



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig

Untersuchung • Prüfung • Beratung • Begutachtung

**Eigenschaften und Potential
stratiformer Salz-Formationen
für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle**

**Eigenschaften und Potential
stratiformer Salz-Formationen
für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle**

Beauftragung: 45201365

Auftraggeber: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)
31224 Peine

Auftragnehmer: Institut für Gebirgsmechanik GmbH
Friederikenstraße 60
04279 Leipzig

Bestellnummer (AG): 45201365 / 17.06.2021
Auftragsnummer (AN): 37/2021

Ort, Erstelldatum: Leipzig, 31.01.2022



Dr. rer. nat. Till Popp
— Prokurist —

Impressum:

Auftraggeber: Bundes-Gesellschaft für Endlagerung
Willy-Brandt-Str. 5
38226 Salzgitter
Telefon: 030 18333-7000
E-Mail: poststelle@bge.de
Internet: www.bge.de

Ersteller: Dr. Till Popp
Institut für Gebirgsmechanik GmbH
Friederikenstraße 60
04279 Leipzig
Telefon: 0341 33600 104
Telefax: 0341 33600 308
E-Mail: office@ifg-leipzig.de
Internet: www.ifg-leipzig.com

Abbildungen: Institut für Gebirgsmechanik GmbH, soweit nicht anders vermerkt.

Revisionsblatt:

Rev.	Rev.- Stand (Datum)	revidierte Seite	Kat. *)	Erläuterung der Revision
00				Ersterstellung
*) Kategorie R = redaktionelle Korrektur Kategorie V = verdeutlichende Verbesserung Kategorie S = substantielle Revision Mindestens bei der Kategorie S müssen Erläuterungen angegeben werden				

KURZFASSUNG

Verfasser: Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IfG)

Titel: Eigenschaften und Potential stratiformer Salz-Formationen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle

Stand: 31.01.2022

Seit 2013 hat in Deutschland die Standortsuche für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle mit Inkrafttreten des ersten Standortauswahlgesetzes (StandAG) neu begonnen. Zielstellung eines vergleichenden Standortauswahlverfahrens ist, bis 2031 einen Standort zu finden, der für einen Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahre die bestmögliche Sicherheit für den Einschluss hochradioaktiver Abfälle bietet.

Sicherheitstechnischer Grundgedanke ist dabei der Einschluss der Schadstoffe im sogenannten einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG). Im Mittelpunkt eines Langzeitsicherheitsnachweises steht folgerichtig der systematische Nachweis des langfristig sicheren Einschlusses der endgelagerten Abfälle durch den Nachweis der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (als wesentliche geologische Barriere) sowie der geotechnischen Barrieren.

Aufgrund ihrer einzigartigen Eigenschaften, u.a. Dichtheit und plastische Verformbarkeit, werden Salzgesteine in Deutschland sowie weltweit seit Jahrzehnten bergbaulich und insbesondere für die Energiespeicherung (u.a. als Gasspeicherkavernen) genutzt. Sie treten in Deutschland häufig auf (wobei im Rahmen dieser Studie nur der Zechstein betrachtet wird). Während Steinsalz in Salzstöcken (Typ: steile Lagerung) vor allem in Nordwestdeutschland verbreitet ist, dominieren in Mitteldeutschland flach gelagerte Salzgesteine (Typ: flache Lagerung) sowie in Teilen Nordostdeutschlands als Variation Salzkippen (Typ: Salzkippen). Beide Typen werden im englischen Sprachgebrauch unter dem Begriff „bedded salt“ beschrieben.

Aufgrund der intensiven bergbaulichen Nutzung liegt ein umfangreicher Kenntnisstand zu den allgemeinen Eigenschaften von Salzformationen sowie ein Prozessverständnis möglicher hydro-mechanischer Einwirkungen vor, die im Rahmen einer Standortauswahl relevant sind:

- Die stratiform gelagerten Salzlagerstätten weisen für die vorkommenden Evaporitgesteine aufgrund ihrer sedimentären Genese eine **große lithologische Vielfalt** auf. Aufgrund sukzessiver Änderungen der Lösungszusammensetzung und der daraus folgenden Mineralausscheidungen variieren die Gesteinsvarietäten von den klassischen, plastisch deformierbaren Salzgesteinen (Steinsalz, Kalisalz) über niedrig poröse Tongesteine (Salztone) bis hin zu spröden Festgesteinen (Anhydrit). Die lithologische Gesteinsabfolge ist zyklisch und tritt in mehreren Ausscheidungsfolgen auf.
- Bezüglich der Wirksamkeit der unterschiedlichen Salzgesteine als geologische Barriere ist es wichtig festzuhalten, dass sie als saline Wirtsgesteinsformationen, unabhängig von ihrer lithologischen Vielfalt, **im unverritzten Zustand hydraulisch dicht sind**. Voraussetzungen dafür sind, dass sie im Gesteinsverband mechanisch eingespannt sind und keine tektonische oder bergbaulich induzierte Schädigung vorliegt. Diese Annahme ist bei einer späteren untertägigen Erkundung durch Untersuchungen zu belegen.

Gleichzeitig resultiert mit der (teilweise mehrfachen zyklischen) Abfolge von Salz- und Tongesteinen **ein natürliches Multi-Barrierensystem**, das unter Berücksichtigung einer vorliegenden Redundanz und Diversität sicherheitstechnische Vorteile bietet.

- Aufgrund dieser Situation ergibt sich eine hohe Robust des natürlichen salinaren Multi-Barrierensystems, das somit selbst **extreme dynamische Beanspruchungen** ertragen

kann, wie sie bei den stärksten in Deutschland anzunehmenden Erdbeben auftreten würden. Dies wird durch Untersuchungen zum Verhalten der geologischen Schutzschichten, während und nach Gebirgsschlägen belegt (vgl. Situation in der Grube Teutschenthal nach dem GS 1996 sowie anderen Gruben), bei denen die integrale Integrität und Dichtigkeit der Barrieren nicht verletzt wurde. Daraus folgt, obwohl dies bei der Endlagerauswahl keine Anforderung ist, dass die Erdbebensicherheit von Endlagern im Salz bei hinreichender Barrierenmächtigkeit im Langzeitprozess gegeben ist.

- Für die Durchführung der Standortauswahl werden Empfehlungen für (im Sinne von § 24 StandAG) sicherheitstechnisch günstige Konstellationen gegeben, u.a.:
 - Der ewG soll in einem räumlich möglichst großen und homogenen Teilbereich des Steinsalz-Gebirges angelegt werden. Steinsalz wird hier als nahezu mono-mineralisches Gestein mit einem **Halit-Anteil > 88%** definiert, womit es eindeutig von benachbarten Gesteinseinheiten, u.a. Anhydrit oder Kalisalz, abgrenzbar ist. Lithologische Anhydrit-Einschaltungen, die in bankiger Ausbildung lokal bis ca. 1 m mächtig sein können, sind als natürlicher Bestandteil des Steinsalz-Gebirges anzusehen.
Aufgrund des hier vorliegenden Kenntnisstandes wird **das Staßfurt-Steinsalz (z2Na)** in der Ausbildung als Salzkissen (vgl. KOSINA-Vorhaben) als der **mutmaßlich günstigste Einlagerungshorizont** bzw. Teil einer Salzstruktur eingeschätzt¹. Vorteile gegenüber Steinsalzeinschaltungen in anderen Zechstein-Folgen sind u.a. große Mächtigkeiten und das Fehlen von eingeschalteten Kaliflözen.
 - Zur Minimierung des Risikos eines potentiellen Lösungszutritts sollte **die Endlagertiefe für den ewG mindestens unterhalb von 800 m Teufe** liegen.
 - Zur Gewährleistung bergbaulich beherrschbarer Randbedingungen (u.a. geringe Konvergenz) sollte **die maximale Endlagertiefe 1.000 - 1.200 m** betragen.
 - Tonige Horizonte im Hangenden der jeweiligen Salzformation (z.B. der Rote Salzton, z4T sowie im z5 – z7 und dem unt. Buntsandstein, su) sind langfristig günstig, weil sie als Wasserstauer einer möglichen Subrosion entgegenwirken.
- Bei der Auswahl potentieller Endlagerstandorte sind zur Vermeidung potentieller Wegsamkeiten **bergbau- und langzeitsicherheitlich begründete Sicherheitsabstände**, u.a. zu einem wasserführenden Deckgebirge oder zu potentiellen Störungszonen, einzuhalten. Zum Kalilager beträgt der zulässige Mindestabstand 50 m.
- **Qualifizierte und robuste Langzeitprognosen der Barrierenintegrität** können bereits im Rahmen von vorläufigen Sicherheitsanalysen (rvSU) für eine Standortauswahl hilfreich sein. Zur Prüfung der etablierten Versagungskriterien, (1) Dilatanz- und (2) Minimalspannungskriterium stehen verifizierte numerische Rechentools sowie geeignete Gesteinsparametersätze der lithologischen Gesteinseinheiten zur Verfügung.
Die methodische Vorgehensweise des Integritätsnachweises im Rahmen einer Sicherheitsanalyse für Endlager von HAW-Abfällen bzw. für Untertagedeponien für chemisch-toxische Abfälle sowie für Versatzbergwerke mit umweltgefährdenden Abfallstoffen ist qualitativ gleich.

Darüber hinaus werden als Referenzbeispiele für Salzstrukturen der flachen Lagerung Ergebnisse aus dem generischen Forschungsvorhaben KOSINA sowie aus der bergbaulichen Praxis die Situation der Grube Teutschenthal (S.-A.) dargestellt sowie als geologisches Analogon die Situation der Messinischen Salze im Mittelmeer betrachtet.

Abschließend werden Empfehlungen zum identifizierten Forschungsbedarf gegeben, wobei dies u.a. die Notwendigkeit eines Untertagelabors für generische Untersuchungen einschließt.

¹ Dies ist aber keine allgemein gültige Vorfestlegung, da bei der Standortauswahl jeweils die konkrete Standortsituation zu betrachten ist, womit auch andere Konstellationen möglich sein können.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	5
1 Aufgabenstellung	2
1.1 Beauftragung	2
1.2 Veranlassung.....	2
1.3 Stratiforme Salzvorkommen in Mitteldeutschland.....	3
1.4 Zielstellung / Bearbeitungskonzept	5
2 Flachgelagerte Salzformationen Mitteldeutschlands	6
2.1 Stratigraphie und Stoffbestand.....	6
2.1.1 Lagerstättenkundliche Genese und Vorkommen	6
2.1.1.1 Grundlagen – die Ablagerungsfolge des Zechsteinsalinars	7
2.1.1.2 Lagerungsänderungen / Salz-Metamorphose	9
2.1.2 Lithologische Komponenten der Salzgesteinsbarriere	12
2.1.2.1 Steinsalz.....	12
2.1.2.2 Anhydrit-Gestein.....	17
2.1.2.3 Tongestein (Salztone)	20
2.1.2.4 Kalisalz.....	22
2.1.2.5 Subsalinar	24
2.1.2.6 Deckgebirge / Suprasalinar	25
2.1.3 Salzlösungs- und Gasvorkommen.....	26
2.1.3.1 Vorkommen von Salzlösungen	26
2.1.3.2 Vorkommen von Gasen.....	27
2.2 Regionale Aspekte stratiformer Salzformationen Mitteldeutschlands	28
2.2.1 Bergbaulich / räumliche Gliederung.....	28
2.2.2 Neotektonische Prozesse – Gebirgsbau und tektonische Beanspruchung	29
2.2.3 Salzauslaugung - Subrosion.....	32
3 Vorgehensweise Sicherheitsnachweis / Anforderungen.....	34
3.1 Sicherheits- und Nachweiskonzepte	34
3.1.1 Vorbemerkung.....	34
3.1.2 Nachweiskonzept Endlager für HAW – Sicherer Einschluss.....	34
3.1.2.1 Vorgehensweise für Standort-Auswahl.....	34
3.1.2.2 Grundgedanken Sicherheitskonzept.....	35
3.1.3 Nachweiskonzept UTD/UTV - Vollständiger Einschluss	36
3.1.3.1 UTD/UTV in Deutschland	36
3.1.3.2 Gesetzliche Anforderungen / Nachweiskonzepte.....	37
3.1.4 Fazit.....	38
3.1.5 Anforderungen / Nachweis der geologischen Barrierenintegrität	39
3.2 Rahmenbedingungen für eine Standortauswahl.....	42
3.2.1 Einführung.....	42
3.2.2 Empfehlung einer Maximalteufe	43
3.2.3 Empfehlung einer Mindestteufe	44
3.2.3.1 Relevanz potentieller Lösungszutritte	44
3.2.3.2 Erläuterung.....	44
3.2.4 Sicherheitsabstände zu potentiellen Störungsbereichen	45
3.2.4.1 Vorbemerkung.....	45
3.2.4.2 Sicherheitsabstände aus dem aktiven Bergbau	46
3.2.4.3 Nachweis einer Pfeiler-Mindestmächtigkeit gegenüber Fluiden	47
3.2.4.4 Vorliegende Empfehlungen für die Standortsuche.....	48
4 Salzgesteine – THM-Eigenschaften	50
4.1 Wirtsgesteinsspezifische Randbedingungen.....	50
4.1.1 Hydraulische Dichtheit Salzgebirge – Natürliche Analogia	50

4.1.2	Barrierenintegrität – Nahfeld/Fernfeld.....	51
4.1.3	Maximaltemperatur Salz.....	52
4.2	Steinsalz.....	53
4.2.1	Mechanische Eigenschaften.....	53
4.2.1.1	Zeitabhängiges Verformungsverhalten	53
4.2.1.2	Mechanische Schädigung / Gefüge-induzierte Anisotropieeffekte	56
4.2.2	Hydraulische Eigenschaften / Dichtheit	58
4.3	Hauptanhydrit (z3AN)	59
4.3.1	Mechanische Eigenschaften.....	59
4.3.2	Hydraulische Eigenschaften / Dichtheit	60
4.4	Salztone (z3T, z4T)	60
4.4.1	Mechanische Eigenschaften.....	61
4.4.2	Hydraulische Eigenschaften	63
4.5	Kali-Salzgesteine	64
4.5.1	Mechanische Eigenschaften.....	64
4.5.2	Hydraulische Eigenschaften	66
4.5.3	Thermische Zersetzung Carnallit.....	66
4.6	Simulation der hydro-mechanischen Eigenschaften von Salzgesteinen.....	67
4.7	Zusammenfassende Bewertung des Kenntnisstandes.....	69
5	Referenzbeispiele zur Integrität der Salinarbarriere in flacher Lagerung	70
5.1	Das Vorhaben KOSINA	70
5.1.1	Einführung.....	70
5.1.2	Einlagerungskonzept / Umsetzung im Rechenmodell.....	70
5.1.3	Referenzmodell - Geologische Situation.....	71
5.1.4	Vorgehensweise Integritätsnachweis	72
5.1.5	Berechnungsergebnisse.....	72
5.1.6	Zusammenfassung / Bewertung der Barriereintegrität.....	75
5.2	Erfahrungen auf Basis LZSN der Grube Teutschenthal	76
5.2.1	Einführung.....	76
5.2.2	Geologische Barriere – Sicherheitskonzept.....	76
5.2.3	Regionale Situation / geologische Barriere.....	78
5.2.4	Robustheit der Salinarbarriere bei dynamischer Belastung - GS 1996	82
5.2.4.1	Einführung.....	82
5.2.4.2	Numerische Analyse des Gebirgsschlagereignisses.....	83
5.2.4.3	Integritätsnachweis der Hangend-Barriere oberhalb des Bruchfeldes 1996.....	85
5.3	Messinische Salzkrise.....	88
5.3.1	Problemstellung	88
5.3.2	Geohydraulik / „Over-pressure“ / Permeabilität.....	91
5.3.3	Fachliche Einordnung.....	91
6	Schlussfolgerungen für Standortsuche in der flachen Lagerung	94
6.1	Zusammenfassung – Kenntnisstand	94
6.2	Empfehlungen zur Durchführung Standortauswahl	96
6.3	Identifizierter Forschungsbedarf.....	97
7	Literaturverzeichnis.....	99

Tabellenverzeichnis

Tab. 1-1. Eigenschaften unterschiedlicher Salzformationen, abhängig vom Strukturtyp (mit einer qualitativen Bewertung, entsprechend der Farbsignatur).....	4
Tab. 2-1. Lithostratigraphische Übersicht der salinaren Schichtenfolge des Zechsteins für verschiedene Teilregionen Sachsen-Anhalts (aus Bachmann et al, 2008)	8

Tab. 2-2. Gliederung des Hauptanhydrits zwischen Südharz und Allertalgraben (aus Kamlot, 2008).....	19
Tab. 2-3. Häufige Salzminerale (Mineralname /-formel).....	22
Tab. 4-1. Im BMWi-Verbundprojekt „Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen“ beteiligte Projektpartner, Stoffgesetze und Rechenprogramme (zur Kennwertbestimmung: KW; für die Modellberechnungen: FDM: Finite-Differenzen-Methode, FEM: Finite-Elemente-Methode) (nach Hampel et al., 2010).....	67

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1. Morphologische Ausprägung unterschiedlicher Salzformationen.....	3
Abb. 2-1. Vorkommen und Verbreitung der salinaren Schichtenfolgen in Deutschland (aus Reinhold et al., 2014). a) Stratigrafische Position und Bezeichnung. b) Schematische on-shore-Verbreitung der Halit-führenden Schichtenfolgen in Deutschland	6
Abb. 2-2. Vollständige und ungestörte Ausscheidungsfolge mariner Evaporite im Vertikalprofil, nach Herrmann (1981).....	7
Abb. 2-3. Lagerungsformen untertage; a) Lokale Salzaufwölbung im Steinsalz (Grube Bernburg) – „Grönaer Sattel: Steinsalz z2NA “. Der Zugang zur sogenannten Testkaverne liegt im Zentrum des Sattels, erkennbar an den umlaufenden Anhydrit-Linien; b) Lokale Großboudinage im Kaliflöz (Grube Teutschenthal): “Neue Werkstatt” – Staßfurt Kalilager z2SF (Bildquelle: IfG).....	10
Abb. 2-4. Probensuite für das Staßfurt-Steinsalz von verschiedenen Lokalitäten in unterschiedlicher tektonischer Überprägung: Übergang von flacher bzw. gering verstellter Lagerung zur steilen Lagerung mit textureller Umverteilung der Akzessorien.....	10
Abb. 2-5. Staßfurt-Steinsalz (z2Na) mit Anhydrit-Einschaltungen im Zentralbereich des Grönaer Sattels (Grube Bernburg, S.-A.). a) Zugang zur sogen. Testkaverne (Streckenhöhe ca. 3 m). Der Ausschnitt zeigt eine Anhydritlinie im Konturanschnitt; b) Herausgelöste Anhydritlinie: ob.: in der Sol-Kaverne, unt.: als Handstück (Quelle: IfG).....	13
Abb. 2-6. Lithologisch/mechanische Variabilität von Steinsalz - Korrelation des Kriechvermögens mit den lithologischen Gefügeeigenschaften von Steinsalz am Beispiel des Salzstockes Gorleben (aus Hunsche et al., 2003). Neben den Gehalten und der Art der Verunreinigungen ist insbesondere die Verteilung der sekundären Mineralphasen für die Kriecheigenschaften von Bedeutung. Sie ändert sich beispielsweise im Staßfurthauptsalz (z2) von lokal angereicherten grobvolumigen Anhydritaggregaten im z2HS1 (Knäuelsalz) zu diffus verteilten Feinstkornverteilungen von Polyhalit und untergeordnet Anhydrit in der Salzmatrix im z2HG (vgl. idealisierte Verteilungsmuster der Verunreinigungen). 16	
Abb. 2-7. Faltenartige Morphologie der lithologischen Trennfläche der Schichtgrenze Hauptanhydrit/Leine-Steinsalz unterhalb der Sohle der Neuen Verbindungsstrecke (grün-markierter Streckenverlauf) im Bereich Lösungszutritt „Wetterumfahrung“ - Horizontalschnitt. Auf Basis von Sondierbohrungen wurde die Teufenlage (Zahlen geben die Tiefe in m bezogen auf die Streckensohle an) der Oberfläche des partiell in der Sohle aufgeschlossenen Hauptanhydrits kartiert (IfG, unveröffentlicht).....	18
Abb. 2-8. Lithologisches Profil für den Roten Salzton (z4T): li.) Horizontales Strecken-Querprofil (Stoss-Kartierung); re.) Lithologisches Mächtigkeitsprofil (verändert nach Minkley et al. (2013).	21
Abb. 2-9. Primäre bis frühdiagenetische Faziesdifferenzierung des Kaliflözes Staßfurt im Raum Mitteldeutschland – Schema (aus Herbert & Schwandt, 2007)	23

Abb. 2-10. Strukturgeologischer Überblick: Übersichtskarte des prätertiären Untergrundes (aus GFE, 1999).	30
Abb. 3-1. Versatzbergwerke/-kavernen (UTV) und Untertagedeponien (UTD) in Deutschland; a) Standort, Betreiber, weitere Nutzung; b) Karte der räumlichen Verteilung (aus Rottlaender, 2013).	37
Abb. 3-2. Dilatanz- und Minimalspannungskriterium.	40
Abb. 3-3. Pseudo-plastische Zone (Bruchfestigkeit β_{80}): Teufen 600m – 1200m; $k_0 = 1$ (aus Lux, 2002).	43
Abb. 3-4. Verteilung fluider Medien im Hauptanhydrit an der NE-Flanke des Staßfurter Sattels (Schwandt, 1991).	44
Abb. 3-5. Schematische Darstellung der vorläufigen, hier empfohlenen Sicherheitsabstände (verändert nach Popp et al., 2022).	49
Abb. 4-1. Blick in den Eingangsbereich des Kavernenhohlraums nach dem CO ₂ -Ausbruch vom 01.10.13 in der Grube Unterbreizbach (links) und geologisches Profil der Salzlagerstätte mit Dimensionen des Kavernenhohlraums (rechts) (aus Liu et al., 2018).	50
Abb. 4-2. Konturverhalten um einen kreisförmigen Streckenquerschnitt mit Ausbildung einer ALZ (Spannungsverteilung mit σ_0 - Tangentialspannung = σ_1 größte Hauptspannung und $\sigma_r = \sigma_2$ kleinste Hauptspannung, Porosität ϕ und Porendruckvariation p_{fl}) – schematische Darstellung (ergänzt nach Salzer, 1989).	51
Abb. 4-3. Die drei Kriechphasen von Salzgesteinen (Hunsche et al. 2003).	54
Abb. 4-4. Konzeptioneller Ansatz zur Beschreibung der Kriecheigenschaften von Steinsalz auf Basis der wirksamen Verformungsmechanismen (Spiers et al., 2005).	54
Abb. 4-5. Langzeitverformungsverhalten von Steinsalz (WIPP-Salz): stationäre Kriechraten vs. Deviatorspannung (Quelle: IfG, Laborversuche im Rahmen des WEIMOS-Vorhabens).	55
Abb. 4-6. Festigkeits- und Dilatanzverhalten von Steinsalz (Mittleres Werra-Steinsalz) im triaxialen Druckversuch: (links) Triaxiale Druckfestigkeitskurven und (rechts) Dilatanzkurven für verschiedene Manteldruckstufen σ_3 (aus Knöfel, 2018).	57
Abb. 4-7. Beispiele für geomechanische Schichtflächeneffekte in flach-gelagerten Salzformationen: a) Firstfall in einer Abbaukammer; b) Sohlenaufbruch; c) Verschiebung an einer Scherfläche im Übergang Steinsalz/Sylvinit.	57
Abb. 4-8. Der Großversuch Springen; a) Schematische Skizze des Versuchsaufbaus mit Großbohrloch, Abdichtung mit MgO-Beton-Pfropfen; b) Vertikales Spannungsprofil auf Basis von HF-Messungen; c) berechnete Spannungsverteilung (Vertikalschnitt), entsprechend der vorliegenden Hohlraumgeometrie (verändert aus Popp et al., 2015).	59
Abb. 4-9. Festigkeit Hauptanhydrit (z3AN Pöthen) in Abhängigkeit vom Manteldruck (aus Kamlot, 2008).	59
Abb. 4-10. Geotechnische Klassifizierung von tonhaltigen Böden und Gesteinen, anhand ihrer ein-axialen Druckfestigkeit.	61
Abb. 4-11. Triaxiale Festigkeitsuntersuchungen des Roten Salztons (z4T).	62
Abb. 4-12. Injektionsversuche mit Lösung am Roten Salztou Teutschenthal - Serie 691, $\sigma_3 = \sigma_1 = 10$ MPa - (Injektion über zentrales Bohrloch (l = 15 mm) mit radialer Ausbreitung) – Lösungsporeabilität vs. Differenzdruck ($p_{fl} - \sigma_3$).	63
Abb. 4-13. Spannungsverformungsverhalten von Steinsalz (li.) und Carnallit (re.) (IfG, unveröffentlichte Daten).	65
Abb. 4-14. Sekundäre Kriechraten (IfG) für Steinsalz und Carnallit im Vergleich zum Kriechgesetz BGRa (mit verschiedenen Kriechklassen) sowie BGRc (aus Liu et al., 2017).	66

Abb. 4-15 Vergleich ausgewählter Phänomene und Eigenschaften sowie deren Umsetzung in den Stoffmodellen (nach Günther, persönl. Mittlg.)	68
Abb. 5-1. 2D-Berechnungsmodell der Salzkissenstruktur (aus Liu et al., 2018).....	70
Abb. 5-2: Geologisches Referenzmodell „Salzkissen“ (Längsschnitt mit drei Querprofilen) mit den stratigrafischen Modelleinheiten (verändert nach Völkner et al. 2017). Das Inset (li. ob.) zeigt schematisch die modellierte Anordnung und Feldes-Dimensionen der Bohrlochlagerung.....	71
Abb. 5-3: Ergebnisse aus den 2D-Modellberechnungen der vertikalen Bohrlochlagerung - Salzkissen (aus Liu et al., 2018); a) Temperaturentwicklung; b) Vertikalverschiebungen.....	73
Abb. 5-4: Fluiddruckkriterium 82 Jahre nach Einlagerung aus der 3D-Modellberechnung (BGR) für die vertikale Bohrlochlagerung - Salzkissen, mit detaillierter Seitenansicht (aus Liu et al., 2018).	74
Abb. 5-5: Dilatante Bereiche in der Salzbarriere 82 Jahren nach Einlagerung aus der 3D-Modellberechnung (BGR) für die vertikale Bohrlochlagerung - Salzkissen, mit detaillierter Seitenansicht (aus Liu et al., 2018).	74
Abb. 5-6. Schematische Darstellung der geologischen Barriereeinheiten für die Grube Teutschenthal sowie der Lösungsbewegungen im Grubengebäude mit den Auswirkungen des Gebirgsschlages 1996, u.a. Ausbildung von Klüftung (bzw. Zerrungsspalten oberhalb der Bruchfeldkanten).....	77
Abb. 5-7. Lage der Grube Teutschenthal mit den GF TEU, GF ANG und GF SAL (oben) und geologische Übersichtsschnitte A - A', B - B' (unten) (aus Schwandt, 1990).....	78
Abb. 5-8. Geologischer Vertikalschnitt durch die Verbindungsstrecke Teutschenthal – Salzmünde (verändert nach Reichenbach, 2008).....	80
Abb. 5-9. Gebirgsmechanisches Berechnungsmodell Ostfeld Teutschenthal: gemessene und berechnete Senkungen (aus Minkley et al., 2010).....	83
Abb. 5-10. Minimale Hauptspannung an der Oberkante Leine-Steinsalz Sekunden nach dem Gebirgsschlag (aus Minkley et al., 2010).	84
Abb. 5-11. Sicherheitsfaktor Frac- Kriterium 4 Sekunden nach Gebirgsschlag mit (rechts) und ohne (links) hydraulische Zugfestigkeit im Roten Salzton (aus Minkley et al., 2010).	84
Abb. 5-12. Verlauf der minimalen Einspannung für den untersuchten W-E-Profilsschnitt entlang der „Neuen Wetterstrecke Petra“ über dem Bruchfeld (Messungen bei 5,0 m Fracteuße im Bohrloch) (aus Minkley et al., 2010).....	86
Abb. 5-13. Permeabilitätstests in Bohrlöchern im Carnallitit (aus Minkley et al, 2010):.....	87
Abb. 5-14. Tektonische und geografische Lage des Untersuchungsgebietes (aus Dale et al., 2021).	89
Abb. 5-15. Seismische Signatur (Reflektions-Seismogramme) verschiedener Geometrien von Flüssigkeitsaustrittszonen („pipes“).	90
Abb. 5-16. Zusammenstellung von Literaturdaten zur Dichtheit (Permeabilität) von Salzgesteinen (aus Dale et al., 2021).	90
Abb. 5-17. Synoptischer Überblick über die Ausscheidung und Diagenese in Halit-Ablagerungen (Beispiel: Totes Meer) (aus GRS, 2020 – Literaturzitate s. dort)..	92
Abb. 5-18. Abnahme der Porosität von rezenten Salzablagerungen (des Quartärs) mit zunehmender Teufe (aus Casas et al., 1989).....	92

Anzahl von Seiten im Dokument	114
--	------------

Verwendete Abkürzungen

ALZ (EDZ)	Auflockerungszone
ARGE	Arbeitsgemeinschaft
BF	Bruchfeld
CARLA	Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallitit)
EDZ	Excavated disturbed/damaged zone, synonym zur ALZ verwendet
DepV	Deponieverordnung
ERAM	Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben
ewG	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich
FuE	Forschung und Entwicklung
GF TEU / ANG / SAL	Grubenfelder Teutschenthal, Angersdorf, Salzmünde
GFE	Geologische Forschung und Erkundung – GFE GmbH, Halle
GS	Gebirgsschlag
GTS	Grube Teutschenthal Sicherungs GmbH & Co. KG
HA	Hauptanhydrit
IfG	Institut für Gebirgsmechanik, Leipzig
KW	Kohlenwasserstoffe
LAGB	Landesamt für Geologie und Bergwesen des Landes Sachsen-Anhalt
LZS / LZSN	Langzeitsicherheit / Langzeitsicherheitsnachweis
NF	Nahfeld
rvSU	repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen
TA Abfall	Technische Anleitung Abfall
TC / TC-MS	Triaxialer Festigkeitsversuch / Triaxialer Mehrstufen-Festigkeitsversuch
UTD/UTV	Untertagedeponie / -verwertung
VersatzV	Versatzverordnung
VSG	Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben
WI	Wirtsgestein
W&T	Stand von Wissenschaft und Technik

1 Aufgabenstellung

1.1 Beauftragung

Mit Datum vom 17. Juni 2021 wurde das Institut für Gebirgsmechanik (IfG) von der Bundesgesellschaft für Endlagerung beauftragt, ausgehend von den Erfahrungen des IfG eine Studie zu den Eigenschaften und dem Potential stratiformer Salz-Formationen (inkl. Salzkissen) für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle zu erstellen (Bestellnummer: 45201365).

1.2 Veranlassung

Festgelegt durch das „Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle“ (Standortauswahlgesetz - StandAG) ist die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) die Vorhabenträgerin für das Standortauswahlverfahren.

Dabei soll derjenige Standort identifiziert werden, der im Vergleich mit allen anderen Alternativen *„die bestmögliche Sicherheit für den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle für einen Zeitraum von einer Million Jahren gewährleistet“*² (StandAG, § 1 Absatz 2), wobei *„grundsätzlich für die Endlagerung hoch-radioaktiver Abfälle die Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein in Betracht kommen* (StandAG, § 1 Absatz 3).

Die Standortsuche wird auf Basis der weißen Deutschlandkarte, entsprechend den Regeln und Kriterien sowie den Anforderungen an ein Endlager für hochradioaktive Abfälle, wie sie die „Kommission zur Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe“ entwickelt hat, durchgeführt.

In drei Phasen wird der Suchraum immer weiter eingeeignet: (1) vom gesamten Bundesgebiet, über überörtlich zu erkundende Standortregionen und (2) über unterörtlich zu erkundende Standorte, bis (3) hin zu einem Vorschlag für einen Standort mit der bestmöglichen Sicherheit für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle.

Im September 2020 hat die BGE als Abschluss des ersten Abschnitts den Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG (Stand 28.09.2020) vorgelegt (BGE, 2020a). Dabei wurden 90 Teilgebiete ausgewiesen. Auf Basis einer schrittweisen Vorgehensweise³ wurden diejenigen Gebiete identifiziert, welche günstige geologische Voraussetzungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle erwarten lassen. Als Ergebnis wurden für das Wirtsgestein Steinsalz insgesamt 74 Teilgebiete mit einer Fläche von ca. 30.450 km² ausgewiesen, von denen sich die Mehrzahl auf Salz in steilere Lagerung und der Rest, 14 Teilgebiete, in stratiformen, also flachen Steinsalzformationen befinden.

Für den anschließenden Schritt zur Einengung auf wenige potentielle Standortregionen, für die eine konkrete oberirdische Erkundung erfolgt, sind repräsentative vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) vorgesehen. Da aus der Vergangenheit in Deutschland bisher keine Erfahrungen für derartige Analysen vorliegen, ergibt sich als notwendiger Zwischenschritt eine

² Original übernommene Textstellen aus dem StandAG bzw. den Erläuterungen zum StandAG (Deutscher Bundestag, 2017) sind im vorliegenden Bericht kursiv gekennzeichnet.

³ Arbeitsschritte zur Ermittlung von Teilgebieten:

- (1) Ausschluss der Gebiete, die nach den gesetzlich festgelegten Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG (u.a. aktive Störungszonen, seismische Aktivität, Vulkanismus) nicht als Endlagerstandort für hochradioaktive Abfälle geeignet sind;
- (2) Identifizierung der Gebiete, welche die Mindestanforderungen (min./max. Teufe: 300 m / 1500 m, Mächtigkeit: 100 m, Mindestfläche: 3 km²) nach § 23 StandAG erfüllen;
- (3) Bewertung der Gebiete anhand der 11 geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG hinsichtlich ihrer günstigen geologischen Gesamtsituation für die Eignung als Standort für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle.

Entwicklung von Methoden für die Ermittlung solcher für die Endlagerung günstigen Standortregionen (BGE-Pressemitteilung vom 05.07.2021⁴). Grundlage dafür bilden ausgewählte Teilgebiete, oder auch nur einzelne Gebiete in Teilgebieten, die von der BGE als Gebiete zur Methodenentwicklung benannt wurden.

Im Gegensatz zu den für die Festlegung eines Endlagerstandortes konkurrierenden Wirtsgesteinen Ton- bzw. Kristallingestein werden Salzgesteine in Deutschland seit mehr als 150 Jahren intensiv bergbaulich untertägig zur Salzgewinnung genutzt⁵. Infolgedessen liegt bereits eine Vielzahl von Informationen zu den verschiedenen Salzvorkommen im Zusammenhang mit den jeweiligen geologischen, geomechanischen und bergmännischen Verhältnissen vor.

1.3 Stratiforme Salzvorkommen in Mitteldeutschland

Salzformationen mit mächtigen Steinsalzpartien sind im tieferen Untergrund von Deutschland weit verbreitet. Sie kommen in unterschiedlichen morphologischen Ausprägungen vor, wie sie in Abb. 1-1 dargestellt sind.

Während Salzgesteine in verschiedenen stratigrafischen Epochen als marine Sedimente primär flach abgelagert wurden und teilweise trotz entsprechender Versenkung und Überlagerung so erhalten blieben (Salzgesteine in stratiformer Lagerung), gibt es auch regional Bereiche, in denen die Salzvorkommen sich verändert haben. U.a. abhängig von der primären Salzmächtigkeit und der Teufenlage sowie infolge tektonischer Einwirkungen, ist es teilweise zu einer kinetischen Mobilisation (Halokinese) mit einfacher Aufwölbung (Salzkissen, Subtyp Steinsalz in stratiformer Lagerung) oder bis zum Durchbruch des Salzes in das überlagernde Deckgebirge mit einer Steilstellung der Schichten gekommen (Steinsalz in steiler Lagerung).

Aufgrund der strukturellen Veränderungen, insbesondere infolge der Halokinese, unterscheiden sich die beiden Haupt-Strukturtypen in ihren Eigenschaften, woraus sich für die Auswahl eines Endlagerstandortes, z. B. bzgl. geometrischer Ausbildung und Wirtsgesteinseigenschaften, (hier zunächst qualitativ) individuelle Vor- und Nachteile ergeben können (vgl. Tab. 1-1).

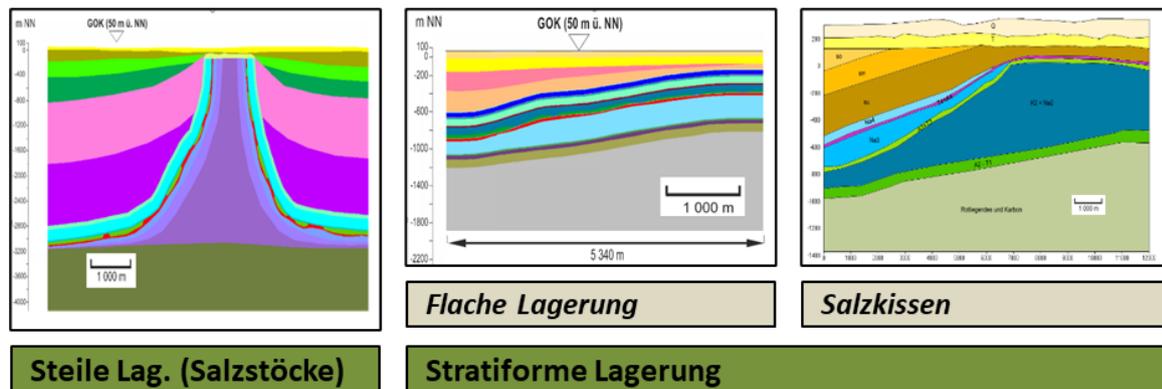


Abb. 1-1. Morphologische Ausprägung unterschiedlicher Salzformationen.

Für eine Bewertung bzw. eine Wichtung der Relevanz der unterschiedlichen Gesteinseigenschaften für die weitergehende Unterteilung möglicher Teilgebiete in Bezug auf geeignete Regionen oder Standorte sind hinreichende Daten oder ausreichende Erfahrungen notwendig.

⁴ <https://www.bge.de/de/endlagersuche/meldungen-und-pressemitteilungen/meldung/news/2021/7/614-standortauswahl/>

⁵ Während die Eröffnung des Staßfurter Salzbergbaues am 31. Januar 1852 nach Abteufen der Schächte „von der Heydt“ und „von Manteuffel“ zunächst nur auf die bergbauliche Gewinnung von Steinsalz ausgerichtet war, wurden aufgrund des Bedarfs für die Landwirtschaft ab 1861 vor allem auch Kalisalze gefördert. Dies gilt als Beginn des Kali-Bergbaus weltweit.

Tab. 1-1. Eigenschaften unterschiedlicher Salzformationen, abhängig vom Strukturtyp (mit einer qualitativen Bewertung, entsprechend der Farbsignatur⁶).

Strukturtyp / Subtyp	Stratiform gelagerte Salzgesteine		Steile Lagerung / Salzstock
	Flache Lagerung	Salzkissen	
Eigenschaften			
Räumliche Ausdehnung	Groß	Ausreichend	Ausreichend
Mächtigkeit	Begrenzt	Erheblich	Groß
Geologie / Internbau	Einfach	Teilweise inhomogen	Komplex
Gleichförmigkeit / Schichtung	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Anhydrit-/Tonlagen ➤ Kalisalz ➤ Salzton-Einschaltungen 		<ul style="list-style-type: none"> ➤ Homogenisierte Salzpartien im Zentrum, Kalisalze (Carnallit)
Deckgebirge	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Intaktes Deckgebirge mit überlagernden Tonschichten ➤ An der Basis der Deckschichten teilweise keine Wasserzutritte ➤ Potentiell Fluid-führender Sockel 		<ul style="list-style-type: none"> ➤ Oft kein intaktes Deckgebirge (Subrosion, glaziale Überprägung) ➤ Wasserführend / Salzspiegel
Hydro-Mechanik	<p>„Anisotrope Eigenschaften“</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Mechanisch/hydraulische Schwächeflächen (z.B. Schichtflächen, lithologische Grenzen / Materialwechsel) ➤ Schlechte Datenbasis zur Bewertung 		<p>„Isotrope Eigenschaften“</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Geringe Permeabilität ➤ Umfangreiche geomechanische Datenbasis (Einzelstrukturen)
Relevanz Lösungszutritt / (Absauf-) Szenarien	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Horizontale Schichten <ul style="list-style-type: none"> ➤ Vertikal: Sperrschichteffekt durch Salzton = Schutz vor Abtragung (Subrosion) ➤ Lateral: horiz. Fluidausbreitung // Schichtung, Salzhang 		<ul style="list-style-type: none"> ➤ Steil-stehende Schichten <ul style="list-style-type: none"> ➤ Anhydritszenario: geklüfteter Anhydrit ➤ Tiefgreifende Subrosion im Kalilager

Als Beispiele stratiform gelagerter Salzformationen lassen sich Salzlagerstätten Mitteldeutschlands heranziehen, wobei diese aufgrund ihrer großräumigen Ausdehnung Gebiete der Bundesländer Hessen, Niedersachsen, Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Thüringen umfassen. In allen vier Bundesländern haben Salze bzw. die vorkommenden Salzformationen als Bodenschätze eine große wirtschaftliche Bedeutung erlangt, wozu u.a. die Bergbaureviere Nordharz, Südharz, Saale-Unstrut und Werra-Thüringen sowie im weiteren Sinne auch die Scholle von Calvörde gehören.

Damit sind zwar die Gegebenheiten der Salzablagerungen lokal teilweise sehr gut bekannt, aber gleichzeitig ist zu konstatieren, dass eben wegen dieser intensiven Nutzung (z.B. konventionelle oder solende Gewinnung sowie Gasspeicherung) diese Teilbereiche nicht mehr zur Verfügung stehen. Weiterhin ergeben sich bereits aufgrund tektonischer sowie exogener Einwirkungen regionale Begrenzungen infolge Störungs- oder Subrosionszonen.

Das bedeutet aber nicht, dass diese großräumigen Teilgebiete per se pauschal auszuschließen sind, **sondern dass auf Basis begründeter Annahmen ausreichende Sicherheitsabstände zu potentiell beeinflussten Randbereichen zu definieren sind.** Diese müssen gewährleisten, dass an einem potentiellen Endlagerstandort die Salinarbarrieren hinreichend mächtig und so beschaffen sind, dass eine mögliche Beeinflussung eines potentiellen Endlagerstandortes für mindestens 1 Mio. Jahre ausschließen ist.

⁶ Hinweis: die Farbgebung der Eigenschaftsfelder entspricht einer qualitativen Bewertung im Sinne von: grün = vorteilhaft, gelb = bedingt günstig bzw. Datenbasis für abschließende Bewertung noch nicht ausreichend, rot = nachteilig.

Die Festlegung der Sicherheitsabstände muss räumlich, d.h. zum Nebengebirge sowie zum Liegenden und Hangenden erfolgen. Dafür können vorliegende bergbauliche Erfahrungen, z. B. Ergebnisse aus modelltechnischen Bewertungen von Sicherheitspfeilern benachbarter Bergwerke sowie Ergebnisse aus der Analyse von Versagensfällen als technische Analoga herangezogen werden (u.a. das „Absaufen von Bergwerken“).

Insgesamt liegt als Ergebnis der für die bergbauliche Nutzung verschiedener Salzbergwerke notwendigen Erkundungs- und Gewinnungsarbeiten ein enormer Daten- und Erfahrungsfundus vor, der eine wertvolle Grundlage sowohl zur Methodenentwicklung als auch für eine nachfolgende Standortregion-Auswahl darstellt. Damit ergibt sich die Notwendigkeit, die vorliegenden Daten und Erfahrungen zusammenzufassen und hinsichtlich der Eignung als Ausgangspunkt für die Standortauswahl zu bewerten.

1.4 Zielstellung / Bearbeitungskonzept

Zielstellung der vorliegenden Bearbeitung ist eine Darstellung des bei IfG vorliegenden Kenntnisstandes zu stratiformen Salzformationen, vor allem auf Basis der für bergbauliche Nutzungen durchgeführten gutachterlichen Arbeiten, die in situ-Untersuchungen, Laboruntersuchungen der hydro-mechanischen Eigenschaften und numerischen Modellierungen an verschiedenen Standorten unter Einbeziehung der Erfahrungen aus ca. 30 Jahren Tätigkeit einbezieht.

Vorbemerkungen:

- (1) Der Schwerpunkt der Betrachtungen bezieht sich ausschließlich auf saline Zechsteinvorkommen, wobei geomechanisch/ptrophysikalische Eigenschaften auf lithologisch vergleichbare Gesteine anderer stratigrafischer Einheiten übertragbar sind.
- (2) In der Studie werden räumlich schwerpunktmäßig Standorte im Mitteldeutschen Raum, mit Thüringen und Sachsen-Anhalt, betrachtet. Die vom IfG dort gewonnenen Erfahrungen/Empfehlungen gelten auch für alle anderen Gebiete mit vergleichbarer geologischer Situation und/anderen relevanten Salinarformationen.
- (3) In Analogie zum Forschungsvorhaben KOSINA⁷ wird nachfolgend als möglicher Einlagerungshorizont bevorzugt das Steinsalzlager der Staßfurt-Formation betrachtet, wobei vorbehaltlich notwendiger Eigenschaften, u.a. der Einhaltung von Mindestanforderungen wie Teufenlage oder Mächtigkeit, auch andere stratigrafische Horizonte geeignet sein können. Dies ist somit keine Vorfestlegung für eine Standortauswahl.
- (4) Als Referenzbeispiel einer stratiformen Salzformation wird nachfolgend explizit auf die Situation am Teutschenthaler Sattel mit der ehemaligen Kaligrube Teutschenthal eingegangen. Dabei handelt es sich um einen Standort, der in den letzten Jahrzehnten vom Bearbeiter intensiv untersucht und bewertet worden ist. Dieser ist kein potentieller Endlagerstandort⁸.

Ausgehend von der Definition der wesentlichen Anforderungen zur Gewährleistung der Barrierenintegrität (u.a. Mindestmächtigkeiten und Sicherheitsabstände zu geologisch/strukturellen Schwachstellen) soll eine allgemeine Einschätzung des Potentials „flach-gelagerter Salzformationen“ für die Einlagerung hochradioaktiver Abfälle sowie eine Ableitung / Diskussion der Risikoszenarien für Barrierenintegrität aus geomechanischer Sicht erfolgen. Grundlage dafür

⁷ Im Vorhaben KOSINA wurde das Steinsalzlager der Staßfurt-Formation als Einlagerungshorizont festgelegt, weil es in der vorläufigen Einschätzung in einem Teufenbereich liegt, der für die Errichtung eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente als günstig angesehen wurde und eine Mächtigkeit deutlich größer 100 m aufwies.

⁸ Aufgrund der strukturgeologischen Rahmenbedingungen handelt es sich um eine räumlich sehr begrenzte Struktur, die intensiv zur Kaligewinnung genutzt wurde und wegen der deshalb notwendigen Sicherungsmaßnahmen als potentieller Standort für ein Endlager ausgeschlossen werden kann.

bilden jeweils natürlich/technische Analoga mit konkreten Standort- oder Belastungssituationen, die zur Verifizierung der getroffenen Annahmen herangezogen werden können.

Dies schließt insbesondere die Berücksichtigung bisher vorliegender Erfahrungen aus bergbaulichen Nutzungen sowie als Untertagedeponie (UTD) oder Untertageverwertung (UTV) ein.

Im Folgenden werden die vorliegenden Informationen zur geologischen, strukturgeologischen und hydrogeologischen Situation sowie den Eigenschaften der verschiedenen Schichtglieder und Erfahrungen zur Integritätsbewertung der geologischen Barrieren zusammengefasst. Davon ausgehend lassen sich Empfehlungen zur Abgrenzung von Subbereichen als potentieller Endlagerstandorte sowie abschließend ggfs. ein notwendiger Forschungsbedarf zur Klärung offener Fragen ableiten.

2 Flachgelagerte Salzformationen Mitteldeutschlands

2.1 Stratigraphie und Stoffbestand

2.1.1 Lagerstättenkundliche Genese und Vorkommen

Das Wirtsgestein Steinsalz ist ein durch Verdunstung von Meerwasser oder Binnenwasser entstandenes Sedimentgestein (Evaporit), das Teil einer salinaren Ausscheidungsfolge ist. Die entsprechenden Salzformationen sind aufgrund ihrer Genese im Allgemeinen zyklisch aufgebaut. Neben Steinsalz treten auch andere Salzgesteine auf, die vorwiegend aus Salzmineralen – meist Chloride und Sulfate der Alkali- und Erdalkalimetalle – zusammengesetzt sind.

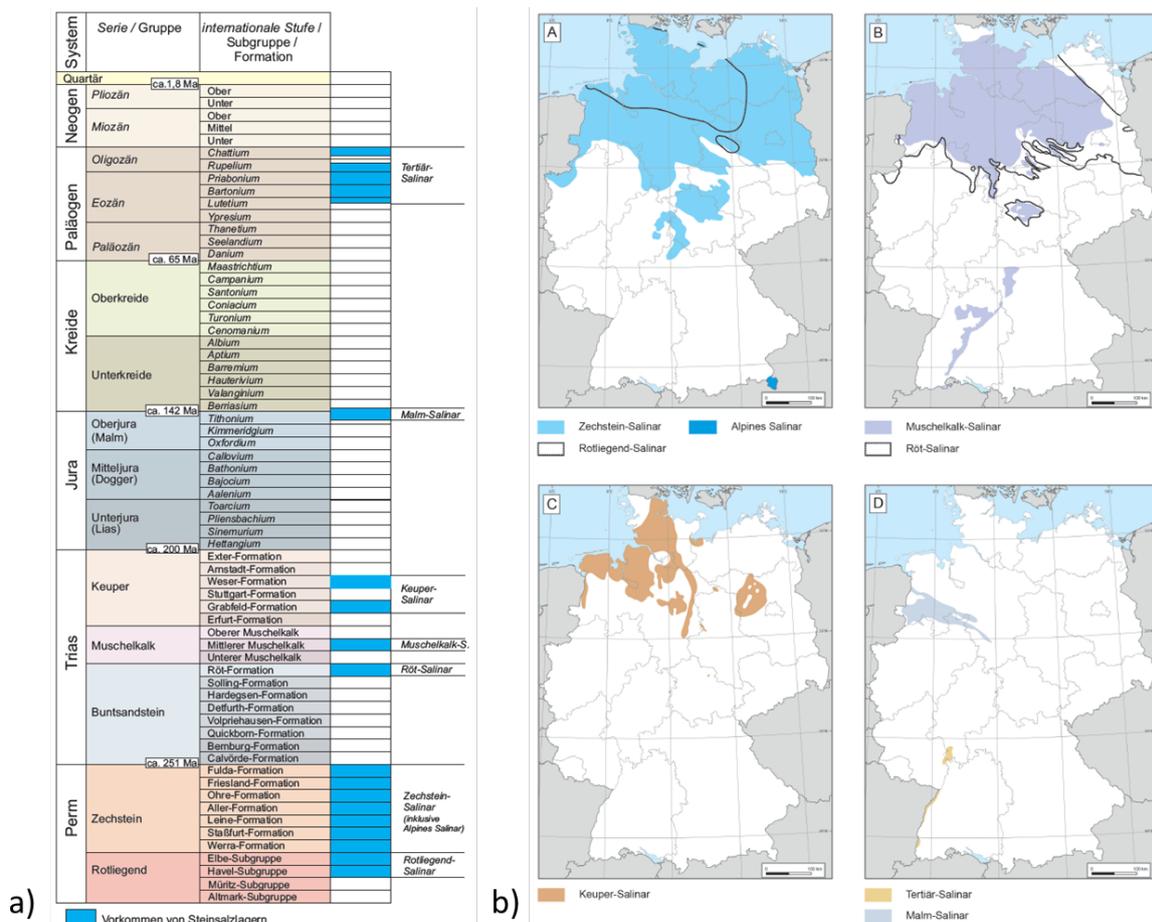


Abb. 2-1. Vorkommen und Verbreitung der salinaren Schichtenfolgen in Deutschland (aus Reinhold et al., 2014). a) Stratigraphische Position und Bezeichnung. b) Schematische on-shore-Verbreitung der Halit-führenden Schichtenfolgen in Deutschland

Entsprechend ihrer Genese kam es in Deutschland zur Ausbildung flach lagernder Salzvorkommen mit unterschiedlicher Mächtigkeit und lithologischer Abfolge, die u.a. mindestens mehrere Zehner Meter mächtige Steinsalzschieben enthalten können (Abb. 2-1).

Eine Abfolge derartiger Steinsalzschieben innerhalb einer Salinar-Formation wird als Steinsalzlager oder Steinsalzfolge bezeichnet. Sie kommen in Deutschland in den einzelnen Formationen der stratigraphischen Einheiten Rotliegend, Zechstein, Röt, Muschelkalk, Keuper, Malm und Tertiär vor (zum Vorkommen und Verbreitung s. hierzu u.a. Reinhold et al., 2014, Bertrams et al., 2020).

In der Literatur finden sich umfassende Darstellungen zur lagerstättenkundlichen Genese heutiger Evaporit-Lagerstätten, weshalb nachfolgend nur wesentliche Grundzüge zusammengefasst werden (für einen Überblick s. Warren, 2016, Bachmann et al., 2008, Herrmann, 1981, u.a.).

2.1.1.1 Grundlagen – die Ablagerungsfolge des Zechsteinsalinars

Salzgesteine treten als Salzformationen mehr oder minder tief im geologischen Untergrund auf. Diese Vorkommen sind in der geologischen Vergangenheit durch solare Verdunstung wässriger Lösungen, mehrheitlich des ozeanischen Wassers in abgeteilten Meeresteilen (Becken), seltener kontinentaler Seen entstanden (Warren, 2016).



Abb. 2-2. Vollständige und ungestörte Ausscheidungsfolge mariner Evaporite im Vertikalprofil, nach Herrmann (1981).

Unter der Voraussetzung einer Barre (Bodenschwelle im Ozean), die den Zufluss von frischem Meerwasser begrenzte, kam es entsprechend der erstmalig von Ochsenius (1877) entwickelten Barretheorie über einen längeren Zeitraum im abgeteilten Meeresbecken zur Erhöhung der Salinität. Abhängig von der Eindunstungsrate wurden verschiedene Salzminerale, entsprechend ihrer Löslichkeit, nacheinander ausgefällt.

Als Teil einer Ausscheidungsfolge in der Reihenfolge höherer Löslichkeit kristallisieren (nach der Ausscheidung von Ton = klastischer Tonfuß) zu Beginn der Meerwasserverdunstung die relativ schwerlöslichen Calciumcarbonate und Gips bzw. Anhydrit, gefolgt von Natriumchlorid (Konzentration des Meerwassers ca. auf das 10-fache).

Die Ausscheidung von NaCl mit Bildung von Halit sowie einem Anteil von Verunreinigungen (hauptsächlich lagenweise Anhydrit und Ton) macht die Hauptmasse aus und wird als „Steinsalz“ bezeichnet (vgl. Kap. 2.1.2.1).

Die sogenannten Edel- bzw. Kalisalze⁹ mit verschiedenen Salzmineralen bilden den Abschluss der sogenannten *progressiven* Phase. Eine Übersicht der in Salzgesteinen an den häufigsten enthaltenen Mineralen gibt Tab. 2-3.

⁹ Hinsichtlich des Stoffbestandes sind 2 Haupttypen von festen Kalisalzlagern zu unterscheiden: der Sulfattyp und der Chloridtyp. Der Sulfattyp ist durch das Auftreten von Mineralen mit Magnesium und Kalium in sulfatischer Bindung (SO₄) charakterisiert. Allerdings fehlen dem überwiegenden Teil der heute bekannten Kalisalzlagern solche sulfatischen K-Mg-Mineralen, da es im Zuge der

Tab. 2-1. Lithostratigraphische Übersicht der salinaren Schichtenfolge des Zechsteins für verschiedene Teilregionen Sachsen-Anhalts (verändert nach Bachmann et al, 2008)

Periode/ System	Stufe/ Unter- stufe Ma	Gruppe	Formation	SE			Merseburg- Zeitz- Osterfeld			
				Calvörde-Scholle	Subherzyn-Mulde	Harzvorland				
Perm	Lopingium	Zechstein (Obere Dyas)	Fulda- Formation (z7)		Oberer Bröckelschiefer (zB3) Schluffstein-Sandstein-Horizont (zB2) Unterer Bröckelschiefer (zB1)		25-35 m			
			Friesland- Formation (z6)	Anhydrit (z6AN) Schluffstein (z6T)	2 m	Graugrüne Grenzbank (z6GG)		< 1 m		
			Ohre- Formation (z5)	Grenzanhydrit (z5ANb) Ohre-Steinsalz (z5NA) Lagenanhydrit (z5ANA) Salzbrockenton (z5T)	6-7 m	"Obere Zechsteinletten"			(ca. 10 m)	
			Aller- Formation (z4)	Grenzanhydrit (z4GA)		< 1 m				
				Tonbrockensalz (br, z4TB) Anhydritmittelsalz (η, z4AM) Tonflockensalz (δ, z4TF) Kristallsalz (γ, z4KS)		Schwaden- und Tonflockensalz (θ und ι, z4ST)		Allersteinsalz (z4NA) 10-50 m		
				Schneesalz (β, z4SS)						
				Basissalz (α, z4BS)						
					Pegmatitanhydrit (z4AN)	1-2,5 m				
					Roter Salztun (z4T)	4-15 m				
			Leine- Formation (z3)	Tonmittelsalz (tm, z3TS3) Tonflockensalz (ι, z3TS2) Tonschwadensalz (θ, z3TS1)		15 m	Schwadensalzzone (θ und ι, z3TS)	10-50 m	Schwaden- und Tonflockensalz (z3TS)	
				Anhydritmittel 1-4 (am1-am4)		ca. 75 m	Anhydritmittelsalz (z3AS)	bis 30 m		
				Linien- salzzone (z3LS) ca. 55 m	Hangendes Begleitsalz (β2, z3LS3)	10 m	Bändersalz (ε, z3BD)	bis 10 m	Leine- Steinsalz (z3NA)	
					Kalisalz- lager Ronnenberg (z3KRO)	~15 m	Übergangsschichten (γ', z3ÜS)			4-11 m
					Linien- salz i. e. S. (β1, z3LS2)	~25 m	Kristallsalz (γ, z3KS)			
					Beta-Liniensalz (z3LS2)					0-16 m
Basissalz (α, z3LS1)		5 m				0-40 m				
		Hauptanhydrit (z3AN)			10-80 m	Platten- dolomit (z3D)				
		Grauer Salztun (z3T)			bis 10 m	bis 25 m				
255	Wuchiapingium	Zechstein (Untere Dyas)		Staßfurt- Formation (z2)	Deckanhydrit (z2ANb) Decksteinsalz (z2NAd) Hangendgruppe Liegendgruppe	1-5 m	Kalisalz- lager Staßfurt (z2KST)	0-70 m	Sangerhäuser Anhydrit (z2SA)	
			Übergangsschichten Kieseritregion Polyhalitregion Anhydritregion			Staßfurtsteinsalz (z2NA)	bis 500 m	max. 142 m	"Obere Letten" 5-10 m	
			Basalanhydrit (z2AN)			1,5-3 m				
			Stinkschiefer (z2S)			4-8 m		Hauptdolomit (z2D) bis 60 m		
257	Wuchiapingium	Zechstein (Untere Dyas)	Werra- Formation (z1)	15-35 m	Oberer Werra- Anhydrit (z1ANb)		max. 76 m	Oberer Werra- Dolomit (z1Db)	0-15 m	
				0-12 m	Werra-Steinsalz (z1NA)				Oberer Werra- Ton (z1Tc)	0-10 m
				15-35 m	Unterer Werra- Anhydrit (z1ANa)		max. 166 m			
				3-10 m	Zechsteinkalk (z1K)		Riffkalke (z1R) bis 42 m		Unterer Werra-Dolomit (z1Da)	bis 70 m
				0,3-0,6 m	Kupferschiefer (z1T)				Unterer Werra-Ton (z1Ta) (Mutterflöz)	bis 4 m
Roo- t- liegend			Eisleben- Formation	Weißliegend (z1WL)		Zechsteinkonglomerat, sandige Fazies (z1S)		Zechsteinkonglomerat (z1C)		

Evaporation des Meerwassers bereits zu stofflichen Verschiebungen infolge bakterieller SO₄-Reduktion und/oder des CaCl₂-Eintrages in das Evaporationsbecken durch Zustrom meteorischer Wässer kam (z. B. Warren, 2009).

