

Salzgeologische Bewertung des Einflusses von „kryogenen Klüften“ und halokinetischen Deformationsprozessen auf die Integrität der geologischen Barriere des Salzstocks Gorleben

Bericht zum Arbeitspaket 2

Vorläufige Sicherheitsanalyse
für den Standort Gorleben

Erstellt von:



Salzgeologische Bewertung des Einflusses von „kryogenen Klüften“ und halokinetischen Deformationsprozessen auf die Integrität der geologischen Barriere des Salzstocks Gorleben

Bericht zum Arbeitspaket 2

Vorläufige Sicherheitsanalyse
für den Standort Gorleben

Jörg Hammer (BGR)
Stephanie Fleig (BGR)
Gerhard Mingerzahn (BGR)
Tatjana Kühnlenz (BGR)
Michael Mertineit (BGR)
Maximilian Pusch (BGR)
Michael Schramm (BGR)
Joachim Behlau (BGR)
Britta Zaretzki (BGR)
Jürgen Hesser (BGR)
Hua Shao (BGR)
Angelika Köthe (BGR)
Peter Vogel (BGR)

Juli 2012

Anmerkung:

Das FuE-Vorhaben UM10A03200 „Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben“ wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem Auftragnehmer. Die hierin geäußerten Meinungen müssen nicht der Meinung des Auftraggebers entsprechen.

GRS - 273
ISBN 978-3-939355-49-6

Vorbemerkung – veränderte Zielsetzungen des Projekts VSG (Stand: Dezember 2012)

Die Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) ist ein Forschungsvorhaben der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS). Sie übernimmt die wissenschaftliche und organisatorische Leitung des vom Bundesministerium geförderten Projektes und bearbeitet selbst den Hauptteil der Arbeitspakete.

Ursprüngliche Zielsetzung

In seiner ursprünglichen Konzeption wurden mit dem Projekt VSG im Wesentlichen drei Ziele verfolgt. Das erste Ziel bestand in der Erarbeitung einer systematischen Zusammenfassung des Kenntnissstands zu Gorleben. Darauf aufbauend sollte als zweites Ziel eine vorläufige Eignungsprognose erarbeitet werden. Diese Prognose sollte die Frage beantworten, ob und ggf. unter welchen Voraussetzungen am Standort Gorleben ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle betrieben werden könnte. Die Vorläufigkeit einer solchen Prognose ergibt sich dabei unter anderem zwangsläufig aus dem Umstand, dass eine endgültige Eignungsaussage nur nach einer vollständigen untertägigen Erkundung möglich ist, die in Gorleben nicht gegeben ist. Die dritte Zielsetzung der VSG bestand schließlich in der Identifizierung des noch bestehenden Bedarfs an Forschung und Entwicklung, also der standortspezifischen und standortunabhängigen Fragestellungen, die noch geklärt werden müssen.

Aktualisierte Zielsetzung

Nach Beginn des Projekts wurde im politischen Raum ein breiter Konsens darüber erzielt, dass der Standort eines zukünftigen Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle durch einen Vergleich verschiedener Standorte im Rahmen eines mehrstufigen Auswahlverfahrens gefunden werden soll. Aus dieser grundsätzlichen Entscheidung ergibt sich, dass die Frage der Eignung eines Standorts zukünftig nur noch im Vergleich mit anderen beantwortet werden kann. „Geeignet“ in diesem Sinn wird damit der Standort sein, der verschiedene grundsätzliche und vergleichsspezifische Kriterien erfüllt und sich damit als der im Hinblick auf die Sicherheit vergleichsweise beste Standort darstellt. Da diese Kriterien heute noch nicht feststehen, kann eine vorläufige Prognose einer so verstandenen Eignung für den Standort Gorleben im Rahmen der VSG nicht erarbeitet werden.

Vor diesem Hintergrund hat die GRS im Einvernehmen mit dem Bundesumweltministerium (BMU) als dem Zuwendungsgeber der VSG die Projektziele den veränderten Rahmenbedingungen angepasst. Danach bleiben die systematische Zusammenfassung des bisherigen Kenntnisstands zu Gorleben und die Identifizierung des zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsbedarfs weiterhin Ziele der VSG. Die Änderungen betreffen die nachfolgenden Punkte:

- Die ursprünglich angestrebte vorläufige Eignungsprognose für den Standort Gorleben wird nicht erarbeitet. Es wird geprüft, ob die im Vorhaben VSG entwickelten Endlagerkonzepte im Verbund mit der geologischen Barriere am Standort Gorleben oder einem hinsichtlich der geologischen Situation vergleichbaren Salzstandort aus heutiger Sicht geeignet erscheinen, die Sicherheitsanforderungen des BMU zu erfüllen.
- Ergänzt werden die bisherigen Projektziele um eine Untersuchung der Frage, welche methodischen Ansätze der VSG in einem zukünftigen Standortauswahlverfahren sinnvoll zum Vergleich von Endlagerstandorten eingesetzt werden können. Unabhängig von der konkreten Ausgestaltung des zukünftigen Standortauswahlverfahrens ist bereits heute absehbar, dass es im Verlauf eines solchen Verfahrens immer wieder erforderlich sein wird, den bis zu einem bestimmten Verfahrensschritt erreichten Wissensstand zu den einzelnen Standorten systematisch zusammenzufassen und zu bewerten.

- Außerdem soll über die ursprünglichen Zielsetzungen hinaus untersucht werden, welche der in der VSG entwickelten technischen Konzepte zur Einlagerung der radioaktiven Abfälle und zum Verschluss des Endlagerbergwerks übertragbar auf Endlagersysteme an Standorten mit anderen geologischen Gegebenheiten sind.

Aktualisierte Projektplanung

Durch den Ausstiegsbeschluss vom Mai 2011 hat sich die Prognose der zu erwartenden Gesamtmenge an wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen gegenüber jener, die zu Beginn des Projekts im Sommer 2010 anzunehmen war, erheblich verändert. Dies führte dazu, dass ein wesentlicher Teil der bis Mai 2011 durchgeführten Konzeptentwicklungen und Modellrechnungen mit den neuen Daten erneut durchgeführt und teilweise bereits fertiggestellte Teilberichte entsprechend durch aktualisierte Fassungen ergänzt werden mussten. Dieser zusätzliche Aufwand und die oben erwähnten Ergänzungen in der Zielsetzung der VSG führen dazu, dass das Projekt nicht – wie ursprünglich vorgesehen – Ende 2012 sondern Ende März 2013 abgeschlossen werden kann.

Projektpartner

Da für die Bearbeitung der VSG spezialisiertes Fachwissen unterschiedlicher Disziplinen notwendig ist, sind neben der GRS verschiedene Partner in das Projekt eingebunden. Dazu zählen: Dr. Bruno Baltes, die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), die DBE TECHNOLOGY GmbH (DBE TEC), das Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal (TUC), das Institut für Endlagerforschung der TU Clausthal (TUC), das Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IfG), das Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec), das Karlsruher Institut für Technologie/Institut für Nukleare Entsorgung (KIT/INE), die international nuclear safety engineering GmbH (nse; mehrere Institute der RWTH Aachen) sowie das Institut für Atmosphäre und Umwelt (IAU) der Universität Frankfurt.

Arbeitspakete

Die Übersicht der Arbeitspakete (AP) der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) umfasst:

- AP 1: Projektkoordination
- AP 2: Geowissenschaftliche Standortbeschreibung und Langzeitprognose
- AP 3: Abfallspezifikation und Mengengerüst
- AP 4: Sicherheits- und Nachweiskonzept
- AP 5: Endlagerkonzept
- AP 6: Endlagerauslegung und -optimierung
- AP 7: FEP-Katalog
- AP 8: Szenarienentwicklung
- AP 9: Integritätsanalysen
- AP 10: Analyse Freisetzungsszenarien
- AP 11: Bewertung Human Intrusion
- AP 12: Bewertung der Betriebssicherheit
- AP 13: Bewertung der Ergebnisse
- AP 14: Empfehlungen

Deskriptoren:

Anhydrit, Barriere, Boudinage, Deformation, Gorleben, Gorleben-Bank, Integrität, Klüfte, Langzeitsicherheit, Salzgeologie

Inhaltsverzeichnis

	Kurzfassung	1
1	Einleitung.....	3
2	Untersuchungen zur Genese der „kryogenen Klüfte“ im Salzstock Bokeloh und zur Übertragbarkeit dieser Kluffbildungsprozesse auf den Salzstock Gorleben	5
2.1	Einführung.....	5
2.2	Bisheriger geologischer Kenntnisstand zu den „kryogenen Klüften“	6
2.3	Regional- und strukturgeologische Befunde zur Genese des Salzstocks Bokeloh	9
2.3.1	Geologisches Umfeld der Salzstruktur Bokeloh.....	9
2.3.2	Vergleich des geologischen Umfeldes und der strukturellen Entwicklung der Salzstöcke Bokeloh und Gorleben.....	12
2.3.3	Äußere Form und Internbau des Salzstocks Bokeloh.....	15
2.4	Mikropaläontologische Untersuchungen an Klufffüllungen aus den „kryogenen Klüften“ des Salzstocks Bokeloh.....	18
2.5	Mikroskopische Untersuchungen der „kryogenen Risse“.....	22
2.6	Ergebnisse von Modellrechnungen zu den Auswirkungen von Inlandvereisungen.....	26
2.7	Zusammenfassung der Ergebnisse und Konsequenzen für den Salzstock Gorleben	29
3	Untersuchungen zur Deformation von Anhydrit-Schichten beim Salzaufstieg	33
3.1	Einführung.....	33
3.2	Fallstudie Boudinage des Anhydritmittelsalzes im ERA Morsleben.....	35
3.3	Experimentelle Untersuchungen zur Boudinage anhydritischer Schichten	40
3.4	Ausbildung, Deformation und Lösungsführung der Gorleben-Bank.....	42

3.4.1	Einführung.....	42
3.4.2	Lithologischer Aufbau, Ausbildung und Mächtigkeit der Gorleben-Bank ..	43
3.4.3	Lösungsvorkommen im Erkundungsbergwerk Gorleben, die der Gorleben-Bank und ihrem unmittelbaren Umfeld zugeordnet werden	54
3.4.4	Untersuchungen der Permeabilität der Gorleben-Bank	63
3.5	Zusammenfassende Bewertung der Untersuchungen zur Deformation ...	68
	Literaturverzeichnis	73
	Abbildungsverzeichnis	83

Kurzfassung

In mehreren, im Umfeld von Hannover gelegenen, Salzstöcken wurden Risse nachgewiesen, für deren Entstehung eine thermisch induzierte Rissbildung infolge von Kaltzeiten („kryogene Klüfte“) als eine Möglichkeit diskutiert wird. Zwecks Überprüfung dieser Hypothese zur Genese der Klüfte und zur Klärung der Übertragbarkeit derartiger Klüftbildungen auf den Salzstock Gorleben erfolgten exemplarisch für den Salzstock Bokeloh umfangreiche stofflich-strukturelle Analysen. Ausgehend von den neuen Ergebnissen strukturgeologischer, mineralogisch-geochemischer und mikropaläontologischer Untersuchungen sowie von thermomechanischen Modellierungen ist eine nur thermisch induzierte Rissbildung infolge von Kaltzeiten für den Salzstock Bokeloh unwahrscheinlich. Es ergibt sich ein direkter Zusammenhang zwischen der Genese des Salzstocks Bokeloh, seiner regionaltektonischen Lage und der Rissbildung. Da der Salzstock Gorleben eine andere Genese und vor allem eine andere regionaltektonische Lage aufweist, wird die Existenz von „kryogenen Klüften“ für den Salzstock Gorleben ausgeschlossen. Außerdem werden die in den letzten Jahren erzielten salzgeologischen und experimentellen Untersuchungsergebnisse zur Deformation von Anhydrit-Schichten (Gorleben-Bank, Anhydritmittel) in Salzstöcken zusammenfassend dargestellt und hinsichtlich ihrer langzeitsicherheitlichen Konsequenzen (Lösungszutrittsszenarien über bis in das grundwasserführende Deckgebirge reichende Anhydritschichten) für ein potenzielles Endlager für hochradioaktive, wärmeentwickelnde Abfälle im Salzstock Gorleben diskutiert. Die noch nicht abgeschlossenen Untersuchungen bestätigen die Ergebnisse älterer Arbeiten der BGR, wonach die anhydritischen Schichten der Leine-Folge keine hydraulisch wirksamen Wegsamkeiten über weite Entfernungen darstellen. Ursache dafür sind die durch den Salzaufstieg hervorgerufenen Deformationsprozesse. Die dem Hauptanhydrit und der Gorleben-Bank zugeordneten Lösungsvorkommen sind als intrasalinare, während des Salzaufstiegs in den Salzschichten partiell umverteilte und lokal begrenzte Lösungsvolumina anzusehen.

1 Einleitung

Im Hinblick auf die potenzielle Eignung des Salzstockes Gorleben für die Errichtung eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle werden häufig Lösungszutrittsszenarien mit daran gebundenen Radionuklid-Freisetzungen in die Biosphäre über den Hauptanhydrit („Hauptanhydrit-Szenario“) und die Gorleben-Bank diskutiert. Ein weiteres Diskussionsthema für ein Endlager in Salzformationen ist die Übertragung der in einigen Salzstöcken im Umfeld von Hannover beobachteten, hinsichtlich ihrer Genese umstrittenen „kryogenen Klüfte“ auf andere Salzstöcke Norddeutschlands. Diese Überlegungen beruhen auf der Hypothese, dass die im Salzstock Bokeloh bis in eine Tiefe von ca. 600 m unter Geländeoberkante (u. GOK) nachgewiesenen Klüfte möglicherweise auf thermisch induzierte Rissbildung infolge von Kaltzeiten zurückzuführen sind /BAU 91/ .

In diesem Bericht werden die wichtigsten seit November 2010 von der BGR erzielten Ergebnisse salzgeologischer Untersuchungen zum Einfluss von salztektonischen Deformationsprozessen und glazigenen Prozessen auf die Integrität der geologischen Barriere des Salzstocks Gorleben zusammenfassend dargestellt. Eine ausführliche Zusammenstellung von langzeitsicherheitsrelevanten Ergebnissen dieser salzgeologischen Untersuchungen erfolgt in Berichten, die im Rahmen des Projektes „Weitererkundung Gorleben“ von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS, Salzgitter) erarbeitet werden.

Ein Schwerpunkt dieses Berichtes ist die Darstellung neuer mineralogisch-geochemischer, mikropaläontologischer und strukturgeologischer Untersuchungsergebnisse zur Klärung der Genese der „kryogenen Klüfte“, die exemplarisch im Salzstock Bokeloh untersucht wurden, sowie zur Übertragbarkeit dieser Klüftbildungen auf den Salzstock Gorleben. Einen weiteren Schwerpunkt bilden neue mineralogisch-geochemische und experimentelle Untersuchungsbefunde zur Deformation von anhydritischen Gesteinen, inkl. Untersuchungen zur Ausbildung, Deformation und hydraulischen Durchlässigkeit der Gorleben-Bank.

2 Untersuchungen zur Genese der „kryogenen Klüfte“ im Salzstock Bokeloh und zur Übertragbarkeit dieser Klufthilungsprozesse auf den Salzstock Gorleben

2.1 Einführung

Ein wichtiger Aspekt bei der langzeitsicherheitlichen Nachweisführung für einen Salz-, Ton- oder Granitstandort hinsichtlich seiner Eignung als potenzieller Endlagerstandort für hochradioaktive wärmeentwickelnde Abfälle ist die Klärung der Möglichkeiten der Bildung von „kryogenen Klüften“ mit Tiefenreichweiten von mehreren hundert Metern im Ergebnis großflächiger Inlandsvereisungen. Ausgangspunkt für diese Überlegungen ist eine Publikation von /BAU 91/, der die im Salzstock Bokeloh (ca. 25 km westlich von Hannover) festgestellten, bis ca. 600 m u. GOK reichenden und partiell eine Tonfüllung aufweisenden Klüfte mit glazigenen Prozessen in Verbindung brachte.

Die von /BAU 91/ auch für die Salzstöcke Lehrte-Sehnde (SE von Hannover) und Benthe (SW von Hannover) beschriebenen „kryogenen Klüfte“ sind rezent durch Salzmineralisationen, saline Lösungen und/oder Toneinlagerungen gefüllt. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte (-11 bis -15 ‰) und die δD -Werte (ca. -65 ‰) der aus Klüften im Salzstock Bokeloh entnommenen Fluidproben deuten nach /DEL 96/ auf einen kaltzeitlichen Ursprung der Fluide hin. Der nicht den Tonlagen der Salinarformation zuzuordnende Tonanteil weist auf einen jungen tertiären/quartären Sedimenteintrag hin. Folglich müssen lokale Wegsamkeiten aus dem grundwasserführenden Deckgebirge und den Oberflächengewässern bis in tiefere Bereiche des Salzstockes existiert haben. Da derartige Klufthilungen möglicherweise zu einer erheblichen Reduzierung der Barrierenmächtigkeit führen können, muss für ein geplantes Endlager ausgeschlossen sein, dass diese Klüfte den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) /AKE 02/ erreichen.

Bei seinen Vermutungen zur Genese der Klufthilungen weist /BAU 91/ darauf hin, dass neben Klufthilungen, die auf tektonische Vorgänge während des Salzaufstiegs und den Kontakt von unterschiedlich kompetenten Salinargesteinen zurückgeführt werden können, auch Klüfte als Folge einer starken Abkühlung (Kontraktion) der salinaren Gesteine während einer Vereisung denkbar sind. Gleichzeitig wird vermerkt, dass diese Genesevorstellung „... eine mit einigen Imponderabilien behaftete Theorie und in erster Linie als Denkanstoß zu sehen ...“ ist und ergänzende mineralogisch-geochemische Untersuchungen erforderlich seien.

Zur Klärung der Genese der „kryogenen Klüfte“ im Salzstock Bokeloh und zur Überprüfung einer eventuellen Übertragbarkeit derartiger Kluffbildungen auf den Salzstock Gorleben wurden durch die BGR in Zusammenarbeit mit K+S komplexe stofflich-strukturelle Untersuchungen der im Kalisalzbergwerk Sigmundshall (Salzstock Bokeloh) aufgeschlossenen Kluffbildungen durchgeführt. Parallel dazu erfolgten vergleichende Analysen der struktur- und regionalgeologischen Entwicklung der Salzstöcke Bokeloh und Gorleben, die unter Berücksichtigung der Ergebnisse thermomechanischer Modellrechnungen zu den Auswirkungen von Permafrost und Inlandvereisungen auf den Salzstock Gorleben interpretiert werden.

Annähernd zeitgleich und unabhängig von den Arbeiten der BGR haben /BOE 10/ den Kenntnisstand zu den „kryogenen Klüften“ zusammengefasst und numerische Untersuchungen zur Klärung ihrer Genese durchgeführt. Als Ergebnis der numerischen Berechnungen ließ sich das Phänomen „kryogene Klüfte“ nicht ausschließlich über thermische Effekte erklären.

2.2 Bisheriger geologischer Kenntnisstand zu den „kryogenen Klüften“

/BAU 91/ beschrieb für einige Salzstöcke in der Umgebung von Hannover (Nordhälfte von Benthe, Bokeloh und Lehrte-Sehnde) Kluffbildungen in den nicht kompetenten Steinsalzschiefern, aber auch in anderen Salinarschichten, die bis ca. 600 m u. GOK reichen. In vielen Fällen weisen diese Klüfte kleinere Laugenzutritte auf und lassen sich über mehrere Abbausohlen, d. h. über größere Teufenbereiche hinweg verbinden. In /BAU 91/ werden lediglich für den Salzstock Bokeloh aus relativ oberflächennah gelegenen Abbauen des Kalisalzbergwerkes Sigmundshall Klüfte mit einer z. T. tonig ausgebildeten Klufffüllung detailliert beschrieben. Diese meist steil stehenden, relativ weit aushaltenden Kluffbildungen stellen zum gegenwärtigen Zeitpunkt verheilte Klüfte dar und können demzufolge nicht zu einem Zutritt von Deckgebirgslösungen, d. h. zu einem „Absaufen“ des Bergwerkes führen. Die Klüfte sind demzufolge ein natürliches Analogon für die Selbstverheilung im Salzgestein. Im Herbst 2009 wurden diese Klüfte in Teufen von ca. 290 m u. NN, d. h. auf der 350 m-Sohle des Kalisalzbergwerkes Sigmundshall, für die Untersuchungen der BGR beprobt.

Die bis zu Beginn der BGR-Untersuchungen vorliegenden Informationen zu den Kluffbildungen in den Salzstöcken Bokeloh, Lehrte-Sehnde und Benthe im Umfeld von Hannover /BAU 91/ gestatten keine abschließenden Aussagen zum Vorkommen und

zur Verbreitung von tongefüllten Klüften in diesen Salzstöcken. Die z. B. für den Salzstock Lehrte-Sehnde (nahe Schacht Bergmannsseggen; /BAU 91/ S. 1255, Abb. 7) oder verallgemeinernd für die norddeutschen Salzstöcke (/BAU 91/ S. 1257, Abb.9) entworfenen Darstellungen zur Häufigkeit sowie zur Horizontal- und Teufenverbreitung der Klüfte enthalten keine Angaben zur Zusammensetzung der Kluffüllungen. Unklar ist deshalb, welcher Teil der in den Abbildungen dargestellten verheilten Klüfte auf den Salzaufstieg und die daran gebundenen Deformations- und Verheilungsprozesse zurückzuführen ist. Auf der Grundlage des bisher zugänglichen Datenmaterials ist demnach eine faktisch gesicherte abschließende Aussage zur teufenabhängigen Verbreitung von Tonfüllungen in den Klüften dieser Salzstöcke und zur Kluffgenese nicht möglich. Möglicherweise lassen die schlechteren Aufschlussverhältnisse in den Salzstöcken Lehrte-Sehnde und Benthe (im Salzstock Benthe liegt die oberste Abbausohle bei 427 m u. GOK) eine Trennung von tongefüllten und tonfreien verheilten Klüften und damit eine Aussage zur Teufenverteilung ersterer auch nicht zu. Bei /BAU 91/ fehlen Angaben zum geologischen Umfeld und zu den Gesteinstypen, in denen die Klüfte nachgewiesen wurden. Eine genetische Zuordnung der Klüfte erfordert jedoch neben genauen Angaben zur Kluffausbildung bzw. -füllung vor allem auch Informationen zu den konkreten geologischen Rahmenbedingungen für die aufgefundenen Klüfte, wie z. B. Abstand zu kompetenten Schichten, strukturgeologische Situation im Umfeld der Klüfte, Abhängigkeit des Vorkommens der Klüfte von der Stratigraphie und Verfaltung der betroffenen Salzgesteine. Auf der Grundlage der aufgezeigten geringen Datendichte ist, auch in Übereinstimmung mit Aussagen der vor Ort tätigen Betriebsgeologen, ohne eine systematische Neukartierung der Kluffbildungen eine Ableitung der maximalen Teufenerstreckung der nach /BAU 91/ möglicherweise kryogen gebildeten, z. T. tongefüllten Klüfte (bis 600 m Teufe) /WOL 12/ nicht möglich.

Die Kluffweiten der von /BAU 91/ detailliert beschriebenen, partiell tongefüllten Klüfte in den halitischen Salzgesteinen des Salzstocks Bokeloh betragen in der Regel nur wenige Millimeter, selten über einen Zentimeter (Abb. 2.1) und nehmen bei zunehmender Teufe deutlich ab.



Abb. 2.1 Ausbildung der von /BAU 91/ als „kryogene Klüfte“ bezeichneten Rissbildungen im Salzstock Bokeloh (Kalisalzbergwerk Sigmundshall, 350 m-Sohle)

Fotos: HOLLÄNDER. Durch Anschnitteffekte erscheinen die maximal 10 mm mächtigen Klüfte auf den Fotos etwas mächtiger.

Aufgrund des 150 m betragenden Sicherheitspfeilers zum Salzspiegel sind die oberflächennahsten Aufschlüsse der tongefüllten Klüfte im Salzstock Bokeloh in einer Tiefe von ca. 290 m u. NN zugänglich. Im Gegensatz zu den tieferen Sohlen weisen die Klüfte hier vereinzelt schlauchartige, wenige Zentimeter breite, rekristallisierte Aufweitungen mit Querschnitten bis zu einigen Quadratzentimetern auf. Diese Aufweitungen sind auf das Eindringen von salzuntersättigten Wässern aus dem Deckgebirge zurückzuführen. Durch Auflösung der die Klüfte unmittelbar umgebenden Salzgesteine kommt es zur lokalen Aufweitung der sonst nur wenige mm breiten Klüfte und zur Aufsättigung der Wässer mit NaCl. Im Bereich dieser nur im oberflächennahen Bereich des Salzstocks beobachteten Aufweitungen sind z. T. größere Mengen von tonigem bis gröberklastischem Material in die Klüfte eingetragen worden.

Auf tiefer gelegenen Sohlen sind die Klüfte nur noch als wenige mm breite, feine Risse wahrnehmbar (Abb. 2.1) und überwiegend mit sekundärem Halit verheilt, dessen Kristallgröße die des Nebengesteins übertrifft. Teilweise werden im Zentralbereich derartiger Klüfte bzw. Risse auch andere Salzminerale, wie z. B. Polyhalit oder Kainit, kleine

Hohlräume mit Salzlösungen und gelegentlich grauer, unverfestigter, Mikrofossilien führender Ton beobachtet (Kap. 2.5).

Die Klüfte haben in der Regel ein steiles Einfallen und streichen überwiegend senkrecht zur Haupterstreckung der Salzstruktur, d. h. quer zur Längsachse des Salzstocks. Derartige steilstehende Klüfte sind aus geomechanischer Sicht in Salzgesteinen nur als Zugspannungsrisse infolge von Thermokontraktion und/oder als Hydrofrac-Bildungen zu erklären. Bei der geologischen Kartierung wurden sehr selten horizontale Risse beobachtet, die nach Informationen von K+S auf Entlastungsprozesse wahrscheinlich während eines Eisrückzuges zurückgeführt werden. In dem von /BAU 91/ näher untersuchten Salzstock Bokeloh sind trotz günstiger Aufschlussverhältnisse (d. h. relativ lange Erstreckung des Bergwerkes in Streichrichtung des Salzstocks) die als „kryogene Klüfte“ bezeichneten Bildungen sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Erstreckung nur auf bestimmte Bereiche des Salzstocks beschränkt. Auffällig ist, dass sich die Klüftbildungen auf den Teil des Salzstocks beschränken, auf den der Bad Nenndorfer Graben zuläuft (Kap. 2.3.3). Eine Bindung der „kryogenen Klüfte“ an den Kreuzungsbereich des Salzstocks mit einer mächtigen salzstockexternen Störungszone wird auch für die anderen von /BAU 91/ genannten Salzstöcke vermutet. Aus der Karte des strukturgeologischen Umfeldes der Salzstöcke im Raum Hannover (Kap. 2.3.3) wird deutlich, dass auch die Salzstöcke Lehrte-Sehnde und Benthe durch quer auf die Struktur zulaufende Grabenbildungen charakterisiert sind.

2.3 Regional- und strukturgeologische Befunde zur Genese des Salzstocks Bokeloh

2.3.1 Geologisches Umfeld der Salzstruktur Bokeloh

Die Salzstrukturen Bokeloh, Sarstedt, Lehrte, Sehnde und Benthe liegen in der Nähe von Hannover (Abb. 2.2). Strukturgeologisch bildet dieser Bereich den Übergang zwischen dem südwestlichen Teil des Niedersachsen-Beckens und der sich südlich daran anschließenden Mittelgebirgsschwelle bzw. dem norddeutschen Bergland.

Charakteristisch für diese Grenzregion ist das komplexe Strukturmuster des Untergrundes (Abb. 2.3). Dabei folgen die Sockelstörungen zwei gegensätzlichen Richtungs-trends. Das westlich von Hannover liegende Steinhuder Meer-Lineament, dem der Salzstock Bokeloh aufsitzt, streicht herzynisch in NW-SE-Richtung und setzt sich in der

Stemmerberg-Überschiebung fort. Dagegen verläuft der östlich von Hannover liegende Strukturzug Sarstedt-Sehnde-Lehrte rheinisch in ENE-WSW-Richtung /KOC 84/ S. 4.

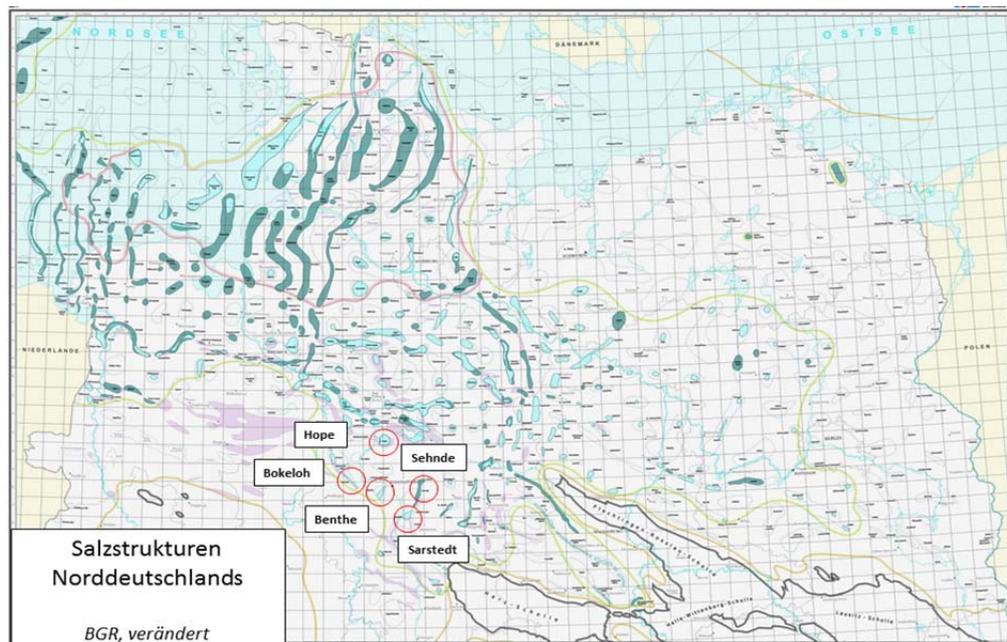


Abb. 2.2 Lage der von /BAU 91/ im Bezug auf „kryogene Klüfte“ genannten Salzstöcke am südlichen Rand des Niedersächsischen Beckens

Auf der Grundlage von /BGR 08/

Diese Differenzierung des Sockels durch NW-SE- und ENE-WSW-streichende Elemente erfolgte ab dem Buntsandstein. Die Differentialbewegungen der Sockelschollen sind für den Keuper nachgewiesen und verstärkten sich noch während des Oberjuras und der Unterkreide. Während des Coniac-Santon (Oberkreide) kehrte sich die Bewegungsrichtung an den Störungen unter dem Einfluss des zu dieser Zeit kompressiv wirkenden Hauptspannungsfeldes und der damit verbundenen Inversionstektonik im gesamten Niedersächsischen Becken um (/KOC 84/ S. 5). Diese Inversion beeinflusste auch die Salzstrukturen der Region Hannover. Alle Salzstöcke in der Region Hannover sind kompressiv überprägt worden, was z. B. an in das Nebengebirge eingespießten Salzkeilen (Sehnde) oder an Überschiebungen im Deckgebirge erkennbar ist.

