

**Natürliche Analoga
im Wirtsgestein Salz**

Teil 1
**Generelle Studie
(2011)**

Teil 2
**Detailstudien
(2012 – 2013)**

Natürliche Analoga im Wirtsgestein Salz

Teil 1
**Generelle Studie
(2011)**

Teil 2
**Detailstudien
(2012 – 2013)**

Thomas Brasser
Christine Fahrenholz
Herbert Kull
Artur Meleshyn
Heike Mönig
Ulrich Noseck
Dagmar Schönwiese
Jens Wolf

Dezember 2014

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende F&E-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter dem Kennzeichen FKZ 02E10719 durchgeführt.

Die Arbeiten wurden von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH ausgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt alleine bei den Autoren.

Deskriptoren:

Barriere, Endlager, Geochemie, Geologie, Geomechanik, Integrität, mikrobielle Prozesse, Sicherheitsnachweis

Vorwort

Der vorliegende Bericht stellt die Ergebnisse der Studien zu Natürlichen Analoga im Wirtsgestein Salz zusammen, die im Rahmen des Projektes ISIBEL-II (FKZ: 02E10719) durchgeführt wurden. Diese Arbeiten wurden in zwei Schritten durchgeführt: Im Jahr 2011 erfolgte zunächst eine Zusammenstellung vorhandener Studien und Untersuchungen, die als Natürliche Analoga in einem Sicherheitsnachweis für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle Verwendung finden können. Die Bewertung zielte darauf ab, diejenigen Natürlichen Analoga zu identifizieren, die für das in ISIBEL-I (FKZ: 02E10055) entwickelte Sicherheits- und Nachweiskonzept eine Rolle spielen. Erfüllen Natürliche Analoga diese Voraussetzung nicht, ist ihre Verwendung im Sicherheitsnachweis ohne Bedeutung und kann von den eigentlich zu machenden Aussagen ablenken. Bei dieser Vorgehensweise wurden auch einzelne, bisher hinsichtlich Natürlicher Analoga nicht betrachtete Aspekte identifiziert, für die deren Einsatz jedoch sinnvoll wäre; dies betrifft z. B. die Zerklockung von Anhydrit. Diese Arbeiten wurden 2011 mit einer Bewertung der zusammengestellten Studien hinsichtlich ihrer Verwendungsmöglichkeit als Natürliche Analoga in einem Sicherheitsnachweis abgeschlossen. Die Resultate dieser Arbeiten sind in Teil 1 des vorliegenden Berichtes zusammengefasst und wurden darüber hinaus 2012 auf dem vom Projektträger Karlsruhe (PTKA-WTE) und der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) veranstalteten internationalen Workshop "Natural Analogues for Safety Cases of Repositories in Rock Salt" präsentiert und diskutiert. Die Diskussionen im Rahmen dieses Workshops haben u. a. dazu geführt, eine Intensivierung von Arbeiten zu Natürlichen Analoga bei einigen sicherheitsrelevanten Fragestellungen für sinnvoll zu erachten. 2012 waren auch Ergebnisse aus der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) zugänglich, die einen Einfluss auf die Bewertung der 2011 durchgeführten Studie haben. Zu nennen sind hier z. B. neue Ergebnisse hinsichtlich einer Zerklockung von Anhydrit, der Bildung von kaltzeitlichen Rinnen, aber auch einer abweichenden Bewertung der Bedeutung von Erdbeben oder kryogener Klüfte in der VSG gegenüber der Bewertung im ISIBEL-Projekt. Auch die Anforderungen an das Barrierensystem sind in der VSG auf Grund der seit 2010 geltenden „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“ etwas modifiziert. Beispielsweise müssen Behälter eine Funktionsdauer von 500 Jahren aufweisen, wodurch der Metallkorrosion wieder eine höhere Bedeutung zukommt. Auf dieser Grundlage wurden in den Jahren 2012 und 2013 neun Detailstudien zu sicherheitsrelevanten Themen durchgeführt, deren Ergebnisse im Teil 2 des vorliegenden Berichtes dokumentiert sind. Diese Dokumentation ist so konzipiert, dass alle Einzelstudien für sich abgeschlossen dargestellt und für den

Leser nutzbar sind. Aus diesem Grunde können sich auch einzelne Abbildungen und Literaturzitate wiederholen, die entweder bereits im Teil 1 oder einer anderen Detailstudie im Teil 2 aufgeführt worden sind.

Inhaltsverzeichnis

Teil 1	Generelle Studie (2011)	1
1	Einleitung zur generellen Studie	1
2	Natürliche Analoga im Langzeitsicherheitsnachweis	3
3	Natürliche Analoga im Sicherheits- und Nachweiskonzept für ein HAW-Endlager im Salzgestein	7
4	Natürliche Analoga für den Integritätsnachweis der geologischen Barriere.....	11
4.1	Grundlegende Argumente für die geologische Endlagerung	11
4.1.1	Beständigkeit von Salzgesteinen	12
4.1.2	Wahrscheinlichkeit neotektonischer Ereignisse	16
4.2	Erhalt der Integrität der geologischen Barriere	17
4.2.1	Auswirkungen von Subrosion und Diapirismus	17
4.2.2	Wegsamkeiten in der geologischen Barriere.....	24
4.2.3	Mechanische Belastbarkeit von Salzgesteinen	33
4.2.4	Thermische Belastbarkeit von Salzgesteinen.....	35
5	Natürliche Analoga für den Integritätsnachweis der geotechnischen Barrieren	39
5.1	Hydraulischer Widerstand der einschlusswirksamen Barrieren	40
5.2	Langzeitverhalten von Verschlussmaterialien im salinaren Milieu	42
5.2.1	Langzeitstabilität von Bentonit	43
5.2.2	Langzeitstabilität von zementhaltigen Materialien	46
5.2.3	Verhalten von organischen Materialien	49
5.3	Kompaktionsverhalten des Salzgrusversatzes.....	50
6	Natürliche Analoga für die Bewertung von Freisetzungsszenarien...	53
6.1	Radionuklid-Rückhaltung im Nahfeld	53
6.1.1	Stabilität der Glasmatrix.....	54

6.1.2	Stabilität der Uranmatrix	57
6.1.3	Rückhaltung von Radionukliden.....	58
6.2	Radionuklid-Rückhaltung im Deckgebirge.....	61
7	Zusammenfassung und Bewertung	65
Literatur zu Teil 1		73
Teil 2	Detail-Studien (2012 - 2013)	93
8	Einleitung zu den Detail-Studien	93
9	Zerblockung von Anhydritschichten in Salzformationen	97
9.1	Bedeutung für den Sicherheitsnachweis	98
9.2	Erkenntnisse aus Labor-Experimenten und Modellrechnungen	99
9.3	Natürliche Analoga	104
9.3.1	Gorleben.....	105
9.3.2	Morsleben.....	107
9.4	Bewertung	108
9.4.1	Grenzen der Anwendbarkeit/Zeitskala/Ungewissheiten	108
9.4.2	Verwendungsmöglichkeit im Sicherheitsnachweis	109
9.4.3	Bewertung der Möglichkeit der Kommunikation	109
9.5	Offene Fragen	109
9.6	Literatur zu Kapitel 9.....	110
10	Salzgruskompaktion.....	113
10.1	Bedeutung für den Sicherheitsnachweis	113
10.2	Erkenntnisse aus Labor- und In-situ-Experimenten und Modellrechnungen	114
10.3	Natürliche Analoga	120
10.3.1	Anforderungen an den zu untersuchenden Versatz und einen Analoga- Standort.....	120
10.3.2	Potentielle Analoga-Standorte für Untersuchungen zur Salzgruskompaktion	121

10.4	Bewertung	121
10.4.1	Grenzen der Anwendbarkeit/Zeitskala/Ungewissheiten	122
10.4.2	Verwendungsmöglichkeit im Sicherheitsnachweis	123
10.4.3	Bewertung der Möglichkeit der Kommunikation	123
10.5	Offene Fragen	123
10.6	Literatur zu Kapitel 10.....	124
10.7	Anhang: Potentielle Analoga-Standorte	130
11	Chemische Zusammensetzung von Fluideinschlüssen	135
11.1	Bedeutung für den Sicherheitsnachweis	135
11.2	Erkenntnisse aus Labor- und In-situ-Experimenten.....	135
11.3	Natürliche Analoga	135
11.4	Bewertung	141
11.4.1	Grenzen der Anwendbarkeit/Zeitskala/Ungewissheiten	141
11.4.2	Verwendungsmöglichkeit im Sicherheitsnachweis	141
11.4.3	Bewertung der Möglichkeit der Kommunikation	142
11.5	Offene Fragen	142
11.6	Literatur zu Kapitel 11	142
12	Thermische Stabilität von Salzgestein.....	147
12.1	Bedeutung für den Sicherheitsnachweis	147
12.2	Erkenntnisse aus Labor- und in-situ Experimenten und Modellrechnungen	147
12.3	Natürliche Analoga	149
12.4	Bewertung	151
12.4.1	Grenzen der Anwendbarkeit/Zeitskala Ungewissheiten	152
12.4.2	Verwendungsmöglichkeit im Sicherheitsnachweis	152
12.4.3	Bewertung der Möglichkeit der Kommunikation	153
12.5	Offene Fragen	153
12.6	Literatur zu Kapitel 12.....	153
13	Mechanische Stabilität von Salzgestein.....	155
13.1	Bedeutung für den Sicherheitsnachweis	155

13.2	Erkenntnisse aus Labor- und in-situ Experimenten und Modellrechnungen	155
13.3	Natürliche Analoga	158
13.3.1	Technische Analoga	158
13.3.2	Analoga aus dem Bergbau	160
13.3.3	Geologische Analoga.....	165
13.4	Bewertung	166
13.4.1	Grenzen der Anwendbarkeit/Zeitskala/Ungewissheiten	167
13.4.2	Verwendungsmöglichkeit im Sicherheitsnachweis	167
13.4.3	Bewertung der Möglichkeit der Kommunikation	168
13.5	Offene Fragen	168
13.6	Literatur zu Kapitel 13.....	168
14	Mögliche Auswirkungen von Erdbeben auf die Integrität von Salzgestein bzw. ein Endlager	171
14.1	Bedeutung für den Sicherheitsnachweis	171
14.2	Erkenntnisse aus Labor- und In-situ-Experimenten.....	173
14.3	Natürliche Analoga	174
14.3.1	Untertage-Bauwerke.....	174
14.3.2	Gebirgsschläge und Peaceful Nuclear Explosions (PNE)	177
14.4	Bewertung	181
14.4.1	Grenzen der Anwendbarkeit/Zeitskala/Ungewissheiten	181
14.4.2	Verwendungsmöglichkeit im Sicherheitsnachweis	181
14.4.3	Bewertung der Möglichkeit der Kommunikation	182
14.5	Offene Fragen	182
14.6	Literatur zu Kapitel 14.....	182
15	Qualifizierte Verschlüsse	187
15.1	Bedeutung für den Sicherheitsnachweis	187
15.1.1	Einsatz von qualifizierten Verschlüssen nach Bergrecht	188
15.1.2	Forschungs- und Entwicklungsarbeiten mit Bezug zum Sicherheitsnachweis	189
15.2	Natürliche Analoga und In-situ-Experimenten	191

15.2.1	Streckenverschlüsse.....	193
15.2.2	Schachtverschlüsse.....	198
15.3	Bewertung	200
15.3.1	Grenzen der Anwendbarkeit/0Zeitskala/Ungewissheiten	201
15.3.2	Verwendungsmöglichkeit im Sicherheitsnachweis	201
15.3.3	Bewertung der Möglichkeit der Kommunikation	202
15.4	Offene Fragen	202
15.5	Literatur zu Kapitel 15.....	203
16	Eisenkorrosion.....	213
16.1	Bedeutung für den Sicherheitsnachweis	213
16.2	Erkenntnisse aus Labor- und In-situ-Experimenten und Modellrechnungen	213
16.3	Natürliche Analoga	214
16.4	Bewertung	216
16.4.1	Grenzen der Anwendbarkeit/Zeitskala/Ungewissheiten	216
16.4.2	Verwendungsmöglichkeit im Sicherheitsnachweis	217
16.4.3	Bewertung der Möglichkeit der Kommunikation	217
16.5	Offene Fragen	217
16.6	Literatur zu Kapitel 16.....	217
17	Mikrobielle Prozesse	219
17.1	Bedeutung für den Sicherheitsnachweis	219
17.2	Erkenntnisse aus Labor- und In-situ-Experimenten und Modellrechnungen	219
17.3	Natürliche Analoga	220
17.3.1	Überlebensfähigkeit von Mikroben im Steinsalz über endlagerrelevante Zeiträume	220
17.3.2	Energiequellen für das Überleben von Mikroben im Steinsalz.....	222
17.3.3	Temperaturlimit für die Überlebensfähigkeit von Mikroben im Steinsalz.	225
17.3.4	Einfluss der Laugenzusammensetzung auf die Überlebensfähigkeit von Mikroben in Salzlaugen.....	225
17.3.5	Populationsgrößen von Mikroben im Steinsalz	226

17.3.6	Metabolische Aktivität von Mikroben im Salinar	227
17.3.7	Mikrobielle Effekte im Deck- und Nebengebirge	228
17.4	Bewertung	228
17.4.1	Grenzen der Anwendbarkeit/Zeitskala/Ungewissheiten	229
17.4.2	Verwendungsmöglichkeit im Sicherheitsnachweis	229
17.4.3	Bewertung der Möglichkeit der Kommunikation	230
17.5	Offene Fragen	230
17.6	Literatur zu Kapitel 17	230
	Abbildungsverzeichnis.....	237
	Tabellenverzeichnis.....	243

Teil 1 Generelle Studie (2011)

1 Einleitung zur generellen Studie

Das wesentliche Sicherheitskonzept bei der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver und langlebiger Abfälle besteht darin, die Abfälle dauerhaft von der Biosphäre zu isolieren. Auf diese Weise soll der Schutz von Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle gewährleistet und unzumutbare Lasten und Verpflichtungen, die von den Abfällen ausgehen können, für zukünftige Generationen vermieden werden /BMU 10/. In Deutschland ist die Entsorgung radioaktiver Abfälle durch deren Endlagerung in tiefen geologischen Formationen vorgeschrieben (analog hierzu werden bereits chemisch-toxische Abfälle vorzugsweise in Untertagedeponien im Salzgestein entsorgt). Der langfristige Einschluss der Abfälle und der in ihnen enthaltenen Schadstoffe muss auch für die Zeit nach Verschluss des Endlagers mit Hilfe eines Langzeitsicherheitsnachweises dargelegt werden. Zu diesem Zweck muss u. a. gezeigt werden, wie sich das Endlager in der Zukunft entwickeln könnte und welche Auswirkungen dies auf die abgelagerten Abfälle und deren Isolation von der Biosphäre hätte.

Aufgrund der Langlebigkeit vieler Radionuklide in radioaktiven Abfällen sind Langzeitsicherheitsnachweise für Endlager über sehr lange Zeiträume zu führen. In den Sicherheitsanforderungen des BMU an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland /BMU 10/ ist ein Nachweiszeitraum von 1 Million Jahre vorgegeben. Über derartig lange Zeiträume bestehen Ungewissheiten hinsichtlich der Beschreibung der zukünftigen Entwicklung von Endlagersystemen, da Prozesse, die über so lange Zeiträume ablaufen, sich in der Regel nur eingeschränkt in Laborexperimenten nachbilden und in Modellrechnungen prognostizieren lassen. Eine wesentliche Möglichkeit, diese Ungewissheiten zu reduzieren, ist die Beobachtung derartiger Prozesse in der Natur. Wenn in solchen natürlichen Systemen abgelaufene (oder ablaufende) Prozesse denen in einem Endlagersystem zu erwartenden ähnlich sind, spricht man von so genannten Natürlichen Analoga /BRA 08/.

Die Untersuchung geeigneter analoger Systeme kann entscheidend dazu beitragen, das Verständnis von Prozessen, die über lange Zeiträume in komplexen Systemen ablaufen, zu erhöhen. Damit werden Ungewissheiten abgebaut und das Vertrauen in die Sicherheitsaussage, die auf Grund eines Langzeitsicherheitsnachweises getroffen wird, erhöht. Natürliche Analoga spielen auch für die Kommunikation der Ergebnisse

mit der Öffentlichkeit eine sehr wichtige Rolle, da Vergleiche der in einem Endlagersystem ablaufenden Prozesse mit natürlichen Systemen oft anschaulicher sind als die Ergebnisse von zum Teil sehr komplexen Computersimulationen /MCK 01/. Studien, die im Rahmen des Vorhabens PAMINA durchgeführt wurden, belegen die höhere Akzeptanz der Aussagen von Natürlichen Analoga im Vergleich zu Ergebnissen aus komplexen Modellrechnungen /HOO 08/.

Aus diesen Gründen sollte ein Langzeitsicherheitsnachweis den internationalen Empfehlungen gemäß neben den eigentlichen Sicherheitsbewertungen¹ auch weitere ergänzende Argumente zur Begründung der Sicherheitsaussage, wie z. B. Natürliche Analoga oder geologische Befunde beinhalten /IAE 06/, /NEA 04/.

In Kapitel 2 wird zunächst die allgemeine Rolle Natürlicher Analoga in einem Langzeitsicherheitsnachweis aufgezeigt. In Kapitel 3 wird dann die Bedeutung Natürlicher Analoga für das Sicherheits- und Nachweiskonzept für ein HAW-Endlager im Salzgestein erläutert. In den Kapiteln 4 bis 6 werden die bereits bekannten relevanten Analoga zu den Komponenten dieses Konzeptes in Beziehung gesetzt. Gegebenenfalls werden wichtige Fragestellungen im Sicherheits- und Nachweiskonzept ausgewiesen, für die Natürliche Analoga in der Beweisführung von Bedeutung wären, aber zurzeit noch nicht formuliert worden sind.

Ziel dieses Berichtes ist es, die Bedeutung der Natürlichen Analoga im Hinblick auf das Sicherheits- und Nachweiskonzeptes aus dem Vorhaben ISIBEL /BUH 08/ darzulegen (Kapitel 7) und den weiteren FuE-Bedarf zu identifizieren, der für eine möglichst stichhaltige Argumentation von Natürlichen Analoga in einem Langzeitsicherheitsnachweis für ein HAW-Endlager notwendig ist.

¹ Die Sicherheitsbewertungen setzen sich zusammen aus der Langzeitsicherheitsanalyse, weiteren Sicherheitsbewertungen, wie z. B. dem Nachweis darüber, dass keine Kritikalität im Endlager auftreten kann, und Aussagen zur Robustheit und Zuverlässigkeit der Sicherheitsbewertungen. Die Langzeitsicherheitsanalyse kann dabei als standortspezifische Analyse der Funktion des Endlagersystems im Hinblick auf die radiologischen Konsequenzen definiert werden.

2 Natürliche Analoga im Langzeitsicherheitsnachweis

Entsprechend der zunehmenden Bedeutung von Natürlichen Analoga wurde 1993 vom damaligen Projektträger des BMBF für Entsorgung (heute: Projektträger Karlsruhe, Wassertechnologie und Entsorgung PTKA-WTE) ein deutscher Expertenkreis „Natürliche Analoga“ ins Leben gerufen, der auf einem Workshop in Karlsruhe die Bedeutung Natürlicher Analoga für die Bewertung der Langzeitsicherheit eines Endlagers im Salzgestein diskutiert hat /KFK 94/. Auch wenn insbesondere auf internationaler Ebene bereits zahlreiche Einzelstudien zu Natürlichen Analoga für verschiedene Endlagersysteme durchgeführt worden waren, z. B. /BRO 90/, /CRA 94/, /DUE 92/, /MIL 94/, ist dieser Workshop als Startpunkt der Diskussion hinsichtlich der Verwendung von Natürlichen Analoga im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises für ein Endlager im Salzgestein in Deutschland zu sehen.

Der o. g. Expertenkreis hat „Natürliche Analoga“ wie folgt definiert: *„Natürliche Analoga sind Systeme in der Natur, in denen physikalische und chemische Prozesse ablaufen, wie sie ähnlich in Endlagersystemen (Nahfeld, Fernfeld, Biosphäre) in geologischen oder historischen Zeiträumen zu erwarten sind“*. Diese Definition wurde im Europäischen Projekt „Network to review natural analogue studies and their applications to repository safety assessment and public communication – NANet“ /MIL 06/ in einen breiteren Kontext gestellt: *„Analogastudien sind Untersuchungen von natürlichen, anthropogenen, archäologischen oder industriellen Systemen, die einen gewissen Grad an Ähnlichkeit mit einem Endlager für radioaktive Abfälle oder seiner Umgebung haben“*.

Nach dieser Definition werden vermehrt auch Systeme herangezogen, die nicht natürlichen Ursprungs sind und erst wenige Jahrzehnte bis wenige Jahrtausende alt sind. Aus diesem Grunde wird gelegentlich nur der Begriff „Analoga“ als Oberbegriff verwendet /BRA 08/.

Im vorliegenden Bericht werden sowohl natürliche als auch technische Analoga unter dem weitverbreiteten und in Fachkreisen etablierten Begriff „Natürliche Analoga“ subsumiert. Es wird hier der weiter gefassten Definition nach /MIL 06/ gefolgt, nicht nur, weil sie die technischen Analoga einschließt, sondern vor allem, weil sie sich nicht allein auf zukünftige Entwicklungen des Endlagersystems bezieht. Die Beschreibung des aktuellen Zustandes des Endlagersystems (z. B. Zerblockung des Anhydrits) und die Stützung deren Plausibilität durch Natürliche Analoga spielt ebenso eine bedeutende Rolle und sollte durch die Definition nicht ausgeschlossen werden.

Die wesentliche Rolle Natürlicher Analoga (im o. G. Sinne) im Rahmen eines Langzeitsicherheitsnachweises besteht darin, qualitative Informationen zur Entwicklung des Endlagersystems und damit auch eine Absicherung von Modellen und der ihnen zugrunde liegenden Annahmen zu liefern, indem sie dazu beitragen, relevante Merkmale und Prozesse in natürlichen Systemen zu identifizieren. Für Prozesse können sie zudem zeigen, wie und auf welcher zeitlichen und räumlichen Skala diese Prozesse ablaufen und ob bzw. wie sie miteinander gekoppelt sind.

Die Verwendung von Natürlichen Analoga steht im Einklang mit der generellen Entwicklung zur Führung eines Langzeitsicherheitsnachweises für Endlager für hochradioaktive Abfälle. In den letzten Jahren geht die Tendenz dahin, einen sog. „Safety Case“ zu erstellen, in dem neben quantitativen numerischen Modellrechnungen zusätzliche Argumente und Informationen aufgenommen werden, welche die Ergebnisse der quantitativen numerischen Modellrechnungen unterstützen und die Argumentation vervollständigen /NEA 04/, /ROE 10/. In diesem Zusammenhang spielen Natürliche Analoga eine wichtige Rolle, weil sie zusätzlich zu den im Langzeitsicherheitsnachweis angewendeten Methoden und Argumentationen auch solche Erfahrungen und Argumente mit einbeziehen, die Rückschlüsse auf den Stand und die Reife des wissenschaftlichen Verständnisses für komplexe natürliche Systeme erkennen lassen. Dadurch spielen sie auch eine bedeutende Rolle bei der Behandlung und Würdigung von Ungewissheiten. Darüber hinaus sind Natürliche Analoga auch für die Kommunikation von wissenschaftlichen Ergebnissen mit der Öffentlichkeit von Bedeutung.

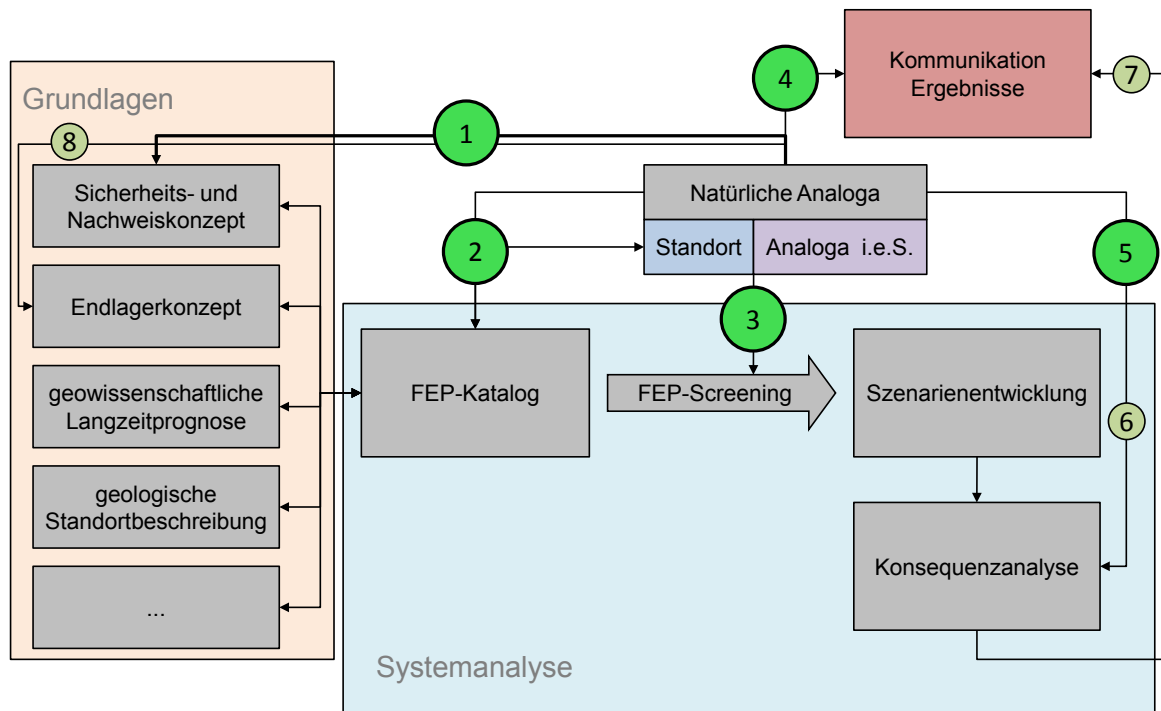


Abb. 2.1 Die Rolle Natürlicher Analoga im Langzeitsicherheitsnachweis; Erläuterungen siehe Text

Wie in Abb. 2.1 illustriert, lassen sich Natürliche Analoga im Rahmen eines Langzeitsicherheitsnachweises an folgenden Stellen sinnvoll einsetzen (die Ziffern in Klammern beziehen sich dabei auf die zitierte Abbildung):

- Untermauerung des Konzepts der tiefen geologischen Endlagerung, z. B. anhand von Beobachtungen in Uranerz-Lagerstätten (1)
- Identifizierung und Beschreibung von Merkmalen, Ereignissen und Prozessen (FEP) an einem Endlagerstandort, z. B. Bestimmung der Subrosionsrate aus der Analyse des Hutgesteins (2)
- Beurteilung der Relevanz dieser FEP in der Szenarientwicklung², z. B. Ausschluss von Kritikalität (3)

² So verweisen die Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ bei der Definition weniger wahrscheinlicher Szenarien indirekt auf die Verwendung Natürlicher Analoga: *Weniger wahrscheinliche Entwicklungen sind solche, die für diesen Standort unter ungünstigen geologischen oder klimatischen Annahmen eintreten können und die bei vergleichbaren Standorten oder vergleichbaren geologischen Situationen selten aufgetreten sind.*

- Erläuterung des Sicherheitskonzeptes und der relevanten FEP für die Öffentlichkeit, Begründung der Beurteilung hinsichtlich ihrer Bedeutung für das Endlagersystem, z. B. Illustration und Bewertung von Korrosionsprozessen (4)
- Beiträge zur Modellentwicklung: Prüfung, welche Prozesse explizit in numerischen Modellen berücksichtigt werden sollten, d. h. welche Prozesse in analogen Systemen auftreten, welche dieser Prozesse dominieren, welche von untergeordneter Bedeutung sind und auf welcher räumlichen und zeitlichen Skala sie stattfinden (5)

Diese Punkte sind aus Sicht der Autoren die entscheidenden Themengebiete in einem Langzeitsicherheitsnachweis, bei denen Natürliche Analoga wirksam eingesetzt werden können. Daneben gibt es noch weitere Aspekte, die durch Natürliche Analoga gestützt werden können:

- Qualifizierung von Modellen und Daten, d. h. Überprüfung, ob die im Langzeitsicherheitsnachweis verwendeten Modelle und deren zugrundeliegende Daten die beobachteten Vorgänge in der Natur beschreiben können. Hier sind insbesondere so genannte „Blind Predictive Modeling“ (BPM) - Studien zu nennen, bei denen die Zeitskala nicht von Bedeutung ist, und die zur Überprüfung von geochemischen Speziationscodes und der zugehörigen Datenbanken durchgeführt werden, siehe z. B. /BRU 02/ (6)
- Darstellung und Untermauerung von FEP, die positiv auf die Langzeitsicherheit einwirken, aber nicht in der Konsequenzenanalyse berücksichtigt werden (können). Diese Reserve-FEP sollten als zusätzliche qualitative Argumente im Sicherheitsnachweis angeführt werden, z. B. Rückhaltung von Radionukliden an Korrosionsprodukten (7)
- Weiterentwicklung von speziellen Optionen, wie die Verwendung neuer Materialien, z. B. Synrock als potenzielles Material für die Abfallmatrix, anhand von Beobachtungen der Langzeitstabilität dieser Minerale in der Natur /PET 92b/ (8)

Natürliche Analoga können auch dafür eingesetzt werden, Randbedingungen und Modellparameter für die im Langzeitsicherheitsnachweis eingesetzten Modelle abzuleiten. Die direkte Verwendung von Informationen aus Studien Natürlicher Analoga in numerischen Modellen für den Langzeitsicherheitsnachweis war in der Vergangenheit aber meist nicht sehr erfolgreich /SME 97/. Ein wichtiger Grund dafür ist die Schwierigkeit, aus komplexen natürlichen Systemen, in denen die Randbedingungen nicht kontrolliert und oft nur ungenau bekannt sind, sichere und fundierte Daten abzuleiten.

3 Natürliche Analoga im Sicherheits- und Nachweiskonzept für ein HAW-Endlager im Salzgestein

Ziel von Teil 1 des vorliegenden Berichtes ist es, die Rolle von Natürlichen Analoga im Hinblick auf ihre Verwendung im Rahmen des im Vorhaben ISIBEL erarbeiteten Sicherheits- und Nachweiskonzeptes zu betrachten und zu überprüfen,

- an welchen Stellen des Langzeitsicherheitsnachweises für ein HAW-Endlager im Salzgestein bereits bekannte Natürliche Analoga Beiträge zur Bewertung dessen Sicherheit liefern können und
- an welchen Stellen Natürliche Analoga als Argumente sinnvoll zu verwenden wären, aber zurzeit noch nicht identifiziert bzw. ausreichend dokumentiert sind (siehe hierzu auch Teil 2).

Im Mittelpunkt des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes steht der Nachweis des langfristig sicheren Einschusses der endgelagerten Abfälle durch den Nachweis der Integrität der geologischen und der geotechnischen Barrieren (Abb. 3.1).

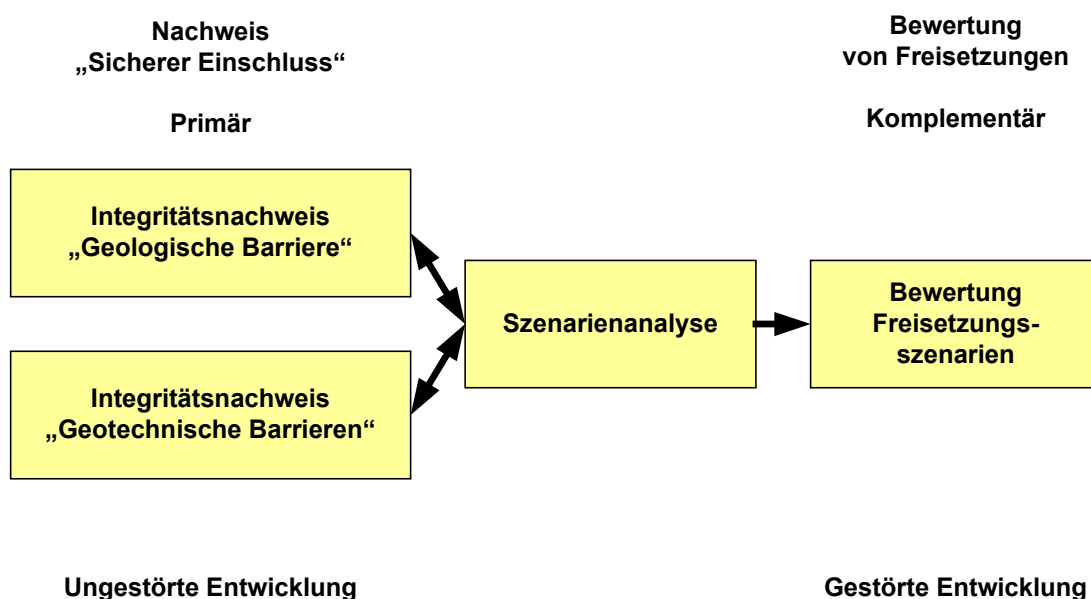


Abb. 3.1 Wichtige Elemente des radiologischen Langzeitsicherheitsnachweises /BUH 08/

Mit dem Begriff der Integrität wird hier der Erhalt der einschlusswirksamen Eigenschaften eines Gebirgsbereichs oder einer geotechnischen Barriere bezeichnet. Der Gebirgsbereich, der im Zusammenwirken mit den Schacht- und Streckenverschlüssen

den Einschluss der Abfälle sicherstellt, wird als einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG) bezeichnet /BMU 10/. Im Vorhaben ISIBEL werden das Wirtsgestein, die Schacht- und Streckenverschlüsse als zentrale Barrieren für den Einschluss im ewG betrachtet.

Die geologische Barriere gewährleistet primär den sicheren Einschluss der Abfälle. Sie wird durch die Salzformationen des Salzstockes, insbesondere durch die undurchlässigen und trockenen Schichten aus Steinsalz gebildet. Das gesamte Hohlraumvolumen sämtlicher Grubenbaue des Endlagerbergwerkes wird mit Salzgrus verfüllt, der auf Grund des Gebirgsdruckes und der rheologischen Eigenschaften des Steinsalzes mit der Zeit kompaktiert wird. Dabei nimmt seine Porosität und Permeabilität ab, bis er ähnliche Barriereigenschaften wie unverritztes Steinsalz aufweist. Dadurch wird die bei der Errichtung des Endlagers unvermeidbare Perforation der geologischen Barriere (z. B. Zugang, Schacht) geheilt und ein Zutritt von Lösungen zu den Abfällen bzw. ein Austreten von schadstoffbelasteten Lösungen entlang der Strecken und Schächte verhindert oder zumindest stark behindert. Solange der Salzgrus diesen Zustand noch nicht erreicht hat, müssen die geotechnischen Verschlussbauwerke in den Strecken und Schächten die Dichtfunktion wahrnehmen.

Die vorhandenen Ungewissheiten hinsichtlich der Entwicklung des Endlagersystems erfordern eine Bewertung von denjenigen Entwicklungen des Endlagersystems, für die eine Beeinträchtigung der Integrität des Barrierensystems und damit eine Ausbildung eines durchgängigen Transportpfades nicht ausgeschlossen werden kann (Freisetzungsszenarien). Ob diese Entwicklungen wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, oder auszuschließen sind, ist Ergebnis der Szenarienanalyse.

In der Szenarienanalyse werden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Zusammenstellung einer Universalliste von Eigenschaften, Prozessen und Ereignissen (FEP), die an einem Endlagerstandort vorkommen bzw. vorkommen können
- Identifizierung relevanter FEP zur Beschreibung möglicher Entwicklungen des Endlagersystems
- Ableitung von Szenarien aus den relevanten FEP

- Zuweisung von Eintrittswahrscheinlichkeiten bzw. Zuordnung der Szenarien in verschiedene Klassen (z. B. „wahrscheinlich“, „weniger wahrscheinlich“ oder „nicht zu betrachten“)

Die Szenarienanalyse ist somit nicht nur die entscheidende Voraussetzung für die Bewertung von Freisetzungsszenarien. Sie beeinflusst auch die Integritätsnachweise für die geologischen und geotechnischen Barrieren (vgl. Abb. 3.1).

Natürliche Analoga, die im Endlagersystem ablaufende Prozesse beschreiben helfen, werden in diesem Bericht den folgenden Komponenten des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes zugeordnet:

- Integritätsnachweis der geologischen Barriere
- Integritätsnachweis der geotechnischen Barrieren
- Bewertung nicht auszuschließender Freisetzungsszenarien

Durch die Verknüpfung der Szenarienanalyse mit diesen drei Komponenten haben alle Natürlichen Analoga, die diesen Komponenten zugeordnet sind, auch eine Bedeutung für die Szenarienanalyse. Die Szenarienanalyse wird in vorliegendem Bericht aber nicht als eigene Komponente aufgeführt. Sie bedient sich der Argumente der bei den anderen Komponenten beschriebenen Natürlichen Analoga bzw. der daraus gewonnenen Informationen, die im FEP-Katalog dokumentiert sind.

Die Beschreibung der Prozesse, die durch Natürliche Analoga gestützt werden können, basiert auf

- Erfahrungen aus den Langzeitsicherheitsnachweisen zum Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) und zur Schachanlage Asse II,
- Erfahrungen aus FuE-Vorhaben,
- Erfahrungen aus dem Salzbergbau, vor allem in Norddeutschland, und
- Umfangreichen, am Salzstock Gorleben gewonnenen Erkundungsergebnissen.

Bei der Auswertung von Natürlichen Analoga lässt sich zwischen Beobachtungen, die von anderen Untersuchungsobjekten auf einen Standort übertragen werden, und Untersuchungsergebnissen vom Standort selbst unterscheiden. Die letzteren gehören zur Standortcharakterisierung. Sie werden aber, wenn aus ihnen konkrete Aussagen zu

möglichen zukünftigen Prozessen im Endlagersystem abgeleitet werden, häufig auch als Analoga, so genannte „Selbstanaloga“, bezeichnet. Im Idealfall liegen beide Arten von Natürlichen Analoga für das untersuchte Phänomen vor. Internationale Beispiele solcher Selbstanaloga sind Ergebnisse aus Untersuchungen am Boom Clay (der potentiellen Endlagerformation in Belgien), die zeigen, dass Uran dort über geologische Zeiträume immobil war /DEC 04/, und Untersuchungen zur Mineralverwitterung in den Tuff-Formationen von Yucca Mountain (USA), aus denen Aussagen zu zukünftigen Verwitterungsprozessen an diesem Standort abgeleitet wurden /BIS 93/.

Bei der Beschreibung der Natürlichen Analoga für einen Standort im Steinsalz (Kapitel 4 bis 6) werden als Selbstanaloga zunächst jeweils die vorliegenden Ergebnisse für den Salzstock Gorleben herangezogen, da für diesen Standort die detailliertesten Kenntnisse vorliegen. Für Prozesse, die sich auf der regionalen Skala abspielen (Kapitel 4.1), ist die norddeutsche Tiefebene als Selbstanaloga anzusehen. Im zweiten Schritt werden dann - wenn möglich - Natürliche Analoga von anderen Standorten beschrieben.

4 Natürliche Analoga für den Integritätsnachweis der geologischen Barriere

Für den Nachweis der Integrität der geologischen Barriere bietet es sich auf Grund der in der Regel über lange Zeiträume relativ langsam ablaufenden geologischen Prozesse in besonderem Maße an, relevante natürliche Prozesse zu untersuchen und als unterstützende Argumente im Nachweis einzusetzen. Dabei kann man zwei Argumentationslinien unterscheiden:

- Grundlegende Argumente für die geologische Endlagerung im Salzgestein, d. h. die grundsätzliche Machbarkeit eines Einschlusses der Abfälle im Wirtsgestein:
 - Beständigkeit der Salzgesteine
 - Keine Beeinträchtigung durch neotektonische Ereignisse
- Erhalt der Integrität der geologischen Barriere, vor allem hinsichtlich:
 - Auswirkungen von Subrosion und Diapirismus
 - Ausschluss von Wegsamkeiten in der geologischen Barriere
 - Mechanische Belastbarkeit der Gesteinsformation
 - Thermische Belastbarkeit der Gesteinsformation

Für diese Argumentationslinien soll in den folgenden Unterkapiteln im Ergebnis dargestellt werden, inwieweit anwendbare Natürliche Analoga vorliegen und ausreichend dokumentiert sind und/oder bestehender FuE-Bedarf ausgewiesen werden.

4.1 Grundlegende Argumente für die geologische Endlagerung

Ein wichtiges Anwendungsgebiet Natürlicher Analoga ist die Argumentation für eine grundsätzliche Eignung tiefer geologischer Formationen für die Endlagerung. Dafür muss gezeigt werden, dass die untersuchte Formation über geologische Zeiträume gesehen stabil ist und auch keine magmatischen oder tektonischen Ereignisse zu erwarten sind, welche das Wirtsgestein und insbesondere den ewG beeinträchtigen können. Ereignisse, deren Auswirkungen weitaus katastrophaler als die Freisetzung von Radionukliden aus eingelagerten Abfällen sind, werden in diesem Zusammenhang nicht betrachtet (z. B. Einschlag eines großen Meteoriten).

4.1.1 Beständigkeit von Salzgesteinen

Ein wichtiges grundlegendes Argument ist die Beständigkeit von Salzgesteinen. Als unterstützende Argumente können Ergebnisse von Naturbeobachtungen bzw. Natürlichen Analoga angeführt werden, die z. B. zeigen, wie viele Salzformationen existieren, wann diese entstanden sind und welche geologischen Veränderungen (z. B. Subrosion, Diapirismus) während ihrer Entwicklung stattgefunden haben.

Norddeutsche Tiefebene. Für die hier diskutierte Option, Steinsalz in steiler Lagerung, als Wirtsgestein für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle zu nutzen, lassen sich allein in Norddeutschland mehr als 200 Salzformationen heranziehen (Abb. 4.1).

Die Entstehung der Salzformationen in der Norddeutschen Tiefebene fällt in die Zeit des Zechstein (Perm) vor ca. 250 Millionen Jahren, als während einer ausgedehnten Warmzeit durch Verdampfung von Meerwasser aus einem tropischen Flachmeer sehr große Mengen von Salzmineralien sedimentierten. Dabei entstanden Salzformationen von z. T. über 1.000 m Mächtigkeit, die im weiteren Verlauf der Erdgeschichte von anderen Schichten überlagert wurden. Unter dem Druck dieser überlagernden Schichten, die eine größere Dichte als das Salz besitzen, wurden die Salzmassen plastisch verformt und begannen, lokal an Störungszonen, zuerst in Form flacher Kissen, danach als Salzstöcke oder auch als ausgedehnte Salzmauern aufzusteigen. Dieser Prozess wird als Halokinese /TRU 57/ bezeichnet. Auf Grund von halokinetischen Prozessen existiert heute im nördlichen Mitteleuropa eine Vielzahl von Salzstrukturen im Bereich zwischen 52° und 57° nördlicher Breite von der Nordsee bis nach Polen.

Die große Zahl heute existierender Salzstöcke aus dem Zechstein ist ein wichtiges Argument dafür, dass sich die wasserlöslichen Salzmassen auch in einem Zeitraum, der ein Vielfaches der im Langzeitsicherheitsnachweis abzudeckenden 1 Million Jahre beträgt, zwar verformen und langsam aufsteigen, sich jedoch offensichtlich in den langen Zeiträumen nicht aufgelöst haben. Dabei ist hervorzuheben, dass im Quartär periodisch Kaltzeiten aufgetreten sind, in denen das Gebiet der Salzstrukturen mit Gletschern überdeckt wurde, was mit entsprechenden glazialtektonischen Hebungen und Senkungen der Erdkruste und hydromechanischen Beanspruchungen der Gesteinsablagerungen einhergegangen ist. In vielen Regionen entstanden zusätzlich tief ins Deckgebirge eingeschnittene Rinnensysteme.

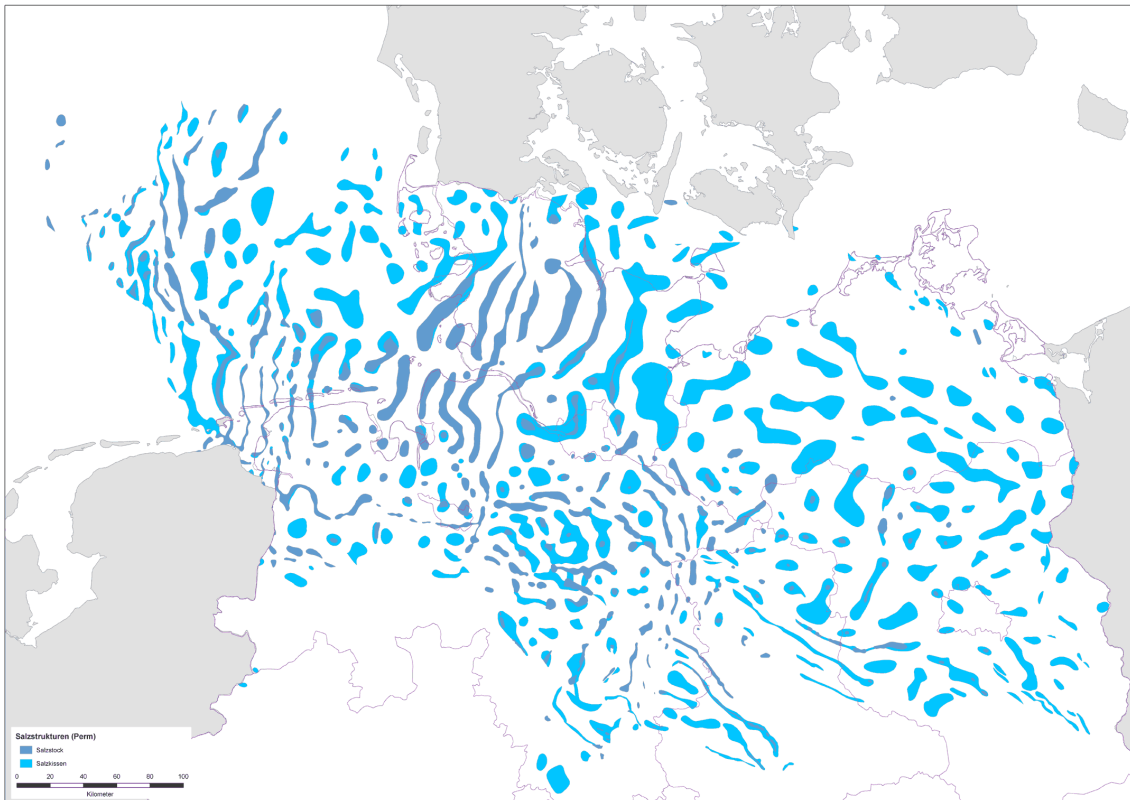


Abb. 4.1 Salzstrukturen in Norddeutschland; Quelle: BGR, http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Bilder/Salzstruk_NDtl_p.html?view=render%5BNeuesFenster%5D (25.11.2014)

/TRU 57/ unterscheidet bei der Halokinese zwei Phasen:

- Kissenstadium: Anschwellen des Salzkörpers ohne Durchbruch des primären sedimentären Daches
- Diapirstadium: Ausbildung einer kuppelförmigen Salzstruktur und Durchbruch des primären sedimentären Daches

Für die Sicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle in einem Salzstock ist es entscheidend, dass dieser Salzstock bereits den Höhepunkt seines Diapirstadiums und damit des Salzaufstieges überschritten hat. Dies ist in der Regel dann der Fall, wenn in den Randsenken (dem Salzeinzugsgebiet) des Salzstockes nicht mehr ausreichend Salz vorhanden ist, um einen weiteren schnellen Aufstieg zu ermöglichen (Nachdiapirstadium). Eine Zusammenstellung der Bewegungen ausgewählter Salzstrukturen im Umfeld der Salzstruktur Gorleben-Rambow finden sich in /KÖT 07/.

Weitere Standorte. Neben den Salzstöcken in der norddeutschen Tiefebene gibt es weltweit weitere Salzformationen, welche die Beständigkeit von Salzformationen bele-

gen. Am besten untersucht sind die Gebiete, in denen die Salzstrukturen auch als Erdölfällen dienen, vor allem in der Nordsee, am Persischen Golf und am Golf von Mexico (Abb. 4.2). Tab. 4.1 stellt Informationen zu einigen gut untersuchten Salzstöcken zusammen.

Tab. 4.1 Beispiele für untersuchte Salzstöcke außerhalb der norddeutschen Tiefebene

Name	Ort	Literatur³
Ara Salz	Oman	/SHO 07/, /SHO 09/
Avery Island	Golfküste, Louisiana, USA	/AUT 02/, /KNA 83/
Damon Mound	Golfküste, Texas, USA	/PRI 88/, /POS 87/
Dasht-e Kavir	Zentral-Iran	/JAC 90/, /TAL 04/
Kłodawa	Polen	/SCH 07/, /BUR 96/
Mors	Dänemark	/ELS 81/
Richton Dome	Mississippi, USA	/WER 88/
Sar Pahl	Straße von Hormus, Iran	/TAL 09/
Tatum Dome	Mississippi, USA	/SAU 88/, /TAY 71/
Vacherie Dome	Nord-Louisiana, USA	/POS 87/, /POS 88/

Die Tatsache, dass es außerhalb der norddeutschen Tiefebene weltweit viele weitere Salzstöcke gibt, die seit Millionen von Jahren existieren, ist ein weiterer Beleg für die Beständigkeit dieser geologischen Formationen. Eine Auswertung, inwieweit sich diese weltweiten Vorkommen auf die norddeutschen Verhältnisse übertragen lassen, steht aber noch aus. Dabei lohnt es sich auch, die Salzstöcke zu untersuchen, die am Meeresboden oder direkt an der Erdoberfläche existieren, da sie zeigen, dass Salzstöcke auch unter abweichenden Gegebenheiten stabil sein können.

³ Die hier angegebenen Literaturzitate beziehen sich auf Veröffentlichungen in allgemein zugänglichen Zeitschriften; teilweise behandeln sie nur einen bestimmten Aspekt der Geologie des betrachteten Salzstockes, beinhalten aber weiterführende Literaturzitate.

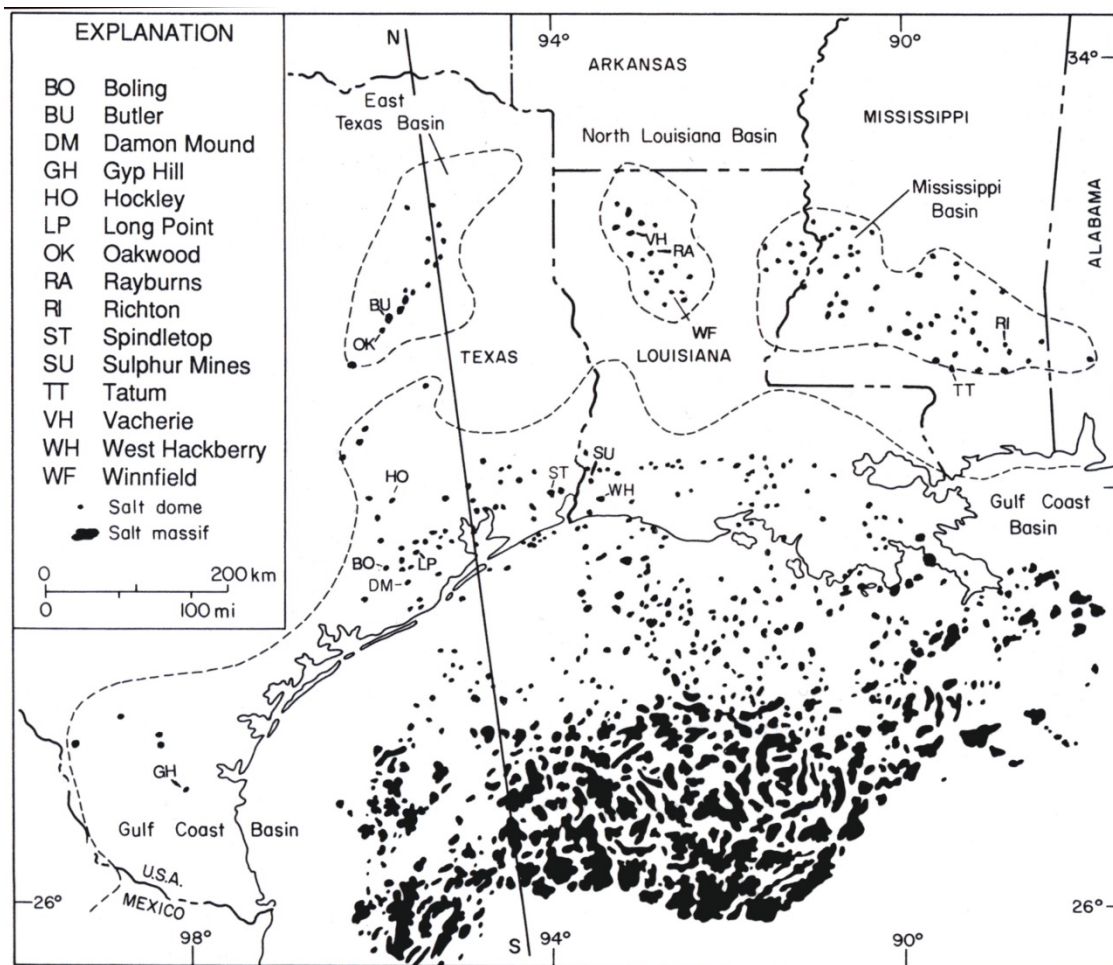


Abb. 4.2 Salzformationen am Golf von Mexiko /MEL 91/

Für ein Endlager im Salzgestein ist es wichtig, dass Argumente dafür angeführt werden, dass Lösungsprozesse, wie z. B. auch die Subrosion, das Einschlusspotenzial des Salzgesteins für die eingelagerten Abfälle nicht beeinträchtigen. Subrosion ist ein unterirdisch ablaufender Prozess, bei dem der Salzstock von oben im Kontakt mit Grundwasser angelöst wird. Dabei werden leichtlösliche Minerale wie Halit und Kalisalz mit dem Wasser abtransportiert, wogegen die schwer löslichen Minerale wie Anhydrit, Gips oder Tone relativ angereichert werden und das Hutgestein eines Salzstocks bilden. Insofern ist das weltweite Auftreten von Hutgesteinen über den Salzstöcken ein Beweis dafür, dass der Prozess der Subrosion ein Merkmal der normalen Entwicklung eines Salzstocks ist.

Trotz der durch Natürliche Analoga nachweisbaren Beständigkeit der Salzformationen ist es bei einem Endlager in einem Salzstock denkbar, dass die Mächtigkeit der geologischen Barriere nach sehr langen Zeiten durch Subrosion in Verbindung mit dem Aufstieg des Salzkörpers so weit reduziert wird, dass Radionuklide aus den eingelagerten

Abfällen in das Grundwasser oberhalb der Salzformation gelangen. Beispielsweise würde eine konstante Subrosionsrate von 0,5 mm/a über den Zeitraum von einer Million Jahre zu einer Reduktion der Barrierenmächtigkeit von 500 m führen. Eine standortspezifische Analyse der Subrosion und des Salzaufstiegs ist deshalb erforderlich, um derartige Prozesse ausschließen zu können und damit eine fundamentale Voraussetzung für die Durchführung eines Langzeitsicherheitsnachweises für ein Endlager in einem Salzstock (Kapitel 4.2.1).

4.1.2 Wahrscheinlichkeit neotektonischer Ereignisse

Neben den Argumenten, welche die Langzeitstabilität der Salzstöcke hervorheben, sollten auch Argumente herangezogen werden, die begründen, wie geologische Ereignisse, die zu einer schwerwiegenden Beeinträchtigung der geologischen Barriere führen würden, am Standort ausgeschlossen werden können. Solche schwerwiegenden Beeinträchtigungen können insbesondere durch magmatische und tektonische Ereignisse verursacht werden.

Norddeutsche Tiefebene. In der norddeutschen Tiefebene existieren entsprechend den regionalen tektonischen Verhältnissen des nördlichen Mitteleuropas keine extremen Spannungen, die zu Beanspruchungen der Kruste führen, wie sie z. B. aus dem alpinen Raum bekannt sind. Die Krustenbewegungen und die Seismizität in Mitteleuropa nehmen mit zunehmender Entfernung vom Alpenrand ab. Die Anzeichen für eine intensive Tektonik sind im Quartär in Norddeutschland nicht gegeben. Sie reichte aber aus, den Rest alpiner Vorlandspannungen weitgehend abzubauen. Grabenbildungen, wie die des Oberrheintals, oder Gebirgsbildungen, wie z. B. die Erhebung der Alpen kamen in Norddeutschland während der letzten 10 Millionen Jahre nicht vor. Eine hochaktive und mobile Kruste lässt sich aus den abgelaufenen Vorgängen für die norddeutsche Tiefebene nicht ableiten. Da das großräumige Spannungsfeld im Bereich des nördlichen Mitteleuropas sich auf Grund der bestehenden plattentektonischen Situation in geologischen Zeiträumen nur langsam ändern wird, dürften sich die zukünftigen tektonisch bedingten Auswirkungen im Rahmen jener Veränderungen abspielen, wie sie für die letzten Millionen Jahre nachzuweisen sind /JAR 94/, /BAL 01/, /KÖT 07/.

Weitere Standorte. Die Beurteilung neotektonischer Ereignisse für einen Standort, z. B. in Norddeutschland, ist ein wichtiger Aspekt der geowissenschaftlichen Standortprognose. Das Heranziehen von Natürlichen Analoga, die über die Betrachtung einer

Standortregion hinausgehen und die Beurteilung der Wahrscheinlichkeit neotektonischer Ereignisse an einem Standort weiter stützen können, erscheint wenig sinnvoll. Tektonische Rahmenbedingungen sind für unterschiedliche Regionen schwer zu vergleichen. Dass sich aus solchen Vergleichen verwertbare Natürliche Analoga ableiten lassen, ist nicht zu erwarten.

4.2 Erhalt der Integrität der geologischen Barriere

Nach den in Kapitel 4.1 vorgestellten Natürlichen Analoga, die grundlegende Argumente für eine geologische Endlagerung an einem Standort in einer Salzstruktur liefern, werden in vorliegendem Kapitel diejenigen Natürlichen Analoga vorgestellt, die als unterstützende Argumente eingesetzt werden können, um den Erhalt der einschlusswirksamen Eigenschaften des Salzgesteins zu untermauern. Die Integrität des Salzgesteins kann sowohl durch externe Einflüsse (z. B. Kaltzeiten) als auch durch das Endlager selbst beeinträchtigt werden (z. B. Temperaturerhöhung durch die eingelagerten Abfälle).

4.2.1 Auswirkungen von Subrosion und Diapirismus

Art und Umfang von Subrosion sind in starkem Maße abhängig von den lokalen Gegebenheiten im Umfeld eines Salzstockes. Weiterer Salzaufstieg könnte zur Folge haben, dass immer neue Bereiche des Salzstockes das Erosions- bzw. Subrosionsniveau erreichen und im Endlager abgelagerte Schadstoffe ins Grundwasser freigesetzt werden. Daher ist die Berücksichtigung von Subrosion und Aufstiegsgeschichte fundamental für die Bewertung der Langzeitsicherheit eines Endlagers in einem Salzstock.

4.2.1.1 Subrosion

Zur Beurteilung der Subrosion ist zunächst die geologische Gesamtsituation (Tektonik des Standortes, halokinetisches Stadium des Salzstockes etc.) heranzuziehen. Die Zusammensetzung der Salzgesteine ist dabei eine wichtige Randbedingung.

Das Ausmaß der Subrosion ist vor allem von den folgenden Faktoren abhängig /SNI 85/:

- Tiefenlage der Salzformation
- Ausbildung und Verteilung der Deckgebirgssedimente
- Temperaturgradient
- Chemismus des Grundwassers über dem Salzstock
- Porosität und Permeabilität der Deckgebirgsschichten
- Druckgradient des Grundwassers

So verstärkte sich die Subrosion z. B. durch die geänderten hydrogeologischen Verhältnisse während der Kaltzeiten beträchtlich. Auf Grund der vielen wichtigen Einflussfaktoren ist es z. T. sehr schwierig, die Subrosionsgeschichte eines Salzstockes zu bewerten und daraus z. B. Subrosionsraten für die zukünftige Entwicklung zu extrapolieren. Umso wichtiger ist es, die Ereignisse an verschiedenen Salzstöcken zu analysieren, um ein möglichst gutes Prozessverständnis zu entwickeln.

Gorleben. Das Subrosionsgeschehen am Standort Gorleben ist in der Vergangenheit durch den Salzstockaufstieg und eine zeitweilig oberflächennahe Position des Salzstocks charakterisiert. Lokal eng begrenzt, wurde der Topbereich des Salzstocks zusätzlich durch eine präelsterzeitlich angelegte quartäre Rinne bzw. durch kaltzeitliche Prozesse beeinflusst, ohne dass dabei eine tief eingeschnittene Subrosionssenke ausgebildet wurde. Für den Zeitraum Miozän bis Quartär wurden Subrosionsraten von 0,01 mm/Jahr bis 0,02 mm/Jahr bestimmt /ZIR 91/.

Wenn von einer subrosiven Absenkung der Hutgesteinsoberfläche um 57 m im Zeitraum vom Cromer- bis Menap-Komplex ausgegangen und für diesen Zeitraum ca. 800.000 Jahre Dauer angesetzt werden, ergeben sich daraus Subrosionsraten von ca. 0,07 mm/Jahr. Zusätzlich dienten die Ausbildung der Hutgesteinsbrekzie, die Bildung des geschichteten Gips- und Anhydritgesteins /BOR 08/ sowie die Lage der Holsteinbasis über dem Salzstock /APP 98/ als Grundlage für die Abschätzung der Subrosionsraten im Quartär. Die auf diesen Daten basierenden durchschnittlichen Ablaugungsraten schwanken zwischen 0,2 mm/Jahr bis 0,3 mm/Jahr. Ähnliche Raten (0,2 bis 0,4 mm/Jahr) werden in /KÖT 07/ für die Saale-Kaltzeit angegeben. Für den Zeitraum der letzten 127.000 Jahre, d. h. seit dem Beginn der Eem-Warmzeit, konnten über der

Salzstruktur Gorleben im zentralen Bereich bis zum südwestlichen Ende des Salzstocks mit geologischen Methoden keine Subrosions- oder Einsenkungsbewegungen (Subsidenz) nachgewiesen werden. Einige Grundwässer zeigen im tieferen Bereich der Rinne Isotopensignaturen, die kombiniert mit ihrer lokalen Position und dem holozänen Alter der Wässer eine geringe rezente Subrosion am Salzspiegel wahrscheinlich machen /KLI 07/. Für relativ geringe Subrosionsraten spricht auch das Fehlen von Subrosionssenken bzw. -seen oberhalb des Salzstocks Gorleben. Die sehr geringe Subrosionstätigkeit wird auch durch die Tatsache unterstrichen, dass – verglichen zu früheren Kaltzeiten – der Salzspiegel tiefer liegt, so dass gering mineralisierte Grundwässer weniger gut an das Salz gelangen.

Neben der, vom am Salzspiegel austreichenden Gesteinstyp abhängigen, mehr oder weniger flächig ablaufenden Subrosion ist punktuell eine selektive Subrosion besonders leicht löslicher Salze am Salzspiegel möglich. Durch die Bildung der kaltzeitlichen Rinne wurde der Prozess am überkippt austreichenden Kaliflöz Staßfurt intensiviert, so dass es bis in eine Tiefe von ca. 100 m unterhalb des flächig ausgebildeten Salzspiegels zu Lösungs- und Umwandlungsprozessen kam. Diese selektiv stärker gelösten Kalisalz-Bereiche wurden durch Steinsalzauskristallisationen wieder verschlossen. Heute liegt ein relativ ebener Salzspiegel vor. Die hier angegebenen Untersuchungen zeigen, dass für einen Salzstock kein einzelner Wert für die Subrosion sondern nur plausible Bereiche für bestimmte geologische Situationen angegeben werden können. Für den Standort Gorleben sind die verschiedenen Subrosionsraten in /KÖT 07/ zusammengefasst (Tabelle 4.2).

Aus der langfristigen Entwicklung des Salzstockes kann von einer mittleren Subrosionsrate von ca. 0,01 mm/a ausgegangen werden /BOR 08/. Dies bedeutet eine Tieferlegung des Salzspiegels um 10 m in einer Million Jahre. Setzt man mit 0,2 mm/a die höheren Raten, die für kürzere Zeitabschnitte im Quartär wirksam waren, an, und überträgt diese auf einen Nachweiszeitraum von einer Million Jahre, resultiert eine Tieferlegung des Salzspiegels von 200 m, d. h. es erfolgt eine Reduzierung der ursprünglich 500 m mächtigen Salzbarriere um 200 m. Subrosionsraten von 0,2 mm/a sind aber nur kurzfristig für bestimmte Kaltzeiten zu erwarten, wenn es u. a. zur Bildung tiefer Rinnen kommt, die den Salzspiegel erreichen. Die Zeitdauer einer Kaltzeit wird analog zu der der Elster-Kaltzeit mit ca. 100.000 Jahren abgeschätzt, so dass sich daraus eine potentielle Ablaugung von 20 m ableitet.

Tab. 4.2 Subrosionsraten für den Salzstock Gorleben nach /KÖT 07/

Zeitraum	Geologische Situation	Subrosionsrate [mm/a]
Malm-Kreide	Diapirphase, Unterkreidetransgression	Hoch
Tertiär	Nachdiapirstadium, Ablagerung Deckschichten	0,005 - 0,015
Quartär, Prälster	Nachdiapirstadium, Abtragung Deckschichten	0,1 - 0,2
Elster- und Saale-Kaltzeit	Nachdiapirstadium, Kaltzeit, Rinnebildung	0,2 - 0,4
Eem-Warmzeit bis rezent	Nachdiapirstadium	0,01 - 0,05

Weitere Standorte. Die Subrosionsraten an verschiedenen Salzstöcken können je nach geologischer Situation unterschiedlich hoch sein.

Die in der Literatur angeführten Subrosionsraten beziehen sich auf unterschiedliche Zeiträume und damit auch auf unterschiedliche geologische Situationen. Auch werden unterschiedliche Methoden zur Ableitung der Subrosionsraten eingesetzt. Die einzelnen Verfahren zur Ableitung der Subrosionsraten werden z. B. von /BOR 08/ und /KÖT 07/ diskutiert.

4.2.1.2 Diapirismus

Eine der Voraussetzungen für das Abfließen halokinetischer Prozesse ist eine instabile Dichteschichtung zwischen dem Deckgebirge und dem Salinar. Dies tritt ein, wenn die überlagernden Deckschichten einer Steinsalzformation infolge ihrer Kompaktion eine durchschnittliche Dichte von $2,2 \text{ g/cm}^3$ erreicht haben. Dafür reicht eine Überdeckung durch klastische Sedimente von wenigen hundert Metern. Bei karbonatischen oder sulfatischen Ablagerungen reichen bereits etwa 100 m. Die potentielle Energie aus der instabilen Dichteschichtung, die für den Ablauf der Bildung von Salzstrukturen zur Verfügung steht, hängt von Mächtigkeit und Fazies der salinaren Formation sowie von Mächtigkeit und Fazies der Deckschichten ab. Ein kompressiv wirkendes regionales tektonisches Spannungsfeld und bereits vorhandene Störungssysteme in den Deckschichten unterstützen den Salzaufstieg. Beim Aufstieg des Salzes können sich im Deckgebirge Grabenstrukturen bilden. Die Entwicklungsgeschichte der Salzstrukturen, in denen sich das Salz akkumuliert und aufsteigt, hat ihre Entsprechung in den

Salzabwanderungsgebieten. Wo Salz abwandert, sinken die Deckschichten nach, und es entstehen Senken, in denen verstärkt sedimentiert wird.

Gorleben. Mit Hilfe der Schichtabfolgen auf und neben der Salzstruktur vom Zechstein bis zum Quartär lässt sich die Entwicklungsgeschichte des Salzstocks Gorleben und seiner Salzabwanderungsgebiete rekonstruieren /ZIR 91/, /ZIR 96/. Dieses Verfahren wird als Randsenkenanalyse bezeichnet.

Das Zechstein besaß primär eine Mächtigkeit von über 1.000 m. Gesichert ist eine Mindestmächtigkeit von 1.150 m, wahrscheinlich ist aber von einer Mächtigkeit von ca. 1.400 m auszugehen. Zechstein-Schichten weisen heute außerhalb der Salzstöcke nur noch Restmächtigkeiten von 100 bis 500 m auf. Der größte Teil des Salzes wanderte in den Salzstock. Im Salzeinzugsgebiet des Salzstocks Gorleben sind bei Zugrundelegung der o. g. Mindestmächtigkeit von den primär vorhandenen Zechsteinsalzen rund 64 % in den Salzstock gewandert. Die Ableitung dieser Zahl findet sich in /KÖT 07/.

Beim Salzaufstieg traten im Bereich des Hauptsalzes Salzfließgeschwindigkeiten von max. 0,34 mm/a während der Oberkreide und bis 0,07 mm/a im Zeitraum Miozän bis Quartär auf. Die eingewanderten Salz mengen hoben dabei die Salzstockoberfläche (= Aufstiegsrate des Salzstockes) etwa 0,08 mm/a zur Oberkreidezeit und etwa 0,01 bis 0,02 mm/a im Zeitraum Miozän bis Quartär /ZIR 91/. Die Salzeinwanderung nahm seit dem Maximum während der Kreidezeit bis zur jüngsten geologischen Vergangenheit stetig ab. Eine Verstärkung der Aufstiegsraten innerhalb der nächsten Million Jahre würde hohe kompressive Spannungen und eine sehr starke Subsidenz des Gebietes mit einer Neubildung von Sedimenten voraussetzen, die jedoch für die norddeutsche Tiefebene nicht prognostiziert werden (Kapitel 4.1.2). Die durchschnittliche Aufstiegsrate während des Zeitraums Miozän bis Quartär von 0,01 bis 0,02 mm/a kann daher auch für die kommende Million Jahre angenommen werden, was ohne Berücksichtigung von Subrosion zu einer Hebung des Salzspiegels um etwa 20 m führen würde. Im Zentrum des Salzstockes sind die Hauptsalze mobiler als die übrigen sie umgebenden Salzgesteine. Sie könnten den jüngeren Salzgesteinen um einen höheren Aufstiegsbeitrag vorseilen, der für den Nachweiszeitraum von einer Million Jahren auf insgesamt ca. 70 m abgeschätzt wird /BUH 10/.

Tab. 4.3 Aufstiegsraten für den Salzstock Gorleben nach /ZIR 91/

Zeitraum	Halokinese	Aufstiegsraten [mm/a]
Miozän - Quartär	Nachdiapirstadium	0,01 – 0,02
Tertiär, Eozän-Oligozän	Nachdiapirstadium	0,04
Kreide	Diapirstadium	0,06 (Oberkreide bis 0,08)
Jura/Kreide	Beginn Diapirstadium	0,02

Weitere Standorte. Im Gegensatz zur Subrosion lassen sich die Aufstiegsraten verschiedener Salzstöcke einfacher vergleichen. Bei der Zusammenstellung von Aufstiegsraten verschiedener Salzstöcke muss aber zu erkennen sein, welche Zeiträume und welche geologischen Situationen der Bestimmung der Aufstiegsrate zugrunde liegen. /JAR 80/ gibt eine Spannbreite für das Diapirstadium in Norddeutschland von weniger als 0,1 bis maximal 0,5 mm/a und für das Nachdiapirstadium einige Hundertstel Millimeter pro Jahr an.

Für die Salzstöcke in Nord-Louisiana (Abb. 4.2) sind die Spannbreiten der Aufstiegsraten seit der Kreide von 0,009 bis 0,042 mm/a auf 0,001 bis 0,027 mm/a zurückgegangen /KIE 80/. Für die aktive Diapirphase von Salzstöcken am Golf von Mexico gibt /DAV 09/ Aufstiegsraten von mehreren mm/a an. /ELS 81/ gibt für den Salzstock Mors in Dänemark durchschnittliche Aufstiegsraten von 0,1 bis 0,3 mm/a in der Diapirphase und 0,005 bis 0,01 mm/a in der Nachdiapirphase an.

4.2.1.3 Subrosion und Diapirismus

Die Bedeutung von Salzaufstieg und Subrosion für die Sicherheit eines Endlagers sind nicht unabhängig voneinander zu betrachten. Sind Aufstiegs- und Subrosionsraten stabil, ändert sich bei geringen Sedimentations- bzw. Abtragungsraten des Deckgebirges wenig an der aktuellen Situation eines Salzstockes. Die Aufstiegsrate hat dabei entscheidenden Einfluss auf die Geschwindigkeit der Subrosion. Da sich die lokalen Gegebenheiten der Salzstöcke im Nachdiapirstadium in Norddeutschland seit dem Tertiär nicht entscheidend verändert haben, ist bei vielen Salzstöcken in diesem Zeitraum von einer stabilen Situation auszugehen. Dieser Befund kann durch Natürliche Analoga, d. h. durch eine detaillierte Auswertung der Situation unterschiedlicher Salzstöcke gestützt werden.

Gorleben. Das Beispiel des Salzstockes Gorleben zeigt, dass die Ablaugung der Salzformationen sehr langsam mit Subrosionsraten in der Größenordnung von einigen Hundertstel Millimetern pro Jahr abläuft, d. h. einigen 10 m in einer Million Jahren. Des Weiteren ist für den Salzstock Gorleben für die geologische Zukunft mit einem durchschnittlichen Salzaufstieg von 0,01 – 0,02 mm/a zu rechnen. Das bedeutet eine natürliche Hebung der Salzstockoberfläche von 10 – 20 m in einer Million Jahren. Bei der erwarteten vollständigen Kompensation der Hebung durch Subrosion würde es demnach etwa 25 – 50 Mio. Jahre dauern, bis eine etwa 500 m mächtige Salzbarriere zwischen Salzspiegel und Endlager abgelaugt wäre. Auf Grundlage dieser Werte ist es unwahrscheinlich, dass Subrosionsvorgänge die Langzeitsicherheit eines Endlagers im Salzstock Gorleben gefährden können.