Mit wiedereinsetzender besserer Verbindung zum Hauptmeer, kommt es zu einer Lösungsverdünnung, die zu einer Ablagerung in der Reihenfolge niedrigerer Löslichkeit führt. Dies bezeichnet man als *rezessive* Folge oder Phase.

Die in Abb. 2-2 dargestellte Idealabfolge mit progressiver ((Ton –) Karbonat – Sulfat – Steinsalz – Kalisalze) und rezessiver Phase (Steinsalz – Sulfat) wird als Serie oder Zyklus bezeichnet. Ein Zyklus kann infolge wiederholter Meeresspiegelschwankungen oder zeitweiser tektonisch bedingter Veränderungen der Zutrittswege mehrfach auftreten. Die daraus resultierende stratigrafische Gliederung des Zechsteins mit den regional unterschiedlichen Bezeichnungen und Mächtigkeiten der verschiedenen Schichtglieder ist in Tab. 2-1 zusammengefasst.

Entsprechend den verschiedenen Bildungsperioden wird das Zechstein¹⁰ nach Richter-Bernburg in Zechstein 1 – 4 bzw. Werra-, Staßfurt-, Leine- und Aller-Serie (-Formation) unterteilt, wobei es in jüngerer Zeit noch um Zechstein 5, 6 und 7 bzw. Ohre-, Friesland und Fulda-Serie¹¹ (-Formation) ergänzt wurde (DSK, 2011).

Der Vergleich der regional unterschiedlichen Mächtigkeiten bzw. das Auftreten von Schichtlücken in Tab. 2-1 zeigt, dass die Evaporation in den oftmals Tausende Quadratkilometer großen Sedimentationsbecken räumlich nicht homogen und auch zeitlich teilweise recht asynchron verlief. Darüber hinaus kam es beckenweit aber auch zu synchronen Trans- und Regressionseignissen, die in den Evaporiten, z. B. lithologisch durch Materialwechsel manifestiert sind.

Einschaltungen von zunächst gering mächtigen Lagen aus Tonmineralen, die sogenannten „Tonlöser“, zeugen vom Eintrag feinklastischer Sedimentströme in das flachmarine Evaporationsbecken. Sie stellen markante Trennflächen im Gesteinsverband dar, denen wesentliche Bedeutung für die First- und Stoßsicherheit bei der Bergmännischen Gewinnung zukommt.

Infolge länger andauernder Fazieswechseln kann es, abhängig von der Position im Becken, auch zur Bildung von „Ausfällungstonen“ als terrigenes Material (infolge Einschwemmung von den Rändern des Sedimentationsraumes) kommen, die bis >10 m-Mächtigkeit erreichen können (z.B. Grauer oder Roter Salzton).

Die Tatsache, dass Salzformationen aufgrund ihrer Genese als Evaporitgestein sowohl vertikal als auch lateral lithologisch sehr heterogen zusammengesetzt sein können, wobei zwar Steinsalz in Teilbereichen die Hauptausscheidungskomponente mit großer Mächtigkeit darstellt, zeigt die Notwendigkeit die Relevanz und Eigenschaften aller lithologischer Gesteinspartien zu bewerten.

2.1.1.2 Lagerungsänderungen / Salz-Metamorphose¹²

Stratiforme Salzlagerstätten zeichnen sich gemeinhin dadurch aus, dass sie großskalig weitgehend homogene, ungestörte Lagerungsbedingungen aufweisen. Allerdings können schon während der Ablagerung am Beckenrand Massenbewegungen stattgefunden haben, die die primär-flache Lagerung lokal im m – 10er m – 100er m - Maßstab verändert haben.

¹⁰ Die einzelnen Serien werden nach den Gegenden benannt, in denen sie am vollständigsten entwickelt bzw. die größte Ausdehnung besitzen.

¹¹ Entsprechend der aktuellen Festlegungen der Deutschen Stratigraphie-Kommission sind ältere Begriffe wie Übergangfolge, Zechstein-Übergangfolge, Bröckelschiefer (Oberer, Unterer Bröckelschiefer) und Mölln-Folge nicht mehr zu benutzen.

¹² Die Anwendbarkeit des Begriffs Metamorphose ist in der Salz-spezifischen Literatur intensiv diskutiert worden. Gegenüber diagenetischen Prozessen (mit Veränderungen infolge der Umwandlung metastabiler Primärausscheidungen) sind bei Salzgesteinen solche Prozesse als Metamorphose abzugrenzen, bei denen es infolge nachträglich eindringender Lösungen dagegen selbst bei unveränderter Temperatur zu tiefgreifenden Umbildungen kommt (Braitsch, 1962).

Unter dem Druck der auflastenden Gesteine können bereits während der Diagenese bzw. danach, als Ergebnis von tektonischen Gebirgsbewegungen, deutliche Lagerungsänderungen der ursprünglich horizontal abgelagerten Salzsichten stattfinden, die am Ende zu der heutigen morphologischen Ausprägung heutiger Salzformationen geführt haben (vgl. Abb. 1-1). Diese Prozesse werden allgemein unter dem Begriff Halokinese zusammengefasst.

Laterale Salzwanderung führt zu strukturellen Veränderungen in der Lagerstätte, die in Form von Falten, Abscherungen, Großboudinagen oder auch begrenzten Aufwölbungen (Salzkissen) bis hin zu lokalen Sattelbildungen manifestiert ist (Abb. 2-3).

Deshalb werden auch in den großräumig eher flach und stratiform gelagerten salinaren Schichtenfolgen lokal begrenzt flachwellige Deformationsstrukturen und intern z. T. intensiv verfaltete Salzlagen (z. B. Kaliflöze) beobachtet (Intra-Salinarstrukturen) (vgl. Bertrams et al., 2020). Wie dort ausgeführt, handelt es sich dabei um geringfügige Schichtverstellungen oder um lokal verfaltete Salzsichten sowie Flexurbildungen, die z. B. auf das „Abpuffern“ von Bewegungen an Störungszonen im Liegenden und/oder Hangenden der Salzlager zurückzuführen sind.

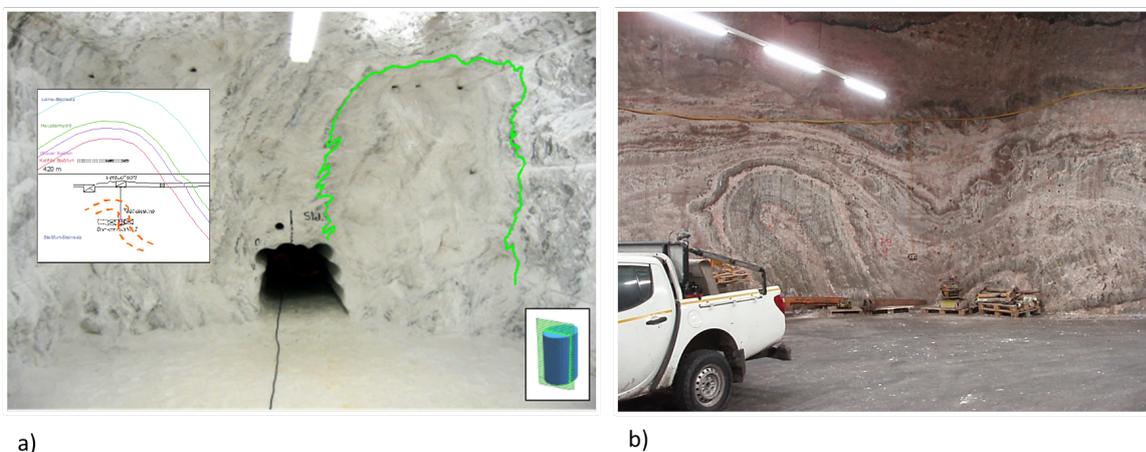


Abb. 2-3. Lagerungsformen untertage; a) Lokale Salzaufwölbung im Steinsalz (Grube Bernburg) – „Grönaer Sattel: Steinsalz z2NA“. Der Zugang zur sogenannten Testkaverne liegt im Zentrum des Sattels, erkennbar an den umlaufenden Anhydrit-Linien; b) Lokale Großboudinage im Kaliflöz (Grube Teutschenthal): „Neue Werkstatt“ – Staßfurt Kalilager z2SF (Bildquelle: IfG).



Homogen \leftarrow Verteilung der Verunreinigungen \Rightarrow Inhomogen
 Flach \leftarrow Lagerung \Rightarrow Steil

Abb. 2-4. Probensuite für das Staßfurt-Steinsalz von verschiedenen Lokalitäten in unterschiedlicher tektonischer Überprägung: Übergang von flacher bzw. gering verstellter Lagerung zur steilen Lagerung mit textueller Umverteilung der Akzessorien.

Der Internbau von Salzkissen ist durch eine erhöhte Mächtigkeit der gut kriechfähigen Steinsalzsichten im Zentralbereich des Kissens gekennzeichnet. Die jüngeren, geringer kriechfähigen Salinarschichten sind durch den Salzzustrom aufgewölbt und in der Regel nur geringfügig verfalt.

Kommt es zum Aufstieg von größeren Salzmenngen aus tieferen in höher gelegene Bereiche der Erdkruste, wobei die darüber liegenden Sedimentschichten teilweise durchdrungen und durchbrochen werden, bilden sich allgemein Salzstöcke (Diapire) bis hin zu sogenannten Salzmauern, wie sie für Norddeutschland typisch sind. Dabei entstehen runde bis längliche geologische Strukturen, bei denen die internen Schichten infolge der extremen Verformung einerseits verstellt bis kompliziert verfaltet und andererseits extreme Ausdünnungen und Anstauungen aufweisen können.

Die resultierenden Gefügeveränderungen finden sich auch im Probenmaßstab wieder. Beispiele für die unterschiedliche Gefügebildung von primärer Schichtung bis hin zu einem tektonisch stark beanspruchten Gestein in steiler Lagerung sind in Abb. 2-4 dargestellt.

Hauptträger dieser halokinetischen Prozesse ist zumeist das räumlich in der Mitte der Struktur angeordnete und häufig mächtig ausgebildete Staßfurt-Steinsalz, das sich beispielsweise gegenüber dem Leine-Steinsalz durch eine höhere Verformbarkeit und Mobilität auszeichnet.

Als Folge bildet es beispielsweise den tektonisch stark beanspruchten Kern des Salzstockes Gorleben, während die jüngeren und geringer mächtigen Salzformationen der Leine- und Aller-Folge am Rand der Salzstruktur auftreten und nur gering tektonisch überprägt wurden (Bornemann, 1991). Das sog. Hauptsalz der Staßfurt-Folge im Salzstock Gorleben wird aufgrund seines Gefüges mit partiell fragmentarischen Steinsalzkristallen sowie den teilweise getrennten und zerrissenen Anhydriteinschaltungen von Bornemann (1991) sogar partiell als tektonische Brekzie gedeutet. Unabhängig davon lassen sich geochemisch über den Bromgehalt sehr wohl noch Hinweis auf die ursprüngliche Sedimentationsfolge finden (Bornemann et al., 2000).

Darüber hinaus sind die unterschiedlichen Salzgesteine in den Lagerstätten im Verlauf ihrer geologischen Entwicklungsgeschichte in vielfacher Weise stofflich verändert worden (z. B. Döhner & Elert, 1975):

- durch frühe diagenetische Prozesse im Ablagerungsraum,
- durch Temperaturerhöhung infolge wachsender Versenkung infolge Überlagerung von anderen Sedimenten (Thermometamorphose) und
- durch migrierende fluide Phasen (Hydrometamorphose).

Als besonderes Beispiel einer Hydrometamorphose erfolgte im Werra-Kalirevier im Zuge des tertiären Basaltvulkanismus die Umwandlung des primären Carnallit in einen wertstoffreichen Sylvinit über einen hydrothermal (Hydrometamorphose) und thermisch (Thermometamorphose) induzierten Umbildungsprozess, bei dem ebenfalls fluide Phasen (Salzlösungen, Gase) eine wesentliche Rolle spielten (für Details s. Knipping, 1989).

Die Umwandlung war mit einer erheblichen Volumenreduzierung verbunden, die je nach Carnallit-Gehalt der primären Salzgesteine bis zu 50 Prozent betragen kann, was zu einer Auflockerung des Gesteinsgefüges führte. Damit verbunden, kam es zur Einspeicherung der an diesen Prozessen beteiligten fluiden Phasen (Salzlösungen, Gase – CO₂) im Poren- und/oder Klufftvolumen.

Die Tatsache, dass die vulkanogen ins Salz eingetragene Fluide über Jahrmlionen im Salz gespeichert blieben, stellt ein wichtiges natürliches Analogon für Dichtheit von Salzformationen dar (vgl. Kap. 4.1.1).

Unabhängig davon entsprechen Mineralbestand und Gefüge der Salzgesteine allgemein (und insbesondere der Kalisalzgesteine) aufgrund der postsedimentär stattgefundenen tektonischen sowie lösungskinetischen Überprägung in den seltensten Fällen denen des Sedimentationsraumes.

2.1.2 Lithologische Komponenten der Salzgesteinsbarriere

Entsprechend des Sicherungskonzepts eines Endlagers für radioaktive Abfälle im Salz wird der Einlagerungsbereich voraussichtlich in einer hinreichend mächtigen Salzgesteinssequenz liegen, die hauptsächlich aus Steinsalz aufgebaut ist und im Weiteren auch den einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) umfasst (für Details s. Kap. 3.1).

Allerdings ist Steinsalz, entsprechend der lithostratigrafischen Abfolge, wie sie in Kap. 2.1.1.1 beschrieben ist, immer umgeben von weiteren, lithologisch anderen Salzgesteinen, die Teil der geologischen Barriere sind. Das bedeutendste, das resultierende Barriersystem besteht aus einzelnen, lithologisch definierten Gesteinsschichten mit unterschiedlichen Eigenschaften und unterschiedlicher Schutzwirkung. Diese werden deshalb nachfolgend bzgl. ihrer lithologischen Ausbildung charakterisiert. Grundlage dafür bildet u.a. der SDGG-Sonderband „Zechstein – Stratigrafie von Deutschland XII“ (DSK, 2020).

2.1.2.1 Steinsalz

Steinsalz tritt entsprechend seiner Genese (in der progressiven und etwas weniger ausgeprägt in der rezessiven Phase, vgl. Abb. 2-2) als massiges Evaporitgestein auf. Die großen Steinsalzmächtigkeiten sind über eine Stagnation der Lösungsentwicklung infolge eines kontinuierlichen Lösungsnachschubs entsprechend der in Kap. 2.1.1.1 skizzierten Barrentheorie entstanden.

Ausgehend von der Tatsache, dass es fast ausschließlich (in der Regel >90 Vol.-%) aus dem Mineral Halit¹³ (Natriumchlorid, NaCl) besteht, neben geringen Beimengungen anderer Evaporitminerale, wie Anhydrit, Gips oder Sylvit, sowie Tonmineralen¹⁴, ist es nahezu monomineralisch und damit stofflich homogen. Aus mineralogisch-petrographischer Sicht ist Steinsalz deshalb als tonig-anhydritischer oder Anhydrit-führender Halit¹⁵ anzusprechen.

¹³ Der Name Halit leitet sich aus den griechischen Wörtern ἅλας, *hals*, *halo* für Salz und λίθος *lithos* für Stein ab. Damit wird anschaulich das Auftreten untertägiger Salzformationen beschrieben.

¹⁴ Eine litho-stratigrafische Sonderrolle als Steinsalzlager besitzen Halit-führende Salzgesteine mit Ton- oder Tonstein-Einschlüssen, wie sie z. B. in den alpinen Haselgebirgssedimenten oder in den Rotliegend-Salinaren auftreten.

Das alpine Haselgebirge entstand mutmaßlich im Oberperm und umfasst als Salzlagerstätten, in SE-Bayern, die Region Berchtesgaden und, in Österreich, die Regionen Hallein, Bad Ischl, Hallstatt und Alt Aussee. Das sehr heterogene Salzgestein besteht neben der Hauptkomponente Halit (im Mittel bis zu 50%), aus Tonstein-Einlagerungen (ca. 40% bis max. 70%) sowie (ca. 10%) Anhydrit. Für die lithologisch-morphologische Ausbildung des „Haselgebirges“ sind neben der sedimentären Bildung als marine Sedimente eine spätere tektonische Überprägung von Bedeutung, die zu einer komplexen Vermischung der verschiedenen Sedimentablagerungen geführt haben (z.B. Schindl-Neumayer, 1984).

Der Ablagerungszentrum der salinaren Rotliegend-Fazies konzentriert sich auf das Gebiet der Südlichen Nordsee und das Elbmündungsgebiet sowie das südliche Schleswig-Holstein. Dort sind die Ablagerungen des Ober-Rotliegend II von pelitischen Sedimenten und von salinaren Schichtenfolgen mit Steinsalzlager geprägt. Kalisalze fehlen in der evaporitischen Schichtenfolge.

In beiden Salzgesteinsvarietäten beeinflussen die tonigen Matrixanteile das Deformationsverhalten des Steinsalzes stark, was neben einer Abnahme der Festigkeiten auch zu erhöhter Durchlässigkeit führt (z.B. Reinhold et al., 2014). Allerdings reagiert der Salzanteil stark plastisch, so dass sämtliche Klüfte, die sich während der geologischen Geschichte gebildet haben, immer wieder mit Salz verheilt sind (Kellerbauer, 1998). – Unabhängig davon handelt es sich hier nicht um Steinsalz.

¹⁵ Nach Stolle & Döhner, 1970, ergibt sich die Gesteinsbezeichnung eines Salzgesteins auf Basis des Mineralbestandes:

- (I) Für die über 20% im Gestein enthaltenen Minerale erfolgt eine Aufzählung in der Reihenfolge zunehmender Anteile und der Anfügung der Nachsilbe „it“ an den Namen der am Ende stehenden dominierenden Komponente, z.B. Halitit (= Steinsalz);

Im Verlauf der Ausscheidung als Evaporitgestein sowie im Verlauf der Diagenese und nachfolgender halokinetischer Prozesse können sich stoffliche und texturale Veränderungen ergeben, die die Gesteinseigenschaften beeinflussen:

- (1) Das massig-ausgebildeten Steinsalz liegt aufgrund von Änderungen der petrographisch-mineralogischen Zusammensetzung als Wechsellagerung von hoch- und niedrig-salinaren Sedimenten vor, d.h. chloridischen (halitischen) und sulfatischen (anhydritischen) Lagen vor. Daraus resultieren Textur-Effekte und gleichzeitig können auch massige Anhydritlagen auftreten.
- (2) Infolge des Wechsels von einer initialen chloridischen Ausscheidungsphase (Steinsalz-Sedimentation) in eine finale Ausscheidungsphase von K-Mg-Chloriden bzw. -Sulfaten (Kalisalz-Sedimentation) ergeben sich stoffliche Veränderungen, die auch in Eigenschaftsänderungen dokumentiert sind.

Beide Aspekte sind bezüglich einer vorliegenden Heterogenität der Steinsalz-Ablagerungen bzgl. der Ausweisung entsprechender Steinsalz-Mächtigkeiten zu berücksichtigen.

Zu (1): Lagige Anhydrit/Ton-Einschaltungen

Obwohl die mächtigen Halitfolgen nahezu mono-mineralogisch aufgebaut sind, bleibt die primäre sedimentäre Schichtung der Salzgesteine bei der diagenetischen Umwandlung der Salzgesteine (u.a. in Verbindung mit der Abpressung von Restlösungen sowie Sammelkristallisation) meist gut erhalten.

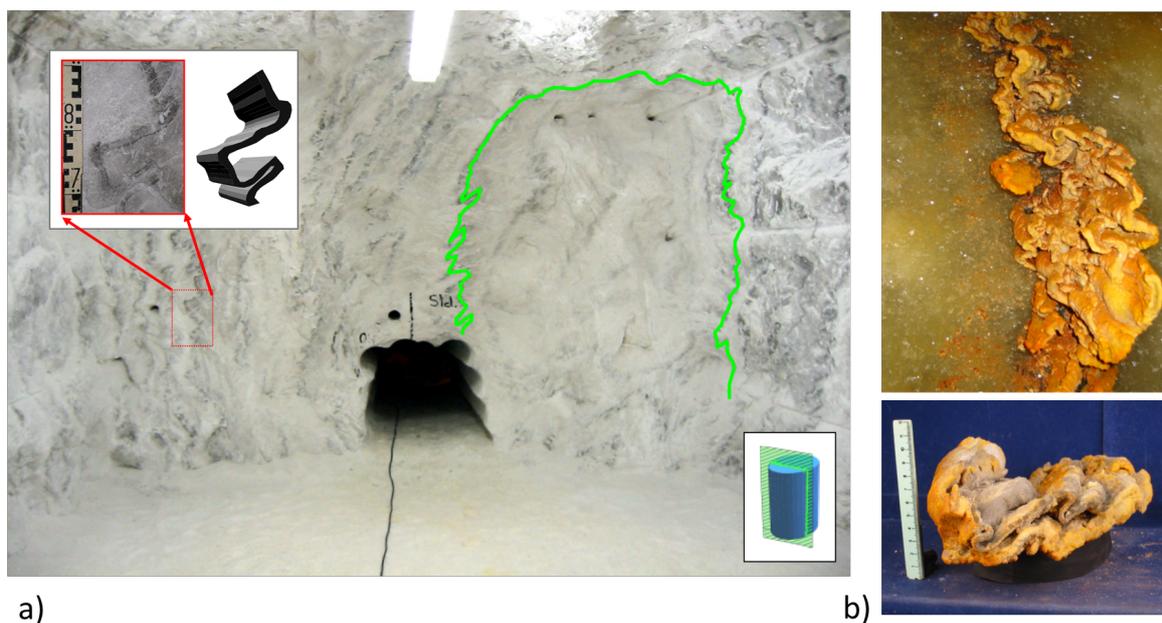


Abb. 2-5. Staßfurt-Steinsalz (z2Na) mit Anhydrit-Einschaltungen im Zentralbereich des Grönaer Sattels (Grube Bernburg, S.-A.). a) Zugang zur sogen. Testkaverne (Streckenöhöhe ca. 3 m). Der Ausschnitt zeigt eine Anhydritlinie im Konturanschnitt; b) Herausgelöste Anhydritlinie: ob.: in der Sol-Kaverne, unt.: als Handstück (Quelle: IfG).

- (II) Für die mit 5 – 20 % beteiligten Minerale erfolgt – den Hauptkomponenten (I) vorangestellt – eine adjektivische Aufzählung in der Reihenfolge zunehmender Anteile;
- (III) Die mit weniger als 5% enthaltenen Mineralkomponenten werden mit den Endungen „-führend“ und „-haltig“ in der Reihenfolge zunehmender Anteile aufgezählt und den Angaben II/I vorangestellt, soweit aus wissenschaftlicher oder wirtschaftlicher Sicht erforderlich ist.

In der Konsequenz liegt, insbesondere in der flachen Lagerung, vertikal eine oft bis über hunderte von etwa 5 - 15 cm dicken Straten umfassende deutliche, regelmäßige Schichtung¹⁶ vor, verursacht durch dünne Einlagerungen von Anhydrit und/oder Ton.

Diese Anhydritschnüre („Jahresringe“) sind teils als mehr oder weniger gleichmäßige Lagen mit scharfer oder unscharfer Liegend- und Hangendbegrenzung, teils als unregelmäßige Fläsern und Schlieren oder als Aneinanderreihung von anhydritischem Staub, Flocken, Schmitzen, Knötchen und großen Brocken ausgebildet. Daraus resultieren die verschiedenen Schichtungstypen des Salzgesteins, wie Linien-, Bänder-, Flaser-, Flockensalze u.a. (Richter-Bernburg, 1968).

Abb. 2-5 zeigt beispielhaft für einen Aufschluss im Staßfurt-Steinsalz (z2Na) die Ausbildung von Anhydrit-Linien an der Salzkontur bzw. herauspräpariert durch den Solprozess (Test-Kaverne in der Grube Bernburg).

Die entsprechend der Anhydrit-Ausbildung auftretenden Schichtungstypen und andere Gefügemerkmale im Steinsalz sind horizontbeständig. Davon ausgehend wurde erstmalig von Lotze (1938) in der Grube Hansa bei Hannover die Gliederung in „Basal-“, „Haupt“- und „Hangendsalz“ aufgestellt, die zumindest für das Staßfurt-Steinsalz nach wie vor gültig ist:

- Das „Basal- bzw. Basissalz“ ist bei einer Mächtigkeit von nur wenigen Metern reich an Anhydrit, der in dicht aufeinander folgenden, unregelmäßigen Flocken und Brocken sowie kompakten Lagen und dünnen Bänkchen auftritt.
- Im „Hauptsalz“, das die Hauptmasse des z2Na ausmacht, ist der Anhydrit in Flocken, Fläsern, Knötchen, Schlieren und unregelmäßigen Bändern im mittel- bis grobkristallinen Steinsalz enthalten, das durch reichliches Auftreten von Kristallsalz und vor allem Kristallbrockensalzen besonders gekennzeichnet ist.
- Das „Hangendsalz“ ist schließlich bei Mächtigkeiten von wenigen Dekametern bis 10er-Meter überwiegend feinkristallin und durch Anhydritbänder und -linien gleichmäßig geschichtet.

Je nach Art dieser Einbettung - ob als scharf begrenzter „Film“ oder als diffus verteilte Verunreinigung - unterscheidet man als Gesteinstypen z. B. Liniensalz, Bändersalz, Schwadensalz. Diese Gefügebildung ist beispielsweise ausschlaggebend für die Namensgebung des Liniensalzes (z3LS) aus der Leine-Folge (z3).

Die Beobachtung einer sehr unterschiedlichen Gefügebildung des Steinsalzes in Abhängigkeit von der primären Sedimentation bis zur tektonischen Beanspruchung während der Halokinese ist u.a., insbesondere für das Verständnis der Transporteigenschaften von Steinsalz von grundlegender Bedeutung (z. B. Popp et al., 2001) (vgl. Kap. 4.2.2).

Danach ist zu erwarten, dass schichtungsabhängig in Lagen mit Anhydritausscheidungen auf den Korngrenzen höhere Fluidpermeabilitäten zu erwarten sind, während senkrecht dazu, möglicherweise unterstützt durch Tonlagen, ein Gasdurchgang behindert wird. Gleichzeitig kann durch tektonische Beanspruchung das primäre Ablagerungsgefüge überprägt worden sein, so dass zusätzlich auch großmaßstäbliche Effekte, wie z.B. Scherzonen, die Durchlässigkeitseigenschaften einer Salzbarriere beeinflussen können.

Unabhängig davon zeigen auch groß-skalige Permeabilitätsbestimmungen, wie sie z.B. mit dem Großbohrlochversuch in Merkers durchgeführt wurden (s. Kap. 4.2.2), dass das geschich-

¹⁶ Das Vorliegen von Halit-Anhydrit-Wechselagerungen wird bei Braitsch (1962) mit einer jahreszeitlich bedingten rhythmischen Schwankung der Konzentrationen der Meerwasserlösung (Mutterlösung) erklärt. Die Relevanz einer Auszählung und Vergleiche dieser „Jahresschichten“ für stratigraphische Korrelationen ist allerdings umstritten.

tete Steinsalz-Gebirge hydraulisch dicht ist. Zwar können im unmittelbaren Konturbereich eines untertägigen Hohlraums begrenzte Wegsamkeiten vorliegen, darüber hinaus ist das Salzgebirge aber dicht.

Somit kann eingeschätzt werden, dass lagige Anhydrit-Einschaltungen (mit Mächtigkeiten bis ca. 1 m, wie sie z.B. als Anhydritbank im Anhydritmittelsalz der Leine-Folge, z3AM, auftreten können) senkrecht zur Schichtrichtung hydraulisch dicht sind, wenn keine mechanische Schädigung vorliegt. Parallel zur Schichtung können lokal Wegsamkeiten vorliegen, die allerdings nicht relevant sind, solange sie hinreichend geomechanisch eingespannt sind.

Das bedeutet, schichtartige Anhydrit-Einschaltungen (mit begrenzter Mächtigkeit) sind Bestandteil der Steinsalz-Barriere und müssen nicht separat ausgewiesen werden.

Zu (2): Mineralogisch-chemische Variabilität während der Steinsalz-Ausscheidung

Innerhalb einer homogenen Steinsalzsequenz, die je nach Ablagerungsposition im Becken Mächtigkeiten bis zu mehrere 100 m umfassen kann, treten hauptsächlich in vertikaler Richtung sedimentationsbedingte stoffliche Variationen des Steinsalzes auf, die neben Mächtigkeitsschwankungen der abgelagerten Schichten auch auf Veränderungen in der Mineralzusammensetzung zurückzuführen sind.

Diese Schwankungen lassen sich z.T. auch in den einzelnen Ausscheidungszyklen wiederfinden, wobei abhängig vom Gehalt und der morphologischen Ausbildung der Akzessorien u.a. auch mechanische Eigenschaften (z.B. das Kriechvermögen: Abnahme der Kriechfähigkeit vom Liegenden zum Hangenden) systematisch beeinflusst sein können.

Dies lässt sich am Beispiel der am Standort Gorleben sehr gut untersuchten Staßfurt-Folge (z2) zeigen, wobei die vorliegenden Gesetzmäßigkeiten zumindest qualitativ auch auf das Leine-Steinsalz (z3) übertragbar sind (vgl. Abb. 2-6).

Das wenige Meter mächtige Basalsalz des Staßfurt-Steinsalzes (oberhalb des liegenden Basalanhydrits, vgl. Tab. 2-1) ist durch einen erhöhten Sulfatgehalt (im wesentlichen Anhydrit) gekennzeichnet. Teilweise treten auch massige Anhydritbänke auf.

Danach dominiert im Hauptsalz (z2HS) zunächst ausschließlich die Paragenese mit Anhydrit (CaSO_4), wobei der Anhydrit-Anteil vom Liegenden mit ca. 10% zum Hangenden hin bis auf etwa 2% abnimmt (Abb. 2-6). Gleichzeitig ist eine deutliche Schichtung infolge lagig angeordneter Anhydritausscheidungen erkennbar (s. unt.). Im Bereich des sogen. Hangendsalz (z2HG) liegt durchgehend Polyhalit ($\text{K}_2\text{MgCa}[\text{SO}_4]_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) vor, während Anhydrit nur noch untergeordnet im Liegenden des Hangendsalzes mit auftritt.

Weiterhin nimmt die Kristallinität des matrixbildenden Halits beim Übergang vom Haupt- zum Hangendsalz von grob- bis mittel- zu eher feinkristallinen Korngrößen ab. Die Korngrößenabnahme deutet auf eine steigende Sedimentationsrate infolge von veränderten klimatischen Bedingungen (Zunahme der Verdunstung) und der Verkleinerung des Sedimentationsbeckens hin.

Die Abnahme des Calciumsulfatanteils vom Liegenden zum Hangenden sowie das Auftreten von Polyhalit im Hangenden sind an die zunehmende Eindampfung und die damit verbundene Zunahme der Salinität gebunden. Sie führt zu einer Anreicherung von Mg-, K- und SO_4 -Ionen in der Lauge und zu einer Reaktion bzw. Wechselwirkung mit dem Bodenkörper (Braitsch, 1962). Hierbei wird aus dem primär ausgefällten Calciumsulfat frühdiagenetisch Polyhalit gebildet. Im Weiteren können auch im Bodenkörper zirkulierende Mg- und K-sulfatreiche Laugen zu einer Umwandlung der Anhydritkristalle zu Polyhalit führen.

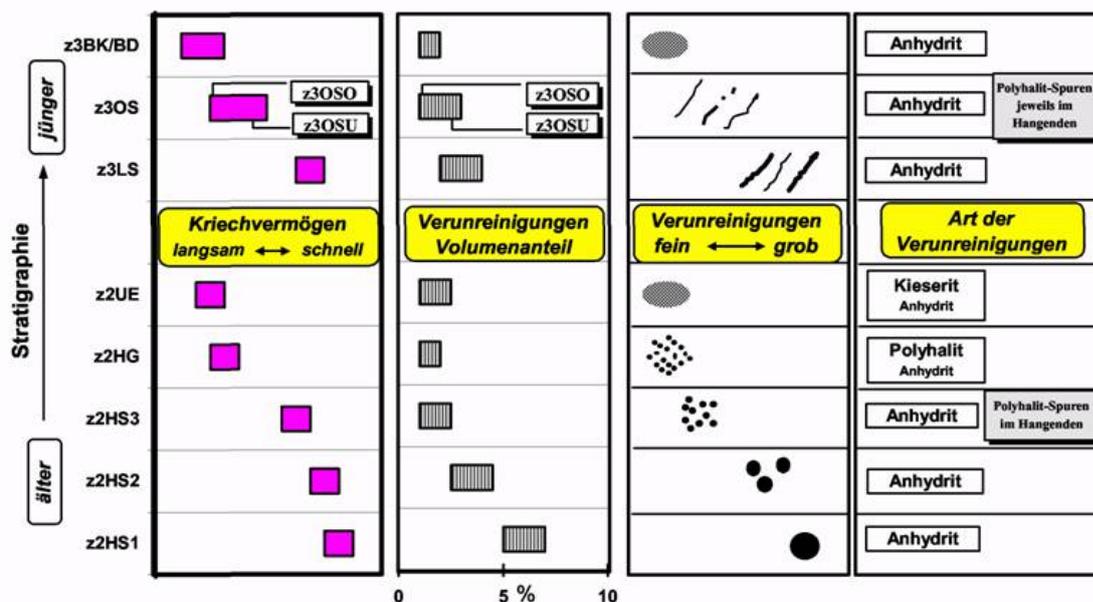


Abb. 2-6. Lithologisch/mechanische Variabilität von Steinsalz - Korrelation des Kriechvermögens mit den lithologischen Gefügeeigenschaften von Steinsalz am Beispiel des Salzstockes Gorleben (aus Hunsche et al., 2003). Neben den Gehalten und der Art der Verunreinigungen ist insbesondere die Verteilung der sekundären Mineralphasen für die Kriecheigenschaften von Bedeutung. Sie ändert sich beispielsweise im Staßfurthaupt Salz (z2) von lokal angereicherten grobvolumigen Anhydritaggregaten im z2HS1 (Knäuelsalz) zu diffus verteilten Feinstkornverteilungen von Polyhalit und untergeordnet Anhydrit in der Salzmatrix im z2HG (vgl. idealisierte Verteilungsmuster der Verunreinigungen).

Die resultierenden Unterschiede im Anteil und der Art bzw. Verteilung der sulfatischen Akzessorien (Anhydrit, Polyhalit) sind Schlüsselparameter für das mechanische Verhalten von Steinsalz¹⁷ (z.B. Hunsche et al., 2003).

Mit progressiver Eindunstung kommt es verstärkt zur Ausscheidung von K-Mg-Mineralen, bis hin zur Bildung von Kali-Gesteinen.

Die Lithologie und die Fazies des Kaliflözes Staßfurts variieren stark, wobei fazielle Übergänge von (Carnallit zu Hartsalz bis hin zu einer halitischen Vertaubung auf engem Raum möglich sind. In carnallitischer Fazies kann das Kaliflöz Staßfurt mit Schichtungstextur oder mit brekziöser Textur ausgebildet sein, wobei textuelle Übergänge fließend möglich sind:

- Die Schichtungstextur resultiert aus einer Wechsellagerung von cm- bis dm-mächtigen Steinsalzbänken und Carnallit, untergeordnet Kieserit und 0,5 - 1 m mächtigen Steinsalzbänken.
- Die brekziöse Textur der Trümmern carnallitite zeichnet sich durch eine carnallitische Matrix mit unregelmäßig verteilten Halit- und untergeordnet Kieserit-Bruchstücken im

¹⁷ In Abb. 2-6 sind wesentliche gefügekundliche Merkmale von Steinsalz bezüglich des Volumenanteils, der Verteilung und der Art von Verunreinigungen (zumeist Sulfatphasen sowie Tonanteile) bezüglich ihres Einflusses auf das Kriechverhalten von Steinsalz dargestellt.

Basierend auf der statistischen Auswertung von Kriechuntersuchungen, die an Steinsalz-Laborproben verschiedener stratigraphischer Varietäten aus dem Salzstock Gorleben durchgeführt wurden zeigt sich innerhalb einer stratigraphischen Abfolge (hier für das z2 sowie weiterhin für das z3), dass das Kriechvermögen von schnell zu langsam vom Liegenden zum Hangenden abnimmt.

Offenbar behindern die feinst-verteilten Ausscheidungen in der Matrix bei höheren Spannungen das mechanische Versetzungskriechen, während Anhydritpartikel sowie weiterer akzessorischer Komponenten (z.B. Tonverunreinigungen) entlang von Korngrenzen das Verformungsverhalten begünstigen.

cm- bis dm-Bereich aus. Neben Kieserit treten als Nebengemengteile im Carnallit Anhydrit, Sylvin, tonige Substanzen und partiell Im Tachhydrit auf.

Unabhängig von der lokalen Ausbildung des Übergangs zum Kaliflöz liegt ein lithologischer Gesteinswechsel vor, woraus sich Konsequenzen für die Ausweisung des ewG ergeben, u.a. mit Festlegung entsprechender Sicherheitsabstände zum Carnallit.

Heterogenität von Steinsalz:

Steinsalz stellt aufgrund seiner stofflichen Homogenität sowie den besonderen Eigenschaften (z. B. Visko-Plastizität, Dichte und hohe Wärmeleitfähigkeit) ein für die Einlagerung wärmeerzeugender radioaktiver Abfälle einzigartig geeignetes Wirtsgestein dar. Gleichzeitig liegt aufgrund entsprechender Forschungsarbeiten bzw. bergbaulicher Erfahrungen ein sehr guter Kenntnisstand vor:

- (1) Unter dem Aspekt „Wirtsgestein“ umfasst Steinsalz eine im bergbaulichen Maßstab lithologisch homogene Salzformation, d.h. neben dem Hauptmineral Halit (mit Anteilen zwischen ≥ 88 und nahezu 100 Vol.-%) können Nebengemengteile, wie Anhydrit und Tonverunreinigungen, auftreten¹⁸.

Da die schichtartig auftretenden Anhydrit-Einschaltungen vom umgebenden Steinsalz-Gebirge eingespannt sind, müssen sie (bei Mächtigkeiten < 1 m) für die Ausweisung der relevanten Steinsalz-Barriere nicht explizit ausgewiesen werden.

- (2) Allerdings können die Gehalte und die Verteilung von Verunreinigungen sowie Mineral- und Fluideinschlüsse sedimentationsbedingt sowohl lateral, als auch vertikal deutlich variieren, wodurch sich auch die Eigenschaften des Salzgesteins ändern.

Kommt es ausscheidungsbedingt zu einer Abnahme Halit-Anteils auf $< 88\%$, was insbesondere im Übergang zum Kalilager der Fall ist, sind diese Bereiche nicht mehr der Steinsalz-Barriere zuzuordnen, sondern als separate lithologische Einheit auszuweisen (s.unt.). Dies gilt besonders für das häufig carnallitisch ausgebildete Kalilager.

- (3) In der Konsequenz ist Steinsalz in der Regel immer Teil einer komplexeren Salinar-Abfolge (z.B. mit unterlagerndem Anhydrit und dem Übergang zum Kalisalz im Hangenden), weshalb die Eigenschaften der angrenzenden Gesteinslithologien im Rahmen einer Standortsuche mit betrachtet werden müssen.

2.1.2.2 Anhydrit-Gestein

Anhydrit ist ein nahezu mono-mineralisches aus CaSO_4 aufgebautes Gestein, das als Teil der natürlichen Ausscheidungsabfolge in Salinarformationen auftritt. Massive Anhydriteinschaltungen bilden, wenn sie als relativ starres Schichtpaket von mehreren Metern innerhalb des Salzes auftreten, eine besondere Gesteinsformation, die die Eigenschaften benachbarter Salzpartien erheblich beeinflussen können. Ein beispielsweise im z3 dominierendes Gesteinspaket ist der Hauptanhydrit (z3AN), der je nach Position im Becken Mächtigkeiten zwischen 10 und 80 m erreichen kann (Tab. 2-1).

Die generellen Lagerungsverhältnisse des Hauptanhydrits werden, entsprechend der regionalen Entwicklung des jeweiligen Untersuchungsgebietes, charakterisiert durch:

- flach-wellige Lagerung, verbunden mit Aufsattelungen, Verwerfungen, disharmonischen Verformungen u. a. Verbreitet ist diese Ausbildung vorwiegend im Südharz-Kaligebiet sowie in den Muldenbereichen des Saale-Unstrut- und Nordharz-Kaligebietes,

¹⁸ Nach Hodenberg et al. (1987) überschreiten Steinsalz-Vorkommen im Mittel nur ganz seltenen Fällen die 10%-Grenze, weshalb hier der Grenzwert auf 12% festgelegt wurde.

- nahezu gleichmäßige, sattelförmige Lagerung mit Verwerfungen, teilweise auch Doppellagerung. Sie ist an langgestreckte Sättel, wie Roßlebener-, Teutschenthaler-, Bernburger-, Staßfurter Sattel u.a. gebunden.
- intensiv unregelmäßig bis kulissenförmig verfaltete Lagerung. Typisch für diese Lagerungsverhältnisse ist der Raum des Allertalgrabens, findet sich aber auch u.a. in der Grube Teutschenthal (Abb. 5-8).

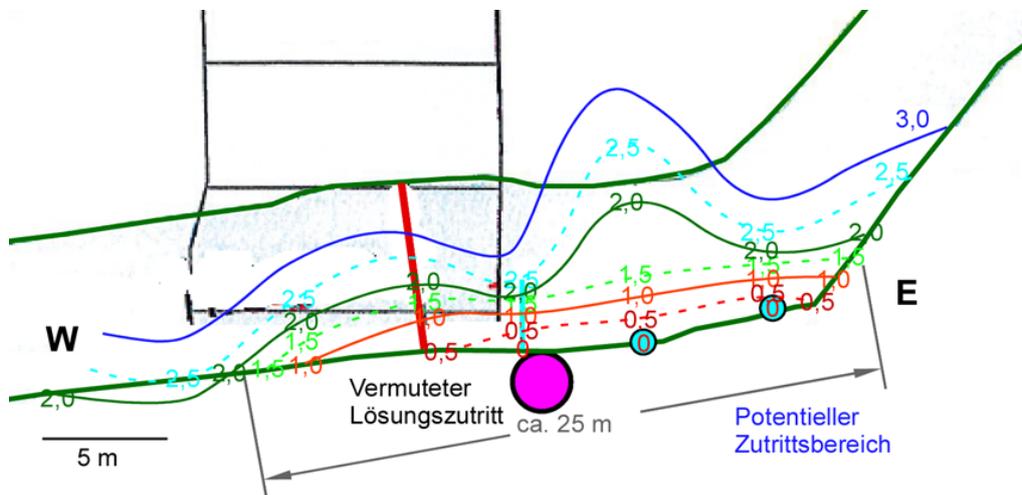


Abb. 2-7. Faltenartige Morphologie der lithologischen Trennfläche der Schichtgrenze Hauptanhydrit/Leine-Steinsalz unterhalb der Sohle der Neuen Verbindungsstrecke (grün-markierter Streckenverlauf) im Bereich Lösungszutritt „Wetterumfahrung“ - Horizontalschnitt. Auf Basis von Sondierbohrungen wurde die Teufenlage (Zahlen geben die Tiefe in m bezogen auf die Streckensohle an) der Oberfläche des partiell in der Sohle aufgeschlossenen Hauptanhydrits kartiert (IfG, unveröffentlicht).

Weitere Merkmale, u.a. bei der geologischen Erkundung, aber für die geomechanischen Wechselwirkungen mit den über- und unterlagernden Schichtgliedern sind:

- Die Grenzfläche zum hangenden Leine-Steinsalz ist morphologisch und lithologisch wechselhaft ausgebildet infolge der verschiedenen zechsteinzeitlichen Vorgänge, insbesondere von Sedimentationsunterbrechungen, den damit verbundenen zechsteinzeitlichen Auflösungen von Steinsalz.
- Somit entstand keine scharfe Trennfläche zwischen Hauptanhydrit und Leine-Steinsalz, die zur Bildung von Schichtfugen und Lagerklüften bei mechanischen (tektonischen, subrosiven oder bergmännischen) Beanspruchungen führen könnte. Das gleiche gilt für die Schwarze Tonlage im oberen Teil des Hauptanhydrits.
- Die Basisfläche des Hauptanhydrits ist wesentlich deutlicher entwickelt, jedoch auch nicht als scharfe Trennfläche. Die darunter folgenden tonigen Lagen im karbonatischen Teil des Grauen Salztone bilden eine ± plastische Verbindung, so dass auch hier bei mechanischen Beanspruchungen keine Fugen aufreißen.

Untersuchungen zur Feinstratigraphie des Hauptanhydrits sind in allen Kaliabbaurevieren, u.a. im Bereich des Thüringer Beckens und Staßfurter Raums, schwerpunktmäßig in den 1960er Jahren vorgenommen worden, wobei die vorgeschlagenen Zonierungen etwas Bearbeiter-spezifisch räumlich unterschiedlich sind. Allgemein können auf Basis verschiedener Texturtypen insgesamt 6 Zonen im Hauptanhydrit unterschieden werden, die mit Alpha bis Zeta bezeichnet werden (vgl. Tab. 2-2).

Der in der Regel dunkelgraue bis schwarze Anhydrit ist zumeist undeutlich geschichtet und bereichsweise relativ stark geklüftet, wobei in mehreren Zonen poröse, teils mit Kristallsalz (Steinsalz, Carnallit, Sylvin und andere Salzminerale), Gas und auch Salzlösungen gefüllte

Partien enthalten sein können. Teilweise treten tonig-karbonatische Bänder auf, die als gestreifte dunkelbraune bis braungraue Partien erkennbar sind.

Die Hauptmasse wird von extrem feinkristallinem Anhydrit gebildet, der aus langgestreckten Kristallen besteht, die sich als Gerüst gegenseitig durchdringen oder verzahnen (sperriges "Kartenhaus"- oder intersertales Gefüge), womit eine sehr dichte und feste Gesteinsmatrix entsteht. Die Hauptmenge der Karbonate setzt sich aus Magnesit und Dolomit zusammen. In den hangenden Bereichen des Anhydrits sind weiterhin geringe Mengen Calcit nachgewiesen worden.

Der Hauptanhydrit besitzt allenfalls nur vernachlässigbare Kriecheigenschaften (vgl. Kap. 4.3.1), weshalb im Zuge der Halokinese der elastisch-spröde reagierende Hauptanhydrit geklüftet oder lokal in Schollen gebrochen sein kann, wobei sich die Brüche auch einige Meter in die angrenzenden duktilen Salzsichten hinein ausgebreitet haben können. Bei mechanischer Beanspruchung können die Klüfte reaktiviert werden, wie Beobachtungen in der Grube Teutschenthal im Nachgang des Gebirgsschlages 1996 gezeigt haben (vgl. Kap. 5.2.4)

Tab. 2-2. Gliederung des Hauptanhydrits zwischen Südharz und Allertalgraben (aus Kamlot, 2008).

Südöstliches Harzvorland JUNG, W. (1960)			Östliches Subherzyn HEMMANN, M. (1972)		
Zone	Texturtyp	Mächtigg. (m)	Zone	Texturtyp	Mächtigg. (m)
Zeta	Texturlos mit verschwommener Feinstreifung bzw. pegmatitartig	2,5 bis 3,5	A	Anhydritschale	Bis 0,5
Épsilon	Unregelmäßig gestreift. Seltener unregelmäßig gebändert, geadert und gemasert	3 bis 6	Épsilon	Schwarze Tonlage, undeutlich streifig	Bis 0,1
Delta	Geadert und gemasert	10 bis 14	Delta	Streifig. Unregelmäßig bis regelmäßig diagonal gestreift	1 bis 9
Gamma	Vorwiegend marmoriert. Untergeordnet gemasert u. geadert	11 bis 15	Gamma	Gemasert, gestreift, geadert, marmoriert	1,5 bis 8,8
Beta	Unregelmäßig gebändert und gemasert	6 bis 12	Beta	Unregelmäßig ausgefrante Bankung. Unregelmäß. Streifung	6,5 bis 12
Alpha	Unregelmäßig gestreift und gebändert, tondurchstäubt	2 bis 4	Alpha	Regelmäßig, eng- bis weit gestreift	1,2 bis 3

Anhydrit – Relevanz als Barrieregestein?

Anhydrit kann aufgrund seines dichten Gesteinsgefüges und unter der Randbedingung, dass er innerhalb einer Salinarformation durch über- oder unterlagernde Gesteine lithostatisch eingespannt ist, als Barrieregestein bewertet werden (vgl. hierzu auch Kap. 4.3.2).

Allerdings können infolge tektonischer Beanspruchungen mit Klüftbildungen lokale Wegsamkeiten per se nicht ausgeschlossen werden. Gleichzeitig wirkte geklüfteter Hauptanhydrit im Laufe seiner salinar-tektonischen Entwicklung als hydraulische Senke, weshalb gesteinsintern ein potentiell hohes Lösungsinventar vorhanden sein (vgl. Kap. 2.1.3.1).

Nach vorliegenden Erfahrungen sind diese Klüfte aber in der Regel durch Salzausfällungen anstehender Lösungen (Carnallit, Steinsalz) geschlossen.

2.1.2.3 Tongestein (Salztone)

Salztone¹⁹ sind stratigraphisch definierbare Horizonte von Tongestein-Einschaltungen, die in Salzgesteins-Folgen zwischengelagert sind und in ihrer Mächtigkeit die Meter- bis 10er-Meterdimension erreichen können. Dabei handelt es sich jeweils um klastische, teilweise feinstkörniges marin gebildete poröse Lockergesteine (Ablagerungsgestein), die im trockenheißen Klima des Zechstein-Meeresses gebildet wurden und die Basis der Ausscheidungsfolge bilden.

Ausgehend von der litho-stratigraphischen Darstellung in Tab. 2-1 sind vor allem der Graue Salzton (z3T) und der Rote Salzton (z4T) und weiterhin Tonausscheidungen der Ohre-Folge (in früheren Darstellungen zumeist zum Bröckelschiefer gerechnet) relevant.

Die potentiell als Barrieregesteine anzusehenden Tongesteine des Zechsteins (sowie auch des Unteren Buntsandsteins) werden hauptsächlich aus den in wechselnden Verhältnissen vorliegenden Tonmineralen Illit-Muskovit und Chlorit aufgebaut. Es muss dabei überwiegend von einer detritischen Herkunft, weniger von authigener Neubildung dieser Minerale ausgegangen werden. Quellfähige Tonminerale sind in den Tongesteinen des Zechsteins (und des Buntsandsteins²⁰) nur untergeordnet und allenfalls lokal verbreitet.

Als Nichttonminerale treten in variablen Anteilen neben Quarz auch Feldspäte, Calcit, Dolomit und Hämatit sowie in den Salztonen Anhydrit, Gips, Magnesit und Halit auf.

Für flache Salzformationen ist insbesondere der Rote Salzton (z4T) von Bedeutung, da er stratigraphisch die Basis der Aller-Folge des Zechsteins bildet und somit im Hangenden der Salzbarriere liegt. Er bildet somit ein wichtiges Element der Salinar-Barriere für Langzeitsicherheitsanalysen, wie er beispielsweise in der Grube Teutschenthal betrachtet wurde (ARGE, 1998).

Ein sehr gut aufgeschlossenes und untersuchtes lithologisches Profil liegt in der Grube Teutschenthal im sogenannten Schneesalz-Querschlag vor. Diese auf der 646 m-Sohle nahezu sählig, am Nordrand des Grubenfeldes Angersdorf, in Richtung NNW aufgefahrenen Strecke durchörtert ein vollständiges Profil das vom hangenden Leine-Steinsalz (z3Na) über den Roten Salzton (z4T) bis in das Aller-Steinsalz (z4Na) reicht (Abb. 2-8).

Für ihn wird eine detritische Genese angenommen, wobei klastische Materialien, in erster Linie Tone, aber auch sandige Partikel (z. B. Quarz), in ein Salzabscheidungsbecken transportiert

¹⁹ Bei dem Begriff „Salzton“ handelt es sich offensichtlich um einen empirisch eingebürgerten Terminus ohne exakt definierten Begriffsinhalt. Dementsprechend existieren unterschiedliche Erläuterungen: „Salztone sind salzführende Tone mariner Lagerstätten“ (Preuschoff et al., 1988).

²⁰ Die Tone der Ohre-Folge („Bröckelschiefer“) bzw. die tonigen Auslaugungsrückstände der oberen Zechsteinfolgen stellen diesbezüglich Ausnahmen dar. Hier wurden neben Chlorit und Illit auch geringe Anteile quellfähiger Tonminerale (Chlorit-Smectit-Wechselagerungen) nachgewiesen.

und ohne Wiederauflösung bereits abgeschiedener chloridischer Gesteine sedimentiert wurden. Über bevorzugte Rinnen und Zuflüsse gelangte der Ton vom Festland ins Becken, z.B. von Süddeutschland über das Solling-Becken. Untergeordnet kam auch Windtransport hinzu.

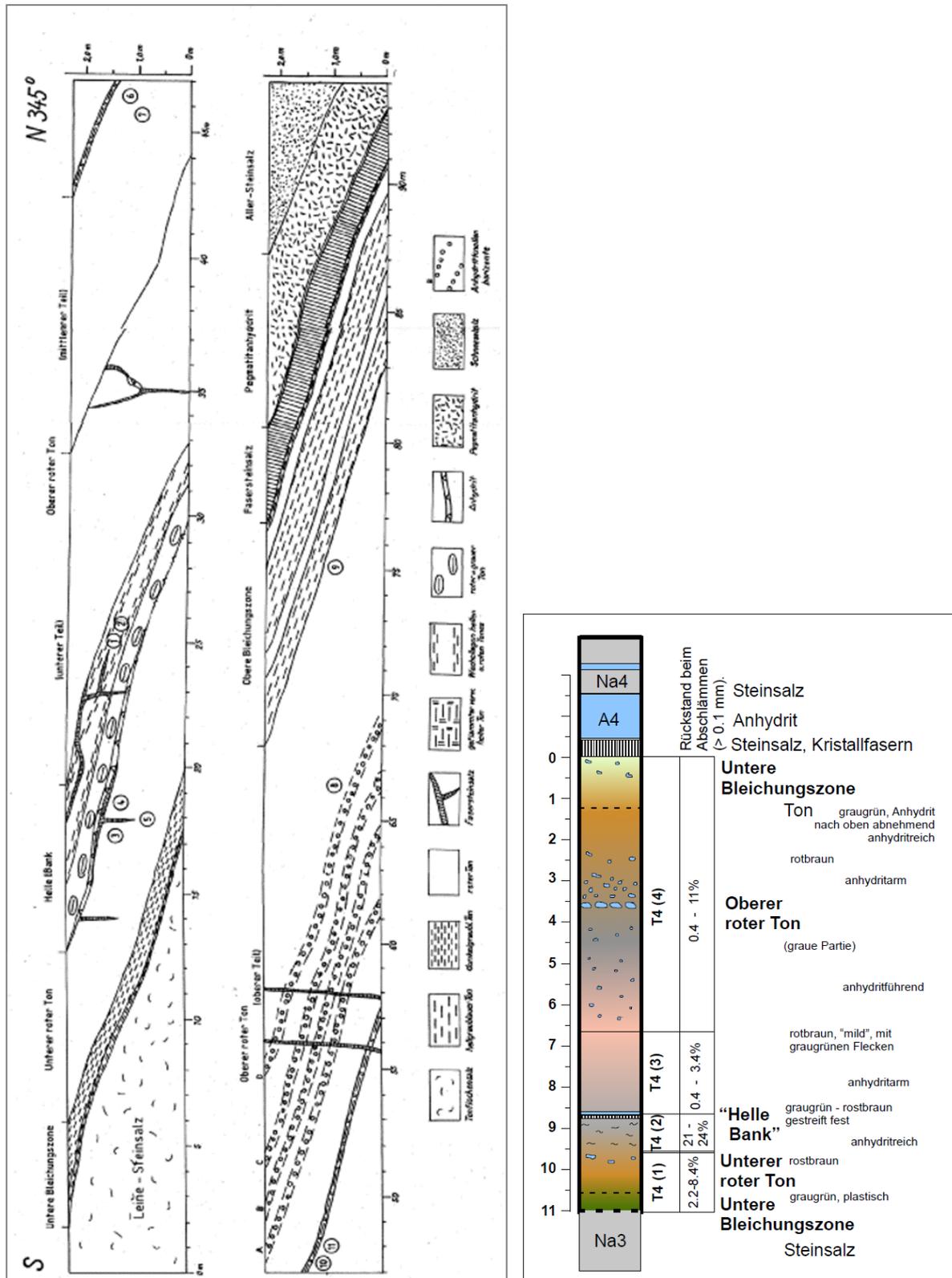


Abb. 2-8. Lithologisches Profil für den Roten Salzton (z4T): li.) Horizontales Strecken-Querprofil (Stoss-Kartierung) (nach Kuhrmann, 1950); re.) Lithologisches Mächtigkeitsprofil (verändert nach Minkley et al., 2013).