Im Raum Hannover wurden nachfolgend Oberkreidesedimente und tertiäre Sedimente des Oberpaläozän, Eozän, Mitteloligozän und Miozän abgelagert, jedoch durch Meeresspiegelabsenkungen und die Kippung des gesamten westlichen Niedersachsen-Beckens nach Norden während des Miozäns und Pleistozäns wieder abgetragen. Sie

sind daher heute größtenteils nur noch als Relikte in den Randsenken der Salzstrukturen oder in Grabenstrukturen vorhanden.

Eine quantitative Abschätzung der Bewegungsbeträge in der Kreide und im Tertiär ist daher schwierig, weil die tiefgründige präcampane und prätertiäre Abtragung sowie die wiederholten Abtragsphasen während des Tertiärs gerade diejenigen Sedimente erodiert haben, an denen durch Mächtigkeitsunterschiede und Verbreitungsgrenzen die strukturelle Entwicklung in dieser Zeit erkennbar wäre /BAD 01/.

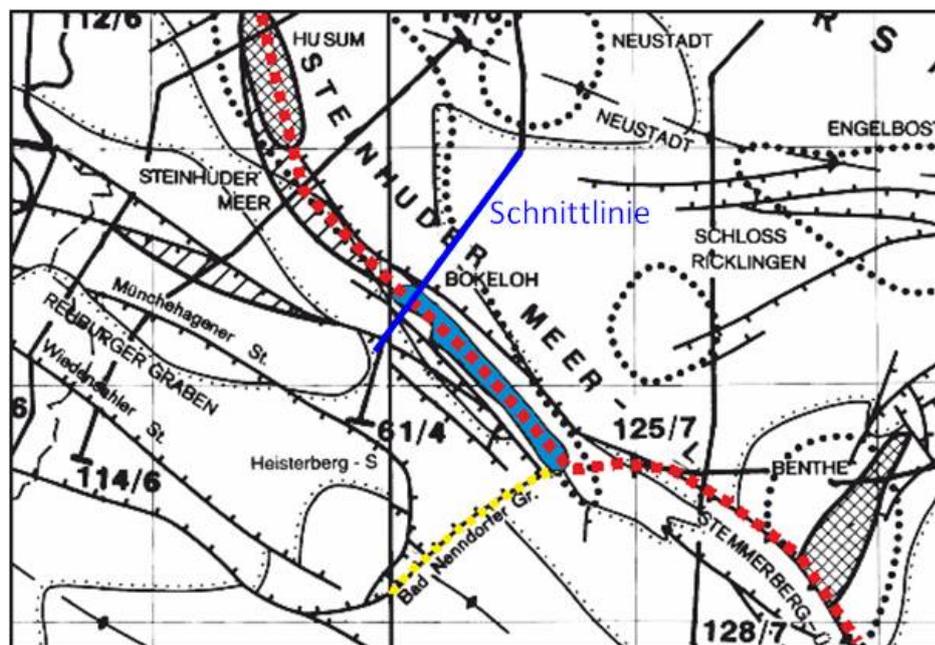


Abb. 2.3 Lage des Salzstocks Bokeloh (blau, ca. 12 km lang)

Salzstock Bokeloh am Kreuzungspunkt der SE-Grabenrandstörung des Bad Nenndorfer Grabens (gelb, NE-SW-Streichen) und des Steinuder Meer-Lineaments (rot, NW-SE-Streichen). Dunkelblaue Linie – Lage des Schnitts in Abb. 2.4 /BAD 01/, ergänzt.

Der Absenkung des Niedersachsen-Beckens am Ende des Tertiärs steht die gegenläufige Bewegung des südlich gelegenen Berglandes gegenüber. Für den Harz konnte nachgewiesen werden, dass marines Oligozän in den Karstfüllungen des Elbingeröder Komplexes am Hartenberg in 510 m Höhe auftritt und damit eine Höhendifferenz von ca. 300 m zum nächstgelegenen marinen Oligozän im Wienröder Becken direkt am Harznordrand festzustellen ist. Mit dieser Referenzfläche ist nachzuweisen, dass der Harzblock seit dem Oligozän um 300 m angehoben wurde /KÖN 05/, zitiert in /FRA 06/ S. 97.

2.3.2 Vergleich des geologischen Umfeldes und der strukturellen Entwicklung der Salzstöcke Bokeloh und Gorleben

Der langgezogene Salzstock Bokeloh liegt im Bereich einer Kreuzung von bis in den Sockel reichenden Störungszonen (Abb. 2.3). Er sitzt dem NW-SE streichenden Steinhuder Meer-Lineament auf. Quer zum SW-Teil der Struktur Bokeloh verläuft der NE-SW-streichende Bad Nenndorfer Graben. Die SE-Grabenrandstörung fällt listrisch gegen NW ein, reicht bis in den Sockel und versetzt die Zechsteinbasis um fast 500 m /BAD 01/. Die Absenkung an dieser Störung begann im Dogger und war besonders stark während und möglicherweise auch nach der Unterkreide. Die NW-Randstörung des Bad Nenndorfer Grabens ist dagegen deutlich weniger stark ausgeprägt /KOC 84/ S. 13.

Die Entwicklung des Salzstocks Bokeloh wurde maßgeblich durch seine regionaltektonische Lage beeinflusst. Schon /BOI 68/ S. 13 vermuteten, dass an diesem Kreuzungspunkt zweier tektonischer Richtungen auch tertiäre Bewegungen stattgefunden haben, bei denen der NW-Block abgesenkt bzw. der SE-Block relativ herausgehoben wurde. Der Nachweis solcher Bewegungen ist jedoch schwierig: Der Bad Nenndorfer Graben wurde im Zuge der oberkretazischen Inversion als Ganzes herausgehoben und vor dem Campan und an der Grenze Kreide-Tertiär tiefgründig abgetragen. Anzeichen für gegensätzlich orientierte Blockbewegungen finden sich auch im Internbau des Salzstocks, z. B. in der Beobachtung von Indikationen für ein daran gebundenes Nachfließen des Salzes in nördlicher Richtung.

Die ursprünglich abgelagerten Sedimente des Eozän, Mitteloligozän und Miozän wurden infolge der jungtertiären Kippung wieder vollständig abgetragen, so dass sich mögliche Bewegungen an der Grabenrandstörung während des Tertiärs heute nicht mehr anhand der Tertiärbedeckung datieren lassen /BAD 01/. Über der Salzstruktur wurde Oligozän abgelagert, das dort in Relikten rezent noch vorhanden ist und in den Bohrungen Kolenfeld 3 und 5 nachgewiesen wurde. Jüngeres Tertiär konnte über der Struktur nicht nachgewiesen werden. Im Quartär wurde die Salzstruktur durch den elster- und saalezeitlichen Eisvorstoß überfahren, der Weichsel-Gletscher erreichte den Salzstock nicht /STA 01/.

Die äußere Form und der Internbau des Salzstocks sind durch die tektonische Beanspruchung am Rand des Niedersächsischen Beckens beeinflusst, insbesondere durch die kompressive Überprägung während der Oberkreide und die Hebung des südlich

des Salzstocks gelegenen Berglandes gegen Ende des Tertiärs. Eine detaillierte Darstellung der verschiedenen Phasen der geologischen Entwicklung der Salzstruktur Bokeloh ist in /BAD 01/ enthalten.

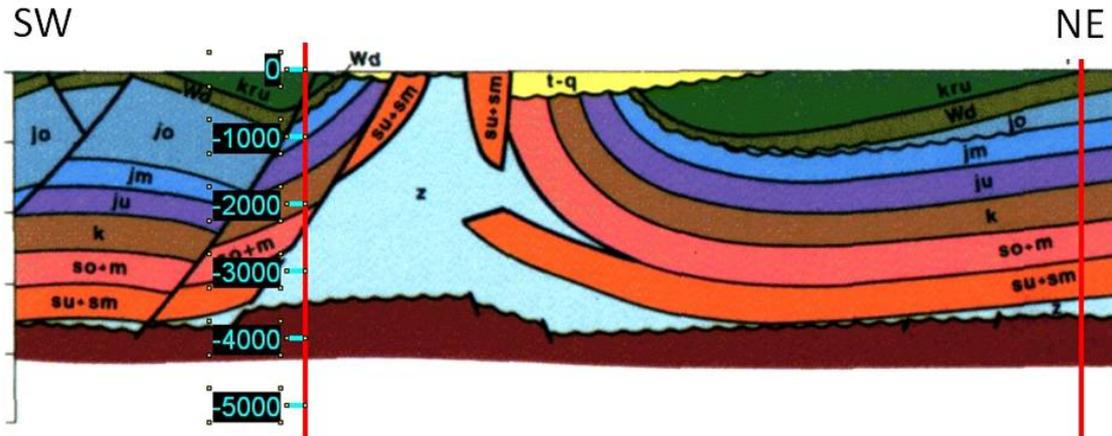


Abb. 2.4 Schnitt durch den nördlichen Teil des Salzstocks Bokeloh

Schnitt Nr.1 in Abb. 2.8, Teufenangaben in m, Lage des Schnittes siehe Abb. 2.3 und Abb. 2.8 /BAD 01/.

Der in diesem Schnitt auf der NE-Flanke eingezeichnete Salzkeil wird auf der Grundlage neuerer Auswertungen von relexionsseismischen Daten als partielle Aufschleppung von Hauptanhydrit-Blöcken gedeutet (Abb. 2.7).

Die im Vergleich zu Bokeloh viel größere und breitere Salzstruktur Gorleben-Rambow liegt dagegen im zentralen Bereich des Niedersächsischen Beckens. Größere Störungen im Deckgebirge sind aus dem Umfeld von Gorleben nicht bekannt (Abb. 2.5). Auch Bewegungen an Sockelstörungen spielen für die Entwicklung des Salzstocks Gorleben-Rambow und der benachbarten Salzstrukturen nur eine untergeordnete Rolle /ZIR 91/ S. 7.

Die Genese des Salzstocks Gorleben ist geprägt durch einen halokinetischen Salzaufstieg, der durch eine Hebung des gesamten Gebietes im Jura und die daraus resultierende Erosion des überlagernden Deckgebirges initiiert wurde /KÖT 07/ S. 173. Die asymmetrische Außenform mit dem Überhang im SE ist keine Folge kompressiver Überprägung während der Oberkreide, sondern das Resultat asymmetrischen Salzzuflusses bevorzugt von SE (Abb. 2.6).

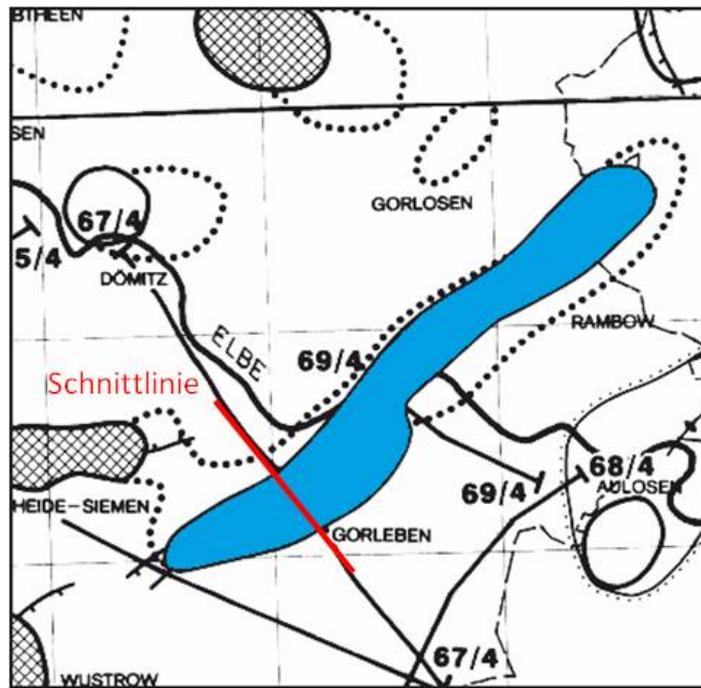


Abb. 2.5 Lage des Salzstocks Gorleben-Rambow (blau, ca. 30 km lang)

Gleicher Maßstab wie Abb. 2.3. In rot dargestellt ist die Schnittlinie des Querprofils in Abb. 2.6 /BAD 01/.

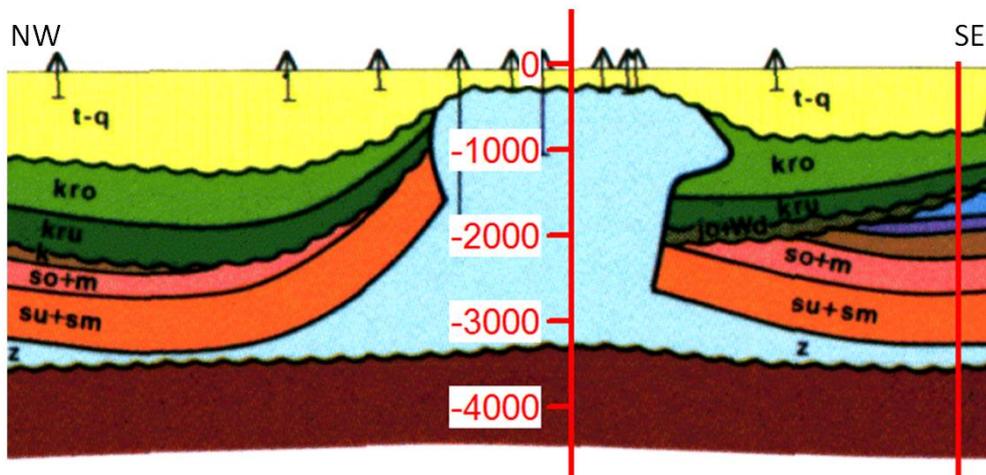


Abb. 2.6 Querprofil durch den Salzstock Gorleben

Teufenangaben in m, Lage des Schnittes siehe Abb. 2.5 /BAD 01/.

2.3.3 Äußere Form und Internbau des Salzstocks Bokeloh

Der Salzstock Bokeloh erstreckt sich über eine Länge von ca. 12 km und besitzt eine mittlere Breite von ca. 1 km. Der geologische Bau des schmalen Salzstocks wird deutlich durch die Inversionsbewegungen während der Oberkreide geprägt. Durch die Tiefbohrung Kolenfeld Z1 wurde die Salzbasis in einer Tiefe von 3300 m nachgewiesen /HOL 08/.

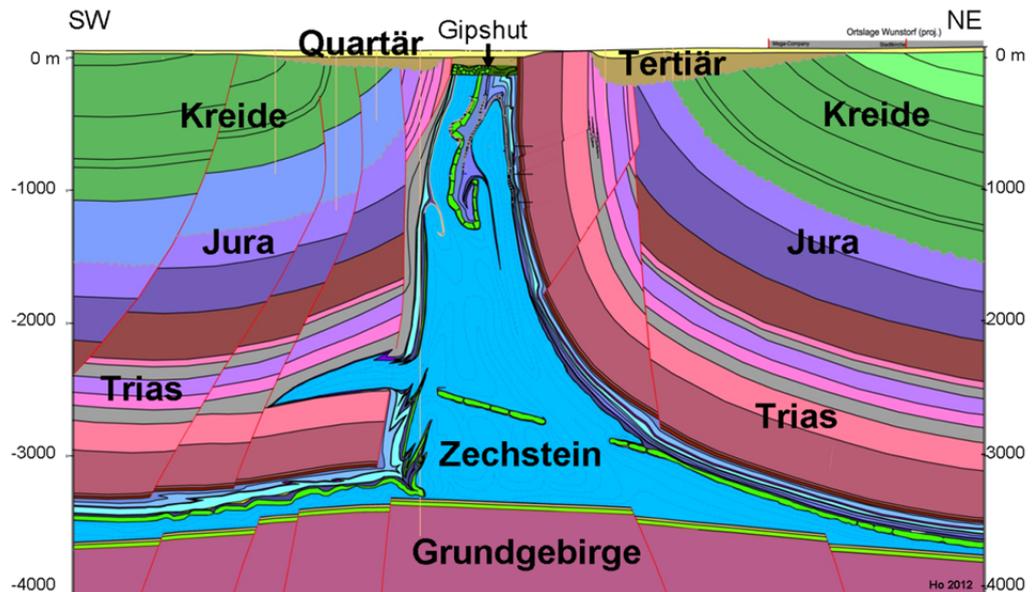


Abb. 2.7 Schnitt durch den südlichen Teil des Salzstocks Bokeloh

Schnitt Nr. 2 in Abb. 2.8; Teufenangaben in m, Lage des Schnittes siehe Abb. 2.8 (durch K+S zur Verfügung gestellt).

Die Flanken sind asymmetrisch ausgebildet (Abb. 2.4 und Abb. 2.7). An der NE-Flanke grenzen die jüngeren Schichten des Zechsteins (Aller-Folge) konkordant und überwiegend ungestört an die Basis des steil aufgerichteten, meist senkrecht einfallenden Buntsandsteins. Erst in 1400 m Tiefe beginnt die Grenze der Salinarstruktur mit 80° nach NE einzufallen. Die SW-Flanke wird dagegen von einer Abschiebung gebildet, die mehr als 3 km Sprunghöhe aufweist. Diese stellt eine listrische Fläche dar, die an der Tagesoberfläche mit 70° bis 75° und zur Tiefe mit 60° bis 65° nach SW einfällt und jünger ist als die Querstörungen, welche die SW-Flanke zerlegt haben. Entlang der beiden Flanken des Salzstockes sind Schollen von Unterem und Mittlerem Buntsandstein an steilen Störungen empor geschleppt worden (Abb. 2.7), siehe auch /BAL 98/.

Der Internbau des Salzstocks Bokeloh ist durch das Grubengebäude des Kaliwerks Sigmundshall bis in 1400 m Teufe erschlossen. Im zentralen Teil des Salzstocks ist ein Staßfurt-Steinsalz-Sattel mit nach NE ausgestülpten Nebensätteln ausgebildet. Zwischen dem Kernsattel und den Nebensätteln liegen Mulden mit mächtigen Anstauungen der Kaliflöze Staßfurt und Ronnenberg. Die SW-Flanke ist dagegen durch extreme Ausdünnungen der Schichtfolgen einschließlich der Kaliflöze gekennzeichnet /HOL 08/. Außerdem sind am SW-Salzstockrand Zechstein-fremde Salze (Röt- und Malm-Salinar) in den Diapir eingebaut /BAD 01/ (Abb. 2.7).

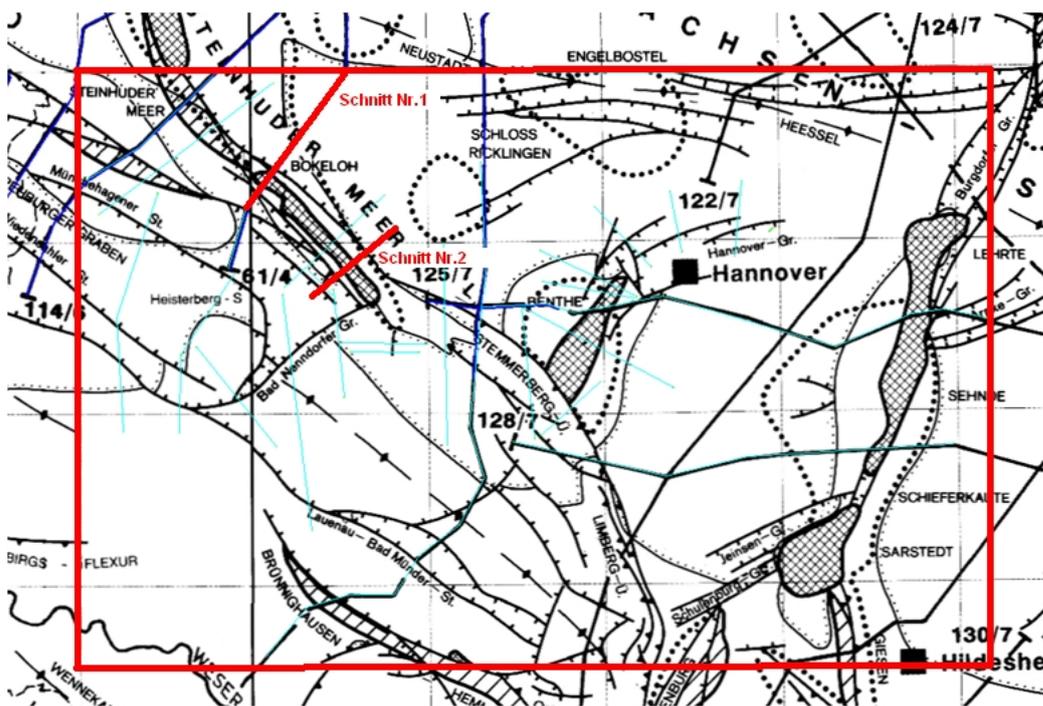


Abb. 2.8 Modellgebiet für die Erstellung des geologischen 3D-Modells in den Ausmaßen 58 km x 38,5 km

Mit Lage der geologischen Schnitte 1 und 2 (Abb. 2.4 und Abb. 2.7).

Zur besseren Darstellung der geologischen Gegebenheiten im Salzstock Bokeloh und in seinem Umfeld wurde von der BGR damit begonnen, ein geologisches 3D-Modell zu erarbeiten. Das Modellgebiet umfasst eine Fläche von 58 km x 38,5 km (Abb. 2.8).

Eine für die Analyse der Genese der „kryogenen Klüfte“ wichtige, vom Unternehmen K+S zur Verfügung gestellte Datenzusammenstellung zeigt die Lage der durch Feuchstellen gekennzeichneten tiefreichenden Klüfte (Abb. 2.9) und des Grubengebäude-Modells (Abb. 2.10) in den aus dem vorläufigen 3D-Modell Bokeloh entnommenen Außenflächen des Salzstocks. Aus beiden Abbildungen wird deutlich, dass sich die tief-

reichenden, z. T. tongefüllten Klüfte trotz günstiger Aufschlussverhältnisse (das Grubengebäude erstreckt sich über einen langen Bereich im Streichen des Salzstocks, (Abb. 2.10) auf den Bereich des Salzstocks konzentrieren, auf den der Bad Nenndorfer Graben zuläuft.

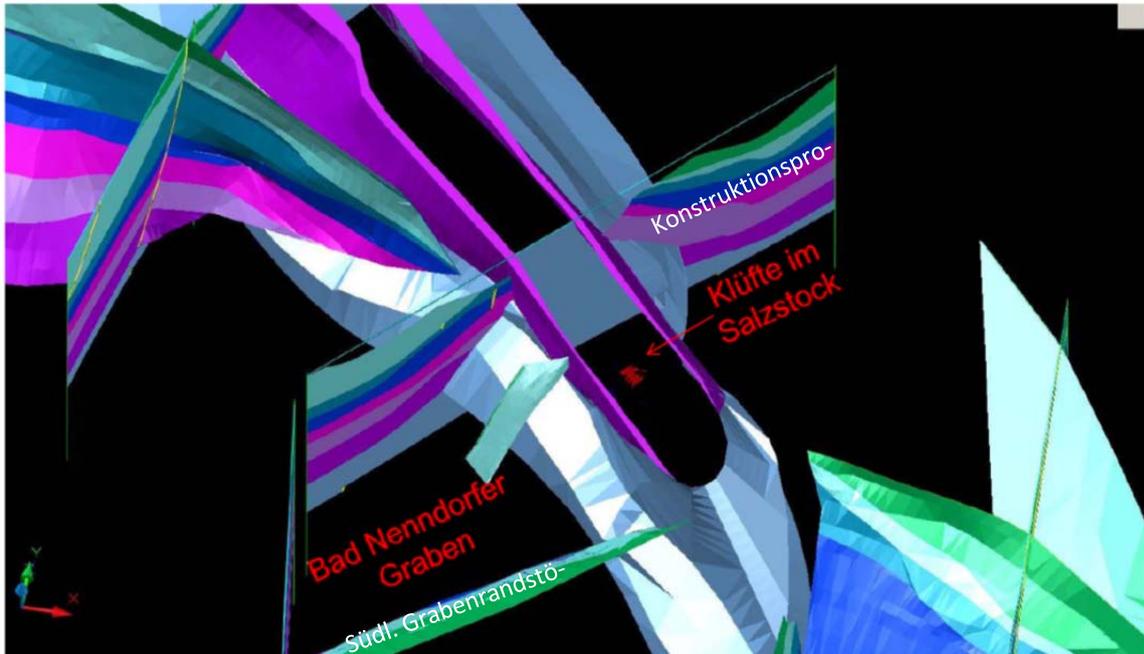


Abb. 2.9 Lage des Bad Nenndorfer Grabens und der Klüfte im Salzstock Bokeloh
Ausschnitt aus dem vorläufigen geologischen 3D-Modell der BGR.

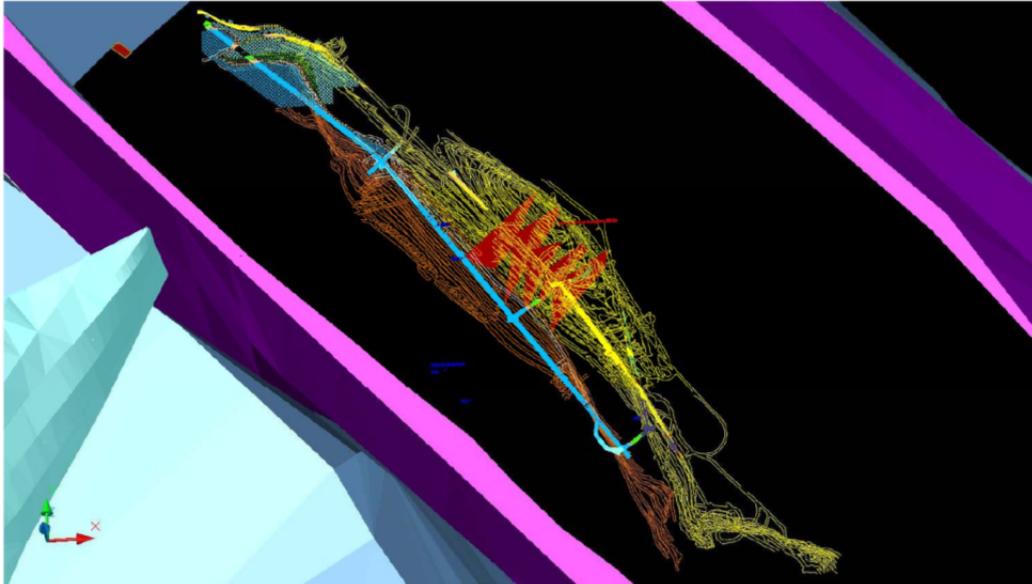


Abb. 2.10 Lage des Grubengebäudes des Bergwerkes Sigmundshall mit den Strecken (blau), den Abbauen im Ronnenberg-Kaliflöz (gelb) und den Abbauen im Staßfurt-Kaliflöz (orange) sowie den Flächen mit einer deutlichen Häufung von Laugenzutritten, die an die „kryogenen Klüfte“ (rot) im Salzstock Bokeloh gebunden sind

Ausschnittsvergrößerung von Abb. 2.9.

2.4 Mikropaläontologische Untersuchungen an Klufffüllungen aus den „kryogenen Klüften“ des Salzstocks Bokeloh

Mit dem Ziel ihrer biostratigraphischen Datierung anhand von Dinozysten wurden auf der 350 m-Sohle (Wendel 1950, Kaliwerk Sigmundshall) im Salzstock Bokeloh drei Sedimentproben aus dem Aufweitungsbereich einer „kryogenen Kluff“ genommen. Dinoflagellatenzysten mit organischer Wandung, kurz Dinozysten genannt, sind einzellige Algen. Diese Mikrofossilgruppe, die seit etwa 210 Millionen Jahren (höhere Trias) vorkommt, ist für die Datierung tertiärer und quartärer Sedimente Norddeutschlands besonders geeignet, da sie in fast allen kalkfreien Sedimenten des brackischen bis marinen Ablagerungsraumes vorkommt /KÖT 05/. Darüber hinaus standen die nicht publizierten, von K+S zur Verfügung gestellten Ergebnisse einer weiteren, im Auftrag von K+S durchgeführten Beprobung der Tonfüllung einer Kluff auf der 350 m-Sohle (Wendel 1950, Kaliwerk Sigmundshall) zur Verfügung.

Die Untersuchungen auf Dinozysten ergaben, dass die in allen drei Proben nachgewiesenen Formen in die Zone D14* (mittleres Unter-Oligozän bis unterstes Ober-Oligozän) einzustufen sind. Lithostratigraphisch umfasst die Zone D14* den gesamten Rupel- bzw. Septarienton und den älteren Teil des Asterigerina-Horizontes /KÖT 90/ Taf. 29. Bei allen drei Proben handelt es sich wahrscheinlich um Mischproben mit jüngem und älterem Rupelton. Alle drei Proben enthalten vereinzelt auch umgelagerte Exemplare aus dem Eozän (z. B. *Areosphaeridium diktyoplokum*, Abb. 2.11, Foto 3). Auch die im Auftrag von K+S untersuchte Probe enthält gut erhaltene Dinozysten, die auf ein alttertiäres Alter (Eozän/Oligozän) hinweisen.

In zwei Proben wurden Hinweise auf jüngeres Material gefunden. In der Probe BoZu2 wurde ein Einzelexemplar von *Achomosphaera andalousiensis andalousiensis* (Abb. 2.11, Foto 1) festgestellt, welches aus dem Obermiozän bis Pliozän stammt. In der Probe BoZu3 wurde ein Bruchstück der Süß- und Kaltwasseralge *Pediastrum kawraiskyi* (Abb. 2.11, Foto 2) gefunden. Zwar wurde *Pediastrum kawraiskyi* in Patagonien bereits im Miozän nachgewiesen /TEL 04/, aus Europa ist die Art jedoch nur aus den kalten Phasen während des Quartärs bekannt /JAN 00/. Sehr vereinzelt wurden in den Proben weitere Exemplare von *Pediastrum* beobachtet. Diese sind jedoch entweder zu schlecht erhalten, um eindeutig bestimmbar zu sein, oder sind eindeutig nicht *P. kawraiskyi* zuzuordnen.

