

Sichtung und Bewertung der Standortdaten Gorleben

Bericht zum Arbeitspaket 2

Vorläufige Sicherheitsanalyse
für den Standort Gorleben

Erstellt von:



Sichtung und Bewertung der Standortdaten Gorleben

Bericht zum Arbeitspaket 2

Vorläufige Sicherheitsanalyse
für den Standort Gorleben

Peter Kukla
Renate Pechnig
Janos Urai

Oktober 2011

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.

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 und die Geophisica Beratungsgesellschaft mbH) 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:

Bewertung, Geologie, Gorleben, Hydrogeologie, Petrophysik, Salztektunik, Standortdaten, Thermo-
mechanische Modelle

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Zielsetzung..... | 1 |
| 2 | Standortdaten zur Hydrogeologie des Deckgebirges | 5 |
| 2.1 | Hydrogeologie und hydraulische Eigenschaften des Deckgebirges | 6 |
| 2.1.1 | Untersuchungsprogramm und dargestellte Ergebnisse..... | 6 |
| 2.1.2 | Bewertung der Datenlage zu den hydraulischen Eigenschaften des Deckgebirges..... | 9 |
| 2.2 | Geothermische Untersuchungen | 11 |
| 2.2.1 | Erhobene Daten (Temperatur-Logs, Laboruntersuchungen)..... | 11 |
| 2.2.2 | Abgeleitete Informationen (Wärmestromdichte, Wärmeleitfähigkeit, Temperaturfeld) | 11 |
| 2.2.3 | Bewertung der geothermischen Daten zum Deckgebirge | 14 |
| 2.3 | Grundwasserbeschaffenheit, Grundwasserbewegung | 17 |
| 2.3.1 | Dichte, Salinität: Datenstand und Bewertung | 17 |
| 2.3.2 | Grundwasserchemie: Daten und Bewertung..... | 18 |
| 2.3.3 | Grundwasserbewegung: Daten und Bewertung..... | 19 |
| 2.4 | Modellrechnungen | 20 |
| 2.4.1 | 2D und 3D Modelle | 20 |
| 2.5 | Hydrogeologie des Deckgebirges: Bedeutung der Standortdaten und Benennung des weiteren Forschungsbedarfs | 22 |
| 3 | Standortdaten zur Geologie des Deck- und Nebengebirges | 25 |
| 3.1 | Übersicht Erkundung (Bohrungen, Geophysik, Kartierungen)..... | 25 |
| 3.2 | Geologische Entwicklung des Salzstockes Gorleben und Umgebung..... | 26 |
| 3.3 | Beurteilung der Standortdaten zur Geologie des Deck- und Nebengebirges | 27 |
| 3.4 | 3D (externe) Geometrie des Salzstockes Gorleben (3D Erkundung) | 27 |
| 3.4.1 | Stand der Forschung und Best Practice..... | 27 |
| 3.4.2 | Seismische Untersuchungen in Gorleben | 28 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.4.3 | Forschungsbedarf zur 3D Geometrie des Salzstocks Gorleben | 29 |
| 3.5 | Geologische Entwicklung der Salzstruktur Gorleben und deren Umfeld (Struktur, Kinematik) | 30 |
| 3.5.1 | Stand der Forschung und Best Practice – Salztektonik und strukturelle Bilanzierung..... | 30 |
| 3.5.2 | Forschungsbedarf zur geologischen Entwicklung der Salzstruktur Gorleben und deren Umfeld (Struktur, Kinematik)..... | 33 |
| 4 | Standortdaten zum Salinar | 35 |
| 4.1 | Übersicht der Voruntersuchungen | 35 |
| 4.2 | Geophysikalische Erkundungsmaßnahmen | 35 |
| 4.2.1 | Oberflächengeophysikalische Verfahren..... | 35 |
| 4.2.2 | Bohrlochgeophysikalische Messungen, Tests..... | 36 |
| 4.2.3 | EMR Methoden zur Strukturerkennung im Salinar | 38 |
| 4.2.4 | Weiterer Forschungsbedarf zur geophysikalischen Erkundung..... | 42 |
| 4.3 | 2D, 2.5D und 3D Modell der Internstruktur des Salzstocks Gorleben..... | 43 |
| 4.3.1 | 3D geometrische Modellierung des Untergrundes: Stand der Forschung und etablierte Methoden..... | 43 |
| 4.3.2 | 2D, 2,5 und 3D Modelle der Internstruktur des Salzstocks Gorleben: Ein Überblick und Bewertung existierender Arbeiten | 45 |
| 4.3.3 | Forschungsbedarf - 3D Geometrie und geologische Entwicklung des Salzstocks Gorleben..... | 48 |
| 4.4 | Fluide im Salzstock Gorleben | 50 |
| 4.4.1 | Stand der Forschung und etablierte Methoden | 50 |
| 4.4.2 | Fluide (Solen und Kohlenwasserstoffe) im Salzstock Gorleben: Ein Überblick / Bewertung existierender Arbeiten | 52 |
| 4.4.3 | Forschungsbedarf zu Fluiden..... | 55 |
| 5 | Geotechnische Untersuchungen am Standort | 57 |
| 5.1 | Geothermische Untersuchungen im Salinar und Nebengebirge..... | 57 |
| 5.1.1 | Temperaturmessungen in Bohrungen..... | 57 |
| 5.1.2 | Thermophysikalische Labormessungen..... | 62 |
| 5.1.3 | Abgeleitete Informationen (Temperaturfeld und Wärmestrom)..... | 64 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5.1.4 | Bewertung der geothermischen Daten zum Salinar und Nebengebirge und weiterer Forschungsbedarf | 67 |
| 5.2 | Hydraulische Daten zum Salinar | 71 |
| 5.2.1 | Datenstand und Bewertung | 71 |
| 5.2.2 | Weiterer Forschungsbedarf | 72 |
| 5.3 | Thermische Modellrechnungen – Eingangsparameter und Konzepte | 72 |
| 5.3.1 | Referenzierbarkeit und Bewertung der geothermischen Daten in den Modellen | 72 |
| 5.3.2 | Weiterer Forschungsbedarf – thermische Modellierungen | 76 |
| 5.4 | Geomechanische in-situ Messungen in Gorleben | 76 |
| 5.4.1 | Überblick und Diskussion der bisherigen Arbeiten | 76 |
| 5.4.2 | Bewertung und Forschungsbedarf zu geomechanischen in-situ Spannungsmessungen | 78 |
| 5.5 | Mechanische und Transport-Eigenschaften | 78 |
| 5.5.1 | Übersicht des aktuellen Stands der Forschung | 78 |
| 5.5.1.1 | Deformationsmechanismen und Rheologie von Halit | 79 |
| 5.5.1.2 | Rheologische Eigenschaften und Fließgesetze | 81 |
| 5.5.1.3 | Zusammenfassung international publizierter Forschungsergebnisse | 86 |
| 5.5.2 | Arbeiten der BGR zu mechanischen Gesteinseigenschaften | 87 |
| 5.5.3 | Mechanische Eigenschaften und Stoffgesetze – Bewertung der Arbeiten der BGR | 88 |
| 5.5.4 | Forschungsbedarf zu mechanischen Eigenschaften und Stoffgesetzen... .. | 92 |
| 5.6 | Thermomechanische Modellrechnungen | 93 |
| 5.6.1 | Stand der Forschung | 93 |
| 5.6.2 | Überblick der erfolgten Arbeiten der BGR | 93 |
| 5.6.3 | Bewertung der thermomechanischen Modellierung | 94 |
| 5.6.4 | Forschungsbedarf zur thermomechanischen Modellierung | 95 |
| 6 | Zusammenfassende Bewertung der Standortdaten und weiterer Forschungsbedarf | 97 |
| 6.1 | Bewertung und Forschungsbedarf – Standortdaten zur Hydrogeologie des Deckgebirges | 97 |

| | | |
|-----|--|------------|
| 6.2 | Bewertung und Forschungsbedarf – Standortdaten zur Geologie des Deck- und Nebengebirges und Standortdaten zum Salinar..... | 99 |
| 6.3 | Bewertung und Forschungsbedarf – Geotechnische Untersuchungen am Standort..... | 103 |
| | Literaturverzeichnis..... | 109 |
| | Abbildungsverzeichnis..... | 139 |
| | Tabellenverzeichnis..... | 141 |
| | Verzeichnis der BGR Fachberichte „Gorleben“ | 143 |

1 Zielsetzung

Der vorliegende Bericht bewertet, ob die erhobene Datengrundlage für eine Standortcharakterisierung nach Stand von Wissenschaft und Technik am Standort Gorleben in Hinblick auf die notwendigen geowissenschaftlichen Daten und Untersuchungsmethoden hinreichend ist. Dies wird im Wesentlichen durch zwei Arbeitsschritte erreicht: Im ersten Arbeitsschritt wird der Untersuchungsstand sowie die Datenlage analysiert und im Hinblick auf die VSG bewertet, wobei Kenntnis- und Dokumentationslücken aufgezeigt werden. Im zweiten Arbeitsschritt wird der weitere Forschungsbedarf für den Zeitraum nach der VSG ausgewiesen. Relevanz und Bandbreite der vorgeschlagenen Methoden werden dabei im Hinblick auf die nachfolgenden Erkundungs- und Planungsarbeiten zum Endlager kategorisiert.

Der Schwerpunkt dieser Studie im Arbeitspaket (AP) 2 der VSG liegt im ersten Arbeitsschritt auf der Analyse und Zusammenfassung der aus der geowissenschaftlichen Standorterkundung bis zum Moratorium im Jahr 2000 vorliegenden Ergebnisse mit dem Ziel, diese auf ihre generelle Aussagesicherheit hin zu bewerten. Als Grundlage dienen die bis zum Moratorium erhobenen geologischen Standortdaten zu Gorleben, die in den Bänden „Standortbeschreibung Gorleben“ 1 – 4 der BGR zusammenfassend dargestellt sind /BOR 08/, /KLI 07/, /KÖT 07/, /BRÄ 11/. Die Gliederung des vorliegenden Berichtes lehnt sich deshalb zur besseren Übersichtlichkeit und Vergleichbarkeit an die Gliederung der genannten BGR-Bände an. Die Sichtung und Bewertung der Standortbeschreibung umfasst jedoch auch die in den Bänden zitierte Primärliteratur. Im Projektverlauf wurden seitens der BGR ca. 60 Fachberichte in digitaler Form zur Verfügung gestellt, die die wesentlichen Basis- und Primärinformationen für die vier Übersichtsberichte liefern. Diese Fachberichte (ca. 30 Berichte aus dem Zeitraum 2000 – 2009 und ca. 20 Berichte aus dem Zeitraum 1990 – 1999) wurden mit in die Bewertung einbezogen. Eine Auflistung der benutzten Literatur aus dem Gorleben Fachberichte-Archiv der BGR findet sich im gleichnamigen Verzeichnis.

Im Zuge der Bewertung der Daten wurden folgende Aspekte berücksichtigt:

- Sichtung der bisherigen geowissenschaftlichen Arbeiten und Ergebnisse der über-tägigen und unter-tägigen Erkundungen.

- Vollständigkeit und Belegbarkeit (Referenzierbarkeit) der Daten und Würdigung des Stands von Wissenschaft und Technik unter Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufs der Erkundung.
- Beurteilung der Qualität und Aussagesicherheit der Standortdaten im Hinblick auf geologische und geomechanische Untersuchungsmethoden (Stand der Technik, Systematik der Vorgehensweise, Datenerhebung, Messverfahren).
- Beurteilung der Qualität und Aussagesicherheit der Standortdaten im Hinblick auf die Upscalingproblematik und gewählter Modellierungsansätze. Würdigung des Untersuchungstiefganges.
- Nachvollziehbarkeit der Prognosegenauigkeit bzw. der Ungewissheiten geowissenschaftlicher Befunde.
- Identifikation des zukünftigen Erkundungs- und Forschungsbedarfs für AP 2, Synthese der Beurteilung der generellen Aussagesicherheit der Standortcharakterisierung im Hinblick auf die Zielstellung der VSG.

Die Sichtung und Bewertung der vorliegenden Daten und der Standortbeschreibung wird am Ende des jeweiligen Kapitels durch eine Würdigung des weiterhin erforderlichen Forschungsbedarfs (post-VSG) ergänzt. Eine Kategorisierung der Relevanz und Bandbreite der Vorschläge für den weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarf wird hierbei gemäß AP 14 vorgenommen. Für die Relevanz wird dementsprechend wie folgt unterschieden:

1. Notwendige Arbeiten für den Abschluss weiterführender Sicherheitsanalysen (nach VSG)
2. Notwendige Arbeiten für die Durchführung eines Genehmigungsverfahrens, aber nicht für eine abschließende Sicherheitsanalyse.
3. Arbeiten, die einer weiterführenden wissenschaftlichen Absicherung dienen.

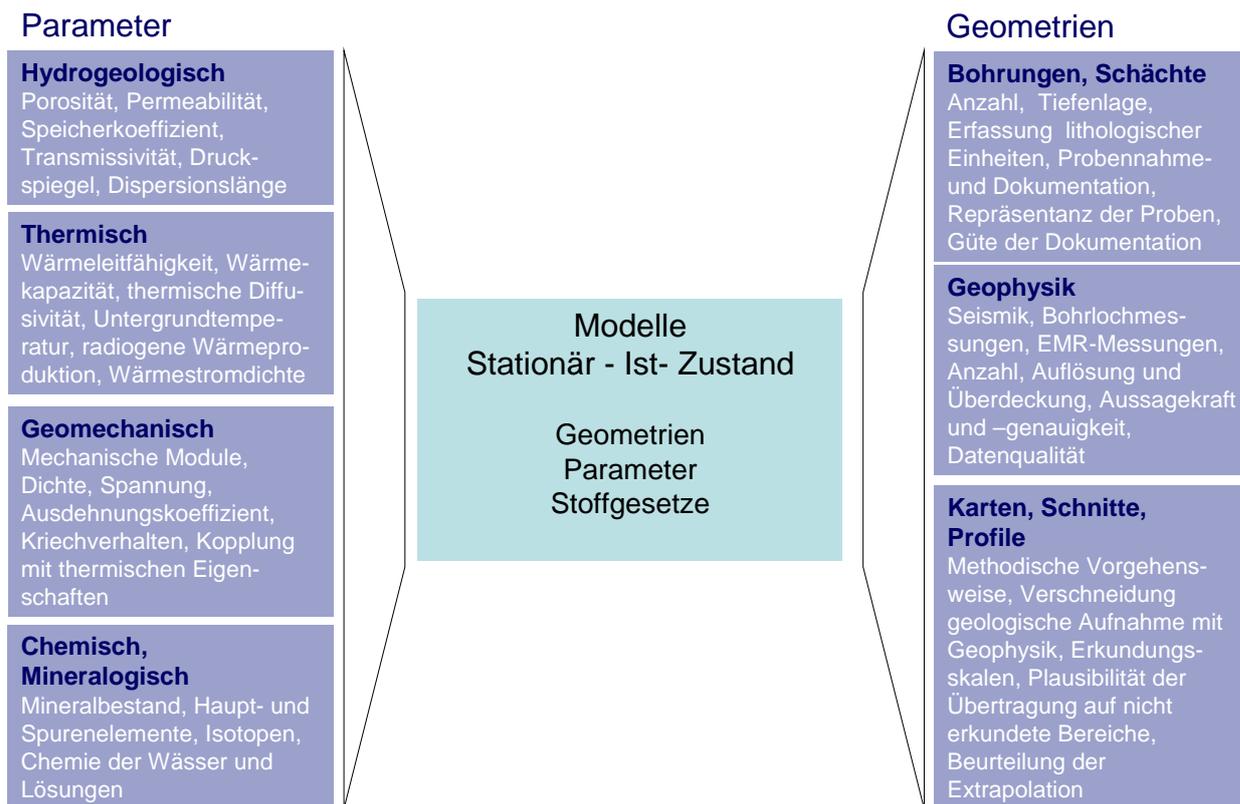


Abb. 1.1 Übersicht der berücksichtigten Basisdaten der geologischen Standortbeschreibung

Die im Rahmen der Vorerkundung in Gorleben gewonnenen Daten beinhalten ein weites Spektrum geowissenschaftlicher Themenbereiche. Parameter wurden durch eine Vielzahl von Gelände-, Bohr- und Laboruntersuchungen bestimmt (Abb. 1.1). Informationen zur Geometrie des Untergrundes wurden aus Kartierungen, Bohrungen und Untertagestrecken sowie durch geophysikalische Erkundungen gewonnen. Diese Daten wurden ausgewertet, interpretiert und zur Erstellung geologischer Untergrundmodelle herangezogen.

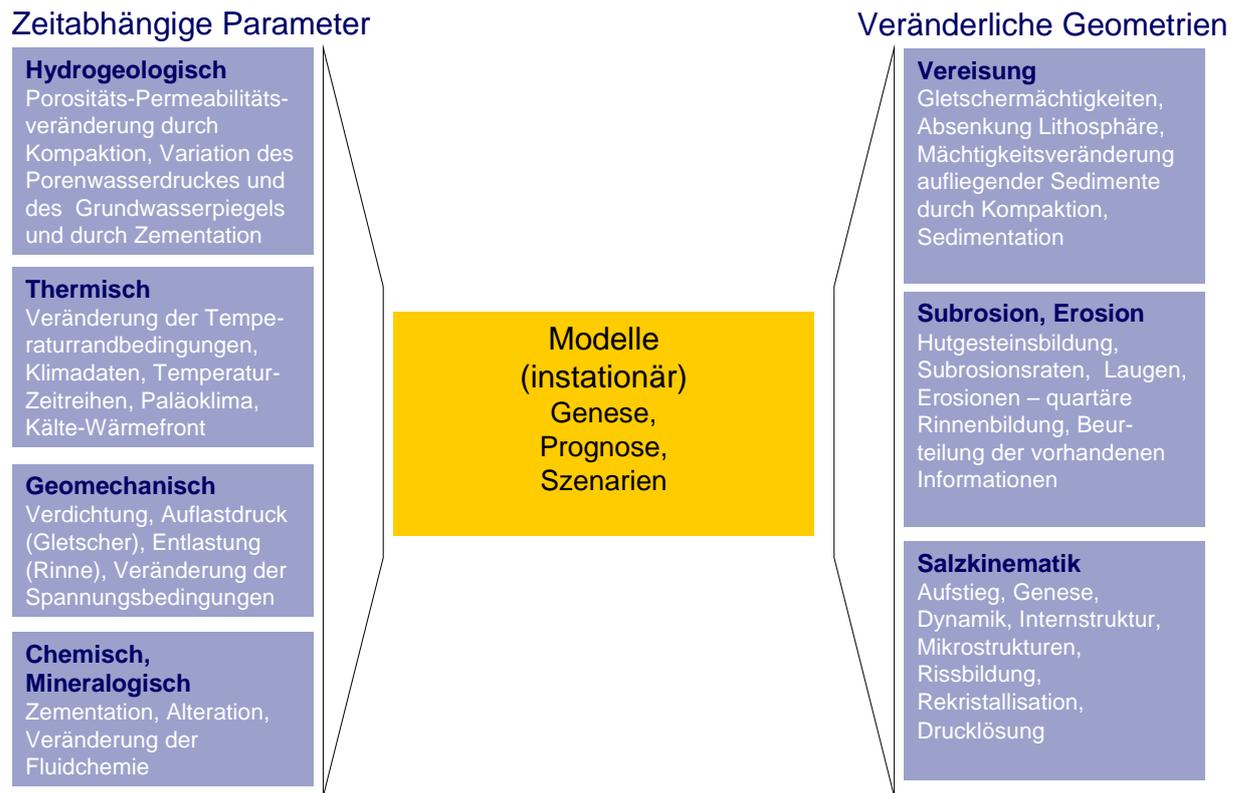


Abb. 1.2 Übersicht möglicher wirksamer zeitabhängiger Parameter und Prozesse

Um die zukünftige Entwicklung des Standortes zu beschreiben, wurden im Rahmen der Erkundung auch Daten und Informationen gewonnen, welche die zeitlichen Veränderungen des Systems berücksichtigen. Dies sind z. B. Abhängigkeiten thermischer und mechanischer Gesteinseigenschaften von Spannungs-, Druck- und Temperaturänderungen oder auch Veränderungen von Geometrien geologischer Grenzflächen und des internen Strukturinventars in Abhängigkeit langsam wirkender geologischer Prozesse (Abb. 1.2).

2 Standortdaten zur Hydrogeologie des Deckgebirges

In der von der BGR erstellten Standortbeschreibung Gorleben Teil 1 /KLI 07/ sind in kompilierter Form alle Informationen zusammengefasst, welche im Rahmen der Erkundung zur Hydrogeologie des Deckgebirges gewonnen wurden. Nach einer Übersicht zu dem Untersuchungsprogramm werden in diesem Bericht die Ergebnisse der hydrogeologischen Aufnahme, der hydraulischen Versuche, der geothermischen Untersuchungen, der chemischen Analysen zur Grundwasserbeschaffenheit sowie der Pegelmessungen zu den Grundwasserständen vorgestellt. In einem nachfolgenden Kapitel sind in /KLI 07/ die erhobenen Daten in einem Grundwassermodell zusammengeführt und abschließend diskutiert. Der Bericht ist mit einer Vielzahl von Tabellen und Abbildungen versehen und bezieht sich auf Primärliteratur der BGR und wissenschaftliche Publikationen.

Bei der Beurteilung des in diesen Berichten aufgezeigten Datenstandes wird eine Unterscheidung nach Primärdaten und abgeleiteten Daten vorgenommen. Unter Primärdaten sind alle Daten zu verstehen, die als direkte Messwerte unmittelbar an Probenmaterial oder in-situ gewonnen wurden. In diese Kategorie fallen z. B. die Messungen physikalischer Gesteinseigenschaften, chemische Analysen von Wasserproben, Pegelmessungen und Temperaturmessungen in Bohrungen. In den Berichten sind diese Primärdaten in der Regel in Form von Übersichten und Tabellen zusammenfassend aufgeführt oder als Einzelmessung exemplarisch dargestellt (z. B. Temperaturmessungen in Bohrungen). Ein direkter Zugriff auf alle einzelnen Primärdaten, zum Beispiel über eine extern zugängliche Datenbank, ist bislang nicht möglich. Insofern erfolgt eine Beurteilung der Primärdaten in erster Linie im Hinblick auf den Umfang, Tiefgang und Qualität des Messprogrammes, soweit dies anhand der Berichte nachvollzogen werden kann. Im Zuge dessen wird auch aufgezeigt, wie gut die erhobenen Daten dokumentiert sind. Bei den abgeleiteten Daten handelt es sich hingegen um Daten, die nicht direkt als Einzeldaten erhoben, sondern aus Messdaten abgeleitet werden, wobei deterministische oder empirische Auswerteverfahren zum Einsatz kommen. Zu nennen sind hier z. B. Wärmeleitfähigkeitsbestimmungen aus Temperaturmessungen, Porositätsmessungen aus Bohrlochmessdaten oder hydraulische Durchlässigkeiten aus Pumpversuchen. Diese abgeleiteten Daten sind in den Berichten in Form von Tabellen und Grafiken zusammenfassend dargestellt. Bei der Beurteilung dieser Daten wird u. a. darauf geachtet, mit welchen Methoden diese Ableitungen erfolgten, wie diese dokumentiert sind und inwiefern die Güte der abgeleiteten Daten validiert worden ist.

2.1 Hydrogeologie und hydraulische Eigenschaften des Deckgebirges

2.1.1 Untersuchungsprogramm und dargestellte Ergebnisse

Im Zeitraum von 1979 bis 1998 wurde ein Bohr- und Untersuchungsprogramm zur Erkundung der hydrogeologischen Verhältnisse durchgeführt. In der ersten Erkundungsphase (1979 – 1984) wurden 158 Aufschlussbohrungen (200 m – 450 m Tiefe) und 44 tiefer reichende Salzspiegelbohrungen niedergebracht, die durch 322 Grundwassermessstellen ergänzt wurden. In einer zweiten Phase (1996 – 1998) wurde für die Bereiche nördlich der Elbe das Untersuchungsprogramm durch weitere 27 Erkundungsbohrungen und 76 Grundwassermessstellen ergänzt (Abb. 2.1). Mit diesen Bohrungen wurde ein dichtes Messstellennetz geschaffen für Pumpversuche, Pegelbeobachtungen und hydrophysikalische / hydrochemische Untersuchungen. Ergänzt wurden diese Untersuchungen durch flachseismische Messungen, Bodenkartierungen, Abflussmessungen und Laboruntersuchungen an Bohrmaterial (Durchlässigkeit, Sorption).

Anhand dieser Bohrungen und der durchgeführten Untersuchungen wurde das quartäre und tertiäre Deckgebirge im Hinblick auf seine hydrostratigraphischen Baueinheiten gegliedert und sein hydrogeologischer Aufbau dreidimensional erfasst. Im speziellen Fokus der Untersuchungen stand die Gorlebener Rinne, in der es über einen direkten Kontakt zwischen dem Salinar und dem unteren Grundwasserleiter zu einer starken Aufsatzung der Grundwässer kommt.

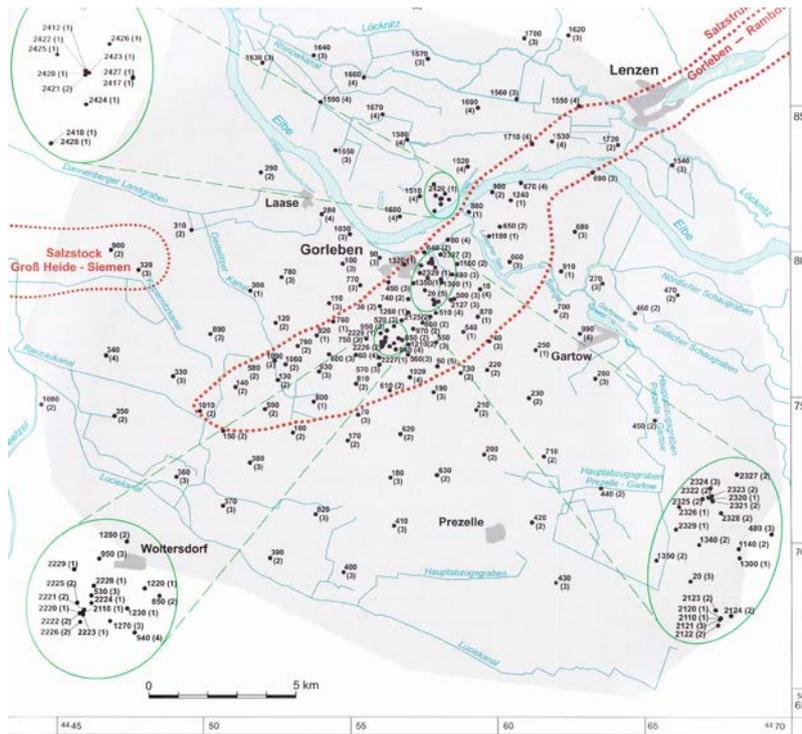


Abb. 2.1 Lage der Aufschlussbohrungen und Messstellen des hydrogeologischen Untersuchungsprogramms (aus /KLI 07/)

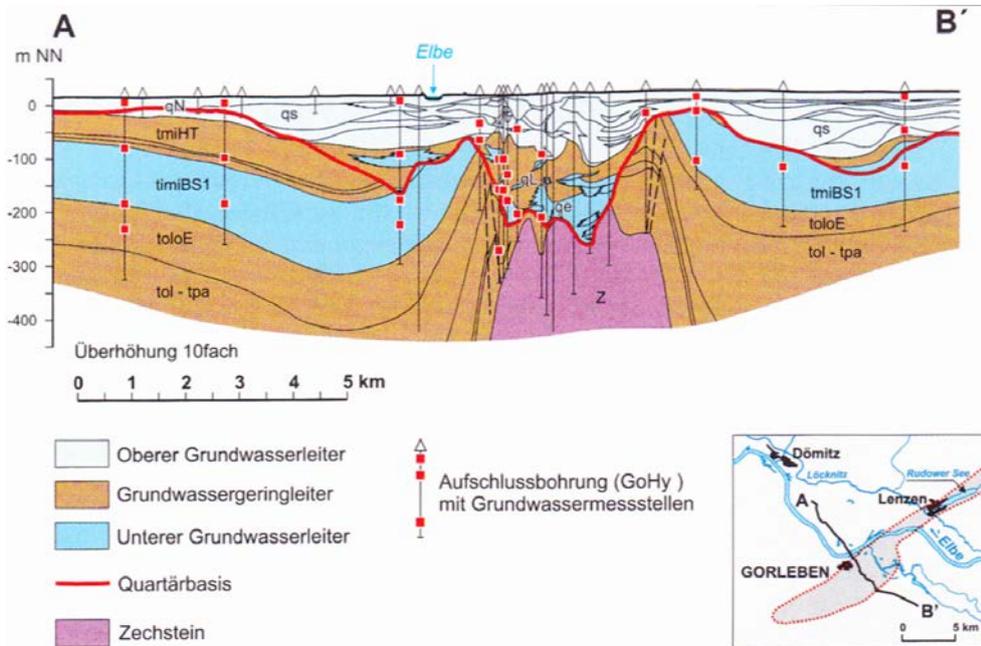


Abb. 2.2 Darstellung der Aquifergliederung im Deck- und Nebengebirge (aus /KLI 07/)

Zur Ermittlung der hydraulischen Eigenschaften (Transmissivität, Durchlässigkeitsbeiwert, Speicherkoeffizient) dienten Pumpversuche und Laboranalysen. Es erfolgten fünf Langzeitpumpversuche sowie Kurzzeitpumpversuche in 75 Grundwassermessstellen. Die Auswertung der Pumpversuche erfolgte nach hydrogeologischen Standardverfahren /THE 35/; in der ersten Untersuchungsphase manuell, später mit im Fachgebiet eingeführter Auswertesoftware. Die Ausführung der Pumpversuche wird in den Berichten erläutert, mit Angabe der technischen Daten und Angaben zu Korrekturen für Wasserstände und Klimadaten. Die hieraus abgeleiteten hydraulischen Kennwerte wurden durch Laboruntersuchungen (ca. 950 Siebanalysen, 50 Wasserdurchlässigkeitsmessungen an bindigen Proben in Triaxialzellen) ergänzt. Für die Auswertung der Laboruntersuchungen sind die eingesetzten Berechnungsverfahren bzw. DIN-Normverfahren benannt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in den Primärberichten im Detail erläutert, in der Standortbeschreibung, Band 1 zu Gorleben in Tab. 2.1 und in Abb. 2.3 in kompilierter Form dargestellt.

Tab. 2.1 Ergebnisse der Pumpversuche: Transmissivität, Durchlässigkeitsbeiwert (k_f) und Speicherkoeffizient nach dem analytischen THEIS-Verfahren (aus /KLI 07/)

| | | Transmissivität [m ² /s] | | k_f -Wert [m/s] | | Speicher- koeffizient | |
|------|----------------------------|--|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|
| | Aquifer (Stratigraphie) | min | max | min | max | min | max |
| WM 1 | oberer (qs) | 2 × 10 ⁻² | | 3 × 10 ⁻⁴ | 4 × 10 ⁻⁴ | 5 × 10 ⁻⁴ | 8 × 10 ⁻⁴ |
| WM 2 | unterer (qe) | 1 × 10 ⁻³ | 2 × 10 ⁻³ | 2 × 10 ⁻⁵ | 5 × 10 ⁻⁵ | 3 × 10 ⁻⁴ | 9 × 10 ⁻⁴ |
| MS | unterer (qe) | 7 × 10 ⁻⁴ | 2 × 10 ⁻³ | 2 × 10 ⁻⁵ | 7 × 10 ⁻⁵ | 1 × 10 ⁻⁴ | 8 × 10 ⁻⁴ |
| GT | unterer (qpe) | 3 × 10 ⁻³ | 1,2 × 10 ⁻² | 4 × 10 ⁻⁵ | 1,7 × 10 ⁻⁴ | 2 × 10 ⁻⁴ | 8 × 10 ⁻⁴ |
| DL * | unterer (qe) | 2 × 10 ⁻² | 3,4 × 10 ⁻² | 2,1 × 10 ⁻⁴ | 3,6 × 10 ⁻⁴ | 1,4 × 10 ⁻³ | 2,6 × 10 ⁻³ |
| | unterer (tmiBS1) | 9,5 × 10 ⁻³ | 1,1 × 10 ⁻² | 1 × 10 ⁻⁴ | 1,2 × 10 ⁻⁴ | 8,4 × 10 ⁻⁴ | 1,2 × 10 ⁻³ |

* = Geometrisches Mittel für minimalen bzw. maximalen Elbeeinfluss

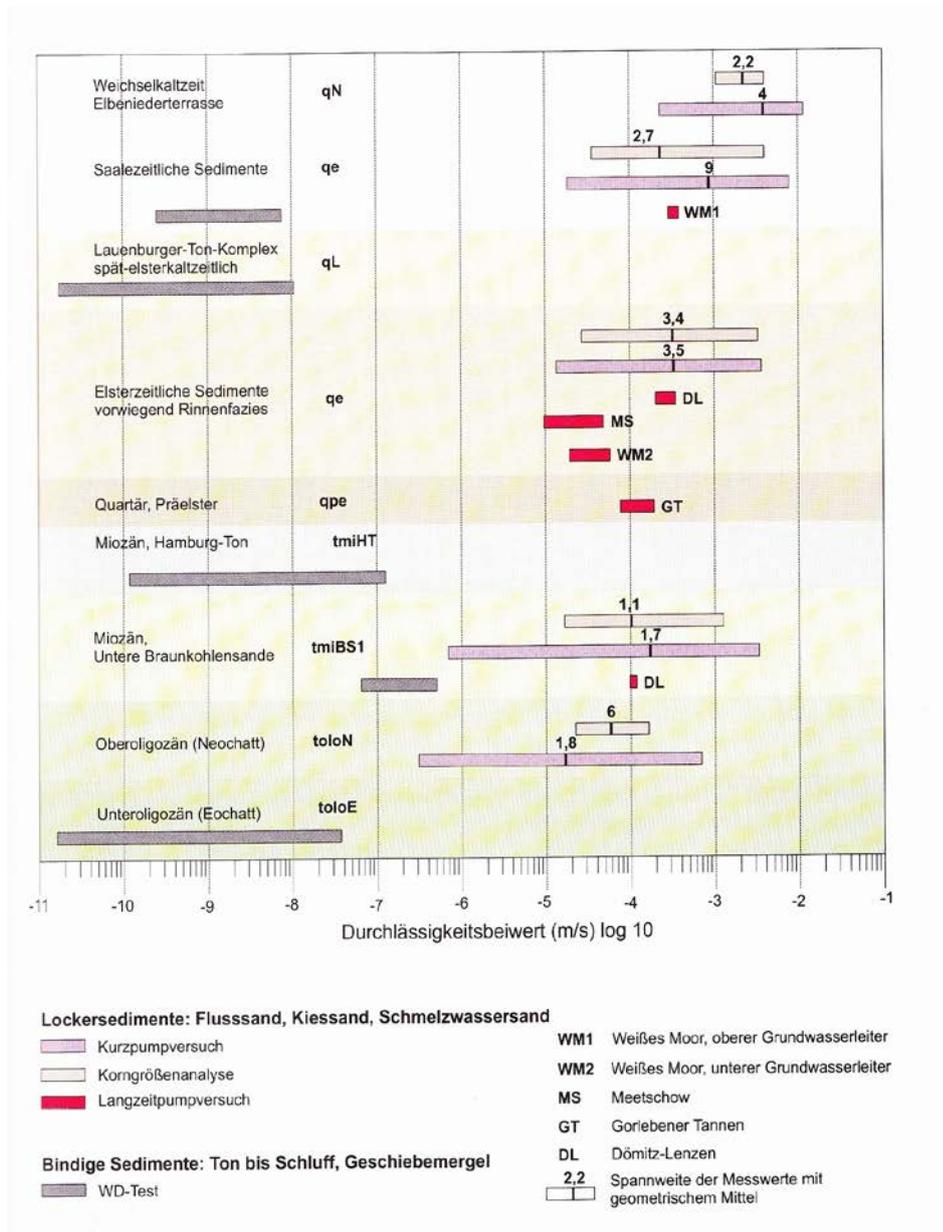


Abb. 2.3 Synoptische Übersicht der Durchlässigkeitsbeiwerte aus Pumpversuchen und Laboruntersuchungen (aus /KLI 07/)

2.1.2 Bewertung der Datenlage zu den hydraulischen Eigenschaften des Deckgebirges

Der Übersichtsbericht /KLI 07/ gibt in kurzer und übersichtlicher Form eine Zusammenfassung der ermittelten hydraulischen Eigenschaften im Deckgebirge. In Anbetracht des sehr umfangreichen Bohrprogramms, welches eine dichte und flächendeckende Abdeckung des Gebietes liefert und der aufwändigen Untersuchungen und Tests zur Ermittlung der hydraulischen Größen ist der Datenstand als sehr gut einzustufen. Ne-

ben den Erläuterungen zur Vorgehensweise und zur Auswertung liefern die Autoren auch eine kritische Einschätzung der ermittelten Größen im Hinblick auf ihre Genauigkeit und Aussagekraft. Die Auswertemethodik wird im Bericht zwar nicht im Detail gezeigt, aber es wird auf verschiedene hydrogeologische Standardverfahren und im Fachgebiet eingeführte Rechencodes verwiesen, was zulässig ist.

Zu den durchgeführten hydrogeologischen Untersuchungen gehört zudem eine digitale Datenbank. Eine umfassende Erläuterung dieser Daten findet sich in einem Metadokument von /KLI 04/. Im Verlauf der hydrogeologischen Erkundung des Deckgebirges über dem Salzstock Gorleben wurden die hydrogeologischen Basisdaten kontinuierlich digital erfasst und fortlaufend aktualisiert. Die Datensätze wurden abschließend in einer Datenbank zusammengeführt. In dem Bericht werden der Aufbau und die Beziehungen der Datenbanktabellen erläutert. Die Datenbank umfasst alle relevanten Daten wie

1. technische Daten zu Aufschlussbohrungen und Grundwassermessstellen,
2. geologische Schichtenverzeichnisse,
3. hydraulische Untersuchungen in Bohrungen und Messstellen,
4. Grundwasserstandsmessungen sowie
5. chemische und isopenhydrologische Analysen an Grundwasserproben aus Messstellen.

Umfang, Qualitätssicherung und Dokumentation der erhobenen hydraulischen / hydrogeologischen Standortdaten können als sehr gut beurteilt werden. Sie genügen in Umfang und Qualität den Anforderungen die bei Standortuntersuchungen für Sicherheitsanalysen zu Grunde gelegt werden.

2.2 Geothermische Untersuchungen

2.2.1 Erhobene Daten (Temperatur-Logs, Laboruntersuchungen)

Im Rahmen der übertägigen Erkundung wurden in insgesamt 167 Bohrungen Temperaturprofile aufgezeichnet. Diese erfolgten als kontinuierliche Profilmessungen über die gesamte Bohrstrecke mit einem Messfühler, für den eine technische Messgenauigkeit von 10 mK bei einer Auflösung von 1 mK angegeben wird. Die Abtastrate der Logs beträgt 2 cm, die Messgeschwindigkeit 2 m min⁻¹ /ALB 91/. Somit ist davon auszugehen, dass die Daten im Hinblick auf ihre Genauigkeit und Präzision von hoher Qualität sind. Nach Berichtsstand sind alle Temperaturdaten in einer digitalen Datenbank gespeichert. Das dichte Messnetz ermöglicht eine räumlich gute Erfassung der Temperaturverhältnisse im Deckgebirge (Abb. 2.4).

Im Labor wurden für die stratigraphischen Baueinheiten des Deckgebirges Wärmeleitfähigkeiten bestimmt, wobei bedingt durch die Laborausstattung der BGR im Untersuchungszeitraum Messungen nur an bindigen Festgesteinen durchgeführt werden konnten. Für alle nicht-bindigen Sedimente wie Kiese, Sande und sandige Schluffe liegen keine Labordaten vor.

2.2.2 Abgeleitete Informationen (Wärmestromdichte, Wärmeleitfähigkeit, Temperaturfeld)

Anhand der vorliegenden Daten erfolgten schon in der Frühphase der Erkundung erste Berechnungen der Wärmestromdichte /DEL 80/. Nach Auswertung der Temperaturmessungen und anderer bohrlochgeophysikalischer Messungen wurden dann detaillierte Berechnungen durchgeführt. Synthetisch erzeugte Profile wurden hierbei unter Annahme eines konstanten vertikalen Wärmestroms und rein konduktiver Bedingungen möglichst genau an gemessene Temperatur-Logs angepasst. Die Wärmestromdichte über dem Salzstock erreicht Maximalwerte bis 160 mW m⁻² (innerhalb des Ringwalls), und einen Minimalwert von 40 mW m⁻² in der östlichen Randsenke. Das Normalfeld der weiteren Umgebung beträgt 60 mW m⁻² /KLI 07/.

Um dieses Verfahren anzuwenden, müssen die Wärmeleitfähigkeiten der Schichten bekannt sein. In Ermangelung vollständiger Messwertserien aus dem Labor wurden die Wärmeleitfähigkeiten aus bohrlochgeophysikalischen Messdaten abgeleitet, was prin-

ziptuell möglich ist. In den Berichten wird erwähnt, dass das Gamma Ray, das Dichtelog und das Inductionlog eingesetzt wurden, um die volumetrischen Anteile der Komponenten Ton, Quarzsand und Wasser zu bestimmen. Über die Verknüpfung mit Wärmeleitfähigkeitskennwerten für diese Komponenten (Tab. 2.2) wurde über ein arithmetisches Mischungsgesetz die Wärmeleitfähigkeit der Schichten berechnet (Abb. 2.5). Diese Profile wurden genutzt, um synthetische Temperaturprofile zu generieren, wobei über die Anpassung an die gemessenen Profile die Wärmestromdichte für den Standort ermittelt wurde und dieses Ergebnis in Form einer Wärmestromdichtekarte dargestellt ist (Abb. 2.6).