Insgesamt wurde der Ton gleichmäßig über das gesamte Becken verteilt. Seine Mächtigkeit schwankt innerhalb der verschiedenen Bergbaureviere im Nordharzbereich zwischen rd. 15 m im Thüringer Becken über 12 m in Teutschenthal und 7 m in Bernburg bis auf 3,5 m in Zielitz. Die größte in Norddeutschland nachgewiesene Mächtigkeit erreicht der z4T mit 61 m in der Bohrung Ganzow (Käding, 2003).

Entsprechend den lithologischen Beschreibungen des Profilaufbaus (nach Kuhrmann, 1950) ist der Rote Salzton als massiges, ungeschichtetes Tongestein ausgebildet, das durch die Einschaltung von stärker anhydritischen und einer geringmächtigen sandigen Partie (Helle Bank) im Arbeitsgebiet einheitlich gegliedert ist. Der Anhydrit ist im Ton feinverteilt oder in Konkretionen angereichert, die von Tonstein umgeben sind. Sie bilden keine definierten Schichten oder Zonen mit abweichenden Eigenschaften (Schwächezonen). Die meist kurzen, ± senkrecht zur Schichtung verlaufenden Klüfte ebenso wie die Lagerklüfte sind mit Steinsalz, seltener mit Anhydrit verheilt.

Salztone – diversitäres Barriereelement:

Salztone können als „klassische“ Tongesteine, entsprechend den Anforderungen an ein Barrieregestein charakterisiert werden. Das bedeutet, wenn sie in ausreichender Mächtigkeit vorliegen, stellen sie de facto diversitäre Elemente im hangenden Teil einer Salinarbarriere dar:

- Sie verhalten sich wegen ihrer Plastizität gegenüber, beispielsweise dynamischen Belastungen, deutlich günstiger, als z. B. Steinsalz.
- Gleichzeitig wirken sie als dichter Tonsteinhorizont einer möglichen Subrosion entgegen (vgl. Fallbeispiel Grube Teutschenthal Kap. 5.2.1).

2.1.2.4 Kalisalz

Kalisalz-Gestein ist mineralogisch sehr vielgestaltig ausgebildet, weshalb abhängig von der primären Beckenausscheidung sowie nachfolgend stattgefundenen tektonischen und lösungschemischen Veränderungen die Flöz-Zusammensetzung bzgl. der gesteinsbildenden Mineral-komponenten lateral und vertikal stark variieren kann. Die wichtigsten Kalisalz-gesteinsbildenden Minerale sind in Tab. 2-3 zusammengestellt.

Die Kalisalzausbildung im Becken (insbesondere die des Übergangsbereichs sogen. „Hart-salzgürtels“) kann lokal sehr stark variieren, was teilweise genetische als auch sekundäre Ursachen zur Folge hat.

Tab. 2-3. Häufige Salzminerale (Mineralname /-formel)

Halit	NaCl
Sylvin	KCl
Anhydrit	Ca[SO ₄]
Gips	CaSO ₄ · 2H ₂ O
Bischofit	MgCl ₂ · 6 H ₂ O
Carnallit	KMgCl ₃ · 6H ₂ O
Epsomite	MgSO ₄ · 7H ₂ O
Hexahydrat	MgSO ₄ · 6H ₂ O
Kainit	KMg[Cl SO ₄] · 3H ₂ O
Kieserit	MgSO ₄ · H ₂ O
Langbeinit	K ₂ Mg ₂ (SO ₄) ₃
Polyhalit	K ₂ Ca ₂ Mg(SO ₄) ₄ · 2H ₂ O
Tachydrate	CaMg ₂ Cl ₆ · 12H ₂ O
Staßfurtit (Boracit)	Mg ₃ [B ₇ O ₁₃ Cl]

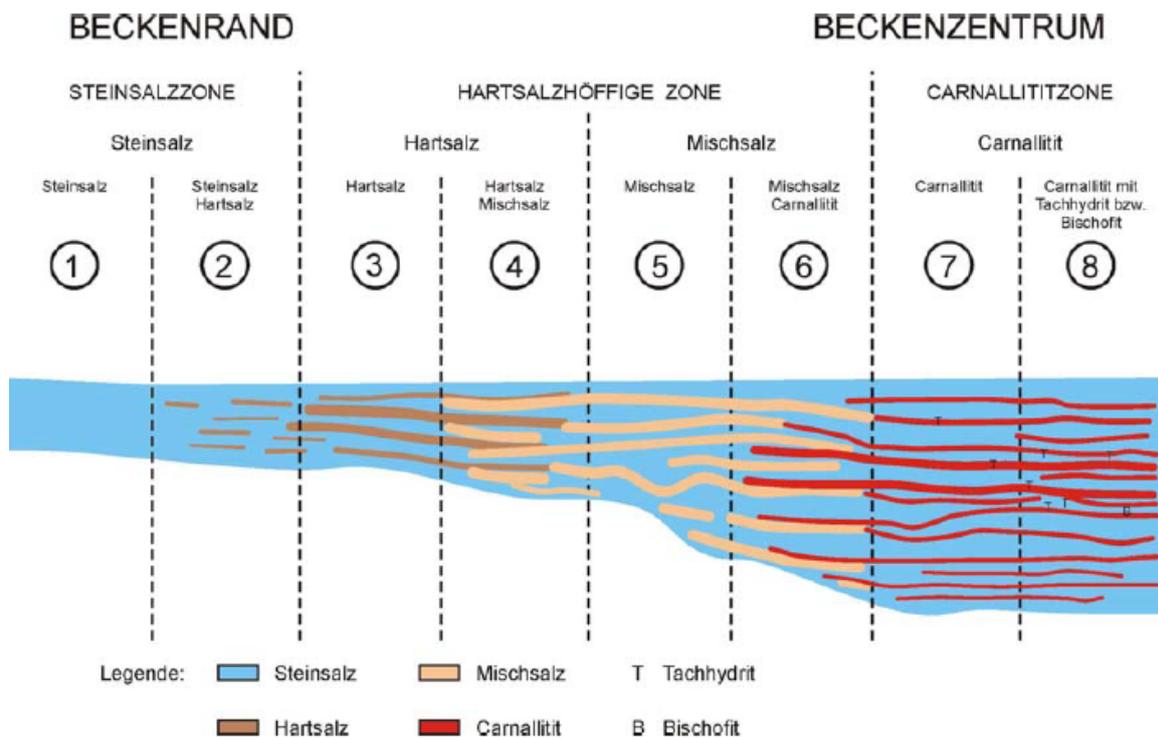


Abb. 2-9. Primäre bis frühdigenetische Faziesdifferenzierung des Kaliflözes Staßfurt im Raum Mitteldeutschland – Schema (aus Herbert & Schwandt, 2007)

Sedimentationsspezifisch ist, wie z.B. bei Herbert & Schwandt (2007) beschrieben, lateral ausgehend vom Beckenzentrum eine Zonierung zu erkennen, die bergmännisch unterschiedlichen Salzgesteinstypen zugeordnet wird (Abb. 2-9):

- **Zentrum:** Carnallit (dominierende carnallitische Ausbildung – Ca-Gehalt >50 %: C50 – C100):

Im Mittel besteht der Carnallit aus ca. 55 % Carnallit, 30 % Halit, 10 % Kieserit, 5 % Anhydrit sowie Ton und gelegentlich Sylvit (als Nebengemengteil tritt nicht selten Staßfurtit auf).

Unter Berücksichtigung der Gefüge können geschichteter Carnallit, Trümmerncarnallit mit Farbstreifung sowie Trümmerncarnallit ohne Farbstreifung unterschieden werden, die sich auch durch variierende Anteile der Hauptminerale unterscheiden.

- **Übergangsbereich** in Richtung Beckenrand: Hartsalz²¹-Gürtel (polyphases Salzgestein) mit verschiedenen Gesteinsvarietäten

- o Hartsalz und Carnallit,
- o sylvinitisches Hartsalz
- o polysulfatisches Hartsalz
- o anhydritisches Hartsalz

Das meist rot gefärbte Hartsalz besteht aus durchschnittlich ~55 % Halit, 24 % Sylvit und 21 % Anhydrit sowie variablen aber stets geringen Anteilen von Ton und weiteren Salzmineralen (Kieserit, Polyhalit, Kainit).

Das Hartsalz tritt vorherrschend als schichtige Wechsellagerung von rötlich gefärbten Halit-, roten Sylvit- und weißen bis grauen Anhydritlagen auf. Kieseritanreicherungen treten vor allem im Grenzbereich zur Carnallit-Fazies auf.

²¹ Hartsalz ist eine typische bergmännische Bezeichnung für Kalisalz-Gesteine, die wegen ihrer sulfatischen Mineralbeimengungen (Anhydrit und Kieserit) beim Bohren eine besondere Härte aufweisen (Rauche, 2015).

- **Beckenrand:** Vertaubung, bis allenfalls ein wenig kalisalzhaltiges Steinsalz

Die Vertaubungsfazies ist durch Fehlen bzw. weitgehendes Fehlen des Sylvins gekennzeichnet. Stattdessen sind weißlichgrauer, feinkörniger Anhydrit und untergeordnet wasserklarer, spätiger Halit sekundär angereichert. Die durchschnittliche Zusammensetzung wird mit 70 % Halit, 25 % Anhydrit sowie 5 % Ton und Nebengemengteile (Sylvin, Kieserit) angegeben. Die primäre Schichtung des Gesteins ist in der Regel erhalten und nur ausnahmsweise, z.B. bei lokalen Toneinpressungen, lagenweise mehr oder weniger gestört.

Zur ursächlichen Genese dieser heterogenen Salzverteilung existiert wegen ihrer hohen praktischen Bedeutung ein umfangreiches Schrifttum, in dem teils paläogeographischen Ursachen (Anordnung des Hartsalzgürtels parallel zu den Wallbildungen des Zechsteins 1 und 2), teils einer sekundären Überprägung durch ascendente und deszendente Lösungen der Vorrang gegeben wird. Heute treten viele Autoren für das Modell einer deszendenten Beeinflussung (partielle Ablaugung und Umbildung unmittelbar am Ende der Abscheidungsperiode) und einer späteren, aber noch zechsteinzeitlich erfolgten Hauptdifferenzierung durch ascendente Fremdlösungen ein (z.B. Döhner & Elert 1975, Bachmann et al., 2008, u.a.).

Kalisalz-Gestein - Problemgestein in der geologischen Barriere?

Kalisalz-Gesteine sind in der Regel Bestandteil der natürlichen Salinarfolge, wobei abhängig von der Position im Ausscheidungsbecken bis zu mehrere 10er-Meter mächtige Einschaltungen (Flöze) auftreten können. Sie treten abhängig vom erreichten Eindunstungsgrad im Becken im Hangenden des Steinsalz-Gebirges auf.

Wegen ihrer komplexen Zusammensetzung mit teilweise Hydrat-haltigen und leicht löslichen Mineralphasen ist die Relevanz als Barrieregestein jeweils besonders zu betrachten:

- In situ-Permeabilitätsmessungen mit Salzlösungen weisen nach, dass Kalisalzhorizonte hydraulisch dicht sind, wenn sie unter lithostatischem Druck eingespannt sind und die angreifenden Lösungen gegenüber dem Salzgebirge gesättigt sind (vgl. Kap. 4.5.2).
- Zur thermischen Stabilität, insbesondere von Carnallit, liegen umfangreiche Kenntnisse vor, die zeigen, dass Carnallit bis zum Schmelzpunkt stabil ist (167°C), solange er lithostatisch eingespannt ist (vgl. Kap. 4.5.3).
- Unabhängig davon werden Kalisalz-Horizonte bei der Endlagerauffahrung mutmaßlich an mindestens zwei Stellen durchörtert. Dies ist aber unkritisch, wenn ausreichende Sicherheitsabstände zu den Einlagerungshorizonten (mindestens 50 m, vgl. Minkley & Popp, 2010) eingehalten werden. Gleichzeitig sind für die Abdichtung notwendiger Zugewegungen in den Einlagerungsbereich (Schächte/Strecken) geeignete, langzeitstabile MgO-Baustoffe verfügbar, mit denen diese Wegsamkeiten langzeitsicher verschlossen werden können.

2.1.2.5 Subsalinar

Die subsalinaren Stockwerkseinheiten umfassen im mitteldeutschen Raum allgemein das Oberkarbon und das Rotliegend, die viele hundert Meter mächtig sein können (vgl. z.B. Bachmann et al., 2008).

Für die weiteren Betrachtungen sind nur die Oberrotliegend-Schichten (Saxon) von Bedeutung, woran sich stratigrafisch (als Liegendes des Zechsteins) die basalen Gesteine der Werra-Folge, in der Regel das Werra-Karbonat und der Werra-Anhydrit, anschließen.

Die Gesteinseinheit Rotliegend²² beinhaltet terrestrische, fluviatile, lakustrine, äolische und vulkanogene Sedimente, von groben Konglomeraten und Brekzien, über Sandsteine bis zu feinkörnigen Tonen, Evaporiten und Kalken. Die Ablagerung erfolgte in Schwemmfächern durch episodische Schichtfluten unter warmariden Klimabedingungen. Die Sedimente füllten die im Oberkarbon angelegten Molassetröge und ebneten diese ein. Lokal sind mächtige magmatische Gesteine eingeschaltet (Laven, Pyroklastika, Ignimbrite, seltener subvulkanische Körper).

Zustand der Liegendbarriere:

Wegen der heterogenen Ausbildung des im Liegenden des Zechsteins befindlichen Oberrotliegend kann eine abdichtende Wirkung (Barriere-Wirkung) nicht angenommen werden. Eine Einbeziehung der Gesteine der subsalinaren Basis und den liegenden Partien der Werra-Folge (z1) als Bestandteil der geologischen Barriere im Liegenden eines flach gelagerten Zechstein-Salzvorkommens wird deshalb nicht empfohlen.

Die entsprechende Bewertung muss allerdings jeweils standortspezifisch erfolgen.

2.1.2.6 Deckgebirge / Suprasalinar

Das Deckgebirge oberhalb des Zechstein-Salinars ist in Mitteldeutschland regional unterschiedlich ausgebildet. Allgemein folgen im Hangenden oberhalb des Aller-Steinsalzes in der Regel (d.h., wenn keine Subrosion stattgefunden hat) (vgl. z.B. Bachmann et al., 2008):

- Oberer Aller-Anhydrit („Grenzanhydrit“)
Hierbei handelt es sich um eine wenige dm-starke, feinkristalline bis dichte, weiß bis fleischrot gefärbte, gelegentlich vergipste Anhydritbank.
Anhand der Textur wird abgeleitet, dass es sich um ein zechsteinzeitliches Residuat des Aller-Steinsalzes handelt.
- die Salinar-Folgen z5 – z7 bzw. Residualbildungen bei Subrosion
Am Top der salinaren Abfolge sind zumeist bis zu mehrere 10er-Meter mächtige Tonsteinhorizonte ausgebildet. In der Vergangenheit wurden diese im Thüringer Becken in die „Obersten Zechsteinletten“ und den ehemals dem Buntsandstein zugeordneten „Bröckelschiefer“ unterschieden.
Stratigraphisch umfassen die Obersten Zechsteinletten die Gesteine der Ohre- und Friesland-Folge mit dem Oberen Aller-Ton, dem Ohre-Ton sowie dem Friesland-Ton. Die Mächtigkeit beträgt abhängig von der regionalen Lage zwischen wenigen Metern bis zu mehreren 10er-Metern. Regionale Abweichungen sind auf tektonisch induzierte Deformationen bzw. subrosive Prozesse zurückzuführen.
Abhängig von stattfindenden Subrosionsprozessen können auch Residualbildungen vorliegen (vgl. Kap. 2.2.3).
- als postsalinales Deckgebirge (regional unterschiedlich) im Wesentlichen die Gesteine der Trias (Buntsandstein, Muschelkalk)
Die sandig- und schluffig tonigen Gesteine unteren Buntsandsteins wirken insgesamt als GW-Stauer, die eingeschalteten Kalksteinbänke sind abhängig von der Situation (besonders Teufe, tektonischer Beanspruchung) lokal wasserführend.
Die Wasserführung des Deckgebirges konzentriert sich im Wesentlichen auf den Mittleren Buntsandstein.
- geringmächtige känozoische Lockergesteine.

²² Namensgebend ist die Rotfärbung, bedingt durch die wüstenhaften Bedingungen des Ablagerungsgebietes.

Relevanz des Deckgebirges

Auch wenn die im Hangenden eines flach gelagerten Zechstein-Salzvorkommens vorkommenden Deckgesteine nicht unmittelbarer Bestandteil der salinaren Wirtsgesteinsbarriere sind, können dort gering-permeable, tonige Gesteinshorizonte (z.B. z5 - z7, su) angrenzen, die als Wasserstauer wirksam sind.

Da diese dann eine abdichtende Wirkung gegenüber lösefähigem Grundwasser aufweisen, können sie als geologische „Barriere im weiteren Sinne“ zur Bewertung der Langzeitsicherheit von UTV und UTD herangezogen werden (vgl. Fallbeispiel Grube Teutschenthal, Kap. 5.2.1).

2.1.3 Salzlösungs- und Gasvorkommen

Salzgestein ist wegen seiner extrem niedrigen Porosität allgemein undurchlässig gegenüber Gasen und Flüssigkeiten, weshalb es einzigartig dichtes Barriere-Gestein darstellt. Unabhängig davon können unterschiedliche Mengen von Fluiden bereits autochthon im Salinar enthalten sein. Wässrige Lösungen, teilweise mit KW-Anteilen und Gasphase, die zu messbaren Lösungszutritten in Bohrungen oder Auffahrungen führen können, wurden deshalb immer wieder im Bergbau angetroffen.

2.1.3.1 Vorkommen von Salzlösungen

Natürliche Salzlösungen treten in allen salinaren Schichten des Zechstein auf, wobei abhängig von der Genese und späteren Prozessen die Lösungsgehalte sehr unterschiedlich sein können. Die Ursprungswässer dieser Lösungs- oder Umbildungsvorgänge können aus der Umbildung Gips/Anhydrit (s. unten) stammen oder aus Poren der Zechsteingesteine ausgepresst sein. Ihr Auftreten ist aus vielfältigen Umwandlungsprozessen in den Kalilagern bekannt (Bildung von Hartsalz im Flöz Staßfurt, von Sylvinit im Flöz Ronnenberg sowie von Vertaubungen).

Die vorkommenden Wassergehalte im Salzgestein zwischen flacher und steiler Lagerung sind wegen der unterschiedlichen Beanspruchung, insbesondere infolge der Halokinese mutmaßlich unterschiedlich²³:

- Flach lagernde Salzformationen (Steinsalzhorizonte) zeichnen sich durch eine Schichtung aufgrund schichtartiger Einschaltungen von Verunreinigungen (zumeist Anhydrit- oder Toneinlagerungen) aus, weshalb die Lösungsgehalte über ein vertikales Profil sehr heterogen verteilt sein können. Diese reichen von 0,1 bis 0,5 Gew.-% in homogenen Salzpartien, während in Anhydrit- und Toneinschaltungen die Lösungsgehalte bis auf mehrere Gewichtsprozent erhöht sein können (Finley et al., 1992)
- Steinsalz aus Salzstöcken hat nominell deutlich geringere und deutlich homogenere Lösungsgehalte: 0,01 bis 0,1 Gew.-% (Roedder, 1981).

Eine mögliche Quelle für das Auftreten von Lösungen im Salzgebirge, die z.B. zur Umbildung des Kaliflözes Staßfurt geführt haben, ist nach Borchert (1959, 1963) primär die Gips-Anhydrit-Dehydratation des Basalanhydrits. Sie haben auf ihrem Weg durch die Salzformation die Kalilager teilweise oder vollständig umgebildet und sind später größtenteils als Metamorphoselösungen in Richtung des Hangenden ausgepresst worden. Nach diesem Modell sind die im Hauptanhydrit auftretenden Lösungen als Umbildungsreliktlösungen zu deuten, die nach der

²³ Während für Steinsalz in steiler Lagerung ausreichend abgesicherte Angabe vorliegen, sind vergleichbare Kennwerte für Salz in flacher Lagerung (insbesondere für Salzvorkommen aus Mitteldeutschland) vergleichsweise selten. Deshalb werden hier Daten von der WIPP-site herangezogen.

Flözumbildung den Grauen Salzton durchdrangen und im klüftigen Hauptanhydrit gespeichert worden sind.

Wie in Kap. 2.1.2.2 bereits beschrieben, sind Anhydrit-Gesteine spröde und zeigen somit ein anderes geomechanisches Verhalten als das visko-plastische Steinsalz. Die tektonischen Bewegungen während der Salzmobilisation (als lateraler Prozess bis hin zur Salzstockbildung, Kap. 2.1.1.2) haben häufig im Hauptanhydrit und in den Anhydritmitteln zu Kluftsystemen geführt. Diese sind sehr effektive Lösungsspeicher, wobei Salzlösungen und Wässer in unterschiedlichen Mengen gespeichert sein können. Dies hängt von der Intensität der tektonischen Aufweitung des im Hauptanhydrit vorhandenen Kluftinventars ab.

Die größte nachgewiesene Salzlösungsmenge, die aus einem geschlossenen System im Hauptanhydrit austrat, wurde in der Grube Roßleben im Unstrut-Revier beobachtet (z.B. Döhner et al., 2003). Aus Kluftsystemen des Hauptanhydrits an der Nordost-Flanke des Rosslebener Sattels sind bei 5 Zuflussereignissen zwischen 1909 und 1986 insgesamt rd. 5 Millionen m³ Lösungen zugeflossen (darunter das Ersaufen der Grube im Jahre 1939). Sie werden nach Autorenkollektiv (2002) als „Urlaugen“ angesprochen, d.h. als chemisch veränderte ehemalige Salzspiegellösungen betrachtet, deren Speicherräume sich nach ihrem Eindringen vermutlich bereits in geologischer Vergangenheit wieder verschlossen hatten.

Darüber hinaus wurden in verschiedenen Gruben verschiedene Salzlösungsvorkommen beobachtet, die als extern angesprochen werden können. Eine umfangreiche Dokumentation und Bewertung von Salzlösungsvorkommen in Bezug auf Schichtenfolge, die Tektonik und die Hydrogeologie eines Standortes auf Basis des vorliegenden Kenntnisstandes infolge des durchgeführten Kalibergbaus Mitteldeutschlands findet sich bei Herbert & Schwandt (2007).

2.1.3.2 Vorkommen von Gasen

Das Auftreten von Gasen im Salinar ist ebenfalls häufig, wobei Gase in unterschiedlichen Mengen in interkristallin-petrographischen Hohlräumen zwischen den Mineralkörnern (intergranular) und in inkristalin-mineralogischen Hohlräumen, d. h. im Mineralkorn selbst (intragranular) enthalten sein können (z.B. Knabe, 1989). Die Gehalte der Mineral-gebundenen Gase betragen allgemein bis zu 15 l/t Salz (Hempel, 1996).

Größere Gasvorkommen können in größeren Hohlräumen (Klüfte, Schnitte) gespeichert sein. In der flachen Lagerung aufgrund von Probenuntersuchungen von Material aus dem Werra-Kalirevier sowie dem Südharz- und Saale-Unstrut-Kalirevier (jeweils ohne Kaliflöze) sind in der Vergangenheit das Leinsteinsalz (z3Na), der Komplex Hauptanhydrit/Grauer Salzton/Deckanhydrit (z3AN/z3T) und das Kalilager (z2KST) als Horizonte mit Gasführung in Erscheinung getreten.

Dabei liegen nach Knabe (1989) folgende Gesetzmäßigkeiten vor:

- In der vertikalen Schichtenfolge der Zechsteinzyklen nehmen die Gasgehalte der Gesteine übereinstimmend von den karbonatischen über die sulfatischen zu den chloridischen Gesteinskomplexen hin ab.
- Die höchsten Gasgehalte von 8 – 11 l/t liegen in den karbonatischen Gesteinen Zechsteinkalk (z1K) und Hauptdolomit (z1D) vor.
- Die Gasgehalte der lithologisch vergleichbaren Salzhorizonte nehmen für die karbonatischen und chloridischen Gesteine vom z1 zum z2 zu, um dann zum z4 hin abzufallen. Für die sulfatischen Gesteine ist keine eindeutige Tendenz feststellbar.
- Als am gasärmsten erweisen sich die halitischen Horizonte Na1, Na3 und Na4.
- Wasserstoff tritt (ohne Berücksichtigung der Kaliflöze!) bevorzugt in sulfatischen und karbonatischen Gesteinen auf, halitische Gesteine führen zumeist keinen Wasserstoff.
- Stickstoff dagegen ist in halitischen Gesteinen absolut vorherrschend

- Kohlendioxid ist grundsätzlich nur in karbonatischen und sulfatischen Schichten zu verzeichnen (Ausnahme: Schwaden- und Tonflockensalz des z3).
- Kohlenwasserstoffe dominieren analog dem CO₂ in karbonatischen und sulfatischen Horizonten. „Schwere“ Kohlenwasserstoffe (Ethan bis n-Hexan) nehmen von karbonatischen über sulfatische zu den chloridischen Gesteinen signifikant ab.

Wegen der geringen Gehalte sind Gasaustritte freier Bläser (Gasaustritt als stetiger Volumenstrom) sehr selten, wobei die salzgebundenen Gasvorkommen des Werra-Gebietes eine besondere geologische Situation darstellen. Im Zuge des tertiären Rhön-Vulkanismus haben Basaltgänge die flache Lagerung an mehreren Stellen durchschlagen und Fluide ins Salz gepresst, wobei große Gasmengen (zumeist CO₂) gespeichert wurden (z.B. Knipping, 1989).

Kohlenwasserstoff-Vorkommen sind für Salzvorkommen in der flachen Lagerung relativ häufig, zumeist im Hangenden von anhydritischen oder karbonatischen Einschaltungen. Die jeweilige Herkunft der KW bzw. die entsprechenden Muttergesteine können anhand ihrer geochemischen Signaturen bestimmt werden, z. B. Püttmann (2012), Gerling et al. (1991). Danach ist die wahrscheinlichste Ursache für das Auftreten von KW eine autochthone Bildung von Kohlenwasserstoffen in Salzgesteinen, wenn entsprechendes organisches Ausgangsmaterial zusammen mit der Sedimentation der Evaporitminerale abgelagert wurde.

Von außen können Kohlenwasserstoffe nur unter bestimmten Bedingungen in eine Salzstruktur hineingelangen. Voraussetzung dafür sind Wegsamkeiten, wie sie z.B. (1) in einer Salzschicht im Zuge tektonischer Beanspruchung als Rissnetzwerke räumlich und zeitlich begrenzt entstehen können (→ Verletzung des Dilatanzkriteriums), oder (2) wenn die hydraulischen Drücke in einem an eine Salzstruktur angrenzenden KW-Vorkommen (Kukla et al., 2011) den hydrostatischen Teufendruck übersteigen und Werte in der Größenordnung des lithostatischen Teufendrucks annehmen.

Die im Salz vorhandenen Fluide können durch Materialverlagerungen innerhalb der Salzstruktur, beispielsweise im Zuge eines halokinetisch bedingten Salzaufstiegs, umgelagert werden. Unabhängig von ihrer Genese zeigt der Verbleib von Fluiden in der Salzstruktur eine Immobilität bzw. nur geringe Mobilität über geologische Zeiträume an, was durch geo- und isotopenchemische Untersuchungen nachgewiesen wurde, z. B. (Siemann, 2007).

Relevanz von Fluiden

Das Auftreten von Fluiden (Gase und Lösungen) im Salz in unterschiedlichem Ausmaß gehört zum natürlichen Stoffbestand einer Salzstruktur. Die Verteilung der Fluide innerhalb einer Salzlagerstätte kann strukturgeologisch und mit der Genese sowie dem Aufbau der Salzstruktur zusammenhängenden Gesetzmäßigkeiten gedeutet werden (vgl. z.B. Bracke et al., 2012). Die Lösungen sind in der Regel geologisch alt und vom Grundwasser des angrenzenden Deckgebirges Buntsandsteins über geologische Zeiträume getrennt.

2.2 Regionale Aspekte stratiformer Salzformationen Mitteldeutschlands

2.2.1 Bergbaulich / räumliche Gliederung

Stratiforme Salzformationen treten in weiten Teilen Mitteldeutschlands auf, wobei regional unterschiedlich insbesondere die Kalisalzflöze Staßfurt (z2KSt) der Staßfurt-Folge sowie die Flöze Thüringen (z1Kth) und Hessen (z1KHe) der Werra-Folge gewonnen wurden.

Ein großräumiges Verbreitungsgebiet stratiformer Salzformationen bildet das „Thüringer Becken“, das weitgehend dem von der BGE für die Methodenentwicklung ausgewählte Teilgebiet 078_02 entspricht. Als bergbauliche Nutzung wurden vorrangig Kalisalze in verschiedenen

Bergbau-Revieren abgebaut. Untergeordnet wurde oder wird noch Steinsalz konventionell sowie über Solung gewonnen.

Im Norden des liegt das ehemalige Saale-Unstrut-Kalirevier im Raum Halle-Eisleben mit dem Teutschenthaler Sattel (Hallesches Kaligebiet) und dem Roßlebener Sattel (Unstrut-Kaligebiet). Eine zusammenfassende Darstellung zur Verbreitung/Mächtigkeit der salinaren Schichten in diesen Untersuchungsräumen findet sich u.a. bei Löffler (1962) sowie Bachmann et al. (2008). Danach wurde in beiden Strukturen Steinsalz in einer Mächtigkeit von bis zu mehr als 500 m akkumuliert, während in den entsprechenden Randstrukturen große Teile des Salzes aus tiefer liegenden Schollen ausgewandert sind.

Nach Süden schließt sich der Bereich des ehemaligen Südharzkalireviere an. Im Nordwestteil des Südharzkalireviere mit den Bergwerken Bleicherode, Bischofferode, Sollstedt und Volkenroda sowie entlang der Wippertal-Störungszone, insbesondere aufgrund des Bergwerkes Sondershausen, besteht ein sehr guter Erkundungsgrad. Hierbei zeigt sich aber, dass die Mächtigkeiten des Werra-Steinsalzes deutlich unter 100 m liegen und auch das Staßfurt-Steinsalz aufgrund der tektonischen Situation erheblichen kleinräumigen Schwankungen unterworfen ist. Es erreicht deshalb nur sehr lokal Mächtigkeiten bis etwa 100 m, womit die Mindestanforderungen nicht erreicht werden.

Im zentralen Thüringer Becken betragen die Gesamtmächtigkeiten des Zechstein nach Seidel (2003) 60 - 800 m, wobei sie je nach Ausscheidungsfolge und regionaler Lage stark variieren können. Während das Staßfurt-Steinsalz nur sehr geringe Mächtigkeit besitzt, liegen für das Werra-Steinsalz besonders große Mächtigkeiten (bis zu 300 m) in einem herzynischen Teilbecken im NW des Thüringer Waldes zwischen Mühlhausen und Ilmenau vor, das eine erzgebirgische Ausbuchtung bis in die Gegend von Sondershausen zeigt. Bedingt durch die geringe Zahl der Aufschlüsse stehen aber nur geringe Informationen zur regionalen Mächtigkeitsverteilung zur Verfügung.

Als Konsequenz bergbaulicher Nutzung sowie aufgrund der Wirkung natürlicher Prozesse liegt für die bisher ausgewiesenen, großräumigen Teilgebiete regional eine flächige Segmentierung in Subbereiche vor, die im Rahmen der Standortauswahl zur Ausweisung von weitgehend unbeeinflussten Standortregionen identifiziert werden müssen.

Dies umfasst u. a.

- Bereiche, in denen großräumig zwar zunächst punktuell, aber lokal über mehrere bis 10er-Quadratkilometer eine bergbauliche Nutzung in Form von Bergwerken oder Solfelder stattgefunden hat
- vorhandene natürliche Begrenzungen infolge von Störungszonen aufgrund des Gebirgsbaus und tektonischer Beanspruchungen (s. Kap. 2.2.2)
- Subrosionsbereiche, in denen oberhalb eines Standorts flächig oder randlich (Ausbildung eines Salzhanges) Teile der originären Salzmächtigkeiten reduziert wurden (s. Kap. 2.2.3).

2.2.2 Neotektonische Prozesse – Gebirgsbau und tektonische Beanspruchung

Störungszonen werden aufgrund ihrer Relation zum Gebirgsbau und tektonischen Beanspruchungen allgemein als Resultat neotektonischer Prozesse gedeutet. Sie spiegeln das Spannungsfeld der Kruste wider, das sich aus den großräumigen tektonischen Spannungen (z.B. Platten- und Schollenrandkräfte) und lokalen induzierten Spannungen (z.B. lokale Effekte der Topographie) zusammensetzt. Diese Bewegungen sind vereinzelt mit Erdbeben verbunden. Zusätzlich zur Neotektonik gehören, z. B. Senkungen und Hebungen durch die Auflösung von Salzen (Subrosion) oder das Aufquellen von Gips und den Aufstieg von Salzen (Diapirismus). Der prätertiäre Untergrund Mitteleuropas ist durch einen Bruchschollenbau gekennzeichnet, der im Gefolge der alpidischen/saxonischen Tektogenese vorwiegend während der Kreide

- Postsalinare Stockwerk (Gesteine der Trias, Ohre- bis Fulda-Folge sowie Oberer Aller-Anhydrit)
- Salinare Stockwerke mit weiterer Untergliederung in
 - Oberen Ausgleichshorizont (Leine-Steinsalz bis Aller-Steinsalz)
 - Oberes Faltenstockwerk (= „Hauptanhydrit-Stockwerk“; Deckanhydrit des Kalisalzflözes Staßfurt bis Leine-Anhydrit, z. T. auch einschließlich Oberes Hartsalzlager des Kalisalzflözes Staßfurt)
 - Unteren Ausgleichshorizont (Carnallit des Kalisalzflözes Staßfurt, untergeordnet auch Staßfurt-Steinsalz)
 - Unteres Faltenstockwerk (= „Basalanhydrit-Stockwerk“, Werra-Folge bis Staßfurt-Anhydrit)
- Präsalinare Stockwerk (Grundgebirge).

Das Salinarstockwerk ist aufgrund der Plastizität und Mobilität der chloridischen Horizonte vor allem durch Faltung sowie Ausdünnung und Anstauung der Salzhorizonte charakterisiert. Daneben treten jedoch auch Horizonte auf, in denen aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung (Anhydrit, Tonstein) bruchtektonische Elemente dominieren. Im Gegensatz zum Postsalinar sind für das Salinar weniger bruchtektonische Elemente nachgewiesen.

Ausdruck finden diese neogeodynamischen Prozesse in der Form, Intensität und Verteilung der Erdbeben in bestimmten seismisch aktiven Zonen. Deshalb wurde das Vorhandensein von Störungen im subsalinaren Sockel²⁴ unterhalb einer Salzstruktur wegen der potentiell erhöhten Erdbebengefahr als Negativkriterium angesehen. Allerdings hat sich gezeigt, dass es kaum eine Salzstruktur gibt, die nicht von einer Sockelstörung unterlagert ist (BGR, 1995).

Gleichzeitig wird aber auch ausgeführt, dass die Sockelstörungen sich in den sedimentären Oberbau nicht durchpausen, sondern die Bewegungen an ihnen durch das Salz abgepuffert werden, was in einer entsprechenden Stockwerksbildung dokumentiert ist.

Untersuchungen des rezenten Spannungsfeldes in Nordostdeutschland ergaben für die maximale Hauptspannung σ_1 , im Subsalinar einen recht einheitlichen N-S-Trend. Dieser schwenkt in Nordwestdeutschland nach NW-SE ein, in Polen nach NNE-SSE (z. B. Röckel & Lempp, 2003). Im Suprasalinar ist die Hauptspannung dagegen sehr variabel und wird von lokalen Strukturen beeinflusst. Dies unterstreicht die geomechanische Entkopplung von Sub- und Suprasalinar, welche verhindert, dass die in der tieferen Kruste wirkenden plattentektonischen Kräfte ungestört ins mesozoische und känozoische Deckgebirge übertragen werden.

Störungszonen als Strukturelemente für die Standortauswahl:

Unter der Randbedingung, dass Deckgebirge und Sockel einer Salzformation möglichst ungestört sein soll (u.a. BGR, 1995) bedeutet das, dass für die Standortauswahl nur Teilgebiete in Frage kommen, wie sie aufgrund der tektonischen Felderung vorliegen. Damit ist die Identifikation potentieller Störungen eine wesentliche Voraussetzung für die Standortauswahl.

Allerdings liegt für die Identifikation der räumlichen Lage und Reichweite einer möglichen Störungszone, insbesondere mittels geophysikalischer Verfahren (z.B. Gravimetrie oder Seismik) eine erhebliche Unsicherheit vor. Diese ist insbesondere für Salzvorkommen in der flachen Lagerung ein wichtiger Aspekt für die Festlegung von horizontalen Sicherheitsabständen.

²⁴ Als Sockel wird hier das Liegende der Salinarstruktur bezeichnet, dessen Oberfläche mit der Oberfläche des "nicht-chloridischen Zechstein", d.h. dem Kupferschiefer-Flöz, Werra-Karbonat, Werra-Anhydrit, Staßfurt-Karbonat und Staßfurt-Anhydrit (insgesamt allgemein ca. 50 m) identisch ist. Dieses Gesteinspaket stellt einen sehr guten seismischen Reflektor (Zechsteinbasis: Reflektor Z_3) dar, der beckenweit verfolgt werden kann.

2.2.3 Salzauslaugung - Subrosion

Salzgesteine zeichnen sich durch eine hohe Löslichkeit aus, das bedeutet, findet Grundwasser oder Oberflächenwasser den Zugang zu einem Salzgestein, kann es zur Auslaugung oder Subrosion kommen. Ein Zutritt zirkulierender Wässer zu den löslichen Gesteinen des Zechsteins ist im Zusammenhang mit Hebungen, tektonischen sowie halokinetischen Bewegungen und der Abtragung schützender Deckschichten möglich (s. unt.).

Die Subrosion von Salz (Steinsalz, Kalisalz) findet als Ablaugung, besser Ablösung, überwiegend flächenhaft von oben statt. Dabei entstehen Salzablösungsflächen (sog. „Salzspiegel“), weil das ±visko-plastische Salz praktisch frei von Klüften ist und wesentlich schneller als alle anderen Gesteine gelöst wird.

Die Teufenlage der Subrosion, insbesondere die Lage der Salzlösefläche als wichtiges Kriterium für die Bewertung der Barriere eines potentiellen Endlagers wird entscheidend von den lokalen geologischen Verhältnissen bestimmt. Daraus können erhebliche Unterschiede in der Teufenlage der Subrosionsflächen resultieren, was bedeutet, dass derartige Analysen immer Standort-bezogen durchzuführen sind.

Es gibt drei wesentliche und zu berücksichtigende Aspekte:

➤ Potentielle Lösegeschwindigkeit

- Die Lösegeschwindigkeit und die Lösungsformen (auch Gesteinsumbildungen) hängen von geologischen Prozessen und den Eigenschaften der Gesteine (Salinargesteine und ihren Nebengesteinen) insbesondere vom physiko-chemischen Verhalten ab.
- Die überwiegend chloridischen Salze sind im Wasser leicht/schnell löslich. Mineralumbildungen im Kalisalzgestein spielen für das hier zu behandelnde Thema kaum eine Rolle. Zu beachten ist jedoch die mit steigender Konzentration (Cl-Gehalt) abnehmende Lösefähigkeit des Grundwassers für Steinsalz, wodurch es schließlich zu zeitweisen und/oder lokalen Unterbrechungen und schließlich zu einem Stillstand der Subrosion kommen kann, wenn das hochkonzentrierte Wasser nicht abgeleitet wird.
- Gegenüber Anhydrit/Gips wird vom Wasser etwa die 160-fache Volumenmenge an Steinsalz aufgenommen. Kalisalze werden von NaCl-gesättigten Wässern je nach Mineralbestand um- und aufgelöst, wobei erhebliche Gesteinsvolumen beeinflusst werden (bis zur 4-fachen Menge der NaCl-Lösung).
- Die entstehende unterirdische Relieffläche wird bei fortschreitender Ablösung relativ, d. h. im Gesteinsverband tiefer gelegt, im Allgemeinen rechnet man in aktiven, natürlichen Subrosionsgebieten mit ca. max. 1 mm/a. Entstehende, weit ausgedehnte aber sehr flache Hohlräume werden umgehend geschlossen (die Hohlräume sind mit dem Lösungsmedium, der hochkonzentrierten NaCl- bzw. Kalisalz-Lösung gefüllt).

➤ Teufenlage / Deckgebirge

- Die Teufenlage der Subrosionsfläche hängt wesentlich vom Gesteinsaufbau und der tektonischen Situation im Deckgebirge ab, weil beide den Zu- und Abfluss von Lösungen steuern, weiterhin von Hebungen/Senkungen, insbesondere infolge von Salzwanderungsprozessen, also von der hydro-geologischen Entwässerung des betreffenden Gebietes.

➤ Relevanz Neotektonischer Prozesse

- Nach ihrer Sedimentation wurden die Salzgesteine durch tonige Schichten des Zechsteins und des Buntsandsteins großräumig vor der Auflösung geschützt - die Tongesteine selbst, sowie die überlagernden Sedimente sind Meeresbildungen.

- Sie gelangten während des Mesozoikums allmählich in große Teufen und wurden verfestigt.
- Bei der nach dem Mesozoikum folgenden generellen Hebung und bruchtektonischen Zergliederung wurden in den Hochschollen Zechstein und Mesozoikum vollständig erodiert (für Teutschenthal relevant sind Hallescher Vulkanitkomplex, Homburger Sattel, Halle-Hettstedter Gebirgsbrücke). In den Tiefschollen der Querfurter Senke blieben unterschiedliche Anteile der Trias und des Zechsteins überwiegend erhalten. Oberflächenwässer konnten über Klüfte in ursprünglich wasserstauende Schichten des Unteren Buntsandsteins eindringen und die Zechstein-Salze ablösen sowie schließlich auch Sulfatgesteine subrodieren und verkarsten.
 - Die Schutzschicht des Buntsandsteins über vollständig erhaltenen Steinsalzschiechten ist in geologisch vergleichbaren Gebieten (südlicher Teil des Germanischen Beckens) normalerweise mindestens 300 m mächtig (Unstrut-Kali-Revier, Südharz-Kalirevier, Bernburg). Auch bei wesentlich geringerer Buntsandsteinüberdeckung sind Salzgesteine erhalten, wobei allerdings die Salze der höheren Zechstein-Folgen, meist auch das Kaliflöz Staßfurt mit den oberen Teilen des Staßfurt-Steinsalzes abgelöst sind.
 - In lokalen Tertiärbecken, die an Subrosionssenken gebunden sind, werden unter marinen und limnischen Sedimenten häufig auch bei weniger als 100 m Rest-Buntsandstein die Salzgesteine in unvollständigen Profilen angetroffen; hier genügte also zu Beginn der tertiären Sedimentation wenige Dekameter Buntsandstein als Schutzschicht für das Steinsalz unter offenen Wasserflächen.
 - Andererseits gibt es sehr tiefgreifende Subrosion mit Buntsandsteinüberdeckung von weit über 400 m. Das bedeutet, die Schutzschichteigenschaften werden von regional unterschiedlich wirksamen Beanspruchungen/Prozessen modifiziert; dies sind geogene Prozesse wie Dehnung, Klüftung, Hebung/Salzakkumulation, Senkung/Salzabwanderung durch die Tektonik, die die Subrosion ebenso aktivieren können wie technologische Prozesse, insbesondere bergbaubedingte Senkung und die damit zusammenhängende Dehnung.

Relevanz von Subrosionsprozessen:

Der Zustand bzw. die Erhaltung der Salinarbarrieren ist im Verkarstungsgrad der Sulfat- und Karbonatgesteine im Deckgebirge dokumentiert. Er hängt wesentlich von der Wirkung der Subrosion ab, die eng an neotektonische Prozesse (Ausbildung von Störungszonen) gebunden ist. Durch den untertägigen Aufschluss (Abteufen der Schächte und des Endlagerbergwerks) können die natürlichen Prozesse aktiviert und beschleunigt werden (z. B. Absaufen von Schächten, wenn ein Durchteufen des wasserführenden Deckgebirges fehlgeschlagen ist).

Deshalb ist die Kenntnis des Zustandes des Deckgebirges, vor dem Hintergrund der Wirkung potenziell langfristig ablaufender Subrosionsprozesse, entscheidend für die geologische Standortprognose im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse. Somit muss das Verständnis und die Bewertung der Relevanz dieser Prozesse an einem möglichen Endlager-Standort ein zentrales Element für die Standortauswahl sein.

3 Vorgehensweise Sicherheitsnachweis / Anforderungen

3.1 Sicherheits- und Nachweiskonzepte

3.1.1 Vorbemerkung

Es ist weltweiter Konsens, dass umweltgefährdende Abfallstoffe, hier insbesondere HAW-Abfälle, langzeitsicher nur in tiefen geologischen Formationen langzeitsicher entsorgt werden können (z. B. IAEA, 2006). Während es in Deutschland bisher kein genehmigtes Endlager für radioaktive Abfälle gibt, werden Salzformationen seit Jahrhunderten bergbaulich zur Salzgewinnung genutzt. Die vorhandenen Hohlräume werden teilweise nach Durchführung einer Sicherheitsanalyse für die Lagerung umweltgefährdender (chemisch-toxischer) Abfälle genutzt. Diese umfangreichen Erfahrungen können auch zur Planung und Bewertung zukünftiger HAW-Endlager herangezogen werden, wobei sich aber die Sicherheitskonzepte unterscheiden.

3.1.2 Nachweiskonzept Endlager für HAW – Sicherer Einschluss

3.1.2.1 Vorgehensweise für Standort-Auswahl

Gemäß Standortauswahlgesetz (StandAG, 2017) werden Endlagersysteme zur Lagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen betrachtet.

Dort wird ein Endlagersystem definiert als

"das den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle durch das Zusammenwirken der verschiedenen Komponenten bewirkende System, das aus dem Endlagerbergwerk, den Barrieren und den das Endlagerbergwerk und die Barrieren umgebenden oder überlagernden geologischen Schichten bis zur Erdoberfläche besteht, soweit sie zur Sicherheit des Endlagers beitragen".

Gleichzeitig ist das Endlager so zu errichten und zu betreiben, dass für den zuverlässigen, langfristigen Einschluss der radioaktiven Abfälle in der Nachverschlussphase keine Eingriffe oder Wartungsarbeiten erforderlich werden.

Für den Entwurf eines Endlagerkonzeptes werden grundsätzlich drei Kategorien von Information benötigt:

- (1) eine Beschreibung der geologischen Gesamtsituation am betrachteten Standort, in der das Endlager errichtet werden soll, inkl. der geologischen Barriere,
- (2) eine umfassende Datenlage zum Abfallinventar (Masse, thermische Leistung, Nuklidspektrum, etc.), das eingelagert werden soll und
- (3) eine konkrete Vorstellung, wie die Sicherheit beim Betrieb und nach Verschluss des Endlagers gewährleistet und nachgewiesen werden soll, d. h. das sogenannte Sicherheitskonzept sowie die erforderlichen Nachweiskonzepte

zu (1): Im Rahmen einer geologischen Standortbeschreibung sind standortspezifisch alle vorliegenden Erkenntnisse zum strukturellen Aufbau der geologischen Formationen und zu ihren Eigenschaften sowie davon ausgehend als geologische Langzeitprognose ihre Entwicklung im Betrachtungszeitraum von einer Million Jahre ohne die Einwirkungen eines Endlagers zu betrachten.

Die Beschreibung hängt wesentlich von den jeweiligen Rahmenbedingungen am Standort ab, wie sie global für Mitteleuropa in Kap. 2.2.1 beschrieben werden.

Zu (2): Mit dem Beschluss der Bundesregierung von 2011 die Produktion von elektrischer Energie durch Kernkraftwerke bis Ende 2022 zu beenden, ist die Abschätzung des endzulagernden Inventars wärmeentwickelnder, radioaktiver Abfälle relativ präzise möglich.

Eine detaillierte Zusammenstellung findet sich u.a. in Pfeiffer et al. (2011), weshalb hier nicht weiter darauf eingegangen wird²⁵.

Abhängig vom Behälter- und Einlagerungskonzept ergibt sich der spezifische Flächenbedarf bzw. die räumliche Ausdehnung. Dies liegt noch nicht abschließend vor.

Zu (3): Ein Sicherheitskonzept beschreibt verbal-argumentativ, durch welche geologischen Gegebenheiten und technischen Maßnahmen die geforderte Sicherheit für ein Endlager an einem Standort erreicht und langfristig gewährleistet werden kann. Dabei liegen Leitgedanken zu Grunde, mittels derer die sichere und langfristige Endlagerung der radioaktiven Abfälle erreicht werden soll. Dies schließt u.a. auch die Entwicklung eines technischen Abdichtkonzeptes für Strecken und Schächte ein.

Ausgehend von den in Mönig et al. (2012) skizzierten Grundgedanken wird nachfolgend das generelle Vorgehen kurz zusammengefasst, wobei zusätzlich noch die Konzepte für Untertagedeponien umweltgefährdender Abfallstoffe damit verglichen werden (s. Kap. 3.1.3).

3.1.2.2 Grundgedanken Sicherheitskonzept

Im FuE-Vorhaben ISIBEL wurde zum ersten Mal ein Sicherheitskonzept erstellt, das den ewG-Gedanken und die hervorgehobene Rolle der Sicherheitsfunktion „Einschluss“ berücksichtigt, und für eine Salzformation in steiler Lagerung ein darauf basierendes Nachweiskonzept erarbeitet (Buhmann et al., 2008), wobei folgende Definitionen getroffen wurden:

- Der beispielsweise in den Sicherheitsanforderungen (BMU, 2010) geforderte Einschluss soll demnach dadurch erreicht werden, dass ein Zutritt von Lösungen zu den Abfällen bzw. der Austritt von Radionukliden ausreichend be- bzw. ganz verhindert wird. Werden bei der Berechnung der Konsequenzen die Kriterien der Sicherheitsanforderungen eingehalten, wird von einem **sicheren Einschluss** gesprochen.
- Falls im Bewertungszeitraum überhaupt keine Radionuklide aus dem ewG freigesetzt werden, wird dies als **vollständiger Einschluss** bezeichnet.

Ausgehend von diesen Festlegungen wurde in Moenig et al. (2012), zunächst für Endlager in Salzstöcken, sowie in Kindlein et al. (2018), übertragen auf flach-lagernde Salzformationen, die wesentlichen Grundgedanken eines Sicherheitskonzepts im Salz entwickelt.

Als Leitgedanke, soll die geologische Barriere (Steinsalz) den Einschluss der radioaktiven Abfälle nachsorgefrei und dauerhaft sicherstellen. Wesentlich für die dauerhafte Einschlusswirkung eines Endlagers im Salzgestein ist die geologische Barriere im ewG mit ihrer praktischen Dichtheit gegenüber Fluiden. Dazu muss die Integrität der geologischen Barriere sichergestellt sein, was durch die Eigenschaften des Salzgesteins im ewG gewährleistet werden muss.

Wie bei Kindlein et al. (2018) ausgeführt, besitzen Steinsalz und bestimmte Kalisalze die Fähigkeit zur bruchlosen duktilen Deformation mit gleichzeitigem Abbau lokaler Spannungen. Unter andauernd kompressiver Belastung verheilen Klüfte und Risse im Steinsalz aufgrund seines hohen Kriechvermögens relativ schnell, insbesondere bei Anwesenheit von Feuchtigkeit. Verheilung bedeutet, dass sich zwischen benachbarten Rissflächen wieder Kohäsion aufbaut oder aber, dass ein Riss durch Sekundärmineralisation wieder verschlossen wird. Die Permeabilitäten des vormals geklüfteten Gesteins erreichen im Ergebnis der Rissschließungs- und Verheilungsprozesse wieder die Werte des ungeklüfteten Gesteins; wie durch In-situ-Messungen nachgewiesen worden ist (Wieczorek & Schwarzianeck, 2004).

²⁵ Abhängig von der Berücksichtigung eines erweiterten Abfallinventars (schwach und mittelradioaktive Abfälle, z.B. nach Umlagerung aus dem ehemaligen Forschungsbergwerk Asse) muss der notwendige Flächenbedarf für ein Endlager in der flachen Lagerung ggfs. aktualisiert werden.

Bei der Bergwerksauffahrung ist die Durchfahrung der geologischen Barriere unvermeidbar. Dadurch werden direkte Wegsamkeiten zu den einzulagernden Abfällen geschaffen. Außerdem wird die geologische Barriere in konturnahen Bereichen aufgelockert und damit in ihrer Wirkung lokal geschwächt. Das visko-elastische bzw. visko-plastische Verhalten der Salinargesteine führt, allerdings erst mit der Zeit, zum Verschluss bergbaulicher Auffahrungen wie Schächte und Strecken, wobei das Salzgestein in konturnahen Bereichen seine ursprünglichen barrierewirksamen Eigenschaften zurückgewinnt.

Durch Einbringung von Versatz (Salzgrus) kann dieser Prozess unterstützt werden, wobei das Versatzmaterial langfristig und dauerhaft möglichst ähnliche hydraulische sowie thermo- und geomechanische Eigenschaften wie das unverritzte Steinsalz aufweisen sollte.

Die vorhandenen Schächte werden durch geeignete Abdichtungen langzeitsicher verwahrt und damit die Integrität der geologischen Barriere wieder hergestellt.

3.1.3 Nachweiskonzept UTD/UTV - Vollständiger Einschluss

3.1.3.1 UTD/UTV in Deutschland

In den 70er Jahren wurde bereits das Potential von Untertagebergwerken im Salz für eine sichere Entsorgung Umwelt-gefährdender Abfallstoffe erkannt²⁶. Während sich bei radioaktiven Abfällen der Begriff „Endlager“ etabliert hat, spricht man bei der Entsorgung von chemisch-toxischen Abfällen von „**Untertagedeponien**“ (⇒ **UTD**).

Dabei handelt es sich nach Deponieverordnung Abs. 2 Punkt 10 (DepV, 2009) um eine

Deponie der Klasse IV (Deponieklasse IV, DK IV): Untertagedeponie, in der Abfälle

a) in einem Bergwerk mit eigenständigem Ablagerungsbereich, der getrennt von einer Mineralgewinnung angelegt ist, oder

*b) in einer Kaverne, **vollständig im Gestein eingeschlossen**, abgelagert werden.*

Das bedeutet, im Unterschied zu einem späteren HAW-Endlager, wo eine wichtige Prämisse die Hohlraumminimierung ist, wurden für die Errichtung der Untertagedeponien bereits vorhandene Hohlräume genutzt, die im Ergebnis einer Sicherheitsbewertung, u.a. günstige geologische Rahmenbedingungen und eine entsprechende Standsicherheit, aufwiesen.

Allerdings steht bei der Rohstoffgewinnung eine möglichst intensive Nutzung im Vordergrund. Dies hat teilweise zu einer Unterdimensionierung des entsprechenden Pfeilertragsystems bezüglich der Verteilung Hohlraum/Pfeiler sowie der Pfeilergeometrie geführt (s. u.a. Bergwerke im Südharz, z. B. Sondershausen, Bleicherode), weshalb die dabei entstandenen Hohlräume zur Wiederherstellung ihrer langzeitigen Standsicherheit versetzt werden müssen. Unter bestimmten geologischen und technischen Voraussetzungen (s. unt.) können dafür geeignete Abfälle, z.B. Filterstäube aus Abgasreinigungsanlagen, nach Untertage verbracht und somit verwertet werden (⇒ **Untertageverwertung, UTV**).

Die aktuell in Deutschland betriebenen Standorte für UTD und/oder UTV sind in Abb. 3-1 zusammengefasst.

²⁶ Beispielsweise werden chemisch-toxische Abfälle seit 1972 in der Europa-größten Untertagedeponie Herfa-Neurode untertägig entsorgt.

Die Entsorgungskapazität der UTV-Bergwerke/-Kavernen zur Verwertung von Abfällen und der Untertagedeponien (UTD) zur Beseitigung von Abfällen betragen zusammen etwa 2,5 Millionen Tonnen im Jahr. Hiervon entfallen auf die vier UTD etwa 360.000 Tonnen im Jahr.

Standort	Eigentümer/Betreiber	Typ	Gleichzeitig Salzproduktion
Bernburg	esco – european salt company GmbH & Co. KG	UTV	Ja
Bleicherode	NDH Entsorgungsbetreiber-gesellschaft mbH	UTV	Nein
Sollstedt	NDH Entsorgungsbetreiber-gesellschaft mbH	UTV	Nein
Hattorf	K+S KALI GmbH	UTV	Ja
Heilbronn	UEV Umwelt, Entsorgung und Verwertung GmbH	UTD/UTV	Ja
Herfa-Neurode	K+S KALI GmbH	UTD	Ja
Kochendorf	UEV Umwelt, Entsorgung und Verwertung GmbH	UTV	Nein
Staßfurt	Minex GmbH	UTV Kaverne	Nein
Sondershausen	GSES Glückauf Sondershausen Entwicklungs- und Sicherungsgesellschaft	UTV/UTD	Ja
Stetten	Wacker Chemie GmbH	UTV	Ja
Teutschenthal	GTS Grube Teutschenthal Sicherungs GmbH & Co. KG	UTV	Nein
Unterbreizbach	K+S KALI GmbH	UTV	Ja
Wintershall	K+S KALI GmbH	UTV	Ja
Zielitz	K+S KALI GmbH	UTD/UTV	Ja



Abb. 3-1. Versatzbergwerke/-kavernen (UTV) und Untertagedeponien (UTD) in Deutschland; a) Standort, Betreiber, weitere Nutzung; b) Karte der räumlichen Verteilung (aus Rottlaender, 2013).

3.1.3.2 Gesetzliche Anforderungen / Nachweiskonzepte

Die Rahmenbedingungen zu Anforderungen an die Verwertung und sonstige Entsorgung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen waren zunächst in der TA Abfall (1991) zusammengefasst, die aktuell in der Deponieverordnung (DepV, 2009) weitergeführt werden.