Auf Grund der Dichteunterschiede des Steinsalzes und der Abfallgebinde ist es aber nicht klar, ob die Abfallgebinde überhaupt am Aufstieg des Steinsalzes teilhaben werden. Theoretisch ist auch ein Absinken der Abfallgebinde möglich. Für die Beurteilung der Möglichkeit eines Absinkens von Abfallgebänden ist der Einsatz unterstützender Argumente vorstellbar. In /CHE 09/ wird auf Grund von Modellrechnungen ein Absinken der dichteren Anhydritblöcke innerhalb des Salzstockes vorausgesagt. Auch solche Thesen können mit Natürlichen Analoga überprüft werden. Dieser Aspekt ist in ähnlicher Weise auch für andere Endlagerkonzepte, nämlich solche, die Bentonit als Puffermaterial um die Behälter verwenden, von Bedeutung. Die Frage ist, ob ein Behälter in einem wassergesättigtem Bentonit über lange Zeiträume absinken kann. Laborexperimente und Modellrechnungen deuten an, dass dieser Prozess begrenzt ist. Ein geeignetes Analogon wurde bisher allerdings noch nicht gefunden /MIL 06/.

Weitere Standorte. Die Beurteilung der Subrosions- und Aufstiegsraten am Salzstock Gorleben sind ein gutes Beispiel dafür, wie aus Naturbeobachtungen wichtige Argumente für den Sicherheitsnachweis gewonnen werden können. Für eine bessere Beurteilung der zukünftigen Entwicklung von Salzstöcken ist es wünschenswert, Aufstiegs- und Ablaugungsgeschichte verschiedener Salzstöcke zu untersuchen. Dabei ist es wichtig, erst einmal festzustellen, welche Salzstöcke sowohl in der norddeutschen Tiefebene als auch weltweit eine derart ähnliche Entwicklungsgeschichte und ähnliche Randbedingungen wie der ausgewählte Standort aufweisen, damit sie als Natürliches Analogon überhaupt in Frage kommen. Für den norddeutschen Raum wurden solche Untersuchungen für einige Salzstöcke (Aschwarden, Harsefeld, Höfer und Jaderberg) im Rahmen von Forschungsvorhaben der BGR durchgeführt.

4.2.2 Wegsamkeiten in der geologischen Barriere

Den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ gemäß ist vom Antragsteller der einschlusswirksame Gebirgsbereich räumlich und zeitlich eindeutig zu definieren und unter Berücksichtigung der eingelagerten Abfälle und der technischen Barrieren zu zeigen, dass

- die Ausbildung von sekundären Wasserwegsamkeiten innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ausgeschlossen ist, die zum Eindringen oder Austreten ggf. schadstoffbelasteter wässriger Lösungen führen können und dass
- ggf. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhandenes Porenwasser nicht am hydrogeologischen Kreislauf im Sinne des Wasserrechts außerhalb des ewG teilnimmt. Dies gilt als erfüllt, wenn die Ausbreitung von Schadstoffen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich durch advective Transportprozesse allenfalls vergleichbar zur Ausbreitung durch diffusive Transportprozesse erfolgt.

Im Hinblick auf diese Anforderungen sind unterstützende Argumente und Beobachtungen von Bedeutung, die zeigen, dass möglichst keine Fluide aus den benachbarten Formationen oder dem Deckgebirge einer Salzformation in diese eingedrungen sind, d. h. dass keine Wegsamkeiten für einen Stofftransport vorhanden waren bzw. sind. Die Bildung solcher Wegsamkeiten ist dabei im Wesentlichen in den spröden Gesteinsschichten zu betrachten (Kapitel 4.2.2.1).

Natürliche Analoga können aus folgenden Untersuchungen abgeleitet werden:

- Mechanisches Verhalten von Salzgesteinen
- Chemische Zusammensetzung und Isotopengehalt von eingeschlossenen Lösungen und Gasen
- Spurenelementprofile (Br, Rb) in den Salzgesteinen

Des Weiteren sind Argumente hilfreich, die zeigen, dass möglichst wenige Lösungseinschlüsse im Salzgestein vorhanden sind.

4.2.2.1 Kompetente Gesteinsformationen

Als kompetent werden Gesteine bezeichnet, die in der Lage sind, gerichteten Druck fortzuleiten, z. B. härtere Kalk- und Sandsteinbänke. Inkompetente Gesteine, z. B. Steinsalz, Tone oder auch Schiefer, lassen sich hingegen plastisch verformen. Kompetente Gesteine verhalten sich hart und spröde. Sie zerbrechen bei mechanischer Beanspruchung eher und neigen zur Klüftbildung. Inkompetente Gesteine weisen auf Grund ihrer Plastizität nur eine geringe oder gar keine Klüftung auf. Die Begriffe kompetent bzw. inkompetent sind aber immer auch in Relation zum benachbarten Gestein zu verstehen.

Während unverheilte Klüfte langfristig für reines Steinsalz in einem Salzstock nahezu ausgeschlossen werden können (Kapitel 4.2.3), sind die Bereiche des Salzstockes für die Beurteilung von möglichen Wegsamkeiten von Bedeutung, bei denen ein hoher Anteil von kompetenten Gesteinen vorliegt. Klüfte sind auch in den Grenzbereichen von kompetenten und inkompetenten bzw. in den kompetenten Salzgesteinen des Salzstocks anzutreffen.

In den Salzablagerungen des Zechsteins spielt vor allem der Hauptanhydrit als kompetentes Gestein eine Rolle. Wenn solche anhydritischen Ablagerungen als durchgehende Bänder in einer Salzformation erhalten bleiben, können sie relevante Wegsamkeiten bilden.

Viele Laborversuche, aber auch geologische Aufschlüsse sowohl in Salzgesteinen als auch in anderen Gesteinsformationen zeigen, dass kompetente Gesteinslagen, die in inkompetenten Lagen eingebettet sind, bei mechanischer Beanspruchung, insbesondere bei ihrer Dehnung, zerbrechen (z. B. Boudinagestrukturen). Je größer der Kontrast zwischen den Lagen ist, desto stärker ist die Zerblockung ausgeprägt. Viele Ergebnisse aus Laborversuchen und natürliche Beispiele sind in /RAM 67/ zusammengestellt.

In /ZUL 09/ und /ZUL 10/ sind Laborexperimente beschrieben, welche die Verhältnisse in einem Salzstock und den Viskositätskontrast zwischen Anhydrit und Steinsalz nachbilden. Auch hier konnten entsprechende Boudinagestrukturen gezeigt werden.

Vor allem bei einer Salzformation im Diapirstadium ist von erheblichen Dehnungen der beteiligten ursprünglichen Salzablagerungen auszugehen, d. h. es ist anzunehmen, dass eine Zerblockung von Anhydritschichten bei sehr vielen Salzstöcken stattgefunden

den hat. Die zerbrochenen kompetenten Gesteine werden durch die duktile Matrix umflossen und so gegeneinander isoliert. Um eine Wegsamkeit über die zerblockten Schollen ausschließen zu können, müssen diese allerdings einen solchen Abstand zueinander haben, dass keine hydraulische Verbindung zwischen ihnen besteht.

Gorleben. Für die Südflanke des Salzstockes Gorleben wurde für den bereits erkundeten Bereich ein Zerblocken der Anhydritschicht in einzelne isolierte Schollen, die keine weit reichenden hydraulischen Verbindungen aufweisen, festgestellt /BOR 08/. Dieser Befund ist eine wichtige Grundlage des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes, der darauf hinweist, dass eine Migration von Radionukliden über ein durchgehendes Anhydritband vom Einlagerungshorizont bis zum Salzspiegel nicht zu erwarten ist.

Weitere Standorte. Das Phänomen des Zerblockens und das Auftreten von Boudinagestrukturen können in vielen weiteren Gesteinsformationen beobachtet und auch für andere Salzstöcke angenommen werden. Auf Grund der Bedeutung Anhydrit dominierter Schichten für das Sicherheits- und Nachweiskonzept sollten entsprechende Natürliche Analoga in einem Langzeitsicherheitsnachweis als zusätzliche Argumente verwendet werden. Diese gilt es aber entweder noch zu identifizieren oder besser als Natürliches Analogon zu dokumentieren. Auch bereits untersuchte Salzstöcke in Norddeutschland, z. B. der Salzstock Morsleben, können auf solche Fragestellungen hin untersucht werden.

4.2.2.2 Chemische Zusammensetzung von Gas- und Lösungseinschlüssen

Durch geochemische Untersuchungen an Lösungs- und Gaseinschlüssen in Salzmineralen und entsprechende Modelle steht ein Instrumentarium zur Verfügung, mit dem die Entstehung und Umbildung von Evaporitgesteinen und die damit verbundenen Mineralreaktionen und Stofftransporte identifiziert und charakterisiert werden können. Aus diesen Untersuchungen können Aussagen darüber abgeleitet werden, ob seit der Bildung der Salzstöcke eine Veränderung des chemischen und mineralogischen Stoffbestandes des Salzstockes durch Lösungen aus dem Deck- und Nebengebirge oder den liegenden Schichten stattgefunden hat oder nicht.

Bei Eindunstung von Meerwasser mit der Ablagerung von Evaporiten und darauf folgenden Umbildungsprozessen während des Salzstockaufstiegs werden unterschiedlich große Lösungsvolumina in den Evaporiten eingeschlossen. Große Volumina an Lösungsmengen werden dabei in Klüften und kavernen Hohlräumen eingeschlossen,

wohingegen nur sehr kleine Lösungsvolumina in den Mineralen der Evaporitgesteine enthalten sind. Neben wässrigen Salzlösungen können die Einschlüsse auch Gase und flüssige Kohlenwasserstoffe enthalten /BOR 91/.

Die Analyse der Gas- und Lösungseinschlüsse⁴ kann Hinweise darauf geben, ob der Stoffbestand der Einschlüsse während der Entstehung des Salzstockes durch Formationswässer aus dem Deck- und Nebengebirge oder gar durch Einwirken magmatischer Schmelzen verändert wurde oder nicht. Auch die Bestimmung des Druckes (lithostatisch oder hydrostatisch) liefert weitere Hinweise für die Beantwortung dieser Frage.

Gas und Lösungseinschlüsse im Salzstock Gorleben

Die Fluidvorkommen in Gorleben sind nicht beliebig im Salzstock verteilt, sondern bevorzugt an bestimmte stratigraphische Horizonte mit einer entsprechenden petrographischen und strukturellen Ausbildung gebunden. Diese Horizonte zeichnen sich dadurch aus, dass ihr sedimentärer oder diagenetischer Verband trotz der halokinetischen Deformation erhalten geblieben ist. Ist der sedimentäre oder diagenetisch bedingte Verband nicht erhalten, z. B. im Hauptsalz der Staßfurtfolge (z2), das durch eine extreme Deformation und Homogenisierung gekennzeichnet ist, kommen nur sehr geringe Mengen an Fluiden vor /BOR 08/. Die ehemals im Hauptsalz enthaltenen Lösungen und Gase sedimentären und diagenetischen Ursprungs sowie auch eventuell auftretende Metamorphoselösungen wurden infolge der Durchbewegung während des Aufstiegs des Salzes entweder zum Salzspiegel hin oder in Anhydrit-Kluftspeicher der Leine-Folge (z3), wie z. B. den Hauptanhydrit, abgepresst.

Bei der bisherigen Erkundung in Gorleben wurden Lösungs- und Gaszutritte hauptsächlich in den Anhydrit-dominierten Gesteinen der Leine-Folge (Hauptanhydrit, Gorleben-Bank, Anhydritmittel) angetroffen, in denen kluft- oder schichtgebundene Speicherräume möglich sind (Kapitel 4.2.2.1). Die angetroffenen Lösungen stehen unter lithostatischem Druck, was eine Verbindung zu den über dem Salzstock befindlichen Aquiferen ausschließt /BOR 08/. Des Weiteren treten Fluide in stark deformierten Zonen an der Grenze zwischen der Staßfurt- und der Leine-Folge (z2/z3) auf.

Lösungen. Das Volumen der Reservoirs im Salzstock Gorleben wird je nach stratigraphischem Horizont, in dem Fluide gespeichert sind, zwischen wenigen cm³ im Haupt-

⁴ Alle auftretenden Gase und Lösungen (fluid inclusions, Gebirgslösungen etc.) werden in diesem Bericht unter dem Begriff Gas- und Lösungseinschlüsse subsumiert.

salz (z2) bis in den Bereich von einigen 1000 m³ im Hauptanhydrit und im Grenzbe-
reich z2/z3 angegeben /BFS 02/. Die Größe der Lösungszutritte im Hauptanhydrit ist
abhängig von der Größe der Hauptanhydritschollen, wobei die Wegsamkeiten inner-
halb einer Scholle vollständig vernetzt sein können. Für die Zutritte aus dem Grenzbe-
reich z2/z3 kann die Gesamtausdehnung hydraulisch kommunizierender Gebirgsberei-
che nur abgeschätzt werden, sie liegt aber weit über dem 10 m-Bereich, wenn
bestimmte strukturelle Voraussetzungen vorliegen /BFS 02/.

Die im Erkundungsbergwerk (ohne Schächte), den Tiefbohrungen und den Einschlüs-
sen vorkommenden Lösungen sind überwiegend an Carnallit und/oder Sylvin gesättigt.
Untergeordnet kommen an Kieserit oder Bischofit gesättigte Lösungen vor. Diese salz-
stockinternen Lösungen sind einerseits durch Mischung primärer Meerwasserrestlö-
sung mit NaCl-gesättigten Lösungen oder andererseits aus der Reaktion von Kaliflöz-
gestein mit NaCl-gesättigten Lösungen entstanden. Anhand charakteristischer
geochemischer Signaturen konnte nachgewiesen werden, dass die Lösungen im Ver-
lauf der Migration zum Teil mit Schichtsilikaten und/oder Karbonaten (Grauer Salzton,
Leine-Karbonat) reagierten.

Alle in den Schächten beprobten Lösungen sind NaCl-gesättigt und meistens infolge
bergbaulicher Maßnahmen beeinflusst. Allerdings kommen in den Schächten auch
untergeordnet Lösungen vor, die zusätzlich an Sylvin (nur Schacht 2) oder an Carnallit
gesättigt sind. Diese salzstockinternen Lösungen werden als nicht bergbaulich beein-
flusst interpretiert. Sie sind durch Migration verändert worden, in deren Folge es zur
Mischung mit NaCl-gesättigten Lösungen oder einer Wechselwirkung mit dem umge-
benden Gestein kam. Von Bedeutung für eine Ausbreitung von Radionukliden in wäss-
riger Lösung ist weiterhin, dass an unbeeinflussten Proben bislang nur reduzierende
Verhältnisse und im Falle der MgCl₂-Lösungen niedrige pH-Werte festgestellt wurden.

Eine wichtige Aussage zur Integrität des Salzstocks liefert eine detaillierte Studie an
Lösungseinschlüssen in Halitkristallen aus verschiedenen Teufenbereichen des Salz-
stocks Gorleben /HER 95/, /HER 98/. Dabei wurden Probenserien aus dem Staßfurt
Kaliflöz direkt unter dem Salzspiegel sowie aus verschiedenen tiefen Horizonten des Lei-
ne-Steinsalzes und darin vorkommenden Klüften untersucht. Die Analyse der Haupt-
bestandteile und von Bromid in den Lösungseinschlüssen zeigt deutlich die Existenz
von zwei unterschiedlichen Lösungsgruppen, die sich hinsichtlich ihrer Lage ebenso
wie in ihrer Genese signifikant unterscheiden.

Bei der ersten Gruppe handelt es sich um Lösungen, in denen NaCl gegenüber MgCl₂ deutlich überwiegt und die Dichte und der Bromidgehalt deutlich geringer sind als in der zweiten Lösungsgruppe. Die erste Lösungsgruppe wird in den Kaliflözen unterhalb des Salzspiegels angetroffen. Die Hauptelementkonzentrationen können nur auf die Umkristallisation des ursprünglichen Stoffbestands der Zechsteinevaporite mit ungesättigten wässrigen Lösungen zurückgeführt werden. Die Existenz dieser Lösungen ist durch kaltzeitlich bedingte Subrosionsvorgänge zu erklären, die bis etwa 80 m unter dem Salzspiegel wirksam gewesen sind.

Die zweite Lösungsgruppe wurde in den Einschlüssen in 600 m bis 1.600 m Tiefe, also etwa 350 m bis 1.350 m unter dem Salzspiegel angetroffen und enthält vorwiegend MgCl₂ und nur wenig NaCl sowie deutlich höhere Bromidgehalte. Ihre Zusammensetzung kann direkt auf ein spätes Eindunstungsstadium von Meerwasser aus der Zeit der Bildung der Zechsteinevaporite zurückgeführt werden.

Ein wesentliches Fazit dieser Studie ist, dass die Evaporite der Zechsteingruppe, in der sich die Einschlüsse befinden, seit ihrer Entstehung vor etwa 250 Millionen Jahren nicht mit Salzstock-externen Formationswässern in Kontakt gekommen sind. Ein Stoffaustausch erfolgte, wenn überhaupt, nur aus dem Salzstock heraus. Porenwässer haben bei der Kompaktion und Verformung des Salzgesteins den Evaporitkörper bevorzugt in Richtung Nebengestein und Deckgebirge verlassen. Die Einwirkung von Formationswässern aus dem Nebengestein oder Deckgebirge war und ist überwiegend auf die Außenbereiche des Evaporitkörpers beschränkt.

Gase in Einschlüssen. Bei Untersuchungen der Zusammensetzung der Gase in den Salzgesteinen des Salzstockes Gorleben wurden sechs Gase gefunden: CH₄, C₂H₆, O₂, H₂, N₂ und H₂S /SIE 01/. CO₂ wurde konnte nicht nachgewiesen werden, ein Hinweis darauf, dass der Salzstock Gorleben während seiner Entstehung nicht von magmatischen Vorgängen beeinflusst wurde. Die Ergebnisse zeigen weiter, dass bei der Genese der Gase grundsätzlich zwischen zwei verschiedenen Gruppen unterschieden werden kann: Die erste Gruppe umfasst die stickstoffhaltigen Gase, die zusätzlich auch Sauerstoff enthalten. Bei diesen Gasen wird aufgrund des der heutigen Atmosphäre ähnlichen N₂/O₂-Verhältnisses angenommen, dass sie die Paläoatmosphäre des Zechsteins widerspiegeln und seit diesem Zeitpunkt im Salzgestein eingeschlossen sind. Die zweite Gruppe umfasst generell sauerstofffreie Gase, sowohl stickstoffhaltige als auch stickstofffreie, z. B. Methan (CH₄) und vielfach auch Wasserstoff (H₂). Diese Gemische lassen sich aus dem Abbau organischer Substanzen unter anoxischen Bedin-

gungen ableiten, wie sie z. B. auf die Verhältnisse im Staßfurt-Karbonat zutreffen. Da H_2 zusammen mit CH_4 auftritt, ist die Methanogenese von organischen Substanzen unter reduzierenden Bedingungen die wahrscheinlichste Quelle für den Wasserstoff /BOR 08/. Diese Beobachtung deutet darauf hin, dass der Wasserstoff seit der Bildung der Einschlüsse dort vorhanden war.

Gasförmige Kohlenwasserstoffvorkommen. Des Weiteren wurden detaillierte Untersuchungen der Zusammensetzung von freien Gaszutritten, salzgebundenen Gasen und so genannten „Headspace“-Gasen durchgeführt /BOR 08/. Ein Schwerpunkt dieser Untersuchung war die Analyse der Kohlenwasserstoffe. Hier wurden die Zusammensetzung der Kohlenwasserstoffe genauer charakterisiert und zusätzlich auch die Isotopenverhältnisse D/H in Methan und $^{13}C/^{12}C$ in den Kohlenwasserstoffen und teilweise auch $^{15}N/^{14}N$ im Stickstoff ermittelt.

Die Ergebnisse zeigen, dass hinsichtlich der Genese im Wesentlichen zwei Gastypen unterschieden werden können. Beim ersten Typ handelt es sich wahrscheinlich um autochthone Zechsteinprodukte mit thermischen Überprägungen. Diese Gase sind demnach seit ihrer Bildung in den Evaporiten eingeschlossen.

Im Hauptanhydrit wird der zweite Gastyp, ein Mischgas, das aus dem Rotliegenden entstammt und etwa 40 bis 45 % des Gases vom Typ 1 enthält, angetroffen. Die Migration der Rotliegend-Gase erfolgte während der Salzstockbildung über Klüfte, die eine Verbindung zwischen Rotliegendem und Anhydrit darstellten. Da der Hauptanhydrit während des Aufstieges zerblockt wurde, existiert diese Verbindung heute nicht mehr (Kap. 4.2.2.1).

Zusätzlich wurden auch Kondensatvorkommen von Kohlenwasserstoffen untersucht. Diese bestehen im Wesentlichen aus niedrig siedenden, flüssigen C_6 - bis C_{16} -Verbindungen. Die Ergebnisse legen nahe, dass sie einem algenreichen, karbonatischen Muttergestein entstammen. Die $^{13}C/^{12}C$ -Verhältnisse der Gesamtproben und Fraktionen sind ähnlich denen aus Zechstein-Erdölfeldern in Nordost-Deutschland und untermauern deren Genese aus einem zechsteineigenen Muttergestein, also sehr wahrscheinlich der organischen Substanz des Staßfurt-Karbonates, die auch die Quelle für die gasförmigen Verbindungen darstellt.

Generell deuten alle Untersuchungen an den Gasvorkommen darauf hin, dass ein Großteil der Gase, bzw. seiner Ausgangssubstanzen aus der Zeit der Bildung der Eva-

porite vor 250 Millionen Jahre stammt und keine Wechselwirkungen mit externen Fluiden stattgefunden haben. Im Steinsalz deuten die Ergebnisse auf geringe Migration von Gasen hin. Hinweise auf Migrationsprozesse innerhalb des Salzstocks sind im Wesentlichen auf den Bereich des Hauptanhydrits beschränkt und fanden hauptsächlich entlang von Klüften während der Salzstockbildung statt.

Weitere Standorte

Lösungsvorkommen. Außerhalb des Salzstocks Gorleben wurden Lösungseinschlüsse vor allem am Standort Morsleben im Salzbergwerk Bartensleben genauer untersucht /HER 97/. Analysiert wurden Lösungseinschlüsse mit Durchmessern $>250 \mu\text{m}$ aus dem Leine-Steinsalz Na3. Es wurde festgestellt, dass alle Lösungen Reste von NaCl-gesättigtem Meerwasser darstellen, die durch NaCl dominiert sind. Die im Vergleich zu der bei Eindunstung von Meerwasser im Stadium der NaCl Sättigung erniedrigte MgSO_4 -Konzentration konnte auf folgende Prozesse zurückgeführt werden: Im Frühstadium der Meerwasser-Eindunstung war die bakterielle Sulfatreduktion bevorzugt. Im Spätstadium dominierten Dolomit- und Magnesitbildung. Generell repräsentieren die Laugen der Einschlüsse aber solche, die bei der Meerwasser-Eindunstung, also zur Zeit der Salzablagerung gebildet wurden und bestätigen, dass in der geologischen Vergangenheit im Leine-Steinsalz des Salzbergwerks Bartensleben kein Austausch mit externen Fluiden stattfand.

Gasvorkommen. Neben den Untersuchungen am Standort Gorleben gibt es detaillierte Untersuchungen über die Zusammensetzung und die Isotopenverhältnisse an eingeschlossenen Gasen aus den flachgelagerten Salzgesteinen der Calvörder Scholle (Untersuchungsort: K+S-Werk Zielitz), die seit ihrer Entstehung keinen hohen tektonischen Beanspruchungen ausgesetzt war, und aus der Salzstruktur Allertal (Esco-Werk Braunschweig-Lüneburg), die dagegen in ihrer geologischen Vergangenheit tektonisch außerordentlich hoch beansprucht worden ist /MEN 05/, /NOS 07/. Die Gaseinschlüsse im Zechstein 2 aus dem Werk Zielitz enthalten CH_4 , H_2 , N_2 und H_2S . Aus dem Verhältnis stabiler schwerer Isotope von Wasserstoff, Sauerstoff und Kohlenstoff zu deren leichteren Isotopen können Rückschlüsse zu dem Entstehungsmechanismus, zu den Bedingungen und damit unter Umständen auch zu den Zeitpunkten, unter denen die Gase gebildet wurden, gezogen werden. Das Verhältnis von schwerem und leichtem Isotop wird üblicherweise als Abweichung gegenüber einem Standard (z. B. IAEA-

Standard VPDB⁵) angegeben und dieser Wert mit dem Symbol δ bezeichnet. Die relativen Anteile der Komponenten sowie die $\delta^2\text{H}$ -Werte des Methans zeigen, dass dieses überwiegend durch Fermentation produziert wurde. Das Profil des $\delta^{13}\text{C}$ im Methan zeigt Werte von -45 bis 50 ‰ (VPDB) im unteren Teil und auffällig hohe (+21 ‰) in den Kalisalzen im oberen Teil der Schichtenfolge. Wie in /MEN 05/ gezeigt wird, zeigen diese Beobachtungen, dass es sich in diesem Fall um primäre Gaseinschlüsse handelt, die sich bereits während der Genese der Salzformation gebildet hatten. Dieses ist wiederum ein deutlicher Hinweis darauf, dass die Gase im Salz gebunden waren und dass seit dem Perm kein Transport oder irgendwelche Wechselwirkungen mit anderen Fluiden stattgefunden haben.

Im Gegensatz zu den flachgelagerten Salzformationen der Calvörder Scholle am Werk Zielitz wurden in der Salzstruktur Allertal nur sehr kleine Mengen eingeschlossener Gase nachgewiesen. Diese Beobachtung wird so gedeutet, dass die bei der Genese eingeschlossenen Gase später bei Rekristallisationsvorgängen freigesetzt wurden, die durch tektonische Spannungen induziert wurden.

Einschlüsse im Steinsalz aus Zechsteinevaporiten über Kohlenwasserstoffvorkommen in Polen beinhalten sowohl Bitumen als auch einen hohen Anteil an Methan. Die Anwesenheit dieser Stoffe wird als Indiz dafür gewertet, dass Kohlenwasserstoffe aus den unterliegenden Schichten in das Salz migriert sind /KOV 08/. Die Eindringtiefe in das Salz beträgt dabei einige Zehnermeter.

Untersuchungen wie z. B. /SIE 01/ liefern wichtige Argumente für die Integrität von Salzformationen über sehr lange Zeiträume. Sie zeigen, dass – sofern keine starken tektonischen Spannungen auftreten - innerhalb des Salzkörpers kein signifikanter Gas-transport auftritt. Ebenso liefern sie ein weiteres Argument dafür, dass ein Zutritt von externen Lösungen nicht erfolgt. Sie zeigen aber auch, dass in Salzstrukturen, die in ihrer Vergangenheit starken mechanischen Einwirkungen ausgesetzt waren, nur sehr kleine Lösungsvorkommen zu erwarten sind.

Andere Arbeiten, wie z. B. /KOV 06/ oder /KOV 08/, liefern aber auch abweichende Aussagen zu möglichen Migrationsprozessen im Steinsalz. Hier besteht noch ein Bedarf, entsprechende Untersuchungen detailliert auszuwerten und zu dokumentieren, um ihre Eignung bewerten zu können.

⁵ VPDB = Vienna Pee Dee Belemnite (Karbonat)

4.2.2.3 Spurenelementprofile von Salzgesteinen

Die Untersuchung der Bromidanteile in Salzgesteinen ist eine Standardmethode für die geologische Erkundung mariner Evaporitvorkommen und wird eingesetzt, um die Entstehungsgeschichte einer Salzformation zu analysieren /BRA 63a/, /BRA 63b/. Zusätzlich können auch die Gehalte anderer Spurenelemente, wie insbesondere Rubidium, zur Erstellung von Genesemodellen herangezogen werden /MAT 95/. An Hand der Profile dieser Spurenelemente können auch Argumente abgeleitet werden, dass die Salzminerale nie mit externen Lösungen in Kontakt gekommen sind.

Gorleben. Für das Hauptsalz der Staßfurt-Folge konnte nachgewiesen werden, dass das Vertikalprofil der absoluten Bromgehalte denen des gesamten Verbreitungsgebietes in Mittel- und Norddeutschland entspricht. Es zeigt den typischen Anstieg des Bromidgehalts während der Eindunstungsphase des Meerwassers /SCH 60/, /HER 00a/. Die Übereinstimmung mit Profilen von Schichten, die nicht durch halokinetische Prozesse deformiert wurden und größtenteils noch in ursprünglicher Form vorliegen, ist ein Argument dafür, dass die mineralogische Zusammensetzung des Hauptsalzes seit seiner Ablagerung unverändert geblieben ist und nicht mit salzstockexternen Lösungen in Verbindung gekommen ist.

Weitere Standorte. /BEC 08/ beschreibt die geologische Situation für eine tektonisch äußerst beanspruchte und gestörte Salzformation aus der Trias am Nordrand der Pyrenäen nahe Bayonne. In dieser Formation zeigt das Bromidprofil nicht den typischen Anstieg, der sich während der Ablagerung der Sedimente einstellt. Das Bromid ist in dieser Formation unregelmäßig über alle Sedimente verteilt. Die Analyse solcher Salzformationen kann als Referenz dienen, wie die Bromidgehalte in Salzgesteinen in tektonisch stark beanspruchten Gebieten verteilt sein könnten.

4.2.3 Mechanische Belastbarkeit von Salzgesteinen

Neben den in Kapitel 4.2.2 zitierten Anforderungen aus den Sicherheitsanforderungen wird für die Langzeitaussage der Integrität von Salinar- und Tongesteinen die Prüfung folgender Sachverhalte gefordert /BMU 10/:

- Die zu erwartenden Beanspruchungen dürfen die Dilatanzfestigkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs außerhalb der Auflockerungszonen nicht überschreiten.

- Die zu erwartenden Fluiddrücke dürfen die Fluiddruckbelastbarkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht in einer Weise überschreiten, die zu einem unnatürlichen Zutritt von Grundwässern in diesen ewG führt.
- Durch die Temperaturentwicklung darf die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht unzulässig beeinflusst werden.

Natürliche Analoga, welche die Prüfung der ersten beiden Sachverhalte unterstützen können, werden in diesem Kapitel beschrieben. Mit dem dritten Punkt beschäftigt sich Kapitel 4.2.4.

Die mechanische Belastbarkeit eines Materials wird in der Regel durch Laboruntersuchungen, z. B. Uniaxial- oder Triaxialversuche, nachgewiesen. Darüber hinaus können aber auch Natürliche Analoga herangezogen werden, die das mechanische Verhalten von Salzgestein unter Endlagerbedingungen belegen können. Hier können die Erfahrungen aus dem Bergbau in Salzgesteinen herangezogen werden, z. B. das Kriechverhalten von Steinsalz bei bergbaulichen Aktivitäten.



Abb. 4.3 Versatzkompaktion infolge Streckenkonvergenz auf der 750-m-Sohle im ehemaligen Salzbergwerk Asse II /BRE 99/

Ein Beispiel stammt aus dem ehemaligen Salzbergwerk Asse II (Abb. 4.3). Es handelt sich um eine mehrere Jahrzehnte alte Strecke auf der 750 m-Sohle in unmittelbarer

Nähe des Kaliflözes Staßfurt, die mit Salzgrus, Asche und Bauschutt versetzt wurde. Die mit der Konvergenz einhergegangenen bruchlosen plastischen Verformungen des Carnallitits sind gut zu erkennen. Der dabei komprimierte Versatz hat eine hohe Dichte erreicht, die durch Eigenkompaktion allein niemals erreicht werden könnte.

Über den Bericht von /BRE 99/ hinaus gibt es wenige Versuche, das mechanische Verhalten von Steinsalz als Natürliches Analoga zu dokumentierten. Für diesen wichtigen Aspekt im Langzeitsicherheitsnachweis wäre eine solche Betrachtung allerdings wünschenswert. Vorhandene salztektonische Studien, z. B. über den Salzstock Kłodawa in Polen /SCH 07/ oder über Salzformationen im Oman /SHO 07/ könnten als Grundlage für solch eine Dokumentation dienen.

4.2.4 Thermische Belastbarkeit von Salzgesteinen

Die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle kann (konzeptbedingt) im Steinsalz zu Temperaturen von maximal 200 °C an der Kontaktfläche der eingelagerten HAW-Abfallgebände führen /BUH 08/. Die dadurch auftretenden Veränderungen lassen sich an Laborproben und mittels Erhitzer-Experimenten gut untersuchen. Zur Absicherung dieser Kenntnisse und zur Analyse der Auswirkung noch höherer Temperaturen über lange Zeit auf Struktur und Mineralzusammensetzung von Steinsalz in einer Teufe von 700 – 800 m können z. B. Untersuchungen von Basaltintrusionen in Steinsalzformationen dienen. Für die thermische Belastbarkeit ist zudem auch das Verhalten von Salzgesteinen bei einer Abkühlung zu beurteilen. Hierzu kann eine Auswertung der Auswirkungen vergangener Kaltzeiten auf die Salzgesteine beitragen.

4.2.4.1 Basaltintrusionen in Steinsalzformationen

Gorleben. Für Salzformationen in steiler Lagerung sind keine Intrusionen bekannt. Bei der Untersuchung der Zusammensetzung der Gaseinschlüsse fehlt CO₂, das in Salzstöcken, die magmatisch beeinflusst wurden, charakteristisch ist /SIE 01/.

Weitere Standorte. Ein sehr gut untersuchtes Beispiel sind die Intrusivgänge, die in den flachgelagerten Zechsteinevaporiten des Werra-Fulda-Lagerstättenbezirks auftreten /KNI 89/, /KNI 94/, /STA 95/. Basaltische Schmelzen drangen während des Miozäns vor etwa 15-25 Millionen Jahren mit Temperaturen von 1.150 °C in das Salzgestein ein und erstarrten in den Steinsalzsichten unter Bildung von steil stehenden

Basaltgängen. Das Steinsalz wurde hierbei im Kontaktbereich auf Temperaturen bis zu ca. 800 °C aufgeheizt; die Temperaturen gingen aber relativ schnell auf unter 100 °C zurück.

Ein typischer Basaltgang ist in Abb. 4.4 dargestellt. Der Durchmesser der Basaltintrusion in dieser Abbildung beträgt 30 cm. Deutlich erkennbar sind scharfe Übergänge zwischen Basalt und Salzgestein (Mittleres Werra-Steinsalz). Die feinen horizontalen und vertikalen Klüfte im Basalt sind hauptsächlich mit Anhydrit und Halit gefüllt. Die Kontaktzone ist weniger als zwei Zentimeter breit und besteht hauptsächlich aus Anhydrit, Kieserit und ferro-dolomitischen Karbonaten. In den Kalisalzgesteinen, z. B. dem Carnallit im Kaliflöz Hessen, sind die Übergänge nicht scharf, hier bildete sich eine Kontaktzone, die Mächtigkeiten von mehreren Metern erreichen kann. Dies belegt, dass Kalisalze wesentlich empfindlicher auf eine Temperatureinwirkung reagieren als das Steinsalz.

An der Kontaktzone hat sich durch die schnelle Abkühlung der Schmelze basaltisches Glas gebildet. Es hat sich gezeigt, dass Materialreaktionen und Materialtransport über flüssige Phasen (mit den eindringenden Basaltschmelzen vergesellschaftete Flüssigkeitsbestandteile) stattgefunden haben. Die Ausdehnung solcher Mineralveränderungen blieb im Na-reichen Steinsalz auf wenige Zentimeter Distanz von der Oberfläche der Basaltintrusion begrenzt und erreichte lediglich in K-Mg-Salzbändern eine Ausdehnung von bis zu 10 m.

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass hohe Temperaturen, die im Fall der Basaltintrusionen um mehrere 100 °C höher lagen als sie bei der geplanten Einlagerung von wärmeentwickelnden Abfällen sein werden, nur geringe Auswirkungen auf die Stabilität der Steinsalzbarriere haben. Im Gegensatz zu der Einlagerung radioaktiver Abfälle ist die räumliche Begrenzung der Einwirkung dieser Basaltintrusion allerdings auf wenige 10er Meter beschränkt. Weitere wichtige Unterschiede zur Endlagerung sind die sehr viel höhere Temperatur beim Eindringen des Basalts in das Salz und die relativ zur Endlagerung raschere Abkühlung des Basaltkörpers.

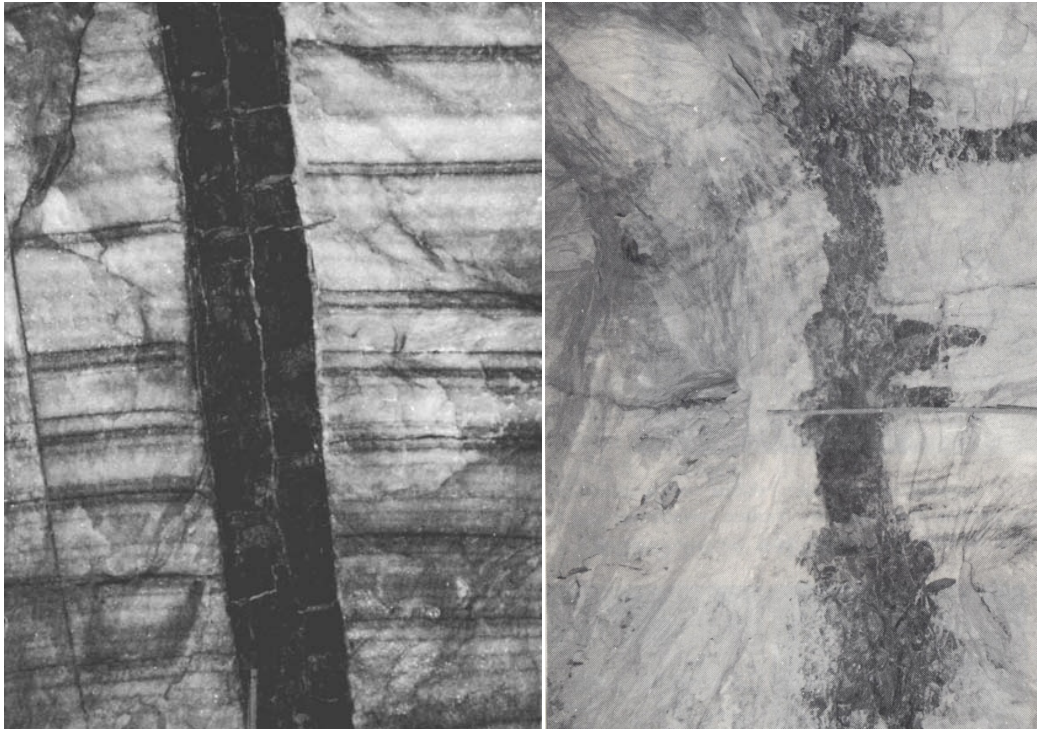


Abb. 4.4 Basaltintrusionen in Steinsalz (links) und in Kalisalz (rechts) in der Werra-Fulda-Region /KNI 89/ - Durchmesser der Basaltintrusion in dieser Abbildung ca. 30 cm

Die Untersuchungen der Kontaktbereiche zwischen magmatischen Gestein und angrenzenden Evaporiten im Werra-Fulda-Lagerstättenbezirk sind trotz der genannten Unterschiede ein geeignetes Natürliches Analogon für das Prozessverständnis für die Auswirkungen lokal erhöhter Temperaturen im Salzgestein. Darüber hinaus lassen sich diese Untersuchungen auch als Natürliches Analogon für andere wichtige Prozesse in einem Endlager nutzen:

- Verheilung von Rissen und bruchhaften Verformungen (Kapitel 4.2.3)
- Stabilität von basaltischen Materialien im Salinar (Kapitel 5.1)
- Mobilität von Lanthanoiden in Evaporiten (Kapitel 6.2)

In den genannten Kapiteln wird dementsprechend dieses Natürliches Analogon erneut herangezogen.

4.2.4.2 Kaltzeitliche Auswirkungen

Die durch den Salzbergbau erschlossenen Salzstöcke des hannoverschen Raumes zeigen eine auffällige Verteilung von Klüften in den chloridischen Salzgesteinen /BAU 91/. Die Klüfte sind in der Regel geschlossen und durch Mineralneubildungen verheilt. Mit zunehmender Teufe nimmt die Häufigkeit dieser Klüfte schnell ab. Unterhalb von ca. 600 m unter Tagesoberfläche sind diese Klüfte gar nicht mehr anzutreffen. Als Ursache für ihre Entstehung wird in /BAU 91/ eine Abkühlung der Salzstöcke, bzw. des Nebengebirges in Folge einer Kaltzeit und die Bildung von Kontraktionsrissen im Salzgestein diskutiert.

Die Befunde an den Salzstöcken des hannoverschen Raumes zeigen, dass die Entstehung von Abkühlungsrissen im oberflächennahen Bereich eines Salzstockes eine denkbare Entwicklung ist. Eine mögliche Einwirkung dieses Prozesses auf die Sicherheit des Endlagersystems lässt sich durch eine entsprechende Teufe des Salzstockes umgehen. So liegt auch die Oberfläche des Salzstockes Gorleben wesentlich tiefer als die der hannoverschen Salzstöcke. Die Untersuchungen an den Salzstöcken im hannoverschen Raum zeigen, wie an Hand von Natürlichen Analoga FEP identifiziert werden können, die es gegebenenfalls in der Szenarienanalyse zu berücksichtigen gilt.

5 Natürliche Analoga für den Integritätsnachweis der geotechnischen Barrieren

Wie bereits in Kapitel 3 dargestellt, steht im Mittelpunkt des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes der Nachweis der Integrität der geologischen und geotechnischen Barrieren. Natürliche Analoga, die den Integritätsnachweis der geologischen Hauptbarriere unterstützen, wurden in Kapitel 4 behandelt. In diesem Kapitel erfolgt eine Zusammenstellung anwendbarer Natürlicher Analoga beim Nachweis der Integrität der geotechnischen Barrieren. Betrachtet werden neben den Schacht- und Streckenverschlüssen auch Bohrlochverschlüsse und der eingebrachte Versatz. Es wird im vorliegenden Bericht von einer reinen Bohrlochlagerung ausgegangen, d. h. sämtliche Abfälle werden in Kokillen endgelagert. Von der Barrierenfunktion der Behälter wird in der Nachverschlussphase kein Kredit genommen. Betrachtet werden des Weiteren nur hochradioaktive Abfälle.

Den Sicherheitsanforderungen gemäß sind beim Nachweis der Integrität bzw. des Einschlusses die technisch unvermeidbaren Barrierenperforationen und die Verfüllung des Endlagers zu berücksichtigen. Es ist zu zeigen, dass die von der geologischen Barriere geforderte Integrität und der von ihr zu gewährleistende Einschluss auch bei Berücksichtigung der technischen Abdichtungs- und Verschlussbauwerke sowie Verfüllung erhalten bleiben. Zum Nachweis sind unter anderem die für die Funktionstüchtigkeit der technischen Verschlussbauwerke maßgeblichen Beanspruchungszustände und Eigenschaften der Baustoffe zu untersuchen. Die hinreichende Belastbarkeit und Alterungsbeständigkeit dieser Baustoffe ist für den Zeitraum nachzuweisen, für den die Funktionstüchtigkeit der Bauwerke gegeben sein muss. Die Diskussionen und Ergebnisse im Vorhaben ISIBEL haben gezeigt, dass insbesondere folgende Aspekte beim Integritätsnachweis der geotechnischen Barrieren von Bedeutung sind:

- Hydraulischer Widerstand
- Langzeitstabilität der eingesetzten Materialien
- Kompaktionsverhalten des Salzgrusversatzes

Die größten Schwierigkeiten ergeben sich daraus, dass die Gesetzmäßigkeiten für die Ausheilung von Auflockerungszonen oder für die Kompaktion von Salzgrusversatz nicht restlos abgesichert sind. Das liegt daran, dass hier komplexe Vorgänge in den

verwendeten Materialien mit Hilfe einfacher Näherungsformeln beschrieben werden müssen und außerdem die Werte für einige der in diese Formeln eingehenden Parameter nicht immer genau vorhergesagt werden können. Auch die zukünftige Entwicklung des geochemischen Milieus ist schwer zu prognostizieren. Hieraus ergeben sich Ungewissheiten hinsichtlich der Langzeitstabilität der eingesetzten Verschlussmaterialien.

Natürliche Analoga sollten daher insbesondere für diese Aspekte des Integritätsnachweises identifiziert und dokumentiert werden. Für die Beschreibung der Vorgänge am Anfang der Nachverschlussphase können verstärkt auch technische Analoga angeführt werden, die vor allem auf Beobachtungen in der mehr als 100-jährigen Geschichte des Steinsalzbergbaus basieren.

5.1 Hydraulischer Widerstand der einschlusswirksamen Barrieren

Der hydraulische Widerstand eines Verschlussbauwerkes ist der integrale Widerstand aus Auflockerungszone, Dichtkörper und der Kontaktzone zwischen Bauwerk und Salzgestein.

Die natürlichen Prozesse zur Verheilung von Rissen und damit auch zur Reduzierung der Permeabilität in der Auflockerungszone wurden bereits in Kapitel 4.2.3 behandelt. In vorliegendem Kapitel geht es vor allem um technische Analoga, die zeigen, dass die für den erforderlichen Zeitraum angestrebten integralen Permeabilitäten der Verschlussbauwerke erreichbar sind.

Die Durchlässigkeit des Dichtkörpers ist dabei weniger kritisch als die Versiegelung der Auflockerungszone und der Kontaktzone. Ein weiterer wichtiger Prozess, dessen Verständnis durch Natürliche Analoga gestützt werden sollte, ist das Langzeitverhalten der Verschlussmaterialien (Bentonit, Asphalt, Bitumen) im salinaren Milieu.

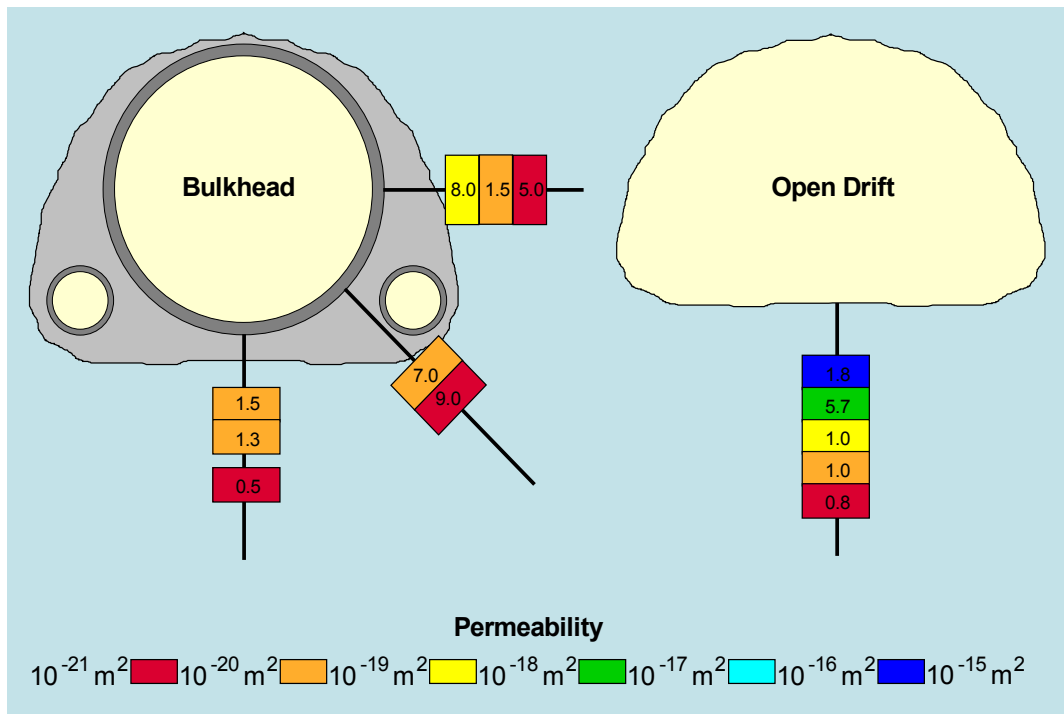


Abb. 5.1 Gemessene Permeabilitäten in Bohrungen um die ausgekleidete Strecke (links) und unterhalb der offenen Strecke (rechts) /WIE 01/

Abb. 5.1 zeigt gemessene Gesteinspermeabilitäten in der Auflockerungszone um eine im Jahre 1911 im Salzbergwerk Asse II in ca. 800 m Teufe aufgefahrene Strecke. Von dieser Strecke wurde ein 25 m langer Abschnitt 1914 mit einem Tübbing verstärkt (Abb. 5.1, links). Durch die Verfüllung der Hohlräume zwischen Tübbing und Streckenstoß wurde ein rascher Kraftschluss mit dem Gebirge hergestellt. Die gemessenen Permeabilitäten kommen denen von unverritztem Steinsalz sehr nahe. Um die nicht ausgebaute Strecke (Abb. 5.1, rechts) existiert auch nach nunmehr fast 100 Jahren noch eine ca. 2 m in das Gebirge hineinreichende ausgeprägte Auflockerungszone mit in Richtung Stoß bis über 10^{-16} m^2 ansteigender Permeabilität. In dem ausgebauten Bereich liegen die Permeabilitäten in Abhängigkeit vom Abstand zur Strecke um mehr als vier Größenordnungen unter denen im nicht ausgebauten Streckenabschnitt. Diese Situation stellt ein Analogon zur Entwicklung der Auflockerungszone um eine Streckenabdichtung im Endlager dar. Diese Beobachtungen zeigen, dass die Ausheilung der Auflockerungszonen innerhalb eines kurzen Zeitraums abläuft und zur signifikanten Reduktion der Permeabilität im stoßnahen Gebirge führt. Dadurch werden die Ergebnisse gebirgsmechanischer Modellrechnungen untermauert, denen zufolge sich in der Nachverschlussphase nach relativ kurzer Zeit in den Gebirgsbereichen, in denen Abdichtungen errichtet wurden, bereits wieder eine Permeabilität in der Größenordnung des ungestörten Steinsalzes ($< 10^{-21} \text{ m}^2$) einstellt.

5.2 Langzeitverhalten von Verschlussmaterialien im salinaren Milieu

Die Zusammensetzung der eingesetzten Verschlussmaterialien ist für den Langzeitsicherheitsnachweis von großer Bedeutung, da sie die Eigenschaften der Verschlussbauwerke bestimmen. Verschlussbauwerke sollen dem Sicherheits- und Nachweiskonzept gemäß sicherstellen, dass keine nennenswerten Lösungsmengen zu den Abfällen gelangen können, solange der Salzgrusversatz nicht soweit kompaktiert ist, dass er diese Barrierefunktion übernehmen kann. Bei der Beurteilung der Langzeitstabilität der Barrieren ist neben den mechanischen Lasten vor allem die Entwicklung des geochemischen Milieus zu betrachten. Da die Entwicklung des zukünftigen Lösungsschemismus nur näherungsweise abgeschätzt werden kann, bestehen Ungewissheiten hinsichtlich der Langzeitstabilität der Barrieren. Diesen Ungewissheiten wird beim Schachtverschluss durch diversitäre Barrieren mit unterschiedlichen Verschlussmaterialien begegnet.

Auch der Zeitraum, den der Salzgrus braucht, um so weit zu kompaktieren, dass er die Barrierefunktion der Verschlussbauwerke übernehmen kann, ist mit Ungewissheiten behaftet. Es ist davon auszugehen, dass für diesen Prozess mehrere tausend Jahre notwendig sind. Aufgrund der geforderten Wirksamkeit über entsprechend lange Zeiträume sollten für die Verschlussbauwerke Materialien verwendet werden, deren Langzeitbeständigkeit aus Vorkommen in der Natur bekannt ist.

Für ein Endlager im Salinar werden folgende Materialien für die Verschlussbauwerke in Betracht gezogen /KRE 08/:

- Salzbriketts aus gepresstem Salzgrus für Widerlager
- Schotter aus langzeitstabilen Gesteinen, z. B. Basalt, als Grundmaterial für ein setzungsarmes Schachtverschlussfundament
- Bentonit für Dichtungselemente für Schachtverschlüsse: Der Bentonit kann dabei gepresst in Form von Mauersteinen oder lose als Pellets und Pulver in Schüttung eingesetzt werden. Je nach den geforderten Eigenschaften können verschiedene Bentonite eingesetzt werden. Es sind auch Gemische von Bentonit und Sand oder anderen Mineralen möglich
- Bitumen für Gleitschichten zwischen Dichtungselementen und Gebirge und als viskose Dichtungsmittel in Dichtungsschlitzten von Dichtungselementen

- Asphalte (Splitt, Sand, Steinmehl und Bitumen) für Dichtungsschlitzte von Dichtungselementen in Schachtverschlüssen. Je nach Anforderungen an den Asphalt können die Mischungsverhältnisse variieren
- Salzbeton (Bindemittel Zement) z. B. für Widerlager oder Dichtelemente
- Sorelbeton (Bindemittel Magnesiabinder) für Widerlager oder Dichtelemente
- Stahl zur Bewehrung von Beton.

Da sich für viele Baustoffe der Nachweis deren Langzeitstabilität als schwierig gestalten würde, bietet sich der Einsatz von natürlichen Materialien für die statischen Widerlager an. Die Langzeitstabilität von Basalt kann z. B. durch das bereits in Kapitel 4.2.4.1 aufgeführte Natürliche Analogon der Basaltintrusionen im Werra-Fulda-Gebiet beschrieben werden /KNI 94/, /KNI 95/.

Die für die Langzeitstabilität kritischen Bestandteile der Verschlussbauwerke sind die Materialien für die Dichtelemente. Eingesetzt werden vor allem Tone (Bentonite) und Bitumen oder Asphalt. Ihr Langzeitverhalten sollte durch Natürliche Analoga abgesichert werden.

5.2.1 Langzeitstabilität von Bentonit

Bentonite spielen als Puffer- oder Versatzmaterial in fast allen Endlagerkonzepten eine wichtige Rolle. In dem im Vorhaben ISIBEL erarbeiteten Verschlusskonzept ist Bentonit vor allem als Dichtelement im Schachtverschluss vorgesehen, das die Grubenbaue gegen Zuflüsse aus dem Deckgebirge abdichtet /KRE 08/. Wichtige Eigenschaften der Bentonite, die auf ihrem hohen Gehalt an Smektiten beruhen, sind ihre geringe hydraulische Leitfähigkeit und ihre Quellfähigkeit. Diese Quellfähigkeit soll bei Verwendung von teilgesättigtem, vorkompaktiertem Bentonit dazu führen, dass bei Wiederaufsättigung mit Wasser durch den Quellvorgang die Hohl- und Porenräume effizient abgedichtet werden. Die Dichtwirkung des Bentonits im Schachtverschluss muss über den Zeitraum gewährleistet sein, bis die versetzten Strecken eine genügend niedrige Permeabilität erreicht haben und die Barrierefunktion übernehmen. Weitere wichtige Eigenschaften von Bentonit sind dessen hohe Sorptionskapazität sowie die langfristige Pufferung des chemischen Milieus. Diese letztgenannten Eigenschaften spielen insbesondere für Endlagerkonzepte in Granit eine wichtige Rolle. Sie sind für ein Endlager im Salzgestein nicht von Relevanz.

Thermische Beeinflussung von Bentonit. Veränderungen der Bentoniteigenschaften können durch Wechselwirkung mit Grundwasser (Änderung des geochemischen Milieus) oder durch hohe Temperaturen auftreten. Umwandlungen des Bentonits führen zu einem Verlust seiner Quellfähigkeit und können damit die hydraulische Funktion beeinflussen. Dass diese Umwandlungen stattfinden, unterstreicht die Tatsache, dass natürliche Bentonit-Vorkommen nicht älter als $4 \cdot 10^8$ Jahre sind /SME 99/.

Die Ergebnisse vieler Studien deuten aber auch darauf hin, dass die Umwandlungsprozesse sowohl kinetisch gehemmt als auch durch ein begrenztes Angebot von Ionen wie Kalium im Grundwasser limitiert sind. Dadurch wird es in den Zeiträumen, die für Langzeitsicherheitsanalysen relevant sind, durch eine Änderung des geochemischen Milieus nicht zu einem vollständigen Verlust der Quellfähigkeit des Bentonits kommen /SIT 96/, /PUS 87/. In all diesen Studien wurden allerdings keine hochsalinaren Lösungen betrachtet.

Die Umwandlung von Bentoniten durch Wärmeeinfluss konnte durch einige Analoga bestätigt werden. So wurden verschiedene Bentonite aus Sardinien von /PUS 88/ untersucht. Aus diesen Untersuchungen geht hervor, dass in einem Temperaturbereich von 150 °C bis 200 °C eine Umwandlung von Bentonit stattfindet. Als weitere Natürliche Analoga für die Einwirkung von Wärme auf Tone wurde in Großbritannien (Isle of Skye), in Frankreich (Col du Perthus) und Italien (Orciatico) die Einwirkung natürlicher Magma-Einschlüsse auf ihre tonige Umgebung untersucht /PEL 99/. Die beobachteten spezifischen Veränderungen im Tongefüge und in den Toneigenschaften waren vielfältig und variabel. Es ließ sich keine Leitgröße herausarbeiten, aus der auf einfache Weise z. B. ein Anhaltspunkt für die Festlegung einer kritischen Obergrenze für die Erwärmung des Tons für ein Endlager ableitbar wäre. Als Ergebnis einer Optimierung verschiedener beobachteter Einflussgrößen plädieren die Autoren für einen Grenzwert von 100 °C . Auch /MIL 94/ schlussfolgert aus den untersuchten Natürlichen Analoga, dass bei Temperaturen unter 150 °C eine vollständige, temperaturbedingte Umwandlung von Bentonit etwa 10^7 Jahre dauert. Die Erkenntnisse decken sich mit Ergebnissen, die aus Laborversuchen abgeleitet wurden und bestätigen diese damit. Im Sicherheitskonzept wird Bentonit nur als Verschlussmaterial im Schachtverschluss eingesetzt. Im Bereich des Bentonit-Dichtelementes werden durch die eingebrachten Abfälle maximale Temperaturen von 40 °C – 50 °C erreicht. Eine relevante thermische Beeinflussung des Bentonits ist daher nicht zu erwarten.

Die Untersuchung dieses Analogons zeigt, dass die Bestätigung von Laboruntersuchungen mit Hilfe Natürlicher Analoga einen wertvollen Beitrag zur Vertrauensbildung unter den Experten leisten kann und die wesentlich längere Zeitdimension des Analogons die aus Laborversuchen bekannten Resultate ergänzt /BRA 08/.

Beeinflussung von Bentonit durch saline Lösungen. Laboruntersuchungen mit hoch salinaren Lösungen und MX-80 Bentonit /HER 04/, einem natürlichen Na-Bentonit aus den USA (Wyoming), deuten darauf hin, dass es unter diesen Bedingungen zu Mineralveränderungen im Bentonit kommt. Je nach Randbedingungen (offenes oder geschlossenes System) wurden Produkte einer Illitisierung bzw. einer Kaolinisierung nachgewiesen, die zur Reduktion der Wasseraufnahmekapazität und des Quelldrucks führen. Allerdings sind Extrapolationen über Zeiträume, in denen es zu einer vollständigen Umwandlung kommt, nicht möglich. Diese Information ist aber gerade wichtig, da der für die Schachtabdichtung vorgesehene Bentonit über einen langen Zeitraum seine Dichtfunktion erfüllen muss, nämlich bis die versetzten Strecken eine genügend niedrige Permeabilität erreicht haben (s. o.).

Analogastudien können dazu beitragen, Umwandlungsprozesse in Bentonit in hoch salinaren Systemen über sehr lange Zeiträume zu ermitteln. In /KAR 04/ wurde natürlicher Bentonit aus San José in Spanien, der hoch salinaren Porenwässern ausgesetzt war, mit MX-80 Bentonit aus Wyoming verglichen. Die an beiden Bentoniten durchgeführten Analysen zeigen, dass die für die Endlagerung wichtigen Eigenschaften des Bentonits, nämlich Quelldruck und hydraulische Leitfähigkeit, trotz der Einwirkung der salinaren Wässer weitgehend noch denen des Wyoming Bentonits entsprachen. Dieses Analogon sollte hinsichtlich der Randbedingungen genauer ausgewertet werden, um eine Aussage über lange Zeiträume zu gestatten.

Ein Natürliches Analogon, das das Langzeitverhalten von Ton in Dichtelementen im Salinar über lange Zeiträume dokumentiert, ist die abdichtende Wirkung von Salztönen in den Salzgesteinen der deutschen Zechsteinevaporite /GRU 03/. Ursprünglich abgelagerte Smektiten sind allerdings nicht mehr nachweisbar. Die Salztöne bestehen heute, neben Quarz, vorwiegend aus Illit, Chlorit und Kaolinit. Die Untersuchungen an den verschiedenen Salztönen haben gezeigt, dass diese Schichten, obwohl sie keine quellfähigen Smektiten mehr enthalten, dennoch auch über lange Zeiträume bis heute eine Dichtfunktion ausgeübt haben. Dieses Analogon wird von den Autoren als konservatives Analogon bezeichnet, da die natürlichen Systeme im Vergleich zu den technischen

Systemen ungünstigeren Bedingungen unterworfen waren (kein trockener Zustand zu Beginn etc.).

5.2.2 Langzeitstabilität von zementhaltigen Materialien

Die Verwendung von Betonen in einem Endlager im Salinar wird insbesondere hinsichtlich ihrer Eignung als Dichtelement in Streckenverschlüssen diskutiert. Ein entsprechender Verschluss wurde bereits im Endlager Morsleben für schwach- und mittelradioaktive Abfälle realisiert. Bei einem Endlager für hochradioaktive, wärmeentwickelnde Abfälle stellen die Streckenverschlüsse eine wichtige geotechnische Barriere dar, die bei einem potentiellen Lösungszufluss in den Infrastrukturbereich den Einlagerungsbereich abdichten. Streckenverschlüsse müssen so lange gegen Fluide dicht sein, bis der Streckenversatz aus Salzgrus soweit kompaktiert ist, dass er eine ähnlich niedrige hydraulische Leitfähigkeit wie das umgebende Salzgestein aufweist /BOL 08/. Entsprechend ist neben der Langzeitentwicklung der Auflockerungszone auch die Langzeitstabilität der vorgesehenen Materialien für einen Streckenverschluss von großer Bedeutung.

Veränderungen der Betone können durch Wechselwirkung mit den Lösungen im Grubengebäude auftreten. Laborexperimente zeigen z. B., dass Salzbetone gegenüber hochsalinaren NaCl-Lösungen stabil sind, allerdings von Mg-haltigen Lösungen korrodiert werden.

Aussagen über Korrosionsfortschritte/-raten können aus Laborexperimenten gewonnen werden. In Abb. 5.2 sind Ergebnisse aus Korrosionsuntersuchungen von Beton in Umgebung hochsalinärer Magnesiumsulfat-Lösungen gezeigt. Die meisten experimentellen Untersuchungen beschränkten sich auf Versuchszeiträume von weniger als einem Jahr. Untersuchungen über längere Zeiträume, wie z. B. die auf der SchachanlageASSE II durchgeführten Experimente, sind selten. Obwohl die experimentellen Daten bei doppelt logarithmischer Auftragung einen linearen Zusammenhang vermuten lassen, ist aufgrund der völlig fehlenden Daten für Versuchszeiten von über 13 Jahren eine Extrapolation gemessener Korrosionstiefen auf Zeiträume um 10.000 Jahre nicht vertretbar. An dieser Stelle könnten Ergebnisse von Studien entsprechender Analoga wertvolle Informationen liefern.

Die Nutzung von Zementen bei Baumaßnahmen ist seit etwa 5.000 v. Chr. nachgewiesen /LAM 96/. Anfängen von Kalkmörteln für Estriche und Böden entwickelte sich

das Anwendungsgebiet weiter zur Verwendung von Mörtel beim Mauerbau und schließlich zum "römischen Beton", dem *opus caementitium*. Noch immer zeugen zahlreiche aus dieser Zeit erhaltene Bauten von einem technologischen Fortschritt, der erst zum Ende des 19. bis Anfang des 20. Jahrhunderts wieder erreicht wurde.

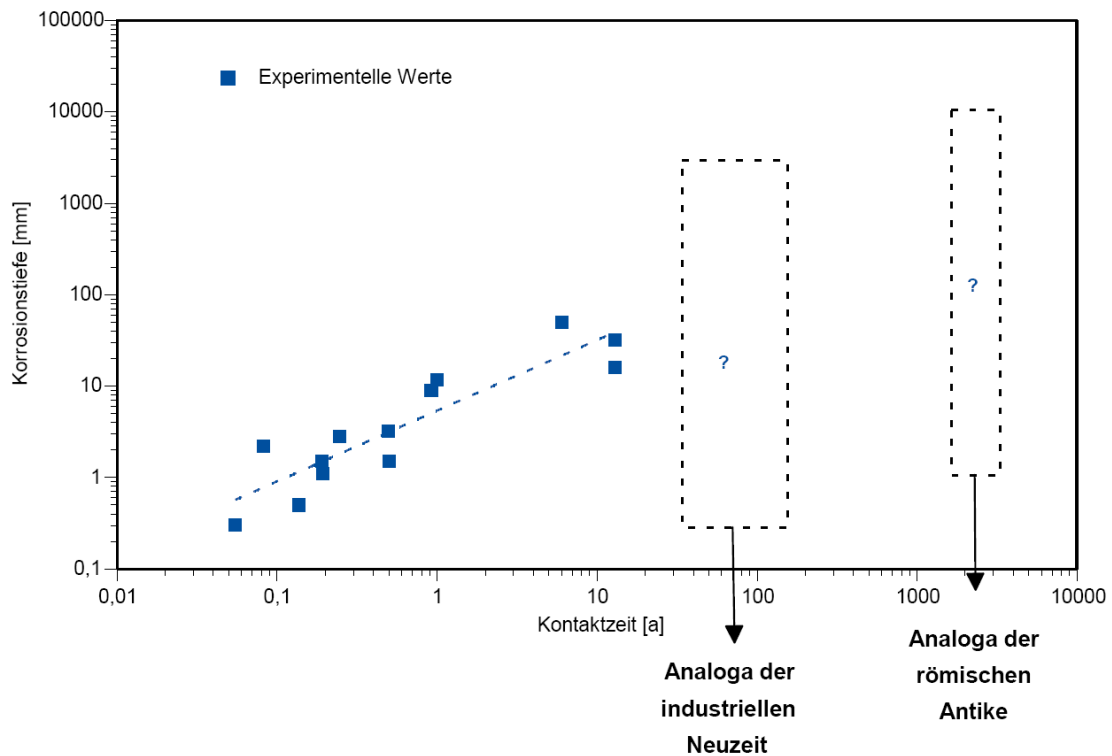


Abb. 5.2 Experimentell bestimmte Korrosionstiefen beim Umsatz Sulfat resistenter Mörtel und Betone mit Magnesiumsulfat reichen Lösungen (gestrichelte Linie: Ausgleichsgerade der experimentellen Daten) und mögliche Bedeutung von Analoga-Studien /HAG 09/

/ROY 82/, /ROY 83/, /MAL 87/ und /JUL 90/ untersuchten die Korrosion historischer Betonbauten, um hieraus Aussagen über die Langzeitbeständigkeit von zementhaltigen Baustoffen in Endlagerprojekten abzuleiten. Bei den untersuchten Proben handelt es sich ausschließlich um Baustoffe, die auf dem Festland eingesetzt wurden. Die beobachtete Korrosion ist daher auf den Einfluss der Atmosphäre oder auf einen gegebenenfalls vorhandenen (Grund-) Wasserfluss zurückzuführen. Mit den Verhältnissen in einem Endlager im Salzgestein sind diese Randbedingungen der Untersuchungen nicht direkt vergleichbar. Hierfür wären Untersuchungen an Betonbauten notwendig, die zumindest teilweise salinaren Verhältnissen, wie z. B. dem Meerwasser, ausgesetzt waren.

Aus archäologisch-historischen Veröffentlichungen zu römischen Hafengebäuden im Mittelmeerraum lassen sich jedoch einige generelle Aussagen entnehmen /MCC 87/, /LAM 96/. Wichtige Beispiele römischer Hafengebäuden sind die Anlagen in Pozzuoli, Cosa und Ostia in Italien oder in Ampurias (Spanien). Hier stehen die Molen zum Teil noch immer im Wasser des Mittelmeeres, so wie sie vor etwa 2.100 bis 2.200 Jahren errichtet wurden. Die Anlagen sind dort nicht nur dem Sulfat- und Magnesiumangriff des Meerwassers, sondern auch dem mechanischen Abrieb durch die Meeresbrandung und der Zerstörungswirkung durch Kleintiere und Muscheln ausgesetzt. Die Pfeiler der Anlagen haben besonders in Höhe des Wellenganges mehrere Meter an Dicke verloren. Die verbleibenden Betonreste weisen aber noch immer eine beachtliche Festigkeit auf (16 – 20 N/mm²). Es ist daher anzunehmen, dass noch keine vollständige Korrosion des Bauwerkes stattgefunden hat. Die Mole in Ampurias (Emporiae) besteht aus einem von Steinblöcken geschützten Betonkern, der die Zeiten zumindest äußerlich gut überstanden hat.

Aus den vorliegenden Informationen geht hervor, dass der mechanische Abrieb die entscheidende Zerstörungswirkung für historische Hafengebäuden im Kontakt mit Meerwasser darstellt. Für weitergehende Aussagen, insbesondere zum Korrosionsfortschritt bei noch erhaltenen Bauwerken, wären Detailuntersuchungen unter physikalisch-chemischen Aspekten notwendig. Es fehlen auch Erklärungen, weshalb einige Bauten noch stehen, während andere bis auf geringfügige Reste verschwunden sind.

Zusätzlich sind aber auch qualitative Informationen von Bedeutung. In /WAK 94/ wurden Beobachtungen an Sulfat-resistenten technischen Zementstrukturen zusammengestellt, um die Ergebnisse von Laborexperimenten zu stützen. Ein wesentlicher Aspekt ist, dass diese Strukturen scharfe Korrosionsfronten zeigen, die langsam in den Beton eindringen. Hinter der Front weist der Zement noch seine ursprünglichen chemischen und physikalischen Eigenschaften auf, wogegen sich die Festigkeit und hydraulischen Eigenschaften vor der Front aufgrund von Auflösungs- und Ausfällungsprozessen signifikant verändert haben. Entsprechend scharfe Fronten treten auch bei den Simulationen im Rahmen der Sicherheitsanalyse für das ERAM auf. Das Analogon liefert damit ein Argument zur Untermauerung des verwendeten Modells.

5.2.3 Verhalten von organischen Materialien

Im Hinblick auf die Verwendung von bitumenhaltigen Materialien wurden Untersuchungen zu Haltbarkeit und Langlebigkeit, zu Wechselwirkungen mit der Umgebung und zu mikrobieller Zersetzung durchgeführt.

Die Bitumensorten, die ggf. in einem Endlager Verwendung finden werden, werden technisch unter kontrollierten Bedingungen hergestellt und haben daher eine genau bekannte charakteristische Zusammensetzung. Im Gegensatz dazu schwankt die Zusammensetzung von natürlichem Bitumen, da sie das Ergebnis unbekannter, komplexer und langdauernder geologischer Prozesse sind. Direkte Vergleiche von technischen und natürlichem Bitumen sind daher problematisch und der Aussagewert von Untersuchungen an natürlichen Bitumen Analoga wird deswegen beschränkt. In verschiedenen Arbeiten finden sich jedoch hilfreiche qualitative Hinweise.

Es gibt viele natürliche Bitumen- bzw. Asphaltvorkommen, die die Haltbarkeit dieser bitumenartigen Materialien zeigen. Im Trinidadier Asphaltsee sind solche Materialien sogar an der Erdoberfläche anzutreffen. Eine gut dokumentierte Studie zur Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen wie Oxidation und Mikrobentätigkeit wurde an einer bitumenhaltigen Kalksteinformation aus dem Jura in Holzen, Niedersachsen durchgeführt /HEL 89/. Der Horizont mit hohem Gehalt an organischem Material wurde vor ca. 70 Millionen Jahren oberflächennahen Bedingungen ausgesetzt. Die Beobachtungen zeigen, dass das Bitumen nicht autochthon vorliegt, sondern den Rückstand einer früheren Erdölakkumulation darstellt. Trotz Unterschieden in einzelnen Teilfraktionen zeigen die Elementzusammensetzung, die Fraktionen in der Chromatographie und die physikalischen Eigenschaften des Materials eine hohe Ähnlichkeit mit technischem Bitumen /HEC 00/. Das Bitumen befindet sich aber immer noch in einem abbaufähigen Zustand. Außerdem zeigen Proben, die nahe der Oberfläche der Formation entnommen wurden, direkte Anzeichen von Oxidation durch Kontakt mit der Atmosphäre und Licht. Trotz dieser Veränderungen blieben die physikalischen Eigenschaften des Materials weitgehend erhalten, was ein Indiz für seine lange Haltbarkeit ist. Die geochemischen Bedingungen dieses Natürlichen Analogons weichen allerdings von denen in einem Endlager ab.

5.3 Kompaktionsverhalten des Salzgrusversatzes

Im Endlagerkonzept wird Salzgrus als Versatz für den Infrastrukturbereich und die Strecken vorgesehen. Bei der vertikalen Bohrlochlagerung werden die verbleibenden Resthohlräume zwischen Abfallgebinde und Bohrlochkontur ebenfalls mit Salzgrus aufgefüllt. Nach Verschluss des Endlagers werden die verbliebenen Resthohlräume im Endlager durch den Konvergenzprozess reduziert und das Versatzmaterial kompaktiert. Unmittelbar nach Verfüllung hat der Salzgrus eine Anfangsporosität von etwa 35 %. Diese soll während des Kompaktionsprozesses auf einen Wert kleiner 1 % zurückgehen, der dem des ungestörten Salzgesteins entspricht. Die Kompaktion des Salzgruses ist von einer Vielzahl von Parametern abhängig, die sich gegenseitig beeinflussen und nicht mit der erforderlichen Genauigkeit bestimmt werden können /KRO 08/:

- Mineralogie des Salzgruses
- Kornverteilung
- Kompaktionsgeschwindigkeit
- Temperatur
- Materialfeuchte
- Spannungszustand

Die gesteinsmechanischen Prozesse verlaufen bei der Kompaktion über sehr lange Zeiträume, die nicht von Laborexperimenten abgedeckt werden. Daher kommt der Untersuchung entsprechender natürlicher Analoga für diesen Prozess eine besondere Bedeutung zu.