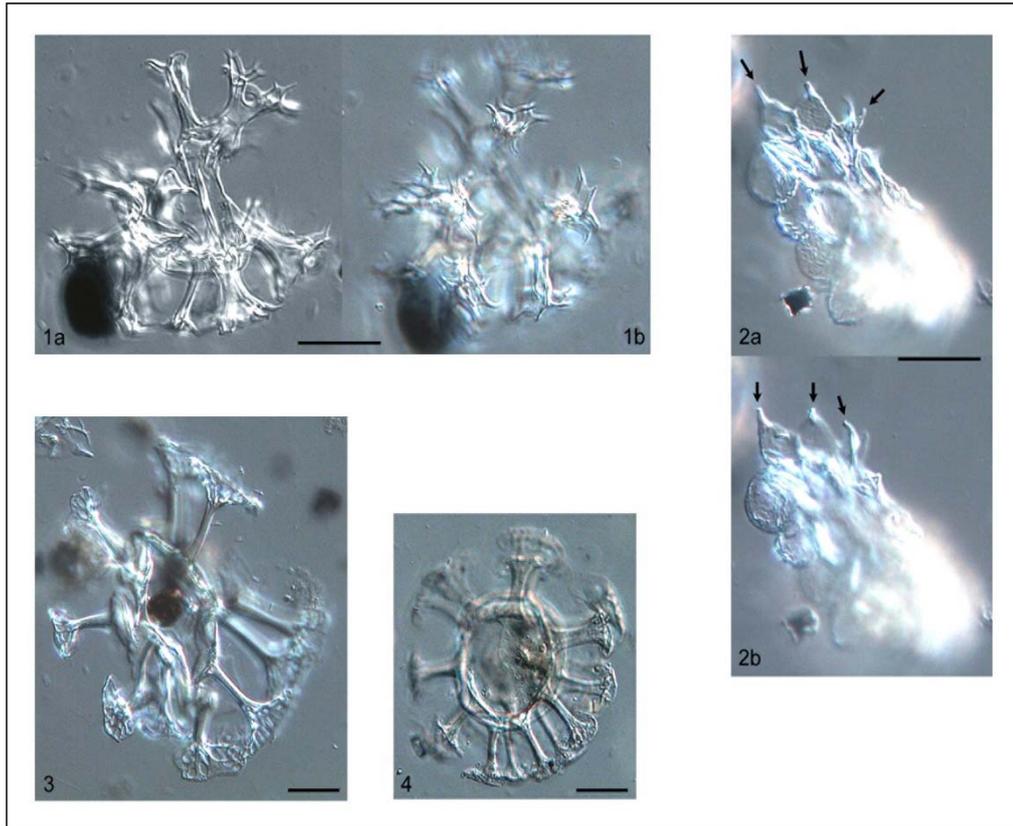


Abb. 2.11 Ausgewählte Ergebnisse der biostratigraphischen Datierungsarbeiten an Kluffüllungen aus einer „kryogenen Kluff“ aus dem Salzstock Bokeloh

Der Maßstab entspricht 20µm.

(1) *Achomosphaera andalusiensis andalusiensis* Jan Du Chene, 1977. BoZu2, P76297A, (2) *Pediastrum kawraiskyi* Schmidle, 1897. BoZu3, P76298, (3) *Areosphaeridium diktyoplokus* (Klumpp, 1953) Eaton, 1971. BoZu2, P76297A, (4) *Cordosphaeridium cantharellum* (Brosius, 1963) Gocht, 1969. BoZu3, P76298A.

Auf der Grundlage der mikropaläontologischen Untersuchungsbefunde sind unter Berücksichtigung der petrographischen Beobachtungen (Kap. 2.5) und der strukturgeologischen Auswertungen (Kap. 2.3) Schlussfolgerungen zur zeitlichen Einordnung und Genese der im Topbereich des Salzstocks Bokeloh nachgewiesenen Kluffbildungen möglich. Das Material der Kluffüllungen entspricht den Sedimenten des Deckgebirges. Unter den mikropaläontologisch analysierten Bestandteilen der Rissfüllungen bilden Dinozysten aus dem Rupelton die Hauptkomponente. Die Artenvielfalt der nachgewiesenen spättertiären, oligozänen Dinozysten deutet auf einen offenermarinen Ablagerungsraum (Stillwassermilieu) mit relativ warmem Wasser hin, d. h. auf eine Ablagerung während des Tertiärs. Nur vereinzelt wurden Formen aus dem Quartär nachgewiesen. Die beiden Einzelexemplare von *Achomosphaera andalusiensis andalusiensis*

lousiensis und *Pediastrum kawraiskyi* stammen wahrscheinlich aus pleistozänen Sedimenten.

Die mikropaläontologischen Untersuchungsergebnisse unterstützen die aus den petrographischen Beobachtungen, strukturgeologischen Überlegungen und Modellierungsergebnissen abgeleiteten Vorstellungen von einer zweiphasigen Genese der tongefüllten Klüfte. Anhand der auf dem südlichen Teil des Salzstocks Bokeloh abgeteuften Bohrungen Kolenfeld KB 3 und Kolenfeld KB 5 lässt sich nachweisen, dass dem Salzstock weitgehend unverfestigte, nur frühdiagenetisch beeinflusste oligozäne Sedimente unmittelbar aufliegen. Die in den Schichtenverzeichnissen ausgewiesenen typischen schluffig-tonigen Oligozän-Sedimente werden mikroskopisch in den tonführenden Rissen beobachtet. Neben den Ton- und Schluffpartikeln, die häufig Fließtexturen aufweisen, werden in den Rissfüllungen vor allem glaukonitische Einlagerungen nachgewiesen. Die im Oligozän abgelagerten Sedimente waren zum Zeitpunkt der initialen Rissbildung, d. h. im Miozän (Kap. 2.3), aufgrund der fehlenden Überdeckung durch mächtige jüngere Sedimente unverfestigt bzw. nur schwach frühdiagenetisch überprägt. In die sich im Miozän öffnenden Risse sind diese unverfestigten oligozänen Sedimente inkl. der oligozänen Mikrofossilien verfrachtet worden. Der sehr gute Erhaltungszustand der Dinozysten deutet, unter Berücksichtigung der petrographischen Beobachtungen (Kap. 2.5), des unverfestigten Charakters der Oligozän-Sedimente und der strukturgeologischen Überlegungen (Kap. 2.3), auf ihre spättertiäre Verfrachtung in die sich im Spättertiär öffnenden Risse hin.

Entsprechend den Schichtenverzeichnissen der Bohrungen Kolenfeld KB 3 und Kolenfeld KB 5 enthalten die oberhalb des Salzstockes Bokeloh nachgewiesenen quartären Sedimente aufgearbeitete Bestandteile mesozoischer Sedimente (z. T. hoher Anteil an umgelagerter Unterkreide sowie Rogenstein-Fragmente aus dem Unteren Buntsandstein) und z. T. deutlich kantengerundete Quarz-, Glaukonit- und Gips-Bruchstücke. In den zentralen Bereichen einiger Rissfüllungen werden derartige Einlagerungen, die den quartären Sedimenten zugeordnet werden, beobachtet. So kommen z. B. kantengerundete Quarz-Bruchstücke, Fragmente von Rogenstein und Bruchstücke von Karbonatgesteinen vor. Gleichzeitig werden Einzelexemplare quartärer Dinozysten nachgewiesen.

2.5 Mikroskopische Untersuchungen der „kryogenen Risse“

Es wurden mikrostrukturelle und mineralogische Untersuchungen an Proben aus eigens zu diesem Zweck auf der 350 m-Sohle gewonnenen Steinsalzblöcken durchgeführt (Abb. 2.12).

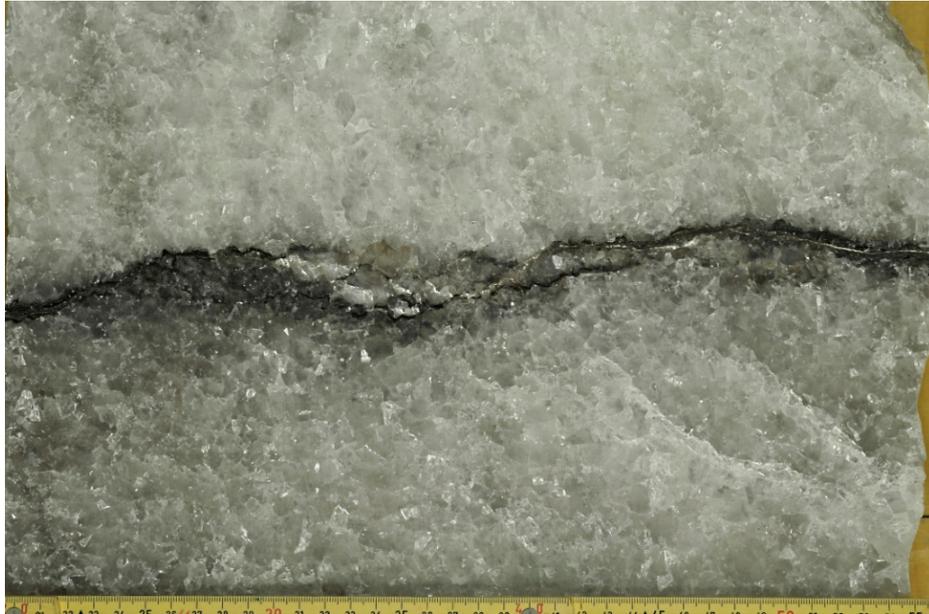


Abb. 2.12 Platte (ca. 45 cm x 20 cm) aus dem Salzgesteinsblock Bo2 aus dem Salzstock Bokeloh mit einer „kryogenen Kluft“ (Kalisalzbergwerk Sigmundshall, 350 m-Sohle)

In den Schliffen aus dem Gesteinsblock Bo2 befindet sich eine bis ca. 8 mm breite, grünlich-braungraue, tonig-schluffige bis gröberklastische sedimentäre Lage (Abb. 2.13). Die tonig-schluffige bis gröberklastische Lage in den Schliffen Bo2-2 und Bo2-3 (Abb. 2.14 und Abb. 2.15) weist unter dem Mikroskop eine mehrphasige Feinlamellierung auf, die auf mindestens zwei zeitlich getrennte Bildungsphasen (eine tonig-schluffige bzw. eine tonig-gröberklastische) in der Entwicklung der Rissfüllung schließen lässt. Die Außenbereiche des Risses sind mit einer tonigen, feinlamellierten Matrix gefüllt, während das Zentrum von überwiegend gröberklastischem Material dominiert wird (Abb. 2.14).

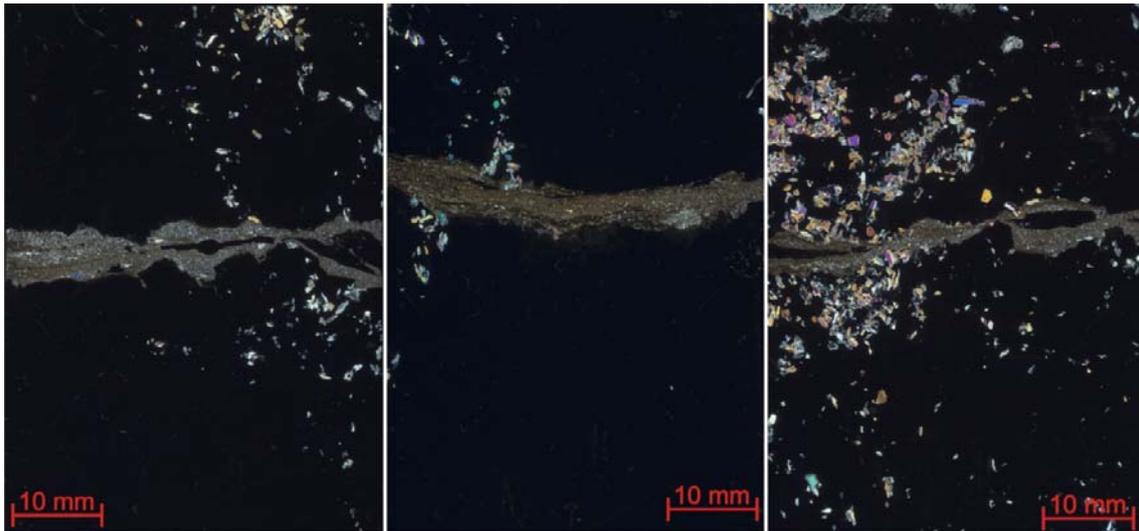


Abb. 2.13 Übersichtsscans der Dünnschliffe Bo2-1, Bo2-2 und Bo2-3 (von links; gekreuzte Polarisatoren) aus dem Gesteinsblock Bo2 mit tonig-schluffig bis gröberklastisch verfüllten Rissen

Die ursprünglichen Öffnungsweiten der Risse betragen in den untersuchten Dünnschliffen bis ca. 1 cm. Abseits des Risses kommen an den Halit-Korngrenzen zum Teil stark alterierte und pseudomorph in Polyhalit umgewandelte Anhydritkristalle vor.

Aufgrund der Schliffbilder kann eine mehrphasige Rissentwicklung angenommen werden. Wahrscheinlich wurde der Riss nach seiner ursprünglichen Verfüllung mit feinklastischem, tonig-schluffigem Material noch mindestens einmal reaktiviert und dabei (oder im Verlaufe des ersten Deformationsereignisses) möglicherweise lateral versetzt. Im Verlaufe des zweiten Deformationsereignisses wurde die bereits verfüllte und teilweise verfestigte Rissfüllung reaktiviert und im zentralen Bereich neu verfüllt. Die Rekonstruktion des Ursprungszustandes der Trennflächenfüllung und -umgebung belegt am Beispiel eines vollständig im Schliff Bo2-2 erhaltenen Risses Abb. 2.15.

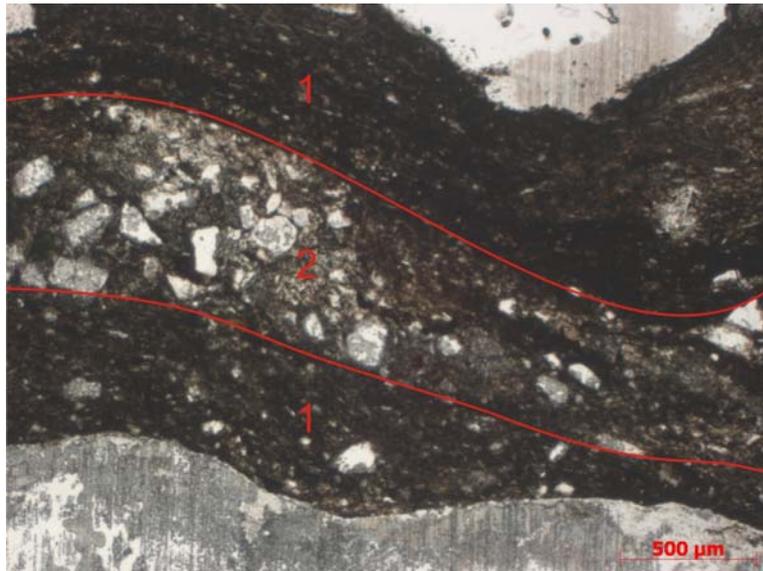


Abb. 2.14 Zweiphasig ausgebildete Rissfüllung im Schluff Bo2-3 (Hellfeld)

Die Außenbereiche des Risses sind von einer feinlamellierten, tonig-schluffigen Schicht mit gelegentlichen, gröberklastischen Bruchstücken verfüllt (1). In der Mitte des Risses dominieren gröberklastische Komponenten aus Gesteinsbruchstücken und teilweise idiomorphen Kristallen in einer tonig-schluffigen, magnesitischen Matrix (2).

Die tonig bis gröberklastisch ausgebildete Rissfüllung weist in den tonig-schluffigen Partien eine Feinlamellierung (dunkelbraune, tonige Schlieren) mit Korneinregelung und laminaren bis turbulenten Strömungsmustern auf, welche neben Tonmineralen auch größere Mengen an zuckerkörnigem Magnesit und Hydrotalkitnadeln enthalten. Die olivbraungrauen, tonig-gröberklastischen Rissfüllungen bestehen überwiegend aus Gesteinsbruchstücken (Gips und Anhydrit), idiomorphen Kristallen (v. a. Quarz) und tonig-schluffiger, magnesitischer Matrix. Teilweise sind in den Randbereichen der Risse Hohlräume zu beobachten, die mit feinen Gips- bzw. Hydrotalkitnadeln und/oder zuckerkörnigem Magnesit ausgekleidet sind. Eine ausführliche Darstellung der mineralogischen Zusammensetzung und des mikrostrukturellen Aufbaus der Rissfüllungen ist im Rahmen dieses zusammenfassenden Berichtes nicht möglich.

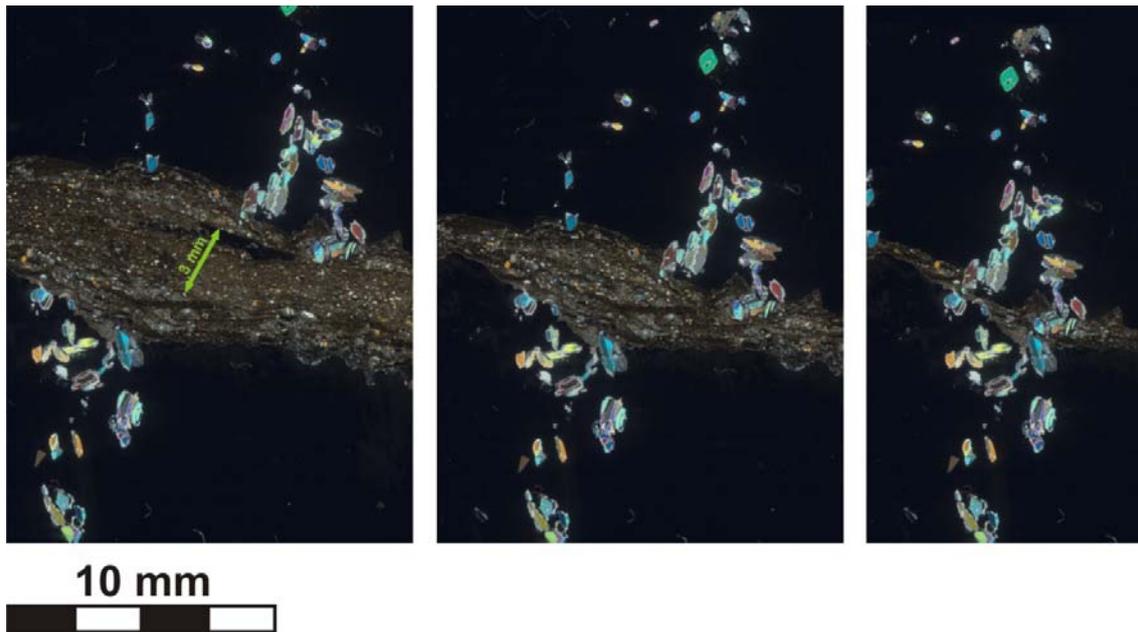


Abb. 2.15 Rekonstruktion der aus mindestens zwei Bildungsphasen zusammengesetzten Rissentwicklung im Schluff Bo2-2 (gekreuzte Polarisatoren)

Die linke Abbildung zeigt den im Schluff beobachteten Riss mit zwei farblich und strukturell unterschiedlichen Füllungen. In der mittleren Abbildung wurde die jüngste, ca. 3 mm breite, annähernd mittig angeordnete Rissfüllung entfernt und der Zustand vor der erneuten Reaktivierung der Trennfläche, die in ihrer Konsequenz zu dem in der linken Abbildung dargestellten Rissaufbau führte, rekonstruiert. Die rechte Abbildung bildet annähernd den originären Zustand des Risses nach Ablauf des ersten Deformationsereignisses ohne lateralen Versatz (Scherung) ab.

Die Ergebnisse aus licht- und elektronenmikroskopischen Untersuchungen der „kryogenen Risse“ aus dem Salzstock Bokeloh dokumentieren eine mehrphasige Entstehung der tonig bis gröberklastisch gefüllten Risse. Das in den Rissen befindliche Material besteht überwiegend aus umgelagerten, schwach verfestigten tertiären (z. B. Glaukonit-Sande) und prätertiären Komponenten (z. B. Rogenstein-Einschlüsse aus dem Unteren Buntsandstein und Gips-Bildungen aus dem Hut des Salzstocks). Die in allen Schliffen dispers verteilten Glaukonite bzw. Pyrite sowie die pyrithaltigen Tonfragmente und Mikrofossilien entstammen, zusammen mit einem Großteil des tonig-schluffigen Materials, marinen Tertiär-Sedimenten, die im Zuge der Rissbildung in die unterlagernden, salinaren Schichten suspensorisch bzw. kapillarsuspensorisch umgelagert wurden.

2.6 Ergebnisse von Modellrechnungen zu den Auswirkungen von Inlandvereisungen

Modellrechnungen zum Einfluss glazigener Prozesse wurden für den Salzstock Gorleben von /DEL 96/ und /HEU 12/ sowie für einen in ähnlicher Teufenposition befindlichen Modellsalzstock von /BOE 10/ durchgeführt. Unterschieden wurde zwischen Szenarien mit teilweiser Gletscherüberdeckung des Salzstocks und Permafrostbedingungen im Vorfeld des Gletschers sowie vollständigen Überfahrungen durch den Gletscher (siehe z. B. Abb. 2.16).

In den Arbeiten von /HEU 12/ und /BOE 10/ wurden die Rahmenbedingungen (z. B. Temperaturverlauf, inklusive kurzzeitiger Temperaturabsenkungen mit hohem Gradienten, und Eismächtigkeit) so gewählt, dass sie den Verhältnissen während der Weichsel-Eiszeit (Permafrost-Bedingungen) bzw. der Saale-Eiszeit (vollständige Eisüberdeckung am Standort Gorleben) entsprachen. Nach /HEU 12/ dringt der Permafrost in den Randsenken bis in eine Tiefe von etwa 100 m ein (Abb. 2.17). Bedingt durch die geringere Mächtigkeit des Deckgebirges und die höhere thermische Leitfähigkeit des Salinars reduziert sich die Eindringtiefe im Bereich unmittelbar über der Salzstruktur auf ca. 50 m (siehe auch /DEL 98/). Der in ca. 200 m bis 300 m Tiefe liegende Salzspiegel des Salzstocks Gorleben wird vom Permafrost nicht erreicht. Auch /DEL 96/ wiesen nur eine moderate Abkühlung des Untergrundes (bis maximal 6° in 1 km Tiefe) nach. Im Ergebnis dieser Modellrechnungen wurde eine geringe Auskühlung des Salzstocks nicht am Top, sondern im Wurzelbereich des Salzstocks prognostiziert.

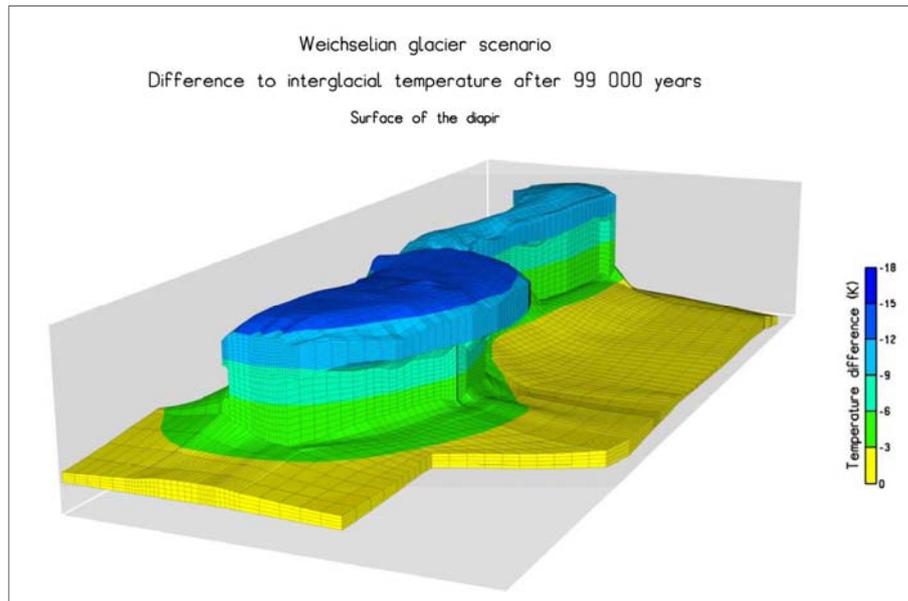


Abb. 2.16 Temperaturverteilung an der Salzstockoberfläche

Abkühlung gegenüber der Temperatur während des Interglazials in [K] /HEU 12/.

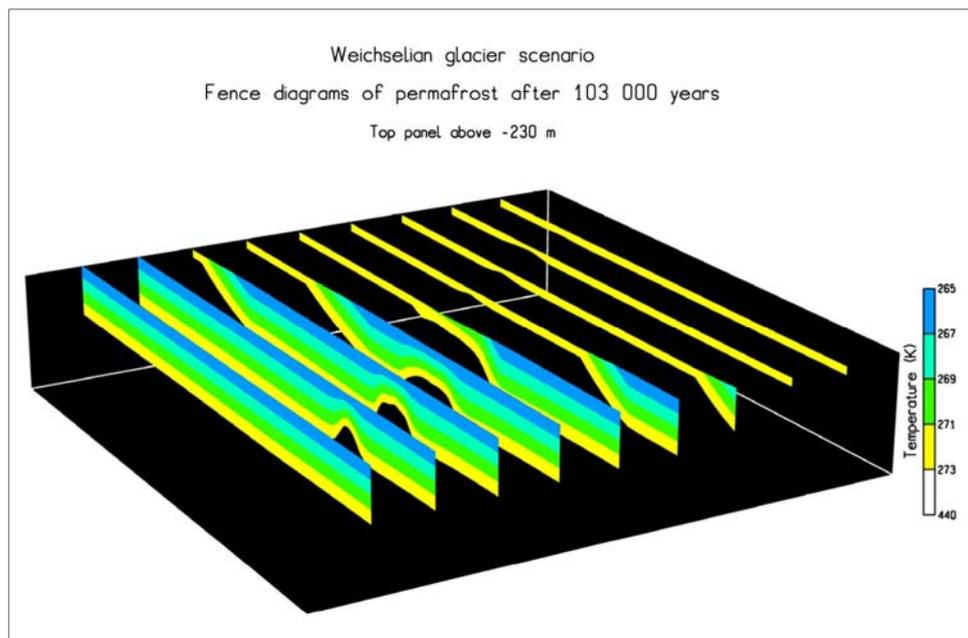


Abb. 2.17 Abkühlung des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben während des glazigenen Maximums bei teilweiser Gletscherbedeckung der Salzstruktur in [K] /HEU 12/

/BOE 10/ kamen zu ähnlichen Ergebnissen – die thermisch isolierende Wirkung des Deckgebirges führt nach diesen Berechnungen nur sehr langsam zu einer Abkühlung

des Salinars unter Permafrostbedingungen, bei der keine kritischen Temperaturgradienten auftreten, welche die Rissbildungen verursachen könnten /BOE 10/ S. 27.

Ein im Verlauf einer Inlandvereisung vollständiges Überfahren des im Untergrund befindlichen Salzstocks durch den Gletscher, wie z.B. während der Elster- und Saale-Eiszeit, führt zu einer Erhöhung der in den Salzgesteinen wirkenden Normalspannungen. Diese Spannungszunahme macht eine mechanische Rissbildung, d. h. eine mechanische Verletzung der Integrität des Salzstocks, unwahrscheinlich. Allerdings nimmt beim Gletscherrückzug infolge der Entlastung und abnehmender Spannungswerte im Salz das Potenzial für Rissbildung oder für Reaktivierung/Wiederöffnung von bereits vorhandenen, zumindest partiell infolge des Kriechens verheilten Rissen wieder zu. Nach /BOE 10/ S. 34 führt die Reduzierung der statischen Auflast nicht zu einem Integritätsverlust, da die wirkenden Normalspannungen erhöht werden (verringertes Potential für mechanisch-hydraulische Rissbildung). Dies deckt sich mit den Modellierungsergebnissen von /HEU 12/, nach denen durch diesen Mechanismus keine Neuanlage von Rissen möglich ist. Bereits vorhandene steil stehende Risse können jedoch durch eine Dehnungs- bzw. Zugbeanspruchung in Richtung der Längserstreckung der Struktur, wie sie sich beim Rückzug eines Gletschers ergeben könnte, reaktiviert werden und sich erneut öffnen. Zu einer ähnlichen Schlussfolgerung kamen /DEL 96/. Danach sind die unter einem hohen Druck stehenden basalen Schmelzwässer unter dem Gletscher in der Lage, in bereits bestehende Klüfte einzudringen und diese durch hydraulisches Fracken zu erweitern bzw. zu vertiefen.

Neben der Be- und Entlastung durch die Überfahrung des Inlandgletschers ist auch die Änderung der hydraulischen Verhältnisse für die Reaktivierung von Rissen von Bedeutung. Kommt es infolge einer Klimaerwärmung zur Ansammlung von Schmelzwasser an der Gletscherbasis oder im unmittelbaren Vorfeld eines Gletschers, so bilden sich ein erhöhtes hydraulisches Potential und höhere Porenwasserdrücke im Deckgebirge und am Salzspiegel aus. Ist diese Zunahme des Porenwasserdruckes (d. h. der Höhe der Wassersäule) mit ruckhaften tektonischen Bewegungen oder dem Gletscherrückzug verbunden, so kommt es infolge der Verletzung des Minimalspannungskriteriums bzw. beim Überschreiten der hydraulischen Aufreißfestigkeit zu einer Fluiddruck-induzierten Öffnung bzw. Reaktivierung und ggf. Vernetzung von Rissen oder interkristallinen Wegsamkeiten. /BOE 10/ vermuten daher, dass es sich bei den von /BAU 91/ als „kryogen“ interpretierten Rissen um Hydrofrac-Risse handeln könnte /BOE 10/ S. 34 und nehmen eine Bildung der Risse während des Quartärs an.

2.7 Zusammenfassung der Ergebnisse und Konsequenzen für den Salzstock Gorleben

Bei der Interpretation der Genese von „kryogenen Klüften“ und bei Überlegungen zu ihrer Übertragbarkeit auf den Standort Gorleben müssen insbesondere die nachfolgenden Befunde berücksichtigt werden:

1. Vorkommen der „kryogenen Klüfte“:

Klüfte mit oligozänen oder jüngeren Tonsedimenten als Kluffüllung wurden im Salzstock Bokeloh bis 430 m u. GOK gefunden /BAU 91/. Im Salzstock Gorleben werden, trotz einer möglicherweise größeren Gletschermächtigkeit als am Standort Bokeloh (vermutlich ca. 700 m statt ca. 350 m), derartige tongefüllte Klüfte nicht beobachtet.

2. Tektonische Situation:

Für den Bereich des Salzstocks Bokeloh ist im Tertiär aufgrund der Lage am südlichen Rand des Niedersächsischen Beckens eine starke tektonische Beanspruchung anzunehmen. Am Standort Gorleben, d. h. im Zentralbereich des Niedersächsischen Beckens, hat es weder im Tertiär noch später tektonische Bewegungen gegeben.

3. Eiszeitliche Spannungsbedingungen:

In Modellberechnungen wurde festgestellt, dass im Verlauf einer Standortvereisung die mechanischen Bedingungen für die Entstehung von Klüften im Salz unterhalb von ca. 300 m Deckgebirge bei einer Salzstockbreite von ca. 4 km zu keinem Zeitpunkt gegeben sind.

Die Untersuchungsergebnisse lassen sich widerspruchsfrei wie folgt zusammenfassen und interpretieren.