Sicherheitstechnischer Grundgedanke der ausschließlich im Salzgestein möglichen Entsorgung chemisch-toxischer Abfälle ist, dass

- bei der Ablagerung von Abfällen in untertägigen Anlagen die Abfälle dauerhaft von der Biosphäre ferngehalten werden sollen (= **dichter Einschluss**). Gleichzeitig hat die untertägige Ablagerung so zu erfolgen, dass keine Nachsorge erforderlich ist.

Voraussetzungen dafür sind gemäß DepV (2009)²⁷,

Das Salzgestein am Standort muss

- 1) gegenüber Flüssigkeiten und Gasen dicht sein,
- 2) eine ausreichende räumliche Ausdehnung besitzen
- 3) im ausgewählten Ablagerungsbereich eine ausreichende Salzmächtigkeit besitzen.

Darüber hinaus

- 4) müssen die geomechanischen Eigenschaften des Gebirges die Herrichtung von standsicheren Hohlräumen ermöglichen,
- 5) dürfen die Hohlraumwandungen nicht in der Nähe von Gebirgsschichten mit potentiellen Wasser-Wegsamkeiten (Wasserwarnlinie nach Bergrecht) liegen,
- 6) sind Standorte, in denen die regionale Erdbebenintensität mit einer Wahrscheinlichkeit von 99% den Wert 8 nach der MSK₆₅-Skala überschritten wird, zu meiden.

²⁷ Anhang 2 Anforderungen an den Standort, geologische Barriere, Langzeitsicherheitsnachweis und Stilllegungsmaßnahmen von Deponien der Klasse IV im Salzgestein (zu § 3 Absatz 2, § 10 Absatz 1, § 11 Absatz 2).

Der Nachweis der Eignung des Gebirges für die Anlage einer Untertagedeponie muss durch eine standortbezogene Sicherheitsbeurteilung erbracht werden. Diese Sicherheitsbeurteilung hat das Gesamtsystem "Abfall-Untertagebauwerk-Gebirgskörper" zu berücksichtigen. Grundlage der standortbezogenen Sicherheitsbeurteilung ist die Analyse der zu beachtenden Gefährdungsmöglichkeiten bei Errichtung, beim Betrieb und in der Nachbetriebsphase. Hieraus sind die erforderlichen Kontroll- und Schutzmaßnahmen abzuleiten. Zur standortbezogenen Sicherheitsbeurteilung sind folgende Einzelnachweise zu führen:

- a. Geotechnischer Standsicherheitsnachweis, d. h.
Nachweis der Standsicherheit der Hohlräume durch geeignete Rechnungen, z. B. Pfeilerberechnungen, wobei der Einfluss der abzulagernden Abfälle zu berücksichtigen ist.
- b. Sicherheitsnachweis für die Betriebsphase
Für die Betriebsphase ist ein Sicherheitsnachweis mit den Einzelnachweisen, (1) dem Nachweis Standsicherheit der Hohlräume (s.o.), und (2) dem Nachweis der Betriebssicherheit.
- c. Langzeitsicherheitsnachweis
Durch einen Langzeitsicherheitsnachweis ist zu belegen, dass die Errichtung, der Betrieb und die Nachbetriebsphase einer Untertagedeponie zu keiner Beeinträchtigung der Biosphäre führen können. Dazu sind die Barrieren der Untertagedeponie (z. B. Abfallbeschaffenheit, Versatz und Verschlüsse von Schächten und Bohrungen), das Verhalten des Salzgesteins, des Nebengesteins und des Deckgebirges sowie Ereignisabläufe im Gesamtsystem durch geeignete Modelle auf der Basis konkreter Standortdaten oder ausreichend konservativer Annahmen nachzubilden und zu bewerten. Die geochemisch-hydrogeologischen Gegebenheiten wie Grundwasserbewegungen und Lösungspotentiale (Barrierewirksamkeit) sind zu betrachten. Dies schließt die Bewertung technischer Abdichtungsbauwerke (Strecken, Schächte) sowie den Versatz ein.

3.1.4 Fazit

Die allgemeinen Anforderungen an die Endlagerung radioaktiver Abfälle sowie die Ablagerung besonders überwachungsbedürftiger (chemisch-toxischer) Abfälle stimmen in wesentlichen Punkten für das Wirtsgestein „Salz“ überein. In beiden Fällen ist immer eine Untersuchung zum konkreten Standort durchzuführen, um die Gewährleistung des allgemeinen Schutzziels sicherzustellen.

Gleichzeitig sind technische Verschlusskonzepte (mit Schacht- und Streckenverschlüssen sowie Versatzmaßnahmen) erforderlich, um die vorliegenden Durchörterungen der Salz-Barriere wieder abzudichten.

Allerdings gibt es bei der konzeptionellen Definition des Schutzziels sowie der Umsetzung dafür mit Definition der Salinar-Barriere Unterschiede:

- Für die Endlagerung radioaktiver Abfälle wird primär der „sichere“ Einschluss gefordert. Das bedeutet, bei der Berechnung der Konsequenzen müssen die Kriterien der Sicherheitsanforderungen für einen Zeitraum von 1 Mio.-Jahren eingehalten werden, wofür ausschließlich die Barriere im Wirtsgestein „Steinsalz“ anzusetzen ist. Dafür ist die Neuauffahrung des HAW-Endlagers zwingende Voraussetzung.
- Bei der Ablagerung von Abfällen (UTD/UTV) wird der „dichte“ Einschluss gefordert. Das bedeutet, in untertägigen Anlagen im Salzgestein sollen die eingebrachten Abfälle dauerhaft von der Biosphäre ferngehalten werden, wofür allerdings auch vorhandene Hohlräume genutzt werden können. Gleichzeitig ist der Betrachtungszeitraum auf ca. 30.000 Jahre begrenzt.

In jedem Fall muss eine ggfs. mögliche Freisetzung immer auf ein zulässiges Maß minimiert sein. Dies soll durch ein Multi-Barrierensystem, teilweise durch die Abfallmatrix selber, sowie technische Barrieren und letztlich die Integrität der Salzbarriere gewährleistet werden. Dabei erfolgt keine Festlegung auf Steinsalz, sondern die geologische Barriere schließt das gesamte Salinar ein, d.h. die gesamte lithologische Vielfalt der auftretenden Salzgesteine (u.a. Steinsalz, Kaligestein, Salztone und Anhydrit) ein (Barriere im eigentlichen Sinne). Zusätzlich wird noch das Deckgebirge betrachtet. Gleichzeitig wird im Falle der UTV mit dem Einbringen der Abfälle (als Bergeversatz) die Gesamtstabilität des umgebenden Gebirges verbessert.

Bewertung

Trotz der qualitativen Unterschiede zwischen „sicherem“ und „dichtem“ Einschluss liegen grundsätzlich vergleichbare Sicherheitsanforderungen und -konzepte vor, die im Falle des HAW-Endlagers noch weiter „verschärft“ wurden. Wesentlich ist, dass der geologischen Barriere eine elementare Sicherheitsfunktion zugewiesen ist.

- Für HAW-Endlager im Salz wird bevorzugt auf das Wirtsgestein „Steinsalz“ fokussiert, das sich durch einzigartige Eigenschaften (Dichtheit, Plastizität) auszeichnet und bei ausreichender Mächtigkeit eine hinreichende Sicherheit für den geforderten Nachweiszeitraum von 1 Mio.-Jahren gewährleistet. Gleichzeitig besteht mit der Neuauffahrung des Endlagers Planungssicherheit.
- Für die Ablagerung umweltgefährdender Abfallstoff im Salzgebirge werden in der Regel bereits vorhandene Hohlräume genutzt, weshalb aufgrund vorliegender bergbaulicher Einwirkungen besondere Anforderungen an die Verfüll- und technischen Abdichtkonzepte bestehen.

Allerdings wird von vornherein auf ein Multi-Barrierensystem abgehoben, das neben technischen Barriere-Elementen die **gesamte Salinarbarriere** umfasst. Damit liegen diversitäre (Tongestein, Salzgestein) und redundante Barriere-Elemente vor (mehrfach wiederholte Steinsalzeinschaltungen aus unterschiedlichen Ausscheidungsfolgen).

Aus sicherheitstechnischer Sicht ergeben sich auch für die geologischen Barrieren erhebliche Vorteile, wenn den Forderungen nach Diversität und Redundanz Rechnung getragen wird, wie es insbesondere für Salz in der flachen Lagerung möglich ist. Allerdings ist damit ein erweiterter Kenntnisstand zu den hydro-mechanischen Eigenschaften dieser Gesteinsserien erforderlich (s. Kap. 4).

3.1.5 Anforderungen / Nachweis der geologischen Barrierenintegrität

Entsprechend Kindlein et al. (2018) stellt das unverritzte Salzgestein im ewG den über den gesamten Nachweiszeitraum primär relevanten Teil der geologischen Barriere dar, der den Einschluss der Schadstoffe im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sicherstellen muss.

Somit ist für ein Endlagerbergwerk in Salzformationen die entscheidende Voraussetzung zur Erlangung eines sicheren Einschlusses das Vorhandensein ausreichend mächtiger Salinarbarrieren um den Einlagerungshorizont. Allerdings kann durch die aufgrund der nachfolgend skizzierten Vorgänge induzierten Spannungs- und Verformungsfelder sowie hydraulischen Belastungen das Integritäts- und Permeabilitätsverhalten einer geologischen Barriere beeinflusst sein (Minkley et al., 2010)

- geogene Vorgänge
- bergbauinduzierte Beanspruchungen

- thermomechanische Beanspruchungen
- Fluiddruck-generierte Beanspruchungen.

Die daraus resultierenden Schädigungsprozesse lassen sich wie folgt beschreiben:

- mechanische Schädigung bei Überschreitung der Dilatanzgrenze:
Dieser Prozess läuft vor allem in der Auflockerungszone der anthropogen geschaffenen Hohlräume (EDZ) ab und ist von seiner Reichweite ins Gebirge stark begrenzt (Dezimeter- bis Meterbereich → Nahfeld) (vgl. Kap. 4.1.2)
- konvergenz- und thermomechanisch bedingte Spannungumlagerungen infolge der freigesetzten Zerfallswärme der eingebrachten HAW-Abfälle:
Dieser Prozess ist in Abhängigkeit von der Größe des Einlagerungsfeldes und den thermisch induzierten Beanspruchungen mit Gesteinsausdehnung sowie Hebung weitreichend (Dekameter bis einige hundert Meter → Fernfeld). Als Folge kann ebenfalls mechanische Schädigung (bei Überschreitung der Dilatanzgrenze) resultieren sowie zusätzlich eine
- fluiddruck-getriebene Generierung von hydraulischen Fließwegen entlang von Diskontinuitäten im mikro- und makroskopischen Maßstab im Salinargebirge (Korngrenzen, Schichtflächen), wenn die Fluiddrücke größer als die minimale Hauptspannung sind.

Daraus folgt als wichtigste Prämisse für den Integritätsnachweis, dass diese komplexen Prozesse einer möglichen Schädigungsentwicklung angemessen zu berücksichtigen sind.

Voraussetzung für die Bewertung der langzeitigen Barrierenintegrität ist, das verifizierte Kriterien zur Identifikation und Quantifizierung potentieller Schädigungsprozesse sowie entsprechende Auswertetools für die Analyse zur Verfügung stehen.

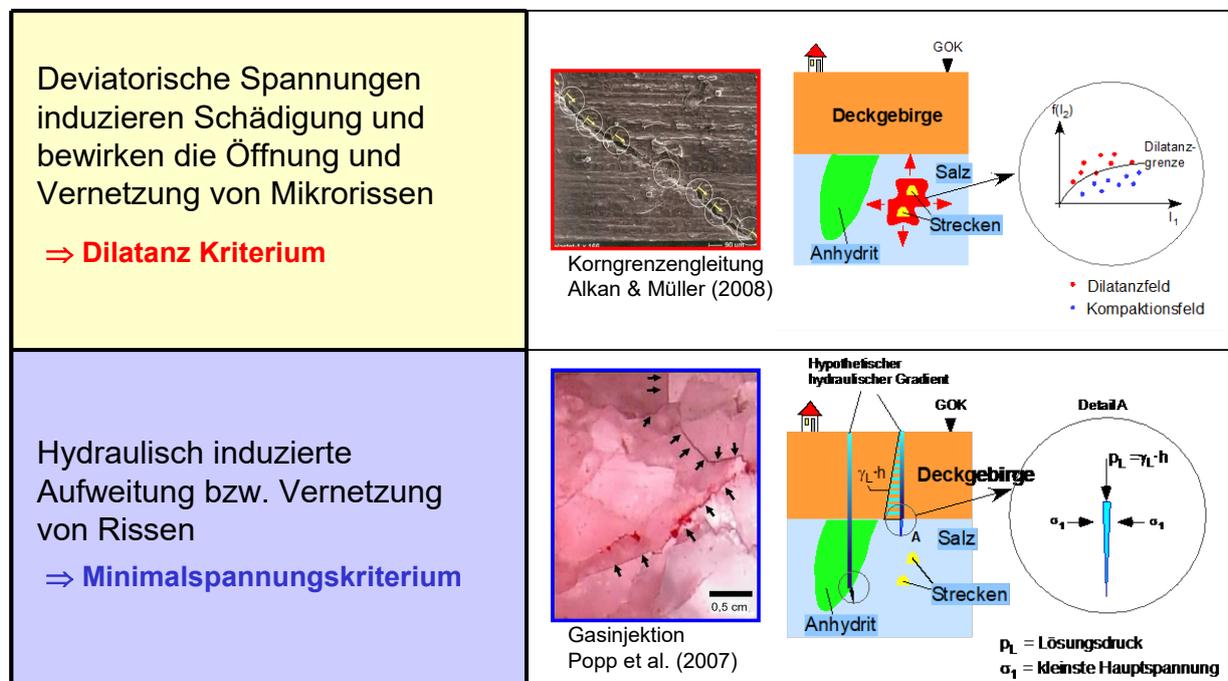


Abb. 3-2. Dilatanz- und Minimalspannungskriterium.

Dies erfolgt durch die Anwendung der folgenden beiden Kriterien, wie sie schematisch in Abb. 3-2 dargestellt sind:

- **Dilatanzkriterium** (mechanische Beanspruchung):

$$\frac{\Delta \varepsilon_{Vol}}{\Delta \varepsilon_1} \leq 0 \quad (3.1)$$

Dieses Kriterium fordert, dass bei deviatorischer Beanspruchung keine durchschlägigen Gefügebrauchungen mit induziertem Risswachstum und Vernetzung interkristalliner Risse entstehen. Der Vorgang der Gefügebrauchung ist allgemein mit Dilatanz, d. h. einer Volumenzunahme durch die Ausbildung von Mikrorissen und Rissakkumulationen, verbunden.

Der Spannungszustand, an dem die Volumenänderungsgröße $\Delta \varepsilon_{Vol}$ positiv wird, also Dilatanz infolge Schädigung eintritt, wird als Dilatanzgrenze bezeichnet. Unterhalb dieser Spannungsgrenze ist die Volumenänderung Null (z.B. bei volumentreuer Verformung infolge Salzkriechen) bzw. kann sogar negativ sein, wenn es zu Risschlussprozessen (Kompaktion) kommt.

- **Fluidruckkriterium bzw. Minimalspannungskriterium** (hydraulische Beanspruchung)

$$n_F = \frac{\sigma_{min} + \sigma_Z}{p_{Fl}} > 1 \quad (3.2)$$

Das Kriterium verlangt, dass die kleinste Gebirgsdruckspannung σ_{min} in der abdichtenden Barriere zuzüglich einer zu überwindenden Zugfestigkeit σ_Z größer als der in der entsprechenden Teufenlage hypothetisch mögliche Fluidruck p_{Fl} sein muss. Bei einem Sicherheitsfaktor $n_F > 1$ gilt das Kriterium als erfüllt, d. h. ein druckgetriebenes Eindringen von möglicherweise anstehendem Fluid ist unter den gegebenen Einspannungsbedingungen nicht möglich.

Die Nachweisführung erfolgt über gebirgsmechanische Modellrechnungen für den gesamten Gebirgsbereich:

- Die Integrität eines Gebirgsbereiches bleibt erhalten, wenn beide Kriterien in diesem Bereich – mit Ausnahme eines eng begrenzten Bereichs um die bergmännisch geschaffenen Hohlräume (Auflockerungszone – Nahfeld) – nicht verletzt werden.

Anhand der Ergebnisse der numerischen Modellrechnungen werden die Gebirgsbereiche identifiziert, in denen die Integrität nicht gegeben ist. Solange die Integrität der geologischen Barriere zumindest im einschlusswirksamen Gebirgsbereich gewährleistet ist, kann ausgeschlossen werden, dass sich Wegsamkeiten für den Zutritt von Lösungen zu den Abfällen oder für den Transport von Radionukliden und sonstigen Schadstoffen zwischen dem Grubengebäude und wasserführenden Schichten außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs oder der Biosphäre bilden.

Bewertung

Aufgrund der Erfahrungen aus den vorläufigen Sicherheitsanalysen im Rahmen der VSG bzw. KOSINA sowie der Analyse aufgetretener Versagensfälle bei praktischen Bergbauprojekten kann gefolgert werden, dass die hier vorgestellten und allgemein angewandten Kriterien zur Prüfung des Dichtheits- und Integritätsverhaltens von Salinarbarrieren den Anforderungen für eine zuverlässige Prognose des Langzeitverhaltens der geologischen Barriere Salz genügen.

3.2 Rahmenbedingungen für eine Standortauswahl

3.2.1 Einführung

Bei den in der Vergangenheit in Deutschland entwickelten Endlagerkonzepten wurde ausschließlich das „Bergwerkskonzept“ berücksichtigt.

Damit ergeben sich für entsprechende Endlagersysteme, in denen hauptsächlich die geologische Barriere, (1) den Einschluss der Abfälle im ewG und (2) die Mindestfunktion über den Nachweiszeitraum (Integrität sowie Wartungsfreiheit) gewährleisten soll, Mindestanforderungen für die Gesteins- und Gebirgseigenschaften und räumliche Parameter.

In StandAG (2017), Kapitel 3 “Kriterien und Anforderungen für die Standortauswahl”, §23 (5) sind die Anforderungen zur Gebirgsdurchlässigkeit²⁸, Mindestmächtigkeit, minimale Teufentiefe (300 m unter Geländeoberfläche) und eine ausreichende Fläche für die Anlage des Endlagers sowie der Erhalt der Barrierewirkung festgelegt. Beispielsweise muss der Gebirgsbereich, der den einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnehmen soll, mindestens 100 m mächtig sein.

Gleichzeitig muss bei Ansatz eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs dieser eine Gebirgsdurchlässigkeit k_f von weniger als 10^{-10} m/s aufweisen. Kann in einem Kristallingestein kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen werden, so ist die Einhaltung der Schutzziele durch die technischen und geotechnischen Barrieren zu gewährleisten.

Darüber hinaus gehend sind aber für eine konkrete Auswahl von Untertagestandorten weitere Präzisierungen wichtiger geologisch/bergbaulicher Grenzparameter notwendig, um günstige Randbedingungen für eine technische Umsetzung zu gewährleisten:

- Empfehlung einer **Maximalteufe**
Wegen der bekannten hohen Kriechfreudigkeit von Steinsalz sowie aus Arbeitssicherheitslichen Gründen ist eine Begrenzung der Maximalteufe zu prüfen (s. Kap. 3.2.2).
- Empfehlung einer **Mindestteufe**,
Aufgrund bergbaulicher Erfahrungen zum Absaufen von Gewinnungsbergwerken, insbesondere im Staßfurter Raum, ist es aus Sicherheits-konzeptioneller Sicht sinnvoll eine Mindestteufe für einen potentiellen Endlagerstandort anzusetzen, um das potentielle Risiko aus hydraulischen Einwirkungen möglichst gering zu halten (s. Kap. 3.2.3).
- Nachweis der Existenz **ausreichender Sicherheitsabstände**, z.B. zu benachbarten Störungszonen bzw. zu einem potentiell wasserführenden Deck- oder Nebengebirge (s. Kap. 3.2.4).

²⁸ Hinweis: Zur Quantifizierung der Durchlässigkeit von Gesteinen werden in der Literatur häufig entweder der Durchlässigkeitsbeiwert (k_f -Wert) oder die Permeabilität k verwendet, die sich allerdings in ihrer Definition und Aussagefähigkeit unterscheiden.

In der hydrogeologischen Praxis wird als Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen allgemein der k_f -Wert (m/s) angegeben. Dieser ist der Quotient aus der durchfließenden Wassermenge Q (m^3/s) und dem Produkt aus Gefälle ($J = h/L$; Druckgradient / Fließweglänge) und der durchströmten Fläche A (m^2). Er ist abhängig von den Eigenschaften des Gesteins und des Grundwassers (z. B. Salinität).

Im Gegensatz dazu ist die Permeabilität k (m^2) ein Gesteinsparameter und somit unabhängig von dem Medium (Fluid), welches das Material durchströmt. Sie leitet sich aus der allgemeinen Darcy-Gleichung (unter Annahme ihrer Gültigkeit) ab, wobei inkompressible (flüssige) und kompressible (gasförmige) Medien in ihren Eigenschaften berücksichtigt werden. Letztlich ist damit die Permeabilität der entscheidende Parameter für den Vergleich von hydraulischen Gesteinseigenschaften.

3.2.2 Empfehlung einer Maximalteufe

Für die Empfehlung einer Maximalteufe ≤ 1200 m sind zwei Aspekte zu beachten:

- (1) Begrenzung der Teufenlage, entsprechend einer max. Gebirgstemperatur von ca. 50°C zur Gewährleistung sicherer Arbeitsbedingungen untertage.

Unter Berücksichtigung üblicher geothermischer Gradienten über Salzformationen ergeben sich damit eine Maximaltiefe von ca. 1.000 m für Salzstöcke bzw. mutmaßlich max. 1.200 m (u.a. nach BGR, 1995).

- (2) Gewährleistung bergbaulich beherrschbarer Konvergenz-bedingter Verformungsprozesse in der Konturzone untertägiger Hohlräume im Salzgebirge

Zielstellung ist für einen Zeitraum von mindestens 50 Jahren einen weitgehend wartungsfreien Endlagerbetrieb (u.a. Stabilität der Hohlraumfirsten und -stöße) zu gewährleisten²⁹.

Lux (2002) kommt im Ergebnis numerischer Simulationsberechnungen von Hohlräumen im Salzgebirge, unter Berücksichtigung einer Gebirgsklasse mittlerer Kriechfähigkeit für Steinsalz in der Bewertung verschiedener Kriterien³⁰ sowie eingeschätzten Grenzwerten (vgl. Abb. 3-3) zum Ergebnis,

dass ausgehend von einer Teufe $z \geq 600$ m

- bis in eine Teufe von 1100 m für den Lastfall Ausbruch und
- bis in eine Teufe von 1000 m für den Lastfall Ausbruch/ Temperaturänderung „günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“ abgeleitet werden können.

Diese Aussage stimmt im Grundsatz mit den bergbaulichen Erfahrungen überein, wonach Kalibergbau in Mitteldeutschland bis in ca. 1.400 m Teufe betrieben wird.

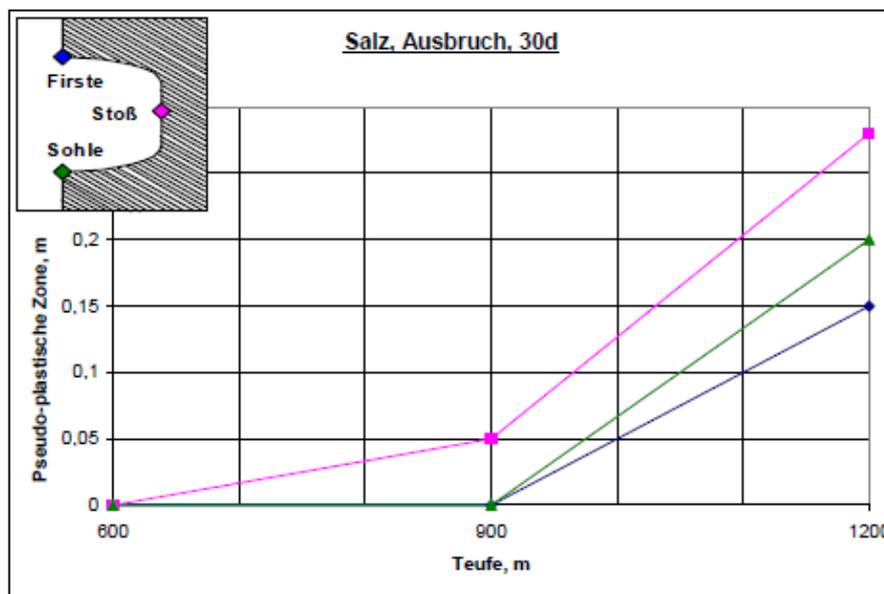


Abb. 3-3. Pseudo-plastische Zone (Bruchfestigkeit β_{80}): Teufen 600m – 1200m; $k_0 = 1$ (aus Lux, 2002).

²⁹ Hierbei ist anzumerken, dass ein Berauben der Firste und Nachschneiden der Sohle wegen der plastischen Eigenschaften des Steinsalzes zu den üblichen Unterhaltungsarbeiten gehören.

³⁰ Zur Bewertung der Anforderung „günstige gebirgsmechanische Randbedingungen“, formuliert Lux (2002) zwei geomechanische Indikatoren (1) Gebirge als Haupttragelement (Nachweis der Standicherheit einer Strecke über einen Zeitraum von 50 Jahren) und (2) begrenzte Sekundärpermeabilität (bei Auffahrung einer Strecke entsteht eine Sekundärpermeabilität, die zeitlich begrenzt und auf die Konturzone der Strecke begrenzt sein soll).

3.2.3 Empfehlung einer Mindestteufe

3.2.3.1 Relevanz potentieller Lösungszutritte

Ein wesentliches Risiko für Endlager in Salzformationen ist wegen der hohen Löslichkeit des Salzgebirges der potentielle Zutritt von ungesättigten Wässern oder nur teilgesättigten Salzlösungen. Vorliegende Erfahrungen aus dem rezenten Salzbergbau zeigen, dass das Gefährdungspotential von Lösungszuflüssen, neben der komplexen hydrogeologischen und tektonischen Situation (wie sie sich z.B. aus der Nähe zu Störungszonen ergibt, vgl. Kap. 3.2.4), vor allem abhängig von der Teufenlage ergibt.

Schwandt & Herbert (2007) folgern aufgrund der chemischen Zusammensetzung beobachteter Salzlösungsvorkommen, dass

- in Gebieten mit vergleichbarer stratigraphischer und tektonischer Situation mit zunehmender Teufe eine Erhöhung der Salzkonzentration und der Dichte der Lösungen auf-treten.
- Gleichzeitig reduziert sich die Anzahl der Zuflüsse, wie auch die Zuflussmenge.

Dies ist qualitativ für Lösungszuflüsse aus dem Hauptanhydrit an der NE-Flanke des Staßfurter Sattels dargestellt (Abb. 3-4). Die Auswertung historischer Lösungszuflüsse über den Hauptanhydrit dokumentiert, dass im eingespannten Gebirge außerhalb eines möglichen Hohlraumeinflusses und in Teufen > 800 m keine geöffneten Klüfte im Hauptanhydrit und in angrenzenden Steinsalzbereichen feststellbar sind.

Dieser Sachverhalt wurden in Untersuchungen von Kamlot (2009), auf Basis von in-situ-Untersuchungen und Modellrechnungen standortunabhängig belegt.

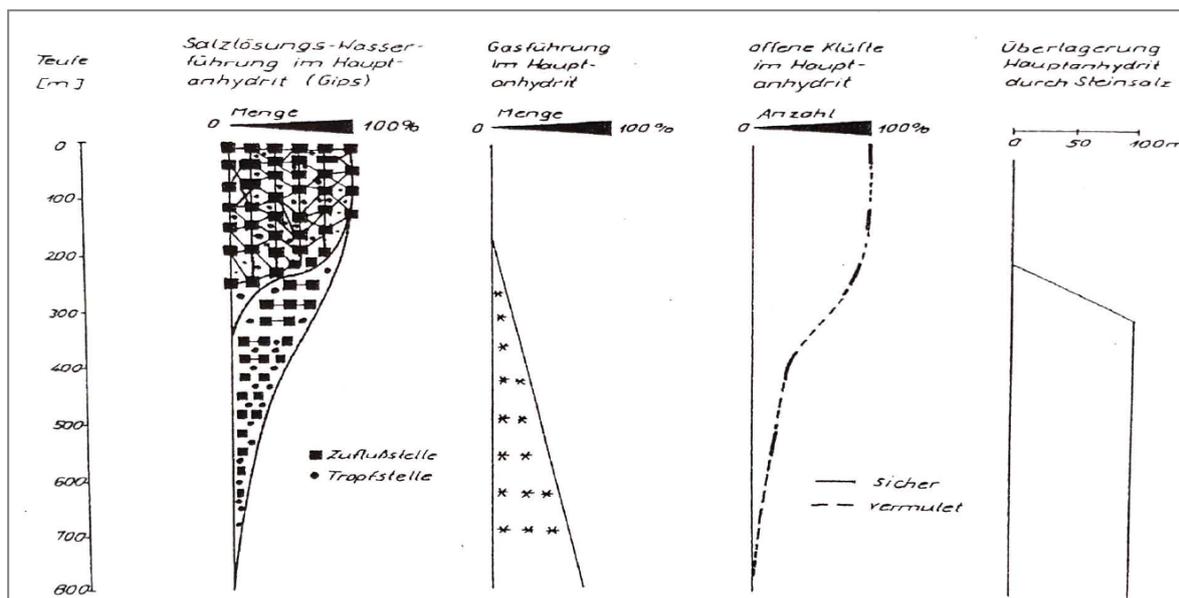


Abb. 3-4. Verteilung fluidier Medien im Hauptanhydrit an der NE-Flanke des Staßfurter Sattels (aus Schwandt, 1991).

3.2.3.2 Erläuterung

Salzgesteine sind primär dicht, weshalb sich in der Regel beim Fehlen von wasser-unlöslichen Schichten im Deckgebirge bei Zutritt von Wasser ein Salzspiegel ausbildet, wobei die Wirksamkeit der Löseprozesse zur Teufe hin von verschiedenen Faktoren abhängig ist (vgl. Kap. 2.2.3).

Unabhängig davon erfolgt ein Zutritt von Salzlösungen in Grubenhohlräume nur bei Unterschreitung hinreichender Salzbarrierenmächtigkeiten (vgl. Kap. 3.2.4) und/oder bei gleichzeitiger Änderung der Spannungsrandbedingungen, insbesondere dann, wenn Spannungszustände oberhalb der Dilatanzgrenze oder wirkende Fluiddrücke, die größer waren als die kleinste Hauptspannung, auftreten.

Mit zunehmender Teufe wird der Unterschied zwischen einem potentiell anstehenden Lösungsdruck ($\rho_{\text{NaCl-Lösung}} = 1,2 \text{ g/cm}^3$) und dem Teufendruckgradienten, der im Norddeutschen Becken zwischen 17,6 und 24,5 MPa/km variiert (Röckel & Lempp, 2003) relativ größer. Insofern ist es zielführend, die Teufenlage eines potentiellen Endlagers möglichst tief, d.h. auf $\geq 800 \text{ m}$ zu legen.

3.2.4 Sicherheitsabstände zu potentiellen Störungsbereichen

3.2.4.1 Vorbemerkung

Der Gesamtflächenbedarf eines Endlagers im Salz ist gegenüber Endlagern im Ton- bzw. Kristallingestein am geringsten und hängt gleichzeitig von der zulässigen Maximaltemperatur ab (DBE-Tec, 2016):

200°C: 1.278.800 m²

100°C: 2.283.800 m².

Wird somit von einem Flächenbedarf von ca. 2,5 km² (Einlagerungstemperatur: 100°C) ausgegangen, bedeutet das, dass bei einer beispielhaften, rechteckigen Grundfläche (2,5 x 1 km²) für das Endlager sowie den dazu gehörenden lateralen Sicherheitsabständen (500 m, vgl. Kap. 3.2.4.4) eine Endlagergrundfläche von ca. 7 km² benötigt würde.

Diese Grundfläche entspricht annähernd der heutigen Grube Teutschenthal und ist damit deutlich kleiner, als die der meisten ehemaligen oder heute noch aktiven Salzgewinnungsbergwerke³¹. Allerdings gilt grundsätzlich, dass die Dimensionierung des Tragsystems und der geologischen Barrieren eines Endlagerbergwerkes für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle anders als bei einem Gewinnungsbergwerk, wo die optimale wirtschaftliche Ausbeute der Lagerstätte im Vordergrund steht, auf die langzeitige Erfüllung der sicherheitlichen Anforderungen zur Vermeidung von Versagenszuständen ausgerichtet ist. Dabei wirken zusätzliche Beanspruchungen, die sich aus dem Wärmeeintrag ergeben. Somit folgt, dass sich die Hohlraumdimensionierung beider Bergwerkstypen grundsätzlich unterscheidet.

Unabhängig davon bestehen für beide Bergwerksnutzungen grundsätzlich eine Reihe natürlicher und technogener Gefährdungsmöglichkeiten. Natürliche Gefährdungsmöglichkeiten sind gegeben u.a. durch Subrosionsbereiche, Inhomogenitäten in den Schutzschichten gegen salzlösungs- bzw. wasserführende Horizonte im Hangenden und Liegenden der Abbaubereiche oder auch undicht ausgebildeter Pfeiler oder Barrieren gegen Salzlösungsvorkommen in benachbarten Gruben.

Technogene Gefährdungsmöglichkeiten können verursacht werden durch Obertage-(OT)-Bohrungen, Schächte, Untertage-(UT)-Bohrungen sowie auch ungenügend dimensionierte Pfeiler gegen wasser- oder salzlösungsführende Horizonte.

Je nach Zweck und den vorherrschenden geologisch-bergbaulichen Rahmenbedingungen existieren unterschiedliche Empfehlungen zur Festlegung von Sicherheitsabständen.

³¹ Beispielsweise entspricht die unter Tage, in der flachen Lagerung, abgebaute Fläche des Werkes Werra (K+S) in ihrer Ausdehnung der Fläche der Stadt München mit Vororten.

3.2.4.2 Sicherheitsabstände aus dem aktiven Bergbau

In der Niedersächsischen Allgemeinen Bergverordnung wird für Salzbergwerke in der steilen Lagerung ein Sicherheitspfeiler gegen den Salzspiegel, die Salzstockbasis und die Salzstockflanken von mindestens 150 m gefordert, nach §224 ABVO (1996). Laut Absatz (e) ist der Sicherheitsabstand auf 200 m zu vergrößern, wenn die Lage der Grenzen nicht genau ermittelt werden kann.

Im Kali- und Steinsalzbergbau in der flachen Lagerung (nachfolgend wird insbesondere auf die Werra-Region Ostdeutschlands Bezug genommen) besteht als Bergbau-sicherheitliche Grundanforderung, die Notwendigkeit der Definition von Sicherheitsabständen zu bekannten oder potentiell hydrogeologischen Gefahrenquellen. Diese sind im Rahmen von Betriebsplänen auszuweisen und unbedingt einzuhalten.

Dafür existieren folgende Begriffsbestimmungen:

- **Sammler** sind bekannte bzw. potentielle hydrogeologische Gefahrenquellen in denen Standwasser angetroffen werden kann.
- **Standwasser** ist Wasser oder Salzlösung (bergmännisch Lauge), von dem bzw. der nach Menge, Druck oder Lösefähigkeit gegenüber den anstehenden Gesteinen eine Gefährdung von Menschen oder des Bergbaubetriebes ausgehen kann. Es ist Inhalt von Sammlern bzw. fließt aus einem solchen zu.

Die potentiellen Gefährdungen werden in „Laugengefährdungsklassen“ eingeteilt, wobei die höchste Gefährdung gegenüber den ob. genannten Sammlern bei Gefährdungsgruppe 1b besteht.

Für die Definition der Sicherheitsabstände handelt es sich um Abstände zu folgenden Gesteinseinheiten bzw. Anomalien (jeweils abhängig von der individuellen Situation des Gewinnungsbergwerkes):

- a) die Schichtenfolge oberhalb der salinaren Schutzschicht, sowie der durch Salzablauung (Subrosion) verursachten Karstbereiche im Bereich der Hangend-Barriere oder des Salzhanges
- b) die Schichtenfolge unterhalb der Salinarabfolge, die nicht Teil der salinaren Schutzschicht sind,
- c) wasser- bzw. salzlösungsführende Spalten und Klüfte, sofern sie mit a) oder b) in Verbindung stehen,
- d) Tagesbohrungen, welche bis in den Abbauhorizont bzw. die Salinar-Barriere reichen,
- e) Antreffstellen von Standwasser in untertägigen Bohrungen innerhalb der Salinar-Barriere.

Daraus ergeben sich folgende Sicherheitspfeiler, wobei die Mindestmächtigkeiten angegeben sind:

- zu a) mind. 50 m vertikal zum Auffahrungshorizont bzw. mind. 150 m in Verlängerung des Auffahrungshorizontes der Grubenbaue,
- zu b) mind. 50 m vertikal zum Auffahrungshorizont bzw. mind. 150 m in Verlängerung des Auffahrungshorizontes der Grubenbaue;
- zu c) mind. 150 m,
- zu d) mind. 50 m vom Bohrlochmittelpunkt,
- zu e) mind. 150 m, für nicht verfüllte Bohrlöcher mit Antreffstellen von Standwasser zusätzlich 50 m um die Bohrlochachse.

Anmerkung

Eine Definition zuverlässiger Sicherheitsabstände auf Basis der praktischen Erfahrungen eines 150-jährigen Kali- und Steinsalzbergbaus in Deutschland muss natürlich auch Erkenntnisse einschließen, die aus Fehleinschätzungen, z.B. im ehemaligen Forschungsbergwerk Asse oder der vereinzelt Unterdimensionierung von Tragsystemen, z.B. im Kalibergbau, zu ziehen sind.

Mittels den in den letzten Jahrzehnten weiter entwickelten geomechanischen Rechenverfahren ist eine umfassende Analyse dieser Schadensfälle möglich. Allerdings ist trotzdem anzumerken, dass die in einem Endlagerbergwerk für stark wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle auftretenden zusätzlichen Beanspruchungen infolge der thermomechanischen Belastungen über die im konventionellen Bergbau vorliegenden Erfahrungen nicht abgedeckt werden. Das bedeutet, für eine abschließende Festlegung bzw. Bewertung der vorliegenden Sicherheitsniveaus für Abstandsfestlegungen ist physikalisch basiertes Verständnis der Schadensmechanismen erforderlich.

3.2.4.3 Nachweis einer Pfeiler-Mindestmächtigkeit gegenüber Fluiden

Für die Dichtheit von Salinarbarrieren bei thermomechanischer Beanspruchung ist die zeitabhängige, fluiddruck-generierte Vernetzung von interkristallinen Fließwegen, bei einem Abfall der Gebirgseinspannung unter den am Salzspiegel anstehenden Flüssigkeitsdruck (Verletzung Minimalspannungskriterium) infolge der thermischen Gebirgsausdehnung, von entscheidender Bedeutung (Minkley et al., 2010).

Im Rahmen der VSG wurden von IfG (Minkley & Popp, 2011) verschiedene bergbauliche Analogie mit spezifischen Barriere-Mächtigkeiten betrachtet, die auf Basis numerischer Simulationsberechnungen unter Berücksichtigung der allgemein gültigen Integritätsbewertungen bewertet wurden (vgl. Kap. 3.1.5).

Danach liegt am Standort Merkers mit den vulkanischen Imprägnationen in Subsalinar bzw. im Salinar selber eine weltweit einmalige geologische Situation vor, die es erlaubt, folgende Prozesse zu bewerten³² (für Details, s. Popp et al., 2007):

- (1) den Einfluss eines hohen Fluiddruckes (7 – 7,5 MPa) auf eine Salzbarriere mit einer vergleichsweise geringen Salzmächtigkeit (ca. 30 m) unter den Einwirkungen eines großflächigen Salzabbaus
- (2) die Auswirkungen eines Gasfracs, der in Zusammenhang mit dem Gebirgsschlag Völkershäuser am 13.03.1989 zu einem Integritätsverlust der geologischen Liegendbarriere des Unteren Werra-Steinsalzes mit einer anschließenden Verheilungsphase führte.

³² Die Kaligrube Merkers gehört zu den Salzlagerstätten in der flachen Lagerung im Werra-Gebiet. Seit 1901 findet hier Salzbergbau statt, wobei als Besonderheit im Salz im Gefolge von Basalteinschaltungen erhebliche Gasintrusionen auftreten können. Sie stehen mit dem tertiären Basaltvulkanismus der Rhön in kausalem Zusammenhang. Das dabei freigesetzte CO₂ akkumulierte hauptsächlich unterhalb der Salzgesteine des Zechstein in den Klüften der ansonsten geringpermeablen Gesteine des Oberrotliegend und basalen Zechstein, d.h. u.a. im klüftigen Werraanhydrit (Abb. 3). In 800 bis 1000 m Teufe existieren mehrere voneinander getrennte Lagerstätten mit gasförmigem, flüssigem oder überkritischem CO₂. Unter der Annahme eines offenen hydraulischen Systems würden im Unteren Werra-Anhydrit bei vorhandener Klüftung Fluide mit einem Druck in der Größenordnung um ca. 7 – 7,5 MPa anstehen.

Über dem gasführenden Subsalinar folgt als dichte Barriere das Untere Werra-Steinsalz mit dem anschließenden carnallitischen Kaliflöz Thüringen. Es wurde als 2. Sohle im Kammer-Pfeiler-Bau-Verfahren großflächig abgebaut, wobei die Hangendbarriere durch das Mittlere Werra-Steinsalz gebildet wird. Im Bereich der Feldatal-Störung ist der das Gasreservoir überdeckende Steinsalzhorizont bis auf ca. 30 m ausgedünnt, wie durch Radarmessungen und Bohrungen nachgewiesen wurde (Käding & Lukas, 1997).

Als Schlussfolgerung aus der lokalen Situation und den bergbaubedingten Ereignissen kann mit dem Beispiel Merkers quantitativ belegt werden, dass dort selbst bei einer Steinsalzmächtigkeit von nur ca. 30 m gegenüber den im Liegenden Subsalinar wirkenden CO₂-Gasdrücken in der Größenordnung von ca. 7 MPa (in der Größenordnung des lithostatischen Drucks) kein Gasdurchtritt in die darüber befindlichen Grubenräume zu beobachten war. Das bedeutet,

- die Integrität der liegenden Schutzschicht war trotz des oberhalb stattfindenden Bergbaus (mit Auffahrung eines Kammer-/Pfeiler-Systems) gegeben.

Erst durch die beim Gebirgsschlag Völkershausen 1989 stattgefundenen Entlastung mit Verletzung des Minimalspannungskriteriums kam es zu einem Gasfrac-Ereignis, in dessen Folge CO₂ in den darüber liegenden Grubenhohlräumen nachgewiesen wurde.

Gleichzeitig konnte mit in situ-Untersuchungen (rund 20 Jahre nach dem Gas-Frac) und Modellrechnungen gezeigt werden, dass sich die hydraulische Dichtheit zumindest teilweise wieder eingestellt hat (Popp et al., 2007).

- Damit wird die günstige Eigenschaft des Salzgesteins für Selbstverheilungsprozesse, nach Etablierung entsprechender Spannungsrandbedingungen, dokumentiert.

Bewertung

Unter Voraussetzung der hydro-mechanischen Unversehrtheit und einer ausreichenden Einspannung wird mit der Fallstudie Merkers nachgewiesen, dass für eine intakte Salzbarriere, wenn der Fluiddruck nicht größer ist als die kleinste Hauptspannung, **ein Mindestabstand von 30m** ausreichend ist, um einen Integritätsverlust der Barriere langfristig auszuschließen.

Allerdings gilt das für statische Zustände und unter der Annahme hinreichender Salzhomogenität. Gleichzeitig ist anzumerken, dass für die Dichtheit von Salinarbarrieren bei thermomechanischer Beanspruchung die zeitabhängige, fluiddruck-generierte Vernetzung von interkristallinen Fließwegen, bei einem Abfall der Gebirgseinspannung unter den am Salzspiegel anstehenden Flüssigkeitsdruck (Verletzung Minimalspannungskriterium) infolge der thermischen Gebirgsausdehnung, von entscheidender Bedeutung ist (Minkley et al., 2010).

3.2.4.4 Vorliegende Empfehlungen für die Standortsuche

Auf der Grundlage geowissenschaftlicher Untersuchungen sowie der vorliegenden Erfahrungen sind von der BGR Mindestanforderungen und Kriterien für Endlagerstandorte in Salzformationen der steilen Lagerung erarbeitet worden.

- Erste Festlegungen zur Barrierenmächtigkeit für ein Endlager in der steilen Lagerung finden sich im salinar-spezifischen Kriterienkatalog der BGR (1977), in dem für Salzstöcke, die in zirkulierendes Grundwasser hineinreichen, ein Mindestabstand Endlager / Grundwasserspiegel von 300 m gefordert wird.
- In der BGR-Studie von 1995 wird eine Salzscheibe über dem Endlagerbereich von 300 m, eine Liegendscheibe von 100 m bei einer Mindestmächtigkeit des Steinsalzes von 500 m gefordert. Für die Bergfesten im Flankenbereich ist eine Mächtigkeit von mindestens 200 m anzusetzen.

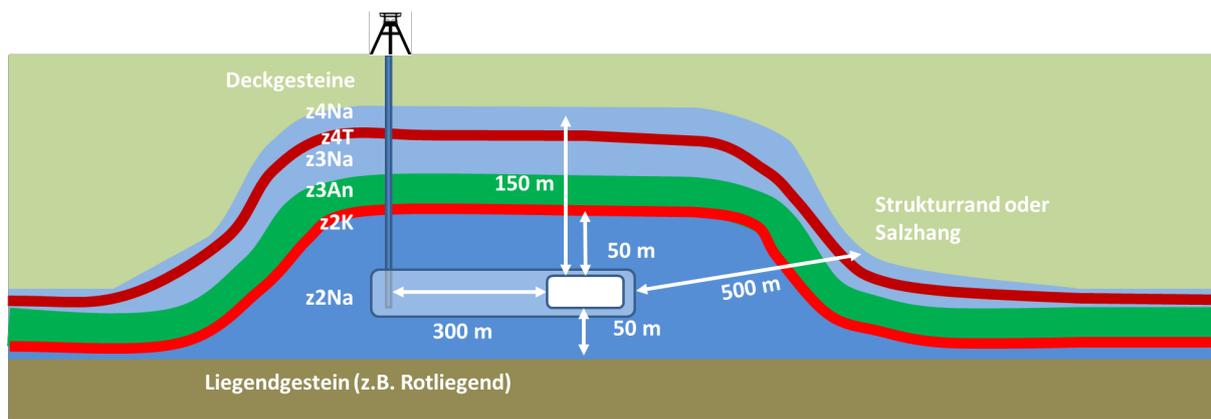


Abb. 3-5. Schematische Darstellung der vorläufigen, hier empfohlenen Sicherheitsabstände (verändert nach Popp et al., 2022).

In einem integralen Ansatz, d.h. unter Berücksichtigung der praktischen Erfahrungen aus dem Kali- und Salzbergbau mit einer Reihe natürlicher Analoga zur Beanspruchbarkeit von Salinärbarrieren sowie dem Ergebnis von geomechanischen Modellrechnungen von Salzstrukturen, werden von Minkley et al. (2010) folgende Empfehlungen für erforderliche Barrieremächtigkeiten für ein Endlagerbergwerk in steiler Lagerung (Salzdom) zur Erlangung des vollständigen Einschusses bei der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle im Salinar gegeben:

- Abstand zum Salzspiegel ≥ 350 m
- Abstand zu Salzstockflanken ≥ 200 m
- Abstand zu Kaliflözen³³ bzw. zum Anhydrit ≥ 50 m

Im Vorhaben KOSINA wurden, als Synthese aus bergbaulichen bzw. -rechtlichen Vorgaben (s. Kap. 3.2.4.2) sowie aus fachgutachterlichen Erfahrungen und den Ergebnissen von Forschungsvorhaben (Minkley et al., 2010), im vorläufigen Sicherheitskonzept zunächst folgende Sicherheitsabstände (siehe Abb. 3-5) definiert:

- **150 m** zum Top des Salinars (die gesamte Salinarabfolge bis z4 im Hangenden, ohne z5 bis z7 sowie ggfs. vorhandene Subrosionsrückstände),
- **50 m** zu Top und Basis des Steinsalzlagers (Einlagerungshorizont),
- **500 m** lateraler Sicherheitspfeiler (um Beeinflussungen durch ggf. vorhandene Salzhangänge auszuschließen, wobei jeweils das Schichteinfallen zu berücksichtigen ist (in Abb. 3-5 nicht darstellbar)
- **300 m** Abstand der Einlagerungsgrubenbaue zu den Tagesschächten

Empfehlung

Aufgrund des vorliegenden Kenntnisstandes wird hier empfohlen, im Rahmen einer Standort-suche die in KOSINA entwickelten und in Abb. 3-5 dargestellten Sicherheitsabstände anzuwenden sowie darüberhinausgehend auch einen Abstand von mindestens 50 m zum Kalilager bzw. Anhydrit einzuhalten.

³³ Für carnallitische Salzformationen eine allgemein gültige Vorgabe, entsprechend eines Temperaturfeldes mit einer Maximaltemperatur von ca. 200°C am Behälter.

4 Salzgesteine – THM-Eigenschaften

4.1 Wirtgesteinsspezifische Randbedingungen

4.1.1 Hydraulische Dichtheit Salzgebirge – Natürliche Analoga

Salinargesteine werden allgemein als dicht charakterisiert, was u.a. dadurch dokumentiert ist, dass in ihnen lokal große Volumina an Fluiden gespeichert sein können. Wie in Kap. 2.1.3 dargestellt, finden sich in fast jedem Kali- und Steinsalzbergwerk lokal begrenzte Lösungs- und Gaseinschlüsse, die durch bergmännische Aktivitäten aufgeschlossen werden.

Das Vorhandensein dieser langfristig im Salz eingeschlossenen Fluide kann als natürliches Analogon zum Isolationspotential von Salinarformationen und ihrem Integritätsverhalten unter geogenen und anthropogenen Beanspruchungen herangezogen werden (Liu et al., 2018). Der Fluideinschluss erfolgt hauptsächlich intergranular, d.h. auf den Korngrenzen zwischen den Salzkristallen aber auch in kavernen Hohlräumen von beachtlicher Größe.

Ein Beispiel dafür ist die Salzlagerstätte im Werra / Fulda Revier, in der große Mengen an CO_2 gespeichert sind, die vor etwa 20 Mio. Jahren durch magmatische Intrusion während des Tertiärvulkanismus in die Salzformation gelangt sind³². Diese wandelten einen Teil der primären Salzgesteine, insbesondere den leicht löslichen Carnallit um. Bei der Abkühlung und Rekristallisation wurde das Gas in den Umwandlungssalzen, vorwiegend im sekundären Sylvinit eingelagert (Giesel et al., 1989). Das sich hauptsächlich auf den Korngrenzen befindliche CO_2 wird als mineralgebunden bezeichnet. Darüber hinaus wurde CO_2 in kavernen Hohlräumen und Spalten eingeschlossen. Hier spricht man von freiem Gas, welches beim Anbohren als Bläser in Erscheinung tritt.

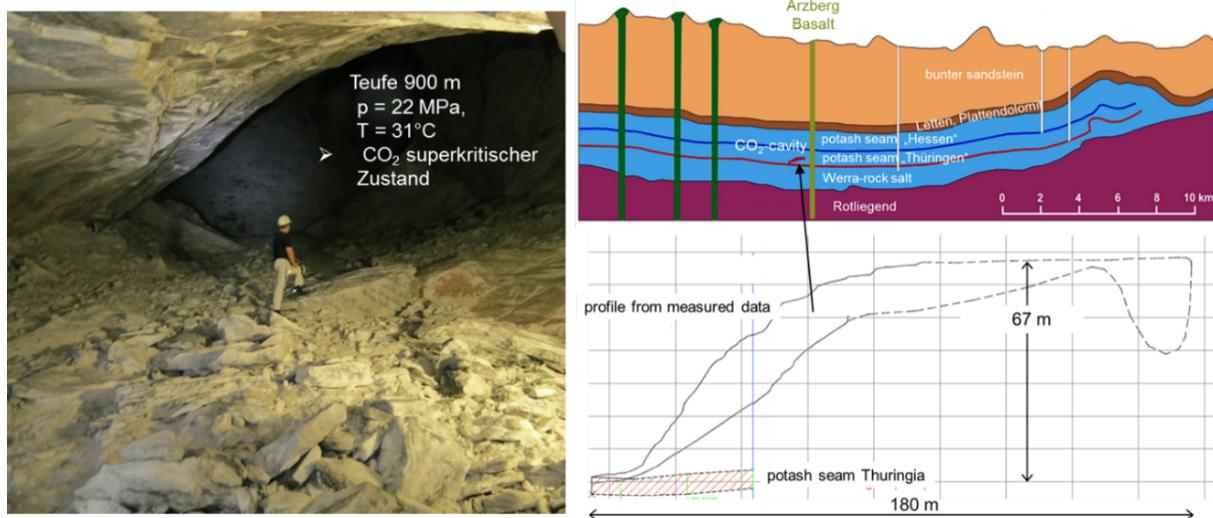


Abb. 4-1. Blick in den Eingangsbereich des Kavernenhohlraums nach dem CO_2 -Ausbruch vom 01.10.13 in der Grube Unterbreizbach (links) und geologisches Profil der Salzlagerstätte mit Dimensionen des Kavernenhohlraums (rechts) (aus Liu et al., 2018).

In der Vergangenheit ist es deshalb zu zahlreichen Ausbrüchen unterschiedlichen Ausmaßes gekommen, die ein erhebliches Risiko für die Betriebssicherheit der betroffenen Kaligruben darstellen, weshalb es wiederholt zu Todesfällen gekommen ist (s. u.a. Liu et al., 2018).

Beim mutmaßlich größten Gas-Salz-Ausbruch im Werra Kalirevier am 01.10.2013 in der Grube Unterbreizbach entstand eine Ausbruchskaverne in den Dimensionen von 180 m Länge und maximal 67 m Höhe (gemessen vom Ansatzpunkt an der Flözfirste bis zur Oberkante im hangenden Steinsalz) (Abb. 4-1).

Ausgehend vom erkundeten Kavernenhohlraum von ca. 100.000 m³ im Mittleren Werra-Steinsalz, ergibt sich bei Entspannung³⁴ des ursprünglich unter lithostatischen Druck stehenden und somit überkritischem CO₂ ein CO₂-Gasvolumen von 40 Mio. m³ unter Atmosphärendruck. Auch aus anderen Salzformationen weltweit sind Einschlüsse von Fluiden bekannt geworden (Ehgartner, et al., 1998). In Weeks Island Salt Dome sind durch Gasausbrüche (Kohlenwasserstoffe) im hangenden Steinsalz Ausbruchskavernen mit Volumina bis 45.000 m³ entstanden (Davisson, 2009)³⁵.

4.1.2 Barrierenintegrität – Nahfeld/Fernfeld

Während Salzgesteine hinsichtlich ihrer Barriereigenschaften im konturfernen Bereich allgemein als hydraulisch dicht zu charakterisieren sind (s. Kap. 4.1.1), kommt es bei Hohlraumauffahrungen im Salzgebirge zur Ausbildung einer Auflockerungszone (ALZ) in der Kontur des den Hohlraum umgebenden Salzgebirges.

Im unverritzten Salzgebirge liegt normalerweise ein isotroper Primärspannungszustand vor, der durch die Auffahrung der Grubenbaue gestört wird. Durch die Auffahrung der Grubenbaue stellt sich an der Hohlraumkontur ein deviatorischer Spannungszustand ein. Durch das viskoelasto-plastische Materialverhalten des Salinars wird sich der deviatorische Spannungszustand an der Hohlraumkontur abbauen. In Abhängigkeit vom Betrag des Spannungsdeviators und den Festigkeitseigenschaften des Salinars können sich die Spannungen entweder bruchlos, d.h. ohne Überschreiten der Dilatanzgrenze, ausschließlich durch Konvergenz abbauen. In diesem Fall verlaufen die Deformationen volumentreu und rissfrei. Anderenfalls sind auch Dilatanz- oder Festigkeitsüberschreitungen denkbar, so dass die Spannungsumlagerungen mit dilatanten Verformungen bzw. der Ausbildung einer ALZ verbunden sind, wie sie schematisch in Abb. 4-2 dargestellt sind.

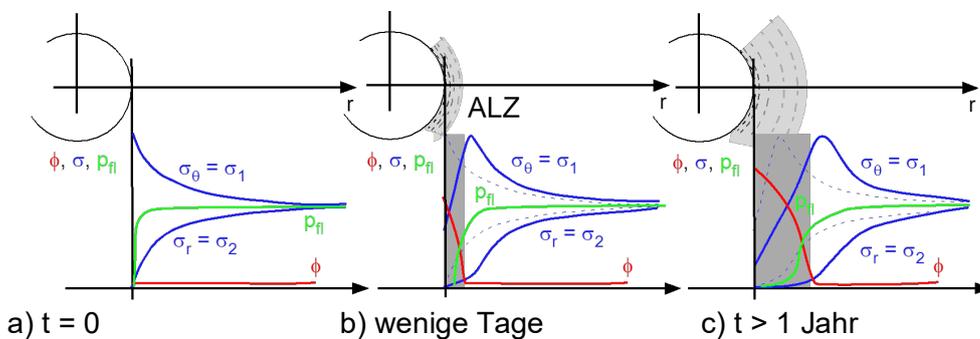


Abb. 4-2. Konturverhalten um einen kreisförmigen Streckenquerschnitt mit Ausbildung einer ALZ (Spannungsverteilung mit σ_{θ} - Tangentialspannung = σ_1 größte Hauptspannung und $\sigma_r = \sigma_2$ kleinste Hauptspannung, Porosität ϕ und Porendruckvariation p_{fl}) – schematische Darstellung (ergänzt nach Salzer, 1989).

³⁴ Die starke Expansion und Druckwelle hat dazu geführt, dass sich das CO₂ in wenigen Minuten im gesamten Grubengebäude ausgebreitet hat, wodurch drei Bergleute in Schachtnähe in 7 km Entfernung vom Ausbruchsort ums Leben kamen. Die Druckwelle war so gewaltig, dass aus dem Schacht Unterbreizbach II Gas und Salzstaub austraten.