Als technische Analoga für die Kompaktion können Untersuchungen von Versatzmaterial, das in versetzten ehemaligen Bergwerken über Jahrzehnte kompaktiert wurde, eingesetzt werden. Notwendige Voraussetzungen sind Kenntnisse über die Eigenschaften des eingebrachten Versatzes, über die Entwicklung der versetzten Hohlräume und über die geologischen Verhältnisse in der Umgebung.

Als Natürliches Analogon lässt sich das Beispiel aus dem ehemaligen Salzbergwerk Asse II heranziehen (Abb. 4.3): Dort zeigt eine mehrere Jahrzehnte alte Strecke auf der 750 m-Sohle in unmittelbarer Nähe des Kaliflözes Staßfurt, die mit Salzgrus, Asche

und Bauschutt versetzt wurde, die mit der Konvergenz einhergegangenen bruchlosen plastischen Verformungen des Carnallitits. Der dabei komprimierte Versatz hat eine hohe Dichte erreicht, die durch Eigenkompaktion allein niemals erreicht werden könnte /BRE 99/. Allerdings handelt es sich bei diesem Versatz nicht um homogenen Salzgrusversatz. Des Weiteren ist die Höhe der Strecke nicht mit den Streckengeometrien in einem HAW-Endlager vergleichbar, so dass dieses Beispiel nur eingeschränkt als Natürliches Analogon einsetzbar ist.

Um weitere noch besser geeignete Natürliche Analoga zu identifizieren, wurde in /BRE 99/ eine Analyse durchgeführt, welche Anforderungen entsprechende Analoga-Standorte zu erfüllen haben. Konkretes Ziel war es, Standorte zu identifizieren, unter denen eine erhebliche Reduktion der ursprünglichen Versatzporosität von 40 % auf Werte von ca. 10 % zu erwarten sind. Modellrechnungen zeigen, dass an Standorten, an denen stützende Anhydrit-Schichten vorhanden sind, die Konvergenz so langsam erfolgt, dass innerhalb einiger 100 Jahre keine signifikante Kompaktion zu erwarten ist. An Standorten ohne Anhydrit-Schichten sind Versatzporositäten < 10 % ab Teufen von 800 m zu erwarten. Erste Proben aus entsprechenden Teufen an den als geeignet identifizierten Untersuchungsstandorten Salzdetfurth und Riedel zeigen, dass eine deutliche Kompaktion stattgefunden hat /BRA 08/.

Insgesamt gibt es wenige Untersuchungen, die Natürliche Analoga hinsichtlich des Kompaktionsgeschehens in versetzten Strecken dokumentiert haben. Für diesen wichtigen Aspekt im Langzeitsicherheitsnachweis wäre eine detaillierte Betrachtung wünschenswert.

6 Natürliche Analoga für die Bewertung von Freisetzungsszenarien

Dem Sicherheits- und Nachweiskonzept gemäß sind für den Nachweis des sicheren Einschlusses die Prozesse innerhalb des ewG ausschlaggebend. Nur wenn die Geringfügigkeit der Freisetzung von Schadstoffen aus dem ewG in einem Szenarium nicht gezeigt werden kann (vereinfachte radiologische Langzeitaussage), ist auch die Ausbreitung der Schadstoffe im Deckgebirge zu betrachten /BMU 10/. Die in diesem Kapitel zusammengestellten Natürlichen Analoga fokussieren sich daher auf die relevanten Prozesse innerhalb des ewG, d. h. auf die Prozesse in der Salzformation (Kapitel 6.1). In Kapitel 6.2 werden zusätzlich aber auch die wesentlichen Natürlichen Analoga für Rückhaltungsprozesse im Deck- und Nebengebirge aufgeführt.

Für die Bewertung von Freisetzungsszenarien wird vermehrt auf chemische Analoga (so genannte Homologe) zurückgegriffen, d. h. das Verhalten der Radionuklide, die aus den Abfällen freigesetzt werden können, wird mit Hilfe von Untersuchungen an anderen, chemisch ähnlichen, Elementen bewertet. Das ist notwendig, da einige in den Abfällen vorkommende Radionuklide nicht oder nur in äußerst niedrigen Konzentrationen in der Natur vorkommen (z. B. Plutonium). Eingesetzte chemische Analoga sind z. B. /MIL 94/:

- Europium (und andere Lanthanide) für dreiwertige Actiniden
- Rhenium für Technetium
- Thorium für vierwertiges Plutonium und vierwertiges Neptunium
- Uran für sechswertiges Plutonium und fünfwertiges Neptunium

6.1 Radionuklid-Rückhaltung im Nahfeld

Im Sicherheitskonzept von ISIBEL wird den Abfallbehältern keine einschlusswirksame Funktion zugeschrieben. Es ist bei der Betrachtung von Freisetzungsszenarien daher davon auszugehen, dass die Behälter im Falle eines Lösungszutritts zu den Abfällen auf Grund der mechanischen Belastung bereits ausgefallen sind und die Abfallmatrizes in direktem Kontakt mit der Lösung stehen.

Die entscheidenden in diesem Bericht zu betrachtenden Prozesse sind daher:

- Stabilität der Glasmatrix in den HAW-Kokillen
- Stabilität der Uranmatrix in den Brennstabkokillen (BSK)
- Rückhaltung von Radionukliden

Sollte ein verändertes Konzept gewählt werden, bei dem den Behältern eine einschlusswirksame Funktion zugeschrieben wird, muss zusätzlich auch die Langzeitstabilität von Metallen betrachtet werden. Für diesen Prozess gibt es eine Vielzahl von Natürlichen Analoga, z. B. /PET 92b/, /MIL 94/.

6.1.1 Stabilität der Glasmatrix

Für die Verfestigung von hochradioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung wird Borosilikatglas verwendet. Die Borosilikatgläser werden dann in HAW-Kokillen abgefüllt und endgelagert (410 kg Glas pro Kokille). Da es im Falle eines Wasser- bzw. Lösungszutritts in Einlagerungsbereiche eines Endlagers nach einem Ausfall der Behälter zu einem Kontakt der Gläser mit den Lösungen kommen kann, sollte das Verhalten von Borosilikatglas mit Hilfe von Natürlichen Analoga analysiert werden. Die Untersuchung Natürlicher Analoga trägt dabei insbesondere zur Ermittlung von experimentell schwer zugänglichen Langzeitkorrosionsraten bei.

Generell dienen die Natürlichen Analoga von Gläsern zur Demonstration der Stabilität und Haltbarkeit von Glas. Das Vorhandensein zahlreicher natürlicher Gläser mit einem Alter von mehr als einer Million Jahre ist ein wichtiges Indiz für die Haltbarkeit von Glas und trägt zur Vertrauensbildung bei. Als mittleres Alter natürlicher Gläser werden etwa zwei Millionen Jahre angegeben /MIL 00/.

Bei Analoga-Studien zur Langzeitstabilität von Gläsern ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen natürlichen Gläsern und archäologischen Objekten. Natürliche Gläser entstehen durch eine sehr schnelle Abkühlung von Lava oder Magma, bei der es nicht zu einer Ausbildung von Mineralphasen kommt. Basaltische Gläser zeigen auf Grund ihres niedrigen SiO₂-Gehaltes die größte Ähnlichkeit zu Borosilikatglas und eignen sich daher am besten für Analoga-Studien. Es muss allerdings einschränkend berücksichtigt werden, dass Bor in den meisten natürlichen Gläsern nur in Spurenkonzentrationen

vorkommt, während die technischen Borosilikatgläser Borgehalte von bis zu 20 % aufweisen /PET 92b/.

Ein wichtiges Argument dafür, das Basaltglas als Analogon für Borosilikat verwendet werden kann, ergibt sich aus den Ergebnissen von /LUT 85/. Sie zeigen, dass beide Gläser bei Korrosion unter erhöhten Temperaturen (200 °C) in NaCl-Lösung die gleichen Korrosionsprodukte bilden. In den Rasterelektronen-Mikroskop Aufnahmen in Abb. 6.1 ist unter a) und b) die Ausbildung von Amalgit-Mineralen auf beiden Glasoberflächen zu sehen. Bei höherer Auflösung (c – f) ist eine Plattenstruktur bei beiden Gläsern zu erkennen und bei höchster Auflösung sieht man ebenfalls bei beiden Gläsern die gleichen kristallinen Rosettenstrukturen, die die Autoren als Tone interpretieren.

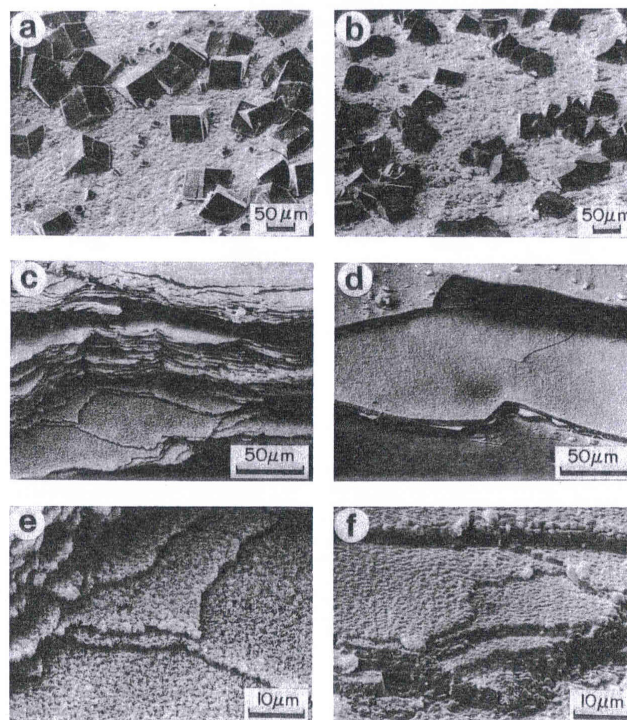


Abb. 6.1 Mikroskopische Strukturen von Borosilikat- (links) und Basalt-Gläsern (rechts), die einer NaCl-Lösung unter hohen Temperaturen ausgesetzt waren /LUT 85/; Details siehe Text

Da es sich bei Glas um eine metastabile Substanz handelt, kann es über lange Zeiträume zu einer Umwandlung in stabile Mineralphasen kommen. Diese Veränderung kann zu einer beschleunigten Korrosion der Matrix führen. In den meisten natürlichen Gläsern sind Spuren einer solchen Umwandlung zu beobachten. Die beobachteten Zeiträume für eine vollständige Umwandlung variieren zwischen einigen 1.000 und einigen 10 Millionen Jahren. Eine wichtige Beobachtung ist, dass die Umwandlung

durch Vorhandensein von Wasser beschleunigt wird. Diese Aussage wird gestützt durch die Ergebnisse von Untersuchungen an mehr als 3,5 Milliarden Jahre alten Gläsern vom Mond (wo kein freies Wasser existiert), an denen nur geringe Spuren einer Umwandlung nachgewiesen worden sind. Quantitative Aussagen zur Umwandlungsdauer von Borosilikatgläsern in einem Endlager können daraus nicht abgeleitet werden, da in den meisten Fällen Informationen über die Zusammensetzung der anstehenden Wässer und die thermischen Bedingungen in der Vergangenheit fehlen.

Bei der Alterung von Gläsern spielen Ionenaustauschprozesse, Hydrolysereaktionen und Ausfällungsreaktionen sekundärer Mineralphasen eine wichtige Rolle. Diese Prozesse führen dazu, dass sich an der Glasoberfläche unterschiedliche Schichten aufbauen. Die Bildung dieser Schichten kann dazu führen, dass die Glaskorrosionsraten über lange Zeiträume abnehmen, da Diffusionsprozesse durch die neu gebildeten Schichten die Korrosion verlangsamen /MIL 94/. Großen Einfluss auf die Glasauflösung haben hydraulische Bedingungen und Parameter wie Temperatur sowie geochemische Eigenschaften der Lösung (insbesondere pH- und Eh-Wert), außerdem die Silikatkonzentration. So ist es bei Analoga-Studien besonders relevant, ob diese Bedingungen über den gesamten Zeitraum vorhanden waren oder sich in der Vergangenheit verändert haben. In einer Untersuchung von /GRA 86/ an natürlichen Gläsern konnte beispielsweise ein Zweiphasenprozess nachgewiesen werden. In der ersten Phase war das Glas auf dem Meeresgrund salzhaltigem Wasser direkt ausgesetzt. In diesem Zeitraum lagen die Auflösungsraten relativ hoch und es bildeten sich aufgrund des geringen Silikatgehaltes des Meerwassers keine authigenen Zementphasen. Im zweiten Stadium, als das Glas von pelagischen Sedimenten bedeckt war, stieg die Silikatkonzentration im Porenwasser schnell an und es bildeten sich authigene Zementphasen auf dem Glas, die bewirkten, dass der Transport nur noch diffusiv erfolgte. Die dann beobachteten Auflösungsraten lagen um mehrere Größenordnungen niedriger.

Ein wichtiger Aspekt sind Unterschiede zwischen den Randbedingungen der Untersuchung von /GRA 86/ und denen in einem Endlager. In einem Endlager im Salzgestein ist im Rahmen der zu betrachtenden Freisetzungsszenarien nur ein sehr geringer Wasserfluss zu erwarten. Außerdem sind die chemischen Bedingungen um die Behälter meist reduzierend. Bei diesbezüglichen Analogastudien ist dagegen der Wasserzutritt häufig nicht begrenzt und die Wässer sind meist oxidierend. Daher können die in solchen Analogastudien beobachteten Korrosionsraten nicht direkt verwendet werden,

sondern stellen allenfalls unter Extrembedingungen ermittelte Obergrenzen dar /BRA 08/.

6.1.2 Stabilität der Uranmatrix

Dem Endlagerkonzept gemäß wird die direkte Endlagerung der ausgedienten Brennelemente aus den Druck- und Siedewasserreaktoren zu Grunde gelegt. Die Mechanismen bei der Auflösung der Uranmatrix sind mit kurzzeitigen Laborversuchen unter kontrollierten Bedingungen gut untersucht. Natürliche Analoga sichern diese Untersuchungen an natürlich vorkommenden Materialien ab. Als analoge Materialien für die Uranmatrix in den Brennstäben kommt vor allem Uraninit in Frage, da es die gleiche Struktur wie UO_2 -Brennstoff aufweist /SME 99/. Es ist allerdings zu beachten, dass prinzipielle Unterschiede existieren: Abgebrannter Brennstoff enthält im Gegensatz zum Uraninit viele Spaltprodukte, während Uraninit normalerweise einen höheren Anteil an nicht radioaktiven Substanzen besitzt. Des Weiteren ist UO_2 -Brennstoff im Reaktor viel höheren Temperaturen und Temperaturgradienten ausgesetzt als die meisten natürlichen Uraninit-Anreicherungen. Sowohl die Temperaturgradienten, die Spaltprodukte selbst sowie auch die Strahlung durch die Spaltprodukte können im Brennstoff Rissbildungen und Gitterdefekte und damit eine erhöhte Reaktivität gegenüber wässrigen Lösungen zur Folge haben /MIL 94/.

Die UO_2 -Matrix stellt eine wichtige Barriere für die Radionuklide dar. Aus diesem Grund existieren zahlreiche Untersuchungen zur Korrosion von abgebranntem Brennstoff und zur Freisetzung von Radionukliden. Die Korrosion von abgebranntem Brennstoff hängt stark von den Redoxbedingungen ab. Unter reduzierenden Bedingungen verläuft die Auflösung von UO_2 extrem langsam. Unter oxidierenden Bedingungen werden viel höhere Auflösungsraten erreicht, allerdings erst, wenn der Oxidationszustand des Brennstoffs die Stufe U_3O_7 überschreitet. Da Endlager in Formationen errichtet werden, in denen reduzierende Wässer auftreten, spielt Radiolyse eine wichtige Rolle. Durch Radiolyse werden reaktive oxidierende Substanzen wie OH-Radikale, H_2O_2 oder O_2 gebildet, die zur Veränderung der Redoxbedingungen und damit zu einer erhöhten UO_2 -Auflösung führen, wenn der ebenfalls gebildete, weniger reaktive Wasserstoff aus dem System rascher migriert als der Sauerstoff.

Auflösungsraten von natürlichen UO_2 -Mineralphasen können durch Messung von einzelnen Isotopen wie Tc-99 oder I-129, die aus der Matrix freigesetzt wurden, ermittelt

werden. Solche Messungen wurden an den Standorten Oklo und Cigar Lake durchgeführt. Unter Verwendung des Tracers Tc-99, in seiner anionischen Form, bzw. dessen stabiler Tochter Ru-99 wurden mittlere Auflösungsraten von $1,1 - 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ a}^{-1}$ ermittelt /MIL 00/. Die Raten, die in Cigar Lake über die Freisetzung von I-129 ermittelt wurden, liegen allerdings zwei Größenordnungen darunter. Zur Erklärung dieser Unterschiede besteht noch FuE-Bedarf.

Einen wichtigen Beitrag zum radiolyseabhängigen Freisetzungsmodell lieferte die Studie Cigar Lake /SME 96/, /GOO 89/. Die Anwendung der derzeit in Langzeitsicherheitsanalysen verwendeten Radiolysemodelle ergab viel zu hohe Konzentrationen an Oxidantien, die zu einer vollständigen Oxidation der Uranerze in 18 bis 170 Millionen Jahren geführt hätten, d. h. der 1,9 Milliarden Jahre alte Erzkörper müsste demnach längst in oxidiertem Zustand sein. Dieses Ergebnis führte zur Entwicklung neuer Radiolysemodelle, die insbesondere die Reichweite der α -Strahlung in Abhängigkeit von der Größenverteilung der UO_2 -Mineralkörner und die Geometrie dünner Wasserschichten zwischen den Mineralkörnern berücksichtigen. Die Ergebnisse der Modellrechnungen zeigen, dass nur ein kleiner Anteil der gesamten Strahlungsenergie von wenigen Prozent zur Bildung von oxidierenden Substanzen in der die Mineralkörner umgebenden wässrigen Phase führt. Dieser Aspekt ist ein gutes Beispiel dafür, dass Analogstudien zur Modellentwicklung für Sicherheitsanalysen beitragen können /CRA 86/, /CRA 94/, /CRA 95/.

Die Studie am Standort Peña Blanca in Mexiko /MUR 97/ ist ein Analogon für solche Endlager, in denen oxidierende Bedingungen erwartet werden. An diesem Standort wurde ein vor ca. 8 Millionen Jahren gebildetes Uraninit-Vorkommen für etwa drei Jahre oxidierenden Wässern ausgesetzt. Dies hat zur Oxidation des Uraninits und zur Bildung sekundärer sechswertiger Uranminerale wie Uranophan, Soddyit und Schoepit geführt. Nur ein geringer Anteil Uraninit ist verblieben.

6.1.3 Rückhaltung von Radionukliden

Für den Fall, dass Lösungen zu den Abfällen gelangt sind, Radionuklide mobilisiert werden konnten und ein Transportmedium und ein Transportweg für die mobilisierten Radionuklide zur Verfügung steht, bilden Adsorption, Ionenaustausch, Ausfällung und Mitfällung in sekundären Mineralphasen die wesentlichen Rückhalte-mechanismen für die gelösten Radionuklide. Sorption führt im Wesentlichen zu einer Verlangsamung des

Radionuklidtransports, Ausfällung und Mitfällung führen in erster Linie zu einer Begrenzung der Radionuklidkonzentration.

Im Nahfeld eines Endlagers im Salz ist Salzgrus als Versatz vorgesehen. An Steinsalz und anderen im Salzgrus vorhandenen Mineralphasen ist die Sorption der Radionuklide so gering, dass sie zu keiner signifikanten Rückhaltung führt. Daher spielt Sorption in den versetzten Strecken keine Rolle bei der Rückhaltung von Radionukliden. Im Salzgestein ist daher nur die Sorption von Radionukliden an Korrosionsprodukten im Einlagerungsbereich, bzw. in Streckenverschlüssen verwendeten Materialien wie Salzbeton von Bedeutung.

Für die Mitfällung von Radionukliden sind sekundäre Mineralphasen, die bei der Umsetzung von Materialien im Einlagerungsbereich gebildet werden, verantwortlich. Hier sind insbesondere Mineralphasen von Bedeutung die während der Korrosion der Glasmatrix, bzw. der Metallbehälter gebildet werden. Die Mitfällung bei der Bildung von sekundären Salzmineralen ist nur dann von Bedeutung, wenn nach der Radionuklidfreisetzung wesentliche Umlöseprozesse im Salz stattfinden.

Durch Sauerstoffkorrosion von Eisen, Stahl und Aluminium (Bildung von Wasserstoff) stellen sich im Endlager in relativ kurzer Zeit reduzierende Verhältnisse ein. Die danach einsetzende anaerobe Korrosion (Bildung von Wasserstoffgas bei Abwesenheit von Sauerstoff) spielt eine wichtige Rolle bei der Betrachtung der geochemischen Verhältnisse im Endlager. Produkte, die bei der anaeroben Korrosion von Metallen entstehen, wie z. B. Magnetit in NaCl-reichen oder Eisen(II)-Hydroxide in Mg-reichen Salzlösungen, haben gute Sorptionseigenschaften für Radionuklide. Dies konnte in zahlreichen Laboruntersuchungen bestätigt werden, z. B. /DUR 08/, /ROJ 09/. Analog-Informationen zur Rückhaltung von Radionukliden an Eisenoxiden und Eisenhydroxiden finden sich z. B. in der Analogstudie „Alligator River“ (Australien) /EDI 94/. Hier zeigt sich eine stark ausgeprägte Assoziation von Uran mit diversen Eisenoxiden. Etwa 40 - 60 % des Urans sind entweder durch Sorption oder durch Einbau in Korrosionsprodukte gebunden worden /NOS 00/.

Ein weiterer wichtiger Prozess ist die Rückhaltung von Radionukliden in sekundären Mineralphasen bei der Glaskorrosion. Trotz der großen Anzahl an Analogstudien zur Glaskorrosion wurden nur in wenigen Fällen die Rückhalteeigenschaften sekundärer Korrosionsprodukte untersucht. In Analogstudien an Island-Basalten wurde das Verhalten von Lanthaniden als Homologe für dreiwertige Aktiniden untersucht /DAU 94/.

Für Lanthanide deuten begleitende Massenbilanz-Rechnungen darauf hin, dass der Einbau in sekundäre Mineralphasen eine bedeutendere Rolle spielt als die Sorption.

Natürliche Analoga zeigen die Bedeutung der Sorption von Radionukliden, an bzw. deren Einbau in Korrosionsprodukten. Hinsichtlich der Rückhaltung von Radionukliden an Korrosionsprodukten über lange Zeiträume gibt es aber bisher noch keine Studien, aus denen quantitative Informationen abgeleitet werden können /SME 99/. Das gilt insbesondere für die Bedingungen in einem Endlager in einer Salzformation. In bisherigen Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager im Salz wurde von der Rückhaltung an Korrosionsprodukten kein Kredit genommen, da entweder die Langzeitstabilität der Mineralphasen oder auch die Modellansätze noch nicht abgesichert waren. Dieser Prozess wird aber als so genannter Reserve-FEP behandelt, d. h. dieser FEP wirkt positiv auf die Langzeitsicherheit und kann damit als ein zusätzliches qualitatives Argument im Sicherheitsnachweis herangeführt werden. Die Stärke dieses Arguments wird durch die Untermauerung mit Analogastudien, die eine Mitfällung und Immobilisierung über lange Zeiträume zeigen, erhöht.

Die Löslichkeit und Speziation von Radionukliden werden über geochemische Modelle mit Hilfe von chemisch thermodynamischen Codes und Datenbanken ermittelt. Als Analoga zur Überprüfung der Modelle und Datenbanken wurden in der Vergangenheit so genannte Blind Predictive Modeling Studien u. a. in El Berrocal, Maqarin, Osamu Utsumi, Cigar Lake und Palmottu durchgeführt. Letztendlich wird dabei versucht, die Konzentration der Radionuklide bei Kenntnis der im System vorhandenen Mineralphasen mit den geochemischen Codes nachzuvollziehen. Die Erfahrungen dieser Arbeiten sind z. B. in Übersichtsarbeiten von /MIL 00/ und /BRU 02/ zusammengefasst und diskutiert worden. Alle diese Studien wurden aber nicht unter Berücksichtigung hoch salinärer Systeme durchgeführt. Zur Überprüfung der für salinare System neu entwickelten Datenbasis (THEREDA) und der verwendeten Modellansätze wäre es sinnvoll, Systeme zu identifizieren, bei denen die Mobilität der langzeitsicherheitsrelevanten Elemente in hochsalinaren Systemen durch Mineralphasen begrenzt werden. Für diese Systeme sollten Modellrechnungen zur Speziation und gelösten Konzentration der Elemente durchgeführt und mit den natürlichen Konzentrationen verglichen werden.

Als ein genereller Hinweis auf die geringe Mobilität von Lanthaniden in Salzlösungen können die Basaltgänge aus dem Werra-Fulda-Lagerstättenbezirk angeführt werden. Eine Mobilisierung von Lanthaniden als chemische Homologe für entsprechende Aktiniden, aus den alterierten basaltischen Gläsern konnte ebenso wenig nachgewiesen

werden, wie aus den unlöslichen Silikatanteilen im Salzgestein. Trotz hoher Temperaturen und signifikanter Stoffumsätze nach Zutritt fluider Komponenten in den basaltischen Glas- bzw. Mineralphasen sind sowohl die ursprüngliche absolute als auch die relative Lanthaniden-Verteilung dort nicht verändert worden.

6.2 Radionuklid-Rückhaltung im Deckgebirge

Als Natürliche Analoga zur Wechselwirkung von Radionukliden mit Sedimenten im Deckgebirge eines Salzstocks wurden Standorte untersucht, an denen Migrationsprozesse von Radionukliden, insbesondere Uran, in der geologischen Vergangenheit in quartären und tertiären Sedimenten aufgetreten und heute noch nachweisbar sind. Da diese Prozesse häufig nahe der Erdoberfläche für die Beobachtung gut zugänglich sind, existiert dazu bereits eine Reihe gut dokumentierter Natürlicher Analoga.

Eine sehr illustrative Studie, die zeigt, dass Radionuklide zwar mobil sein können, ihr Transport in Gesteinen aber auch über lange Zeiträume begrenzt ist, ist die Analogastudie Alligator River /DUE 92/. An dem Standort haben sich Redoxbedingungen in der Umgebung eines Uranerzes vor ca. 6 Millionen Jahren von reduzierenden zu oxidierenden Bedingungen geändert. Dadurch wurde sechswertiges Uran mobilisiert. Es hat sich eine Uranfahne mit einer Längsausdehnung von etwa 200 m ausgebildet. Die Untersuchungen zeigen, dass eine starke Sorption des Urans an den Sedimenten (speziell Eisenoxiden) die Ausbreitung des Urans sehr stark begrenzt hat.

Aus Verteilungen von natürlichen Radionukliden/Elementen in der flüssigen Phase und an der Matrix von Grundwasser-/Sedimentsystemen können so genannte in-situ K_d -Werte ermittelt werden. Bei der Ermittlung von in-situ K_d -Werten ist insbesondere zu beachten, dass nur die leicht zugängliche, mit dem Wasser im Gleichgewicht stehende, sorbierte Elementfraktion berücksichtigt werden darf, da ja ein Wert für die Gleichgewichtssorption ermittelt werden soll. Daher wurde für die Ermittlung des sorbierten Elementanteils nicht der Gesamtgehalt im Sediment sondern nur der mit 1M Essigsäure extrahierbare Anteil zu Grunde gelegt.

Derartige Untersuchungen wurden beispielsweise von /GEC 99b/ an Sedimenten des Deckgebirges über dem Salzstock in Morsleben durchgeführt. Sie können zum direkten Vergleich mit Ergebnissen aus Laboruntersuchungen (üblicherweise Adsorptions- und Desorptions-Batch-Experimente) herangezogen werden, um diese Ergebnisse zu un-

termauern. In der oben genannten Studie wurden die Elemente Strontium, Uran, Thorium und die Lanthaniden (als Homologe für trivalente Actiniden) untersucht.

Die Ergebnisse zeigen, dass für die meisten Proben in-situ und Labor- K_d -Werte gut übereinstimmen. Es gibt kein Sediment-Grundwasser-System, für das der in-situ K_d -Wert signifikant geringer ist als der im Labor gemessene. Dieses Ergebnis erhöht das Vertrauen in die Laborwerte, aus denen Parameter für die Transportprogramme ermittelt werden. In denjenigen Sedimenten, die einen hohen Gehalt an Calcit aufweisen, liegen die in-situ K_d -Werte, speziell für Uran, deutlich höher als die Laborwerte. Grund dafür ist der Einbau von Uran in Calcitminerale. Calcit wird durch Essigsäure gelöst, wodurch das darin eingebaute Uran einen erhöhten sorbierten Anteil vortäuscht.

Das geochemische Verhalten und die langfristige Rückhaltung von Uran in tertiären und quartären Sedimenten, die auch einen Teil des Deckgebirges eines Salzstocks bilden, kann an Lokationen mit analogen Verhältnissen und erhöhten natürlichen Urangehalten nachgewiesen werden. Hierzu liegen beispielsweise Ergebnisse von geochemischen in-situ Messungen aus dem Egergraben vor /NOS 06/, /NOS 08b/, /NOS 09b/. Diese Arbeiten zeigen, dass sedimentäre Schichten eine starke Barrierefunktion für Uran aufweisen können, wenn bestimmte Randbedingungen erfüllt sind. Unter den stark reduzierenden Bedingungen in den Ton/Lignit-Horizonten am Standort Ruprechtov (nahe Karlovy Vary, CZ) wurde Uran über Millionen Jahre zurückgehalten, ohne dass es Hinweise auf eine signifikante Uranfreisetzung gibt. Diese Ergebnisse zeigen auch die Langzeitstabilität der geologischen Barriere in der Sedimentformation trotz starker oberflächlicher Erosionsprozesse, die in der geologischen Vergangenheit an dem Standort stattgefunden haben.

Am Standort Ruprechtov konnten die wesentlichen Prozesse, die zur Immobilisierung von Uran in einem komplexen natürlichen System beigetragen haben, identifiziert werden. Außerdem wurde ein konsistentes Bild vom geochemischen Verhalten von Uran und der Rolle organischer Materie erhalten. Der Uranhorizont befindet sich heute in einer Tiefe von 20 bis 50 Metern. Trotz einer hohen Anreicherung im Sediment (bis zu 600 ppm) sind die Konzentrationen im Grundwasser mit ca. 10^{-9} mol/l sehr niedrig und durch amorphes UO_2 und Ningyoit kontrolliert, die als Haupt-Uranminerale im Sediment gefunden werden. Die geringen Uran-Konzentrationen können sehr gut mit den vorhandenen thermodynamischen Daten (NEA-TDB) nachvollzogen werden und stärken damit auch das Vertrauen in die Datenbasis.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Untersuchungen am Standort Ruprechtov ist, dass die Bedeutung von mikrobiellen Prozessen, insbesondere auch bei der Rückhaltung von Uran, identifiziert und charakterisiert werden konnte. In diesem Fall konnte gezeigt werden, dass Sulfat-reduzierende Mikroben in komplexer Weise das System beeinflusst haben und auch heute noch beeinflussen (erkennbar an typischen ^{34}S -Signaturen). Die Sulfatreduktion führte zur Bildung von Pyriten, auf deren Oberflächen dünne Schichten von Arsenopyrit abgelagerten, die später zur Reduktion des sechswertigen Urans führten. Durch den mikrobiellen Abbau des organischen Materials wurden Phosphate freigesetzt, die zur Ausfällung von Ningyoit führten. Weiterhin werden (und wahrscheinlich wurden in der Vergangenheit) die Redoxbedingungen durch die Sulfatreduktion bestimmt. Organischer Kohlenstoff war demnach nicht direkt – durch Sorption von Uran an der Oberfläche – sondern indirekt, durch seinen Einfluss auf das geochemische Milieu, an der Uran-Rückhaltung beteiligt. Diese Ergebnisse führen zu einem verbesserten Verständnis des geochemischen Verhaltens von Uran in einem natürlichen Sedimentsystem und sind auch im Hinblick auf die in einem Safety Case zu betrachtenden Prozesse von Bedeutung.

Die erzielten Erkenntnisse können in einem Safety Case für ein Endlager für radioaktive Abfälle als zusätzliche Argumente für die Rückhaltung von Uran in sedimentären Formationen verwendet werden und die Rolle der Geosphäre als natürliche Barriere für die Radionuklid-Migration über sehr lange Zeiträume auch für eine breite Öffentlichkeit nachvollziehbar verdeutlichen.

7 Zusammenfassung und Bewertung

In Teil 1 des vorliegenden Berichtes wird die mögliche Rolle von Natürlichen Analoga im Hinblick auf deren Verwendung im Rahmen des im FuE-Vorhaben ISIBEL erarbeiteten Sicherheits- und Nachweiskonzeptes bewertet. Dafür wurde in den Kapiteln 4 bis 6 überprüft, an welchen Stellen des Langzeitsicherheitsnachweises für ein HAW-Endlager im Salzgestein bereits bekannte Studien als Natürliche Analoga wirksam eingesetzt werden können. Da sich viele bisher dokumentierte Natürliche Analoga auf die Wirtsgesteine Ton oder Granit beziehen, ist eine Übertragbarkeit der Natürlichen Analoga nicht immer gegeben. Speziell wegen der generell hohen Salinität von potentiell in ein Endlager im Salzgestein zutretenden Lösungen sind viele Studien nicht direkt verwendbar, z. B. bei der Beurteilung der Stabilität von Bentonit. Neben der Auswertung bereits dokumentierter Natürlicher Analoga wurde untersucht, für welche Aspekte Natürliche Analoga als Argumente im Langzeitsicherheitsnachweis für ein HAW-Endlager im Salzgestein sinnvoll einsetzbar wären, aber zurzeit noch nicht ausreichend dokumentiert sind. Dabei wurden z. T. auch einzelne, bisher nicht betrachtete Aspekte identifiziert, für die der Einsatz natürlicher Analoga sinnvoll wäre.

Um eine Bewertung durchführen zu können, wurde das Sicherheits- und Nachweiskonzept in seine wesentlichen Bestandteile aufgeteilt: Integritätsnachweis der geologischen Barriere, Integritätsnachweis der geotechnischen Barrieren und Bewertung nicht auszuschließender Freisetzungsszenarien. Durch die Verknüpfung der Szenarienanalyse mit diesen drei Komponenten haben alle Natürlichen Analoga, die diesen Komponenten zugeordnet sind, auch eine Bedeutung für die Szenarienanalyse. Die Zuordnung der Natürlichen Analoga zu den Komponenten des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes wurde an Hand der relevanten FEP für diese Komponenten durchgeführt. Die relevanten FEP ergeben sich aus den bisherigen Ergebnissen aus dem FuE-Vorhaben ISIBEL (berücksichtigt wurde nur die Bohrlochlagerung von BSK und HAW-Kokillen):

- Geologische Beständigkeit von Salzformationen
- Neotektonische Ereignisse
- Subrosion
- Diapirismus
- Zerblockung der Anhydritschichten

- Fluidvorkommen im Salzgestein
- Verheilung von Rissen
- Temperaturbeständigkeit von Salzgesteinen
- Integraler hydraulischer Widerstand von Verschlussbauwerken
- Langzeitstabilität von Bentonit
- Langzeitstabilität von zementhaltigen Verschlussmaterialien
- Langzeitstabilität von organischen Verschlussmaterialien
- Kompaktionsverhalten von Salzgrusversatz

Bei der Bewertung von Freisetzungsszenarien sind zusätzlich zu betrachten:

- Stabilität der Glasmatrix
- Stabilität des Uranbrennstoffes
- Rückhaltung von Radionukliden an Korrosionsprodukten
- Löslichkeiten von Radionukliden im salinaren Milieu

Der Stand der Natürlichen Analoga hinsichtlich dieser FEP wurde in den Kapiteln 4 bis 6 beschrieben. Um diese Beschreibungen in einer übersichtlichen Form zusammenzustellen, wird der Stand in diesem Kapitel an Hand von fünf verschiedenen Klassen zusammenfassend bewertet:



- ++ Natürliches Analogon ist identifiziert und gut dokumentiert
- + Natürliches Analogon ist identifiziert, aber nicht ausreichend dokumentiert
- ∅ Natürliches Analogon ist identifiziert, aber nicht dokumentiert
- Natürliches Analogon ist nicht identifiziert
- Natürliches Analogon ist (wahrscheinlich) nicht identifizierbar

Bei den Natürlichen Analoga für den Integritätsnachweis der geologischen Barriere (Tab. 7.1) wird bei der Bewertung noch zwischen der Beschreibung am Standort („Selbstanalogon“ (S)) und der Beschreibung anderer Standorte (A) unterschieden. Der Standort Gorleben wird in diesem Bericht beispielhaft als der geplante Endlagerstand-

ort angesehen. Die Bewertung des Selbstanalogons bezieht sich somit auf die Erkenntnisse über den Salzstock Gorleben (bzw. bei den ersten beiden Natürlichen Analoga in Tab. 7.1 auf die norddeutsche Tiefebene). Sollte ein anderer Standort ausgewählt werden, wären die Erkenntnisse über den Salzstock Gorleben den übrigen Natürlichen Analoga zuzuordnen. Da am Standort Gorleben keine Basaltintrusionen stattgefunden haben, existiert für dieses Phänomen kein Selbstanalogon und es wird dementsprechend keine Bewertung abgegeben.

Die Einteilung der Natürlichen Analoga basiert auf der Einschätzung der Experten aus den in ISIBEL-II beteiligten Institutionen. Für die Einschätzung war die Identifikation (und Dokumentation) eines einzigen Analogons ausreichend. Generell gilt für Natürliche Analoga aber, dass deren Gewicht als Argument im Sicherheitsnachweis auch abhängig ist von der Anzahl von geeigneten Naturbeobachtungen auf die die Dokumentation des Natürlichen Analogons gestützt ist.

Die in den Kapiteln 4 bis 6 zusammengestellten Natürlichen Analoga und ihre Bewertung werden mit Hilfe der Tab. 7.1 bis Tab. 7.3 zusammengefasst. Neben der bereits erläuterten Bewertung des Standes der Natürlichen Analoga zu den relevanten FEP findet sich in diesen Tabellen auch eine Bewertung hinsichtlich der Möglichkeit, das entsprechende Natürliche Analogon zur Kommunikation mit der Öffentlichkeit zu verwenden. Diese Bewertung wurde aufgenommen, da die Verbesserung der Kommunikation mit der Öffentlichkeit als eine wesentliche Aufgabe Natürlicher Analoga im Langzeitsicherheitsnachweis angesehen wird. Basierend auf der Komplexität der zu beschreibenden Prozesse wurde in den Tab. 7.1 bis Tab. 7.3 eine Einschätzung vorgenommen hinsichtlich der Aspekte:

-  eher für die Kommunikation mit Experten geeignet
-  eher für die Kommunikation mit der Öffentlichkeit geeignet

Für die Außendarstellung eines Langzeitsicherheitsnachweises ist es zudem wichtig, dass der Antragsteller nicht den Anschein erweckt, dass er mit den Natürlichen Analoga nur die Naturbeobachtungen darstellt, die einen positiven Einfluss auf die Sicherheit eines Endlagersystems haben. Auch Prozesse, die die Sicherheit des Endlagersystems beeinträchtigen können und deren Auftreten durch Natürliche Analoga bestätigt wird, sollten explizit aufgeführt werden.

Für das Sicherheitskonzept in Salz sind dies vor allem:

- Subrosion des Salzstockes
- Umwandlung des Bentonits
- Temperaturempfindlichkeit von Carnallit
- Kryogene Risse am Salzspiegel
- Mobilisierung von Uranverbindung unter oxidierenden Bedingungen

Gerade für diese Punkte ist dann im Langzeitsicherheitsnachweis zu zeigen, wie durch das Endlagerkonzept sichergestellt wird, dass diese FEP nicht sicherheitsrelevant werden können (z. B. durch eine ausreichende Tiefenlage des Endlagers oder durch ausreichende Sicherheitsabstände zu Carnallit).

Einige Argumente, die einen positiven Effekt auf die Endlagersicherheit haben, werden nicht in der Konsequenzenanalyse berücksichtigt. Dafür kann es verschiedene Gründe geben, z. B. unzureichende Prognosemöglichkeiten eines FEP. Solche Reserve-FEP sollten als qualitative Argumente zusammengestellt und durch Natürliche Analoga untermauert werden. Ein bereits genanntes Beispiel ist die Rückhaltung der Radionuklide an Korrosionsprodukten.

In den Tab. 7.1 bis Tab. 7.3 ist neben den Bewertungen auch die Literatur zu dem entsprechenden Natürlichen Analogon angegeben. Neben der Literatur speziell zu den einzelnen Natürlichen Analoga existiert aber auch noch eine Reihe von Übersichtsartikeln und allgemeinen Bewertungen zu Natürlichen Analoga, die in die Bewertungen mit eingeflossen sind, aber nicht noch einmal explizit aufgeführt werden: /BRA 08/, /GRU 04/, /KNI 95/, /HER 98/, /HER 07/, /MCK 01/, /MIL 94/, /MIL 00/, /NOS 00/, /NOS 07/, /NOS 08a/, /PET 92b/, /REM 07/, /SME 97/, /SME 99/, /STE 96/.

Tab. 7.1 Mögliche Natürliche Analoga für die Integrität der geologischen Barriere

Analogon	Anwendung (Kapitel)	Literatur	Klasse
Existenz von Salzstöcken in Norddeutschland	Langzeitstabilität von Salzstöcken (4.1.1)	/JAR 73/ /JAR 80/ /KOC 99/ /TRU 57/	S: ++ A: + ☀☀
Stabilität neotektonischer Verhältnisse	Auftreten von Erdbeben und magmatischen Ereignissen (4.1.2)	/BAL 01/ /KOC 02/ /LEY 80/ /LEY 02/	S: ++ A: -- ☀☀
Mächtigkeit und Zusammensetzung des Hutgesteins	Subrosionsraten (4.2.1)	/BOR 86/ /JAR 94/ /ZIR 91/	S: ++ A: + ☀☀
Analyse der Randsenken	Aufstiegsraten (4.2.1)	/JAR 80/ /ZIR 91/	S: ++ A: + ☀
Zerblockung spröder Salzformationen in einem Salzstock	Keine durchgehende Wegsamkeiten, z. B. im Anhydrit (4.2.2)	/BOR 08/ /ZUL 09/ /ZUL 10/	S: + A: ∅ ☀☀
Br- (und Rb-) Verteilung in Mineralen oder Gesteinen	Wechselwirkung von externen Lösungen mit dem Salzstock (4.2.2)	/BEC 08/ /BRA 63a/ /BRA 63b/ /HER 00a/ /MAT 94/ /MAT 95/ /SCH 60/	S: ++ A: ++ ☀
Chemische Zusammensetzung von Fluideinschlüssen in Salzformationen	Wechselwirkung von externen Lösungen mit dem Salzstock (4.2.2)	/HER 91a/ /HER 91b/ /HER 93/ /HER 95/ /HER 00a/ /HER 00b/ /HER 07/ /BOR 91/ /BOR 92/ /RÜH 95/ /POP 02/	S: ++ A: ++ ☀
Chemische und Isotopen-Zusammensetzung von Gaseinschlüssen in Salzformationen	Migration von Gasen im Salzstock (4.2.2)	/SIE 01/ /POT 04a/ /POT 04b/ /MEN 05/ /POP 02/	S: ++ A: ++ ☀
Untersuchung von Grubenbauen des Salzbergbaus	Verhalten von Steinsalz im Untergrund (4.2.3)	/BRE 99/	S: ∅ A: + ☀☀
Basaltintrusionen in Fulda-Werra Serie des Zechsteins	Verheilung von Rissen (Selbstverheilung) und bruchhaften Verformungen (4.2.3)	/KNI 85/ /KNI 89/ /KNI 94/	S: -- A: ++ ☀☀
Basaltintrusionen in Fulda-Werra Serie des Zechsteins	Salzverhalten gegenüber hohen Temperaturen (4.2.4)	/BRO 81/ /KNI 89/ /KNI 94/	S: A: ++ ☀
Kryogene Klüfte in norddeutschen Salzdiapiren	Entstehung und Verhalten von aufgrund abkühlungsbedingter Kontraktion des Salzes gebildeter Klüfte (4.2.4)	/BAU 91/	S: - A: + ☀

Tab. 7.2 Mögliche Natürliche Analoga für die Integrität der geotechnischen Barriere

Analogon	Anwendung (Kapitel)	Literatur	Klasse
Dammjoch in der Schachtanlage Asse II	Reduktion der Permeabilität einer EDZ um Streckenverschlüsse (5.1.1)	/BEC 04/ /ROT 03/ /WIE 01/ /WIE 03/	+ ☀
Basaltintrusionen in Salzformationen (z. B. Fulda-Werra Serie des Zechsteins)	Langzeitverhalten von Basaltschotter als Teil des Schachtverschlusses im Salinar (5.1.2)	/KNI 89/ /STE 97/ /STE 99/ /BRO 81/	++ ☀☀
Chemische und mineralogische Zusammensetzung natürlicher Tonvorkommen	Temperaturempfindlichkeit von Tonmineralien (5.1.2)	/PEL 99/	++ ☀
Eigenschaften natürlicher Salztone in den Salzlagern des Zechsteins	Langzeitverhalten von Tonen/Bentoniten als Dichtelementmaterialien im Salinar (5.1.2)	/SIT 98/ /GRU 03/	+ ☀
Korrosion historischer Betonbauten	Langzeitverhalten von zementhaltigen Materialien (5.1.2)	/JUL 90/ /LAM 96/ /MAL 87/ /ROY 82/ /ROY 83/	++ ☀
Bentonite in salinärer Umgebung	Langzeitstabilität von Bentonit als Dichtelement im Salinar (5.1.2)	/KAR 04/ /KAS 02/ /SIT 96/	+ ☀
Chemische und mineralogische Zusammensetzung natürlicher Bitumenvorkommen	Langzeitverhalten von Bitumen/Asphalten als Dichtelementmaterialien (5.1.2)	/HEC 00/ /HEL 89/	+ ☀
Umsetzung von organischen Materialien	Grenzen mikrobieller Gasbildung aus organischem Material in geologischen Zeiträumen (5.1.2)	/BRA 03/	+ ☀
Kompaktiertes Versatzmaterial aus verfüllten Strecken und Schächten in Salzbergwerken	Kompaktion von Salzgrus über lange Zeiträume (5.2)	/BRE 99/	∅ ☀

Tab. 7.3 Mögliche Natürliche Analoga für die Bewertung von Freisetzungsszenarien

Analogon	Anwendung (Kapitel)	Literatur	Klasse
Stabilität natürlicher Basaltgläser	Korrosion von Borosilikatglas (6.1.1)	/KNI 94/ /GRA 86/	+ ☀
Uraninit-Vorkommen	Korrosion der Uranmatrix (6.1.2)	/SME 96/ /GOO 89/	+ ☀☀☀
Basaltgläser in salinärer Umgebung	Bildung sekundärer Phasen bei der Glaskorrosion und Rückhaltung von Radionukliden (6.1.3)	/BRA 92/ /CRO 85/ /GRA 86/ /GÖM 01/ /KNI 94/ /LUT 85/ /STA 95/ /STE 97/ /STE 99/	+ ☀
Einbau und Sorption von Radionukliden	Rückhaltung von Radionukliden an Korrosionsprodukten bei der Metallkorrosion (6.1.3)	/EDI 94/ /NOS 00/	+ ☀
Lanthanoid-Verteilungen in wasserunlöslichen Mineralfractionen mariner Evaporitgesteine	Mobilität von Lanthanoiden (als chemische Homologe für Aktiniden) in Salzformationen (6.1.3)	/BRA 92/ /PET 92a/ /STA 95/	+ ☀
Fällung natürlicher Elemente bei der Entstehung und Umbildung von Salzlagerstätten	Rückhaltung von Radionukliden im Salzstock durch Einbau bei der Ausfällung von Salzen (6.1.3)		- ☀
Verhalten von Radionukliden hochsalinaren Systemen. (z. B. Solen von geothermischen Tiefbohrungen, Kalifornien)	Radionuklidretardation unter hochsalinaren Bedingungen (6.1.3)	/ZUK 87/ /LAU 84/ /LAU 85/ /LAU 88/ /SZA 80/	+ ☀
In-situ Kd Werte in sedimentären Formationen (Morsleben, Gorleben)	Absicherung von aus Laborexperimenten bestimmten Kd-Werten für das Deckgebirge (6.2)	/GEC 99a/ /GEC 99b/ /GEC 03/	+ ☀
Uranmigration am Standort Ruprechtov	Verhalten von Uran und Thorium in tertiären Sedimenten im Deckgebirge eines Endlagers (6.2)	/NOS 06/ /NOS 08b/ /NOS 09a/ /NOS 09b/	+ ☀

Literatur zu Teil 1

- /APP 98/ Appel, D.; Habler, W.: Quantifizierung postholsteinzeitlicher Subrosion am Salzstock Gorleben durch statistische Auswertung von Bohrerergebnissen. - Mitt. geol. Inst. Univ. Hannover, Vol. 38, pp. 7-30, 1998.
- /AUT 02/ Autin, J.W.: Landscape evolution of the Five Islands of south Louisiana: scientific policy and salt dome utilization and management. - Geomorphology, Vol. 47, pp. 227-244, 2002.
- /BAL 01/ Baldschuhn, R.; Binot, F.; Fleig, S.; Kockel, F.: Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor. Strukturen, Strukturentwicklung, Paläogeographie. - Geol. Jb., A 153, Hannover, 2001.
- /BAU 91/ Bauer, J.: Kryogene Klüfte in norddeutschen Salzdiapiren? - Zbl. Geol. Paläont., Vol. 1(4), pp. 1247-1261, Stuttgart, 1991.
- /BFS 02/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Verzeichnis der Vorkommen salinärer Lösungen im Erkundungsbergwerk Gorleben sowie in einigen Bereichen des Salzstocks Gorleben (Lösungsverzeichnis Gorleben). - Bundesamt für Strahlenschutz, 2002. Abrufbar unter http://www.bfs.de/de/endlager/erkundungsbergwerk_gorleben/geologie/loesungsverzeichnis_gorleben.html
- /BEC 04/ Bechthold, W.; Smailos, E.; Heusermann, S.; Bollingerfehr, W.; Bazargan Sabet, B.; Rothfuchs, T.; Kamlot, P.; Grupa, J.; Olivella, S.; Hansen, F.D.: Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS-II Project), EUR 20621 EN, Luxembourg, 2004.
- /BEC 08/ Becker, F.: Geology of the salt deposit at the brine field Urcoit near Bayonne, France, - Kali und Steinsalz, Heft 3/2008, S. 36-45, 2008.
- /BIS 93/ Bish, D.L., Aronson, J.L.: Paleogeothermal and paleohydrologic conditions in silicic tuff from Yucca Mountain, Nevada. - Clays and Clay Minerals, Vol. 41 (2), pp. 148-161, 1993.

- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, Stand 30. September 2010. Abrufbar unter: http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-im-port/files/pdfs/allgemein/application/pdf/sicherheitsanforderungen_endlagerung_bf.pdf (22.07.2010)
- /BOL 08/ Bollingerfehr, W.; Filbert, W.; Pöhler, M.; Tholen, M.; Wehrmann, J.: ISIBEL Abschlussbericht „Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW“. - Aufgabenpaket AP 1.2 Konzeptionelle Endlagerplanung. DBE Technology GmbH, TEC-20-2008-AP, Peine, 2008.
- /BOR 86/ Bornemann, O.; Fischbeck, R.: Ablaugung und Hutgesteinsbildung am Salzstock Gorleben. - Z. dt. Geol. Ges., Vol. 137, pp. 71-83, 1986.
- /BOR 91/ van Borstel, L.E.: Die Charakterisierung des Stoffbestands von fluid inclusions in Zechsteinevaporiten mittels der Lösungsgleichgewichte mariner Salzsysteme. - Kali und Steinsalz, Vol. 10, pp. 409-416, Essen, 1991.
- /BOR 92/ van Borstel, L.E. : Lösungen in marinen Zechsteinevaporiten Deutschlands. - Dissertation, TU Clausthal, 1992.
- /BOR 08/ Bornemann, O.; Behlau, J.; Fischbeck, R.; Hammer, J.; Jaritz, W.; Keller, S.; Mingerzahn, G.; Schramm, M.: Standortbeschreibung Gorleben. Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen geologischen Erkundung des Salinars. - Geol. Jb., C 73, Hannover, 2008.
- /BRA 63a/ Braitsch, O.; Herrmann, A.G.: Zur Geochemie des Broms in salinaren Sedimenten: Teil I: Experimentelle Bestimmung der Br-Verteilung in verschiedenen natürlichen Salzsystemen. - Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 27 (4), pp. 361-391, 1963.

- /BRA 63b/ Braitsch, O.; Herrmann, A.G.: Zur Geochemie des Broms in salinaren Sedimenten Teil II: Die Bildungstemperaturen primärer Sylvin- und Carnallit-Gesteine. - *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 28 (7), pp. 1081-1109, 1963.
- /BRA 92/ Brammer, K.J.: Stoffbestand und Lanthanidenverteilung der wasserlöslichen Mineralfraktion in marinen Zechsteinevaporiten. - Dissertation, TU Clausthal, 1992.
- /BRA 03/ Bracke, G.; Müller, K.; Krooß, B.M.; Littke, R.: Natürliche Analoga zur Ableitung der Grenzen der mikrobiellen Gasbildung aus organischem Material in geologischen Zeiträumen. - Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec) GmbH, ISTec-A-721, Köln, 2003.
- /BRA 08/ Brassler, T.; Bletz, B.; Noseck, U.; Schmidt, G.: Anhang Natürliche Analoga. - in: Brassler, T. et al.: Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-247, Köln, 2008.
- /BRE 99/ Brenner, J.; Feddersen, H.K.; Gies, H.; Miehe, R.; Rothfuchs, T.; Storck, R.: Untersuchung von Altversatz als Analogon zur Konvergenz und Kompaktierung versetzter untertägiger Hohlräume im Salz über lange Zeiträume – Phase I. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-147, Köln, 1999.
- /BRO 90/ Brookins, D.G.: Radionuclide behavior at the Oklo nuclear reactor, Gabon. - *Waste Management*, Vol. 10, pp. 285-296, 1990.
- /BRO 81/ Brookins, D.G.: Geochemical study of a lamprophyre dike near the WIPP site. - *Proc. 3rd Int. Symp. on Nuclear Waste Management*, pp. 307-314, New York, 1981.
- /BRU 02/ Bruno, J.; Duro, L.; Grivé, M.: The applicability and limitations of thermodynamic geochemical models to simulate trace element behaviour in natural waters. Lessons learned from natural analogue studies. - *Chemical Geology*, Vol. 190, pp. 371-393, 2002.

- /BUH 08/ Buhmann, D.; Mönig, J.; Wolf, J.; Heusermann, S.; Keller, S.; Weber, J.R.; Bollingerfehr, W.; Filbert, W.; Kreienmeyer, M.; Krone, J.; Tholen, M.: Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW – ISIBEL. - Gemeinsamer Bericht von DBE Technology, BGR und GRS, DBE Technology GmbH, Peine, 2008.
- /BUH 10/ Buhmann, D.; Mönig, J.; Wolf, J.; Keller, S.; Mrugalla, S.; Weber, J.R.; Krone, J.; Lommerzheim, A.: FEP-Katalog für einen HAW-Standort im Wirtsgestein Salz. - Gemeinsamer Bericht von DBE Technology, BGR und GRS, DBE Technology GmbH, Peine, 2010.
- /BUR 96/ Burliga, S.: Kinematics within the Kłodawa salt diapir, central Poland. In: Alsop, G.; Blundell, D.J.; Davison, I. (Eds.): Salt Tectonics. - Geological Society Special Publication No. 100, pp. 11-21, 1996.
- /CHE 09/ Chemia, Z.; Schmeling, H.; Koyi, H.: The effect of the salt viscosity on future evolution of the Gorleben salt diapir, Germany. - Tectonophysics, Vol. 473, pp. 446-456, 2009.
- /CRA 86/ Cramer, J.J.: Sandstone-hosted uranium deposits in northern Saskatchewan as natural analogs to nuclear fuel waste disposal vaults. - Chem. Geol., Vol. 55 (3-4), pp. 269-279, 1986.
- /CRA 94/ Cramer, J.J.; Smellie, J.A.T. (Eds.): Final Report for the AECL/SKB Cigar Lake analog study. - AECL Tech.Rep. (AECL-10851), AECL, Pinawa, Canada, and SKB Tech. Rep. (TR-94-04), SKB, Stockholm, 1994.
- /CRA 95/ Cramer, J.J.: Cigar Lake: A natural example of long-term isolation of uranium. - Am. Nucl. Soc. Radwaste Magazine, Vol. 2 (3), pp. 36-40, 1995.
- /CRO 85/ Crovisier, J.L.; Fritz B.; Grambow, B.; Eberhart, J.P.: Dissolution of basaltic glass in seawater: experiments and their thermodynamic modelling. - Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol. 50, pp. 273-280, 1985.

- /DAU 94/ Daux, V.; Crovisier, J.L.; Hemond, C.; Petit, J.C.: Geochemical evolution of basaltic rocks subjected to weathering: Fate of the major elements, rare earth elements, and thorium. - *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 58 (22), pp. 4941-4954, 1994.
- /DAV 09/ Davison, I.: Faulting and fluid flow through salt. - *Journal of the Geological Society*, Vol. 166, pp. 205-216, London, 2009.
- /DEC 04/ De Craen, M.; Wang, L.; Weetjens, E.: Natural evidence on the long-term behaviour of trace elements and radionuclides in the Boom Clay. - SCK-CEN report R- 3926, Mol, 2004.
- /DUE 92/ Duerden, P.; Lever, D.A.; Sverjensky, D.A.; Townley, L.R.: Alligator Rivers Analogue Project: Final Report, Volume 1 Summary of findings. - OECD/NEA, 1992.
- /DUR 08/ Duro, L.; Aamrani, S.E.; Rovira, M.; de Pablo, J.; Bruno, J.: Study of the interaction between U(VI) and the anoxic corrosion products of carbon steel. - *Applied Geochemistry*, Vol. 23 (5), pp. 1094-1100, 2008.
- /EDI 94/ Edis, R.; Kopp, A.J.; Payne, T.E.; Yanase, N.: Solid phase studies and uranium distribution at Koongarra. - In: von Maravic, H.; Smellie, J.A.T. (Eds.): *Proceedings of the Fifth CEC Natural Analogue Working Group (NAWG) Meeting and Alligator Rivers Analogue Project (ARAP) Final Workshop, Toledo, Spain, October 5-9, 1992*, EUR 15176 EN, pp. 77-82, Luxembourg 1994.
- /ELS 81/ ELSAM (Ed.): *Disposal of High-Level Waste from Nuclear Power Plants in Denmark. Salt dome Investigations. – Vol. II, Geology*. - Fredericia, 1981.
- /GEC 99a/ Geckeis, H.; Klenze, R.; Kim, J.I.: Solid water interface reactions of actinides and homologues: Sorption onto Mineral surfaces. - *Radiochim. Acta*, Vol. 87, pp. 13-21, 1999.

- /GEC 99b/ Geckeis, H.; Vejmelka, P.; Degering, D.; Pohlmann, C.; Gompper, K.; Hentschel, D.; Kim, J.I.: In-situ distribution of trace metals in a natural aquifer overlying the nuclear repository site Morsleben, Germany. - In: Proceedings of the workshop Mineral/water interactions close to equilibrium, FZKA 6291, Karlsruhe, 1999.
- /GEC 03/ Geckeis, H.; Ngo Manh, Th.; Bouby, M.; Kim, J.I.: Aquatic colloids relevant to radionuclide migration characterization by size fractionation and ICP-mass spectrometric detection. - Colloids and Surface, Vol. A 217, pp. 101-108, 2003.
- /GÖM 01/ Gömann, K.: Das Verhalten von Spurenelementen in tertiären Basaltgläsern im Kontakt zu Evaporiten. Eine Elektronenstrahl-Mikrosonden-Studie. - Dissertation TU Clausthal, 2001.
- /GOO 89/ Goodwin, B.W.; Cramer, J.J.; McConnel, D.B.: The Cigar Lake uranium deposit: An analogue for nuclear fuel waste disposal. - IAEA Technical Report Series 304, Vienna, 1989.
- /GRA 86/ Grambow, B.; Jercinovic, M.J.; Ewing, R.C.; Byers, C.D.: Weathered Basalt glass: A natural analogue for the effects of reaction progress on nuclear waste glass alteration. - Scientific Basis for Nuclear Waste Management IX. Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol. 50, pp. 263-272, 1986.
- /GRU 03/ Gruner, M.; Ehlert, K.H.; Schwandt, A.; Sitz, P.: Salzton – Natürliches Analogon für Bentonitdichtelemente im Salinar. - Kali und Steinsalz, Heft 2, S. 12-17, 2003.
- /GRU 04/ Grundfelt, B.; Smellie, J.: Prozessorientierte Auswertung von natürlichen Analoga und ihre Bewertung als vertrauensbildendes Element bei Sicherheitsbewertungen für Anlagen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle. - Kemakta AR 2004-16, 2004.
- /HAG 09/ Hagemann, S.; Xie, M.; Herbert, H.-J.: Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse zur Korrosion von Salzbeton durch saline Lösungen. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3458, Köln, 2009.

- /HEC 00/ Heckers, J.; Hellmuth, K.-H.; Wehner, H.: Degradation of natural bitumen. Implications on the use of technical bitumens in radioactive waste disposal. - Zeitschrift für Geologische Wissenschaften, Vol. 28 (3/4), pp. 441-450, 2000.
- /HEL 89/ Helmuth, K.-H.: Natural analogues of bitumen and bitumenized radioactive waste. - STUK-B-VALO 58, Helsinki, 1999.
- /HER 91a/ Herrmann, A.G.; van Borstel, C.Z.: The composition and origin of fluid inclusions in Zechstein evaporites of Germany. - N. Jb. Miner. Mh., Heft 6, S. 263-269, 1991.
- /HER 91b/ Herrmann, A.G.; Knipping, B.; Schröder, K.; van Borstel, C.Z.: The quantitative analysis of fluid inclusions in marine evaporites. - N. Jb. Miner. Mh., Heft 1, S. 39-48, 1991.
- /HER 93/ Herrmann, A.G.; Knipping, B.: Waste disposal and evaporates: Contributions to long-term safety. - Lecture Notes in Earth Sciences 45, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1993.
- /HER 95/ Herrmann, A.G.; Rühle, S.: Lösungseinschlüsse in Zechsteinevaporiten – Neue Perspektiven in der anwendungsorientierten Grundlagenforschung. - Kali u. Steinsalz, Vol. 11, S. 345-354, 1995.
- /HER 97/ Herrmann, A.G.; Rühle, S.; Usdowski, E.: Fluid inclusions: Neue Erkenntnisse über den Stoffbestand NaCl-gesättigter Meerwasserlösungen im Zechstein 3. - Kali und Steinsalz, Vol. 12, S. 115-124, 1997.
- /HER 98/ Herrmann, A.G.; Röthemeyer, H.: Langfristig sichere Deponien. Situation Grundlagen Realisierung. - Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1998.
- /HER 00a/ Herrmann, A.G.: Br-Profil für das Staßfurt-Steinsalz des Salzstocks Gorleben. - Kali und Steinsalz, Vol. 13, S. 449-459, 2000.
- /HER 00b/ Herrmann, A.G.; Siewers, U.; Harazim, B.; Lodziak, J.; Weck, H.-D.; Straßburg, S.: Die Herkunft von Haupt-, Neben- und Spurenelementen in Salzlösungen der Zechsteinevaporite Mittel- und Norddeutschlands. - Kali und Steinsalz, Vol. 13, S. 771-783, 2000.

- /HER 04/ Herbert, H.-J.; Kasbohm, J.; Moog, H.C.; Henning, K -H.: Long-term behaviour of the Wyoming bentonite MX-80 in high saline solutions. - Applied Clay Science, Vol. 26 (1-4), pp. 275-291, 2004.
- /HER 07/ Herrmann, A.G.; Röthemeyer, H.: Naturbeobachtungen am Geosystem Salzstock Gorleben. Das Unsichtbare sichtbar machen. Forschung, Erkenntnis, Besinnung. - atw Internationale Zeitschrift für Kernenergie, Vol. 52, pp. 333-341, 2007.
- /HOO 08/ Hooker, P.J.; Greulich-Smith, T.: Report on the PAMINA Stakeholder Workshop: Communicating Safety Issues for a Geological Repository. - PAMINA Deliverable (D-N°: D2.1.B.1), Galson Sciences Limited, Sussex, 2008.
- /IAE 06/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Geological Disposal of Radioactive Waste. - IAEA Safety Requirements No. WS-R-4, Vienna, 2006.
- /JAC 90/ Jackson, M.P.A.; Cornelius, R.R.; Craig, C.H.; Gansser, A.; Stocklin, J.; Talbot, C.J.: Salt diapirs of the Great Kavir, Central Iran. - Geological Society of America, Memoir 177, Washington, 1990.
- /JAR 73/ Jaritz, W.: Zur Entstehung der Salzstrukturen Nordwestdeutschlands. - Geol. Jb., A10, Hannover, 1973.
- /JAR 80/ Jaritz, W.: Einige Aspekte der Entwicklungsgeschichte der nordwestdeutschen Salzstöcke. - Z. dt. geol. Ges., Vol. 131 (2), S. 387-408, Hannover, 1980.
- /JAR 94/ Jaritz, W.: Die Entwicklungsgeschichte des Standortes Gorleben als natürliches Analogon für das Langzeitverhalten eines Barrierensystems. - Z. dt. geol. Ges., Vol. 145 (1), S. 192-206, Hannover, 1994.
- /JUL 90/ Jull, S.P.; Lees, T.P.: Studies of historic concrete. Final report. - EUR 12972 EN, Luxembourg, 1990.

- /KAR 04/ Karnland, O.; Sellin, P.; Olsson, S.: Mineralogy and some physical properties of the San José bentonite - a natural analogue to buffer material exposed to saline groundwater. - Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 807, pp. 849-854, 2004.
- /KAS 02/ Kasbohm, J.; Herbert, H. J.: Langzeitstabilität von Tondichtungen. - Ernst Moritz Arndt Universität, Greifswald, 2002.
- /KFK 94/ Kernforschungszentrum Karlsruhe: Natürliche Analoga zur Endlagerung radioaktiver Abfälle. - Sammlung der Vorträge anlässlich des Workshops vom 4. und 5. November 1993, KfK 5323, Karlsruhe, 1994.
- /KIE 80/ Kier, R. S.; Showalter, P.A.; Dettinger, M.D.: Conceptual Model for Radionuclide Transport from a Salt Dome Repository. A Technical Memorandum. - University of California, Lawrence Livermore Laboratory, 1980.
- /KLI 07/ Klinge, H.; Boehme, J.; Grisseemann, C.; Houben, G.; Ludwig, R.-R.; Rübél, A.; Schelkes, K.; Schildknecht, F.; Suckow, A.: Standortbeschreibung Gorleben. Teil 1: Die Hydrogeologie des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben. - Geol. Jb., C 71, Hannover, 2007.
- /KNA 83/ Knauth, L.P.; Kumar, M.B.: Isotopic character and origin of brine leaks in the Avery Island Salt Mine, South Louisiana, U.S.A. - Journal of Hydrology, Vol. 66, pp. 343-350, 1983.
- /KNI 85/ Knipping, B.; Herrmann, A.G.: Mineralreaktionen und Stofftransporte an einem Kontakt Basalt-Carnallit im Kalisalzhorizont Thüringen der Werra-Serie des Zechsteins. - Kali und Steinsalz, Vol. 9, S. 111-124, 1985.
- /KNI 89/ Knipping, B.: Basalt intrusions in evaporites. - Lecture Notes in Earth Sciences, Vol. 24, Springer-Verlag, 1989.

- /KNI 94/ Knipping, B.: Natürliche Analoga zur Beurteilung der Langzeitsicherheit von Untergrund-Deponien in Evaporiten: Stofftransporte und Immobilität spezifischer Komponenten am Kontakt Basalt/Salzgestein. - In: Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, PTE, Sammlung der Vorträge anlässlich des Workshops „Natürliche Analoga zur Endlagerung radioaktiver Abfälle“ 4./5. November 1993, KfK Bericht 5323, S. 111-140, Karlsruhe, 1994.
- /KNI 95/ Knipping, B.: Standortcharakterisierung und Beurteilung der Langzeitsicherheit von Untergrund-Deponien durch Naturbeobachtungen. - Kali und Steinsalz, Vol. 11, S. 360-365, 1995.
- /KOC 99/ Kockel, F.: Die Bildung von Salzstrukturen in Norddeutschland - neue Einsichten, offene Fragen. - Mitt. dt. Geophys. Ges., Vol. 3, S 38-47, Potsdam, 1999.
- /KOC 02/ Kockel, F.: Rifting processes in NW-Germany and the German North Sea Sector. - Netherlands Journal of Geosciences / Geologie en Mijnbouw, Vol. 81 (2), pp. 149-158, Utrecht, 2002.
- /KÖT 07/ Köthe, A.; Hoffmann, N.; Krull, P.; Zirngast, M.; Zwirner, R.: Standortbeschreibung Gorleben. Teil 2: Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben. - Geol. Jb., C 72, Hannover, 2007.
- /KOV 06/ Kovalevych, V.M.; Peryt, T.-M.; Zang, W.; Vovnyuk, S.V.: Composition of brines in halite-hosted fluid inclusions in the Upper Ordovician, Canning Basin, Western Australia: new data on seawater chemistry. - Terra Nova, Vol. 18, pp. 95-103, 2006.
- /KOV 08/ Kovalevych, V.M.; Peryt, T.-M.; Shanina, S.N.; Wieclaw, D.; Lytvyniuk, S.F.: Geochemical aureoles around oil and gas accumulations in the Zechstein (Upper Permian) of Poland: analysis of fluid inclusions in halite and bitumens in rock salt. - Journal of Petroleum Geology, Vol. 31, pp. 245-262, 2008.
- /KRE 08/ Kreienmeyer, M.; Lerch, C.; Polster, M.; Tholen, M.: Nachweiskonzept zur Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren. - DBE Technology, TEC-15-2008-AP, Peine, 2008.

- /KRO 08/ Kröhn, K.-P.; Stührenberg, D.; Herklotz, M.; Heemann, U.; Lerch, C.; Xie, M.: Restporosität und -permeabilität von kompaktierendem Salzgrus-Versatz; Projekt REPOPERM - Phase 1. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-254, Köln, 2009.
- /LAM 96/ Lamprecht, H.-O.: Opus Caementitium - Bautechnik der Römer. - Beton-Verlag, 1996.
- /LAU 84/ Laul, J.C.; Smith, M.R.; Hubbard, N.: Behaviour of natural U, Th and Ra isotopes in the Wolfcamp brine aquifers Palo Duro Basin, Texas. - Scientific Basis for Nuclear Waste Management, Vol. VIII, pp. 475-482, 1984.
- /LAU 85/ Laul, J.C.; Smith, M.R.; Hubbard, N.: $^{234}\text{U}/^{230}\text{Th}$ ratio as indicator of redox state, and U, Th, and Ra behaviour in briney aquifers. - Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 50, pp. 673-680, 1985.
- /LAU 88/ Laul, J.C.; Smith, M.R.: Disequilibrium study of natural radionuclides of uranium and thorium in cores and briny groundwaters from the Palo Duro Basin, Texas. - Radioactive Waste Management and the Nuclear Fuel Cycle, Vol. 11, pp. 169-225, 1988.
- /LEY 80/ Leydecker, G.: Stellungnahmen zu den Thesen von E. Grimmel: Erdbeben in Nord-Deutschland. - Z. dt. geol. Ges., Vol. 131, S. 547-555, Hannover 1980.
- /LEY 02/ Leydecker, G.: Erdbebenkatalog für die Bundesrepublik Deutschland mit Randgebieten für die Jahre 800-2001. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, 2002.
- /LUT 85/ Lutze, W.; Malow, G.; Ewing, R.C.; Jercinovic, M.J.; Keil K. Alteration of basalt glasses: implications for modelling the long-term stability of nuclear waste glasses. - Nature, Vol. 314, pp. 252-255, 1985.
- /MAL 87/ Mallinson, L.G.; Davies, I.L.: A historical examination of concrete. Final report. - EUR 10937 EN, Luxembourg, 1987.

- /MAT 94/ Mattenklott, M.: Die Bromid und Rubidium-Verteilung in Carnallitgesteinen. Kriterien für die Genese mariner Evaporite. - Dissertation TU-Clausthal, 1994.
- /MAT 95/ Mattenklott, M.: Modellberechnungen zur Br- und Rb-Verteilung in Carnallitgesteinen. - Kali und Steinsalz, Vol. 11, pp. 341-365, 1995.
- /MCC 87/ McCann, A.M.; Bourgeois, J.; Gazda, E.K.; Oleson, J-P.; Lyding Will, E.: The Roman port and fishery of Cosa. - Princeton University Press, 492 pages, 1987.
- /MCK 01/ McKinley, I.G.; Tsuboya, T.: Integrating natural analogue studies into a national confidence-building programme. - Radwaste Solutions, Vol. 11/12 2001, pp. 24-27, 2001.
- /MEL 91/ Melvin, J.L.: Evaporites, Petroleum and Mineral Resources. - Developments in Sedimentology, Vol 50, Elsevier, Amsterdam 1991.
- /MEN 05/ Mengel, K.: Herkunft und Migration mineralgebundener Gase in marinen Evaporiten. - Abschlussbericht, Technische Universität Clausthal, Clausthal-Zellerfeld, 2005.
- /MIL 94/ Miller, W.; Alexander, R.; Chapman, N.; McKinley, I.; Smellie, J.: Natural Analogue Studies in the Geological Disposal of Radioactive Wastes. - NAGRA Technical Report 93-03, Wettingen, 1994.
- /MIL 00/ Miller, W.M.; Alexander, W.R.; Chapman, N.A.; McKinley, I.G.; Smellie, J.A.T.: Geological Disposal of Radioactive Wastes & Natural Analogues. - Waste Management Series; Vol. 2, Pergamon Elsevier Science Ltd., Amsterdam, 2000.
- /MIL 06/ Miller, B.; Hooker, P.; Smellie, J.; Dalton, J.; Degnan, P.; Knight, L.; Noseck, U.; Ahonen, L.; Laciok, A.; Trotignon, L.; Wouters, L.; Hernán, P.; Vela, A.: NANet Network to review natural analogue studies and their applications to repository safety assessment and public communication. Synthesis Report. - EUR 21919, Luxembourg, 2006.