1. Die Bildung der tonführenden Klüfte im Salzstock Bokeloh ist die Folge schneller (dynamischer) bruchhafter Deformation des Salzstocks im Spättertiär.

Der Salzstock Bokeloh liegt am südlichen Rand des Niedersächsischen Beckens im Übergang zur Mittelgebirgsschwelle und am Kreuzungspunkt des Bad Nenndorfer Grabens und des Steinhuder Meer-Lineamentes. Das späte Tertiär ist in diesem Gebiet, wie am gesamten Südrand des Norddeutschen Beckens, durch starke tektonische

Aktivitäten gekennzeichnet. Der Heraushebung der südlich gelegenen Mittelgebirge steht die Absenkung des nördlichen Sedimentationsbeckens gegenüber. Die Lage des Salzstocks in diesem Grenzbereich hat dazu geführt, dass der Salzstock durch die Heraushebung im Süden und das Ankippen des Niedersachsen-Beckens nach Norden im späten Tertiär (Miozän) tektonisch stark beeinflusst wurde. Der langgestreckte, sehr schmale Salzstock reagierte auf diese extreme dynamische Belastung mit einer partiellen internen Deformation (Abbau der hohen Spannungen durch mit Bruch behaftete Verformung), die im Internbau ausgehend vom Salzspiegel das Aufreißen von Rissen induzierte (Abb. 2.18 und Kap. 2.3). Im Rahmen weiterführender geomechanischer Modellrechnungen muss geklärt werden, ob die aus der regionalgeologischen Entwicklung der Standortregion bzw. der Salzstruktur abgeleiteten Verformungsrandbedingungen (z. B. dynamische Spannungsentlastung, sehr hohe Verformungsraten), wie auf der Grundlage der mineralogisch-geochemischen und geologischen Untersuchungen angenommen, zu einer bruchhaften Rissbildung im Salz führen können.

2. Die erstmalige Anlage der tongefüllten Klüfte erfolgte im Miozän (Spättertiär).

Ausgehend von diesen strukturgeologischen Überlegungen und gestützt auf petrographische Beobachtungen wird von einer zweiphasigen Entwicklung der Klüfte und von ihrer ursprünglichen Bildung im Spättertiär ausgegangen. Bei den mikropaläontologischen Untersuchungen des aus den Kluffüllungen gewonnenen Probenmaterials wurden spättertiäre (oligozäne) und quartäre Dinozysten gefunden. Außerdem wurden in den Klüften Einlagerungen unverfestigter, nur schwach frühdiagenetisch beeinflusster oligozäner Sedimente nachgewiesen. Der sehr gute Erhaltungszustand der oligozänen Dinozysten spricht unter Berücksichtigung des unverfestigten Charakters der in den Klüften nachgewiesenen und dem Salzstock Bokeloh unmittelbar auflagernden oligozänen Sedimente sowie des zweiphasigen Aufbaus der Rissfüllungen für eine an die initiale Rissbildung im Miozän gebundene Verfrachtung dieser Dinozysten in die Rissfüllungen. Auf der Grundlage der petrographischen und mikropaläontologischen Beobachtungen wird ausgeschlossen, dass es sich bei einem Großteil der in den Klüften nachgewiesenen oligozänen Sedimente um umgelagertes Material handelt, das im Quartär als Bestandteil von Schmelzwassersuspensionen eingespült wurde.

3. Im Quartär erfolgte keine Neubildung von Klüften. Die im Spättertiär gebildeten, größtenteils verheilten Klüfte wurden im Quartär z. T. reaktiviert.

Die Ergebnisse der licht- und elektronenmikroskopischen Untersuchungen der Klüfte aus dem Salzstock Bokeloh dokumentieren eine mehrphasige Entstehung der tonig bis gröberklastisch gefüllten Klüfte. Auf der Grundlage der Schliffbilder ist davon auszugehen, dass die Bildung und weitere Entwicklung der Klüfte bzw. Risse auf eine mehrfache mechanische Beanspruchung der Salzstruktur seit dem Spättertiär zurückzuführen ist. Die Klüfte entstanden im Bereich von Trennflächen, die infolge von spättertiären ruckhaften (dynamischen) Scherbewegungen im Steinsalz aufgerissen und mit tonig-gröberklastischem Material (in Form einer Suspension) aus den die Struktur unmittelbar überlagernden, weitgehend unverfestigten marinen oligozänen Sedimenten verfüllt wurden. Die Risse sind zu Beginn des Quartärs größtenteils verheilt, stellen aber aufgrund der Toneinschlüssen lokale Schwächezonen dar. In einer zweiten, quartären, an großflächige Inlandvereisungen gebundenen Phase wurden diese Klüfte unter geometrisch ähnlichen Spannungsbedingungen reaktiviert und, lokal unterschiedlich, erneut mit Sedimentmaterial verfüllt (Kap. 2.5). Dieser Teil der Rissfüllungen ist ausgehend von den mikroskopischen Befunden tonig-schluffig, z. T. gröberklastisch zusammengesetzt und enthält meist kantengerundete Fragmente aus Ablagerungen des Unteren Buntsandsteins und der Kreide, die in den quartären Sedimenten oberhalb des Salzstocks (z. B. in den Bohrungen Kolenfeld KB 3 und Kolenfeld KB 5) nachgewiesen wurden.

4. Der glazigene Einfluss beschränkt sich auf eine teilweise Reaktivierung bereits vorhandener Klüfte während des quartärzeitlichen Gletscherrückzugs.

Die Ergebnisse der Modellrechnungen belegen, dass Permafrost nicht die Ursache der Klüftbildung sein kann und die Eisauflast während einer Inlandsvereisung nicht zur Bildung von Rissen im Salinar geführt hat. Bedingungen für eine erneute Öffnung bereits vorhandener Klüfte während des Quartärs könnten ausgehend von den durchgeführten Modellberechnungen zum Einfluß glazigener Prozesse auf Salzstöcke bei der Entlastung nach der Gletscherüberfahrung durch Schmelzwasser-induzierte Hydrofrac-Prozesse vorgelegen haben (Kap. 2.6).

Fazit: Bei den von /BAU 91/ für den Salzstock Bokeloh beschriebenen tongefüllten Klüften handelt es sich **nicht** um „kryogene Klüfte“. Auf der Grundlage der neuen mineralogischen, mikrostrukturellen, mikropaläontologischen und strukturgeologischen Un-

tersuchungsergebnisse und der Ergebnisse der Modellrechnungen wird von einer regionaltektonisch induzierten Bildung der Klüfte im Spättertiär und von einer durch Hydrofrac-Prozesse verursachten Reaktivierung im Quartär ausgegangen (Abb. 2.18).

Der Salzstock Gorleben liegt im zentralen Bereich des Niedersächsischen Beckens und damit in einer strukturgeologisch völlig anderen Position als der Salzstock Bokeloh. Weder gibt es in unmittelbarer Nähe zu Gorleben bedeutende Sockelstörungen (Abb. 2.5 und Abb. 2.6; siehe z. B. auch /MAR 84/, /ZIR 91/), noch erfolgten während des Tertiärs ruckartige (dynamische) gegenläufige Vertikalbewegungen des Sockels. Damit fehlen für Gorleben und andere Standorte in ähnlicher strukturgeologischer Position die Grundvoraussetzungen für eine Anlage von Klüften durch schnelle bruchhafte Deformation des Salzstocks. Durch den Ausschluss einer zukünftigen Bildung von „kryogenen Klüften“ für den Salzstock Gorleben bestehen auch keine Möglichkeiten des Zutritts von Deckgebirgslösungen in den Salzstock über derartige Klüfte.

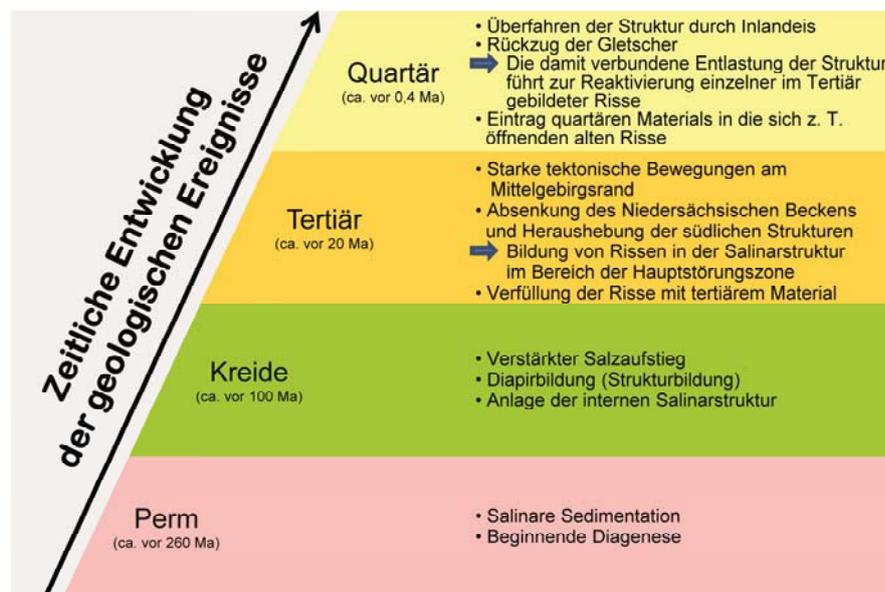


Abb. 2.18 Auf der Grundlage neuer Untersuchungsergebnisse reinterpretierte zeitliche Entwicklung der von /BAU 91/ als mögliche „kryogene Klüfte“ beschriebenen Rissbildungen in der Salzstruktur Bokeloh

Alle im Salzstock Gorleben bisher beobachteten und im Rahmen der Standorterkundung analysierten Klüftbildungen /BOR 08/ sind, abgesehen von Klüften, die mit dem Einsatz des Gefrierfahrens beim Schachabteufen verbunden sind, auf den Salzaufstieg und die daran gebundenen Deformationsprozesse zurückzuführen.

3 Untersuchungen zur Deformation von Anhydrit-Schichten beim Salzaufstieg

3.1 Einführung

Bei der Erkundung des Salzstocks Gorleben hinsichtlich seiner Eignung als potenzieller HAW-Endlagerstandort werden Beeinflussungen der Integrität der geologischen Barriere durch Streckenauffahrungen und Erkundungsbohrungen in langzeitsicherheitsrelevanten Gesteinsschichten minimiert /STI 97/. Deshalb stehen im Erkundungsbergwerk Gorleben für einige, im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse zu bewertende Fragestellungen nur wenige Aufschlüsse zur Verfügung. Dies betrifft v. a. die eingeschränkten Möglichkeiten zum Studium der Auswirkungen von Deformationsprozessen auf die Ausbildung, Mächtigkeit und Lösungsführung der anhydritischen Schichten der Leine-Folge, insbesondere die Untersuchung der Auswirkungen der an den Salzaufstieg gebundenen salztektonischen Deformation des Hauptanhydrits (z3HA).

Die begrenzte Anzahl geeigneter In-situ-Untersuchungsmöglichkeiten im Erkundungsbergwerk Gorleben und die besonderen Anforderungen an die Integrität der geologischen Barriere an einem potenziellen Endlagerstandort erfordern den Einsatz spezifischer Erkundungskonzepte und -methoden. So sind z. B. im Rahmen der Erkundung des Salzstocks Gorleben zur Untersuchung der Lage und der salztektonischen Zerblockung des Hauptanhydrits an den Salzstock-Flanken zahlreiche parallel zum Streichen der Anhydritschichten angeordnete Erkundungsbohrungen geplant. In diesen Bohrungen sollen umfangreiche EMR-Messungen durchgeführt werden, um den räumlichen Verlauf des z2/z3-Übergangsbereiches (inkl. Hauptanhydrit) sowie die Boudinage und die Zerschierung des Hauptanhydrits zu erfassen. Im Rahmen der Erkundung des Salzstocks Gorleben konnte bisher nur ein geringer Teil der dafür vorgesehenen Erkundungsbohrungen realisiert werden.

Im Gegensatz zu den vergleichsweise wenigen, direkt in den geologischen Aufschlüssen ermittelten Erkundungsdaten zum Aufbau und zur Zerblockung des Hauptanhydrits im Salzstock Gorleben liegt aus der geologischen Erkundung des Infrastrukturbereiches des Erkundungsbergwerkes umfangreiches Datenmaterial zur Ausbildung, Mächtigkeit und Lösungsführung der überwiegend anhydritisch zusammengesetzten Gorleben-Bank (z3OSM) vor. Die in Kap. 3.4 zusammengefassten Untersuchungser-

gebnisse gestatten eine Reihe von generellen Schlussfolgerungen zum Verhalten von Anhydrit-Schichten im Verlaufe des Salzaufstiegs und zu den Auswirkungen der an den Diapirismus gebundenen Deformationsprozesse auf diese kompetenten Gesteinsschichten.

Eine weitere Möglichkeit zum Studium der Deformationsprozesse und ihrer Auswirkungen auf die Integrität der geologischen Barriere ist die Übertragung von Beobachtungen, Untersuchungsergebnissen und Erfahrungen aus anderen, besser aufgeschlossenen Salzbergwerken. Deshalb erfolgten in Ergänzung zu den Arbeiten im Erkundungsbergwerk Gorleben Untersuchungen zur Deformation der im Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) sehr gut aufgeschlossenen Anhydritmittel des Anhydritmittelsalzes (z3AM; Kap. 3.2). Komplettiert werden die Untersuchungen zum Einfluss von salztektonischen Deformationsprozessen auf Anhydrit-Schichten durch experimentelle Arbeiten zur Boudinage einer Hauptanhydrit-Schicht in Steinsalzmatrix (Kap. 3.3).

Ziel der zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht abgeschlossenen experimentellen und In-situ-Untersuchungen zur Deformation von anhydritischen Gesteinen ist:

- die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Intensität und die Resultate halokinetischer Deformationsprozesse zu diagnostizieren,
- den Ablauf und die Auswirkungen von Deformations- und Verheilungsprozessen durch mineralogisch-geochemische und mikrostrukturelle Untersuchungen zu analysieren,
- die an die Halokinese gebundenen extremen Mächtigkeitsschwankungen der anhydritischen Schichten (bis hin zum völligen Abreißen der Schicht) und das Fehlen von sich über große Entfernungen erstreckenden potenziellen Migrationsbahnen in diesen Schichten anhand von detailliert untersuchten Fallstudien nachzuweisen sowie
- die experimentellen Befunde sowie die mineralogisch-geochemischen und struktur-geologischen Untersuchungsergebnisse für die Gorleben-Bank (z3OSM) und die Anhydritmittel (z3AM) hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf die Hauptanhydrit-Deformation zu bewerten. Dabei werden die spezifischen, z. T. deutlich von den natürlichen Gegebenheiten für den Hauptanhydrit (Mächtigkeit bis maximal 80 m, keine Einschaltungen von Halit) abweichenden Rahmenbedingungen in diesen als

natürliche Analoga genutzten geringmächtigen, z. T. Halit-führenden Anhydrit-Schichten, berücksichtigt.

3.2 Fallstudie Boudinage des Anhydritmittelsalzes im ERA Morsleben

Im Verlaufe des Salzaufstiegs bzw. der Salzstockbildung können mehrere Prozesse zum Auseinanderreißen einer Schicht, eines Schichtpakets bzw. einer Gesteinseinheit führen, wie z. B. Scherung, Auf- und Abschiebung sowie Boudinage (Extension). Die Intensität und die Auswirkungen dieser Prozesse sind abhängig von der Orientierung der Schicht bzw. des geologischen Körpers in Bezug auf das vorliegende Spannungsfeld, von den mechanischen Eigenschaften der Gesteine, der Strain- bzw. Dehnungs-/Deformationsrate, der finiten Verformung sowie von fluidgesteuerten/fluidbeeinflussten und metamorphen Prozessen. Oftmals kommen diese Prozesse kombiniert vor, oder durch polyphase Deformation werden zuerst angelegte Strukturen überprägt, was ihre Analyse und Interpretation erschwert.

Ausschlaggebend für das Auseinanderreißen einer Schicht während der Deformation ist, bei gegebener Orientierung der Hauptnormalspannungen im Verhältnis zur räumlichen Lage der Schicht, der Kompetenzkontrast zwischen der Schicht und dem umgebenden Gestein, z. B. /RAM 55/, /RAM 83/. Das Auseinanderreißen der Schicht wird durch lokale, auf Anisotropien beruhende Spannungskonzentrationen innerhalb der Schicht verursacht, welche zu lokal höheren Deformationsraten führen und ein Ausdünnen und/oder Zerreißen der Schicht verursachen. Durch voranschreitende Extension kann es zu einer Separation der einzelnen Blöcke („Boudins“) kommen, in den Bereich zwischen den Boudins („neck zones“, „Necks“) kann durch beispielsweise plastisches Fließen und/oder Lösungs-Fällungskriechen weniger kompetentes Umgebungsmaterial eindringen, z. B. /RAM 55/, /ZUG 11/, /MER 12/. Die Form der so entstandenen einzelnen Boudins hängt stark vom Kompetenzkontrast sowie von der Deformationskinematik, aber auch vom Aufbau der kompetenten Schicht ab /RAM 83/, /GOS 04/.

In dem im ERA Morsleben sehr gut aufgeschlossenen boudinierten Anhydritmittelsalz (z3AM3/ah, z3AM4/ah) können in den Necks die Auswirkungen von Lösungs-/Fällungsprozessen beobachtet werden /MER 12/. Beide Anhydritmittel bestehen aus vier sedimentär angelegten Schichten und erreichen unter normalen Ablage-

rungsbedingungen eine Mächtigkeit von 0,3 bis 1,6 m, wobei das z3AM4/ah etwas mächtiger ausgebildet ist als das z3AM3/ah /BEH 97/.

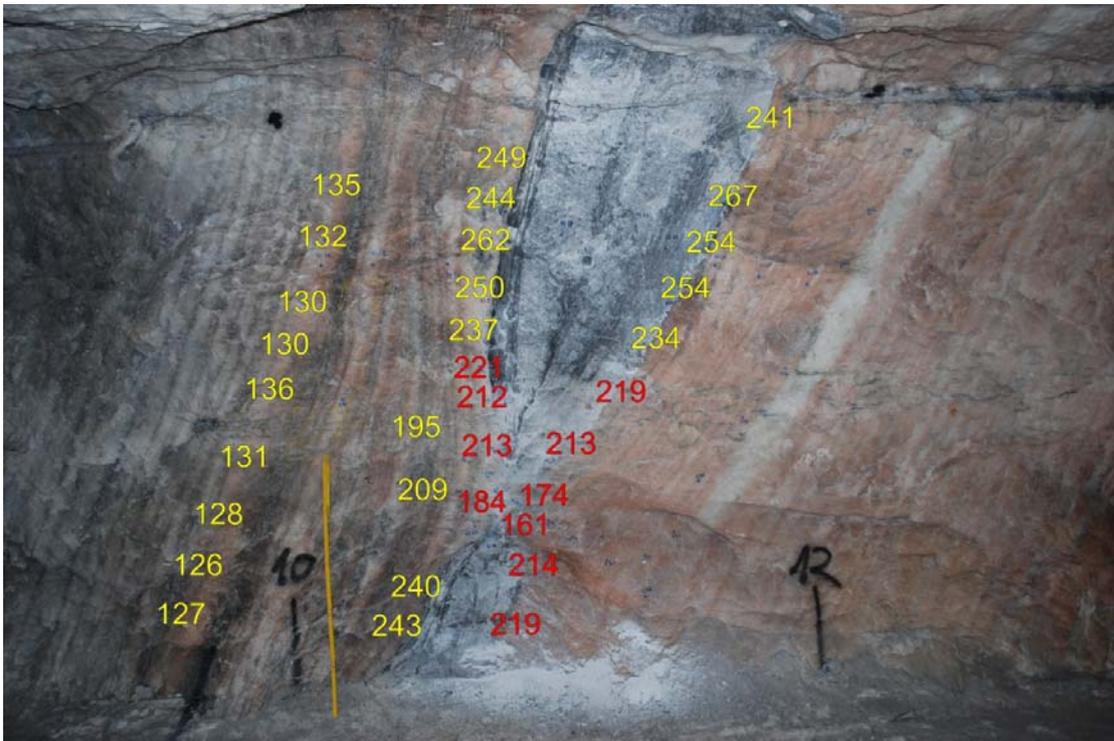


Abb. 3.1 Bromidgehalte in dem das Anhydritmittel (überkippte Lagerung) umgebenden halitischen Gestein in µgBr/gHalit

Anstieg der Werte von 130 auf 250 µgBr/gHalit im Rahmen des zunehmenden Eindunstungsgrades bei der Sedimentation (gelb). Im Boudinneck und am ausdünnenden Rand des Anhydritmittels – deutlich niedrigere Werte von bis zu 161 µgBr/gHalit (rot). Während des Deformationsprozesses waren metamorphe Lösungen beteiligt, wodurch der Bromidgehalt des Steinsalzes im Neck niedriger ist als beim umgebenden Gestein (ergänzt nach /MER 12/). Zollstock entspricht 1 m.

Der Bromidgehalt des Halits im Neckbereich des z3AM3/ah unterscheidet sich deutlich vom Gehalt des umgebenden, nicht durch die Neckbildung beeinflussten Gesteins (Abb. 3.1). Die Bromidwerte steigen im unbeeinflussten z3AM2/na als Folge des zunehmenden Eindunstungsgrades von ~130 µgBr/gHalit auf ~250 µgBr/gHalit an, was den üblichen sedimentären Verhältnissen des Anhydritmittelsalzes im Norddeutschen Becken entspricht /BOR 08/. Im Bereich des Boudinnecks und im angrenzenden Bereich des ausgedünnten Anhydritboudins zeigen die Bromidwerte deutlich niedrigere Werte und erreichen direkt im Neck Werte von lediglich 161 µgBr/gHalit (Abb. 3.1). Diese Variation lässt sich durch den Einfluss metamorpher Lösungen erklären, welche in den Deformationsprozess eingebunden waren. Zahlreiche mikroskopische Beobach-

tungen belegen, dass das Steinsalz in den Neckbereich durch Lösungs-Fällungs-Prozesse eindrang (Abb. 3.2f). Eine ausführliche Darstellung der mikroskopischen Beobachtungen und der Ergebnisse mikrostruktureller Untersuchungen ist z. B. in /MER 12/ enthalten.

Die Mikrostrukturen innerhalb der Anhydritlage unterscheiden sich deutlich in Abhängigkeit von der Position der untersuchten Proben /MER 12/. Auffällig ist, dass das gesamte Gesteinspaket Deformationsanzeichen aufweist und nicht nur die Randbereiche oder der Übergang zur Halitmatrix betroffen sind.

An der Basis des z3AM3/ah sind die Folgen ausgeprägter Drucklösungsvorgänge zu beobachten, verdeutlicht durch einen hohen Anteil organischer/opaker bzw. unlöslicher Komponenten wie Magnesit und Schichtsilikate (Abb. 3.2b), sehr kleine Anhydritkorngrößen (~50 µm) sowie das völlige Fehlen älterer Anhydritgenerationen. Der Übergang Anhydritmittelsalz 2 (z3AM2/na) zum z3AM3/ah ist sehr diskret ausgebildet. Am direkten Übergang sind neu kristallisierte, ± idiomorphe und einschlussfreie Anhydritkristalle zu beobachten, in Nestern entstand Polyhalit vergesellschaftet mit Halit (Abb. 3.2a). Die Schicht ist bereichsweise von Scherbändern durchzogen.

Im Zentrum des z3AM3/ah sind verstärkt ältere Anhydritgenerationen vertreten. Anzeichen von Drucklösung sind auch in diesem Bereich zu erkennen, allerdings nicht so ausgeprägt wie an der Schichtbasis. Die Korngrößen sind im Vergleich zum Rand des z3AM3/ah deutlich größer und erreichen maximal ca. 3 – 4 mm (Abb. 3.2c). Fächer- und rosettenförmige Anhydritkristalle sind verzahnt mit massigen bis leistenförmigen Anhydritkristallen. Zahlreiche Kristalle zeigen Deformationsstrukturen, wie undulöse Auslöschung, Zwillingsbildung und Subkörner, lobate Korngrenzen lassen auf Korngrenzenwanderung schließen (Abb. 3.2d). In fächer- und rosettenförmigen Kristallen lassen sich zahlreiche Fluideinschlüsse beobachten, welche kristallographischen Vorzugsrichtungen folgen. Es lassen sich lösungserfüllte Einschlüsse und solche mit opaker Füllung unterscheiden. Vereinzelt sind kleine Hämatitschuppen anzutreffen. Subkörner sind v. a. in „Anhydritblasten“ /BAL 97/ zu beobachten, allerdings auch in massigen und fächerförmigen Kristallen. In Scherbändern können Anhydritfragmente enthalten sein, welche asymmetrisch deformiert sind und so Aufschluss über den Bewegungssinn geben können (Abb. 3.2e). Am Top des z3AM3/ah ist der Übergang zum z3AM3/na weniger diskret ausgebildet. Die Korngrößen erreichen maximal ca. 2 mm, das Gestein weist einen hohen Anteil an Halit auf, sowohl als Matrixmaterial als auch in

Form von Rissfüllungen. Drucklösung ist auch in diesem Bereich ein wichtiger Deformationsmechanismus.

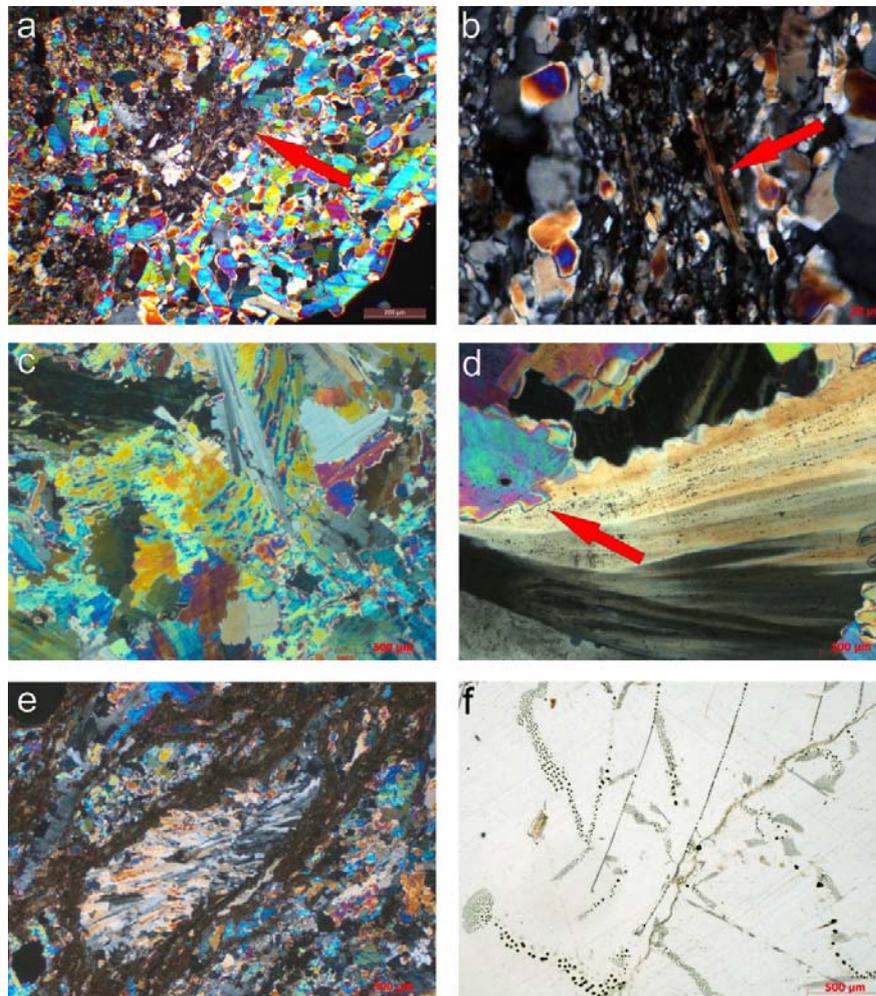


Abb. 3.2 Mikrostrukturen im boudinierten Anhydritmittel 3 im ERA Morsleben
a) bis e) + Polarisatoren, f) // Polarisatoren

a) Übergang z3AM3/ah – z3AM2/na. Übergang sehr diskret mit Kristallisation von Anhydrit. In Hohlräumen Entstehung von Polyhalit, vergesellschaftet mit Halit (Pfeil). b) Ausschnitt aus a), feiner Lagenbau aus unterschiedlich großen Anhydritkristallen, Anhydrit sehr feinkörnig, Anreicherung opaken Materials sowie von Magnesit und Schichtsilikaten (Pfeil). c) Übersichtsaufnahme über verschiedene Anhydrittypen und -generationen im Boudinzentrum. d) Detailaufnahme eines fächerförmigen Anhydritkristalls. Gut zu erkennen sind undulöse Auslöschung sowie hoher Anteil an Fluideinschlüssen. Lobate Korngrenze sowie Auswölbung zeigen Korngrenzwanderung an (Pfeil). e) Deformierter Anhydrit in Scherzone, asymmetrische Form lässt auf sinistralen Schersinn schließen. f) Verschieden orientierte intra- bzw. interkristalline Fluideinschlüsse in Halitkristallen im Neckbereich.