³⁵ Das Auftreten von KW wurde z.B. auch bei der Erkundung des Salzstock Gorlebens beobachtet. Sie gehören, wie bereits in Kap. 2.1.3.2 dargestellt, zum natürlichen Stoffbestand von Salzgesteinen. Entsprechende Fluide können bei der Auffahrung von Hohlräumen in (üblicherweise) geringen Mengen nachgewiesen oder freigesetzt werden. Somit können diese KW-Vorkommen für die Betriebssicherheit eines Bergwerks von Bedeutung sein, für die Langzeitsicherheit des Endlagers sind sie von nachgeordneter Relevanz (z.B. Bracke et al., 2012). In Bezug auf die Zusammensetzung ist neben der Beurteilung der Brennbarkeit der Austrittsgase das vereinzelte Auftreten von Schwefelwasserstoff auf Grund seiner hohen Toxizität von besonderer Bedeutung.

Sie resultiert aus der sekundären Einwirkung der Hohlraumaufrichtung mit einer mechanischen Entlastung (bzw. Belastung) und Rissbildung. Die Reichweite dieser hydraulisch relevanten Zone (in der Regel zwischen 0,5 m - Einzelstrecke - bis mehrere Meter, z.B. bei größeren Kammern oder mechanisch hoch-belasteten Pfeilern) hängt u. a. vom Grundspannungszustand (Teufenlage), der Hohlraumgeometrie, der Auffahrungsart (schneidend bzw. sprengtechnisch) und den Salzgesteinseigenschaften sowie der Standzeit und dem Vorhandensein bzw. dem Volumenanteil lokaler Fluide (z.B. Lösungseinschlüsse, Gase) ab.

In elastisch-plastischen Gesteinen führen Spannungskonzentrationen z.B. infolge einer Auffahrung erst dann zu Spannungsumlagerungen in weniger beanspruchte Gebirgsbereiche, wenn zuvor Tragwerksbereiche überbeansprucht und daher plastifiziert worden sind. Wird die Festigkeit des Gesteins dagegen nicht überschritten, finden in der Kontur lediglich Spannungsänderungen statt.

Im Steinsalz kann es aufgrund seines Rekristallisationsvermögens auch zur Schädigungsverheilung kommen. In Bereichen, in denen stützender Versatz oder geotechnische Barrieren eingebaut sind, führt die Konvergenz zu einem Stützdruckaufbau in ggf. geschädigten Konturbereichen, so dass Risse geschlossen werden und über längere Zeiträume auch verheilen. Spannungsumlagerungen kommen im Salinar zum Stillstand, wenn konvergenzbedingt wieder ein isotroper Spannungszustand vorherrscht.

4.1.3 Maximaltemperatur Salz

Bei der Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Salzformationen wird an das umgebende Salzgestein Wärme abgegeben, die nach derzeitigen Endlagerkonzepten in der Umgebung der Einlagerungsgebäude bis in die Nähe von etwa 200°C führen kann.

Bezüglich des Einflusses der mit den Abfällen eingebrachten Wärmeleistung enthalten die früheren Sicherheitsanforderungen (BMU, 2010) in Abschnitt 7.2.1 im Hinblick auf die Langzeitaussage zur Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs die Anforderung, dass die *„Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs [durch die Temperaturentwicklung] nicht unzulässig beeinflusst werden [darf]“*.

Davon ausgehend hat die Kommission "Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe" des Deutschen Bundestags (Endlagerkommission) in ihrem Abschlussbericht (Kommission 2016) im Zusammenhang mit dem geowissenschaftlichen Abwägungskriterium „Gute Temperaturverträglichkeit“³⁶ empfohlen, aus Vorsorgegründen in der Phase 1 des Standortauswahlverfahrens zunächst von einer Grenztemperatur an der Oberfläche des endgelagerten Abfallgebändes für hoch radioaktive Abfälle von 100°C auszugehen, bis auf der Basis von Forschungsarbeiten maximal mögliche Temperaturen in den jeweiligen Wirtsgesteinen festgelegt und daraus spezifische Grenztemperaturen abgeleitet werden können.

Die Untersuchung möglicher Auswirkungen der durch die Abfälle entstehenden Temperaturänderungen auf das Wirtsgestein Salz war eine wesentliche Fragestellung bei den in den vergangenen 50 Jahren weltweit zur Eignung von Salzformationen durchgeführten Forschungsarbeiten. Sie umfassten die Charakterisierung des mechanischen Verhaltens von Salzgesteinen sowie auch mögliche mineralogisch/chemische Beeinflussungen.

- (1) Für die zuverlässige Prognose und Vorhersage der Barrierenintegrität für den geforderten Nachweiszeitraum von 1 Million Jahren bei thermo-mechanischen Einwirkungen bildete einen Schwerpunkt die Entwicklung von Stoffgesetzen für das thermomechanische Verhalten von Salzgestein und die Bereitstellung einer Datenbasis der in

³⁶ Kommission (2016), siehe dort S. 325 ff, „Anforderung 8“.

einer Salzstruktur vorkommenden Gesteine. Dabei ist vor allem das Kriech- und Festigkeitsverhalten von zentraler Bedeutung. Das Besondere am Steinsalz ist, dass es sowohl duktil als auch spröde auf Beanspruchung reagieren kann (vgl. Kap. 4.2.1).

- (2) Zur Bewertung der thermischen Stabilität des Gesteins wurden sowohl Labor- als auch Feldmessungen durchgeführt, bei den u.a. in großmaßstäblichen Erhitzerversuchen das Salzgestein bis zu mehreren 100°C aufgeheizt wurde.

Kristallwasserhaltige Mineralkomponenten, die in Steinsalz- oder Kalisalzformationen vorkommen können, sind Kieserit ($\text{Mg}[\text{SO}_4] \cdot \text{H}_2\text{O}$), Polyhalit ($\text{K}_2\text{Ca}_2\text{Mg}[\text{SO}_4]_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) und Carnallit ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) (vgl. Tab. 2-3). Eine thermische Kristallwasserfreisetzung hängt sehr von den Randbedingungen des jeweiligen Untersuchungsverfahrens (Probenmaßstab, Aufheizrate, der über der Probe herrschende Luftfeuchte bzw. dem Wasserdampfpartialdruck, dichtes oder offenes System) ab.

Während Kieserit im Laborversuch ab ca. 335°C sein Kristallwasser abgibt (Jockwer, 1981), setzt für Polyhalit nach Ergebnis untertägiger Erhitzerversuche, die im polyhalitisches Speisesalz im Bergwerk Asse durchgeführt wurden, die Entwässerung bei ca. 230°C ein (Rothfuchs & Kessels, 1985). Eine besondere Relevanz hat die thermische Zersetzung des Carnallits. Detailliertere Informationen dazu finden sich in Kap. 4.5.3.

Für die Endlagerkommission wurde ein genereller Überblick über die vorliegenden Forschungen an Salzgesteinen im Vergleich zu Ton- und Kristallin-Gesteinen in (GRS 2016) erstellt, der in Ökoinstitut (2016) hinsichtlich der Einführung einer wirtsgesteinsunabhängigen Grenztemperatur unter Vorsorgeaspekten zusammengefasst und bewertet wurde.

Die Autoren (Ökoinstitut, 2016) fassen zusammen: „Aufgrund des vorliegenden Forschungsstandes zur Langzeitsicherheit der Endlagerung in Steinsalz ergibt sich keine Notwendigkeit, aus Vorsorgegründen eine Grenztemperatur von 100°C anzunehmen.“

Diese Einschätzung wird hier geteilt.

4.2 Steinsalz

4.2.1 Mechanische Eigenschaften

Das Verformungsverhalten von Steinsalz ist in den letzten 40 Jahren umfassend untersucht worden, woraus ein allgemein akzeptiertes Prozessverständnis und eine umfangreiche experimentelle Daten- und Parameterbasis³⁷ resultiert. Im Gegensatz zur Annahme, dass Steinsalz zunächst als homogen und isotrop anzusehen ist, weisen Salzgesteine einige Besonderheiten auf.

4.2.1.1 Zeitabhängiges Verformungsverhalten

Salzgesteine besitzen ein komplexes nichtlineares Spannungs-Verformungs-Verhalten. Das Langzeitdeformationsverhalten von Salzgesteinen für den konturfernen Bereich wird hauptsächlich durch die Deviator- und Temperatur-abhängigen Kriecheigenschaften getragen, während die Dilatanz- und Festigkeitseigenschaften (abgesehen von Bereichen mit Materialkontrasten, z. B. zum Hauptanhydrit bzw. Kalisalz, sowie im Bereich des Salzspiegels) von nachgeordneter Bedeutung sind.

³⁷ Die aktuell umfassendste Datenbasis liegt mit Liu et al. (2017) vor, die im Rahmen des KOSINA-Vorhabens gemeinsam von BGR und IfG auf Basis der bei beiden Institutionen vorliegenden sowie Literaturdaten erarbeitet wurde. Sie schließt auch Angaben zu Kalisalzgesteinen sowie Anhydrit ein.

Steinsalz z. B. reagiert unter Belastung mit einem ausgeprägten duktilen Verformungsverhalten, bei dem sich viskoses Kriechen mit schädigungsinduzierten Verformungen überlagert, woraus ein zeitabhängiges Festigkeits- und Verformungsverhalten resultiert.

Das Salzkriechen kann in 3 Kriechphasen (Abb. 4-3) unterteilt werden. Die erste Kriechphase ist das primäre oder transiente Übergangskriechen. Dieses ist durch eine instationäre Kriechrate gekennzeichnet, die sich jedoch zeitlich degressiv entwickelt. Daran schließt sich in der Regel das sekundäre Kriechen an. In dieser Kriechphase wird die Kriechrate für konstante Spannungen konstant bzw. stationär, weshalb es auch als stationäres Kriechen bezeichnet wird. Wenn die Belastungsbedingungen oberhalb der Dilatanzgrenze liegen, tritt mit der Verformung Schädigung auf, was letztlich über tertiäres Kriechen bis zum Kriechbruch führt.

Die nach Ausweis von Gefügeuntersuchungen dominierenden Verformungsmechanismen sind sowohl „klassisches“ Versetzungskriechen (in Abb. 4-4 beschrieben als Term BGR) als auch feuchtebasierte Drucklösungsmechanismen (Term UTRECHT) sowie Rekristallisation. Die zusätzlichen von Festkörperdiffusion getragenen Beiträge zu Spannungsumlagerung und Verformung können vernachlässigt werden.

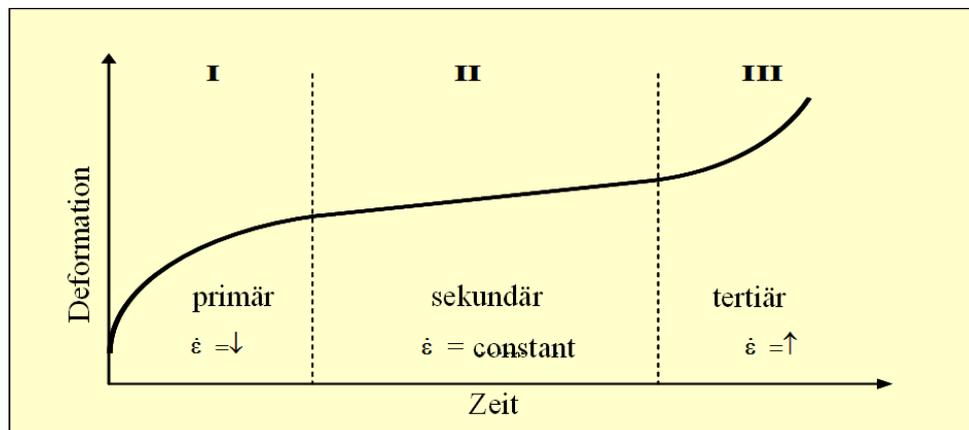


Abb. 4-3. Die drei Kriechphasen von Salzgesteinen (nach Hunsche et al. 2003).

$$\dot{\epsilon}_v = A(T) \cdot f_A(\phi) \cdot \sigma^{5.5} + B(T) \cdot f_B(\phi) \cdot \frac{\sigma}{d^3} + \dots ?$$

Dislocation creep (BGR)

High stress,
high strain-rate,
coarse grain size

Pressure solution creep (Utrecht)

Low stress,
low strain-rate,
fine grain size

Plasticity coupled solution transfer

High stress
conditions

Abb. 4-4. Konzeptioneller Ansatz zur Beschreibung der Kriecheigenschaften von Steinsalz auf Basis der wirksamen Verformungsmechanismen (nach Spiers et al., 2005).

Versetzungskriechen (BGR) wird von den beweglichen intrakristallinen Versetzungen im NaCl-Gitter getragen, die mit Kriechbeginn in der Anzahl zunächst zunehmen (transientes Kriechen), die sich dann aber vernetzen, gegenseitig behindern (Verfestigungsphase) und schließlich einer konstanten Dichte zustreben (stationäres Kriechen). Eine Temperaturerhöhung bewirkt eine höhere Beweglichkeit von Versetzungen, wobei eine Temperaturerhöhung von 10 K im

Temperaturbereich zwischen 20 °C und 50 °C bei einer Differenzspannung von 10 MPa eine Erhöhung der stationären Kriechrate um den Faktor 4 bis 5 verursacht.

Wenn Feuchtigkeit im Porenraum verfügbar ist, kann das transkristalline Versetzungskriechen von lokaler Umlösung am Kornkontakt (psc-Kriechen - „pressure solution creep“) oder im Falle der Sättigung des Porenraums sogar auch von Druck-Lösung, Materialtransport im Löslichkeitsgradienten und Ausfällung (FADT-Kriechen - "fluid assisted diffusional transport") überlagert sein.

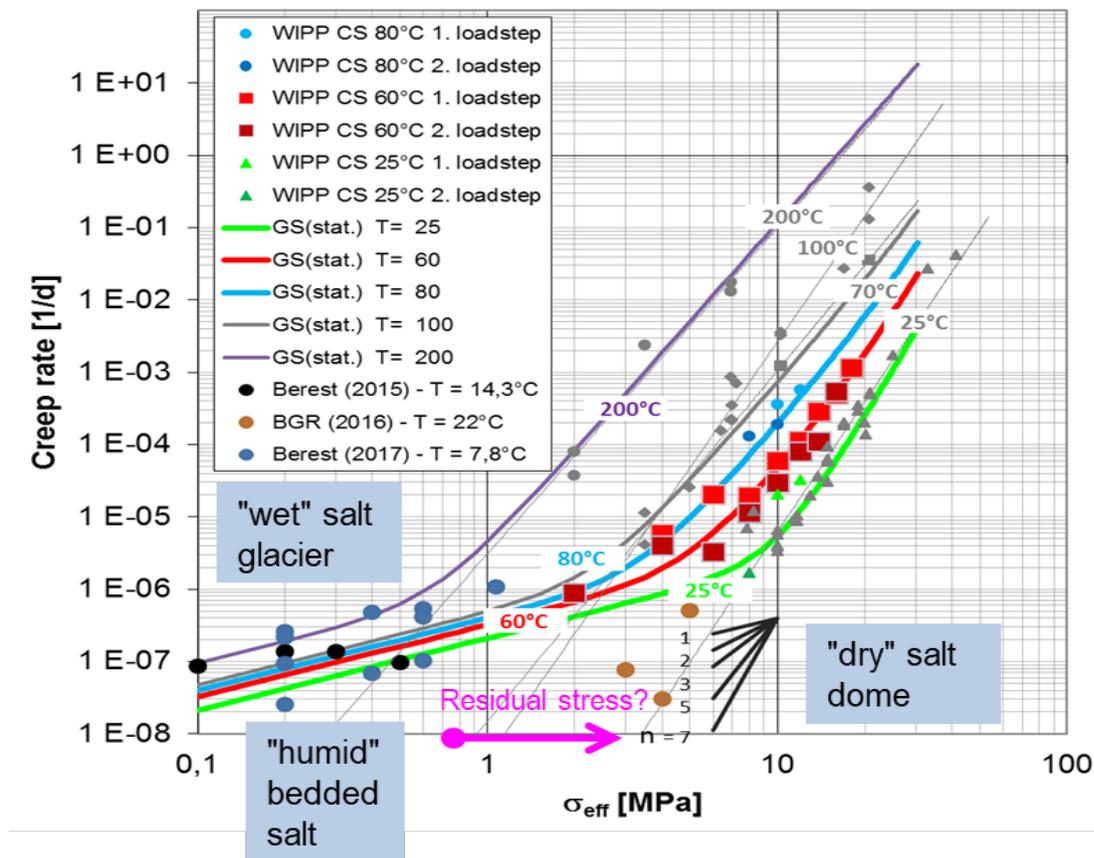


Abb. 4-5. Langzeitverformungsverhalten von Steinsalz (WIPP-Salz): stationäre Kriechraten vs. Deviatorspannung (Quelle: IfG, Laborversuche im Rahmen des WEIMOS-Vorhabens).

Die Ergebnisse aus Einzelversuchen bei unterschiedlicher Temperatur sind jeweils durch farbige Symbole gekennzeichnet, wobei die Kurvenverläufe die Approximation bei Verwendung des Günther-Salzer-Ansatzes (GS) wiedergeben. Zusätzlich zeigen die grau hinterlegten Bereiche schematisch die jeweiligen Kriechraten/Spannungs-Bereiche für „trockenes“ Steinsalz (mutmaßlich aus Salzstöcken), natürlich „feuchtes“ Salz der flachen Lagerung sowie Ablagerungen von „Salzgletschern“).

Nach Analogbefunden sind Lösungs-induzierte Kriechprozesse mutmaßlich bei kleinen Spannungsdeviatoren gegenüber dem Versetzungskriechen dominant und führen bis gegenüber dem BGR-Term zu mehreren Größenordnungen höheren Kriechraten. In Abb. 4-5 ist die Abhängigkeit der stationären Kriechrate für Steinsalz von der Deviatorspannung dargestellt, wobei umfangreiche Kriechuntersuchungen durchgeführt wurden. Es wird deutlich, dass eine Extrapolation von konventionellen Kriechuntersuchungen, die in der Regel bei $\sigma_{\text{Diff}} > 5$ MPa durchgeführt wurden, unter Annahme eines Potenzansatzes (z. B. BGR-a) zu mutmaßlich um mehrere Größenordnungen zu niedrige Kriechraten führt.

Da mit einer Zunahme der Kriechfähigkeit lokale Spannungsdifferenzen schneller abgebaut werden, sind höhere Kriechraten sicherheitlich grundsätzlich günstig. Allerdings ist der Feuchte-induzierte Effekt für die resultierenden Kriechraten stark Korngrößenabhängig, so dass bzgl. der Wirksamkeit unter in situ-Bedingungen, insbesondere bei kleinen Spannungen noch Klärungsbedarf besteht. Gleichzeitig gibt es Hinweise, dass in den Salzgesteinen der flachen Lagerung der Feuchtigkeitsanteil gegenüber Salz in steiler Lagerung deutlich erhöht ist, womit die Wirksamkeit feuchte-unterstützter Kriechprozesse mutmaßlich größer ist.

Wesentlich ist, dass die in Abb. 4-4 dargestellten Verformungsprozesse nicht zu einer Volumenzunahme (Dilatanz) führen, solange das Belastungsregime unterhalb der Dilatanzgrenze liegt. Daraus ergibt sich für intaktes Steinsalz gleichzeitig, dass beispielsweise Porendruckeffekte, wie sie für Tongesteine zur Beschreibung des mechanischen Langzeitverhaltens im Nah- und Fernfeld der geologischen Barriere extrem wichtig sind, für Salz allgemein pauschal vernachlässigt werden können ($\alpha = 0$). Experimentelle Untersuchungen mit Langzeitkriechversuchen mit phasenweiser Applikation von Fluidrücken, z. B. Popp et al. (2007) weisen nur für geschädigtes Steinsalz einen Einfluss eines Porendruckes nach.

4.2.1.2 Mechanische Schädigung / Gefüge-induzierte Anisotropieeffekte

Neben den Kriecheigenschaften, die weitgehend dilatanzfrei ablaufen, ist zur Bewertung des Barriereverhaltens zusätzlich das Festigkeits- und Schädigungsverhalten in Nah- und Fernfeld relevant.

Unter Gesteinsfestigkeit versteht man die Widerstandsfähigkeit des Gesteins gegen Druck-, Zug-, Biege- und anderer Beanspruchung. Zur Charakterisierung der vom jeweiligen Salinalgestein ertragbaren Beanspruchungen (Spannungen/Verformungen) werden ein- und triaxiale Kurzzeitversuche durchgeführt, um die Bruchfestigkeit abzuleiten.

Exemplarisch sind in Abb. 4-6 Ergebnisse der Festigkeits- und Dilatanzuntersuchungen in der Triaxialzelle von Werra-Steinsalz dargestellt. Die Festigkeitskurven zeigen mit zunehmendem Manteldruck die Zunahme der Festigkeit und Verformbarkeit, mit einem Wechsel von bruchhafter zu immer mehr duktiler Verformung, die auch in der Dilatanz-Entwicklung dokumentiert ist. Bei Einspannungen ($\sigma_3 > 5$ MPa) wird Rissbildung weitestgehend unterdrückt.

Im Ergebnis entsprechender Festigkeits- und Dilatanzuntersuchungen kann die Dilatanzgrenze experimentell bestimmt werden (Kap. 3.1.5).

Obwohl Steinsalz in der Regel als Kontinuum angesprochen wird, liegen insbesondere im Salz der flachen Lagerung aufgrund der sedimentären Genese Schichtflächen vor, die als potentielle Schwächeflächen für hydro-mechanische Prozesse (Festigkeit, Durchlässigkeit) wirksam sein können (vgl. Kap. 2.1.2.1).

Die häufig lagig angeordneten akzessorischen Minerale oder Verunreinigungen (z.B. Anhydrit, Tonminerale) können Trennflächen ausbilden. Letztere sind von entscheidender Bedeutung für die resultierenden Eigenschaften des Gebirges, z.B. für die Bewertung der Firstflächenstabilität im Salzgebirge oder als potentielle Scherflächen (vgl. Abb. 4-7). Im Unterschied zu Felstrennflächen an Diskontinuitäten und Schichtflächen im Salzgebirge sind neben Reibungsvorgängen zusätzlich Kohäsions- und Haftreibungseigenschaften von besonderer Bedeutung³⁸.

³⁸ Salzgesteine besitzen bereits unter normalen bergbaulichen Belastungsbedingungen in bedeutendem Maße die Fähigkeit zur Reaktivierung von Adhäsions- bzw. Kohäsionskräften an den Trennflächen bzw. Schichtflächen. Der Wechsel von Haft- und Gleitreibungszuständen wird als stick-slip-Bewegung bezeichnet. Eine Entfestigung wird durch Haftreibungsverlust und das Abscheren von Unebenheiten bei zunehmender Scherverschiebung bewirkt. Eine umfassende Beschreibung des

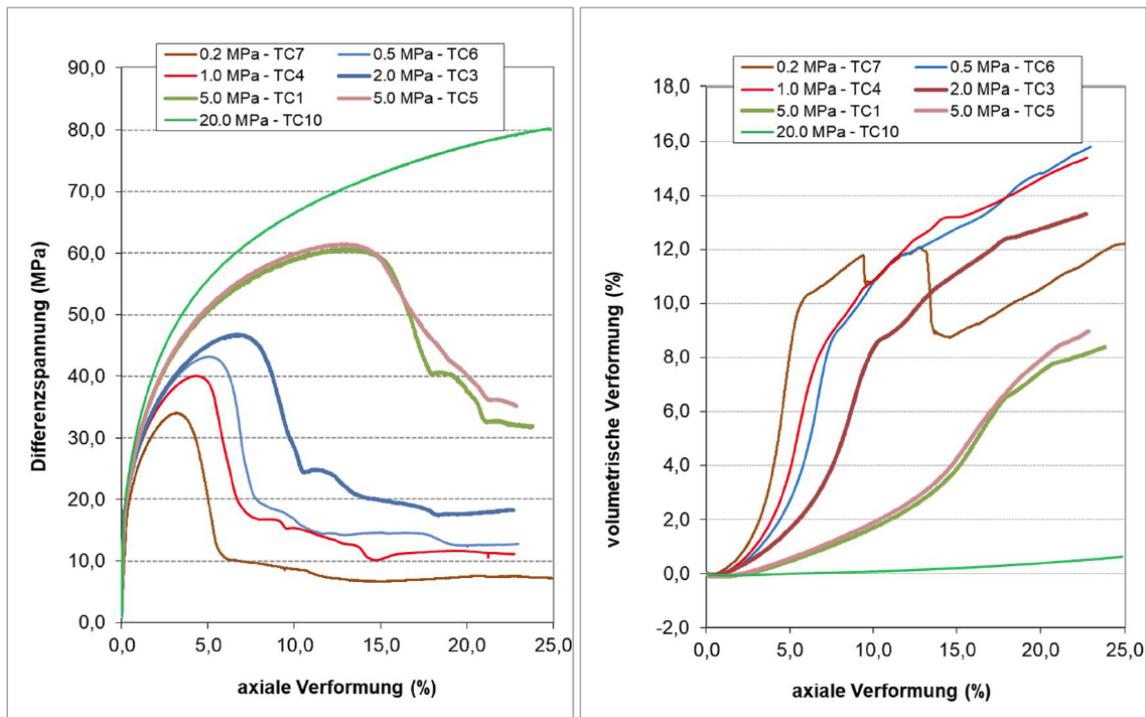


Abb. 4-6. Festigkeits- und Dilatanzverhalten von Steinsalz (Mittleres Werra-Steinsalz) im triaxialen Druckversuch: (links) Triaxiale Druckfestigkeitskurven und (rechts) Dilatanzkurven für verschiedene Manteldruckstufen σ_3 (aus Knöfel, 2018).

Allerdings sind in der Literatur umfassende experimentelle Untersuchungen der Haft- und Trennflächen von Salzgesteinen unter Berücksichtigung Verformungsgeschwindigkeitsabhängiger Effekte bzw. unter dynamischen Beanspruchungen (z.B. mechanischen Fräsarbeiten in der Hohlraumfiste) bisher sehr selten (Minkley & Mühlbauer, 2007).

Dies schließt Untersuchungen zur mechanischen Zugfestigkeit im Salzgebirge ein. Diese kann von quasi 0 (Tonlöser) über 0,5 bis ca. 1 MPa (Steinsalz mit schichtartigen Anhydrit-Einschlüssen) bis ca. 2 MPa für homogenes bzw. nur diffus verunreinigtes Steinsalz variieren.

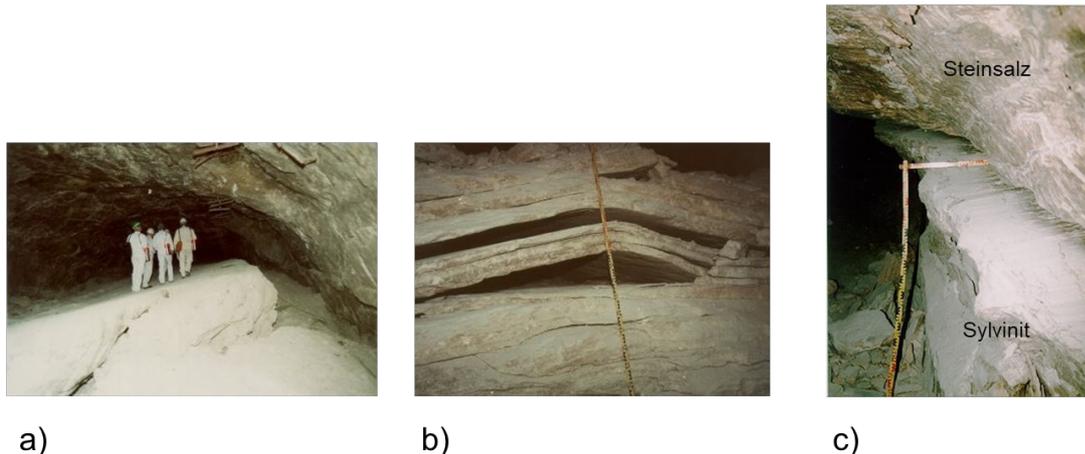


Abb. 4-7. Beispiele für geomechanische Schichtflächeneffekte in flach-gelagerten Salzformationen: a) Firstfall in einer Abbaukammer; b) Sohlenaufbruch; c) Verschiebung an einer Scherfläche im Übergang Steinsalz/Sylvinit (Quelle: IfG).

mechanischen Verhaltens des Salzgebirges ist daher nur unter Einbeziehung entsprechender Scherfestigkeitsmodelle für Schichtflächen möglich (Minkley & Mühlbauer, 2007).

4.2.2 Hydraulische Eigenschaften / Dichtheit

Steinsalz wird allgemein als „hydraulisch dicht“ bezeichnet. Da übliche Definitionen zur technischen Dichtheit bei Steinsalz nicht angewendet werden können, wurde von P. Bérest im Rahmen eines Übersichtsvortrages³⁹ auf der MECASALT 6 auf der Basis praktischer Erfahrungen aus der Gasspeicherung in Salzformationen eine Permeabilität $\leq 10^{-22} \text{ m}^2$ als dicht definiert.

In der Literatur gibt es eine Vielzahl von Angaben zur Permeabilität von Salzgesteinen, die aus unterschiedlichen Quellen stammen (vgl. Liu et al., 2017, Popp et al., 2001)

- (1) Permeabilität von Steinsalz ohne genaue Referenz
- (2) abgeleitete Kenngrößen aus Analogbetrachtungen (vgl. Kap. 4.1.1)
- (3) Labormessungen
- (4) In situ-Messungen

Das Spektrum von experimentell bestimmten Kennwerten zeigt allgemein eine große Streuung (vgl. Abb. 5-16 bzw. Kap. 5.3.2):

- für intaktes Steinsalz: zwischen 10^{-23} m^2 - 10^{-20} m^2 ,
- für aufgelockertes, geschädigtes Steinsalz: 10^{-20} m^2 - 10^{-15} m^2 sowie
- für Salzgrus: bis 10^{-13} m^2 .

Allerdings sind die Zuverlässigkeit und Relevanz der jeweiligen Angaben nicht einfach überprüfbar. Höhere Durchlässigkeitskennwerte sind häufig auf technische Undichtigkeiten des Messsystems bzw. Hohlraum-bedingte Schädigungseffekte oder lithologische Inhomogenitäten zurückführbar.

In der Konsequenz müssen vorliegende Messdaten jeweils bzgl. ihrer Signifikanz für die zu bewertende Problematik immer kritisch hinterfragt bzw. sorgfältig verifiziert werden. Unabhängig davon gilt, ungeschädigtes und lithostatisch eingespanntes Steinsalz ist hydraulisch dicht (vgl. Kap. 4.1.1).

Wesentlich zur experimentellen Bewertung der großräumigen Dichtheit der Salinarbarriere, insbesondere im geschichteten Salzgebirge, sind integrale Bohrlochversuche, mit denen größere Gebirgsbereiche abgedeckt werden. Ein entsprechendes Referenzbeispiel ist der sogen. „Großversuch Springen“ in der Grube Merkers im Grubenfeld Springen.

Dort wurde unter Ausnutzung des vorliegenden 2-sohligen Kaliabbaus im Mittleren Werra-Steinsalz (z1NAß) ein vertikal stehender zylindrischer Großbohrlochschaft (GBL) in den Abmessungen von $\varnothing \approx 1,35 \text{ m}$ sowie einer Länge von ca. 60 m aufgefahren (Abb. 4-8a). Zusätzlich wurde in ausreichendem Abstand noch eine Vertikalbohrung erstellt, wobei der Bohrlochpacker bzw. das Bohrlochende einen ausreichenden Abstand ($> 20 \text{ m}$) zu den Hohlräumen der Abbauhazone aufwies.

Das anstehende mittlere Werra-Steinsalz (z1Naß) ist grau bis dunkelgrau gefärbt und meist fein- bis mittelkristallin, seltener grobkristallin ausgebildet. Es wird durch diffus verteilten Anhydrit bzw. Anhydritagglomerate unterteilt.

Die Bohrung wurde schrittweise Druck-beaufschlagt, wobei je Laststufe die Haltezeit ca. 30 Tage betrug. Insgesamt betrug die Versuchszeit ca. 1100 Tage. Die Auswertung der Gebirgspermeabilität erfolgte für jede Belastungsstufe separat. Dabei konnte bis zu Gasdrücken $< 100 \text{ bar}$ (integral über das mittlere Werra-Steinsalz) eine Dichtheit des Salzgebirges in der Größenordnung von $k \sim 10^{-23} \text{ m}^2$ messtechnisch nachgewiesen werden.

³⁹ 6th Conference on the Mechanical Behavior of Salt: Understanding of the THMC Processes in Salt Rocks, 22.05.2007 - 25.05.2007 in Hannover.

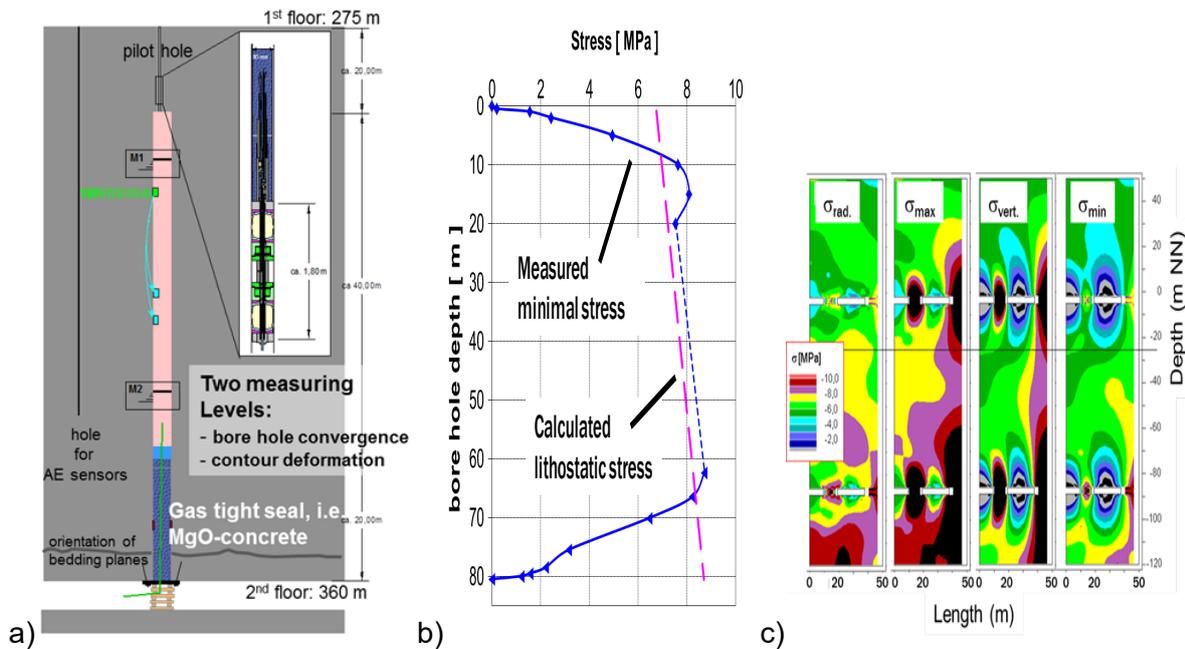


Abb. 4-8. Der Großversuch Springen; a) Schematische Skizze des Versuchsaufbaus mit Großbohrloch, Abdichtung mit MgO-Beton-Pfropfen; b) Vertikales Spannungsprofil auf Basis von HF-Messungen; c) berechnete Spannungsverteilung (Vertikalschnitt), entsprechend der vorliegenden Hohlraumgeometrie (verändert aus Popp et al., 2015).

4.3 Hauptanhydrit⁴⁰ (z3AN)

4.3.1 Mechanische Eigenschaften

Festigkeitsuntersuchungen verschiedener Proben aus unterschiedlichen Anhydritvorkommen weisen (unabhängig von der regionalen Herkunft) ein typisches Spröbruchverhalten aus, d.h. Manteldruck-abhängig tritt nach weniger als 1 % Verformung ein makroskopischer Scherbruch ein (Kamlot, 2008).

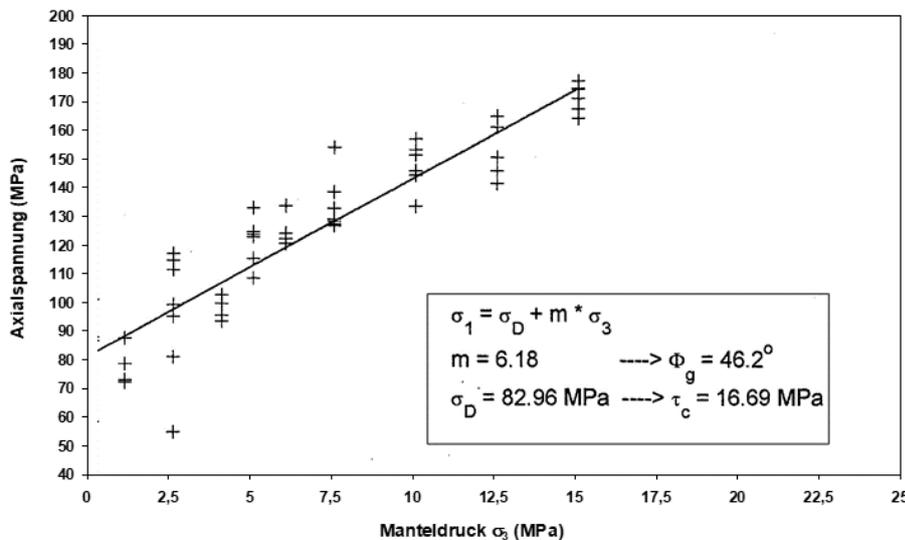


Abb. 4-9. Festigkeit Hauptanhydrit (z3AN Pöthen) in Abhängigkeit vom Manteldruck (aus Kamlot, 2008).

⁴⁰ Der Hauptanhydrit der Leine-Folge ist der prominenteste Vertreter im Zechstein für ein Anhydritgestein, weshalb zu ihm die meisten Daten vorliegen.

Deshalb ist in erster Näherung ein linearer Ansatz zur Darstellung des Zusammenhanges von vertikaler Spannung und Manteldruck gerechtfertigt. Die graphische Darstellung in Abb. 4-9 macht jedoch deutlich, wie stark die Messergebnisse streuen. Ursache sind u.a. Klufflächen, an denen die Festigkeit reduziert oder aber, wenn es um Gipsmaterial handelt, ein entsprechender Gipsanteil.

An den Anhydrit- und Salztonproben sind bei den Einzelmessungen durchaus Abweichungen von über 50 % von der Ausgleichsgerade zu beobachten.

4.3.2 *Hydraulische Eigenschaften / Dichtheit*

Während Steinsalz bei Belastung, d.h. solange die untertägigen Hohlräume existieren, die Fähigkeit zur bruchlosen Deformation ohne Integritätsverlust besitzt, sind bei Anhydrit (und teilweise auch bei Salzton, s. unt.) größere Deformationen meist mit der Aktivierung natürlicher Klüfte bzw. mit Rissbildungen verbunden, die gleichzeitig zur Ausbildung signifikanter Lösungs- oder allgemein Fluidspeicher im Hauptanhydrit geführt haben (vgl. Kap. 2.1.3).

Aus vielen untertägigen Beobachtungen sowie vorliegenden Untersuchungsergebnissen (z.B. GRS, 2000) ist bekannt, dass es durch Kriechprozesse im Steinsalz zu Lastumverlagerungen auf die harten Einschlüsse, vor allem Anhydrit kommt. Diese führen im Hohlraumkonturbereich zu Zugspannungen bzw. im eingespannten Gebirgskörper zu hohen Druckspannungen, die Risse und Wegsamkeiten hervorrufen können.

Als Konsequenz liegen anhydritische Gesteinspakete, hier insbesondere der Hauptanhydrit (z3An), primär bereits geklüftet vor.:

- Im kompakten Zustand sind die Klüfte geschlossen bzw. durch Ausfällungen abgedichtet, weshalb der unverritzte Hauptanhydrit hydraulisch dicht (impermeabel) ist (GFE, 2005, IfG, 2016b). Bei dem in der Grube Teutschenthal beobachteten Laugenzutritt Lösungszutritt handelt es sich somit zunächst um abgeschlossene Lösungsvorkommen.
- Nach Laboruntersuchungen von KAMLOT (2009) liegt die Permeabilität von kompaktem Anhydrit mit einem Mittelwert von $5 \cdot 10^{-24} \text{ m}^2$ nur geringfügig über der Nachweisgrenze der verwendeten Messapparatur von ca. $2 \cdot 10^{-24} \text{ m}^2$. Geklüfteter Anhydrit besitzt Permeabilitätswerte von $< 10^{-23} \text{ m}^2$ bis 10^{-17} m^2 mit einem Mittelwert von $7 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$.

Insgesamt belegt der aktuell vorliegende Kenntnisstand, dass, wenn Anhydrit hinreichend eingespannt ist und nicht durch natürliche Bewegungen oder bergbauliche Beanspruchungen beeinflusst ist, er als geologisch-dichte Barriere wirksam sein kann.

Diese These ist aber jeweils standortspezifisch durch Messungen und die Bewertung der bergbaulich/geologischen Situation nachzuweisen.

4.4 **Salztone (z3T, z4T)**

Zu den Eigenschaften von Salztönen (Grauer, z3T, bzw. Roter Salzton, z4T) existieren in der Literatur vergleichsweise wenige Daten, die im Rahmen verschiedener Forschungsarbeiten (z. B. GRS, 2000) sowie insbesondere am Standort Teutschenthal (z. B. Minkley et al., 2013) gewonnen wurden.

Aufgrund seiner Bedeutung als Barrieregestein ist der Rote Salzton (z4T) insbesondere für den Teutschenthaler Raum im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises für die Grube Teutschenthal umfassend charakterisiert worden. Für eine Einordnung liegen noch Daten seiner petrophysikalischen und gebirgsmechanischen Eigenschaften für einen Standort der steilen Lagerung (Kaligrube Sigmundshall) vor (Popp et al., 2007).

4.4.1 Mechanische Eigenschaften

In-situ-Beobachtungen und vergleichsweise wenige Laboruntersuchungen dokumentieren, dass das mechanische Verhalten des Grauen und des Roten Salztons sehr unterschiedlich sein kann, was wesentlich von dem in der Matrix enthaltenen Sulfatanteil (u.a. Anhydrit und Magnesit bzw. Dolomit) abhängt.

Während der Graue Salzton generell als ein stark zur Bruchtektonik neigender Horizont bezeichnet wird⁴¹, verhält sich der Rote Salzton (nach vorliegenden Erfahrungen aus der Grube Teutschenthal) sehr plastisch⁴².

Die Festigkeit von Tongesteinen allgemein und insbesondere die des Roten Salztons ist abhängig von der mittleren Effektivspannung und von der Wassersättigung. Analog zeigt sich auch bezüglich der mechanischen Kennwerte von verfestigten Tonsteinen eine erhebliche Streuung, die zusätzlich zu den lithologischen Eigenschaften (z.B. Gefüge, Mineralbestand, inhärente Feuchtigkeit, Porendruck) von sekundären Faktoren (z.B. Auflockerung beim Bohrprozess und der Präparation sowie Feuchtigkeitsverlust mit Änderung des inhärenten Porendrucks) beeinflusst wird.

Zumindest der Rote Salzton ist entsprechend Abb. 4-10 als „weiches Gestein“ einzustufen.

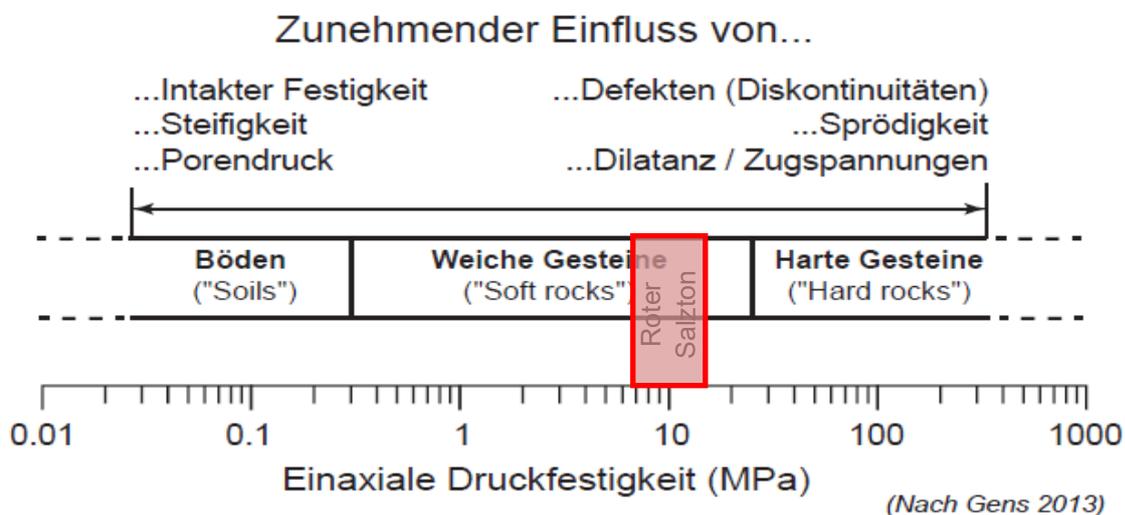


Abb. 4-10. Geotechnische Klassifizierung von tonhaltigen Böden und Gesteinen, anhand ihrer ein-axialen Druckfestigkeit.

Beispielhaft sind in Abb. 4-11a die Ergebnisse eines Einzel-Festigkeitsversuchs am Roten Salzton dargestellt. Bei konstanter Dehnungsrate (hier $\dot{\epsilon} = 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) ergibt sich ausgehend von einer geringen Anfangskompaktion und quasi-elastischer Verformung mit steigender Verformung infolge einsetzender lokaler Rissbildung eine klassische Spannungs-Dehnungskurve, wie sie für spröd-duktilen Gesteine typisch ist. Die Änderungen im Festigkeitsverhalten (und der hier nicht gemessenen Ultraschallgeschwindigkeiten mit einem Maximum, v_p und v_s , vgl. Popp et al., 2008) zeigen die Lage der Dilatanzgrenze an, die bei etwa 50% der Bruchfestigkeit liegt. Im weiteren Verformungsverlauf ergibt sich bei einer Dehnung von nur ~1% ein Festigkeitspeak (σ_{\max}) mit dem nachfolgenden Übergang ins Restfestigkeitsniveau.

⁴¹ Nach Lotze (1957) reagiert der Graue Salzton bereits bei geringen geomechanischen Beanspruchungen durch Aktivierung der Klüfte sowie Bildung von Rissen. Nach Hessmann et al. (1961) ist aber die Klüftintensität im Grauen Salzton geringer als im Hauptanhydrit.

⁴² Die als charakteristischste Eigenschaft des Roten Salztons hohe Plastizität („Drückendes Gebirge“) bewirkt beispielsweise innerhalb kürzester Zeit das Verschließen nicht verrohrter Bohrungen.

Dabei bildet sich ein charakteristischer Scherbruch aus, d.h. das Restfestigkeitsplateau ergibt sich aus Reibungsprozessen auf den gebildeten makroskopischen Scherbruchflächen (vgl. Abb. 4-11a, Bildinset).

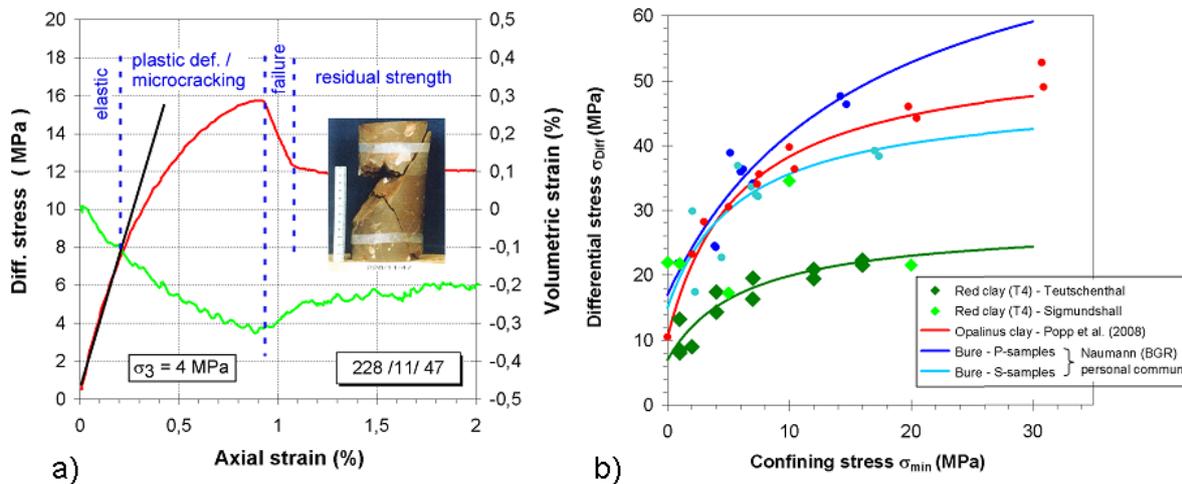


Abb. 4-11. Triaxiale Festigkeitsuntersuchungen des Roten Salztons (z4T) (aus Minkley et al., 2013).

a) Triaxialer Druckversuch am Roten Salzton – Spannungs-Dehnungskurve mit Volumendehnung (Herkunft: Grube Teutschenthal, Probe: 228/11/47) bei $\sigma_3 = 4$ MPa; b) Festigkeit verschiedener Tonsteine unterschiedlicher Herkunft als Funktion der Einspannung – Darstellung über ein nicht lineares Festigkeitskriterium (Minkley-Ansatz); Datenbasis: Roter Salzton (unveröff. IfG-Untersuchungen); Opalinuston // Schichtung (P-Proben); Tonproben aus Bure: // Schichtung (P-Proben) und \perp Schichtung (S-Proben).

Werden triaxiale Versuchsserien mit größeren Probenzahlen (üblicherweise in einem Manteldruckbereich für σ_{\min} zwischen 0,5 und 20 MPa) durchgeführt, ergeben sich Grenzkurven zur Bruchfestigkeit, wie sie in Abb. 4-11b für verschiedenen Salzton-Varietäten im Vergleich zu Literaturdaten zusammengestellt sind (u.a. für Opalinus-Ton aus dem Standort Mont Terri und Tonstein aus Bure, wobei zusätzlich noch unterschiedliche Belastungsrichtungen - parallel (//) und senkrecht (\perp) zur Schichtung - zu berücksichtigen sind). Die festgestellten Bruchspannungen nehmen generell mit steigendem Manteldruck zu, variieren jedoch stark in Abhängigkeit von der Herkunft der Proben sowie vom Habitus der Einzelproben. Das Versagen der Prüfkörper als Tragelement tritt bei niedrigem Manteldruck unter Ausbildung von Scherbruchflächen ein. Mit steigendem Manteldruck entwickelt sich ein komplexes Rissgefüge, das zu einem quasi-plastischen Bruchversagen führt.

Die Festigkeiten können sich für die gleiche Tonformation lokationsspezifisch erheblich unterscheiden, wie die Ergebnisse für die Standorte Sigmundshall und Angersdorf zeigen. Während die Proben aus Angersdorf oberhalb von $\sigma_{\min} > 10$ MPa ein Plateau in der Bruchfestigkeit von ca. 20 MPa erreichen, liegen einzelne Festigkeitswerte vom Standort Sigmundshall deutlich höher und entsprechen dabei eher den Festigkeiten von Opalinuston, wobei die Ursachen bisher nicht zweifelsfrei geklärt sind⁴³.

⁴³ Ursächlich dafür könnte die hier stattgefundenene Überkonsolidierung des Roten Salztons bei der Versenkung der Salzgesteine bis mehrere 1000 Meter Teufe sein, die zu einer deutlichen Verfestigung geführt hat.

Auch wenn die Eigenschaften von Salztönen (z.B. die Druckfestigkeiten), abhängig vom Mineralbestand und der Vorkonsolidierung, stark variieren können, entspricht ihr generelles Festigkeits- und Dilatanz-Verhalten qualitativ dem bekannter Ton-Gesteine, die aktuell als potentielle Wirtsgesteine für die Endlagerung radioaktiver Abfälle untersucht werden (z. B. Opalinuston).

4.4.2 Hydraulische Eigenschaften

Permeabilitätstests an Tonsteinen sind unter Labor- und Feldbedingungen immer sehr komplex, weil z. B. bei Laborversuchen, im Unterschied zu Standardtests der Bodenmechanik nach Darcy, jeweils die effektiven Sättigungsrandbedingungen beachtet werden müssen. Gleichzeitig handelt es sich um sehr gering permeable Gesteine, was vergleichsweise lange Versuchszeiten erfordert.

Beispielhaft sind in Abb. 4-12 Ergebnisse aus isostatischen Injektionstests ($\sigma_3 = \sigma_1 = 10$ MPa) mit Salzlösung dargestellt, bei denen unter triaxialer Einspannung der Probe ($d = 100$ mm, $l = 200$ mm) über eine zentrale Bohrung ein definierter Probenabschnitt im Zentrum der Probe beaufschlagt wurde. Mit dieser Messkonfiguration wird eine signifikante Vorschädigung der Probe weitgehend vermieden.

Die Ergebnisse lassen sich zwei Themenschwerpunkten zuordnen:

(1) Inhärente Lösungspermeabilität:

Die am Roten Salzton initial gemessenen Fluidpermeabilitäten liegen zwischen 10^{-17} und $>10^{-19}$ m², was auch durch Feldmessungen (IfG, unveröff. Daten) bestätigt wurde.

Diese Größenordnung der Permeabilität entspricht einer hohen Dichtheit, wie sie allgemein für verfestigte Tonsteine zu erwarten ist.

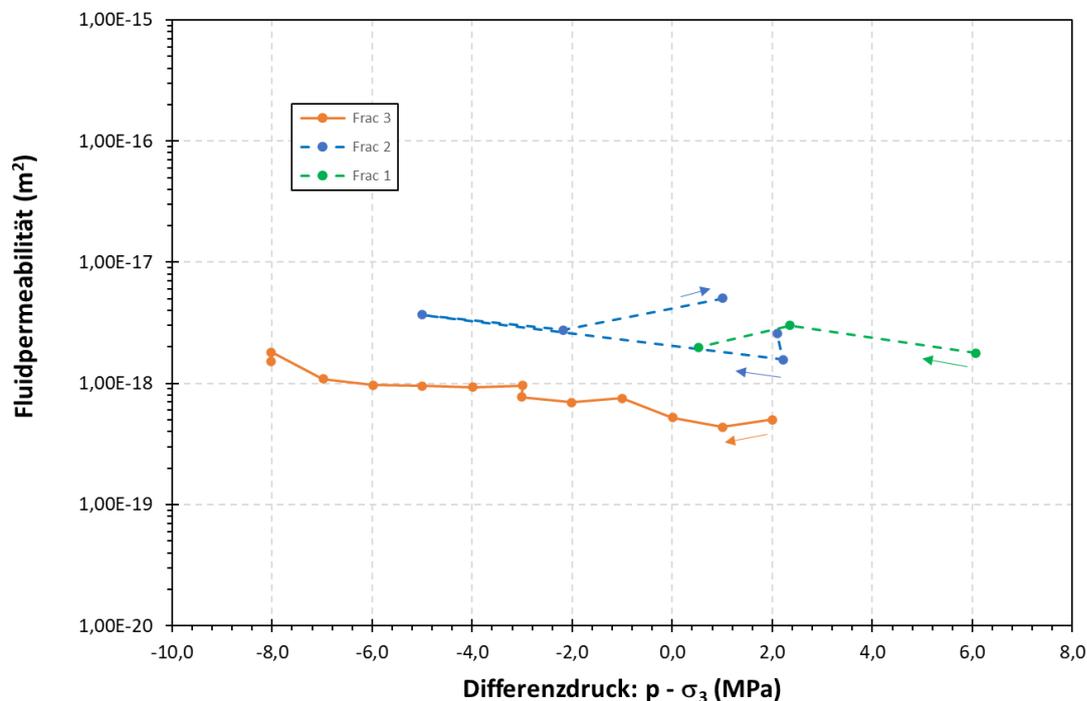


Abb. 4-12. Injektionsversuche mit Lösung am Roten Salzton Teutschenthal - Serie 691, $\sigma_3 = \sigma_1 = 10$ MPa - (Injektion über zentrales Bohrloch ($l = 15$ mm) mit radialer Ausbreitung) – Lösungspermeabilität vs. Differenzdruck ($p_{II} - \sigma_3$) (IfG, unveröffentlichte Daten).

Damit wird nachgewiesen, dass der Rote Salztön trotz des (nominell) hohen Porenanteils in der Größenordnung von 20% ein offensichtlich stabiles, gut verwachsenes Korngerüst besitzt, dessen Porenraum bis annähernd der Sättigung von Porenwasser besetzt ist. Dieser Porenraum ist nach dem aktuellen Prozessverständnis für Tonsteine nur teilweise durch Porenkanäle / diffuse Wegsamkeiten miteinander verbunden. Die benetzenden Flüssigkeiten Wasser und Salzlauge lagern sich bevorzugt in kleinen Poren ein. Durch Wachstum von Salzausscheidungen können zusätzlich Porenkanäle verschlossen werden, insofern ist die für Transportprozesse zur Verfügung stehende effektive Porosität sehr klein.

(2) Hydraulisches Aufreißverhalten - Minimalspannungskriterium:

Bei Salzgesteinen kommt es, wenn der Lösungsdruck die kleinste Hauptspannung im Gebirge erreicht bzw. überschreitet ($p_i \geq \sigma_3$), zu einer deutlichen Zunahme der Permeabilität (bis zu mehreren Größenordnungen). Dieser Prozess wird allgemein anhand des Minimalspannungskriteriums bewertet (Kap. 3.1.5).

Die Wirkung eines Lösungsdruckes auf die Durchlässigkeit des Roten Salztöns wurde an triaxial eingespannten Salztönproben untersucht. Nach erfolgter Aufsättigung wurde jeweils der Injektionsdruck (p_i) über der Probe schrittweise erhöht, während der Seitendruck von 10 MPa konstant gehalten wurde.

Ausgehend von den gemessenen Injektionsraten der Lösung wurden die Permeabilitäten berechnet, die in Abb. 4-12 gegen den Differenzdruck ($p_i - \sigma_3$) dargestellt sind. Dabei zeigen sich (wenn man von rechts kommt, mit $p_i < \sigma_3$), dass sich trotz der Verletzung des Minimalspannungskriteriums ($p_i \leq \sigma_3$) keine schlagartige Änderung der Durchlässigkeit, sondern allenfalls eine moderate Zunahme ergibt.