- /MUR 97/ Murphy, W.M.; English, C.P.; Pickett, D.A.: Natural analogue studies at Peña Blanca and Santorini. - In: von Maravic, H., Smellie, J.A.T. (Eds.), Proceedings of the Seventh EC Natural Analogue Working Group (NAWG) Meeting, Stein am Rhein, Switzerland, October 28-30, 1996, EUR 17851 EN, pp. 105-112, Luxemburg, 1997.
- /NEA 04/ Nuclear Energy Agency (NEA): The Handling of Timescales in Assessing Post-Closure Safety, Lessons Learnt from the April 2002 Workshop in Paris, France. - NEA/OECD, Paris, 2004.
- /NOS 00/ Noseck, U.: Zusammenstellung und Auswertung geochemischer Untersuchungen zum Radionuklidverhalten aus ausgewählten Studien über Natürliche Analoga. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-155, Köln, 2000.
- /NOS 06/ Noseck, U.; Brassler, T.: Application of transport models on radionuclide migration in natural rock formations - Ruprechtov site. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-218, Köln, 2006.
- /NOS 07/ Noseck, U.; Müller-Lyda, I.; Brewitz, W.: To what extent can natural analogues contribute to the safety case of high-level waste repositories in rock salt? - In: *NEA Symposium "Safety Cases for the Deep Disposal of Radioactive Waste: Where do we stand?"* OECD/NEA. Workshop Proceedings, Paris, 23-25 January, 2007.
- /NOS 08a/ Noseck, U.; Müller-Lyda, I.; Steininger, W.: Overview on Natural Analogue Studies in Germany. - *atw Internationale Zeitschrift für Kernenergie*, Vol. 53, pp. 342-348, 2008.
- /NOS 08b/ Noseck, U.; Brassler, T.; Suksi, J.; Havlova, V.; Hercik, M.; Denecke, M.A.; Förster, H.J.: Identification of Uranium enrichment Scenarios by Multi-Method Characterization of Immobile Uranium phases. - *Phys. Chem. Earth*, Vol. 33, pp. 969-977, 2008.

- /NOS 09a/ Noseck, U.; Rozanski, K.; Dulinski, M.; Havlova, V.; Sracek, O.; Brasser, T.; Hercik, M.; Buckau, G.: Characterisation of hydrogeology and carbon chemistry by use of natural isotopes – Ruprechtov site, Czech Republic. - Applied Geochemistry, Vol. 24, pp. 1765-1776, 2009.
- /NOS 09b/ Noseck, U.; Havlova, V.; Suksi, J.; Brasser, T.; Cervinka, R.: Geochemical behaviour of uranium in sedimentary formations: insights from a natural analogue study. - Proc. 12th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management (ICEM '09), 11-15th October, 2009, Liverpool, 2009.
- /PEL 99/ Pellegrini, R.; Horseman, S.; Kemp, S.; Rochelle, C.; Boisson, J.Y.; Lombardi, S.; Bouchet, A.; Parneix, J.C.: Natural analogues of the thermohydrochemical and thermo-hydro-mechanical response. - EUR 19114, Luxembourg, 1999.
- /PET 92a/ Peters-Zimmermann, H.: Geochemische Untersuchungen an wasserunlöslichen Mineralfraktionen von Sylviniten des Kaliflözes Riedel (Z3). - Eur. J. Mineral., Vol. 4, pp. 345-354, 1992.
- /PET 92b/ Petit, J.-C.: Natural analogues for the design and performance assessment of radioactive waste forms: a review. - Journal of Geochemical Exploration, Vol. 46, pp. 1-33, 1992.
- /POP 02/ Popp, T.; Fischer, M.; Kern, H.: Gefügekundliche Untersuchungen zur Verteilung von Kohlenwasserstoffen (KW) im Steinsalz. - Meyniana, Vol. 54, pp. 131-154, Kiel, 2002.
- /POS 87/ Posey, H.H.; Kyle, J.R.; Jackson, T.J.; Hurst, S.D.: Multiple fluid components of salt diapirs and salt dome cap rocks, Gulf Coast, U.S.A. - Applied Geochemistry, Vol. 2:, pp. 523-534, 1987.
- /POS 88/ Posey, H.H.; Kyle, J.R.: Fluid-rock interactions in the salt dome environment: An introduction and review. - Chemical Geology, Vol. 74 (1-2), pp. 1-24, 1988.

- /POT 04a/ Potter, J.; Siemann, M.G.: A new method for determining $\delta^{13}\text{C}$ and δD simultaneously for CH_4 by gas chromatography/ continuous-flow isotope ratio mass spectrometry. - Rapid Commun. Mass Spectrom., Vol. 18, pp. 175-180, 2004.
- /POT 04b/ Potter, J.; Siemann, M.G.; Tsyukov, M.: Large scale isotopic carbon fractionations in a Zechstein evaporite deposit and the generation of extremely ^{13}C -enriched methane. - Geology, Vol. 32, pp. 533-536, 2004.
- /PRI 88/ Prikryl, J.D.; Posey, H.H.; Kyle, J.R.: A petrographic and geochemical model for the origin of calcite cap rock at Damon Mound Salt Dome, Texas, U.S.A. - Chemical Geology, Vol. 74, pp. 67-97, 1988.
- /PUS 87/ Pusch, R.; Börgesson, L.; Erlström, M.: Alteration of isolating properties of dense smectite clay in repository environment as exemplified by seven pre-quaternary clays. - SKB Technical Report, TR-87-29, Stockholm, 1987.
- /PUS 88/ Pusch, R.; Karnland, O.: Geological evidence of smectite longevity: The Sardinian and Gotland cases. - SKB Technical Report, TR-88-26, Stockholm, 1988.
- /RAM 67/ Ramsay, J.G.: Folding and Fracturing of Rocks. - McGraw Hill, New York, 1967.
- /REM 07/ Rempe, N.T.: Permanent underground repositories for radioactive waste. - Progress in Nuclear Energy, Vol. 49, pp. 365-374, 2007.
- /ROE 10/ Röhlig, K.-J.: Das Konzept des Safety Case – Internationale Entwicklungen zur Demonstration der Langzeitsicherheit von Endlagern. - In: Hocke, P.; Arens, G. (Hrsg.): Die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. – Tagungsdokumentation zum „Internationalen Endlagersymposium Berlin, 30.10 bis 01.11.2008“, Karlsruhe, Bonn, Berlin, 2010.
- /ROJ 09/ Rojo, I.; Seco, F.; Rovira, M.; Giménez, J.; Cervantes, G.; Martí, V.; de Pablo, J.: Thorium sorption onto magnetite and ferrihydrite in acidic conditions. - Journal of Nuclear Materials, Vol. 385 (2), pp. 474-478, 2009.

- /ROT 03/ Rothfuchs, T.; Wieczorek, K.; Olivella, S.; Gens, A.: Lessons Learned in Salt. - European Commission CLUSTER Conference on the Impact of EDZ on the Performance of Radioactive Waste Geological Repositories, 3-5 November 2003, Luxembourg, 2003.
- /ROY 82/ Roy, D.M.; Langton, C.A.: Longevity of borehole and shaft sealing materials: Characterization of cement-based ancient building materials. - Office of Nuclear Waste Isolation, Technical Report ONWI-202, Columbus, 1982.
- /ROY 83/ Roy, D.M.; Langton, C.A.: Characterization of cement-based ancient building materials in support of repository seal materials studies. - Office of Nuclear Waste Isolation, Technical Report BMI/ONWI-523, Columbus, 1983.
- /RÜH 95/ Rühle, S.: Der quantitative chemische Stoffbestand einzelner Lösungseinschlüsse in Zechsteinevaporiten. - Dissertation, TU Clausthal, 1995.
- /SAU 88/ Saunders, J.A.; Prikryl, J.D.; Posey, H.H.: Mineralogic and Isotopic Constraints on the Origin of Strontium-Rich Cap Rock, Tatum Dome, Mississippi, U.S.A. - Chemical Geology, Vol. 74, pp.137-152, 1988.
- /SCH 60/ Schulze, G.: Stratigraphische und genetische Deutung der Bromidverteilung in den mitteldeutschen Steinsalzlagern des Zechsteins. - Freiburger Forschungshefte, Reihe C83, Freiberg, 1960.
- /SCH 07/ Schléder, Z.; Burliga, S.; Urai, J.: Dynamic and static recrystallization-related microstructures in halite samples from the Klodawa salt wall (central Poland) as revealed by gamma-irradiation. - Neues Jahrbuch für Mineralogie und Petrologie, Vol. 184, pp. 17-28, 2007.
- /SHO 07/ Schoenherr, J.; Urai, J.; Kukla, P.A.; Littke, R.; Schléder, Z.; Larroque, J.-M.; Newall, M.; Al-Abry, N.; Al-Siyabi, H.A.; Rawahi, Z.: Limits to the sealing capacity of rocksalt: A case study of the Infra-Cambrian Ara Salt from the South Oman Salt Basin. - AAPG Bulletin, Vol. 91, pp. 1541-1557, 2007.

- /SHO 09/ Schoenherr, J.; Reuning, L.; Kukla, P.A.; Littke, R.; Urai, J.; Siemann, M.; Rawahi, Z.: Halite cementation and carbonate diagenesis of intra-salt reservoirs from the Late Neoproterozoic to Early Cambrian Ara Group (South Oman Salt Basin). - *Sedimentology*, Vol. 56, pp. 567-589, 2009.
- /SIE 01/ Siemann, M.G.; Ellendorf, B.: The composition of gases in fluid inclusions of late Permian (Zechstein) marine evaporites in Northern Germany. - *Chem. Geol.*, Vol. 173, pp. 31-44, 2001.
- /SIT 96/ Sitz, P.; Gruner, M.: Langzeitsichere Verschlüsse für Untertagedeponien und Endlager unter besonderer Berücksichtigung natürlicher Materialien. - *Glückauf*, Band 132 (7), S. 327-332, 1996.
- /SIT 98/ Sitz, P.; Gruner, M.: Materialuntersuchungen für Mehrkomponentensysteme auf Ton/Bentonit - Basis für Dichtung und Lastabtrag, mit hohem Rückhaltevermögen, für den langzeitsicheren Verschluss von UTD und Endlagern im Salinar. - In: *Untertägige Entsorgung, Statusgespräch des PTE zu BMBF-geförderten F+E-Vorhaben auf dem Gebiet der Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen*. 14.-15. Oktober 1997, FZKA PtE Nr. 5, S. 291-301, Karlsruhe, 1998.
- /SME 96/ Smellie, J.; Karlsson, F.: The Cigar Lake Analogue Project: A Reappraisal of Some Key Issues and Their Relevance to Repository Performance Assessment. - *SKB Technical Report 96-08*, Stockholm, 1996.
- /SME 97/ Smellie, J.; Karlsson, F.; Alexander, W.R.: Natural analogue studies: present status and performance assessment implications. - *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 26, pp. 3-17, 1997.
- /SME 99/ Smellie, J.; Karlsson, F.: The use of natural analogues to assess radionuclide transport. - *Engineering Geology*, Vol. 52, pp. 193-220, 1999.
- /SNI 85/ Schnier, H.: Geologische Langzeitprognosen. - In: *Projekt Sicherheitsstudie Entsorgung (PSE), Fachband 11, Standsicherheitskriterien für das Endlagerbergwerk Gorleben, Kapitel 5*, Berlin, 1985.

- /STA 95/ Stascheit, A.; Knipping, B.: Die Lanthanoidverteilung in Evaporitgesteinen. - Kali und Steinsalz, Vol. 11, S. 355-359, 1995.
- /STE 96/ Steininger, W.: Natural analogues for a repository in rock salt, the German approach. - In: Proceedings of the 6th EC Natural Analogue Working Group Meeting, 12.-16. Sept. 1994, Santa Fe, EUR 16761, Luxembourg, 1996.
- /STE 97/ Steinmann, M.; Stille, P.; Mengel, K.; Bernotat, W.: Nd-Sr isotope and REE evidence for the long-term stability of HLW glass products and trace metal migration in a salt repository: Corroding basaltic dykes in evaporites as natural analogues. - In: Proc. MRS '97, Scientific Basis for Nuclear Waste Management, 1081, Sept. 28 - Oct. 3, 1997, Davos, 1997.
- /STE 99/ Steinmann, M.; Stille, P.; Bernotat, W.; Knipping, B.: The corrosion of basaltic dykes in evaporites: Ar-Nd-Sr isotope and rare earth elements evidence. - Chem. Geol., Vol. 153, pp. 259-279, 1999.
- /SZA 80/ Szabo, J.; Gottschall, W.C.: Uranium Series Disequilibrium Investigations Related to the WIPP Site, New Mexico, Part I: A preliminary study of Uranium-Thorium Systematics in Dissolution Residues at the top of evaporites of the Salado Formation – Implications to Process and Time. WIPP Site, New Mexico. - U.S. Geological Survey, Open-File Report 80-879., Denver, 1980.
- /TAL 04/ Talbot, C.J.; Aftabi, P.: Geology and models of salt extrusion at Qum Kuh, central Iran. - Journal of the Geological Society, Vol. 161, pp. 321-334, London, 2004.
- /TAL 09/ Talbot, C.J.; Farhadi, R.; Aftabi, P.: Potash in salt extruded at Sar Pohl diapir, Southern Iran. - Ore Geology Reviews, Vol. 35, pp. 352-366, 2009.
- /TAY 71/ Taylor, R.E.: Geohydrology of Tatum Salt Dome Area, Lamar and Marion Counties, Miss. - U.S. Geological Survey, Final Report Vela Uniform Program: Project Dribble, Washington, D.C. 1971.

- /TRU 57/ Trusheim, F.: Über Halokinese und ihre Bedeutung für die strukturelle Entwicklung Norddeutschlands.- Z. dt. geol. Ges., Band 109 (1), Hannover, 1957.
- /WAK 94/ Wakeley, L.D.; Poole, T.S.; Burkes, J.P.: Durability of Concrete Materials in High-Magnesium Brine. - Sandia Report 93-7073, 1994.
- /WER 88/ Werner, M.L.; Feldman, M.D.; Knauth, L.P.: Petrography and Geochemistry of Water-Rock Interactions in Richton Dome Cap Rock (Southeastern Mississippi, U.S.A.). - Chemical Geology, Vol. 74, pp. 113-135, 1988.
- /WIE 01/ Wieczorek, K.; Schwarzianeck, P.; Rothfuchs, T.: Self healing of excavation-disturbed rocks in the near field of underground cavities – exemplary measurements in rock salt and interpretation of preliminary results. - Proceedings of the Eurosafe conference, Paris 5./6.November 2001.
- /WIE 03/ Wieczorek, K.: EDZ in Rock Salt: Testing Methods and Interpretation. - European Commission CLUSTER Conference on the Impact of EDZ on the Performance of Radioactive Waste Geological Repositories, 3-5 November 2003, Luxembourg, 2003.
- /ZIR 91/ Zirngast, M.: Die Entwicklungsgeschichte des Salzstocks Gorleben - Ergebnis einer strukturgeologischen Bearbeitung. - Geol. Jb., Band A132, S. 3-13, 1991.
- /ZIR 96/ Zirngast, M.: The development of the Gorleben salt dome (northwest Germany) based on quantitative analysis of peripheral sinks. - In: Alsop, G.I.; Blundell, D.J.; Davison, I. (eds.): Salt Tectonics. - Geological Society Special Publication No. 100, London, 1996.
- /ZUK 87/ Zukin, J.G.; Hammond, D.E.; Ku, T.L.; Elders, W.A.: Uranium-thorium series radionuclides in brines and reservoir rocks from two deep geothermal boreholes in the Salton Sea Geothermal Field, southeastern California. - Geochim. Cosmochim. Acta, Vol. 51, pp. 2719-2731, 1987.

- /ZUL 09/ Zulauf, G.; Zulauf, J.; Bornemann, O.; Kihm, N.; Peinl, M.; Zanella, F.: Experimental deformation of a single-layer anhydrite in halite matrix under bulk constriction. Part 1: Geometric and kinematic aspects. - Journal of Structural Geology, Vol. 31, pp. 460-474, 2009.
- /ZUL 10/ Zulauf, G.; Zulauf, J.; Bornemann, O.; Brenker, F.E.; Höfer, M.; Peinl, M.; Woodland, A.B.: Experimental deformation of a single-layer anhydrite in halite matrix under bulk constriction. Part 2: Deformation mechanisms and the role of fluids. - Journal of Structural Geology, Vol. 32, pp. 264-277, 2010.

Teil 2 Detail-Studien (2012 - 2013)

8 Einleitung zu den Detail-Studien

Die Auswertung Natürlicher Analoga in Teil 1 dieses Berichtes zeigt, dass bereits einige gut dokumentierte Natürliche Analoga für das Wirtsgestein Salz existieren, die das Verständnis der in einem Endlagersystem ablaufenden Prozesse erheblich verbessert haben. Allerdings wird auch deutlich, dass durch

- den Paradigmenwechsel im Sicherheits- und Nachweiskonzept (sicherer Einschluss im einschlusswirksamen Gebirgsbereich als primäre Sicherheitsfunktion) /BMU 10/ und
- das fortgeschrittene Stadium der Untersuchungen am Standort Gorleben, insbesondere durch die vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) /FIS 13/

neue Aspekte im Langzeitsicherheitsnachweis hinzugekommen sind oder vorhandene Aspekte an Bedeutung gewonnen haben, die durch entsprechende Natürliche Analoga konkretisiert werden sollten, insbesondere die

- Zerblockung von Anhydrit-Formationen in einem Salzstock im Nachdiapir-Stadium (Kapitel 9) sowie die
- Kompaktion des Salzgrusversatzes (Kapitel 10)

Daneben gibt es Aspekte im Langzeitsicherheitsnachweis, die von Beginn an Bedeutung besessen haben, die aber noch nicht ausreichend dokumentiert sind, z. T auch dadurch, dass durch die VSG neue Erkenntnisse gewonnen oder Untersuchungsmethoden weiterentwickelt wurden.

Dies betrifft insbesondere die:

- Integrität der geologischen Barriere
 - Rückschlüsse aus Fluideinschlüssen (Kapitel 11)
 - Thermische Belastbarkeit von Steinsalz (Kapitel 12)
 - Mechanische Belastbarkeit von Steinsalz (Kapitel 13)
 - Einfluss von Erdbeben (Kapitel 14)

sowie die

- Integrität der geotechnischen Barrieren
 - Langzeitstabilität von Verschlussmaterialien (Kapitel 15)
 - Korrosionsverhalten von Metallen (Kapitel 16)

Letztlich gibt es mit den mikrobiellen Prozessen ein Thema (Kapitel 17), das bisher nicht im Sicherheitsnachweis berücksichtigt wurde, da man davon ausgegangen ist, dass solche Prozesse nicht in einem Endlager im Salzgestein stattfinden können. Hier zeigen Natürliche Analoga, dass diese Einschätzung falsch gewesen ist. Dieses Thema wurde deshalb ebenfalls in einer Detailstudie untersucht und in diesem Berichtsteil dokumentiert.

Die Auswertung in Teil 1 hat gezeigt, dass die Verhältnisse am Standort Gorleben sehr gut untersucht sind. Das gilt insbesondere für geologische Fragestellungen, die von Beginn an als sicherheitsrelevant eingestuft wurden, z. B. Salzstockaufstieg, Subrosion oder kaltzeitliche Rinnenbildung. Diese Fragestellungen wurden daher bei den Detailstudien in Teil 2 des Berichtes nicht mehr berücksichtigt. Für derartige Fragestellungen wäre dennoch die Untersuchung und Darstellung entsprechender Verhältnisse an anderen Salzstöcken wünschenswert. Dies betrifft vor allem Salzstöcke außerhalb des mitteleuropäischen Zechsteinbeckens. So sind beispielsweise an den Salzstöcken um den Golf von Mexico bereits viele Untersuchungen durchgeführt worden, allerdings im Rahmen der Standortsuche für ein Endlager in den USA und in den 1970er Jahren. Diese Untersuchungen sind mittlerweile in der Regel mehr als dreißig Jahre alt und zum größten Teil nicht veröffentlicht. Will man die Ergebnisse dieser Untersuchungen an amerikanischen Salzstöcken nutzen, sind Auswertungen notwendig, die zeigen, ob und inwieweit die dortigen Verhältnisse und Erkenntnisse auf die geologische Situation in Norddeutschland übertragen werden können. Die nachfolgend dokumentierten Detailstudien befassen sich mit den einleitend genannten Aspekten und sind weitgehend einheitlich aufgebaut.

Jede Studie ist wie folgt gegliedert:

- Bedeutung für den Sicherheitsnachweis,
- Erkenntnisse aus Labor-, in-situ-Experimenten und Modellrechnungen,
- Natürliche Analoga,

- Bewertung (mit den Unterkapiteln: Grenzen der Anwendbarkeit/Zeitskala/Un-
gewissheiten, Verwendungsmöglichkeit im Sicherheitsnachweis und Möglichkeit
der Kommunikation),
- Offene Fragen, sowie
- Literatur.

9 Zerblockung von Anhydritschichten in Salzformationen

Die Zerblockung von Anhydritschichten in Salzformationen ist eine mögliche Ausprägung des Gesteinsgefüges, die als *Boudinage* bezeichnet wird. Sie entsteht durch Zugbeanspruchung in Sedimenten und Metamorphiten mit Kompetenzkontrast. Dabei werden die kompetenten⁶ Schichten gedehnt und dünnen dadurch aus oder zerreißen, während das Gefüge der übrigen Gesteinsmasse dieses Gefüge umfließt. Die Ausprägung der *Boudinage* wird insbesondere von der Lage der kompetenten Gesteinsschicht im vorliegenden Spannungsfeld, seiner mechanischen Eigenschaften sowie des Kompetenzkontrastes zwischen dieser und der umliegenden Schichten und der Deformationskinematik beeinflusst, z. B. /HAM 12/, /GOS 04/. In der Klassifikation von /GOS 04/ sind mögliche Ausprägungen der durch *Boudinage* veränderten Gesteinsschichten gegenübergestellt. Die entstehenden Gesteinsblöcke können demnach getrennt voneinander (*torn* oder *gash boudins*) oder nebeneinander (*shearband*, *drawn*, *domino boudins*) vorliegen, s. Abb. 9.1.

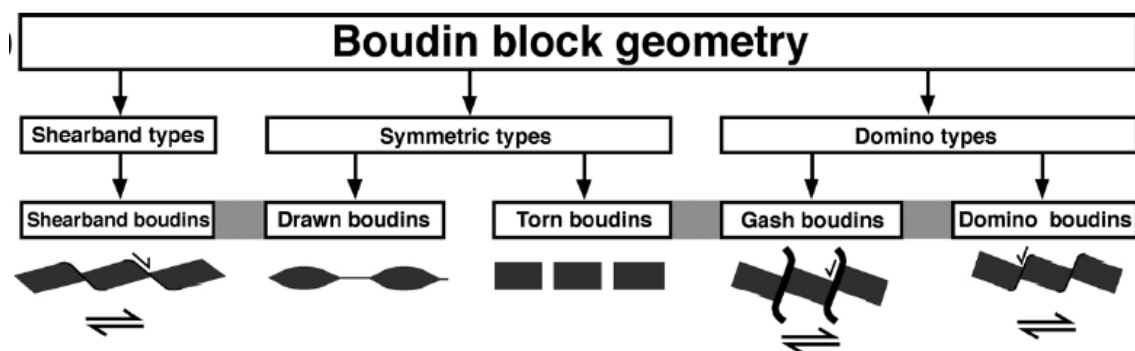


Abb. 9.1 *Boudinage*-Klassifikation nach /GOS 04/

Die einzelnen Boudins können vielfältige Formen und Größen annehmen (siehe z. B. Abb. 9.2). Linsenförmige Boudins sind durch schmale ausgedünnte Einbuchtungen getrennt, die als *necks* oder *neck zones* bezeichnet werden. Das trennende Gesteinsmaterial zwischen den Boudins besteht entweder aus der inkompetenten Schicht, in die das spröde Gestein eingebettet und das zwischen die Boudins eingedrungen ist oder aus erst durch Ausfällung entstandenen Mineralaggregaten. Die Größe der Boudins liegt im Zentimeter- bis Kilometerbereich /ABE 12/.

⁶ In der Geologie Begriff zur Beschreibung von relativen Kontrasten der Fließfestigkeit zweier verschiedener, benachbarter Gesteinsarten. Das Material mit der grösseren Fließfestigkeit, welches somit weniger stark deformiert wird, wird als kompetent; das Material mit der geringeren Fließfestigkeit, welches also stärker deformiert wird, als inkompetent bezeichnet.

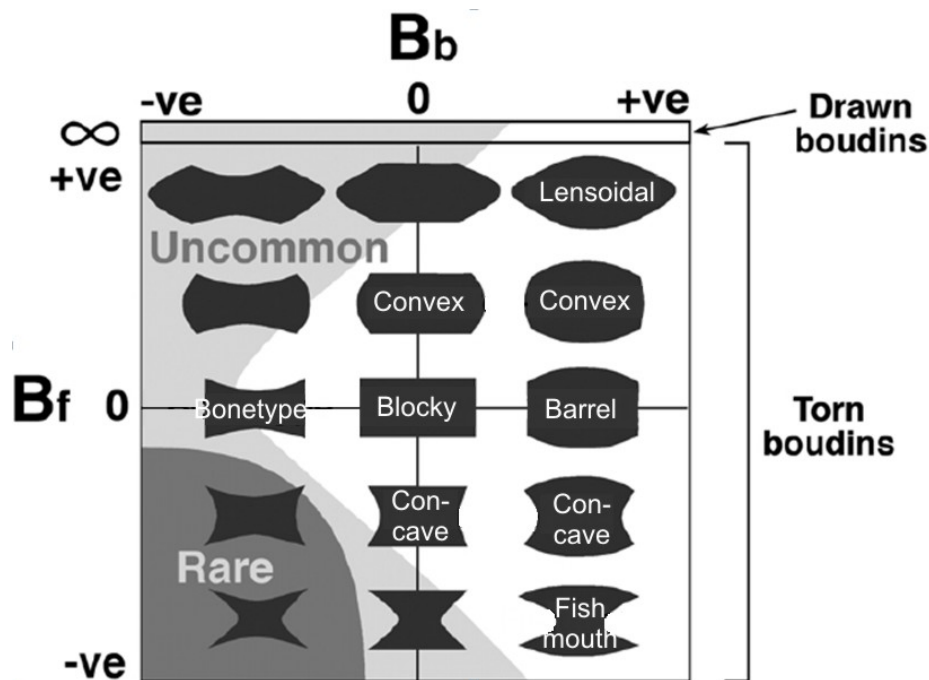


Abb. 9.2 Mögliche Boudin-Formen und Nomenklatur der am häufigsten vorkommenden Fragmente nach /GOS 04/; B_b = curvature of boudin exterior, B_f = curvature of boudin face

9.1 Bedeutung für den Sicherheitsnachweis

Anhydritische Gesteinsschichten stellen gegenüber Steinsalz kompetente Schichten dar; sie sind aufgrund der Ausfällungsreihe der verschiedenen Salze und der Entstehungsgeschichte der Salzstöcke in der Regel Bestandteil eines Salzstockes und in inkompetente Gesteinsschichten eingebettet. Durch mechanische Extension wie z. B. während des Salzaufstiegs kommt es zu einer Klüftung sowie einer Steilstellung der kompetenten Gesteinsschichten. Dadurch können Wasserwegsamkeiten entlang von Klüften von den Deckgebirgsschichten bis zum Einlagerungsniveau ausgebildet werden. Entstehen durch Boudinage einzelne isolierte Schollen aus Anhydrit, ist keine Wegsamkeit gegeben. Lage und Ausdehnung der anhydritischen Gesteinsschichten ist auch für die Ausweisung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) von großer Bedeutung.

9.2 Erkenntnisse aus Labor-Experimenten und Modellrechnungen

Experimente zur *Boudinage* wurden z. B. von /ZUL 09/, /ZUL 10/, /ZUL 11/, /MER 12a/ und /MER 12b/ mit Halit- und Anhydrit-Proben aus deutschen Salzstöcken durchgeführt. Die Experimente haben u. a. zu folgenden Erkenntnissen geführt:

- Der prinzipielle Deformationsmechanismus des spröden bis spröd-duktilen Anhydrits ist die Bruchbildung. Dadurch bilden sich Risse unterschiedlicher Größe aus.
- Eine verstärkte Extension hat eine höhere Anzahl und einen geringeren Durchmesser der Boudins zur Folge.
- Die Form und Größe der boudinierten Gesteinsblöcke werden sowohl von der Deformationseigenschaft der kompetenten Gesteinsschicht und der sie umgebenden inkompetenten Gesteinsmatrix als auch der initialen Schichtmächtigkeit der kompetenten Schicht beeinflusst. So nehmen im Fall des Gorleben-Anhydrits der mittlere Durchmesser der Blöcke mit steigender Mächtigkeit der Schicht linear zu und die Anzahl der Blöcke linear ab. Dieser lineare Zusammenhang scheint jedoch nur im Falle einer Zugbruch-*Boudinage* zu bestehen. Modelle mit viskosen und spröd-viskosen Schichten zeigen dagegen eine nicht-lineare Abhängigkeit.
- Die Deformationsgeometrie hat Auswirkungen auf die Block-Geometrie der Boudins (Abb. 9.1), jedoch nicht auf ihren Durchmesser. Die Block-Geometrie zeigt innerhalb der Experimente Variationen, auch wenn die Anfangs- und Randbedingungen gleich gewählt wurden. /MER 12a/ und /MER 12b/ führen dies auf Unterschiede in der Mikrostruktur und der Zusammensetzung des Anhydrits zurück.
- Die Ausbildung von Mikroklüften kann Wegsamkeiten für migrierende Flüssigkeiten darstellen oder zu Fluideinschlüssen führen. So sind im Anhydrit Fluideinschlüsse vorhanden, die auch organisches Material enthalten.
- Es gibt Hinweise darauf, dass offene Bereiche in *Necks* erst mit organischem Material belegt und später mit feinkörnigem Halit ausgefüllt wurden. Dieser entstand durch Ausfällung aus der flüssigen Phase.
- Im Halit entstanden radiale Risse im Bereich von Anhydrit-Einschlüssen, die auf eine hydraulische Rissbildung durch erhöhten Fluiddruck hinweisen. Die Tatsache, dass der Fluiddruck steigen konnte, obwohl es sich um ein offenes System han-

delt, lässt darauf schließen, dass der den Anhydrit umgebende Halit während der viskosen Deformation sehr impermeabel war. Aus dem Anhydrit austretende Fluide gelangten somit nicht tief in den Halit hinein oder verblieben überwiegend im Anhydrit.

Abb. 9.3 zeigt die *Boudinage* einer Anhydritschicht. Die entstandenen Boudin-Necks sind größtenteils vollständig mit Halit gefüllt. Dieser konnte z. T. durch viskoses Fließen in den Neckbereich eindringen /HAM 12/. Zum Teil handelt es sich auch um eine Wiederausfällung von zuvor gelöstem Halit /ZUL 10/, /MER 12b/. In wenigen Ausnahmen verblieb ein Hohlraum /ZUL 10/.

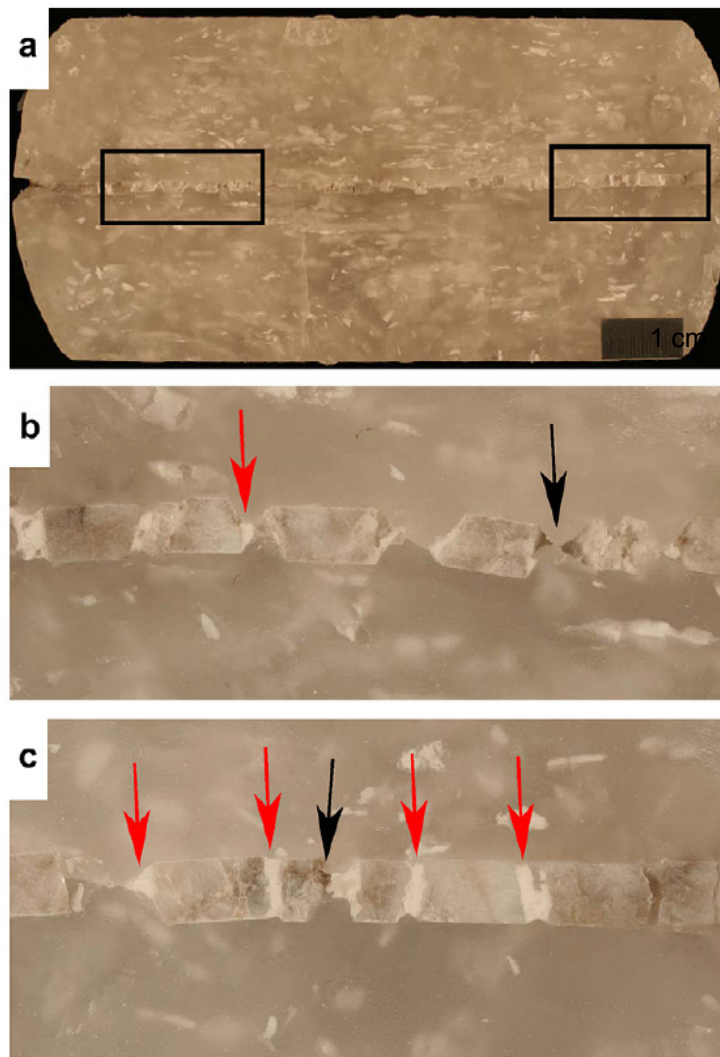


Abb. 9.3 Foto einer boudinierten Gesteinsprobe (a); in den Ausschnittsvergrößerungen (b, c)

In den Ausschnittsvergrößerungen werden die Boudin-Necks deutlich sichtbar – sie sind z. T. mit feinkörnigem Halit gefüllt, welches aus der fluiden Phase wiederausgefällt wurde (rote Pfeile); andere Necks sind noch offen und weisen einen dunklen Belag mit organischem Material auf (schwarze Pfeile) (aus /ZUL 10/)

Neben den analogen Modellen kann der Prozess der *Boudinage* auch mit numerischen Modellen untersucht werden. /ABE 12/ nutzte beispielsweise ein diskretes Elemente Modell (DEM) zur 2-D-Simulation des *Boudinage*-Prozesses. Die Ergebnisse zeigen, dass die Materialparameter der kompetenten Schicht die Boudin-Form bestimmen. Abb. 9.4 zeigt unterschiedliche Boudins, die bei Variation der Materialeigenschaften der kompetenten Schicht entstehen. Es wurde beobachtet, dass für ein sprödes Material zerrissene Boudins mit nahezu glatten Seiten entstehen. Die Variation der Festigkeit beeinflusst die Fragmentgröße. Ein semi-duktilen Material weist dagegen *pinch-and-swell* Strukturen auf.

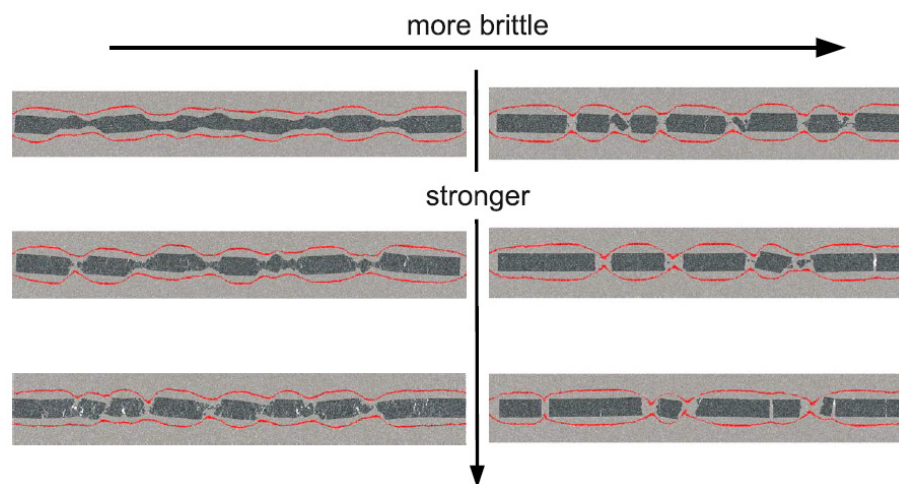


Abb. 9.4 Ergebnis der *Boudinage* an kompetenten Schichten mit unterschiedlichen Materialeigenschaften

Die rote Linie zeigt die Matrixbewegung (aus /ABE 12/)

Der Prozess der Klüftbildung und das Erreichen der Klüftsättigung wurden u. a. in den Modellen von /TAN 08/ untersucht (Abb. 9.5). Die Grauschattierung zeigt zusätzlich, wie sich die Klüftbildung auf das Spannungsmuster im Gestein auswirkt.

Die Klüftsättigung ist erreicht, wenn keine neuen Klüfte mehr gebildet werden. Dies ist der Fall, wenn

- ab einem bestimmten Verhältnis zwischen Klüftabstand und Schichtmächtigkeit nur noch die Öffnungsweiten der bestehenden Klüfte vergrößert, aber keine neuen Klüfte mehr gebildet werden,
- die regionale Spannungsvariation für eine Neubildung von Klüften nicht mehr ausreicht,

- sich statt in der kompetenten Schicht Klüfte in ihrer näheren Umgebung bilden und so zum Spannungsabbau beitragen.

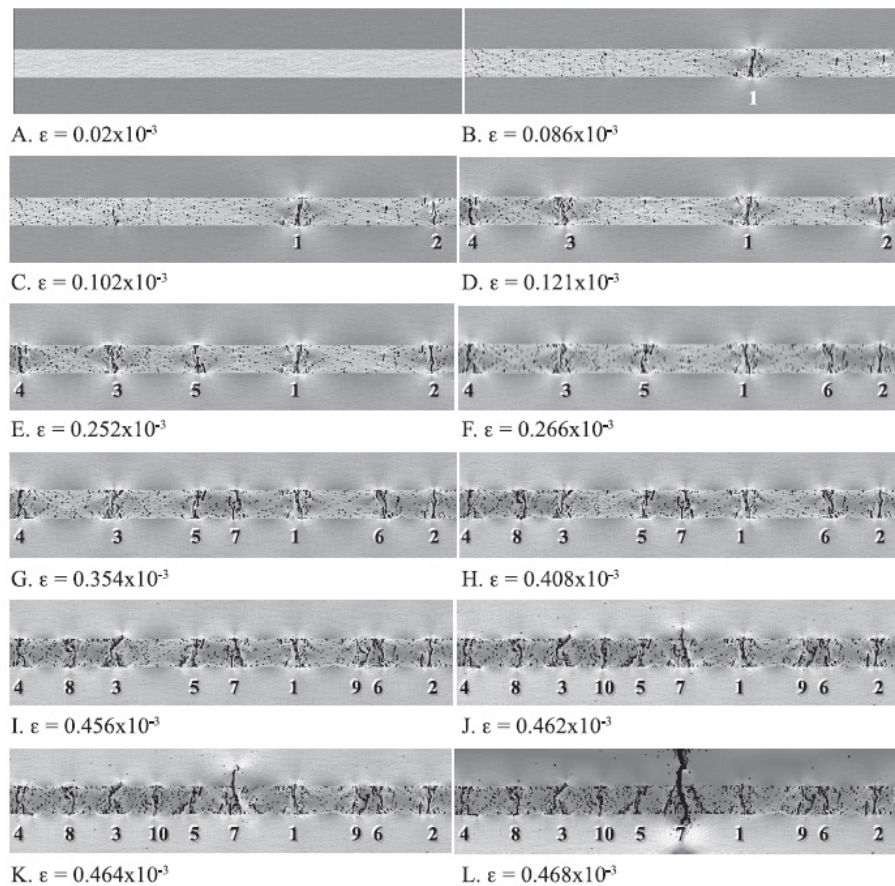


Abb. 9.5 Reihenfolge der Klufftbildung, Erreichen der Kluftsättigung und Spannungsverteilung in einem Dreischichtmodell

Die Zahlen von eins bis zehn dokumentieren die Reihenfolge, in der die Klüfte gebildet werden. Die Grauschattierung im Hintergrund zeigt die Verteilung des Spannungsmusters – ϵ Durchschnittliche Spannung (aus /TAN 08/)

Außerdem wurde in /TAN 08/ gezeigt, dass der Klufftabstand umgekehrt proportional zu der aufgewendeten Spannung ist und mit zunehmender Spannung abnimmt. Zudem besteht eine proportionale Abhängigkeit zwischen Klufftabstand und Schichtmächtigkeit der kompetenten Schicht. Dieser Zusammenhang wird in Abb. 9.6 veranschaulicht, in der Modelle mit einer unterschiedlich mächtigen kompetenten Schicht (T_f) zwischen 15 mm und 35 mm und deren modellierte Klüftung bei Erreichen der Kluftsättigung dargestellt sind.

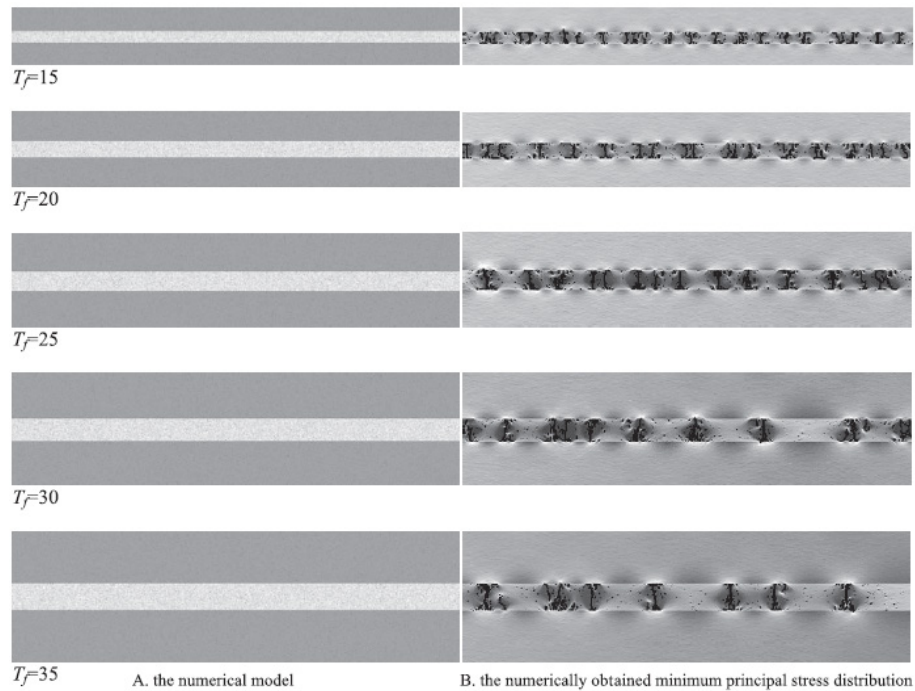


Abb. 9.6 Dreischichtmodelle mit modellierten Klüften bei Erreichen der Klufthsättigung

Die kompetente Schicht besitzt Mächtigkeiten zwischen 15 mm und 35 mm. Die dunklen Elemente zeigen die Klüftung (aus /TAN 08/)

Die Kluftmuster hängen stark von den Heterogenitäten der mechanischen Eigenschaften (z. B. der Elastizitätskonstanten und Bruchfestigkeit) der kompetenten Schicht ab. Bei geringer Heterogenität kommt es zu einer Rissausbreitung, während sich bei großen Heterogenitäten zunächst einzelne kleine Klüfte in Schwächezonen ausbilden, die später zusammenwachsen. Die heterogene Schicht enthält daher am Ende viele, eng beieinander liegende kurze und unregelmäßige Klüfte, s. Abb. 9.7.

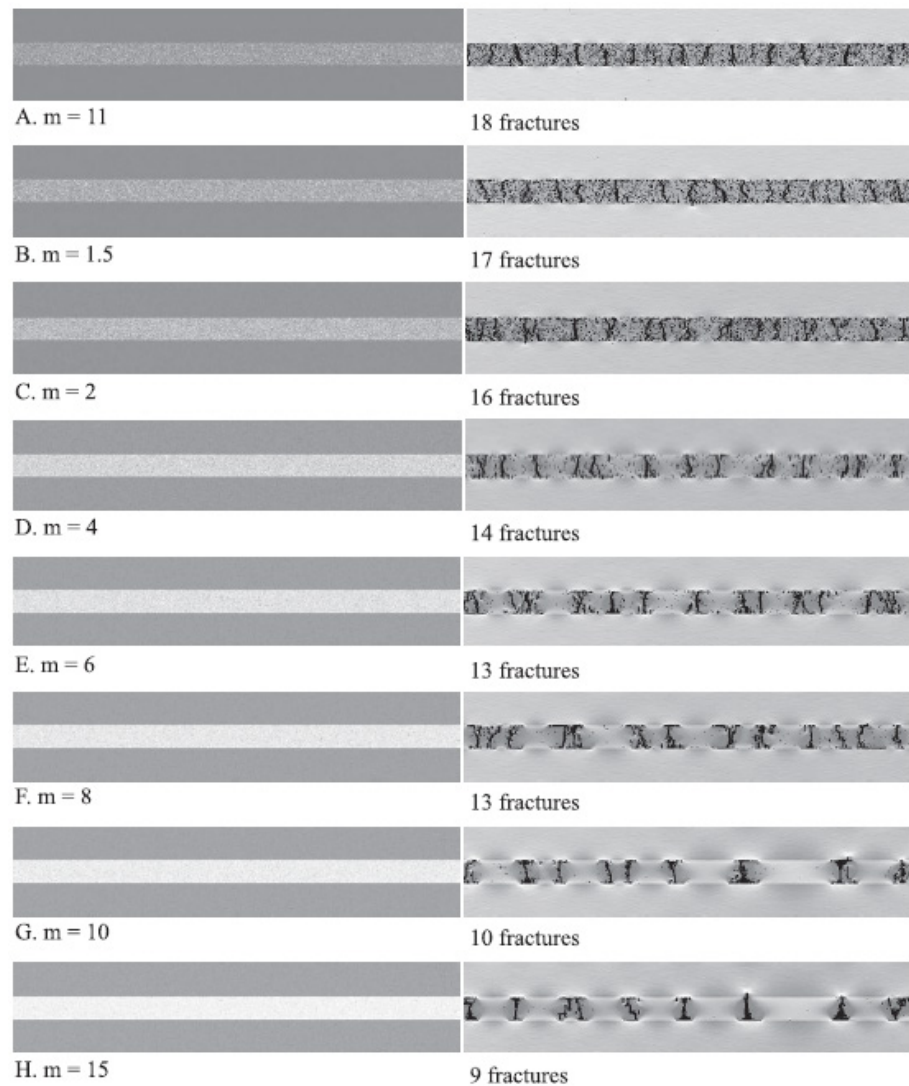


Abb. 9.7 Dreischichtmodelle mit einem unterschiedlichen Homogenitätsindex (m) der kompetenten Schicht und modellierte Klüfte bei Klufte-sättigung /TAN 08/

9.3 Natürliche Analoga

Der Prozess der *Boudinage* kann nicht nur in Anhydritschichten beobachtet werden, sondern auch in vielen weiteren Gesteinsformationen wie z. B. Pegmatiten, Amphiboliten, Quarziten und Dolomiten oder auch Tonsteinen. Aufgrund der in diesem Bericht behandelten Thematik werden im Folgenden jedoch ausschließlich die boudinierten Strukturen anhydritischer Schichten aus den Salzstöcken Gorleben und Morsleben vorgestellt.

9.3.1 Gorleben

Im Salzstock Gorleben treten verschiedene kompetente Gesteinsschichten auf, wie z. B. der Hauptanhydrit (z3HA), der Graue Salzton (z3GT), das Leine-Karbonat (z3LK) und die Gorleben-Bank (z3OSM). Der Hauptanhydrit ist für die Ausbildung von Klüften, die hydraulische Wegsamkeiten darstellen können, von besonderem Interesse, weil er mit 40 m bis 80 m die mit Abstand größte Mächtigkeit aufweist /BOR 08/ und durch seine Steilstellung während des Salzaufstiegs vom Deckgebirge bis in eine Tiefe von mehr als 3.000 m nachgewiesen werden kann (Abb. 9.8). Jedoch wurde für die Südflanke des Salzstockes ein Zerblocken der Anhydritschichten in einzelne isolierte Schollen festgestellt, die keine weit reichenden hydraulischen Verbindungen besitzen /HAM 12/.

Eine in ihrer Zusammensetzung vergleichbare Schicht ist die Gorleben Bank (z3OSM). Sie wurde in den Tiefbohrungen Go 1002 bis Go 1005 und den untertägigen Erkundungsbohrungen, wie z. B. am Übergang der z2- zu den z3-Schichten an der Nordwest-Flanke des Salzstockes erbohrt. Zudem wurde die Gorleben Bank im Infrastrukturbereich des Erkundungsbergwerkes angetroffen /HAM 12/.

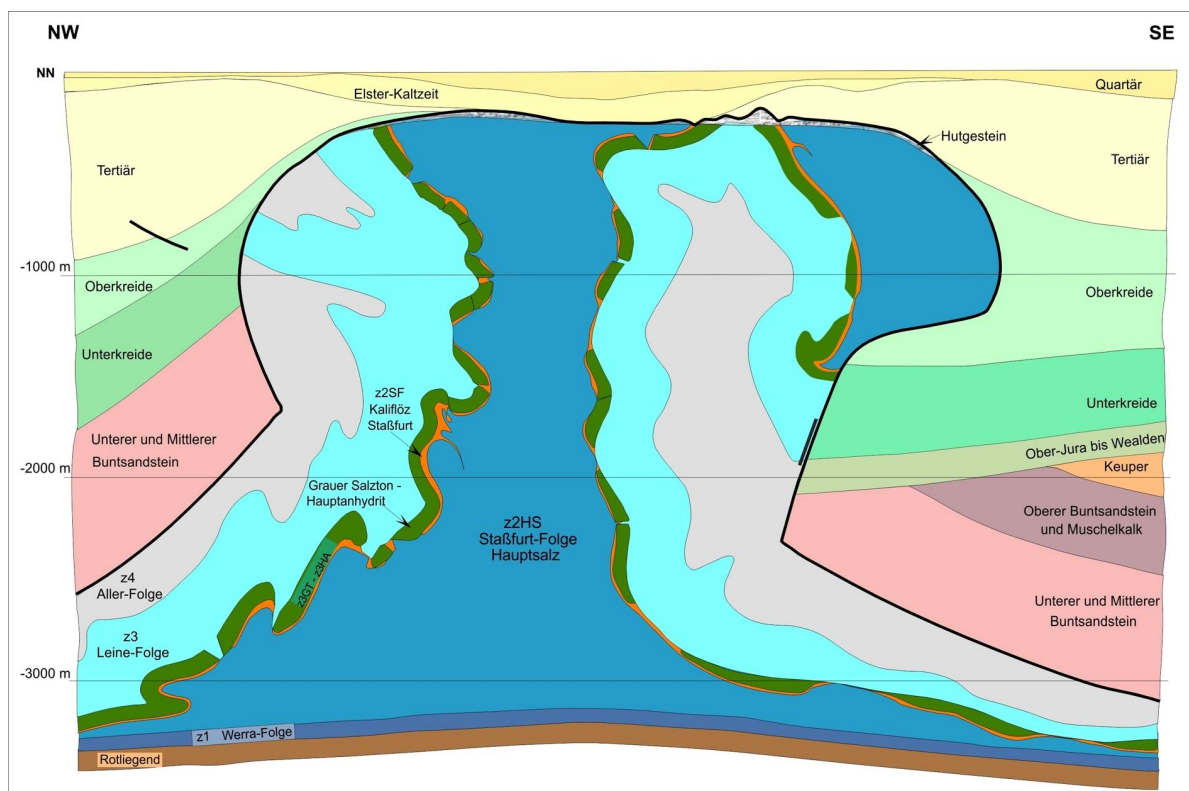


Abb. 9.8 Schematischer Querschnitt durch den Salzstock Gorleben (basierend auf /BOR 91/ geändert in /ISI 08/)

Ebenso wie der Hauptanhydrit wurden auch alle anderen z3-Schichten und damit auch die Gorleben-Bank während des Salzaufstiegs z. T. stark deformiert, zerschert und/oder boudiniert. Davon ist vor allem der Übergangsbereich des Hauptanhydrits sowie der Gorleben-Bank zu den umgebenden oft halitischen Gesteinen betroffen. Die dadurch entstandenen Klüfte und Hohlräume sind entweder durch Sekundärmineralisation verheilt oder partiell lösungserfüllt /HAM 12/. Es treten Öffnungsweiten im Millimeter- bis Zentimeterbereich auf /BEH 00/.

Die geologischen Aufnahmen der Gorleben-Bank zeigen deutliche Unterschiede in ihrer Mächtigkeit. In /BOR 08/ sind Mächtigkeiten zwischen wenigen Zentimetern und 3,5 m dokumentiert. /HAM 12/ beschreibt in den Bohrungen 01YEA02RB753 und 03YEA02RB754 Mächtigkeiten zwischen 3 cm und 15 cm. Sie werden im Wesentlichen auf halokinetische Deformation, Abscherung bzw. *Boudinage* während des Salzaufstiegs zurückgeführt. Geringmächtige Schichten bis zu 3 cm wurden oft ohne sichtbares Abreißen intensiv gefaltet. Größere Mächtigkeiten führten aufgrund der Kompetenz des Anhydrits und/oder der eingelagerten Tonlage zu einem Bruch im Schichtenverband, vgl. Abb. 9.9.

Die beiden Permeabilitätsmessungen im Bereich der Gorleben-Bank zeigen Werte von weniger als 10^{-20} m² und liegen damit in der Größenordnung der angrenzenden Schichten der Leine-Folge /HAM 12/. Auch die verheilten Bereiche sind durch sehr geringe Permeabilitäten charakterisiert /HAM 12/.



Abb. 9.9 Boudinage an einer etwa 10 cm mächtigen Schicht der Gorleben-Bank /HAM 12/

9.3.2 Morsleben

Im ERA Morsleben sind die Anhydritmittelsalze z3AM3/ah und z3AM4/ah sehr gut aufgeschlossen. Es handelt sich dabei um ein Gemisch aus Steinsalz und Anhydrit. Beide Anhydritmittel erreichen in der Regel zusammen eine Mächtigkeit zwischen 0,3 m und 1,6 m /HAM 12/. Vielfach sind stark variierende boudinierte Formen im Gestein sichtbar (vgl. Abb. 9.10). Festzustellen ist, dass das gesamte Gesteinspaket Deformationsanzeichen aufweist und nicht nur der Rand- oder der Übergangsbereich zur Halitmatrix betroffen ist. Aufgrund des hohen Kompetenzkontrastes zwischen Halit und Anhydrit überwiegen eckige Boudins. Vereinzelt werden *pinch and swell*-Strukturen beobachtet. Ihre Bildung könnte auf unterschiedlich stark ausgeprägte Drucklösungen, mikrostrukturelle Anisotropien oder Unterschiede in der mineralogischen Zusammensetzung des Anhydrits zurückzuführen sein /HAM 12/. Die *Necks* der Boudins werden in der Regel durch Halit gefüllt. Mikroskopische Beobachtungen belegen, dass es häufig durch Lösungs- und anschließende Fällungs-Prozesse entstand /HAM 12/.

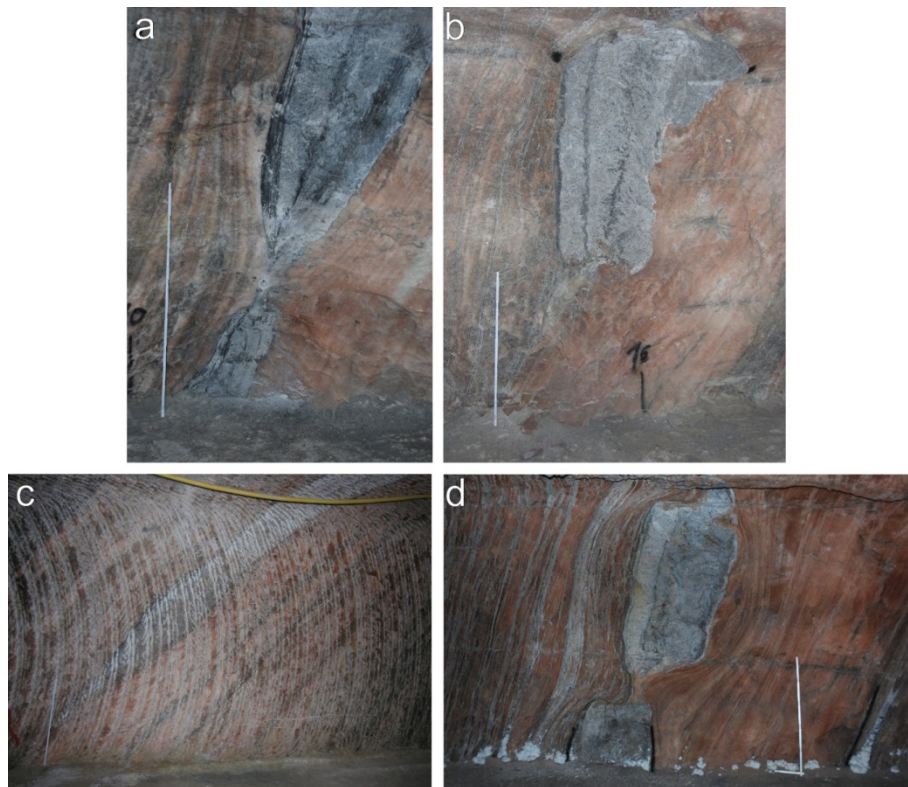


Abb. 9.10 Verschiedene Boudinformen im Bereich des Anhydritmittelsalzes im ERA Morsleben /HAM 12/

9.4 Bewertung

Obwohl sich die Untersuchungen an kompetenten Gesteinen bisher nur auf begrenzte Bereiche der Salzstöcke beschränken, weisen alle experimentellen Untersuchungen und numerischen Modellrechnungen, aber auch in-situ Beobachtungen und Untersuchungen darauf hin, dass es keine ausgedehnten hydraulischen Wegsamkeiten im Bereich der kompetenten Gesteine gibt. Werden Hohlräume geschaffen, verheilen diese in der Regel durch einfließenden Halit oder Wiederausfällung von Sekundärmineralen. Offene Hohlräume sind selten und autark, so dass keine durchgängigen Wegsamkeiten durch sie entstehen. Die einzige Möglichkeit, Fluide über lange Distanzen in Mikrorissen des Anhydrits oder im Bereich der Anhydrit-Halit Grenze zu transportieren, wäre eine durchgehende, nicht boudinierte Anhydritschicht /ZUL 10/. Aufgrund der aufgetretenen Kräfte während der Salzstockgenese und den bisherigen Untersuchungen ist eine über weite Strecken intakte Anhydritschicht allerdings nicht zu erwarten.

In /HAM 12/ heißt es dazu: „Nach den Ergebnissen der Untersuchungen (...) ist davon auszugehen, dass die anhydritischen Schichten der Leine-Folge infolge des Salzaufstiegs keine langaushaltenden, hydraulisch wirksamen Wegsamkeiten darstellen.“ „Die Anhydritschichten sind in Bereichen enger Verfaltungen und an den Salzstock-Flanken (...) zerblockt. Die Verheilung (...) hat dazu geführt, dass die (...) migrierten bzw. umverteilten Lösungen in den kompetenten Schichten selbst sowie in Klüften und Hohlräumen in ihrem Umfeld dicht eingeschlossen wurden. Die der Gorleben-Bank zugeordneten Lösungszutritte sind als intrasalinare, lokal begrenzte Lösungsvorkommen anzusehen.“ Und /BOR 08/ stellt fest: „Kommt es zu einer Zerblockung der Gesteinschicht, sind die Blöcke von einer sich plastisch verhaltenden Matrix umgeben, die hydraulische Wegsamkeiten ausschließt“.

9.4.1 Grenzen der Anwendbarkeit/Zeitskala/Ungewissheiten

Die in Kapitel 9.2 und 9.3 beschriebenen Natürlichen Analoga und Experimente wurden an den in Frage kommenden oder ähnlichen Schichten durchgeführt. Eine direkte Verwendung der gewonnenen Erkenntnisse ist daher möglich. Ungewissheiten bestehen in Bezug auf die Vollständigkeit der Daten. So ist z. B. nicht geklärt, wie stark die Zerblockung der Hauptanhydritschicht über die gesamte Länge ausgeprägt ist. Permeabilitäten sind z. Z. nur aus einzelnen Proben aus der Gorlebenbank bekannt.

9.4.2 Verwendungsmöglichkeit im Sicherheitsnachweis

Die Bewertung der Zerblockung des Anhydrits in einem Salzstock ist ein hervorragendes Beispiel dafür, wie Natürliche Analoga im Sicherheitsnachweis wertvolle Argumente liefern. Aus Beobachtungen in Salzstöcken lässt sich ableiten, ob und in welchem Maße eine Zerblockung des Anhydrits zu erwarten ist. Die Kombination dieser Untersuchungen mit Modellrechnungen sowie Labor- und in-situ Messungen können hier die bei der Bewertung unterirdischer Strukturen vorhandenen Ungewissheiten deutlich reduzieren.

9.4.3 Bewertung der Möglichkeit der Kommunikation

Auch wenn die Zerblockung von Gesteinen von komplexen Randbedingungen abhängt, können die Dimension einer zerblockten Anhydritschicht in einem Salzstock sowie die anderen Ausprägungen der *Boudinage* eindrucksvoll z. B. anhand von Laborexperimenten und numerischen Modellen dargestellt werden. Mit Hilfe von Animationen könnte auch dargestellt werden, dass nach einem Salzstockaufstieg durchgehende Anhydritschichten nicht zu erwarten sind.

9.5 Offene Fragen

Offene Fragen bestehen im Hinblick auf spezifische Eigenschaften von Halit und Anhydrit, wie z. B. die 3-D-Verteilung von Fluideinschlüssen in ihnen und der Zusammenhang zwischen der Kornform und mechanischer Anisotropie im Halit /ZUL 10/. Zum anderen sind die Zusammenhänge zwischen den Gesteinseigenschaften und der *Boudinage*-Ausprägung noch nicht gänzlich verstanden. Für die letztere Fragestellung sind bereits weiterführende Untersuchungen geplant, die sich beispielsweise damit befassen, warum die *Boudinage* in einigen Bereichen als zerblockte und in anderen als *pinch and swell* Strukturen ausgeprägt ist /HAM 12/. Des Weiteren sollen die experimentell festgestellten Abhängigkeiten zwischen Schichtmächtigkeit und Boudin-Größe unter Zugrundelegung systematischer Auswertungen in den Aufschlüssen des ERA Morsleben überprüft werden /HAM 12/.

Von großer Relevanz für den Sicherheitsnachweis ist der Nachweis einer nicht durchgehenden und möglichst häufig unterbrochenen Anhydritschicht. Kritiker führen an, dass keine absolute Sicherheit dahingehend besteht, dass beispielsweise der Haupt-

anhydrit in Gorleben durchgehend zerblockt ist /SCH 11/. Zur detaillierteren Erfassung des Zustandes der Anhydritschichten wären parallel zum Streichen der Anhydritschichten angeordnete Erkundungsbohrungen, in denen umfangreiche elektromagnetische Reflexionsmessungen (EMR-Messungen) durchgeführt werden sinnvoll /HAM 12/. Diese könnten die Ausprägung des Hauptanhydrits, sowie des z2/z3-Übergangsbereiches erfassen und damit Aufschluss über die Ausdehnung der zerblockten Bereiche geben.

9.6 Literatur zu Kapitel 9

- /ABE 12/ Abe, S.; Urai, J.L.: Discrete element modeling of boudinage: Insights on rock rheology, matrix flow, and evolution of geometry. - Journal of Geophysical Research, Vol. 117, B01407, 2012.
- /BEH 00/ Behlau, H.; Mingerzahn, G.; Bornemann, O.: ERA Morsleben – Erarbeitung eines geologischen Lagerstättenmodells Morsleben. - Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben, 2000.
- /BOR 91/ Bornemann, O.: Zur Geologie des Salzstocks Gorleben nach den Bohrergebnissen. BfS-Schriften 4/91, 67 Seiten, Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Salzgitter, 1991.
- /BOR 08/ Bornemann, O.; Behlau, J.; Fischbeck, R.; Hammer, J.; Jaritz, W.; Keller, S.; Mingerzahn, G.; Schramm, M: Standortbeschreibung Gorleben, Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. - Geologisches Jahrbuch Reihe C, Heft 73, Hannover, 2008.
- /GOS 04/ Goscombe, B.D.; Passchier, C.W.; Hand, M.: Boudinage classification: end-member boudin types and modified boudin structures. - Journal of Structural Geology, Vol. 26, pp. 739-763, 2004.

- /HAM 12/ Hammer, J.; Fleig, S.; Mingerzahn, G.; Kühnlenz, T.; Mertineit, M.; Pusch, M.; Schramm, M.; Behlau, J. (BGR): Salzgeologische Bewertung des Einflusses von "kryogenen Klüften" und halokinetischen Deformationsprozessen auf die Integrität der geologischen Barriere des Salzstocks Gorleben - Bericht zum Arbeitspaket 2 der vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-273, Köln, 2012.
- /ISI 08/ Bollingerfehr, W.; Buhmann, D.; Filbert, W.; Heusermann, S.; Keller, S.; Kreienmeyer, M.; Krone, J.; Mönig, J.; Tholen, M.; Weber, J.R., Wolf, J.: Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW (Projekt ISIBEL), Zusammenfassender Abschlussbericht. TEC-09-2008-AB, 95 Seiten, DBE TECHNOLOGY GmbH, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Peine, Braunschweig, Hannover, April 2008.
- /MER 12a/ Mertineit, M.; Hammer, J.; Zulauf, G.; Zulauf, J: Boudinage of anhydrite in rock-salt matrix: The impact of bulk finite strain geometry. - In: Bérest, P.; Ghoreychi, M.; Hadj-Hassen, F.; Tijani, M. (eds): Proc. Mechanical Behavior of Salt, Vol. VII, pp. 65-69, 2012.
- /MER 12b/ Mertineit, M.; Behlau, J.; Hammer, J.; Schramm, M.; Zulauf, G.: Mechanical Behaviour of anhydrite rocks: Results of field investigations, mineralogical-geochemical studies and thermomechanical experiments. - In: Bérest, P.; Ghoreychi, M.; Hadj-Hassen, F.; Tijani, M. (eds): Proc. Mechanical Behavior of Salt, Vol. VII, pp. 123-129, 2012.
- /SCH 11/ Schneider, U.: ISIBEL und der Salzstock Gorleben unter besonderer Berücksichtigung von Gas-, Kohlenwasserstoff- und Laugenvorkommen – Eine kritische Betrachtung im Auftrag der Bürgerinitiative Umweltschutz Lüchow-Dannenberg e.V., 2011.

- /TAN 08/ Tang, C.A.; Liang, Z. Z.; Zhang, Y.B.; Chang X.; Tao, X.; Wang, D.G.; Zhang, J. X. ; Liu, J.S.; Zhu, W.C.; Elsworth, D.: Fracture Spacing in Layered Materials: A New Explanation Based on Two-Dimensional Failure Process Modeling. - American Journal of Science, Vol. 308, pp. 49-72, 2008.
- /ZUL 09/ Zulauf, G.; Zulauf, J.; Bornemann, O.; Kihm, N.; Peinl, M.; Zanella, F.: Experimental deformation of a single-layer anhydrite in halite matrix under bulk constriction. Part 1: Geometric and kinematic aspects. - Journal of Structural Geology, Vol. 31, pp. 460-474, 2009.
- /ZUL 10/ Zulauf, G.; Zulauf, J.; Bornemann, O.; Brenker, F. E.; Höfer, M.; Peinl, M.; Woodland, A. B.: Experimental deformation of a single-layer anhydrite in halite matrix under bulk constriction. Part 2: Deformation mechanisms and the role of fluids. - Journal of Structural Geology, Vol. 32, pp. 264-277, 2010.
- /ZUL 11/ Zulauf, J.; Zulauf, G.; Hammer, J.; Zanella, F.: Tablet boudinage of an anhydrite layer in rock-salt matrix: Results from thermomechanical experiments. - Journal of Structural Geology, Vol. 33, pp. 1801-1815, 2011.

10 Salzgruskompaktion

10.1 Bedeutung für den Sicherheitsnachweis

Für den Sicherheitsnachweis werden sowohl Strömungsvorgänge von Wasser, Laugen und Gas, als auch ein Schadstofftransport durch die natürlichen und technischen Barrieren auf Basis identifizierter FEP benötigt. Entsprechend dem bisherigen Endlagerkonzept in Deutschland soll als Versatzmaterial Steinsalzgrus verwendet werden. Die Kompaktion von Steinsalzgrus und damit einhergehend die Verringerung der Permeabilität in Abhängigkeit von der Zeit führt zu einer zunehmenden Abdichtung der eingelagerten radioaktiven Abfälle. Dies setzt voraus, dass unter Tage auch tatsächlich eine ausreichende Konvergenz auftritt. Dieser Aspekt ist ein wichtiger Bestandteil des Sicherheitsnachweises /MÖN 12/.

Für die Berechnung der Strömungs- und Transportverhältnisse innerhalb des Salzgrusversatzes ist die Kenntnis über die Verringerung der Permeabilität von kompaktierendem Salzgrus und die damit einhergehende Entwicklung eines Stützdrucks an der Hohlraumkontur ein wichtiger Parameter /MLY 99b/, /KRE 08/. Die genaue Kenntnis und Prognostizierbarkeit der Salzgruskompaktion ist wiederum Voraussetzung zur Ableitung der Anforderungen an die geotechnischen Barrieren. Zudem kommt dem Salzgrus für den langfristig sicheren Einschluss eine maßgebliche Rolle zu. Für den Nachweis des vollständigen Einschlusses der Abfälle spielt insbesondere der Bereich sehr geringer Porositäten eine wichtige Rolle.

Die Betrachtung von Analoga, wie im Fall von Untersuchungen von bereits kompaktiertem Salzgrusversatz aus dem Altbergbau hat den Vorteil, dass über einen langen Zeitraum abgelaufene gebirgsmechanische Prozesse untersucht werden können. In Kombination mit auf kurze Untersuchungszeiträume ausgelegten Laborversuchen stellen solche Analoga ein geeignetes Instrumentarium dar, mit dessen Hilfe Daten und Modellvorstellungen zur Konvergenz und Kompaktion von Steinsalzversatz überprüft, ergänzt und gegebenenfalls auch verifiziert werden können.

10.2 Erkenntnisse aus Labor- und In-situ-Experimenten und Modellrechnungen

Eingebrachter Salzgrus weist unmittelbar nach der Verfüllung eines unterirdischen Hohlraums eine Anfangsporosität von ca. 35 bis 40 % auf. Diese wird durch den vom Gebirgsdruck verursachten Konvergenzprozess mit der Zeit erheblich reduziert. Die Kompaktierung wird unterschieden in die zunächst erfolgende Kurzzeitkompaktierung und die länger andauernde Kriechkompaktierung /HEI 91/. Die Kompaktion von Salzgrus ist dabei von einer Vielzahl von Parametern abhängig, die sich wiederum gegenseitig beeinflussen können. Neben der Mineralogie, der Kornverteilung und -größe, der Anfangsschüttdichte, der Materialfeuchte und der Temperatur beeinflussen auch der vorherrschende Spannungszustand und die Kompaktionsgeschwindigkeit den Prozess (/KAP 86/, /KAP 88/, /ZHA 95/). Kompaktionsmodelle zur Beschreibung der Salzgruskompaktion wurden u. a. von /ZHA 93/, /KOR 98/, /OLI 02/, /POP 02/ aufgestellt und erweitert.

Die Permeabilität von Salzgrus wird bestimmt durch die mikroskopische Verteilung und die dreidimensionale Vernetzungsstruktur des Porenraumes /MLY 99b/. Aus den bisher im Labor durchgeführten Experimenten sind Funktionen zwischen der Gas-Permeabilität bzw. Laugendurchlässigkeit zur Porosität bzw. Korngröße des trockenen Materials ableitbar. Die Versuche decken im Wesentlichen den Porositätsbereich zwischen der Einbauporosität und einer Porosität von ca. 0,1 für den im Endlager relevanten Temperaturbereich ab /KRE 08/. Niedrige Konvergenzraten des umlagernden Gebirges (z. B. $< 10^{-10} \text{ s}^{-1}$) sind jedoch verantwortlich dafür, dass auch heute noch Unsicherheiten über das Langzeitverhalten von Salzgruskompaktion existieren /KRÖ 12/. Insbesondere der Bereich geringer Permeabilitäten/Porositäten ist mit einer großen Unsicherheit behaftet.

Statistische Auswertungen von Messwerten zeigen zudem, dass der Feuchtegehalt des verwendeten Salzgruses die Permeabilität und damit die Strömungswiderstände maßgeblich beeinflusst (/FEI 96/, /MLY 99a/, /MLY 99b/). Feuchtigkeit kann zu einem signifikanten Absinken des Versatzdruckes führen (Zitat von BGR 1998 in /KRE 08/). Untersuchungen von /ZHA 97/ belegen, dass bereits geringe Zugaben von Lauge (~1%) den Widerstand von Salzgrus deutlich herabsetzen. Diese Feststellung belegen Berechnungen der GRS, die Transportvorgänge im Zusammenhang mit Fluidströmungen/Lösungszutritten zum Gegenstand hatten (/DRO 00/, /ROT 03/). Neuere Laborversuche von /STÜ 12/ zur Bestimmung der Permeabilität von Salzgrusproben mit gerin-

ger Porosität ($< 0,5\%$) zeigen deutliche Unterschiede der beobachteten Permeabilität von trockenem ($k = 10^{-16} \text{ m}^2$) zu feuchtem ($k \leq 10^{-20} \text{ m}^2$) Material. In jüngster Zeit wurden im Rahmen der Repoperm-Projekte Experimente zum Langzeitverhalten von trockenem und feuchtem Salzgrusversatz durchgeführt (/KRÖ 09/, /CZA 12/, /KRÖ 12/). Die mikrostrukturellen Untersuchungen sollen eine Unterscheidung zwischen effektiver und totaler Porosität ermöglichen und eine Abschätzungen erlauben, bei welcher Kompaktion die effektive Porosität Null beträgt und damit der Fluss innerhalb der Probe zum Erliegen kommt /KRÖ 12/.