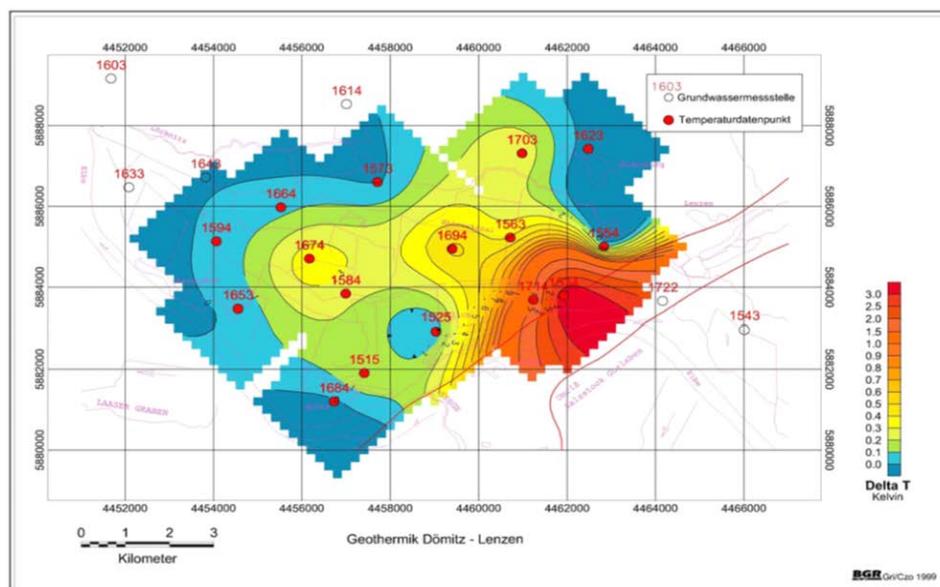


Abb. 2.4 Differenztemperaturen im Niveau -180 m (aus /BGR 03a/)

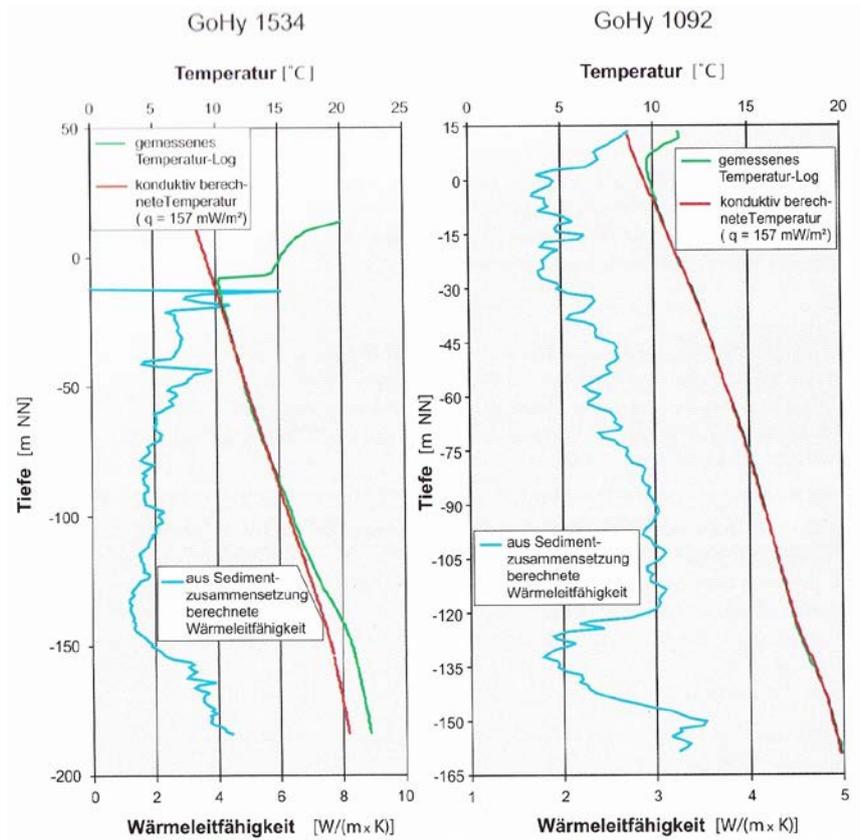


Abb. 2.5 Beispiel für einen Vergleich gemessener und berechneter Temperaturlogs (aus /KLI 07/)

Tab. 2.2 Verwendete Wärmeleitfähigkeiten der Sedimentkomponenten Ton, Quarzsand und Wasser (aus /KLI 07/)

| Sedimentkomponente | Wärmeleitfähigkeit k [W/m × K] bei 15 °C |
|--------------------|---|
| Ton | $k_{to} = 1,3$ |
| Quarzsand | $k_{sa} = 3,3$ |
| Wasser | $k_{wa} = 0,6$ |

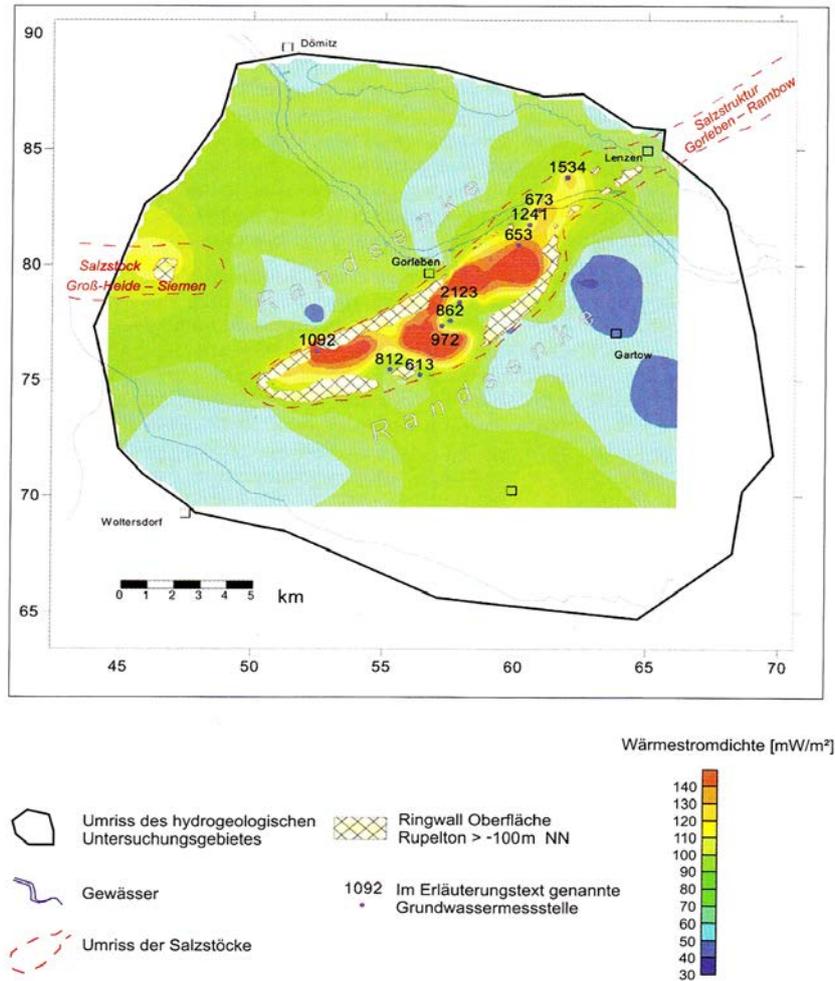


Abb. 2.6 Aus Temperaturlogs und berechneten Wärmeleitfähigkeiten ermittelte Karte der Wärmestromdichte (aus /KLI 07/)

2.2.3 Bewertung der geothermischen Daten zum Deckgebirge

Es existiert eine große Anzahl von Bohrungen im Deckgebirge, die eine sehr gute und detaillierte Erfassung des Temperaturfeldes bis in Tiefen von ca. -250 ü. NN liefern. Die Temperaturmessungen sind insgesamt sehr gut dokumentiert und es ist davon auszugehen, dass diese Messungen auch in einer sehr hohen Qualität, sowohl im Hinblick auf ihre Genauigkeit als auch Präzision, vorliegen. Es ist im Bericht vermerkt, dass alle Temperaturlogs in eine digitale Datenbank überführt wurden.

Die Informationen zu den Wärmeleitfähigkeiten sind hingegen nicht über eine direkte Datenerhebung belegt. Da Labormessungen mit den damaligen Laborgeräten der BGR nur an Festgesteinen möglich waren, wurden tertiäre und quartäre Lockergesteine, wie

Kiese, Sande und Schluffe, nicht im Labor vermessen. Direkte Daten zur Wärmeleitfähigkeit wurden nur an bindigen Materialien wie Tonen und Mergeln gewonnen. Wie viele Untersuchungen insgesamt an den bindigen Gesteinen wie Tonen und Mergeln durchgeführt wurden, konnte den Berichten /KLI 07/ bzw. /ALB 91/ nicht entnommen werden. Auch Angaben zu anderen thermophysikalischen Parametern, wie Wärmekapazität, Porosität bzw. Dichte, die eine geothermische Relevanz haben, sind in den Übersichtsberichten nicht aufgeführt.

Das bedeutet, dass für die in den Deckschichten auftretenden Sande und Kiese die Ableitung der Wärmeleitfähigkeit indirekt erfolgte. Zur Erstellung dieser abgeleiteten Daten wurde eine volumetrische Komponentenauswertung von Bohrlochmessdaten durchgeführt. Die Methode zur Berechnung der Komponenten Sand, Ton, Wasser ist in den bislang zugänglichen Berichten nicht näher erläutert. Hier existieren nur Verweise auf ein internes Rechenprogramm der BGR. Es gibt in der Bohrlochgeophysik eine Vielzahl von Methoden zur Bestimmung von Gesteinskomponenten und Porositäten, die in einer Reihe von Standardwerken zur Bohrlochgeophysik aufgeführt sind (z. B. /DOV 79/, /RID 96/, /SER 84/, /ELL 87/, /HEA 00/. Eine Benennung der Methoden und Aussagen darüber, welche im vorliegenden Fall benutzt wurden, ist notwendig.

Anhand der Loganalyse wurden Wärmeleitfähigkeitsprofile erzeugt. Hierzu gibt es in der Literatur verschiedene methodische Ansätze. So wird entweder ein empirischer Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit und den Logdaten hergestellt /DOV 97/, /VAC 88/, /EVA 77/, /GOS 75/ oder die Wärmeleitfähigkeit wird aus der Verschneidung volumetrischer Gesteinskomponenten mit den zugehörigen Wärmeleitfähigkeiten ermittelt /WILL 90/, /BRI 90/, /DEM 91/, /HAR 05/, /HAR 07/. Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit am Standort Gorleben folgte dem zweiten Ansatz über eine arithmetische Mittelung der aus den Bohrlochmessungen abgeleiteten volumetrischen Komponenten. Für diese Mittelung wurden Matrixwerte für Ton, Sand und Wasser benötigt. Die Herkunft der benutzten Matrixwerte für Sand und Ton ist nicht näher erläutert; es scheint sich um Richtwerte aus der Literatur zu handeln. Hier scheint der Wert von $3,3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ relativ klein für Quarzsand, falls dieser Wert als Matrixwert für Quarz verstanden werden soll. Referenzwerte aus der Literatur zeigen deutlich höhere Werte /ČER 82/, /CLA 06/. Für die berechneten Wärmeleitfähigkeiten existiert kein exemplarischer Vergleich mit den im Labor gemessenen Daten aufgrund dessen die Genauigkeit bzw. die Ungewissheit der abgeleiteten Werte überprüft werden könnte.

Schließlich wurden aus den berechneten Wärmeleitfähigkeiten und den Wärmestromdichten synthetische Temperaturlogs berechnet und an die gemessenen Daten angepasst. Die Anpassungen zeigen gute Übereinstimmungen für Teufenbereiche, bei denen man von konduktivem Wärmetransport ausgeht; Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen Temperaturprofilen weisen auf advektiven Wärmetransport hin. Diese Ergebnisse, soweit man diese anhand der verfügbaren Beispiele beurteilen kann, sprechen für in sich konsistente Daten.

Für alle weiteren Untersuchungen, die nach der VSG erfolgen, wird empfohlen die Ergebnisse der Loganalyse zumindest stichpunktartig zu überprüfen und die methodische Vorgehensweise exemplarisch zu dokumentieren. Im Zuge dessen sollten Vergleiche mit unabhängigen Daten gezeigt werden. Dies ist zum Beispiel die Berechnung des aus dem Gamma Ray-Log berechneten Tonanteils im Vergleich zum ermittelten Tonanteil aus mineralogischen Analysen (nach /ALB 91/ liegen 135 Tonmineralanalysen vor). Das gleiche gilt sowohl für eine Validierung der aus den Bohrlochmessdaten ermittelten Porosität mit der im Labor bestimmten Porosität der Lockergesteine (nach /ALB 91/ liegen 101 Porositätsmessungen vor) als auch für die Validierung der Wärmeleitfähigkeitsmessungen mit vorhandenen Labordaten. Nach den Erläuterungen von /SCH 99a/ sind die Bohrlochmessungen, die in den Erkundungsbohrungen durchgeführt wurden, mit einigen Ungewissheiten behaftet (siehe auch Kap. 2.3.1). Das gilt speziell für das Dichtelog, aus dem die Porositäten berechnet wurden.

Zu den geothermischen Daten kann zusammenfassend festgestellt werden, dass die Temperaturmessungen in ausreichend großer Zahl und in guter Qualität durchgeführt wurden und bezüglich ihrer Auswertung gut dokumentiert sind. Nicht genau erklärt sind hingegen die zugrunde liegenden Methoden zur Auswertung der anderen bohrlochgeophysikalischen Messungen und vor allem die zur Berechnung der synthetischen Wärmeleitfähigkeitsprofile aus den Logs. Demnach sollten im Sinne der Nachvollziehbarkeit im Hinblick auf die zukünftige Endlagerforschung, die Datenherkunft und angewendete Methodik besser dokumentiert werden. Hier wäre es sinnvoll, die genaue Vorgehensweise anhand eines Fallbeispiels exemplarisch zu dokumentieren und auch die wirksamen Prozesse im Untergrund, die das Temperaturfeld beeinflussen, zu erläutern. Darstellungen zum vertikalen Verlauf des Wärmestroms würden zur Veranschaulichung und Identifizierung der Horizonte mit möglicher Fluidströmung beitragen. Voraussetzung hierfür ist ein kalibriertes Wärmeleitfähigkeitsprofil sowie ein ungestörtes Temperaturlog. Weiterhin sollte eine eingehende Diskussion zu den Einflüssen anderer Prozesse, wie paläoklimatische Temperaturänderungen auf die gemessenen

Temperaturen bzw. den Wärmestrom erfolgen, da eine Vernachlässigung dieser Effekte zu einer systematischen Unterschätzung des Wärmestroms führen kann (z. B. /MAJ 11/, /MOT 06/).

2.3 Grundwasserbeschaffenheit, Grundwasserbewegung

2.3.1 Dichte, Salinität: Datenstand und Bewertung

Bedingt durch den direkten Kontakt der Grundwässer mit dem Zechsteinsalinar im zentralen Bereich der Gorlebener Rinne kommt es zu einer starken Aufsatzung der Grundwässer. Zur Erfassung der räumlichen Verteilung der Gesamtsalzgehalte wurden Grundwasserproben aus 404 Messstellen analysiert. Neben der chemischen Analyse wurden die Dichte der Grundwässer und ihre elektrische Leitfähigkeit bestimmt /ALB 91/. Diese direkten Messungen des Salzgehaltes und der physikalischen Eigenschaften wurden durch Salinitätsprofile und Profile der Porenwasserdichte ergänzt, die aus Bohrlochmessungen (Dichtelog, Widerstandslog, Gamma Ray-Log) abgeleitet wurden. Über eine vorliegende Korrelation des gemessenen elektrischen Formationswiderstandes mit den Gesamtsalzgehalten, den Wasseranalysen und den gemessenen Dichten konnte die Salinität und die Porenwasserdichte empirisch abgeleitet werden.

Die Vorgehensweise ist in /SCH 99a/ ausführlich erläutert, wobei alle benutzten Methoden nachvollziehbar dokumentiert sind und mögliche Fehlerquellen und Aussagegenauigkeiten benannt sind. Da die Auswertemethodik im engeren Sinne nur für tonfreie Gesteine gilt, wurde diese zur Berücksichtigung der Tonanteile erweitert. Die Berechnungen sind zwar mit einigen Ungewissheiten behaftet (Gerätekalibrierungen, Bohrlochausbrüche, Toneinschaltungen, Schultereffekte, Variation des Formationsfaktors), ermöglichen aber bei den stark kontrastierenden Grundwässern eine sehr gute qualitative Erfassung der vertikalen Salinitätsverteilung. Hier sei darauf hingewiesen, dass aus den Bohrlochmessungen allein eine sichere quantitative Ermittlung der Salinität und Porenwasserdichte aufgrund nicht systematisch erklärbarer Unterschiede zwischen den Dichtelogs in den Bohrungen nicht möglich war (ggf. Kalibriereffekte). Erst durch Variation freier Korrekturparameter (Widerstand der Tonmatrix, und Widerstand der Sandmatrix) wurde schrittweise ein Ergebnis erreicht, das mit den unabhängigen Wasseranalysen übereinstimmte (Abb. 2.7). /SCH 99a/ weist explizit darauf hin, dass die Bohrlochmessdaten, im speziellen die Dichtelogs und die daraus abgeleitete Porositätslogs, mit großen Ungewissheiten behaftet sind und nur über eine Kalibrierung der

Berechnungsergebnisse mit den punktuell vorliegenden Wasseranalysen sinnvolle Ergebnisse erzielt werden konnten.

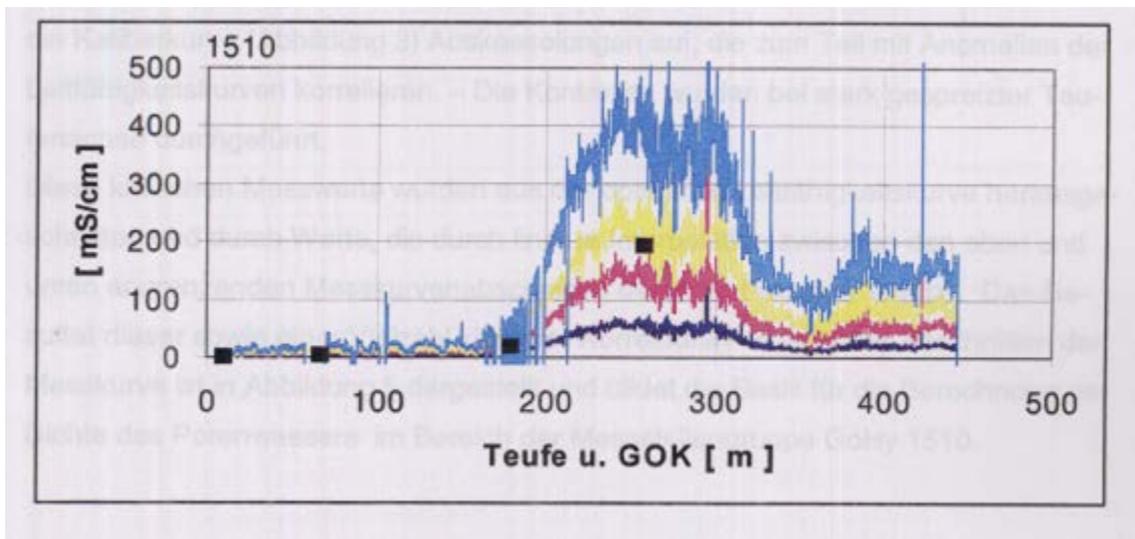


Abb. 2.7 Beispiel für eine Anpassung der Rechenergebnisse an gemessene Werte (aus /SCH 99a/)

Dargestellt sind verschiedene mögliche Rechenergebnisse für die elektrische Leitfähigkeit des Porenwassers aus geophysikalischen Bohrlochmessungen (farbige Linien) im Vergleich zu den Messwerten von Wasserproben (schwarze Quadrate)

Basierend auf den ausführlichen Erläuterungen zur Vorgehensweise und den vom Autor deutlich herausgestellten Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens können die berechneten Profile der Salinität und Porenwasserdichte als eine gute Datenbasis für die Erfassung der Süß- und Salzwasserverteilung im Deckgebirge bewertet werden. Aus der Süß- und Salzwasserverteilung ergeben sich nach /KLI 07/ prinzipiell zwei Ausbreitungspfade der Salzwässer. Zum einen erfolgt ein lateraler Transport von hochkonzentrierten Salzwässern in die nordwestliche Randsenke, zum anderen erfolgt ein vertikaler Salzwasseraufstieg in den oberen Grundwasserleiter infolge lokal erhöhter Durchlässigkeiten im zwischen liegenden Aquitard.

2.3.2 Grundwasserchemie: Daten und Bewertung

Zur Typisierung der Grundwässer wurden insgesamt ca. 1400 chemische Analysen durchgeführt. Im Übersichtsbericht sind die Analysen aller Messstellen in aussagekräftiger Form in Abbildungen dargestellt. Die beprobten Grundwässer wurden vier verschiedenen Grundwassertypen zugeordnet. Die chemische Signatur der Wässer wird in den Berichten ausführlich erläutert und ihre Genese in Hinblick auf die Süß- und

Salzwasserverteilung sowie die Wechselwirkungen zwischen Grundwässern und Sedimenten erklärt.

Die Alter der Grundwässer wurden mit isotopenhydrologischen Untersuchungen (Tritium, Deuterium, ^{14}C , ^{18}O) datiert und die Edelgasgehalte in den Wässern bestimmt. Die Messungen erfolgten durch das Institut für Umweltgeophysik der Universität Heidelberg sowie teilweise durch das Institut für Radiohydrothermie der GSF, Neuherberg. Insgesamt wurden Proben aus 82 Messstellen untersucht, ergänzt durch flächendeckende ^{18}O Messungen an Proben aus allen Messstellen. Edelgase wurden an ausgesuchten 41 Messstellen gemessen. Die Daten sind grafisch klar dargestellt und in Bezug zur chemischen Zusammensetzung und Herkunft der Wässer ausführlich erläutert.

Entsprechend der großen Zahl an Analysen kann der Datenstand zur Grundwasserchemie als umfassend und ausreichend beurteilt werden. Die Analysen wurden mit in der Grundwasserchemie üblichen Verfahren und Messgeräten durchgeführt und es wird davon ausgegangen, dass die zugehörigen Qualitätsstandards eingehalten wurden.

2.3.3 Grundwasserbewegung: Daten und Bewertung

Im Untersuchungsgebiet südlich der Elbe erfolgten seit 1979 Wasserstandsmessungen, wobei bis zum Jahr 1994 insgesamt 324 Messstellen in einem dichten zeitlichen Raster vermessen wurden. Im Schnitt liegen kontinuierliche Messdaten über neun Jahre bis maximal 15 Jahre vor. Nördlich der Elbe wurden Messungen zwischen 1997 und 2000 durchgeführt. Die Daten zeigen eine hohe zeitliche Auflösung und decken das gesamte Untersuchungsgebiet in einem engen Raster ab. Zusammenfassend ergeben die Wasserstandsmessungen, dass die Fluktuationen der Wasserstände im Wesentlichen durch die witterungsbedingte, unterschiedlich hohe Grundwasserneubildung gesteuert werden, wobei in flussnahen Bereichen der Einfluss der Vorfluter mit einwirkt.

Zur Ermittlung der Grundwasserbewegungen im oberen Süßwasserkörper wurden Grundwassergleichenpläne erstellt, aus denen die hydrogeologische Gliederung der Neubildungs-, Auf-, Zustrom- und Abstromgebiete im Untersuchungsgebiet ersichtlich wird. Für den unteren Süßwasserkörper wurden Druckspiegelpläne erstellt, mit denen

die hydrogeologischen Wechselwirkungen zwischen oberem und unterem Süßwasserkörper erklärt werden können.

Zur Ermittlung der Grundwasserbewegung im Salzwasserkörper erfolgten zusätzlich Porenwasserdruckmessungen mittels direkter Drucksondenmessungen im Filterbereich von Messstellen. Zur Bestimmung des Drucks für den gesamten Salzwasserkörper wurden zusätzlich die Daten aus der Bestimmung der Porenwasserdichte (Kap. 2.3.1) herangezogen und schließlich die gemessenen Drucke auf ein einheitliches Tiefenniveau bezogen. Aus den Messdaten, die auf die jeweiligen Referenzniveaus bezogen sind, ergeben sich Druckgradienten und entsprechende Fließrichtungen. Die Ergebnisse zeigen, dass in Tiefenniveaus von mehr als -200 m ü. NN die Fließrichtung im Salzwasserkörper nach Süden gerichtet ist, und somit entgegen der Süßwasserbewegung in den oberen Horizonten /KLI 07/.

Zusammenfassend kann der Ausgangsdatenstand zur Ermittlung der Grundwasserbewegung als sehr dicht beurteilt werden. Das gilt besonders für den oberen Süßwasserkörper, für den sehr umfangreiche Wasserstandsmessungen zur Ermittlung der Grundwasserpläne zur Verfügung stehen. Für den Salzwasserkörper ist die Datendichte aus Drucksondenmessungen deutlich geringer. Hier wurde zur Ermittlung der Druckgradienten zusätzlich die berechneten Porenwasserdichten mit hinzugezogen, die zwar mit gewissen Ungewissheiten behaftet sind (Kap. 2.3.1), aber insgesamt eine gute und ausreichende Datenbasis darstellen.

2.4 Modellrechnungen

2.4.1 2D und 3D Modelle

Die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Informationen zum hydrogeologischen Aufbau, zu den hydraulischen Eigenschaften, zur geothermischen Situation, zur Grundwasserbeschaffenheit und zur Grundwasserbewegung wurden für zwei- und drei-dimensionale Grundwassermodellierungen genutzt. Die Modellergebnisse sind in /KLI 07/ zusammenfassend erläutert. Vorgehensweisen und Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

Für Berechnungen mit konstanter Grundwasserdichte wurde ein dreidimensionales Grundwassermodell erstellt, das eine Fläche von ca. 350 m² umfasst und für die nume-

rischen Berechnungen in 380 unterschiedlich große Flächen diskretisiert wurde. Die Tiefenerstreckung reicht von +15 m ü. NN bis -350 m ü. NN und gliedert sich in 15 übereinander liegende Rechenebenen. Die entstandenen Zellen repräsentieren jeweils eine mittlere vertikale bzw. horizontale hydraulische Leitfähigkeit und effektive Porosität. Das Modell wurde mit Hilfe der Pegelmessungen gut kalibriert. Bis zu einer Tiefe von ca. 150 m stimmen die Modellberechnungen und Messungen mit einer Toleranz von einem Meter gut überein. Bedingt durch die zu Grunde liegende Vereinfachung einer angenommenen konstanten Porenwasserdichte wird von /KLI 07/ die Aussagekraft des Modells für die Gorlebener Rinne als eingeschränkt betrachtet, hier sind generell längere Fließzeiten der salzhaltigen Wässer zu erwarten.

Berechnungen zur Grundwasserbewegung mit variabler Dichte wurden nach /KLI 07/ nur als zweidimensionale Modelle ausgeführt, wobei Vertikalschnitte zur Gorlebener Rinne zu Grunde gelegt wurden. Die Modellstudien sollten klären, ob sich das Grundwassersystem in einem stationären Zustand befindet und welche Faktoren sensitiv auf das System einwirken. Für die Berechnung wurde das Programm SUTRA /VOS 02/ gewählt, in dem die variable Dichte als Funktion der Salzkonzentration gekoppelt ist. Die Modellrechnungen erwiesen sich als extrem zeitaufwändig und führten zum damaligen Zeitpunkt an die Grenzen der Wissenschaft und Technik. Die numerischen Berechnungen haben erheblich zum Verständnis der Strömungs- und Salzwassertransportmechanismen innerhalb der Gorlebener Rinne beigetragen (Abb. 2.8). Wesentlich schwieriger gestaltet sich die Quantifizierung des Salzwassertransports, d. h. die Angabe von Salzwasser-Transportraten und -Fließgeschwindigkeiten.

Nach /KLI 07/ sind wichtige Parameter, die die Interaktion des Deckgebirges mit dem Salinar betreffen, nicht ausreichend bekannt. Dies betrifft vor allem eine weitergehende Quantifizierung von Salzwasser-Transportraten und -Fließgeschwindigkeiten, die den Einsatz realitätsnaher dreidimensionaler Fließmodelle erfordern, welche auch die ortsvariable Dichte der Grundwässer berücksichtigen. Für über die VSG hinausreichende Standortcharakterisierungen ergibt sich hieraus ein notwendiger Forschungsbedarf für die Erstellung dreidimensionaler Modelle, die auch komplexe Systeme wie in Gorleben erfassen und quantifizieren können (siehe auch Kap. 2.2.4).

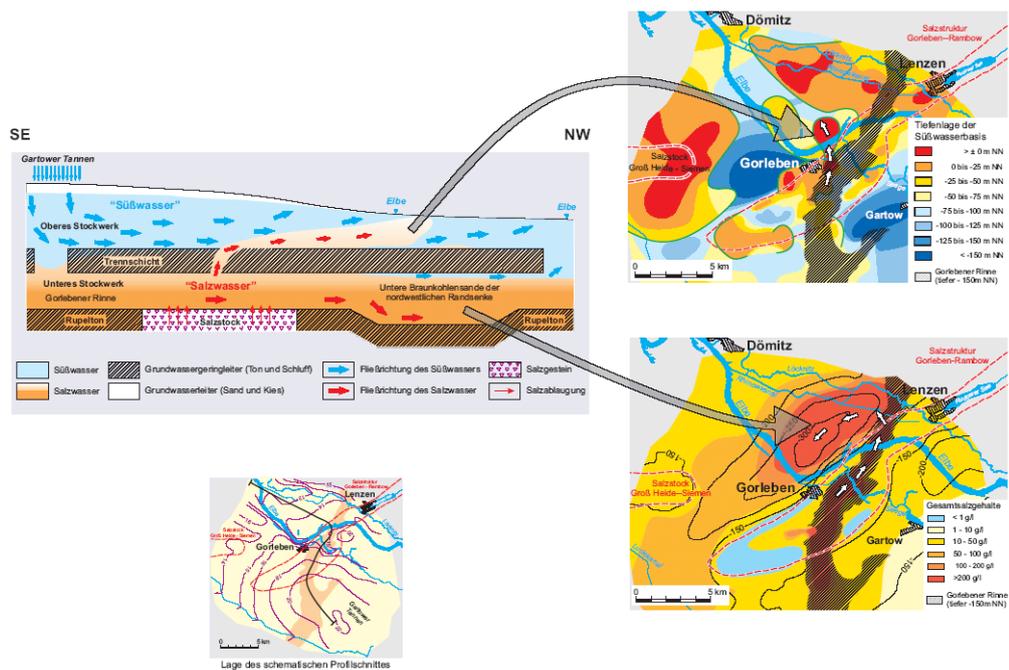


Abb. 12-6: Schema des Salzwassertransportes aus der Gorlebener Rinne

Abb. 2.8 Schema des Salzwassertransportes aus der Gorlebener Rinne (aus /KLI 07/)

2.5 Hydrogeologie des Deckgebirges: Bedeutung der Standortdaten und Benennung des weiteren Forschungsbedarfs

Eine gute Kenntnis der hydrogeologischen Situation an einem Standort ist ein wichtiges Element der Standortcharakterisierung, auf deren Basis die umfassende, standortspezifische Sicherheitsanalyse und Sicherheitsbewertung vorzunehmen ist. Gemäß dem Sicherheitskonzept der VSG soll der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle und ihrer Inhaltsstoffe in der Nachverschlussphase in dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) erfolgen. Dieser Gebirgsbereich soll im Nachweiszeitraum erhalten bleiben und seine Barrierenwirksamkeit soll weder durch interne noch durch externe Vorgänge und Prozesse beeinträchtigt werden. Zum langfristigen Erhalt des ewG tragen maßgeblich die den ewG überlagernden, mehrere Hundert Meter mächtigen Salzschichten bei.

Grundwasserfließvorgänge in den geologischen Schichten über dem Salinarkörper sind in diesem Zusammenhang von Bedeutung und bei den entsprechenden Nachweisen zu berücksichtigen, da sie u. a. die Auswirkungen der Subrosion des Salzgesteins bestimmen und damit direkt auf die Salzschichten wirken, die den ewG schützen und dessen Erhalt im Nachweiszeitraum sicherstellen sollen.

Gemäß dieser Bedeutung wurde am Standort Gorleben ein umfangreiches Bohr- und Untersuchungsprogramm durchgeführt, mit dem die Geometrien des Grundwassersystems und alle relevanten hydrogeologischen und hydrochemischen Parameter umfangreich erfasst wurden. Im Hinblick auf eine abschließende Beurteilung des hydraulischen Systems der Gorleben Rinne und ihrer Interaktion mit dem Salzstock im Hinblick auf Strömungsgeschwindigkeiten, Lösungs- und Transportraten müssen im Rahmen der weiteren Planung realitätsnahe dreidimensionale Grundwassermodelle erstellt werden, die alle wirksamen Prozesse der Grundwasserbewegung berücksichtigen. Für die Aufstellung eines mehrfach gekoppelten 3D Grundwassermodells ist eine Überprüfung der Modellgeometrien und vor allem der thermisch-hydraulischen Modelleingangsparameter erforderlich. Gründe hierfür sind im Folgenden beispielhaft aufgeführt.

Generell kommt den thermischen und hydraulischen Eigenschaften der jeweils vorliegenden Gesteine im Hinblick auf die Grundwasserbewegung im Deckgebirge eine große Bedeutung zu. Systematische Vergleiche haben gezeigt, dass bei gleichem Ausgangsdatensatz je nach gewähltem Mischungsgesetz die aus Logs berechneten Wärmeleitfähigkeiten sehr große Variationen aufweisen können /HAR 05/. Das trifft vor allem für Grundwasserleiter mit hoher Porosität, wie im Deckgebirge des Salzstockes Gorleben ausgebildet, zu. Ungenauigkeiten bei der Abschätzung des Wassergehaltes (Porosität) aus den Logs können erhebliche Fehler bei der Berechnung der Wärmeleitfähigkeit nach sich ziehen, was wiederum die Berechnung der Wärmestromdichte anhand von Temperaturlogs beeinflusst. Eine validierte bzw. auch in ihren Ungewissheiten quantifizierte Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit sowie anderer hydraulisch wirksamer Größen (Porosität, Permeabilität) würde einen sinnvollen Beitrag zu einem dreidimensionalen thermisch-hydraulisch gekoppelten Grundwassermodell leisten. Eine räumliche Einbindung der thermisch wirksamen Parameter in den dreidimensionalen Modellraum liefert eine genauere Einschätzung der vertikalen und lateralen Variation dieser Parameter und verbessert die Vorhersagegenauigkeit von Grundwassermodellen. Forschungsarbeiten haben gezeigt, dass auf der Basis abgesicherter Wärmeleitfähigkeitsprofile (Labordaten, Inversionsrechnungen) und der daraus abgeleiteten synthetischen Temperaturlogs quantifizierbare Aussagen zu Strömungsgeschwindigkeiten möglich sind /RAH 05/, /RÜH 10/. Wie oben erwähnt gehört hierzu auch die Berücksichtigung paläoklimatischer Einflüsse auf die Wärmestromdichte. Strömungsgeschwindigkeiten sind für die Salzwasserkörper des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben bislang nicht ausreichend bekannt.

Für alle weiteren Forschungs- und Erkundungsarbeiten für den Standort Gorleben als auch für den Abschluss weiterführender Sicherheitsanalysen (nach VSG) ist es notwendig, den Datenbestand der BGR so zu archivieren, dass alle geologischen, bohrlochgeophysikalischen, petrophysikalischen und geochemischen Informationen und Daten in einer Datenbank zugänglich gemacht werden bzw. zumindest in digitalen Datenformaten (z. B. einzelne Dateien für Labordaten) auch für weitere Arbeiten zur Verfügung stehen.

3 Standortdaten zur Geologie des Deck- und Nebengebirges

3.1 Übersicht Erkundung (Bohrungen, Geophysik, Kartierungen)

Der Kenntnisstand der lokalen geologischen Verhältnisse vor Beginn der Erkundungsphase, die im Jahr 1979 begann und im Jahr 2000 mit dem Moratorium endete, basierte auf alten Kartierungen und einer geringen Anzahl von Bohrungen und reflexionsseismischen Messungen. Die Erkundungsmaßnahmen seit 1979 beinhalteten Kartierungen, Bohrungen, mineralogisch-geochemische Untersuchungen und ein intensives geophysikalisches Messprogramm. Das Bohrprogramm umfasste 281 Projektbohrungen, wobei der überwiegende Teil (185) als hydrogeologische Aufschlussbohrungen abgeteuft wurde (maximale Teufe –444 m ü. NN). Weitere 44 Bohrungen mit Teufen bis max. 520 m dienten der Erkundung des Salzspiegels, des Hutgesteins und allgemein der Verhältnisse der flachen Abschnitte des Salzstocks und seiner Umgebung. Der tiefere Untergrund wurde in insgesamt vier Tiefbohrungen in den Flankenbereichen des Salzstocks bis 2000 m Tiefe und in zwei Schachtvorbohrungen bis 1000 m Tiefe erkundet.

Begleitend zu den genannten Bohrungen fand ein extensives geophysikalisches und bohrlochgeophysikalisches Messprogramm statt. Hierbei wurden die bis zum Ende des Erkundungszeitraumes üblichen Messmethoden und Auswertungsverfahren angewendet. Reflexions- und refraktionsseismische Messungen zur Erforschung der 3D Struktur des Salzstocks und des tieferen Untergrundes wurden dabei zuletzt 1984 durchgeführt. Zwischen 1994 und 1997 erfolgten zwei flachseismische Messkampagnen zur Erkundung der Lagerungsverhältnisse im Quartär und Tertiär und der Ausbildung der Oberfläche des Salzstocks. Diese wurden durch bohrlochseismische Messungen mit Geophonen in 42 Bohrungen unterstützt. Die erhobenen Daten bildeten die Basis für die Randsenkenanalyse, die Ermittlung von möglichen Fluid-Wegsamkeiten und die Interpretation der Geometrie des Salzstocks.

Neue und umfangreiche quartärgeologische Kartierungen wurden aufgrund des „veralteten Standes“ /KÖT 07/ der lokalen geologischen Standortdaten durchgeführt. Ziel war es hierbei insbesondere, die eiszeitlichen Terrassenablagerungen und jüngeren holozänen Sedimente zu erfassen, um Rückschlüsse auf die zukünftige Entwicklung des Salzstocks zu ziehen. Die begleitende Probenanalytik der 1980er und 1990er Jahre ist tabellarisch in /KÖT 07/ aufgeführt.

3.2 Geologische Entwicklung des Salzstockes Gorleben und Umgebung

Die im Untersuchungszeitraum durchgeführten Kartierungen, Beprobungen und Messkampagnen ermöglichten sehr umfangreiche und detaillierte stratigraphische Arbeiten im Zielgebiet. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die quartäre Entwicklung gelegt. Die Kartierung der Niederterrasse, die keine kryogene Überprägung erfuhr, ermöglichte dabei die Abschätzung jüngster halokinetischer Bewegungen. Eine Besonderheit der quartären Ablagerungen stellen die in Norddeutschland weit verbreiteten eiszeitlichen Rinnen dar. Einleitend wird darauf hingewiesen (/KÖT 07/, S. 150), dass „generell keine engeren Beziehungen zu Salzstrukturen bzw. zum prä-quartären Untergrund nachzuweisen sind“. Dominierendes Element ist die über 40 km lange und bis zu 4 km breite Gorlebener Rinne. Dieser mit grobklastischen Sanden, Brekzien und Tonen aufgefüllte Erosionskörper kommt im zentralen Bereich des Salzstocks mit elsterzeitlichem Hutgestein und zum Teil auch direkt mit dem Salzstock in Kontakt. Die Bildung der Hutgesteinsbrekzie und deren Ablagerung im Bereich der Rinne weisen auf elsterzeitlichen Schmelzwassertransport zwischen Hutgestein und Salinar hin. Flachbohrungen belegen eine intensive glazigene Deformation bis etwa 150 m unter Flur, die den Salzstock nicht beeinflusst. Die Strukturen im Liegenden des Salzstocks wurden auf Basis der 1984 durchgeführten reflexionsseismischen Salzflanken- und Salzstockunterschneidungen interpretiert. Daneben wurde die Zechsteinbasis durch vier Bohrungen durchörtert, wobei nur zwei Bohrungen im zentralen Bereich des Salzstocks niedergebracht wurden. Demnach und im Vergleich mit dem Salzstock Rambow sind auf Basis der 2D Seismik keine Störungen an der Zechsteinbasis nachweisbar bei einer Auflösungsgrenze von etwa 50 Metern. Überregionale Untersuchungen des Salzsockels geben keinen Hinweis auf die Existenz von ausgeprägten Störungszonen im unterlagernden Paläozoikum, die an anderer Stelle im Zechsteinbecken für die Ausbildung langgestreckter Salzkörper verantwortlich gemacht werden.

Angaben zu Salzspiegel- und Hutgesteinsmächtigkeiten und -ausbildungen sind durch eine hohe Datendichte gut belegbar. Sie geben zudem Hinweise auf die geodynamische Entwicklung des Gorleben-Salzstocks (siehe unten). Der Einfluss der elsterzeitlichen Rinne auf die Entwicklung des Hutgesteins ist durch schwankende Mächtigkeiten und lithologisch heterogene Ausbildungen deutlich sichtbar. Hinweise auf Subrosion im Scheitelbereich der Salzstöcke sind nachvollziehbar. Subrosionsphasen im Tertiär werden mit berechneten Raten von jährlich 0,005 mm bis 0,015 mm angegeben, im präglazialen Quartär schwanken die Berechnungen zwischen 0,2 mm (/KÖT 07/, S. 164) und 0,5 mm/Jahr /DUP 87/ und in den quartären Eiszeiten (Elster

bis Saale) zwischen 0,1 mm bis 0,2 mm/Jahr /KÖT 07/. Eine andauernde holozäne Subrosion ist mit den gängigen geologischen Methoden für die letzten 130.000 Jahre nicht nachzuweisen. Zukünftige mittlere Salzablaugungsraten werden in /KÖT 07/ unter den gegebenen hydrogeologischen Gegebenheiten mit 0,01 mm bis 0,05 mm/Jahr angegeben.

3.3 Beurteilung der Standortdaten zur Geologie des Deck- und Nebengebirges

Ein über 20 Jahre umfassender Untersuchungszeitraum ermöglichte eine sehr detaillierte Bestandsaufnahme im Gelände, unterstützende Bohrungen sowie umfangreiche Laboruntersuchungen. Die stratigraphische Abfolge ist deshalb ebenso gut etabliert wie die durch Bohrungen belegten geologischen Gegebenheiten im flacheren Untergrund. Der tiefere Untergrund mit den Salzflanken und den unterlagernden präpermischen Schichten ist jedoch durch lediglich zwei Bohrungen und eine 2D Seismik von 1984 weniger gut belegbar. Das daraus abgeleitete Geometriemodell des Salzstocks und die Kinematik der Salzbewegungen sowie Bilanzierung der Salz mengen wird im folgenden Kapitel detailliert besprochen. Die Quantifizierung der Salzablaugungsraten ist aus Befunden der Geländearbeiten und Laboranalytik abgeleitet und vor allem für die letzten nachweisbaren Salzablaugungen im Holozän vermutlich auf die geringe hydrologische Aktivität im Gebiet zurückzuführen. Deutlich erhöhte Laugungsraten in der Vergangenheit liefern Hinweise auf unterschiedliche Einflussparameter im Vergleich zu heute. Entsprechend muss auch vertiefend geprüft werden, ob ein direkter Kontakt zwischen hochporöser Rinnenfüllung der Gorlebener Rinne und dem Salinar des Salzstocks bestand und auch zukünftig nicht ausgeschlossen werden kann.