Als wichtiges Ergebnis dieser Labortests ist festzuhalten, dass es bei den Injektionsversuchen mit sehr langsam durchgeführten Druckbeaufschlagungen nicht zu einem hydraulischen Aufreißen der Probe kommt. Mutmaßlich führt die inhärente, geringe Durchlässigkeit des Salztöns sowie die Plastizität des Gesteinsgefüges dazu, dass zwar Wegsamkeiten hydraulisch aufgeweitet werden (moderate Permeabilitätszunahme), dass es aber nicht zu singulären Wegsamkeiten (Hydro-Fracs) kommt.

Damit ergibt sich auch die Erklärung, warum, wie in Kap. 5.2.4 beschrieben, die geologische Barriere (hier als Multi-Barrierensystem aus Salz- und Tongestein) beim Gebirgsschlag 1996 in Teutschenthal nicht versagt hat. Obwohl dabei nachweislich das Minimalspannungskriterium verletzt war.

Das bedeutet nicht nur, dass im Unterschied zu Steinsalz das Minimalspannungskriterium extrem konservativ ist, sondern dass mit dem natürlichen Multi-Barrierensystem ein erheblicher sicherheitstechnischer Vorteil besteht.

4.5 Kali-Salzgesteine

4.5.1 Mechanische Eigenschaften

Kalisalze (u.a. Carnallit, Sylvinit und Hartsalz) zeichnen sich durch ein sehr komplexes Verformungsverhalten aus, weil sie sich in ihrer mineralogischen Zusammensetzung deutlich unterscheiden können (Kap. 2.1.2.4). Es kann allerdings auf eine große Zahl von Ergebnissen aus Untersuchungen an verschiedenen bergbaulich genutzten Standorten zurückgegriffen werden. Besonders zu nennen sind die Arbeitsergebnisse im Abschlussbericht für das ERA-Morsleben (Hunsche et al. 1998).

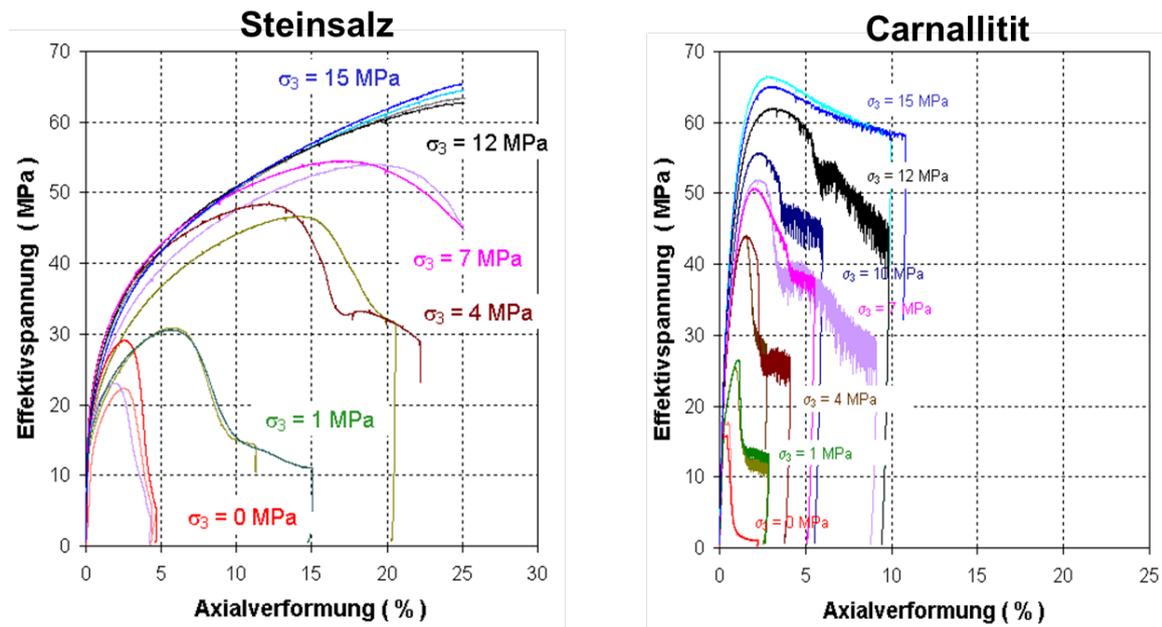


Abb. 4-13. Spannungsverformungsverhalten von Steinsalz (li.) und Carnallit (re.) (IfG, unveröffentlichte Daten).

Eine Sonderrolle nimmt der Carnallit ein, der wegen seiner Spröbruchgefährlichkeit bergbaulich besonderer Aufmerksamkeit bedarf, und sich deutlich vom Verformungsverhalten von Steinsalz unterscheidet (Abb. 4-13). Im Vergleich zu Steinsalz ist die mechanische Verformbarkeit gebirgstrockener Gesteinsproben bis zum Bruch deutlich kleiner und gleichzeitig ergibt sich mit steigendem Manteldruck zwar eine Verfestigung, aber kein Übergang von spröde zu duktil, sondern Carnallit verhält sich spröde mit einem ausgeprägtem Bruch- und Nachbruchverhalten.

Im Gegensatz zu Steinsalz, bei dem eine visko-plastische Verformung durch die Bewegung von Versetzungen auf kristallographischen Gleitebenen vermittelt wird, resultiert die inelastische Verformung von Carnallit hauptsächlich aus Zwillingsbildung, Rissbildung und der Verschiebung auf Scherflächen. Die Rissdichte (und damit die Dilatanz) nimmt mit wachsender Axialverformung (nichtlinear) zu, wobei mit Zunahme der Einspannung die Rissbildung behindert wird. In der Konsequenz treten mit Überschreitung einer spezifischen Belastungsgrenze plötzlich Tragfähigkeitsverluste (stick-slip) auf, die im Probenmaßstab zur schlagartigen Probenbruch (mit Ausbildung großer Risse und Scherbrüche) führen bzw. in-situ durch ein kollektives Pfeilerversagen ganzer Abbaufelder (Gebirgsschlag) dokumentiert sein können.

Das experimentelle Verformungsverhalten wird wesentlich vom Manteldruck, der Verformungsgeschwindigkeit und dem Carnallitgehalt bestimmt.

Ein wesentlicher Aspekt ist allerdings die Verfügbarkeit von "Wasser", was dazu führt, dass carnallitische Gesteine nur geringe Deformationsverfestigungen aufweisen und sich gleichzeitig „weich“ bzw. plastisch verhalten (Hunsche et al., 2003). Im Ergebnis kann Carnallit, insbesondere bei kleinen Spannungen teilweise sogar höhere Verformungsraten aufweisen, als Steinsalz (Abb. 4-14).

Im Hartsalz dagegen sind Feuchteeffekte praktisch nicht zu beobachten. Das Gestein ist wenig duktil. Wie Steinsalz bedarf es nach einer Höherbelastung der Verfestigungserholung mit transientem Kriechen. Hartsalz reagiert nach vergleichsweise geringer Verformung mit Spröbruch.

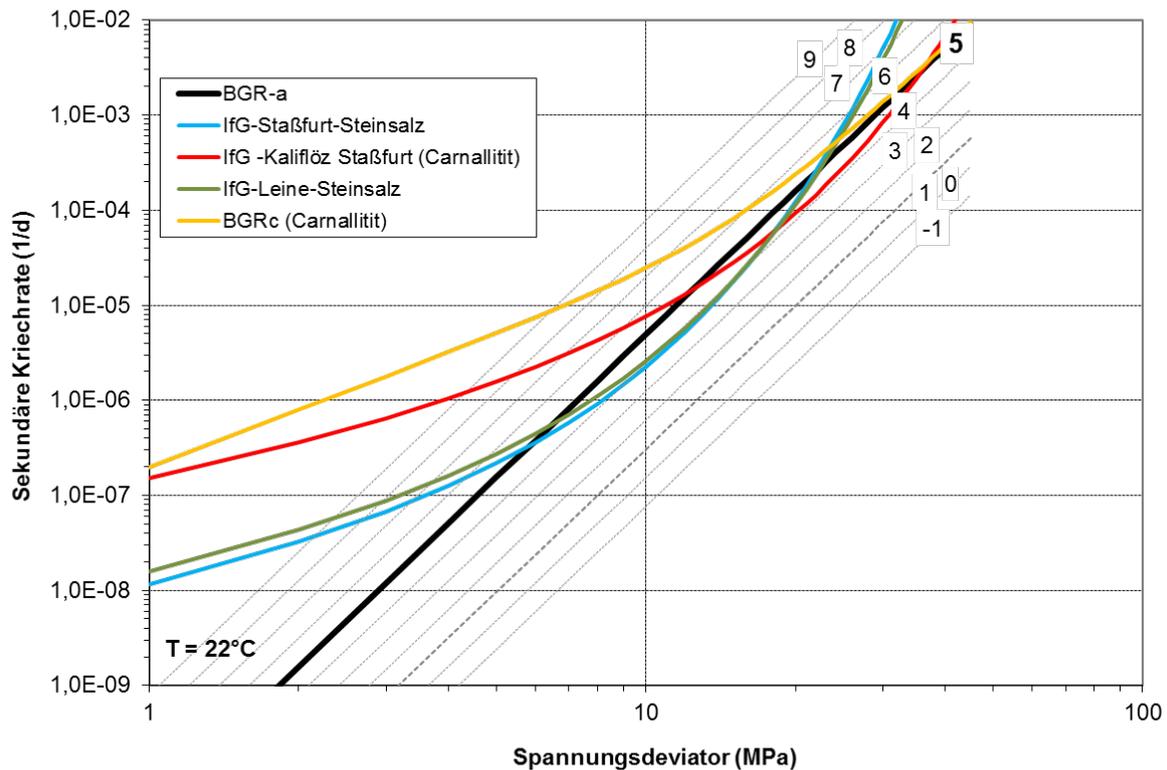


Abb. 4-14. Sekundäre Kriechraten (IfG) für Steinsalz und Carnallit im Vergleich zum Kriechgesetz BGRa (mit verschiedenen Kriechklassen) sowie BGRc (aus Liu et al., 2017).

4.5.2 Hydraulische Eigenschaften

Zu den hydraulischen Eigenschaften von Kalisalz-Formationen liegen vergleichsweise wenige Kenndaten vor, da insbesondere carnallitische Gesteine z.B. in der Regel nicht für die Errichtung von technischen Abdichtungen genutzt werden, wo Permeabilitätsmessungen ansonsten relevant wären.

Hydraulische Messungen der Lösungsporeabilität wurden im Carnallit der Grube Teutschenthal über 3 – 7 Monate in zwei ca. 21 m langen Bohrlöchern mit unterschiedlichen $MgCl_2$ -dominierten Lösungen durchgeführt (Popp et al. 2010). Die dabei am Untersuchungsort bestimmte integrale effektive Lösungsporeabilität im anstehenden Gebirge war jeweils deutlich kleiner als $10^{-22} m^2$.

4.5.3 Thermische Zersetzung Carnallit

Carnallit kommt in der Regel als Hauptkomponente des Kaliflözes Staßfurt sowie teilweise auch in den anderen Salinarfolgen als wichtige Kalisalzkomponente vor (vgl. Tab. 2-3).

Die thermodynamische Stabilität des Minerals Carnallit ($KMgCl_3 \cdot 6H_2O$) ergibt sich über das Phasengleichgewicht zwischen dem mineralischen Festkörper, der gesättigten Salzlösung als flüssiger Phase über dem mineralischen Bodenkörper und dem Wasserdampf in der Gasphase (Wasserdampfpartialdruck) (Freyer et al. 2006).

Die thermische Zersetzung des Carnallits erfolgt über die beiden Hydratationsstufen Carnallit-Dihydrat und Carnallit-Anhydrid.

Nach Ausweis von Laboruntersuchen an Pulverproben setzt unter Raumbedingungen eine nachweisbare thermische Zersetzung von Carnallit ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) bei etwa 80°C ein. Allerdings hängt die thermische Zersetzung von dem im verfügbaren Porenraum wirkenden Wasserdampfpartialdruck ab (Jockwer, 1980). Kern & Franke (1980) zeigen, dass die Wasserabgabe sich mit steigendem Druck zu höheren Temperaturen verschiebt, wobei Carnallit in einem Porenraum-freien System bis zum Schmelzpunkt bei $167,5^\circ\text{C}$ stabil ist (Will & Hinze 1983). Entsprechend ist bei Herrmann (1983, Tab. 28) vermerkt, dass bei absolut trockener Luft keine untere Grenztemperatur angegeben werden kann, bei der Carnallit gegen die Abgabe von Kristallwasser stabil bleibt.

Die Ergebnisse aus kleinskaligen Laboruntersuchungen wurden durch Untersuchungen an repräsentativen Kernproben ($d = 100 \text{ mm}$, $l = 250 \text{ mm}$) aus dem Salzstock Gorleben unter simulierten in situ-Bedingungen weitgehend bestätigt. Mittels elektrischer Leitfähigkeitsmessungen konnten Popp & Kern (1993) zeigen, dass bei niedriger Einspannung (wenige MPa) ab ca. 100°C eine signifikante elektrische Leitfähigkeitszunahme (infolge von freigesetztem Wasser im Porenraum) auftrat. Die Entwässerungseffekte werden mit zunehmender Einspannung sukzessive kleiner, bis Carnallit bei Drücken ab ca. 20 MPa bis zum Schmelzpunkt von 167°C stabil ist („geschlossenes System, ohne vernetzte Porosität“).

Als Gesamtbewertung wird gefolgert, dass Carnallit bis zum Schmelzpunkt von 167°C stabil ist, solange es ausreichend eingespannt ist und keine Wegsamkeiten für ein Entweichen potentiell freigesetzter Fluide vorhanden ist. Über die Planung des Endlagers wird gewährleistet, dass unter Einhalten ausreichender Sicherheitsabstände keine Gefährdung resultiert.

4.6 Simulation der hydro-mechanischen Eigenschaften von Salzgesteinen

Geomechanische Modellberechnungen zum geotechnischen Integritätsnachweis werden in den verschiedenen Phasen der Standortauswahl im Rahmen vorläufiger Sicherheitsanalysen benötigt. Voraussetzung dafür ist, dass geeignete Nachweistools und Materialgesetze zur Beschreibung der Eigenschaften zur Verfügung stehen.

Tab. 4-1. Im BMWi-Verbundprojekt „Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen“ beteiligte Projektpartner, Stoffgesetze und Rechenprogramme (zur Kennwertbestimmung: KW; für die Modellberechnungen: FDM: Finite-Differenzen-Methode, FEM: Finite-Elemente-Methode) (nach Hampel et al., 2010).

Projektpartner	Stoffgesetze	Programmsysteme
Dr. A. Hampel	<ul style="list-style-type: none"> • Composite-Dilatanz-Modell (CDM) 	MATCAD (KW), FLAC3D (FDM)
IfG Leipzig	<ul style="list-style-type: none"> • Modell Günther/Salzer • Modell Minkley 	EXCEL (KW), FLAC, FLAC3D (FDM)
KIT Karlsruhe	<ul style="list-style-type: none"> • KIT-Modell 	ADINA (FEM)
Uni Hannover	<ul style="list-style-type: none"> • Lubby-MDCF 	FLAC, FLAC3D (FDM)
TU Braunschweig	<ul style="list-style-type: none"> • Modell IGBTUBS (Döring) 	EXCEL (KW), FLAC3D (FDM), ANSYS (FEM)
TU Clausthal	<ul style="list-style-type: none"> • Modell Hou/Lux bzw. Lux/Volters 	FLAC, FLAC3D (FDM)
Sandia Nat. Lab.	<ul style="list-style-type: none"> • Munson-Dawson-Modell (MD) 	Sierra Mechanics Code Suite (diverse gekoppelte Codes)

Einen Überblick über den Stand moderner Stoffgesetze für Salzgesteine gibt beispielhaft das BMWi-Verbundprojekt „Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen“, das in drei Phasen im Zeitraum zwischen 2007 – 2015 durchgeführt wurde und mit dem Vorhaben WEI-MOS fortgesetzt wird. Die Partner mit ihren unterschiedlichen Stoffgesetzen sowie den benutzten numerischen Tools sind in Tab. 4-1 zusammengefasst.

Wie in Abb. 4-15 schematisch dargestellt, beschreiben die verschiedenen Stoffansätze (mit einzelnen Ausnahmen) das im vorhergehenden Abschnitt dargestellte komplexe mechanische Verhalten von Steinsalz, d.h. das transiente Kriechen infolge der Verfestigung und Erholung von Steinsalz, das stationäre Kriechen, die Entwicklung der Schädigung und Dilatanz (Auflockerung, volumetrischen Verformung), den Kriechbruch, die Kurzzeitfestigkeit, das Nachbruchverhalten, die Restfestigkeit sowie die Schädigungsrückbildung und Verheilung.

Phänomen/ Eigenschaft	STOFFMODELLE					
	CDM-Hampel	IfG-GS	KIT	TUC-Hou/Lux	IUB-L-MDCF	IfG-Minkley
Prim. Kriechen und Sek. Kriechen	Struktur- verfestigung ↕ Sin-Hyp.	Deformations- verfestigung ↕ Potenz-Ansatz	Zeit- verfestigung +	Deformations- verfestigung +	Zeit- verfestigung +	Zeit- verfestigung +
Dilatanzgrenze	standortspezifisch		Allgemeine Dilatanz- grenze	standortspezifisch		
	Min(ϵ_{vol})	Min(ϵ_{vol}), Restfestigkeit		Min(ϵ_{vol}), v_p Verlauf	30% $\beta(J_1)$	Min(ϵ_{vol})
	TC			TC/ TE => f(θ)		TC
Beschreibung Spitzenfestig- keit	Vergl. zulässige und geleistete Arbeit im Dilatanzbereich	keine erforderlich folgt aus dem Verfestigungs- konzept über ϵ_{vol} - abhängige Viskosität (innere Verknüpfung)	Vergl. zulässige und wirkende Spannung	Vergl. zulässige und wirkende Spannung		
Bruch- und Nachbruch	Beschleuni- gungsfunkti- onen für Kriechrate (multiplikative Verknüpfung)		Noch nicht berücksichtigt	schädigungsinduzierte Kriechraten (additive Verknüpfung)		Hüllkurven: $\sigma_{Max}=f(\sigma_3, \epsilon_{pl})$ Verfestigung/ Entfestigung => plast. Deformation
mechanisch Rückkopplung Schädigung / Dilatanz		Ja => Volumen- zunahme und	Schädigungs- induzierte Kriechrate	Flächenschädigungskonzept		
volumetrisch	-	G, K=f(ϵ_{vol})	-	Ja => Volumen- zunahme	-	Ja => Volumen- zunahme und G, K=f(ϵ_{vol})

Abb. 4-15 Vergleich ausgewählter Phänomene und Eigenschaften sowie deren Umsetzung in den Stoffmodellen (nach Günther, persönl. Mittlg.).

Jedes dieser Verformungsphänomene kann unter dem Einfluss diverser Randbedingungen wie Spannungszustand, Temperatur und Verformungsrate in einem weiten, in-situ relevanten Wertebereich modelliert werden, wobei jeweils Stoffgesetz-spezifische und von der Anzahl her unterschiedlich viele Materialparameter verwendet werden.

Es wird deutlich, dass unterschiedliche Arbeitsgruppen verschiedene Stoffgesetze und Programmsysteme verwenden, die grundsätzlich validiert und für konkrete Berechnungsfälle bzgl. der eingesetzten Materialparameter auch standortspezifisch verifiziert sein müssen. Grundsätzlich liegen aber hinreichende Voraussetzungen zur Durchführung vorläufiger Integritätsbewertungen vor.

4.7 Zusammenfassende Bewertung des Kenntnisstandes (hydro-mechanische Eigenschaften von Salzgesteinen)

Die Untersuchungen belegen exemplarisch,

- dass die gesteinspezifischen Eigenschaften von Steinsalz, Anhydrit, Salztonen und Kalisalz sich untereinander zwar qualitativ / quantitativ stark unterscheiden, dass aber ein grundsätzliches Materialverständnis existiert.
- dass die geomechanischen Eigenschaften von Salzgesteinen unter den bei der Endlagerung wärmeproduzierender Abfälle wirkenden Einwirkungen, die abhängig von den Spannungs- und Verformungsrandbedingungen zu lokalen Schädigungen führen können, hinreichend charakterisiert werden können.
 - ⇒ Eine zuverlässige Ableitung von Gesteinsparametern für Salzgesteine (Steinsalz, Anhydrit, Salztone und Kalisalze) zur Durchführung numerischer Integritätsbewertungen im Rahmen von Sicherheitsanalysen ist somit möglich. Allerdings sind die Parameter-Sätze im Rahmen der Erkundung (z.B. mittels Bohrungen von übertage) über geeignete Feldmessungen und Laboruntersuchungen zu verifizieren.
- dass aber zusätzlich noch lithologische Ausprägungen und Eigenschaften, wie z.B. natürliche Trennflächen im Salzgebirge (vor allem im geschichteten Steinsalz) ein wichtiges Gesteinscharakteristikum sind. Sie bestimmen wesentlich die Barriere-Eigenschaften des Salzgebirges mit, wozu neben den Festigkeitseigenschaften einer Hohlraumkontur auch die Durchlässigkeit gehört.
 - ⇒ Die aus Gefügeinhomogenitäten resultierenden Anisotropieeffekte (Richtungsabhängigkeit hydraulisch/mechanischer Eigenschaften) werden aktuell in numerischen Modellierungen bei Integritätsbetrachtungen meistens aufgrund nicht hinreichender Daten oder eines nicht ausreichenden Prozessverständnisses vernachlässigt.
- dass die in flachgelagerten Salzformationen vorkommenden und lithologisch verschiedenen Salzgesteine (z.B. Steinsalz, Anhydrit und Salztone) hydraulisch dicht sind, solange sie hinreichend eingespannt und nicht mechanisch oder durch Fluiddruckwirkung geschädigt sind.
 - ⇒ Die verschiedenen Salzgesteine sind somit als potentielle Barrieregesteine wirksam. Allerdings ist durch geeignete Untersuchungen (z.B. durch direkte Permeabilitätsmessungen oder anhand der Einschätzung auf Basis des Spannungszustandes) nachzuweisen, dass das Salzgebirge außerhalb des Einwirkungsbereichs der Hohlräume hydraulisch dicht ist.

5 Referenzbeispiele zur Integrität der Salinarbarriere in flacher Lagerung

5.1 Das Vorhaben KOSINA

5.1.1 Einführung

Im Rahmen des BMWi-Vorhabens KOSINA (Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschichten in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes – Laufzeit: 01.07.2015 - 30.04.2018) wurden thermo-mechanisch-hydraulisch gekoppelte Modellberechnungen zur Integrität der geologischen Barrieren an zwei unterschiedlichen, generischen Endlager- bzw. Wirtsgesteinskonstellationen (flache Lagerung bzw. Salzkissen) durchgeführt und bewertet (Bollingerfehr et al., 2018).

Hier wird exemplarisch die Modellstudie⁴⁴ zur Situation „Salzkissen“ betrachtet, wie sie als geologische Situation für verschiedene potentielle Endlagerlokationen in Mitteldeutschland repräsentativ sein kann (für Details, s. Liu et al., 2018).

5.1.2 Einlagerungskonzept / Umsetzung im Rechenmodell

Die im Rahmen des FuE-Vorhabens KOSINA für flach lagernde Salzformationen entwickelten technischen Endlagerkonzepte sind bisher nur generischer Art und wurden analog zu den in der VSG beschriebenen Konzepten weiterentwickelt (Bollingerfehr et al., 2018).

Neben der Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern und der Bohrlochlagerung von Brennstabkernen in vertikalen Bohrlöchern (hier max. 50 m Bohrlochlänge), wurde auch ein Konzept zur Einlagerung von Brennstabkernen in horizontalen Bohrlöchern entworfen.

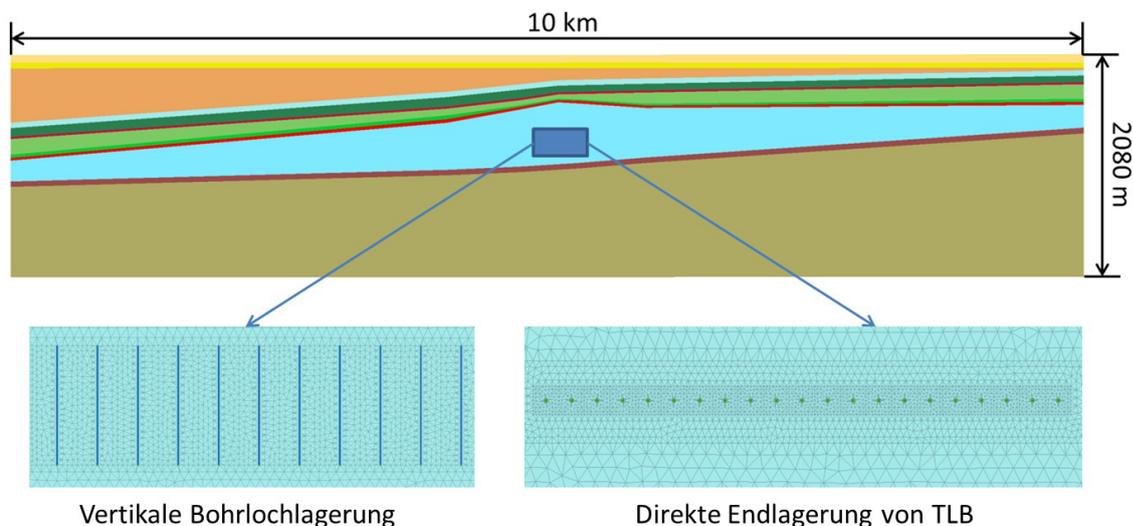


Abb. 5-1. 2D-Berechnungsmodell der Salzkissenstruktur (aus Liu et al., 2018).

Die für den Modelltyp „Salzkissen“ betrachteten Einlagerungsvarianten waren:

- Vertikale Bohrlochlagerung von Brennstabkernen (BSK-V),

Dazu werden horizontale Bohrungen mit entsprechenden Linern ausgestattet, in die sogenannte Panzerrollen vorinstalliert werden, die dazu dienen, sowohl das Einschleusen der Brennstabkerne zu vereinfachen als auch deren Rückholung während der Betriebszeit zu gewährleisten.

⁴⁴ Bzgl. der untersuchten Varianten „flache Lagerung“ und Salzkissen ist anzumerken, dass die generellen Effekte (z.B. Temperatur-bedingte Hebungen an der Oberfläche, die zu entsprechenden Zerrungen führen) qualitativ ähnlich waren, dass aber insgesamt die größere Salzmächtigkeit des Salzkissens mit einer größeren, nicht-beeinflussten Salz-Barriere objektive Vorteile zeigte.

- Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern (TLB) in horizontalen Kurzbohrlöchern.

Bohrlochlagerung in vertikalen Bohrlöchern (hier max. 50 m Bohrlochlänge)

Die geologische Gesamtsituation wurde mittels 2D oder 3D-Modellen abgebildet, wobei jeweils eine tatsächlich in Deutschland vorkommende Geologie dargestellt ist (s. unt. bzw. vgl. Abb. 5-2). Teufenabhängig vom Einlagerungskonzept wurde die Einlagerungssohle für die vertikale Bohrlochlagerung bei 725 m u.NN und für die direkte Endlagerung bei 830 m u. NN zentral in die Salzformation hineinprojiziert.

Hohlräume wie z. B. Richtstrecken, Querschläge und Einlagerungsstrecken werden in diesen Modellen nicht berücksichtigt. Diese Annahme ist im Hinblick auf die Bewertung der Integrität der Salzbarriere vor allem im Fernbereich als konservativ einzustufen, da im Einlagerungsbereich infolge Wärmeproduktion größere Druckspannungen berechnet werden, die im Salzspiegelbereich zu einer größeren zughafte Entlastung führen und sich damit ungünstig auf Dilatanz- und Fluiddruckkriterium auswirken.

5.1.3 Referenzmodell - Geologische Situation

Das in Abb. 5-2 dargestellte, in der Länge ca. 12,5 km umfassende Referenzmodell für das Salzkissen weist für den Einlagerungshorizont z2Na (Staßfurt-Steinsalz) eine maximale Mächtigkeit von ca. 600 m in einer minimalen Teufe von 460 m u. GOK und eine Salzbasis in ungefähr 1.100 m u. GOK auf. Eine detaillierte Beschreibung der geologischen Gesamtstruktur mit den spezifischen Einheiten des Salinars sowie des Deck-, Neben- und Grundgebirges wird in Völkner et al. (2017) gegeben.

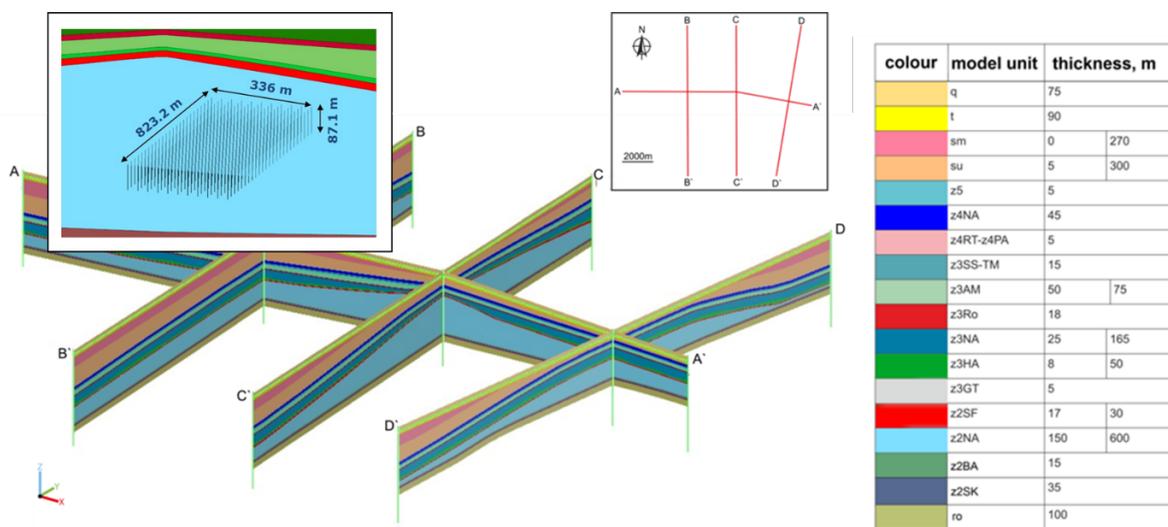


Abb. 5-2: Geologisches Referenzmodell „Salzkissen“ (Längsschnitt mit drei Querprofilen) mit den stratigraphischen Modelleinheiten (verändert nach Völkner et al. 2017). Das Inset (li. ob.) zeigt schematisch die modellierte Anordnung und Feldes-Dimensionen der Bohrlochlagerung.

Als repräsentative Homogenbereiche werden in der Salinarformation 8 idealisierte lithologisch-stratigraphische Einheiten berücksichtigt. Oberhalb des Einlagerungsbereichs bzw. des darüber liegenden carnallitisch ausgebildeten Kalilagers (z2SF) folgen zum Hangenden hin die Leine-Formation (z3, u. a. mit dem grauen Salzton und dem Hauptanhydrit sowie den verschiedenen darauffolgenden Steinsalzpartien und dem Kaliflöz Ronnenberg) und die Aller-Formation (z4, u. a. mit dem Roten Salzton und dem Aller-Steinsalz). Das Deckgebirge wird durch drei Homogenbereiche abgebildet, den Folgen z5 – z7 mit dem unteren und mittleren Buntsandstein (als einheitliches Schichtpaket), dem Tertiär und dem überlagernden Quartär.

Zum Liegenden folgen als Teil der salinaren Folgen u. a. der Werra-Anhydrit und das Werra-Karbonat, die als Grundgebirge durch das Rotliegende (bestehend aus Sandsteinen) unterlagert sind.

Ausgehend von dem endzulagernden radioaktiven Inventar wurden verschiedene Einlagerungsvarianten mit unterschiedlichen Behälterkonzepten (u. a. in horizontalen Strecken mit Castoren oder vertikalen Bohrlöchern mit verschiedenen Kokillentypen) betrachtet. Auf Basis thermischer Auslegungsrechnungen (u. a. mit Berücksichtigung der behälterspezifischen Wärmeentwicklung mit den Wirtsgesteinseigenschaften sowie einer Auslegungstemperatur $T_{\max} \leq 200^\circ\text{C}$ sowie Sicherheitsabständen zum Carnallitit) wurde die Einlagerungsgeometrie mit dem notwendigen Platzbedarf optimiert.

Die weiteren Ergebnisse beziehen sich auf den Modellfall „Bohrlochlagerung“, wie er als Inset in Abb. 5-2 dargestellt ist.

5.1.4 Vorgehensweise Integritätsnachweis

Die Integritätsanalysen wurden unter Anwendung der in Kapitel 3.1.5 dargelegten Kriterien für die wahrscheinlichen Entwicklungen (Integritätsnachweis) durchgeführt. Dabei kamen zwei unterschiedliche Modellkonzepte (Berechnungsprogramme und Stoffmodelle) zur Anwendung, wobei in den beiden Programmen unterschiedliche Stoffmodelle implementiert sind:

- BGR: das Finite-Elemente-Programm JIFE, u. a. Stoffmodell BGRa und BGRb sowie dem r_v -Konzept nach Hunsche et al. (2003) - 3D-Modell
- IfG: die Distinct-Element-Codes UDEC (2D) bzw. 3DEC (3D); u. a. visko-elasto-plastisches Modellkonzept nach Minkley & Mühlbauer (2007) – 2,5D-Scheiben-Modell

Das 3D-Modell für die Einlagerungsvariante „vertikale Bohrlochlagerung“ (siehe ausschnittsweise Abb. 5-2) weist eine Länge von 5336 m, eine Breite von 3323 m und eine Höhe von 3574 m auf. Hohlräume wie z. B. Richtstrecken, Querschläge und Einlagerungsstrecken werden in diesem Modell nicht berücksichtigt.

Das IfG-Scheibenmodell für die vertikale Bohrlochlagerung hat unter Ausnutzung der Symmetrie eine Dicke von 16,8 m (halber Bohrlochabstand in out-of-plane-Richtung).

Für die ausgewiesenen Homogenbereiche wurden auf Basis von „Expert Judgement“ synthetische Datensätze der thermo-mechanischen Eigenschaften festgelegt, die im Wesentlichen den Extrakt von umfangreichen Laboruntersuchungen für Standorte in Mitteldeutschland (u. a. Teutschenthal, Staßfurter Raum, Bernburg und Scholle von Calvörde - Zielitz sowie den Südharz, u. a. mit Sondershausen, Bleicherode) repräsentieren.

Ausgangspunkt beider Modellansätze bildet die zeitabhängige Wärmeleistung der radioaktiven Abfälle, die bei BGR als Flächenquelle angesetzt und bei IfG für jedes mit Behältern beladene Bohrloch berechnet wurde, womit auch das Nahfeld der Ablagerungshohlräume betrachtet werden kann.

5.1.5 Berechnungsergebnisse

Die Wärmefreisetzung im Einlagerungsbereich führt zu einer instationären Wärmeausbreitung sowie zu thermisch induzierten Spannungen und Verformungen, die über einen Zeitraum von 10.000 Jahren berechnet wurden. Die Einlagerungsvariante „vertikale Bohrlochlagerung“ hat flächenbezogen die höchste thermische Energiedichte, was bedeutet, dass hier auch die höchsten Belastungen der Barriere zu erwarten sind.

Bzgl. der Berechnungsergebnisse ist anzumerken, dass die nachfolgend diskutierten Effekte zwar qualitativ gleich abgebildet werden, was die grundsätzliche Richtigkeit der daraus abge-

leiteten Aussagen bestätigt, aber im Detail quantitative Unterschiede in der Temperaturverteilung aufgrund der unterschiedlichen Berechnungsverfahren vorliegen. Unabhängig davon sind die Ergebnisse ausreichend zur vorläufigen Einschätzung.

• Temperaturfeld / Vertikale Verschiebungen (Hebungen)

Die Temperatur an der Behälteroberfläche im Zentrum des Einlagerungsfeldes steigt auf ca. 185 °C (Abb. 5-3 a) innerhalb von etwa 280 Jahren an (bei BGR: 147 °C nach 214 Jahren)⁴⁵. Der Wärmeeintrag erreicht den Salzspiegel verzögert und führt zu einer maximalen Temperaturänderung von ca. 15 °C nach etwa 2500 Jahren. Die Temperaturänderung am Salzspiegel ist damit geringer als beispielsweise in den (hier nicht gezeigten) Berechnungen zur flachen Lagerung, was hauptsächlich auf den größeren Abstand des Salzspiegels zum Einlagerungsbereich im Salzkissen zurückzuführen ist. Nach Erreichen des Maximums gehen die Temperaturen langsam zurück, allerdings ist der Ausgangszustand am Ende des Betrachtungszeitraumes von 10.000 Jahren noch nicht erreicht. An der Geländeoberkante wird keine signifikante Temperaturzunahme beobachtet.

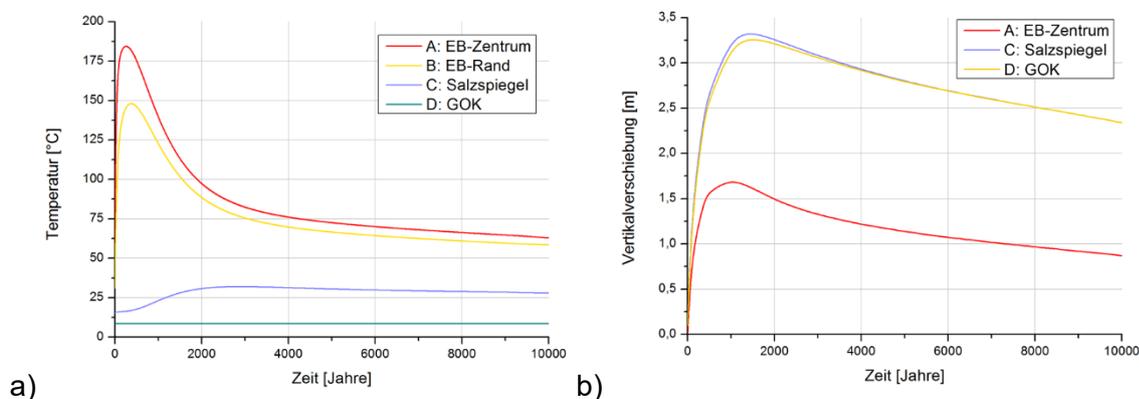


Abb. 5-3: Ergebnisse aus den 2D-Modellberechnungen der vertikalen Bohrlochlagerung - Salzkissen (aus Liu et al., 2018); a) Temperaturentwicklung; b) Vertikalverschiebungen.

Die thermisch induzierte Expansion im Einlagerungshorizont führt zum Einsetzen eines Hebungsprozesses oberhalb des Einlagerungsbereiches (vgl. Abb. 5-3 b). Die Hebungen an der Tagesoberfläche erreichen in der IfG-Modellierung einen Maximalwert von ca. 3,3 m nach ca. 1000 Jahren, d.h. also lange nachdem das Temperaturmaximum in und um den Einlagerungsbereich auftrat (bei BGR Maximalwert: 2,4 m nach 908 Jahren). Sämtliche Hebungen klingen nachfolgend bis zum Ende der Berechnung nur sehr langsam ab.

• Überprüfung Fluidkriterium

Abb. 5-4 zeigt zum Zeitpunkt 82 Jahre nach Einlagerung die berechnete Differenz zwischen der kleinsten Hauptdruckspannung S_1 und dem in der jeweiligen Teufe hypothetisch möglichen Fluiddruck W_D im Salzgebirge. Gelb bis rot eingefärbt sind die hypothetisch fluiddruckgefährdeten Bereiche. Die grünen und zum Teil transparent dargestellten Bereiche sind das Deck- und Grundgebirge sowie der Hauptanhydrit. Das Fluiddruckkriterium $S_1 - W_D$ wird bereits nach

⁴⁵ IfG und BGR verwenden unterschiedliche Modell-technische Ansätze zur Berechnung des Temperaturfeldes; IfG: Berücksichtigung der Einzelbehälter mit deren Wärmeleistung; BGR: Simulation einer „verschmierten“ Wärmequelle für den Einlagerungsbereich“. Die integrale Wärmeleistung ist aber in beiden Ansätzen vergleichbar.

ca. 9 bis 380 Jahren in der Schicht des Aller-Steinsalzes NA4 bis maximal 50 m unterhalb des Salzspiegels verletzt.

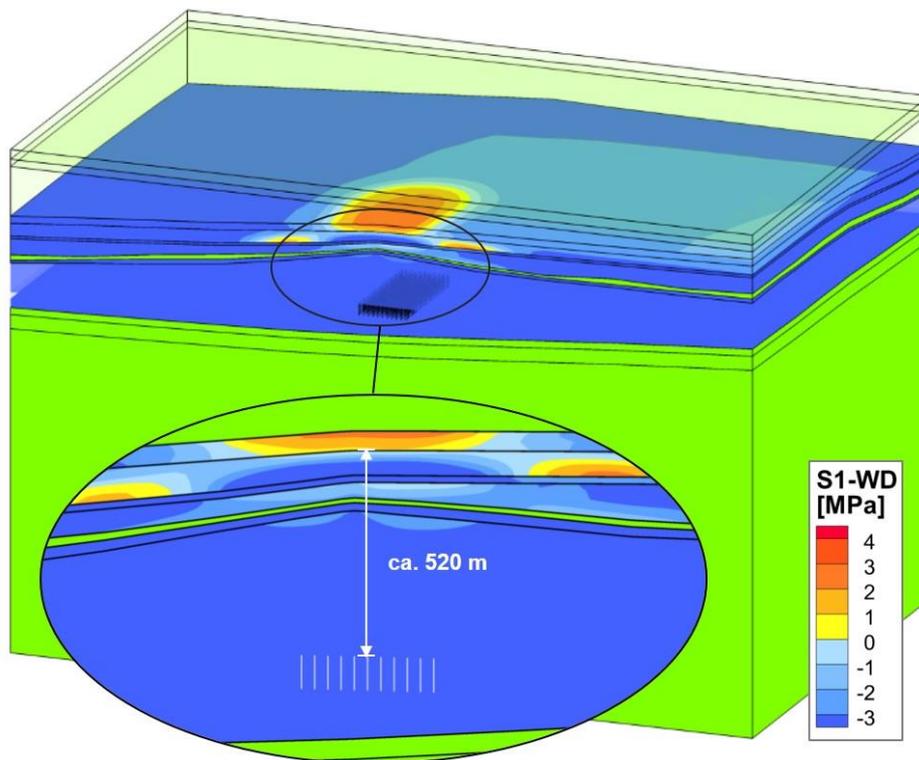


Abb. 5-4: Fluiddruckkriterium 82 Jahre nach Einlagerung aus der 3D-Modellberechnung (BGR) für die vertikale Bohrlöchlagerung - Salzkissen, mit detaillierter Seitenansicht (aus Liu et al., 2018).

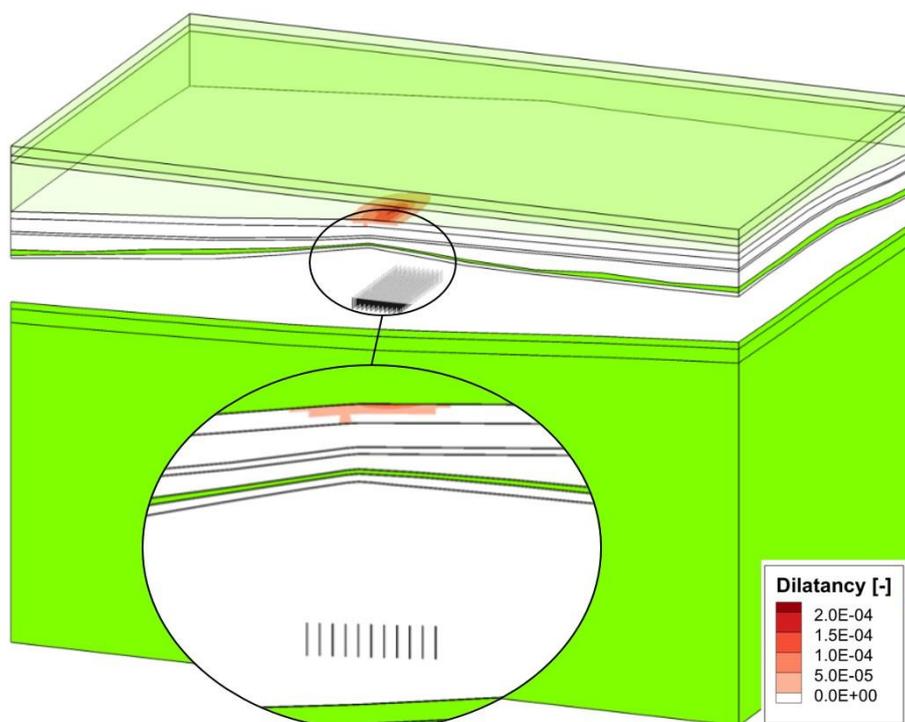


Abb. 5-5: Dilatante Bereiche in der Salzbarriere 82 Jahre nach Einlagerung aus der 3D-Modellberechnung (BGR) für die vertikale Bohrlöchlagerung - Salzkissen, mit detaillierter Seitenansicht (aus Liu et al., 2018).

Zwischen der Einlagerungssohle und den potenziell fluiddruckgefährdeten Bereichen existiert mindestens eine 520 m mächtige Barriere im Salinar. Somit entstehen keine Wegsamkeiten zwischen Deckgebirge und Endlager. Das Fluiddruckkriterium wird rechnerisch in der gesamten Salzbarriere nach 616 Jahren wieder erfüllt.

- **Überprüfung Dilatanzkriterium**

Die berechneten dilatanten Bereiche im Salzgebirge sind in Abb. 5-5 in Rot dargestellt. Die grünen und zum Teil transparent dargestellten Bereiche sind das Deck- und Grundgebirge sowie der Hauptanhydrit. Das Dilatanzkriterium wird lokal im Aller-Steinsalz NA4 bis maximal 50 m unterhalb des Salzspiegels zentral über dem Einlagerungsbereich verletzt. Die dilatante Zone bildet sich in einem Zeitraum von 20 bis 82 Jahren nach Einlagerung aus.

Zwischen der Einlagerungssohle und den dilatanten Zonen existiert mindestens eine 520 m mächtige intakte Barriere im Salinar. Somit entstehen keine Wegsamkeiten zwischen Deckgebirge und Endlager. Nach 82 Jahren bleibt die Dilatanz bis zum Ende des Betrachtungszeitraums konstant, weil kein Verheilungsansatz in den Modellberechnungen berücksichtigt wurde.

5.1.6 Zusammenfassung / Bewertung der Barriereintegrität

Durch die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle wird das Salzgebirge langfristig aufgeheizt. Die Temperaturen klingen nach Erreichen des Maximums aufgrund der abnehmenden Wärmeleistung der Abfälle zwar wieder ab, verbleiben aber auch nach 10.000 Jahren über dem initialen Niveau. Die Temperaturerhöhungen bewirken neben einer Veränderung der thermischen und mechanischen Materialeigenschaften insbesondere auch eine thermisch bedingte Volumenexpansion des Salzgebirges. Infolgedessen werden Spannungsänderungen induziert, die im Salzspiegelbereich zu einer zughafte Entlastung der Spannungen führen.

Eine Beeinträchtigung der Barriereintegrität ist somit im Salzspiegelbereich zum Deckgebirge nicht auszuschließen.

In allen Berechnungsmodellen (unabhängig vom Modellansatz) ergeben sich zu frühen Betrachtungszeiträumen bis zu 620 Jahren ausgedehnte Zonen, in denen der hypothetische Fluiddruck p_{FI} größer als die betragsmäßig kleinste Hauptspannung σ_1 ist, so dass das Fluiddruckkriterium dort nicht erfüllt ist. Im Bereich des Salzspiegels reichen die verletzten Zonen im Aller-Steinsalz NA4 bis maximal 60 m unterhalb des Salzspiegels. Zwischen den eingelagerten Abfällen und den hypothetisch fluiddruckgefährdeten Bereichen befindet sich im Falle des (hier als generische Situation betrachteten) Salzkissens eine über 500 m ungestörte hydraulische Schutzschicht im Salinar.

Im Fall der vertikalen Bohrlochlagerung im Salzkissen bildet sich eine dilatante Zone in einem Zeitraum von 20 bis 82 Jahren nach Einlagerung aus und dehnt sich im Aller-Steinsalz NA4 bis maximal 50 m unterhalb des Salzspiegels zentral über dem Einlagerungsbereich aus. Nach 82 Jahren bleibt die Dilatanz bis zum Ende des Betrachtungszeitraums konstant, weil kein Verheilungsansatz in der Modellberechnung berücksichtigt wurde.

Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der vorläufigen Integritätsbewertung zur Einlagerung von HAW-Abfällen für einen generischen Standort in einem Salzkissen dokumentieren, dass die Integrität des ewG unter den hier realisierten Rahmenbedingungen grundsätzlich nachweisbar ist:

- Im gesamten Betrachtungszeitraum von 10.000 Jahren entsteht rechnerisch in keinem Fall eine potenzielle durchgehende Wegsamkeit zwischen Deckgebirge und Endlager.
- Zwischen der Einlagerungssohle und dilatanten Zone befindet sich (für die hier betrachtete geologische Situation) mindestens eine 520 m mächtige Barriere im Salinar. Somit entstehen im gesamten Betrachtungszeitraum von 10.000 Jahren keine Wegsamkeiten zwischen Deckgebirge und Endlager.
- Für die vergleichende Standortauswahl bedeutet eine derartig mächtige Barriere einen erheblichen Standortvorteil, weil diese Barriere hohe Sicherheitsreserven besitzt, sowohl gegenüber den aus dem Wärmeeintrag der HAW-Abfälle, als auch externen Einflüssen (z.B. Gletscherüberfahrung) resultierenden Einwirkungen.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass die hier betrachtete Situation sich an realistischen Rahmenbedingungen orientiert, wie sie u.a. in ähnlicher Form in Mitteldeutschland in Thüringen oder Sachsen-Anhalt sowie in Brandenburg vorliegen können.

Unabhängig davon müssen in einem späteren Sicherheitsnachweis entsprechende Nachweisrechnungen mit den tatsächlichen Geometrien der geologischen Situation und dem Endlagerkonzept sowie den thermischen Daten für die Abfallgebände erneut durchgeführt werden.

5.2 Erfahrungen auf Basis LZSN der Grube Teutschenthal

5.2.1 Einführung

Bei der Grube Teutschenthal handelt es sich um einen Salzstandort der flachen Lagerung, wo moderate Salzausgleichsbewegungen zur Bildung des Teutschenthaler Sattels geführt haben, woraus für das Staßfurt-Steinsalz (z2Na) Mächtigkeiten bis zu 500 m resultieren.

In den Grubenfeldern der Schachanlage Teutschenthal wurde von 1908 bis 1982 Carnallit im 40 – 45 m mächtigen Flöz Staßfurt und mit Unterbrechungen von 1913 bis 1966 im begrenztem Umfang Staßfurtsteinsalz abgebaut. Wegen der nicht gegebenen Langzeitstandortsicherheit der Carnallitpfeiler infolge der im Carnallit zeitabhängig ablaufenden Entfestigungsprozesse, die bekanntlich zu den Gebirgsschlagereignissen von 1916, 1940 und 1996 geführt haben (Minkley & Menzel, 1999), besteht die Notwendigkeit, Versatz einzubringen.

Zielstellungen dabei sind u.a. die Vermeidung weiterer Gebirgsschläge und der Schutz der Tagesoberfläche. Die dafür erforderlichen, aufwändigen Sicherungsarbeiten werden durch die Grube Teutschenthal Sicherungs GmbH & Co. KG (GTS) durch Versatz der Grubenhohlräume mit bergbaufremden mineralischen Abfällen durchgeführt.

5.2.2 Geologische Barriere – Sicherheitskonzept

Voraussetzung für die Nutzung als Versatzbergwerk war, dass die zu versetzenden Grubenhohlräume von einem System von geologischen Barrieren umgeben sind, dass sie langfristig sicher von der Hydro- und damit von der Biosphäre abschließt und die Ausbreitung von Schadstoffen auch dauerhaft verhindert. Das im Lngzeitsicherheitsnachweis (LZSN) 2000 beschriebene Barriersystem besteht aus einzelnen lithologisch definierten Schichten unterschiedlicher Eigenschaften und unterschiedlicher Schutzwirkung (ARGE, 1998). Die einzelnen, für

Wasser und/oder Gas unwegsamen oder behindernden Schichten werden auch als Schutzschicht bezeichnet.

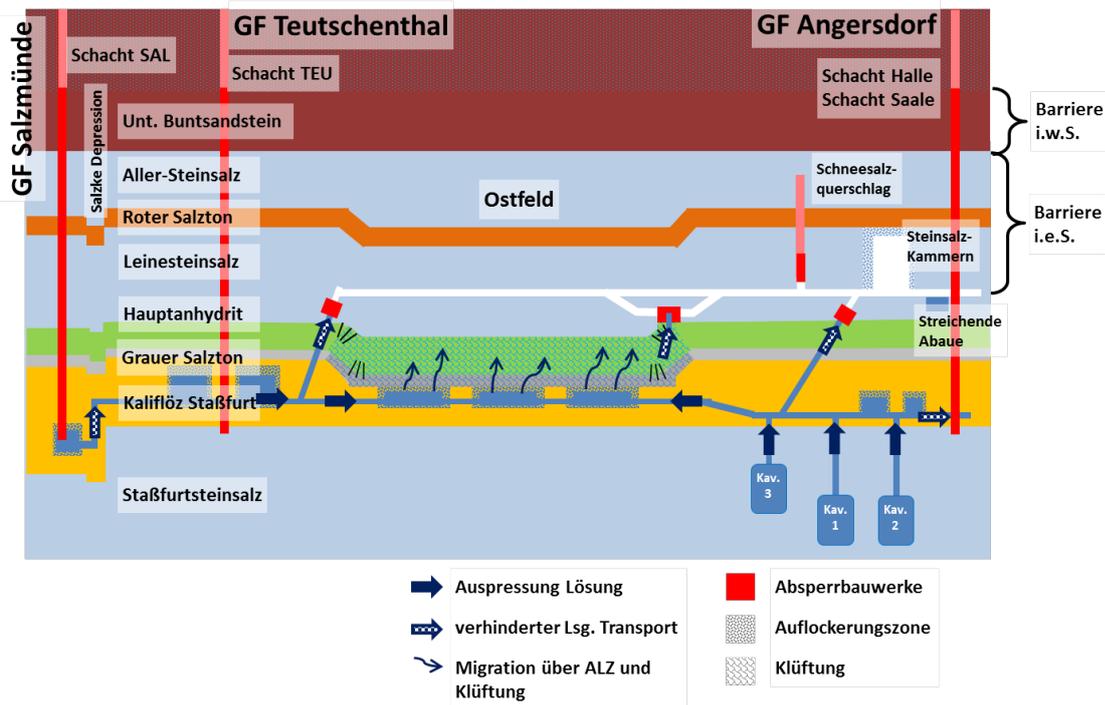


Abb. 5-6. Schematische Darstellung der geologischen Barriereeinheiten für die Grube Teutschenthal sowie der Lösungsbewegungen im Grubengebäude mit den Auswirkungen des Gebirgsschlages 1996, u.a. Ausbildung von Klüftung (bzw. Zerrungsspalten oberhalb der Bruchfeldkanten) (Quelle: IfG).

Wie in Abb. 5-6 schematisch dargestellt, wird unterschieden zwischen

- der **geologischen Barriere im engeren Sinne (i. e. S.)**, das sind das triaxial eingespannte Salz im Liegenden und Hangenden sowie seitlich der Hohlräume und die im Salz eingelagerten Schichten mit vergleichbaren Eigenschaften (Kriechverhalten, Permeabilität) und der
- **geologischen Barriere im weiteren Sinne (i. w. S.)**; das sind die Schichten zwischen dem Salz (insbesondere Anhydrit, soweit er seine Integrität erhalten hat) sowie die wasserundurchlässigen oder geringleitenden Schichten unter und über dem Salzschichtkomplex (insbesondere Tonsteine im Unteren Buntsandstein), die im o. g. Sinne als Schutzschicht wirken, indem sie Wasserzuläufe verhindern, verzögern und/oder verlagern und außerdem zum Schutz der Integrität der Barriere i. e. S. beitragen, d. h. die geogene oder technogene Subrosion behindern oder gebirgsmechanische Schädigungen des Deckgebirges bei ausreichender Mächtigkeit erschweren.

Entsprechend dieser Definition setzt sich die Hangendbarriere für die Grubenhohlräume der GTS zusammen

- der **Barriere i. e. S.**; das sind Leine-(z3Na) und Aller-Steinsalz (z4Na) sowie (bei vorhandenem Aller-Steinsalz) der zwischengelagerte Rote Salzton (z4T)
- der **Barrieren i. w. S.**; das sind die wasserundurchlässigen/geringleitenden Schichten unter, zwischen und über dem Steinsalz, also
 - Grauer Salzton (z3T)/Hauptanhydrit (z3An) über den Kalisalzabbauen, Roter Salzton
 - die Tonsteine des Bröckelschiefers (z5 – z7)
 - der „restliche“ Untere Buntsandstein (su).

Die Salzsichten der Barriere i. e. S. sind durch ein Schutzschichtsystem in ihrer geologischen Geschichte vor der Zerstörung - insbesondere durch Subrosion - bewahrt worden. Die [natürliche] Subrosion ist im Bereich der Grubenfelder während des Pleistozäns zum Stillstand gekommen. Die heute aktive Wasserzirkulation lösungsfähiger Grundwasser erreicht derzeit nicht die Salzoberflächen.

5.2.3 Regionale Situation / geologische Barriere

Das Hallesche Kalisalzgebiet mit der Grube Teutschenthal ist Teil des Subherzynen Beckens (vgl. Abb. 2-10). Es umfasst nach Löffler (1962) den Bereich der Mansfelder Mulde, den Teutschenthaler Sattel und den nördlichen Teil der Querfurter Mulde.

Als lokal begrenztes Referenzgebiet werden im Folgenden die Grubenfelder Angersdorf (GF ANG) und Teutschenthal (GF TEU) betrachtet (Abb. 5-7). Sie liegen an der Nordflanke des Teutschenthaler Sattels. Diese Struktur ist durch Salzanstau und die Kippung einer leistenförmigen Scholle des salinaren Untergrundes - der Teutschenthaler Scholle - entstanden. Die nachfolgende Darstellung der regionalen Situation und den Rahmenbedingungen zum Nachweis der Integrität der salinaren Schutzschichten basiert auf Reichenbach (2005).