Labor-Untersuchungen an Proben aus der WIPP-Site (USA) bei Raumtemperatur zeigen, dass bereits geringe Zugaben von Wasser (0,5 %) zu Salzgrusmaterial die Kompaktion um eine Größenordnung erhöhten. Nach dem bisherigen Wissensstand ist daher davon auszugehen, dass es bei Verwendung angefeuchteten Materials schneller zu einer Abnahme der Porosität innerhalb des Versatzes kommt. Diese Erkenntnis wird auch im Sicherheits- und Nachweiskonzept der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben verwendet /MÖN 12/.

Weitere bedeutende Parameter für das Versatz-Stoffgesetz sind, neben der Kornverschiebung und Kornverformung /HEI 91/, die Kornzertrümmerung sowie Umlöse- und Rekristallisationsvorgänge (/ZHA 93/, /HUN 96/). Mikrostrukturanalysen an Salzgrusproben zeigen im Gegensatz zu Salzgesteinsproben Rekristallisation und Korngrenzverschiebungen in der Nachbarschaft von Flüssigkeitseinschlüssen.

Die seit den 1980er Jahren in vielen Projekten von der BGR durchgeführten Oedometer- und Triaxialversuche (/STÜ 95/, /KOR 96/, /KOR 98/) bestätigen im Wesentlichen das von /HEI 91/ aufgestellte Stoffgesetz. Für zahlreiche Versuche wurde das sog. „Referenzmaterial“ für Streckenversatz (part-face Material bis max. 31,5 mm aus dem z2HS Horizont der Staßfurt-Serie) verwendet (/STÜ 04/, /STÜ 07/). Daneben gibt es zusätzliche Untersuchungen mit Material anderer Korngrößen.

Neben gebirgsmechanischen und chemischen Prozessen können auch mikrobielle Prozesse im Steinsalz das Langzeitverhalten eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle maßgeblich beeinflussen, so sind Bakterien u. a. für Behälterkorrosion, Gasproduktion, Veränderung des geochemischen Milieus sowie Ab- und Adsorption von Radionukliden mit verantwortlich. Bisher ist allerdings noch nicht abschätzbar, ob und wenn ja, in welchem Umfang bestimmte mikrobielle Prozesse unter endlagerrelevanten Bedingungen im Steinsalzversatz auftreten können.

In Modellrechnungen von /XU 12/ wurde die Beeinflussung von Versatzmaterial mit dem umgebenen Salzgestein betrachtet. Dabei zeigte sich, dass die viskose Deformation des Versatzes für Langzeitbetrachtungen signifikant ist.

Die quantitative Ermittlung des Rückhaltevermögens von Salzgrus gegenüber Radionukliden und die bisher bestimmten Retardationsfaktoren lassen eine direkte Übertragung in Rückhaltefaktoren für die Langzeitsicherheitsanalyse (noch) nicht zu; dafür müssen weitere Parameter bekannt sein (z. B. Zeiten bis zur Einstellung der Sorptions- bzw. Desorptionsgleichgewichte, Versatzgeometrie). Es wird erwartet, dass Steinsalz als Versatzmaterial nach Konvergenzvorgängen eine ähnlich geringe Wegsamkeit für Radionuklide bietet, wie ungestörtes Steinsalz. Die Sorptionsfähigkeit von Salzgrus ist jedoch sehr gering; aus diesem Grund wurde eine Beimengung von Zuschlagstoffen, welche die Retardationsfähigkeit des Versatzmaterials verbessern sollen, wie Hydroxylapatit /GRU 04/, Ton, Braunkohlenflugasche /MLY 99b/ diskutiert. Ebenso angedacht war es, Mischungen von Salzgrus und Bentoniten zu verwenden. Zugabe von 15% Bentonit zu Salzgrus reduziert die Permeabilität um mehrere Größenordnungen /ZHA 97/. Der dabei eingesetzte Bentonit sollte eine geringe Feuchte besitzen, da sonst eine Desorption des an der Bentonit-Oberfläche gebundenen Wassers zur Wasseraufnahme innerhalb des Salzgruses und somit zu einer Abnahme der mechanischen Stabilität auftreten kann /KAU 09/.

In /SAN 03/ wurde die Wirksamkeit der Abdichtungen von Versatzmaterialien mit Zusatzstoffen (wasserfreien Mineralen) untersucht. Ziel war es nachzuweisen, dass in einem Versatz mit ausgewählten Zuschlagstoffen bei Zutritt von Wasser oder Lauge Reaktionen ausgelöst werden, die einen langzeitstabilen geochemisch-mineralogischen Selbstverschluss (SVV = selbst verheilender Versatz) bewirken. Durch eine Volumenvergrößerung infolge neu gebildeter Feststoffe werden nicht nur ein schneller Druckaufbau und eine starke Reduzierung der Permeabilität innerhalb des Versatzkörpers erzielt, sondern auch ein rascher Kraftschluss zum Gebirge bewirkt.

Schachtanlage Asse II, Deutschland

In der Schachtanlage Asse II wurde zwischen 1990 und 1999 eine Reihe von in-situ Experimenten auf der 800 m-Sohle durchgeführt (gefördert durch BMBF). Im Vorhaben „Thermische Simulation der Streckenlagerung (TSS)“ /DRO 96/ wurde beispielsweise das Kompaktionsverhalten von Salzgrusversatz um in Streckenabschnitten platzierte POLLUX-Behälter untersucht. Die Versuche zeigten, dass für die wärmeren Zentralbe-

reiche die Prognoserechnungen sowohl Streckenkonvergenz als auch Versatzkompaktierung überschätzt haben. Im Vergleich zu Laborexperimenten verhielt sich der Versatz deutlich steifer, was auf eine Entmischung des Salzgruses während der Einbringung zurückgeführt wurde /SCH 93/.

Spezielle Experimente zum unterschiedlichen Kompaktionsverhalten und zur Durchlässigkeit von feinem bzw. grobem Steinsalzgrus im Bohrlochringpalt bzw. im Verschlussbereich erfolgten im Rahmen des Debora-Vorhabens (/ROT 95/, /ROT 99/). Dabei wurde Salzgrusversatz zwischen eingebrachten wärmeproduzierenden Kokillen und dem Gebirge, sowie oberhalb der Kokillen untersucht. Zusätzlich wurden Laborversuche, wie z. B. die Gaspermeabilität in Abhängigkeit der vorherrschenden Temperatur, durchgeführt. Mit Hilfe dieser Daten konnten für Salzgrus mit einer Korngröße < 8 mm (Bohrlochversatz) die Porosität und Permeabilität sowie die relativ geringen Kompaktionsraten gegen Ende des Versuches zufriedenstellend nachberechnet werden. Für gröberes Material (bis zu einer Korngröße von 31,5 mm, Streckenversatz) gelang dies aufgrund mechanischer Instabilitäten der Proben, die auf internen Inhomogenitäten beruhten, nicht /ROT 99/. Untersuchungen zur Wärme- und Temperaturleitfähigkeit sowie der spezifischen Wärme von Salzgrus wurden seit 1996 im Bambus-Vorhaben durchgeführt. Modellrechnungen im Rahmen des Bambus II-Vorhabens zeigten, dass insbesondere die Variation der mechanischen Eigenschaften von Salzgrusversatz einen großen Einfluss auf die einzelnen Modellergebnisse hat und dass weitere Erkenntnisse hinsichtlich des Kompaktionsverhaltens von Steinsalzversatz möglicherweise bessere Vorhersagen erlauben würden /BEC 04/.



Abb. 10.1 Bohrkerngewinnung von kompaktiertem Salzgrus aus der Schachtanlage Asse II, 800 m-Sohle im Rahmen des Debora-Vorhabens /ROT 99/



Abb. 10.2 Freigelegter Erhitzer aus dem TSS-Versuch, Schachtanlage Asse II /ROT 99/

Optische sowie elektronenmikroskopische Untersuchungen an Versatzmaterial aus den TSS-Versuchen belegen, dass effektive Prozesse wie Drucklösung/Rekristallisation bei der Kompaktion von Versatzmaterial keine wesentliche Rolle spielen. Die Wärme der Versuchsbehälter bewirkte keine nennenswerte Alterung des Versatzmaterials /BEC 04/.

Im Jahr 1992 gewonnene Bohrkern mit Versatzmaterial aus der Schachtanlage Asse II wiesen nach dessen Verweilzeit im Gebirge von 60 Jahren immer noch eine hohe

Porosität von ~7 % auf /GLÄ 92/. Vermutlich hat es sich in diesem Fall nicht um Stein-salzgrus als Versatzmaterial gehandelt.

Von 1995 bis 2003 wurden Abbaue und Strecken in der Schachanlage Asse II systematisch mit Haldenmaterial aus Ronnenberg verfüllt. Seit Dezember 2004 wird Eigenversatz zur Verfüllung verwendet. Viele Strecken sind heute nicht mehr zugänglich; es besteht aber noch in einzelnen Teilstrecken die Möglichkeit, an Versatzproben zu gelangen /PAR 12/. Aufgrund der Situation in der Schachanlage Asse II ist an derartigen Lokationen im Grubengebäude ggf. eine rasche Probennahme notwendig.

Salzbergwerk Riedel

Im Salzbergwerk Riedel wurden einzelne Versatzproben untersucht. Die Salzgrus-Bohrkerne stammten aus einer Teufe von 1.260 bzw. 1.275 m und wiesen eine hohe Kompaktion auf. Heute ist das Bergwerk allerdings zum großen Teil geflutet und nicht mehr befahrbar.



Abb. 10.3 Endstücke eines Bohrkerns aus einer Bohrung in den Altversatz von der 1260/1275 m-Sohle des Salzbergwerks Riedel /BRA 08/

Amelie Mine, Frankreich

Im Kalibergwerk Amélie (Mines de potasse d'Alsace, Frankreich) wurden zwischen 1987 und 1991 von der französischen Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA) ebenfalls Erhitzerversuche durchgeführt. Dabei wurden in 520 m

Teufe Bohrlöcher (\varnothing 24 cm) mit Salzgrus dreier Korngrößen (0,4 mm; 1 mm und 2 mm) verfüllt und über eine Länge von 2 m bis max. 130 °C erwärmt. Die durchgeführten in-situ Versuche haben gezeigt, dass der höchste Druck von ~4 MPa innerhalb des Versatzes mit der feinsten Salzgrusfüllungen messbar war (/GHO 91/, /RAY 93/).

10.3 Natürliche Analoga

Bislang gibt es nur wenige Analoga-Standorte, an denen der in ein Bergwerk eingebrachte Salzgrus in-situ oder im Rahmen von Laborversuchen untersucht wurde. Größere Forschungsprojekte, wie in der Schachanlage Asse II oder im Kalibergwerk Amelie wurden in Kap. 10.2 erwähnt. Hinzu kommen kleinere Probenentnahmen aus diversen (ehemals) aktiven Steinsalzbergbauen. Aus diesen Experimenten und Untersuchungen liegen Daten zur Salzgruskompaktion bzw. zur Permeabilitätsabnahme vor. Für die Ermittlung und Präzisierung von Eingangsparametern für Modellrechnungen sowie zur Beantwortung offener Fragen (s. Kap. 10.5) sind weitere Daten aus Analoga-Salzversatzproben wünschenswert, die Aussagen über den laborüblichen Zeitraum hinaus zulassen.

Bereits 1999 legte /BRE 99/ einen Bericht vor, in dem die an den zu untersuchenden Versatz und den Analoga-Standort gestellten Anforderungen erläutert werden. Kap. 10.3.1 fasst die wesentlichen Anforderungen zusammen.

10.3.1 Anforderungen an den zu untersuchenden Versatz und einen Analoga-Standort

Bislang wurde in Deutschland Steinsalzgrus als Versatzmaterial für ein Endlager für radioaktive Abfälle im Salzgestein favorisiert. Aus diesem Grund sollte ein zu untersuchender Altversatz, der als repräsentativ für ein Endlager angesehen werden kann, ebenfalls aus Steinsalzgrus bestehen. Das Korngrößenspektrum sollte endlagerrelevant sein, d. h. die Versatz-Bruchstücke für Streckenverschlüsse sollten < 6 cm sein. Der Versatz sollte analog zum Endlager trocken und möglichst einschließlich der Feinstfraktion sowie weitestgehend firstbündig eingebracht worden sein /MLY 99b/. Wünschenswert sind detaillierte Kenntnisse über das eingebrachte Versatzmaterial zum Zeitpunkt des Eintrages, wie z. B. mineralogische Zusammensetzung, Korngrößenverteilung, evtl. chemische Zusatzstoffe, Feuchte, Art der Einbringung, Schüttdichte, Anfangsporosität, Konvergenz des Gebirges etc. /BRE 99/.

Ein potentieller Analogon-Standort kann theoretisch in einem Salzstock oder einer söhlig gelagerten Salzformation angetroffen werden. Für eine ausreichende Festigkeit der Proben ist jedoch wichtig, dass der Versatz eine genügend hohe Kompaktion erfahren hat. Dafür sind i. d. R. eine ausreichende Teufe (min. 800 m) und ein Mindestalter (≥ 10 Jahre) seit Versatzeinbringung notwendig /BRE 99/. Auch sind Aussagen von Standorten, deren Konvergenzraten gering sind (z. B. Bergwerke mit stützenden Anhydritschichten) nicht als Analogon für ein Endlager in einem Salzstock anwendbar. Für eine ggf. söhliche Einbringung von Abfällen jedoch sind auch diese Standorte mit niedrigen Konvergenzraten von Interesse. Idealerweise befindet sich ein Analogon-Standort für Salzversatz in einem Grubenbereich, dessen Spannungsfeld nicht durch zusätzliche umliegende Abbaue gestört wurde bzw. wird /BRE 99/. Generell sollten die geologischen Standortverhältnisse sowie die Geschichte des Bergbaus, insbesondere die des versetzten Hohlraumes, hinreichend bekannt sein. Technische Anforderungen bestehen zudem darin, ob ein Analogon-Standort zugänglich ist (Grube befahrbar?) und ob eine Probenentnahme unter Tage logistisch und technisch machbar ist.

10.3.2 Potentielle Analoga-Standorte für Untersuchungen zur Salzgruskompaktion

Eine Zusammenstellung heute noch zugänglicher Steinsalz- und Kalibergwerke in Deutschland sowie einiger ausgewählter Standorte im Ausland, die grundsätzlich für weitere Salzgrusversatz-Analoga Untersuchungen in Frage kommen, ist in Tab. 10.1 im Anhang gegeben.

Neben Salzgrusproben aus Salzbergwerken ist ggf. auch die Beprobung oberirdisch gelagerten Haldenmaterials eine Möglichkeit, entsprechende Salzgrusproben zu gewinnen. Es muss jedoch sorgfältig geprüft werden, welche Art von Untersuchungen bzw. Aussagen tatsächlich möglich und sinnvoll sind, da sich viele Randbedingungen bei einer oberirdischen Halde deutlich von denen einer untertägigen Lokation unterscheiden.

10.4 Bewertung

Die bereits durchgeführten Labor- und in-situ Versuche mit Salzgrusversatz sowie die damit einhergehenden Modellrechnungen haben in Teilbereichen bereits zu einer guten qualitativen und quantitativen Datengrundlage geführt. Allerdings gilt dies nicht für

alle Aspekte, die im Rahmen einer Langzeitsicherheitsanalyse von Bedeutung sind. Für spezielle Fragestellungen, wie sie in Kap. 10.5 näher aufgeführt sind, besteht nach wie vor Forschungsbedarf, der durch Natürliche Analoga abgedeckt werden kann.

10.4.1 Grenzen der Anwendbarkeit/Zeitskala/Ungewissheiten

Um sicherheitsrelevante Effekte in Laborversuchen abbilden zu können, werden bei diesen oftmals erhöhte Drücke eingesetzt, die so unter in-situ Bedingungen nicht angetroffen werden. Salzgrusversatz von geeigneten untertägigen Analoga-Standorten hat den Vorteil, dass er über längere Zeiträume realistischen Drücken ausgesetzt war.

Für eine Probenentnahme vor Ort ist eine ausreichend hohe Festigkeit des Versatzmaterials Voraussetzung. Oftmals reichen die Lagerungszeiten des eingebrachten Salzgruses jedoch nicht aus, um die für Kernbohrungen notwendige Verfestigung des Salzgrusversatzes bereits erzielt zu haben und geeignetes Probenmaterial gewinnen zu können. Individuelle Begutachtungen bzw. Testbohrungen sind daher im Einzelfall notwendig. Dies gilt besonders für den ab Mitte der 1990er Jahre eingebrachten Salzgrusversatz bzw. für Salzgrusversatz aus geringer Teufe bzw. Gebirgsbereichen mit geringer Konvergenz.

Unsicherheiten bestehen insbesondere hinsichtlich der Übertragbarkeit und Vergleichbarkeit der aus untersuchtem Probenmaterial gewonnenen Parameter und Daten, da jeder Standort durch seine lokalen Gegebenheiten gekennzeichnet ist. So variieren beispielsweise Zusammensetzung, Korngröße und Feuchte eines Salzgrusversatzes stark. Ebenso kann die Dokumentation über Versatzmaßnahmen von Standort zu Standort sehr unterschiedlich detailliert und ggf. lückenhaft sein. Ein Salzversatz, der allen gewünschten Anforderungen (s. Kap.10.3.1) entspricht, wird deshalb schwer zu finden sein.

Für Untersuchungen einzelner Prozesse bzw. einzelner Fragestellungen, wie z. B. der Art der Vernetzung des Porenraum, möglicher Kanalbildung durch Auf- und Umlösungen, Verhalten von Flüssigkeitseinschlüssen etc., können allerdings unterschiedliche Salzgrusversatz-Proben von verschiedenen Analoga-Standorten durchaus schon wichtige Grundlagen bilden.

10.4.2 Verwendungsmöglichkeit im Sicherheitsnachweis

Aus Analoga-Untersuchungen gewonnene Kenngrößen und Materialparameter für Steinsalzgrusversatz (z. B. Permeabilität, Porosität) können in Modellrechnungen für die jeweiligen Teilsysteme und Komponenten eines Endlagers im Rahmen eines Sicherheitsnachweises eingesetzt werden. Des Weiteren bieten Untersuchungen an kompaktiertem Salzversatz auch wertvolle Qualifizierungsmöglichkeiten für Stoffmodelle in Modellrechnungen auch wenn sie nicht endlagerrelevante Bedingungen widerspiegeln.

10.4.3 Bewertung der Möglichkeit der Kommunikation

Die Darstellung von Erkenntnissen aus Experimenten, die im Rahmen von Natürlichen bzw. Technischen Analoga-Projekten gewonnen werden, kann für die Öffentlichkeit ggf. einfacher nachvollziehbar und daher überzeugender sein, als komplexe, theoretische Modellierungsergebnisse. Untersuchungen in Salzbergwerken „vor der Haustür“, die auf eine lange Tradition zurückblicken, werden vermutlich bei der Öffentlichkeit auf ein reges Interesse stoßen.

Für Experten sind natürliche und technische Analoga bereits seit vielen Jahren hinsichtlich unterschiedlicher Fragestellungen von Interesse. Insbesondere Untersuchungen, die sich mit tatsächlich ablaufenden Prozessen beschäftigen und somit zum Gesamtverständnis z. B. zur Verheilung von Salzgrusversatz im Bergwerk Beiträge leisten können, sind für Fachkreise interessant und können mit diesen diskutiert werden.

10.5 Offene Fragen

Zur genaueren Ableitung von Eigenschaften und Kenngrößen für Steinsalzgrusversatz sowie zur (Über)-Prüfung der Stoffgesetze für Steinsalzgrus sind weitere Analoga-Untersuchungen wünschenswert.

Nach wie vor gibt es Forschungsbedarf zum Langzeitverhalten der Salzgruskompaktion und der damit verbundenen Permeabilitätsverringerung, insbesondere im Porositätsbereich $< 10\%$ sowie bei niedrigen Konvergenzraten des umgebenden Gebirges /KRÖ 12/. In diesem Zusammenhang sind auch weitere Aussagen über die Veränderung von Kompaktionsraten in Abhängigkeit von der Zeit wünschenswert. Weiterhin

gibt es noch offene Fragen zum Zweiphasenfluss, insbesondere im ungesättigten kompaktiertem Salzgrusversatz /KRÖ 12/.

Darüber hinaus ist die Kenntnis von Kenngrößen und Parametern des eingebrachten, angefeuchteten Salzgrusmaterials (gilt sowohl für Strecken- als auch für Bohrlochversatz) wünschenswert. Für trockenes Salzgrusmaterial liegen bereits Modell-Eingangsdaten vor, welche noch zu überprüfen sind.

Neben der Erhebung von für die Modellierung benötigten Kenngrößen können Untersuchungen, die sich mit vorliegenden Mikrostrukturen und der Porenraumvernetzung innerhalb des Salzgrusversatzes beschäftigen, zusätzliche Informationen zum Prozessverständnis liefern, z. B., wie sich Flüssigkeitseinschlüsse in kompaktiertem Salzgrus verhalten, ob und wie Korngrenzen-Verschiebungen bzw. Rekristallisationsvorgänge stattfinden und wie der Heilungsprozess im Übergangsbereich zwischen Salzgrus und Steinsalz in der Natur abläuft.

10.6 Literatur zu Kapitel 10

/BEC 04/ Bechthold, W.; Smailos, E.; Heusermann, S.; Bollingerfehr, W.; Bazargan Sabet, B.; Rothfuchs, T.; Kamlot, P.; Grupa, J.; Olivella, S.; Hansen, F.D.: Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS-II Project). - Commission of the European Communities, EUR 20621, 272 pp., Luxembourg, 2004.

/BRA 08/ Brassler, Th.; Bletz, B.; Noseck, U.; Schmidt, G.: Die Rolle Natürlicher Analoga bei der Sicherheitsbewertung von Endlagern - Anhang „Natürliche Analoga“. - in: Brassler, T. et al.: Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-247, 96 S. + 22 Anhänge auf CD, Köln, 2008.

/BRE 99/ Brenner, J.; Feddersen, H.-K.; Gies, H.; Miehe, R.; Rothfuchs, T.; Storck, R.: Untersuchungen von Altversatz als Analogon zur Konvergenz und Kompaktierung untertägiger Hohlräume im Salz über lange Zeiträume-Phase 1. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-147, Köln, 1999.

- /CZA 12/ Czaikowski, O.; Wieczorek, K.; Kröhn, K.-P.: Compaction of salt backfill-
new experiments and numerical modeling. - Mechanical Behaviour of salt
VII, pp. 161-168, 2012.
- /DRO 96/ Droste, J.; Feddersen, H.K.; Rothfuchs, T.; Zimmer, U.: The TSS-Projekt:
Thermal Simulation of Drift Emplacement, Final Report Phase 2. - Gesell-
schaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-127, Köln,
1996.
- /DRO 00/ Droste, J.; Feddersen, H.K.; Rothfuchs, T.: Experimental Investigations on
the Backfill Behaviour in Disposal Drifts in Rock Salt (VVS-Projekt). - Ge-
sellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-173, Köln,
2000.
- /FEI 96/ Fein, E. et al.: Ableitung einer Permeabilitäts-Porositätsbeziehung für Salz-
grus und Dammbaumaterialien. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktors-
icherheit (GRS) mbH, GRS-132, Köln, 1996.
- /GHO 91/ Ghoreychi, M.: Behaviour of crushed salt under the effect of a heat source
in tests conducted in a salt mine. - Commission of the European Communi-
ties, EUR 13638, pp. 348, 1991.
- /GLÄ 92/ Gläß, F.; Kappei, G.; Schmidt, M.W.; Schwieger, K.; Starke, C.; Taubert, E.;
Wallmüller, R.; Walter, F.: Backfilling and sealing of rooms and galleries in
a repository in salt. - Commission of the European Communities, EUR
13955, pp. 279, Luxembourg, 1992.
- /GRU 04/ Grundfelt, B.; Smellie, J.: Prozessorientierte Auswertung von natürlichen
und anthropogenen Analoga und ihre Bewertung als vertrauensbildendes
Element bei Sicherheitsbewertungen für Anlagen zur Endlagerung radioak-
tiver Abfälle. - Kemakta Konsult AB, AR 2004-16, pp.187, 2004.
- /HEI 91/ Hein, H.-J.: Ein Stoffgesetz zur Beschreibung des thermomechanischen
Verhaltens von Salzgranulat. - Dissertation TH Aachen, 1991.

- /HUN 96/ Hunsche, U.; Schulze, O.: Effect of humidity and confining pressure on creep of rock salt. - In: The Mechanical Behavior of Salt III; Proc. 3rd Conf. Palaiseau (France), pp. 237-248, 1996.
- /KAP 86/ Kappei, G.: Verdichtungsverhalten von Steinsalzhaufwerken (0-20 mm). - Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung, GSF-Bericht 5/86, Neuharberg, 1986.
- /KAP 88/ Kappei, G.: Ermittlung bodenmechanischer Eigenschaften von Salzhaufwerken als mögliche Versatzmaterialien in einem untertägigen Endlager. - Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung, GSF-Bericht 1/88, Neuharberg, 1988.
- /KAU 09/ Kaufhold, S.; Stührenberg, D.; Dohrmann, R.: Water redistribution between bentonite and salt at elevated temperature. - Applied Clay Science, Vol. 46, pp. 245-250, 2009.
- /KOR 96/ Korthaus, E.: Consolidation and Deviatoric Deformation Behaviour of Dry Crushed Salt at Temperatures up to 150°C. - 4th Conference on Mechanical Behaviour of Salt, Montreal, June 17-18, 1996.
- /KOR 98/ Korthaus, E.: Experiments on Crushed Salt Consolidation with True Triaxial Testing device as a Contribution to an Benchmark Exercise. - Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftlicher Bericht FZKA 6181, pp.19, Karlsruhe, 1998.
- /KRE 08/ Kreienmeyer, M.; Lerch, Ch; Polster, M.; Tholen, M.: Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW. – Teilbericht AP5: Nachweiskonzept zur Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren zum Forschungsvorhaben ISIBEL, Förderkennzeichen 02E10055 und 02E10065, 2008.
- /KRÖ 09/ Kröhn, K.-P.; Stührenberg, D.; Herklotz, M.; Heemann, U.; Lerch, Ch.; Xie, M.: Restporosität und -permeabilität von kompaktierendem Salzgrusversatz, REPOPERM – Phase 1. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-254, Köln, 2009.

- /KRÖ 12/ Kröhn, K.-P.; Zhang, C.L.; Wolf, J.; Stührenberg, D.; Jobmann, M.; v. Borstel, L.; Lerch, C.: The compaction behaviour of salt backfill at low porosities. - Mechanical Behaviour of salt VII, pp. 161-168, 2012.
- /MLY 99a/ Müller-Lyda, I.; Birthler, H.; Fein, E.: Ableitung von Permeabilitäts-Porositätsrelationen für Salzgrus. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-148, 74 S., Köln, 1999.
- /MLY 99b/ Müller-Lyda, I.: Eigenschaften von Salzgrus als Versatzmaterial im Wirtsgestein Salz. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-143, 78 S., Köln, 1999.
- /MÖN 12/ Jörg Mönig, J.; Buhmann, D.; Rübél, A.; Wolf, J.; Baltes, B.; Fischer-Appelt, K.: Sicherheits- und Nachweiskonzept. Bericht zum Arbeitspaket 4. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. – GRS-277, 2012.
- /OLI 02/ Olivella, S.; Gens, A.: A constitutive model for crushed salt. - Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., Vol. 26, issue 7, pp. 719-746, 2002.
- /PAR 12/ Parlitz, A.: Mündliche Mitteilung, Asse GmbH, 06.03.2012.
- /POP 02/ Popp, T.: Transporteigenschaften von Steinsalz – Modellierung der Permeabilitäts-Porositäts-Beziehung. - Meyniana, Vol. 54, pp. 113-129, 2002.
- /RAY 93/ Raynal, M.; Laurens, J.F.; Jehan, R.A.: In-situ tests on backfilling and surrounding host-rock in the case of a radioactive waste disposal in a layered salt formation. - Engineering Geology, Vol. 34, pp. 281-293, 1993.
- /ROT 95/ Rothfuchs, T.; Prij, J.; Kröhn, K.-P.; van den Horn, B.A.; Wieczorek, K.: DEBORA-Project - Development of Borehole Seals for High-Level Radioactive Waste, Final Report Phase I 1991-1995. - GSF Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GSF-Bericht 28/95, Neuherberg, 1995.
- /ROT 99/ Rothfuchs, T.; Feddersen, H.-K.; Kröhn, K.-P.; Miehe, R.; Wieczorek, K.: The DEBORA-Project: Development of Borehole Seals for High-Level Radioactive Waste – Phase II. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-161, 109 pp., Köln, 1999.

- /ROT 03/ Rothfuchs, T. et al.: Final Evaluation of the Project "Thermal Simulation of Drift Emplacement" (TSDE-Projekt) - Final Report. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-194, 137 pp., Köln, 2003.
- /SAN 03/ Sander, W.; Herbert, H.-J.: Wirksamkeit der Abdichtungen von Versatzmaterialien – Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Salzversatz mit Zuschlagstoffen. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-180, 225 pp., Köln, 2003.
- /SCH 93/ Schneefuß, J.; Droste, J.; Gommlich, G.; Jockwer, N.; Kunze, N.; Mönig, J.: Testplan zum Demonstrationsversuch „Thermische Simulation der Streckenlagerung“ im Salzbergwerk Asse. Hauptband Direkte Endlagerung. - Kernforschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe, 1993.
- /STÜ 95/ Stührenberg, D.; Zhang, C.L.: Results of Experiments on the Compaction and Permeability Behaviour of Crushed Salt. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover 1995. Abrufbar unter http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Downloads/kompaktion_salzgrus.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (19.08.2013)
- /STÜ 04/ Stührenberg, D.: Compaction and Permeability Behaviour of Crushed Salt and Mixtures of Crushed Salt and Bentonite. - Proc. DisTec2004, Int. Conf. on Radioactive Disposal, pp. 511-515, Berlin, 2004.
- /STÜ 07/ Stührenberg, D.: Long-term laboratory investigation on backfill - The Mechanical Behaviour of Salt-Understanding of the THMC Process in Salt. - Proc. "Saltmech6", pp. 223-229, Hannover, 2007.
- /STÜ 12/ Stührenberg, D.; Schulze, O.: Porosity and permeability of crushed and damaged rock salt during compaction. - Mechanical Behaviour of Salt, Vol. VII., pp. 275-282, 2012.
- /XU 12/ Xu, Y.L.; Yang, C.H.; Li, Y.P.; Guo, Y.T.; Ji, W.D.: Preliminary study of the interaction between backfill body and surrounding rock salt mass. - Mechanical Behaviour of salt, Vol. VII, pp. 293-301, 2012.

- /ZHA 93/ Zhang, Ch.; Heemann, U.; Schmidt, M.W.; Staupendahl, G.: A constitutive Model for description of Compaction Behaviour of Crushed salt Backfill. - ISRM Int. Sym. Eurock 93, Lisbon, 1993.
- /ZHA 95/ Zhang, Ch.: Studies of the consolidation behavior of salt grit as filling material for repositories in salt domes, with spatial regard to the interaction between rock and fill. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Report Nr. INIS-mf-15136, pp. 114, Hannover, 1995.
- /ZHA 97/ Zhang, Ch. et al.: Compaction and its effects on the permeability of crushed salt with added brine or bentonite. - Proc. 6th Int. Conf. on Radioactive Waste Management and Environment Remediation, pp. 289-294, Singapore, 1997.

10.7 Anhang: Potentielle Analoga-Standorte

In der nachfolgenden Tabelle sind Informationen zu potentiellen Analoga-Standorten für Untersuchungen der Salzgrus-Kompaktion im In- und Ausland zusammengestellt.

Tab. 10.1 Potentielle Analoga-Standorte zur Untersuchung von Salzgrus

Name/Ort	Ressource	Abbau Beginn	Abbau Ende	Heutige Funktion	Lagerungsverhältnisse
Baden-Württemberg					
Bergwerk Heilbronn, Stadt Heilbronn	Steinsalz	1883	aktiv	Bergwerk und UTD	Flache Lagerung, mittlerer Muschelkalk, in 200 m Teufe, Mächtigkeit 30 – 40 m
Salzbergwerk Bad Friedrichshall-Kochendorf, Kreis Heilbronn	Steinsalz	1899	1994	Besucherbergwerk und UTV	Flache Lagerung, mittlerer Muschelkalk, in 100-200 m Teufe, Mächtigkeit 25 – 30 m
Salzbergwerk Stetten, Haigerloch-Stetten	Steinsalz	1854	aktiv	Bergwerk und UTV	Flache Lagerung, mittlerer Muschelkalk, in ca. 130 m Teufe, Mächtigkeit 8 – 10 m
Hessen					
Kaliwerk Heringen und Kaliwerk Wintershall, Heringen (Werra)	Kalisalz	1907	aktiv	Bergwerk und UTV (seit 1997 beim K+S Kali GmbH Verbundwerk Werra)	Flache Lagerung, Zechstein
UTD Herfa-Neurode, Heringen (Werra)	Kalisalz	1972	aktiv	UTD	Flach Lagerung, Zechstein
Kaliwerk Heimbaldshausen und Kaliwerk Hattorf (Schacht Hera), Philippsthal (Werra)	Kalisalz	1905	aktiv	UTV (seit 1997 beim K+S Kali GmbH Verbundwerk Werra)	Flach Lagerung, Zechstein

Name/Ort	Ressource	Abbau Beginn	Abbau Ende	Heutige Funktion	Lagerungsverhältnisse
Niedersachsen					
Kaliwerk Salzdetfurth, Bad Salzdetfurth	Kalisalz	1899	aktiv	UTV (seit 1999 bei der K+S Aktiengesellschaft)	Salzstock, Zechstein, Salzspiegel in ca. 180 m Teufe
Kali- und Steinsalzbergwerk Asse, Remlingen	Kali- und Steinsalz	1899	aktiv	Ehem. Forschungsbergwerk; heute Option der Rückholung der radioaktiven Abfälle favorisiert	Salzstock, Zechstein
Kaliwerk Sigmundshall, Wundsdorfbokeloh	Kalisalz	1898	aktiv	Kalibergwerk und UTV	Salzstock, Zechstein
Kaliwerk Wilhelmine-Carlsglück, Hülsen a.d. Aller	Kalisalz	1905	1924	Seit 1973 Erdöltief-speicher	Salzstock, Zechstein, Endteufe der Schächte bei ca. 600 m
Steinsalzwerk Braunschweig-Lüneburg, Grasleben	Kali- und Steinsalz	1913	aktiv	Seit Sommer 2012 Untergrundlabor für Dosimetrie und radiologische Spektrometrie (UDO2) der PTB	Salzstock, Zechstein
Kaliwerk Glückauf-Sarstedt, Sarstedt	Kali- und Steinsalz	1904	1925	Durchschlag zur Schachanlage Fürstenhall, Reservebergwerk Siegfried Gießen auf der 550-m-Sohle.	Salzstock, Zechstein
Kaliwerk Siegfried-Giesen, Sarstedt	Kalisalz	1909	1987	Reservebergwerk; bis 1999 wurden Versatarbeiten durchgeführt; Zugang z. Z. nur über den Schacht Fürstenhall; nicht befahrbar	Salzstock, Zechstein

Name/Ort	Ressource	Abbau Beginn	Abbau Ende	Heutige Funktion	Lagerungsverhältnisse
Sachsen-Anhalt					
Steinsalzbergwerk Bernburg, Bernburg	Steinsalz	1912	aktiv	Bergwerk, seit 1974 zusätzliche Nutzung als Untergrundspeicher für Erd- und Flüssiggas	Salzstock, Zechstein
Kaliwerk Staßfurt, Staßfurt	Kali- und Steinsalz	1857	1972	heute nur noch Solgeförderung	Salzsattel, Zechstein, Solkavernen in 400 – 600 m Teufe
ERAM Schacht Marie und Schacht Bartensleben, Morsleben	Steinsalz	1897	1966	Endlager für schwach-mittelradioaktive Abfälle; Beendigung des Einlagerungsbetriebs 1998	Salzstock, Zechstein, geringe Konvergenz !
Kaliwerk Teutschenthal, Schacht Krügershall, Teutschenthal	Kalisalz	1906	1982	Seit 1992 UTV	Salzsattel, Zechstein, Carnallit bis 50 m, Steinsalz bis 300 m
Kaliwerk Zielitz, Zielitz (Landkreis Börde)	Kalisalz	1973	aktiv	Seit 1995 UTD	Salzvorkommen auf der Scholle von Calvörde, Zechstein
Thüringen					
Kaliwerk Thomas Müntzer, Bischofferode	Kalisalz	1911	1993	Industrieverfüllung; heute nur noch teils zugänglich	Flache Lagerung, Zechstein
Kaliwerk Sollstedt, Sollstedt	Kalisalz	1902	1991	UTV	Flache Lagerung, Zechstein
Kaliwerk Bleicherode (Karl Liebnecht), Bleicherode	Kalisalz	1899	1990	Seit 1996 UTV	Flache Lagerung, Zechstein
Kaliwerk Glückauf, Sondershausen	Kali- und Steinsalz	1893	1991	Seit 1991 Versatzmaßnahmen, 1998 Gründung der EBBG mbH (Erlebnisbergwerk Glückauf); seit 2006 UTD	Flache Lagerung, Zechstein
Kaliwerk Unterbreizbach-Merkers, Merkers	Kalisalz	1910	aktiv	Seit 1991 Erlebnisbergwerk Merkers; seit 1997 zum Verbundwerk Werra	Flache Lagerung, Zechstein

Name/Ort	Ressource	Abbau Beginn	Abbau Ende	Heutige Funktion	Lagerungsverhältnisse
Ausland					
USA					
WIPP-Site, Carlsbad (New Mexico)	Steinsalz			Untertagelabor	Flache Lagerung, Zech- stein, in ca. 300 m Teufe
Frankreich					
StocaMine, Wittelsheim (Elsass)	Kali- und Steinsalz	1910		Zeitweise UTD (nach Brand stillgelegt)	Flache Lagerung, Tertiär
Polen					
Salzbergwerk Wieliczka, Wie- liczka	Steinsalz	~1283	1993	Teilweise abgesof- fen, teilweise mit Versatz gefüllt, seit 1978 UNESCO Kulturerbe	Ursprünglich flache Lagerung, durch Tekto- nik z. T. übereinander gefaltet, Miozän, Mäch- tigkeit max. 300 m

11 Chemische Zusammensetzung von Fluideinschlüssen

11.1 Bedeutung für den Sicherheitsnachweis

Nach der Bildung von Fluideinschlüssen im Halit während der Evaporation des Meerwassers und der Formation einer Salzlagerstätte kann sich deren chemische Zusammensetzung nur durch Einträge von meteorischen oder hydrothermalen Wässern ändern. Auf diesem Grundsatz basiert die Bestimmung der Zusammensetzung des Paläo-Meerwassers (siehe z. B. /HOR 02/). Dabei erweisen sich Gehalte an stabilen Wasser-, Chlor- und Strontium-Isotopen im Steinsalz sowie Schwefel- und Kohlenstoff-Isotopen in im Steinsalz eingelagerten Mineralen als besonders hilfreich, um auf die Genese der Fluideinschlüsse und eingelagerter Minerale rückzuschließen. Insbesondere helfen diese Indikatoren, die eventuellen Einträge von meteorischen oder hydrothermalen Wässern zu identifizieren. Es ergibt sich somit die Möglichkeit, durch die Bestimmung solcher Indikatoren die Integrität von ausgewiesenen Bereichen eines Salzgesteins – nicht nur von Halit-Schichten sondern auch von eventuell eingelagerten Schichten anderer Minerale – über geologische Zeiträume nachzuweisen oder zu widerlegen.

11.2 Erkenntnisse aus Labor- und In-situ-Experimenten

Geochemische Filterung wurde in /ZIM 01/ vorgeschlagen und z. B. in /HOR 02/ verwendet, um primäre Fluideinschlüsse zu identifizieren, die evaporiertes Meerwasser vor Kalisalz-Präzipitation und ohne Einfluss der Evaporit-Wiederauflösung enthalten. Diese Methode basiert auf der Berechnung von Evaporationsstufen für unterschiedliche Elemente der Laugen, die für unterschiedliche Salzbildungsprozessen charakteristisch sind /ZIM 01/.

11.3 Natürliche Analoga

Laut /LÜD 10/ wird die Systematik der stabilen Wasserisotope $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^2\text{H}$ am häufigsten verwendet, um zwischen Formationswässern meteorischen und marinen Ursprungs zu unterscheiden. Die $\delta^{18}\text{O}^7$ und $\delta^2\text{H}^8$ Werte variieren z. B. jeweils in Berei-

⁷ $\delta^{18}\text{O} = \left(\frac{{}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}}{{}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}_{\text{SMOW}}} - 1 \right) \times 1000$, SMOW = Standard Mean Ocean Water

⁸ $\delta^2\text{H} = \left(\frac{{}^2\text{H}/{}^1\text{H}}{{}^2\text{H}/{}^1\text{H}_{\text{SMOW}}} - 1 \right) \times 1000$

chen von -11 bis +12 ‰ und -80 bis +10 ‰ in Proben des Zechsteinsalzes aus dem Salzbergwerk Kłodawa /DUL 00/. Mit Hilfe dieser Systematik, des Cl/Br-Verhältnisses und der Zusammensetzung von zweiwertigen Ionen wurde z. B. für das Palo Duro Becken in Texas gefolgert /KNA 88/, dass:

- Laugen innerhalb des permischen Steinsalzes seit dem Perm hydrologisch isoliert blieben,
- Laugen unterhalb des Steinsalzes an der Ostflanke des Beckens eine Mischung aus einem durch Evaporation aufkonzentriertem Meerwasser und einem meteorischen Wasser mit einem $\delta^2\text{H}$ Wert von -20 ‰ darstellen,
- Laugen unterhalb des Steinsalzes an der Ostflanke des Beckens eine Mischung aus zwei meteorischen Wässern mit $\delta^2\text{H}$ Werten von -20 ‰ und -55 ‰ darstellen,
- Wässer oberhalb des Steinsalzes die isotopische Zusammensetzung von meteorischen Wässern haben.

Ebenso konnte anhand der Wasserisotopenwerte zwischen dem Formationswasser und jüngeren Wassereinträgen in das Steinsalz im Salzbergwerk Kłodawa unterschieden werden (Abb. 11.1) /DUL 00/. Ferner konnte mit Hilfe der Wasserisotopensystematik für das Gasfeld Altmark, das 25 km südwestlich des Salzbergwerkes Gorleben liegt, gezeigt werden, dass Porenwasser im durch Zechsteinsalz überlagerten Sandstein beträchtliche Anteile an Formationswässern enthalten /LÜD 10/. Daraus wurde geschlossen, dass keine Einträge von jüngeren bzw. meteorischen Wässern aus dem Hangenden in das Rotliegende erfolgten.

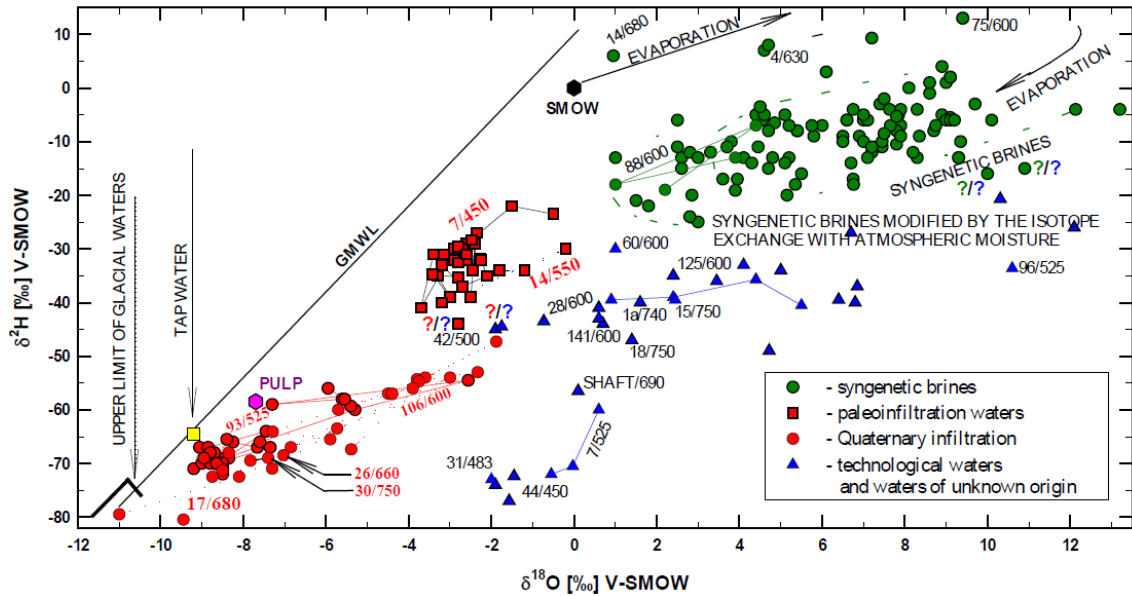


Abb. 11.1 Isotopensignatur von Wassereinträgen in das Salzbergwerk Kłodawa (Polen). Die Bezeichnung „Zahl1/Zahl2“ (z. B. 14/550) gibt die laufende Nummer (Zahl1, bspw. 14) und die Tiefe des Auftretens (Zahl2, bspw. 550) eines Wassereintrags an /DUL 00/

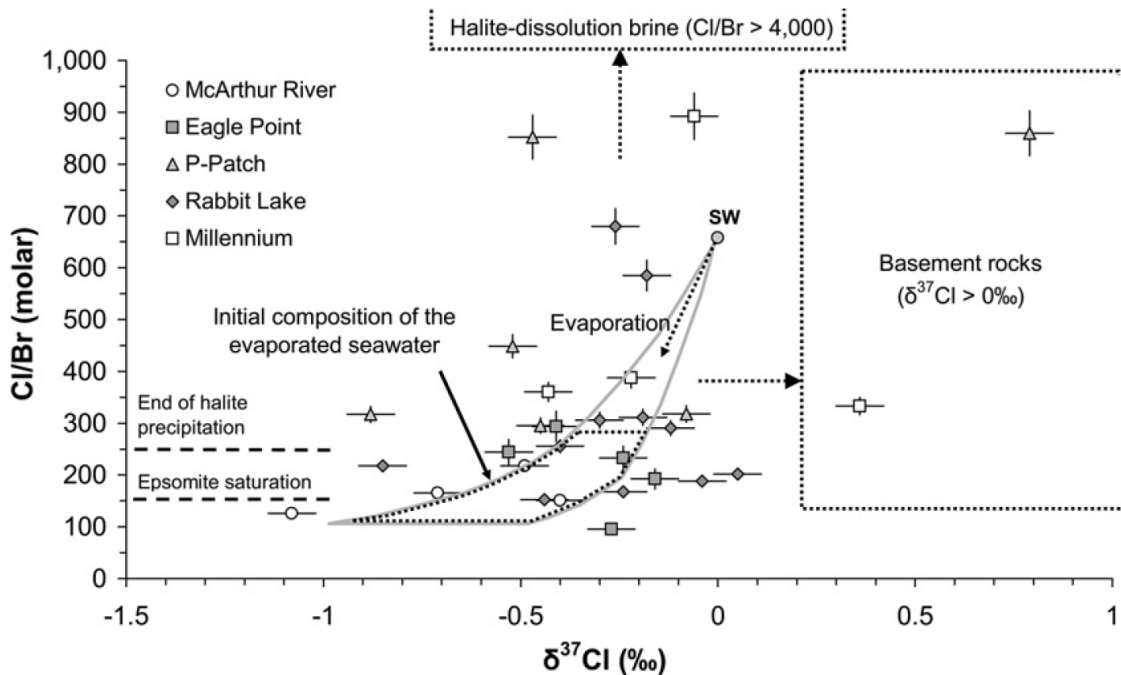


Abb.11.2 Zusammenhang zwischen $\delta^{37}\text{Cl}$ und dem Cl/Br-Verhältnis für Salzlagen aus Fluideinschlüssen in Quarz- und Karbonatadern einer Uranlagerstätte im paläoproterozoischen Athabasca Becken in Canada (SW = Meerwasser) /RIC 11/

Laut /EGG 95/ können die systematischen Veränderungen des $\delta^{37}\text{Cl}^9$ in Laugen oder Steinsalz benutzt werden, um die stattgefundenene Evaporation zu quantifizieren, die Zeiten der Einträge von frischem Meerwasser zu bestimmen und das Vorliegen einer Vermischung mit teilweise wiederaufgelöstem Salz festzustellen (Abb.11.2). $\delta^{37}\text{Cl}$ -Werte variierten z. B. zwischen $-0,58 \pm 0,04 \text{ ‰}$ und $+0,24 \pm 0,06 \text{ ‰}$ in Zechsteinsalzproben /EGG 95/. In /EAS 99/ wird geschlossen, dass Laugen mit $\delta^{37}\text{Cl}$ -Werten im Bereich von $-0,1$ bis $0,4 \text{ ‰}$ im Halit des Palo Duro Beckens aus dem Perm durch eine Reihe von Prozessen einschließlich einer Halit-Auflösung in meteorischen Wässern erzeugt werden können. Hingegen können $\delta^{37}\text{Cl}$ -Werte von $-1,0$ bis $-0,4 \text{ ‰}$ in Halit-Laugen nicht durch eine Halit-Auflösung generiert werden und weisen auf die Erhaltung der Laugen seit der Zeit der Evaporit-Formation hin. Im Unterschied zur $\delta^{18}\text{O}$ - und $\delta^2\text{H}$ -Systematik verhält sich die $\delta^{37}\text{Cl}$ -Systematik konservativ auch für hydrothermale Systeme /RIC 11/.

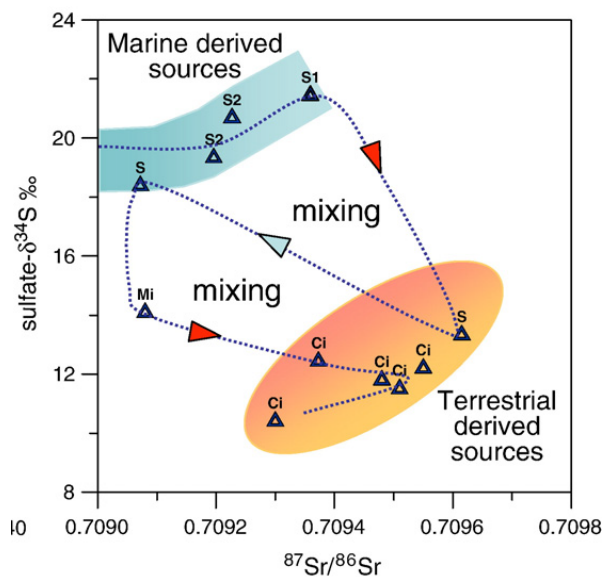


Abb.11.3 Zusammenhang zwischen $\delta^{34}\text{S}$ und $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in Fluideinschlüssen im Salz IV des Mulhouse Beckens in Elsass (Frankreich)

Die gepunktete Linie stellt die Variation des $\delta^{34}\text{S}$ und $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ während des Evaporationsprozesses vom Marl-Anhydrit (S2) über Halit (S1) zum Marl-Anhydrit (S) und Halit (Mi und Ci) dar. Die farblich unterlegten Flächen stellen marine und terrestrische Endglieder dar /CEN 08/

⁹ $\delta^{37}\text{Cl} = \left(\frac{^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}}{(^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl})_{\text{SMOC}}} - 1 \right) \times 1000$, SMOC = Standard Mean Ocean Chloride

Variationen in $\delta^{34}\text{S}$ -Werten¹⁰ einer Anhydritschicht können auf Veränderungen in Wassereinträgen, Randbedingungen, Redoxreaktionen sowie biogenen Prozessen wie bakterielle Sulfatreduktion, die im Formationsbecken einer Salzlagerstätte stattfanden, hinweisen (Abb.11.3) /GAR 11/. $\delta^{34}\text{S}$ -Werte variierten z. B. zwischen +8,84 und + 11,96 ‰ in Zechsteinsalzproben /GAR 11/, während sie in Proben eines deutlich jüngeren Steinsalzes aus dem Eozän im Bereich von + 12,9 bis + 23,6 ‰ lagen /AYO 95/.

Eine Kombination der Strontium-Isotopen-Bestimmung mit klassischen chemischen und weiteren isotopischen Verfahren wird als sehr effektiv für Untersuchungen der Modifikation des Laugenchemismus durch diagenetische Prozesse, die den Ausgangswert des $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisses im Meerwasser oder Steinsalz verändern, bewertet /KLO 01/. Beispielsweise wurden in /HOR 02/ für die Bestimmungen der chemischen Zusammensetzung des Paläo-Meerwasser nur die Fluideinschlüsse herangezogen, deren Strontium- und Schwefel-Isotopensignaturen eindeutig auf ihren marinen Ursprung hindeuteten. Das $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnis variiert zwischen 0,7068 und 0,7082 in Laugen und Steinsalz, die dem Meerwasser aus dem Perm entstammen; Laugen aus dem Gorleben-Gebiet sind charakterisiert durch einen schmalen Wertebereich von 0,7076 bis 0,7079 /KLO 01/. Einträge von Strontium aus tiefen hydrothermalen Wässern oder aufgrund einer Wechselwirkung mit dem Nebengebirge können anhand höherer Werte des $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisses von jeweils 0,7115 und >0,724 festgestellt werden /CEN 08/, /LÜD 10/.

Eine negative Verschiebung des $\delta^{13}\text{C}$ -Wertes¹¹ um ~2 ‰, die weltweit für anorganischen und organischen Kohlenstoff an der Perm-Trias-Grenze (vor ~250 Millionen Jahren) beobachtet wird /DOL 01/, kann benutzt werden, um zu prüfen, ob Karbonate im Zechsteinsalz eine postsedimentäre Transformation aufgrund eines Kontakts mit meteorischen Wässern erfahren haben.

Brom reichert sich in einer Lauge an, wenn solche Mineralphasen wie Halit, Calcit/Dolomit oder Anhydrit/Gips präzipitieren, und erreicht bei der Halit-Präzipitation aus einem modernen Meerwasser eine Konzentration von 68 bis 75 ppm /CEN 08/. Höhere Bromgehalte deuten auf einen Bromeintrag mit regionalen hydrothermalen Wässern oder als Resultat einer Auflösung von Kalisalzen hin, während niedrigere Bromgehalte

¹⁰ $\delta^{34}\text{S} = ((^{34}\text{S}/^{32}\text{S}) / (^{34}\text{S}/^{32}\text{S})_{\text{V-CDT}} - 1) \times 1000$, V-CDT = Vienna Canyon Diablo Troilite

¹¹ $\delta^{13}\text{C} = ((^{13}\text{C}/^{12}\text{C}) / (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{V-PDB}} - 1) \times 1000$, V-PDB = Vienna Pee Dee Belemnite

für einen Einfluss meteorischer Wässer oder Salz-Wiederauflösung charakteristisch sind /CEN 08/, /GAR 11/. Allerdings können Variationen der Bromkonzentration im Meerwasser oder der Brompartition bei einer Mineralpräzipitation, die mit Variationen der Sulfatkonzentration im Meerwasser einhergehen können, auch zu niedrigeren Bromgehalten in Salzlaugen führen /CEN 08/, /GAR 11/.

Laut /KOV 08/ stellt ein relativer CH_4 -Anteil von $>50\%$ in Gaseinschlüssen einen direkten Nachweis einer Kohlenwasserstoffakkumulation im Liegenden dar. Außerdem werden hoher interner Gasdruck in Gaseinschlüssen und deren Assoziation mit geheilten Mikrorissen in einem kristallinen Halit als starke Hinweise auf ein postsedimentäres – möglicherweise nach Erreichen gegenwärtiger Teufe – Eindringen von Gasen in den Halit betrachtet /KOV 06/. Das Vorhandensein von Gasphasen in Fluideinschlüssen wird von einigen Wissenschaftlern generell als ein Hinweis auf deren postsedimentäre Modifikation angesehen und somit als disqualifizierend für eine Rekonstruktion der Zusammensetzung des Paläo-Meerwassers bewertet /KOV 06/. In Halit-Kristallen aus dem Gorlebener Hauptsalz kommen häufig gasreiche bzw. laugenreiche Einschlüsse mit einem relativen CH_4 -Anteil von $>50\%$ vor /SIE 01/. Es wird in der letzten Arbeit mit Verweis auf /ROE 84/ festgestellt, dass die typische Verengung der Fluideinschlüsse in Halit-Kristallen aus dem Gorlebener Hauptsalz (Abb.11.4) auf ihre sekundäre Genese hindeutet. Solche Verengungen werden in /ROE 84/ als Nachweis für eine relativ moderne Entstehung infolge einer Rissverheilung betrachtet.

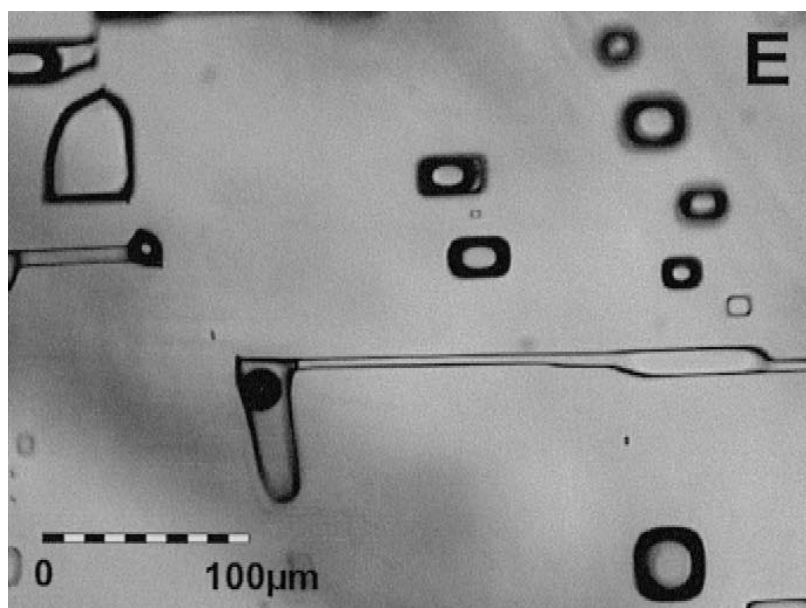


Abb.11.4 Typische Verengung der Fluideinschlüsse in Halit-Kristallen aus dem Gorlebener Hauptsalz /SIE 01/

11.4 Bewertung

Die diskutierten Integritätsindikatoren können sowohl für das Salzgestein eines Endlagerstandortes als auch für Salzgesteine aus dem gleichen Erdzeitalter anderer Standorte – die Natürlichen Analoga – verwendet werden. Sie können eine zeitliche und räumliche Eingrenzung eines von äußeren hydrochemischen und hydrothermalen Einflüssen isolierten Bereiches des Salzgesteins ermöglichen.

11.4.1 Grenzen der Anwendbarkeit/Zeitskala/Ungewissheiten

Im Fall eines Standortes für ein Natürliches Analogon ist die Übertragbarkeit der Integritätsaussagen trotz der ggf. gleichen diagenetischen Zeitskala durch die Bedingung, dass an dem Standort während der postsedimentären Entwicklung ähnliche hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge herrschten und ähnliche hydrothermale Ereignisse stattfanden wie am Endlagerstandort, eingeschränkt. Jedoch ist die Übertragbarkeit der Bestimmungen der chemischen Zusammensetzung des Paläo-Meeresswassers, auf denen die Integritätsaussagen teilweise basieren, aufgrund der anzunehmenden größeren Erstreckung des Formationsbeckens deutlich ortsunabhängiger.

11.4.2 Verwendungsmöglichkeit im Sicherheitsnachweis

Den „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“ /BMU 10/ gemäß muss sich die Bewertung der Langzeitsicherheit u. a. auf eine Langzeitaussage zur Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs stützen. Hierbei ist für die wahrscheinlichen Entwicklungen für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich auf der Grundlage einer geowissenschaftlichen Langzeitprognose nachzuweisen, dass die Integrität dieses Gebirgsbereichs über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahre sichergestellt ist. Hierfür ist vom Antragsteller u. a. zu zeigen, dass ggf. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhandenes Porenwasser nicht am hydrogeologischen Kreislauf im Sinne des Wasserrechts außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs teilnimmt. Hierzu können die chemischen und isotopischen Signaturen von mikroskopischen Fluideinschlüssen aus dem Salzgestein als Integritätsindikatoren am Endlagerstandort verwendet werden. Wichtige Argumente für den Safety Case sind aber auch entsprechende Beobachtungen an anderen Salzformationen.

11.4.3 Bewertung der Möglichkeit der Kommunikation

Es bestehen voraussichtlich gute Kommunikationsmöglichkeiten, da Fluideinschlüsse durch mikroskopische Aufnahmen medienwirksam präsentiert werden können. Allerdings ist die Erklärung der zugrunde liegenden Prozesse z. T. relativ komplex, was die Kommunikation mit einer nicht-technischen Audienz erschwert.

11.5 Offene Fragen

Die Anwendbarkeit der oben beschriebenen Integritätsindikatoren einzeln und in ihrer Gesamtheit für die Herleitung von Argumenten für einen Safety Case sollte geprüft werden. Arbeiten von /DUL 13/ zeigen, dass Wechselwirkungen mit den im Salz vorhandenen Mineralphasen, die ausschließlich aus der chemischen Zusammensetzung der Fluideinschlüsse abgeleiteten Aussagen einschränken können. Daher fällt der Verwendung der stabilen Isotope eine sehr wichtige Rolle zu. Es sollte geprüft werden, inwieweit diese Methode eine Quantifizierung der Reichweite und ggf. des Zeitpunkts des Eindringens von meteorischen und hydrothermalen Wässern in das Wirtsgestein ermöglicht. Ein zusätzlicher Aspekt ist die Anwendung der Methode sowohl auf Salzstöcke als auch auf Salzformationen in flacher Lagerung.

11.6 Literatur zu Kapitel 11

/AYO 95/ Ayora, C.; Taberner, C.; Pierre, C.; Pueyo, J.-J.: Modeling the sulfur and oxygen isotopic composition of sulfates through a halite-potash sequence: Implications for the hydrological evolution of the Upper Eocene Southpyrenean Basin. - *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 59, pp. 1799-1808, 1995.

/BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, Stand 30. September 2010. - Abrufbar unter: http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/sicherheitsanforderungen_endlagerung_bf.pdf (24.11.2014)

- /CEN 08/ Cendón, D.I.; Ayora, C.; Pueyo, J.J.; Taberner, C.; Blanc-Valleron, M.-M.: The chemical and hydrological evolution of the Mulhouse potash basin (France): Are “marine” ancient evaporites always representative of synchronous seawater chemistry? - *Chemical Geology*, Vol. 252, pp. 109-124, 2008.
- /DOL 01/ Dolenc, T.; Lojen, S.; Ramovš, A.: The Permian-Triassic boundary in Western Slovenia (Idrijca Valley section): magnetostratigraphy, stable isotopes, and elemental variations. - *Chemical Geology*, Vol. 175, pp. 175-190, 2001.
- /DUL 00/ Duliński, M.; Grabczak, J.; Zuber, A.: Stable isotopes and hydrochemical data as a tool for identifying the origin of waters appearing in the Kłodawa Salt Mine (Poland). - *Proc. 7th International Mine Water Association Congress in Katowice-Ustron, Poland*, pp. 530-535, 2000.
- /DUL 13/ Dulinski, M.; Rozanski, K. (2013): Isotope monitoring of water appearances in salt mines: the Polish experience. In *Natural Analogues for Safety Cases of Repositories in Rock Salt. Proceedings of an NEA Workshop, Braunschweig, 4.6 September, 2012. NEA Report R(2013)10* (pp. 123-131). Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), Paris.
- /EAS 99/ Eastoe, C.J.; Long, A.; Knauth, L.P.: Stable chlorine isotopes in the Palo Duro Basin, Texas: evidence for preservation of Permian evaporite brines. - *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 63, pp. 1375-1382, 1999.
- /EGG 95/ Eggenkamp, H.G.M.; Kreulen, R.; Koster van Groos, A.F.: Chlorine stable isotope fractionation in evaporites. - *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 59, pp. 5169-5175, 1995.
- /GAR 11/ García-Veigas, J.; Cendón, D.I.; Pueyo, J.J.; Peryt, T.M.: Zechstein saline brines in Poland, evidence of overturned anoxic ocean during the Late Permian mass extinction event. - *Chemical Geology*, Vol. 290, pp. 189-201, 2011.

- /HOR 02/ Horita, J.; Zimmermann, H.; Holland, H.D.: Chemical evolution of seawater during the Phanerozoic: Implications from the record of marine evaporites. - *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 66, pp. 3733-3756, 2002.
- /KLO 01/ Kloppmann, W.; Négrel, P.; Casanova, J.; Klinge, H.; Schelkes, K.; Guerrot, C.: Halite dissolution derived brines in the vicinity of a Permian salt dome (N German Basin). Evidence from boron, strontium, oxygen and hydrogen isotopes. - *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 65, pp. 4087-4101, 2001.
- /KNA 88/ Knauth, L.P.: Origin and mixing history of brines, Palo Duro Basin, Texas, U.S.A. - *Applied Geochemistry*, Vol. 3, pp. 455-474, 1988.
- /KOV 06/ Kovalevych, V.M.; Peryt, T.-M.; Zang, W.; Vovnyuk, S. V.: Composition of brines in halite-hosted fluid inclusions in the Upper Ordovician, Canning Basin, Western Australia: new data on seawater chemistry. - *Terra Nova*, Vol. 18, pp. 95-103, 2006.
- /KOV 08/ Kovalevych, V.M.; Peryt, T.-M.; Shanina, S.N.; Wieclaw, D.; Lytvyniuk, S.F.: Geochemical aureoles around oil and gas accumulations in the Zechstein (Upper Permian) of Poland: analysis of fluid inclusions in halite and bitumens in rock salt. - *Journal of Petroleum Geology*, Vol. 31, pp. 245-262, 2008.
- /LÜD 10/ Lüders, V.; Plessen, B.; Romer, R.L.; Weise, S.M.; Banks, D.A.; Hoth, P.; Dulski, P.; Schettler, G.: Chemistry and isotopic composition of Rotliegend and Upper Carboniferous formation waters from the North German Basin. - *Chemical Geology*, Vol. 276, pp. 198-208, 2010.
- /RIC 11/ Richard, A.; Banks, D.A.; Mercadier, J.; Boiron, M.-C.; Cuney, M.; Cathelineau, M.: An evaporated seawater origin for the ore-forming brines in unconformity-related uranium deposits (Athabasca Basin, Canada): Cl/Br and $\delta^{37}\text{Cl}$ analysis of fluid inclusions. - *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 75, pp. 2792-2810, 2011.
- /ROE 84/ Roedder, E.: The fluids in salt. - *American Mineralogist*, Vol. 69, pp. 413-439, 1984.

- /SIE 01/ Siemann, M.G.; Ellendorff, B.: The composition of gases in fluid inclusions of late Permian (Zechstein) marine evaporites in Northern Germany. - Chemical Geology, Vol. 173, pp. 31-44, 2001.
- /ZIM 01/ Zimmermann, H.: On the origin of fluids included in Phanerozoic marine halite - Basic interpretation strategies. - Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 65, pp. 35-45, 2001.

12 Thermische Stabilität von Salzgestein

12.1 Bedeutung für den Sicherheitsnachweis

In der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) ist ein Kriterium für die Auslegung eines Endlagers gewesen, dass sowohl bei der Streckenlagerung als auch bei der Bohrlochlagerung eine Kontakttemperatur zwischen Behälter und Salz von 200 °C nicht überschritten wird /MOE 12/. Diese Festlegung einer Maximaltemperatur ist erforderlich, um:

- die chemische Stabilität kristallwasserhaltiger Salzgesteine zu gewährleisten und
- die Zentraltemperatur innerhalb der HAW-Kokillen zu minimieren, damit die chemische Integrität der Glasmatrix nicht beeinträchtigt wird.

Durch die Temperaturentwicklung bei der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle darf die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) nicht unzulässig beeinflusst werden /BMU 10/. Nachdem der radioaktive wärmeentwickelnde Abfall im Salz eingelagert wurde und die Abfallkammer durch Verfüllung und Konvergenz des Salzes verdichtet ist, wird das umgebende Salzgestein thermischen Einflüssen ausgesetzt, die ausgehend von den radioaktiven wärmeentwickelnden Abfällen bis zu 200 °C erreichen können. Durch hohe Temperaturen können sich Spannungsrisse im Barrierematerial ausbilden und sich im Nahfeld der Behälter ausbreiten.

Die Wirkung eines thermischen Gradienten kann durch Basaltintrusionen als Natürliches Analogon dargestellt werden /KNI 89/. Diese Intrusionen werden im Unterkapitel „Natürliche Analoga“ näher beschrieben. Weiterhin können auch Erhitzerversuche (z. B. /ROT 86/) herangezogen werden, um die Auswirkungen hoher Temperaturen auf Salzgestein aufzuzeigen.

12.2 Erkenntnisse aus Labor- und in-situ Experimenten und Modellrechnungen

/ROT 86/ untersuchte die Auswirkung unterschiedlicher Temperaturen auf Steinsalzformationen in der Schachanlage Asse II. Dazu wurden mittels einer sieben Meter tiefen Horizontalbohrung elektrische Erhitzer in das Polyhalit-Bänkchensalz eingebaut und im Versuchsverlauf die Temperatur in diesen Erhitzern stufenweise erhöht.



Abb. 12.1 Nach Versuchsende freigelegter Erhitzer aus dem Erhitzerversuch /ROT 86/

Das Polyhalit-Bänkchensalz z2PS auf der 775 m-Sohle stellte das eigentliche Versuchsmedium für diesen Erhitzerversuch dar. Das z2PS besteht hauptsächlich aus Halit, weitere Minerale sind Polyhalit $K_2Ca_2Mg(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$ und Anhydrit $CaSO_4$ /JOC 81/.

Wie der Summenformel zu entnehmen ist, enthält Polyhalit Kristallwasser, welches bei diesem Versuch eine große Rolle gespielt hat. Für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle wird das Steinsalz der Staßfurtserie z2HS in Betracht gezogen, welches geringe Mengen Polyhalit enthält /JOC 81/, sich aber sonst nicht mineralogisch vom Polyhalitbänkchensalz unterscheidet. Das z2PS selbst eignet sich für einen Erhitzerversuch besser, da mehr Kristallwasser vorhanden ist und sich thermische Einflüsse stärker bemerkbar machen.

Bei der stufenweisen Erhitzung wurden Temperaturen von 100 °C, 150 °C, 200 °C, 230 °C und 270 °C eingestellt. Untersucht wurde die Freisetzung von Kristallwasser nach Einstellung der jeweiligen Temperatur.

Zu Beginn des Versuches war die Freisetzungsrates des Kristallwassers hoch. Dabei wurde zunächst an der Bohrlochwandung gebundenes Adsorptionswasser freigesetzt. Bei der fünften Heizstufe (270 °C) wurde am meisten Kristallwasser freigesetzt. Diese Freisetzung wird als Nachweis für das Einsetzen der Kristallwasserfreisetzung

oberhalb von 230 °C interpretiert /ROT 86/. Um diese These zu verifizieren, wurden 1984 chemisch-mineralogische Untersuchungen an erhitztem Steinsalz durchgeführt.

Für die Probenentnahme wurde der infrage kommende Bereich freigelegt (s. Abb. 12.1) und das erhitzte Steinsalz mit einer Spezialsäge in dünne Schichten für weitere Untersuchungen zersägt. Die mineralogischen Untersuchungen zeigten teilweise zerfallene Polyhalitkristalle in einem Abstand von zwei Zentimetern von der Bohrlochwandung (= Heizoberfläche). Diese zerfallenen Kristalle konnten nur in Bereichen ermittelt werden, in denen die Temperatur der Salzproben im Versuchsverlauf über 230 °C gelegen hatte. Daraus folgerte /ROT 86/, dass bei Einlagerung einer maximalen Temperatur von 200 °C an der Oberfläche der Behälter bei der Einlagerung nicht mit einer Polyhalit-Zersetzung (und damit Wasserfreisetzung) zu rechnen ist.

12.3 Natürliche Analoga

Eine Aussage zum Verhalten von Salzgestein gegenüber hohen und sehr hohen Temperaturen kann durch magmatische Intrusionen in das betreffende Gestein getroffen werden. Hier wird gezeigt, wie sich das betreffende Salzgestein in unmittelbarer Nähe hoher Temperaturen verhält.

Für derartige Untersuchungen eignen sich insb. die vertikalen, tertiären magmatischen Intrusionen, die in horizontale, permische Salzablagerungen in Deutschland /KNI 89/ und New Mexiko /CAL 78/ eingedrungen sind. Das umliegende Salzgestein zeigt im unmittelbaren Randbereich der Intrusionen Veränderungen, die auch fotografisch sehr gut festgehalten werden können. Die Fluide der hydrothermalen Phase einer Intrusion bewegen sich nur sehr lokal. Im undurchlässigen Salzgestein bleiben durch die Intrusion resultierende, unter hohem Druck stehende flüssige CO₂-Einschlüsse unterschiedlicher Größe in unmittelbarer Nähe der Intrusion über Millionen von Jahren bestehen.