3.4 3D (externe) Geometrie des Salzstocks Gorleben (3D Erkundung)

3.4.1 Stand der Forschung und Best Practice

Die detaillierte Kenntnis der dreidimensionalen Geometrie des Untergrundes ist bei dessen Erschließung in vielfacher Hinsicht von Bedeutung. Auf dem Gebiet der seismischen Erkundung werden vor allem durch die Aktivitäten der Kohlenwasserstoffindustrie seit zwei Jahrzehnten große Fortschritte auf Basis von 3D seismischen Datensätzen gemacht /NES 96/, /DOR 96/, /CAR 05/. Der Übergang zu 3D war hauptsächlich

der limitierten räumlichen Auflösung von 2D seismischen Daten zuzuschreiben /CAR 07/. Damit verbunden war eine deutliche Verbesserung der Prozessierungstechniken und folgend der Visualisierung des Untergrundes. Durch die sich stetig verbessernde Auflösung der Daten sind detaillierte sedimentologische und tektonische Strukturen /DAV 04/, /YIL 01/ im Bereich weniger Meter detektierbar /BUL 06/. Mit der Technologie der „Quantitativen Seismischen Interpretation (QI)“ wurde gleichzeitig die Verbindung hin zur Gesteinsphysik und der Vorhersage von Lithologien und Reservoirfluiden gezogen /AVS 10/. Die in der Industrie anerkannte „Halbwertszeit“ eines seismischen Datensatzes nach der eine Neuprozessierung bzw. eine Neuakquirierung in Betracht gezogen werden sollte, liegt augenblicklich bei unter 10 Jahren, bedingt durch die Forschungs- und Entwicklungsfortschritte in diesem Fachgebiet.

3.4.2 Seismische Untersuchungen in Gorleben

Am Salzstock Gorleben erfolgte 1980 eine Salzstockflankenbestimmung mit Hilfe von Reflexionsseismik, wobei an der Oberfläche angeregt und in den Tiefbohrungen Go 1002 und Go 1003 die reflektierten Signale gemessen wurden. 1984 wurden im Bereich des Salzstocks Gorleben reflexionsseismische Messungen durchgeführt. Sie wurden ergänzt durch refraktionsseismische Messungen und Salzstockunterschießungen. Aufgabe war, die Lage des Salzstocks, das Relief seiner Oberfläche, seine äußeren Umrisse und die Basis zu erkunden. Es wurden insgesamt 16 Profile mit einer Gesamtlänge von ca. 150 km reflexionsseismisch vermessen und ausgewertet /ZIR 91/. In den Jahren 1994 bis 1997 wurden bei zwei Messkampagnen in den Gebieten Gorleben-Süd und Dömitz-Lenzen auf 313 Profilkilometern Untersuchungen mit hochauflösender Reflexionsseismik (Flachseismik) durchgeführt. Ziel war die Präzisierung der Lagerungsverhältnisse des Tertiär, des Quartär sowie die Ausbildung der Oberfläche des Salzstocks Gorleben und des angrenzenden Teils des Salzstocks Rambow. Gleichzeitig erfolgten in 42 Bohrungen Geophonversenkmessungen, deren Ergebnisse zur Interpretation der Flachseismik benutzt wurden /ZIR 00/. Die Ergebnisse der geophysikalischen Erkundungsprogramme ermöglichten laut /KÖT 07/ „die Durchführung einer Randsenkenanalyse, die Ermittlung von potentiellen Lösungswegen im Deckgebirge und eine genauere Festlegung der Salzstockbegrenzung“.

Die niedrige Auflösung der 2D Seismik aus den 1980er Jahren wird exemplarisch in den Seismogrammen der Salzstockunterschießung sichtbar (Abb. 37 in /KÖT 07/). Durch die Bohrungen und regionalgeologischen Daten zeichnet sich die Zechsteinba-

sis ab. Die Möglichkeit des Vorhandenseins von Störungen mit Versätzen < 50 m, die im 2D Datensatz augenblicklich nicht detektierbar sind, kann allein anhand vorliegender seismischer Untersuchungen nicht ausgeschlossen werden /KÖT 07/. Es hat sich weltweit in vielen Gebieten beim Übergang von 2D auf 3D Seismik herausgestellt, dass erst mit diesen hochauflösenden seismischen Methoden bisher nicht sichtbare Störungsmuster herausgearbeitet werden können und dies auch in flachen Untergrundbereichen zielführend sein kann /YOR 09/. Hierbei sind nach dem aktuellen Stand der Technik, in Abhängigkeit von der jeweiligen lokalen geologischen Situation, Auflösungen im Bereich von 5 – 10 m nachweisbar /BUL 06/, /AIT 05/, /GEN 11/.

Die dieser Bewertung zugrunde liegenden Querschnitte des Salzstocks (z. B. Abb. 41 in /KÖT 07/) sind als Projektionen bzw. geologische Modellvorstellungen zu betrachten. Sie basieren auf einer Integration der erhobenen Geländedaten, Bohrlochdaten (Kerne und Messungen), Messungen aus der Erkundungsebene heraus sowie der 2D Seismik. Letztere liefert jedoch kein hochauflösendes Bild vor allem der Salzstockflanken. Die Außengeometrie des Salzstocks ist demnach ebenso wie die Verteilung und das Volumen des Hauptsalzkörpers über dem Einlagerungsbereich mit bisher nicht quantifizierbaren Ungewissheiten behaftet. Die Modellvorstellungen zur strukturellen Entwicklung des Salzstocks und seines Hut- und Nebengesteins (z. B. Abb. 38 in /KÖT 07/) sowie des avisierten Salzflusses sind ebenso eher qualitativ einzuschätzen.

Der oben dargestellte, augenblickliche geologische Kenntnisstand stellt eine Prämisse dar, mit der sich die VSG zu diesem Zeitpunkt arrangieren muss.

3.4.3 **Forschungsbedarf zur 3D Geometrie des Salzstocks Gorleben**

Zur Bewertung der Eignung einer geologischen Struktur als Endlager für radioaktive Abfälle ist die Kenntnis der jeweiligen Untergrundsituation erforderlich. Zur dreidimensionalen Abbildung liefert hierzu die 3D Seismik die besten Voraussetzungen. Die im Folgenden genannten und auf Gorleben bezogenen Punkte werden deshalb über diesen Standort hinaus als notwendig für den Abschluss weiterführender Sicherheitsanalysen (nach VSG) in der Endlagererkundung generell betrachtet.

- Die Akquisition eines hochauflösenden 3D seismischen Datensatzes mit Fokus auf die Salzflankenabbildung (und die interne Strukturierung des Salzstocks vor allem der Anhydritschollen (Kap. 4.3)) ist für den Salzstock Gorleben notwendig.

- Eine 3D seismische Interpretation mit Attributanalyse ist auf Basis eines tiefenmigrierten (PSDM, Pre-Stack Depth Migration) prozessierten Datensatzes im Rahmen einer Quantitativen Seismischen Interpretation notwendig.
- Notwendig für den Abschluss weiterführender Sicherheitsanalysen ist die Erstellung eines 3D geometrischen Modells mit quantifizierbaren Fehlergrenzen. Die genannten Daten und Methoden dienen zur hochauflösenden Detektion von Grenzflächen und Störungen und tragen zum Gesamtmodell des geometrischen, kinematischen und dynamischen Zustands des Salzstocks und damit zum Aufbau eines quantitativen Untergrundmodells bei.

3.5 Geologische Entwicklung der Salzstruktur Gorleben und deren Umfeld (Struktur, Kinematik)

3.5.1 Stand der Forschung und Best Practice – Salztektunik und strukturelle Bilanzierung

Salztektunik

Die Salztektunik spielt bei der Entwicklung des zentraleuropäischen Beckensystems, in dem Gorleben liegt, eine zentrale Rolle bei der Abschätzung der geodynamischen Entwicklung. Die vergangenen zwei Jahrzehnte sind weltweit durch große Fortschritte im Verständnis der Mechanismen der Salztektunik gekennzeichnet. Diese wurden in einer Reihe von Review-Artikeln zusammengefasst /HUD 07/, /STE 99/, /JAC 95/, /JAC 94/. Salzdynamische Modelle wurden am Beginn des vergangenen Jahrhunderts vor allem auch in Deutschland entwickelt. Frühe Modelle beinhalteten Auftrieb /ARR 12/, tektonische Extension und Kompression /STI 10/, /STI 25/ oder passiven Diapirismus /BAR 33/ als Antriebskräfte für Salzbewegungen. Das halokinetische Modell von Trusheim /TRU 57/, /TRU 60/ erlangte als Dichteinversionsmodell weltweit Anerkennung. Es wurde später durch eine tektonische Komponente bei der Initiierung der Salzbeugung modifiziert /MEI 67/, /RÜH 76/, /JAR 73/, /JAR 87/, /JAR 92/, /ZIR 96/. /BRI 92/ schlugen eine Verbindung zwischen Diapirismus, Blattverschiebungen und der Rotation von Randsenken vor.

Moderne Konzepte der Salztektunik betonen den Einfluss einer differentiellen Auflast als dominierende Kraft, die den Salzfluss steuert /HUD 07/. Dieses Konzept erklärt

laterale Variationen der Mächtigkeit, Dichte oder Festigkeit der Supra-Salz Sequenzen durch sedimentäre und erosive Prozesse /JAC 95/. So interpretiert /GE 97/ Diapirfamilien und periphere Randsenken in Norddeutschland als das Ergebnis progradierender sedimentärer Keile und lateraler Migration von Salz. Der Einfluss einer differentiellen Auflast auf das Wachstum von Salzstöcken (Diapiren) durch Sedimentkörper ist ein anerkannter Mechanismus. Dieser „passive Diapirismus“ (auch „downbuilding“) wird als Hauptantriebsmechanismus für Salzbewegung gesehen /BAR 33/, /JAC 91/, /VEN 92/, /BUC 96/, /ROW 03/. Dieses Konzept beinhaltet Sedimentation während das Salz kontinuierlich im Verhältnis zum umliegenden Schichtenverband aufsteigt und dabei in Oberflächennähe verbleibt. Es sieht derart den Durchbruch des Salzes bis an die Oberfläche vor. Das sedimentäre Inventar am Rand des Salzstocks enthält dabei onlap-Strukturen, die die typische Christbaum-Geometrie verursachen, ebenso wie steile Schichtenfolgen und Diskordanzen. Auf dieser Basis lassen sich „halokinetische Sequenzen“ definieren /GIL 02/, /ROW 03/, /KUK 08/. Aus der detaillierten Analyse der Salzüberhänge und deren Geometrien im Zusammenspiel mit anderen, nicht evaporitischen, sedimentären Ablagerungen lassen sich mit diesem Konzept Salzaufstiegsraten und Sedimentationsraten quantifizieren. Der passive Diapirismus endet erst wenn die Salzmigration nicht mit der Sedimentation Schritt halten kann /ROW 03/.

Rezente Studien im Zentraleuropäischen Becken unter besonderer Berücksichtigung der Salzdynamik wurden in einem Schwerpunktprogramm der DFG (SPP 1135) mit interdisziplinärer Beteiligung führender Institute durchgeführt und in /LIT 08/ veröffentlicht. Hierin wird deutlich gezeigt, dass der Hauptmechanismus der Salzdynamik die Entkopplung von Salz und strukturell bedingte Salzbewegung ist /KUK 08/, /MOH 05/, /MAY 05/, /SCH 03a/, /KOC 02/, /KOC 03/, /KOS 02/, /BAD 01/, /KOK 98/. Studien in nahegelegenen Gebieten der südlichen Nordsee erklären Salzkissen als buckle-folds, entstanden durch Inversion und Kompression /COW 95/ oder durch downbuilding-Prozesse /BUC 96/. Andere Autoren sehen Basement-gesteuerte Extension und Kompression als Grund für den Salzfluss /REM 95/ oder dokumentieren Floß-Tektonik als einen extremen Modus der Extension und Initiierung von Salzfluss /THI 01/.

Studien in vielen Salzprovinzen belegen, dass integrierte Studien, die auf einer kinematischen Bilanzierung und dynamischen Modellierung (z. B. /GEM 05/) basieren, der Schlüssel zu einem besseren Verständnis der Dynamik von Salzgebieten sind. Derartige Untergrundstudien sollten neben der sedimentären und strukturellen Analyse basierend auf üblichen geologischen Daten vor allem auf seismischer Interpretation und seismischer Attributanalyse aufbauen. So wurde mit Hilfe eines modernen 3D seismi-

schen Datensatzes erstmals in Deutschland eine Salzdurchbruchstruktur (Salzgletscher) im Niveau des oberen Keupers gefunden und visualisiert /MOH 07/.

Strukturelle Bilanzierung

Die Methode der kinematischen Bilanzierung (auch: palinspastische Rekonstruktion oder Retrodeformation) ist inzwischen eine anerkannte Verfahrensweise, um die strukturelle Entwicklung eines Gebietes in Zeit und Raum sequentiell und quantitativ nachzuvollziehen. Dies kann auf unterschiedlichen Maßstabsebenen stattfinden, vom Beckenmaßstab anhand von 2D seismischen Linien, bis hin zu eng umgrenzten Gebieten in 3D. In salztektonisch beeinflussten Gebieten haben eine Reihe von Studien nachgewiesen, dass diese Methodik zur Rekonstruktion der strukturellen und sedimentologischen Entwicklung sehr nützlich sein kann (z. B. /ROW 93/, /HOS 95/, /BUC 96/, /SCH 98/, /MOH 05/). Dabei werden stratigraphische Einheiten und Strukturen sequentiell entfernt, um die kinematische Entwicklung und die korrespondierenden Salzgeometrien herauszuarbeiten. Zusätzlich, und das ist die Stärke dieser Methodik, können unterschiedliche Untergrundgeometrien, die durch die seismische Interpretation möglich wären, auf ihre Plausibilität untersucht und somit ihre Ungewissheiten abgewogen werden.

Nachdem die kinematische Bilanzierung oft keine eindeutigen Ergebnisse liefert, muss ein iterativer Prozess zwischen struktureller Bilanzierung und seismischer Interpretation angewendet werden um ein „best-fit“ Modell zu erreichen. Das finale Modell soll somit alle Rahmenbedingungen der möglichen Modelle erfüllen und ist somit wahrscheinlicher als andere, aber üblicherweise nicht einzigartig /WOO 89/. Bei der Rekonstruktion von Salzstrukturen steht die Entwicklung des Deckgebirges in direktem Zusammenhang mit Salzflussraten. Die Restorationsmodelle können die Einflüsse von Sedimentation, Kompaktion, Isostasie, thermischer Subsidenz und die Dynamik von Störungssystemen sowie Salzbewegungen beinhalten. Der Einfluss dieser Modelleingangsparameter auf das Ergebnis ist stark abhängig von den weiteren Rahmenbedingungen wie Sektionslänge, Gebietsgröße, Variabilität und Strukturierung der untersuchten stratigraphischen Sektion. So hat es sich gezeigt, dass Kompaktion bei der Bilanzierung dort eine Rolle spielt, wo das Ziel ein Verständnis der bewegten Volumina und Raten ist, im Gegensatz zu Zielsetzungen wie Mechanismen und Prozesse.

Eine wichtige Annahme bei der 2D strukturellen Bilanzierung ist der plane-strain Zustand und die Tatsache, dass das Profil parallel zum tektonischen Transport orientiert

sein sollte /WOO 89/. Die Entkopplung durch das Salz macht es häufig nötig, die Salzlage und die pre-Salz und post-Salz Sequenzen als drei autonome tetkonisch-sedimentäre Systeme zu betrachten /SCH 98/. Weiterhin muss ein regionaler Horizont als Bezugshorizont definiert werden, der das Ausgangsrelief vor der Deformation repräsentiert /HOS 95/. Die üblichen Bilanzierungsalgorithmen in Salzgebieten sind schräge Scherung (oblique shear) und Biegescherung (flexural slip). Erstere erhalten die Fläche, aber die Linienlänge ist nicht konstant im Gegensatz zu Letzterem. Aus diesem Grund bevorzugen viele Bearbeiter oblique shear um Downbuilding- und Extensionsprozesse besser nachvollziehen zu können. Flexural slip dagegen wird für strukturelle Verkürzung (Kompression) und aktiven Salzdiapirismus bevorzugt.

3.5.2 Forschungsbedarf zur geologischen Entwicklung der Salzstruktur Gorleben und deren Umfeld (Struktur, Kinematik)

Die bis zur Verfassung dieses Berichtes vorliegenden Bilanzierungen von Salzaufstiegs- und Sedimentationsraten des Salzstockes Gorleben basieren auf den oben genannten Bohrungen hauptsächlich im Hutbereich, flachseismischen Messkampagnen zur Erkundung der Lagerungsverhältnisse im Quartär und Tertiär, und Messungen im Einlagerungsbereich. Der gesamte Teufenbereich des Salzstocks wurde bisher jedoch mit keiner der Methodiken erfasst. Die erhobenen Daten bildeten die Basis für die Randsenkenanalyse, die Berechnung der ursprünglichen Salzmächtigkeit und der Salzmengen und die strukturelle Entwicklung des Salzstocks und seiner Umgebung. Diese Kalkulationen und die Modellvorstellungen zur Kinematik des Salzstocks stützen sich auf eine qualitative Inversion der Schichtmächtigkeiten und der verwendeten Paläostrukturschnitte.

Aufgrund der außerhalb des unmittelbaren Einlagerungsbereiches unzureichenden Kenntnis der internen und externen Geometrie des Salzkörpers erlaubt es die bisherige Datenlage nicht, ein quantifizierbares kinematisches Modell des gesamten Salzstocks und seines Nebengesteins zu erstellen. Das vorliegende 2D kinematische Modell der BGR liefert keine Angaben über Fehlergrenzen. Für die VSG kann deshalb die Zuverlässigkeit der Datenlage aufgrund des Fehlens der Bandbreiten nicht abgeschätzt werden. Für abschließende Sicherheitsanalysen ist es notwendig, die Bandbreiten der Fehler zu modellieren. Mit dieser Basis können Entscheidungen über die Notwendigkeit weiter durchzuführender Datenaquisition (z. B. 3D Seismik) gefällt werden. In Gorleben besteht somit Forschungsbedarf im Hinblick auf die Klärung der äußeren und

inneren dreidimensionalen Struktur des Salzstocks und seiner räumlich-zeitlichen Entwicklung. Dies kann mit Hilfe von einer neuen 3D Seismik durch eine integrierte 3D kinematische und dynamische Bilanzierung erreicht werden. Dadurch lassen sich die Ungewissheiten der bisherigen, auf alten 2D Daten basierenden Bilanzierung deutlich reduzieren. Die 3D Bilanzierung wird zudem als feedback-Mechanismus für aufgestellte Struktur- und Fluid-Modelle einen wertvollen Beitrag zur weiteren Reduktion geologischer Ungewissheiten liefern. Die mögliche Quantifizierung der Deformationsraten und eine gegenüber dem augenblicklichen Kenntnisstand verbesserte Abschätzung der Salzaufstiegsraten unterstützt dabei die Vorhersage zukünftiger Bewegungen des Salzstocks nach der Einlagerung. Der Nutzen einer 3D kinematischen Bilanzierung lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Herausarbeitung der Zeitabfolge der Deformationsmechanismen und -phasen,
- Quantifizierung der Deformationsraten,
- Quantifizierung der Salzaufstiegs- und der Sedimentationsraten und zeitliche Abfolge der tektono-sedimentären Ereignisse,
- Etablierung einer halokinetischen Stratigraphie,
- Kalibrierungsmöglichkeit zwischen seismischer Interpretation und Retrodeformation,
- deutlich verbesserter Input für geomechanische Modelle der Entwicklung des Salzstocks überleben.

4 Standortdaten zum Salinar

4.1 Übersicht der Voruntersuchungen

Die Erkundung der Schichtenfolgen und der Strukturen im Salinar erfolgte durch die vier Salzstockerkundungsbohrungen Go 1002, Go 1003, Go 1004 und Go 1005 mit jeweils etwa 2000 m Endteufe. Die Bohrungen wurden dabei bewusst in den äußeren Bereichen des Salzstocks angesetzt, um möglichst viele unterschiedliche Schichtenfolgen und Lithologien zu durchteufen, aber hauptsächlich um das ältere Steinsalz zu erkunden. In allen Bohrungen wurden Bohrkerne, meist ab der Oberkante des Hutgesteins, gewonnen. Begleitend zu den genannten Bohrungen fand ein extensives geophysikalisches und bohrlochgeophysikalisches Messprogramm statt. Hierbei wurden die bis zum Ende des Erkundungszeitraumes üblichen Messmethoden und Auswertungsverfahren angewendet. Reflexions- und refraktionsseismische Messungen zur Erforschung der 3D Struktur des Salzstocks und des tieferen Untergrundes wurden dabei zuletzt 1984 durchgeführt.

Des Weiteren wurden 44 Salzspiegelbohrungen durchgeführt mit dem Ziel, den Aufbau des Hutgesteins und des Salzspiegels zu erkunden und geeignete Schachtansatzpunkte zu definieren. Zwei Schachtvorbohrungen, Go 5001 und Go 5002, die bis etwa 1000 m Tiefe gebohrt wurden, hatten zum Ziel, die bestmöglichen Standorte im Hinblick auf die Standfestigkeit im jüngeren Steinsalz zu erkunden, um die Strecken des Erkundungsbergwerkes optimal platzieren zu können.

4.2 Geophysikalische Erkundungsmaßnahmen

4.2.1 Oberflächengeophysikalische Verfahren

Im Jahr 1984 erfolgten reflexions- und refraktionsseismische Messungen und Salzstockunterschießungen, um die Lage und Umriss des Salzstocks sowie die Salzstockoberfläche zu bestimmen. Ein weiteres Ziel bestand in der reflexionsseismischen Erfassung der Lage der Salinarbasis, wobei auf ausgewählten Messlinien zusätzliche Salzstockunterschießungen durchgeführt wurden /ZIR 85/, /ZIR 90/. Insgesamt existieren 549 Tiefensondierungen und 16 reflexionsseismische Profile mit einer Länge von insgesamt 150 km längs und quer zum Salzstock /BOR 08/.

In den Jahren 1994 bis 1996 erfolgten zusätzlich hochauflösende flachseismische Untersuchungen. Ziel war die genaue Erfassung der Lagerungsverhältnisse der Deckschichten und der Ausbildung der Oberfläche des Salzstocks. Außerdem sollten Ausbisse des Kaliflözes Staßfurt am Salzspiegel erfasst werden. In 42 Bohrungen erfolgten Geophonversenkungsmessungen. Auf der Grundlage dieser Daten wurden die Profile dann in Tiefen umgerechnet bzw. geologisch interpretiert, wobei hier der Schwerpunkt auf dem Deckgebirge und Erfassung der Salzstockoberfläche lag (/KÖT 07/, /ZIR 03/).

„Die durch Seismik gewonnenen Salzstock- und Deckgebirgsdaten fließen unmittelbar in das Lagerstättenmodell ein und finden bei der Strukturkonstruktion im 3D Modell Verwendung“ /BOR 08/. Hier ist anzumerken, dass speziell hinsichtlich der Erfassung der tieferen Gebirgsbereiche (Nebengebirge, Salinar) der Stand der Wissenschaft und Technik mehr als 20 Jahre zurück liegt. Seither erfolgte eine erhebliche Verbesserung der seismischen Verfahren, wobei insbesondere hochauflösende 3D Seismik zu nennen ist. Hier wurden sowohl im Bereich der technischen Ausführung, des Datenprozessing und der Datenaufbereitung (Attribute, Imaging) enorme Fortschritte erzielt, die eine dreidimensionale Erfassung auch hoch komplexer Untergrundstrukturen im Detail erlauben (Kap. 3.4.1).

4.2.2 Bohrlochgeophysikalische Messungen, Tests

Aus den vier Erkundungsbohrungen (Go 1002 – Go 1005) und den zwei Schachtvorbohrungen (Go 5001 – Go 5002) liegen bohrlochgeophysikalische Messungen und Bohrlochtests vor. In den Erkundungsbohrungen kamen folgende Messungen zum Einsatz (Tab. 4.1):

Tab. 4.1 Übersicht der eingesetzten Bohrlochmessverfahren in den Erkundungsbohrungen und den Schachtvorbohrungen /KLI 07/

| Logs | Go 1002 | Go 1003 | Go 1004 | Go 1005 | Go 5001 | Go 5002 |
|----------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Temperatur | X | X | X | X | X | X |
| Dichte | X | X | X | X | X | X |
| Bohrlochgeometrie | X | X | X | X | | |
| Kaliber | X | X | X | X | X | X |
| Bohrlochabweichung | | | | | X | X |
| Natürliche Gamma-Strahlung | X | X | X | X | X | X |
| Neutron | | X | X | X | | X |
| Akustische Wellengeschwindigkeit | | X | X | X | X | X |
| Widerstand | | | | | X | X |
| Salinität | | X | | | | |
| Dip (Einfallen) | | | X | | X | X |

4.2.3 **EMR Methoden zur Strukturerkennung im Salinar**

Das elektromagnetische Impulsreflexionsverfahren EMR (=Elektromagnetische Reflexion) dient der hochauflösenden, zerstörungsfreien Erkundung des Untergrunds. Es ist bezüglich der Wellenausbreitung der Reflexionsseismik ähnlich. Die Anwendung von Radarsystemen zur Erkundung von Untergrundstrukturen ist seit mehr als 30 Jahren ein Standardverfahren in der Geophysik und wird als GPR (ground penetrating radar), RES (radio echo sounding) oder EMR (Elektromagnetisches Reflexionsverfahren) durchgeführt. Je nach Beschaffenheit des Untergrundes und verwendeter Frequenz beträgt die Reichweite bis zu mehreren hundert Meter.

Mittels EMR wurden am Standort Gorleben Messungen zur Identifizierung von geoelektrischen Diskontinuitäten durchgeführt. Nach /EIS 03b/ konnten durch die gemeinsame Betrachtung aller Reflektoren in weiten Bereichen des Infrastrukturbereiches die Charakterisierung des Verlaufs der Gorleben-Bank, des Übergangs der Staßfurt-Folge zur Leine-Folge z2/z3 und eine Eingrenzung homogener Salzbereiche erreicht werden. Eine Zusammenfassung aller durchgeführten EMR Messungen ist in /BOR 08/ dargestellt.

Beim EMR-Verfahren werden über eine Sendeantenne kurze elektromagnetische Impulse (einige ns im MHz-Bereich) in den Untergrund gesendet. Die abgestrahlten elektromagnetischen Wellen werden an den Grenzen unterschiedlicher Materialien bzw. Formationen reflektiert und gebrochen (Refraktion). Mit einem Empfänger werden die Amplituden und die Laufzeiten über die Wege des Signals von der Sendeantenne zum Empfänger gemessen (Abb. 4.1).

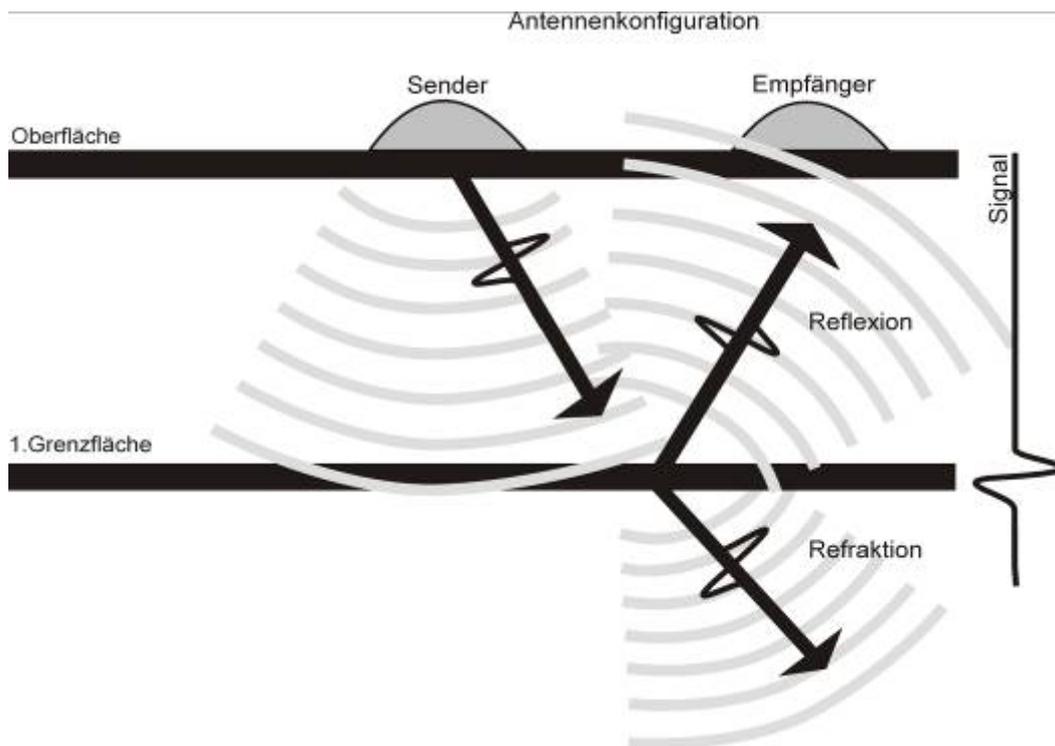


Abb. 4.1 Messprinzip des EMR-Messverfahrens nach /BUN 07/

An geoelektrischen Diskontinuitäten werden die elektromagnetischen Wellen reflektiert bzw. gebrochen. Je nach verwendeter Frequenz und Messkonfiguration können unterschiedliche Eindringtiefen und Auflösungen erreicht werden.

Tab. 4.2 Übersicht zu Frequenzbereichen und Auflösungsvermögen von EMR Messungen

| Frequenzbereich | Eindringtiefe in den Untergrund | Auflösungsvermögen der Objekte |
|-----------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 10 MHz | Hoch (1-100 Meter und mehr) | Niedrig (einige Meter) |
| bis | bis | bis |
| 10 GHz | Niedrig (einige Millimeter) | Hoch (einige Millimeter) |

Über die Kenntnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit lassen sich die Laufzeitmessungen in Entfernungen umrechnen.

Eine Übersicht über die gegenseitige Abhängigkeit von Frequenzbereich, Eindringtiefe in den Untergrund und Auflösungsvermögen der Objekte ist in der Tabelle 1 nach /BUN 07/ dargestellt.

Die EMR Messungen sind in /EIS 03b/ ausführlich beschrieben und in /BOR 08/ zusammengefasst. Die Messungen erfolgten zur Unterstützung der geologischen Erkundung des Salzstocks. Ab dem Jahr 1994 wurden im Salinarteil der Schächte in fast allen aufgefahrenen Strecken des Erkundungsbergwerks EMR Messungen durchgeführt.

Da die Messungen in den Schächten, Strecken und einigen Bohrungen ab dem Jahr 1998 mit einem richtungssensitiven System durchgeführt wurden, konnte zusätzlich zur Entfernung die Richtung der empfangenen Reflexionen bestimmt werden. Erste EMR Messungen in den Schachtvorbohrungen Go 5001 und Go 5002 fanden bereits in der Vorerkundungsphase statt, jedoch ohne Richtungszuordnung. Diese Ergebnisse wurden in den neueren Arbeiten als Zusatzinformation digitalisiert.

Die Messabstände betragen 1 m – 1,5 m. Es wurden verschiedene Frequenzen für Nah- und Fernbereich verwendet (20 MHz – 300 MHz). Tests ergaben, dass bei einer Frequenz von 50 MHz eine ausreichende Auflösung bei maximaler Reichweite erzielt wurde. Zur Ungewissheit der Entfernungsmessungen werden in /EIS 03b/ die theoretischen Auflösungen von wenigen cm bei einer Frequenz von 50 MHz genannt. Allerdings werden die in der Praxis erreichte Auflösung und Genauigkeit bezüglich der Entfernungsbestimmung quantitativ nicht erwähnt; für die Richtungsabhängigkeit wird eine Winkelauflösung von 20 gon (Vollkreis: 400 gon) genannt. Ebenfalls erwähnt werden Ungewissheiten bei der gemessenen Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals im Salz, dabei ergaben sich Werte um $124 \text{ m } \mu\text{s}^{-1}$ mit Abweichungen von weniger als 2 %. Wirkliche Ungewissheiten in den Entfernungsbestimmungen sind wohl aufgrund der verschiedenen Messkonfigurationen und Eigenschaften der Gesteine kaum anzugeben, es ist aber davon auszugehen, dass diese im Meterbereich liegen (z. B. /DAV 89/).

Die Erstellung dreidimensionaler struktureller Informationen erfolgte nach /EIS 03b/: *„Die Lage der Profile wurde zunächst markscheiderisch exakt eingemessen. Als Ergebnis der Messungen werden ausgewählte räumliche Reflektordarstellungen mit geologischen Modellentwürfen diskutiert. Durch geeignete Verknüpfung der Reflektoren mit weiteren räumlichen Strukturinformationen können in weiten Bereichen geologische Formationen modelliert werden, die in perspektivischen Ansichten vorgestellt werden. Eine umfassendere Visualisierung der räumlichen Lage der einzelnen Reflektoren bzw. modellierten Strukturen wird durch Animationen erreicht. Aus diesem Grund ist dem Bericht zudem eine CD mit Animationen der modellierten Szenen beigelegt. Zum leich-*

teren Auffinden der in den Szenen verarbeiteten Reflektoren werden die Anlagen der Ergebnisberichte zitiert. Sämtliche räumliche Strukturinformationen dieses Berichtes sind bereits direkt im Anschluss an die jeweiligen Messungen der geologischen Interpretation in numerischer und grafischer Form zugänglich gemacht worden. Die hier vorgenommenen geologischen Zuordnungen erfolgten in Zusammenarbeit mit der Geologie und entsprechen dem Wissensstand von August 2003.“

/BOR 08/ stellen fest, dass nach dieser Vorgehensweise der strukturelle Bau im Umfeld der Schächte bis etwa 85 m Entfernung durch EMR Messungen noch abgebildet werden kann. Es seien zwar Reflektoren bis in 250 m Entfernung von den Schächten gemessen worden, berücksichtige man jedoch die Winkelunsicherheit von etwa 10 gon, so betrage die horizontale Abweichung bei dieser Entfernung rund 40 m. Weiter gehende, verlässliche Strukturbestimmungen im weiteren Umfeld der Schächte wurden dann erst durch EMR Messungen in den aufgefahrenen Strecken bzw. den Erkundungsbohrungen möglich.

Zusammenfassende Bewertung

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die umfangreichen Georadarmessungen ein geeignetes Werkzeug sind, um wertvolle Hinweise über den Verlauf und die räumliche Lage von Schichtgrenzen sowie zum internen Aufbau des Salzstockes und damit für die Ausweisung des ewG zu liefern, wobei die Ungewissheiten im Fernfeld durch kontinuierliche Messungen mit dem Fortschreiten der Erkundung im Salinar (Auffahren von Strecken, Bohrungen) sukzessive abgebaut werden können. Im Fernfeld > ~ 50 m können größere Ungewissheiten auftreten, so dass EMR-Messungen für die großräumige Abbildung von Strukturen nur bedingt geeignet sind. Hier könnte eine hochauflösende Seismik geeignete Vorinformationen zum Strukturbau liefern, die dann im Nahfeld durch die EMR Messungen im kleinskaligen Bereich verfeinert werden.

Es ist anzumerken, dass wenn es auch im Einzelfall nicht möglich ist, eine Prognosegenauigkeit der EMR Messungen für einzelne Schichten darzulegen, es doch sinnvoll wäre, dieses zumindest an Fallbeispielen zu dokumentieren. Aus der fortschreitenden Erkundung gibt es eine Reihe von Beispielen, in denen ein durch EMR prognostizierter Horizont bei der Streckenauffahrung aufgeschlossen wurde. Ein Vergleich der Prognose mit Angaben von zu erwartenden Genauigkeiten und der schließlich erfassten Distanz zum Messpunkt wäre hier eine hilfreiche Dokumentation. Weiterhin sollte eine Abschätzung oder besser eine quantitative Angabe der zu erreichenden Prognose-

genauigkeiten für den einzuhaltenden Sicherheitsabstand erfolgen. Hier scheint eine Präzisierung der Genauigkeiten, auch bezüglich aller Raumlagen, unumgänglich.

4.2.4 **Weiterer Forschungsbedarf zur geophysikalischen Erkundung**

Neben dem in Kap. 3.4.3 aufgezeigten Forschungsbedarf für einen neuen, hoch aufgelösten seismischen 3D Datensatz zur verbesserten Erfassung der Salzflanken und der internen Struktur des Salzstocks ergibt sich auch für die EMR Messungen zusätzlich Forschungsbedarf zur weiteren wissenschaftlichen Absicherung für Untersuchungsphasen nach der VSG. Hier kann als ein Themenschwerpunkt der Abgleich seismischer Daten mit EMR Messungen genannt werden. Ein Vergleich der akustischen mit den elektrischen Impedanzen für die im Salinar auftretenden Gesteinstypen wäre hier von großem Interesse.

Von Interesse ist hier die verbesserte Erfassung von lösungsführenden Bereichen. Mit den eingesetzten EMR Verfahren lassen sich lösungsführende Bereiche im Salz aufgrund der diffusen Verteilung in der Regel bislang weniger scharf abgrenzen. Sie zeichnen sich vorrangig als Bereiche mit erhöhter Dämpfung ab /EIS 03b/. Hier könnte weitere Forschung zu einer kombinierten Auswertung von seismischen und EMR Daten führen, die möglicherweise wichtige Informationen zur Verteilung, Größe und Geometrie der Lösungsvorkommen erbringen würden. Denkbar sind hier methodische Fortschritte im Hinblick auf die Abbildungsgenauigkeit und Identifizierbarkeit von Lösungsvorkommen, die von ergänzenden Laboruntersuchungen (systematische Untersuchungen von Änderungen der akustischen und elektrischen Eigenschaften bei lösungsführenden Salzgesteinen) flankiert werden sollten.

Als weiteres Werkzeug der Strukturerkennung sollten auch neuere methodische Entwicklungen der Visualisierung mikroseismischer Ereignisse in Salzstöcken Berücksichtigung finden. Seismische Emissionen von Mikrorissen im Umfeld einer Kaverne im Salzstock Morsleben konnten genutzt werden, um strukturelle Heterogenitäten im Salzstock zu erfassen und lieferten Indikatoren zur Gebirgsspannung und zu der viskoelastischen Relaxation im Salz /KÖH 09/.

Es ist zu erwarten, dass über eine Verschneidung hoch aufgelöster Seismik mit EMR-Messungen und einer mikroseismischen Analyse eine deutlich verbesserte Erfassung der Internstruktur des Salzstockes möglich ist und die Ungewissheiten bezüglich Raumlagen und Distanzen der Strukturelemente dadurch erheblich verringert werden können.

4.3 2D, 2.5D und 3D Modell der Internstruktur des Salzstocks Gorleben

4.3.1 3D geometrische Modellierung des Untergrundes: Stand der Forschung und etablierte Methoden

Wie in Kap. 3 ausgeführt wurde, ist die Analyse und Darstellung von Untergrundgeometrien eine schnell wachsende Disziplin /ZAK 11/, /MAX 09/, die insbesondere in der Kohlenwasserstoffindustrie genutzt wird /RAW 06/, /PUT 06/. Aufgrund der häufig komplexen geologischen Verhältnisse in Salzgebieten beinhalten Gesamtbetrachtungen idealerweise Kartierungen, geologische Expertise, Daten aus Bohrlöchern, elektromagnetische Untersuchungen und Daten aus dem Auffahren von Strecken. Die damit verbundenen Ungenauigkeiten des geometrischen Modells können dabei häufig nicht quantifiziert werden, wenn kein dreidimensionaler Datensatz und eine integrierte Fehlerbetrachtung zur Verfügung steht /WEL 10/, /CHI 04/.

In allen geologischen Modellen, seien sie zwei-, drei- oder vierdimensional (inkl. dem Parameter „Zeit“), sind die verfügbaren Daten nicht kontinuierlich. Dieses Defizit ließe sich durch eine 3D Seismik quantifizieren. Stattdessen werden Volumina, in denen keine Daten vorhanden sind, durch entsprechende Algorithmen und Expertenwissen inter- oder extrapoliert. Aus diesen geometrischen Modellen wird die Analyse der geologischen Entwicklung und die Vorhersage der Verteilung von Gesteinseigenschaften erstellt /KEM 06/, /NIE 03/.

Bewährte Methoden in der 3D geometrischen Modellierung beginnen mit der Charakterisierung und Anpassung von Daten. Datensätze aus zeitlich versetzten Kampagnen und basierend auf unterschiedlichen Technologien dürfen nicht mit demselben Vertrauensgrad übernommen werden. Eine Datenbank für die dreidimensionalen Daten dient als zentrale Schnittstelle, um Daten mit Hilfe von harmonisierten und klar definierten Parametern von und für Modellrechnungen und Interpretationen abzurufen, neu zu klassifizieren und einzugrenzen /APE 06/. Ein Schlüsselement zur Sicherstellung der internen Konsistenz ist die topologische und zeitliche Ordnung struktureller Netzwerke /MOR 06/. Es findet sich selten eine einzige 3D Lösung, so dass unterschiedliche Realisierungen geologisch Sinn machen und konsistent mit den vorhandenen Daten sind. Qualitätsmerkmale zu den unterschiedlichen Interpretationen müssen berücksichtigt und als Attribut beigelegt werden.

Neben einer Datenbank für dreidimensionale Daten ist auch eine 3D Modellierungsplattform zur Integration unterschiedlicher Datentypen, Datenstrukturen und geometrischen Objekten hilfreich /MCG 00/. Die schnelle und iterative Nutzung der Daten, der Aufbau neuer räumlicher Objekte und die Visualisierung des Einflusses unterschiedlicher Parameter inklusive der Qualitätsmerkmale ist dabei von großer Bedeutung /KEM 07/.

Drei Ansätze sind aktuell bei der Software für geologische 3D Modellierung verfügbar, wobei im Folgenden exemplarisch einige weitverbreitet genutzte Software-Produkte genannt werden.