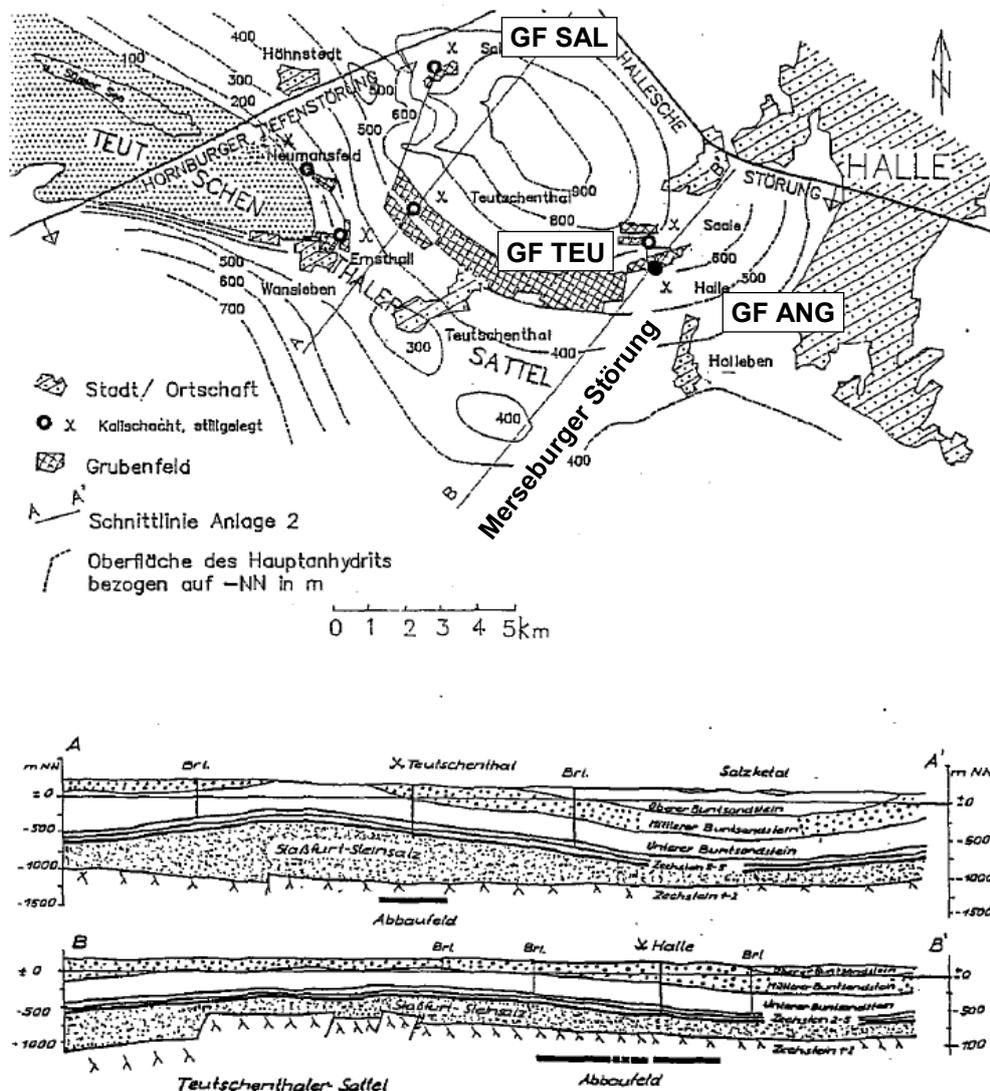


Abb. 5-7. Lage der Grube Teutschenthal mit den GF TEU, GF ANG und GF SAL (oben) und geologische Übersichtsschnitte A - A', B - B' (unten) (aus Schwandt, 1990).

Die Leistenscholle wird von NW-SE-streichenden Störungen im Abstand von ca. 10 km begrenzt, im NE von der sogenannten Hallesche Störung, im SW von der Lauchstädter Störung (Abb. 5-7). Letztere markiert etwa die Achse des Teutschenthaler Sattels. Im NW bildet die quer dazu verlaufende Hornburger Tiefenstörung die Begrenzung der Teutschenthaler Scholle, in ihrem Einflussbereich liegt das Grubenfeld Salzmünde⁴⁶.

Die nachgewiesenen strukturgeologischen Elemente können Einfluss auf die geologischen Barrieren und ihre Bewertung haben, weil sie teilweise eng mit tektonischen Prozessen (z.B. Salzke-Depression im Nordwesten im Übergang GF TEU zum GF ANG) und Subrosionsprozessen (im südlichen und südöstlichen Teil, s. unt.) verknüpft sind (vgl. Abb. 5-8).

Die Grube Teutschenthal liegt unter vollständig erhaltenem Leinsteinsalz (z3Na) und unterschiedlich erhaltenem Allersteinsalz (z4Na) sowie dem dazwischen liegenden Roten Salzton (z4T), die somit i. e. S. die geologische Barriere bilden. Zum Liegenden des Leine-Steinsalzes schließt sich eine Schichtfolge Hauptanhydrit z3AN – Grauer Salzton (z3T) – Flöz Staßfurt (z2K) – Staßfurtsteinsalz (z2NA) an.

Das in einem vertikalen Abstand von ca. 50 m und mehr über den Kalisalzabbauen (mit dem dazwischen-liegenden Schichtpaket des Grauen Salztons und des Hauptanhydrits) lagernde Leine-Steinsalz ist normalerweise 50 bis 55 m mächtig. Die Abbaue des Feldes Angersdorf liegen unter subrosiv unbeeinflusstem Leine-Steinsalz. Im südöstlichen Teil des Grubenfeldes Teutschenthal ist es durch Subrosion bis auf 38 m am Feldestrand reduziert und setzt rund 200 m nördlich der südlichen Feldegrenze über den Abbauen mit voller Mächtigkeit ein.

Das Aller-Steinsalz ist bis knapp 15 m mächtig, jedoch in einem breiten Streifen im südlichen und südöstlichen Teil der Grubenfelder Teutschenthal und Angersdorf flächenhaft durch Subrosion geschwächt. Sein Auftreten im Hangenden ist sicheres Indiz dafür, dass auch das Leine-Steinsalz in voller Mächtigkeit erhalten und der Rote Salzton unverändert geblieben ist.

Steinsalz ist im Ergebnis der geologischen Bewertung und auf Basis geotechnischer Messungen im ungestörten Gebirgsverband praktisch als impermeables Gestein anzusehen. An durch Probenahmen entspannten und zum Teil vorgeschädigten Prüfkörpern vom Leine- und Aller-Steinsalz wurden im Labor im Ausgangszustand Permeabilitäten von 10^{21} bis 10^{22} m² gemessen (Stickstoff als Fluid) (unveröff. IfG-Daten). Bei dilatanter Verformung unter geringer Einspannung nimmt die Permeabilität stark zu. Bei Fluidrücken kleiner als die normale Hauptspannung im Gebirge und nicht-dilatanter Verformung bleibt die Dichtigkeit von Steinsalz gewährleistet (vgl. Kap. 3.1.5).

⁴⁶ Das Grubenfeld Salzmünde liegt im Bereich des Salzmünder Sattels, einer relativ engbegrenzten kuppelförmigen Salzaufwölbung. Eine weitere Kuppel ist der sich im Süden anschließende Salzke-Breitsattel, der im Süden und Norden von den sogenannten Salzke-Depressionen (starke Einmuldungen der salinaren Ablagerungen) begleitet wird. Diese tektonisch-komplexe Situation war zunächst unbekannt und wurde erst mit Auffahrung der 2,5 km langen Verbindungsstrecke im Niveau der 868-m-Sohle vom GF SAL nach Teutschenthal nachgewiesen (Abb. 5-8).

Die genannten Salzkuppeln sind als Folgeerscheinungen der Einpressung von Salz in den Bereich der Hornburger Tiefenstörung entstanden (Abb. 5-7). Diese Störung bzw. die mit ihr verbundenen Sättel und Kuppeln trennen die größere westliche Mansfelder Mulde von einer östlich gelegenen kleineren Spezialmulde, der Bennstedt-Nietlebener Mulde. Infolge dieser regionalgeologischen Position liegen im Bereich der Schachtanlage Salzmünde relativ komplizierte tektonische Verhältnisse vor. Allerdings konnte im Ergebnis der geologischen Gesamtbewertung sowie der Durchführung numerischer Simulationsrechnungen zur bergbaulich/geologischen Schutzschichtsituation die generelle Barrierenintegrität nachgewiesen werden.

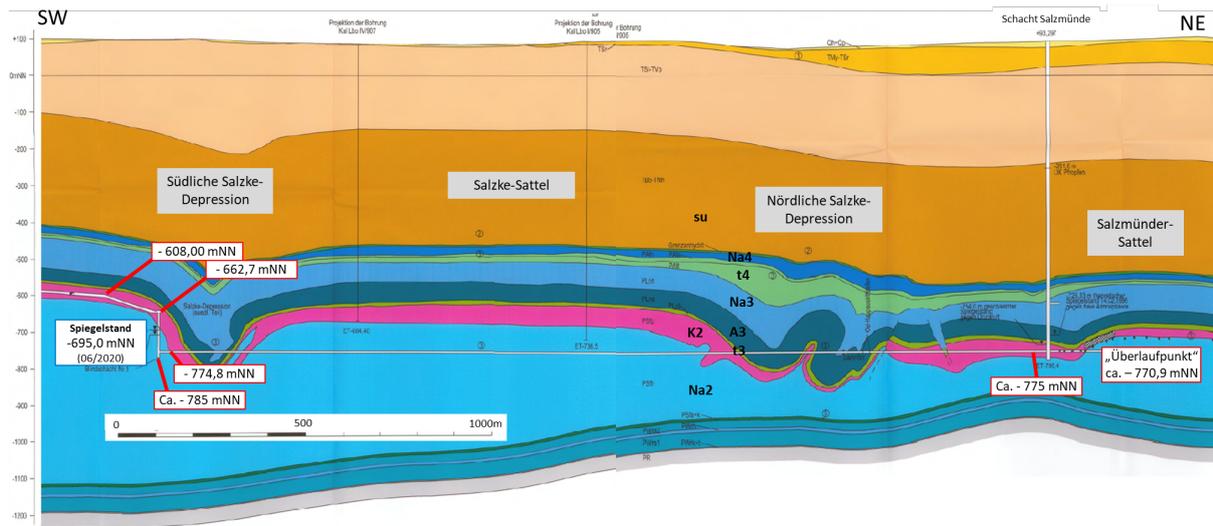


Abb. 5-8. Geologischer Vertikalschnitt durch die Verbindungsstrecke Teutschenthal – Salzmünde (verändert nach Reichenbach, 2008).

Der Rote Salzton (z4T) (rund 12 bis 15 m mächtig) überdeckt das Leine-Steinsalz als durchgehend entwickelte und im Bereich der Grubenfelder vollständig erhaltene Deckschicht aus steifplastischem Ton. An Prüfkörpern, die u.a. durch die Probenahme aufgelockert waren, wurden sehr niedrige Permeabilitäten ($< 10^{-18} \text{ m}^2$) bestimmt (vgl. Abb. 4-11). Wie dort beschrieben, sind bei Salztonen anders als bei Steinsalz, Verformungen oberhalb der Dilatanzgrenze, also mit Volumenzunahme, nicht mit einer Permeabilitätszunahme verbunden, weil durch Feinstkornabsonderungen (die sogen. Kolmation) die dichtende Wirkung erhalten bleibt. Der Salzton besitzt außerdem im Gegensatz zum Steinsalz eine hohe hydraulische Aufreißfestigkeit.

Der Schichtkomplex Grauer Salzton (z3T) / Hauptanhydrit (z3AN) (ca. 50 m mächtig) zeichnet sich durch unterschiedliches, vom Salz abweichendes Verhalten aus. Der Hauptanhydrit ist in unbeanspruchten Bereichen nicht wasserdurchlässig, in geklüfteten Zonen ist er dagegen permeabel. Seine Barrierewirkung ist abhängig vom mechanischen und hydraulischen Kluffverhalten.

Auch der Graue Salzton wirkt grundsätzlich wasserstauend (Permeabilität von 10^{17} bis 10^{23} m^2 , Kamlot, 2008); die häufig beobachteten Klüfte, die meist von Steinsalz und Carnallit verheilt sind, können lokal besonders im Zusammenhang mit tektonischen Vorgängen oder gebirgsmechanischer Beanspruchung (z.B. über Bergbauhohlräumen) die Wasserleitfähigkeit wesentlich erhöhen.

Grauer Salzton und Hauptanhydrit können nach den Befunden am Standort Grube Teutschenthal als Schutzschicht in der geologischen Barriere wirksam sein, wenn sie vom Salz unter- und überlagert werden, außerhalb von geomechanischen Beanspruchungszonen liegen und bei flacher Lagerung ihr Ausbiss unter der Subrosionsfläche mindestens 100 bis 200 m von bergbaulichen Hohlräumen bzw. Beanspruchungszonen entfernt ist.

Das trifft für das Feld Angersdorf zu (Entfernung 1400 m), aber auch für das Ostfeld Teutschenthal (mindestens 450 m).

Die Schutzschichten über dem Salinar sind die Grundwasserstauer im Buntsandstein, insbesondere der Untere Buntsandstein. Dieser ist über den Grubenfeldern vollständig erhalten. Nach der Hydrogeologie, der tektonischen Analyse und den Kenntnissen von der Subrosion sind im Bereich der Grubenfelder keine wasserwegsameren Zonen bekannt. Der Untere Bunt-

sandstein erfüllt somit die geforderten Kriterien für eine Barriere i.w.S.: er verhindert Wasserzuläufe und trägt somit zum Schutz der Integrität der Barriere i.e.S. bei, weil er die geogene oder technogene Subrosion behindert.

Die Liegendbarriere in den Grubenfeldern der GTS setzt sich zusammen aus dem im Feld Angersdorf von E nach W von 200 m auf 350 m zunehmend mächtiger werdenden Staßfurt-Steinsalz (in Teutschenthal über 350 m) und dem geringmächtigen Werra-Steinsalz (rd. 10 m). Dazwischen liegen gering durchlässige Anhydrite und Karbonate. Trotz der intensiven tektonischen Beanspruchung bei den Schollenbewegungen im sub-halitischen Untergrund und der Fließbewegungen im Salz sind im Staßfurt-Salz keine Verfaltungen, Einfaltungen anderer Gesteinskomplexe oder Fehlstellen bekannt geworden bzw. sind aufgrund des visko-plastischen Materialverhaltens (unter den hier vorherrschenden Rahmenbedingungen) auch nicht zu erwarten.

Entsprechend der Forderung der TA Abfall (bzw. der DepV, vgl. Kap. 3.1.3.2) muss das Salz allseitig die Hohlräume umschließen und die Barriere muss auch seitlich wirksam sein. Für die Gruben der GTS sind ausreichende Sicherheitspfeiler zum Ausgehenden der potenziell wasserwegsam Schichten in der Hangend- und Liegendbarriere und im W zu den lösungserfüllten Hohlräumen der benachbarten Grube Emsthall am Ostrand des Salzstockes Wansleben (am Rand des Salzigen Sees) sowie im S zu den Kavernen des Solfeldes Bad Lauchstädt vorhanden.

Für das Feld Angersdorf gilt:

- Der Ausstrichbereich des Hauptanhydrits (Gebiet ohne Leine-Steinsalz-Überdeckung im Subrosionsgebiet des Leine-Steinsalzes im S der verbundenen Grubenfelder Angersdorf und Teutschenthal) liegt mindestens 1400 m bzw. 450 m vom Grubenfeldrand entfernt (SE des Ostfeldes Teutschenthal). Der Hauptanhydrit wird in diesem über 450 m breiten Gebiet durch das überlagernde Steinsalz geschützt.

Bergbaubedingte Dehnungen sind im Anhydrit nur innerhalb eines rund 70 m breiten Streifens zu erwarten (bei einem Grenzwinkel von rd. 50° und einem Abstand der Anhydritoberfläche zu den Bergbauhohlräumen von 60 bis 70 m), so dass die Schutzwirkung des Anhydrits in einem über 350 m breiten Sicherheitspfeiler voll erhalten ist. Auch nach der Modellierung des Gebirgsschlages reichen die Beanspruchungen nur bis 100 m südlich des Abbaufeldes.

- Zu den gas- und lösungsgefüllten Kavernen Angersdorf 1/975 und 2/975 sowie des Feldes Bad Lauchstädt im Staßfurt-Steinsalz besteht ein Abstand des Feldes Angersdorf von über 1000 m, vom Feld Teutschenthal von über 500 m. Die Kavernen sind vollständig von Steinsalz umschlossen, das diese sicher abdichtet.
- Zwischen dem Grubenfeld Angersdorf und dem Ostfeld von Teutschenthal ist ein Abbaufreibereich von 150 m erhalten.

In den Schutzschichten treten Abweichungen/Veränderungen im normalen Aufbau und Zustand auf, die u.U. als Schwachstellen die Integrität der Barrieren gefährden können:

- Am Scheitel des Teutschenthaler Sattels sind südlich des Grubenfeldes Teutschenthal intensive Lagerungsstörungen im Salinar festgestellt worden, wobei Verwerfungen anscheinend überwiegen (keine Faltungen/Überschiebungen, wie sonst in derartigen Strukturen). Die Oberfläche des Zechsteins ist auf einen über 800 m breiten Streifen südlich der obersten Sohlen von Teutschenthal frei von erkennbaren Störungen. Südlich vom Grubenfeld Angersdorf sind am Sattelscheitel keine Störungen bekannt.
- Durch Subrosion wurden im südlichen und besonders im südöstlichen Grubenfeldrand Teutschenthal Salzschutzschichten reduziert. Im SE des Ostfeldes Teutschenthal sind am Baufeldrand nur noch 38 m Steinsalz über dem Hauptanhydrit mit Sicherheit erhalten. Die Barrieren, d.h. die überlagernden Schutzschichten (insbesondere Roter Salzton und Bröckelschiefer), sind gering beeinflusst und haben ihre Schutzwirkung

nicht verloren. Der Anhydrit im südöstlich sich anschließenden Ausstrichbereich ist nicht verkarstet und tektonisch nicht gestört, auch der mindestens 450 m breite Sicherheitspfeiler ist ungestört. Die Barriere-Integrität ist gebirgsmechanisch durch umfangreiche Modellrechnungen belegt.

- Die NNW-SSE-streichende Merseburger Störung tangiert mutmaßlich den Ostrand des Feldes Angersdorf. Sie weist im Buntsandstein und an der Zechsteinoberfläche Versetzungsbeträge bis 30 m auf. Allerdings gibt es keine gesicherten Hinweise auf eine Beeinflussung der lateralen Barrierenintegrität der Grube.

Zusammenfassung

Entsprechend den Anforderungen zur Genehmigung der Nutzung der Grube Teutschenthal als UTV wurde eine umfassende Analyse und Bewertung der vorliegenden geologischen Situation (u.a. Zustand der geologischen Barriere vor dem Hintergrund natürlicher und bergbaulicher Einwirkungen) sowie der langzeitigen gebirgsmechanischen Entwicklung durchgeführt.

Im Detail ergeben sich danach folgende Feststellungen:

➤ **Die geologischen Barrieren in den GF TEU, SAL und ANG erfüllen alle erforderlichen Bedingungen für die Gewährleistung der Langzeitsicherheit.**

- Es waren für den Betrachtungszeitraum (ca. 30.000 Jahre) keine geogenen Prozesse identifizierbar, die zu einem Verlust der langzeitigen geologischen und geotechnischen Barrierenintegrität führen können
- Die vorliegenden technogenen (d.h. bergbaulich bedingten) Schwachstellen in der geologischen Barriere (z.B. Schächte, Strecken in der Schutzschicht) sind hinreichend identifiziert, wobei es sich in der Realität um Mächtigkeitsreduzierungen handelt, die entsprechend des entwickelten Sicherheitskonzeptes mit technischen Maßnahmen (Versatz, Abdichtung) saniert werden können.

Im Ergebnis der Erarbeitung des Langzeitsicherheitsnachweises für das gesamte untertägige Grubengebäude der GTS GmbH & Co. KG wurde 2000 der Langzeitsicherheitsnachweis zunächst für das GF TEU durch das Bergamt Halle (heute LAGB) bestätigt, der in 2005 mit der 1. Fortschreibung (FS) und 2016 mit der 2. FS auf das komplette Grubenfeld der GTS (die drei miteinander verbundenen GF TEU, GF ANG und GF SAL) erweitert.

Nach Abschluss der Versatarbeiten und Durchführung der untertägigen Sicherungsarbeiten (u.a. Bau von Abdichtungen und Strömungsbarrieren) ist die Grube nach dem Verschluss der 4 Tagesschächte (voraussichtlich bis 2031) langzeitsicher verschlossen (Popp et al., 2018).

5.2.4 Robustheit der Salinarbarriere bei dynamischer Belastung - GS 1996

5.2.4.1 Einführung

In der Grube Teutschenthal ereignete sich am 11.09.1996 um 05:36 MESZ der dritte Gebirgsschlag (GS 1996), bei dem das gesamte Ostfeld mit einer Fläche von ca. 2,5 km² in einer Tiefe von 620 - 770 m zusammenbrach (Minkley, 2004).

In Folge des Gebirgsschlags mit einer Lokalmagnitude um 5 hat die geologische Hangendbarriere aus Rotem Salzton und Leine-Steinsalz über dem zusammengebrochenem Ostfeld insgesamt eine Absenkung von 1,3 m erfahren, wovon 0,5 m in wenigen Sekunden während des Gebirgsschlages eingetreten sind (Abb. 5-9).

Trotz dieser erheblichen dynamischen Beanspruchung kam es nicht zu einem Lösungszutritt in die Grube, was sich letztlich nur über die Wirkung einer lithologischen Multi-Barriere bestehend aus Steinsalz und Rotem Salzton als horizontale Schichtelemente in der geologischen Barriere erklären ließ (Minkley, 2004).

Nach Auffahrung der Wetterstrecke über dem Gebirgsschlagsfeld von 1996 in der Grube Teutschenthal, die seit Mitte 2005 durchschlägig war, war gleichzeitig eine standortspezifische Verifizierung der Annahmen der mutmaßlichen Schädigungsauswirkungen in der hangenden Salinarbarriere über dem Bruchfeld möglich. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Minkley et al. (2010) zusammengefasst und werden im Folgenden auszugsweise zusammengefasst.

5.2.4.2 Numerische Analyse des Gebirgsschlagereignisses

Der dynamische Bruchvorgang konnte mit dem Entfestigungsansatz des im Rahmen des Forschungsprojektes FZK 02C0264 entwickelten visko-elasto-plastischen Modells in seinen wesentlichen Erscheinungsformen, wie Auslösemechanismus durch lokales Pfeilerversagen, Herddauer von wenigen Sekunden und kettenreaktionsartige Ausdehnung des Bruchvorganges auf das gesamte Ostfeld vorausberechnet werden (Minkley & Menzel, 1999).

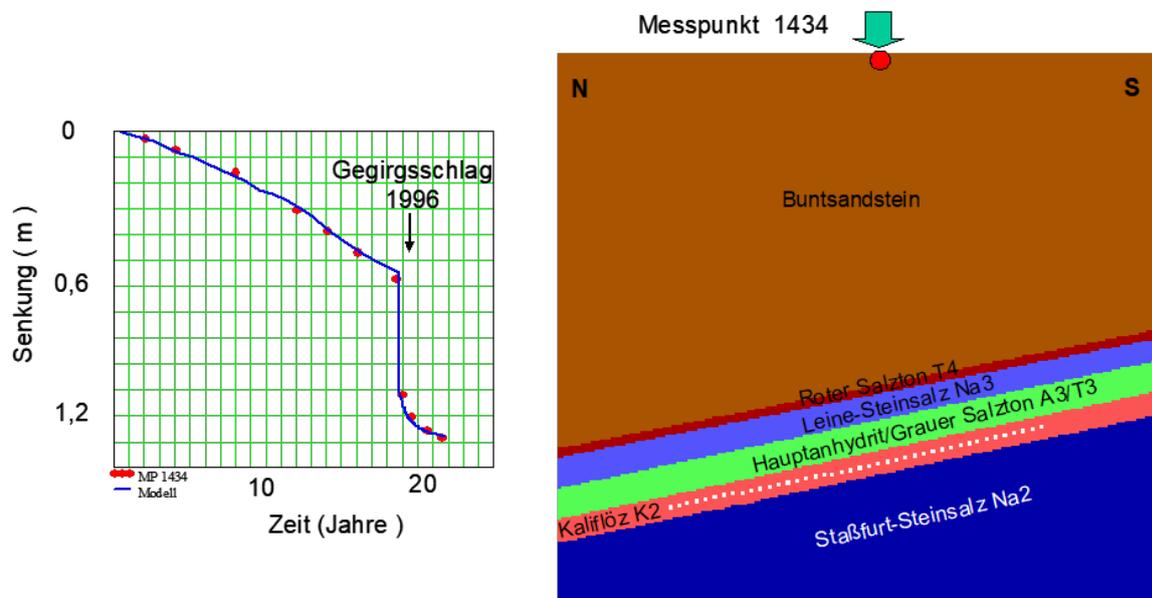


Abb. 5-9. Gebirgsmechanisches Berechnungsmodell Ostfeld Teutschenthal: gemessene und berechnete Senkungen (aus Minkley et al., 2010).

Der multiple Bruchvorgang (Implosionsphase) dauerte ca. 1,5 s und nach 2,1 bis 2,5 s setzte die Kompressionsphase mit dem Rückschwingen des Deckgebirges bei der Wiederauflage auf das zerbrochene Pfeilersystem ein (Abb. 5-10). Aus den untertägigen Erkundungen geht hervor, dass das Ostfeld mit seinen etwa 700 Langpfeilern großflächig zusammengebrochen ist und der Bruchprozess erst an den Baufeldrändern sowie am Barrierepfeiler zum Westfeld zum Stehen kam.

Durch den Implosionsvorgang beim Zusammenbruch des im Carnallit des Flözes Staßfurt aufgefahrenen Kammer-Pfeiler-Abbausystems ist in der hangenden Salinarbarriere über dem kollabierenden Ostfeld plötzlich eine Entspannung eingetreten. In der Nachrechnung des Ereignisses (zur Schadensanalyse bzw. zur Bewertung der Barrieren-Integrität) ergibt sich aus den mit dem visko-elasto-plastischen Modell durchgeführten Berechnungen für die minimale Hauptspannung an der Oberkante des 50 m mächtigen Leine-Steinsalzes Na3 ein Spannungsabfall um mehr als 10 MPa über der Bruchfeldkante (Abb. 5-10). Über dem Bruchfeld fällt die Entspannung geringer aus.

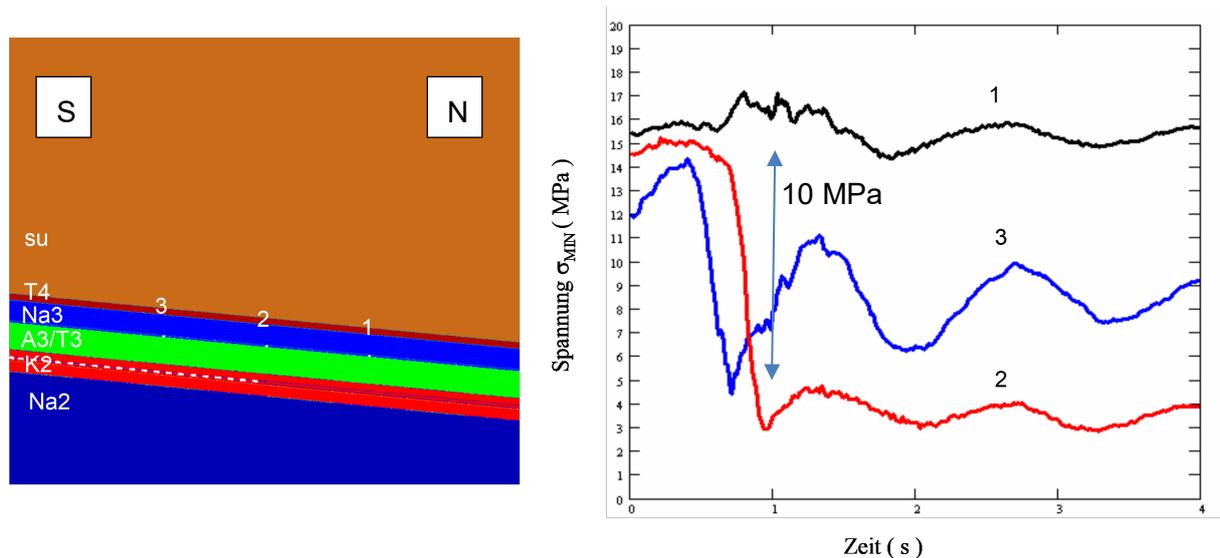


Abb. 5-10. Minimale Hauptspannung an der Oberkante Leine-Steinsalz Sekunden nach dem Gebirgsschlag (aus Minkley et al., 2010).

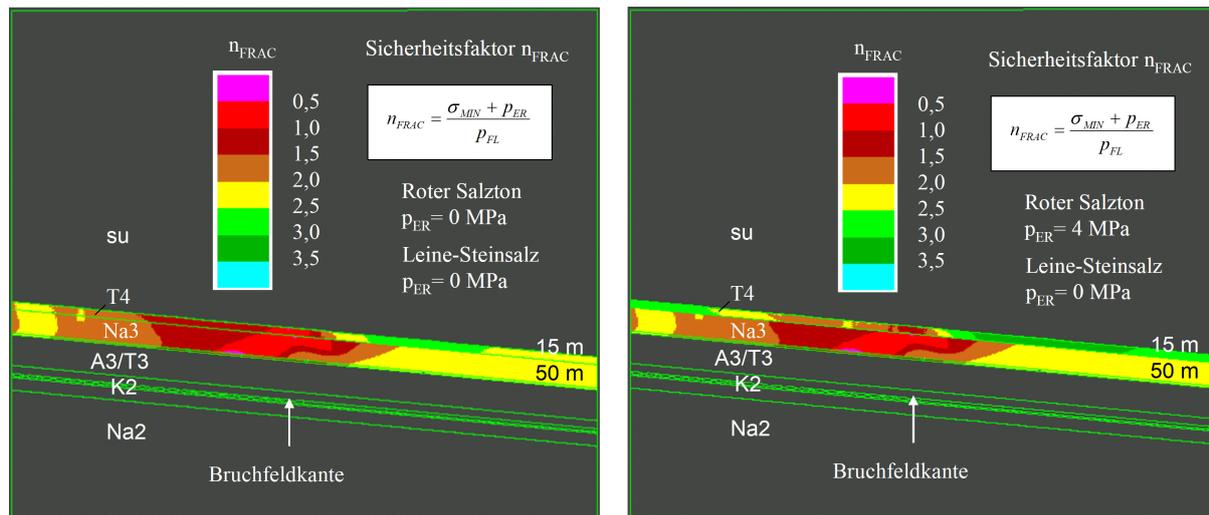


Abb. 5-11. Sicherheitsfaktor Frac- Kriterium 4 Sekunden nach Gebirgsschlag mit (rechts) und ohne (links) hydraulische Zugfestigkeit im Roten Salzton (aus Minkley et al., 2010).

Wendet man das allgemein akzeptierte Frac- bzw. Minimalspannungskriterium auf die hangende Salinarbarriere an, welches der minimalen Hauptspannung den in der Tiefe wirkenden Fluiddruck gegenüberstellt (vgl. Kap. 3.1.5), so zeigt sich ohne Ansatz einer hydraulischen Zugfestigkeit **eine durchgehende Verletzung** des Integritätskriteriums innerhalb der 65 m mächtigen Barriere bestehend aus Steinsalz und Rotem Salzton über der Bruchfeldkante (Abb. 5-11, links).

Allerdings ist der Rote Salzton, wie in Kap. 4.4.2 gezeigt, gegenüber einer hydraulischen Einwirkung sehr robust, d.h. auch bei hydraulischen Überdrücken von mehreren MPa (bis zu 8 MPa) über der wirkenden Einspannung bleibt die Dichtwirkung erhalten (keine signifikante Zunahme der Permeabilität, vgl. Abb. 4-12).

Wird dieses besondere Verhalten mit Ansatz einer Aufreißfestigkeit des Roten Salzton von 4 MPa berücksichtigt, ist das Frac-Kriterium im Roten Salzton nicht mehr verletzt **und die 15 m**

mächtige Salztionschicht dichtet das unterlagernde Steinsalz zumindest temporär ab (Abb. 5-11, rechts).

Zur Bestätigung, dass die Dichtheit der Salzbarriere insgesamt nicht beeinflusst ist, sind gegenständliche Nachweise zur Spannungssituation bzw. der Dichtheit im Bereich des Leine-Steinsalzes erforderlich.

5.2.4.3 Integritätsnachweis der Hangend-Barriere oberhalb des Bruchfeldes 1996

Da mit dem Gebirgsschlagereignis von 1996 die Verbindung zwischen dem Grubenfeld Angersdorf mit dem Schacht Angersdorf und dem Grubenfeld Teutschenthal unterbrochen wurde, wurde die Neue Wetterstrecke Petra im Zeitraum zwischen 01/2004 und 06/2005 mit einer Streckenlänge von 3.670 m aufgefahren. Sie bildet die notwendige Wetter- und Fluchstrecke zwischen den GF TEU und dem GF ANG.

Die Wetterstrecke hat die Schichtfolge Leine-Steinsalz - Hauptanhydrit - Grauer Salzton - Flöz Staßfurt aufgeschlossen. Vorwiegend verläuft sie im unteren Abschnitt des Leine-Steinsalzes, dessen obere 15 m nicht durchfahren wurden, quert aber auch in der Wendel am Schacht Halle und westlich des Steinsalzabbaufeldes die Schichtfolge zwischen Anhydritmittel und der ehemaligen Bauscheibe im Kaliflöz Staßfurt. Die Mächtigkeit des Leinsteinsalzes beträgt in den in der Grube Teutschenthal vorhandenen Aufschlüssen zwischen rund 52 und 56 m (bzw. zwischen 47 und 63 m nach dem Befund der Radarmessungen).

Während der Arbeiten in der Wetterstrecke Petra wurden beim Auffahren der Umfahungsstrecke (Wetterschleuse) die oberen 0,5 m des Hauptanhydrits im südlichen Stoß bei Streckenpunkt +423 m am 10.08.2004 aufgeschlossen. Aus einer flachen osteinfallenden Klufffläche tritt hier seitdem hoch-konzentrierte $MgCl_2$ -Lösung aus⁴⁷.

Das durchgeführte, aufwändige untertägige Untersuchungsprogramm hatte zwei Schwerpunkte:

- (1) Durch Spannungssondierungen entlang des Profils der Wetterstrecke wurde der Spannungszustand in der geologischen Barriere Leine-Steinsalz nach der Gebirgsverrückung erkundet und gebirgsmechanischen Prognoserechnungen gegenübergestellt. Dabei war durch die experimentellen In-situ-Untersuchungen herauszufinden, ob die minimale Hauptspannung in jedem Punkt der hangenden Steinsalzbarriere größer ist, als ein angenommener Fluidruck in der entsprechenden Teufe, um das Minimalspannungs- bzw. Frac-Kriterium zu erfüllen und die Dichtheit der geologischen Barriere der UTV im Langzeitprozess zu gewährleisten.
- (2) Gleichermaßen wurden entlang des Profils der durchörterten Barriere über dem Bruchfeld Permeabilitätsmessungen im Leine-Steinsalz und zu Vergleichszwecken an Bohrkernen im Labor durchgeführt, mit denen experimentell das Dichtheitsverhalten des Barrieregesteins nach der extremen mechanischen Beanspruchung in situ gegenständig überprüft worden ist (Einhaltung mechanisches Schädigungs- bzw. Dilatanzkriterium).

⁴⁷ Ursächlich für den Lösungszutritt aus einem begrenzten Reservoir (GFE, 2005), ist die Beanspruchung beim Gebirgsschlag unmittelbar über der Bruchfeldkante. Bei und nach dem Zubruchgehen wurde dieser Bereich besonders stark zerrüttet und gedehnt. Dafür spricht, dass der Hauptantritt bei allen bergbaulich notwendigen Durchörterungen jeweils trocken war.

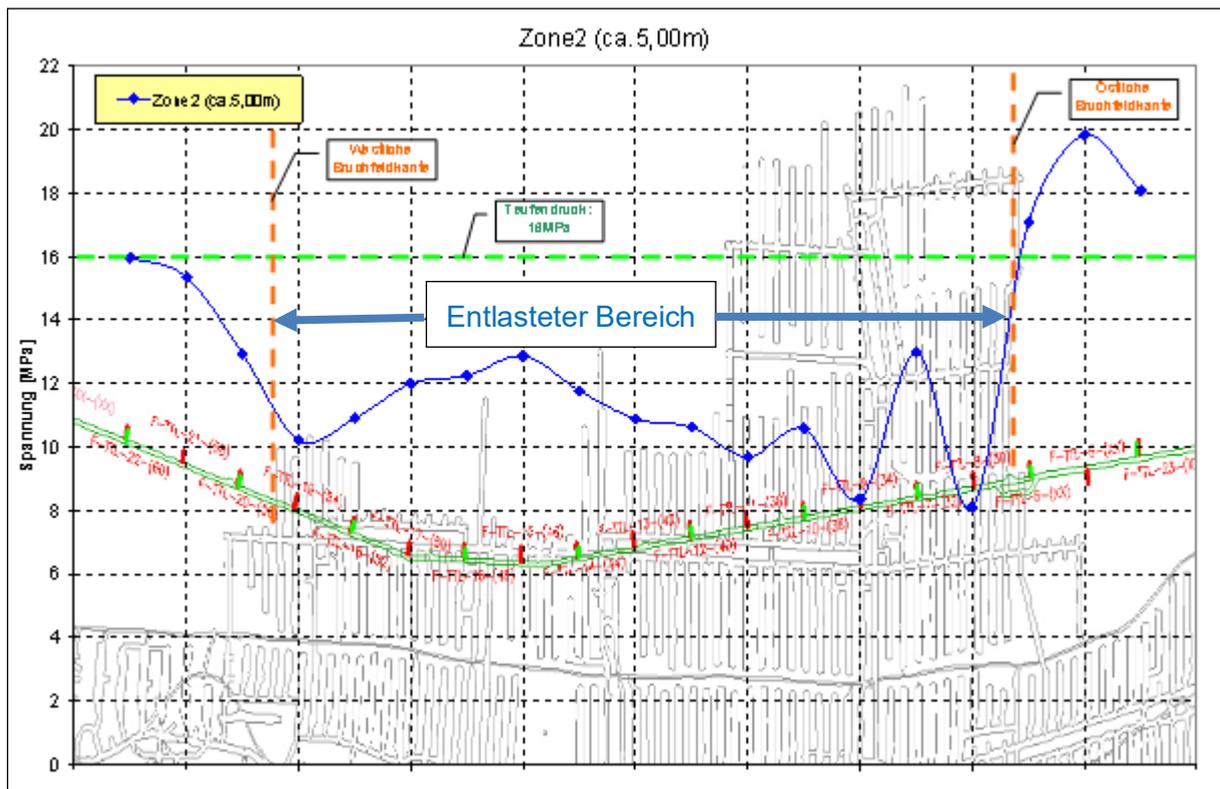


Abb. 5-12. Verlauf der minimalen Einspannung für den untersuchten W-E-Profilsschnitt entlang der „Neuen Wetterstrecke Petra“ über dem Bruchfeld (Messungen bei 5,0 m Fracteufe im Bohrloch) (aus Minkley et al., 2010).

Zu (1): Untersuchungen zum wirkenden Spannungszustand in der Leine-Steinsalzbarriere

Hierfür wurden in 19 Bohrungen des 1800 m langen Profils in der Wetterstrecke mittels des „hydraulic-fracturing“ Verfahrens punktuelle Spannungssondierungen (je 5 Messpunkte pro Bohrung: 2 m, 5 m, ca. 8,35 m, 11,35 m und 14,5 m) in bis zu 15 m tiefen Horizontalbohrungen durchgeführt.

In den Ergebnissen zeigte sich, dass die gemessenen Minimalspannungen mit größer werdendem Konturabstand zunahm, was den Einfluss der Strecke mit der entlasteten Saumzone widerspiegelt, bis in etwa 4 bis 8 m ein bohrlochspezifisches Maximum bzw. Plateau erreicht wurde. Allerdings wurde in Bohrungen, die über dem ehemaligen Ostfeld liegen, der mit einem mittleren Wert von ca. 16 MPa abgeschätzte lithostatische Teufendruck nicht erreicht, was die noch vorhandene Entlastung durch den Gebirgsschlag 1996 anzeigt.

Für die detaillierte Bewertung der lateralen Spannungsvariation ist in Abb. 5-12 der Verlauf der minimalen Einspannung über das komplette W-E Profil in einer Bohrlochtiefe von 5,00 m exemplarisch dargestellt. Im Ergebnis zeigt sich eine starke Streuung der verschiedenen Bohrungen, die aber offenbar mit dem darunter befindlichen Grubengebäude korreliert ist.

Eine – im Zentralbereich oberhalb des Bruchfeldes – ausgeprägte Zone mit Einspannungen deutlich unterhalb des Teufendruckes, d.h. bis zu $\sigma_{\min} \geq 8$ MPa ist offensichtlich. Sie resultiert hauptsächlich aus der durch den Gebirgsschlag hervorgerufenen Entspannung über dem Bruchfeld.

Insgesamt zeigen die ca. 12 Jahre nach dem Gebirgsschlag durchgeführten Spannungssondierungen, dass sich der mit dem Gebirgsschlag drastisch abgesenkte Spannungszustand weitgehend wieder hergestellt hat.

Die beim Kollaps des Ostfeldes eingetretene Entspannung mit großen Deviatoren im Bereich über den Abbaurändern (wie sie in den Modellrechnungen ausgewiesen wurden) ist infolge der viskosen Eigenschaften der hangenden Steinsalzbarriere (in Übereinstimmung mit Kriechrechnungen nach dem Gebirgsschlag) wieder reduziert worden. Dies dokumentiert in Analogie zu den Gasfrac-Ereignissen in der Grube Merkers (vgl. Kap. 3.2.4.3), bei denen sich ebenfalls zeitlich die Integrität der Barriere (Anstieg der Minimalspannung) wiederherstellte, die Fähigkeit einer Salz-Barriere zur Selbstheilung.

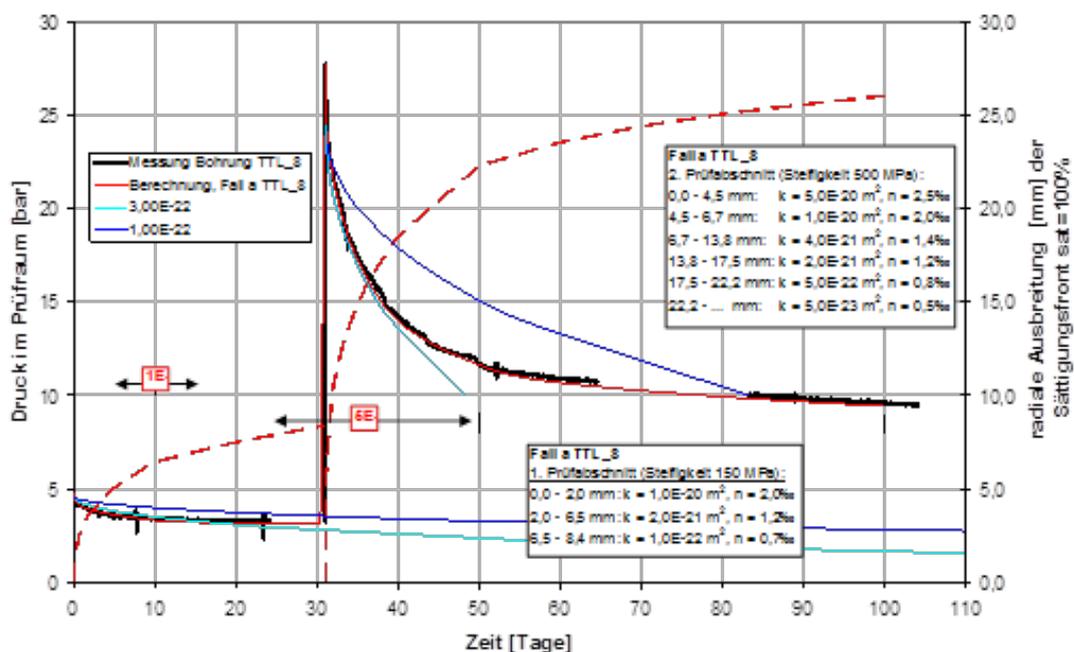


Abb. 5-13. Permeabilitätstests in Bohrlöchern im Carnallitit (aus Minkley et al, 2010):

Auswertung der gemessenen Druckabfallkurven Bohrung F-TTL-8 (2 Drucktests innerhalb der ersten 100 Tage) mittels analytischer Lösungsansätze (Berechnung von Modellkurven unter Annahme zweier Gebirgspermeabilitäten von 10^{-22} m^2 bzw. $3 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$) sowie des numerischen FLAC-Modells mit Zeitintervall-abhängiger Anpassung von Permeabilität und Porosität. Hinweis: mittels des FLAC-Modells wird sowohl der Druckverlauf als auch die radiale Ausbreitung des Messfluids in die Bohrlochkontur zeitabhängig berechnet.

Zu (2): Untersuchungen zur hydraulischen Dichtheit des Leine-Steinsalzes

In den 19 Bohrungen des 1800 m langen Profils in der Wetterstrecke über dem Bruchfeld wurden im Bohrlochtiefsten auch Permeabilitätsmessungen in Form von Druckstoßtests durchgeführt. Weiterhin wurden noch Langzeitmessungen der integralen Permeabilität in zwei zusätzlichen Bohrlöchern durchgeführt.

Exemplarisch sind in Abb. 5-13 Druckabfallkurven in einer sogenannten langen Bohrung (ca. 12 m lang) dargestellt. Die Bohrung ist einfallend gebohrt und anschließend mit NaCl-Lösung befüllt worden, wobei der Packer 6 m hinter der Streckenkontur in der nicht durch die ALZ beeinflussten Zone liegt. Mit Drucktests in der Bohrung wird integral die Permeabilität des Salzgebirges bestimmt, wobei die Versuchszeit wegen der vorliegenden hohen Dichtigkeit des Steinsalzes bis zu mehr als 100 Tagen beträgt. Die Auswertung der Druckabfallkurven erfolgt sowohl analytisch als auch numerisch, wobei die Aufsättigung des Porenraums mit Lösung beschrieben wird (für Details, s. Minkley et al., 2010).

Als Ergebnis weisen die Permeabilitätsmessungen im hangenden Leine-Steinsalz über dem Bruchfeld, offenbar unabhängig von den vorliegenden dynamischen Einwirkungen, mit einer Permeabilität kleiner 10^{-22} m² die hydraulische Dichttheit im Leine-Steinsalz nach.

Offenbar sind die durch den Gebirgsschlag im Leine-Steinsalz über den Bruchfeldkanten hervorgerufenen mögliche Schädigungen sehr gering, worauf u.a. gebirgsmechanische Berechnungen mit Dilatanz-Werten maximal im Promillebereich hinweisen. Ursächlich für die Wiederherstellung von möglichen lokalen Schädigungen im Steinsalz ist der Wiederanstieg der minimalen Einspannung aufgrund dessen Kriechfähigkeit, womit nach kurzer Zeit wieder Spannungszustände mit reduzierten Deviatoren erreicht wurden, die unterhalb der Dilatanzgrenze liegen und das Potential für Verheilungsprozesse besitzen.

5.3 Messinische Salzkrise

5.3.1 Problemstellung

Die **Messinische Salinitätskrise** (englisch: *Messinian salinity crisis*, abgekürzt **MSC**) ist ein Abschnitt der Erdgeschichte, in dem das Mittelmeer teilweise oder vollständig ausgetrocknet war, bis wieder ein Meereswassereinbruch über die Straße von Gibraltar erfolgte⁴⁸. Sie wurde durch Änderungen der geodynamischen und klimatischen Faktoren (infolge plattentektonischer Prozesse) verursacht, die zur Bildung massiger Salzablagerungen hinter einer marinen Schwelle geführt hat (Capeila et al., 2020).

Allerdings werden die grundsätzlichen Entstehungsbedingungen seit Mitte der 70er-Jahre, in denen diese räumlich ausgedehnten Salzablagerungen im Ergebnis von seismischen Untersuchungen und Tiefbohrungen im Rahmen des Deep-Sea-Drilling-Projekts (DSDP) nachgewiesen wurden, teilweise kontrovers diskutiert (u.a. Roveri et al., 2014).

Abb. 5-14 gibt einen Überblick über das westliche Mittelmeer, das in der hier herangezogenen Studie von Dale et al. (2021) als Untersuchungsgebiet betrachtet wurde. Es zeigt anhand des

⁴⁸ Nach Gerber (2018) war der Tethys-Ozean Vorläufer des Mittelmeeres. Er war das flächengrößte Gewässer der Erde, als der Urkontinent Pangäa im Perm zu zerbrechen begann. Aus ihm entstanden der Südkontinent Gondwana und der Nordkontinent Laurasia.

Die Afrikanische Platte, ein Teil des Südkontinents Gondwana, driftete im Zeitabschnitt Trias / Jura vom nördlichen Teilkontinent Laurasia nach Süden. Daraus ergab sich an dieser Stelle die Tethys-Öffnung reißverschlussartig nach Westen. Mit der späteren Norddrift der Afrikanischen Platte, ein Bruchstück des ehemaligen Südkontinents Gondwana, in der Kreidezeit, kollidierte diese schließlich im Tertiär mit dem Südrand Europas. Als Folge kam es zur Teilung des westlichen Tethys-Ozeans in einen Nordteil, die Paratethys, und einen Südteil, den Vorläufer des heutigen Mittelmeeres.

Das stark salzhaltige interkontinentale Mittelmeer, der Südteil des ehemaligen Tethys-Ozeans, durchlebte nach der Teilung einen Zyklus des Wechsels von Austrocknung und Wiederauffüllung von Meerwasser und damit verbundenen Salinitätsvariationen. Bedingt durch tektonische Veränderungen, wie Hebungen von Meeresschwellen und Dammeinbrüchen bei Gibraltar, aber auch durch einen Klimawandel, gab es im Mittelmeer unterschiedliche Meeresspiegelstände.

Im Messinium (oberstes Miozän) erfuhr das Mittelmeer eine Austrocknung. Zu dieser Zeit war es noch nicht über die Straße von Gibraltar mit dem Atlantik verbunden, sondern über Meeresarme, die über Südspanien und durch das Atlasgebirge führten. Die Schließung dieser Verbindungen erfolgte durch die Kollision Afrikas mit Europa. Durch das Zusammenspiel von plattentektonischer ozeanischer Isolation, aridem Klima und starker Verdunstung sank der Meeresspiegel damals mehrmals ab. Es bildete sich eine Salzwüste, die heute durch mächtige, mehrfach wiederholte zyklische Ausscheidung von Gips- und Salzlagern am Meeresboden nachweisbar ist.

Jahrtausende später drang Meerwasser vom Atlantik über die Straße von Gibraltar in das trockene Becken ein und füllte das Mittelmeer vor ca. 5–6 Millionen Jahren auf.

Farbspektrums die mögliche Mächtigkeit der vorkommenden Evaporit-Gesteine, die im zentralen Liguro-Provenzal-Becken bis zu mehreren Tausend Meter betragen kann. Gleichzeitig sind für diesen Bereich auch Salzdiapir-Bildungen nachgewiesen.

Letztlich ist damit eine der weltweit größten Salzlagerstätten entstanden (der sogen. „Mediterranean Salt Giant“), der im Mittelpunkt internationaler Forschungsaktivitäten steht (z.B. <https://www.saltgiant-etn.com/>).

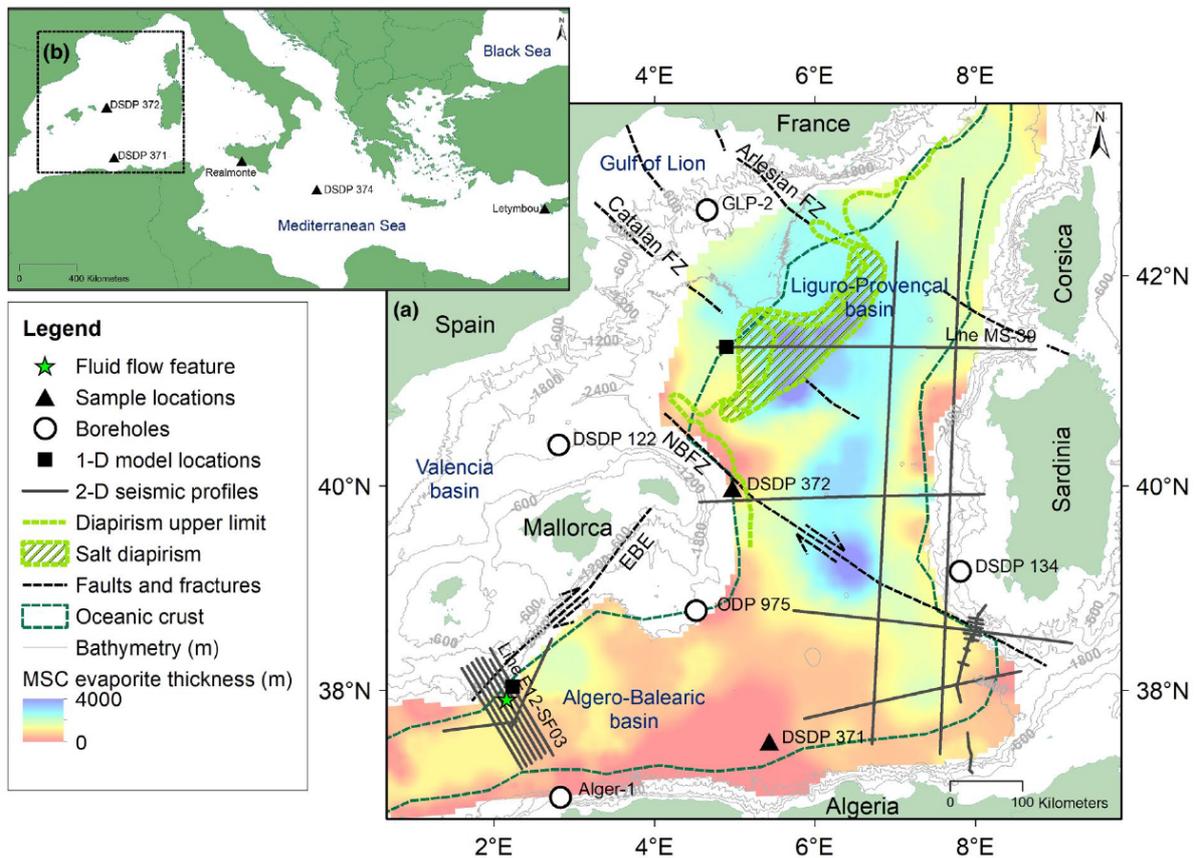


Abb. 5-14. Tektonische und geografische Lage des Untersuchungsgebietes (aus Dale et al., 2021).

(a) Karte des westlichen Mittelmeers (das schwarze Kästchen in b), zeigt die Lage seismischer Profile einschließlich der in dieser Studie verwendeten (dunkelgraue Linien), modifizierten und geglätteten Verteilung der Evaporitmächtigkeit, Emile Baudot Schichtstufe (EBE) und Nordbalearische Bruchzone (NBFZ); gestrichelte schwarze Linien), Arlesianische Bruch-Zone (ArFZ) und Catalanische Bruch-Zone (CFZ), Grenze der ozeanischen Kruste: gestrichelte dunkelgrüne Linien) und bathymetrische Konturen: hellgraue Linien). Die Ausdehnung der ozeanischen Kruste und NBFZ wurden in dieser Studie verwendet, um die Beckengrenzen zu trennen. Schwarze Quadrate zeigen die Position von 1-D-Überdruckmodellen an. Der grüne Stern zeigt den Ort einer möglichen Evaporitdiagenese und eine Flüssigkeitsströmungslokalität. Der grün schraffierte Bereich zeigt eine Salzdiapirprovinz und eine Durchdringung am Meeresboden an, die aus seismischen Profilen und bathymetrischen Daten der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA; <https://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/bathymetry/>) entnommen wurden, und die Diapirismus-Obergrenze (gestrichelte grüne Linie). (b) Lage der Messinischen Evaporitproben, die in dieser Studie bewertet wurden.

Er ist aus wissenschaftlicher Sicht auch deshalb interessant, weil sich unterschiedliche Phasen der Salzlagerstättenentwicklung großräumig in einer relativ „jungen“ Umgebung untersuchen lassen. Dies umfasst dichte-induzierte, halokinetische Ausgleichsbewegungen, wie sie bereits in Kap. 2.1.1.2 qualitativ beschrieben wurden, sowie die Bildung intrastruktureller Porendrü-

cke, die über kanalisierte Fluidauspressung bis zu einem Lösungsaustritt ins Deckgebirge geführt haben. Die Tatsache, dass in Salzformationen diese vertikalen Lösungsbewegungen ablaufen können, wird von verschiedenen Autoren herangezogen, die grundsätzliche Dichtheit von Salzformationen in Frage zu stellen (z.B. Warren, 2017).

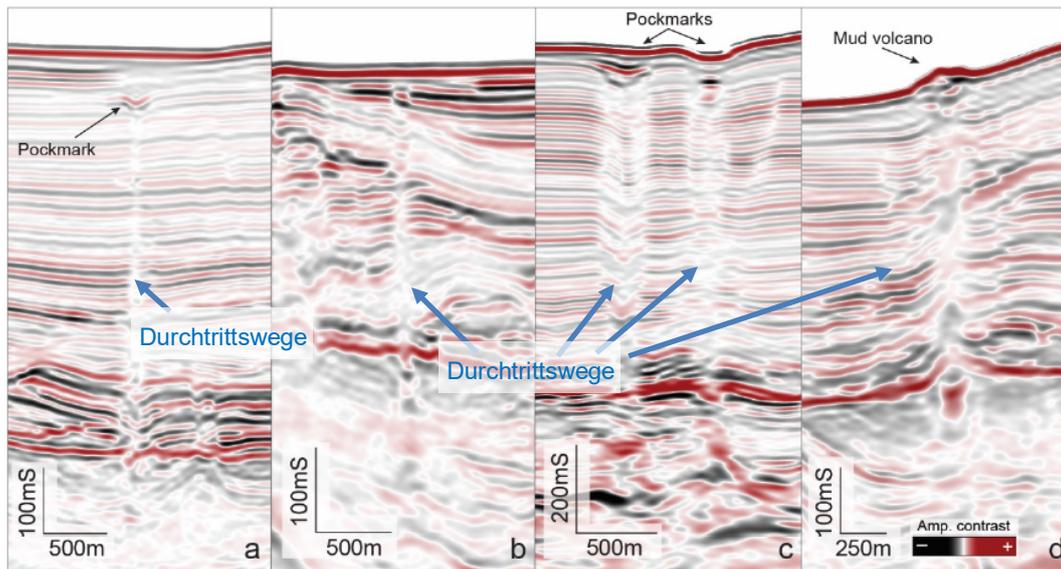


Abb. 5-15. Seismische Signatur (Reflektions-Seismogramme) verschiedener Geometrien von Flüssigkeitsaustrittszonen („pipes“) (verändert nach Oppo et al., 2021).

a) sich nach oben verjüngender Austrittsweg, der am Austrittspunkt eine pockennarbige Ausbildung zeigt; b) zylindrische Durchtrittswege mit ungefähr gleichem Durchmesser; c) sich nach unten verjüngende konische Rohr-förmige Fließwege mit großen Pockennarben am Meeresboden und im flachen Untergrund; d) Schlammvulkan-Zutrittswege, die die seitliche Migration von Flüssigkeit in die aufnehmenden Sedimente zeigt.