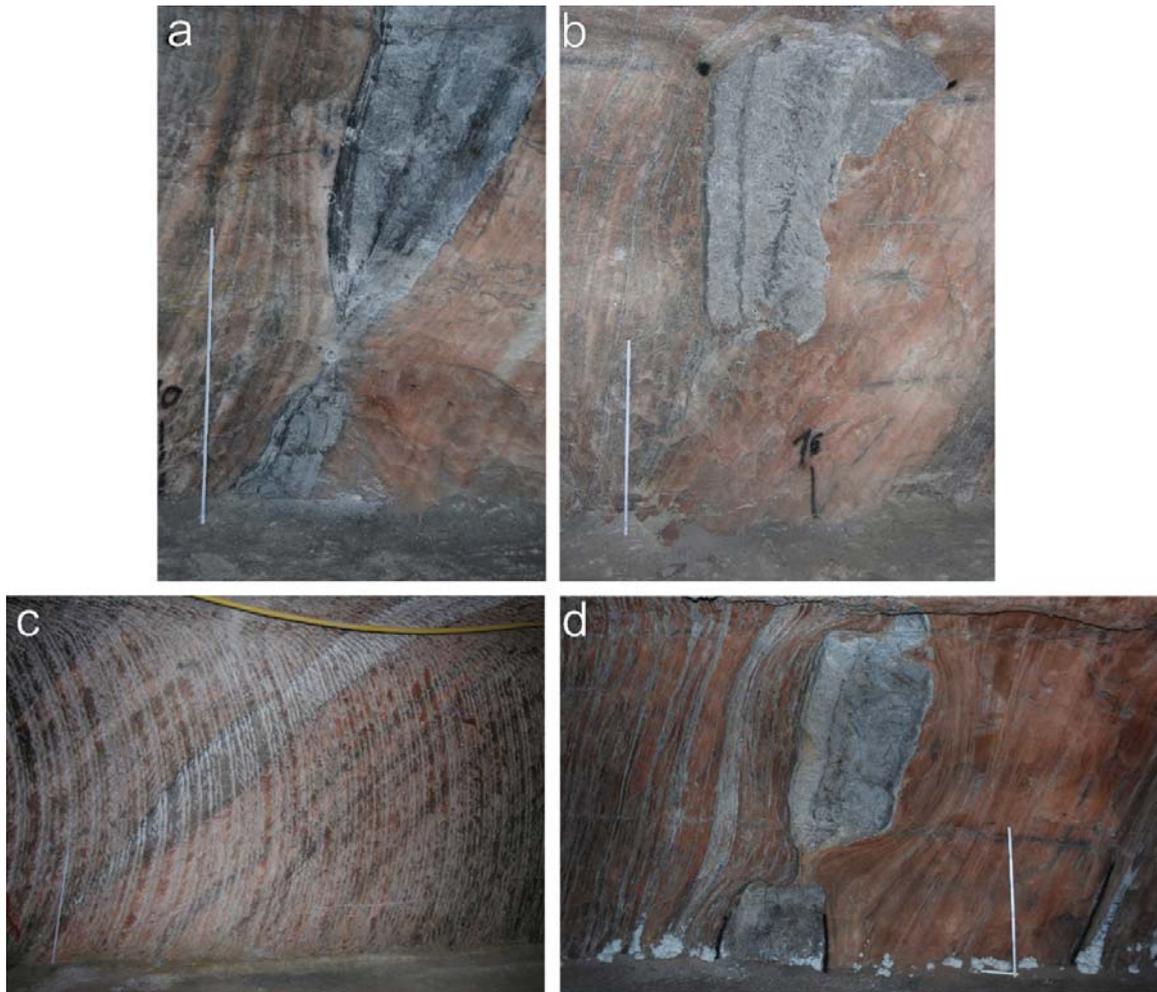


Abb. 3.3 Unterschiedliche Boudin-Ausbildungsformen im Bereich von Anhydritlagen des Anhydritmittelsalzes im ERA Morsleben

- a) z3AM3/ah, Rüstungskammer 45, Schacht Marie: Ausdünnen der Anhydritlage zum Boudinneck hin, Maßstab = 1 m. b) z3AM4/ah, gleiche Lokalität wie unter a): boudinierte Lage zeigt eckige Form mit leicht verzogenen Kanten, Maßstab = 0,6 m. c) z3AM6/ah, Ostquerschlag 2. Sohle, Schacht Bartensleben: ausgedünnte Anhydritlage mit undulierender Mächtigkeit, Maßstab = 1 m. d) z3AM4/ah, 2. Sohle, Schacht Marie: eckige Boudinform, ausgeprägtes Einfließen des Matrixgesteins in Boudinneck, Maßstab = 1 m.

Die Form der im ERAM aufgeschlossenen z3AM-Boudins variiert stark, wobei symmetrische, eckige Boudins mit leicht verzogenen Kanten überwiegen, was mit dem hohen Kompetenzkontrast Halit – Anhydrit erklärt werden kann (Abb. 3.3). Untergeordnet kommen Boudins vor, die eine deutliche Ausdünnung zum Neckbereich hin aufweisen. Die Gründe hierfür sind noch nicht hinreichend geklärt und Gegenstand weiterführender Untersuchungen. Mögliche Erklärungen wären unterschiedlich stark

ausgeprägte Drucklösung im Anhydritgestein, mikrostrukturelle Anisotropien oder Unterschiede in der mineralogischen Zusammensetzung des Gesteins /MER 12/.

Vereinzelt werden ausgedünnte oder durch „pinch and swell“ gekennzeichnete Anhydritlagen beobachtet (Abb. 3.3c, z3AM6/ah). Diese Besonderheit liegt in der mineralogischen Zusammensetzung des z3AM6/ah begründet, welches stark mit Steinsalz durchsetzt ist /BEH 97/ und so einen deutlich niedrigeren Kompetenzkontrast zu dem umgebenden Steinsalz aufweist. Ähnliche Strukturen sind auch von /PEA 93/ und /LIA 07/ beschrieben worden.

3.3 Experimentelle Untersuchungen zur Boudinage anhydritischer Schichten

Numerische Modellierungen, z. B. /SMI 77/, /LLO 82/, /MAE 09/, /ABE 12/ und dortige Referenzen, erbrachten eine Vielzahl von Erkenntnissen zum Ablauf der Boudinage und zum Einfluss unterschiedlicher rheologischer Parameter auf den Boudinageprozess. Die Arbeiten zur sogenannten „fracture saturation“ /BAI 00a/, /BAI 00b/, /LIY 07/ ergaben, dass unter bruchhaften Deformationsbedingungen eine Abhängigkeit zwischen Schichtdicke und Bruchabständen besteht. Dieses Verhältnis spiegelt eine maximale Anzahl an Rissen wider und lässt somit Rückschlüsse auf die Größe der Boudins zu.

Neben den numerischen Modellierungen wurden zahlreiche analoge Experimente durchgeführt, z. B. /RAM 55/, /NEU 82/, /SCM 02/, /ZUL 04/, /MEN 07/. In den am Institut für Geowissenschaften der Universität Frankfurt/M. durchgeführten Experimenten wird eine Anhydritlage in Halitmatrix bei erhöhten Temperaturen und unterschiedlichen Deformationsgeometrien (konstriktional, ebene und reine Plättung) verformt /ZUG 07/, /ZUG 09/, /ZUG 10/, /ZUL 11/, /ZUG 12/, /MER 12/. Die Experimente wurden bei untereinander vergleichbaren Deformationsbedingungen durchgeführt: Temperatur $T = 345 \text{ °C}$, maximale Differentialspannung $\sigma_{\max} = 4,6 \text{ MPa}$, Strainrate $\dot{\epsilon} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, maximale Verkürzung $e_{z\max} \approx -30 \text{ %}$. Die initiale Schichtdicke H_i der Anhydritlage S liegt zwischen $0,85$ und $4,5 \text{ mm} \pm 0,025 \text{ mm}$, die Abmessungen einer fertig gestellten Probe aus Anhydrit und Steinsalz betragen $45 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$. Die erhöhte Temperatur ist notwendig, um eine höhere Strainrate zu ermöglichen, damit die Experimente in einem angemessenen Zeitrahmen durchgeführt werden können (ein Lauf dauert etwa 3 Wochen). Eine Zusammenfassung der Ergebnisse liefern /ZUG 12/.

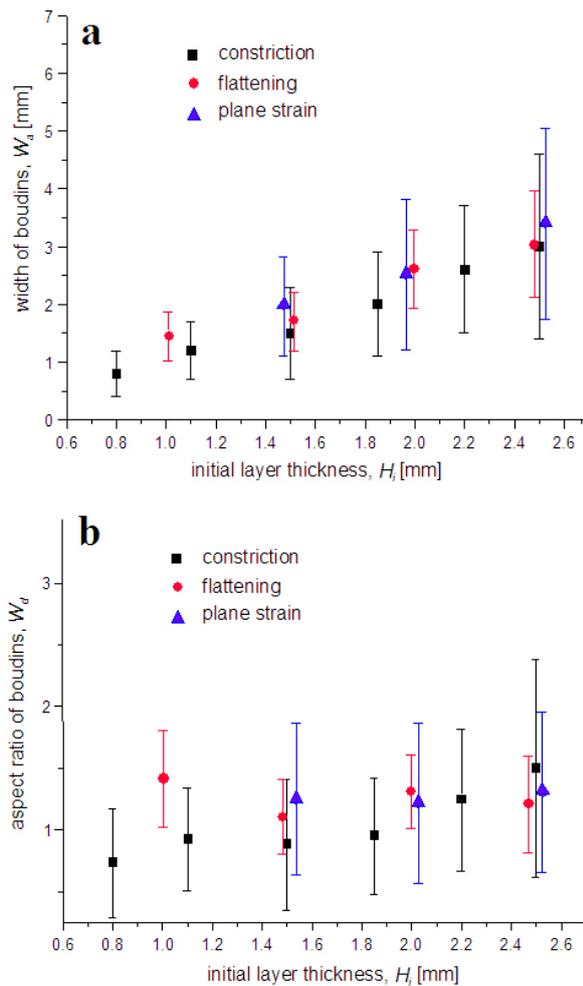


Abb. 3.4 Geometrische Parameter der experimentell entstandenen Boudins unter konstruktionaler (schwarz) und ebener (blau) Verformung sowie reiner Plättung (rot)

a) Boudinlänge vs. initiale Schichtdicke. Es ist ein deutlicher Zusammenhang zwischen Schichtmächtigkeit und Boudingröße erkennbar. b) Mächtigkeits-Längenverhältnis vs. initiale Schichtdicke. Unabhängig von der Deformationsgeometrie stellt sich ein konstantes Verhältnis $W_d - H_i$ ein /ZUG 12/.

In sämtlichen Experimenten wurde die Anhydritlage durch Bruchdeformation zerlegt. Kristallplastische Deformationsstrukturen im Anhydrit, wie undulöse Auslöschung oder Zwillingsbildung sind mikroskopisch zu beobachten, spielen jedoch für den Boudinageprozess eine untergeordnete Rolle /ZUG 10/. Die Boudin-Größe W_a bzw. das Mächtigkeits-Längenverhältnis W_d ($W_d = W_a / H_i$) der entstandenen Boudins ist unabhängig von der übergeordneten Deformationsgeometrie. Die Größe der Boudins ist, ausgehend von den durchgeführten Experimenten, stark abhängig von der initialen Schichtmächtigkeit. Das Mächtigkeits- Längenverhältnis W_d zeigt einen konstanten Wert von 0,7 –

1,5 (Abb. 3.4). Im Gegensatz zu der Boudingröße sind die Unterschiede in der Boudin-form stark abhängig von der Deformationsgeometrie und i. d. R. deutlich ausgeprägt (ausführlicher siehe /ZUG 12/).

Die Boudinnecks sind größtenteils vollständig mit Steinsalz verfüllt, welches durch viskoses Fließen in den Neckbereich eindrang. Lediglich in wenigen Necks ist ein kleiner Hohlraum erhalten geblieben /MER 09/, /ZUG 10/, /ZUG 12/. Der Rand derartiger Hohlräume ist teilweise mit feinkörnigem Halit und opakem, organischem Material belegt. In dem Steinsalz bildete sich in Abhängigkeit von der übergeordneten Deformationsgeometrie ein Gefüge aus, welches das vorhandene, natürliche Gefüge überprägt. Als Hauptdeformationsmechanismen des Steinsalzes konnten Dislokationskriechen und Subkorn-Rotationsrekristallisation bestimmt werden.

3.4 Ausbildung, Deformation und Lösungsführung der Gorleben-Bank

3.4.1 Einführung

Die Gorleben-Bank ist eine vorwiegend aus Anhydrit bestehende, in ihrer Mächtigkeit stark schwankende, meist aber nur wenige cm mächtige Schicht, die im Salzstock Gorleben im Orangesalz (z3OS) der Leine-Folge (z3) nachgewiesen wurde /BOR 91/. Die Gorleben-Bank und ihr unmittelbares Umfeld sind neben dem Hauptanhydrit der Leine-Folge (z3HA) die wichtigsten Speichergesteine (Kluftspeicher) für die im Salzstock Gorleben natürlich vorkommenden Salzlösungen und Gase/Kondensate /BFS 02/, /BOR 08/, /SCM 09/.

Infolge einer z. T. starken Verfallung der z3-Schichten während des Salzaufstiegs werden in den Kontakt- bzw. Übergangsbereichen von Gesteinen mit deutlich unterschiedlichem Deformationsverhalten intensiv zerscherte sowie boudinierte Gesteinsschichten angetroffen. Dies betrifft vor allem den Übergang des Hauptanhydrits zu den carnallitisch-kieseritisch-sylvinitischen und halitischen Schichten im Liegenden und Hangenden sowie den Übergangsbereich der kompetenten, anhydritisch dominierten Gorleben-Bank zu den umgebenden inkompetenten, halitischen Gesteinen im Liegenden und Hangenden der Gorleben-Bank. Die bei der halokinetischen Deformation dieser Kontaktzonen entstehenden druckentlasteten und z. T. aufgelockerten Bereiche im Steinsalz und/oder die Klüfte im Anhydrit wirken als hydraulische Senken für die im Salzgestein enthaltenen und im Zuge der Halokinese umverteilten Fluide (lokale Lö-

sungsmigration). Diese Klüfte bzw. Hohlräume sind entweder durch Sekundärmineralisationen verheilt oder partiell lösungserfüllt. Die im unverritzten Gebirge dicht eingeschlossenen Lösungen und Gase/Kondensate werden beim Anfahren oder Erbohren freigesetzt.

Aufgrund der aus einer möglichen Lösungsführung der Gorleben-Bank möglicherweise resultierenden Auswirkungen müssen die Fluidvorkommen in langzeitsicherheitlichen Bewertungen eines Endlagers im Salzstock Gorleben betrachtet werden, siehe z. B. /WOL 12/, /BEU 12/. Insbesondere betrifft dies die langzeitsicherheitsrelevante Frage, ob Zutritte von in der Gorleben-Bank oder in ihrem unmittelbaren Umfeld gespeicherten Lösungen über die Schächte bzw. den Infrastrukturbereich ggf. bis in die Einlagerungshohlräume möglich sind, sofern dies durch geeignete Verschluss- und Versatzmaßnahmen nicht verhindert werden kann.

Bedeutsam für eine Langzeitsicherheitsanalyse ist auch die Frage, ob lang aushaltende Migrationswege im Bereich der Gorleben-Bank vom Salzspiegel bis in das geplante Endlagerbergwerk vorhanden sind, über die Lösungen aus dem Deckgebirge zutreten könnten. Für die Bewertung der Langzeitsicherheit eines potenziellen Endlagers im Salzstock Gorleben ist es deshalb notwendig, die unterschiedliche texturell-strukturelle Ausbildung, Verbreitung und Lösungsführung der Gorleben-Bank genau zu erfassen. Auf der Grundlage dieser Daten und detaillierter Vorstellungen zur Genese und zum Internbau des Salzstocks können die Gesetzmäßigkeiten im strukturellen Bau bzw. in der salztektonischen Überprägung der Gorleben-Bank sowie in ihrer Lösungsführung abgeleitet, in langzeitsicherheitlichen Bewertungen berücksichtigt und besser für noch nicht detailliert erkundete Salzstock-Bereiche prognostiziert werden.

3.4.2 Lithologischer Aufbau, Ausbildung und Mächtigkeit der Gorleben-Bank

3.4.2.1 Lithologischer Aufbau der Gorleben-Bank

Im Erkundungsbergwerk Gorleben ist die Gorleben-Bank v. a. in den Auffahrungen des Infrastrukturbereiches, inkl. der Schächte des Bergwerks, aufgeschlossen. Außerdem wurde die Gorleben-Bank im Verlaufe der geologischen Erkundung des Salzstocks Gorleben in den Tiefbohrungen Go 1002 bis Go 1005, in einigen zur Erkundung des Infrastrukturbereiches und des z3/z2-Übergangsbereiches gestoßenen untertägigen

Erkundungsbohrungen sowie in der zum Zwecke der Erkundung des z2/z3-Überganges an der Northwest-Flanke des Salzstockes gestoßenen untertägigen Erkundungsbohrung 02YER20RB254 nachgewiesen.

Abb. 3.5 verdeutlicht am Beispiel des in der geologischen Erkundungsbohrung 02YEA04RB025 angetroffenen Gorleben-Bank-Durchganges den lithologischen Aufbau dieses überwiegend aus Anhydrit bestehenden Leithorizontes im Orangesalz der Leine-Folge.

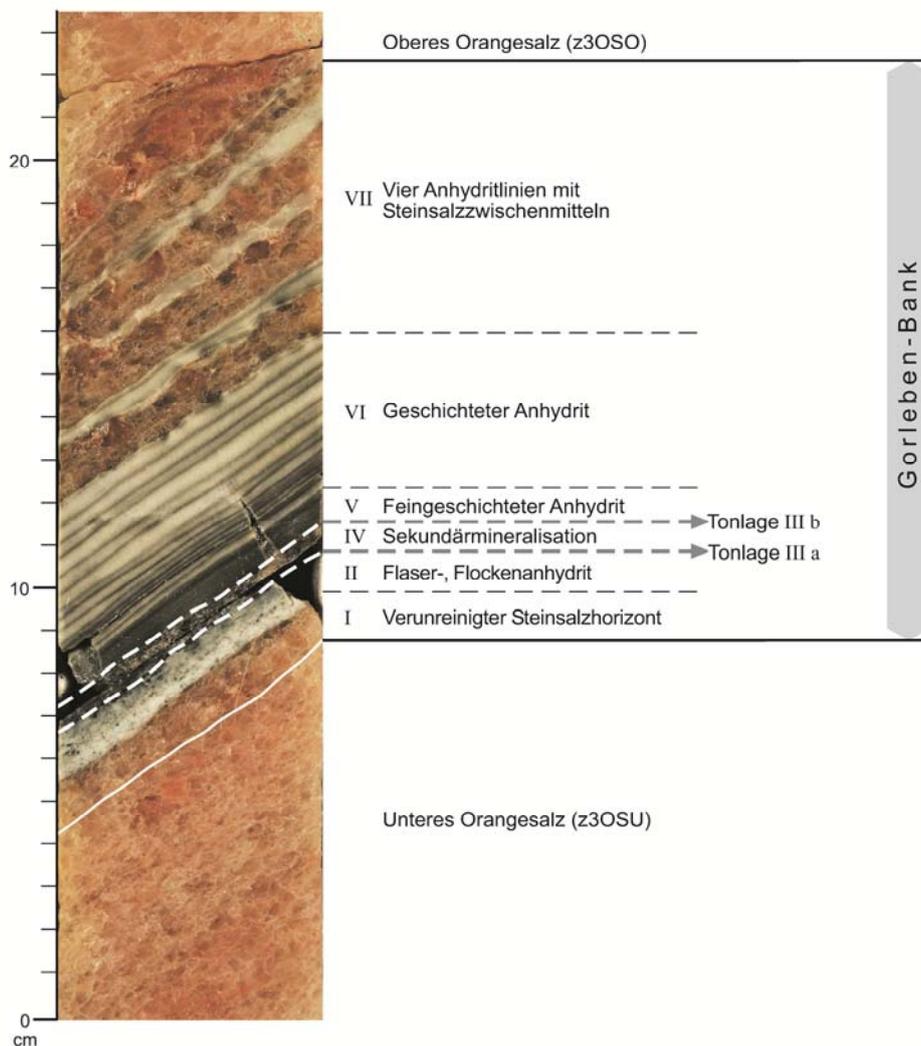


Abb. 3.5 Lithologische Gliederung und petrographische Ausbildung der Gorleben-Bank (z3OSM)

Illustriert am Beispiel eines flach einfallenden Gorleben-Bank-Aufschlusses in der Erkundungsbohrung 02YEA04RB025

Die konkordant auf das Untere Orangesalz folgende Gorleben-Bank lässt sich in vollständiger Ausbildung vom Liegenden zum Hangenden in sieben Zonen gliedern (Abb. 3.5), siehe auch /BÄU 00/:

- Zone I – verunreinigter Steinsalzhorizont mit einer Mächtigkeit zwischen 0,1 und 44 cm. Das Steinsalz ist im Vergleich zum z3OSU durch einen, meist nur im Durchlicht erkennbaren höheren Anteil von z. T. schichtig eingelagerten Polyhalit- und Anhydritflocken ($\varnothing < 1$ bis 2 mm groß) gekennzeichnet.
- Zone II – Flaser-, Flockenanhydrit, der aus einem feinkristallinen Anhydritgestein besteht und Mächtigkeiten zwischen 0,05 und 3,5 cm erreicht. Im Hangenden wird der Flaser-, Flockenanhydrit meist durch eine schichtbeständige Tonlage begrenzt, die häufig infolge von salztektonischen Beanspruchungen Harnischbildungen aufweist.
- Zone III – Tonlage (Bewegungszone), mit Mächtigkeiten von maximal 2 cm. Im Ergebnis von Scherprozessen entlang der Tonlage und daran gebundenen Hohlrumbaupungen in der Gorleben-Bank selbst oder in ihrem unmittelbaren Umfeld hat sich im Bereich der Tonlage der Gorleben-Bank relativ häufig eine Zone mit Sekundärmineralisation gebildet (Abb. 3.5, Zone IV). In derartigen Fällen ist die Tonlage häufig zweigeteilt (Zone III a auf der liegenden und Zone III b auf der hangenden Scherfläche der verheilten Sekundärzone). Der Besteg dieser Zone ist z. T. mehrschichtig aufgebaut, woraus mehrere Deformations- bzw. Bewegungsphasen abgeleitet werden können.
- Zone IV – Sekundärmineralisation. Es handelt sich um eine immer schichtparallel verlaufende, meist vollständig verheilte oder nur selten teilweise mit Lösungen gefüllte Zone, deren ursprüngliche Öffnungsweiten bis maximal 42 cm erreichen (Abb. 3.6). Die Mächtigkeit der Zone IV ist in den meisten Aufschlüssen geringer als 3 cm, nur selten werden Mächtigkeiten größer 10 cm erreicht. Der Besteg wird überwiegend aus Steinsalz und/oder Carnallit gebildet. Oft sind Anhydritbruchstücke aus den Anhydritlagen der Gorleben-Bank, Tonfetzen, teilweise Polyhalitaggregate und Sylvinkristalle eingelagert. Häufig deutet der Aufbau der Sekundärmineralisationszone der Gorleben-Bank auf eine polystadiale Genese dieses im Verlaufe der Halokinese gebildeten Teils der Gorleben-Bank hin /BOR 08/.
- Zone V – Feingeschichteter Anhydrit, der eine bankrechte Mächtigkeit von 0,1 bis 10 cm erreicht. Der feinkristalline Anhydrit ist im Zehntel-mm-Bereich durch tonige Lagen feingeschichtet.

- Zone VI – Geschichteter Anhydrit mit einer bankrechten Mächtigkeit von 0,1 bis 17 cm. Das feinkristalline Anhydritgestein ist im mm-Bereich durch dunkelgraue Lagen geschichtet.
- Zone VII – 2 bis 8 cm mächtige Zone aus bis zu vier eng aufeinander folgenden, jeweils 1 bis 3 mm mächtigen, konkordant verlaufenden Anhydritlinien mit Steinsalzzwischenmitteln.



Abb. 3.6 Gorleben-Bank mit deutlich ausgebildeter, zweigeteilter Tonlage (Zone IIIa und Zone IIIb) und Sekundärmineralisations-Zone (Zone IV, Abb. 3.5)

Foto: DBE

3.4.2.2 Mächtigkeit der Gorleben-Bank

Die Ausführungen zur räumlichen Variabilität der Mächtigkeit der Gorleben-Bank und zu den geologischen Ursachen für die Änderungen im lithologischen Aufbau und in der Mächtigkeitsverteilung berücksichtigen lediglich die Zonen II bis VII (Abb. 3.5). Die Zone I der Gorleben-Bank ist zum größten Teil auf sekundäre Stoffumverteilungen während der an den Salzaufstieg gebundenen Deformation (sekundäre Lösungsmigration ins Liegende der Gorleben-Bank, d. h. ins z3OSU) zurückzuführen /BÄU 00/. Für die Analyse der möglicherweise an die Gorleben-Bank gebundenen potenziellen Migrationswege sind die Steinsalzsichten der Zone I nicht relevant. Abgesehen von den bei der halokinetischen Deformation möglicherweise im unmittelbaren Umfeld der Gorleben-Bank gebildeten Hohlräumen (Abb. 3.11 und Abb. 3.12) bietet die Zone I aufgrund

ihrer halitischen Zusammensetzung selbst keinerlei Speicherpotential für Lösungen/Gase und stellt keinen bevorzugten Gleithorizont bei Scherbewegungen dar.

Die bankrechten Mächtigkeiten der bisher in den Auffahrungen und in den Erkundungsbohrungen detailliert dokumentierten 181 Gorleben-Bank-Aufschlüsse schwanken stark (**Abb. 3.7**). Die Mehrheit der Gorleben-Bank-Durchgänge weist Mächtigkeiten (ohne Zone I) von weniger als 10 cm auf. Die mittlere Mächtigkeit liegt bei 6,4 cm. Nur acht Aufschlüsse erreichen eine Mächtigkeit von mehr als 20 cm (**Abb. 3.7**, Abb. 3.8 und Abb. 3.9), die maximale Mächtigkeit (ohne Zone I) beträgt 59,1 cm.

Auf kürzeste Entfernungen, oft sogar innerhalb eines einzelnen Aufschlusses, weist die Gorleben-Bank beträchtliche Mächtigkeitsschwankungen auf, die entweder primär-sedimentär angelegt und/oder salztektonisch verursacht wurden. Die Mehrzahl der für die Gorleben-Bank im Salzstock Gorleben nachgewiesenen Mächtigkeitsreduzierungen ist nach Auffassung der BGR auf Deformationsprozesse während des Salzaufstiegs zurückzuführen.

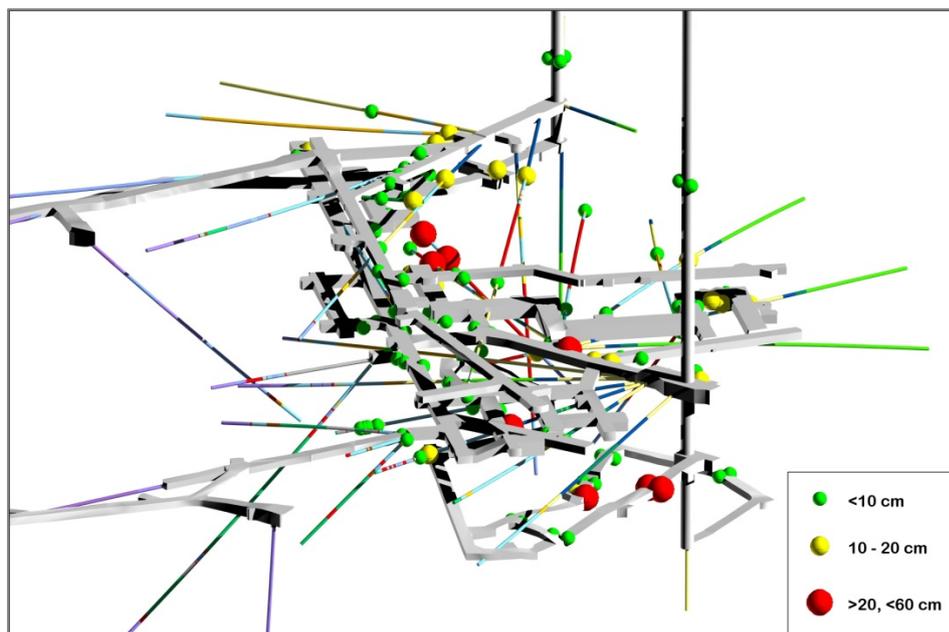


Abb. 3.7 Verteilung der Mächtigkeiten der Gorleben-Bank (ohne Zone 1) in den Aufschlüssen des Infrastrukturbereiches des Erkundungsbergwerkes Gorleben

Blick von NW; gut zu sehen sind die beiden Schächte (Abstand voneinander ca. 450 m) und die auf der 840 m-Sohle gelegenen Querschläge 1 West (links unten) und 1 Ost (links oben).

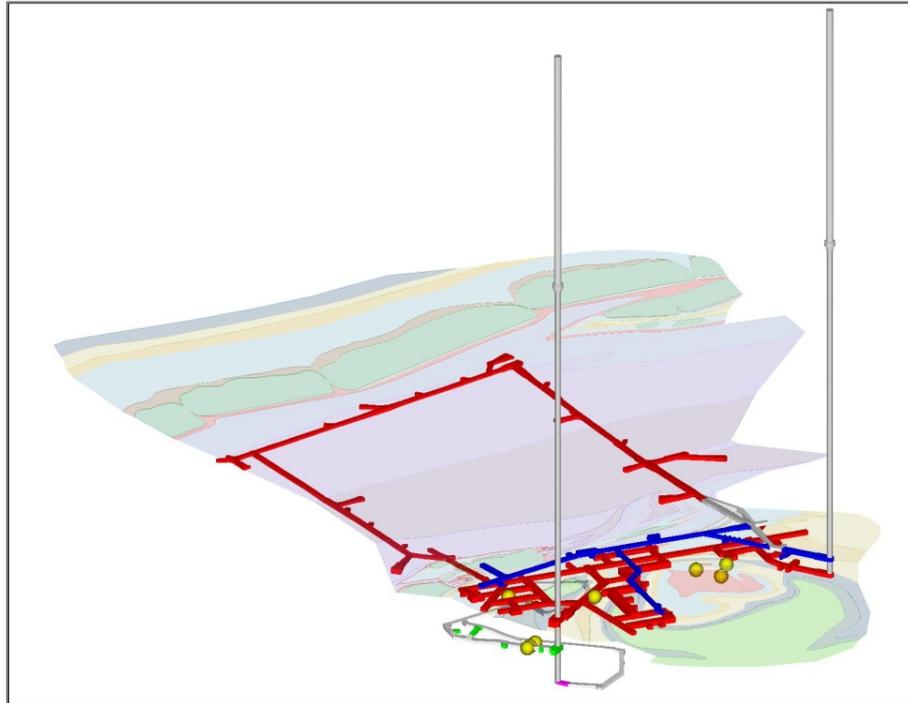


Abb. 3.8 Lage der acht Gorleben-Bank-Aufschlüsse mit einer Mächtigkeit von mehr als 20 cm (gelbe Kugeln) im Verhältnis zum Grubengebäude-Modell des Erkundungsbergwerkes Gorleben (blau – 820 m-Sohle, rot – 840 m-Sohle)
Zur besseren Anschaulichkeit wurde der geologische Riss der 840 m-Sohle eingefügt.

Die geologischen Aufnahmen der Gorleben-Bank-Aufschlüsse in den untertägigen Erkundungsbohrungen und in den Auffahrungen des Grubengebäudes zeigen für den bisher untersuchten Teil des Salzstocks Gorleben deutliche Mächtigkeitsschwankungen (**Abb. 3.7**). Oft werden selbst an den gegenüberliegenden Stößen von Streckenauffahrungen deutliche Unterschiede in der Zusammensetzung und im Aufbau sowie in der Mächtigkeit der Gorleben-Bank registriert. Dies trifft z. B. auch auf die in den Gorleben-Bank-Bohrungen festgestellten Unterschiede hinsichtlich der Ausbildung und Mächtigkeit der Gorleben-Bank auf unterschiedlichen Faltenschenkeln ein und derselben Falten zu (Kap. 3.4.4).