Ein erster Ansatz verfolgt eine CAD-ähnliche, vektorbasierte Methode mit detaillierten räumlichen Parametern. Dieser Ansatz produziert ein „geologisch aussehendes“ Modell, tendiert aber zum Subjektiven, da die Ergebnisse in der Regel nicht reproduzierbar sind. Die 3D Visualisierungen können die Kommunikation von Konzepten unterstützen, dienen aber nicht für rein quantitative Vorhersagen. Ein Beispiel für diesen Ansatz ist SPARSE, ein NURBS-basierter Prototyp für komplexe geologische Flächen /KEM 07/.

Ein zweiter Ansatz (GEOMODELLER, SKUA, LEAPFROG) nutzt implizite 3D Modellierungswerkzeuge, bei denen räumliche Randparameter mit einer gut definierten geologischen Geschichte kombiniert und die strukturellen und stratigraphischen Merkmale topologisch geordnet werden /DUL 09/. Durch diesen Ansatz werden komplexe, implizite Flächen von kategorischen oder kontinuierlichen Variablen gebildet, die im Wesentlichen dem Management der Randbedingungen und nicht so sehr der Modellgenerierung dienen. Die zugrunde liegenden Berechnungen nutzen einen integrierten Fehlerbereich basierend auf geostatistischen Modellen. Der Ansatz ist quantitativ belastbarer, führt aber bei unzureichenden Daten und komplexerer Geologie nicht zu brauchbaren Modellen.

Ein dritter Ansatz ist das „Common Earth“ Modell, bei dem unterschiedlichste, georeferenzierte Parameter (lithologische, stratigraphische, strukturelle, geophysikalische, geochemische, mechanische, qualitative usw.) abgeglichen werden /MCG 00/. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um einen 3D GIS Ansatz. Beispiele sind Simulationen von der Verteilung von Lithologien oder Karten von Ungewissheiten. Hierbei handelt es sich um den schwierigsten Ansatz, weil er die stärkste Integration von Daten unterschiedlicher Fachbereiche und Disziplinen erfordert. Diese Überbrückung der interdis-

ziplinären Barrieren ermöglicht aber Ergebnisse, die weit über die Möglichkeiten der einzelnen Disziplinen mit ihren Teildaten hinausgehen.

Zahlreiche weitere 3D Systeme sind verfügbar (Vulcan, Minesight, Datamine, Gemcom, AutoCad, Microstation, Surpac), verfügen aber über geringere Integration und Modellierungsmöglichkeiten und sind eher ingenieur- als geowissenschaftliche Modellierungswerkzeuge. Die Entwicklung der genannten Werkzeuge geht schnell voran. Entsprechend ist es wichtig, dass das Interpretations-Team frühzeitig in die Entwicklung einer Datenbank, die Definition der stratigraphischen und strukturellen Randbedingungen und die Visualisierung dieser Daten investiert /WYC 09/.

Der Aufbau quantitativer, konsistenter Modelle ist ein schnell wachsender Bereich mit großen Herausforderungen /ZLA 02/. Ohne solche Modelle werden die sehr großen Investitionen bei der Entwicklung eines Untergrundmodells nur in einem geringen Umfang quantifizierte Risiken enthalten.

Zunehmende Bedeutung für die Untersuchung der Innenstruktur von Salzkörpern hat in den letzten Jahren die Interpretation von 3D Seismik gewonnen /GEN 11/. Insbesondere in Pre-Stack Depth Migration (PSDM) prozessierten Daten sind Anhydrit-Karbonatkörper sehr gut zu interpretieren. Diese Methodik ermöglicht vor allem die Detektion und Interpretation der komplexen Innenstrukturen über große Gebiete (> 1000 km²).

4.3.2 2D, 2,5 und 3D Modelle der Internstruktur des Salzstocks Gorleben: Ein Überblick und Bewertung existierender Arbeiten

Eine gut etablierte Stratigraphie ist die Grundlage für ein Modell zur Internstruktur des Salzstocks Gorleben. Ein Überblick der im Salzstock vorhandenen Einheiten des Zechstein 2 und Zechstein 3 wird beispielsweise in Abb. 4 (S. 46) in /BOR 08/ gegeben. Die Einheiten sind klar und ausführlich beschrieben und beinhalten die Petrographie, geophysikalische Log-Signaturen, geochemische Analysen mit Röntgendiffraktion, Messungen von Spurenelementen wie Brom, makroskopische Deformationsstrukturen wie Falten, Stylolithen, Adern, tektonische Brekzien, Brüche usw. Die Analytik ist von sehr guter Qualität und bildet eine solide Basis zur Definition der komplexen, internen Geometrie des Salzstocks, zur Interpretation von Daten aus zukünftigen Strecken oder Bohrlöchern, zur Modellierung der Verteilung von Fluiden im Salz-

stock, und zur Festlegung unterschiedlicher Homogenbereiche für geomechanische Modellierungen des Salzstocks mit Endlager.

Basierend auf Bohrlochdaten, Daten aus Strecken und elektromagnetischen Untersuchungen präsentieren /BOR 08/ eine Serie von Profilen und Karten, in denen die Innenstruktur des Salzstocks in einem 2,5D Modell dargestellt wird. 3D Seismik Daten stehen für die Untersuchung der Innenstruktur des Salzstocks Gorleben bisher nicht zur Verfügung. In einigen Fällen werden auch Bilder von 3D Modellen gezeigt (/SCH 09/, S. 55), die jedoch nicht im Detail erklärt werden. Die 3D Innenstruktur des elongierten Salzstocks Gorleben erscheint somit weniger komplex als solche in kleineren, kreisförmigen Salzstöcken (/BOR 08/, S. 125). Dennoch zeigt die Innenstruktur komplexe, nicht-zylindrische Falten auf unterschiedlichen Maßstäben, die die Extrapolation der Geometrien erschweren.

In solchen komplex gefalteten Bereichen integriert die moderne strukturgeologische Methodik die Flächenanalysen, Überprägungsbeziehungen, Faltengenerationen, Orientierungsstatistik und Mikrotektonik. Damit werden dynamische Modelle des Untergrundes entwickelt, womit die Geometrie, Kinematik und Dynamik quantifiziert wird (inklusive Spannungen und Bewegungen). Eine solche Analyse des Salzstocks Gorleben liegt bisher nicht vor, so dass seine Struktur und deren zeitliche Entwicklung, und somit die Möglichkeit zur Vorhersage von Strukturen und Eigenschaften in Gebieten außerhalb der Strecken und Bohrlöcher, mit bisher nicht quantifizierten Ungewissheiten verbunden ist. Diese Schlussfolgerung ist vergleichbar mit unseren Aussagen über die Ausengeometrie des Salzstocks Gorleben (Kap. 3.4.3 und 3.5.2)

Die Daten zur lokalen Analyse werden gut und ausführlich präsentiert (siehe Liste von Berichten in /BOR 08/), allerdings sind die Methoden und Annahmen zur Konstruktion der Profile und Karten sowie der Lithologien und Geometrien außerhalb der Strecken weniger deutlich. Details zum Arbeitsablauf der benutzten Software, und die Trennung von Daten und Interpretation werden unzureichend erläutert. Dies trifft auf die Karten und Profile in Bornemann /BOR 08/ und insbesondere auf das 3D Modell zu, welches nicht im Detail dokumentiert ist, sondern als Basis beispielsweise für die geochemischen Daten genutzt wird. Es ist auf Basis der vorliegenden Unterlagen nicht klar, in welcher Form die umfangreichen Daten in einer konsistenten, qualitätsgeprüften Datenbank abgelegt wurden.

Als Schlussfolgerung aus dem oben Gesagten müssen die Ungewissheiten der Modell-Geometrie für weiterführende Sicherheitsanalysen quantifiziert werden. Unter anderem ist zu klären, mit welcher Genauigkeit und Zuverlässigkeit die Schichtgrenzen und Strukturen auf den Karten an solchen Orten dargestellt werden, bei denen direkte Beobachtungen durch Bohrlöcher oder Strecken sowie im geringeren Umfang durch elektromagnetische Untersuchungen nicht möglich waren. Da es sich bei Karten in der Regel um die Visualisierung einer Interpretation handelt, bleibt unklar, in welchem Ausmaß potentielle alternative Geometrien anhand der vorliegenden Daten konstruiert werden können und welchen Einfluss alternative Geometrien beispielsweise auf die Berechnungen des thermo-mechanischen Verhaltens oder die Transportprozesse in einem Endlager hat. Es ist vermutlich ein bedeutender Datensatz zur Quantifizierung der Genauigkeit vorhanden, mit dem die Vorhersagen für abgeteufte Bohrlöcher und vorgetriebene Strecken mit den tatsächlich angetroffenen Ergebnissen verglichen wurden. Diese Ergebnisse sollten in eine zukünftige Abschätzung der Ungewissheiten der Geometrie einfließen, womit wiederum die Ungewissheiten in geomechanischen Modellen der Langzeitsicherheit quantifiziert werden können.

In den dargestellten Profilen ist Zechsteinsalz sowohl in den 2D als auch in 3D Modellen über dem Rotliegenden durchgehend vorhanden. Nach aktuellem Verständnis von Salztektunik und Geomechanik wird dieses Zechsteinsalz in geologischer Zeit zu einer lang andauernden Aufwärtsbewegung des Salzstocks Gorleben führen. Dessen Aufstiegsrate ist stark von den angewendeten Stoffgesetzen (siehe Diskussion Stoffgesetze) und Geometrien abhängig. Eine solche Bewegung und die damit zusammenhängenden Differentialspannungen könnte mit den in Gorleben gemessenen in-situ Spannungen innerhalb der Fehlerbereiche übereinstimmen (Band 4, /BRÄ 11/). Andererseits sind die quartären Hebungsraten des Salzstocks Gorleben sehr klein, was eine geringe Mächtigkeit des Zechsteins über eine ausgedehnte Fläche vermuten lässt. Dies sollte für zukünftige Modellrechnungen geklärt werden.

Da die zum Teil versiegelten Brüche in den äußeren Bereichen des Salzstocks im Anhydrit als potentielle Fluidwegsamkeiten dienen können, ist ein Verständnis der Boudinage des Anhydrits und der resultierenden Boudin-Geometrie (inklusive der Randbedingungen zur 3D Konnektivität) ein wichtiger Bestandteil bei der Charakterisierung der Internstruktur. Die Analyse der 3D Geometrie von Boudins, deren Form und Größenstatistik (/RAM 55/, /PAS 02/, /GOS 03/, /GOS 04/, /ZUL 05/) könnte die Vorhersageeigenschaften des Modells stark verbessern. Karten des boudinierten Anhydrits /BOR 08/ könnten zudem den strukturellen Stil der Boudins widerspiegeln. Einige Bou-

dins werden mit diskreten Störungen, andere wie pinch- und swell Strukturen interpretiert. Beispielsweise könnten die Vorzugsrichtungen der Boudinblöcke und der Boudin-Hälse eine detaillierte Vorhersage zur Konnektivität der Boudins ermöglichen.

Die hier bewerteten bisherigen Arbeiten können als eine von Experten mit umfangreicher Kenntnis des Zechsteins und der Gorleben-Daten durchgeführtes, bestmögliches Modell, basierend auf dem Stand der Forschung im Jahre 2000, angesehen werden (Expert Judgement). Im Vergleich mit dem heutigen Stand der Forschung ergeben sich erweiterte Möglichkeiten hinsichtlich zusätzlicher Datenorganisation, Messungen, Analysen und Modellrechnungen und Quantifizierung der Ungewissheiten.

Insgesamt präsentiert das Modell eine sehr große Anzahl von qualitativ sehr hochwertigen Daten. Mit Hilfe zusätzlicher Daten und deren Analyse könnte die Struktur des Salzstocks Gorleben besser quantifiziert werden. Die Methoden, Annahmen sowie die Datenbank, die zum gegenwärtigen Modell führten, könnte ausführlicher dokumentiert werden. Beispielsweise könnte der vorliegende Datensatz der grundlegenden Parameter durch unterschiedliche Teams ähnlich qualifizierter Spezialisten unterschiedlich interpretiert werden. Dadurch könnten alternative Interpretationen konstruiert und die Ungewissheiten der abgeleiteten Modelle quantifiziert werden, um das Spektrum der möglichen Geometrien und Strukturen in abgeleiteten Modellen zu quantifizieren (z. B. Finite-Elemente-Modelle zur Integrität des Endlagers).

4.3.3 Forschungsbedarf - 3D Geometrie und geologische Entwicklung des Salzstocks Gorleben

Wie unter 3.4.3 aufgeführt, ist zur Bewertung der Eignung einer geologischen Struktur als Endlager für radioaktive Abfälle die (hochauflösende) Kenntnis der jeweiligen Untergrundsituation notwendig. Der oben dargestellte augenblickliche geologische Kenntnisstand zur Geometrie des Salzstocks stellt eine Prämisse dar, mit der sich die VSG zu diesem Zeitpunkt arrangieren muss. Zukünftig notwendige Arbeiten für den Abschluss weiterführender Sicherheitsanalysen (nach VSG) können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Es ist eine integrierte und validierbare Analyse der 3D Internstruktur des Salzstocks Gorleben unter Zuhilfenahme aller verfügbarer Informationen (3D Seismik, Lithologie, Petrographie integriert mit Strukturbau, Statistik von Gefügeelementen, Mikrotektonik, kinematische und dynamische Modellierung der Strukturentwicklung) notwendig. Es sollte hierbei das Ziel sein, auf Basis reduzierter und quantifizierter Ungewissheiten eine quantitative Betrachtung des Ist-Zustandes zu erreichen und damit die Vorhersage zum zukünftigen Verhalten des Endlagers zu verbessern. Diese Vorgehensweise führt zu einer Präzisierung und Quantifizierung der Ungewissheiten in den Modellvorhersagen.
2. Auf Basis von 1. ist zukünftig die Erstellung eines konsistenten „Common Earth Models“ notwendig. Ein derartiges Modell des Salzstocks Gorleben und des Nebengebirges basiert auf einer konsistent geführten Datenbank mit allen erhobenen Daten, der klaren Darstellung der verwendeten Methoden, Hinweisen zur Qualität der alten und neuen Daten und einer Quantifizierung der Ungewissheiten bzw. Fehlergrenzen der Geometrie. Mit diesem Ansatz können die Ungewissheiten der 3D Geometrie quantifiziert und validiert und die Qualität der 3D Geometrie durch einen Vergleich von Prognosen vor dem Abteufen von Bohrungen und vor dem Anfahren von Strecken mit den tatsächlichen Ergebnissen getestet werden.

Um die zukünftige Entwicklung des Salzstocks und des Endlagers vorherzusagen, werden unterschiedliche geomechanische Modelle benutzt (siehe auch Kap. 5). Der heutige Ist-Zustand in diesen Modellen wird neben den o. g. Geometrien durch geomechanische Parameter dargestellt. Diese sind in die existierenden Modelle jedoch stark vereinfacht eingebunden. Um den heutigen Ist-Zustand des Salzstocks besser darstellen zu können, ist es deshalb für zukünftige Sicherheitsanalysen notwendig, die geologische Entwicklung des Salzstocks geomechanisch zu modellieren. Das wird zu einem deutlich verbesserten Verständnis des Ist-Zustands und der zukünftigen Entwicklung des Salzstocks und des Endlagers führen.

4.4 **Fluide im Salzstock Gorleben**

4.4.1 **Stand der Forschung und etablierte Methoden**

Im Untergrund befinden sich üblicherweise Flüssigkeiten und Gase im Salzgestein, die in kleinen Mengen, heterogen verteilt und mit unterschiedlichen Drucken und unterschiedlicher Zusammensetzung beaufschlagt sind (z. B. /HER 81/). Die allgegenwärtigen Flüssigkeitseinschlüsse und Fluidfilme entlang von Korngrenzen und intergranular kommen in allen Evaporiten der Welt vor. Diese Fluide, die in mikroskopischen, isolierten Einschlüssen auftreten, sind nicht mit makroskopisch messbaren Porendrucken assoziiert und werden in diesem Bericht als mikroskopische Fluideinschlüsse bezeichnet. Fluide im Steinsalz können in größeren Akkumulationen in teilweise verheilten Brüchen, seltener in offenen Salzhohlräumen und größeren Laugennestern (fluid pockets) vorkommen, in Zonen anomal hoher, miteinander verbundener Porosität. Diese Fluide, die in verbundener Porosität vorkommen, sind mit makroskopisch messbaren Porendrucken und lokal erhöhter Durchlässigkeit assoziiert und werden in diesem Bericht als makroskopische Fluideinschlüsse bezeichnet.

Mikroskopische und makroskopische Fluideinschlüsse können durch verschiedene Deformations- und Verheilungsprozesse entlang von Korngrenzen in einander übergehen. Diese Prozesse sind bis heute unzureichend bekannt, so dass auch Vorhersagen unter Endlagerbedingungen nicht möglich sind.

„Stringer“ (große, 10 m bis km-große Einschlüsse von sprödem Anhydrit oder Karbonatgestein im Steinsalz) können eine Matrix- oder Kluftporosität enthalten, welche mit Fluiden unter hydrostatischem bis sub-lithostatischem Druck gefüllt sind /KUK 11/, /WEB 11/.

Es ist bekannt, dass im ungestörten Steinsalz Permeabilitäten mit Werten von üblicherweise weniger als 10^{-21} m² vorliegen. Diese geringe Permeabilität hängt mit der Struktur der Korngrenzen zusammen, bei denen mikroskopische Fluideinschlüsse entlang verheilter Korngrenzen eingeregelt sind. Solche mikroskopische Fluideinschlüsse können ihren Druck (in einzelnen Mikro-Einschlüssen) auch dann halten, wenn die Untertage gewonnenen Steinsalzproben bei Atmosphärendruck aufbewahrt werden. Eine höhere Permeabilität kann entstehen, wenn

1. das Steinsalz sich durch Mikrorisse auf den Korngrenzen weitet und ein verbundenes Mikroriss-Netzwerk bildet /POP 01/, /SPI 96/. Bei einem solchen Prozess ist der Schlüsselparameter eine Kombination aus Effektiv- und deviatorischer Spannung.
2. die Korngrenzen im Steinsalz durch die Rekristallisation und Drucklösungsprozesse mobilisiert werden und sich ein verbundenes Netzwerk vom Fluid-Filmen bildet, welches die physikalischen Eigenschaften wie die Kriechfestigkeit und die elektrische Leitfähigkeit stark ändert /WAT 02/, /URA 08/ – hier sind die wesentlichen Randparameter die deviatorische Spannung und die Temperatur.
3. die p-T Bedingungen ausreichen, um thermodynamisch stabile Dreikorngrenzen und eine assoziierte Fluidbenetzung in einem isotropen Spannungsfeld zu bilden /HOL 97/.

Evaporite sind als die vermutlich am besten abdichtenden Deckschichten in sedimentären Becken bekannt. Die obere Grenze ihrer Versiegelungskapazität wird bei Fluiddrücken erreicht, die der minimalen Hauptspannung im Steinsalz entspricht. Unter diesen Bedingungen (d. h. Verletzung des Minimalspannungskriteriums) wird das Salzgestein für das Fluid aufgrund von diffusiver Dilatanz oder der Bildung von fluidinduzierten Wegsamkeiten permeabel /LUX 09/, /FOK 95/. Der Prozess ist im Detail und insbesondere für Zweiphasen-Fluide komplex und hängt zudem vom Kapillardruck ab /SCH 07c/.

Die Fluidmigration und die Metamorphose von Steinsalz sind gut untersuchte Prozesse. Die Thermodynamik der Prozesse ist seit langer Zeit bekannt, und die komplexe Abfolge von Reaktionen wurde gut dokumentiert (z. B. /BOR 64/, /HER 81/, /HER 89/). Hinweise auf die zugrunde liegenden Prozesse finden sich in den Reaktionsprodukten, in salzgefüllten Adern /SCH 08/ und in Flüssigkeitseinschlüssen, die die geochemische Signatur des Metamorphoseprozesses enthalten. Es gibt auch Hinweise, dass diese metamorphen Fluide das Zechstein verlassen und die überlagernden Sedimentgesteine infiltrieren können /NOL 05/.

Makroskopische Fluideinschlüsse (fluid pockets) sind poröser als das Nebengestein und enthalten miteinander verbundene Fluide unter hohem Druck, die sowohl im Salzabbau und von Bohrungen, aber auch aus Gesteinen der tieferen Erdkruste und dem Erdmantel bekannt sind. Da makroskopische Fluideinschlüsse eine geringere Dichte als das Nebengestein haben und somit dem Auftrieb unterliegen, können sie

langsam, über geologische Zeiträume, nach oben migrieren. In manchen Studien werden sie auch „porosity waves“ genannt (z. B. /APP 02/). Basierend auf Beobachtungen der Kompaktion von viskos deformierbaren porösen Medien werden makroskopische Fluideinschlüsse als Bereiche mit erhöhtem Flüssigkeitsanteil betrachtet, die durch den Auftrieb durch das Gestein migrieren. Ähnliche Modelle wurden für den Transport von magmatischen Schmelzen entwickelt. Die Mobilität von großen Fluidkavernen wurde im Zusammenhang mit Abdichtungen von ausgesolten Kavernen bei der Außerbetriebnahme behandelt. Die Konvergenz der Kavernenwände führt zu lithostatischen Fluid drucken und der Infiltration in das hangende Salzgestein innerhalb weniger hundert Jahre infolge diffusiver Dilatanz oder durch Klüfte. Der zugrunde liegende Prozess ist komplex und ein lithostatischer Druck wird wegen der langsamen Infiltration in die sehr gering permeablen Salzgesteine nicht in jedem Fall erreicht /BÉR 05a/, /BÉR 10/. Die Rolle des Porendrucks, der Größe der Lauggenester und die Dynamik der Infiltration bei sehr niedrigen Raten wurden als wichtige, aber nur teilweise erforschte Parameter identifiziert /BÉR 05b/, /BÉR 10/, /LUX 09/, /FOK 95/.

4.4.2 **Fluide (Solen und Kohlenwasserstoffe) im Salzstock Gorleben: Ein Überblick / Bewertung existierender Arbeiten**

Im Salzstock Gorleben wurde eine hohe Anzahl qualitativ guter geochemischer und hydraulischer Daten zu Fluiden erhoben /NOW 02a/, /SCH 09/. Diese Daten wurden systematisch in dem Lösungskataster Gorleben (BfS 2002) erfasst und mit Methoden aus der Geochemie und dem Reservoir-Ingenieurwesen analysiert. Ebenso wurden Kerne aus Zonen gewonnen, in denen Fluidaustritte beobachtet wurden. Die gewonnenen Daten sind von hoher Qualität und die präsentierte Datenanalyse ist ausführlich und klar dargestellt.

Die ausführliche Interpretation der geochemischen Daten zeigt, dass die Fluide aus dem Zechstein hervorgehen und durch interne Migration und Metamorphose gebildet wurden. Ebenso deutlich wird dargestellt, dass der Fluidtyp und -inhalt stark von der stratigraphischen Position im Salzstock Gorleben abhängt: In einigen Bereichen wurden kaum Fluide vorgefunden (Zechstein 2), während in anderen Bereichen relativ große Vorkommen von Fluiden verzeichnet und analysiert werden konnten.

Basierend auf ausführlichen Tests wurden die in-situ Volumina und der Druck der makroskopischen Fluideinschlüsse geschätzt; die Ergebnisse der Berechnungen zeigen ein

großes Spektrum möglicher Volumina in Abhängigkeit zum Anteil von ursprünglich vorhandenem, freiem Gas. Die initial gemessenen Drucke der Lösungsreservoirs /NOW 02b/ liegen zwischen einem lithostatischen Druck von etwa 18 MPa und einem hydrostatischen Druck von etwa 11 MPa. Der Initialdruck (Druck vor Beginn des Fluidzutritts) ist ein wichtiger Parameter der mit den Langzeitabdichtungseigenschaften des Gebirges zusammenhängt: Durch die oben erwähnte, sehr geringe Durchlässigkeit des Steinsalzes in Kombination mit dem Kriechverhalten über geologische Zeiträume, kann man erwarten, dass die Initialdrucke lithostatisch sind. Studien aus der Kohlenwasserstoff Industrie belegen jedoch, dass die Situation komplizierter ist /KUK 11/. So zeigen /BÉR 05a/, /BÉR 10/, dass sich Laugennester mit unterlithostatischen Drucken in Salzkavernen aufgrund der langsamen Konvergenz und der gleichzeitigen Infiltration stationär verhalten können.

Die initial gemessenen Drucke sind mit dem entsprechenden Kürzel des Fluidvorkommens zusammengestellt (aus /NOW 02b/):

- 02YEF11 RB012 -14,2 MPa
- 02YER02 RB233 < 11 MPa
- 02YER02 RB031 -1,5 MPa (bereits produziert aus 02YEF11 RB012)
- 01YEF20 RB014 -8,1 MPa (abgebrochen)
- 02YEA04 RB023 -11,9 MPa

Die Autoren folgern: „Die Abgeschlossenheit konnte somit nachgewiesen werden, da ein Druck von mehr als 11 MPa festgestellt wurde“ /NOW 02b/. Nach unserer Meinung können jedoch in einem impermeablen Salzkörper lithostatische Drücke in den makroskopischen Fluideinschlüssen erwartet werden, wie sie beispielsweise in /KUK 11/ dargestellt werden. Die hier aufgelisteten Drücke befinden sich weit unterhalb des lithostatischen Druckes und könnten unter der Annahme einer Sole hoher Dichte sogar hydrostatische Drucke widerspiegeln. Nach diesen Erkenntnissen ist „Abgeschlossenheit“ nicht gegeben.

Zahlreiche Kerne wurden in den Bereichen gewonnen, die von Fluiden durchsetzt wurden. In Bohrung Go 1002 werden Knistercarnallite mit Kohlenwasserstoffgasen angetroffen ebenso wie Störungszonen im Hauptanhydrit. In diesen wird grobkristalliner Carnallit, in dem Anhydritbrocken eingebettet sind, beobachtet. Bohrung Go 1003 zeigt

wie das Kaliflöz Staßfurt isoklinal in das Hauptsalz hineingefaltet wurde, darüber und darunter wurden im Steinsalz max. 5 cm breite und offene Klüfte und Kleinststörungen mit Halitkristallen beschrieben. In der Schachtvorbohrung Go 5001 wurden ab etwa 870 m Teufe „derart hohe Gehalte an Kohlenwasserstoffgasen“ festgestellt, „dass es zum teilweisen Auswurf der Bohrspülung kam“ /NOW 02a/. Als Maßnahme musste durch die Zugabe von Schwerspat und NaCl die übliche Ton-Mischsalz-Wasserspülung auf $1,7 \text{ kg l}^{-1}$ Gewicht erhöht werden, was über dem Standard für diesen Teufenbereich liegt. In-situ Messungen von Fluiddrücken zeigen ein große Bandbreite (/NOW 02a; siehe auch unten). Weiterführende Untersuchungen könnten die internen Mikrostrukturen und die Porositäten dieser Bereiche quantifizieren und die Möglichkeiten zur Bestimmung des Gesamtvolumens fluid-infiltrierten Steinsalzes verbessern. Solche Untersuchungen erlauben, in Kombination mit dem Wissen über die Form, die Berechnung der Auftriebskräfte der makroskopischen Fluideinschlüsse und deren Potential zur Aufwärtsbewegung.

Wegen der Wichtigkeit der Fluidvorkommen ist für den Abschluss weiterführender Sicherheitsanalysen eine Erweiterung der Untersuchungen um eine geostatistische Analyse der Größen Drucke und Volumen zur Verbesserung der Vorhersagen hinsichtlich der zu erwartenden Fluidvorkommen in nicht erbohrten Bereichen notwendig.

Die Fluidmigration im Salzstock Gorleben wurde mit Hilfe petrographischer und geochemischer Studien zur Salzmetamorphose durch das Vorhandensein versiegelter Brüche, metamorpher Minerale etc. während der geologischen Geschichte dokumentiert. Es handelt sich um ein sehr nützliches, natürliches Labor, um die Zirkulation von Fluiden in sich deformierenden Steinsalz (eventuell als mobile Laugennester) zu verstehen.

Die mechanischen Eigenschaften von porösem Steinsalz, welches Fluide enthält, werden von /WEB 11/ diskutiert. Die Autoren argumentieren, dass die deviatorische Spannung sich nicht mit steigendem Porendruck ändert. Diese Annahme trifft unter bestimmten Randbedingungen zu, wesentlich wichtiger ist aber die Änderung der mittleren Effektivspannung durch den zunehmenden Fluiddruck und ihren Effekt, Dilatanz und weitere Änderungen der Durchlässigkeit zu induzieren. Aus diesem Grund können Gesteinsvolumina mit den darin enthaltenen makroskopischen Fluideinschlüssen nicht mit denselben Stoffgesetzen modelliert werden wie Volumina ohne verbundene mikroskopische Fluideinschlüsse. Zudem ist nicht geklärt, wie sich die makroskopischen Fluideinschlüsse unter den Spannungs- und Temperaturgradienten eines

Endlagers Verhalten werden. Falls die makroskopischen Fluideinschlüsse initial unter tatsächlichem lithostatischen Druck stehen, würden diese Bereiche den von /LUX 09/ vorgeschlagenen Stabilitätskriterien widersprechen. Falls sie geringere als lithostatische Drucke aufweisen, würde das auf lokal erhöhte Permeabilitäten hinweisen. An dieser Stelle sei auf den Bericht der „Arbeitsgruppe Kohlenwasserstoffe“ /BRA 12/ verwiesen.

4.4.3 **Forschungsbedarf zu Fluiden**

1. Die Erstellung eines dynamischen Modells der Mobilität und Migration der Fluide über lange Zeiträume im Salzstock Gorleben ist zukünftig für den Abschluss weiterführender Sicherheitsanalysen notwendig. Der Ist-Zustand der Fluide kann damit besser erklärt und Langzeitvorhersagen der möglichen Migration von Fluiden im Endlager besser quantifiziert werden. Dieses Modell muss auf einer mikrophysikalischen Grundlage aufgebaut werden, mit mikrostrukturellen, petrophysikalischen und geochemischen Daten von Salzgesteinen, die Fluide enthalten, als Basis. Die Einbindung der Arbeiten von /LUX 09/, /FOK 95/, /SCH 07c/, /SCH 09/ wird hierzu empfohlen.
2. Eine geostatistische Analyse von Lokationen, Größen, Drucken und Volumina von Fluidvorkommen ist für weiterführende Sicherheitsanalysen notwendig, um ein Modell mit quantitativen Vorhersagen für nicht erbohrte Volumina zu erstellen.

5 Geotechnische Untersuchungen am Standort

In der von der BGR erstellten Standortbeschreibung Gorleben Teil 4 /BRÄ 11/ sind in kompilierter Form die Daten und Ergebnisse zusammengefasst, welche im Rahmen der geotechnischen Erkundung im Salzstock und seiner Umgebung gewonnen wurden. Nach einer Übersicht zu dem Untersuchungsprogramm werden in diesem BGR-Bericht die Ergebnisse der geothermischen, geomechanischen und hydraulischen Untersuchungen vorgestellt. Die Ergebnisse münden in einem Übersichtskapitel zur thermischen und mechanischen Modellierung, in dem verschiedene Modelle vorgestellt und abschließend diskutiert werden. Der Bericht /BRÄ 11/ ist mit einer Vielzahl von Tabellen und Abbildungen versehen und bezieht sich auf Primärliteratur der BGR und andere wissenschaftliche Publikationen.

5.1 Geothermische Untersuchungen im Salinar und Nebengebirge

5.1.1 Temperaturmessungen in Bohrungen

Im Rahmen der Erkundung wurden in acht untertägigen Erkundungsbohrungen auf der 840 m Erkundungssohle sowie in den vier obertägig ausgeführten Tiefbohrungen Temperaturmessungen durchgeführt. Ziel war die Bestimmung des ungestörten Temperaturfeldes des Erkundungsbereichs 1 (EB1). Während die vertikalen Tiefbohrungen als Salzstockerkundungs- bzw. Schachtvorbohrungen bereits 1983 geothermisch vermessen wurden, sind die Temperaturmessungen in den untertägigen Erkundungsbohrungen 1997 durchgeführt worden. Die Tab. 5.1 und die Tab. 5.2 zeigen eine Übersicht zu den vermessenen Bohrungen. In Abb. 5.1 ist ein Lageplan der Bohrungen dargestellt sowie das interpretierte Temperaturfeld (Kap. 5.1.3). Hier ist anzumerken, dass die Messung in der Bohrung Go 1002 bei den Ergebnissen von /BGR 03a/ nicht berücksichtigt wird, die Begründung liegt wohl in der Lage der Bohrung, welche sich in etwas weiterer Entfernung nordwestlich des Ausschnitts in Abb. 5.1 befindet. Eine nähere Erklärung wird jedoch nicht gegeben.

Die Abb. 5.2 zeigt als Beispiel ein Temperaturlog, wie es in /BGR 03a/ dokumentiert ist. Die Interpretation des Temperaturfeldes unter Einbeziehung der Messungen in den Tiefbohrungen und den Bohrungen auf der Erkundungssohle ist in /BGR 03a/ beschrieben. Die Datenerhebung ist dort ebenfalls ausführlich dargestellt. Es wird insbe-

sondere auf die verschiedenen Faktoren, welche die Temperaturmessungen beeinflussen, eingegangen sowie mögliche Korrekturen dargestellt. Zu den Faktoren gehören Fluidvorkommen und -bewegung, Einflüsse der Bewetterung auf die untertägigen Erkundungsbohrungen und verschiedene Randbedingungen.

Tab. 5.1 Geothermisch vermessenen Bohrungen auf der Erkundungssohle (nach /BGR 03a/)

| Bohrung | Rechtswert | Hochwert | Tiefe [m NN] | Azimut [gon] | Anfangs-Neigung [gon] | geothermisch vermessene Länge [m] |
|---------------|------------|----------|--------------|--------------|-----------------------|-----------------------------------|
| 02YER02 RB032 | 4456256 | 5877483 | -815,05 | 372 | -3 | 474,50 |
| 02YEQ01 RB119 | 4456563 | 5877711 | -805,44 | 355 | -2 | 382,00 |
| 02YEQ01 RB120 | 4456565 | 5877712 | -805,45 | 372 | -2 | 466,00 |
| 01YEF20 RB217 | 4456656 | 5877462 | -794,78 | 285 | -65 | 180,00 |
| 02YEQ01 RB427 | 4456406 | 5877989 | -816,83 | 298 | -2 | 324,00 |
| 02YEQ01 RB194 | 4456522 | 5877684 | -808,54 | 178 | -50 | 150,00 |
| 02YEQ01 RB206 | 4456515 | 5877690 | -805,29 | 235 | 5 | 43,50 |
| 02YEQ01 RB208 | 4456483 | 5877813 | -815,26 | 302 | 5 | 51,70 |

Tab. 5.2 Geothermisch vermessene vertikale Tiefbohrungen im Umfeld des Erkundungsbereiches 1 (nach /BGR 03a/)

| Bohrung | Rechtswert | Hochwert | Geothermisch vermessene Teufe |
|---------|------------|----------|-------------------------------|
| Go 1002 | 4457432 | 5878708 | -1591 m |
| Go 1003 | 4455930 | 5878084 | -1986 m |
| Go 5001 | 4456340 | 5877335 | -934 m |
| Go 5002 | 4456720 | 5877445 | -874 m |

In Abb. 5.3 ist der Verlauf von Temperatur und Temperaturgradient der Bohrung Go 1003 dargestellt. Hier ist deutlich der Einfluss der Carnallit-Schichten mit ihren geringeren Wärmeleitfähigkeiten zu erkennen. Im Gegensatz zu den Salzstockerkundungsbohrungen Go 1002 und Go 1003 wurden bei den Schachtvorbohrungen Go 5001 und Go 5002 (Abb. 5.4) kein Carnallit durchteuft /ALB 91/.

Im Temperaturlog der Bohrung Go 5002 treten Störungen im Messsignal auf, die nach /ALB 91/ auf Kohlenwasserstoffzutritte zurückzuführen sind. So sind nach der Teilverfüllung dieses Bohrlochs Wiederholungsmessungen durchgeführt worden, die keine Anomalien mehr aufwiesen und das gleiche Temperaturverhalten wie in der Bohrung Go 5001 zeigten. Dies sei nach /ALB 91/ ein Hinweis auf den Einfluss von Gas- und Kondensatanteilen in der Spülung auf das zu Beginn gemessene Temperaturlog. Auch wurden bereits während der Bohrung und bei Packertests vor der Teilverfüllung Kohlenwasserstoffzutritte beobachtet /GRÜ 83/.

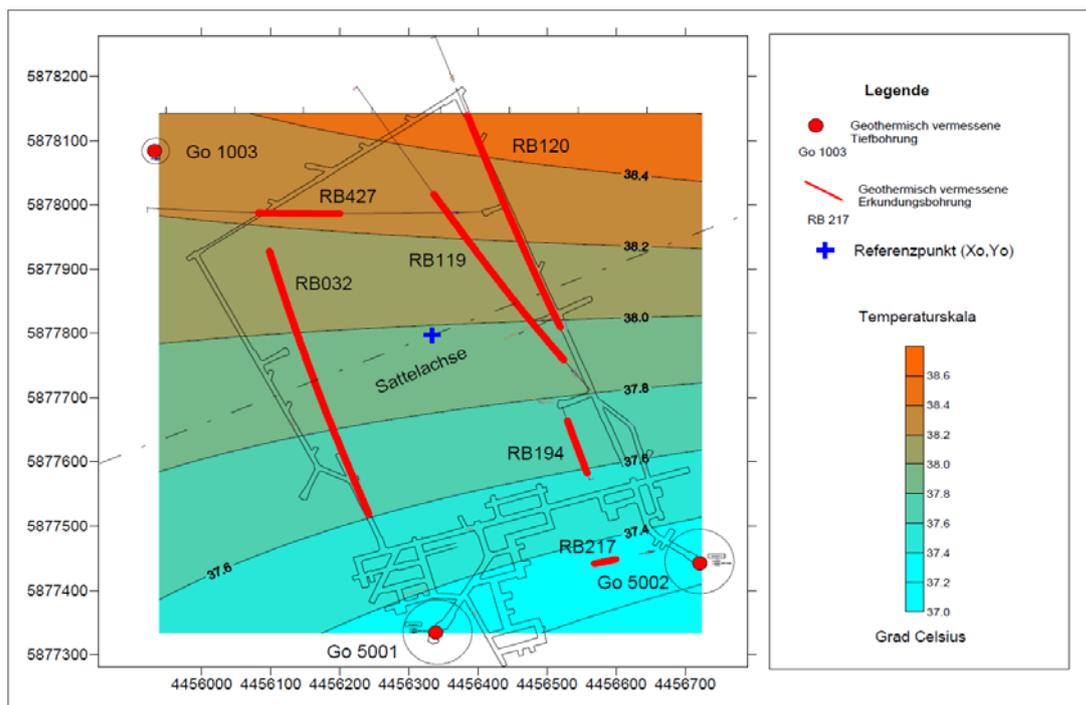


Abb. 5.1 Lageplan der Bohrungen, in welchen Temperaturmessungen durchgeführt wurden sowie das interpolierte, ungestörte Temperaturfeld der 840 m Sohle (aus /BGR 03a/)

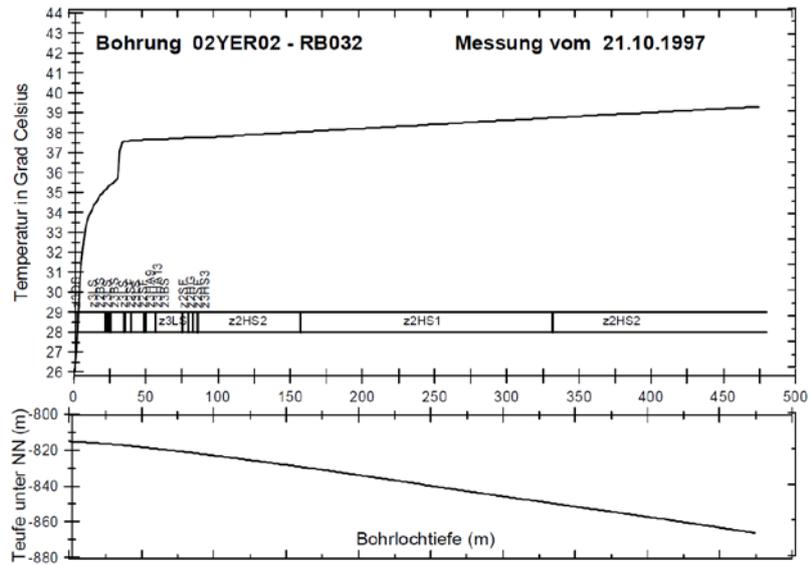


Abb. 5.2 Beispiel für eine Temperaturmessung in der Erkundungsbohrung RB032, wie sie in /BGR 03a/ dargestellt ist

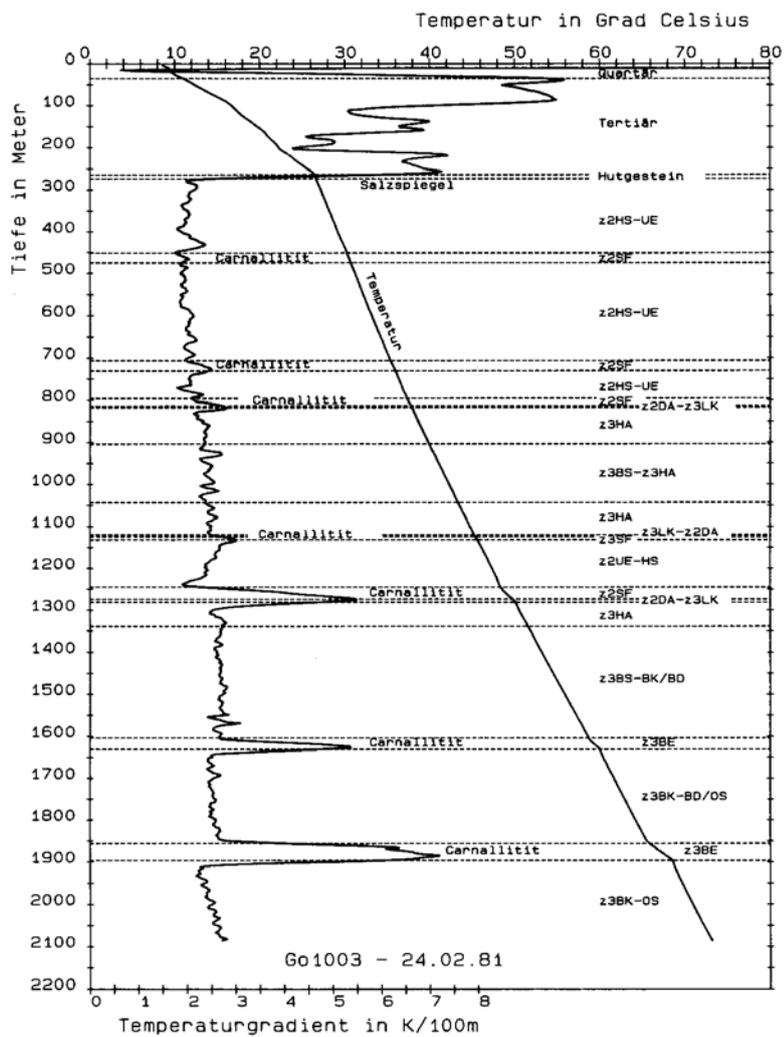


Abb. 5.3 Temperatur- und Gradientenlog der Go 1003 (aus /ALB 91/)

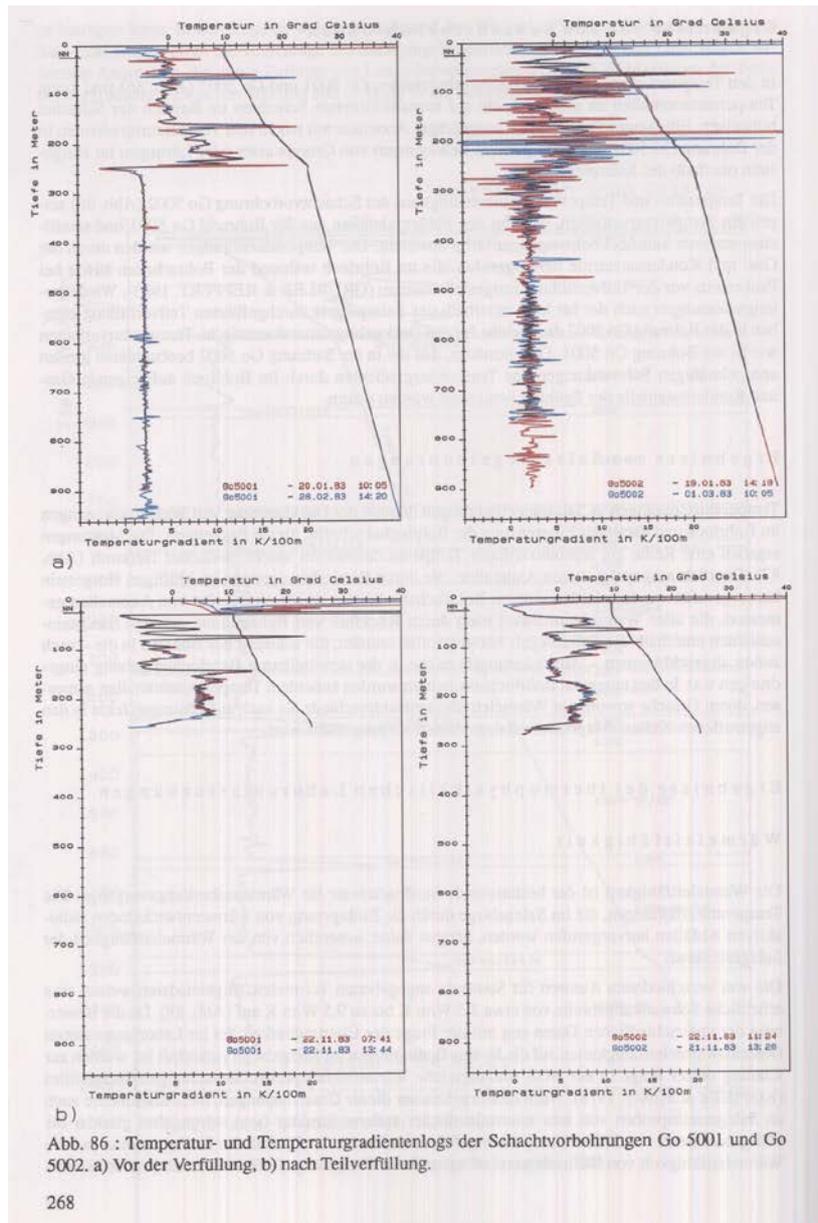


Abb. 5.4 Temperatur und Temperaturgradienten der Schachtvorbohrungen Go 5001 (links) und 5002 (rechts) vor der Verfüllung (oben) und nach der Verfüllung (unten)

5.1.2 Thermophysikalische Labormessungen

Bereits in der ersten Phase des Erkundungsprogramms wurden verschiedene thermophysikalische Messungen durchgeführt. Im Einzelnen waren diese (nach /ALB 91/):

- *Wärmeleitfähigkeit:* Messungen mit Plattenapparatur bzw. Divided Bar (Dynatech/Holometrix TCHM-LT). Probekörper: zylindrische Scheiben mit 50 mm Durchmesser und 20 mm Dicke /KOP 85/
- *Spezifische Wärmekapazität:* Messungen mit Wärmefluss-Kalorimeter, Methode Calvet (Setaram C80). Messzelle: 17 mm Durchmesser, Höhe 80 mm (15 cm³)
- *Thermischer Ausdehnungskoeffizient:* Messungen mit vollautomatischem Dilatometer mit induktivem Wegaufnehmer (Netsch 402 ES) Probekörper: Max. 25 mm Durchmesser und 50 mm Länge

Diese in der ersten Phase erhobenen Daten sind nicht beurteilbar, da die Primärdaten nicht vollständig verfügbar sind: Es gibt zwar Vergleiche zwischen den von der BGR gemessenen und anderen Wärmeleitfähigkeitsdaten (Tabelle 44, S. 271, /ALB 91/), allerdings ohne Angaben zur Anzahl der tatsächlich am Standort Gorleben erhobenen Messungen. Auch im Abschlussbericht zum Teilprojekt III, Geothermik /KOP 88/ sind keine Daten zu finden, es wird lediglich das Messprogramm beschrieben. Nur in /GRE 91/ gibt es eine Tabelle (Tabelle 1, S. 178), in der 33 Messwerte für Wärmeleitfähigkeiten bei verschiedenen Temperaturen an Proben der Bohrung Go 1003 aufgeführt sind. In diesem Bericht finden sich noch Auflistungen verschiedener Proben (Abb. 5.5). Hierzu finden sich aber lediglich Zuweisungen zu Datenträgernummer, aber keine weiteren Messwerte zur Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität und zum thermischen Ausdehnungskoeffizient.