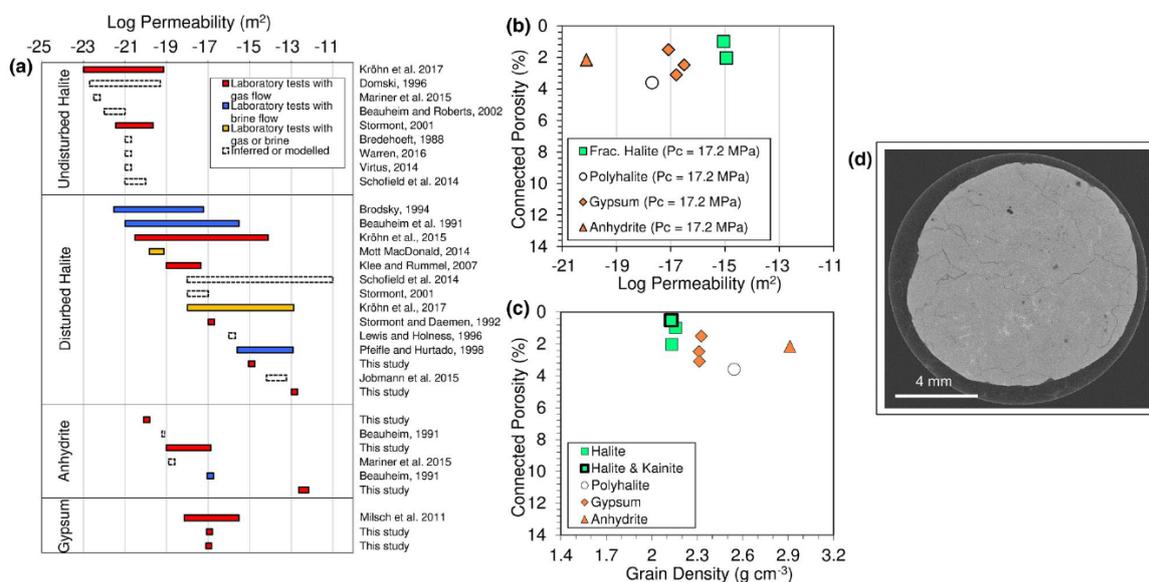


Abb. 5-16. Zusammenstellung von Literaturdaten zur Dichtheit (Permeabilität) von Salzgesteinen (verändert nach Dale et al., 2021).

(a) Globale Permeabilitätsbereiche von Evaporiten (einschließlich der Laborergebnisse dieser Studie - die Grenze von ungestörtem zu geschädigtem Steinsalz liegt hier bei $<10^{-21} \text{ m}^2$). (b) Kombinierte Permeabilitäts-/ Porositätsmessungen für Miozän-Evaporite, (c) Vernetzte Porosität vs. Korn-Dichte (d) Röntgen-Computertomographie-Scan eines Miozän-Salzkerne mit 10µm Auflösung; Dokumentation von Rissen und isolierten Porenräumen (schwarze Bereiche).

5.3.2 Geohydraulik / „Over-pressure“ / Permeabilität

Die Barriere-Eigenschaften von Salzablagerungen sind weltweit von großem Interesse, weil sie als „Fluid-undurchlässige“ Dichthorizonte, u.a. zur Bildung tief lagernder KW-Vorkommen geführt haben. Allerdings gibt es verschiedene Beobachtungen u.a. im Zusammenhang der Messinischen Salzvorkommen, die die absolute Dichtheit der Salzablagerungen zumindest lokal in Zweifel ziehen:

- (1) Lateral begrenzte, aber ansonsten integral durchgehende Aufstiegszonen von Fluiden (hier als "pipes" bezeichnet) innerhalb der flach gelagerten Salzablagerungen

Beispielsweise haben Oppo et al. (2021) im nördlichen Levant-Becken auf Basis bestimmter Erkennungsmuster in seismischen Profilen mehr als 325 vertikale seismische Anomalien als mutmaßliche Flüssigkeits-Wegsamkeiten (pipes) identifiziert (Abb. 5-15). Diese Bereiche sind in der Grundrissform ungefähr kreisförmig, wobei Querschnittsänderungen im vertikalen Verlauf möglich sind, und variieren in der lateralen Ausdehnung von der seismischen Strukturauflösungsgrenze (ca. 25-50 m) bis ca. 255 m Durchmesser. Die Wurzeln der „pipes“ befinden sich in der Regel in den liegenden Partien der unteren Salzhorizonte. Der obere Endpunkt der Rohre ist entweder eine Pockennarbe oder ein kleiner Schlammvulkan, der die gegenwärtige oder vergangene Austreibung von Flüssigkeit und Sediment am Meeresboden anzeigt (Abb. 5-15).

Erklärungsansatz: Viele Autoren (z.B. Oppo et al. 2021) nehmen an, dass sich mit zunehmender Versenkung lokale Fluid-Speicher gebildet haben, die infolge der lithologischen Auflast einem höheren Druck unterlagen, als dem hydrostatischen Druck der Flüssigkeitssäule entsprechen würde. Mit Überschreiten einer kritischen Grenze (Perkolationsgrenze, analog zum Minimalspannungskriterium, vgl. Kap. 3.1.5) kam es zur lokalisierten Auspressung bis ins Deckgebirge, wo die Lösungen ins Sediment eintraten. Dies entspricht Beobachtungen aus den uns bekannten, heutigen Salzvorkommen, wo es ebenfalls als Teil der Diagenese zu einer Fluidmobilisation gekommen ist (Kap. 2.1.1.2).

- (2) Weite Streuung der Permeabilitäts- bzw. Porositätskennwerte von Kernproben (Abb. 5-16a), die eine signifikante Durchlässigkeit, aber keine absolute Dichtheit zeigen.

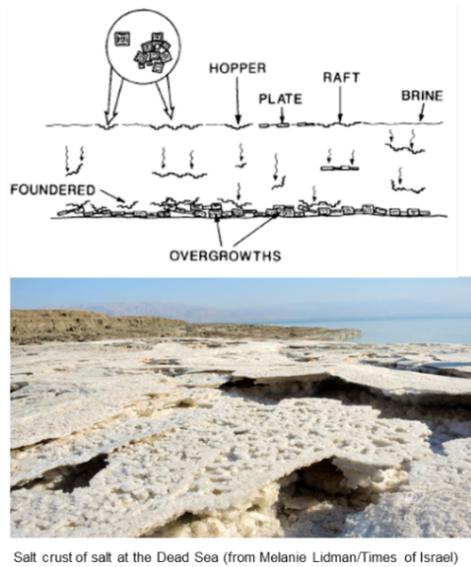
Einschätzung: Entsprechend der bereits in Kap. 4.2.2 geführten Diskussion sind nur wenige Messungen von Laborproben geeignet, um tatsächlich „Gebirgskennwerte“ abzuleiten. Unabhängig davon handelt es sich hier um sehr junge Salzsedimente, d.h. erhöhte Fluidgehalte sind in diesem Stadium der Diagenese nicht ungewöhnlich.

5.3.3 Fachliche Einordnung

Die messinischen Salzvorkommen sind gegenüber den hier im Vordergrund stehenden Zechsteinlagerstätten vergleichsweise jung, d.h. sie haben mutmaßlich nicht den „Reifegrad“, den die heutigen flach gelagerten Salzlagerstätten im Laufe ihrer 200 Mio.-jährigen Entwicklung erlangt haben (bei Letzteren dokumentiert in ihrer vernachlässigbaren Porosität und den geringen Wassergehalten). Unabhängig davon ist die generelle Entwicklung von Salzabscheidungen bis zum „dichten“ Wirtsgestein Salz grundsätzlich immer gleich.

Ausgangspunkt bildet die Salzausscheidung in einem flachen, durch eine Barre abgetrennten Nebenbecken, wo es infolge Verdunstung bei einem geringen Nachfluss salzhaltiger Lösungen zur stetigen Ausfällung von Salzabscheidungen, entsprechend ihrer unterschiedlichen Löslichkeit kommt (vgl. Kap. 2.1.1.1). Dieser Prozess findet auch heutzutage u.a. am Toten Meer statt, womit die Entwicklung von einem hochporösem Salzgrus (Porosität ca. 50 %) in einer gesättigten Salzlösung, über eine gravitative Verdichtung bis zu einem niedrig-porösen Sedimentgestein (wenige % Resthohlraum) nachvollzogen werden kann, wie sie exemplarisch in Abb. 5-17 dargestellt sind (für Details s. u.a. Casas et al., 1989, und Warren, 2016). Der Prozess einer Verdichtung mit gleichzeitiger Abnahme der Porosität findet hier bereits bei einer Versenkung von wenigen 10er-Metern statt, weshalb nach Casas et al. (1989) für die in Abb.

5-18 gezeigten Beispiele bereits nach ca. 50 m eine vollständige Verdichtung (Porosität ≈ 0) erreicht wird.



(1) Formation of halite cumulates begins with crystal nucleation at the brine/air interface (e.g. hopper crystals). At the bottom loosely packed layers of cumulates with halite cement as overgrowths (after Handford, 1991).

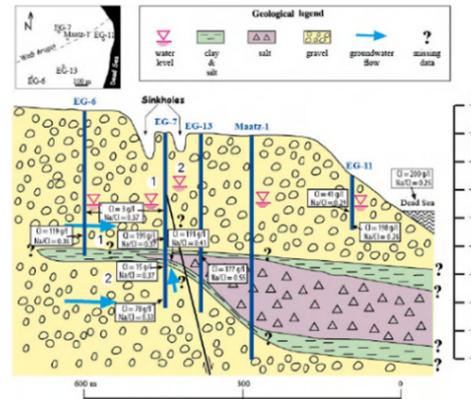


Abb. 5-17. Synoptischer Überblick über die Ausscheidung und Diagenese in Halit-Ablagerungen (Beispiel: Totes Meer) (aus GRS, 2020 – Literaturzitate s. dort).

Voraussetzung dafür ist, dass die Restlösungen im Porenraum gravitativ ausgepresst werden und als zeitlicher Drainageprozess im Sediment nach oben steigen können. Dies hat wegen der schnellen Sedimentationsrate bei den Messinischen Salzablagerungen offenbar nicht stattgefunden, weshalb im Sediment größere Lösungsmengen akkumuliert wurden.

Neben der Kompaktions-bedingten Abnahme der Porosität kommt es während der Diagenese vor allem zum interkristallinen Zuwachsen vorhandener Restlösungshohlräume, u.a. durch Ausfällungsprozesse, die zur Bildung großer, klarer NaCl-Kristallite im Sediment führen.

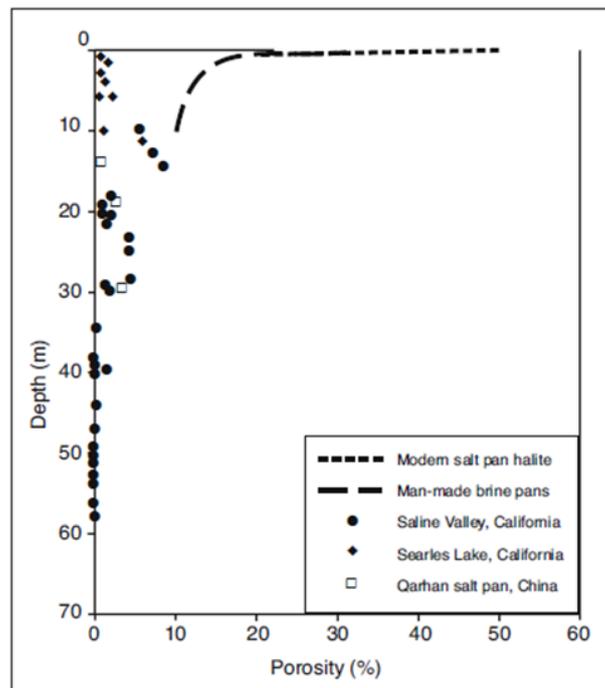


Abb. 5-18. Abnahme der Porosität von rezenten Salzablagerungen (des Quartärs) mit zunehmender Teufe (aus Casas et al., 1989).

Bei den Messinischen Salzablagerungen ist es entsprechend der erreichten Versenkungstiefe zur Entwicklung hoher (annähernd lithostatischer) Lösungsdrücke im gering verdichteten Salzgrus gekommen. Zusätzlich muss noch die Möglichkeit in Betracht gezogen werden, dass aufgrund der Teufen-bedingten Umwandlung von Gips in Anhydrit (vgl. Kap. 2.1.1.2) zusätzliche freie Lösungen entstanden, was aus geomechanischer Sicht zu einer sehr instabilen Porendrucksituation geführt hat.

Eine glaubhafte These für die „scheinbare Durchlässigkeit des Salzgebirges“ ist deshalb, dass diese großen und mobilen Lösungsmengen im flach abgelagerten Steinsalz infolge der zunehmenden Auflast durch überlagernde Schichten in hangende Schichten abgepresst werden. In den zunächst porösen und permeablen Salzablagerungen könnte es dabei zu einer Kanalisierung der nach oben migrierenden Lösungen auf makroskopischen Fließwegen gekommen sein. Die Lösungsmigration kommt in einem solchen Fließweg zum Erliegen, wenn entlastete Speicherhorizonte im Deckgebirge erreicht wurden.

Letztlich entspricht die Auspressung der salinaren Salzlösungen im porösen Salzgestein einer Verletzung des Minimalspannungskriteriums, der über den Prozess der druckgetriebenen Perkolation prinzipiell auch im Salzgebirge möglich ist (vgl. Kap. 3.1.5).

Fakt ist aber, auch im Salzgebirge können lokal erhebliche Lösungsmengen in Form von Rachen, Klüften etc. auch über große Zeiträume gespeichert sein, wie die CO₂-Akkumulationen im Werra-Revier belegen. Letztere Situation ist zwar ein Sonderfall, weil die Lösungen erst vergleichsweise spät, als hydro-dynamischer Prozess (ebenfalls unter Verletzung des Minimalspannungskriteriums) ins Salz übergetreten sind, die Tatsache, dass sie danach aber im Salz gespeichert wurden, belegt aber dessen generelle Dichtheit.

Weiterhin sind die generell in der flachen Lagerung vorhandenen (reliktischen) Lösungsmengen nach heutigem Kenntnisstand nicht ausreichend, um als durchgängige Migrationspfade wirksam zu sein (vgl. Kap. 2.1.3.1).

6 Schlussfolgerungen für Standortsuche in der flachen Lagerung

6.1 Zusammenfassung – Kenntnisstand

In Bestätigung der bereits vorliegenden Aussagen (u.a. Minkley et al., 2010, Liu et al., 2018) kann ergänzend zum Stand von Wissenschaft und Technik hinsichtlich der potentiellen Eignung flach lagernder Salzgesteine konstatiert werden:

- Die stratiform gelagerten Salzlagerstätten weisen für die vorkommenden Evaporitgesteine aufgrund ihrer sedimentären Genese mit sukzessiven Änderungen der Lösungszusammensetzung und den daraus folgenden Mineralausscheidungen eine große lithologische Vielfalt auf. Die Gesteinsvarietäten reichen von den klassischen, plastisch deformierbaren Salzgesteinen (Steinsalz, Kalisalz) über niedrig poröse Tongesteine (Salztone) bis hin zu spröden Festgesteinen (Anhydrit).
- Für Salzgesteine (allgemein) ist davon auszugehen, dass die salinaren Wirtsgesteinsformationen im unverritzten Zustand bei entsprechender in situ-Einspannung als geologisch dicht zu charakterisieren sind. Dies schließt grundsätzlich alle in einer salinaren Ausscheidungsfolge vorkommenden Gesteine (Steinsalz, Anhydrit, Salztone und Kaligestein) ein. Belege dafür sind u.a. geologische und technische Analoga, z. B. CO₂-Intrusionen im Werra-Gebiet sowie die Dichtheit von Gasspeicherkavernen.

Allerdings kann es bei tektonischen oder bergbaulichen Einwirkungen aufgrund der vorliegenden Gesteinsprödigkeit, z.B. von Anhydrit und Grauem Salzton, zu einer möglichen Schädigung bis hin zur Klüftbildung kommen. Diese Klüfte sind in der langzeitigen Entwicklung aber häufig wieder durch Salzmineralausfällungen verheilt und somit nicht hydraulisch wirksam. Unabhängig davon ist die Dichtheit von nicht ausschließlich als Steinsalz anzusprechenden Salzgesteinen, d.h. z. B. des Grauen Salztons (z3T) und des Hauptanhydrits (z3AN), standortspezifisch zu überprüfen.

Gleichzeitig ist über ausreichend dimensionierte Sicherheitsabstände zu gewährleisten, dass es nicht zu signifikanten bergbaulichen Einwirkungen kommt.

- Für die Festlegung von Sicherheitsabständen, u.a. zu einem wasserführenden Deckgebirge oder zu potentiellen Störungszonen, liegen Erfahrungen aus dem praktischen Bergbau vor, die teilweise Eingang in behördliche Festlegungen (z.B. ABVO, 1996) erfahren haben. Allerdings werden damit thermo-hydro-mechanische Einwirkungen, wie sie in einem Endlager für Wärme-produzierende Abfälle auftreten können, möglicherweise nicht ausreichend abgedeckt, weshalb auch Ergebnisse aus entsprechenden Modellrechnungen heranzuziehen sind. Der als Mindestbarriere im Salzgebirge ausgewiesene Abstand zu einem außerhalb davon anstehendem Fluiddruck beträgt entsprechend dem Analogbeispiel Salzgrube Merkers 30 m (vgl. Minkley et al., 2010).
- Aus den im Kali- und Salzbergbau gesammelten praktischen Erfahrungen ist abzuleiten, dass Gesteine mit plastisch-viskosen Eigenschaften wie Salz und Salzton ihre Integrität und Dichtheit unter statischen Beanspruchungsbedingungen nur verlieren, wenn die Mächtigkeit der geologischen Barrieren in Wechselwirkung mit einer nicht dauerstandsicheren Dimensionierung des Grubengebäudes zu gering ist, was in der Vergangenheit zum Integritätsverlust geologischer Barrieren um Grubengebäude der steilen und flachen Lagerung geführt hat (u.a. für die Situation der Asse).

Die methodische Vorgehensweise des Integritätsnachweises im Rahmen einer Sicherheitsanalyse für Endlager von HAW-Abfällen bzw. für Untertagedeponien für chemisch-toxische Abfälle sowie für Versatzbergwerke mit umweltgefährdenden Abfallstoffen ist qualitativ gleich. Als qualitativer Unterschied wird für Endlager mindestens der „sichere Einschluss“ durch Nachweis des im Steinsalz liegenden ewG gefordert, während für UTV / UTD der „dichte“ Einschluss im Salzgestein Voraussetzung ist.

- Über die rechentechnische Bewertung mittels den bekannten Versagungskriterien, (1) Dilatanz- und (2) Minimalspannungskriterium, ist eine zuverlässige Bewertung der geologischen Barrierenintegrität für sehr lange Zeiträume möglich.

Als Ergebnis durchgeführter Integritätsanalysen für praktische Fragestellungen des Salzbergbaus und UTD/UTV sowie aus dem vorliegenden wissenschaftlichen-technischen Kenntnisstand (entsprechend dem Ergebnis vorläufiger Sicherheitsanalysen) kann gefolgert werden, dass die vorliegenden Methoden hinreichend robust sind, für zuverlässige Prognose der langzeitigen Barrierenintegrität.

Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass bei einer entsprechenden Dimensionierung des Grubengebäudes bzw. Endlagerbergwerkes und ausreichend mächtigen Salinarbarrieren unter quasi-statischen Beanspruchungsbedingungen, wie sie als mechanische Einwirkungen aus der untertägigen Hohlraumerstellung sowie aus der thermischen Freisetzung der Abfälle resultieren, die Integrität geologischer Salinarbarrieren nicht verletzt wird. Das bedeutet die Impermeabilität in einem hinreichend mächtigen Gebirgsbereich um den Einlagerungsbereich bzw. ewG bleibt erhalten.

- Die flache Lagerung weist gegenüber der steilen Lagerung mehrere sicherheitstechnische Vorteile auf:
 - das bevorzugte Wirtsgestein (Steinsalz) kommt innerhalb der salinaren Ausscheidungsfolge in verschiedenen stratigrafischen Einheiten mehrfach vor (z.B. Staßfurt-, z2NA, Leine-, z3NA und Aller-Steinsalz, z4Na), die in aufeinander folgenden Stockwerken angeordnet sind = **Redundanz**
 - Innerhalb der lithologischen Ausscheidungsfolge kommen in ihren Eigenschaften unterschiedliche Gesteine (z.B. Steinsalz, Tongestein) vor, die sich in ihrer Schutzwirkung (u.a. Dichtheit gegenüber Fluiden, Schutz gegen Auflösung) ideal ergänzen = **Diversität**

Insbesondere die Tonsteine (Salztone sowie das z5 – z7) im Hangenden des Wirtsgesteins zeichnen sich durch günstige geomechanische und hydraulische Eigenschaften (Plastizität, Fähigkeit zur Selbstabdichtung) aus.

 - Darüber hinaus ist mutmaßlich auch das Rückhaltepotential von Salztönen für gelöste chemische Substanzen infolge ihres in der großen spezifischen Oberfläche begründeten Adsorptionsvermögens und ihrer Fähigkeit zum Kationenaustausch günstig.

= **chemische Barriere**

Auch wenn Redundanz / Diversität nicht Inhalt der aktuell gültigen Sicherheitsanforderungen sind, kann in flach gelagerten Salinarformationen **ein natürliches Multi-Barrierensystem vorliegen, das einen erheblichen sicherheitstechnischen Vorteil darstellt**. Dieser Aspekt kann somit analog zu den sonstigen geowissenschaftliche Abwägungskriterien nach § 24 StandAG zu berücksichtig werden.

- Darüber hinaus lässt sich durch Untersuchungen zum Verhalten geologischer Salinarbarrieren nach extremen dynamischen Beanspruchungen (vgl. Situation in der Grube Teutschenthal nach dem GS 1996 sowie anderen Gruben) in situ der Nachweis erbringen, dass auch die stärksten in Deutschland anzunehmenden Erdbeben bei ausreichender Bemessung der Salinarbarrieren ertragen werden können. Da dabei die Integrität und Dichtheit der Barrieren nicht verletzt wurde, bedeutet dies, dass die Erdbbensicherheit im Langzeitprozess gegeben ist.
- Die grundsätzliche Durchführbarkeit einer vorläufigen Sicherheitsanalyse wurde mit der Bewertung der geologischen Barrierenintegrität zweier unterschiedlicher generi-

scher Standortssituationen im Rahmen des Vorhabens KOSINA erfolgreich gezeigt, wobei die Standort-Konstellation „Salzkissen“ gegenüber der „flachen“ Lagerung wegen der größeren Schutzschichtmächtigkeit Vorteile aufwies.

- Die rezenten Lösungsbewegungen innerhalb der Messinischen Salzvorkommen des Mittelmeeres werden als nicht relevant für die hier vorgestellte Situation der flach-gelagerten Salzformationen in Mitteleuropa eingeschätzt. Mutmaßlich erfolgte die Sedimentation dieser vergleichsweise jungen (tertiären) Salzsedimente so schnell, dass kein ausreichender Lösungsaustritt (Drainage) nach oben erfolgen konnte. Deshalb entstanden unter hohem Porendruck stehende Lösungsreservoirs im Salz, die zur Bildung lokalisierter Fluidaustrittswege führen können, wenn es wegen der vorhandenen hydro-mechanischen Instabilität zu einer Lösungsmobilisation kommt.

6.2 Empfehlungen zur Durchführung Standortauswahl

Unterstützend zur Beurteilung der weiteren Untersuchungswürdigkeit flach-gelagerter Salzstrukturen sind folgende Anforderungen heranzuziehen:

- Sicherheitstechnisch günstige Konstellationen (im Sinne von § 24 StandAG)
 - Die bevorzugte Endlagertiefe für den Erkundungs-/Endlagerbereich sollte mindestens > 800 m Tiefe betragen (weil damit das Risiko eines potentiellen Lösungszutritts minimiert wird).
 - Die maximale Endlagertiefe sollte 1.000 - 1.200 m betragen, zur Gewährleistung bergmännisch und arbeitssicherheitslich beherrschbarer Randbedingungen (u.a. mit moderater Konvergenz der aufgefahrenen Hohlräume).
 - Der hangende Mindestabstand zum Kalilager sollte mindestens 50 m betragen (zur Vermeidung einer thermischen Zersetzung des Carnallits).
- Sicherheitsabstände sowie Anforderungen zur Gewährleistung der Barrierenintegrität
 - Die Vorgaben zu Sicherheitsabständen von Problemzonen (Störungszonen, konkurrierende Nutzungen) entsprechen weitgehend den Vorgaben im Vorhaben KOSINA:
 - 150 m zum Top des Salinars,
 - 50 m zu Top und Basis des Steinsalzlagers (Einlagerungshorizont),
 - 500 m lateraler Sicherheitspfeiler (z.B. zum Salzhang)
 - 300 m Abstand der Einlagerungsgrubenbaue zu den Tagesschächten
 - Das Vorhandensein ausreichend mächtiger Barrieren gegen wasserführende Schichten im Hangenden (z. B. im unteren Buntsandstein) und im Liegenden ist eine Grundanforderung. Unter Berücksichtigung der lateralen Variabilität sowie der Tatsache, dass Schichtübergänge keine ebenen Kontaktflächen sind, sollte die Mächtigkeit der Liegend-Schutzschicht mindestens 50 m betragen.
Das Auftreten mächtiger Salztonhorizonte im Hangenden der Wirtsgesteinsformation, insbesondere des z4T sowie des z5 – z7, ist als günstig einzuschätzen, weil sie als natürliches Multi-Barrierensystem wirken, solange sie intakt und ausreichend mächtig sind (≥ 10 m).
 - Die Identifikation und Bewertung einer möglicherweise bereits stattgefundenen Subrosion sowie die Einschätzung zukünftiger Subrosionsprozesse oberhalb einer potentiellen Salzformation ist essentiell, zumal langzeitige Löseprozesse oberhalb des Endlagers möglichst vernachlässigbar sein sollten.
 - Nachweis von Bereichen geringer Bruchtektonik im Deckgebirge und im Sub-Salinar.

- Hinweise zum Staßfurt-Steinsalz als die zu bevorzugende Steinsalzformation
In Analogie zum Vorgehen im Forschungsvorhaben KOSINA (Bollingerfehr et al., 2018) wird eingeschätzt, dass das Staßfurt-Steinsalz (z2NA), u.a. aufgrund der vorliegenden Homogenität und Eigenschaften gegenüber den alternativ möglichen Steinsalz-Horizonten im Zechstein Vorteile bietet. Dafür sind unter Berücksichtigung regionaler Unterschiede allgemein u.a. als günstig zu bewerten:
 - Eine große Mächtigkeit und ausreichende laterale Erstreckung (entsprechend den Anforderungen der räumlichen Ausdehnung des Endlagers und den erforderlichen Sicherheitsabständen).
 - Gegenüber dem Leine-, z3NA, sowie dem Aller-Steinsalz, z4NA, zeichnet es sich durch eine lokal deutlich größere Mächtigkeit aus, die bis zu mehreren 100er-Meter betragen kann.
 - Gegenüber dem Werra-Steinsalz (z1Na) fehlen die z.B. für das Werra-Gebiet typischen Kali-Salz-Einschaltungen (Flöze Thüringen und Hessen)
Darüber hinaus liegt in der Regel eine günstigere Liegend-Barriere vor. Gleichzeitig ist beim Werra-Steinsalz zu gewährleisten, dass zu den auftretenden Kaliflößen Thüringen und Hessen ein Sicherheitsabstand von mindestens 50 m eingehalten wird.

6.3 Identifizierter Forschungsbedarf

- Weiterentwicklung der geophysikalisch basierten Verfahren (z. B. 3D-Seismik, Gravimetrie) zur Identifikation tektonischer Störungszonen sowie der räumlichen Ausdehnung von Salz-Strukturen mit Bewertung des Zustands des Deckgebirges und dem geologischen Intern-Bau.
- Entwicklung von optimierten Behälter- und Einlagerungskonzepten für HAW-Abfälle (z.B. Bohrloch- oder Streckenlagerung) für die flache Lagerung:
Als Grundlage für die Standortauswahl können die Anforderungen an den Flächenbedarf bzw. die räumliche Ausdehnung des Einlagerungsbereiches abhängig vom Endlagerkonzept (z.B. horizontale Streckenlagerung gegenüber einer Einlagerung in vertikalen Bohrungen unterschiedlich sein).
- Die Wassergehalte der verschiedenen Wirtsgesteine bzw. den weiteren Schutzschichten (Ton- und Anhydritgesteine) sind ein Schlüsselparameter, sowohl zur Bewertung hydraulischer (z.B. für die Ausbildung potentieller Lösungsfilme entlang von Korngrenzen) als auch mechanischer Eigenschaften (u.a. Quantifizierung der Kriecheigenschaften).
Hier sollten an vorhandenen Standorten systematische Untersuchungen über die vertikale Schichtmächtigkeiten erfolgen, insbesondere unter Berücksichtigung sulfatischer und toniger Einschaltungen.
- Salztone in der geologischen Barriere können im Sinne eines natürlichen Multi-Barriersystems wirksam sein. Das bedeutet, sie sind als Tongestein diversitär zum Steinsalz, womit u.a. zusätzlich auch chemische Prozesse (Absorption und Kationenaustausch) zur Erhöhung des Sicherheitsniveaus beitragen können.
Hierzu liegen bisher keine belastbaren, spezifischen Untersuchungen vor.
- Verbesserung der experimentellen Datenbasis zum Festigkeits- und Dilatanzverhalten sowie den Kriecheigenschaften der vorkommenden Salzgesteine. Von besonderer Relevanz ist hier das langzeitige Kriechverhalten bei kleinen Spannungen, das letztlich den Abbau potentiell schädlicher Spannungsdeviatoren infolge der Temperaturentwicklung in der Barriere sowie die Rückbildung eingetragener Schädigung bestimmt.

Dies schließt die Weiterentwicklung der Methoden zur geomechanischen Homogenbereichscharakterisierung (u.a. mit Durchführung von Kriechuntersuchungen unter triaxialer Einspannung und unter Lösungsdruck sowie bei kleinen Kriechraten) ein.

- Gezielte experimentelle Untersuchungen zur Bewertung gefügeinduzierter Anisotropieeffekte, u.a. hydraulische Dichtheit und Festigkeit (im Labor- und Feldmaßstab)
- Weiterhin ist für eine optimierte Bewertung der langfristig wirkenden geomechanischen Randbedingungen die Weiterentwicklung geeigneter Materialgesetze zur numerischen Simulation der thermo-mechanischen Einwirkungen auf geschichtete Salzformationen erforderlich.

Letztlich wird deutlich, dass die **Einrichtung eines Untertagelabors in einem vorhandenen Salzbergwerk** erhebliche Vorteile zur Bearbeitung bestehender Fragen- und daraus resultierenden Themenkomplexe bieten würde.

Dies betrifft vor allem eine Methodenentwicklung, u.a.

⇒ der übertägig einzusetzenden Erkundungsverfahren. Sie kann an einem bekannten Referenzstandort erfolgen, wo eine für die Interpretation ausreichende geologische Datengrundlage bereits vorliegt (ohne, dass dieser als potentieller Endlagerstandorte in Betrachtung gezogen wird).

⇒ zur direkten Untersuchung der Eigenschaften der verschiedenen Salinarformationen bzw. der Salzgesteine auf Basis von Labor- und Felduntersuchungen. Dies schließt die Probengewinnung, z.B. im Bereich Wirtsgesteinscharakterisierung, sowie die Durchführung von in situ-Großversuchen im Bereich Strecken- und Schachtverschlüsse ein.

Vorteilhaft wäre, dass die gesamte Infrastruktur an einem bestehenden Standort genutzt werden könnte, d.h., das kosten- und zeitaufwändige Auffahren von Schächten und Strecken entfällt.

Potentielle Standorte, an denen z.B. das Staßfurt-Steinsalz in der flachen Lagerung aufgeschlossen ist, wären die Salzgruben Teutschenthal und Sondershausen. Gleichzeitig werden an diesen Standorten bereits FuE-Vorhaben zu Fragestellungen der Endlagerung durchgeführt (vgl. Poetzsch et al., 2021, Biegler & Gruner, 2020).

7 Literaturverzeichnis

- ARGE (1998): Bewertung der Langzeitsicherheit Grube Teutschenthal; der GTS Grube Teutschenthal GmbH & Co. KG unter Berücksichtigung des Gebirgsschlages vom 11.09.1996 im Ostfeld; Teil Geomechanik; ARGE IfG GmbH, Leipzig, ERCOSPLAN GmbH, Erfurt; K-UTEC GmbH, Sondershausen, Dr. A. Schwandt, Erfurt, 25.02.1998 (unveröffentlicht).
- Autorenkollektiv (2002): Kalibergbau an Unstrut und Finne (Hrsg. Bergmannsverein „Glück Auf“ Roßleben), Langenweißbach.
- Bachmann, G. H; Ehling, B. C; Eichner, R.; Schwab, M. (2008): Geologie von Sachsen-Anhalt, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung., ISBN: 9783510652402.
- Bertrams, N. et al. (2020): RESUS Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in flach lagernden Salzformationen, GRS – 568, ISBN 978-3-947685-54-7.
- BGE (2020a): Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH.
- BGR (1995): Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Fortnationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Salzformationen, Bundesanstalt für Geowissenschaften, Hannover, August 1995.
- Biegler, J. & Gruner, M. (2020): Grube Teutschenthal - 20 Jahre In situ-Forschungsarbeiten, Bergbau, 11/2020, 498 – 503.
- BMU (2010): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärme-entwickelnder radioaktiver Abfälle. Bonn, Stand: 30. September 2010.
- Bollingerfehr et al. (2018): KOSINA Concept developments for a generic repository for heat-generating waste in bedded salt formations in Germany, BGE TEC, 2018-13.
- Borchert, H. (1959): Ozeane Salzlagerstätten. Grundzüge der Entstehung und Metamorphose ozeaner Salzlagerstätten sowie des Gebirgsverhaltens von Salzgesteinsmassen. – Verl. Gebrüder Bornträger, Berlin.
- Borchert, H. (1963): Der Wasserhaushalt bei der Metamorphose der Kalisalze. – Berichte Geol. Ges., Sonderheft 1, 145-194, Berlin.
- Bornemann, O. (1991): Zur Geologie des Salzstocks Gorleben nach den Bohrergebnissen.-BfS-Schriften, 4/91: 67 pp., 13 Fig., 5 Tab., 24 Apps.; Salzgitter.
- Bornemann, O., Fischbeck, R. & Bäuerle, G. (2000): Investigation of deformation textures of salt rock from various Zechstein units and their relationship to the formation of the salt diapirs in NW Germany. (In: Geertmann, R. M. (Hrsg.): SALT 2000) - Proc. 8th World Salt Symposium, Vol. 1, 89 - 94.
- Bracke, G., Popp, T., Püttmann, W., Kienzler, B., Lommerzheim, A., Moog, H. (2012): Berücksichtigung der Kohlenwasserstoffvorkommen in Gorleben. Bericht der Arbeitsgruppe „Kohlenwasserstoffe“, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-285, ISBN 978-3-939355-61-8, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, August 2012.
- Braitsch, O., (1962): Entstehung und Stoffbestand der Salzlagerstätten. - 232 S., Springer, Berlin.
- Buhmann, D., Mönig, J., Wolf, J., Heusermann, S., Keller, S., Weber, J.R., Bollingerfehr, W., Filbert, W., Kreienmeyer, M., Krone, J., Tholen, M. (2008): Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicher-heitliche Bewertung von Endlagern für HAW – ISIBEL. Zusammenfas-sender Abschlussbericht. DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR und GRS. TEC-09-2008-AB. BMWi-FKZ 02E10065 und 02E10055. Peine, 2008
- Capella, W., Spakman, W., van Hinsbergen, D. J. J., Chertova, M. V., & Krijgsman, W. (2020): Mantle resistance against Gibraltar slab dragging as a key cause of the Messinian Salinity Crisis. Terra Nova, 32(2), 141–150.<https://doi.org/10.1111/ter.12442>
- Casas, E., Lowenstein. T.K. (1989): Diagenesis of Saline Pan Halite: Comparison of Pétrographie Features of Modern, Quaternary and Permian Halites. Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 59, 19.
- Dale, M., Marín-Moreno, H., Falcon-Suarez, I., Grattoni, C., Bull, J. & McNeill, M. (2021): The Messinian Salinity Crisis as a trigger for high pore pressure development in the Western Mediterranean, Basin Research 33(4), DOI: 10.1111/bre.12554
- Davison, I. (2009): Faulting and fluid flow through salt. Journal of the Geological Society London, Vol. 166, 205 – 216
- DBE-Tec (2016): Gutachten - Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle, TEC-09-216-G, Peine.

- DepV (2009): "Deponieverordnung vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598) geändert worden ist".
- Döhner, Ch., Heynke, A. & Rauche, H. (2003): Die Geologie der Südharz-Unstrut-Kalilagerstätte in: Kali im Südharz-Unstrut-Revier. – Herausgegeben zum 2. Thüringer Bergmannstag, 4.-7. Sept. 2003, Selbstverlag des Deutschen Bergbau-Museums Bochum, 83-129.
- Döhner, C. & Elert, K.-H. (1975): Genetische Prozesse im Staßfurt-Salinar. *Zeitschrift für geologische Wissenschaften*, 3(2), 121-141.
- DSK – Deutsche Stratigraphische Kommission (2020): Zechstein – Stratigraphie von Deutschland XII. – Schriftenreihe der Dt. Ges. Geowiss., Heft 89: 1-647; Stuttgart.
- DSK – Deutsche Stratigraphische Kommission (Menning, M., Schröder, B., Plein, E., Simon, T., Lepper, J., Röhling, H.-G., Stapf, K., Lützner, H., Käding, K.-C., Paul, J., Horn, M., Hagdorn, H., Beutler, G. & Nitsch, E.) (2011): Beschlüsse der Deutschen Stratigraphischen Kommission 1991–2010 zu Perm und Trias von Mitteleuropa. – Z. Dt. Ges. Geowiss., 162: 1–18; Stuttgart.
- Ehgartner, B., Neal, J., Hinkebeim, T. (1998): Gas releases from salt, Sandia National Laboratories Report SAND-98-1354
- Elert, K.-H. (1995): Der Rote Salzton (T4) - Sedimentations- und Mächtigkeitsverhältnisse. Unveröffentl. Zwischenbericht. Institut für Bergbau der TU Bergakademie Freiberg. März 1995.
- Finley, S.J., D.J. Hanson & R. Parsons (1992): *Small-scale brine inflow experiments – data report through 6/6/91*, (185 p.) SAND91–1856, Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories.
- Freyer, D., Voigt, W., Böttge, V. (2006): Zur thermischen Stabilität von Tachhydrit und Anhydrit. Kali und Steinsalz, (2006)1: 28-37.
- Gerber, W. (2018): Das Europäische Mittelmeer - Entstehung und Entwicklung in einem tektonisch aktiven Raum, *geographie-heute*, 39. JG. Heft 338, 44-46.
- Gerling, P., Beer, W., Bornemann, O. (1991): Gasförmige Kohlenwasserstoffe in Evaporiten des deutschen Zechsteins. Kali und Steinsalz, Vol. 10, No. 11, S. 377-383.
- GFE (2005): Abschlussdokumentation – Geologische Betreuung Streckenauffahrung Angersdorf-Teutschenthal und Bewertung des Laugenzuflusses, GFE Consult, 29.07.2005 (uneröffentlicht).
- GFE (1999): Geologisches Gutachten - Langzeitsicherheitsnachweis Grube Teutschenthal, Geologische Forschung und Erkundung – GFE GmbH, 22.07.1999 (uneröffentlicht).
- Giesel, R. J., Haase, G., Maggraf, P., Salzer, K. & Thoma, K. (1989): Drei Jahrzehnte Ausbruchsforschung im Kalibergbau des Werrareviers der DDR. – *Zeitschrift für Geologische Wissenschaften*, 17: 333-346; Berlin.
- GRS (2020): Czaikowsky et al., KOMPASS- Compaction of crushed salt for the safe containment, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-608, ISBN 978-3-947685-94-3.
- GRS (2016): Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH (A. Meleshyn, T. Weyand, G. Bracke, H. Kull, K. Wiczorek): Wärmeentwicklung / Gesteinsverträglichkeit. Im Auftrag der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, veröffentlicht als K-MAT 64. Mai. 2016.
- GRS (2000): Untersuchung der Barrierewirksamkeit des Gesteinsverbandes Steinsalz/Anhydrit/Salzton (BARITON), Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS - 160
- Hampel, A., Günther, R.-M., Salzer, K., Minkley, W., Pudewills, A., Yildirim, S., Rokahr, R., Gährken, A., Missal, C., Stahlmann, J., Herchen, K. & Lux, K.-H. (2016): BMWi-Verbundprojekt: Verbundprojekt: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen anhand von Modellberechnungen zum thermo-mechanischen Verhalten und zur Verheilung von Steinsalz. – Ergebnisbericht zu Teilvorhaben 1; FKZ 0E10820, Zeitraum 01.10.2010 – 31.03.2016.
- Hempel, D. (1996): Gutachterliche Stellungnahme vom 08. 11. 1996 zum Auftreten von brennbaren Gasen nach dem Gebirgsschlag in der Grube Teutschenthal, Braunschweig (uneröffentlicht).
- Herbert, H.-J., Schwandt, A. (2007): Salzlösungszuflüsse im Salzbergbau Mitteldeutschlands - Erfassung und Bewertung der chemischen und physikalischen Analyseergebnisse. GRS – 226, ISBN 978-3-939355-00-7
- Herrmann, A. G. (1981): Grundkenntnisse über die Entstehung mariner Salzlagerstätten. Der Abschluss, 32, 45-72.
- Herrmann, A.G., B. J. Knipping (1993): Waste Disposal and Evaporites, ISBN 978-3-540-56232-0.
- Hessmann, W.; Schwandt, A. (1961): Zur Bruchtektonik im Salinar und Deckgebirge, *Z. geol. Wiss.*, 9, 3, Seite 283 bis 292, Berlin.

- Hodenberg, R. v., R. Fischbeck und R. Kühn (1987): Beitrag zur Kenntnis der Salzminerale, Salzgesteine und Salzlagerstätten, insbesondere im deutschen Zechstein (Teil 2: Salzgesteine). Abschluss, 38, 777 – 92.
- Hunsche, U., Schulze, O., Walter, F. & Plischke, I., 2003. Projekt Gorleben - Thermomechanisches Verhalten von Salzgestein, BGR Abschlussbericht, AP 9G2138110000.
- Hunsche, U., Plischke, I. & Schulze, O. (1998): ERA Morsleben - Gebirgsmechanische und Geotechnische Untersuchungen im Labor und in situ.- Abschlussbericht zum AP 9M 213 100 15, BGR-Bericht, Mai 1998, Archiv-Nr. 117 213.
- IAEA (2006): International Atomic Energy Agency: Geological Disposal of Radioactive Waste. Safety Requirements. IAEA Safety Standards Series No. WS-R-4, ISBN 92-0-10570-9, Wien, 2006.
- Jockwer, N. (1980): Die thermische Kristallwasserfreisetzung des Carnallits in Abhängigkeit von der absoluten Luftfeuchtigkeit. - Kali und Steinsalz, Bd. 8, H. 2: 55-58, 5 B.; Essen.
- Käding, K.-C. (2003): Bromprofile aus dem Zechstein 4 und 5 – ein Beitrag zur Stratigraphie der Aller- und Ohre-Folge. Kali und Steinsalz, 1, 6 - 17.
- Käding, K.-Ch.; Lukas, V. (1997): Untertageradar (EMR) als Planungsinstrument im Salzbergbau, Kali und Steinsalz, 12, 5, 151 – 157.
- Kamlot, W.-P. (2008): Gebirgsmechanische Bewertung der geologischen Barrierefunktion des Hauptanhydrits in einem Salzbergwerk, Habilitationsschrift, TU BA Freiberg, Freiberg 02.04.2009.
- Kellerbauer, S. (1998): Einaxiale Druckfestigkeit, Verformungsverhalten und Gebirgsklassifizierung von Haselgebirge und Nebengesteinen im alpinen Salzbergbau. Münchner Geol. Hefte, B 7, 148 – 158.
- Kern, H., Franke, J.-H. (1980): Thermische Stabilität von Carnallit unter Lagerstättenbedingungen. - Glückauf-Forsch.-H., 41/6: 252-255, 6 B.; Essen.
- Kindlein, J.; Buhmann, D.; Mönig, J.; Wolf, J.: Sicherheits- und Nachweiskonzept für ein Endlager in flach lagernden Salzformationen – Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS-495, BMWi-FKZ 02E11405; ISBN 978-3-946607-80-9, Braunschweig, 2018.
- Knabe, H.-J. (1989): Verteilung gesteinsgebundener Gase, Z. geol. Wiss. (Berlin) 17 (1989) 4, 353 – 368.
- Knipping, B. (1989): Basalt Intrusions in Evaporites. Lecture Notes in Earth Sciences, 24, Knipping, B., Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 1-132.
- Kuhrmann, M. (1950): Der Rote Salztön in den Aufschlüssen der „Halleschen Salzwerke“ bei Angersdorf, Geologische Meldearbeit, Geol. Institut der BA Freiberg.
- Kukla, P.A., Reuning, L., Becker, S., Urai, J., Schoenherr, J. (2011): Distribution and mechanisms of overpressure generation and deflation in the late Neo-proterozoic to early Cambrian South Oman Salt Basin. Geofluids, Vol. 11, No. 4, S. 12.
- Liu, W, Knauth, M. Eickemeier, R., Fahland, S., Minkley, W., Popp, T. (2018): TM- und THM-gekoppelte Modellberechnungen zur Integritätsanalyse der geologischen Barrieren in flach lagernden Salzformationen. Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover.
- Liu, W., Völkner, E., Popp, T. & Minkley, W. (2017): Zusammenstellung der Materialparameter für THM-Modellberechnungen - Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover.
- Löffler, J. (1962): Die Kali- und Steinsalzlagerstätten des Zechsteins in der DDR.- Teil III: Sachsen-Anhalt.- Freiburger Forschungshefte C 97/111, Berlin.
- Lotze, F. (1957): Steinsalz und Kalisalze, Verl. Gebr. Bornträger, Berlin.
- Lux, K.-H. (2002): Entwicklung und Fundierung der Anforderung „Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“. Teil A: Grundlegende rechnerische Untersuchungen. Technische Universität Clausthal, Januar 2002.
- Minkley, W. (2004): Gebirgsmechanische Beschreibung von Entfestigung und Sprödbbrucherscheinungen im Carnallitit. Schriftenreihe des Institutes für Gebirgsmechanik – Band 1, Shaker Verlag Aachen.
- Minkley, W., Knauth, M., Brückner, D. (2013): Discontinuum-mechanical behaviour of salt rocks and the practical relevance for the integrity of salinar barriers. ARMA, 47th US Rock Mechanics Symposium, San Francisco, CA, USA, 23-26 June 2013. Paper ARMA 13-388.
- Minkley, W., Popp, T., Salzer, K., Gruner, M., Böttge, V. (2013): Hydro-mechanical properties of the Red Salt Clay (T4) – Relevancy of the minimum stress criterion for barrier integrity. Physics and

- Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. Available online 3 June 2013 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474706513000545>.
- Minkley, W., Popp, T. (2010): Sicherheitsabstände zur vorläufigen Dimensionierung eines untertägigen Endlagers für wärme-entwickelnde Abfälle im Salzgebirge. Memo für die VSG, IfG-Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig, 29.10.2010.
- Minkley, W., Wüste, U., Popp, T., Neumann, D., Wiedemann, M., Bobinsky, J. (2010): Beweissicherungsprogramm zum geomechanischen Verhalten von Salinarbarrieren nach starker dynamischer Beanspruchung und Entwicklung einer Dimensionierungsrichtlinie zum dauerhaften Einschluss, BMWi-FKZ: 02C1264, IfG-Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig, 31.01.2010.
- Minkley, W. & Mühlbauer, J. (2007): Constitutive models to describe the mechanical behavior of salt rocks and the imbedded weakness planes. – Proc. of the 6th Conf. on the Mechanical Behavior of Salt, 22-25 May 2007, Hannover, Germany: 19-127.
- Minkley, W.; Menzel, W. (1999): Vorausberechnung des Kollapses eines Grubenfeldes - Gebirgs-schlag Teutschenthal 11.09.1996. Proc. 9th Int. Congress on Rock Mechanics, Paris, August 1999, Vol. 2, 1115 – 1118.
- Mönig, J.; Buhmann, D.; Rubel, A.; Wolf, J.; Baltus, B.; Fischer-Appelt, K. (2012): Sicherheits- und Nachweiskonzept. Bericht zum Arbeitspaket 4. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-277, Köln.
- Ochsenius, K. (1877): Die Bildung der Steinsalzlager und ihrer Mutterlaugensalze unter specieller Berücksichtigung der Flötze von Douglasshall in der Egelu. – Pfeffer, Halle/Saale.
- Ökoinstitut (2016): Bewertung der Einführung einer wirtsgesteinsunabhängigen Grenztemperatur unter Vorsorgeaspekten - Rev. 02., Darmstadt, 31.10.2016.
- Oppo, D., Evans, S., Iacopini, D., Mainul, M., Kabir, Maselli, V., Jackson, C. (2021): Pipe trails record the history of cross-evaporite fluid escape in the northern Levant Basin, Eastern Mediterranean, Basin Research, Volume33, Issue3, June 2021, Pages 1798-1819.
- Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler, J.: Abfallspezifikation und Mengengerüst. Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung (Juli 2011). Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-278, ISBN 978-3-939355-54-0, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, September 2011.
- Pötzsch, S., Gruner, M., Kießling, T., Mischo, H. (2021): Forschung und Entwicklung - Langzeitsicherheit im Bergwerk Glückauf Sondershausen, Bergbau, 5/2021, 208 - 212.
- Popp, T., Günther, R.-M. & Naumann, D. (2022): Hydromechanical integrity of HAW-repositories in bedded and domal salt - Commonalities and differences as implications for a site selection process in Germany, SALTMECH X, Utrecht 2022 (subm.)
- Popp, T., Minkley, W., Fillinger, E. & Boettge, V. (2018): Closure of the Teutschenthal backfill mine - About the challenge to elaborate a geomechanical safety concept in salt formations. In: The Mechanical Behavior of Salt IX; Proceedings of the 9th Conference on the Mechanical Behavior of Salt (SaltMech IX), Hannover, Germany, 12-14 September 2018 (ISBN 978-3-9814108-6-0), 385-402.
- Popp, T., Minkley, W., Wiedemann, M., Salzer, K. & Dörner, D. (2015): Gas pressure effects on salt – the large scale in-situ test Merkers. – In: L. Roberts, K. Mellegard & F. Hansen (Hrsg.): Proc. of the Conference on Mechanical Behavior of Salt, Saltmech VIII, South Dakota School of Mines & Technology, Rapid City, SD, USA, 26.-28.05.2015, pp. 127–135, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02840-1.
- Popp, T., Weise, D., Salzer, K., Wiedemann, M., Günther, R., Minkley, W., Philipp, J., Dörner, D., Hotzel, S. (2012): Auswirkungen der Gasbildung im Endlager auf den ein-schlusswirksamen Gebirgsbereich. - Abschlussbericht des Forschungsvorhabens (FKZ) 3609R03222, Institutes für Gebirgsmechanik, Leipzig, im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz; Salzgitter.
- Popp, T., Salzer, K., Weise, D., Wiedemann, M. (2010): Hydraulische Barrierenintegrität von carnallitischem Salzgebirge, Kali und Steinsalz, Heft 2/2010: 16-23.
- Popp, T., Salzer, K. & Minkley, W. (2008): Influence of bedding planes to EDZ-evolution and the coupled HM properties of Opalinus clay. Physics and Chemistry of the Earth, 33, S374-S387.
- Popp, T., Wiedemann, M., Böhnelt, Minkley, W., Manthei, G. (2007): Untersuchungen zur Barriereintegrität im Hinblick auf das Ein-Endlager-Konzept. - Abschlussbericht des Vorhabens: SR 2470, Institutes für Gebirgsmechanik, Leipzig, im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz; Salzgitter.
- Popp, T., Kern, H. & Schulze, O., 2001. The evolution of dilatancy and permeability in rock salt during hydrostatic compaction and triaxial deformation. - J. Geophys. Res. 106, No. B3, 4061-4078.

- Popp, T., Kern, H. (1993): Thermal dehydration reactions characterized by combined measurements of electrical conductivity and elastic wave velocities. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 120: 43-57.
- Püttmann, W. (2012): Literaturrecherche zur thermochemischen Sulfatreduktion (TSR) – Zuarbeit zur VSG. 25 Seiten, Universität Frankfurt.
- Reichenbach, W. (2008): Langzeitsicherheitsnachweis Grube Teutschenthal. Fortschreibung Grubenfeld Salzmünde. Geologischer Teil. 30.10.2008.
- Reichenbach, W. (2005): Langzeitsicherheitsnachweis Grube Teutschenthal Fortschreibung Grubenfeld Angersdorf - Geologischer Teil. Halle, GFE-Bericht, Dez. 2005 (unveröffentlicht).
- Reinhold, K., Hammer, J. & Pusch, M. (2014): Verbreitung, Zusammensetzung und geologische Lagerungsverhältnisse flach lagernder Steinsalzfolgen in Deutschland – Zwischenbericht: 98 S.; Berlin / Hannover (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe).
- Richter-Bernburg, G. (1968): Salzlagerstätten. In Lehrbuch der angewandten Geologie, herausgegeben von A. Bentz & H.-J. Martini. Bd. 2, Teil 1, Seite 918 1061, Stuttgart 1968.
- Röckel, T., Lempp, C. (2003): Der Spannungszustand im Norddeutschen Becken, ERDÖL ERDGAS KOHLE 119. Jg. 2003, Heft 2.
- Roedder, E.; Bassett, R. L. (1981): "Problems in determination of the water content of rock-salt samples and its significance in nuclear-waste storage siting". *Geology*. V9 (11): pp 525-350.
- Rothfuchs, T. & Kessels, W. (1985): Thermophysikalische in-situ-Untersuchungen zur HAW-Einlagerung im Steinsalz, In: Gies, H. (Koordinator) Versuchseinlagerung hochradioaktiver Abfälle im Salzbergwerk Asse (Abschlussbericht zum Vertrag WAS 336-83-7D im Rahmen des Indirekten Aktionsprogramms der Europäischen Gemeinschaft für die Jahre 1983/84), GSF, S. 2-16.
- Rottlaender, G. (2013): Technik, Kapazitäten und Preisentwicklung der Untertage-Entsorgung in Deutschland. In: Aschen • Schlacken • Stäube – aus Abfallverbrennung und Metallurgie, HG: Karl J. Thomé-Kozmiensky, SBN: 978-3-935317-99-3, 678-688.
- Roveri, M., Flecker, R., Krijgsman, W., & Lofi, J. (2014): The Messinian Salinity Crisis: Past and future of a great challenge for marine sciences. *Marine Geology*, 352, 25–58. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.02.002>.
- Schindl-Neumayer, M. (1984): Gefügekundliche Studien in alpinen Salzlagern. In: Archiv für Lagerstättenforschung der Geologischen Bundesanstalt. Band 5, 1984, ISSN 0253-097X, S. 135–156.
- Schwandt, A. (1991): Zum Hauptanhydritszenario am Beispiel der NE-Flanke des Staßfurter Sattels.- GSF-Bericht 22/91, GSF - Institut für Tief Lagerung, Braunschweig.
- Seidel, G. (2003): Geologie von Thüringen. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele und Obermiller), Stuttgart.
- Siemann, M.G. (2007): Herkunft und Migration mineralgebundener Gase der Zechstein 2 Schichten in Zielitz. Kali und Steinsalz, Vol. 3, S. 26-41.
- Spiers, C.J., Grupa, J., Salzer, K., Popp, T., Stührenberg, D. (2005): Buffer / backfill in salt (long-term compaction, additives, precompated bricks), 2nd NFPRO-Workshop: Cardiff (GB)..
- StandAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 16 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist.
- Stolle, E. & Ch. Döhner (1970): Zur petrografischen Nomenklatur der Salzgesteine, *Ber. Deutsch. Ges. geol. Wiss.*, A 15, 4, 481 – 493.
- TA Abfall (1991): Zweite allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz Teil 1: Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen, biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen - Ta Abfall - vom 12.März 1991. Vom 12.März 1991.
- Völkner, E., Kühnlentz, T., Hammer, J. (2017): Entwicklung generischer geologischer Modelle für flach lagernde Salzformationen (KOSINA). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- Warren, J. K. (2017): Salt usually seals, but sometimes leaks: Implications for mine and cavern stabilities in the short and long term. *Earth-Science Reviews*, Volume 165, February 2017, Pages 302-341.
- Warren, J. K. (2016): *Evaporites - A Geological Compendium*. Springer International Publishing, 1813 p.
- Wieczorek, K.; Schwarzianeck, P. (2004): Untersuchungen zur hydraulisch wirksamen Auflockerungszone um Endlagerbereiche im Salinar in Abhängigkeit vom Hohlraumabstand und Spannungszustand. Abschlussbericht, GRS-198, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 3-931995-65-8, Braunschweig.

Will, G., Hinze, E. (1983): Entwässerungsverhalten von hydratisierten Salzphasen als Funktion des Druckes. - In: Versuchseinlagerung hochradioaktiver Abfälle im Salzbergwerk Asse; 1. Halbjahresbericht, GSF; Braunschweig.