Als natürliches Analogon können die Basaltintrusionen im Werra-Fulda-Lagerstättenbezirk herangezogen werden. Vor etwa 15 bis 25 Mio. Jahren (ca. Miozän) drangen im Gebiet des heutigen Vogelbergs, der Rhön und des nördlich davon liegenden Vorlandes basaltische Schmelzen mit Temperaturen von ca. 1.150 °C in das im Zechstein abgelagerte Salzgestein ein. In den entstandenen Wegsamkeiten des Salzgesteins erstarrte die Schmelze zu steil stehenden Basaltgängen. Die Kontaktbereiche zwischen Salzgestein und Basalt wurden auf ca. 800 °C aufgeheizt. Da Salz ein guter

Wärmeleiter ist, gingen die Temperaturen innerhalb weniger Jahre auf unter 100 °C zurück (/KNI 89/, /STA 95/).

In Abb. 12.2 ist einer der Basaltgänge dargestellt. Dieser Basaltgang hat eine Breite von etwa 30 cm; die Abbildung zeigt ferner eine deutliche Grenze zwischen Basalt und Salzgestein. Anhydrit und Halit bilden das Füllmaterial der sichtbaren horizontalen und vertikalen Klüfte. In der Kontaktzone sind hauptsächlich Kieserit, Anhydrit und ferrodolomitische Karbonate zu finden. Die basaltische Schmelze kühlte im Bereich der Kontaktzone so schnell ab, dass eine Kristallisierung nicht möglich war und ein sogenanntes Glas entstand. Mineralreaktionen und der Mineraltransport über flüssige Phasen, die mit in den Basaltschmelzen enthaltenen Flüssigkeitsbestandteilen vergesellschaftet sind, änderten die chemische und mineralogische Zusammensetzung der wasserunlöslichen Bestandteile im Steinsalz. Diese Veränderungen erreichten wenige Zentimeter Eindringtiefe in das Na-reiche Steinsalz und waren somit begrenzt. Die K-Mg-Salzbänder wurden bis zu einer Entfernung von 10 m von der Basaltoberfläche verändert.

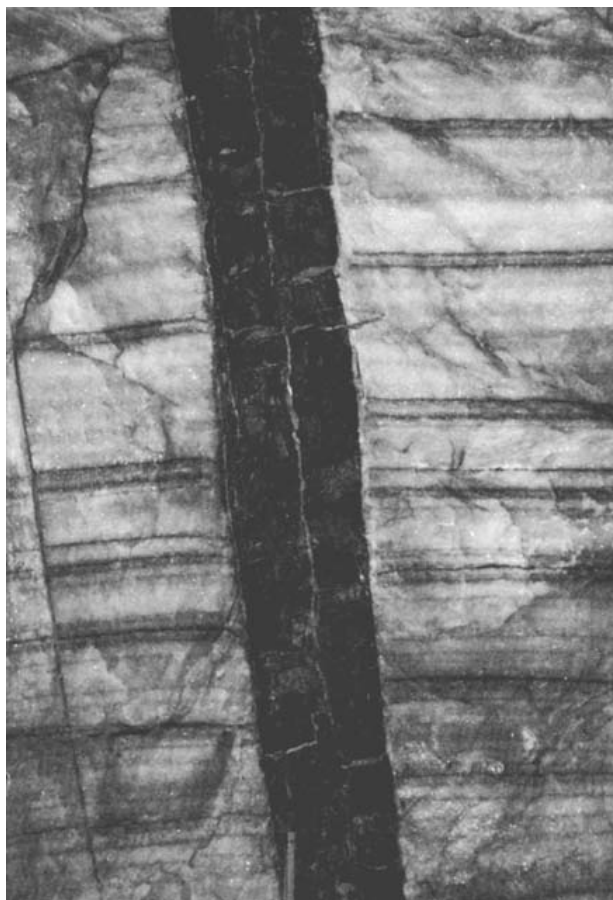


Abb. 12.2 Basaltintrusion in Steinsalz in der Werra-Region /KNI 89/; der Durchmesser der Intrusion beträgt ca. 30 cm

Eine weitere thermische Beanspruchung von Salzgestein durch Magma zeigen die Peridotit-Intrusionen im Bereich der Cayuga Rock Salt Mine (USA, Bundesstaat New York), die auf post-Appalachian-Zeitalter datiert werden. Sie folgen den regionalen Bruchzonen. Die Struktur dieser Intrusionen zeigt ein beiderseitiges Eindringen von Peridotit und Salz und weist darauf hin, dass das Magma eine leicht höhere Temperatur als die Schmelztemperatur von Halit aufwies. Die Schmelztemperatur von Halit liegt bei ca. 800 °C/BRO 50/.

In /BRO 50/ wird der Ablauf der Ereignisse beschrieben: Das sehr flüssige kimberlitische Magma steigt auf und nimmt dabei Tongesteinsbruchstücke mit. Bedingt durch die vergleichsweise niedrige Temperatur der aufsteigenden Schmelze werden diese Bruchstücke nicht kalziniert. Des Weiteren dringt das Magma in das vorhandene Steinsalz ein. Der Kontakt zwischen Steinsalz und Magma bildet sich sehr schafkantig aus, da Halit schmilzt. Das Magma verliert schnell an Temperatur und zieht sich zusammen. Durch das schnelle Abkühlen des Magmas ist für kurze Zeit der scharfkantige Kontakt offen und Gase können sich verflüchtigen. Die Intrusion dehnt sich weiter aus und führt dazu, dass im Inneren der scharfkantige Kontakt breccisiert und somit die halitische Schmelze in die Zwischenräume eindringen kann. Dadurch werden die Intrusionsfragmente umflossen. Zum Abschluss des Prozesses kristallisiert die Salzschnmelze.

12.4 Bewertung

Die o. g. Basaltintrusionen zeigen, dass hohe Temperaturen kaum einen Einfluss auf die Stabilität des Salzgesteins haben und Veränderungen nur im unmittelbaren Umfeld der Intrusionen nachweisbar sind. Die Temperatur der Schmelzen lag um ca. 950 °C höher als die maximale Temperatur von 200 °C, die bei der Einlagerung wärmeentwickelnder hochradioaktiver Abfälle im Kontaktbereich zum anstehenden Salz nicht überschritten werden darf.

Auf Grund der sehr hohen Temperaturen sowie der schnellen Abkühlung der Schmelzen und damit auch einer schnellen Abkühlung des Salzgesteins bestehen allerdings auch gravierende Unterschiede zu den Verhältnissen, wie sie bei einer Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle im Salzgestein zu erwarten sind.

Der o. g. Erhitzerversuch wurde im Polyhalitbänkchensalz (z2PS) durchgeführt. Für die Endlagerung wärmeentwickelnder hochradioaktiver Abfälle ist in Deutschland allerdings der ältere Halit (z2HS) der Staßfurtserie vorgesehen, der weniger Polyhalit als

das Polyhalitbänkchensalz enthält. Durch die geringeren Mengen Polyhalit in der Staßfurtserie sind die Kristallwassermengen somit auch geringer als im untersuchten Polyhalitbänkchensalz /JOC 81/.

Das z2HS weist große Mächtigkeiten und eine gute Kriechfähigkeit auf, da es sehr homogen ist und wenig Wasser enthält. Bei der Suche nach einem Standort für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle könnte auch das Leinesalz in Betracht gezogen werden. Auch dieses Salz ist sehr mächtig und homogen. Bei der Betrachtung des Leinesalzes aber auch anderer, für die Endlagersuche in Betracht kommender Salzgesteine, muss geprüft werden, ob sich die Ergebnisse aus dem Erhitzerversuch (in Salzen der Staßfurtserie) auch auf andere Salzformationen übertragen lassen.

12.4.1 Grenzen der Anwendbarkeit/Zeitskala Ungewissheiten

Die Basaltintrusionen zeigen sehr anschaulich, dass Veränderungen im Salzgestein, in das Magma intrudiert ist, trotz der hohen Beanspruchung durch Druck und sehr hohe Temperaturen nur in unmittelbarer Umgebung der Intrusion stattgefunden haben. Dieses grundsätzlich positive Ergebnis ist dennoch schwierig mit den Bedingungen in einem Endlager vergleichbar, da die zulässigen Temperaturen in einem Endlager bei maximal 200 °C liegen. Auch erfolgt die Abkühlung im Endlager wesentlich langsamer als die Abkühlung der Intrusion im Salz, da die radioaktiven Abfälle über eine längere Zeit Wärme produzieren. Die Eignung von Basaltintrusionen als Natürliches Analogon muss deshalb vor dessen eventueller Verwendung geprüft und belegt werden. Andere Analoga, welche die Verhältnisse in einem Endlager besser widerspiegeln, wurden allerdings nicht identifiziert.

Auch der o. g. Erhitzerversuch stellt kein direktes Analogon dar, weil die Randbedingungen des Versuches nicht oder nur zu einem untergeordneten Teil mit denen eines Endlagers übereinstimmen.

12.4.2 Verwendungsmöglichkeit im Sicherheitsnachweis

Für die Langzeitsicherheit eines Endlagers stellt die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs eine wichtige Komponente dar /BMU 10/. Auf Grundlage einer geowissenschaftlichen Langzeitprognose soll nachgewiesen werden, dass innerhalb von einer Million Jahre diese Integrität sichergestellt ist.

In diesem Zusammenhang liefern Basaltintrusionen, aber auch Erhitzerversuche wichtige Ergebnisse. Sie zeigen, wie sich Salzgestein in unmittelbarer Umgebung hoher Temperaturen verhält. Die ermittelten Daten und Werte können im Rahmen eines Sicherheitsnachweises nur eingeschränkt verwendet werden, da die Versuchs- und Untersuchungsbedingungen andere Ausgangspositionen (Temperatur, Kristallwasser) enthalten, als sie für ein Endlager im Salzgestein vorgesehen sind.

12.4.3 Bewertung der Möglichkeit der Kommunikation

Fotos von Basaltintrusionen zeigen sehr anschaulich die scharfe Abgrenzung zwischen Basalt und Salzgestein. Für den Laien wird neben der scharfen Abgrenzung ersichtlich, dass eine Störung des umliegenden Salzgesteins nicht vorhanden ist. Derartige Basaltintrusionen können deshalb im Bereich der Kommunikation wichtige Aufgaben erfüllen. Es muss aber darauf geachtet werden, dass die o. g. Unterschiede zwischen thermischen Einflüssen infolge einer Basaltintrusion (oder auch eines Erhitzerversuches) und wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen in einem Endlager ebenfalls kommuniziert werden.

12.5 Offene Fragen

Weitere Altersbestimmungen an den Basalten könnten die Frequenz der Intrusionen genauer darlegen. Dadurch kann auf die Temperatur geschlossen werden, die während der gesamten Intrusionszeit auf das Salz gewirkt hat.

Darüber hinaus sind Natürliche Analoga von Interesse, welche die Temperaturentwicklung unter Endlagerbedingungen wiedergeben; diese sind aber bislang noch nicht identifiziert.

12.6 Literatur zu Kapitel 12

/BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, Stand 30. September 2010. Abrufbar unter: http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/sicherheitsanforderungen_endlagerung_bf.pdf (22.07.2013).

- /BRO 50/ Boughton, J.G.: Observations on the intrusion of rock salt by peridotite. - Transactions, American Geophysical Union, Vol. 31, Nr. 2, pp. 229-233, 1950.
- /CAL 78/ Calzia, J.P.; Hiss, W.L.: Igneous rocks in northern Delaware Basin, New Mexico and Texas. - New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources Circular 159, p. 39-45, 1978.
- /JOC 81/ Jockwer, N.: Untersuchungen zu Art und Menge des im Steinsalz des Zechsteins enthaltenen Wassers sowie dessen Freisetzung und Migration im Temperaturfeld endgelagerter radioaktiver Abfälle. - Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung, Institut für Tief Lagerung, GSF-Bericht T-119, Braunschweig, 1981.
- /KNI 89/ Knipping, B.: Basalt Intrusions in Evaporites. - Lecture Notes in Earth Sciences, Vol. 24, Springer Verlag, Berlin - Heidelberg, 1989.
- /MOE 12/ Mönig, J.; Buhmann, D.; Rübél, A.; Wolf, J.; Baltes, B.; Fischer-Appelt, K.: Sicherheits- und Nachweiskonzept, Bericht zum Arbeitspaket 4, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-277, Köln, 2012.
- /ROT 86/ Rothfuchs, T.: Untersuchung der thermisch induzierten Wasserfreisetzung aus polyhalitischem Steinsalz unter In-situ-Bedingungen, Temperaturversuch 5 im Salzbergwerk Asse. - Kommission der Europäischen Gemeinschaften, EUR 10392 DE und Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung, GSF-Bericht 30/85, Brüssel - Neuherberg, 1985.
- /STA 95/ Stascheit, A.; Knipping, B.: Die Lanthanoidenverteilung in Evaporitgesteinen. - Kali u. Steinsalz, Vol. 11, S. 355-360, 1995.

13 Mechanische Stabilität von Salzgestein

13.1 Bedeutung für den Sicherheitsnachweis

Beim Konzept der Endlagerung radioaktiver Abfälle in einer Steinsalzformation wird davon ausgegangen, dass sich die aufgefahrenen Hohlräume und die daraus resultierenden Auflockerungszonen (Excavation Damaged Zones, EDZ) im Allgemeinen durch Konvergenz und Salzkriechen wieder verschließen. Reines Steinsalz verhält sich bei auftretendem Druck plastisch, das heißt, es verformt sich irreversibel. Darüber hinaus nimmt die Viskosität von Steinsalz mit steigender Temperatur und steigendem Druck zu.

Durch die Konvergenz wird das Porenvolumen in den Auflockerungszonen (und auch versetzten Hohlräumen) eines Endlagerbergwerkes bei nicht weiterer Offenhaltung der Hohlräume laufend verringert. Nach einigen tausend Jahren (je nach Konvergenzraten) ist das Salzgestein vollkommen ausgeheilt. Zusammenhängende Klüfte und Spalten werden durch diese Eigenschaft weitgehend verhindert. Durch diese mechanischen Eigenschaften werden zentrale Anforderungen aus den Sicherheitsanforderungen, wie z. B. die Verhinderung sekundärer Wegsamkeiten im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) oder eines advektiven Transports von Schadstoffen, erreicht. Natürliche Analoga können eingesetzt werden, um zu belegen, dass diese Eigenschaften auch unter Endlagerbedingungen gegeben sind.

13.2 Erkenntnisse aus Labor- und in-situ Experimenten und Modellrechnungen

/HUN 94/ beschreibt das Kriechverhalten von Steinsalz und fasst u. a. Formeln für die Kriechgeschwindigkeiten des Salzes zusammen, die die Abhängigkeit der stationären Kriechrate $\dot{\epsilon}_s$ von der Spannung σ sowie von der Temperatur T beschreiben:

$$\dot{\epsilon}_s = f(\sigma, T) \quad (13.1)$$

/HUN 03/ befasste sich mit der Problemstellung, dass unterschiedliche Homogenbereiche im Salzgestein unterschiedliche Kriechgeschwindigkeiten aufweisen und wie man dies in Stoffgesetzen zeigen kann. Grundlegend für das duktile Deformationsverhalten ist das Kriechen. Um mit großer Zuverlässigkeit für lange Zeiträume anwendbare und

zutreffende Gesetze für die verschiedenen Steinsalztypen zu erhalten, müssen die mikrostrukturellen Deformationsprozesse dargestellt werden.

Die Untersuchung von Schädigungen des Steinsalzes und damit eines möglichen Versagens der geologischen Barriere ist im Rahmen der Sicherheitsbewertung eines Endlagers wichtig. Basierend auf dem Verständnis von Deformationsprozessen können aus der Schädigung resultierende Permeabilitäten und Permeationen auf Grund von Porendruck-Effekten abgeleitet werden.

Das Verformungsverhalten insgesamt umfasst den durch Feuchte beschleunigten Kriechvorgang, die Entfestigung und das tertiäre Kriechen vor dem Bruch sowie das Nachbruchverhalten.

Um das Kriechverhalten unterschiedlicher Homogenbereiche besser bewerten zu können, wurden die Formeln (BGR_a /WAL 79/) und (BGR_b /PLI 89/) zum stationären Kriechen von Steinsalz auf Grundlage von in-situ Versuchen im Erkundungsbergwerk Gorleben modifiziert und praxisorientiert in dafür geeignete Rechenprogramme implementiert.

Zu Grunde gelegt wurden die Formel BGRa nach /WAL 79/:

$$\dot{\epsilon}_s = A * \exp[-Q/(RT)] * (\sigma / \sigma^*)^n \quad (13.2)$$

mit

$$A = 0,18 \text{ d}^{-1}$$

$$Q = 12,9 \text{ kcal/mol} = 54 \text{ kJ/mol} ; n = 5$$

und die Formel BGRb nach /PLI 89/:

$$\dot{\epsilon}_s = [A_1 * \exp[-Q_1/(RT)] + A_2 * \exp[-Q_2/(RT)]] * (\sigma / \sigma^*)^n \quad (13.3)$$

mit

$$A_1 = 2,3 * 10^{-4} \text{ d}^{-1}$$

$$Q^1 = 10 \text{ kcal/mol} = 42 \text{ kJ/mol}$$

$$A^2 = 2,1 * 10^6 \text{ d}^{-1}$$

$$Q_2 = 27 \text{ kcal/mol} = 113 \text{ kJ/mol}$$

$$n = 5$$

Der Strukturparameter A ist abhängig von der Zusammensetzung und Kristallinität des Salzes. Q zeigt die Aktivierungsenergie, die das Maß für die Temperaturempfindlichkeit des Kriechens liefert und n ist das Maß für die Spannungsabhängigkeit.

Bei Raumtemperatur werden die Kriechklassen für die uniaxialen Versuche auf Grundlage des Kriechgesetzes BGR_a /WAL 79/ ermittelt. Bei Versuchsbedingungen über 30 °C trocknet der Prüfkörper aus, so dass das Feuchtekriechen nicht mehr vorhanden ist. Hier erfolgt die Einteilung in Kriechklassen mit Hilfe des Kriechgesetzes BGR_b /PLI 89/. Andere Feuchten als 45 % r.F. erfordern eine Umrechnung.

Basierend auf den durchgeführten Versuchen wird der sogenannte Vorfaktor V eingeführt. Jeder bestimmte Vorfaktor wird einer bestimmten Kriechklasse zugeordnet (s. Tab. 13.1). So werden die unterschiedlichen Kriechgeschwindigkeiten der jeweiligen Homogenbereiche berücksichtigt. Durch diese Einteilung in Kriechklassen kann das Kriechverhalten auf überschaubare Weise dargestellt werden.

Die nachfolgenden Gleichungen beschreiben die Abhängigkeit des stationären Kriechens von der Temperatur und der Spannung in der für die jeweiligen Homogenbereiche genutzten Form:

Referenzkriechgesetz BGR_a /HUN 03/ für Steinsalz:

$$\dot{\varepsilon}_s = V * A * \exp[-Q/(RT)] * (\sigma / \sigma^*)^n \quad (13.4)$$

mit

$$V = 2^K/32$$

$$R = 8,314 * 10^{-3} \text{kJ}/(\text{mol} * \text{K})$$

K = Kriechklasse des Homogenbereichs

Referenzkriechgesetz BGR_b /HUN 03/ für Steinsalz:

$$\dot{\varepsilon}_s = V * [A_1 * \exp[-Q_1/(RT)] + A_2 * \exp[-Q_2/RT]] * (\sigma / \sigma^*)^n \quad (13.5)$$

In verschiedenen Homogenbereichen der einzelnen Steinsalzbereiche wurden durch uni- und triaxiale Kriechversuche die stationären Kriechraten ermittelt. Mit Hilfe der Gleichungen BGR_a /HUN 03/ und BGR_b /HUN 03/ können dann die Kriechklassen errechnet oder abgelesen werden (s. Tab. 13.1).

Tab. 13.1 Zuordnung eines bestimmten Vorfaktors zu einer bestimmten Kriechklasse
/HUN 03/

Kriechklasse K			-1	0	3	4	5	6	7	8	9
Vorfaktor V	1/64	1/32	1/16	1/8	1/4	1/2	1	2	4	8	16

13.3 Natürliche Analoga

Die mechanische Stabilität des Salzgesteins lässt sich mit Hilfe von Analoga darstellen, die für dieses Detailkapitel in drei Unterkapitel eingeteilt werden: a) Technische Analoga, b) Analoga aus dem Bergbau und c) Geologische Analoga.

13.3.1 Technische Analoga

In Russland und Kasachstan, aber auch in den USA sind unterirdische Kernexplosionen insbesondere zur Schaffung von Speicherhöhlräumen für Kohlenwasserstoffe durchgeführt worden (115 Standorte ab Mitte der 1960er Jahre in Russland und Kasachstan in verschiedenen Gesteinsformationen). Diese Explosionen resultierten u. a. in einer erheblichen Druckbelastung des umgebenden Steinsalzes. Diese Druckbelastung kann grundsätzlich als technisches Analogon für den durch Gasbildung aus radioaktiven Abfällen verursachten Druckaufbau in einem Endlager herangezogen werden /RSK 05/.

Viele der o. g. Hohlräume sind inzwischen geflutet. Untersuchungen zeigen, dass in nichtsalinaren Formationen der Frac-Druck überschritten wurde, was u. a. in tiefen Einsturztrichtern und Undichtigkeiten des Systems resultierte. Derartige Beobachtungen wurden demgegenüber in Salzstrukturen nicht gemacht, abgesehen von Explosionen in geringer Tiefe. Ein Integritätsnachweis steht aber noch aus, da nicht gezielte bzw. wenig aussagekräftige Daten erhoben wurden /RSK 05/.

Von Untersuchungen zu Auswirkungen von Kernexplosionen auf Salzgestein in Kasachstan liegt speziell zum Testgebiet Asgir umfangreiches Datenmaterial vor, welches teilweise bereits ausgewertet wurde (u. a. /NOS 00/ und /SCH 97/). Danach hatten die

Kernexplosionen eine Sprengkraft von 103.000 Tonnen TNT, wodurch Hohlräumvolumina bis zu 240.000 m³ entstanden sind /RSK 05/.

Bei den meisten dieser Kernexplosionen sind die Randbedingungen im Hinblick auf Tiefe (ca. 600 - 1000 m), Mächtigkeit der überlagerten Salzschieht (ca. 300 m-700 m) und Mächtigkeit des Deckgebirges (ca. 300 m) mit den Randbedingungen für ein Endlager in einem Salzstock vergleichbar. Der Ablauf und die Auswirkungen zwischen den Vorgängen bei der Explosion und bei der Gasentwicklung aus radioaktiven Abfällen in einem Endlager zeigen jedoch deutliche Unterschiede /RSK 05/ (s. Tab. 13.2).

Tab. 13.2 Vergleich der wesentlichen Parameter bei unterirdischen Kernexplosionen und Endlagern bzgl. des Druckaufbaus /RSK 05/

	Kernexplosion	Endlager
Tiefe	160 - 1.500 m	800 m ^{a)}
Mächtigkeit des Deckgebirges	8 - 300 m	300 m ^{a)}
Mächtigkeit der Salzüberdeckung	150 - 1.200 m	500 m ^{a)}
Dauer des Druckanstiegs	< 1 ms	> 500 Jahre ^{b)}
Maximaldruck	~100 TPa	~20 MPa ^{c)}
Lithostatischer Druck	~15 MPa	~15 MPa
Verformung des Steinsalzes	Instantan	Langsam
Druckausbreitung	Schockwellen, hohe Geschwindigkeit, hohe Reichweite	Langsam
Rissbildung	Großräumig, ca. sechsfacher Kavernenradius	Kleinräumig, ca. zweifacher Streckenradius
Dauer des Temperaturanstiegs	<1 ms	Mehrere Jahre
Höhe der Maximaltemperatur	~10.000.000 °C	200 °C
^{a)} Endlager in einem Salzstock ^{b)} bei ausreichendem Wasserdargebot ^{b)} Wert orientiert sich an den Modellrechnungen für die WIPP ^{c)} Für HAW		

Bei der theoretischen Betrachtung unterirdischer Kernexplosionen zeigt sich, dass innerhalb einer Zeitspanne von unter einer Mikrosekunde die gesamte Explosionsenergie freigesetzt wird. Das Gestein geht durch die Druckwelle und starke Erwärmung in Plasma über (mit Plasmadrücken von 1.200 MPa). Die daraus resultierende Hohlraumbildung erfolgt innerhalb von 100 Millisekunden durch elasto-plastische Verschiebungen des Steinsalzes. Durch rasche Abkühlung verwandelt sich das Plasma innerhalb weniger Sekunden in gasförmiges NaCl. Der Druckabfall ist nur erheblich geringer und die Rissbildung ist abgeschlossen /RSK 05/.

13.3.2 Analoga aus dem Bergbau

In Salzbergwerken mussten und müssen für den Salzabbau Strecken und Kammern in das Salz getrieben werden. Durch die Auffahrung bilden sich wie in allen Gesteinen Auflockerungszonen, die sich im Salzgestein bis zu zwei Meter in das anstehende Salz ausdehnen können. In den Auflockerungszonen erhöht sich die Permeabilität im Verhältnis zum ungestörten Salzgestein um einige Größenordnungen /WIE 03/. Diese Auflockerung kann durch das Auflaufen des Gebirges auf eine geotechnische Barriere durch Übergang der Spannungen in einen homogenen Zustand reduziert werden /BRA 08/.

In der Schachanlage Asse II wurde 1911 ein 25 m langer Abschnitt einer frisch aufgefahrenen Strecke mit einem Stahlgussrohr ausgekleidet. Zwischen Stahlgussrohr und anstehendem Salzgestein wurde der Resthohlraum mit Beton verfüllt. Dieses sogenannte „Dammjoch“ gilt heute als technisches Analogon, an dem die Entwicklung der EDZ im Streckenbereich untersucht werden kann. Der Ausheilungsprozess über längere Zeiträume kann durch Untersuchungen zu den Spannungsverhältnissen und zur Permeabilität beschrieben werden /BRE 99/.

/WIE 01/, /WIE 03/ und /WIE 04/ beschreiben die Permeabilitätsunterschiede zwischen Dammjoch und einer offen gehaltenen Strecke, woraus Ausheilungsprozesse über einen Zeitraum von ca. 90 Jahren ermittelt werden können. Hierbei wurden für die Permeabilitätsmessungen eine horizontale, eine vertikale Bohrung und eine Bohrung in einem Winkel von 45° durch das Stahlrohr in das anstehende Salzgestein gebohrt. Eine weitere Bohrung wurde für die Ermittlung eines Vergleichswertes in die Streckensohle im nicht ausgekleideten Teil der Strecke verwendet (s. Abb. 13.1).

Ersichtlich wird in dieser Studie, die repräsentativ für trockenes Steinsalz mit Wassergehalten um 0,2 Gew.% ist, dass die nicht ausgekleidete Strecke auf Grundlage der ermittelten Werte einer typischen Auflockerungszone entspricht. Auch nach 90 Jahren ist die Verheilung nicht abgeschlossen. Die Permeabilität in diesem Bereich weist Werte von über 10^{-16} m^2 auf (im ungestörten Steinsalz liegen die Permeabilitäten dagegen bei 10^{-21} m^2) und die Ausdehnung der Auflockerungszone in das anstehende Gestein beläuft sich auf ca. 1,5 m.

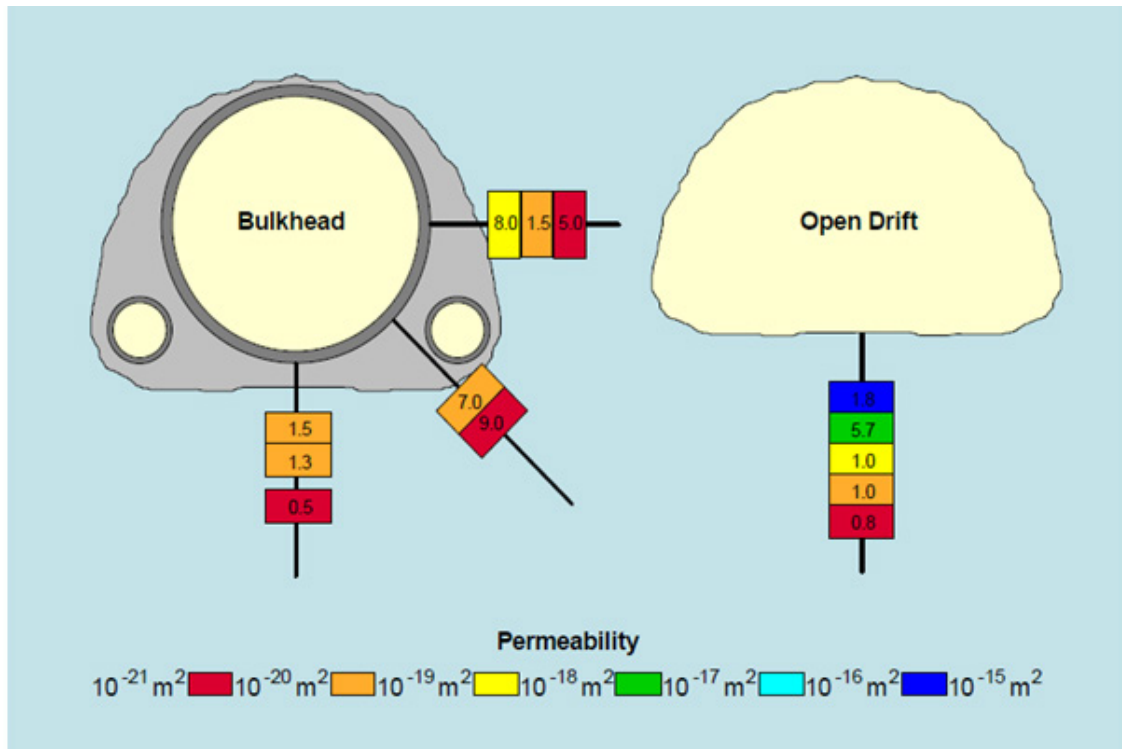


Abb. 13.1 Ergebnisse von Permeabilitätsmessungen in Bohrungen von der mit Stahlguss ausgekleideten Strecke (links) „Dammjoch“ und in der Streckensohle im nicht ausgekleideten Bereich (rechts) /WIE 04/

Im ausgekleideten Bereich sind die Werte mit einer Ausnahme in der horizontalen Bohrung wesentlich geringer als im nicht ausgekleideten Bereich. Hier wurden Permeabilitäten im Bereich von 10^{-19} m^2 und geringer ermittelt. Damit unterscheidet sich dieser Bereich deutlich von einer typischen Auflockerungszone. Auch Kernproben von den jeweiligen Stellen zeigen, dass Mikrorisse zwar generell verschlossen, aber noch nicht ausgeheilt sind. Aus den Permeabilitäten und den Kernen lässt sich die Folge eines Spannungszustandes ableiten, der durch eine hohe Normalspannung und vernachlässigbare deviatorische Spannung gekennzeichnet ist. Die Ausheilung der Auflocke-

rungszone ist spannungs- und zeitabhängig. Im Bereich des Dammjochs reichen 90 Jahre nicht aus, um die vollständige Ausheilung der Auflockerungszone zu bewirken.

Darüber hinaus wurde hinsichtlich im Salzgestein eingeschlossener Werkzeuge im Salzbergwerk Hallstatt recherchiert. Die ältesten Funde datieren um das Jahr 5000 v. Chr., stammen allerdings von Fundorten außerhalb des Berges. Im Berg selbst datieren die Funde etwa zwischen 1.300 v. Chr. und 400 v. Chr.

Für die Ausgrabungen ist das Naturhistorische Museum Wien zuständig, das auf dem Hallstätter Salzberg eine ständige Außenstelle betreibt. Einige der Funde sind auch in diesem Museum ausgestellt, weitere im Museum Hallstatt und in der ständigen Außenstelle auf dem Berg. Die Fundstellen selbst können im Zuge einer prähistorischen Führung besichtigt werden, in diesem Zusammenhang auch ein etwa 3.000 Jahre altes, intaktes Bastseil und die älteste bisher entdeckte Holzstiege der Welt (1343 und 1344 v. Chr.) (s. Abb. 13.2). Des Weiteren sind in der so genannten „Herzerlkammer“ Originalabbauspuren aus der Hallstattzeit (800 – 400 v. Chr.) zu sehen.



Abb. 13.2 Im Salzbergwerk Hallstatt gefundene Werkzeuge und bergwerkliche Gebrauchsgegenstände, hier die älteste bisher entdeckte Holzstiege der Welt

Weder Bastseil, Stiege oder das Werkzeug waren und sind direkt im Steinsalz eingeschlossen. Die Fundstücke wurden bei einem Einbruch des Bergwerkes verschüttet und zwischen Schutt und sogenanntem Heidengebirge (Gemenge aus allen Gebirgsarten, die im Salzbergwerk auftreten, mit Spuren menschlicher Tätigkeit /BAR 87/) eingeschlossen.

In der Schachtanlage Asse II wurden und werden beim Auffahren neuer Grubenhohlräume alte konvergierte Strecken und (Blind-)Schächte entdeckt. Sichtbar werden diese durch bergbauliche Überreste, wie z. B. Schienen, Holz, Kabel usw. An derartigen Stellen könnten mittels einer Beprobung Permeabilitäten und Dichten im Salzgestein und ggf. auch Versatzmaterial gemessen werden, um Aussagen über den Grad des Einschlusses der o. g. Überreste zu gewinnen. In /ASS 12/ sind einige Bilder zu Fundstellen o. g. Überreste dargestellt. Viele der dort dokumentierten Orte sind allerdings nicht mehr begehbar und damit auch nicht mehr beprobbar.



Abb. 13.3 Blick auf eine ehemalige, konvergierte Strecke im Grubengebäude der Schachtanlage Asse II westlich von Schacht 4 auf der 700 m-Sohle /ASS 12/

Abb. 13.3 zeigt eine ehemalige Strecke, die konvergiert ist. Zu sehen sind alte Schienen und Holzbruchstücke. In Abb. 13.4 sind Reste eines ehemaligen Schachtes in Form von Kabeln und Holz zu sehen. Der Schacht ist ebenfalls konvergiert. Abb. 13.5

zeigt eine konvergierte Strecke, die durch eine neu aufgefahrne Strecke gekreuzt wird. Zu sehen sind Schienen, Backsteine und Holz. Alle beschriebenen Stellen sind nicht mehr begehbar, können aber als Beispiele dienen.



Abb. 13.4 Sohle 637/658 Zugang BS2 unmittelbar nach der Auffahrung – Ehemaliger Schacht, von dem noch das Holz und die Kabel zu sehen sind /ASS 12/



Abb. 13.5 700 m Sohle: Neue Strecke kreuzt ehemalige Strecke (links und rechts zu sehen)

13.3.3 Geologische Analoga

In den Salzstöcken Bokeloh, Lehrte-Sehnde und Benthe (alle im Raum Hannover) untersuchte Klüfte (s. Abb. 13.6) /BAU 91/ zeigen, dass Kluftweiten in der Regel mehrere Millimeter, in einigen Fällen auch über einen Zentimeter betragen.

Die einzelnen Klüfte lassen sich allerdings selten über eine große Distanz verfolgen, sondern sind auf bestimmte Bereiche beschränkt. Derartige Klüfte wurden auch nirgendwo in größeren Teufen als 700 m festgestellt.

In den meisten Fällen sind diese Klüfte mit farblosem, sekundärem Halit verheilt. Die Körnung des sekundären Halits ist dabei gröber als die des Nebengesteins. Die Klüfte fallen heute als helle Streifen auf, wenn das Nebengestein merklich gefärbt ist. Die sekundären Füllungen der Klüfte können auch aus anderen Salzmineralen wie z. B. Polyhalit und Kainit bestehen, die mittig in der Kluftfüllung perlschnurartig vorliegen. Diese sekundären Salzminerale werden teilweise von grauem, unverfestigten und Mikrofossilien führendem Ton begleitet.

In den Klüften können häufig schlauchartige Hohlräume zwischen der Sekundärmineralisation in unregelmäßigen Abständen auftreten. Diese Drusen und Kavernen, deren Durchmesser der Kluftbreite entsprechen, sind mit idiomorphen, sekundären und vereinzelt bläulich gefärbten, sonst klaren Halitkristallen ausgekleidet.



Abb. 13.6 Rissbildung, die in /BAU 91/ als „kryogene Klüfte“ bezeichnet wird, auf der 350 m-Sohle im Kalisalzbergwerk Sigmundshall (Salzstock Bokeloh) (Fotos aus /HAM 12/)

Aufgrund ihrer Verheilung stellen die beschriebenen Klüfte ein natürliches Analogon für die Selbstverheilung von Steinsalz dar.

Als Ursache für die o. g. Kluffbildung zieht /BAU 91/ eine starke Abkühlung während einer Vereisung in Betracht. Diese Überlegungen wurden von /HAM 12/ auch im Hinblick auf die Übertragbarkeit derartiger Kluffbildungen auf den Salzstock Gorleben überprüft. Umfangreiche stofflich-strukturelle Analysen erfolgten exemplarisch für den Salzstock Bokeloh. Die Ergebnisse dieser struktureologischen, mineralogisch-geochemischen und mikropaläontologischen Untersuchungen zeigen zusammen mit thermomechanischen Modellierungen die Unwahrscheinlichkeit einer nur thermisch induzierten Rissbildung infolge von Kaltzeiten für den Salzstock Bokeloh. Die Rissbildung ergibt demnach einen direkten Zusammenhang mit der Genese des Salzstocks Bokeloh und seiner tektonischen Lage.

13.4 Bewertung

Das sogenannte „Dammjoch“ in der Schachanlage Asse II kann ein Analogon darstellen, da sich die Permeabilitäten im Salzgestein im ausgekleideten Bereich innerhalb von ca. 90 Jahren denen im ungestörten Bereich angenähert haben und eine Verheilung messbar ist.

Auch die verheilten Risse im Salzstock Bokeloh zeigen exemplarisch das Ausheilen des Salzes und können als Analogon für Salzverheilung herangezogen werden.

Die Unterschiede in den Randbedingungen zwischen unterirdischen Kernexplosionen und einem Endlager (z. B. zeitliche Entwicklung von Druck und Temperatur, resultierende Beanspruchung und deren Auswirkung, insbesondere auch die Rissbildungsmechanismen und Rissausbreitungsgeschwindigkeiten) sind so gravierend, dass eine Übertragung der Ergebnisse sehr eingeschränkt möglich ist /RSK 05/.

13.4.1 Grenzen der Anwendbarkeit/Zeitskala/Ungewissheiten

Jedes Salzbergwerk ist anders gestaltet und unterliegt spezifischen Gesetzmäßigkeiten. Beispielsweise ist eine Kriechformel für einen bestimmten Bereich im Salzbergwerk nur auf diesen konkreten Bereich anwendbar, da u. a. Druck und Temperatur an unterschiedlichen Stellen im Bergwerk, aber auch von Bergwerk zu Bergwerk andere Eingangsgrößen aufweisen.

13.4.2 Verwendungsmöglichkeit im Sicherheitsnachweis

Die Langzeitaussage zur Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs stellt einen wichtigen Nachweis bezüglich der Langzeitsicherheit dar /BMU 10/. Auf der Grundlage einer geowissenschaftlichen Langzeitprognose soll nachgewiesen werden, dass die Entwicklung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über eine Million Jahre die Integrität des Bereiches sicherstellt.

Wichtige Argumente liefern die Beobachtungen und Messungen in Bereichen, in denen Salzgestein „verheilt“ ist und die Permeabilitäten messbar abnehmen. Die mittels derartiger Messungen ermittelten Parameter können in Berechnungen im Rahmen eines Sicherheitsnachweises eingesetzt werden, gelten aber nur für den konkreten Bereich, in dem die Parameter gewonnen wurden. Für das Salzkriechen ausschlaggebende Kennwerte, wie z. B. Druck und Temperatur, müssen deshalb jeweils in den definierten Bereichen ermittelt werden, in denen ein Endlager errichtet werden soll.

13.4.3 Bewertung der Möglichkeit der Kommunikation

Neu aufgefahrenen Strecken, die auf alte, konvergierte Strecken stoßen, zeigen sehr anschaulich, wie Gegenstände des Bergbaus durch die Konvergenz des Steinsalzes eingeschlossen werden und können ein wichtiges Hilfsmittel zur Visualisierung und zum Verständnis von Konvergenzprozessen darstellen.

13.5 Offene Fragen

Offene Fragen betreffen beispielsweise den zeitlichen Verlauf der natürlichen Verheilungsmechanismen; darüber hinaus könnten eventuell stattgefundenen Veränderungen in den im Salzgestein eingeschlossenen Materialien (i. W. Metalle, Holz) untersucht und hinsichtlich ihrer Relevanz für endlagerbezogene Prozesse geprüft werden.

13.6 Literatur zu Kapitel 13

- /ASS 12/ Wallmüller, R.: Zusammenstellung von Photographien aus der Schachanlage Asse II. - Interne Unterlage der Asse-GmbH, Remlingen, 2012.

- /BAR 87/ Barth, F.E.: Zur Geschichte des Begriffes Heidengebirge. - Ann. Naturhist. Mus. Wien, Vol. 89, A, pp. 205-224, 1987.

- /BAU 91/ Bauer, G.: Kryogene Klüfte in norddeutschen Salzdiapiren? - Zbl. Geol. Paläont., Teil I, Heft 4, pp. 1247-1261, Stuttgart, 1991.

- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, Stand 30. September 2010. Abrufbar unter: http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/sicherheitsanforderungen_endlagerung_bf.pdf (22.07.2013).

- /BRA 08/ Brassler, T.; Bletz, B.; Nosek, U.; Schmidt, G.: Die Rolle Natürlicher Analoga bei der Sicherheitsbewertung von Endlagern. - Anhang „Natürliche Analoga“ in: Brassler, T.; Droste, J.; Müller-Lyda, I.; Neles, J. M.; Sailer, M.; Schmidt, G.; Steinhoff, M.: Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle in Deutschland - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-247, 96 S. + Anhänge auf beigefügter CD, Köln, 2008.
- /BRE 99/ Brenner, J.; Feddersen, H.-K.; Gies, H.; Miehe, R.; Rothfuchs, T.; Storck, R.: Untersuchung von Altversatz als Analogon zur Konvergenz und Kompaktierung versetzter untertägiger Hohlräume im Salz über lange Zeiträume, Phase I. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-147, Köln, 1999.
- /HAM 12/ Hammer, J.; Fleig, S.; Mingerzahn, G.; Kühnlenz, T.; Mertineit, M.; Pusch, M.; Schramm, M.; Behlau, J.; Zaretzki, B.; Hesser, J.; Shao, H.; Köthe, A.; Vogel, P.: Salzgeologische Bewertung des Einflusses von „kryogenen Klüften“ und halokinetischen Deformationsprozessen auf die Integrität der geologischen Barriere des Salzstocks Gorleben. - Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), GRS-273 (erstellt von BGR Hannover), 2012.
- /HUN 94/ Hunsche, U.; Schulze, O.: Das Kriechverhalten von Steinsalz. - Kali und Steinsalz, Band 11, Heft 8/9, 1994.
- /HUN 03/ Hunsche, U.; Schulze, O.; Walter, F.; Plischke, I.: Thermomechanisches Verhalten von Salzgestein. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Projekt Gorleben 9G2138110000, im Auftrage des BfS, Hannover, 2003.
- /NOS 00/ Noseck, U.: Zusammenstellung und Auswertung geochemischer Untersuchungen zum Radionuklidverhalten aus ausgewählten Studien über natürliche Analoga. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), GRS-155, Köln, 2000.

- /PLI 89/ Plischke, I.; Hunsche, U.; In situ-Kriechversuche unter kontrollierten Spannungsbedingungen an großen Steinsalzpfeilern. - In: Maury, V.; Fourmaintraux, D. (eds.): Rock at Great Depth; Proc. Int. Symp., Pau (France), pp. 101-108. Balkema, Rotterdam, 1989.
- /RSK 05/ Reaktor-Sicherheitskommission: RSK Stellungnahme: Gase im Endlager vom 27.01.2005 (379. Sitzung), 2005. Abrufbar unter <http://www.rskonline.de/downloads/sngaseendlager.pdf> (22.07.2013).
- /SCH 97/ Schneider, L.: Auswertung von russischen Experimenten zum Nachweis der Stabilität von Salzdomen nach der Freisetzung extremer Energiemengen im Steinsalzmassiv. - Stoller Ingenieurtechnik GmbH, Abschlussbericht, 176 S., 1997.
- /WAL 79/ Wallner, M.; Caninenberg, C.; Gonther, H.: Ermittlung zeit- und temperaturabhängiger mechanischer Kennwerte von Salzgesteinen. - In: Proc. 4th Int. Congress on Rock Mechanics, Montreux, 313-318. Balkema, Rotterdam, 1979.
- /WIE 01/ Wieczorek, K.; Schwarzianek, P.; Rotfuchs, T.: Self healing of excavation disturbed rocks in the near field of underground cavities - exemplary measurements in rock salt and interpretation of preliminary results. - Proceedings of Eurosafe-01, Paris, Nov. 5-6, 2001.
- /WIE 03/ Wieczorek, K.: EDZ in Rock Salt: Testing Methods and Interpretation. - European Commission CLUSTER conference on the Impact of EDZ on the Performance of Radioactive waste Geological Repositories, 3-5 November 2003, Luxembourg, 2003.
- /WIE 04/ Wieczorek, K.; Schwarzianeck, P.: Untersuchung zur Auflockerungszone im Salinar (ALOHA2). - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-198, Köln, 2004.

14 Mögliche Auswirkungen von Erdbeben auf die Integrität von Salzgestein bzw. ein Endlager

14.1 Bedeutung für den Sicherheitsnachweis

Die geologische Barriere eines Endlagersystems wird vom einschlusswirksamen Gebirgsbereich gebildet, der Teil eines geeigneten Wirtsgesteins ist, wie es z. B. Salzgestein darstellt. Solch ein Wirtsgestein muss dabei zwei wesentliche Anforderungen erfüllen (siehe /BRA 08/):

- Isolation der Schadstoffe von der Biosphäre über sehr lange Zeiträume
- Sichere Errichtung und Betrieb des Endlagers

Übergeordnet werden mit diesen Anforderungen auch die Ziele eines dauerhaften Schutzes von Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen der Abfälle sowie der Vermeidung unzumutbarer Lasten und Verpflichtungen für zukünftige Generationen verfolgt /BMU 10/.

Da Erdbeben die Einhaltung dieser Anforderungen beeinträchtigen können, muss das Wirtsgestein gegenüber geodynamischen Einwirkungen, wie sie beispielsweise Erdbeben oder neotektonische Bewegungen darstellen, stabil sein. Erdbeben wirken einerseits durch ihre Erschütterungsfähigkeit und durch bleibende Verschiebungen, andererseits sind sie Indikatoren für derzeit ablaufende tektonische Prozesse. Für einen Endlagerbereich wird in /AKE 02/ empfohlen, dass die zu erwartenden seismischen Aktivitäten nicht größer als Erdbebenzone 1 nach DIN 4149 /DIN 05/ sein dürfen. Basis für eine Abgrenzung von erdbebengefährdeten Gebieten bildet in Deutschland die „Karte der Erdbebenzonen Deutschlands“ (/GFZ 15/, siehe auch /DIN 05/, Abb. 14.1). Auch in anderen Ländern ist die Erdbebengefährdung im Zusammenhang mit Endlagern bereits analysiert worden (z. B. /BÄC 02/, /KOL 03/.

Durch Erdbeben verursachte seismische Wellen führen auch zu einer dynamischen Zusatzbeanspruchung der Hohlräume eines Endlagerbergwerkes. Da es in Deutschland durchaus Gebiete erhöhter Seismizität gibt, muss zum Nachweis der Erdbebensicherheit eines Grubengebäudes beurteilt werden, ob die Wechselwirkungen zwischen seismischen Wellen und untertägigem Hohlraum zu sicherheitsrelevanten Beeinträchtigungen des Endlagerkonzeptes führen können.

Grundsätzlich ist in diesem Zusammenhang aber festzuhalten, dass Salzformationen oft in geologisch stabilen Regionen mit geringer Erdbebenaktivität vorkommen /LEY 11/. Die Mächtigkeit vieler Salzablagerungen belegt zudem die stabilen geodynamischen Verhältnisse während ihrer viele Millionen Jahre andauernden Sedimentation.

Zusammenfassend wird deshalb auch in /HER 98/ das Fazit gezogen, dass in Deutschland die Gebiete mit der relativ stärkeren Seismizität und dem häufigeren Auftreten von Erdstößen nicht in Norddeutschland liegen, sondern im süd- und westdeutschen Raum. Alle bisherigen Beobachtungen aus der geologischen Vergangenheit weisen darauf hin, dass in der nahen Zukunft (mehrere hunderttausend Jahre) tektonische Ereignisse und Erdbeben nicht vorrangig die Langzeitsicherheit von Untertage-Deponien [Anm.: zu denen hier auch Endlager gezählt werden] in den ... Salzstöcken Norddeutschlands beeinflussen werden.

Auch nach Ansicht der BGR bietet der Untergrund bzgl. Untertage-Bauwerken generell beste Voraussetzungen für die Sicherheit vor Naturgefahren: „Erdbebenauswirkungen sind zum Beispiel in der Tiefe wesentlich geringer als an der Oberfläche“ /BGR 13/.

Mit Hilfe von Literaturrecherchen sollte im Rahmen der vorliegenden Teilaufgabe geprüft werden, ob derartige Aussagen bereits hinreichend begründet sind oder ob es sinnvoll ist, mittels zusätzlicher (natürlicher oder auch anthropogener) Analogie weitere Belege beizufügen oder auch die getätigten Aussagen in Frage zu stellen.

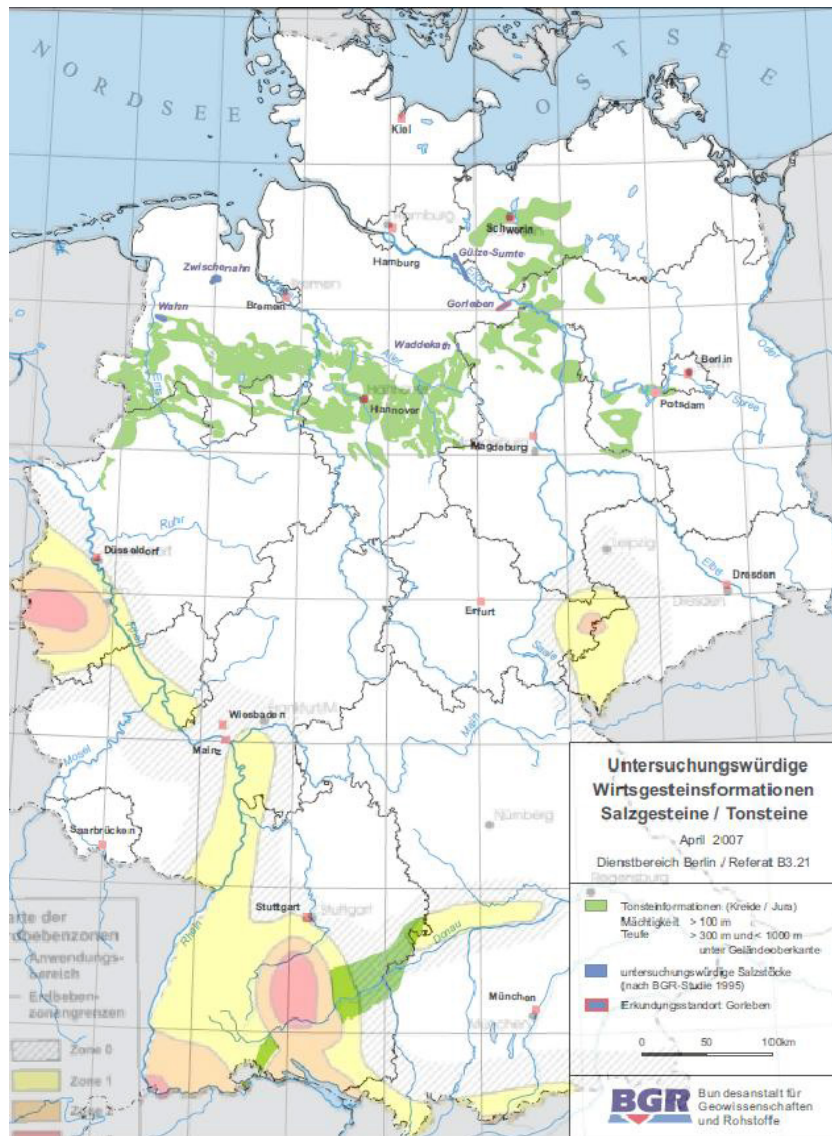


Abb. 14.1 Übereinander gelegte Karten der Erdbebenzonen /GFZ 15/ und der untersuchungswürdigen Wirtsgesteinsformationen in Deutschland (/BRÄ 12/, nach Unterlagen der BGR)

14.2 Erkenntnisse aus Labor- und In-situ-Experimenten

Dieses Kapitel wird in vorliegendem Teilbericht nicht weiter ausgeführt, da auf spezifische Labor- und in-situ Experimente nicht zurückgegriffen wird. Sofern relevant, sind einzelne diesbezügliche Aussagen in den nachfolgenden Unterkapiteln enthalten.

14.3 Natürliche Analoga

14.3.1 Untertage-Bauwerke

Vom Grundsatz her stellt jedes unterirdische Bauwerk, das den Auswirkungen eines Erdbebens ausgesetzt gewesen und diesbezüglich analysiert worden ist, ein Analogon für mögliche Auswirkungen von Erdbeben auf die Integrität eines Endlagers dar. Die überwiegende Mehrzahl diesbezüglicher Arbeiten bezieht sich dabei auf Tunnelbauten und unterirdisch angelegte Verkehrswege (U-Bahn), eine deutlich geringere Anzahl auf Bergwerke. Bei den in entsprechenden Studien behandelten Gesteinen dominieren eindeutig nicht-salinare Festgesteine. Nichts desto trotz lassen sich aus derartigen Studien auch wirtsgesteins-unabhängige Aussagen ableiten.

Die wesentlichen Erkenntnisse hierzu sind bereits 1986 seitens BGR in einer Studie /ALH 86/ zusammengestellt worden, die von /GÖB 12/ weitergeführt und aktualisiert worden ist. Darin wurden insbesondere die Auswirkungen von seismischen Erschütterungen (insbesondere von Erdbeben) auf Untertage-Bauwerke untersucht. Dabei hat sich bestätigt, dass von den in /ALH 86/ ausgewerteten Arbeiten die Studien von /DOW 78/ und /OWE 81/ nach wie vor grundlegend sind (siehe auch /LEN 96/, /SHA 91/).

Abb. 14.2 zeigt mögliche Ursachen der Gefährdung von Untertage-Bauwerken in Form eines Flussdiagramms auf. Dabei wird insbesondere zwischen dem Nahfeld und dem Fernfeld eines seismischen Herdes unterschieden, da sich nicht nur die Amplitude, sondern auch der Frequenzgehalt eines seismischen Signals mit dem Abstand vom Herd ändert.

Die seismische Erregung wird in der Regel über die Bodenbewegung abgeschätzt, und zwar entweder durch die

- Maximale Schwinggeschwindigkeit vor Ort (*peak particle velocity*, ppv) oder die
- maximale Bodenbeschleunigung an der Erdoberfläche (*peak ground acceleration*, PGA).

Der ppv-Wert beschreibt die Situation vor Ort genauer als der PGA-Wert. Die hauptsächlichlichen Anregungsfrequenzen und die Beibendauer sind ebenfalls von Bedeutung,

werden aber bei der Auswertung seismischer Ereignisse bestenfalls qualitativ berücksichtigt /GÖB 12/.

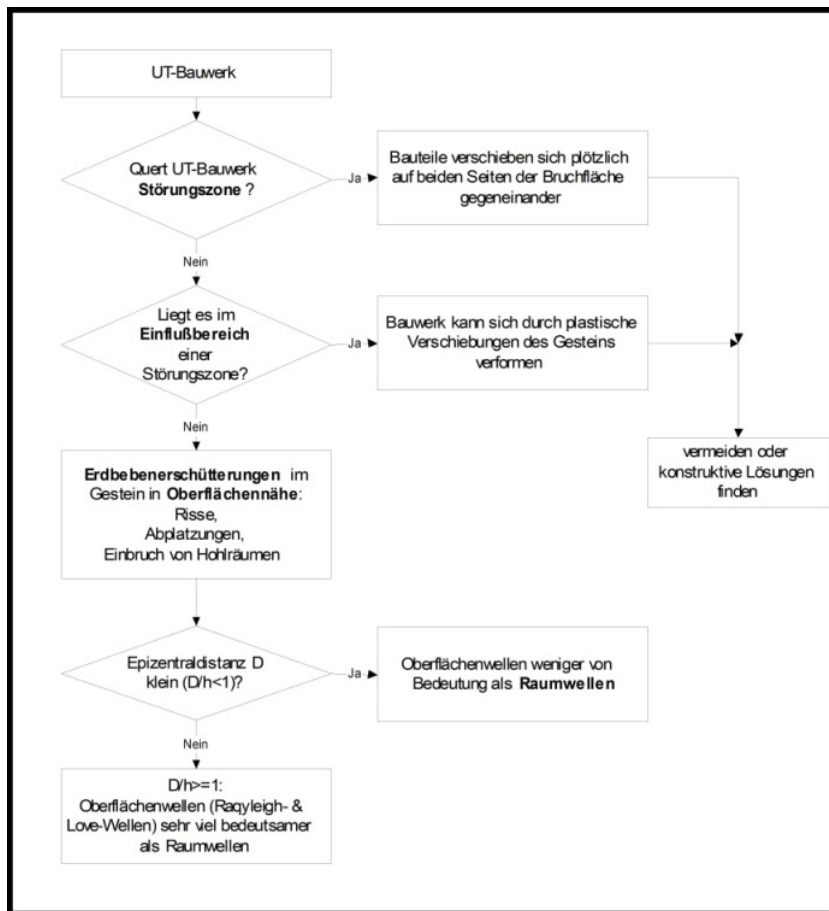


Abb. 14.2 Flussdiagramm zur Auswirkung seismischer Wellen auf Untertagebauwerke (/BER 87/, /LEN 96/). UT = „Untertage“, h = Herdtiefe des Bebens, D = Epizentraldistanz /GÖB 12/

In /LEN 96/ wird als Erfahrungswert anführt, dass es in der Regel nur unmittelbar im Epizentrum (also im Nahfeld¹² eines Erdbebens) zu Beschädigungen größeren Ausmaßes kommt, im Erdbeben-Fernfeld weisen sowohl die maximale Bodenbeschleunigung als auch die maximale Schwinggeschwindigkeit schon in geringer Tiefe nur die Hälfte der Werte an der Erdoberfläche auf.

In /GÖB 12/ werden diese Aussagen von /LEN 96/ folgendermaßen veranschaulicht: Die Amplituden von Oberflächenwellen sinken mit der Tiefe, und zwar abhängig von der Erregerfrequenz: Je kleiner die Frequenz, desto größer ist die Eindringtiefe

¹² Die Begriffe „Nahfeld“ und „Fernfeld“ werden auch im Zusammenhang mit einem Endlager gebraucht und beziehen sich dort auf die Lage zu den radioaktive Abfällen; in vorliegendem Teilkapitel beziehen sich die gleichlautenden Begriffe auf einen Erdbebenherd.

/SCH 01/; allerdings sind Erdbebenwellen durch relativ niedrige Frequenzen gekennzeichnet. Wenn man annimmt, dass Gebirgsfestigkeit und Elastizitätsmodul mit der Tiefe steigen, dann führen gleichzeitig abnehmende Amplituden der Anregung zu sinkenden Verformungen des hauptsächlich durch Oberflächenwellen beanspruchten Gebirges. Je kleiner die Verformungen, desto geringer sollte die Wahrscheinlichkeit von Schäden sein.

Schäden an Untertage-Bauwerken sind nach /LEN 90/ allerdings schwer vorherzusagen /GÖB 12/, weil es z. B. durch Unterschiede in Geologie, Herdmechanismus, Absorption der seismischen Energie, Geometrie des Bergwerks und unterschiedlichen Ausbauten vielfältige Einflussmöglichkeiten gibt. In /HER 96/ wird zwischen unmittelbaren und langfristigen Folgen von Erdbeben unterschieden, die jedoch beide mit den Eigenschaftsänderungen von Gestein und hydrologischer Situation zu tun haben, also primär auf das Langzeitverhalten von Untertage-Deponien ausgerichtet sind. Dieser Komplex bleibt in der BGR-Studie /GÖB 12/ unberücksichtigt. Deren Schwerpunkt liegt vielmehr auf der kurzfristigen Wirkung tektonischer Beben auf im Fernfeld¹² befindliche Untertage-Bauwerke. Die Wirkung von seismischen Wellen im Nahfeld wird ebenfalls betrachtet. Außerdem wird von statischer Stabilität der Untertage-Bauwerke ausgegangen.

Nach /GÖB 12/ sind insgesamt wenig Informationen über die Einwirkungen von tektonischen Beben auf Tunnel und Kavernen veröffentlicht, während Schäden im Bergbau aufgrund von bergbau-induzierten Beben zahlreich dokumentiert sind. Die von induzierten Beben freigesetzte Energie ist allerdings in aller Regel sehr viel kleiner als bei einem tektonischen Beben, so dass induzierte Beben hauptsächlich im Nahfeld ihrer Entstehung wirken. Der Herd eines tektonischen Bebens wird vom Untertage-Bauwerk sehr viel weiter entfernt sein als der Herd eines induzierten Bebens, so dass die Wirkung eines tektonischen Bebens im Nahfeld des Untertage-Bauwerkes sehr viel schwächer sein wird. Physikalisch besteht allerdings kein Unterschied zwischen tektonischen und induzierten Herden /GIB 90/.

Nach /KOL 96/ sind Untertage-Bauwerke auch ohne spezielle Maßnahmen erdbebensicherer als Übertage-Bauwerke. Nach /HOL 90/ sind starke Schäden übertage erst ab einer Magnitude $M = 3$ zu erwarten. In /JEN 01/ wird vom Hyogo-ken Nanbu (Kobe) - Erdbeben im Jahr 1995 berichtet, dass im Gegensatz zu fast 180.000 beschädigten Gebäuden an der Erdoberfläche nur wenige Untertage-Bauwerke beschädigt wurden.

Eine weitere diesbezügliche Literaturlauswertung ist - mit vergleichbarem Ergebnis - aktuell durch /BRÄ 12/ erfolgt.

14.3.2 Gebirgsschläge und Peaceful Nuclear Explosions (PNE)

Während im Kapitel 14.3.1 seismische Auswirkungen auf untertägige Einrichtungen ohne unmittelbaren Wirtsgesteinsbezug dargestellt worden sind, können als spezifische Natürliche Analoga (im weiteren Sinne, hier meist durch technische Maßnahmen verursacht) für eine dynamische Beanspruchung von Salinarbarrieren (wie sie Erdbeben darstellen) insbesondere Gebirgsschläge herangezogen werden /MIN 10/. Auf diese Studie /MIN 10/ wird deshalb nachfolgend in besonderem Maße Bezug genommen, wobei nicht in jedem Detail das zugehörige Einzelzitat wiederholt wird. Als ein weiteres Natürliches (technisches) Analogon können ggf. auch unterirdische Kernexplosionen (Peaceful Nuclear Explosions - PNE) herangezogen werden.

Gebirgsschläge

Mit Bezug auf eine Endlagerung in speziell aufzufahrenden Bergwerken im Salzgestein bietet die Analyse von Gebirgsschlägen de facto Einblicke in geodynamische „Versuchsabläufe“ unter extremen Beanspruchungen im Maßstab 1:1 und stellt somit einen originären Datenfundus zur Ableitung erforderlicher Mindestmächtigkeiten für Salinarbarrieren zur Verfügung /MIN 10/. Für eine in-situ gegebene Mächtigkeit einer geologischen Salinarbarriere lässt sich damit gegenüber einem Integritäts- und Dichtheitsverlust eine Sicherheit ausweisen, die letztendlich auf einer Art „Großversuch“ (mehrere Quadratkilometer großer Grubenfelder) basiert, bei denen die umgebenden Barrieren plötzlich einem Versatz von bis zu mehreren Metern unterworfen worden sind. Die dabei aufgetretenen dynamischen Beanspruchungen der umgebenden geologischen Salinarbarrieren waren nach /MIN 10/ um ein Vielfaches höher, verglichen mit dem seismischen Lastfall beim Durchlaufen von Erdbebenwellen mit der in Deutschland maximal möglichen Stärke. Dies bedeutet, dass die großen Gebirgsschläge im Kali-bergbau den Extremfall einer dynamischen Beanspruchung von abdichtenden Salinarbarrieren darstellen, der aufgrund des ablaufenden Herdmechanismus mit großen Versatzbeträgen und der Lage des Hypozentrums in der Lagerstätte weit über der Beanspruchung liegt, die sich allein aus der natürlichen Seismizität in Deutschland ergibt.

Nach /MIN 04/ sind weltweit im Kali- und Steinsalzbergbau die in Tab. 14.1 zusammengefassten, größeren Gebirgsschläge mit Magnituden im Bereich $M_L = 3 \dots 5,6$ und Absenkungen des Deckgebirges im Dezimeterbereich bis zu mehreren Metern bekannt geworden. Die geologische Barriere aus Steinsalz und Salzton zu grundwasserführenden Schichten hat dabei in allen Fällen ihre Dichtheit bewahrt.

Tab. 14.1 Gebirgsschläge im Kalibergbau (aus /MIN 10/)

Nr.	Datum	Ort	Magnitudo	Bruchfeldfläche [km ²]	Senkung [m]
1	24.05.1940	Krügershall	4,3	0,6	0,2
2	22.02.1953	Heringen	5,0	0,7	0,6
3	08.07.1958	Merkers	4,8	2,0	0,45
4	29.06.1961	Merkers	3,7	0,2	0,1
5	04.04.1971	Aschersleben	4,6	0,33	0,75
6	23.06.1975	Sünna	5,2	3,4	0,7
7	02.07.1983	Bleicherode	3,3	0,1	0,07
8	13.03.1989	Völkershausen	5,6	6,5	1,0
9	05.01.1995	Solikarnsk (GUS)	4,8	0,36	4,6
10	03.02.1995	Wyoming (USA)	5,1	2,0	1,0
11	11.09.1996	Teutschenthal	4,9	2,5	0,5

$$M_L = \frac{1}{1,64} (\log W - 4,8)$$

$$\Delta W \approx \frac{1}{2} \cdot f_{AB} \cdot A_{BF} \cdot \Delta Z \cdot \Delta \sigma_{PF}$$

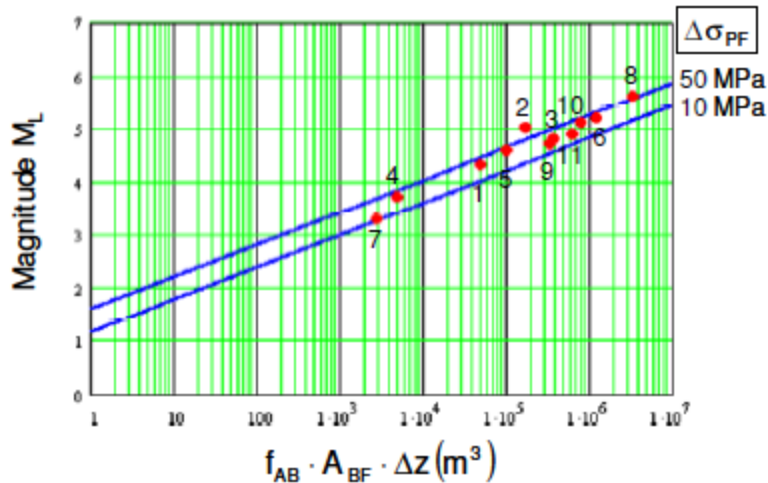


Abb. 14.3 Bei Gebirgsschlägen im Kalibergbau freigesetzte Energie (Magnitude) in Abhängigkeit von zerstörter Grubenfeldfläche A_{BF} , Konvergenzsprung Δz , Pfeilertragfähigkeitsabfall $\Delta\sigma_{PF}$ und Abbauverlustfaktor f_{AB} (aus /MIN 10/)

Aus der Analyse dieser Gebirgsschläge (siehe Abb. 14.3) lassen sich nach /MIN 10/ für die Beanspruchbarkeit von Salinarbarrieren folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Die stärksten bergbauinduzierten dynamischen Beanspruchungen, welche die aus natürlicher Seismizität in Deutschland möglichen Belastungen um ein Vielfaches übertreffen und im Vergleich mit statischen Beanspruchungen weitaus kritischere deviatorische Belastungsfälle für die geologischen Barrieren darstellen, sind ab einer bestimmten Mächtigkeit der Salinarbarrieren nicht mehr im Stande, deren Integrität und Dichtheit zu verletzen.
- Die durchgeführten experimentellen Untersuchungen einer Salinarbarriere nach starker dynamischer Beanspruchung (Magnitude $M_L = 4,9$) über einem kollabierten Grubenfeld¹³ weisen nach, dass in der 50 m mächtigen Steinsalzschiefer der hangenden Barriere über dem Hauptanhydrit keine dilatanten Schädigungen mit einer

¹³ Im Rahmen des zitierten Projektes /MIN 10/ bestand die Aufgabe, die in-situ Untersuchungen zum geomechanischen Verhalten von Salinarbarrieren nach starker dynamischer Beanspruchung am Beispiel des letzten großen Gebirgsschlages in der UTV Teutschenthal vorzunehmen, wo zum Zeitpunkt des Kollaps im Ostfeld die Versatzarbeiten zur Stabilisierung des Abbaufeldes gerade angelaufen waren.

erhöhten Permeabilität feststellbar sind und die geologische Salinarbarriere unter den geänderten Einspannungsbedingungen ihre Integrität und Dichtheit erhalten hat.

- Ein im Steinsalz angelegtes Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle ist bei ausreichend mächtig dimensionierten Salinarbarrieren erdbebensicher.

Peaceful Nuclear Explosions (PNE)

Als ein weiteres Natürliches (technisches) Analogon für mögliche Auswirkungen von Erdbeben auf die Integrität von Salzgestein können die umfangreichen Untersuchungen in Zusammenhang mit unterirdischen Kernexplosionen (Peaceful Nuclear Explosions - PNE) – schwerpunktmäßig in den 1950er und 1960er Jahren durchgeführt – herangezogen werden.

Versuchsgründe für Kernexplosionsprogramme in größeren Teufen sind dabei im Wesentlichen folgende gewesen:

- Isotopen-Programm (Herstellung von Isotopen, anschließende Gewinnung)
- Power-Programm (Extraktion der Fusionswärme zur Erzeugung elektrischer Energie)

Im Weiteren aber auch:

- Hohlraumgewinnung
- Zerrüttung/Auflockerung des Untergrundes zur verstärkten Ausnutzung vorhandener Kohlenwasserstoff-Lagerstätten

Ein Teil dieser unterirdischen Kernexplosionen wurde in Salzgestein durchgeführt, so dass ggf. als Ergebnis der Zielsetzungen „Hohlraumgewinnung“ und „Zerrüttung des Untergrundes“ relevante Erfahrungen und Ergebnisse zum Thema der vorliegenden Teilstudie extrahiert bzw. abgeleitet werden können. Allerdings liegen diese Versuche bereits rund 50 Jahre zurück; die Dokumentation entspricht deshalb möglicherweise nicht den heutigen Standards.

Schon 1972 ist von /LAN 72/ gefordert worden, dass zur Gewährleistung der Dichtigkeit eines durch eine nukleare Sprengung erzeugten Hohlraums die Bruch- bzw. Zerrüttungszone vollkommen innerhalb einer genügend mächtigen und dichten Gesteinsab-

folge liegen muss (vgl. die Forderung nach einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich /AKE 02/). Diese Forderung ist – nach damaliger Datenlage – bei den o. a. Versuchen erfüllt worden (/BRA 83/ mit weiteren Zitaten). Durch Messungen der Grundwasserspiegelstände vor, während und nach Versuchsdurchführung konnte beispielsweise nachgewiesen werden, dass durch die Sprengungen keine Verbindungen zu überliegenden Aquiferen hergestellt wurden (z. B. USGS 62). Lediglich eine Zunahme der Permeabilität konnte bis zum 3,5-fachen Hohlraumdurchmesser im umgebenden Medium festgestellt werden. Als Ausgangspunkt für gezielte Recherchen (siehe Kapitel 14.5) kann eine neuere Übersicht /YAN 03/ über weltweite Aktivitäten bzgl. nuklearer Explosionen herangezogen werden.

14.4 Bewertung

Die verschiedenen Literaturanalysen haben gezeigt, dass es im Vergleich zu einer Vielzahl von Quellen bzgl. Schäden durch Erdbeben an der Erdoberfläche nur eine geringe Anzahl von Arbeiten gibt, welche sich mit unterirdischen Schäden durch Erdbeben befassen. Die wenigen zur Verfügung stehenden empirischen Daten werden beispielsweise von /STE 77/, /PRA 78/ und /SHA 91/ als zu gering bewertet, um eine aussagekräftige Prognose zu formulieren. Oft werden daher die Studien zum Verhalten und die auftretenden Schäden an Tunneln während Erdbeben herangezogen (z. B. /ROZ 76/).

14.4.1 Grenzen der Anwendbarkeit/Zeitskala/Ungewissheiten

Mit Ausnahme des Gebirgsschlag-Analogons, das als solches bereits in der Primärliteratur /MIN 10/ dargestellt und quantitativ hinterlegt ist, sind die übrigen Beispiele und Erfahrungen in erster Linie geeignet, ein Grundverständnis zu möglichen Auswirkungen von Erdbeben auf die Integrität von Salzgestein bzw. ein Endlager zu vermitteln. Eine direkte Anwendbarkeit auf einen konkreten Endlagerstandort ist nicht gegeben.

14.4.2 Verwendungsmöglichkeit im Sicherheitsnachweis

Die in vorliegendem Teilbeitrag dargestellten Erfahrungen und Ergebnisse können – unter Hinzuziehung der zugrunde liegenden Literatur – für Erdbeben-bezogene Aussagen in einem Sicherheitsnachweis unterstützend herangezogen werden. Das spezi-

elle Gebirgsschlag-Analogon ist als solches nicht nur qualitativ verwendbar, sondern in /MIN 10/ auch ausführlich experimentell und rechnerisch hinterlegt.