Diskette : Wärmeleitfähigkeitsmessungen 2 (Rohdaten)

| Probe | Herkunft | Teufe | Messdatum | Filename |
|--------------|-------------------|-------|------------|----------|
| Ton-Go-592-1 | Gorleben Go-592-1 | 0.00 | 21.04.1981 | GO D 25 |
| Ton-Go-14-1 | Gorleben Go-14-1 | 0.00 | 22.04.1981 | GO D 26 |
| Ton-Go-14-1 | Gorleben Go-14-1 | 0.00 | 23.04.1981 | GO D 27 |
| Ton-Go-193-3 | Gorleben Go-193-3 | 0.00 | 24.04.1981 | GO D 28 |
| Ton-Go-263-2 | Gorleben Go-263-2 | 0.00 | 24.04.1981 | GO D 29 |
| Ton-Go-632-1 | Gorleben Go-632-1 | 0.00 | 27.04.1981 | GO D 30 |
| Ton-Go-632-3 | Gorleben Go-632-3 | 0.00 | 27.04.1981 | GO D 31 |
| Ton-Go-323-2 | Gorleben Go-323-2 | 0.00 | 29.04.1981 | GO D 32 |
| Ton-Go-323-1 | Gorleben Go-323-1 | 0.00 | 29.04.1981 | GO D 33 |
| Ton-Go-14-3 | Gorleben Go-14-3 | 0.00 | 29.04.1981 | GO D 34 |
| Ton-Go-323-3 | Gorleben Go-323-3 | 0.00 | 29.04.1981 | GO D 35 |
| Ton-Go-14-2 | Gorleben Go-14-2 | 0.00 | 29.04.1981 | GO D 36 |

Abb. 5.5 Beispiel für die Auflistung der Daten in /GRE 91/

Begleitend zu den geothermischen in-situ Messungen wurden in den Jahren 1996 – 2000 weitere Labormessungen durchgeführt, welche in /EIS 03a/ beschrieben sind. Es wurden nach /BRÄ 11/ über 150 Proben aus dem Salinar im Temperaturbereich bis 200 °C und bei unterschiedlichen Drucken bis 20 MPa hinsichtlich ihrer thermischen Eigenschaften in den Laboren von BGR, Geotec und GGD vermessen, wobei folgende Verfahren und Messgeräte zum Einsatz kamen:.

- *Reindichte, Rohdichte, Porosität (GGD)*: Ermittlung durch Wiegen, Volumenbestimmung und Pyknometer
- *Wärmeleitfähigkeit (BGR)*: Messungen mit Plattenapparatur bzw. Divided Bar (Dynatech TCHM-LT), bis 200 °C. Probekörper: zylindrische Scheiben mit 50 mm Durchmesser und 20 mm Dicke
- *Wärmeleitfähigkeit unter Druck- und Temperaturerhöhung (Geotec)*: Wärmeflussmeter, einaxialer Druck 5 MPa und Temperatur bis 200 °C, Probekörper: zylindrische Scheiben mit 30 mm Durchmesser und 5 – 15 mm Dicke
- *Spezifische Wärmekapazität (Geotec)*: Wärmestrom-Differenz-Kalorimeter (Netsch 404), T-Bereich bis 250 °C. Probekörper: 7 mm Durchmesser und 3 – 6 mm Dicke
- *Thermischer Ausdehnungskoeffizient (Geotec)*: Messungen mit vollautomatischem Dilatometer mit induktivem Wegaufnehmer (Netsch 402). Probekörper: 3 – 14 mm Durchmesser und 25 – 100 mm Länge. Temperaturbereich 20 – 290 °C

Diese Messungen der zweiten Erkundungsphase sind in dem Bericht /EIS 03a/ beschrieben und die Ergebnisse in tabellarischer bzw. graphischer Form dargestellt.

5.1.3 Abgeleitete Informationen (Temperaturfeld und Wärmestrom)

Erste Studien zum Temperaturfeld und Wärmestrom im Salzstock wurden bei den Vorerkundungen durchgeführt. Dazu gehörten die 2D Modellrechnungen von /DEL 80/ und die direkten Temperaturmessungen in mehreren Tiefbohrungen, welche den Bereich der späteren Erkundungssohle durchteuften /KOP 83/, /ALB 91/. Das charakteristische Temperaturfeld eines Salzstocks wird in /BRÄ 11/ ausführlich beschrieben: Die ersten Studien von /DEL 80/ ließen im geplanten Tiefenniveau der Erkundungssohle (840 m) etwa 38 °C erwarten (Abb. 5.6). Der im Vergleich zur Umgebung (50 – 60 mW m⁻²) /HÄN 80/ erhöhte Wärmestrom beträgt nach diesen ersten Studien 110 – 120 mW m⁻².

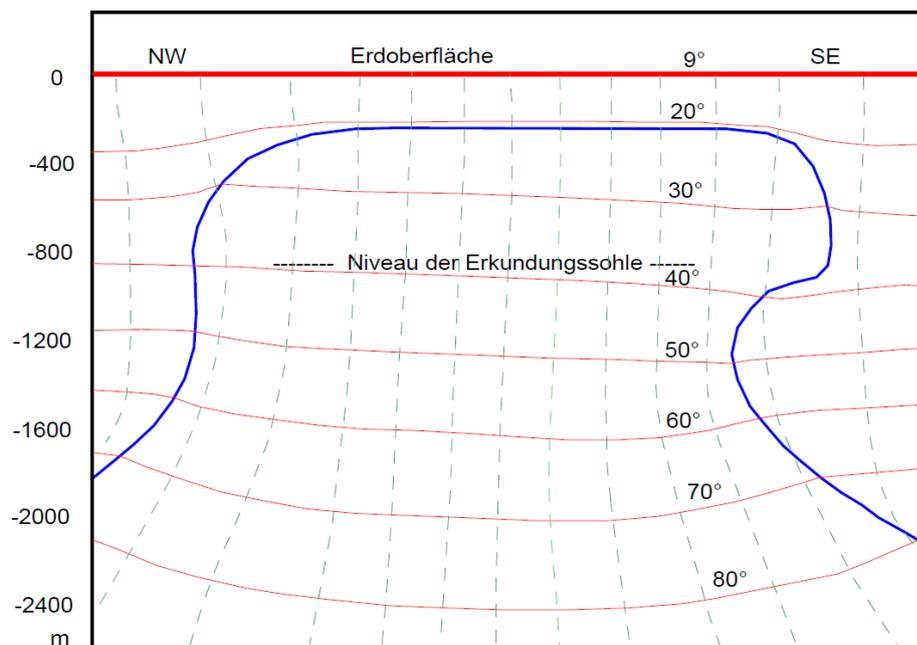


Abb. 5.6 Temperaturverteilung nach /DEL 80/ für einen Querschnitt durch den Salzstock (aus /BGR 03a/)

Die am Ende der 90er Jahre neu gewonnenen Daten wurden zusammen mit den früheren Messungen in den Tiefbohrungen von /BGR 03a/ interpretiert. Mit mathematischen Methoden (bilinearen Regressions-Analysen) wurde die Temperaturverteilung in einem vertikalen Schnitt quer zur Achse des Salzstocks bestimmt (Abb. 5.7). Dort befinden

sich die Bohrungen RB032, Go 1003 und Go 5001. Insgesamt sind ausführliche Studien zur Bestimmung des ungestörten Temperaturfeldes und des Wärmestroms durchgeführt worden, wobei die Vorgehensweise sehr gut dokumentiert und dargestellt ist.

Das horizontale Temperaturfeld aus Abb. 5.1 ist das Ergebnis aller auf die 840 m Sohle reduzierten Temperaturwerte der vermessenen Bohrungen. Es wird wie folgt interpretiert: Der Hauptgradient in Richtung NNW bis N entspricht den früheren Modellrechnungen /DEL 80/ und wird durch die Asymmetrie der Salzhänge erklärt. Eine Verzerrung der Isolinien am Nordrand des Gebietes kann durch (a) den Übergang z2/z3 in der gefalteten Nordflanke (niedrige Wärmeleitfähigkeit von grauem Salztou und Kalisalz) und (b) durch die Nähe zum Nebengestein erklärt werden. Es wird erwähnt, dass für diese Trendbeobachtung im Nordteil des Erkundungsbereichs weitere Messungen nötig wären. Die Abb. 5.8 zeigt den Vergleich der geologischen Strukturen mit dem Temperaturfeld auf der 840 m Sohle.

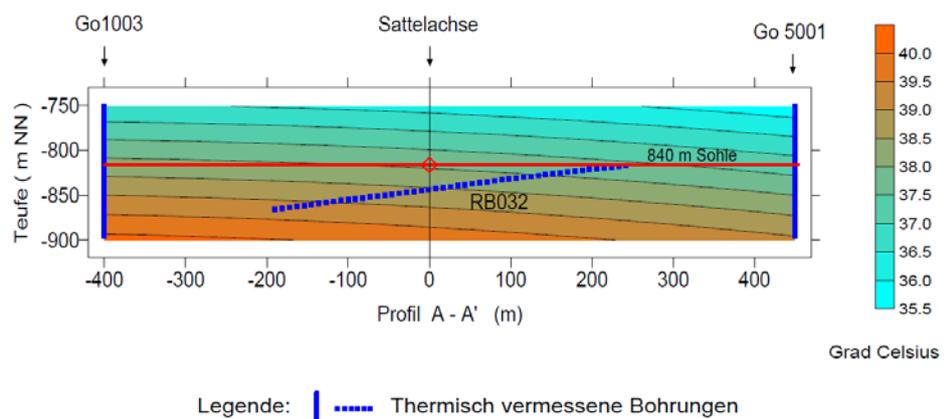


Abb. 5.7 Das ungestörte Temperaturfeld in einem Vertikalschnitt durch die Bohrungen Go 1003, RB032 und Go 5001 (aus /BGR 03a/)

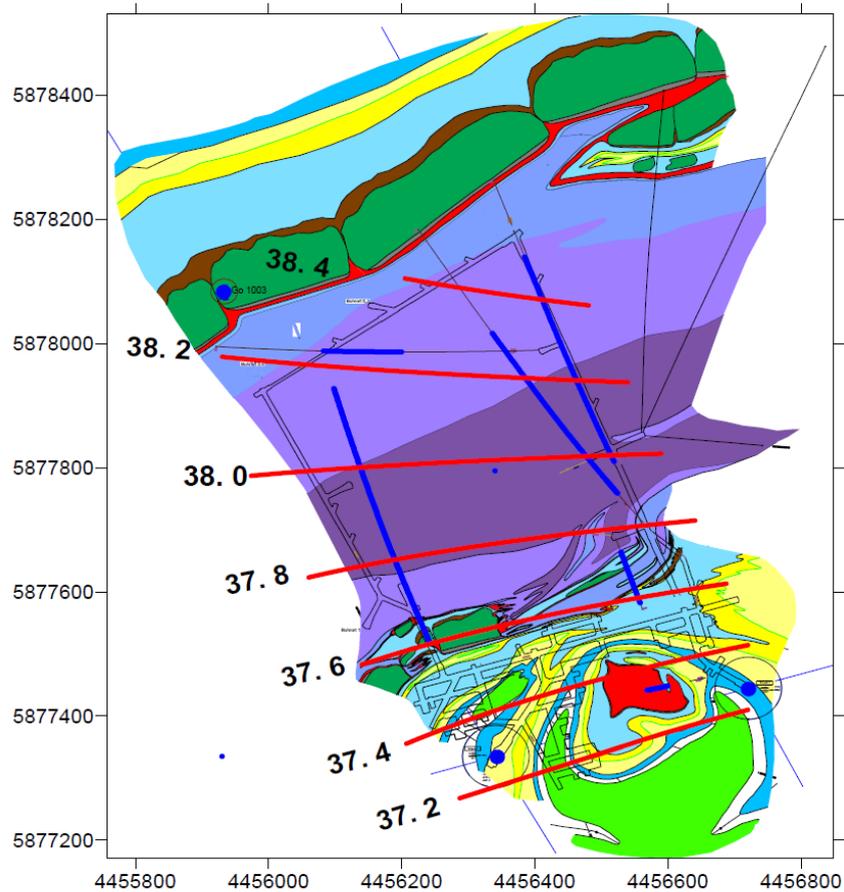


Abb. 5.8 Geologischer Horizontalschnitt in der 840 m Sohle nach /BOR 08/ mit Isothermen des natürlichen Temperaturfeldes (aus /BGR 03a/)

Nach den Auswertungen und Studien von /BGR 03a/ wurde in den Bohrungen Go 1003, Go 5001 und Go 5002 im Teufenabschnitt von 700 – 950 m eine mittlere Wärmestromdichte von 115 mW m^{-2} (Gradient $0,023 \text{ K m}^{-1}$ und $5 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ für die Wärmeleitfähigkeit des Gorleben Steinsalzes, gemessen im Labor) ermittelt. Dies entspricht dem in den ersten Modellrechnungen ermittelten Wert von $110 - 120 \text{ mW m}^{-2}$.

In den zur Verfügung stehenden Berichten fehlt ein Vergleich mit den Wärmestromdichten, welche im Deckgebirge von /KLI 07/ bestimmt wurden. Hier wurden verschiedene Grundwasserbohrungen geothermisch vermessen und zusammen mit Labormessungen Wärmestromdichten im oberflächennahen Bereich berechnet und flächenhaft interpoliert (siehe auch Kap. 2.2.2). Nach Abb. 2.6 stimmen diese Werte auch mit den in den Tiefbohrungen ermittelten Werten überein.

5.1.4 **Bewertung der geothermischen Daten zum Salinar und Nebengebirge und weiterer Forschungsbedarf**

Die Qualität der Temperaturmessungen in den Bohrungen Go 1003 und Go 5001 ist gut. Das Temperaturlog der Go 5002 zeigt insgesamt ein sehr starkes Rauschen und ist von schlechterer Qualität. Die Gründe hierfür sind aus den Berichten nicht eindeutig ersichtlich.

Bei den Bohrungen auf der Erkundungssohle ist die Datenlage sehr gut dokumentiert. Soweit dargestellt, sind die Temperaturdaten von guter Qualität. Die aufgezeigte Auswertung der Daten, ihre Qualitätsbeurteilung und die vorgenommenen Korrekturen sind in den Berichten nachvollziehbar und schlüssig dargestellt. Generell ist anzumerken, dass die Datendichte für die aufgezeigte Temperaturfeldprognose (Variation der Gradienten im Horizont) im Nordteil gering ist und somit mit Ungewissheiten behaftet ist.

Es ist zu erwarten, dass sich eine genauere Erfassung des Temperaturfeldes im Verlauf der weiteren Erkundung ergibt. Zur Überprüfung der auf dem aktuellen Datenstand basierenden Temperaturfeldprognosen könnte eine 3D Modellrechnung auf Basis des vorliegenden Strukturmodells und der vorliegenden thermischen Parameter durchgeführt werden. Mit einer solchen Modellrechnung könnten die gemessenen Temperaturdaten nachvollzogen werden und die möglichen Ursachen für die beobachteten Verzerrungen der Isolinien durch Sensitivitätsstudien (Einflüsse und Variation thermischer Parameter u. ä.) untersucht werden. 3D Simulationsrechnungen zum Verständnis des natürlichen Temperaturfeldes und seiner Variationen liefern wichtige Randbedingungen für sicherheitsrelevante Berechnungen des Wärmetransports im ewG. Dies spricht für eine Ausweitung der Modellstudien im Zuge weiterer Standortuntersuchungen (siehe auch Kap. 5.3.2).

Die Datenlage der Labormessungen aus der ersten Erkundungsphase ist anhand der vorliegenden Berichte nicht beurteilbar, da die Primärdaten nicht verfügbar sind. Es gibt Übersichten, in denen jedoch zum Teil nicht erwähnt ist, wie viele Proben eines Gesteinstyps vermessen wurden. Dies macht eine Einschätzung der Güte, der Variabilität und der statistischen Repräsentanz der Daten schwierig.

Die Datenlage der Messungen, die zwischen 1996 und 2000 durchgeführt wurden (vorwiegend Proben aus den Bohrungen auf der Erkundungssohle), ist hingegen gut dokumentiert. Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität und thermischer Ausdehnungskoeff-

fiziert sind als graphische Einzeldaten und in tabellarischen Übersichten ausführlich dargestellt. Die Einzeldaten sind zur Übersicht in Tab. 5.3 zusammengefasst. Es sind alle notwendigen Metadaten vorhanden, wie genaue Angaben zur Bohrung, Tiefe, Probennummer sowie eine petrographische Beschreibung der jeweiligen Probe. Eine solch vollständige Auflistung ist für alle in Gorleben erfassten und gemessenen Proben im Sinne einer zukünftigen Endlagersuche in Salzgesteinen erforderlich.

Anhand solcher gut dokumentierter Daten kann auch eine statistische Bewertung durchgeführt werden. Im vorliegenden Fall ist das für das Steinsalz möglich, für das eine ausreichende Anzahl von Messungen vorliegt. Als Beispiel zeigt die Abb. 5.9 ein Histogramm für die aus den Daten für Steinsalz entnommene temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit. Hier wird deutlich, dass die Daten über einen signifikanten Bereich streuen, wobei die Variation mit steigender Temperatur zunimmt. Diese Variationen sind für weitere Modellstudien zum Temperaturverhalten des Untersuchungsgebiets maßgeblich und müssen berücksichtigt werden.

Für die anderen Gesteinsarten ist die Anzahl der Messungen, die über die Berichte erfassbar sind, nicht ausreichend, um statistische Untersuchungen durchzuführen. So existieren für z. B. Carnallit und Anhydrit nur wenige Proben. Hier sind weitere Messungen im Rahmen der fortschreitenden Erkundung erforderlich. Für die Gesteine außerhalb des Salinars geht aus den vorliegenden Berichten nicht eindeutig hervor, ob auch hier temperaturabhängige Messungen der thermischen Eigenschaften durchgeführt wurden (siehe auch Kap. 5.3.1). Ebenfalls geht aus den Berichten nicht hervor, ob die natürliche radiogene Wärmeproduktion der Gesteine erfasst wurde. Dies kann bei den Kalisalzen vergleichsweise hohe Werte annehmen. Modellrechnungen zum Wärmetransport sollten diese natürliche Wärmequelle berücksichtigen.

Für den Abschluss weiterführender Sicherheitsanalysen wird es als notwendig erachtet, alle thermischen Daten, die am Standort erfasst wurden, zusammen zu führen und Lücken im Datenstand zu schließen. Dies erfordert zusätzliche Messungen an Gesteinstypen des Salinars und des Nebengesteins, die bislang nicht statistisch repräsentativ vermessen wurden.

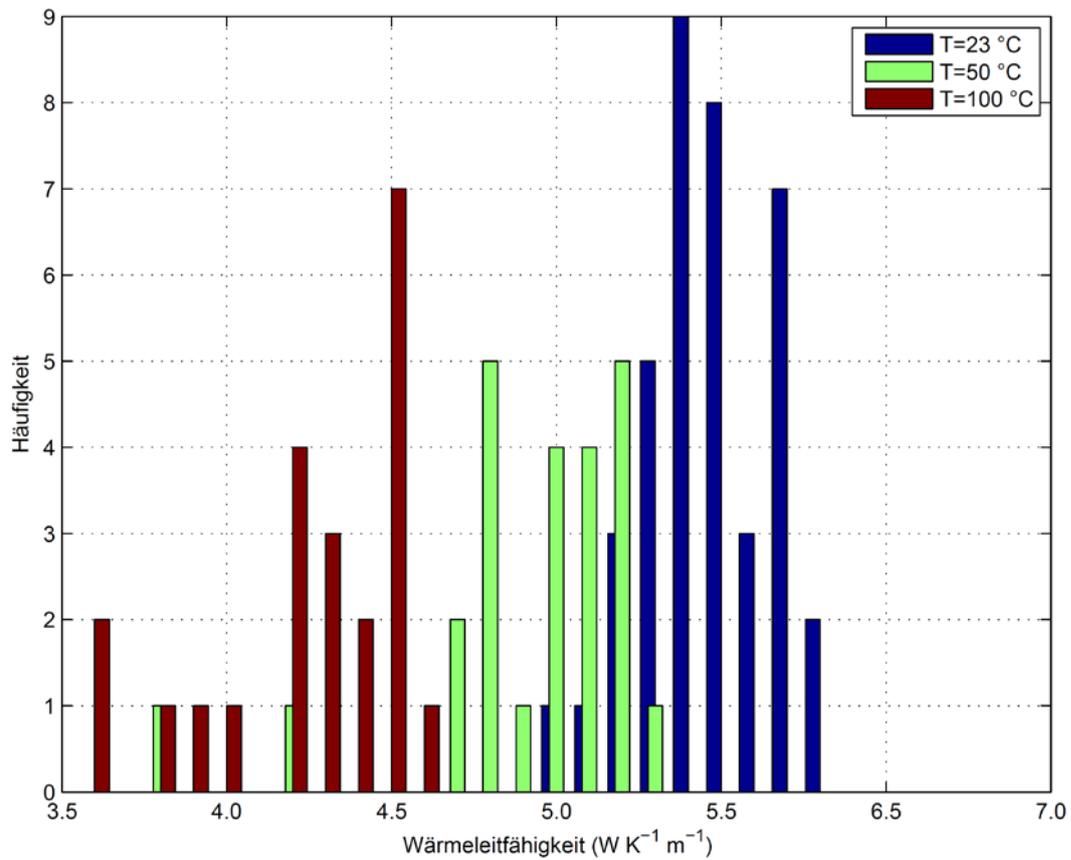


Abb. 5.9 Aus den Daten von /BGR 03a/ kompiliertes Histogramm für die Wärmeleitfähigkeit des Salzgesteins bei verschiedenen Temperaturen

Tab. 5.3 Anzahl der Messungen thermischer Gesteinsparameter

Die Anlagen beziehen sich auf das Dokument /EIS 03a/.

| | Proben Gorleben | | | | | | | Proben Morsleben |
|----------------------------|--------------------------------|----------------------------------|-----------|---|--|-------------------------|---|---|
| | Dichte & Porosität (Labor GGD) | Thermische Parameter (Labor BGR) | | | Thermische Parameter (Labor GeoTec) | | | Thermische Parameter (BGR) |
| | | Wärmeleitfähigkeit (WLF) | Porosität | WLF in Abhängigkeit von der Temperatur & in Abhängigkeit von der Messzeit | WLF in Abhängigkeit vom Druck & in Abhängigkeit von der Temperatur | Lineare Wärmeausdehnung | spez. Wärmekapazität in Abhängigkeit von der Temperatur | WLF in Abhängigkeit von der Temperatur & in Abhängigkeit von der Messzeit |
| Halit | 26 | 40 | 39 | 23 | 11 | 27 | 26 | 17 |
| Carnallit | 1 | 2 | 2 | 1 | | 3 | 2 | 8 |
| Trümmercarnallit | 2 | 1 | 1 | | 1 | | 1 | |
| Steinsalz/Anhydrit | | | | | | | | |
| Anhydrit | 1 | | | 4 | | 1 | 1 | 6 |
| Gorlebenbank | 1 | | | | | 1 | 1 | |
| Hartsalz | | | | | | | | 10 |
| Karbonat | | | | | | | | 6 |
| Salzton | | | | | | | | 1 |
| Ganggestein | | | | | | | | |
| Tonschiefer/Phyllit | | | | | | | | |
| Basalt | | | | | | | | |
| Sandstein | | | | | | | | |
| keine Angabe | | | 1 | | | | | |
| Proben gesamt | 31 | 43 | 43 | 28 | 12 | 32 | 31 | 48 |
| Quelle /EIS 03a/ | Anlage 1 | Anlage 2 | | Anlage 4.1 | Anlage 4.2 | | Anlage 5 | |

5.2 **Hydraulische Daten zum Salinar**

Die hydraulische Datenerhebung für den Salzstock Gorleben wurde mit unterschiedlichen Methoden durchgeführt. Diese werden sehr ausführlich im Abschlussbericht zum Arbeitspaket „Hydraulische Charakterisierung der Salzbarriere Gorleben“ /NOW 02b/ beschrieben. Als wichtigstes Instrument zur Bestimmung der Permeabilität wurden hydraulische Bohrlochtests vorgenommen, sowohl in einigen Erkundungsbohrungen als auch in Kurzbohrungen. Erstere ergaben Hinweise auf die Permeabilität des anstehenden Gebirges im Erkundungsbereich 1 und im Infrastrukturbereich, während letztere zur Charakterisierung der potentiellen Auflockerungszone dienten.

Wegen des im Oktober 2000 beginnenden Moratoriums konnten keine weiteren Messungen durchgeführt werden. Somit ist die Bestimmung der Permeabilität auf die bislang erkundeten Bereiche des Salzstocks beschränkt.

5.2.1 **Datenstand und Bewertung**

Im Erkundungsbereich konnten aus Tests mit Lösung bzw. Gas für das Streifensalz eine Obergrenze von 10^{-20} bzw. 10^{-21} m^2 für die Permeabilität bestimmt werden. Im Infrastrukturbereich wurden für die Staßfurt- und Leinefolgen Werte von 10^{-20} m^2 ermittelt. In einer Bohrung ergaben sich in stark deformierten Schichten der Leinefolge Werte bis zu 10^{-18} m^2 . An einer Lokation wurden in Kurzbohrungen (wenige Meter) Tests zur Untersuchung der möglichen Auflockerungszone durchgeführt. Hier zeigten sich ab 0,3 m Stoßentfernung keine Auflockerungen mehr und die Werte lagen mit 10^{-20} m^2 – $5 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ in der Größenordnung der ungestörten Bereiche.

Alle Messungen und Vorgehensweisen sind in /NOW 02b/ detailliert aufgeführt. Die gewonnenen Daten sind übersichtlich in Tabellen dargestellt. Auch sind verwendete Methoden mit ihren Einschränkungen und Korrekturen ausführlich erläutert. Weitere Bewertungen zu den hydraulischen Daten und Untersuchungen wie z. B. die Bestimmung von Reservoirvolumina werden auch in Kap. 4.4 dieses Berichtes dargestellt.

5.2.2 Weiterer Forschungsbedarf

Die Autoren unterstützen die Forderung der BGR /BRÄ 11/, /NOW 02b/ nach der weitere Studien zur vollständigen Charakterisierung der hydraulischen Eigenschaften des Salzstocks notwendig sind. Diese konnten wegen des Moratoriums nicht zu Ende geführt werden. Zum Forschungsbedarf die Fluide betreffend sei auf Kap. 4.4.2 verwiesen.

5.3 Thermische Modellrechnungen – Eingangsparameter und Konzepte

In den BGR Berichten /BGR 03b/, /NIP 00/ werden Ergebnisse von zweidimensionalen bzw. rotationssymmetrischen Finite Elemente Modellrechnungen zur thermomechanischen Beanspruchung der Salzbarriere und von Bergwerkskomponenten sowie zur Interpretation von in-situ Messungen vorgestellt.

5.3.1 Referenzierbarkeit und Bewertung der geothermischen Daten in den Modellen

Zur Initialisierung der Modellrechnungen wurde das stationäre Temperaturfeld simuliert. Trotz generell ausführlicher Beschreibung der Eingangs- bzw. Modellparameter sind einige Punkte in den vorliegenden Berichten nicht eindeutig dargestellt. Dazu gehört zunächst die Darstellung der thermischen Randbedingungen, welche aus nicht näher erläuterten Gründen „konvektiv“ genannt wird. Hier ist nicht ganz klar, woher der Wärmeübergangskoeffizient $\alpha = 8,7 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ stammt. Es wird zwar die mittlere Jahrestemperatur von $8,5 \text{ °C}$ angegeben, aber nicht erwähnt, welcher Wert für die mittlere Bodentemperatur in Gl. (2) in /NIP 00/ berechnet wurde. Die Kopplung zwischen mittlerer Boden- und Lufttemperatur ist nicht trivial und wird seit längerem untersucht (z. B. /SME 03/). Hier könnte man auf die zahlreichen Messungen in den flachen Bohrungen zurückgreifen und so eine feste Temperaturrandbedingung (Dirichlet) setzen.

Die am unteren Modellrand zu setzende Randbedingung wird nicht diskutiert, es wird lediglich auf großräumige Berechnungen von der BGR aus dem Jahre 1987 eingegangen. In welchem Maße Variationen bzw. Ungewissheiten einen Einfluss auf die Simulationsergebnisse haben, wird nicht erläutert. Zu dieser wichtigen Randbedingung gibt es Studien, eine neuere ist z. B. /NOR 08/. Im Allgemeinen wird am unteren Rand ein konstanter Wärmestrom (Neumann-Randbedingung) bzw. bei genauerer Kenntnis des

Temperaturfeldes über eine entsprechende Datendichte eine variierende Temperatur-
randbedingung gesetzt (Dirichlet-Randbedingung).

Für die thermomechanische Modellierung wurden neun verschiedene Einheiten im
Deck-, Neben- und Grundgebirge betrachtet (Tab. 5.4). Das Salinar selber wurde in
acht Einheiten unterteilt (Tab. 5.5). Für die Herkunft der Daten werden in /NIP 00/ bzw.
/BGR 03b/ Berichte als Referenz genannt (/NIP 88c/, /NIP 88d/, /EIC 98/), jedoch keine
weiteren Angaben (Anzahl der Messungen, Variationen etc.) gemacht. Auch ist zu hin-
terfragen, woher Daten für die nicht durchteuften Bereiche hergeleitet wurden, da ledig-
lich die Bohrung Go 1005 den mittleren Buntsandstein erreicht. Es wird nicht erläutert,
ob die Wärmeleitfähigkeit bereits ein über die Porosität gemittelter Wert oder der Mat-
rixwert ist.

Tab. 5.4 Thermische Kennwerte für das Deck-, Rand- und Grundgebirge nach
/NIP 00/

| Homogenbereich | Wärmeleitfähigkeit [W m ⁻¹ K ⁻¹] | Volumetrische Wärme- kapazität [MJ m ⁻³ K ⁻¹] |
|-------------------|--|---|
| Quartär | 2,3 | 1,9008 |
| Tertiär | 2,1 | 1,9008 |
| Hutgestein | 2,2 | 1,9008 |
| Oberkreide | 2,0 | 1,9008 |
| Unterkreide | 2,4 | 1,9008 |
| Jura-Keuper | 2,5 | 1,9008 |
| Buntsandstein | 2,6 | 1,9008 |
| Rotliegendes | 2,7 | 1,9008 |
| Kaliflöz Staßfurt | 1,5 | 1,9872 |

Tab. 5.5 Gemessene Wärmeleitfähigkeiten mit Streubereich für Steinsalze der Tiefbohrung Go 1003 bei T=35 °C nach /NIP 00/

| Homogenbereich | Wärmeleitfähigkeit [W m ⁻¹ K ⁻¹] |
|------------------------|---|
| Leine-Steinsalz | 5,06 |
| Kaliflöz Bergmannshall | 1,3 |
| Bank-, Bändersalz | 4,72 |
| Basissalz | 5,15 |
| Hauptanhydrit | 5,12 |
| Kaliflöz Staßfurt | 2,14 |
| Kies. Übergangssalz | 5,12 |
| Staßfurt-Steinsalz | 5,22 |
| Hauptsalz | 5,46 |

Weiterhin sind die Angaben zur Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeiten nicht eindeutig. Es wird erwähnt, dass aufgrund der zu erwartenden geringen Temperaturerhöhung in den vom Erkundungsbereich weiter entfernt liegenden Gebirgsbereichen nur konstante Wärmeleitfähigkeiten verwendet wurden, während diejenigen der Salzgesteine als temperaturabhängig in die Modelle eingehen. Es wird nicht erläutert, in welchen Bereichen des Neben- und Grundgebirges in den Modellen eine Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit und volumetrischen Wärmekapazität angesetzt wurde. In /BGR 03b/ wird von „...teils temperaturabhängig, teils temperaturunabhängig...“ (S. 21) gesprochen. Wenn eine Temperaturabhängigkeit angenommen wurde, besteht die Frage, auf welchen Daten diese basiert. Die Modelltiefe beträgt mehr als 3 km, so dass natürliche in-situ Temperaturen von etwa 100 °C auftreten. Die maximale Temperatur in der Bohrung Go 1003 ist etwa 70 °C in 2100 m Tiefe. Auch in diesem primär vorliegendem Temperaturbereich treten signifikante Veränderungen der thermischen Eigenschaften auf, die in numerischen Berechnungen berücksichtigt werden sollten.

Eine mögliche Druckabhängigkeit (z. B. /CLA 06/) der Wärmeleitfähigkeit wird nicht diskutiert. Es sei auch bemerkt, dass in der Tabelle 2 von /NIP 00/ auf S. 11 die spezifische Wärmekapazität genannt wird, laut Einheit und Zahlenwerten ist es jedoch die volumetrische Wärmekapazität (Produkt aus Matrixdichte und spezifischer Wärmekapazität).

Weiterhin wird erwähnt, dass die Wärmekapazität der Salzgesteine als temperaturunabhängig angenommen wurde. Für das Neben- und Grundgebirge werden keine Angaben gemacht. Hier fehlt die Begründung, denn die Wärmekapazität kann in dem vorhandenen Temperaturbereich auch signifikant variieren (z. B. /CLA 06/). Generell stellt sich die Frage, ob die im Zeitraum von 1996 – 2000 erhobenen Daten /EIS 03/ bei der Ermittlung der Modelleingangsparameter berücksichtigt wurden.

Bei der Temperaturabhängigkeit der thermischen Parameter ist insbesondere zu beachten, dass der für die instationäre Wärmetransportgleichung maßgebliche Parameter Temperaturleitfähigkeit κ , der Quotient aus Wärmeleitfähigkeit λ und volumetrischer Wärmekapazität $\rho \cdot c_p$, stärker mit der Temperatur variiert, als die jeweiligen Parameter alleine (z. B. /MOT 08/):

$$\kappa = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (5.1)$$

Der Grund liegt in dem konträren Verhalten bei der Temperaturabhängigkeit: Während die Wärmeleitfähigkeit mit der Temperatur sinkt (siehe auch die verwendete Formel (3) in /NIP 00/), steigt die Wärmekapazität mit der Temperatur im Allgemeinen. Diskussionen hierzu fehlen in den Berichten.

Als wichtiger Parameter wird die radiogene Wärmeproduktion nicht erwähnt bzw. berücksichtigt. Diese kann im Neben- bzw. Deckgestein und in den Kaliflözen signifikante Werte annehmen (siehe auch Kap. 5.1.4). Hierzu finden sich in keinem der Berichte irgendwelche Hinweise oder Zahlen.

Insgesamt sind die Modellierungen ausführlich und eingehend beschrieben, die Herkunft der Daten bzw. Modellparameter ist in den Berichten jedoch z. T. nicht eindeutig erläutert. Generell ist auch hier der Aufbau eines einheitlichen Datenarchivs erforderlich (Kap. 5.1.4).

5.3.2 **Weiterer Forschungsbedarf – thermische Modellierungen**

Die Bestimmung der thermophysikalischen Eigenschaften und deren Druck- und Temperaturabhängigkeiten sowie ihre repräsentative Zuordnung zu den Modelleinheiten sind wichtig für Modellierungen, bei welchen der Salzstock sowie das Umgebungsgestein detaillierter und dreidimensional erfasst werden sollen. Hierbei ergibt sich für den Abschluss weiterführender Sicherheitsanalysen die Notwendigkeit, geostatistische Methoden anzuwenden und die Ungewissheiten zu definieren. Wie in Abschnitt 5.1.4 erläutert, können mit umfassenderen, dreidimensionalen Temperaturfeldmodellierungen diese Ziele erreicht werden. Notwendig hierfür ist eine fundierte Datenbasis, welche alle Messdaten aus den verschiedenen Erkundungsphasen vereint.

5.4 **Geomechanische in-situ Messungen in Gorleben**

5.4.1 **Überblick und Diskussion der bisherigen Arbeiten**

Die geomechanischen in-situ Untersuchungen zum Standort Gorleben beinhalten eine ausführliche und sorgfältig durchgeführte Serie von Messungen. Dazu gehören Analysen der in-situ Spannungen und des Verschiebungsfeldes sowie die Beprobung der zur Verfügung stehenden Lithologien (z. B. /BGR 03b/, /NIP 00/). Diese Untersuchungen wurden durchgeführt, um die initialen Bedingungen und Eigenschaften des Steinsalzes (in-situ Spannungen, Temperatur, Gesteinseigenschaften) zu bestimmen und deren zeitliche Entwicklung zu analysieren. Mit diesem Ansatz können geomechanische Modelle und deren Eingabeparameter validiert werden, um Voraussagen für zukünftige Entwicklungen des Salzstockes zu treffen.