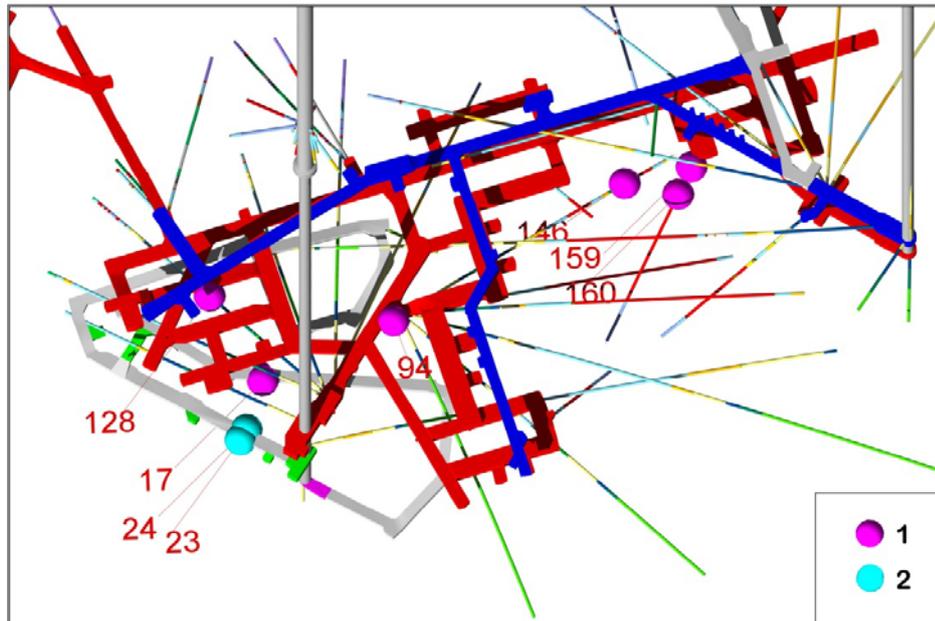


Abb. 3.9 Räumliche Verteilung der Gorleben Bank-Aufschlüsse mit einer Gesamtmächtigkeit der Zonen II bis VII von mehr als 20 cm (1 - magenta)

Farblich hervorgehoben (2 - cyan) sind die Gorleben-Bank-Aufschlüsse, die mächtiger als 20 cm sind und einen Lösungszutritt aufweisen (Draufsicht, die Aufschluss-Nummern entsprechen einer BGR-internen Nummerierung aller Gorleben-Bank-Aufschlüsse).

Die in den beiden Schächten bzw. in den Bohrungen in unmittelbarer Schachtnähe festgestellten Gorleben-Bank-Durchgänge sind durch geringe Mächtigkeiten und ausgeprägte Mächtigkeitsschwankungen auf kurze Distanzen charakterisiert. Im Schacht 2 (und in seinem unmittelbaren Umfeld) ist die Gorleben-Bank in den 26 detailliert analysierten Aufschlüssen unterschiedlich mächtig ausgebildet – die minimale Mächtigkeit beträgt 1,3 cm, der maximale Wert ist 11 cm. An zwei der 26 Aufschlüsse, d. h. in den Bohrungen 00YES02RB149 und 00YES02RB150 wurden Lösungszutritte registriert. Auf der Grundlage geochemischer Kriterien zur genetischen Eingruppierung von salinaren Lösungen werden die Zutritte nur zu einem geringen Teil auf die Gorleben-Bank bzw. ihr unmittelbares Umfeld zurückgeführt. Die in den Bohrungen zugetretenen Lösungsvolumina betragen 84,65 m³ bzw. 51,67 m³ und werden überwiegend Lösungszutritten aus der Topfrisszone (verursacht durch den Einsatz des Gefrierfahrens beim Schachtabteufen) zugeordnet (Kap. 3.4.3).

Die festgestellten Mächtigkeitsschwankungen sind nur zu einem geringen Teil auf die Sedimentation und Diagenese der Gorleben-Bank zurückzuführen. Typische Beispiele dafür sind die in der Schachtunterfahrung Schacht 1 festgestellten „slumping-

Strukturen“, die mit primär-sedimentären bis frühdiagenetischen Prozessen erklärt werden. Das Paläorelief während der Ablagerung und die Bedingungen bei der Diagenese wirken sich auf die Mächtigkeiten der Gorleben-Bank aus. Der im stratigraphisch Liegenden des Linien- und Orangesalzes vorkommende Hauptanhydrit weist durch lokale Unterschiede in den Sedimentationsbedingungen /BÄU 00/, /BEH 01/ bei ungestörter Basisfläche vereinzelt ein am Top stark gegliedertes Relief auf /HEM 68/, /KOS 69/. /FUL 69/ prägte für derartige Anhydritaufragungen den Begriff „Anhydrit-Klippen“. Im Salzstock Gorleben werden nur vereinzelt durch unterschiedliche Sedimentationsbedingungen verursachte Zunahmen der Mächtigkeiten der Gorleben-Bank beobachtet, was durch die Lage des Standortes im Zentralbereich des Zechsteinbeckens begründet werden kann. Deshalb wurde nur ein kleiner Teil der Mächtigkeitsschwankungen der Gorleben-Bank durch das sich noch in geringem Maße durch die Steinsalzlagen des z3-Basissalzes bis einschließlich des Unteren Orangesalzes durchpausende Relief des Hauptanhydrits verursacht.



Abb. 3.10 Boudinage an einem ca. 10 cm mächtigen Gorleben-Bank-Aufschluss im Ergebnis intensiver salztektonischer Beanspruchung

Foto: DBE

Der weitaus größere Teil der Mächtigkeitsschwankungen wird auf tektonische, an den Salzaufstieg gebundene Abscherungen und Boudinage-Prozesse zurückgeführt (Kap. 3.2 und Kap. 3.3). Diese halokinetische Deformation und Überprägung der Gorleben-Bank setzt mit Beginn des Kissenstadiums des Salzstocks Gorleben, d. h. im Röt bis Muschelkalk ein, z. B. /ZIR 91/. Bei geringmächtigen, zwischen einigen mm bis

2 – 3 cm schwankenden Mächtigkeiten der geschichteten Anhydritlagen (Zonen V – VI) wird die Gorleben-Bank im Verlaufe der Halokinese oft intensiv verfaltet, häufig ohne makroskopisch sichtbares Abreißen der Gorleben-Bank. Bei größeren Mächtigkeiten der Geschichteten Anhydritlagen bricht der Schichtenverband der Gorleben-Bank aufgrund der Kompetenz des Anhydrits und/oder durch die Wirkung der Tonlage (Zone III), die eine Schwächezone bei der salztektonischen Beanspruchung darstellt, auf (Abb. 3.10). Beim Salzaufstieg erfolgt eine z. T. sehr intensive Boudinage der Gorleben-Bank und es kommt entlang von schichtparallelen Bewegungszonen zur Abscherung und Umlagerung der Anhydritschichten.

3.4.2.3 Klüfte und sekundäre Umkristallisationsbereiche in der Gorleben-Bank bzw. in ihrem unmittelbaren Umfeld

Im Verlaufe des Salzaufstiegs bzw. der Diapirbildung verhalten sich die halitischen Schichten von Salinarformationen plastisch und kriechen. Im Gegensatz dazu bilden sich in den anhydritischen Schichten und in den Übergangsbereichen von Gesteinen mit deutlich unterschiedlichem Materialverhalten (z. B. Übergang von Halit zu Anhydrit) bei der Deformation Klüfte. Die Klüfte werden (bedingt durch den hohen Kompetenzkontrast zu den halitischen Gesteinen) oft von Hohlrumbildungen im Kontaktbereich der anhydritischen Schichten begleitet. In diese Hohlräume (zumeist im Liegenden der Gorleben-Bank) dringen die beim Salzaufstieg mobilisierten Lösungen ein, kristallisieren z. T. infolge der Aufwärtsbewegung der Salzgesteine und der daran gebundenen p-T-Änderungen in den Klüften bzw. Hohlräumen aus oder werden darin gespeichert. Die von der Gorleben-Bank ausgehenden Klüfte weisen keine Versätze auf und kommen nur bis maximal 1 bis 3 m im Liegenden und nur selten im unmittelbaren Hangenden der Gorleben-Bank vor. Abb. 3.11 und Abb. 3.12 zeigen Beispiele für derartige Bildungen in der Gorleben-Bank und ihrem unmittelbaren Umfeld.



Abb. 3.11 Ausbildung der bei der Halokinese im Bereich der Zone III aufgerissenen und durch sekundäre Halite (farblos) und Carnallite (rot) wieder verheilten Gorleben-Bank

Gut zu sehen sind neben der Zone IV (Sekundärmineralisationszone) auch die im Liegenden der Gorleben-Bank ausgebildeten Sekundärmineralisationen, Foto: DBE.



Abb. 3.12 Aufschluss der Gorleben-Bank mit deutlichen Anzeichen einer Deformation

Ausgehend von der Zone IV wird im Liegenden der Gorleben-Bank ein bei der Deformation aufgerissener Hohlraum, ausgefüllt überwiegend mit Sekundärmineralen (Carnallit und untergeordnet Halit) und untergeordnet mit Salzlösung (beim Auffahren ausgetreten) beobachtet. Die liegenden Anhydritschichten der Gorleben-Bank (Zone II) sind zerrissen, Foto: DBE.

Ein typisches Resultat derartiger salztektonischer Prozesse ist die Bildung der Sekundärmineralisationszone (Zone IV, Abb. 3.11), die auf Abreiß- bzw. Scherprozesse entlang der Ton-Zone (Zone III) während der Halokinese zurückzuführen ist. Bei der Bewertung dieser Sekundärzone ist zu berücksichtigen, dass die Zone IV in 91 von den insgesamt 181 untersuchten Gorleben-Bank-Durchgängen nicht beobachtet wurde. Die verbleibenden 90 Aufschlüsse sind durch stark wechselnde Mächtigkeiten der Zone IV charakterisiert (Abb. 3.13). Die mittlere bankrechte Mächtigkeit der Zone IV der Gorleben-Bank beträgt in den 90 Aufschlüssen 2,9 cm. Nur sehr lokal begrenzt werden Mächtigkeiten größer 10 cm beobachtet. Die Mächtigkeit dieser Zone erreicht maximal 42 cm, wobei es keine Korrelation zwischen der Gesamtmächtigkeit der Gorleben-Bank und der Mächtigkeit der Zone IV gibt.

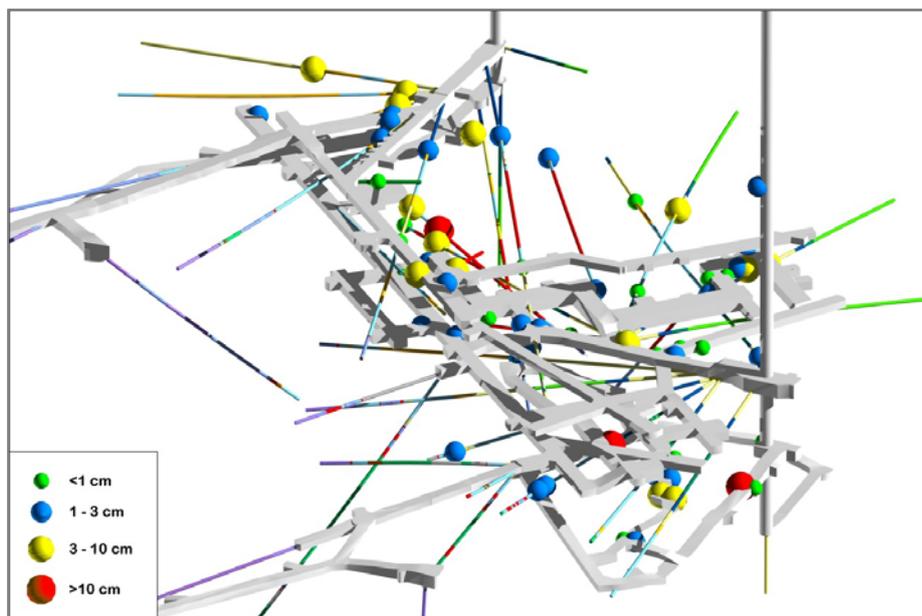


Abb. 3.13 Verteilung der Mächtigkeit der Zone IV (Sekundärmineralisationszone) in den Aufschlüssen der Gorleben-Bank in den Erkundungsbohrungen und Auffahrungen im Infrastrukturbereich des Erkundungsbergwerkes Gorleben
Erläuterungen siehe Abb. 3.7.

In einigen Gorleben-Bank-Aufschlüssen bestehen die Füllungen der Sekundärmineralisationszone aus mehreren Halitlagen, welche durch dünne Ton- oder Sulfatsäume oder Carnallitbildungen voneinander getrennt sind. Dies deutet darauf hin, dass die Bewegungen entlang der Ton-Lage der Gorleben-Bank z. T. mehrfach stattgefunden haben müssen (ruckartiger, etappenweiser Aufstieg des Salzes bei der Halokinese).

3.4.3 Lösungsvorkommen im Erkundungsbergwerk Gorleben, die der Gorleben-Bank und ihrem unmittelbaren Umfeld zugeordnet werden

Die bei der Erkundung des Salzstocks Gorleben angetroffenen salinaren Lösungen und Gase sind ungleichmäßig über den Salzstock verteilt. Von den insgesamt 666 m³ während der Erkundung des Salzstocks Gorleben (Tiefbohrungen, Schächte und untertägige Erkundungsbohrungen) zugetretenen Lösungen stammen die meisten Lösungen aus den Anhydritschichten der Leine-Folge (z3), wobei im Rahmen der Komplexinterpretation des „Lösungskatasters Gorleben“ /BFS 02/ 261 m³ (d. h. 39 %) dem z3OSM und seinem unmittelbaren Umfeld zugeordnet wurden /SCM 09/.

Die salinaren Lösungen weisen eine z. T. unterschiedliche Genese auf. Auf der Grundlage der Hauptkomponenten-Zusammensetzungen und Spurenelementsignaturen werden die Lösungen als Reste eingedunsteten Meerwassers der Zechsteinzeit, als Metamorphoselösungen oder als Mischung zwischen diesen gedeutet /VBO 92/, /RÜH 95/, /SIE 96/, /ELL 99/, /SCM 09/. In Salzstöcken sind die heutigen salinaren Speichergesteine (fast ausschließlich Kluftspeicher) für die angetroffenen Lösungen meist nicht ihr ursprünglicher Entstehungsort. So stammen auch die aktuell in der Gorleben-Bank bzw. in ihrem unmittelbaren Umfeld gespeicherten salinaren Lösungen ursprünglich aus anderen, am Aufbau des Salzstocks beteiligten Salzsichten und sind im Verlaufe des Salzaufstiegs bzw. der Halokinese umverteilt worden.

Die Speichermöglichkeiten für Salzlösungen, Kondensate und Gase können in der Gorleben-Bank bzw. in ihrem unmittelbaren Umfeld folgende Ausprägungen aufweisen:

- schichtparallele Hohlräume im Bereich der tonig ausgebildeten, bei halokinetischen Deformationen in Abhängigkeit von den vorherrschenden Spannungsverhältnissen z. T. aufgerissenen Scherzone (Zone III), die teilweise durch sekundäres Steinsalz und sekundären Carnallit verheilt (Zone IV) und relativ selten lösungs- oder gasführend sind;
- Speicherräume in den aufblätternen schichtparallelen Anhydritlamellen der Zonen V und VI;
- Klüfte, welche die Gorleben-Bank quer oder schräg zur Schichtung durchziehen und auf Boudinage oder Scherprozesse zurückzuführen sind;
- sekundäre Carnallitfüllungen in Faltenscharnieren unterhalb der Gorleben-Bank;

- Hohlräume oder teilweise lösungserfüllte Rekristallisationsbereiche, bevorzugt im Liegenden der Gorleben-Bank, hervorgerufen durch unterschiedlich kompetentes Verhalten der anhydritischen Gesteine der Gorleben-Bank und der halitischen Gesteine im Unteren bzw. Oberen Orangesalz.

Das Vorkommen von salinaren Lösungen ist für die Gorleben-Bank bzw. ihr unmittelbares Umfeld keineswegs typisch. Von den 181 bisher untersuchten Gorleben-Bank-Durchgängen waren nur 17 lösungsführend. In den im Infrastrukturbereich des Erkundungsbergwerkes gestoßenen Erkundungsbohrungen wurden 61 Gorleben-Bank-Durchgänge dokumentiert, von denen lediglich drei durch den Zutritt von volumenmäßig erfassbaren und geochemisch analysierbaren Lösungen charakterisiert waren (Abb. 3.14). Offensichtlich kam es nur in wenigen Fällen während der Halokinese zur Bildung von Speicherräumen in der Gorleben-Bank oder in ihrem unmittelbaren Umfeld (Abb. 3.11 und Abb. 3.12). Ein großer Teil der in der Gorleben-Bank und in ihrem Umfeld ursprünglich gespeicherten Lösungen ist infolge von p-T- und Konzentrations-Änderungen auskristallisiert, d. h. es bildeten sich verheilte Klüfte oder Rekristallisationsbereiche aus. Abb. 3.9 zeigt, dass es keinen Zusammenhang zwischen der Gesamtmächtigkeit der Gorleben-Bank und ihrer Lösungsführung gibt. Von den acht im Infrastrukturbereich nachgewiesenen Gorleben-Bank-Aufschlüssen mit einer Mächtigkeit von mehr als 20 cm sind lediglich zwei durch einen Lösungszutritt charakterisiert. Es existieren vergleichsweise viele Gorleben-Bank-Durchgänge, die zwar Mächtigkeiten größer 10 cm aufweisen, aber nicht lösungsführend sind. Es besteht auch kein Zusammenhang zwischen der Mächtigkeit der Sekundärmineralisationszone (Zone IV) und der Lösungsführung der Gorleben-Bank.

Die Mehrzahl der Gorleben-Bank-Aufschlüsse weist keine Lösungs- und Gasführung auf (Abb. 3.9 und Abb. 3.14). Die lösungsführenden Bereiche der Gorleben-Bank in Bohrungsaufschlüssen beschränken sich auf die untertägigen Bohrungen 01YEF02RB014 und 02YEA04RB023. Gorleben-Bank-Durchgänge, die nur wenige Zentimeter mächtig sind und salztektonisch nur gering beansprucht wurden, sind in der Regel lösungsfrei.

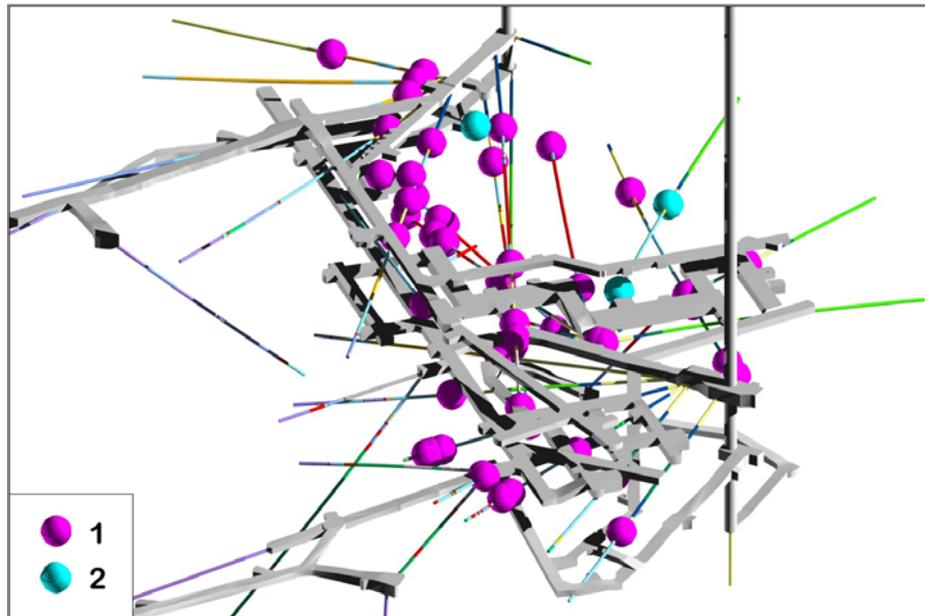


Abb. 3.14 Gegenüberstellung der in den untertägigen Erkundungsbohrungen im Infrastrukturbereich festgestellten Gorleben-Bank-Durchgänge (magenta) und der dabei fixierten Lösungszutritte (cyan)

Dies trifft z. B. auf die Mehrzahl der Gorleben-Bank-Durchgänge in den Schächten zu. Von den 26 in Schacht 2 (bzw. in seinem unmittelbaren Umfeld) dokumentierten Gorleben-Bank-Aufschlüssen konnten lediglich für zwei die Zutrittsmengen bestimmt werden, wobei die maximal zugetretene Lösungsmenge $84,65 \text{ m}^3$ betrug. Von den zehn in Schacht 1 dokumentierten Aufschlüssen konnten nur für zwei die Zutrittsmengen der Lösungszutritte gemessen werden, die maximal $79,66 \text{ m}^3$ umfassten. Bei der Bewertung der Mengen und der chemischen Zusammensetzungen dieser Lösungszutritte in die Schächte des Erkundungsbergwerks bzw. in Bohrungen im unmittelbaren Nahfeld der Schächte ist zu berücksichtigen, dass es sich bei den zugetretenen Lösungen um stark verdünnte saline Mischlösungen handelt. Aufgrund ihrer sehr geringen Bromid-Konzentrationen (meist kleiner 100 ppm) stellen die unterhalb der Blödit-Sättigung liegenden Lösungen eine Mischung aus relativ geringen Lösungsanteilen aus der Gorleben-Bank und dominierenden Anteilen von Lösungen aus der Topfrisszone der Schächte dar (Kap. 3.4.2.2). Ausgehend von diesen, auf neuen geochemischen Auswertungen basierenden Bewertungen der Lösungszutritte werden der Gorleben-Bank im Bereich der Schächte deutlich geringere Lösungsvolumina zugeordnet als ursprünglich angenommen /BFS 02/, /SCM 09/.

Die Größe der Lösungszutritte aus der Gorleben-Bank beträgt in den meisten Fällen weniger als 1 m³. Verbindungen zwischen einzelnen, räumlich eng beieinander liegenden Zutrittsstellen wurden bisher nur lokal begrenzt beobachtet (siehe Vorkommen in der Füllortstrecke Schacht 1, in Schacht 1 von 858 m bis 863 m und in der Bandstrecke auf der 880 m-Sohle). Derartige Verbindungen, z. B. über schichtparallel angelegte Klüfte/Störungen, sind aufgrund der zum größten Teil starken salztektonischen Beanspruchung der Gorleben-Bank und der ausgeprägten Zerschierung und Boudinage des anhydritisch dominierten Schichtpaketes (mit ausgeprägten räumlichen Trennungen zwischen den einzelnen Boudins, Abb. 3.10) sowie infolge der meist sehr geringen Mächtigkeit der Gorleben-Bank äußerst selten.

Eine ausführliche Interpretation der chemischen Zusammensetzung der Lösungen aus der Gorleben-Bank ist in /SCM 09/ enthalten. Alle im Infrastrukturbereich des Grubengebäudes (ohne die Schächte) aus dem z3OSM zugetretenen Lösungen sind an Carnallit gesättigt. Zusätzlich sind einige Proben an Kieserit gesättigt (Linie R-Z im Jänecke-Diagramm, /SCM 09/). Alle Proben weisen geringe Mengen an fiktivem CaSO₄ auf und sind frei von fiktivem CaCl₂. Aus den fehlenden CaCl₂-Gehalten folgt, dass keine Interaktion der Lösungen mit Karbonaten stattgefunden hat. Mit Ausnahme der Subrosionszone (d. h. des „Hutgesteins“) des Salzstocks und seltenen Calcit/Dolomit-Bildungen in einigen Kohlenwasserstoff-führenden Hauptsalz-Proben /HAM 12/ ist Magnesit das einzige Karbonatmineral im Salzstock Gorleben.

Die Mn-Gehalte der Lösungen aus dem Mittleren Orangesalz (z3OSM) variieren zwischen 12,3 ppm bzw. 23,1 ppm und sind mit durchschnittlich 16 ppm gegenüber der durch Eindunstung maximal zu erwartenden Konzentration um den Faktor 800 erhöht. Als Mn-Quelle kommt Mn-Karbonat, wie z. B. Kutnohorit, sehr wahrscheinlich nicht infrage, da dieses Mineral in den Zechstein-Evaporiten nicht nachgewiesen wurde. Wesentlich wahrscheinlicher ist, dass Mn aus den Schichtsilikaten der Tonlage (Zone III) generiert wird, an die es häufig gebunden ist. Ähnliches gilt für die Fe-Gehalte der Lösungen aus dem z3OSM, die gegenüber eingedunstetem Meerwasser deutlich erhöht sind. Die Lösungen weisen Konzentrationen von 159 ppm bis 1176 ppm auf. Letztere sind somit um maximal das 3876-fache gegenüber dem eingedunsteten Meerwasser erhöht. Das Fe-/Mn-Verhältnis der Zutrittslösungen liegt im Mittel bei 16,7.

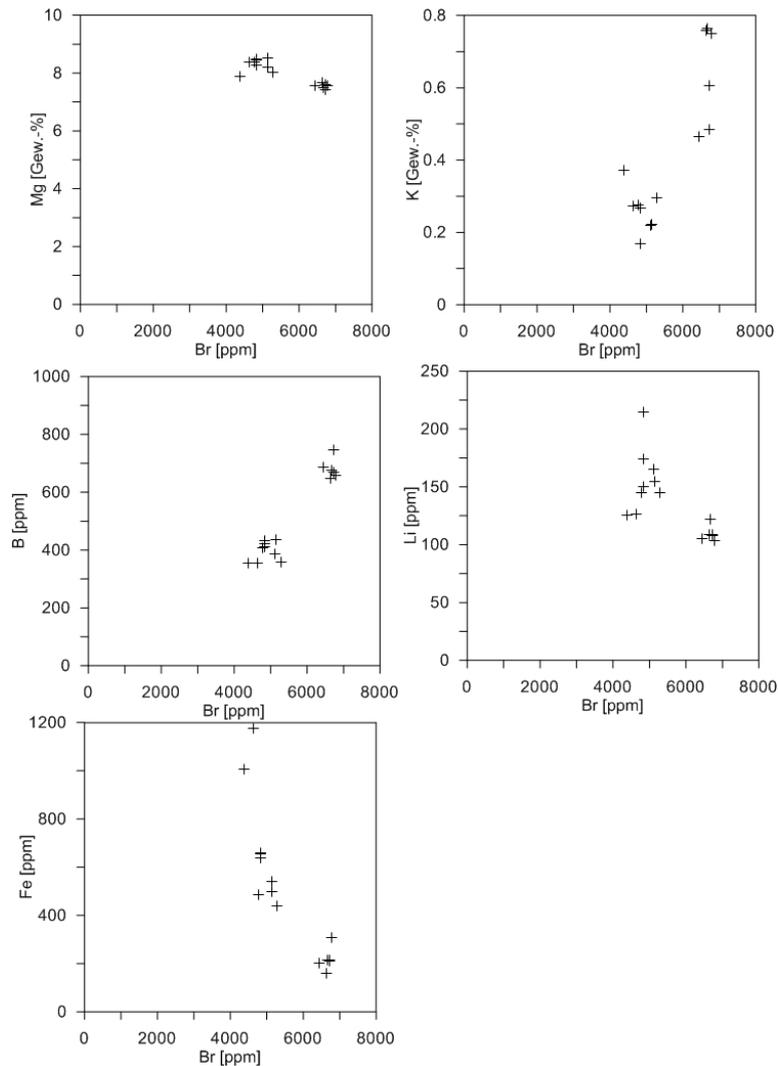


Abb. 3.15 Auftragung der Mg-, K-, B-, Li- und Fe-Gehalte gegen die Bromid-Gehalte der z3OSM-Lösungen aus dem Infrastrukturbereich des Erkundungsbergwerkes Gorleben

Bei Auftragung der Bromidkonzentrationen gegen Mg, K, B, Li und Fe (Abb. 3.15) zeigt sich, dass keine Korrelationen innerhalb der Datengruppe festgestellt werden können. Die Bromidgehalte variieren zwischen 4381 ppm und 6778 ppm, bei einem Mittelwert von 5588 ppm. Sie entsprechen dem Bromidgehalt des carnallitischen Eindunstungsstadiums.

Bemerkenswert ist der relativ hohe Li-Gehalt der Lösungen aus dem z3OSM und seinem Umfeld von durchschnittlich 137 ppm (Variationen zwischen 104 ppm und 214 ppm, Abb. 3.16). Dieser Wert ist gegenüber der maximal zu erwartenden Konzentration

ration aus eingedunstetem Meerwasser um etwa das zehnfache erhöht. Dies bedeutet, dass die hohen Li-Gehalte nicht aus der Eindunstung von Meerwasser stammen.

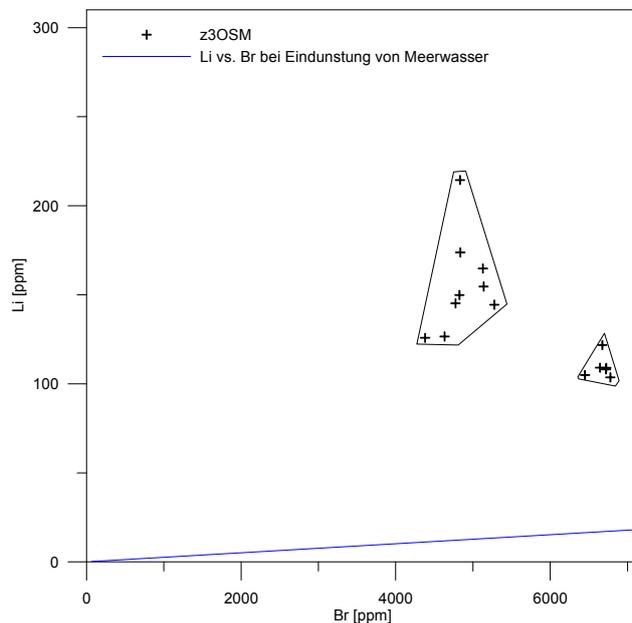


Abb. 3.16 Auftragung der Li- gegen die Bromid-Gehalte für die z3OSM-Lösungsproben aus dem Infrastrukturbereich des Erkundungsbergwerkes Gorleben

In der Auftragung der Li- gegen die Bromid-Gehalte zeigen die z3OSM-Proben einen deutlichen Abstand zur Meerwasserlinie (Abb. 3.16), was die Li-Anreicherung in den Lösungen aus der Gorleben-Bank bzw. aus ihrem unmittelbaren Umfeld verdeutlicht. Die erhöhten Li-Gehalte stammen sehr wahrscheinlich aus der Wechselwirkung der Lösungen mit den Schichtsilikaten der Gorleben-Bank. Analysenergebnisse zu Li-Gehalten in tonigen bzw. tonig-anhydritischen Schichten von Salinarformationen sind kaum veröffentlicht worden. Nur /OHR 68/ publizierte Li-Gehalte vom Roten Salzton (z4RT) der Aller-Folge. Die Daten variieren zwischen 47 ppm und 91 ppm.