14.4.3 Bewertung der Möglichkeit der Kommunikation

Es bestehen gute Kommunikationsmöglichkeiten, da (insbesondere starke) Erdbeben und Gebirgsschläge in den Medien ausführlich dargestellt werden und Grundinformationen über die entsprechenden Prozesse in weiten Bereichen der Bevölkerung vorhanden sind.

14.5 Offene Fragen

Es ergeben sich eine Reihe von Ansatzpunkten für weiterführende Arbeiten und damit auch die Beantwortung offener Fragen:

- Systematische Zusammenstellung von Erfahrungen im Tunnelbau (und vergleichbaren Bauwerken) und deren Analyse hinsichtlich Wirtsgestein, Teufenlage, geologischer Gesamtsituation und seismischer Beanspruchung,
- Erweiterung der Gebirgsschlag-Studie /MIN 10/ auf alle bekannten größeren Gebirgsschläge im Salzgestein,
- Spezielle und systematische Auswertung der PNE-Experimente hinsichtlich Stärke der Explosion, Teufenlage des Versuchsortes, Salinarmächtigkeit (speziell auch Barrierenmächtigkeit im Rahmen des jeweiligen Experimentes), Art und Umfang der wissenschaftlichen Begleitung, Verwendbarkeit der dokumentierten Ergebnisse, Potenzial für weiterführende Auswertungen.

14.6 Literatur zu Kapitel 14

/AKE 02/ Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Empfehlungen des AkEnd - Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, im Auftrag des BMU, 260 S., Köln, 2002.

- /ALH 86/ Alheid, H.J.: Wechselwirkung zwischen seismischen Wellen und untertägigen Hohlräumen (Kenntnisstand). - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Archiv-Nr. 100029, Hannover, 1986.
- /BÄC 02/ Bäckblom, G.; Munier, R.: Effects of earthquakes on the deep repository for spent fuel in Sweden based on case studies and preliminary results. - Svensk Kärnbränslehantering AB, Technical Report TR-02-24, 115 p., Stockholm, 2002.
- /BER 87/ Berger, E.: Konzeptionelle Überlegungen zum Verhalten von Untertagebauten während Erdbeben. - Nagra informiert 3, S. 15-20, 1987.
- /BGR 13/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Untertagebauwerke - Sicherheit vor Naturgefahren im Untergrund. - http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Geotech_Sicherheit/Untertage_Bw/untertage_bw_node.html (2013-01-29), 2013.
- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, Stand 30. September 2010. Abrufbar unter: http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/sicherheitsanforderungen_endlagerung_bf.pdf (22.07.2010)
- /BRA 08/ Brassler, T. et al.: Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland. - GRS-247, 96 S. + 22 Anhänge auf CD, Köln, 2008.
- /BRÄ 12/ Bräuer, M.: Auswirkungen von seismischen Ereignissen auf ein Endlager für radioaktive Abfälle im Wirtsgestein Salz - Literaturrecherche. - Bachelorarbeit am Institut für Geosysteme und Bioindikation der TU Braunschweig, 2012.
- /BRA 83/ Brassler, T.: Ausbreitung von Radionukliden nach unterirdischen Kernexplosionen (Peaceful Nuclear Explosions - PNE). - Bericht GSF-Ift interne Literaturrecherche, Braunschweig (unveröffentlicht), 1983.

- /DIN 05/ Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN 4149: Bauten in deutschen Erdbebengebieten. Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten. - 82 S., Beuth-Verlag, Berlin, 2005.
- /DOW 78/ Dowding, C.H., Rozen, A.: Damage to rock tunnels from earthquake shaking. - J. Geotech. Eng. Div. Am. Soc. Civ. Eng., Vol. 104(2), pp. 175-192, 1978.
- /GFZ 15/ Helmholtz-Zentrum Potsdam - Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ: Erdbebenzonenkarte. - Abrufbar unter : http://www.gfz-potsdam.de/din4149_erdbebenzonenabfrage/ (27.02.2015)
- /GIB 90/ Gibowicz, S.J.: Keynote lecture: The mechanism of seismic events induced by mining - a review. - In: Fairhurst, C. (ed.), Rockbursts and Seismicity in Mines, pp. 3-27, Balkema, Rotterdam, 1990.
- /GÖB 12/ Göbel, I.: Persönliche Kommunikation mit besonderem Verweis auf den „Methodenbericht Erdbebensicherheit“ der BGR (ohne Zitat - auszugsweise als Manuskript zur Verfügung gestellt), Hannover, 2012.
- /HER 96/ Herbert, A.W., Norris, S.: Accounting for Natural Hazards in Safety Assessments. - Radioactive waste disposal 21/22, November, Kensington Hilton Hotel, Condon W 11, organized by IBC Technical Services Energy Division, 1996.
- /HER 98/ Herrmann, A.G.; Röthemeyer, H.: Langfristig sichere Deponien. – 467 S., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1998.
- /HOL 90/ Holmes, R.D., Reeson, J.A.: Excess shear stress (ESS) - A case Study. - In: Fairhurst, C. (ed.), Rockbursts and Seismicity in Mines, pp. 331-336, Balkema, Rotterdam, 1990.
- /KOL 03/ Koller, M.G.: Projekt Opalinuston, Gutachten zur Erdbebensicherheit. - RÉSONANCE Ingénieurs-Conseils SA, TM 253.01-1/MK, Carouge (Genève) (im Auftrag der NAGRA), 2003.
- /KOL 96/ Kolekova, Y., Flesch, R.G., Lenhardt, W.: Erdbebensicherheit im Grundbau-Erfahrungsbericht. - Felsbau 14, Nr. 5, S. 248-257, 1996.

- /LAN 72/ Langer, M.: Ingenieurgeologische Probleme bei der Speicherung von Öl und Gas. - Geol. Jb., Band 90, S. 315-358, Hannover, 1972.
- /LEN 90/ Lenhardt, W.A.: Damage studies at a deep level African gold mine. - In: Fairhurst, C. (ed.), Rockbursts and Seismicity in Mines, pp. 391-393, Balkema, Rotterdam, 1990.
- /LEN 96/ Lenhardt, W.A.: Zur Abschätzung von Erdbebenbelastungen. - Felsbau 14, Nr. 5, S. 241-247, 1996.
- /LEY 11/ Leydecker, G.: Erdbebenkatalog für Deutschland mit Randgebieten für die Jahre 800 bis 2008. - Geol. Jb., Reihe E, Heft 59, 198 S. + CD, Hannover, 2011.
- /MIN 04/ Minkley, W.: Gebirgsmechanische Beschreibung von Entfestigung und Sprödbrecherscheinungen im Carnallit. - Schriftenreihe des Institutes für Gebirgsmechanik - Band 1, Shaker Verlag, Aachen, 2004.
- /MIN 10/ Minkley, W. et al.: Beweissicherungsprogramm zum geomechanischen Verhalten von Salinarbarrieren nach starker dynamischer Beanspruchung und Entwicklung einer Dimensionierungsrichtlinie zum dauerhaften Einschluss. - Abschlussbericht zum FuE-Vorhaben (FKZ: 02C1264), IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH, 214 S. + Anlagen, Leipzig, 2010.
- /OWE 81/ Owen, G.N., Scholl, R.E.: Earthquake engineering of large underground structures. - URS/John A. Blume and Assoc., Report FHWA/RD-80/195, San Francisco, 1981.
- /PRA 78/ Pratt, H.R., Hustrulid, W., Stephenson, D.E.: Earthquake damage to underground facilities. - Du Pont de Nemours and Company, Savannah River Laboratory, DP-1513, 84 pp., Aiken, South Carolina, 1978.
- /ROZ 76/ Rozen, A.: Response of rock tunnels to earthquake shaking. - Master of Science, Massachusetts Institute of Technology, 238 pp., 1976.
- /SCH 01/ Schmidt, H.G., Wuttke, F., Schönhardt, M.: Seismische Erkundung von bebauten Standorten. -Geotechnikseminar Weimar 2001, Schriftenreihe Geotechnik, Heft 4, Bauhaus-Universität, Weimar, 2001.

- /SHA 91/ Sharma, S., Judd, W.R.: Underground opening damage from earthquakes. - Engineering Geology 30 (3-4), pp. 263-276, 1991.
- /STE 77/ Stevens, P.R.: A Review of the Effects of Earthquakes on Underground Mines. -: Unites States Department of the Interior, Geological Survey, Open-File Report 77-313, 47 pp., Reston, Virginia, 1977.
- /UEN 01/ Uenishi, K., Sakurai, S.: Dynamic failure of an underground structure: Could it be induced by a horizontal disturbance? - Ellsworth, Tinucci, Heasley (eds.), Rock Mechanics in the National Interest, S. 1107-1114, Balkema, Lisse, 2001.
- /YAN 03/ Yang, X. et al.: Worldwide Nuclear Explosions. - International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Vol. 81B, pp. 1595-1599, Int. Assoc. Seismol. & Phys. Earth's Interior, 2003.

15 Qualifizierte Verschlüsse

15.1 Bedeutung für den Sicherheitsnachweis

Als Verschluss wird in den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ sowohl der Verschluss der Einlagerungsbereiche durch konturbündige Verfüllung ausgewählter Strecken und Grubenbaue als auch der dichte Verschluss der Schächte des Endlagerbergwerks bezeichnet. Zum Verschluss zählen alle technischen Bauwerke, die in das Endlagerbergwerk eingebracht werden, um die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) und den Schutz vor ionisierenden Strahlen sicherzustellen. Ein „qualifizierter“ Verschluss“ impliziert die Quasi-Wiederherstellung der intrinsischen Eigenschaften und damit die Prognosesicherheit für lange Zeiträume.

Heutige Stilllegungs-/Schließungskonzepte für ein zukünftiges Endlager für hochradioaktive Abfälle im Salinar gehen von einer vollständigen Verfüllung aller untertägig aufgefahrenen Hohlräume, Verbindungsstrecken und Schächten aus. Zielsetzung dieser Konzepte ist, die hydraulisch sensitiven Bereiche durch qualifizierte Verschlüsse bzw. Abdichtungen so zu konditionieren, dass die Langzeitsicherheit des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches nicht beeinträchtigt wird /MOE 12/.

Entsprechend den zu definierenden Anforderungen an qualifizierte Verschlüsse in einem Endlager im Salinar werden in den Tagesschächten und Zugangsstrecken Abdichtbauwerke erstellt, um den Zufluss von Lösung aus dem Deckgebirge in das Endlager in der Zeit bis zur Wiederherstellung des dichten Zustands zu verhindern bzw. zu minimieren. Diese Verschlussbauwerke müssen dabei mindestens so lange wirksam sein, bis der Einschluss im Endlager durch ausreichend kompaktierten Salzgrus hergestellt ist /MOE 12/.

In der Auslegungsplanung und der Nachweisführung sind solche geforderten Verschlüsse noch Gegenstand von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten /WTE 12/.

Vorliegende Erkenntnisse aus der Analyse natürlicher und/oder anthropogener Analogie können in diesem Zusammenhang zur Bewertung von Konzepten und Modellierungsergebnissen über die langfristige Entwicklung von qualifizierten Verschlüssen beitragen.

Einen Überblick über das Thema „Natürliche Analoga“ und ihre Relevanz für die Bewertung des Langzeitverhaltens geotechnischer Verschlüsse in einem Endlager für hochradioaktive Abfälle vermitteln die Berichte:

- Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland, Anhang Natürliche Analoga /BRA 08/
- Prozessorientierte Auswertung von natürlichen und anthropogenen Analoga und ihre Bewertung als vertrauensbildendes Element bei Sicherheitsbewertungen für Anlagen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle /KEL 07/, /GRU 11/

15.1.1 Einsatz von qualifizierten Verschlüssen nach Bergrecht

Nach Neu-Bewertung der Auswirkung von Bergschäden, insbesondere im Bereich des Altbergbaues und der Gefährdung durch Tagesbrüche, verlangt das heutige Bergrecht (Bundesberggesetz BBergG) /BERG 09/ zum Schutz der Tagesoberfläche immer häufiger eine sachgerechte Verwahrung von Schächten und Strecken durch geeignete Verschlüsse. Mit §53 und §55 wird über die Zulassung von Betriebsplänen entschieden, durch die auch noch nach Einstellung des Betriebes der Schutz Dritter sowie die Wiedernutzbarmachung der Oberfläche langfristig sichergestellt werden soll.

Qualifizierte Verschlüsse mit Langzeitsicherheitsnachweis werden nach dem Bergrecht und der Deponieverordnung (DepV)/Abfallrecht überall dort gefordert, wo die Einhaltung dieser Schutzziele gefährdet ist (/DEI 11/, /DEP 09/, /TAA 91/, /TAS 93/, /VER 02/, /LBA 08/, /VER 12/).

Dies gilt für vom Einsturz bedrohte Versatzbergwerke (UTV) und bei Nutzungsänderung rechtsvorschriftlich erweitert für Untertagedeponien (UTD) (siehe Tab. 15.1). So ist für Deponien der Klasse IV (UTD) im Rahmen der standortbezogenen Sicherheitsbeurteilung ein Langzeitsicherheitsnachweis zu führen, was bei Stilllegung den Nachweis der Standsicherheit und der Barrierenwirksamkeit von Verschlüssen einschließt.

Die Anforderungen an den Langzeitsicherheitsnachweis für Versatzbergwerke (festgelegt in Anlage 4 der VersatzV /VER 12/ für Bergbaubetriebe im Salzgestein für die Verwertung bergbaufremder Abfälle) sind analog den Anforderungen für Untertagede-

ponien (definiert in Anhang 2 der DepV /DEP 09/ für Abfälle der Deponieklasse IV im Salzgestein¹⁴) formuliert.

Tab. 15.1 Produzierende UTD-, UTV-Bergwerke/Kavernen, deren Betriebsgenehmigung auf einem positiven Langzeitsicherheitsnachweis beruht /ALW 12/

Bundesland	UTD-Bergwerk	UTV-Bergwerk	UTV-Kaverne
Sachsen-Anhalt	Zielitz	Zielitz, Bernburg, Teutschenthal	Steißfurt
Thüringen	Sondershausen	Sondershausen, Bleicherode, Sollstedt	
Hessen	Herfa-Neurode	Hattorf, Wintershall, Unterbreizbach	
Baden-Württemberg	Heilbronn	Bad Friedrichshall-Kochendorf, Heilbronn, Haigerloch-Stetten	
Nordrhein-Westfalen		Borth	

Im Rahmen der Führung des standortbezogenen Langzeitsicherheitsnachweises wird insbesondere dem geotechnischen Standsicherheitsnachweis hohe Bedeutung beigemessen. Entsprechend gewichtet ist die Herausforderung für die Planer von Schacht- und Streckenverschlüssen an die ingenieurtechnische Nachweisführung /BFS 07/. Ebenso wie in der Diskussion der Endlagerung radioaktiver Abfälle stellt sich für die Betreiber von UTD/UTV die Frage nach den zu betrachtenden Zeiträumen /ALW 12/ bzw. nach geologischen Analogiebezüge.

15.1.2 Forschungs- und Entwicklungsarbeiten mit Bezug zum Sicherheitsnachweis

Im Fokus der im Folgenden aufgelisteten nationalen/internationalen Forschungs- und Entwicklungsprojekte für ein Endlager für wärmeentwickelnde, radioaktive Abfälle stehen abgestimmte genehmigungsfähige Referenzkonzepte für einzurichtende Verschlussbauwerke mit akzeptierten Anforderungskriterien und plausibler Nachweisführung, in denen einflussnehmende FEP (Features, Events and Processes) berücksichtigt werden:

- ISIBEL I/II; Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW /BUH 08/

¹⁴ DepV, Anhang 2; zu § 3 Absatz 2, § 10 Absatz 1, § 11 Absatz 2; BGBl. I 2009, 920 - 924

- VerSi; Vergleich von Endlagersystemen /MOE 10/, /FIS 11/
- EUGENIA; Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für Endlager /BOL 11/
- VSG; Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben /FIS 13/, /HOE 12/
- DOPAS; Full Scale Demonstration of Plugs and Seals /CZA 12/, /GRU 12/, /IGD 12/, /IGD 13/
- WIPP-site; Salt Disposal of Heat-Generating Nuclear Waste /HAN 11/

In der jetzigen Konzeptionsphase für ein Endlager im Salinar sind Strecken- und Schachtverschlüsse als Mehrkomponentenbauwerke mit Widerlagern und Dichtelementen auszulegen:

- ELSA; Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle /BOL 12/, /KUD 12/, /FRE 12/
- LAVA; Langzeitverhalten von SOREL-Beton in Salzformationen /HER 12/
- LASA; Langzeitsicherer Schachtverschluss im Salinar /CZA 12a/
- VSG; Verschlusskonzept für Schacht- und Streckenverschlüsse /HOE 12/

Bereits in der Vergangenheit wurden mit direktem Bezug zu einem HAW-Endlager im Salinar in der Schachanlage Asse II Dammbauwerke sowie Verfüll- und Versatzstoffe verbaut und getestet. Diese grundlegenden Arbeiten zum Aufbau von Verschlüssen wurden im Rahmen der FuE-Arbeiten in den 1980er und 1990er Jahren durchgeführt. Allen voran das Verbundprojekt „Dammbau“, das 1992 eingestellt wurde.

Mit der ingenieurtechnischen Nach-Untersuchung des Asse-Vordammes und des Gebirges im Bereich des sogenannten Dammjoches wurden erste belastbare Messdaten für den Sicherheitsnachweis für solche Bauwerke bereitgestellt, die u. a. für das Planungskonzept für den Verschluss von Strecken und Rolllöchern in ERA Morsleben herangezogen werden und in den folgenden Arbeiten dokumentiert wurden.

- Dammbauwerk (Asse-Vordamm) /GLA 91/, /BFS 04b/
- Dammjoch /BFS 04a/

- TSS; Thermische Simulation der Streckenlagerung; BAMBUS; Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt /BEC 99/, /BEC 04/
- DEBORA; Development of Borehole Seals for HAW /ROT 99/

Für den Nachweis einer sicheren Flutung und damit sicheren Verwahrung von Kalibergwerken wurden Pilot-Versuche in den Kalisalzbergwerken Hope/Revier Nord-Hannover (Streckenverschluss, /HER 87/) und Salzdetfurth/Revier Süd-Hannover (Schachtverschluss, /BRE 02/) durchgeführt. Der Schachtverschluss in Salzdetfurth gilt heute als „Stand der Technik“ und als Nachweis für die sichere Verwahrung von Schächten nach dem BBergG.

Das Konzept einer geotechnischen Barriere aus Bentonit-Formsteinen wurde als Streckenverschlussbauwerk („Streckenverschluss Immenrode“) in der Verbindungsstrecke zwischen dem heutigen Versatzbergwerk und Untertagedeponie Glückauf-Sondershausen und dem ehemaligen Kalibergwerk Ludwigshall/Revier Südharz-Unstrut umgesetzt /ALA 99/. Weitere in-situ Projekte (CARLA, SVV2), in denen alternative Materialien (MgO-Beton bzw. MgSO₄-calciniert) auf ihre Langzeitdichtwirkung als Streckenverschluss hin getestet wurden, wurden im ehemaligen Kalisalzbergwerk (und heutigen Untertagedeponie) Teutschenthal/Revier Saale-Unstrut durchgeführt (/SIT 05/, /POP 10/, /HER 11/).

Generische FuE-Arbeiten betrachten die Einflussnahme von Konstruktionsmerkmalen auf die Langzeitdichtwirkung eines Verschlusssystems mit Äquipotenzialsegmenten /SCH 09/.

Im US-amerikanischen HAW-Endlager „Waste Isolation Pilot Plant“ (WIPP) wird aktuell die Konzeptplanung für Strecken- und Schachtverschlüsse mit Schwerpunkt auf der „Materialspezifikation“ fortgeschrieben /DOE 95/, /DOE 09/, /DOE 12/, /HAN 12/, /EYE 95/, /WIL 08/, /WIP 10/.

15.2 Natürliche Analoga und In-situ-Experimenten

Für Endlager – aber auch für UTD – werden Verschlussbauwerke für die Zugangsstrecken zwischen Schacht und Einlagerungsfeldern konzipiert und als signifikant für die

Langzeitsicherheit eines Endlagers betrachtet, insbesondere dort, wo Kalisalze vor dem Zutritt von wässrigen Lösungen nachhaltig zu schützen sind.

Auf Grund des zu erwartenden Setzungsverhaltens der eingesetzten Baumaterialien ist die Konstruktion von Streckenverschlüssen in der Regel technisch anspruchsvoller als von Schachtverschlüssen. Erfahrungswerte aus der Schachtanlage Asse II bzw. aus in-situ Experimenten belegen, dass nicht in jedem Fall der notwendige Formschluss mit dem Gebirge erreicht wird, um die gewünschte nachhaltige Dichtwirkung zu erzielen /WIE 04/. Fehlende Gebirgskonvergenz und/oder eine ausgeprägte Auflockerungszone erfordern hier zusätzliche technische Maßnahmen. In Sachen „Dichtwirkung“ sind die Erfahrungen beim Schachtverschluss hingegen positiv /BRE 02/.

Um den Nachweis der langfristigen Integrität der Verschlüsse bzw. der geotechnischen Barrieren zu führen, wird bei der Planung auf Erfahrungen zurückgegriffen, die beim Bau von Verschlussbauwerken in Kali- und Salzbergwerken und im Rahmen von FuE-Arbeiten gewonnen wurden /HOE 99/, /HOE 99a/.

Als Baustoffe für Verschlüsse werden schwerpunktmäßig Magnesiabinder (Sorelbeton), Salzbeton, Bentonit, Baustoffgruppen aus Salzmineralien, Steinsalz-Anhydrit-Baustoffe und Schotter in Betracht gezogen und als Verfüllmaterial Salzgrus. Die Verschlussmaterialien erfüllen dabei verschiedene Aufgaben:

- Bentonit: Dichtung, Plastische Verformung, Quellung
- Sand-Kies-Schotter: Stabilität, Filterwirkung
- Salzbeton: Stabilität, Dichtung, Elastische Verformung
- Sorelbeton: Stabilität, Dichtung, Elastische Verformung
- Salzgrus: Dichtung, Plastische Verformung
- Asphalt/Bitumen: Dichtung, Plastische Verformung

Das Korrosionsverhalten der eingesetzten Baumaterialien kann jedoch z. Z. nicht durch belastbare in-situ Daten aus Langzeituntersuchungen belegt werden.

15.2.1 Streckenverschlüsse

Die heutige Konzeption von Dicht-, Verschlussbauwerken und geotechnischen Barrieren baut weitestgehend auf den nationalen Erfahrungen auf, die im Rahmen der letzten 150 Jahre im Salzbergbau gesammelt wurden.

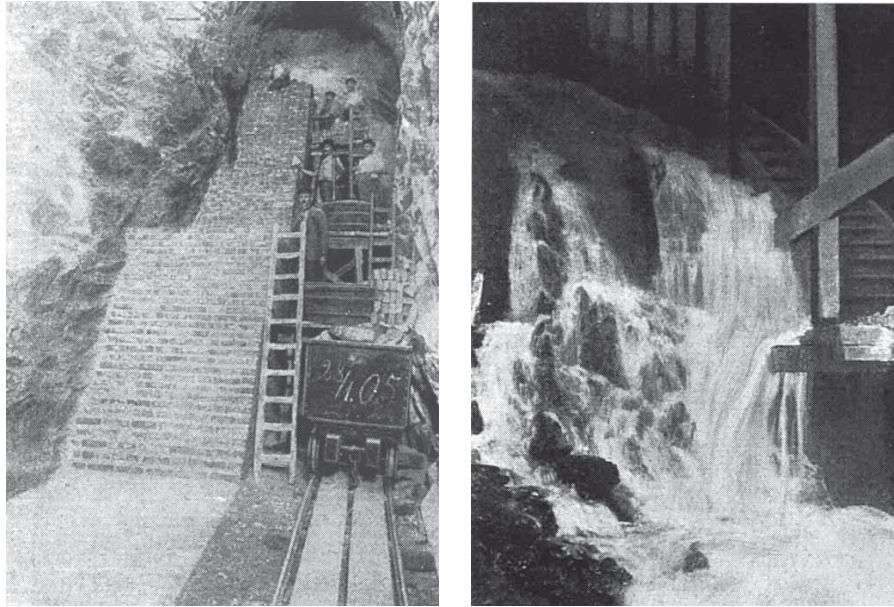


Abb. 15.1 Ziegelmauer zur Abschirmung von Laugenzuflüssen (1903) durch den klüftigen Anhydrit im Feld Agathe/Staßfurt (links); Laugendurchbruch vom Feld Achenbach in das Feld Agathe (rechts) /DEI 11/

Wiederholt aufgetretene Wasserzuflüsse beim Schachtabteufen und während des Abbaubetriebes haben vom Betreiber schadensbegrenzende Maßnahmen gefordert. Bereits vor 100 Jahren wurden Dammbauwerke im Kalibergbau konzipiert, um einzelne Abbaufelder vor dem Absaufen zu bewahren /EMO 98/, /EMO 01/. Die nachträglich durchgeführten technischen Maßnahmen waren jedoch nur in Ausnahmefällen nachhaltig (siehe Abb. 15.1).

Die in der Vergangenheit im Salzbergbau unter bergbaulichen Aspekten konzipierten Dämme und Verschlüsse wurden im Hinblick auf den Verschluss von Endlagern in verschiedenen technisch-wissenschaftlichen Arbeiten unter den Gesichtspunkten ihrer Funktionsfähigkeit, ihrer Wirkungsweise und ihrer Relevanz aufgearbeitet /XIE 02/, /FLI 03/. Im Projekt ELSA werden zu diesem Thema die FuE-Arbeiten zusammengeführt /HOE 12/, /CZA 12/, /BOL 12/, /KUD 12/, /FRE 12/, /GRU 12/. Ein wesentlicher Schwerpunkt dieser Arbeiten ist die Beurteilung der Langzeitstabilität der einzelnen Komponenten der Verschlussysteme.

Wie ein solcher Streckenschluss aussehen könnte, wurde in der Konzeptstudie für Asse-Verschlüsse und Morsleben mit Verweis auf einen „langzeitfunktionstüchtigen Streckenschluss aus kompaktiertem Bentonit“ (Abb. 15.2) im Bergwerk Sondershausen (s. o.) aufgezeigt /WIE 04/, /BFS 04b/, /RAU 09/.

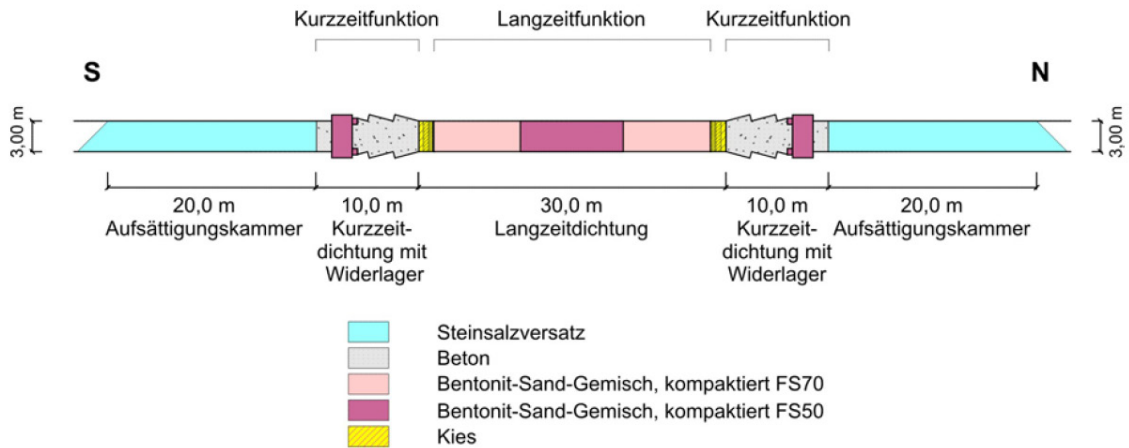


Abb. 15.2 Konzept des Streckenschlusses Immenrode (Dammbauwerk) (aus /RAU 09/, nach /ALA 99/)

Nach Beendigung der Einlagerung 1978 wurden die Abbaukammern (Abb. 15.3) in der Schachanlage Asse II mit Kurzzeitdichtungen verschlossen /GLA 91/. Das Konzept einer Langzeitdichtung wurde in der Schachanlage Asse II im Rahmen des Dammbauprojektes im Ansatz umgesetzt. Der Nachweis der Dichtwirkung des Gesamtbauwerkes konnte nicht geführt werden /STM 94/, /ZHA 93/.

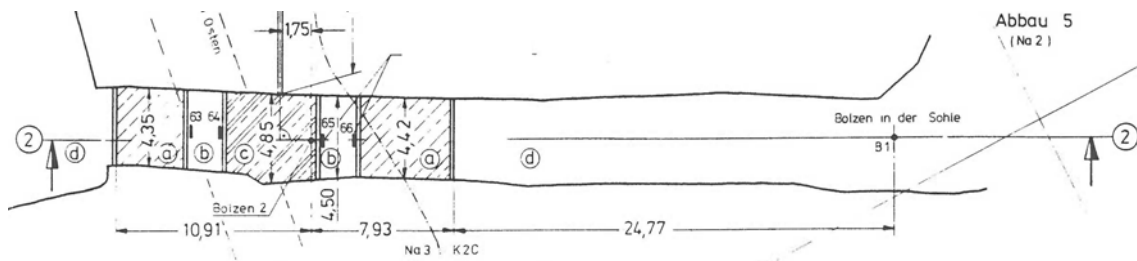


Abb. 15.3 Schachanlage Asse II: Kammerverschluss zwischen den Abbauen 5 und 7 auf der 750 m-Sohle; verwendete Materialien: Salzgrus (a, c) sowie Bitumen (b) und Salzgrus (d) /GLA 91/

Das ein Dammbauwerk mittelfristig seine Funktion beibehält, verdeutlicht das nachstehend von Thyssen-Schachtbau beschriebene Beispiel eines funktionsfähigen Dammes in Rocanville/Kanada /THY 12/.

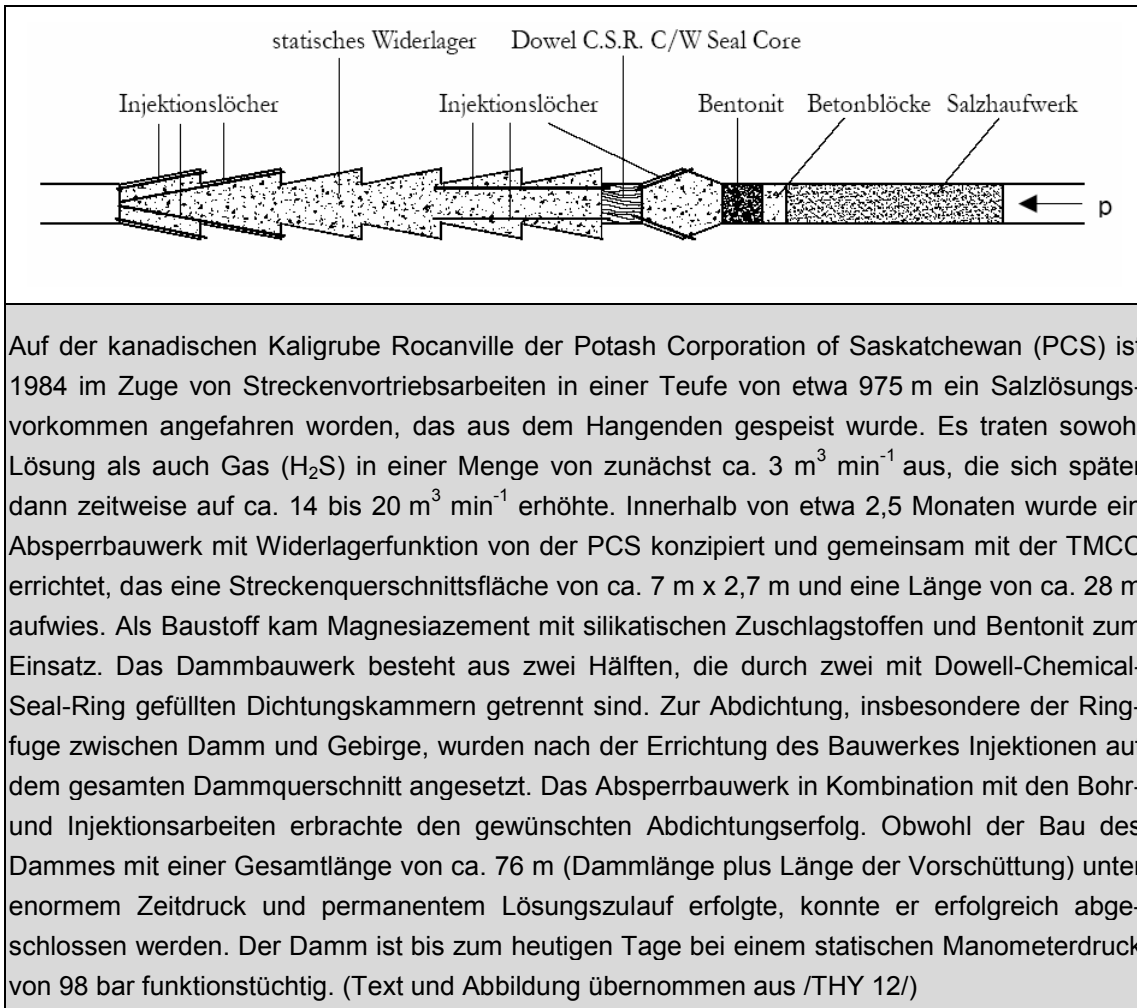


Abb. 15.4 Beispiel eines funktionsfähigen Dammes in Rocanville/Kanada /THY 12/

Erfolgversprechende kurzfristige Sicherungsmaßnahmen nach Wassereinbruch sind für das polnische Salzbergwerk Wieliczka (Abb. 15.5) dokumentiert /GON 12/.

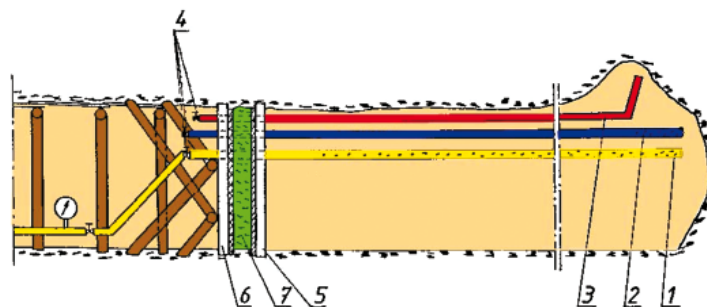


Abb. 15.5 Kurzzeitdichtung im Salzbergwerk Wieliczka (1, 2, 3, 4 = Rohrleitungen; 5, 7 = Mauern, Nr. 6 stellt das eigentliche Dichtungselement dar) /GON 12/

Tab. 15.2 Beispiele für die Errichtung wirksamer Verschlüsse nach unkontrollierbarem Laugenzufluss (aus /HOE 99/); die Konzeption der aufgeführten Dammbauwerke ist Grundlage für heutige Designplanungen

Damm- bauwerk	Leopoldshall I/II – L.III	Leopoldshall III – L.IV	Bismarckshall	Sachsen-Weimar
Fertigstellung	1903	1922	1916/1923	1929
Umgebungs- gestein	Steinsalz	Steinsalz	Steinsalz	Steinsalz
Teufe	300 m	300 m	582 m	715 m
Zufluss	Tageslauge	Keine Angaben	Tageslauge, NaCl-Lauge mit H ₂ S	Tageslauge, NaCl-Lauge
Laugendruck	3,3 MPa	3,0 MPa	4,3 MPa	7,5 MPa
Bauart	Verzahnt	4 Damnteile (3 parallel, 1 mit Widerlagern), zu- sätzlich Schutz- damm, Wasser- kammern	Parallel, meh- rere Damnteile, mit Zwischenräumen für Verpres- sung	Verzahnt/ kegelstumpf- förmig
Baustoff	Portlandzement und Magnesia- mauerwerk/Asphalt	Portlandzement und Magnesia- mauerwerk/ Ton- mehl in Fugen	Zement und Magnesiamau- erwerk	Hochofen- zement und Mauerwerk/ Ton gestampft
Länge	161,5 m	77 m	80 m	22 m
Querschnitt	10 m ²	10 m ²	10 m ²	10 m ²
Aufsätti- gungsstrecke	Ja, Carnallit	Ja, Carnallit	Keine Angaben	Nein
Nachdichten in Baukörper/ Kontaktfuge	Nein	Im 4. Dammbau- teil mit Zement- milch	Zementleim	Zementsus- pen-sion, spä- ter Wasserglas (15 MPa)
Zeitraum	20 Jahre	25 Jahre	> 1992	> 1992

Die historischen Beispiele legen den Schluss nahe, dass unabhängig von der Wahl der Materialien und/oder der Einzelkomponenten die Länge des Gesamtverschlusses ausschlaggebend für die integrale Dichtwirkung ist (siehe Abb. 15.6). Während „kurze“ Verschlüsse meist kurz nach Einbau undicht wurden, behielten „lange“ Verschlüsse auch während der folgenden Betriebsphasen ihre Funktionswirkung bei.

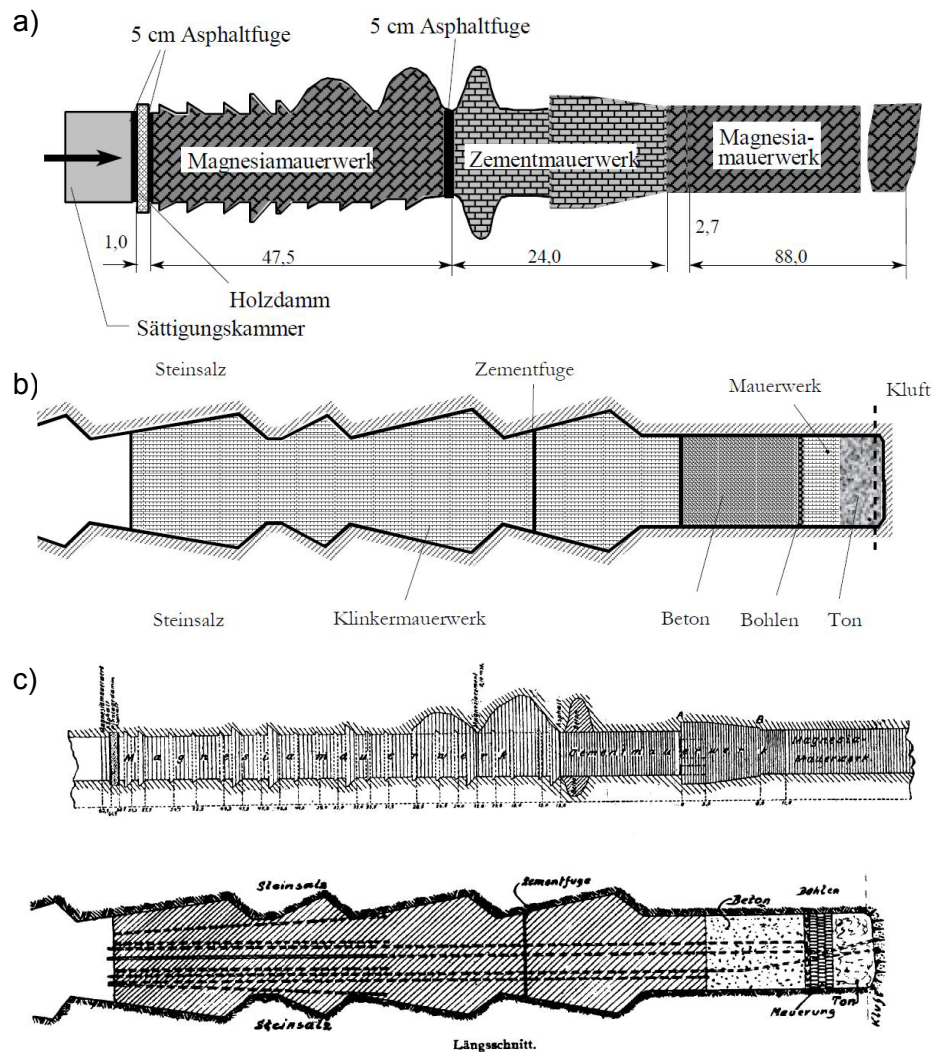


Abb. 15.6 Aufbau und Konstruktionsmerkmale von Streckenverschlüssen bzw. Dammbauwerken: a) Leopoldshall 1898, b) Sachsen-Weimar (beide aus /FLI 03/), c) Glückauf 1902, d) Hattorf 1929 (beide aus /HOE 99a/)

Allen dokumentierten Streckenverschlüssen gemein ist der „Sandwich-Aufbau“. Entsprechend dem Lastfall – eingetretener oder erwarteter Wasserzufluss – wurden mechanisch stabile und hydraulisch dichte Komponenten kombiniert. Die „Verzahnung“ des Verschlusses mit dem Gebirge sollte deren Widerlagerfunktion gegenüber hohem Laugendruck gewährleisten. Durch Nach-Injektionen in den Streckenstößen wurde die Anbindung der Verschlüsse an das Gebirge erhöht und Umläufigkeiten im Konturbereich verringert. Zwischengeschaltete Asphalt- bzw. Bitumensegmente bildeten die hydraulische Dichtung.

15.2.2 Schachtverschlüsse

Die technische Realisierbarkeit von langzeitsicheren Schachtverschlüssen nach Bergrecht ist anhand eines Prototyps nachgewiesen (Abb. 15.7) /BRE 02/, der derzeit im Rahmen von Verwahrungsmaßnahmen für stillzulegende Gewinnungsbergwerke zur Anwendung kommt. Ob das zugrunde gelegte Konzept auf einen Schachtverschluss für ein Endlager für radioaktive Abfälle übertragbar oder sogar direkt anwendbar ist, ist Gegenstand aktueller FuE-Arbeiten (vgl. Projekt ELSA). Bei allen Untertagedeponien behält sich dennoch die zuständige Bergbehörde vor, im Rahmen des Abschlussbetriebsplans die Ausführung der Schachtverschlüsse nach dem zu diesem Zeitpunkt erreichten verbesserten Stand der Technik zu fordern /HER 11a/.

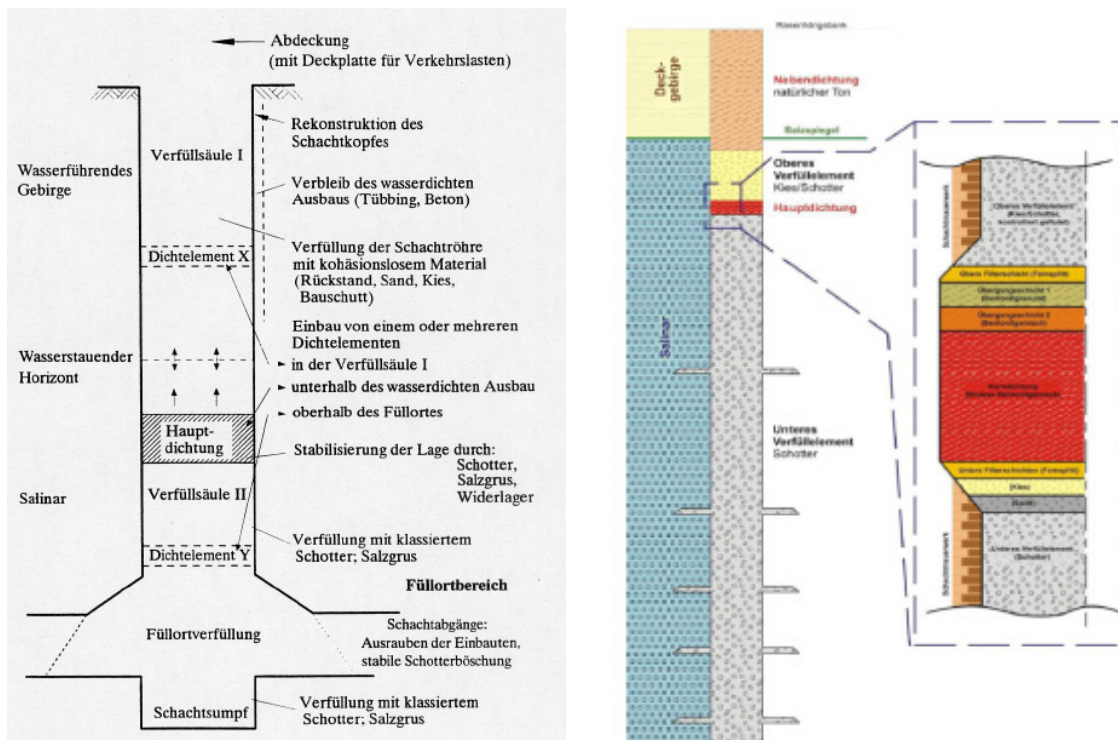


Abb. 15.7 Elemente eines langzeitsicheren Schachtverschlusses (links) sowie Grundkonzept für den Prototyp eines nach Bergrecht genehmigungsfähigen Schachtverschlusses (rechts) /WIL 08/

Der o. g. Prototyp beruht auf dem Verschluss eines Schachtes des ehemaligen Salzbergwerkes in Salzdetfurth. Untersucht wurde die Eignung von Calcium-Bentonit als Verschlussmaterial für die Hauptdichtung im Maßstab 1:1. Mit dem ingenieurtechnischen Nachweis existiert ein Stand von Wissenschaft und Technik für die Genehmigung dieses für die Langzeitsicherheit wichtigen Verschlussystems.

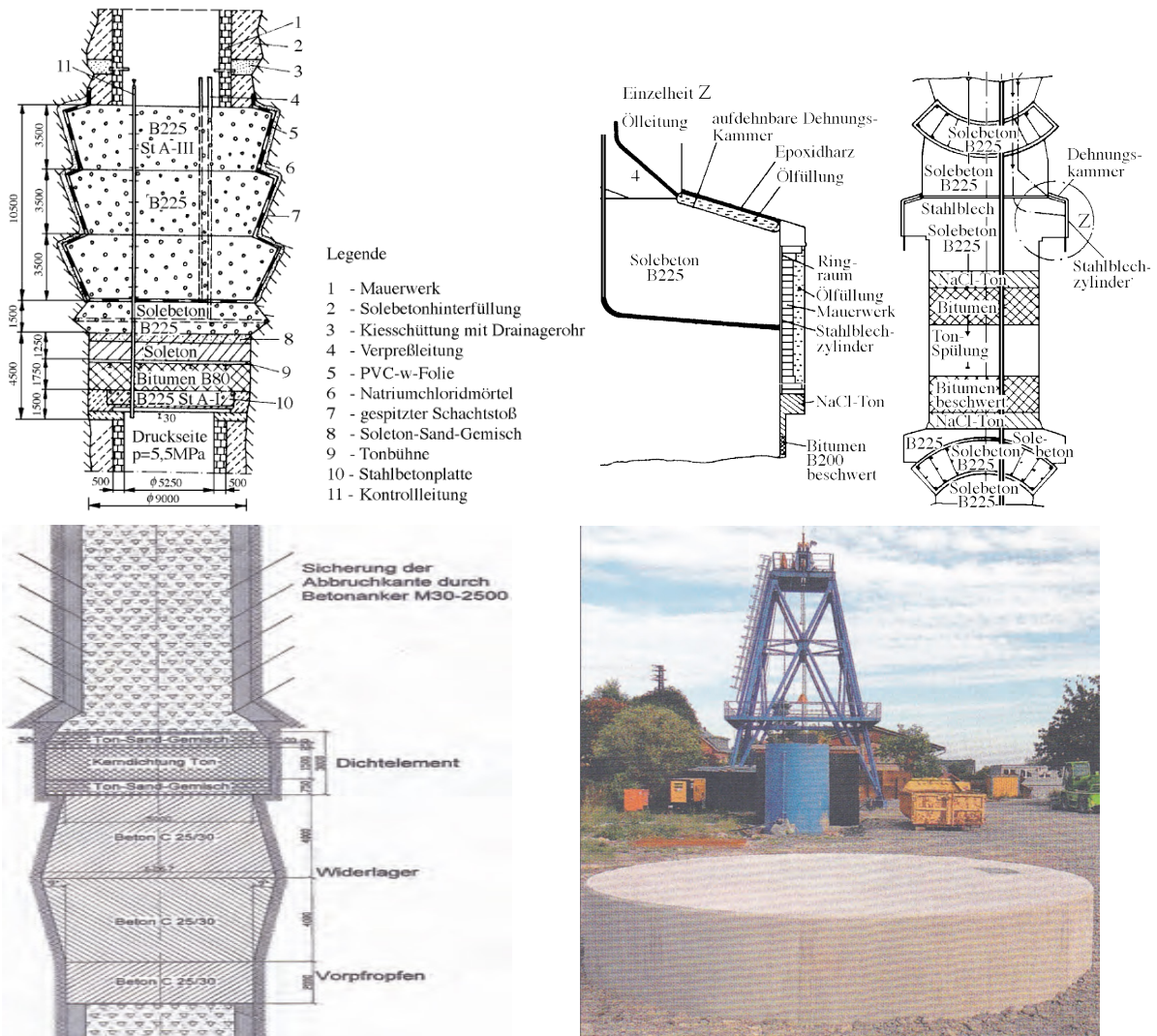


Abb. 15.8 Aufbau und Konstruktionsmerkmale von ausgewählten Schachtverschlüssen: Schachtverschlussbauwerk Bernterode (oben links), Burggraf Berndorf (oben rechts) /SIT 82/, Dichtungs-, Widerlagerkonstruktion „Beberstedt“ (unten links), Abschlusskonstruktion Schacht „Hüpstedt“ und Schachtgerüst „Beberstedt“ (unten rechts) /WTE 12/

Nach 1989 wurden vor allem im ostdeutschen Kalirevier in den abgeworfenen zu verwahrenden Schachtanlagen zahlreiche Schächte total bzw. teilverfüllt /BOD 02/:

- Rossleben (Georg, Unstrut, Rossleben I+II)
- Volkenroda (Pöthen I+II, Volkenroda)
- Sondershausen (Glückauf II, III, IV+VI)
- Bleicherode (Hain I+II, Kleinbodungen II, Kraja I)
- Sollstedt (Lohra, Gebra, Kraja II)

Bei der Planung der Verwahrung der Schächte flossen insbesondere die Erfahrungen mit ein, die im ostdeutschen Kalibergbau gesammelt wurden /BOD 05/.

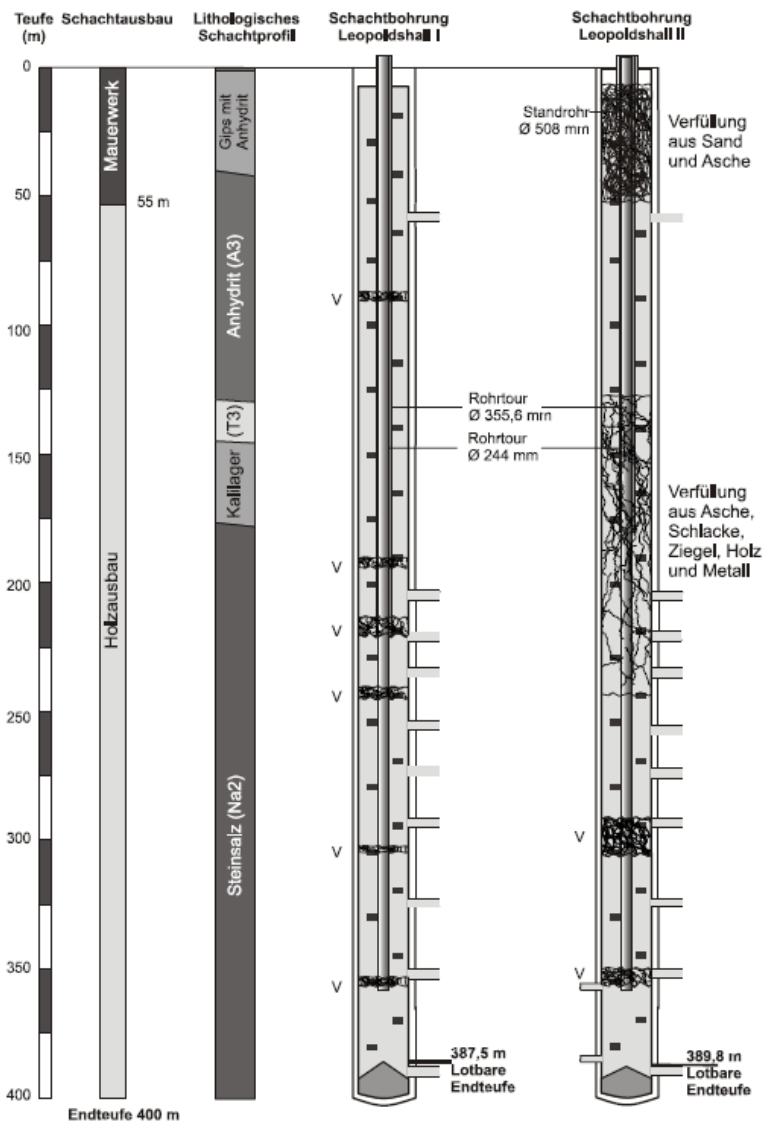


Abb. 15.9 Verschlüsse in den ehemaligen Kalischächten Leopoldshall I und II /JOC 07/

15.3 Bewertung

Die in den vergangenen ca. 150 Jahren konstruierten Schacht- und Streckenverschlüsse wurden unter bergbaulichen Gesichtspunkten geplant und ausgeführt, meist unter dem Aspekt der unmittelbaren Gefahrenabwehr. Als Nachweis für die langfristige Eignung als qualifizierte Verschlüsse sind die existierenden Bauwerke nur bedingt heranzuziehen, auch deshalb, weil keine Daten über ihre dynamische langfristige Entwick-

lung im Gebirgsverband existieren. Standortgebunden sind ebenfalls die spezifischen auf das Gebirge abgestimmten Konstruktions- und Funktionsmerkmale. Eine Übertragung dieser Merkmale auf andere Standorte und Bedingungen ist daher eher phänomenologisch zu sehen und nur mit Einschränkungen für die Ableitung eines Nachweiskonzeptes für lange Zeiträume (> 10.000 Jahre) geeignet.

Die mittelfristige (10 – 100 Jahre) Sicherung der Tagesoberfläche durch Schachtverschlüsse und der Schutz von Grubengebäuden durch Versatzmaßnahmen ist Stand von Wissenschaft und Technik. Ausreichende Erfahrungen gibt es hinsichtlich adäquater Materialien, die die Anforderungen an eine geforderte Dicht- und/oder Stützwirkung erfüllen, so dass akute Georisiken wie z. B. Erdfälle und/oder Bergschlägen ausschließlich von nicht sachgerecht verfüllten Schächten und Grubengebäuden ausgehen können.

15.3.1 Grenzen der Anwendbarkeit/Zeitskala/Ungewissheiten

Die dokumentierten Schacht- und Streckenverschlüsse sind standortgebunden, können aber bei Anpassung ihrer Konzeption auf vergleichbare Verhältnisse als übertragbar angesehen werden.

Schwer prognostizierbar ist der Einfluss langsam ablaufender Prozesse (z. B. Korrosion von Verschlussmaterialien), die langfristig die technischen Eigenschaften der Bauwerke beeinträchtigen können. Eine Übertragbarkeit des heutigen Standes von Wissenschaft und Technik auf sehr lange Zeiträume (bis 100.000 Jahre) hat ihre Grenzen. Bei der Einschätzung, ob die erforderliche Wirkung der eingesetzten technischen Materialien langfristig anhält, können gegebenenfalls weitere Natürliche Analoga eingesetzt werden.

15.3.2 Verwendungsmöglichkeit im Sicherheitsnachweis

Gemäß Sicherheitsanforderungen sind beim Nachweis der Integrität bzw. des Einschlusses die technisch unvermeidbaren Barrierenperforationen und die Verfüllung des Endlagers zu berücksichtigen. Es ist zu zeigen, dass die von der geologischen Barriere geforderte Integrität und der von ihr zu gewährleistende Einschluss auch bei Berücksichtigung der technischen Abdichtungs- und Verschlussbauwerke sowie Verfüllung erhalten bleiben. Zum Nachweis sind unter anderem die für die Funktionstüchtigkeit

der technischen Verschlussbauwerke maßgeblichen Beanspruchungszustände und Eigenschaften der Baustoffe zu untersuchen. Die hinreichende Belastbarkeit und Alterungsbeständigkeit dieser Baustoffe ist für den Zeitraum nachzuweisen, für den die Funktionstüchtigkeit der Bauwerke gegeben sein muss /BMU 10/.

Die in der Vergangenheit im Salzbergbau unter bergbaulichen Aspekten konzipierten Verschlussbauwerke bieten ein breites Spektrum an Erfahrungen im Hinblick auf den Verschluss von Endlagern, z. B. unter den Gesichtspunkten ihrer Funktionsfähigkeit, ihrer Wirkungsweise und ihrer Relevanz. Für den Sicherheitsnachweis sind dabei auch die negativen Erfahrungen mit Verschlussbauwerken im Salzbergbau von Interesse. Aus der Aufarbeitung der Ursachen bzw. der Lastfälle (*inverse approach*), die den Einsatz derartiger Bauwerke erforderlich machen, können belastbare Ausschlusskriterien für ihren Einsatz abgeleitet werden.

15.3.3 Bewertung der Möglichkeit der Kommunikation

Der große Erfahrungsschatz aus dem Salzbergbau vor allem in Deutschland bietet die Möglichkeit, die daraus abgeleiteten technischen Analogie mit einem hohen Maß an Vertrauen zu kommunizieren. Die im Bergbau verwendeten Konzepte sind vergleichsweise einfach aufgebaut und mit Hilfe von Abbildungen einfach zu vermitteln.

15.4 Offene Fragen

Offene Fragen bei der Erstellung technischer Verschlussbauwerke sind nach wie vor die Belastbarkeit und der Nachweis der Wirksamkeit der Verschlussysteme im Gebirgsverband über sehr lange Zeiträume. Die als mögliche Analogie vorliegenden bergbautauglichen Konzeptionen beruhen auf semi-quantitativen Erfahrungswerten aus ca. 150 Jahren Salzbergbau; Messdaten bzw. -reihen, z. B. über die Langzeitdichtwirkung, sind nur für kurze Zeiträume verfügbar. Eine Validierung der aus in-situ Tests (z. B. Hope, Salzdörfurth) abgeleiteten Nachweisführung ist nur eingeschränkt durchgeführt worden.

15.5 Literatur zu Kapitel 15

- /ALA 99/ Aland, H.-J.; Handke, N.; Leuschner, J.; Bodenstein, J.; Maelzer, K.; Sitz, P.; Gruner, M.; Springer, H.: Langzeitfunktionstüchtiger Streckenverschluss aus kompaktiertem Bentonit im Bergwerk Sondershausen. - in: Glückauf 135 (3), S. 134-139 + Kali und Steinsalz, 12 (9), S. 24-29 + Geotechnik 22 (1), S. 56-62, 1999.
- /ALW 12/ Alwast, H.; Riemann, A.; Schulte, J.: Bewertung der mittel- bis langfristigen Perspektiven von UTV und UTD in Deutschland für die Entsorgung von Abgasreinigungsrückständen. - Endbericht für den Verband der Kali- und Salzindustrie e.V. (VKS) sowie Verband Bergbau , Geologie und Umwelt e.V. (VBGU). Prognos, Berlin, 2012.
- /BEC 04/ Bechthold, W.; Smailos, E.; Heusermann, S.; Bollingerfehr, W.; Bazargan Sabet, B.; Rothfuchs, T.; Kamlot, P., Grupa, J.; Olivella, S.; Hansen, F.D.: Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS-II Project). - European Commission, EUR 20621, Brussels, 2004.
- /BEC 99/ Bechthold, W.; Rothfuchs, T.; Huertas, F.; Poley, A.; Ghoreychi, M.; Heusermann, S.; Gens, A.: Backfilling and Sealing of Underground Repositories in Salt – The BAMBUS Project, Euradwaste '99, 5th EC Conf. on Radioactive Waste Management and Disposal and Decommissioning, 15-18 November, Luxembourg, 1999.
- /BERG 09/ BBergG – Bundesberggesetz. - vom 13. August 1980, (BGBl. I S. 1310) nebst Durchführungsbestimmungen des Bundes und der Länder, (GBl. I Nr. 53 S. 1071). Zuletzt geändert durch Art. 15a G v. 31.7.2009 (BGBl. I S. 2585).
- /BFS 04a/ Bundesamt für Strahlenschutz BfS: Konzept und Systembeschreibung. Schachtverschlussystem der Schächte Bartensleben und Marie. - Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben. Verfahrensunterlage G183, Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, 2004.

- /BFS 04b/ Rauche, H.; Sitz, P.; Lukas, V.; Rumphorst, K.; Lippmann, G.; Wagner, K.; Bodenstein, J.; Teichert, T.: Konzeptplanung der Schachtverschlüsse Bartensleben und Marie des ERA Morsleben. Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben. - Verfahrensunterlage P182, Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, 2004.
- /BFS 07/ Brennecke, P.; Eilers, G.; Köster, R.; Kugel, K.; Laske, D.; Möller, K.; Preuss, J.; Ranft, M.; Regenauer, U.; Schubarth-Engelschall, N.; Schulze, Ch.; Stier-Friedland, G.; Thiel, J.; Weiser, A.; Wollrath, J.; Ziegler, H.-J.; Gerler, J.: Prüfung von Unterlagen zur Schließung der Schachtanlage Asse II im Hinblick auf die Anforderungen eines atomrechtlichen Planfeststellungsverfahrens. - Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, 2007.
- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, Stand 30. September 2010. - Abrufbar unter: http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/sicherheitsanforderungen_endlagerung_bf.pdf (22.07.2010)
- /BOD 02/ Bodenstein, J.; Leuschner, J.; Seifert, M.: 10-Jahre Schachtverwahrung im Südharzrevier. Erfahrungen aus Sicht von Planung und Ausführung. - Glückauf 138, Nr. 4, S. 137-147, Essen, 2002.
- /BOD 05/ Bodenstein, J.; Salzer, S.; Sitz, P.; Rauche, H.; Vetter, D.: Vergleichende Bewertung von Verwahrungsalternativen für Altalkalischächte. - 5. Altbergbau-Kolloquium, Clausthal-Zellerfeld, 2005.
- /BOL 11/ Bollingerfehr, W.; Herklotz, M.; Herzog, C.; Jobmann, M.; Lommerzheim, A.; Weiß, E.; Wolf, J.; Ziegenhagen, J.; Hammer, J.; Sönke, J.; Mingerzahn, G.: Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für Endlager in tiefen geologischen Formationen in unterschiedlichen Wirtsgesteinen (EUGENIA). - DBE-BGR Synthesebericht, FKZ 02 E 10346, DBE Technology, Peine, 2011.
- /BOL 12/ Bollingerfehr, W.; Jobmann, M.; Herold, P.: Anforderungen an Schachtverschlüsse für HAW-Endlager.- Handouts, ELSA, Workshop 19.09.2012, DBE TECHNOLOGY, Peine, 2012.

- /BRA 08/ Brassler, T.; Bletz, U.; Schmidt, G.; Noseck, U.: Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland, Anhang Natürliche Analoga. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-247, Köln, 2008.
- /BRE 02/ Breidung, K.-P.: Verwahrung von Kali- und Steinsalzbergwerken einschließlich langzeitsicherer Schachtabdichtungen. - Kali und Steinsalz, H. 02/2002, S. 28-39, Kassel, 2002.
- /BUH 08/ Buhmann, D.; Eberth, S.; Keller, S.; Kreienmeyer, M.; Krone, J.; Mönig, J.; Tholen, M.; Weber, J.R.; Wolf, J.: Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW (ISIBEL). FEP-Katalog für einen HAW-Standort im Wirtsgestein Salz. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-237, Köln, 2008.
- /CZA 12/ Czaikowski, O., Rothfuchs, T.: EU-Projekt DOPAS (Full Scale Demonstration of Plugs and Seals). Deutsche Beiträge und ihre Verknüpfung mit dem Projekt ELSA. - Handouts, ELSA Workshop 19.09.2012, DBE Technology, Peine, 2012.
- /CZA 12a/ Czaikowski, O.: Langzeitsicherer Schachtverschluss im Salinar – Kurztitel: LASA. - in: PTE Nr. 44, BMWi geförderte FuE zu „Endlagerung radioaktiver Abfälle“, Berichtszeitraum: 1. Juli - 31. Dezember 2012, S.148, Projektträger Karlsruhe Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE). - Abrufbar unter http://www.ptka.kit.edu/downloads/ptka-wte-e/PTE_FB44.pdf (10.05.2013)
- /DEI 11/ Deisenroth, N.: 150 Jahre Kalibergbau in Deutschland. Vor 150 Jahren startete die erste Kaliförderung weltweit in Stassfurt. - Gezähkiste, Heft 8, 02/2011, S.14-21, Heringen, 2011.
- /DEP 09/ Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV), Deponieverordnung vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900) http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/depv_2009/gesamt.pdf <http://www.bgbl.de>, www.bmu.de

- /DOE 09/ WIPP: Shaft sealing system – Material specification. - Compliance submittal design report, Appendix I2A, Waste Isolation Pilot Plant, Hazardous Waste Facility Permit, Renewal Application, September 2009.
http://www.wipp.energy.gov/library/rcrappermit/WIPP_Final_HWFP_Renewal_Application_9_09/43-I2A-092509.pdf (24.11.2014)
- /DOE 12/ Camphouse, C.; Gross, M.; Herrik, C.G.; Kicker, D.; Thompson, B.: Recommendations and justifications of parameter values for the run-of-mine salt. - Panel closure system design modeled in the PCS-2012 PA. Sandia National Laboratories, Carlsbad, New Mexico, 2012.
- /DOE 95/ WIPP: Waste Isolation Pilot Plant Sealing System Design Report. - DOE / WIPP-95-3117, Department of Energy, Springfield, 1995.
- /EMO 01/ Emons, H.-H.: Die Kaliindustrie - Geschichte eines deutschen Wirtschaftszweiges ? - Überarbeiteter Vortrag vom 19. April 2001, Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, Bd. 49, Heft 6., S.5-74, Berlin, 2001.
- /EMO 98/ Emons, H.-H.: Chemische Aspekte im Umfeld der Kali- und Steinsalzgewinnung. - Überarbeiteter Vortrag vom 19. Sep. 1996, Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, Bd. 26, S. 35-62, Berlin, 1998.
- /EYE 95/ Eyermann, T.J.; van Sambeek, L.L.; Hansen, F.D.: Case Studies of Sealing Methods and Materials Used in the Salt and Potash Mining Industries.- Sandia Report SAND951120, 1995.
- /FIS 11/ Fischer-Apelt, K.: Abwägungsmethodik für den Vergleich von Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen. Bewertung der charakteristischen Parameter der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen der Schachtverschlüsse (im Fall Gorleben zusätzlich: Streckenabdichtungen zum Infrastrukturbereich). - Begleitbericht zum Vorhaben 3607R02589 VerSi „Evaluierung der Vorgehensweise“, 58 S., Köln, 2011.
- /FIS 13/ Fischer-Apelt, K.; Baltés, B.; Buhmann, D.; Larue, J.; Mönig, J.: Synthesenbericht für die VSG. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-290, 424 pp., Köln, 2013.

- /FLI 03/ Fliß, Th.: Entwicklung eines Algorithmus zum Entwurf und zur Abschätzung der mehr-axialen Beanspruchungen von Mauerwerksverbänden unter Berücksichtigung der Langzeitstabilität, sowie Bestimmung der Verbandparameter. - Dissertation, TU-Freiberg, 2003.
- /FRE 12/ Freyer, D.: Geochemische Randbedingungen bei Schachtverschlüssen für HAW-Endlager. Rahmenbedingungen für die Konzeption von Schachtverschlüssen für Endlager für hochradioaktive Abfälle. - Handouts, ELSA - Workshop 19.09.2012, DBE Technology, Peine, 2012.
- /GLA 91/ Gläß, F.; Kappei, G.; Schmidt, M.W.; Schwieger, K.; Starke, C.; Taubert, E.; Wallmüller, R.; Walter, F.: Untersuchungen zum Versatz und Verschluss von Kammern und Strecken in einem Endlager im Salz. - GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GSF 19/91, Neuherberg, 1991.
- /GON 12/ Gonet, A.; Stryczek, S.; Brudnik, K.: New reconstruction technologies of safety pillar in mines. - Arch. Min. Sci., Vol. 57 (2012), No 2, p. 403-412.
- /GRU 11/ Grundfelt, B.; Smellie, J.: Prozessorientierte Auswertung von natürlichen und anthropogenen Analoga und ihre Bewertung als vertrauensbildendes Element bei Sicherheitsbewertungen für Anlagen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle. - Abschlussbericht, Kemakta Consult AB / Conterra AB, 2004-07-09, Stockholm 2011. Auftragsbericht des Bundesamtes für Strahlenschutz, Salzgitter (Bericht eingeschränkt zitierfähig)
- /GRU 12/ Gruner, M.: Stand der Wissenschaft und Technik zu Schachtverschlüssen für HAW-Endlager. - Handouts, ELSA - Workshop 19.09.2012, DBE Technology, Peine, 2012.
- /HAN 11/ Hansen, F.D.; Leigh, C.: Salt Disposal of Heat-Generating Nuclear Waste. - Sandia National Laboratories, Sandia Report SAND2011-0161, Albuquerque, 2011.
- /HAN 12/ Hansen, F.D.: Underground Salt Research Laboratory at the Waste Isolation Pilot Plant. - Sandia National Laboratories, Carlsbad (New Mexico), 2012.

- /HER 11/ Herbert, H.-J.; Hertes, U.; Meyer, L.; Hellwald, K.; Dittrich, J.: SVV2 - Qualifizierung von Strömungsbarrieren in Salzformationen. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), GRS-263, 123 S., Köln, 2011.
- /HER 11a/ Herold, P.: „Auswertung der Bauausführung bisheriger Asphalt und Bitumendichtungen in Schachtverschlüssen im Salinar und Schlussfolgerungen für zukünftige Dichtsysteme auf Basis von Asphalt und Bitumen“. - Diplomarbeit, TU-Freiberg, 2011.
- /HER 12/ Herbert, H.-J.: Entwicklung chemisch-hydraulischer Modelle für die Prognose des Langzeitverhaltens von Sorelbeton in Salzformationen – Kurztitel: LAVA. - in: PTE Nr. 44, BMWi geförderte FuE zu „Endlagerung radioaktiver Abfälle“, Berichtszeitraum: 1. Juli - 31. Dezember 2012, S.146, Projektträger Karlsruhe Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE).
http://www.ptka.kit.edu/downloads/ptka-wte-e/PTE_FB44.pdf (24.11.2014)
- /HER 87/ Herbert, H.-J.; Sander, W.: Die Flutung des Kalibergwerkes Hope - Ergebnisse des geochemischen Meßprogramms. - Kali und Steinsalz, 9, H. 10, S. 326-333, Kassel, 1987.
- /HOE 12/ Müller-Hoeppe, N.; Engelhardt, H.-J.; Lerch, C.; Linkamp, M.; Buhmann, D.; Czaikowski, O.; Herbert, H.-J.; Wiczorek, K.; Xie, M.: Funktionsnachweis für Schachtverschlüsse für HAW-Endlager am Beispiel VSG. - Handouts, ELSA - Workshop 19.09.2012, DBE Technology, Peine, 2012.
- /HOE 99/ Müller-Hoeppe, N.; Pöhler, M.: Ein neuer Ansatz zur Bewertung der Wirksamkeit von Barrieren im Endlager - Dokumentierte Erfahrung hinsichtlich dichter Dammbauwerke im Salinar. - Abschlussbericht zu FKZ, 02 E 9087, Hauptband, DBE, Peine, 1999.
- /HOE 99a/ Müller-Hoeppe, N., Pöhler, M.: Ein neuer Ansatz zur Bewertung der Wirksamkeit von Barrieren im Endlager. Dokumentierte Erfahrung hinsichtlich dichter Dammbauwerke im Salinar. - Abschlussbericht zu FKZ, 02 E 9087, Technischer Anhang 2, DBE, Peine, 1999.

- /IGD 12/ Homepage IGD-TP: Deployment Plan 2011–2016. IGD-TP, Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste Technology Platform, June 2012. <http://www.igdtp.eu/index.php/european-projects/dopas> (24.11.2014).
- /IGD 13/ Homepage IGD-TP: DOPAS - Full Scale Demonstration of Plugs and Seals. IGD-TP, Implementing Geological Disposal - Technology Platform <http://www.igdtp.eu/index.php/european-projects/dopas> (24.11.2014).
- /JOC 07/ Jockel, A.; Jost, G.; Martin, J.; Rauche, H.; Triller, Th.: Erkundung von verfüllten Alt-Kalischächten mittels Schachtbohrungen. - 7. Altbergbau-Kolloquium, S.92-100, Freiberg, 2007.
- /KEL 07/ Keller, S.: Langzeitsicherheitsanalyse für ein HAW-Endlager im Salz - Geologisches Referenzmodell für einen HAW-Endlagerstandort im Salz - Technischer Bericht, Beitrag für das Projekt ISIBEL, BGR, 2007.
- /KUD 12/ Kudla, W.: Das Forschungsvorhaben "Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle" (ELSA) Teil 1. - Handouts, ELSA - Workshop 19.09.2012, DBE Technology, Peine, 2012.
- /LBA 08/ Kießling, H.: Leitfaden für das Verwahrung von Tagesschächten in Thüringen. – Thüringer Landesbergamt, Gera, 2008.
http://www.tlba.de/docs/Leitfaden_Schachtverwahrung_08_08_2008.PDF (24.11.2014)
- /MOE 10/ Mönig, J.; Rübel, A.: Projekt VerSi. „Untersuchung aktueller planerischer Grundsatzfragen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen“. Teil 4: Modellkonzept für ein Endlager im Salz. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3535/4, Köln, 2010.
- /MOE 12/ Mönig, J.; Buhmann, D.; Rübel, A.; Wolf, J.; Baltés, B.; Fischer-Appelt, K.: Sicherheits- und Nachweiskonzept, Bericht zum Arbeitspaket 4, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-277, Köln, 2012.