Spannungsmessungen wurden anhand von Überbohr- und Hydrofracverfahren durchgeführt und mit Druckmesszellen über einen Zeitraum verfolgt. Das Überbohrverfahren der BGR wurde speziell für die Anwendung in Steinsalz entwickelt und validiert. Mit Hilfe von numerischen Modellierungen wurde die Deformation des Steinsalzes im Bereich der Bohrungen bestimmt, um die Effekte von Spannungsrelaxationen zu kompensieren. Hierzu wurden die lokalen Materialeigenschaften, die für Skaleneffekte korrigiert wurden, im Labor gemessen.

Konvergenzmessungen wurden anhand des Versatzes von im Steinsalz fixierten Punkten mit Extensioimetern in Bohrlöchern, in die Bohrlochwand zementierten Inklinome-

tern und den in den selten vorkommenden offenen Brüchen zementierten Fissurometern durchgeführt. Diese Messungen wurden an zahlreichen Stellen in den zugänglichen Bereichen des Salzstocks in Schächten und Strecken vorgenommen. Die Anordnung der Messungen wurde gut und in ausreichender Anzahl dokumentiert, die Methoden entsprechen dem Stand der Forschung.

Die Ergebnisse dieser Messungen, die über mehr als eine Dekade erfolgten, zeigen einen starken Einfluss der Temperatur auf die untertägigen Hohlräume und die damit zusammenhängende thermische Expansion des Steinsalzes. Die thermische Expansion ist deutlich weniger ausgeprägt, wenn die Messungen mehr als 10 m von der Strecken- oder der Schachtwand entfernt liegen.

Die primären, mit dem Überbohrverfahren gemessenen in-situ Spannungen zeigen eine Zunahme mit der Teufe von etwa 10 MPa auf etwa 15 MPa. Wenn diese Ergebnisse mit den berechneten Werten der vertikalen Spannung, basierend auf plausiblen Annahmen der Dichte des hangenden Gesteins, verglichen werden, zeigt sich deutlich ein nahezu isotroper initialer Spannungszustand. Dennoch ist ein geringer, aber konsistenter Unterschied von weniger als 2 MPa zwischen den beiden Spannungen zu erkennen. Dieser Unterschied zeigt ein geringes deviatorisches Spannungsfeld im Salzstock an, welches ggf. mit Änderungen der geologischen Auflast und den assoziierten geologischen Verformungen und / oder den Ungenauigkeiten der berechneten Auflast auf Grundlage gemittelter Gesteinsdichten einhergeht /BRÄ 11/.

Die Spannungsänderung über lange Zeiträume zeigt ein heterogenes Ansprechverhalten an unterschiedlichen Messstellen. Ein deutlicher saisonaler Einfluss durch die Änderungen der Temperatur des Gesteins und der Luft ist erkennbar. Dieser komplexe Effekt basiert auf der Kombination von Spannungsänderungen durch thermische Ausdehnung und Kriechen, verursacht durch den Bau von Hohlräumen im Untergrund.

Konvergenzmessungen (z. B. /SCH 03b/) geben weitere Details zu den bedeutenden Unterschieden zwischen den Messstellen, die in Bezug zur Gesteinsart an der jeweiligen Messstelle gesetzt werden. Beispielsweise zeigen Hohlräume im Orangesalz und im Anhydritmittelsalz wesentlich geringere Konvergenzen als andere Lithologien.

5.4.2 **Bewertung und Forschungsbedarf zu geomechanischen in-situ Spannungsmessungen**

Die geomechanischen in-situ Messungen wurden gut geplant und umfassend angelegt. Die Methoden entsprechen dem Stand der Forschung. /BRÄ 11/ machen Vorschläge für weiterführende Labormessungen, in-situ Beobachtungen und Modellrechnungen. Diese Vorschläge sind nachvollziehbar dargelegt und es wird empfohlen, diesen zu folgen. Es ist deshalb für den Abschluss weiterführender Sicherheitsanalysen (nach VSG) notwendig, zukünftig Forschung durchzuführen, bei der die initialen in-situ Spannungsmodelle verfeinert und die geringen, aber signifikanten Abweichungen vom bisher angenommenen, isotropen Spannungszustand berücksichtigt werden (siehe Forschungsbedarf in Kap. 4.3.3). Hierzu ist auch ein verbessertes Modell der Dichteverteilung und der Geometrie des Salzstocks notwendig.

Eine umfassende, quantitative Evaluierung der Konvergenzmessungen würde zur weiteren wissenschaftlichen Absicherung eine sinnvolle Validierung der verwendeten Stoffgesetze darstellen. Hierzu wäre auch die Einbindung eines Modells, welches die komplex gefalteten Geometrien beinhaltet, erforderlich. Die gezeigten numerischen Simulationen belegen die Notwendigkeit solcher numerischer Ansätze.

Zusammenfassend besteht die Notwendigkeit einer besseren Integration aller Spannungs- und Versatzmessungen in einem konsistenten, quantifizierten (inklusive der Ungewissheiten) Modell für Salzstrukturen generell und die gesamte Gorleben-Struktur im Speziellen. Dazu sollten die aktuellsten Modelle (und ihre Ungewissheiten) der Geometrie, der physikalischen Eigenschaften und der Randbedingungen genutzt werden, um einen Vergleich der Messungen mit den Vorhersagen (in-situ Spannung, Bewegungen) durchführen zu können. So könnte ein integriertes und validiertes Modell des Salzstocks erstellt werden, welches deutlich genauere Vorhersagen des zukünftigen Verhaltens des Endlagers erlaubt.

5.5 **Mechanische und Transport-Eigenschaften**

5.5.1 **Übersicht des aktuellen Stands der Forschung**

Um verlässliche Modellierungen der Salzdeformation für die langfristige Standsicherheit von untertägigen Bauwerken durchzuführen, sind experimentell hergeleitete Stoff-

gesetze auf viel geringere Verformungsraten, als im Labor erzeugbar, zu extrapolieren. Diese Extrapolation muss auf einem Verständnis der Deformationsmechanismen im Mikromaßstab basieren, was durch kombinierte Untersuchungen von natürlichen und experimentell deformierten Gesteinen geschieht, integriert mit mikrostrukturellen Analysen. Dabei werden dieselben Werkzeuge verwendet, wie sie in den modernen Materialwissenschaften und vielen anderen Gebieten der Natur- und Ingenieurwissenschaften Anwendung finden. In den letzten Jahren konnten in diesen Forschungsfeldern wesentliche Fortschritte gemacht werden, die mit den modernen Entwicklungen der mikrostrukturellen und Texturanalyse wie der Elektronenrückstreubeugung EBSD, der Mikrostruktur-Dekoration durch Gamma-Bestrahlung, BIB-Cryo-SEM und anderen Methoden einhergehen. Diese Analysen erlauben eine viel zuverlässigere und physikalisch begründete Anwendung der Stoffgesetze und damit eine deutliche Reduktion der Ungewissheit der Vorhersagen insbesondere über lange Zeiträume. Diese modernen Methoden wurden bisher nicht in die Untersuchungen von Steinsalz im Hinblick auf die Vorhersage von Prozessen in einem Endlager angewendet.

Die ingenieurwissenschaftlichen Kriechgesetze, die allgemein im Salzbergbau Anwendung finden, basieren auf dem in Experimenten beobachteten Dislokationskriechen sowie Dilatanz- / Mikroriss-Prozessen. Zahlreiche Untersuchungen zeigen jedoch deutlich, dass Lösungs-Fällungs-Prozesse auf Korngrenzen, wie das Lösungs-Fällungs-Kriechen und die dynamische Rekristallisation, eine signifikante Rolle in einem weiten Spektrum von Druck-Temperatur-Bedingungen ausmachen. Diese Prozesse können große Änderungen der Rheologie verursachen. Diese Prozesse wurden bisher nicht in die Untersuchungen von Steinsalz im Hinblick auf die Vorhersage von Prozessen in einem Endlager berücksichtigt.

5.5.1.1 Deformationsmechanismen und Rheologie von Halit

Verschiedene Deformationsmechanismen können bei den für Endlager relevanten Temperaturen (20 – 200 °C) unterschieden werden:

1. Bei niedrigem effektiven, allseitigen Druck und hohen deviatorischen Spannungen (> 15 – 20 MPa) sind inter- und intragranulare Mikrorisse, Kornrotation und intergranulares Korngrenzgleiten neben der Kristallplastizität wichtige, verformungsakkumulierende Prozesse. Die mechanischen Eigenschaften und die Dilatationsrate sind abhängig von der effektiven Mittelspannung /CRI 98b/, /PEA 96/, /CRI 98a/,

/PEA 01/, /HUN 03/, /GÜN 09/, /POP 00/, /HUN 99/, /HUN 96/, /POP 01/, /HAK 09/. Bei ausreichend hohen deviatorischen Spannungen versagt das Material auf (semi) sprödem Wege. Mit zunehmender effektiver Mittelspannung werden Mikrobrüche und die Dilatanz unterdrückt und kristallplastische Prozesse dominieren.

2. Bei Temperaturen von 50 – 200 °C ist das Dislokationskriechen sowohl in Laborexperimenten als auch bei natürlicher Deformation von Bedeutung. Während dieses Prozesses bilden sich in den Halitkörnern Subkörner /PEN 05/, /PEN 06a/, /PEN 06b/, deren Durchmesser eine nahezu lineare, inverse Korrelation mit der deviatorischen Spannung zeigt /CAR 93/, /HUN 03/, /GÜN 09/, /POP 00/, /HUN 99/, /SCH 01/, /ALB 90/, /WAW 86/. Enthalten die Polykristalle geringe, aber signifikante Mengen von Wasser in Form von gesättigten Lösungen in Einschlüssen oder Korngrenzfilmen, wie es üblicherweise für natürliche und synthetische Proben der Fall ist, kommt fluid-unterstütztes Korngrenzwandern zum Tragen /SCH 04/, /SCH 06/. Korngrenzwandern durch Lösungs-Fällungs-Transfer über Korngrenzfilme wird durch Unterschiede des chemischen Potentials zwischen den Korngrenzen angetrieben, verursacht durch Unterschiede in der Versetzungsdichte /SPI 84/, /SPI 89/, /SPI 96/, /PEA 01/, /WAT 02/. In einem stark deformierten, feuchten Steinsalz ist die Wanderung von Korngrenzen sehr schnell und kann bei Raumtemperatur Geschwindigkeiten von 10 nm/s erreichen /SCH 06/. Ein Modell des zugrunde liegenden Prozesses wurde von /PEA 01/ und /NOO 07/ hergeleitet. Danach korreliert die Rate für das Korngrenzwandern ausreichend gut mit den Beobachtungen von 10nm/s.
3. Während Dislokationskriechen im Kristallgitter des Halitkorns stattfindet und fluid-unterstütztes Korngrenzwandern einen Lösungs-Fällungs-Transfer über Korngrenzen hinweg beinhaltet, ist das Lösungs-Fällungs-Kriechen ein Prozess, der den Massentransport um Korngrenzen beinhaltet /SCH 99b/, /SPI 90/, /SPI 04/. Dieser Prozess wird von intergranularem Gleiten und Rotation (Kornneuanordnung) begleitet und ist sowohl für die Deformation von Steinsalz als auch für die Kompaktion von porösem Salz von großer Bedeutung /SPI 90/.

Lösungs-Fällungs-Kriechen wurde in Laborexperimenten und natürlich deformiertem Salz in einem breiten Spektrum von Randparametern untersucht /URA 87c/, /SPI 98/, /TRI 00/, /TER 05a/, /SCH 07b/, /SCH 08/.

Fluid-unterstütztes Korngrenz wandern und Lösungs-Fällungs-Prozesse können in trockenem Salz (< 5 ppm Wasser) /TER 05b/ nicht stattfinden. Auch in natürlichen Proben, die unter dilatanten Bedingungen deformiert wurden und somit die Evaporation von intergranularem Fluid ermöglichen /PEA 01/, wurden diese Prozesse nicht beobachtet.

Die Randbedingungen, in denen unterschiedliche Deformationsmechanismen dominieren, werden üblicherweise in Karten (DMM – deformation mechanism maps) dargestellt /FOS 02/, /TER 05a/.

5.5.1.2 Rheologische Eigenschaften und Fließgesetze

Die Rheologie eines kristallinen Materials hängt vom dominierenden Deformationsmechanismus ab wobei Mikrostruktur (State Variable), Deformationsrate, Temperatur und Fluidgehalt eine Rolle spielen. Für Steinsalz wurden Zusammenfassungen beispielsweise von /URA 86b/, /CRI 98b/, /HUN 99/, /FOS 02/, /TER 05a/, /TER 05b/, /URA 08/, /HUN 03/ publiziert.

Das primäre oder transiente Kriechen wurde im sogenannten Verbundmodell /HUN 03/, /WAL 07/ beschrieben und ist das „state of the art“ Modell zur Beschreibung transienten Kriechens durch Dislokationsmechanismen in Salz.

Betrachtet man die nicht-dilatante Steady-state Deformation, dann sind die wesentlichen Gleichungen für das Kriechen von Steinsalz

$$\dot{\varepsilon}_{DC} = A e^{\frac{-Q_{DC}}{RT}} (\sigma_1 - \sigma_3)^n \quad (5.2)$$

für das Dislokationskriechen und

$$\dot{\varepsilon}_{PS} = B e^{\frac{-Q_{PS}}{RT}} \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{TD^m} \right) \quad (5.3)$$

für das Lösungs-Fällungs-Kriechen. Die Gesamtverformungsrate setzt sich aus der Summe des Dislokationskriechens und der Lösungs-Fällungs-Kriechen zusammen zu

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_{DC} + \dot{\epsilon}_{PS} \quad (5.4)$$

In diesen Gleichungen (z. B. /URA 08/), die hier für eine axial symmetrische Verkürzung dargestellt sind, sind A und B Materialparameter, Q_{DC} und Q_{PS} repräsentieren die Aktivierungsenergie für Dislokations- und Drucklösungskriechen, R ist die Gaskonstante, T die absolute Temperatur, σ_1 und σ_3 sind die maximale und minimale Hauptnormalspannung, D ist die Korngröße (in μm), und n und m sind die Exponenten der Spannung bzw. der Korngröße. Zwei wichtige Unterschiede zwischen den beiden Gleichungen sind (i) die Abhängigkeit der Verformungsrate von der Spannung ($n = 1$ für das Lösungs-Fällungs-Kriechen und die Drucklösung, $n > 1$ für das Dislokationskriechen) sowie (ii) die Abhängigkeit der Verformungsrate von der Korngröße. Dabei ist zu beachten, dass das Dislokationskriechen unabhängig von der Korngröße ist, während die Drucklösung mit einem Exponenten von $m = 3$ stark korngößenabhängig ist.

Sowohl uniaxiale als auch triaxiale Experimente an natürlichem und synthetischem Steinsalz zeigen bei Temperaturen von 20 – 200 °C Differenzialspannungen unter 15 – 20 MPa und Verformungsraten unter 10^{-6} s^{-1} ein exponentielles Dislokationskriechen. Die Spannungsexponenten n betragen 5 – 6 bei höheren Spannungen und 3,5 – 4,5 bei niedrigeren Spannungen /WAW 86/, /CAR 93/, /SPI 98/, /HUN 99/. Intergranulare, mikrostrukturelle Anzeichen wie gewellte Deformationsbänder deuten an, dass ein Quergleiten von Schraubversetzungen der limitierende Prozess bei Differenzialspannungen ($\sigma_1 - \sigma_3$) oberhalb von 10 – 15 MPa ($n = 5 - 6$) ist. Bei geringeren Spannungen ($n = 3 - 4$) bilden sich gut entwickelte, gleichachsige Subkörner, die auf die Erholung durch Klettern hindeuten.

Für eine gegebene Differenzialspannung kann die Rate des Dislokationskriechens um etwa drei Größenordnungen variieren. Dies wird durch Unterschiede in der Konzentration von Fremdanteilen im Mischkristall, die Menge und Verteilung von sekundären Mineralphasen, Korngröße, Subkorngröße, Dislokationsdichte und Fluide entlang von Korngrenzen verursacht (Kriechklasse: /HUN 96/, /ALB 90/).

Die relative hohe Variabilität der Kriechfestigkeit von natürlichem Steinsalz steht in guter Übereinstimmung mit den im Gelände beobachteten kleinskaligen Falten, die in den Lagen natürlichen Steinsalzes allgegenwärtig sind. Diese Beobachtungen wurden bisher nicht in numerische Modelle zur Salztektonik integriert. Bisher werden bedeutend

homogenere Materialeigenschaften angenommen und produzieren dementsprechend weniger heterogene Verformungsfelder.

Steinsalzproben, die mehr als 10 – 20 ppm Wasser entlang von Korngrenzen enthalten, werden durch fluidunterstütztes Korngrenzwandern während des Dislokationskriechens dynamisch rekristallisiert. Verglichen mit trockenen Proben (<10 ppm Wasser) führt dieser Prozess zu einer Reduzierung der Kriechfestigkeit von 25 – 50 % und einem exponentiellen Verhalten mit einem n-Wert von etwa 4,5 /PEA 01/, /TER 05b/, /WAT 02/. Die Gleichung, welche die mittlere rekristallisierte Korngröße mit der Differenzialspannung (MPa) und der Temperatur koppelt, wurde von /TER 05a/ hergeleitet und bildet die Basis für die Abschätzung der Fließspannungen anhand von dynamisch rekristallisierten Korngrößen (Paläopiezometer).

Lösungs-Fällungs-Kriechen wurde in zahlreichen Laborexperimenten an feuchten, feinkörnigen Haliten bei Temperaturen von 20 – 200 °C festgestellt, welches zu schneller, linear-viskoser Deformation von dichtem Salz und Kompaktion porösen Materials (der Versatz) führt (z. B. /URA 86b/, /SPI 90/, /SPI 93/, /REN 02/, /TER 05b/). Der Prozess wurde auch an individuellen, unter Spannung stehenden Halitkornkontakten (z. B. /GRA 93/, /SCH 99b/, /MEE 95/) und in Salzaggregaten mit sekundären Phasen /REN 01/, /ZOU 04/ beobachtet. Der Prozess benötigt das Vorhandensein einer Sole entlang von Korngrenzen. Anzeichen für Drucklösung wurde auch in Kriechexperimenten von grobkörnigem, natürlichem Steinsalz bei niedrigen Spannungen berichtet /BÉR 05a/. Die Deformation von Kammern und Pfeilern in Kalisalzminen wurde ebenfalls auf das Lösungs-Fällungs-Kriechen von Steinsalz zurückgeführt /CAM 98/, /LEE 98/. Allerdings sind solche in-situ Daten bisher nicht ausreichend dokumentiert worden, um eine ausreichende Quantifizierung des zugrunde liegenden Prozesses zu ermöglichen /BEK 07/.

Lösungs-Fällungs-Kriechen wird aufgrund der signifikanten Korngrößenabhängigkeit und der limitierten Dauer von Laboruntersuchungen selten in Experimenten mit natürlichem Steinsalz (Korngrößen von etwa 1 cm) beobachtet. Aus diesem Grunde wird das Lösungs-Fällungs-Kriechen üblicherweise nicht in ingenieurmäßige Beschreibungen der Salzrheologie integriert /CRI 98b/, /HUN 99/, /FOS 02/. Bei langsamen Deformationen und über lange Zeiträume kann Lösungs-Fällungs-Kriechen ein wichtiger Prozess in Endlagern sein, der zu vielen Magnituden schnellerem Kriechen bei geringen Spannungen führen würde als das Dislokationskriechen.

Dilatantes Mikrobrechen der Korngrenzen und eine schnelle Erhöhung der Permeabilität /CRI 98b/, /PEA 96/ wurden im Detail durch /CRI 98b/ sowie /CRI 98a/ beschrieben. Der Beginn des Mikrobrechens hat einen geringen, direkten Effekt auf das Kriechverhalten, allerdings kann es den Einfluss von Wasser auf das Kriechen stark beeinflussen. In Salz mit geringer Menge von Wasser durchtrennt das Mikrobrechen die Korngrenzfilme und unterbricht die Korngrenzwanderung und die Drucklösung, insbesondere wenn das Wasser aus der Probe entweichen kann /PEA 01/. Andererseits kann sowohl die Rekristallisation und das Lösungs-Fällungs-Kriechen stark erhöht werden, wenn Mikrobrechen den Zugang von freier Sole oder Wasser in das kriechende Salz ermöglicht (Feuchtekriechen: /HUN 03/).

Obwohl bereits eine große Menge an Daten für Lösungs-Fällungs-Kriechen in Salz vorhanden ist, sind die zugrunde liegenden mikrophysikalischen Prozesse nur unzureichend untersucht /HIC 95/, /SCH 99b/, /SPI 04/, /MEE 95/, SCH 06/. Bei ausreichend geringen intergranularen Effektivspannungen wird davon ausgegangen, dass nun die Oberflächenenergien als die treibenden Kräfte groß genug werden, um ein Verheilen der Korngrenzen durch Insel- oder Kontaktwachstum zu ermöglichen. Dies führt zu isolierten Flüssigkeitseinschlüssen an der Korngrenze /SCH 99b/. Durch die Untersuchungen von /NOO 07/ wurde eine erste Grundlage geschaffen, diesen Prozess zu evaluieren. Dennoch ist eine praktische Anwendung in einem Material wie Halit schwierig und weitere Arbeiten (auch bezogen auf die Langzeit-Kompaktion des Versatzes) sind zukünftig notwendig (Kap. 5.4).

Wesentlich weniger ist über die Rheologie und Deformationsmechanismen von anderen Evaporiten bekannt. Carnallit und Bischofit wurden von /URA 83/, /EEK 84/, /URA 85b/, /URA 85a/, /URA 86a/, /URA 86b/, /URA 87a/, /URA 87b/, /KER 86/, /SCH 05a/ untersucht. Es konnten zahlreiche Ähnlichkeiten mit Halit aufgezeigt werden, wie das Dislokationskriechen, die dynamische Rekristallisation und die Lösungs-Fällungs-Prozesse in natürlich deformierten und Laborproben. Die mechanischen Daten deuten auf eine wesentlich geringere Festigkeit als die von Halit hin, wobei der Bischofit wesentlich weicher als Carnallit ist.

Die Rheologie von Anhydrit bei Bedingungen natürlicher Deformation ist größtenteils unbekannt. Existierende Untersuchungen zeigen bei niedrigen Temperaturen sprödes Versagen, und Experimente die duktilen Verhalten zeigen, wurden bei hohen Temperaturen an trockenen Proben durchgeführt (z. B. /DEL 95/). Es ist nicht klar, wie diese Untersuchungen auf natürliche Bedingungen extrapoliert werden können. Die Be-

obachtung von gefalteten und boudinierten Anhydritlagen, die von Salz umgeben sind, deuten jedoch darauf hin, dass die langsame Deformation von Anhydriten bei geologischen Verformungsraten komplex ist und sowohl viskose als auch spröde Deformation beinhaltet.

Des Weiteren wurden große Fortschritte bei der Messung des Oberflächen-Verschiebungsfeldes von aktivem Salzfluss gemacht. In einer Reihe von Publikationen /BUR 11/, /MUK 07/, /MUK 10/, /KOY 01/, /WEI 06/ wurde die Rheologie von Salzdomen mit Hilfe ihrer in-situ Deformation (d. h. während der rezenten, aktiven Tektonik) untersucht. Die Arbeiten kommen zu dem Schluss, dass Salz über geologische Zeiträume sich wie ein newtonisches Fluid verhält und bei geringer Differentialspannung eine Viskosität besitzt, die zu einigen Magnituden höheren Verformungsraten als die von der BGR vorgenannten Werte führen.

Diese Daten des Oberflächen-Verschiebungsfeldes von aktivem Salzfluß Steinsalz können mit nicht-linearen Finite-Element Techniken invertiert werden, um die rheologischen Stoffgesetze für den Salzfluss während der langsamen, natürlichen Deformation abzuleiten /WEI 06/. Einblicke in die in-situ Rheologie von Salz über einen Zeitraum von Jahren konnten auch gewonnen werden, indem die Fließgesetze der numerischen Modelle mit den durch den Bergbau verursachten Subsidenzen mit der Entwicklung des Oberflächenversatzes gekoppelt wurden. Solche Studien, die im Zusammenhang mit tiefer Untertagelaugung in den Niederlanden in Barradeel (2 – 3 km Teufe) durchgeführt wurden, deuten auf einen Salzfluss durch Dislokationskriechen (n-Wert von 3 – 4) zusammen mit einem linear-viskosen Fließgesetz hin, welches für Lösungs-Fällungs-Kriechen gilt /BRE 03/.

Mikrostrukturelle Untersuchungen natürlich deformierten Salzes zeigen, dass sowohl Dislokationsgleiten und Dislokationskriechen als auch Lösungs-Fällungs-Kriechen und fluidunterstützte dynamische Rekristallisation von großer Bedeutung sind /URA 87a/, /SPI 98/, /SCH 05b/, /SCH 07b/. Differenzialspannungen, wie sie anhand von im Labor kalibrierten Subkorngrößen abgeleitet und in Steinsalz gemessen werden, sind in natürlich deformiertem Salz üblicherweise geringer als 2 MPa. Dies ist in Übereinstimmung mit in-situ Spannungsmessungen natürlich deformierten Salzes und geologischen Fließraten /SPI 98/, /SCH 05a/.

Die Mikrostrukturen von natürlich deformiertem Steinsalz können aufgrund der Langzeitdeformation wichtige Hinweise auf die Deformationsmechanismen und Stoffgesetze

geben, Bedingungen die in Laborexperimenten nicht erreichbar sind. Proben aus dem Salzbergwerk Asse wurden in /URA 87b/ und /KÜS 10/ beschrieben. Alle Proben zeigen Dislokationskriechen, begleitet von erheblicher, wasserunterstützter Korngrenzwanderung. Es wurde gezeigt, dass die Korngrenzen während der Rekristallisation Filme von Sole enthalten. Lösungs-Fällungs-Prozesse wurden als bedeutende Deformationsmechanismen abgeleitet. Im Gegensatz zu den gering deformierten Proben von Hengelo, Niederlande /SCH 05b/ wurden vermutlich aufgrund der extensiven Korngrenzwanderung keine Relikte primärer Körner im Material gefunden. Im Vergleich mit publizierten Untersuchungen an natürlichen Salztekoniten gibt es nur wenige Daten aus nordwestdeutschen Salzstöcken.

5.5.1.3 Zusammenfassung international publizierter Forschungsergebnisse

Durch die Integration aller vorhandenen Daten ist es möglich, ein umfassendes Modell der Deformationsmechanismen und der mikrostrukturellen Entwicklung von Evaporiten in einem breiten Spektrum von Randparametern zu untersuchen. Dies beinhaltet auch Verformungsraten, die weit unterhalb dessen liegen, was durch experimentelle Laborarbeiten erreicht werden kann.

Informationen zum Verhalten von Salz bei geringen Verformungsraten kann durch mikrostrukturelle Untersuchungen natürlichen Steinsalzes und deren Extrapolation, Langzeit-in-situ- und Subsidenz-Messungen, und die Extrapolation experimenteller Daten aus feinkörnigen Proben gewonnen werden. Bei diesen geringen Raten deutet sich an, dass neben Dislokationskriechen und Mikrorissbildung auch Lösungs-Fällungs-Kriechen und fluidunterstützte dynamische Rekristallisation wichtige Prozesse darstellen, die wesentlich zu der Gesamtverformung beitragen.

Die vorhandenen Daten sind eine angemessene Grundlage für die Modellierung des mechanischen Verhaltens von Salz unter geotechnischen und Langzeitbedingungen. Dennoch werden in bisherigen Arbeiten am Salzstock Gorleben die Effekte von fluidaktiviertem Korngrenzwandern nicht betrachtet, was zu bisher nicht quantifizierten Ungewissheiten in der Vorhersage von Spannungen und Verschiebungsfeldern, insbesondere über lange Zeiträume, führt.

Weitere Fortschritte können durch ein detaillierteres Verständnis der Mechanismen von transienten und stationärem Dislokationskriechen, einer Verbesserung der mikrophysi-

kalischen Modelle für die Effekte von Lösungs-Fällungs-Kriechen sowie den Einfluss von Rekristallisation und durch Oberflächenenergien angetriebenen Korngrenz wandern und Bruchverheilung auf den Fluss- und Transporteigenschaften gewonnen werden.

Weitere Forschungsbemühungen sind ebenso hinsichtlich der Deformationsmechanismen von natürlich deformiertem Steinsalz für ein breites Spektrum geowissenschaftlicher Fragestellungen notwendig. Dies beinhaltet auch einen detaillierten Vergleich der aus Laboruntersuchungen ermittelten Stoffgesetze mit denen, die durch die Inversion des Oberflächenversatzes und Konvergenzmessungen in Salzminen und Salzextrusionen gewonnen werden.

5.5.2 **Arbeiten der BGR zu mechanischen Gesteinseigenschaften**

Die Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften wurde an zahlreichen Gesteinsproben durchgeführt. Die Labormessungen wurden dann in numerischen Modellen verwendet, um die Entwicklung von Bewegungen und Spannungen zu simulieren und die zeitliche Entwicklung der Stabilität und Integrität der untertägigen Hohlräume vorherzusagen.

Die Labormessungen beinhalteten die Bestimmung der akustischen Eigenschaften sowie die Deformations- und Festigkeits-Eigenschaften mit Hilfe von uniaxialen, triaxialen und Brazilian Tests. Die Messungen beinhalteten zahlreiche, größtenteils uniaxiale Langzeit-Kriechtests. In einigen Fällen wurden Verbesserungen zu den Standardabläufen der DGGT eingeführt.

/BRÄ 11/ und /HUN 03/ präsentieren Zusammenfassungen der Arbeiten, die in zahlreichen Berichten dokumentiert sind. Die mechanischen Eigenschaften werden detailliert beschrieben, allerdings sind die über viele Jahre gewonnenen und dokumentierten Ergebnisse nicht einfach zugänglich, da eine konsistente Datenbank mit Gesteinsparametern fehlt. Ebenso ist eine Analyse der Daten im Hinblick auf eine Überprüfung der Validität der gemachten Korrelationen schwierig. Die meisten Daten werden in nicht publizierten BGR Berichten, Konferenzbeiträgen und einer Anzahl bekannter Publikationen in internationalen, peer-reviewed Publikationen dokumentiert.

5.5.3 **Mechanische Eigenschaften und Stoffgesetze – Bewertung der Arbeiten der BGR**

Durch die zahlreichen Berichte und Publikationen ist eine große Zahl qualitativ hochwertiger Messungen beschrieben. Die Messungen und Präsentationen der vorhandenen Daten sind von hoher Qualität. Es existiert weltweit keine vergleichbare Studie über Salz mit einer so großen Datenquelle. Die triaxialen Messungen sind von sehr guter Qualität und präzise. Die experimentellen Daten sind voll ausreichend, um kurzfristige, ingenieurbasierte Aspekte für den Bau eines Endlagers zu simulieren und stimmen mit der breiten Erfahrung hinsichtlich Salzmechanik und über (geologisch kurze Zeiträume) gemessene Konvergenzen von untertägigen Hohlräumen, die im aktiven Salzbergbau in Deutschland und darüber hinaus gewonnen werden konnten, gut überein. Die Interpretation der gewonnenen Ergebnisse im Hinblick auf das Spektrum mikrostruktureller Prozesse und die Extrapolation der Ergebnisse auf die Langzeit-Prozesse eines Endlagers wird jedoch kontrovers diskutiert. Des Weiteren existieren in diesem Feld wesentliche Unterschiede zu international publizierten Ergebnissen.

Die Kriechgesetze BGR-a, BGR-b und das Verbundmodell wurden über viele Jahre entwickelt und umfassend untersucht, auf Fallbeispiele angewandt und gegen Vorhersagen zu untertägigen Messungen sowie Experimenten getestet. Dennoch existiert eine bedeutende Kontroverse in der Anwendbarkeit dieser Stoffgesetze insbesondere im Hinblick auf das Langzeit-Verhalten eines Endlagers.

In Gorleben und anderen Standorten wurde demonstriert, dass unterschiedliche stratigraphische Einheiten unterschiedlichen Kriechklassen unterliegen. Eine Serie von Kriechklassen mit unterschiedlichen Parametern in den Kriechgesetzen wird für jede Einheit als Grundlage für die geomechanische Modellierung vorgeschlagen. Kriechklasse 1 ist „fest“ – sie kriecht 100 mal langsamer als Kriechklasse 9 bei denselben Spannungen und Temperaturen. Der Ansatz ist attraktiv und vermutlich der einzig realistische für eine repräsentative Modellierung der Langzeit-Deformation eines solch komplexen geologischen Körpers wie Gorleben. Dennoch betrachtet die Studie nicht die Varianz innerhalb jeder Kriechklasse und es besteht eine große Überlappung zwischen den Klassen. Die Heterogenität könnte in einem eher geostatistischen Ansatz in thermomechanische Modelle eingebunden werden. Außerdem wurde nicht gezeigt, dass der Spannungsexponent n und die Aktivierungsenergie Q in den Stoffgesetzen denselben Wert für alle Gesteinsarten und jede Kriechklasse besitzen, was aufgrund der mikrophysikalischen Argumente vermutlich nicht der Fall ist. Das bedeutet, dass

eine Extrapolation der Stoffgesetze der jeweiligen Kriechklasse bei geringeren Verformungsraten und höheren Temperaturen um Magnituden von den gemachten Vorhersagen differieren kann.

Der Beginn der Dilatanz ist ein Schlüsselement bei der Integritätsbewertung eines Endlagers, weil die Ausbildung von Mikrobrüchen in dilatantem Salz zu einer erhöhten Permeabilität und möglichen Migrationspfaden für Fluide durch das Salz führt. Diese Erkenntnisse wurden von der BGR und anderen Gruppen in Deutschland gemacht und in der Literatur dokumentiert.

Das Korngefüge, sekundäre Phasen und Dislokationen werden in einigen Fällen in Bezug zu den Mikrostrukturen und den mechanischen Eigenschaften untersucht. Solche Untersuchungen wurden leider nur selten und nicht im notwendigen Detail durchgeführt. In der Literatur gibt es zahlreiche Beispiele effizienter und robuster Methoden zur Evaluation intra- und intergranularer Mikrostrukturen, wie die quantitative Mikroskopie, CPO Kartierungen (kristallographische Vorzugsrichtungen), Gammadekoration zur Visualisierung der Mikrostruktur oder Cryo-SEM zur Untersuchung von Flüssigkeitseinschlüssen an Korngrenzen. Ein Beispiel ist der Versuch einer Korrelation der Mikrostrukturen unterschiedlicher Einheiten mit dem Mikrogefüge und Fremdmaterial (/HUN 03/, Abb. 4.3.8). Parameter wie der Wasser- und Kohlenwasserstoffanteil, die Konzentration festen Fremdmaterials, die Korngröße, kristallographische Vorzugsrichtung und die Struktur von Korngrenzen werden nicht dokumentiert und eine umfassende quantitative, multivariate Untersuchung zur Korrelation zwischen Mikrostruktur und mechanischen Eigenschaften nicht dargestellt.

„Das Kriechen von Steinsalz wird fast ausschließlich von der transkristallinen Bewegung der Versetzungen getragen" (/HUN 03/, Kap. 4.3). Das vorgenannte Zitat fasst die betrachteten mikrostrukturellen Prozesse von /HUN 03/ und /BRÄ 11/ zusammen, auf deren Grundlage die mikrophysikalischen Prozesse in die Kriechgesetze eingebunden wurden. Wichtige Korngrenz-Fluid-Prozesse sind gut dokumentiert, Endlager-relevant und international publiziert (Kap. 5.5.1). Obwohl diese Arbeiten dokumentieren, dass diese Prozesse auch das Kriechen in Salzstöcken in Deutschland beeinflussen, wurden diese Korngrenz-Fluid-Prozesse bisher nicht berücksichtigt und es ist deshalb nicht nachgewiesen, dass diesen Prozessen im Fall des Endlagers Gorleben keine Bedeutung beizumessen ist. Dies stellt ein wesentliches Problem bei der Extrapolation von Kriechdaten auf Bedingungen dar, die im Labor nicht untersucht werden können.

In den Materialwissenschaften werden die Ergebnisse von Deformationsexperimenten mit der modernen Mikrostrukturanalyse korreliert, um die Stoffgesetze herzuleiten. Vollständige und detaillierte mikrostrukturelle Untersuchungen von natürlichen und experimentell deformierten Salzgesteinen, entsprechend dem Stand der Forschung, sind den in /HUN 03/ zusammengefassten Arbeiten nicht zu entnehmen.

Ein wichtiger und gut dokumentierter Prozess ist die dynamische und statische Rekristallisation von Steinsalz und anderen Evaporiten, einhergehend mit Fluidfilmen auf Korngrenzen, die die Mobilität um mehrere Magnituden beschleunigen (Details siehe Kap. 5.5.1). Es gibt gut dokumentierte Experimente mit demselben Asse Speisesalz unter Endlagerrelevanten Bedingungen, wie es für die Herleitung der BGR Stoffgesetze verwendet wurde. Diese Ergebnisse wurden veröffentlicht (z. B. /URA 86a/), jedoch nicht in das Verbundmodell implementiert. Diese Experimente zeigen dynamische Rekristallisation, wodurch die abgeleiteten Kriechraten um mehrere Magnituden zu denen, die aus den BGR Kriechgesetzen abzuleiten wären, differieren. Die deformierten Proben der BGR Experimente wurden selten mikrostrukturell untersucht und entsprechend ist es wahrscheinlich, dass Korngrenz-Fluid-Prozesse nicht erkannt wurden. Zudem beeinflussen die Korngrenz-Fluid-Prozesse die mechanischen Eigenschaften erst bei Bedingungen, die außerhalb der Möglichkeiten von Labortests liegen, aber dennoch endlagerrelevant sind. Diese Effekte resultieren in bisher nicht quantifizierten Ungewissheiten in der Vorhersage von Spannungen und Bewegungsvektorfeldern in einem Endlager.

Ein weiteres Beispiel ist die gut dokumentierte Rekristallisation in der Auflockerungszone (Excavation Damage Zone EDZ) von Salzbergwerken /SCH 07a/. Ein solcher Prozess ist auch in der EDZ der untertägigen Hohlräume in Gorleben zu erwarten, was zur Umverteilung von Fluiden und einer Änderung der Eigenschaften führen könnte. Eine solche Studie liegt zu Gorleben nicht vor. Einaxial deformierte Proben (bei kontrollierter Humidität) führen üblicherweise durch Dilatanz und Austrocknung zu einem Verlust von Fluiden auf Korngrenzen. Dies verhindert vermutlich den Beginn von Korngrenz-Fluid bezogenen Prozessen. Das Trocknen einaxial deformierter Proben könnte ein Prozess sein, mit dem die Bedingungen in der EDZ simuliert werden könnten, das gilt allerdings nicht für das nicht-dilatante umgebende Gestein. Der Verlust von Feuchtigkeit während der Experimente könnte zu einer Unterdrückung der korngrenzbezogenen Prozesse führen, so dass die Experimente nicht die Deformation nicht-dilatanten Salzes widerspiegeln, wie sie weiter entfernt von den untertägigen Hohlräumen zu erwarten sind.

Ein weiterer wichtiger Prozess in der experimentellen und der natürlichen Deformation ist das Lösungs-Fällungs-Kriechen („Drucklösung“), welches in Steinsalz intensiv untersucht wurde. Hierbei haben mobile, fluidgefüllte Korngrenzen ebenso eine Schlüsselrolle. Die Stoffgesetze für diesen Kriechprozess sind gut dokumentiert und werden in der Übersicht weiter oben zusammengefasst (Kap. 5.5.1). Der Prozess findet in einem breiten Spektrum von Randbedingungen sowohl im Labor als auch bei der natürlichen Deformation statt und ist auch bei Bedingungen, wie sie in einem Endlager anzutreffen sind, von Bedeutung. In grobkörnigem Salz beginnt der Prozess des Lösungs-Fällungs-Kriechens die mechanischen Eigenschaften nur bei langsamer, langanhaltender Deformation zu dominieren. Das Fehlen mikrostruktureller Untersuchungen in den Gorleben-Proben bedeutet, dass Lösungs-Fällungs Prozesse in zahlreichen Proben stattgefunden haben können, ohne dass sie in den mechanischen Messungen erkannt worden wären. Korngrenz-Fluid bezogenen Prozessen wurde bei der Verheilung von Mikrobrüchen in dilatierten Gesteinen bei feuchter Luft (Feuchtekriechen) große Bedeutung beigemessen. Die Stoffgesetze könnten durch mikrostrukturelle Untersuchungen wesentlich verbessert werden, die auch die mikrophysikalischen Grundlagen der Prozesse bestimmen und quantifizieren.

Eine umfassende Diskussion und die Integration der Ergebnisse mit publizierten Beiträgen in der internationalen Literatur sind den vorliegenden Unterlagen und Berichten nicht zu entnehmen. Viele der nicht zitierten Publikationen (siehe Kap. 5.5.1) schlagen insbesondere für die Langzeit-Deformation signifikant andere mechanische Eigenschaften vor als die in den vorliegenden Berichten. Diese Effekte resultieren in bisher nicht quantifizierten Ungewissheiten in der Vorhersage von Spannungen und Bewegungsvektorfeldern in einem Endlager.

Die Beschreibung der Bedingungen für das Langzeit- und Hochtemperatur-Verhalten eines Endlagers benötigt die Extrapolation von Labordaten hin zu geringeren Verformungsraten und Differenzialspannungen. Es wird nicht gezeigt, warum die Stoffgesetze unter diesen Bedingungen unverändert bleiben. Dazu sind mikrostrukturelle Untersuchungen deformierter Proben und eine Integration der experimentellen Ergebnisse mit denen aus natürlichen Vorkommen notwendig. Der Vergleich Natur-Experiment begründet sich dadurch, dass in der Natur Gesteine unter geringeren Raten deformiert werden, die im Labor nicht simuliert werden können.

5.5.4 **Forschungsbedarf zu mechanischen Eigenschaften und Stoffgesetzen**

Im Folgenden wird der Forschungsbedarf zur verbesserten Abschätzung der mechanischen Eigenschaften und für eine zuverlässige Anwendung der Stoffgesetze aufgelistet.