Bei Auftragung der B- gegen die Bromid-Gehalte wird eine Zweiteilung der Lösungen aus dem z3OSM deutlich (Abb. 3.15). Ein großer Teil der Lösungen weist B-Gehalte von 355 ppm bis 436 ppm auf, wobei diese Proben nahe der Meerwasserlinie dargestellt werden. Für einen Teil der Lösungsproben wurden höhere B-Gehalte von 646 bis 745 ppm bestimmt, mit einem deutlichen Abstand zur Meerwasserlinie. Da durch die Eindunstung von Meerwasser maximal 500 ppm B in der Restlösung (Bischofitsättigung) erreicht werden können, ist es sehr wahrscheinlich, dass die hohen Borgehalte

auf Wechselwirkungsprozesse der Lösungen mit Bormineralen (z. B. Lüneburgit), wie sie in Klüften z. B. des z3GT vorkommen, zurückzuführen sind. Möglicherweise wird durch die salinaren Lösungen auch das ggf. in Tonmineralen der Gorleben-Bank-Tonlage (Zone III, Abb. 3.5) fixierte B-Ion freigesetzt.

Die Al-Gehalte der Lösungen aus dem z3OSM variieren zwischen Werten im Bereich der Nachweisgrenze von <0,005 ppm und 6,14 ppm. Im Vergleich dazu erreicht der Al-Gehalt des Meerwassers bei maximaler Eindunstung einen Wert von bis zu 0,01 ppm. Da die meisten Proben höhere Konzentrationen aufweisen, kann daraus geschlossen werden, dass das Al im Wesentlichen nicht aus dem Meerwasser, sondern aus einer anderen Quelle stammen muss. In diesem Zusammenhang sind Schichtsilikate zu nennen, die z. B. in die Tonlage des z3OSM eingeschaltet sind und durch Wechselwirkung mit salinaren Lösungen auch Al in die fluide Phase abgegeben haben. Einige Proben aus den Bohrungen 02YER02RB027, 02YER02RZ026 sowie 01YEF20RB014 weisen niedrigere Gehalte auf, was auf Verdünnungseffekte oder Speicherung in Schichtsilikat-freien Bereichen der Gorleben-Bank rückschließen lässt.

Die Rb-Gehalte zwischen 0,2 ppm und 6,7 ppm sind ebenfalls auf eine unterschiedliche Genese der Lösungen zurückzuführen. Nur eine Lösungsprobe aus dem z3OSM aus der Bohrung 01YEF20RB014 kann aufgrund des Rb/Br-Verhältnisses einer primären Meerwasserrestlösung des höheren Eindunstungsstadiums zugeordnet werden. Die anderen vier Lösungen entsprechen im Rb/Br-Verhältnis Lösungen, die eindeutig durch die Mischung einer durch Eindunstung stark konzentrierten Meerwasserrestlösung sowie einer metamorphen Lösung entstanden sind (Abb. 3.17).

Ein großer Teil der Proben des z3OSM kann aufgrund des Rb/Br-Verhältnisses als Lösung $Z_{(35\text{ °C})}$ beschrieben werden. Solche Lösungen entstehen durch die synsedimentäre Auflösung primärer Bischofitkristalle bei 35 °C. Es ist anzunehmen, dass diese Lösungen im Verlauf ihrer weiteren Entwicklung, insbesondere während der Salzstockbildung, bis in das z3OSM bzw. in Hohlräume im Umfeld der Gorleben-Bank mobilisiert wurden, wo sie gespeichert werden konnten. Durch Interaktion mit den im z3OSM vorkommenden Schichtsilikaten reicherten sich in den eingeschlossenen salinaren Lösungen Al und Li sowie Mn und Fe an.

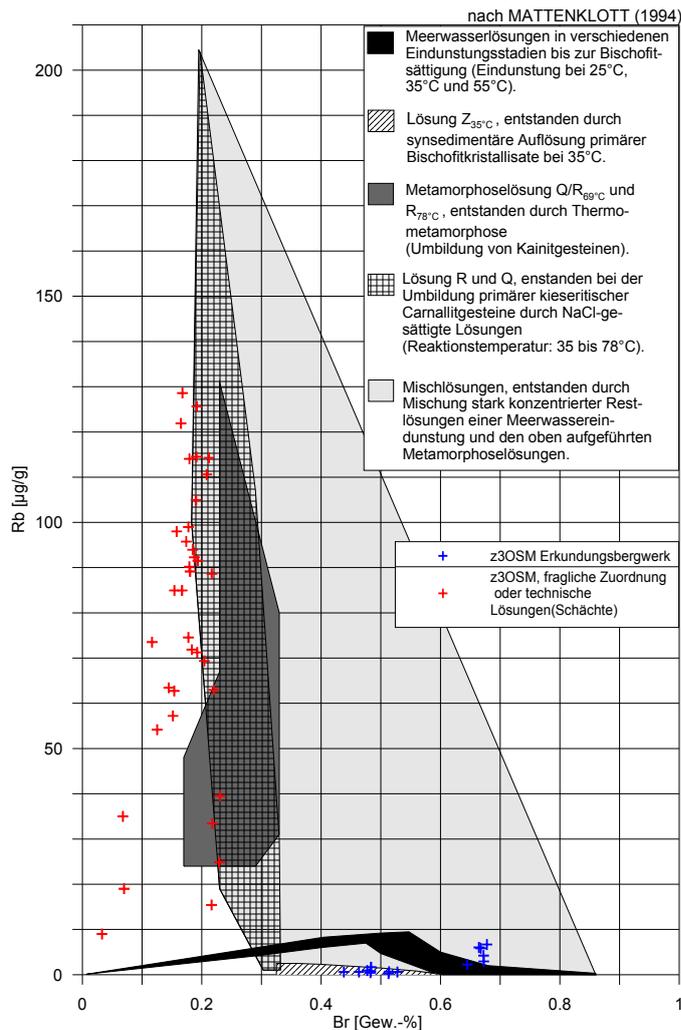


Abb. 3.17 Auftragung der Rb- gegen die Bromid-Gehalte für die z3OSM-Lösungsproben aus dem Erkundungsbergwerk Gorleben

Feldereinteilung nach /MAT 94/

Ein Teil der in den Schächten zugetretenen z3OSM-Lösungen ist im Vergleich zu den typischen Lösungszutritten in den Erkundungsbohrungen im Infrastrukturbereich geochemisch verändert worden. Die Untersuchungen haben ergeben, dass diese Lösungen NaCl-gesättigt sind, CaSO_4 als fiktive Komponente enthalten und geringe Gehalte von K, Mg und Br aufweisen. Der geochemische Stoffbestand dieser Lösungen zeigt Merkmale einer relativ schwach eingedunsteten Meerwasserlösung, welche die Blödit-sättigung noch nicht erreicht hat. Bei diesen Lösungen wurde die ursprüngliche Zu-sammensetzung verändert. Als Ursachen können angenommen werden, dass Lösun-gen aus der Topfrisszone der Schächte, Kondenswasser aus der Bewetterung oder Restwasser des Schachtverbaus dem System zugeführt wurden. Große Anteile der in den oberen Abschnitten der Schächte nachgewiesenen größeren Lösungsvolumina

und einige mittlerweile versiegte Zutrittsstellen sind infolge des Einsatzes des Gefrierverfahrens bei der Schachtabteufung auf Topfrisse, die im Schacht 1 bis ca. 65 m unterhalb des Salzspiegels angetroffen wurden, zurückzuführen. Das infolge dieser drei beschriebenen Prozesse zugeführte frische Wasser reagierte möglicherweise mit dem Salzgestein, so dass Na, Cl, Ca und SO₄ in der Lösung angereichert wurden. Je nach Gesteinstyp wurden auch Polyhalit und Carnallit aufgelöst, wodurch sich die Lösungszusammensetzung abermals änderte. Einige Lösungszusammensetzungen können auch durch Mischungen mit anderen salzstockinternen Lösungen zusätzlich verändert worden sein.

Die chemischen Angaben zu den Lösungen aus der Gorleben-Bank (z3OSM) bzw. aus ihrem unmittelbaren Umfeld unterscheiden sich von den anderen, im Salzstock Gorleben ausgehaltenen Lösungstypen /SCM 09/. Insbesondere trifft dies auf die z. T. sehr hohen Li-Gehalte von bis zu 401 ppm und die sehr hohen Gehalte von Br (bis zu 6778 ppm) sowie von Rb zu (bis zu 6,7 ppm). Charakteristisch sind auch die z. T. sehr niedrigen Ba-Gehalte von im Mittel 0,002 ppm sowie die hohen Li/Br- und Br/Mg-Verhältnisse von 0,044 bzw. 0,090 (ausführlicher siehe /SCM 09/). Die Entstehung der Lösungen kann wahrscheinlich auf eine synsedimentäre Auflösung von Bischofitkristallen bei 35 °C zurückgeführt werden. Im Verlauf der Salzstockbildung wurden diese Lösungen mobilisiert, im z3OSM bzw. in ihrem Umfeld gespeichert und an B, Br, Li, Fe und Mn angereichert.

In der Literatur wird die Herkunft der erhöhten Li-Gehalte in salinaren Lösungen z. Zt. intensiv diskutiert. Aus salinaren Lagerstätten sind keine eigenständigen Li-Minerale bekannt. In /BÄU 00/ wird festgestellt: *„Aufgrund der stark unterschiedlichen Ionenradien zwischen Li und den einfach geladenen Hauptelementkationen der Salzminerale ist ein Li-Einbau für diese in die Kristallstruktur während der Evaporation unwahrscheinlich (Ionenradien in 6-Koordination für Li = 0,76 Å, für Na = 1,18 Å und für K = 1,64 Å). Ein diadocher Einbau des Li für Mg (Ionenradius Mg = 0,72 Å), wie er für Silikatgesteine bekannt ist, kann bei Kristallisation der evaporitischen Ionenkristalle aufgrund des fehlenden Ladungsausgleiches kaum stattfinden. Hieraus ist abzuleiten, dass das Lithium während der Evaporation in der Lösung angereichert wird /KLI 98/, /SCH 95/. Nach Modellrechnungen von /SCH 95/ ist im Punkt Z der 25 °C-Isotherme des quinären Jänecke-Systems eine maximale Li-Konzentration von 26,8 µg/g in der Lösung vorhanden. Die Li-Gehalte der analysierten Fluid Inclusions reichen von 46 µg/g bis 196 µg/g. Die in den Fluid Inclusions gefundenen Werte bzw. die Br/Li-Verhältnisse liegen z. T. um ein Vielfaches über den Maximalwerten der Modellrechnung und sind*

mit dem derzeitigen Stand der Forschung nicht zu erklären. Auch /SCH 95/ und /VBO 92/ geben für $MgCl_2$ - oder $MgCl_2$ - $CaCl_2$ -normative Lösungen aus dem deutschen Zechstein sehr hohe, nicht erklärbare Li-Werte an.“

Da die Li-Gehalte z. T. deutlich über den durch Meerwassereindunstung zu erreichenden Konzentrationen liegen, muss mindestens eine zusätzliche Li-Quelle zur Verfügung gestanden haben, entweder im synsedimentären oder auch im postsedimentären Stadium oder in beiden Phasen. Eine Möglichkeit der Herkunft der hohen Li-Gehalte wird in Gesteinen vermutet, die Schichtsilikate führen. Nach /SCM 06/ werden erhöhte Li-Gehalte in Fluid Inclusions untertriassischer Salzgesteine (Rötsalinar aus den Niederlanden) auf Wechselwirkungen zwischen hochsalinaren Lösungen und Tonschichten zurückgeführt. Auch nach /OHR 68/ stellen Schichtsilikate eine mögliche Li-Quelle in Salzgesteinen dar. In /VBO 93/ werden /EDM 87/ zitiert, die hohe Li-Anteile in salinaren Grundwässern im granitischen Umfeld festgestellt haben. /EDM 87/ bringen die sehr hohen Li-Gehalte in der Lösung mit Austauschreaktionen zwischen Grundwasser und Biotiten (also Schichtsilikaten) unter Bildung von Kaoliniten in Verbindung.

In die Auswertung und in die Interpretation der geochemischen Untersuchungsergebnisse zu den im Lösungskataster Gorleben /BFS 02/ erfassten Lösungen fließen keine Überlegungen zur Anhydrit-/Polyhalit-Sättigung und zu den Sr-Gehalten der Lösungen ein; siehe auch /SCM 09/. Grund dafür ist, dass die Lösungen quasi immer im Gleichgewicht mit Anhydrit oder Polyhalit und selbstverständlich Halit stehen, so dass sich daraus kein relevanter Informationsgewinn ergibt. Die Sr-Gehalte werden nicht in die Interpretation der Lösungen einbezogen, da das Verhalten des Sr im Verlauf der Meerwassereindunstung und letztlich beim Einbau in die Evaporitminerale noch nicht vollständig verstanden ist. Eine Bewertung des Einflusses metamorpher Reaktionen oder von Recycling-Prozessen auf den Lösungsschemismus wird zusätzlich durch die sehr hohen Verteilungskoeffizienten (und den daran gebundenen großen Einfluss von Reservoireffekten) erschwert. Neue, in der BGR durchgeführte Mikrosondenanalysen haben gezeigt, dass kleinräumig und selbst in einem einzelnen Anhydritkristall bereits große Sr-Variationen vorkommen können.

3.4.4 Untersuchungen der Permeabilität der Gorleben-Bank

Für Permeabilitätsmessungen im Bereich der Gorleben-Bank wurde im Rahmen des Projektes „Weitererkundung Gorleben“ ein spezielles Bohr- und Untersuchungspro-

gramm umgesetzt, das Messungen in vier, speziell für diese Aufgabenstellung vorgesehenen, in unterschiedlichen Bereichen des Erkundungsbergwerkes positionierten, ca. 30 m langen Erkundungsbohrungen vorsieht. Bisher wurden Messungen in den Gorleben-Bank-Bohrungen 01YEA02RB753 und 03YEA02RB754 durchgeführt. Die Lage der Bohrungen im Grubengebäude geht aus Abb. 3.18 hervor. In beiden Bohrungen wurde die Gorleben-Bank zweimal durchörtert (Abb. 3.18, Abb. 3.19 und Abb. 3.21). Die Mächtigkeit der Gorleben-Bank variiert bei diesen Aufschlüssen von 3 cm bis 15 cm.



Abb. 3.18 Lage der beiden Gorleben-Bank-Bohrungen 01YEA02RB753 und 03YEA02RB754 im Grubengebäude des Erkundungsbergwerkes Gorleben mit jeweils zwei Gorleben-Bank-Durchgängen (gelbe Kugeln)

Eine ausführliche Darstellung der Messungen, der Untersuchungsergebnisse und der Interpretation der für die Gorleben-Bank bestimmten Permeabilitäten ist in /ZAR 12/ enthalten. Aufgrund der Messintervalllänge von 1,2 m wurden jeweils das Untere Orangesalz (z3OSU) im Liegenden und das Obere Orangesalz (z3OSO) im Hangenden mit erfasst. Für eine eindeutige Permeabilitätsbestimmung der Gorleben-Bank wurden die Permeabilitäten der benachbarten Schichten (Unteres Orangesalz - z3OSU und Oberes Orangesalz - z3OSO) separat bestimmt.

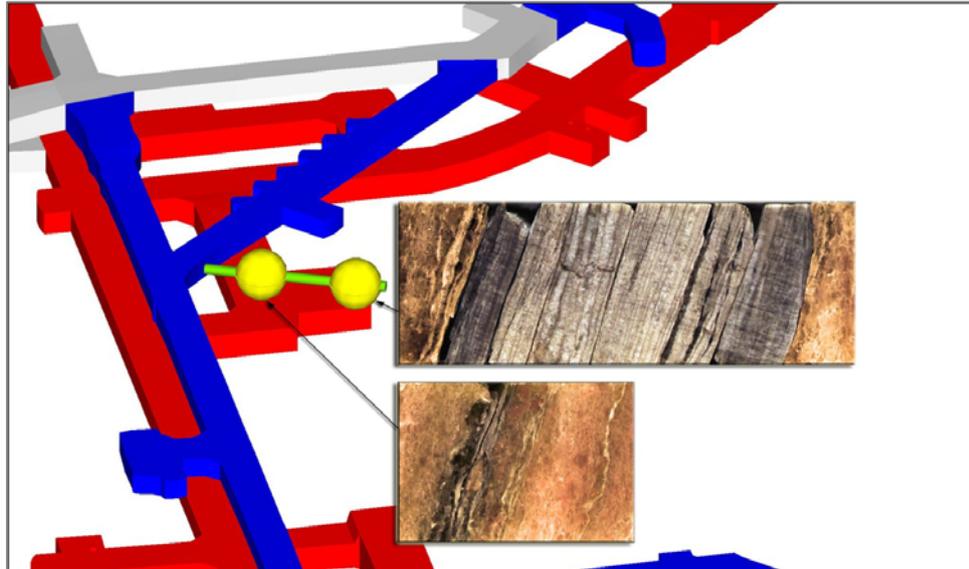


Abb. 3.19 Lage der Gorleben-Bank-Bohrung 01YEA02RB753 im Grubengebäude und Ausbildung der in dieser Bohrung angetroffenen Gorleben-Bank-Durchgänge

Die Durchmesser der im geschnittenen Zustand liegend photographierten Kerne betragen ca. 70 mm.

Die in der 01YEA02RB753 ermittelten Permeabilitäten betragen in allen stratigraphischen Einheiten $< 10^{-20} \text{ m}^2$ (Abb. 3.20). Bei allen Messungen wurden nur minimale Druckverluste im Messintervall, vereinzelt sogar Druckanstiege (z. B. Messungen bei 10,5 m (z3OSM) und bei 30,7 m (z3OSU), möglicherweise verursacht durch Lösungsführung bzw. Porendruck), registriert. Bei wenigen Messungen wurden geringfügige Schwankungen in den Druckkurven beobachtet (Abb. 3.20). Die in der Bohrung 01YEA02RB753 teilweise beobachteten, vom rechnerisch bestimmten zeitlichen Druckverlauf abweichenden Kurvenverläufe werden auf einen geringen Gas- und Laugenzutritt zurückgeführt.

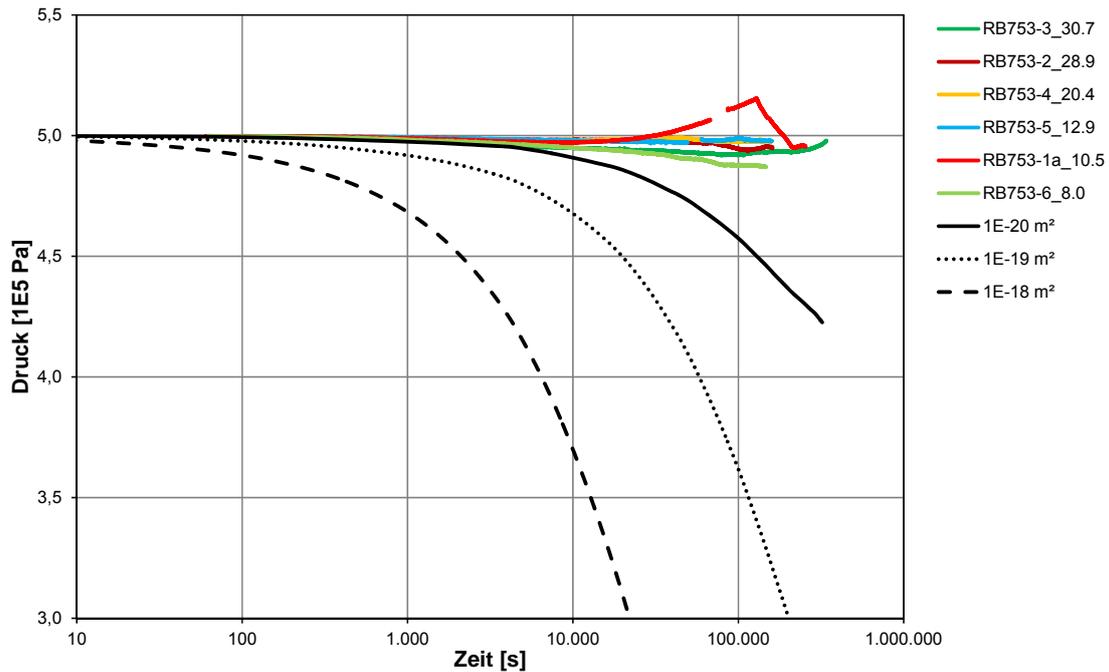


Abb. 3.20 Gemessene und berechnete Druckverläufe für die Messungen in der 01YEA02RB753

Injektionsdruck normiert auf 0,5 MPa; eine ausführliche Darstellung der den Rechnungen zugrunde gelegten Randbedingungen befindet sich in /ZAR 12/.

Die integralen Messungen in den Bereichen der Gorleben-Bank (mit den benachbarten Schichten des Oberen und Unteren Orangesalzes) in der 03YEA02RB754 (Abb. 3.21) lieferten Permeabilitäten von $< 10^{-20} \text{ m}^2$. Aus den separaten Messungen in den benachbarten Schichten wurden ebenfalls Permeabilitäten von $< 10^{-20} \text{ m}^2$ ermittelt. Bei allen Messungen wurden nur geringe Druckverluste im Messintervall registriert. Eine vom idealtypischen Kurvenverlauf abweichende Druckentwicklung mit einem vorübergehenden minimalen Druckanstieg war in den Messintervallen bei 9,2 m (z3OSM) und bei 7,0 m (z3OSO) zu beobachten (Abb. 3.22).



Abb. 3.21 Lage der Gorleben-Bank-Bohrung 01YEA02RB754 im Grubengebäude und Ausbildung der in dieser Bohrung angetroffenen Gorleben-Bank-Durchgänge

Die Durchmesser der im geschnittenen Zustand liegend photographierten Kerne betragen ca. 70 mm.

Die Permeabilität der Gorleben-Bank kann in den durch die Bohrungen 01YEA02RB753 und 03YEA02RB754 aufgeschlossenen Gebirgsbereichen mit $< 10^{-20} \text{ m}^2$ angegeben werden. Dieser Wert entspricht den Permeabilitäten, die für die angrenzenden Schichten der Leine-Folge (z3) ermittelt wurden, d. h. es wurden keine Änderungen der Permeabilitäten der Gorleben-Bank im Vergleich zu den benachbarten Gebirgsschichten festgestellt. Auch die Gorleben-Bank-Durchgänge mit stark ausgeprägter Sekundärmineralisationszone und verheilten Klüften, die die Gorleben-Bank senkrecht zur Schichtung schneiden (03YEA02RB754, Abb. 3.21), sind durch sehr geringe Permeabilitäten charakterisiert. Dies spricht für eine nachhaltige und wirkungsvolle Verheilung sowie gegen eine langzeitsicherheitsrelevante Schädigung der geologischen Barriere.

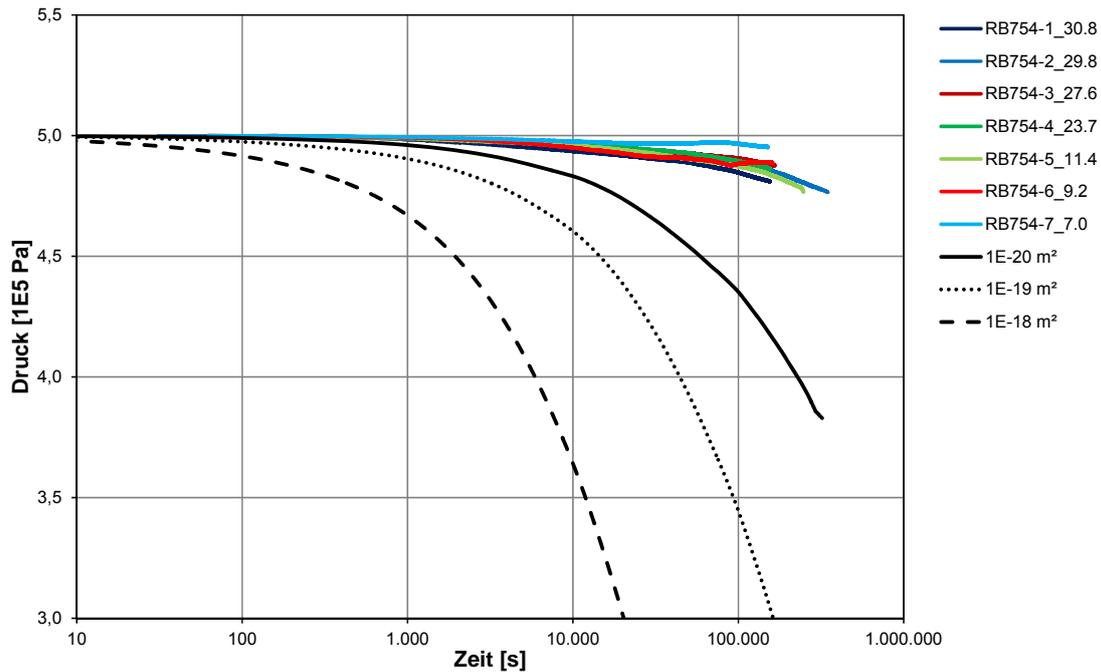


Abb. 3.22 Gemessener und berechneter Druckverlauf für die Messungen in der Gorleben-Bank-Bohrung 03YEA02RB754

Injektionsdruck normiert auf 0,5 MPa.

3.5 Zusammenfassende Bewertung der Untersuchungen zur Deformation

Die in Kap. 3 zusammengefassten, auf umfangreichen im Rahmen des Projektes „Weitererkundung Gorleben“ realisierten Detailstudien beruhenden Untersuchungsergebnisse gestatten Schlussfolgerungen zum Verhalten von Anhydrit-Schichten im Verlaufe des Salzaufstiegs und zu den Auswirkungen der an den Diapirismus gebundenen Deformationsprozesse auf die kompetenten und inkompetenten Gesteinsschichten. Die Untersuchungsergebnisse zur Deformation der anhydritischen Gesteine der Leine-Folge im ERA Morsleben (Anhydritmittelsalz, z3AM) und im Salzstock Gorleben (Gorleben-Bank, z3OSM) und die experimentellen Untersuchungen zur Boudinage von anhydritischen Gesteinen lassen sich wie folgt zusammenfassend bewerten.

1. Während der Halokinese und der daran gebundenen Extensions- und Deformationsprozesse (z. B. Scherung, Auf- und Abschiebung, Verfaltung, Stauchung) kommt es durch lokal wirkende, auf Anisotropien beruhende Spannungskonzentrationen innerhalb anhydritischer Schichten zur Boudinage und Zerblockung und/oder zum Abreißen der anhydritischen Schichten in Salinarformationen. Dies

wird durch Aufschlüsse in allen, durch Bergwerke oder Erkundungsbohrungen zugänglichen Salzstöcken belegt, wobei neben deformierten Anhydritschichten (z. B. /BOR 08/, /BEH 10/) auch deformierte und wieder verheilte Steinsalzschieben beobachtet werden (z. B. /KÜS 10/).

2. In die Zwischenräume der separierten Anhydrit-Blöcke dringt z. B. durch plastisches Fließen und/oder Lösungs-/Fällungskriechen weniger kompetentes, meist halitisches Gestein ein. Wie die Untersuchungen in den Gorleben-Bank-Bohrungen zeigen (Kap. 3.4.4), verheilen diese Bereiche sehr effektiv und erreichen Permeabilitäten, die dem umgebenden unbeeinflussten Salzgestein entsprechen.
3. Die Bromidgehalte der Halite aus den Zwischenräumen der untersuchten Anhydrit-Blöcke sind im Vergleich zum umgebenden Steinsalz deutlich reduziert. Dies weist auf die Beteiligung metamorpher Lösungen am Deformationsprozess hin.
4. Die Anhydrit-Blöcke zeigen unterschiedliche Deformationsstrukturen. Neben Neubildungen von Anhydrit- und Polyhalitkristallen werden Deformationsstrukturen, wie undulöse Auslöschung, Zwillingsbildung und Subkörner sowie Korngrenzenwanderung beobachtet. Anzeichen von Drucklösungen lassen sich in fast allen anhydritischen Schichten nachweisen und stellen einen wichtigen Deformationsprozess dar.
5. Der Grad der Zerböckung der anhydritischen Schichten hängt vor allem von den beim Salzaufstieg vorherrschenden mechanischen und geometrischen Rahmenbedingungen ab, wie z. B. von Größe und Orientierung der Spannungsvektoren, Größe und Form des durch das aufsteigende Salz einzunehmenden Volumens, Aufstiegsentfernung und -geschwindigkeit, aber auch von der Mächtigkeit und mineralogischen Zusammensetzung der Anhydritschichten.
6. Die experimentellen Arbeiten zur Deformation von Anhydrit-Schichten zeigen, dass die Größe (ausgedrückt über das Mächtigkeits-Längenverhältnis) und die Anzahl der Anhydrit-Blöcke unabhängig von der Deformationsgeometrie sind. Die Deformationsgeometrie bestimmt entscheidend die Block- bzw. Boudin-Form. Die Größe der Blöcke ist vielmehr stark von der initialen Mächtigkeit der Anhydrit-Schicht abhängig. In weiterführenden Arbeiten gilt es, die diesbezüglich festgestellten funktionalen Wechselbeziehungen anhand von weiteren In-situ-Studien zu überprüfen und hinsichtlich ihres Gültigkeitsbereiches zu bewerten.

7. Die Abhängigkeit des Zerblockungsgrades einer anhydritischen Schicht von ihrer Mächtigkeit bestätigt, dass die im Rahmen der Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse zur Deformation von vergleichsweise geringmächtigen Anhydrit-Schichten (Gorleben-Bank, Anhydritmittel) nicht ungeprüft auf das mechanische Verhalten des bis zu 80 m mächtigen Hauptanhydrits der Leine-Folge übertragen werden können. Durch detaillierte Studien an gut aufgeschlossenen Hauptanhydrit-Vorkommen in besser aufgeschlossenen Salzstrukturen (z. B. ERA Morsleben) ist zu überprüfen, ob die für die geringmächtigen Anhydrit-Schichten beschriebenen Deformations- und Verheilungsmechanismen auch bei der Deformation des Hauptanhydrits beobachtet werden können.
8. Die systematischen Untersuchungen der Ausbildung und Mächtigkeit der Gorleben-Bank zeigen eine sehr starke, auf intensive Faltungs-, Scher- und Extensionsprozesse zurückzuführende Variabilität dieser überwiegend aus Anhydrit zusammengesetzten Schicht im Orangesalz der Leine-Folge. Auf engstem Raum werden extreme Mächtigkeitsschwankungen der Gorleben-Bank beobachtet. Dies variiert zwischen vollständigem Abreißen der Schicht bzw. weniger als 1 cm Mächtigkeit und maximal 60 cm Mächtigkeit. Die mittlere Mächtigkeit beträgt 6,4 cm. Im bisher erkundeten Teil des Salzstocks Gorleben erreichen nur 8 Aufschlüsse eine Mächtigkeit von mehr als 20 cm.
9. Untersuchungen zur Durchlässigkeit der Gorleben-Bank ergaben sehr geringe Permeabilitätswerte von $< 10^{-20} \text{ m}^2$. Derartig geringe Permeabilitäten wurden auch für intensiv bei der Halokinese zerscherte bzw. geklüftete, inzwischen wieder verheilte Gorleben-Bank-Bereiche bestimmt (Kap. 3.4.4). Dies belegt eine nachhaltige Verheilung dieser beim Salzaufstieg deformierten Schichten und das Fehlen von langzeitsicherheitsrelevanten Schädigungen dieses Teils der geologischen Barriere.
10. Die Verheilung der Necks (Zwischenräume) der bei der Halokinese zerscherten und boudinierten Anhydrit-Schichten hat dazu geführt, dass die während des Salzaufstiegs abgepressten, in den Salinarschichten intern migrierten bzw. umverteilten Lösungen in den kompetenten Schichten selbst sowie in Klüften und Hohlräumen in ihrem unmittelbaren Umfeld dicht eingeschlossen wurden. Nur in wenigen Fällen wurden im Verlaufe der bisherigen Erkundung in Auffahrungen oder Erkundungsbohrungen Lösungszutritte aus der Gorleben-Bank oder ihrem unmittelbaren Umfeld (meist Kluffbildungen im Liegenden der Gorleben-Bank) beobachtet. Bei Nichtberücksichtigung der Lösungszutritte in den oberen Bereichen der

Schächte (Mischlösungen aus der Gorleben-Bank und der Topfrisszone, die sich durch den Einsatz des Gefrierverfahrens beim Abteufen der Schächte gebildet hatte) liegen die Zutrittsvolumina meist unter 1 m³. Die Lösungen weisen geochemische Signaturen auf, die für ihre intrasalinare Herkunft und für Wechselwirkungen der salinaren Lösungen mit den Schichtsilikaten der Gorleben-Bank sprechen.