- /POP 10/ Popp, T.; Salzer, K.; Weise, D.; Wiedemann, M.: Hydraulische Barrierenintegrität von carnallitischem Salzgebirge. - Kali und Steinsalz, 02/2010, S. 16-23, Kassel, 2010.
- /RAU 09/ Rauche, H.: Beurteilung der Machbarkeit einer Umlagerung aller oder Teile der radioaktiver Abfälle in der Schachtanlage Asse II. - Auftragsstudie des Bundesamtes für Strahlenschutz, ERCOSPLAN, Erfurt, 2009.
(keine Genehmigung für Vervielfältigung)
- /ROT 99/ Rothfuchs, T., Feddersen, H.-K., Kröhn, K.-P., Miehe, R., Wieczorek, K., Poley, A.: The DEBORA-Project: Development of Borehole Seals für High-Level Radioactive Waste -Phase II. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-161, Köln, 1999.
- /SCH 09/ Schumann, R.; Emmerich, K.; Kemper, G.; Königer, F.; Kudla, W.; Gruner, M.; Gaßner, W.; Hofmann, M.; Szczyrba, S.; Schanz, T.; Zimmerer, M.; Datcheva, M.: Verschlussystem mit Äquipotenzialsegmenten für die untertägige Entsorgung (UTD und ELA) gefährlicher Abfälle zur Sicherstellung der homogenen Befeuchtung der Dichtelemente und zur Verbesserung der Langzeitstabilität. - BMBF FKZ 02C0922, Schlussbericht, 117 S., TH Karlsruhe, Institut für Technologie, Karlsruhe, 2009.
- /SIT 05/ Sitz, P.; Gruner, M.; Knoll, P.: Streckenverschlüsse im Carnallitit. - Kali und Steinsalz, 02/2005, S. 16-25, Kassel, 2005.
- /SIT 82/ Sitz, P.: Querschnittsabdichtungen untertägiger Hohlräume durch Dämme und Pfropfen. - Freiburger Forschungshefte, A 643, Leipzig 1982.
- /STM 94/ Stockmann, N.; Beinlich, A.; Droste, J.; Flach, D.; Gläß, F.; Jockwer, N.; Krogmann, P.; Miehe, R.; Möller, J.; Schwägermann, F.; Wallmüller, R.; Walter, F.; Yaramanci, U.: Dammbau im Salzgebirge. - GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GSF-Bericht 18/94, Neuherberg, 1994.

- /TAA 91/ Zweite allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Abfall). - Teil 1: Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen, biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachtungsbedürftigen Abfällen. In der Fassung der Bekanntmachung vom 12. März 1991. (23.05.2005).
- /TAS 93/ TA Siedlungsabfall. - Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen (Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz) vom 14. Mai 1993 (BAnz. Nr. 99a vom 29.05.1993).
- /THY 12/ THYSSEN SCHACHTBAU Gruppe: Referenzliste der TS Schachtbau und Bohren zu Langzeitsicheren Verschlussbauwerken und Abdichtungsmaßnahmen im Kali- und Steinsalzbergbau. - <http://thyssen-schachtbau.com/images/schachtbaubohren/referenzen/>. (Letzter Zugriff 26.11.2012)
- /VER 02/ Verordnung über den Versatz von Abfällen unter Tage. - Versatzverordnung - VersatzV vom 24.07.2002 (BGBl. I S. 2833).
- /VER 12/ Verordnung über den Versatz von Abfällen unter Tage (Versatzverordnung - VersatzV). - Versatzverordnung - VersatzV vom 24.07.2002 (BGBl. I S. 2833), zuletzt geändert durch Art. 5 Abs. 25 Gesetz vom 24.02.2012 (BGBl. I S. 212).
- /WIE 04/ Wieczorek, K.; Schwarzianeck, P.: Untersuchung zur Auflockerungszone im Salinar (ALOHA2). Untersuchungen zur hydraulisch wirksamen Auflockerungszone um Endlagerbereiche im Salinar in Abhängigkeit vom Hohlraumabstand und Spannungszustand. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-198, Köln, 2004.
- /WIL 08/ Wilsnack, T., Sitz, P., Heinemann, K.-H., Rumphorst, K., Hunstock, P.: Flüssigkeitsdichte Verwahrung von Schächten. - Kali und Steinsalz, H. 03/2008, S. 24-35, Kassel, 2008.
- /WIP 10/ Hardin, E.: Implementation of Tunnel, Shaft, and Borehole Seal Systems Handout SAND2010-3641P, Sandia National Laboratories, 2010.

- /WTE 12/ Projektträger Karlsruhe - WTE: Schwerpunkte zukünftiger FuE-Arbeiten bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle (2011 – 2014). - BMWI und PTKA-WTE, Projektträger Karlsruhe Wassertechnologie und Entsorgung, Karlsruhe, 2012.
- /XIE 02/ Xie, Z.: Rechnerische Untersuchungen zum mechanischen und hydraulischen Verhalten von Abdichtungsbauwerken in Untertagedeponien für den Fall eines Lösungszutrittes. - Dissertation, Techn. Univ. Clausthal, 2002.
- /ZHA 93/ Zhang, C.-L.; Schmidt, M.W.; Staupendahl, G.; Heemann, U.: Entwicklung eines Stoffansatzes zur Beschreibung des Kompaktionsverhaltens von Salzgrus. - Inst. f. Statik TU BS Bericht Nr. 93-73 und GSF-Inst. F. Tief Lagerung, Braunschweig, 1993.

16 Eisenkorrosion

16.1 Bedeutung für den Sicherheitsnachweis

Bei den in Betracht gezogenen Einlagerungsvarianten kommen Einlagerungsbehälter zum Einsatz, die im Wesentlichen aus Baustählen und Gusseisen bestehen. Die eingesetzten Behälter müssen sicherstellen, dass eine Handhabbarkeit der Behälter bei einer eventuellen Bergung aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager für einen Zeitraum von 500 Jahren gegeben ist /BMU 10/.

Das Korrosionsverhalten der Behälter bestimmt die Dauer des Einschlusses der Radionuklide in den Einlagerungsbehältern und ist damit ein wichtiger Einflussfaktor für die Gewährleistung der Sicherheit der Endlagerung der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle gemäß den Sicherheitsanforderungen.

Die Quantifizierung der in-situ Korrosionsraten von Eisen in Kontakt mit Salzlauge bzw. feuchter Luft in einem Salzbergwerk und mineralogische Beschreibung der Korrosionsprodukte kann sowohl durch das verbesserte Prozessverständnis als auch durch die Bereitstellung wichtiger kinetischer und thermodynamischer Parameter zum Sicherheitsnachweis beitragen.

16.2 Erkenntnisse aus Labor- und In-situ-Experimenten und Modellrechnungen

Experimentelle Untersuchungen zum Korrosionsverhalten verschiedener Werkstoffe, die für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Frage kommen, wurden vom Forschungszentrum Karlsruhe durchgeführt (/SMA 92/, /SMA 93/, /SMA 99/, /SMA 02/, /SMA 03/). Die Ergebnisse beschreiben das Korrosionsverhalten der Werkstoffe, die für den Bau verschiedener Behälter benötigt werden. Sowohl flächenhafte Korrosion als auch Lochfraß wurden für Behältermaterialien und Salzlösungen untersucht, wie sie für ein Endlager am Standort Gorleben geplant bzw. relevant gewesen sind. In den zahlreichen Experimenten wurde gezeigt, dass die aktive Korrosion der unlegierten Stähle flächenhaft und mit weitgehend konstanter Rate verläuft. Bei passivierten Edelstählen, insbesondere in einer chloridhaltigen Lösung, treten an Fehlstellen der aus Oxiden bestehenden Passivschicht häufig punktförmige Korrosionsprozesse (Lochfraß) auf. An diesen Fehlstellen wird der Sauerstoff aus der Oxidschicht durch Chloridionen

verdrängt. Durch weitere Anlagerung von Chloridionen entsteht ein Bereich auf der Oberfläche des Metalls, der nicht mehr durch eine Oxidschicht geschützt ist. Diese Stelle bietet nun einen Angriffspunkt für Korrosion.

16.3 Natürliche Analoga

Die mineralogische Untersuchung von Eisenkorrosion im polnischen Salzbergwerk Wieliczka wurde unlängst in einer polnischen Fachzeitschrift veröffentlicht /MAL 10/. Diese kann als Natürliches Analogon für Eisenkorrosion in einem Endlager in Frage kommen und verdient im Hinblick auf eventuelle weiterführende Untersuchungen Aufmerksamkeit. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden Proben von Ketten, Ventilen, Rohren sowie Federn aus ehemaligen Salzabbaukammern, die sich in genügendem Abstand von Schächten befinden, entnommen. Die Lufttemperatur in diesen Kammern variiert im Bereich von 13 – 16 °C mit einem Mittelwert von 14 °C und die Luftfeuchtigkeit im Bereich von 55 – 75 % mit einem Mittelwert von etwa 63 – 65 %. Das Alter dieser Gegenstände wurde nicht angegeben, jedoch gibt eine andere Studie /OBY 10/ mit der Angabe des Anfangs der industriellen Auslaugung im Bereich der Probenentnahmekammer Koberwein in den 1960er Jahren einen Hinweis auf ein mögliches Alter der Proben.

Anhand einer visuellen Charakterisierung wurden die Proben zunächst in zwei Gruppen unterteilt mit (i) einem signifikanten Rest nicht-korrodierten Metalls (unvollständig korrodierte Proben) und (ii) einer vernachlässigbaren Menge an nicht-korrodiertem Metall (vollständig korrodierte Proben) (Abb. 16.1). Für die zweite Gruppe wurde ferner zwischen Außen- („A-1“ und „A-2“) und Innenschichten („B-1“ und „B-2“) unterschieden (Abb. 16.2).



Abb. 16.1 Unvollständig (links, ein Ventil) und vollständig (rechts, ein Rohr) korrodierte Proben aus ehemaligen Salzabbaukammern des Salzbergwerkes Wieliczka /MAL 10/



Abb. 16.2 Korrosionsschichten entlang eines Querschnittes durch ein vollständig korrodiertes Rohr aus ehemaligen Salzabbaukammern des Salzbergwerkes Wieliczka /MAL 10/

XRD- und REM-EDX-Analysen zeigten, dass A-1 überwiegend aus nadelförmigen Goethit-Kristallen, A-2 aus idiomorphen Halit-Kristallen, B-1 aus granularen Aggregaten von Magnetit-Kristallen und B-2 aus sphärischen, faserförmigen sowie xenomorphen Akageneit-Kristallen (laut /MAL 10/: $\text{Fe}^{3+}(\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+})\text{O}_4$, nach /STA 03/: $\text{FeO}_{0.833}(\text{OH})_{1.167}\text{Cl}_{0.167}$) und Goethit-Kristallen besteht. Die Form der Akageneit-Aggregate scheint mit ihrem Chlor-Gehalt zu korrelieren, so dass sich bei 1 – 3,3 Gew.% xenomorphe und bei 5 – 10 % idiomorphe Kristalle bildeten.

Des Weiteren wurde an den Oberflächen der untersuchten Proben sporadisches Auftreten von schwarzen, bläschenförmigen Aggregaten (Abb. 16.3) beobachtet, die chemisch denen aus der Schicht B-2 (Akageneit) sehr ähnlich sind. Laut /STA 03/ wird die Bildung von Akageneit durch hohe Chlorid-Konzentrationen und niedrige pH-Werte

begünstigt, so dass Akagenit von einer besonderen Relevanz für die Stabilität der archäologischen Artefakte ist.



Abb. 16.3 Bläschenförmige Aggregate an einem Kettenglied aus ehemaligen Salzabbaukammern des Salzbergwerkes Wieliczka /MAL 10/

16.4 Bewertung

Da in der Arbeit /MAL 10/ sowohl Angaben zum Alter der Proben als auch zu ursprünglichen Dicken des korrodierten Materials fehlen, lassen sich keine genauen Korrosionsraten ableiten.¹⁵ Eine systematische Probennahme in Wieliczka könnte eventuell zu einer genauen Abschätzung der Korrosionsraten von Eisen in Kontakt mit Salzlauge bzw. feuchter Luft in einem Salzbergwerk führen. In dieser Hinsicht wäre es sinnvoll zu eruieren, ob auch andere eisenhaltige Materialien bzw. Gegenstände in Wieliczka über längere Zeiten der korrosiven Umgebung ausgesetzt waren, was bei dem Alter des Bergwerkes (etwa 700 Jahren) durchaus denkbar ist.

16.4.1 Grenzen der Anwendbarkeit/Zeitskala/Ungewissheiten

Das dargestellte Analogon ist nur anwendbar für Endlager-Materialien mit ähnlicher Zusammensetzung wie die untersuchten (bzw. noch zu untersuchenden) Gegenstände, die im Salzbergwerk Wieliczka herrschenden Temperaturen sowie sauerstoffreiche Bedingungen.

¹⁵ Aus der ungefähren Dicke des durchkorrodierten Rohrs, das in der Abbildung 2 neben einer Grosz-Münze mit einem Durchmesser von 15,5 mm (<http://www.mennica.com.pl/produkty-i-uslugi/produkty-mennicze/monety-nbp/monety-obiegowe/produkt/zobacz/1-grosz.html>) abgelichtet ist, und dem unterstellten Alter von 50 Jahren lässt sich eine Korrosionsrate von 0,3 mm pro Jahr abschätzen.

16.4.2 Verwendungsmöglichkeit im Sicherheitsnachweis

Sowohl Korrosionsraten – falls genauer bestimmt – als auch die Beschreibung der Korrosionsprodukte wären ohne (größere) Einschränkungen übertragbar für entsprechenden Materialien und Temperaturen in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in einer frühen Nachverschlussphase (bei Verfügbarkeit des Sauerstoffes in der Grubenluft).

16.4.3 Bewertung der Möglichkeit der Kommunikation

Es bestehen sehr gute Kommunikationsmöglichkeiten, z. B. durch Fotos von alltäglichen (Metall-)Gegenständen aus einem bekannten und Touristen zugänglichen Salzbergwerk.

16.5 Offene Fragen

Zu noch nicht geklärten Fragen gehört insb. ein eventuelles Auftreten von mikrobiell beeinflusster Korrosion unter aeroben bzw. anaeroben Bedingungen und für Behältermaterial im Kontakt mit Salzlauge oder Wasserdampf .

16.6 Literatur zu Kapitel 16

/BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, Stand 30. September 2010.

/MAL 10/ Malinowski, Ł.; Sawłowicz, Z.; Przybyło, J.: Mineralogical and geochemical characteristics of the iron corrosion products from the Wieliczka Salt Mine. - Geologia, Vol. 36, pp. 313-329, 2010.

/OBY 10/ d'Obyrn, K.; Przybyło, J.; Wiewiórka, W.: Geological structure and exploitation techniques in excavation chambers of the new specialist route in the Wieliczka Salt Mine. - Geologia, Vol. 36, pp. 287-311, 2010.

- /SMA 92/ Smailos, E.; Schwarzkopf, W.; Koste, R.; Gruenthaler, K. H.: Advanced corrosion studies on selected packaging materials for disposal of HLW canisters in rock salt, in Corrosion Problems Related to Nuclear Waste Disposal: A Working Party Report, European Federation of Corrosion, Ed.: The Institute of Materials: 23-31, 1992.
- /SMA 93/ Smailos, E.: Corrosion of high-level waste packaging materials in disposal relevant brines, Nuclear Technology, vol. 104: 343-350, 1993.
- /SMA 99/ Smailos, E.; Martínez-Esparza, M. A.; Kursten, B.; Marx, G.; Azkarate, I.: Corrosion evaluation of metallic materials for long-lived HLW/spent fuel disposal containers. - Forschungszentrum Karlsruhe FZKA 6285, 04/1999.
- /SMA 02/ Smailos, E.: Influence of gamma radiation on the corrosion of carbon steel, heat-generating nuclear waste packaging in salt brines. IAEA TECDOC-1316, IAEA; Wien, 2002.
- /SMA 03/ Smailos, E.; Cunado, M. A.; Azkarate, I.; Kursten, B.; Marx, G.: Long-term performance of candidate materials for HLW/spent fuel disposal containers. – Forschungszentrum Karlsruhe Wissenschaftliche Berichte, FZKA-6809, 2003.
- /STA 03/ Ståhl, K.; Nielsen, K.; Jiang, J.; Lebech, B.; Hanson, J. C.; Norby, P.; van Lanschot, J.: On the akaganéite crystal structure, phase transformations and possible role in post-excavational corrosion of iron artifacts. - Corrosion Science, Vol. 45, pp. 2563-2575, 2003.

17 Mikrobielle Prozesse

17.1 Bedeutung für den Sicherheitsnachweis

Mikrobielle Prozesse im Steinsalz können das Langzeitverhalten eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle auf mannigfaltige Weise, u. a. durch eine Beschleunigung der (lokalen) Behälterkorrosion, Gasproduktion, Veränderung des geochemischen Milieus sowie Ab- und Adsorption von Radionukliden, beeinflussen. Allerdings ist noch weitestgehend unklar, ob – und wenn ja, mit welcher Intensität und in welchem Umfang – bestimmte mikrobielle Prozesse unter endlagerrelevanten Bedingungen im Steinsalz auftreten können. Derzeit gibt es weltweit nur ein einziges konzeptuelles Modell für mikrobiologische Prozesse in einem Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Steinsalz: nämlich für das WIPP-Endlager (U.S. Department of Energy, Waste Isolation Pilot Plant). Dieses Modell basiert im Wesentlichen auf Erkenntnissen, die aus Untersuchungen von Natürlichen Analoga – hypersalinen Gewässern, Porenlösungen aus tiefen Sedimenten, Fluideinschlüssen aus verschiedenen Salzformationen sowie gesättigten Salzlagern aus Salinen – stammen. Dies zeigt exemplarisch die Bedeutung von Natürlichen Analoga für den Sicherheitsnachweis. Der aktuelle Stand des Wissens bietet derzeit kaum ein alternatives Instrumentarium für die Berücksichtigung mikrobieller Prozesse in einer Langzeitsicherheitsanalyse als Natürliche Analoga, da es kaum – und im Fall von WIPP nur wenige – Endlagerstandort- bzw. Wirtsgesteinsformation-spezifische Untersuchungen gibt.

17.2 Erkenntnisse aus Labor- und In-situ-Experimenten und Modellrechnungen

Aufnahme und Überleben von Mikroben in Fluideinschlüssen im Halit unter Laborbedingungen wurden mit 40 Stämmen von Halobakterien in der Studie /NOR 88/ umfangreich untersucht. Alle getesteten Stämme behielten Überlebensfähigkeit für mindestens sechs Monate und Beweglichkeit für mindestens drei Wochen in Fluideinschlüssen in im Labor auskristallisierten Halitkristallen. Eine andere Studie /ADA 06/ zeigte, dass sogar nicht-halophile Bakterien (*Pseudomonas aeruginosa*) ihre Überlebensfähigkeit für mindestens 13 Monate nach Inkorporation in Fluideinschlüssen im Halit behalten können. Des Weiteren ist in der Studie sowie in einem weiteren Experiment /FEN 06/ durch genetische Modifikation von Mikroben bzw. ihre Anfärbung mit fluoreszierenden Stoffen und anschließenden Einsatz von Laserfluoreszenz und Mikroskopie ein Nach-

weis gelungen, dass Mikroben in dem im Labor auskristallisierten Halit ausschließlich in Fluideinschlüssen inkorporiert waren.

In den obigen Versuchen mit 40 Stämmen von Halobakterien setzte die Kristallisation von Halit in allen Proben mit Mikroben 24 – 28 Stunden früher als in sterilen Kontrollproben ein /NOR 88/. Die Kristallisation von Halit wurde in Anwesenheit von Mikroben bei NaCl-Gehalten von 225 g/L, die etwa 100 g/L unter der Halit-Sättigungskonzentration liegen, beobachtet, während sich in sterilen Laugen keine Halit-Kristalle bildeten /CAS 99/. Dieser Effekt wurde in der letzteren Studie der intrazellulären Akkumulierung des KCl, die zu einer Sättigung oder sogar Übersättigung der Salzlauge an NaCl in der unmittelbaren Umgebung von Mikroben zugeordnet. Die treibende Kraft für einen solchen lokalen Anstieg der NaCl-Konzentration wäre in dem Fall der intrazellulär-extrazelluläre Konzentrationsgradient, der für extrazelluläre NaCl-Konzentration von z. B. 236 g/L mit einem Verhältnis von 0,3 – 0,8 charakterisiert wird /CHR 62/. Es wurde in /CAS 99/ spekuliert, dass ein solcher Prozess bei der Deposition von Steinsalz über geologische Zeiträume eine bedeutende Rolle gespielt haben könnte.

Mit der intrazellulären Akkumulierung des K^+ – und somit seines natürlichen radioaktiven Isotops ^{40}K – geht auch die Frage der Resistenz von Mikroben gegenüber ionisierender Strahlung einher. Berechnungen zeigen, dass die letale Expositionsdosis für Mikroben aufgrund einer solchen Akkumulierung nicht einmal über 10^9 Jahre generiert wird /GRA 04/. Außerdem zeigten Experimente, dass z. B. das bei 4 M NaCl optimal wachsende Halobacterium sp. unempfindlich gegen 5.000 Gy ^{60}Co -Gammastrahlung ist /KOT 05/.

17.3 Natürliche Analoga

Im Folgenden werden die Aspekte der mikrobiellen Aktivität in einem Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Steinsalz diskutiert, die sich aus den in der Literatur dokumentierten Studien identifizieren lassen.

17.3.1 Überlebensfähigkeit von Mikroben im Steinsalz über endlagerrelevante Zeiträume

Bereits Anfang der 1960er Jahre wurden Ergebnisse mikrobiologischer Untersuchungen veröffentlicht, die die Fähigkeit von Mikroben, im Steinsalz über geologische Zeiten

zu überleben, dokumentierten /DOM 63/. In der Veröffentlichung wurde über die Isolierung – unter Einsatz von rigorosen und aufwendigen Verfahren zur Vermeidung von Kontaminierung des beprobten Materials – und Kultivierung von lebendigen Mikroben aus dem primären Zechsteinsalz mit einem Alter von 250 Mio. Jahren und aus dem Präkambrium-Steinsalz mit einem Alter von 650 Mio. Jahren berichtet. Die isolierten Mikroben hatten eine optimale Wachstumstemperatur von 45 – 55 °C und wurden in die kristalline Struktur des Salzes und nicht in die kapillaren Poren eingebettet gefunden. In einer späteren Untersuchung wurde die Isolierung von lebendigen Mikroben aus den Proben des primären Zechsteinsalzes einer anderen Salzlagerstätte – ebenfalls unter Einsatz von aufwendigen Verfahren zur Vermeidung von Kontaminierung des beprobten Materials sowie mit Einbeziehung zahlreicher Kontrollproben – reproduziert /BIB 83/. Diese Ergebnisse werden gegenwärtig als glaubwürdig, jedoch nicht als unanfechtbar betrachtet /MCG 00/, /MOR 03/, /GRA 04/, /ADA 06/.

In einer jüngeren Veröffentlichung, die wegen äußerster Sterilisierungsmaßnahmen gegen eine Kontamination mit modernen Mikroorganismen ein hohes öffentliches Aufsehen erregte, wurde schließlich über die Extraktion und Kultivierung eines 250 Mio. Jahre alten halotoleranten Bakteriums aus einem Fluideinschluss in einem Halitkristall aus der sog. Salado-Formation (WIPP-Endlager) berichtet /VRE 00/.

Kritiker hinterfragten diesen Bericht zunächst mit dem Argument, dass der Habitus des beprobten großen Halit-Einkristalls untypisch für eine primäre Steinsalzbildung ist, so dass der Fluideinschluss und das lebensfähige Bakterium darin deutlich jüngeren Ursprungs sein sollten /HAZ 01/. Jedoch zeigte eine nachfolgende Analyse, dass die diskutierten Fluideinschlüsse evaporiertes permisches Meerwasser enthielten /SAT 05/.

Basierend auf einer evolutionären Rate von 1,5 Nukleotid-Substitutionen pro 100 Basen in 16S rDNA pro 50 Mio. Jahren und der Beobachtung, dass das 250 Mio. Jahre alte Bakterium aus der WIPP zu 99 % identisch einem modernen Bakterium aus dem Toten Meer ist, argumentierten Kritiker weiter, dass das extrahierte Bakterium ein modernes sein soll /NIC 02/, /HEB 05/. Allerdings weisen die Beobachtungen von äußerst ähnlichen Mikroben in 23, 121 und 419 Mio. Jahre alten Steinsalzen aus Spanien, Brasilien und USA darauf hin, dass Salzformationen eine natürliche Erbgut-Datenbank für die Erdbiosphäre durch Auflösung und Re-präzipitation von Salzablagerungen infolge des aktiven Wasserzyklus und tektonischer Prozesse darstellen /PAR 09/.

Weitere Kritik bezog sich auf das Problem der DNA-Stabilität über längere Zeiträume und auf die fehlende unabhängige Bestätigung der Beobachtung /WIL 05/. Jedoch konnten in einer späteren Studie mit Beteiligung von Autoren der Veröffentlichung /WIL 05/ die DNA-Reparatur und die Überlebensfähigkeit von Mikroben über 0,5 Mio. Jahre in Permafrost nachgewiesen werden /JOH 07/.

Weitere Studien berichteten ebenfalls über die Isolierung und Kultivierung von lebendigen Mikroben aus dem permischen und triassischen (etwa 200 – 280 Mio. Jahre alten) Steinsalz in England, Deutschland und Österreich /NOR 93/, /STA 99/ sowie aus Fluideinschlüssen in 97.000 Jahre altem Steinsalz aus Kalifornien, USA /MOR 03/.

17.3.2 Energiequellen für das Überleben von Mikroben im Steinsalz

Metabolische Aktivität von Mikroben wie z. B. DNA-Reparatur braucht eine In-situ-Energiequelle. In diesem Zusammenhang stellt sich eine weitere Frage bezüglich des Überlebensmechanismus von Mikroben in Fluideinschlüssen. In dieser Hinsicht sind Beobachtungen aus den Untersuchungen von Halit-Fluideinschlüssen aus Death Valley in Kalifornien mit einem Alter von 12.000 – 100.000 Jahren sehr aufschlussreich, dass Mikroben in Fluideinschlüssen oft zusammen mit Dunaliella-Algen eingeschlossen sind (Abb. 17.1) /SCH 10/. Diese Algen enthalten bis zu 7 M Glycerol, $C_3H_5(OH)_3$, in ihrem Zytoplasma, das in die Salzlauge freigesetzt werden und als Energiequelle für die mit eingeschlossenen Mikroben dienen kann, wie in dem Artikel /SCH 10/ anhand zahlreicher Beobachtungen in Salzseen vorgeschlagen.

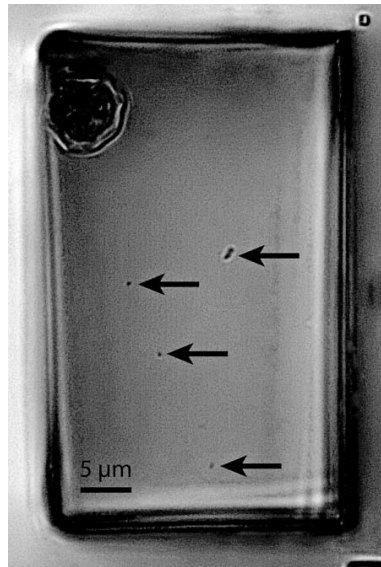


Abb. 17.1 Mikroben (mit Pfeilen markiert) und eine Dunaliella-Alge (links oben) in einem 12.000 Jahre altem Fluideinschluss im Halit aus einer 8,7 m tiefen Salzschrift in Death Valley /SCH 10/

Obwohl nahezu alle übersalzigen Seen große Mengen an totem pflanzlichen Material enthalten, enthält die Salado-Formation, in der das WIPP-Endlager gebaut wurde, keine fossile Organik, dafür aber nachweisbare Populationen von Zellulose-abbauenden Mikroben /VRE 98/. Dies deutet darauf hin, dass Mikroben im Steinsalz über längere Zeiträume durch den Abbau von mit eingeschlossener Organik als Energie- und Nährstoffquelle überleben können.

Ferner enthält Steinsalz oft Hohlräume mit Gas unter Hochdruck, die durch ein Explo-sionspotential gekennzeichnet sind /EHR 98/ und primären (aus Zersetzung der bei der Salzdeposition eingefangenen organischen Stoffen) oder sekundären (Gaspenetration beim Salzaufstieg) Ursprungs sein können /KUP 78/. In den Salzbergwerken an der Küste des Golfs von Mexico reihen sich Gashohlräume tendenziell an eine schwarze tonhaltige Salzschrift /KUP 78/. Gase in Hohlräumen der Salzstöcke in den USA können bis zu 90 – 99 % aus CH_4 bestehen, während sie in Deutschland oft CH_4 und CO_2 als Hauptkomponenten enthalten /EHR 98/. Ausbruchsalz, das durch Gasexplosionen aus solchen Hohlräumen geschleudert wird, enthält im Durchschnitt bis zu 2 m^3 Gas pro Tonne Steinsalz in den USA und 18 m^3 Gas pro Tonne Steinsalz in Deutschland, während Gasgehalt im normalen Steinsalz unter $0,003 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ liegt /EHR 98/.

Diese Gasinventare sind bei der Quantifizierung der Energiequellen für mikrobielle Aktivität im Steinsalz insoweit zu berücksichtigen, als CO_2 von fermentativen und metha-

nogenen Mikroben als Elektronenakzeptor und CH_4 von anaeroben methanotrophen Mikroben als Elektronendonator bei Methanoxidation verwertet werden kann /MEL 11/. Im letzteren Prozess kann entweder Sulfat oder Fe(III) als Elektronenakzeptor benutzt werden. Sulfat ist das Hauptanion in Salzlaugen mit Konzentrationen von z. B. bis zu 340 mmol pro kg H_2O , die in Fluideinschlüssen in Haliten der Salado-Formation beobachtet wurden /LOW 05/. Fe(III) kann im Steinsalz in Fe(III)-(Oxidhydr)Oxiden, die einigen Schichten des Zechstein-Steinsalzes ihre charakteristische orangene Färbung verleihen /URA 85/, /SIE 01/, oder in Tonmineralen /KUP 78/, /SIE 01/, /SWA 12/ vorliegen. Darüber hinaus enthalten Fluideinschlüsse im Halit oft Kohlenwasserstoffe, die mikrobielle Aktivitäten aufrechterhalten können /MCG 00/, /SIE 01/. In Verbindung mit karbonatischen Tonfacies im Steinsalz kann weiterer organischer Kohlenstoff, mit z. B. 0,1 – 7 % in Bresse und im Mulhouse-Becken in Frankreich, auftreten /PIR 95/. Potentielle Energiequellen für mikrobielle Aktivitäten und entsprechende Hauptprodukte des mikrobiellen Metabolismus in einem Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Steinsalz sind in der Abb. 17.2 zusammengefasst.

Eine zusätzliche In-situ-Energiequelle (H_2) für mikrobielle Aktivität kann durch Gamma- und Beta-Bestrahlung des NaCl (z. B. durch ^{40}K im Steinsalz sowie durch radioaktive Abfälle) und Formation des kolloidalen Na aufgetan werden /TUR 06/. Eine Wechselwirkung zwischen dem kolloidalen Na und der Salzlauge infolge von z. B. Korngrenzenmigration kann dann zur Freisetzung von H_2 entsprechend der Reaktion $2\text{Na} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaOH} + \text{H}_2$ führen /SCH 07/. Weil Mikroben zum Überleben im Salinar eine osmotische Balance zwischen der Salzlauge und dem Zytoplasma aufbauen müssen, akkumulieren sie in einem der zwei Überlebensmechanismen hohe intrazelluläre KCl-Konzentrationen von 4-5 M /GRA 04/, /ORE 11/. Daher können sich kolloidales Na und somit kontinuierliche H_2 -Quellen in unmittelbarer Nähe zu Mikroben bilden. Solcher Mechanismus könnte z. B. die Beobachtung von Sylvin (KCl) zusammen mit CH_4 und organischen Stoffen in (pseudo)sekundären Fluideinschlüssen im blauen Zechstein-Halit aus dem Kłodawa-Bergwerk in Polen erklären /WES 08/ (obwohl der Mechanismus der Bildung von metallischem Na in Halit immer noch umstritten ist /SON 95/, /WES 08/. Metallisches Na wird als die häufigste Ursache für die blaue Färbung des Halits betrachtet /SON 95/).

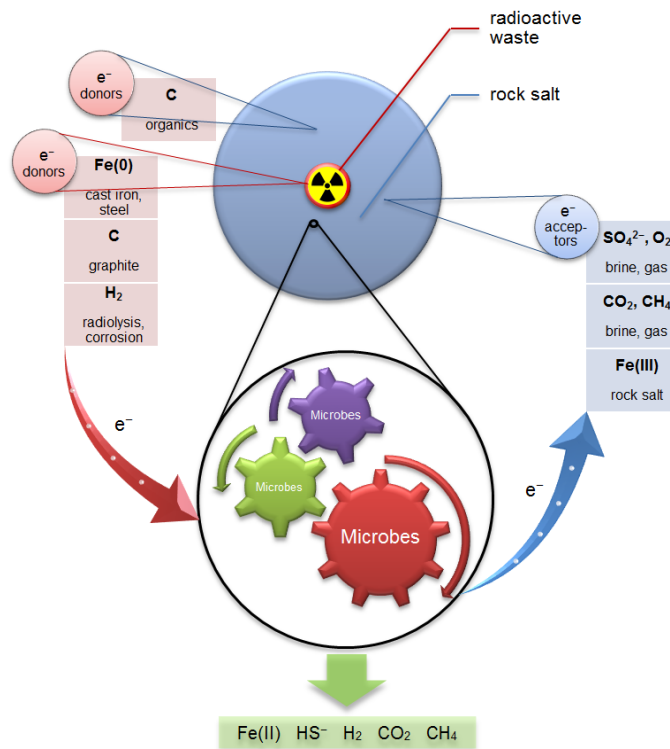


Abb. 17.2 Schematische Darstellung der Quellen von Elektronendonatoren und -akzeptoren und der möglichen Produkte des mikrobiellen Metabolismus in einem Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Steinsalz

17.3.3 Temperaturlimit für die Überlebensfähigkeit von Mikroben im Steinsalz

Es gibt nur wenige Evaporiten, in denen in mikrobiologischen Untersuchungen keine Mikroben nachgewiesen werden konnten. Beispielsweise wurden keine Mikroben aus dem Steinsalz, das Diagenesetemperaturen von $\sim 160\text{ }^{\circ}\text{C}$ erfahren hatte, isoliert /DOM 63/. Gleichmaßen wurden keine Mikroben in Salzlaugen aus einem hochdeformierten Kaliflöz innerhalb eines Salzdiapirs, das einer tiefen Diagenese unterlag und bis zu mindestens $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ erhitzt wurde, gefunden /MCG 00/.

17.3.4 Einfluss der Laugenzusammensetzung auf die Überlebensfähigkeit von Mikroben in Salzlaugen

Aus Untersuchungsergebnissen eines Meerwassergradienten von $0,05\text{-}5,05\text{ M MgCl}_2$ an der übersalzten Salzlaugengrenzfläche im sog. Discovery Becken – einem großen, stabilen und mit MgCl_2 nahezu gesättigten Salzsee am Boden des Mittelmeeres,

wurde geschlossen, dass die Obergrenze der $MgCl_2$ -Konzentration für mikrobielles Leben bei etwa 2,3 M liegt. Bei höheren Konzentrationen werden biologische Makromoleküle vermutlich durch $MgCl_2$ denaturiert /HAL 07/. Allerdings halten eine Beobachtung der mikrobiellen Aktivität in der Salzlauge aus dem Discovery Becken und die Begründung der Schlussfolgerung der Studie /HAL 07/ auf der Verwendung einer Kultivierungsmethode die Möglichkeit offen, dass es nicht kultivierbare, aber zur Existenz in $MgCl_2$ -Laugen adaptierte Mikroben geben kann /SAS 08/, /KMI 10/.

17.3.5 Populationsgrößen von Mikroben im Steinsalz

Noch im Jahr 1981 wurden Steinsalze aus Salzgewinnung durch Mikrobiologen als „Mikroben-frei“ beschrieben. Diese Auffassung von Salzbergwerken als sterilem Medium ist immer noch weit verbreitet, obwohl keine Zweifel mehr bestehen, dass im Steinsalz beträchtliche Mikroben-Populationen existieren können /GRA 04/. Beispielsweise enthielt G-Seep-Lauge aus Grubenbauen der WIPP 7×10^4 bis 3×10^6 Zellen pro mL /FRA 93/ und Salzlauge aus den Bergwerken in Winsford und Boulby (UK) enthielten jeweils bis zu 4×10^7 bzw. $1,9 \times 10^6$ Zellen pro mL /MCG 00/. Diese Populationsgrößen sind ähnlich denen, die in tiefen Tongesteinen und anderen tiefen Sedimenten beobachtet werden /MEL 11/. In diesem Zusammenhang ist zu vermerken, dass Populationsgrößen von Mikroben in natürlichen, salzhaltigen Medien in früheren Bestimmungen wegen der bis vor kurzem unbeachteten Nanohaloarchaea mit einem Zelldiameter von $\sim 0,6 \mu m$ möglicherweise wesentlich unterschätzt wurden /NAR 12/.

Die Wirtsgesteinsformation des WIPP, die Salado-Formation, enthält lebensfähige und kultivierbare Populationen von halophilen Mikroben, die in den Grubenbauen eine heterogene Streuung mit bis zu 10.000 koloniebildenden Einheiten pro mL (G-Seep 1-Lauge), aber keine koloniebildenden Einheiten (Room 7) zeigen /VRE 98/. Bei diesen Zahlen ist zu beachten, dass sich, wie inzwischen breit akzeptiert ist, etwa 99,9 % der Mikroben aus natürlichen Medien einer Kultivierung im Labor entziehen /AND 06/, /LIT 07/.

Einige der in den obigen Studien untersuchten Populationen können eventuell Spezies repräsentieren, die infolge menschlicher Aktivität in die Grubenbaue eingebracht wurden, und somit nicht indigen sind. Jedoch ist alleine die Tatsache, dass sie im Steinsalz überleben können, von Bedeutung für die Langzeitsicherheitsanalyse eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Steinsalz. Dies ist darin

begründet, dass auch nicht-indigene Mikroben infolge der Auffahrung, Einbringung der radioaktiven Abfälle sowie Verfüll- und Versatzmaterialien zwangsläufig in das Endlagersystem eingebracht werden.

17.3.6 Metabolische Aktivität von Mikroben im Salinar

Obwohl sulfatreduzierende Bakterien bis zu recht hohen Salzgehalten von etwa 350 g/L das korrosionsfördernde Hydrogensulfid aktiv produzieren können, erfolgt die Methanogenese durch Reduktion von CO₂ nur bei Salzgehalten unter etwa 90 g/L /ORE 11/. Die Methanogenese durch Fermentierung von Methylaminen, Dimethylsulfiden oder Methanol kann jedoch bei Salzgehalten von etwa 210 – 250 g/L ablaufen /ORE 11/.

Auf diesen Beobachtungen – Natürlichen Analoga – basiert das konzeptuelle Modell für mikrobiologische Prozesse im WIPP-Endlager – weltweit wohl das einzige Modell dieser Art für ein Endlager im Steinsalz überhaupt. Dieses Modell betrachtet die Produktion von CO₂ und Biosorption als signifikante mikrobielle Beiträge zum Endlagerverhalten und nimmt an, dass das erzeugte CO₂ zu 4 % der Denitrifikation und zu 96 % der Sulfat-Reduktion entstammen wird. Laut des Modells wird Methanogenese keinen Beitrag zu Biodegradation und Gasproduktion liefern /SWA 12/.

Diese Beobachtungen repräsentieren den aktuellen Stand des Wissens bezüglich mikrobiologischer Prozesse im Salinar und können als grundsätzlich anwendbar im Rahmen von Sicherheitsanalysen für ein Endlager im Steinsalz betrachtet werden. Es soll allerdings auch berücksichtigt werden, dass z. B. Methangehalte in Fluideinschlüssen in Halitschichten ohne Erdöl- und Gasvorkommen im Liegenden laut Beobachtungen im Zechstein-Steinsalz in Nordpolen bis zu etwa 42 % erreichen können /KOV 08/. Dies deutet darauf hin, dass mikrobielle Methanproduktion im Zechstein-Halit während seiner postsedimentären Geschichte doch stattgefunden haben kann (siehe auch die Diskussion über die Beobachtung von Sylvin und CH₄ in (pseudo)sekundären Fluideinschlüssen im Abschnitt 17.3.2). Dementsprechend sollte Methanogenese in Sicherheitsanalysen insoweit berücksichtigt werden, als geologische und geochemische Gegebenheiten eines Endlagers im Steinsalz dies erfordern.

Bezüglich der mikrobiellen Reduktion von Fe(III), das im Steinsalz in Begleitmineralen – wie im Abschnitt 17.3.2 bereits diskutiert – vorliegt und in einem Endlager zusätzlich

durch Abfallbehälterkorrosion freigesetzt werden kann, ist unter anaeroben Bedingungen im Salz lediglich eine Unkenntnis festzustellen /ORE 11/.

17.3.7 Mikrobielle Effekte im Deck- und Nebengebirge

Laut /SAS 94/ erfolgt die Formation eines Anhydrit-Hutgesteins während der ersten Auflösungsphase eines Halitdiapirs im Liegenden durch meteorisches Wasser. Karbonat-Hutgestein entwickelt sich anschließend hauptsächlich durch eine abwärts gerichtete Ablösung des Anhydrit-Hutgesteins und ist von dem letzteren manchmal durch eine Übergangszone aus Gips, Elementarschwefel und Metallsulfiden getrennt. Das Karbonat-Hutgestein des Damon Mound Salzstocks in Texas mit einem geschätzten Gewicht von etwa 33×10^6 Tonnen entstammt dabei nachweislich mikrobieller Oxidation eines Äquivalents von etwa $5,4 \times 10^6 \text{ m}^3$ des Roherdöls /SAS 94/. Generell wird die Verwertung von CO_2 , Roherdöl und CH_4 – in dieser Präferenzreihenfolge – durch sulfatreduzierende Bakterien als die wahrscheinliche Kohlenstoffquelle in Karbonat-Hutgesteinen betrachtet /POS 88/, /SAS 94/.

Biodegradation von Kohlenwasserstoffen und mikrobielle Sulfatreduktion wurden als ursächlich nicht nur für die Niedertemperaturbildung von Karbonatmineralen, sondern auch für die Bildung von Elementarschwefel und Metallsulfiden in den Hutgesteinen der Salzstöcke an der Küste des Golf von Mexico (USA) und der Balhoul-Formation (Tunesien) identifiziert /POS 88/, /BEC 96/, /SAU 96/. Diese Studien stellten fest, dass Sulfat aus der Auflösung des Anhydrit-Hutgesteins durch sulfatreduzierende Bakterien zu Hydrogensulfid in Mengen reduziert wird, die mehr als ausreichend für eine rasche Präzipitation der mit Konvektionszuströmen von Fe, Zn und Pb aus dem Liegenden der Salzstöcke sind. Sogar bei einem solchen relativ hohen Ausmaß an Hydrogensulfid-Produktion wurde die Aktivität von sulfatreduzierenden Bakterien durch das Sulfat-Angebot trotz seiner hohen Verfügbarkeit in angrenzenden Schichten untersuchter Salzstöcke – und nicht durch das Kohlenwasserstoffangebot – begrenzt /BEC 98/.

17.4 Bewertung

Die diskutierten Natürlichen Analoga bieten eine Grundlage für eine qualitative Evaluation der Relevanz von mikrobiellen Prozessen in einem Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Steinsalz. Für eine quantitative Aussage über die Intensität und Umfang dieser Prozesse in einem Endlager reichen sie jedoch noch nicht aus.

Dies ist zum Teil dadurch bedingt, dass gezielte Untersuchungen in dieser Hinsicht bisher kaum bzw. gar nicht stattfanden. Eine eingehende Literaturrecherche und Analyse der vorhandenen Gegebenheiten in Salzbergwerken könnte diese unzureichende Wissenslage durch eine Identifizierung und Priorisierung von durchzuführenden Studien verbessern.

17.4.1 Grenzen der Anwendbarkeit/Zeitskala/Ungewissheiten

Beobachtungen einer außerordentlichen Ähnlichkeit von Mikroben in Steinsalzen aus Spanien, Brasilien und den USA /PAR 09/ sowie aus Deutschland, England und Österreich /STA 99/ legen nahe, dass die identifizierten Natürlichen Analoga wahrscheinlich auf beliebige Steinsalzformationen – und somit auch auf eine potentielle Wirtsformation eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle – übertragbar sein werden. Zeitskalen der identifizierten Natürlichen Analoga sind vergleichbar (einige 10.000 Jahre) bis identisch oder größer (geologische Zeiträume) und somit abdeckend. Ein Teil der in ein Endlager von außen eingebrachten Mikroben kann in Salz überlebensfähig sein. Die hier beschriebenen Untersuchungen wurden hingegen mit dem Ziel durchgeführt, indigene Mikroben zu charakterisieren, und sind nur im begrenzten Maße auf die eingebrachten Mikroben übertragbar.

17.4.2 Verwendungsmöglichkeit im Sicherheitsnachweis

Aussagen über die Relevanz von einzelnen mikrobiellen Prozessen in einzelnen Teilsystemen und Komponenten eines Endlagers können direkt aus Natürlichen Analoga abgeleitet werden. Dies gilt auch für Aussagen über die Intensität und Umfang einzelner mikrobieller Prozessen in den Teilsystemen Wirtsgestein, Deck- und Nebengebirge (siehe Abschnitt 17.3.7) sowie Strecken und Schächte eines Endlagers – vorausgesetzt, es erfolgen entsprechende Untersuchungen. Die Möglichkeit einer Ableitung solcher Aussagen für Nahfeld eines Endlagers aus Natürlichen Analoga bedarf aufgrund des Einflusses der einzulagernden Abfälle und entsprechender Komplexität der Fragestellung weiterer Prüfung.

17.4.3 Bewertung der Möglichkeit der Kommunikation

Es bestehen voraussichtlich gute Kommunikationsmöglichkeiten, da Mikroben und mikrobielle Effekte auch im alltäglichen Leben allgegenwärtig – und insoweit auch eine Vergleichsbasis und allgemeines Interesse – vorhanden sind.

17.5 Offene Fragen

Das Temperaturlimit für die Überlebensfähigkeit von Mikroben im Steinsalz bleibt noch unbekannt. Hierzu könnten mikrobiologische Untersuchungen des durch Basaltintrusionen beeinflussten Steinsalzes durchgeführt werden, um die Wissenslage zu verbessern. Des Weiteren fand die mikrobiell beeinflusste Korrosion des Abfallbehältermaterials im Kontakt mit einer Salzlauge bzw. dem Wasserdampf und einem Salzgrus in bisherigen Korrosionsuntersuchungen nur wenig Beachtung. Hierbei ist der mikrobielle Einfluss auf u. A. die Art der Korrosion (flächenhaft oder Lochfraß) und ihre Rate sowie auf Gasproduktion und Wasserhaushalt zu untersuchen. Die Frage nach der Möglichkeit einer Biofilmbildung an der Metalloberfläche, die eine Metallkorrosion noch stärker beeinflussen kann als einzelne Mikroorganismen, wurde unter den für einen Endlager im Steinsalz relevanten Bedingungen noch nicht beantwortet.

Noch nicht bzw. kaum behandelt wurde auch das Thema der Methanogenese und der Sulfat-Reduktion in Fluideinschlüssen im Halit, Anhydrit, Carnallit und in anderen Mineralen des Steinsalzes sowie der Sulfat-Reduktion im in Halit eingebetteten Anhydrit. In diesem Zusammenhang wäre die Beeinflussung dieser mikrobiellen Prozesse durch die Zufuhr von Elektronendonatoren infolge der Metallkorrosion sowie anschließende Diffusion des Hydrogensulfids Richtung Abfallbehälter vom Interesse für die Langzeitsicherheitsanalysen. Ferner blieb eine Beurteilung von solchen eventuell möglichen Prozessen wie mikrobiell-getriebene Migration von Fluideinschlüssen entlang eines Nährstoffgradienten bislang aus.

17.6 Literatur zu Kapitel 17

/ADA 06/ Adamski, J.C.; Roberts, J.A.; Goldstein, R.H.: Entrapment of bacteria in fluid inclusions in laboratory-grown halite. - *Astrobiology*, Vol. 6, pp. 552-562, 2006.

- /AND 06/ Anderson, C.R.; James, R.E.; Fru, E.C.; Kennedy, C.B.; Pedersen, K.: In situ ecological development of a bacteriogenic iron oxide-producing microbial community from a subsurface granitic rock environment. - *Geobiology*, Vol. 4, pp. 29-42, 2006.
- /BEC 96/ Bechtel, A.; Shieh, Y.-N.; Pervaz, M.; Püttmann, W.: Biodegradation of hydrocarbons and biogeochemical sulfur cycling in the salt dome environment: inferences from sulfur isotope and organic geochemical investigations of the Bahloul Formation at the Bou Grine Zn/Pb ore deposit, Tunisia. - *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 60, pp. 2833-2855, 1996.
- /BEC 98/ Bechtel, A.; Pervaz, M.; Püttmann, W.: Role of organic matter and sulphate-reducing bacteria for metal sulphide precipitation in the Bahloul Formation at the Bou Grine Zn/Pb deposit (Tunisia). - *Chemical Geology*, Vol. 144, pp. 1-21, 1998.
- /BIB 83/ Bibo, F.-J.; Söngen, R.; Fresenius R.E.: Vermehrungsfähige Mikroorganismen in Steinsalz aus primären Lagerstätten. - *Kali und Steinsalz*, Vol. 8, pp. 367-373, 1983.
- /CAS 99/ Castanier, S.; Perthuisot, J.-P.; Matrat, M.; Morvan, J.-Y.: The salt ooids of Berre salt works (Bouches du Rhône, France): the role of bacteria in salt crystallization. - *Sedimentary Geology*, Vol. 125, pp. 9-21, 1999.
- /CHR 62/ Christian, J.H.B.; Waltho, J.A.: Solute concentrations within cells of halophilic and nonhalophilic bacteria. - *Biochimica et Biophysica Acta*, Vol. 65, pp. 506-508, 1962.
- /DOM 63/ Dombrowski, H.: Bacteria from paleozoic salt deposits. - *Annals of New York Academy of Sciences*, Vol. 108, pp. 453-460, 1963.
- /EHR 98/ Ehgartner, B.; Neal, J.; Hinkebein, T.: Gas releases from salt. - Sandia National Laboratories, Report SAND98-1354, Albuquerque, NM, 1998.

- /FEN 06/ Fendrihan, S.; Legat, A.; Gruber, C.; Pfaffenhuemer, M.; Weidler, G.; Gerbl, F.; Stan-Lotter, H.: Extremely halophilic archaea and the issue of long term microbial survival. - *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, Vol. 5, pp. 1569-1605, 2006.
- /FRA 93/ Francis, A.J.; Gillow, J.B.: Effects of microbial processes on gas generation under expected WIPP repository conditions. - Brookhaven National Laboratory, Annual Report through 1992, BNL-49518, Upton, NY, 1993.
- /GRA 04/ Grant, W.D.: Life at low water activity. - *Philosophical Transactions of the Royal Society London*, Vol. B 359, pp. 1249-1267, 2004.
- /HAL 07/ Hallsworth, J.E.; Yakimov, M.M.; Golyshin, P.N.; Gillion, J.L.; D'Auria, G.; de Lima Alves, F.; La Cono, V.; Genovese, M.; McKew, B.A.; Hayes, S.L.; Harris, G.; Giuliano, L.; Timmis, K.N.; McGenity, T.J.: Limits of life in MgCl₂-containing environments: chaotropicity defines the window. - *Environmental Microbiology*, Vol. 9, pp. 801-813, 2007.
- /HAZ 01/ Hazen, R.M.; Roedder, E.: How old are bacteria from the Permian age? - *Nature*, Vol. 411, p. 155, 2001.
- /HEB 05/ Hebsgaard, M.B.; Phillips, M.J.; Willerslev, E.: Geologically ancient DNA: Fact or artefact? - *Trends in Microbiology*, Vol. 13, pp. 212-220, 2005.
- /JOH 07/ Johnson, S.S.; Hebsgaard, M.B.; Christensen, T.R.; Mastepanov, M.; Nielsen, R.; Munch, K.; Brand, T.; Gilbert, M.T.P.; Zuber, M.T.; Bunce, M.; Rønn, R.; Gilichinsky, D.; Froese, D.; Willerslev, E.: Ancient bacteria show evidence of DNA repair. - *Proc. Nat. Academy of Sciences of the USA*, Vol. 104, pp. 14401-14405, 2007.

- /KMI 10/ Kminek, G.; Rummel, J.D.; Cockell, C.S.; Atlas, R.; Barlow, N.; Beaty, D.; Boynton, W.; Carr, M.; Clifford, S.; Conley, C.A.; Davila, A.F.; Debus, A.; Doran, P.; Hecht, M.; Heldmann, J.; Helbert, J.; Hipkin, V.; Horneck, G.; Kieft, T. L.; Klingelhoefer, G.; Meyer, M.; Newsom, H.; Ori, G.G.; Parnell, J.; Prieur, D.; Raulin, F.; Schulze-Makuch, D.; Spry, J. A.; Stabekis, P. E.; Stackebrandt, E.; Vago, J.; Viso, M.; Voytek, M.; Wells L.; Westall, F.: Report of the COSPAR mars special regions colloquium. - *Advances in Space Research*, Vol. 46, pp. 811-829, 2010.
- /KOT 05/ Kottemann, M.; Kish, A.; Iloanusi, C.; Bjork, S.; DiRuggiero J.: Physiological responses of the halophilic archaeon *Halobacterium* sp. strain NRC1 to desiccation and gamma irradiation. - *Extremophiles*, Vol. 9, pp. 219-227, 2005.
- /KOV 08/ Kovalevych, V.M.; Peryt, T.-M.; Shanina, S.N.; Wieclaw, D.; Lytvyniuk, S.F.: Geochemical aureoles around oil and gas accumulations in the Zechstein (Upper Permian) of Poland: analysis of fluid inclusions in halite and bitumens in rock salt. - *Journal of Petroleum Geology*, Vol. 31, pp. 245-262, 2008.
- /KUP 78/ Kupfer, D.H.: Problems associated with anomalous zones in Louisiana salt stocks, USA. - *Proc. 5th Int. Symp. on Salt*, The Northern Ohio Geological Society, Inc., Cleveland, Ohio, pp. 119-134, 1978.
- /LIT 07/ Little, B. J.; Lee, J.S.: *Microbiologically influenced corrosion*. - John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2007.
- /LOW 05/ Lowenstein, T.K.; Timofeeff, M.N.; Kovalevych, V.M.; Horita, J.: The major ion composition of Permian seawater. - *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 69, pp. 1701-1719, 2005.
- /MCG 00/ McGenity, T.J.; Gemmell, R.T.; Grant W.D.; Stan-Lotter H.: Origins of halophilic microorganisms in ancient salt deposits. - *Environmental Microbiology*, Vol. 2, pp. 243-250, 2000.

- /MEL 11/ Meleshyn, A.: Microbial processes relevant for long-term performance of radioactive waste repositories in clays. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-291, 117 S., Köln 2011.
- /MOR 03/ Mormile, M.R.; Biesen, M.A.; Gutierrez, M.C.; Ventosa, A.; Pavlovich, J.B.; Onstott, T.C.; Fredrickson, J.K.: Isolation of *Halobacterium salinarum* retrieved directly from halite brine inclusions. - *Environmental Microbiology*, Vol. 5, pp. 1094-1102, 2003.
- /NAR 12/ Narasingarao, P.; Podell, S.; Ugalde, J.A.; Brochier-Armanet, C.; Emerson, J.B.; Brocks, J.J.; Heidelberg, K.B.; Banfield, J.F.; Allen, E.E.: De novo metagenomic assembly reveals abundant novel major lineage of Archaea in hypersaline microbial communities. - *The ISME Journal*, Vol. 6, pp. 81-93, 2012.
- /NIC 02/ Nickle, D.C.; Learn, G.H.; Rain, M.W.; Mullins, J.I.; Mittler, J.E.: Curiously modern DNA for a "250 million-year-old" bacterium. - *Journal of Molecular Evolution*, Vol. 54, pp. 134-137, 2002.
- /NOR 88/ Norton, C.F.; Grant, W.D.: Survival of halobacteria within fluid inclusions in salt crystals. - *Journal of General Microbiology*, Vol. 134, pp. 1365-1373, 1988.
- /NOR 93/ Norton, C.F.; McGenity, T.J.; Grant, W.D.: Archaeal halophiles (halobacteria) from two British salt mines. - *Journal of General Microbiology*, Vol. 139, pp. 1077-1081, 1993.
- /ORE 11/ Oren, A.: Thermodynamic limits to microbial life at high salt concentrations. - *Environmental Microbiology*, Vol. 13, pp. 1908-1923, 2011.
- /PAR 09/ Park, J.S.; Vreeland, R.H.; Cho, B.C.; Lowenstein, T.K.; Timofeeff, M.N.; Rosenzweig, W.D.: Haloarchaeal diversity in 23, 121 and 419 MYA salts. - *Geobiology*, Vol. 7, pp. 515-523, 2009.

- /PIR 95/ Pironon, J.; Pagel, M.; L  v  que, M.-H.; Mog  , M.: Organic inclusions in salt. Part I: Solid and liquid organic matter, carbon dioxide and nitrogen species in fluid inclusions from the Bresse basin (France). - *Organic Geochemistry*, Vol. 23, pp. 391-402, 1995.
- /POS 88/ Posey, H.H.; Kyle, J.R.: Fluid–rock interactions in the salt dome environment: an introduction and review. - *Chemical Geology*, Vol. 74, pp. 1-24, 1988.
- /SAS 94/ Sassen, R.; Cole, G.A.; Drozd, R.; Roberts, H. H.: Oligocene to Holocene hydrocarbon migration and salt-dome carbonates, northern Gulf of Mexico. - *Marine and Petroleum Geology*, Vol. 11, pp. 55-65, 1994.
- /SAS 08/ Sass, A.M.; McKew, B.A.; Sass, H.; Fichtel, J.; Timmis, K.N.; McGenity, T.J.: Diversity of Bacillus-like organisms isolated from deep-sea hypersaline anoxic sediments. - *Saline Systems*, Vol. 4, ch. 8.1-8.11, 2008.
- /SAT 05/ Satterfield, C.L.; Lowenstein, T.K.; Vreeland, R.H.; Rosenzweig, W.D.; Powers, D.W.: New evidence for 250 Ma age of halotolerant bacterium from a Permian salt crystal. - *Geology*, Vol. 33, pp. 265-268, 2005.
- /SAU 96/ Saunders, J.A.; Thomas, R.C.: Origin of 'exotic' minerals in Mississippi salt dome cap rocks: results of reaction-path modeling. - *Applied Geochemistry*, Vol. 11, pp. 667-676, 1996.
- /SCH 07/ Schl  der, Z.; Burliga, S.; Urai, J.L.: Dynamic and static recrystallization-related microstructures in halite samples from the K  dawa salt wall (central Poland) as revealed by gamma-irradiation. - *Neues Jahrbuch f  r Mineralogie und Petrologie*, Vol. 184, pp. 17-28, 2007.
- /SCH 10/ Schubert, B.A.; Timofeeff, M.N.; Lowenstein, T.K.; Polle, J.E.W.: Dunaliella cells in fluid inclusions in halite: significance for long-term survival of prokaryotes. - *Geomicrobiology Journal*, Vol. 27, pp. 61-75, 2010.
- /SIE 01/ Siemann, M.G.; Ellendorff, B.: The composition of gases in fluid inclusions of late Permian (Zechstein) marine evaporites in Northern Germany. - *Chemical Geology*, Vol. 173, pp. 31-44, 2001.

- /SON 95/ Sonnenfeld, P.: The color of rock salt—a review. - *Sedimentary Geology*, Vol. 94, pp. 267-276, 1995.
- /STA 99/ Stan-Lotter, H.; McGenity, T.J.; Legat, A.; Denner, E.B.M.; Glaser, K.; Stetter, K.O.; Wanner, G.: Very similar strains of *Halococcus salifodinae* are found in geographically separated Permo-Triassic salt deposits. - *Microbiology*, Vol. 145, pp. 3565-3574, 1999.
- /SWA 12/ Swanson, J.S.; Reed, D.T.; Ams, D.A.; Norden, D.; Simmons, K.A.: Status report on the microbial characterization of halite and groundwater samples from the WIPP. - Los Alamos National Laboratory, Report LA-UR-12-22824, Carlsbad, NM, 2012.
- /TUR 06/ Turkin, A.A.; Sugonyako, A.V.; Vainshtein, D.I.; den Hartog, H.W.: Radiolysis of NaCl at high and low temperatures: development of size distribution of bubbles and colloids. - *Journal of Physics: Condensed Matter* 18, pp. 5655-5668, 2006.
- /URA 85/ Urai, J.L.; Boland, J.N.: Development of microstructures and the origin of hematite in naturally deformed carnallite. - *Neues Jahrbuch für Mineralogie - Monatshefte*, pp. 58-72, 1985.
- /VRE 98/ Vreeland, R.H.; Piselli, A.F.; McDonnough, S.; Myer, S.S.: Distribution and diversity of halophilic bacteria in a subsurface salt formation. - *Extremophiles*, Vol. 2, pp. 321-331, 1998.
- /VRE 00/ Vreeland, R.H.; Rosenzweig, W.D.; Powers, D.W.: Isolation of a 250 million-year-old halotolerant bacterium from a primary salt crystal. - *Nature*, Vol. 407, pp. 897-900, 2000.
- /WES 08/ Weselucha-Birczyńska, A.; Tobała, T.; Natkaniec-Nowak, L.: Raman microscopy of inclusions in blue halites. - *Vibrational Spectroscopy*, Vol. 48, pp. 302-307, 2008.
- /WIL 05/ Willerslev, E.; Hebsgaard, M.B.: New evidence for 250 Ma age of halotolerant bacterium from a Permian salt crystal: Comment. - *Geology*, Vol. 33, p. 93, 2005.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Die Rolle Natürlicher Analoga im Langzeitsicherheitsnachweis; Erläuterungen siehe Text.....	5
Abb. 3.1	Wichtige Elemente des radiologischen Langzeitsicherheitsnachweises /BUH 08/.....	7
Abb. 4.1	Salzstrukturen in Norddeutschland; Quelle: BGR, http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Bilder/Salzstruk_NDtl_p.html?view=render%5BNeuesFenster%5D (25.11.2014).....	13
Abb. 4.2	Salzformationen am Golf von Mexico /MEL 91/	15
Abb. 4.3	Versatzkompaktion infolge Streckenkonvergenz auf der 750-m-Sohle im ehemaligen Salzbergwerk Asse II /BRE 99/	34
Abb. 4.4	Basaltintrusionen in Steinsalz (links) und in Kalisalz (rechts) in der Werra-Fulda-Region /KNI 89/ - Durchmesser der Basaltintrusion in dieser Abbildung ca. 30 cm.....	37
Abb. 5.1	Gemessene Permeabilitäten in Bohrungen um die ausgekleidete Strecke (links) und unterhalb der offenen Strecke (rechts) /WIE 01/	41
Abb. 5.2	Experimentell bestimmte Korrosionstiefen beim Umsatz Sulfat resistenter Mörtel und Betone mit Magnesiumsulfat reichen Lösungen (gestrichelte Linie: Ausgleichsgerade der experimentellen Daten) und mögliche Bedeutung von Analoga-Studien /HAG 09/.....	47
Abb. 6.1	Mikroskopische Strukturen von Borosilikat- (links) und Basalt-Gläsern (rechts), die einer NaCl-Lösung unter hohen Temperaturen ausgesetzt waren /LUT 85/; Details siehe Text.....	55
Abb. 9.1	<i>Boudinage</i> -Klassifikation nach /GOS 04/	97

Abb. 9.2	Mögliche Boudin-Formen und Nomenklatur der am häufigsten vorkommenden Fragmente nach /GOS 04/; B_b = <i>curvature of boudin exterior</i> , B_f = <i>curvature of boudin face</i>	98
Abb. 9.3	Foto einer boudinierten Gesteinsprobe (a); in den Ausschnittsvergrößerungen (b, c).....	100
Abb. 9.4	Ergebnis der <i>Boudinage</i> an kompetenten Schichten mit unterschiedlichen Materialeigenschaften	101
Abb. 9.5	Reihenfolge der Kluftbildung, Erreichen der Kluftsättigung und Spannungsverteilung in einem Dreischichtmodell.....	102
Abb. 9.6	Dreischichtmodelle mit modellierten Klüften bei Erreichen der Kluftsättigung.....	103
Abb. 9.7	Dreischichtmodelle mit einem unterschiedlichen Homogenitätsindex (m) der kompetenten Schicht und modellierte Klüfte bei Kluftsättigung /TAN 08/	104
Abb. 9.8	Schematischer Querschnitt durch den Salzstock Gorleben (basierend auf /BOR 91/ geändert in /ISI 08/).....	105
Abb. 9.9	Boudinage an einer etwa 10 cm mächtigen Schicht der Gorleben-Bank /HAM 12/	106
Abb. 9.10	Verschiedene Boudinformen im Bereich des Anhydritmittelsalzes im ERA Morsleben /HAM 12/	107
Abb. 10.1	Bohrkerngewinnung von kompaktiertem Salzgrus aus der Schachanlage Asse II, 800 m-Sohle im Rahmen des Debora-Vorhabens /ROT 99/	118
Abb. 10.2	Freigelegter Erhitzer aus dem TSS-Versuch, Schachanlage Asse II /ROT 99/	118
Abb. 10.3	Endstücke eines Bohrkerns aus einer Bohrung in den Altversatz von der 1260/1275 m-Sohle des Salzbergwerks Riedel /BRA 08/	119

Abb. 11.1	Isotopensignatur von Wassereinträgen in das Salzbergwerk Kłodawa (Polen). Die Bezeichnung „Zahl1/Zahl2“ (z. B. 14/550) gibt die laufende Nummer (Zahl1, bspw. 14) und die Tiefe des Auftretens (Zahl2, bspw. 550) eines Wassereintrags an /DUL 00/	137
Abb.11.2	Zusammenhang zwischen $\delta^{37}\text{Cl}$ und dem Cl/Br-Verhältnis für Salzlaugen aus Fluideinschlüssen in Quarz- und Karbonatadern einer Uranlagerstätte im paläoproterozoischen Athabasca Becken in Canada (SW = Meerwasser) /RIC 11/.....	137
Abb.11.3	Zusammenhang zwischen $\delta^{34}\text{S}$ und $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in Fluideinschlüssen im Salz IV des Mulhouse Beckens in Elsass (Frankreich)	138
Abb.11.4	Typische Verengung der Fluideinschlüsse in Halit-Kristallen aus dem Gorlebener Hauptsalz /SIE 01/	140
Abb. 12.1	Nach Versuchsende freigelegter Erhitzer aus dem Erhitzerversuch /ROT 86/.....	148
Abb. 12.2	Basaltintrusion in Steinsalz in der Werra-Region /KNI 89/; der Durchmesser der Intrusion beträgt ca. 30 cm	150
Abb. 13.1	Ergebnisse von Permeabilitätsmessungen in Bohrungen von der mit Stahlguss ausgekleideten Strecke (links) „Dammjoch“ und in der Streckensohle im nicht ausgekleideten Bereich (rechts) /WIE 04/.....	161
Abb. 13.2	Im Salzbergwerk Hallstatt gefundene Werkzeuge und bergwerkliche Gebrauchsgegenstände, hier die älteste bisher entdeckte Holzstiege der Welt	162
Abb. 13.3	Blick auf eine ehemalige, konvergierte Strecke im Grubengebäude der Schachanlage Asse II westlich von Schacht 4 auf der 700 m-Sohle /ASS 12/	163
Abb. 13.4	Sohle 637/658 Zugang BS2 unmittelbar nach der Auffahrung – Ehemaliger Schacht, von dem noch das Holz und die Kabel zu sehen sind /ASS 12/	164

Abb. 13.5	700 m Sohle: Neue Strecke kreuzt ehemalige Strecke (links und rechts zu sehen).....	164
Abb. 13.6	Rissbildung, die in /BAU 91/ als „kryogene Klüfte“ bezeichnet wird, auf der 350 m-Sohle im Kalisalzbergwerk Sigmundshall (Salzstock Bokeloh) (Fotos aus /HAM 12/)	166
Abb. 14.1	Übereinander gelegte Karten der Erdbebenzonen /GFZ 15/ und der untersuchungswürdigen Wirtsgesteinsformationen in Deutschland (/BRÄ 12/, nach Unterlagen der BGR)	173
Abb. 14.2	Flussdiagramm zur Auswirkung seismischer Wellen auf Untertage-Bauwerke (/BER 87/, /LEN 96/). UT = „Untertage“, h = Herdtiefe des Bebens, D = Epizentraldistanz /GÖB 12/	175
Abb. 14.3	Bei Gebirgsschlägen im Kalibergbau freigesetzte Energie (Magnitude) in Abhängigkeit von zerstörter Grubenfeldfläche A_{BF} , Konvergenzsprung Δz , Pfeilertragfähigkeitsabfall $\Delta\sigma_{PF}$ und Abbauverlustfaktor f_{AB} (aus /MIN 10/)	179
Abb. 15.1	Ziegelmauer zur Abschirmung von Laugenzuflüssen (1903) durch den klüftigen Anhydrit im Feld Agathe/Staßfurt (links); Laugendurchbruch vom Feld Achenbach in das Feld Agathe (rechts) /DEI 11/	193
Abb. 15.2	Konzept des Streckenverschlusses Immenrode (Dammbauwerk) (aus /RAU 09/, nach /ALA 99/)	194
Abb. 15.3	Schachtanlage Asse II: Kammerverschluss zwischen den Abbauen 5 und 7 auf der 750 m-Sohle; verwendete Materialien: Salzbeton (a, c) sowie Bitumen (b) und Salzgrus (d) /GLA 91/	194
Abb. 15.4	Beispiel eines funktionsfähigen Dammes in Rocanville/Kanada /THY 12/	195
Abb. 15.5	Kurzzeitdichtung im Salzbergwerk Wieliczka (1, 2, 3, 4 = Rohrleitungen; 5, 7 = Mauern, Nr. 6 stellt das eigentliche Dichtungselement dar) /GON 12/	195

Abb. 15.5	Aufbau und Konstruktionsmerkmale von Streckenverschlüssen bzw. Dammbauwerken: a) Leopoldshall 1898, b) Sachsen-Weimar (beide aus /FLI 03/), c) Glückauf 1902, d) Hattorf 1929 (beide aus /HOE 99a/)	197
Abb. 15.6	Elemente eines langzeitsicheren Schachtverschlusses (links) sowie Grundkonzept für den Prototyp eines nach Bergrecht genehmigungsfähigen Schachtverschlusses (rechts) /WIL 08/	198
Abb. 15.7	Aufbau und Konstruktionsmerkmale von ausgewählten Schachtverschlüssen: Schachtverschlussbauwerk Bernterode (oben links), Burggraf Berndorf (oben rechts) /SIT 82/, Dichtungs-, Widerlagerkonstruktion „Beberstedt“ (unten links), Abschlusskonstruktion Schacht „Hüpstedt“ und Schachtgerüst „Beberstedt“ (unten rechts) /WTE 12/	199
Abb. 15.8	Verschlüsse in den ehemaligen Kalischächten Leopoldshall I und II /JOC 07/	200
Abb. 16.1	Unvollständig (links, ein Ventil) und vollständig (rechts, ein Rohr) korrodierte Proben aus ehemaligen Salzabbaukammern des Salzbergwerkes Wieliczka /MAL 10/	215
Abb. 16.2	Korrosionsschichten entlang eines Querschnittes durch ein vollständig korrodiertes Rohr aus ehemaligen Salzabbaukammern des Salzbergwerkes Wieliczka /MAL 10/	215
Abb. 16.3	Bläschenförmige Aggregate an einem Kettenglied aus ehemaligen Salzabbaukammern des Salzbergwerkes Wieliczka /MAL 10/	216
Abb. 17.1	Mikroben (mit Pfeilen markiert) und eine Dunaliella-Alge (links oben) in einem 12.000 Jahre altem Fluideinschluss im Halit aus einer 8,7 m tiefen Salzsicht in Death Valley /SCH 10/	223
Abb. 17.2	Schematische Darstellung der Quellen von Elektronendonatoren und -akzeptoren und der möglichen Produkte des mikrobiellen Metabolismus in einem Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Steinsalz	225

Tabellenverzeichnis

Tab. 4.1	Beispiele für untersuchte Salzstöcke außerhalb der norddeutschen Tiefebene	14
Tab. 4.2	Subrosionsraten für den Salzstock Gorleben nach /KÖT 07/	20
Tab. 4.3	Aufstiegsraten für den Salzstock Gorleben nach /ZIR 91/	22
Tab. 7.1	Mögliche Natürliche Analoga für die Integrität der geologischen Barriere.....	69
Tab. 7.2	Mögliche Natürliche Analoga für die Integrität der geotechnischen Barriere.....	70
Tab. 7.3	Mögliche Natürliche Analoga für die Bewertung von Freisetzungsszenarien.....	71
Tab. 10.1	Potentielle Analoga-Standorte zur Untersuchung von Salzgrus	130
Tab. 13.1	Zuordnung eines bestimmten Vorfaktors zu einer bestimmten Kriechklasse /HUN 03/.....	158
Tab. 13.2	Vergleich der wesentlichen Parameter bei unterirdischen Kernexplosionen und Endlagern bzgl. des Druckaufbaus /RSK 05/.....	159
Tab. 14.1	Gebirgsschläge im Kalibergbau (aus /MIN 10/.....)	178
Tab. 15.1	Produzierende UTD-, UTV-Bergwerke/Kavernen, deren Betriebsgenehmigung auf einem positiven Langzeitsicherheitsnachweis beruht /ALW 12/.....	189
Tab. 15.2	Beispiele für die Errichtung wirksamer Verschlüsse nach unkontrollierbarem Laugenzufluss (aus /HOE 99/); die Konzeption der aufgeführten Dammbauwerke ist Grundlage für heutige Designplanungen.....	196

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

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