- Um mikrostrukturelle Prozesse und ihren Einfluss auf die mechanischen und Transport-Eigenschaften sowie ihren Einfluss auf die Stoffgesetze zu erfassen, ist die Erstellung eines umfassenden, integrierten, mikrophysik-basierten Modells der Fluide entlang von Korngrenzen in den unterschiedlichen Einheiten des Salzstocks Gorleben für weiterführende Sicherheitsanalysen (nach VSG) notwendig.
- Mikrostrukturelle und mikromechanische Untersuchungen – entsprechend dem Stand der Forschung – aller Einheiten des Endlagers sind für weiterführende Sicherheitsanalysen (nach VSG) notwendig, um die Deformationsmechanismen zu evaluieren und Vorhersagen des Langzeit-Betriebs des Endlagers besser zu quantifizieren. Diese Untersuchungen sollten den Beginn der fluid-unterstützten Rekristallisation bestimmen sowie die Korngrenzstruktur und die Drucklösungsprozesse nach aktuellem Stand der Forschung quantifizieren.
- Eine multivariate Korrelation der mechanischen Eigenschaften mit quantitativen mikrostrukturellen Daten wird im Sinne einer wissenschaftlichen Absicherung empfohlen.
- Mikrostrukturelle Untersuchungen der EDZ und des Versatzes in Gorleben sind für weiterführende Sicherheitsanalysen (nach VSG) notwendig, um das Ausmaß von fluid-unterstützten Rekristallisationsprozessen und den Einfluss von Drucklösung bestimmen zu können.
- Für zukünftige Sicherheitsanalysen (nach VSG) ist die Erstellung einer Datenbank mit gesteinsmechanischen Kennwerten notwendig. Diese sollte alle Messergebnisse und die Kalibrationen der Messapparaturen beinhalten, um den Transfer in Stoffgesetze und die Statistik aus diesen Daten reproduzieren zu können.

5.6 Thermomechanische Modellrechnungen

5.6.1 Stand der Forschung

Es gibt eine wachsende Anzahl von Publikationen zu geomechanischen Modellen von Salz, die unterschiedliche Skalen, Raum und Zeit mit unterschiedlichen Geometrien und unterschiedlichen Stoffgesetzen berücksichtigen. Diese Modelle dienen als Werkzeuge, um komplexe Prozesse und Geometrien zu simulieren. Das Spektrum der betrachteten Skalen ist so groß, dass eine Hochskalierung der unterschiedlichen Klassen von Modellen notwendig ist. Beispiele für diese Arbeiten sind Modelle des Salzfließens im Beckenmaßstab /GEM 05/, /ING 10/, Simulationen des initialen Spannungszustands innerhalb und um Salzkörper /ZEE 11/, gravitative Prozesse zum Sinken dichter Einschlüsse in Salz /BUR 11/, /KOY 11/, Deformation und Entwicklung des Spannungszustandes um Bohrlöcher in Salz /WIL 02/ sowie die Entwicklung der Spannung und Versätze um untertägige Hohlräume /BGR 03b/, /NIP 00/. Bisher werden diese Modelle durch die verschiedenen natur- und ingenieurwissenschaftlichen Gruppen genutzt, ohne dass bisher eine schlüssige Integration der Modelle über die Disziplinen hinweg gelungen ist.

5.6.2 Überblick der erfolgten Arbeiten der BGR

Die thermischen und thermomechanischen Modelle zur Entwicklung der Spannungen und Versätze wurden auf Basis der Daten, die im Zuge der Exploration des Salzstocks Gorleben gewonnen wurden, durchgeführt. Die Modelle unterstützten die Interpretation der Überbohrungstests, das Design der untertägigen Hohlräume und die Vorhersage der Langzeitentwicklung. Diese Arbeiten werden in einigen Berichten dokumentiert, wie in /BGR 03b/, /NIP 00/ und zusammengefasst in /BRÄ 11/. Einige der ursprünglich geplanten Modelle konnten wegen des Moratoriums und des damit verbundenen Stopps der Arbeiten in Gorleben nicht durchgeführt werden.

Die Modelle nutzen den BGR ANSALT I Code, der die physikalischen Eigenschaften aus den Laboruntersuchungen, die zeitabhängige Deformation inklusive des stationären Fließens, die Dilatanz und die Bruchkriterien beinhaltet. Die weiter oben erwähnten fluid-unterstützten Prozesse an Korngrenzen wurden nicht in die Modelle implementiert. Die Ergebnisse der Berechnungen des Versatzes und der Spannung zeigt, dass mit dieser numerischen Methode eine gute Übereinstimmung von Messwerten und

Berechnungen erreicht werden kann. Allerdings wurden auch einige Unstimmigkeiten in den Berechnungen beobachtet, wie unrealistische Zugspannungen. Die Autoren stellen fest, dass für eine komplette Simulation der Messergebnisse und die genaue Vorhersage der zukünftigen Entwicklung von Versätzen und Spannungen in einem Endlager eine weitere Entwicklung des Modells notwendig sei /BGR 03b/, /NIP 00/.

5.6.3 **Bewertung der thermomechanischen Modellierung**

In den etwa zehn Jahren seit dem Ende der oben beschriebenen Modelluntersuchungen /BRÄ 11/ wurden in der geomechanischen Modellierung große Entwicklungen sowohl im Hinblick auf die numerischen Methoden als auch auf die Möglichkeiten der Hardware gemacht. Aktuelle geomechanische Modelle ermöglichen die 3D Berechnung komplexer Strukturen inklusive der Quantifizierung der Ungewissheit und die Beschreibung der Deformationslokalisierung, und sie erlauben die Simulation gekoppelter Prozesse. /BRÄ 11/ stellen fest, dass aufgrund des Moratoriums eine umfassende Simulation der durchgeführten Messungen und eine genaue Vorhersage der zukünftigen Versätze und Spannungen in einem Endlager nicht möglich waren. Die in /BGR 03b/, /NIP 00/, /BRÄ 11/ zusammengefassten Untersuchungen waren für die Notwendigkeiten im Stadium der Exploration angemessen, und die Autoren unterstützen die Anmerkungen von /BRÄ 11/ hinsichtlich einer notwendigen Weiterentwicklung der numerischen Simulationen für eine verlässliche und genaue Modellierung.

/NIP 00/, /NIP 88a/, /NIP 88b/, /NIP 88c/, /NIP 88d/ präsentieren Berechnungen zur Langzeitentwicklung der Spannungen und Bewegungen in einem 2D Modell des Salzstocks mit Endlager. Diese basieren auf einem geologischen Profil und beinhalten unterschiedliche Kriechklassen für die im Profil vorhandenen Gesteine. Diese Modellierungen sind, unter Berücksichtigung der zugrunde liegenden Daten und Technologien, beeindruckend. Ansatzweise konnten mit den Modellen die Ungewissheiten der Geometrien des geologischen Modells (siehe die Diskussion in Kap. 4.3.3) betrachtet werden. Es wurde keine volle Parameterstudie durchgeführt, um die Ungewissheiten der Vorhersagen zu quantifizieren, und die Effekte der 3D Komplexitäten sowie die unterschiedlichen Materialgesetze (Kap. 5.5.4) werden nicht berücksichtigt. Das führt zu einer unzureichenden Quantifizierung der Ungewissheiten. Daher können die Vorhersagen von /NIP 00/ durch die oben angeregte Weiterentwicklung der numerischen Modellierung verbessert werden.

Wie bereits in Kap. 5.5.1.2 erwähnt, bietet die aktive Salztektone ein natürliches Laboratorium, um Stoffgesetze über lange Zeit zu betrachten. Untersuchungen kommen zu dem Schluss, dass sich Salz unter bestimmten Randbedingungen wie ein Newtonsches Fluid verhalten kann und bei geringen Differenzialspannungen eine Viskosität besitzt, die mehrere Magnituden niedriger ist, als von der BGR vorhergesagt. Da die Schlussfolgerungen dieser Publikationen in starkem Kontrast zu den Ergebnissen der hier diskutierten Modelle stehen, ist es notwendig, diese Arbeiten für zukünftige Sicherheitsanalysen (nach VSG) zu berücksichtigen.

5.6.4 **Forschungsbedarf zur thermomechanischen Modellierung**

- Die Autoren unterstützen den Vorschlag der BGR für eine Weiterentwicklung der numerischen thermomechanischen Modelle, z. B. hinsichtlich der Qualifizierung von Stoffgesetzen zur Beschreibung von hydro-mechanischen Wechselwirkungen basierend auf einem grundlegenden geowissenschaftlichen Prozessverständnis.
- Die Autoren des vorliegenden Berichts halten für zukünftige Sicherheitsanalysen (nach VSG) eine Integration numerischer Modelle unter dem Aspekt der Kombination geowissenschaftlicher und ingenieurtechnischer Sichtweisen für notwendig. Diese sollen auf einem geometrischen Modell (Common Earth Model) mit quantifizierten Ungewissheiten beruhen und Stoffgesetze, wie in Kap. 5.5.4 beschrieben, beinhalten.
- Weiterhin ist eine Validierung der Modelle anhand eines integrierten Vergleichs der Modellrechnungen mit den in einer Datenbank abgelegten Messungen von Spannungen und Bewegungen des Salzstocks Gorleben für zukünftige Sicherheitsanalysen (nach VSG) notwendig.

6 Zusammenfassende Bewertung der Standortdaten und weiterer Forschungsbedarf

Insgesamt hat die Sichtung der bis zum Moratorium im Jahr 2000 zusammengefassten Daten und einiger danach gewonnener Erkenntnisse ergeben, dass die vorliegenden Daten zum Standort Gorleben sowohl hinsichtlich ihres Umfangs als auch hinsichtlich ihrer Qualität unter Berücksichtigung zum Teil großer Ungewissheiten für die Durchführung einer vorläufigen Sicherheitsanalyse geeignet sind. Für eine abschließende Sicherheitsanalyse jedoch sind die in diesem Bericht erarbeiteten Schlüsselaussagen zur Standortbewertung sowie des zukünftigen Forschungsbedarfs zu berücksichtigen. Diese sind im Folgenden mit Bezug zu den jeweiligen Schlusskapiteln abschließend zusammengefasst.

6.1 Bewertung und Forschungsbedarf – Standortdaten zur Hydrogeologie des Deckgebirges

Im Bereich der hydrogeologischen Standortbeschreibungen (Standortbeschreibung Gorleben Teil 1, /KLI 07/) ist der Datenstand insgesamt als sehr gut zu bewerten. Die Daten genügen in Umfang und Qualität den Anforderungen, die bei Standortuntersuchungen für Sicherheitsanalysen zu Grunde gelegt werden. Von hoher Qualität im Hinblick auf Datenumfang und Datendokumentation sind die hydraulischen Parameter, die Temperaturmessungen, die Grundwasserchemie und die Wasserstandsmessungen. Hier finden sich in den Berichten Informationen zu der Anzahl der Messungen und meist auch Hinweise auf die Genauigkeit der Daten. Auch die jeweils eingesetzten Auswertemethoden sind genannt und nachvollziehbar erläutert. Weniger gut dokumentiert sind die thermischen Parameter des Deckgebirges. Direkte Wärmeleitfähigkeitsmessungen an Bohrproben konnten nur eingeschränkt durchgeführt werden, so dass dieser Parameter aus Bohrlochmessdaten abgeleitet wurde. Die methodische Vorgehensweise ist hierbei nicht nachvollziehbar. Das gilt auch für andere Parameter, die aus Bohrlochmessdaten abgeleitet wurden (Porosität, Tonvolumen). Hier fehlen Angaben zu den benutzten Methoden und eine Verifizierung der berechneten Parameter mit unabhängigen Daten z. B. aus dem Labor. Eine solche Kalibrierung wird nur für die Ableitung der Porenwasserdichte bzw. Porenwassersalinität aus Bohrlochlogs gezeigt. Hier wurden die Daten mit unabhängigen Messdaten zur Porenwassersalinität (in-situ Messung in den Filterstrecken der Bohrungen) kalibriert. Eine vergleichbare Dokumen-

tation der Vorgehensweisen und Methoden sollte auch für alle anderen aus Logs abgeleiteten Größen erfolgen, wobei die Qualität der Primärdaten dargelegt werden sollte und Ungewissheiten wenn möglich quantifiziert werden sollten.

Für alle über die VSG hinausgehenden weiteren Forschungs- und Erkundungsarbeiten für den Standort Gorleben als auch für eine weitere Endlagersuche ist es notwendig, den Datenbestand der BGR so zu archivieren, dass alle geologischen, bohrlochgeophysikalischen, petrophysikalischen und geochemischen Informationen und Daten in einer Datenbank zugänglich gemacht werden, bzw. zumindest in digitalen Datenformaten für weitere Arbeiten zur Verfügung stehen. Diese Überführung des Datenstandes in digitale Formate (z. B. Tabellenformate für Labordaten, LAS-Archive für Logdaten, vereinheitlichte digitale Bohrprofile und Gesteinsbeschreibungen) sollte von einer vollständigen Digitalisierung aller BGR Berichte inklusive Anlagen und Karten begleitet werden.

Als notwendiger Forschungsbedarf für weiterführende Sicherheitsanalysen (nach VSG) ist im Bereich Hydrogeologie vor allem die Erstellung eines 3D Grundwassermodells zu nennen, in dem sowohl verschiedene Dichten als auch Viskositäten der Grundwässer berücksichtigt werden. Ein solches 3D Modell existiert /KLI 07/ bislang nicht. Nur über ein solches 3D Modell können Informationen zu den langfristigen Grundwasserbewegungen im Deckgebirge und speziell in der Gorlebener Rinne bereitgestellt werden. Diese Informationen sind wichtig, um Auskunft über Verweilzeiten und Ablaugungsraten im Kontaktbereich zum Salinar zu erhalten. Da für eine Grundwassermodellierung sowohl die exakte Bestimmung der Geometrien der Modelleinheiten als auch die möglichst genaue Erfassung der zugehörigen Parameter von entscheidender Bedeutung sind, ist es notwendig, die in das Modell eingehenden Parameter wie Porosität, Permeabilität, effektive Wärmeleitfähigkeit, Wärmestromdichte, Dichte und Viskosität der Wässer einer Prüfung zu unterziehen. Für weitere Betrachtungen der Grundwasserchemie und ihrer Abhängigkeit von den gelösten, transportierten und gegebenenfalls auch wieder ausgefällten Salzen ist es notwendig, Grundwassermodellierungen durchzuführen, die neben den gekoppelten hydraulisch-thermischen Prozessen auch den reaktiven Stofftransport mit berücksichtigen.

6.2 Bewertung und Forschungsbedarf – Standortdaten zur Geologie des Deck- und Nebengebirges und Standortdaten zum Salinar

Ein über 20 Jahre umfassender Untersuchungszeitraum gewährleistete eine sehr detaillierte Bestandsaufnahme im Gelände zur Erhebung der Standortdaten zur Geologie des Deck- und Nebengebirges (Standortbeschreibung Gorleben Teil 2, /KÖT 07/). Diese wurden durch ein geologisch-geophysikalisches Erkundungsprogramm unterstützt (Standortbeschreibung Gorleben Teil 3, /BOR 08/). Die stratigraphische Abfolge ist ebenso gut etabliert wie die durch Bohrungen belegten geologischen Gegebenheiten im flacheren Untergrund. Der tiefere Untergrund mit den Salzflanken und den unterlagernden prä-permischen Schichten ist durch zwei Bohrungen und eine 2D Seismik von 1984 weniger gut belegbar.

Bewertung und Forschungsbedarf – 3D Geometrie des Salzstocks Gorleben und geophysikalische Erkundung

Die bisher existierenden Querschnitte des Salzstocks (z. B. Abb. 41 in /KÖT 07/) sind als Projektionen bzw. geologische Modellvorstellungen zu betrachten. Sie basieren auf einer Integration der erhobenen Geländedaten, Bohrlochdaten (Kerne und Messungen), Messungen aus der Erkundungsebene heraus sowie der 2D Seismik. Letztere ist jedoch ungeeignet, um ein hochauflösendes Bild vor allem der Salzstockflanken zu liefern. Die Außengeometrie des Salzstocks ist demnach mit großen, bisher nicht quantifizierten Ungewissheiten behaftet, da kein schlüssiges geometrisches kinematisches und dynamisches Modell der Struktur des Körpers und seines Umfeldes existiert. Auch die Verteilung und das Volumen des Hauptsalzkörpers über dem Einlagerungsbereich ist bisher unzureichend quantifiziert worden. Die Modellvorstellungen zur strukturellen Entwicklung des Salzstocks und seines Hut- und Nebengesteins (z. B. Abb. 38 in /KÖT 07/ sowie des avisierten Salzflusses sind ebenso eher qualitativ einzuschätzen.

Aus diesem Grunde ist es für zukünftige Sicherheitsanalysen notwendig, der Quantifizierung der internen und externen Geometrie des Salzstockes bzw. anderer Einlagerungskörper höchste Bedeutung zuzuschreiben. Daten hierzu sollten aus geophysikalischen Erkundungsprogrammen erzeugt werden. Hierzu ist die Akquisition eines hochauflösenden 3D seismischen Datensatzes mit Fokus auf die Salzflankenabbildung und die interne Strukturierung des Salzstocks vor allem der Anhydritschollen notwendig. Basierend auf einem solchen PSDM prozessierten, 3D seismischen Datensatz,

sollte eine 3D seismische Interpretation mit Attributanalyse erfolgen. Diese dient der Detektion von Störungen, der Verbesserung des geometrischen Modells des Salzstocks und einer besseren Abbildung der Gorlebener Rinne. Ein weiterer Schritt zur Quantifizierung ist die Methode der „Quantitativen Seismischen Interpretation“ zur Bestimmung von Gesteins- und Fluidvolumina und -typen. Als finales Produkt kann auf Basis dieser neuen Daten der Aufbau eines quantitativen Common Earth Modells nach Standards der Kohlenwasserstoffindustrie entstehen.

Gleichzeitig ergibt sich auch für die EMR Messungen zusätzlicher Bedarf im Rahmen der weiteren Erkundung. Hier kann als Themenschwerpunkt der Abgleich seismischer Daten mit EMR Messungen genannt werden. Ein Vergleich der akustischen mit den elektrischen Impedanzen für die im Salinar auftretenden Gesteinstypen würde hier zu einem Erkenntnisgewinn führen.

Zur weiteren wissenschaftlichen Absicherung werden methodische Weiterentwicklungen zur verbesserten Erfassung von lösungsführenden Bereichen empfohlen. Mit den eingesetzten EMR Verfahren lassen sich lösungsführende Bereiche im Salz aufgrund der diffusen Verteilung in der Regel bislang weniger scharf abgrenzen. Hier könnte weitere Forschung zu einer kombinierten Auswertung von seismischen und EMR Daten führen, die möglicherweise wichtige Informationen zur Verteilung, Größe und Geometrie der Lösungsvorkommen erbringen würde. Denkbar sind hier methodische Fortschritte im Hinblick auf die Abbildungsgenauigkeit und Identifizierbarkeit von Lösungsvorkommen, die von ergänzenden Laboruntersuchungen (systematische Untersuchungen von Änderungen der akustischen und elektrischen Eigenschaften bei lösungsführenden Salzgesteinen) flankiert werden sollten.

Als weiteres Werkzeug der Strukturerkennung sollten auch neuere methodische Entwicklungen der Visualisierung mikroseismischer Ereignisse in Salzstöcken Berücksichtigung finden. Seismische Emissionen von Mikrorissen im Umfeld einer Kaverne im Salzstock Morsleben konnten genutzt werden, um strukturelle Heterogenitäten im Salzstock zu erfassen und lieferten Indikatoren zur Gebirgsspannung und zu der viskoelastischen Relaxation im Salz /KÖH 09/.

Es ist zu erwarten, dass über eine Verschneidung hoch aufgelöster Seismik mit EMR-Messungen und mikroseismischen Analysen eine deutlich verbesserte Erfassung der Internstruktur des Salzstockes möglich ist und die Ungewissheiten bezüglich Raumlagen und Distanzen der Strukturelemente dadurch erheblich verringert werden können.

Bewertung und Forschungsbedarf – Geologische Entwicklung der Salzstruktur deren Umfeld (Struktur, Kinematik)

Die bisher vorliegenden Bilanzierungen von Salzaufstiegs- und Sedimentationsraten basieren auf Bohrungen hauptsächlich im Hutbereich, flachseismischen Messkampagnen zur Erkundung der Lagerungsverhältnisse im Quartär und Tertiär, und Messungen im Einlagerungsbereich. Der gesamte Teufenbereich des Salzstocks wurde bisher jedoch mit keiner der Methoden erfasst. Kalkulationen und die Modellvorstellungen zur Kinematik des Salzstocks stützen sich auf eine qualitative Inversion der Schichtmächtigkeiten und der verwendeten Paläostrukturschnitte. Die Ausbildung der Salzflankenbereiche ist entsprechend der Darstellungen in den vereinfachten Schnittbildern des Salzstocks mit nicht quantifizierten, hohen Ungewissheiten dargestellt. Die bisherige Datenlage erlaubt es daher nicht, ein quantifizierbares kinematisches Modell des gesamten Salzstocks und seines Nebengesteins durchzuführen.

Es besteht für weiterführende Sicherheitsanalysen (nach VSG) Forschungsbedarf, um die dreidimensionale externe und interne Struktur des Salzstocks Gorleben und seine räumlich-zeitliche Entwicklung zu quantifizieren. Hierfür ist eine integrierte 3D kinematische und dynamische Bilanzierung mit Hilfe einer neuen 3D Seismik (siehe oben) notwendig, die als feedback-Mechanismus für aufgestellte Struktur- und Fluid-Modelle (siehe unten) einen wertvollen Beitrag zur Reduktion geologischer Ungewissheiten liefern kann. Die mögliche Quantifizierung der Deformationsraten und eine gegenüber dem augenblicklichen Kenntnisstand verbesserte Abschätzung der Salzaufstiegsraten unterstützt dabei die Definition des Ist-Zustands und die Vorhersage zukünftiger Bewegungen des Salzstocks nach der Einlagerung.

Zudem ist eine integrierte Analyse der 3D Internstrukturen des Salzstocks Gorleben unter Zuhilfenahme aller verfügbarer Informationen (Lithologie, Petrographie integriert mit Strukturbau, Statistik von Gefügeelementen, Mikrotektonik, kinematische und dynamische Modellierung der Strukturentwicklung) notwendig. Es sollte hierbei das Ziel sein, auf Basis reduzierter und quantifizierter Ungewissheiten eine quantitative Betrachtung des Ist-Zustandes zu erreichen und damit die Vorhersage zum zukünftigen Verhalten des Endlagers zu verbessern. Diese Vorgehensweise führt zu einer Präzisierung und Quantifizierung der Ungewissheiten in den Modellvorhersagen.

Basierend darauf ist die Erstellung eines konsistenten „Common Earth Models“ für zukünftige Sicherheitsanalysen notwendig. Ein derartiges Modell des Salzstocks Gorle-

ben und des Nebengebirges basiert auf einer konsistent geführten Datenbank mit allen erhobenen Daten, der klaren Darstellung der verwendeten Methoden, Hinweisen zur Qualität der alten und neuen Daten, und einer Quantifizierung der Ungewissheiten bzw. Fehlergrenzen der Geometrie. Mit diesem Ansatz können die Ungewissheiten der 3D Geometrien quantifiziert und validiert und die Qualität der 3D Geometrien durch einen Vergleich von Prognosen vor dem Abteufen von Bohrungen und vor dem Anfahren von Strecken mit den tatsächlichen Ergebnissen getestet werden. Durch den Vergleich von Prognosen mit möglichen Ergebnissen können Hinweise und Anleitungen im Umgang mit den Ungewissheiten der Modelle und Profile gewonnen werden. Gleichzeitig kann eine Abschätzung erreicht werden, in welchem Ausmaß potentielle alternative Geometrien anhand der vorliegenden Daten konstruiert werden können und welchen Einfluss alternative Geometrien beispielsweise auf die Berechnungen des thermo-mechanischen Verhaltens oder die Transportprozesse in einem Endlager haben.

Bewertung und Forschungsbedarf – Fluide (salinare Lösungen und Kohlenwasserstoffe) im Salzstock Gorleben

Im Salzstock Gorleben wurde eine hohe Anzahl qualitativ hochwertiger geochemischer und hydraulischer Daten zu Fluiden erhoben /NOW 02a/, /SCH 09/, /BfS 02/. Die Datenanalyse ist ausführlich und klar dargestellt. Die Interpretation der geochemischen Daten zeigt, dass die Fluide dem Zechstein zuzuordnen sind und durch interne Migration und Metamorphose gebildet wurden. Ebenso wird deutlich, dass der Fluidtyp und -inhalt stark von der jeweiligen Position im Salzstock abhängt. In einigen Bereichen wurden kaum Fluide vorgefunden, während in anderen Bereichen relativ große Vorkommen von Fluiden verzeichnet und analysiert werden konnten.

Die Erstellung eines dynamischen Modells der Mobilität und Migration der Fluide über lange Zeiträume im Salzstock Gorleben ist zukünftig für den Abschluss weiterführender Sicherheitsanalysen notwendig. Der Ist-Zustand der Fluide kann damit besser erklärt und Langzeitvorhersagen der möglichen Migration von Fluiden im Endlager besser quantifiziert werden. Dieses Modell muss auf einer mikrophysikalischen Grundlage aufgebaut werden, mit mikrostrukturellen, petrophysikalischen und geochemischen Daten von Salzgesteinen, die Fluide enthalten, als Basis.

Eine geostatistische Analyse von Lokationen, Größen, Drucken und Volumina von Fluidvorkommen ist für weiterführende Sicherheitsanalysen notwendig um ein Modell mit quantitativen Vorhersagen für nicht erbohrte Volumina zu erstellen.

6.3 Bewertung und Forschungsbedarf – Geotechnische Untersuchungen am Standort

Bewertung und Forschungsbedarf – Geothermische Daten im Salinar und Nebengebirge

Die vorhandenen Temperaturdaten sind – bis auf ein Temperaturlog – von guter Qualität. Insbesondere die Messungen in den Bohrungen auf der Erkundungssohle sind sehr gut dokumentiert und, soweit aus ihrer Darstellung ersichtlich, von hoher Qualität. Die verschiedenen Korrekturmethode sind detailliert erläutert. Für die Interpretation des Temperaturfeldes im Nordteil des Salzstocks ist die Datendichte gering und daher mit Ungewissheiten behaftet. Zur weiterführenden wissenschaftlichen Absicherung werden 3D Simulationsrechnungen zum Verständnis des natürlichen Temperaturfeldes und seiner Variationen empfohlen.

Die Datenlage hinsichtlich der Labormessungen der thermischen Eigenschaften aus der ersten Erkundungsphase ist nicht beurteilbar, da in den vorliegenden Berichten kaum Primärdaten verfügbar sind. Dies erschwert die Einschätzung der Qualität und Variabilität dieser Daten. Die gewonnenen Daten aus dem Zeitraum von 1996 – 2000 sind hingegen sehr gut dokumentiert. Alle Einzeldaten sind tabellarisch aufgelistet und mit entsprechenden Metadaten versehen. Soweit einschätzbar, sind diese von hoher Qualität. Eine Auflistung aller in Gorleben erfassten Daten in solcher Art und Weise ist für alle weiteren Standorterkundungen und andere Standortsuchen erforderlich.

Anzumerken ist, dass die Probenanzahl bzw. Messungen (soweit zugänglich) nicht für alle Gesteinsarten ausreichen, um statistische Untersuchungen durchzuführen. Dies ist jedoch erforderlich, um eine fundierte Datenbasis für belastbare abschließende Modellstudien zu erlangen. Als Forschungsbedarf für weiterführende Sicherheitsanalysen (nach VSG) ergibt sich hier eine statistisch ausreichende Verdichtung des Datenstandes im Salinar, sei es anhand schon genommener Proben oder im Zuge der weiterführenden Erkundung. Weiterhin ist eine Überprüfung der Kennwerte für das Nebengebirge notwendig. Hier könnte eine Einbeziehung von Probenmaterial bzw. die Re-interpretation von Daten (Bohrlochmessdaten) aus benachbarten Kohlenwasser-

stoffbohrungen hilfreich sein, da das Nebengebirge im Rahmen der Gorleben-spezifischen Erkundungsbohrungen nur im geringen Maße erbohrt wurde. Zur Vervollständigung der Standortcharakterisierung sollte auch die natürliche radiogene Wärme-produktionsrate der Gesteine bzw. Durchschnittswerte für die stratigraphischen Einheiten bestimmt werden, um in den Modellen die natürlichen Wärmequellen des vorliegenden Systems zu berücksichtigen.

Bewertung und Forschungsbedarf – Hydraulische Daten Salinar

Die hydraulischen Untersuchungen ergaben eine Vielzahl von qualitativ hochwertigen Daten, welche sehr ausführlich in /NOW 02b/ dargestellt sind. Es konnten in einigen Bereichen des Salzstocks Obergrenzen für die Permeabilitäten nachgewiesen werden, die dort die hydraulische Dichtheit des Salzgebirges bestätigen. Wegen der nicht weitergeführten Erkundung auf Grund des Moratoriums ist allerdings eine abschließende Bewertung des Salzstocks hinsichtlich der Permeabilität nicht möglich.

Die Autoren unterstützen die Forderung der BGR /BRÄ 11/, /NOW 02b/ nach der weitere Studien zur vollständigen Charakterisierung der hydraulischen Eigenschaften des Salzstocks notwendig sind. Diese konnten wegen des Moratoriums nicht zu Ende geführt werden.

Bewertung und Forschungsbedarf – Thermische Modellrechnungen, Eingangparameter und Konzepte

Im Hinblick auf die in Modellrechnungen genutzten geothermischen Daten sind die erläuterten Randbedingungen nicht eindeutig nachvollziehbar. In welchem Maße Ungewissheiten eingehen, ist nicht ersichtlich.

Bei den thermischen Parametern ist die Herkunft der Daten aus den Berichten nicht erkennbar, es werden keine Variabilitäten genannt und ihr Einfluss auf die Modelle nicht diskutiert. Weiterhin ist der wichtige Aspekt der Temperaturabhängigkeit unzureichend dargestellt. Es wird nicht deutlich, für welche Bereiche des Nebengesteins Abhängigkeiten angenommen werden und für welche nicht. Auch die verwendete Datenbasis hierfür ist in den vorliegenden Berichten nicht dokumentiert. Die radiogene Wärmeproduktion wurde sowohl bei den Labormessungen als auch bei den Modellen nicht berücksichtigt.

Generell sind zukünftig für den Abschluss weiterführender Sicherheitsanalysen weitere Modellrechnungen notwendig. Mit dreidimensionalen Studien des Temperaturfeldes auf Basis von Messdaten aus allen Erkundungsphasen können dann statistisch belastbare Aussagen zum Temperaturfeld und zum Einfluss verschiedener Parametervariationen gemacht werden.

Bewertung und Forschungsbedarf – Geomechanische in-situ Spannungsmessungen

/BRÄ 11/ geben Hinweise für weiterführende Labormessungen, in-situ Beobachtungen und Modellrechnungen. Die Autoren empfehlen, diesen Anmerkungen zu folgen. Hierbei sollte das gesamte Potential dieser Untersuchungen ausgeschöpft werden, indem die Messungen besser mit den anderen Daten und Modellen des Salzstocks und des Endlagers integriert werden.

Es ist deshalb für den Abschluss weiterführender Sicherheitsanalysen notwendig, weiterführende Forschung durchzuführen, bei der die initialen in-situ Spannungsmodelle verfeinert und die geringen, aber signifikanten Abweichungen vom bisher angenommenen, isotropen Spannungszustand berücksichtigt werden (Kap. 4.3.3). Hierzu sind geomechanische Modelle der geologischen Entwicklung des Salzstocks sowie ein verbessertes Modell der Dichteverteilung und der Geometrie des Salzstocks zu erarbeiten.

Zusammenfassend besteht für weiterführende Sicherheitsanalysen die Notwendigkeit einer Integration aller Spannungs- und Versatzmessungen in einem konsistenten, quantifizierten (inklusive der Ungewissheiten) Modell der gesamten Gorleben-Struktur. Dazu sollten die aktuellsten Modelle (und ihre Ungewissheiten) der Geometrie, der physikalischen Eigenschaften und der Randbedingungen genutzt werden, um einen Vergleich der Messungen mit den Vorhersagen (in-situ Spannung, Versatz) machen zu können. So könnte ein validiertes Modell des Salzstocks erstellt werden, welches deutlich besser abgesicherte Vorhersagen des zukünftigen Verhaltens des Endlagers erlaubt.

Forschungsbedarf – Mechanische Eigenschaften und Stoffgesetze

Um mikrostrukturelle Prozesse und ihren Einfluss auf die mechanischen und Transport-Eigenschaften zu erfassen, ist für weiterführende Sicherheitsanalysen die Erstellung eines umfassenden, integrierten, mikrophysik-basierten Modells der Fluide ent-

lang von Korngrenzen in den unterschiedlichen Einheiten des Salzstocks Gorleben sowie ihr Einfluss auf die Stoffgesetze notwendig.

Mikrostrukturelle und mikromechanische Untersuchungen – entsprechend dem Stand der Forschung – aller Einheiten des Endlagers sind notwendig, um die Deformationsmechanismen zu evaluieren und Vorhersagen der Langzeitentwicklung des Endlagers besser zu quantifizieren. Diese Untersuchungen sollten die Relevanz der fluid-unterstützten Rekristallisation für die stattfindenden Verformungsprozesse sowie die Korngrenzstruktur und die Drucklösungsprozesse nach aktuellem Stand der Forschung quantifizieren.

Diese Vorgehensweise sollte im Sinne einer weiteren wissenschaftlichen Absicherung eine multivariate Korrelation der mechanischen Eigenschaften mit quantitativen mikrostrukturellen Daten ebenso wie mikrostrukturelle Untersuchungen der EDZ in Gorleben beinhalten, um das Ausmaß von fluid-unterstützten Rekristallisationsprozessen zu bestimmen.

Die Erstellung einer gesteinsmechanischen Datenbank mit gesteinsmechanischen Kennwerten, die alle Messergebnisse und die Kalibrationen der Messapparaturen beinhalten, ist notwendig.

Forschungsbedarf – Thermomechanische Modellierung

Die Autoren unterstützen den Vorschlag der BGR für eine umfassende Auffrischung der numerischen, thermomechanischen Modelle, z. B. hinsichtlich der Qualifizierung von Stoffgesetzen zur Beschreibung von hydro-mechanischen Wechselwirkungen basierend auf einem grundlegenden geowissenschaftlichen Prozessverständnis.

Die Autoren halten eine Integration numerischer Modelle, sofern benötigt in 3D, mit unterschiedlichen zur Verfügung stehenden Skalen, basierend auf einem konsistenten geometrischen Modell (Common Earth Model – Verknüpfung geowissenschaftlicher und ingenieurtechnischer Sichtweisen), für zukünftige Sicherheitsanalysen (nach VSG) für notwendig.

Es ist für den Abschluss weiterführender Sicherheitsanalysen eine Serie von Modellen notwendig, die die geologische und geomechanische Entwicklung zur Quantifizierung der initialen Zustände des Salzstocks Gorleben beinhaltet. Die Modelle sollten dabei

die Ungewissheiten der 3D Geometrien, integrierte Materialgesetze (in diesem Bericht diskutiert), und eine Parameterstudie zur Quantifizierung der Ungewissheiten hinsichtlich der Vorhersagen und des Spektrums möglicher Ergebnisse berücksichtigen.

Literaturverzeichnis

- /AIT 05/ Ait-Messaoud, M., Boulegroun, M.-Z., Gribi, A., Kasmi, R., Touami, M., Anderson, B., Van Baaren, P., El-Emam, A., Rached, G., Pickering, S., Moldoveanu, N., Özbek, A.: New Dimensions in Land Seismic Technology. Oilfield Review, Vol. 17, No. 3, S. 42-53, 2005.
- /ALB 90/ Albrecht, H., Hunsche, U., Plischke, E., Schulze, O.: Mapping of the mechanical properties of a salt dome. In: Proceedings of the 6th Congress of the International Association of Engineering Geology (IAEG), Vol. I, Price, D.G. (Editor), S. 23-29: Amsterdam, 1990.
- /ALB 91/ Albrecht, H., Böhme, J., Bornemann, O., Delisle, G., Eisenburger, D., Faber, E., Fielitz, K., Fischbeck, R., Fritsch, J., Gerling, P., Giesel, W., Hollmann, A., Hunsche, U., Jaritz, W., Kopietz, J., Leydecker, G., Ludwig, R., Nickel, H., Nipp, H.-K., Plischke, E., Schelkes, K., Schmidt, G., Schulze, O., Strebel, O., Tittel, G., Zirngast, M.: Übertägige geowissenschaftliche Erkundung des Standortes Gorleben. Zusammenfassender Bericht, Stand 01.01.1990, Archiv-Nr. 108 880, 369 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1991.
- /APE 06/ Apel, M.: From 3d geomodelling systems towards 3d geoscience information systems: Data model, query functionality, and data management. Computers & Geosciences, Vol. 32, No. 2, S. 222-229, DOI 10.1016/j.cageo.2005.06.016, March 2006.
- /APP 02/ Appold, M.S., Nunn, J.A.: Numerical models of petroleum migration via buoyancy-driven porosity waves in viscously deformable sediments. Geofluids, Vol. 2, No. 3, S. 233-247, DOI 10.1046/j.1468-8123.2002.00040.x, August 2002.
- /ARR 12/ Arrhenius, S., Lachmann, R.: Die physikalisch-chemischen Bedingungen bei der Bildung der Salzlagerstätten und ihre Anwendung auf geologische Probleme. Geologische Rundschau, Vol. 3, No. 3, S. 139-157, DOI 10.1007/BF01801982, Mai 2012.

- /AVS 10/ Avseth, P., Mukerji, T., Mavko, G.: Quantitative Seismic Interpretation: Applying Rock Physics Tools to Reduce Interpretation Risk. ISBN: 978-0-521-15135-1, 408 Seiten, Cambridge University Press, 2010.
- /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.
- /BAR 33/ Barton, D.C.: Mechanics of formation of salt domes with special reference to Gulf coast salt domes of Texas and Louisiana. AAPG Bulletin, Vol. 17, S. 1025-1083, September 1933.
- /BEK 07/ Bekendam, R.F., Urai, J.: Pillar deformation-induced surface subsidence in the Hengelo brine field, the Netherlands. In: The Mechanical Behavior of Salt – Understanding of THMC Processes in Salt, Wallner, M., Lux, K.H., Minkley, W., Hardy, H.R. (Editoren), S. 369-376, 2007.
- /BÉR 05a/ Bérest, P., Brouard, B., Karimi-Jafari, M.: Deep salt cavern abandonment, Post-Mining: Nancy, France, 16.-17. November 2005.
- /BÉR 05b/ Bérest, P., Blum, P.A., Charpentier, J.P., Gharbi, H., Valès, F.: Very slow creep tests on rock samples. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 42, S. 569-576, 2005.
- /BÉR 10/ Bérest, P., Brouard, B., Hévin, A.: A 12-year cavern abandonment test. EPJ Web of Conferences, Vol. 6, id: 22003, DOI 10.1051/epjconf/20100622003, 2010.
- /BGR 03a/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Projekt Gorleben - Das natürliche Temperaturfeld im Erkundungsbereich 1. Abschlussbericht, Archiv-Nummer: 123780: Hannover, 2003.
- /BGR 03b/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Projekt Gorleben - Erkundungsbegleitende großräumige gebirgsmechanische Berechnungen. Abschlussbericht, 9G4141800000: Hannover, 2003.

- /BOR 64/ Borchert, H., Muir, R.O.: Salt deposits: the origin, metamorphism and deformation of evaporites. London, Princeton, N.J., Van Nostrand, 1964.
- /BOR 08/ 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, ISBN 978-3-510-95964-8, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2008.
- /BRA 12/ Bracke, G., Popp, T., Püttmann, W., Kienzler, B., Lommerzheim, A., Moog, H.: Berücksichtigung der Kohlenwasserstoffvorkommen in Gorleben. Bericht der Arbeitsgruppe "Kohlenwasserstoffe", Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-285, ISBN: 978-3-939355-61-8, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /BRÄ 11/ Bräuer, V., Eickemeyer, R., Eisenburger, D., Grissemann, C., Hesser, J., Heusermann, S., Kaiser, D., Nipp, H.-K., Nowak, T., Plischke, I., Schnier, H., Schulze, O., Sönke, J., Weber, J.R.: Description of the Gorleben site Part 4: Geotechnical exploration of the Gorleben salt dome. ISBN 978-3-9814108-0-8, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2011.
- /BRE 03/ Breunese, J.N., van Eijs, R.M.H.E., de Meer, S., Kroon, I.C.: Observation and prediction of the relation between salt creep and land subsidence in solution mining – The Barradeel case. SMRI conference: Chester, UK, 2003.
- /BRI 90/ Brigaud, F., Chapman, D.S., Le Douran, S.: Estimating thermal conductivity in sedimentary basins using lithologic data and geophysical well logs. AAPG Bulletin, Vol. 74, No. 9, S. 1459-1477, September 1990.
- /BRI 92/ Brink, H.J.: Some aspects of the late and post-Variscan development of the Northwestern German Basin. Tectonophysics, Vol. 207, No. 1-2, S. 65-95, DOI 10.1016/0040-1951(92)90472-I, 1992.

- /BUC 96/ Buchanan, P.G., Bishop, D.J., Hood, D.N.: Development of salt-related structures in the Central North Sea: results from section balancing. The Geological Society, Vol. 100, No. 1, S. 111-128, DOI 10.1144/GSL.SP.1996.100.01.09, 1996.
- /BUL 06/ Bulat, J., Long, D.: Use of 3D Seismic data as a substitute for high resolution seismic surveys for site investigation. British Geological Survey for the Health and Safety Executive 2006, Research Report 459, Health and Safety Executive (HSE), 2006.
- /BUN 07/ Bungler, S.: Grundlagen der Horizontalbohrtechnik. ISBN 3802753259, Vulkan-Verlag GmbH, 2007.
- /BUR 11/ Burchardt, S., Koyi, H.A., Schmeling, H.: Strain pattern within and around denser blocks sinking within Newtonian salt. Journal of Structural Geology, Vol. 33, No. 2, S. 145-153, DOI 10.1016/j.jsg.2010.11.007, 2011.
- /CAM 98/ Campos de Orellana, A.J.: Non-associated pressure solution creep in salt rock mines. In: Mechanical Behavior of Salt, Vol. 22, S. 429-444, Trans Tech Publications, Series on Rock and Soil mechanics: Clausthal-Zellerfeld, 1998.
- /CAR 93/ Carter, N.L., Horseman, S.T., Russell, J.E., Handin, J.: Rheology of rocksalt. Journal of Structural Geology, Vol. 15, No. 9-10, S. 1257-1271, DOI 10.1016/0191-8141(93)90168-A, 1993.
- /CAR 05/ Cartwright, J.A., Huuse, M.: 3D seismic technology: the geological 'Hubble'. Basin Research, Vol. 17, No. 1, S. 1-20, DOI 10.1111/j.1365-2117.2005.00252.x, 2005.
- /CAR 07/ Cartwright, J.A.: The impact of 3D seismic data on the understanding of compaction, fluid flow and diagenesis in sedimentary basins. Journal of the Geological Society, Vol. 164, No. 5, S. 881-893, DOI 10.1144/0016-76492006-143, 2012.