Obwohl die mineralogisch-geochemischen und mikrostrukturellen Arbeiten noch nicht abgeschlossen sind, liefern die Untersuchungen zur Deformation des Anhydritmittelsalzes im ERA Morsleben sowie der Gorleben-Bank im Salzstock Gorleben und die experimentellen Studien zur Boudinage anhydritischer Schichten wichtige Hinweise auf den Ablauf und die Folgen von halokinetischen Deformationsprozessen in Salzstöcken. Abschließende Aussagen hinsichtlich der Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse auf die Deformation des Hauptanhydrits im Salzstock Gorleben sind noch nicht möglich. Nach den Ergebnissen der Untersuchungen ist davon auszugehen, dass die anhydritischen Schichten der Leine-Folge in Salzstöcken infolge des Salzaufstiegs und der daran gebundenen Deformationsprozesse (insbesondere Scherprozesse) keine, sich über weite Entfernungen erstreckenden, hydraulisch wirksamen Wegsamkeiten darstellen.

Literaturverzeichnis

- /ABE 12/ Abe, S., Urai, J.: Discrete element modeling of boudinage: Insights on rock rheology, matrix flow, and evolution of geometry. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 117, B01407, DOI 10.1029/2011JB008555, 2012.
- /AKE 02/ Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd):
Auswahlverfahren für Endlagerstandorte – Empfehlungen des
Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd). 260 Seiten:
Köln, 2002.
- /BAD 01/ Baldschuhn, R., Binot, F., Fleig, S., Kockel, F.: Geotektonischer Atlas von
Nordwestdeutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor: Strukturen,
Strukturentwicklung, Paläogeographie. *Geologisches Jahrbuch*, Vol. A153,
S. 88, 2001.
- /BAI 00a/ Bai, T., Pollard, D.D., Gao, H.: Explanation for fracture spacing in layered
materials. *Nature*, Vol. 403, S. 753-756, DOI 10.1038/35001550, 17.
Februar 2000.
- /BAI 00b/ Bai, T., Pollard, D.D.: Fracture spacing in layered rocks: a new explanation
based on the stress transition. *Journal of Structural Geology*, Vol. 22, No.
1, S. 43-57, January 2000.
- /BAL 97/ Balzer, D.: Mikrofazies-Analyse von Ca-Sulfatgesteinen des Zechsteins.
Geologisches Jahrbuch, Vol. D 106, Bundesanstalt für Geowissenschaften
und Rohstoffe (BGR), Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 99 pp:
Stuttgart, 1997.
- /BAL 98/ Baldschuhn, R., Kockel, F.: Der Untergrund von Hannover und seiner
Umgebung. *Berichte Naturhistorischer Gesellschaft Hannover*, Vol. 140, S.
5-98, 1998.
- /BAU 91/ Bauer, G.: Kryogene Klüfte in norddeutschen Salzdiapiren? *Zentralblatt für
Geologie und Paläontologie*, Vol. I, No. 4, S. 1247-1261, 1991.

- /BÄU 00/ Bäuerle, G.: Geochemisch-mineralogische Untersuchungen zur Genese, Lösungs- und Gasführung der Gorleben-Bank (Zechstein 3) des Salzstocks Gorleben. Dissertation, 237 Seiten, Technische Universität Clausthal: Clausthal-Zellerfeld, 2000.
- /BEH 97/ Behlau, J., Mingerzahn, G., Bornemann, O.: ERA Morsleben - Erarbeitung eines geologischen Lagerstättenmodells Morsleben. Abschlussbericht AP 9M2124601100, Archiv-Nr. 116872, 73 pp., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1997.
- /BEH 10/ Behlau, J., Hammer, J., Mingerzahn, G., Blanke, H.: Deformational behaviour and distribution of anhydrite rocks in salt diapirs - case studies from Morsleben, Etzel and Gorleben; Germany. Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Vol. 68, S. 88, 2010.
- /BEH 01/ Behlau, J., Mingerzahn, G.: Geological and tectonic investigations in the former Morsleben salt mine (Germany) as a basis for the safety assessment of a radioactive waste repository. Engineering Geology, Vol. 61, No. 2-3, S. 83-97, August 2001.
- /BEU 12/ Beuth, T., Bracke, G., Buhmann, D., Dresbach, C., Keller, S., Krone, J., Lommerzheim, A., Mönig, J., Mrugalla, S., Rübel, A., Wolf, J.: Szenarienentwicklung: Methodik und Anwendung. Bericht zum Arbeitspaket 8, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-284, ISBN 978-3-939355-60-1, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /BFS 02/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Verzeichnis der Vorkommen salinärer Lösungen im Erkundungsbergwerk Gorleben sowie in einigen Bereichen des Salzstocks Gorleben (Lösungsverzeichnis Gorleben). 1. Fortschreibung: Datenerfassung bis 30.09.2000, 1183 Seiten, 2002.
- /BGR 08/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Salzstrukturen Deutschlands. Maßstab 1:500.000: Berlin/Hannover, 2008.

- /BOE 10/ Boetticher, L., Doose, H., Popp, T., Günther, R.-M.: Bewertung der zu erwartenden Szenarien anhand von Simulationsrechnungen. Teilbericht 4, Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz, Glazigene Beeinflussung von Wirtsgesteinstypen Ton und Salz und deren Einflüsse auf die Eignung zur Aufnahme eines HAW-Endlagers, 35 Seiten, Golder Associates GmbH in Kooperation mit IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH: Celle, 2010.
- /BOI 68/ Boigk, H., Porth, H.: Über die tektonischen Verhältnisse am Südostende der Steinhuder-Meer-Linie. Archiv NLFB, Archiv-Nr. 00110561: Hannover, 1968. (unveröffentlicht)
- /BOR 91/ Bornemann, O.: Zur Geologie des Salzstocks Gorleben nach den Bohrerergebnissen. BfS-Schriften 4/91, 67 Seiten, Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Salzgitter, 1991.
- /BOR 08/ Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M.: Description of the Gorleben site. Part 3: Results of the geological surface and underground exploration of the salt formation. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2008.
- /DEL 96/ Delisle, G., Dumke, I.: Geochemische und geothermische Untersuchungen zur Frage der Existenz von kryogenen Klüften in norddeutschen Salzstöcken. Zeitschrift für Angewandte Geologie, Vol. 42, No. 2, S. 149-154, 1996.
- /DEL 98/ Delisle, G.: Numerical simulation of permafrost growth and decay. Journal of Quaternary Science, Vol. 13, No. 4, S. 325-333, 1998.
- /EDM 87/ Edmunds, W.M., Kay, R.L.F., Miles, D.L., Cook, J.M.: The origin of saline groundwaters in the Carnmenellis granite, Cornwall (U.K.): Further evidence from minor and trace elements. In: Fritz, P., Frapé, S.K. (Eds.) Saline water and gases in crystalline rocks, S. 127-143, Geol. Assoc. of Canada, Sp. Paper 33, 1987.

- /ELL 99/ Ellendorf, B.: Geochemische Untersuchungen an einzelnen Fluid Inclusions in Zechsteinevaporiten mittels Laser-Ramanspektrometrie, Ionenchromatographie und Laser-Ablation-ICP-Massenspektrometrie. (Zitat in: Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M.: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben. Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. Geologisches Jahrbuch, Vol. C 73, 211 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2008.). Dissertation, 93 Seiten, Universität Clausthal-Zellerfeld: Clausthal-Zellerfeld, 1999.
- /FRA 06/ Franzke, H.J.: Das mesozoische Spannungsfeld im Harzgebiet, abgeleitet aus kinematischen Störungsanalysen. Clausthaler Geowissenschaften, Vol. 5, S. 89-100, 2006.
- /FUL 29/ Fulda, E.: Über Anhydrit-Klippen. Kali und verwandte Salze, Vol. 23, S. 129-133, 1929.
- /GOS 03/ Goscombe, B.D., Passchier, C.W.: Asymmetric boudins as shear sense indicators - an assessment from field data. Journal of Structural Geology, Vol. 25, No. 4, S. 575-589, April 2003.
- /GOS 04/ Goscombe, B.D., Passchier, C.W., Hand, M.: Boudinage classification: end-member boudintypes and modified boudin structures Journal of Structural Geology, Vol. 26, No. 4, S. 739-763, April 2004.
- /HAM 12/ Hammer, J., Pusch, M., Häger, A., Ostertag-Henning, C., Schlömer, S., Mingerzahn, G., Scheeder, G., Shao, H., Paul, B., Schulze, O., Zaretzki, B., Hesser, J.: Projekt Gorleben, Untersuchungen von Kohlenwasserstoffen im Erkundungsbergwerk Gorleben. 236 Seiten, Zwischenbericht 2011, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Hannover, 2012.
- /HEM 68/ Hemann, M.: Zur Ausbildung und Genese des Leinesteinsalzes und Hauptanhydrits (Zechstein 3) im Ostteil des Subherzynen Beckens. Dissertation, 214 Seiten, Bergakademie: Freiberg, 1968.

- /HEU 12/ Heusermann, S., Vogel, P., Eickemeier, R., Nipp, H.-K.: Analysis of the integrity of the geological barrier in the Gorleben salt formation. In: Mechanical Behavior of Salt VII, Tijani, M., Berest, P., Ghoreychi, M., Hadj-Hassen, F. (Editoren), S. 453-460, ISBN Print 978-0-415-62122-9, 2012.
- /HOL 08/ Holländer, R.: Exkursion A4: Geologische Kurzbeschreibung des Kaliwerks Sigmundshall der K+S Kali GmbH, Wunstorf Bokeloh. In: Tagungsband, Exkursionsführer; 75. Tagung der Arbeitsgemeinschaft Norddeutscher Geologen 2008, 13.-16. Mai 2008, Hannover S. 90-95, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG): Hannover, 2008.
- /JAN 00/ Jankovská, V., Komárek, J.: Indicative value of *Pediastrum* and other coccal green algae in Palaeoecology. *Folia Geobotanica*, Vol. 35, S. 59-82, 2000.
- /KLI 98/ Klingenberg, I.: Die Verteilung der Isotope des Strontiums, Schwefels und Lithiums in salinaren Lösungen des Salzstocks Gorleben und der Salzstruktur des Allertalgrabens. Dissertation, 82 Seiten, TU-Clausthal: Clausthal-Zellerfeld, 1998.
- /KOC 84/ Kockel, F.: Geotektonischer Atlas von Nordwestdeutschland. Blatt Hannover (C3922) 1:100.000, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1984. (unveröffentlicht)
- /KÖN 05/ König, W., Blumenstengel, H.: Neue Tertiäraufschlüsse im Mittelharz bei Elbingerode. Exkursionsführer und Veröffentlichungen Deutsche Geologische Gesellschaft (DGG), Vol. 227, S. 18-24, 2005.
- /KÖT 07/ Köthe, A., Hoffmann, N., Krull, P., Zirngast, M., Zwirner, R.: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben. Teil 2: Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben. Geologisches Jahrbuch, Vol. C 72, 201 Seiten, ISBN 978-3-510-95963-1, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2007.

- /KÖT 09/ Köthe, A.: Calcareous Nannoplankton and Dinoflagellate Cysts Paleogene biostratigraphy of the Loburg I/90 cored borehole (Saxony-Anhalt, central Germany). *Zeitschrift für Geologische Wissenschaften*, Vol. 37 (6), S. 381-425, 2009.
- /KOS 69/ Kosmahl, W.: Zur Stratigraphie, Petrographie, Paläogeographie, Genese und Sedimentation des Gebänderten Anhydrits (Zechstein 2), Grauen Salztones und Hauptanhydrits (Zechstein 3) in Nordwestdeutschland. *Geologisches Jahrbuch, Beihefte*, Vol. 71, 129 Seiten: Hannover, 1969.
- /KÜS 10/ Küster, Y., Leiss, B., Schramm, M.: Structural characteristics of the halite fabric type "Kristallbrocken" from the Zechstein Basin with regard to its development. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)*, Vol. 99, S. 505-526, DOI 10.1007/s00531-008-0399-8, 2010.
- /LIA 07/ Liang, W., Yang, C., Zhao, Y., Dusseault, M.B., Liu, J.: Experimental investigation of mechanical properties of bedded salt rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 44, No. 3, S. 400-411, April 2007.
- /LLO 82/ Lloyd, G.E., Ferguson, C.C., Reading, K.: A stress-transfer model for the development of extension fracture boudinage. *Journal of Structural Geology*, Vol. 4, S. 355-372, 1982.
- /MAE 09/ Maeder, X., Passchier, C.W., Koehn, D.: Modelling of segment structures: Boudins, bone-boudins, mullions and related single- and multiphase deformation features. *Journal of Structural Geology*, Vol. 31, S. 817-830, 2009.
- /MAR 84/ Marschall, P., Neumann, R.: Bericht – Gorleben 1984 – über die Salzstockunterschießung im Konzessionsgebiet Gorleben. Erstellt im Auftrag der Deutschen Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), 840 005 51, 17 Seiten, Prakla-Seismos GmbH: Hannover, 1984.
- /MAT 94/ Mattenklott, M.: Die Bromid- und Rubidiumverteilung in Carnallitgesteinen. Dissertation, 214 Seiten, Universität Clausthal: Clausthal-Zellerfeld, 1994.

- /MEN 07/ Mengong, M.E., Zulauf, G.: The impact of strain rate on folding and boudinage under plane strain: Results from analogue modelling. *Geotectonic Research*, Vol. 95, S. 101-114, 2007.
- /MER 09/ Mertineit, M.: Faltung und Boudinage einer Anhydritlage in Halitmatrix unter ebenen Verformungsbedingungen: Ergebnisse thermomechanischer Experimente. Diploma Thesis, 77 Seiten, Goethe University: Frankfurt/Main, 2009.
- /MER 12/ Mertineit, M., Behlau, J., Hammer, J., Schramm, M., Zulauf, G.: Mechanical behavior of anhydrite rocks: Results of field investigations, mineralogical-geochemical studies and thermomechanical experiments. S. 123-129, Taylor and Francis, *The Mechanical Behavior of Salt: 7th Conference (SaltMech7)*: Paris, France, 2012.
- /MÜL 81/ Müller, W.H., Schmid, S.M., Briegel, U.: Deformation experiments on anhydrite rocks of different grain sizes: Rheology and microfabric. *Tectonophysics*, Vol. 78, No. 1-4, S. 527-543, Oktober 1981.
- /NEU 82/ Neurath, C., Smith, R.B.: The effect of material properties on growth rates of folding and boudinage: Experiments with wax models. *Journal of Structural Geology*, Vol. 4, No. 2, S. 215-229, 1982.
- /OHR 68/ Ohrdorf, R.: Ein Beitrag zur Geochemie des Lithiums in Sedimentgesteinen. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 32, No. 2, S. 191-208.
- /PEA 93/ Peach, C.J.: Deformation, dilatancy and permeability development in halite/anhydrite composites. In: *The Mechanical Behaviour of Salt, Proceedings of the 3rd Conference*, Ghoreychi, M., Berest, P., Hardy, H.R., Langer, M. (Editoren), S. 153-166, Trans Tech Publications, 1993.
- /RAM 55/ Ramberg, H.: Natural and experimental boudinage and pinch-and-swell structures. *Journal of Geology*, Vol. 63, No. 6, S. 512-526, DOI 10.1086/626293, November 1955.

- /RAM 83/ Ramsay, J.G., Huber, M.I.: The techniques of modern structural geology. Vol. 1: Strain analysis, 307 Seiten, Academic Press Ltd., 4th printing, 1983.
- /RÜH 95/ Rühle, S.: Der quantitative chemische Stoffbestand einzelner Lösungseinschlüsse in Zechsteinevaporiten. Dissertation, 236 Seiten, Universität Clausthal: Clausthal-Zellerfeld, 1995.
- /SCH 95/ Schmidt, K.H., Mattenklott, M., Knipping, G.J., Siemann, M.G.: Bewertung der Wirkung der geologischen Barriere potentieller Endlager-Evaporitkörper – Die Bedeutung der kombinierten Interpretation von Bromid-, Rubidium- und Lithiumverteilungen in marinen Salzlagerstätten und salinaren Lösungen. Abschlussbericht, BMBF-Projekt, 1995. (unveröffentlicht)
- /SCM 06/ Schramm, M., Bornemann, O., Paar, W.A.: Fluid inclusions of lower Triassic sea water in evaporites of eastern Netherlands. Kurzfassungen der Vorträge und Poster, 84. Jahrestagung der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft: Hannover, 25.-27. September 2006.
- /SCM 09/ Schramm, M., Kühnlenz, T., Mingerzahn, G., Hammer, J.: Lösungen im Salzstock Gorleben - eine Dokumentation und genetische Interpretation. BGR-Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2009.
- /SCP 02/ Schöpfer, M.P.J., Zulauf, G.: Strain-dependent rheology and the memory of plasticine. Tectonophysics, Vol. 354, No. 1-2, S. 85-99, August 2002.
- /SIE 96/ Siemann, M.G., Mattenklott, M., Knipping, B.: Br-Rb-Korrelationen und ihre Anwendung bei der genetischen Interpretation salinärer Lösungen in Evaporiten. European Journal of Mineralogy, Vol. 8, 1996.
- /SMI 77/ Smith, R.B.: Formation of folds, boudinage and mullions in non-Newtonian materials. Geological Society of America Bulletin, Vol. 88/2, S. 312-320, 1977.

- /STA 01/ Stackebrandt, W., Ludwig, A.O., Ostaficzuk, S.: Die Basis quartärer Ablagerungen der Ostseesenke und benachbarter Gebiete (Karte 2). Neodynamica Baltica IGCP-Project 346. Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge, Vol. 8, No. 1, S. 13-19, 2001.
- /STI 97/ Stier-Friedland, G., Ranft, M., Bornemann, O.: Geowissenschaftliche Untersuchungen bei der Erkundung des Salzstocks Gorleben von unter Tage - Erkundungssohle. ET-IB-96, Bundesamt für Strahlenschutz: Salzgitter, 1997.
- /TEL 04/ Tell, G., del Zamalao, M.: A Miocene algal assemblage dominated by *Pediastrum leonensis* n. sp. (Chlorophyceae) from Patagonia, Argentina: paleoenvironmental implications. *Journal of Paleolimnology*, Vol. 32, No. 3, S. 247-254, Oktober 2004.
- /VBO 92/ von Borstel, L.E.: Lösungen in marinen Zechsteinevaporiten Deutschlands. Dissertation, 321 Seiten, Universität Clausthal: Clausthal-Zellerfeld, 1992.
- /VBO 93/ Von Borstel, L.E.: Lösungen in marinen Evaporiten. BfS-Schriften, Vol. 10, S. 315, 1993.
- /ZAR 12/ Zaretzki, B., Shao, H., Hesser, J.: Geotechnische Bewertung der Erkundungsbereiche. Ergebnisbericht 2011: Permeabilitätsmessungen, Archiv-Nr. 0130913, Arbeitspaket 9GE431100000, 123 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2012.
- /ZIR 91/ Zirngast, M.: Die Entwicklungsgeschichte des Salzstocks Gorleben - Ergebnisse einer strukturgeologischen Bearbeitung. In: *Geologisches Jahrbuch*, Vol. A 132, S. 3-31, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1991.
- /ZUG 07/ Zulauf, G., Zulauf, J., Bornemann, O.: Deformation of a halite-anhydrite sequence under bulk construction: Preliminary results from thermomechanical experiments. In: *Mechanical Behavior of Salt-Understanding of THMC processes in salt*, Wallner, M., Lux, K.-H., Minkley, W., Hardy, H.R. (Editoren), S. 63-68, ISBN 0415443989, 2007.

- /ZUG 09/ Zulauf, G., Zulauf, J., Bornemann, O., Kihm, N., Peinl, M., Zanella, F.: Experimental deformation of a single-layer anhydrite in halite matrix under bulk construction. Part 1: Geometric and kinematic aspects. *Journal of Structural Geology*, Vol. 31, No. 4, S. 460-474, DOI 10.1016/j.jsg.2009.01.013, 2009.
- /ZUG 10/ Zulauf, G., Zulauf, J., Bornemann, O., Brenker, F., Höfer, H., Peinl, M., Woodland, A.: Experimental deformation of a single-layer anhydrite in halite matrix under bulk construction. Part 2: Deformation mechanisms and the role of fluids. *Journal of Structural Geology*, Vol. 32, No. 3, S. 264-277, DOI 10.1016/j.jsg.2009.12.001, 2010.
- /ZUG 11/ Zulauf, G., Gutiérrez-Alonso, G., Kraus, R., Petschick, R., Potel, S.: Formation of chocolate-tablet boudins in a foreland fold and thrust belt: A case study from the external Variscides (Almograve, Portugal). *Journal of Structural Geology*, Vol. 33, No. 11, S. 1639-1649, DOI 10.1016/j.jsg.2011.08.009, November 2011.
- /ZUG 12/ Zulauf, G., Zulauf, J., Mertineit, M., Hammer, J.: Boudinage of anhydrite in rock-salt matrix: The impact of bulk finite strain geometry. In: *Mechanical Behaviour of Salt VII, Proceedings of the 7th Conference*, Berest, P., Ghorecychi, M., Hadj-Hassen, F., Tijani, M. (Editoren), S. 65-70, ISBN 978-0-415-62122-9, 2012.
- /ZUL 04/ Zulauf, J.: Analogmodellierung von Falten und Boudings in Raum und Zeit. *Erlanger geologische Abhandlungen*, Vol. 135, S. 115, 2004.
- /ZUL 11/ Zulauf, J., Zulauf, G., Hammer, J., Zanella, F.: Tablet boudinage of an anhydrite layer in rock-salt matrix: Results from thermomechanical experiments. *Journal of Structural Geology*, Vol. 33, No. 12, S. 1801-1815, DOI 10.1016/j.jsg.2011.09.006, 2011.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Ausbildung der von /BAU 91/ als „kryogene Klüfte“ bezeichneten Rissbildungen im Salzstock Bokeloh (Kalisalzbergwerk Sigmundshall, 350 m-Sohle).....	8
Abb. 2.2	Lage der von /BAU 91/ im Bezug auf „kryogene Klüfte“ genannten Salzstöcke am südlichen Rand des Niedersächsischen Beckens	10
Abb. 2.3	Lage des Salzstocks Bokeloh (blau, ca. 12 km lang).....	11
Abb. 2.4	Schnitt durch den nördlichen Teil des Salzstocks Bokeloh.....	13
Abb. 2.5	Lage des Salzstocks Gorleben-Rambow (blau, ca. 30 km lang)	14
Abb. 2.6	Querprofil durch den Salzstock Gorleben	14
Abb. 2.7	Schnitt durch den südlichen Teil des Salzstocks Bokeloh	15
Abb. 2.8	Modellgebiet für die Erstellung des geologischen 3D-Modells in den Ausmaßen 58 km x 38,5 km	16
Abb. 2.9	Lage des Bad Nenndorfer Grabens und der Klüfte im Salzstock Bokeloh	17
Abb. 2.10	Lage des Grubengebäudes des Bergwerkes Sigmundshall mit den Strecken (blau), den Abbauen im Ronnenberg-Kaliflöz (gelb) und den Abbauen im Staßfurt-Kaliflöz (orange) sowie den Flächen mit einer deutlichen Häufung von Laugenzutritten, die an die „kryogenen Klüfte“ (rot) im Salzstock Bokeloh gebunden sind	18
Abb. 2.11	Ausgewählte Ergebnisse der biostratigraphischen Datierungsarbeiten an Kluffüllungen aus einer „kryogenen Kluff“ aus dem Salzstock Bokeloh	20
Abb. 2.12	Platte (ca. 45 cm x 20 cm) aus dem Salzgesteinsblock Bo2 aus dem Salzstock Bokeloh mit einer „kryogenen Kluff“ (Kalisalzbergwerk Sigmundshall, 350 m-Sohle).....	22
Abb. 2.13	Übersichtsscans der Dünnschliffe Bo2-1, Bo2-2 und Bo2-3 (von links; gekreuzte Polarisatoren) aus dem Gesteinsblock Bo2 mit tonig-schluffig bis gröberklastisch verfüllten Rissen.....	23

Abb. 2.14	Zweiphasig ausgebildete Rissfüllung im Schliff Bo2-3 (Hellfeld)	24
Abb. 2.15	Rekonstruktion der aus mindestens zwei Bildungsphasen zusammengesetzten Rissentwicklung im Schliff Bo2-2 (gekreuzte Polarisatoren).....	25
Abb. 2.16	Temperaturverteilung an der Salzstockoberfläche.....	27
Abb. 2.17	Abkühlung des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben während des glazigenen Maximums bei teilweiser Gletscherbedeckung der Salzstruktur in [K] /HEU 12/	27
Abb. 2.18	Auf der Grundlage neuer Untersuchungsergebnisse reinterpretierte zeitliche Entwicklung der von /BAU 91/ als mögliche „kryogene Klüfte“ beschriebenen Rissbildungen in der Salzstruktur Bokeloh	32
Abb. 3.1	Bromidgehalte in dem das Anhydritmittel (überkippte Lagerung) umgebenden halitischen Gestein in $\mu\text{gBr/gHalit}$	36
Abb. 3.2	Mikrostrukturen im boudinierten Anhydritmittel 3 im ERA Morsleben a) bis e) + Polarisatoren, f) II Polarisatoren.....	38
Abb. 3.3	Unterschiedliche Boudin-Ausbildungsformen im Bereich von Anhydritlagen des Anhydritmittelsalzes im ERA Morsleben	39
Abb. 3.4	Geometrische Parameter der experimentell entstandenen Boudins unter konstriktionaler (schwarz) und ebener (blau) Verformung sowie reiner Plättung (rot)	41
Abb. 3.5	Lithologische Gliederung und petrographische Ausbildung der Gorleben-Bank (z3OSM).....	44
Abb. 3.6	Gorleben-Bank mit deutlich ausgebildeter, zweigeteilter Tonlage (Zone IIIa und Zone IIIb) und Sekundärmineralisations-Zone (Zone IV, Abb. 3.5)	46
Abb. 3.7	Verteilung der Mächtigkeiten der Gorleben-Bank (ohne Zone 1) in den Aufschlüssen des Infrastrukturbereiches des Erkundungsbergwerkes Gorleben.....	47

Abb. 3.8	Lage der acht Gorleben-Bank-Aufschlüsse mit einer Mächtigkeit von mehr als 20 cm (gelbe Kugeln) im Verhältnis zum Grubengebäude-Modell des Erkundungsbergwerkes Gorleben (blau – 820 m-Sohle, rot – 840 m-Sohle)	48
Abb. 3.9	Räumliche Verteilung der Gorleben Bank-Aufschlüsse mit einer Gesamtmächtigkeit der Zonen II bis VII von mehr als 20 cm (1 - magenta)	49
Abb. 3.10	Boudinage an einem ca. 10 cm mächtigen Gorleben-Bank-Aufschluss im Ergebnis intensiver salztektonischer Beanspruchung	50
Abb. 3.11	Ausbildung der bei der Halokinese im Bereich der Zone III aufgerissenen und durch sekundäre Halite (farblos) und Carnallite (rot) wieder verheilten Gorleben-Bank	52
Abb. 3.12	Aufschluss der Gorleben-Bank mit deutlichen Anzeichen einer Deformation	52
Abb. 3.13	Verteilung der Mächtigkeit der Zone IV (Sekundärmineralisationszone) in den Aufschlüssen der Gorleben-Bank in den Erkundungsbohrungen und Auffahrungen im Infrastrukturbereich des Erkundungsbergwerkes Gorleben	53
Abb. 3.14	Gegenüberstellung der in den untertägigen Erkundungsbohrungen im Infrastrukturbereich festgestellten Gorleben-Bank-Durchgänge (magenta) und der dabei fixierten Lösungszutritte (cyan)	56
Abb. 3.15	Auftragung der Mg-, K-, B-, Li- und Fe-Gehalte gegen die Bromid-Gehalte der z3OSM-Lösungen aus dem Infrastrukturbereich des Erkundungsbergwerkes Gorleben	58
Abb. 3.16	Auftragung der Li- gegen die Bromid-Gehalte für die z3OSM-Lösungsproben aus dem Infrastrukturbereich des Erkundungsbergwerkes Gorleben	59
Abb. 3.17	Auftragung der Rb- gegen die Bromid-Gehalte für die z3OSM-Lösungsproben aus dem Erkundungsbergwerk Gorleben	61
Abb. 3.18	Lage der beiden Gorleben-Bank-Bohrungen 01YEA02RB753 und 03YEA02RB754 im Grubengebäude des Erkundungsbergwerkes Gorleben mit jeweils zwei Gorleben-Bank-Durchgängen (gelbe Kugeln)	64

Abb. 3.19	Lage der Gorleben-Bank-Bohrung 01YEA02RB753 im Grubengebäude und Ausbildung der in dieser Bohrung angetroffenen Gorleben-Bank-Durchgänge	65
Abb. 3.20	Gemessene und berechnete Druckverläufe für die Messungen in der 01YEA02RB753	66
Abb. 3.21	Lage der Gorleben-Bank-Bohrung 01YEA02RB754 im Grubengebäude und Ausbildung der in dieser Bohrung angetroffenen Gorleben-Bank-Durchgänge	67
Abb. 3.22	Gemessener und berechneter Druckverlauf für die Messungen in der Gorleben-Bank-Bohrung 03YEA02RB754	68

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

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

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

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

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

www.grs.de

**Bundesanstalt für Geowissen-
schaften und Rohstoffe**
Stilleweg 2
30655 Hannover

ISBN 978-3-939355-49-6