- /ČER 82/ Čermák, V., Rybach, L.: Thermal conductivity and specific heat of minerals and rocks. In: Landolt-Börnstein: Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology, Angenheister, G. (Editor), S. 305-343, Springer Verlag: Berlin, 1982.
- /CHI 04/ Chiles, J.P., Aug, C., Guillen, A., Lees, T.: Modeling the Geometry of Geological Units and its Uncertainty in 3D From Structural Data: The Potential Field Method. S. 313-320, Proceedings of Orebody Modeling and Strategic Mine Planning - Uncertainty and Risk Management: Perth, WA, 22. - 24. November 2004.
- /CLA 06/ Clauser, C.: Geothermal Energy. In: Landolt-Börnstein, Group VIII: Advanced Materials and Technologies. Vol. 3: Energy Technologies, Subvol. C: Renewable Energies, Heinloth, K. (Editor), S. 493-604, Springer Verlag: Heidelberg-Berlin, 2006.
- /COW 95/ Coward, M., Stewart, S.: Salt-influenced structures in the Mesozoic-Tertiary cover of the southern North Sea, U.K. In: Salt tectonics; a global perspective, Vol. 65, Jackson, M.P.A., Roberts, D.G., Snelson, S. (Editoren), S. 229-250, AAPG Memoir, 1995.
- /CRI 98a/ Cristescu, N.D.: Evolution of damage in rocksalt. In: Mechanical Behavior of Salt, Vol. 22, S. 131-142, Trans Tech Publications, Series on Rock and Soil mechanics: Clausthal-Zellerfeld, 1998a.
- /CRI 98b/ Cristescu, N.D., Hunsche, U.: Time Effects in Rock Mechanics. ISBN 0471955175, Wiley & Sons, 1998.
- /DAV 89/ Davies, J.L., Annan, A.P.: Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. Geophysical Prospecting, Vol. 37, No. 5, 1989.
- /DAV 04/ Davies, R.J., Cartwright, J.A., Stewart, S.A., Lappin, M., Underhill, J.R. (Editoren): 3d Seismic Technology: Application to the Exploration of Sedimentary Basins. The Geological Society Memoir, Vol. 29, 2004.

- /DEL 80/ Delisle, G.: Berechnungen zur raumzeitlichen Entwicklung des Temperaturfeldes um ein Endlager für mittel- und hochaktive Abfälle in einer Salzformation. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Vol. 131, S. 461-482, Januar 1980.
- /DEL 95/ Dell'Angelo, L.N., Olgaard, D.L.: Experimental deformation of fine-grained anhydrite: Evidence for dislocation and diffusion creep. Journal of Geophysical Research, Vol. 100, No. B8, S. 15425-15440, DOI 10.1029/95JB00956, 1995.
- /DEM 91/ Demongodin, L., Pinoteau, B., Vasseur, G., Gable, R.: Thermal conductivity and well logs: a case study in the Paris basin. Geophysical Journal International, Vol. 105, No. 3, S. 675-691, DOI 10.1111/j.1365-246X.1991.tb00805.x, 1991.
- /DOR 98/ Dorn, A.G.: Modern 3-D seismic interpretation. The Leading Edge, Vol. 17, No. 9, S. 1262-1272, DOI 10.1190/1.1438121, September 1989.
- /DOV 79/ Doveton, J.H., Cable, H.W.: Fast matrix methods for the lithological interpretation of geophysical logs. Computers & Geology, Vol. 3, S. 101-116, 1979.
- /DOV 97/ Doveton, J.H., Förster, A., Merriam, D.F.: Predicting thermal conductivity from petrophysical logs: a midcontinent paleozoic case study. In: Proceedings of the International Association for Mathematical Geosciences 1997 (IAMG'97), Pawlowsky-Glahn, V. (Editor), S. 212-217: International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), Barcelona, 1997.
- /DUL 09/ Dulac, J.C.: Advances in chrono-stratigraphic interpretation modelling. First Break, Vol. 27, No. 10, S. 69-72, 2009.
- /DUP 87/ Duphorn, K.: Die quartäre Subrosion am Endlagersalzstock Gorleben. – Eine vergleichende Betrachtung der Arbeitsmethoden, Bohrbefunde, Deutungen und sicherheitsgeologischen Bewertungen. Meyniana, Vol. 39, S. 41-69, 1987.

- /EEK 84/ Van Eekelen, H.A., Hulsebos, T., Urai, J.: Creep of bischofite. S. 389-405, Trans Tech Publications, Proceedings of the First Conference on the Mechanical Behaviour of Salt.
- /EIC 98/ Eickemeier, R.: Erkundungsbergwerk Gorleben – Festlegung des Abstandes der nördlichen Richtstrecke des EB1 vom randlichen Hauptanhydrit. Fachbericht zum Arbeitspaket 9G21321000 Tgb.-Nr. 11551/98, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1998.
- /EIS 03a/ Eisenburger, D., Grisseemann, C.: Projekt Gorleben - Laboruntersuchungen zur Bestimmung der thermophysikalischen und elektrischen Gesteinsparameter. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2003.
- /EIS 03b/ Eisenburger, D., Gundelach, V.: Elektromagnetische Hochfrequenz-Reflexionsmessungen (EMR) im Erkundungsbergwerk Gorleben. AP 9G 4142100000, Archiv-Nummer: 124194, 2003.
- /ELL 87/ Ellis, D.V.: Well Logging for Earth Scientists. Elsevier: Amsterdam, 1987.
- /EVA 77/ Evans, T.R.: Thermal Properties Of North Sea Rocks. The Log Analyst, Vol. 18, No. 2, S. 3-12, March-April 1977.
- /FOK 95/ Fokker, P.A.: The behaviour of salt and salt caverns. Dissertation, ISBN: 909007953X, 9789090079530, 143 Seiten, Technical University of Delft, 24.01.1995.
- /FOS 02/ Fossum, A.F., Fredrich, J.T.: Salt Mechanics Primer for Near-Salt and Sub-Salt Deepwater Gulf of Mexico Field Developments. SANDIA Report SAND2002-2063, Sandia National Laboratories, July 2002.
- /FUR 08/ Furman, A.: Modeling Coupled Surface-Subsurface Flow Processes: A Review. Vadose Zone Journal, Vol. 7, No. 2, S. 741-756, DOI 10.2136/vzj2007.0065, May 2008.

- /GE 97/ Ge, H., Jackson, M.P.A., Vendeville, B.C.: Kinematics and dynamics of salt tectonics driven by progradation. AAPG Bulletin, Vol. 81, S. 398-423, 1997.
- /GEM 05/ Gemmer, L., Beaumont, C., Ings, S.J.: Dynamic Modelling of Passive Margin Salt Tectonics – Effects of Water Loading, Sediment Properties and Sedimentation Patterns. Basin Research, Vol. 17, S. 383-402, DOI 10.1111/j.1365-2117.2005.00274.x, 2005.
- /GEN 11/ Van Gent, H., Urai, J., de Keijzer, M.: The internal geometry of salt structures - a first look using 3D seismic data from the Zechstein of the Netherlands. Journal of Structural Geology, Vol. 33, Special Issue: Flow of rocks: Field analysis and modeling - In celebration of Paul F. Williams' contribution to mentoring, S. 292-311, DOI 10.1016/j.jsg.2010.07.005, ISBN: 0191-8141, 2011.
- /GIL 02/ Giles, K.A., Lawton, T.F.: Halokinetic sequence stratigraphy adjacent to the El Papalote diapir, northeastern Mexico. AAPG Bulletin, Vol. 86, No. 5, S. 823-840, May 2002.
- /GOS 75/ Goss, R., Combs, J., Timur, A.: Prediction of thermal conductivity in rocks from other physical parameters and from standard geophysical well logs, Transactions of the SPWLA annual logging symposium, 16. Society of Professional Well Log Analysts: New Orleans, 1975.
- /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.
- /GRA 93/ Gratier, J.-P.: Experimental pressure solution of Halite by an indenter technique. Geophysical Research Letters, Vol. 20, No. 15, S. 1647-1650, DOI 10.1029/93GL01398, 1993.

- /GRE 91/ Greinwald, S., Thierbach, R., Eisenburger, D., Nickel, H., Kopietz, J.:
Wissenschaftliche Grundlagen der Erkundung und Berechenbarkeit des
Endlagerbergwerks; Teilprojekt IV Geophysikalische Grundlagen der
Erkundung - Elektromagnetik und Thermophysik. Abschlussbericht, Archiv-
Nr. 108822, 150 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und
Rohstoffe (BGR), 1991.
- /GRÜ 83/ Grübler, G., Reppert, D.: Bericht über die in den Schachtvorbohrungen
Go5001 und Go 5002 angetroffenen KW-Kondesate/-Gase und deren
Untersuchungsergebnisse. Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb
von Endlagern für Abfallstoffe (DBE): Peine, 1983.
- /GÜN 09/ Günther, R.-M.: Erweiterter Dehnungs-Verfestigungs-Ansatz:
Phänomenologisches Stoffmodell für duktile Salzgesteine zur
Beschreibung primären, sekundären und tertiären Kriechens. Dissertation,
201 Seiten, Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau der
Technischen Universität Bergakademie: Freiberg, 2009.
- /HAK 09/ Hakan, A.: Percolation model for dilatancy-induced permeability of the
excavation damaged zone in rock salt. International Journal of Rock
Mechanics and Mining Sciences, Vol. 46, No. 4, S. 716-724, 2009.
- /HÄN 80/ Hänel, R. (Editor): Atlas of subsurface temperatures in the European
Community, 36 Seiten, Commission of the European Communities,
Directorate for Research, Sciences and Education, 1980.
- /HAR 05/ Hartmann, A., Rath, V., Clauser, C.: Thermal conductivity from core and
well log data. International Journal of Rock Mechanics and Mining
Sciences, Vol. 42, S. 1042-1055, 2005.
- /HAR 07/ Hartmann, A., Pechinig, R., Clauser, C.: Petrophysical analysis of regional-
scale thermal properties for improved simulations of geothermal
installations and basin-scale heat and fluid flow. Int J Earth Sci (Geol
Rundsch), DOI 10.1007/s00531-007-0283-y, 2007.

- /HEA 00/ Hearst, J.R., Nelson, P.H., Paillet, F.L.: Well logging for physical properties. 2. Edition, ISBN 0-471-96305-4, John Wiley & Sons, Ltd, Februar 2000.
- /HER 81/ Herrmann, A.G.: Grundkenntnisse über die Entstehung mariner Salzlagerstätten. Der Aufschluss - Zeitschrift für Freunde der Mineralogie und Geologie, Vol. 32, S. 1-72, 1981.
- /HER 89/ Herrmann, A.G., Knipping, B.: Stoffbestand von Salzstocken und Langzeitsicherheit für Endlager radioaktiver Abfälle. PTB informiert: Fachbeiträge zur Sicherstellung und zur Endlagerung radioaktiver Abfälle, Vol. 1, S. 2-50, 1989.
- /HIC 95/ Hickmann, S.H., Evans, B.: Kinetics of pressure solution at halite-silica interfaces and intergranular clay films. Journal of Geophysical Research, Vol. 100, No. B7, S. 13113–13132, DOI 10.1029/95JB00911, 1995.
- /HOL 97/ Holness, M.B., Lewis, S.: The structure of the halite-brine interface inferred from pressure and temperature variations of equilibrium dihedral angles in the halite-H₂O-CO₂-system. Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 61, No. 4, S. 795–804, DOI 10.1016/S0016-7037(96)00370-5, February 1997.
- /HOS 95/ Hossack, J.: Geometric rules of section balancing for salt structures. In: Salt Tectonics: A Global Perspective, Vol. M 65, Jackson, M.P.A., Roberts, D.G., Snelson, S. (Editoren), S. 29-40, AAPG Memoir, 1995.
- /HUD 07/ Hudec, M.R., Jackson, M.P.A.: Terra infirma: Understanding salt tectonics. Earth-Science Reviews, Vol. 82, No. 1-2, S. 1-28, DOI 10.1016/j.earscirev.2007.01.001, 2007.
- /HUN 96/ Hunsche, U., Mingerzahn, G., Schulze, O.: The influence of textural parameters and mineralogical composition on the creep behavior of rock salt. In: Mechanical Behavior of Salt III, Proceedings of the 3rd Conference, Ghorecychi, M., Berest, P., Hardy, H.R., Langer, M. (Editoren), S. 143-151, Trans Tech Publications: Clausthal, 1996.

- /HUN 99/ Hunsche, U., Hampel, A.: Rock salt - the mechanical properties of the host rock material for a radioactive waste repository. *Engineering Geology*, Vol. 52, No. 3, S. 271-291, April 1999.
- /HUN 03/ Hunsche, U., Schulze, O., Walter, F., Plischke, I.: Projekt Gorleben – Thermomechanisches Verhalten von Salzgestein. Abschlussbericht. Arbeitspaket 9G 213 811, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2003.
- /ING 10/ Ings, S.J., Beaumont, C.: Shortening Viscous Pressure Ridges, a Solution to the Enigma of Initiating Salt Withdrawal Minibasins. *Geology*, Vol. 38, S. 339-342, 2010.
- /JAC 91/ Jackson, M.P.A., Talbot, C.J.: A glossary of salt tectonics. In: Bureau of Economic Geology, Vol. 91-94, Geological Circular, 44 Seiten, University of Texas at Austin, 1991.
- /JAC 94/ Jackson, M.P.A., Talbot, C.J.: Advances in salt tectonics. In: Continental deformation, Chapter 8: Pergamon Press / International Union of Geological Sciences, Hancock, P.L. (Editor), S. 159-179: Oxford, United Kingdom, 1994.
- /JAC 95/ Jackson, M.P.A.: Retrospective Salt Tectonics. In: Salt tectonics; a global perspective, Vol. M 65, Jackson, M.P.A., Roberts, D.G., Snelson, S. (Editoren), S. 1-28, AAPG Memoir, 1995.
- /JAR 73/ Jaritz, W.: Zur Entstehung der Salzstrukturen Nordwestdeutschlands. *Geologisches Jahrbuch*, Vol. A 10, 77 Seiten, Bundesanstalt für Bodenforschung: Stuttgart, 1973.
- /JAR 87/ Jaritz, W.: The origin and development of salt structures in Northwest Germany. In: *Dynamical geology of salt and related structures*, Lerche, I., O'Brien, J.J. (Editoren), S. 479 - 493, Academic Press: Orlando, Florida, 1987.

- /JAR 92/ Jaritz, W.: Fortschritte und offene Fragen zur Entstehung der Salzstrukturen NW-Deutschlands. Heft 8, 16-24 Seiten, Niedersächsische Akademie der Geowissenschaften, Veröffentlichungen: Hannover, 1992.
- /KEM 06/ De Kemp, E.A.: 3-D Interpretive Mapping: An Extension of GIS Technologies for the Geoscientist. In: Geographic information systems (GIS) for the Earth Sciences, Vol. 44, Harris, J.R. (Editor), S. 591-612, Geological Association of Canada, Special Publication, 2006.
- /KEM 07/ De Kemp, E.A.: 3-D geological modelling supporting mineral exploration. In: Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods, Vol. 5, Goodfellow, W.D. (Editor), S. 1051-1061, Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication, 2007.
- /KER 86/ Kern, H., Franke, J.H.: Carnallit - thermisches und thermomechanisches Verhalten in Endlager-Salzstöcken. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Vol. 137, S. 1-27, Januar 1986.
- /KLI 04/ Klinge, H., Baharian-Shiraz, A.: Projekt Gorleben, Dokumentation hydrogeologischer Basisdaten. 18 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2004.
- /KLI 07/ Klinge, H., Boehme, J., Grissemann, C., Houben, G., Ludwig, R.-R., Rübels, A., Schelkes, K., Schildknecht, F., Suckow, A.: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben. Teil 1: Die Hydrogeologie des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben. Geologisches Jahrbuch, Vol. C 71, 147 Seiten, ISBN 978-3-510-95962-4, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2007.
- /KOC 98/ Kockel, F.: Salt problems in NW-Germany and the German North Sea Sector. Journal of Seismic Exploration, Vol. 7, S. 219-235, 1998.
- /KOC 02/ Kockel, F.: Rifting processes in NW-Germany and the German North Sea Sector. Netherlands Journal of Geosciences / Geologie en Mijnbouw, Vol. 81, No. 2, S. 149-158, 2002.

- /KOC 03/ Kockel, F.: Inversion structures in Central Europe – expressions, reasons, an open discussion. *Netherlands Journal of Geosciences / Geologie en Mijnbouw*, Vol. 82, No. 4, S. 367-382, Januar 2003.
- /KOC 09/ Koch, A.: Erstellung statistisch abgesicherter thermischer und hydraulischer Gesteinseigenschaften für den flachen und tiefen Untergrund in Deutschland (Phase 2 – Westliches Nordrhein-Westfalen und bayerisches Molassebecken). Schlussbericht zum BMU-Projekt FKZ 0327563, E.ON Energy Research Center, Lehrstuhl Applied Geophysics and Geothermal Energy, RWTH Aachen University: Aachen, 2009.
- /KÖH 09/ Köhler, N.: Seismicity patterns and variation of the frequency-magnitude distribution of microracks in salt. *Geophysical Journal International*, Vol. 179, No. 1, S. 489-499, Oktober 2009.
- /KOP 83/ Kopietz, J.: Temperaturfelderkundung Gorleben. Abschlussbericht BMFT-Forschungsvorhaben KWA 206000, Archiv-Nr. 009 4954, Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 1983.
- /KOP 85/ Kopietz, J., Neumann, W.: Thermal-Conductivity and Thermal Diffusivity Measurements of Salt Rocks by Different Methods, *Proceedings of the 18th International Thermal Conductivity Conference: Rapid City, USA*, 1985.
- /KOP 88/ Kopietz, J.: Hydrologische, geohydraulische und geothermische Untersuchungen an geplanten Standorten für die Endlagerung radioaktiver Abfälle – Teilprojekt Geothermik. Abschlussbericht BMFT-Forschungsvorhaben KWA 53090, KWA 85050, KWA 85049/2 Archiv-Nr. 103 972, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 1988.
- /KOS 02/ Kossow, D., Krawczyk, C.M.: Structure and quantification of processes controlling the evolution of the inverted NE-German Basin. *Marine and Petroleum Geology*, Vol. 19, S. 601-618, DOI 10.1016/S0264-8172(02)00032-6, 2002.

- /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.
- /KOY 01/ Koyi, H.A.: Modeling the influence of sinking anhydrite blocks on salt diapirs targeted for hazardous waste disposal. *Geology*, Vol. 29, No. 5, S. 387-390, Januar 2001.
- /KUK 08/ Kukla, P., Urai, J., Mohr, M.: Dynamics of salt structures. In: *Dynamics of Complex Intracontinental Basins - The Central European Basin System*, Littke, R., Bayer, U., Gajewski, D., Nelskamp, S. (Editoren), S. 291-306, Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, 2008.
- /KUK 11/ Kukla, P.A., Reuning, L., Becker, S., Urai, J., Schoenherr, J.: Distribution and mechanisms of overpressure generation and deflation in the late Neoproterozoic to early Cambrian South Oman Salt Basin. *Geofluids*, Vol. 11, No. 4, S. 12, DOI 10.1111/j.1468-8123.2011.00340.x, 2011.
- /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.
- /LEE 98/ Lee, R., De Souza, E.: The effect of brine on the creep behaviour and dissolution chemistry of evaporites. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 35, No. 5, S. 720-729, DOI 10.1139/t98-050, 1998.
- /LIT 08/ Littke, R., Bayer, U., Gajewski, D., Nelskamp, S. (Editoren): *Dynamics of Complex Intracontinental Basins - The Central European Basin System*, 505 Seiten, ISBN 978-3-540-85084-7, Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, 2008.

- /LUX 09/ Lux, K.H.: Design of salt caverns for the storage of natural gas, crude oil and compressed air; geomechanical aspects of construction, operation and abandonment. In: Underground gas storage; worldwide experiences and future development in the UK and Europe, Vol. 313, Evans, D.J., Chadwick, R.A. (Editoren), S. 93-128, Geological Society Special Publications, 2009.
- /MAJ 11/ Majorowicz, J., Wybraniec, S.: New terrestrial heat flow map of Europe after regional paleoclimatic correction application. Int J Earth Sci (Geol Rundsch), Vol. 100, No. 4, S. 881-887, DOI 10.1007/s00531-010-0526-1, 2011.
- /MAX 09/ Maxelon, M., Renard, P., Courrioux, G., Brandli, M., Mancktelow, N.: A workflow to facilitate three-dimensional geometrical modeling of complex poly-deformed geological units. Computers & Geosciences, Vol. 35, No. 3, S. 644-658, March 2009.
- /MAY 05/ Maystrenko, Y., Bayer, U., Scheck-Wenderoth, M.: Structure and evolution of the Glueckstadt Graben due to salt movements. Int J Earth Sci (Geol Rundsch), Vol. 94, No. 5, S. 799-814, DOI 10.1007/s00531-005-0003-4, Januar 2005.
- /MCG 00/ McGaughey, J., Morrison, K.: The Common Earth Model: A revolution in Exploration Data Integration, Mining Millenium 2000 The Prospectors and Developers Association of Canada (PDAC): Toronto, 2000.
- /MEE 95/ De Meer, S., Spiers, C.J., Nakashima, S.: Structure and diffusive properties of fluid-filled grain boundaries: An in-situ study using infrared (micro) spectroscopy. Earth and Planetary Science Letters, Vol. 232, No. 3-4, S. 403-414, DOI 10.1016/j.epsl.2004.12.030, 15. April 2005.
- /MEI 67/ Meinhold, R., Reinhardt, H.G.: Halokinese im nordostdeutschen Tiefland. Deut.Ges. Geol. Wiss., Vol. A 12, Geol. Palaeontol., No. 3-4, S. 329-353.

- /MOH 05/ Mohr, M., Kukla, P., Urai, J., Bresser, G.: Multiphase salt tectonic evolution in NW Germany: seismic interpretation and retro-deformation. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)*, Vol. 94, S. 917-940, DOI 10.1007/s00531-005-0039-5.
- /MOH 07/ Mohr, M., Warren, J.K., Urai, J., Irmen, A.: Subsurface seismic record of salt glaciers in an extensional intracontinental setting (Late Triassic of northwestern Germany). *Geology*, Vol. 35, No. 11, S. 963-966, DOI 10.1130/G23378A.1, 2007.
- /MOR 06/ Moretti, I., Lepage, F., Guiton, M.: KINE3D: a New 3D Restoration Method Based on a Mixed Approach Linking Geometry and Geomechanics. *Oil and Gas Science and Technology*, Vol. 61, No. 2, S. 277-289, 2006.
- /MOT 06/ Mottaghy, D., Rath, V.: Latent heat effects in subsurface heat transport modelling and their impact on palaeotemperature reconstructions. *Geophysical Journal International*, Vol. 164, S. 236-245, DOI 10.1111/j.1365-246X.2005.02843.x, 2006.
- /MOT 08/ Mottaghy, D., Vosteen, H.-D.: Temperature dependence of the relationship of thermal diffusivity versus thermal conductivity for crystalline rocks. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)*, DOI 10.1007/s00531-007-0238-3.
- /MUK 07/ Mukherjee, S., Talbot, C.J., Koyi, H.A.: Estimation of Viscosities of Natural Salts of the Hormuz and Namakdan Diapirs in the Persian Gulf. In: *Annual Transactions of the Nordic Rheology Society*, Vol. 15, Aho, J. (Editor), S. 189-196, 2007.
- /MUK 10/ Mukherjee, S., Talbot, C.J., Koyi, H.A.: Viscosity estimates of salt in the Hormuz and Namakdan salt diapirs. *Persian Gulf Geological Magazine*, Vol. 147, No. 4, S. 497-507, DOI 10.1017/S001675680999077X, July 2010.
- /NES 96/ Nestvold, E.O.: The impact of 3-D seismic data on exploration, field development, and production. In: *Applications of 3-D Seismic Data to Exploration and Production*, Vol. 42, Weimer, P., Davis, T.L. (Editoren), S. 1-7, AAPG Studies in Geology, 1996.

- /NIE 03/ Nieuwland, D.A.: New insights into structural interpretation and modelling. The Geological Society of London, Special Publications, Vol. 212, S. 1-6, DOI 10.1144/GSL.SP.2003.212.01.01, 2003.
- /NIP 00/ Nipp, H.K., Heusermann, S.: Erkundungsbergwerk Gorleben, Gebirgsmechanische Beurteilung der Integrität der Salzbarriere im Erkundungsbereich EB1 für das technische Endlagerkonzept 1 (Bohrlochlagerung, BSK3). Ergebnisbericht 0120209, 45 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2000.
- /NIP 88a/ Nipp, H.-K.: Thermomechanische Berechnungen zum Endlager im Salzstock Gorleben (Berechnungsmodell 1984). Fachbericht, Archiv-Nr. 103 299, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1988.
- /NIP 88b/ Nipp, H.-K.: Thermomechanische Berechnungen zum Endlager im Salzstock Gorleben (Berechnungsmodell 1986-2). Fachbericht, Archiv-Nr. 103 819, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1988.
- /NIP 88c/ Nipp, H.-K.: Thermomechanische Berechnungen zum Endlager im Salzstock Gorleben (Berechnungsmodell 1986). Fachbericht, Archiv-Nr. 103 379, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1988.
- /NIP 88d/ Nipp, H.-K.: Thermomechanische Berechnungen zum Endlager im Salzstock Gorleben (Berechnungsmodell 1985). Fachbericht, Archiv-Nr. 103 321, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1988.
- /NOL 05/ Nollet, S., Hilgers, C., Urai, J.L.: Sealing of fluid pathways in overpressure cells: a case study from the Buntsandstein in the Lower Saxony Basin (NW Germany). Int J Earth Sci (Geol Rundsch), Vol. 94, S. 1039-1056, DOI 10.1007/s00531-005-0492-1, 2005.

- /NOO 07/ Van Noort, R., Visser, H.J.M., Spiers, C.J.: Influence of grain boundary structure on dissolution controlled pressure solution and retarding effects of grain boundary healing. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 113, DOI 10.1029/2007JB005223, 2007.
- /NOR 08/ Norden, B., Förster, A., Balling, N.: Heat flow and lithospheric thermal regime in the Northeast German Basin. *Tectonophysics*, Vol. 460, No. 1-4, S. 215-229, November 2008.
- /NOW 02a/ Nowak, T., Weber, J.R., Bornemann, O.: Gas- und Lösungsreservoir im Salzstock Gorleben. 71 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2002.
- /NOW 02b/ Nowak, T., Weber, J.R.: Hydraulische Charakterisierung der Salzbarriere Gorleben. Archiv-Nr. 123070, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2002.
- /PAS 02/ Passchier, C.W., Druguet, E.: Numerical modelling of asymmetric boudinage. *Journal of Structural Geology*, Vol. 24, S. 1789-1803, 2002.
- /PEA 96/ Peach, C.J., Spiers, C.J.: Influence of crystal plastic deformation on dilatancy and permeability development in synthetic salt rock. *Tectonophysics*, Vol. 256, No. 1-4, S. 101-128, DOI 10.1016/0040-1951(95)00170-0, May 1996.
- /PEA 01/ Peach, C.J., Spiers, C.J., Trimby, P.W.: Effect of confining pressure on dilatation, recrystallization and flow of rocksalt at 150°C. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 106, No. B7, S. 13315-13328.
- /PEN 05/ Pennock, G.M., Drury, M.R., Spiers, C.J.: The development of subgrain misorientations with strain in dry synthetic NaCl measured using EBSD. *Journal of Structural Geology*, Vol. 27, No. 12, S. 2159-2170, DOI 10.1016/j.jsg.2005.06.013, 2005.

- /PEN 06a/ Pennock, G.M., Drury, M.R., Peach, C.J., Spiers, C.J.: The influence of water on deformation microstructures and textures in synthetic NaCl measured using EBSD. *Journal of Structural Geology*, Vol. 28, No. 4, S. 588-601, DOI 10.1016/j.jsg.2006.01.014, 2006.
- /PEN 06b/ Pennock, G.M., Drury, M.R., Spiers, C.J.: Grain boundary populations in wet and dry NaCl. *Materials Science and Technology*, Vol. 22, No. 11, S. 1307-1315(9), DOI 10.1179/174328406X130975, 2006.
- /POP 00/ Popp, T., Kern, H.: Monitoring the state of microfracturing in rock salt during deformation by combined measurements of permeability and P- and S- wave velocities. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, Vol. 25, No. 2, S. 149-154, DOI 10.1016/S1464-1895(00)00024-7, 2000.
- /POP 01/ Popp, T., Kern, H., Schulze, O.: Evolution of dilatancy and permeability in rock salt during hydrostatic compaction and triaxial deformation. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, Vol. 106, No. B3, S. 4061-4078, DOI 10.1029/2000jb900381, 2001.
- /PUT 06/ Putz, M., Stuwe, K., Jessell, M., Calcagno, P.: Three-dimensional model and late stage warping of the Plattengneis shear zone in the Eastern Alps. *Tectonophysics*, Vol. 412, S. 87-103, DOI 10.1016/j.tecto.2005.10.003.
- /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.
- /RAW 06/ Rawling, T.J., Schaubs, P.M., Dugdale, L.J., Wilson, C.J.L., Murphy, F.C.: Application of 3D models and numerical simulations as a predictive exploration tool in western Victoria. *Australian Journal of Earth Sciences*, Vol. 53, No. 5, S. 825-839, DOI 10.1080/08120090600827470.
- /REM 95/ Remmelts, G.: Fault-related salt tectonics in the southern North Sea, the Netherlands. In: *Salt tectonics; a global perspective*, Vol. M 65, Jackson, M.P.A., Roberts, D.G., Snelson, S. (Editoren), S. 261-272, AAPG Memoir, 1995.

- /REN 01/ Renard, F., Dysthe, D., Feder, J., Bjørlykke, K., Jamtveit, B.: Enhanced pressure solution creep rates induced by clay particles: Experimental evidence in salt aggregates. *Geophysical Research Letters*, Vol. 28, No. 7, S. 1295-1298, DOI 10.1029/2000GL012394.
- /REN 02/ Renard, F., Dysthe, D., Feder, J., Jamtveit, B.: Healing of fluid-filled microcracks. S. 925-931, ISBN 90 5809 394 8, *Poromechanics II*, Proceedings of the second Biot Conference on poromechanics, A. A. Balkema Publishers, 2002.
- /RID 96/ Rider, M.: The geological interpretation of well logs. 2. Edition, ISBN 0-9541906-0-2, Whittles Publishing: Caithness, 1996.
- /ROW 93/ Rowan, M.G.: A systematic technique for the sequential restoration of salt structures. *Tectonophysics*, Vol. 228, No. 3-4, S. 331-348, DOI 10.1016/0040-1951(93)90347-M, December 1993.
- /ROW 03/ Rowan, M.G., Lawton, T.F., Giles, K.A., Ratliff, R.A.: Near-salt deformation in La Popa basin, Mexico, and the northern Gulf of Mexico: A general model for passive diapirism. *AAPG Bulletin*, Vol. 87, No. 5, S. 733-756.
- /RÜH 76/ Rühberg, N.: Probleme der Zechsteinsalzbewegung. *Zeitschrift für Angewandte Geologie*, Vol. 22, No. 9, S. 413-420, 1976.
- /RÜH 10/ Rühbaak, W., Rath, V., Clauser, C.: Detecting thermal anomalies within the Molasse Basin, southern Germany. *Hydrogeology Journal*, Vol. 18, No. 8, S. 1897-1915, DOI 10.1007/s10040-010-0676-z, December 2010.
- /SCH 98/ Schäfer, F., Griffiths, P.A., Osborn, R.: Balancing salt structures in 3D. S. 69-107, Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V. (DGMK)-Mintrop-Seminar, 1998.
- /SCH 99a/ Schildknecht, F.: Dichteschichtung und Druckverteilung im salinen Grundwasser des Untersuchungsgebietes Dömitz-Lenzen. Endbericht AP9G3411200000 im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz Archiv-Nr. 118709, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1999.

- /SCH 99b/ Schutjens, P.M.T.M., Spiers, C.J.: Intergranular Pressure Solution in NaCl: Grain-to-Grain Contact Experiments under the Optical Microscope. *Oil and Gas Science and Technology*, Vol. 54, No. 6, S. 729-750, 1999.
- /SCH 01/ Schulze, O., Popp, T., Kern, H.: Development of damage and permeability in deforming rock salt. *Engineering Geology*, Vol. 61, No. 2-3, S. 163-180, DOI 10.1016/s0013-7952(01)00051-5, 2001.
- /SCH 03a/ Scheck, M., Bayer, U., Lewerenz, B.: Salt movements in the Northeast German Basin and its relation to major post-Permian tectonic phases; results from 3D structural modelling, backstripping and reflection seismic data. *Tectonophysics*, Vol. 361, No. 3-4, S. 277-299, DOI 10.1016/S0040-1951(02)00650-9, January 2003.
- /SCH 03b/ Schnier, H.: Projekt Gorleben – Bewertung der Verformungsmessungen in den Schächten Gorleben 1 und 2 (Salinar). 9G4132000000, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2003.
(unveröffentlicht)
- /SCH 04/ Schenk, O., Urai, J.: Microstructural evolution and grain boundary structure during static recrystallization in synthetic polycrystals of sodium chloride containing saturated brine. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Vol. 146, S. 671-682, DOI 10.1007/s00410-003-0522-6, 2004.
- /SCH 05a/ Schenk, O., Urai, J.: The migration of fluid-filled grain boundaries in recrystallizing synthetic bischofite: first results of in-situ high-pressure, high-temperature deformation experiments in transmitted light. *Journal of Metamorphic Geology*, Vol. 23, S. 695-709, 2005.
- /SCH 05b/ Schléder, Z., Urai, J.: Microstructural evolution of deformation-modified primary halite from the Middle Triassic Röt Formation at Hengelo, The Netherlands. *International Journal of Earth Sciences*, Vol. 94, No. 5, S. 941-956, DOI 10.1007/s00531-005-0503-2, 2005.
- /SCH 06/ Schenk, O., Urai, J., Piazzolo, S.: Structure of grain boundaries in wet, synthetic polycrystalline, statically recrystallizing halite – evidence from cryo-SEM observations. *Geofluids*, Vol. 6, No. 1, S. 93-104, 2006.

- /SCH 07a/ Schléder, Z., Burliga, S., Urai, J.: Dynamic and static recrystallization-related microstructures in halite samples from the Klodawa salt wall (central Poland) as revealed by gamma-irradiation. *Neues Jahrbuch für Mineralogie und Petrologie*, Vol. 184, No. 1, S. 17-28, DOI 10.1127/0077-7757/2007/0079, 2007.
- /SCH 07b/ Schléder, Z., Urai, J.: Deformation and recrystallization mechanisms in mylonitic shear zones in naturally deformed extrusive Eocene-Oligocene rocksalt from Eyvanekey plateau and Garmsar hills (central Iran). *Journal of Structural Geology*, Vol. 29, No. 2, S. 241-255, 2007.
- /SCH 07c/ Schoenherr, J., Urai, J., Kukla, P., Littke, R., Schléder, Z., Larroque, J.-M., Newall, M., Al-Abry, N., Al-Siyabi, H., Rawahi, Z.: Limits to the sealing capacity of rocksalt: A case study of the Infra-Cambrian Ara Salt from the South Oman Salt Basin. *AAPG Bulletin*, Vol. 91, S. 1541-1557.
- /SCH 08/ Schléder, Z., Urai, J., Nollet, S., Hilgers, C.: Solution-precipitation creep and fluid flow in halite: a case study of Zechstein (Z1) rocksalt from Neuhof salt mine (Germany). *International Journal of Earth Sciences*, Vol. 97, S. 1045-1056, DOI 10.1007/s00531-007-0275-y, 2008.
- /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.
- /SER 84/ Serra, O.: *Fundamentals of Well-Log Interpretation*. ISBN 0-444-42132-7, Elsevier: Amsterdam, 1984.
- /SME 03/ Smerdon, J.E., Pollack, H.N., Enz, J.W., Lewis, M.J.: Conduction-dominated heat transport of the annual temperature signal in soil. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108 (B9), S. 6, DOI 10.1029/2002JB002351, 2003.

- /SPI 84/ Spiers, C.J., Urai, J., Lister, G.: The effect of brine (Inherent or added) on rheology and deformation mechanisms in salt rock, Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, Second conference on the mechanical behaviour of salt: Hanover, 1984.
- /SPI 89/ Spiers, C.J., Peach, C.J., Brzesowsky, R.H., Schutjens, P.M.T.M., Liezenberg, J.L., Zwart, H.J.: Long-term Rheological and Transport Properties of Dry and Wet Salt Rocks. In: Nuclear Science and Technology, Vol. EUR 11848 EN, 1989.
- /SPI 90/ Spiers, C.J., Schutjens, P.M.T.M., Brzesowsky, R.H., Peach, C.J., Liezenberg, J.L., Zwart, H.J.: Experimental determination of constitutive parameters governing creep of rocksalt by pressure solution. In: Deformation Mechanics, Rheology and Tectonics, Vol. 54, Knipe, R.J., Rutter, E.H. (Editoren), S. 215-227, Geological Society, Special Publications: London, 1990.
- /SPI 93/ Spiers, C.J., Brzesowsky, R.H.: Densification behaviour of wet granular salt: theory versus experiment. In: Seventh Symposium on Salt, Vol. 1, Kakinana, H., Hardy, H.R.J., Hoshi, T., Toyokura, K. (Editoren), S. 83-92, Elsevier Science: Amsterdam, 1993.
- /SPI 96/ Spiers, C.J., Carter, N.L.: Microphysics of rocksalt flow in nature, Fourth conference on the mechanical behaviour of salt: Montreal, 1996.
- /SPI 98/ Spiers, C.J., Carter, N.L.: Microphysics of rocksalt of flow in nature. In: Proceedings of the 4th Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Vol. 22, Aubertin, M., Hardy, H.R. (Editoren), S. 115-128, Trans Tech. Publication Series on Rock and Soil Mechanics, 1998.
- /SPI 04/ Spiers, C.J., De Meer, S., Niemeijer, A., Zhang, X.: Kinetics of rock deformation by pressure solution and the role of thin aqueous films. In: Proceedings of the international symposium on "Physiochemistry of water and dynamics of materials and the earth - Structures and behaviours of the thin film water", Vol. 44, Nakashima, A. (Editor), Frontier Science Series, Universal Academy Press: Tokyo, 2004.

- /STE 99/ Stewart, I.S., Clark, J.A.: Impact of salt on the structure of the Central North Sea hydrocarbon fairways. In: Petroleum geology of Northwest Europe, Vol. 1, Fleet, A.J., Boldy, S.A.R. (Editoren), S. 179-200, Proceedings of the 5th conference held at the Barbican Centre: London, 1999.
- /STI 10/ Stille, H.: Faltung des Deutschen Bodens und des Salzgebirges. Kali Zeitschrift, Vol. 5, No. 16, 1910.
- /STI 25/ Stille, H.: The upthrust of the salt masses of Germany. AAPG Bulletin, Vol. 9, S. 417-441, 1925.
- /TER 05a/ Ter Heege, J.H.P., De Bresser, J.H.P., Spiers, C.J.: Dynamic recrystallization of wet synthetic polycrystalline halite: dependence of grain size distribution on flow stress, temperature and strain. Tectonophysics, Vol. 396, S. 35-57, DOI 10.1016/j.tecto.2004.10.002, 2005.
- /TER 05b/ Ter Heege, J.H.P., De Bresser, J.H.P., Spiers, C.J.: Rheological behaviour of synthetic rocksalt: the interplay between water, dynamic recrystallization and deformation mechanisms. Journal of Structural Geology, Vol. 27, No. 6, S. 948-963, 2005.
- /THE 35/ Theis, C.V.: The relation between lowering of the piezometric surface and rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. Transactions of the American Geophysical Union, Vol. 16, S. 519-524, 1935.
- /THI 01/ Thieme, B., Rockenbach, K.: Floßtektonik in der Trias der Deutschen Südlichen Nordsee. Erdöl Erdgas Kohle, Vol. 117, S. 568-573, 2001.
- /TRI 00/ Trimby, P.W., Drury, M.R., Spiers, C.J.: Recognising the crystallographic signature of recrystallisation processes in de-formed rocks: a study of experimentally deformed rocksalt. Journal of Structural Geology, Vol. 22, S. 1609-1620, 2000.

- /TRU 57/ Trusheim, F.: Über Halokinese und ihre Bedeutung für die strukturelle Entwicklung Norddeutschlands. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Vol. 109, No. 1, S. 111-151, 1957.
- /TRU 60/ Trusheim, F.: Mechanism of salt migration in northern Germany. AAPG Bulletin, Vol. 44, No. 9, S. 1519-1540, September 1960.
- /URA 83/ Urai, J.: Water assisted dynamic recrystallization and weakening in polycrystalline bischofite. Tectonophysics, Vol. 96, No. 1-2, S. 125-157, DOI 10.1016/0040-1951(83)90247-0, April 1983.
- /URA 85a/ Urai, J.: Water-enhanced dynamic recrystallization and solution transfer in experimentally deformed carnallite. Tectonophysics, Vol. 120, No. 3-4, S. 285-317, DOI 10.1016/0040-1951(85)90055-1, Dezember 1985.
- /URA 85b/ Urai, J., Boland, J.N.: Development of microstructure and the origin of hematite in naturally deformed carnallite. Neues Jahrbuch Mineralogie, Vol. H2, S. 58-72, Februar 1985.
- /URA 86a/ Urai, J., Means, W.D.M., Lister, G.: Dynamic recrystallization of minerals. American Geophysical Union, Geophysical Monograph, Vol. 36 (the Paterson volume), S. 161-199, 1986.
- /URA 86b/ Urai, J., Spiers, C.J., Zwart, H.J., Lister, G.: Weakening of rock salt by water during long-term creep. Nature, Vol. 324, S. 554-557, DOI 10.1038/324554a0, December 1986.
- /URA 87a/ Urai, J.: Development of microstructure during deformation of carnallite and bischofite in transmitted light. Tectonophysics, Vol. 135, No. 1-3, S. 251-263, DOI 10.1016/0040-1951(87)90166-1, April 1987.
- /URA 87b/ Urai, J.: Carnallit-thermisches und thermomechanisches Verhalten in Endlager-Salzstöcken - Discussion. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Vol. 138, S. 239-243, 1987.

- /URA 87c/ Urai, J., Spiers, C.J., Peach, C.J., Franssen, R.C.M.W., Liezenberg, J.L.: Deformation mechanisms operating in naturally de-formed Halite rocks as deduced from microstructural investigations. *Geologie en Mijnbouw*, Vol. 66, S. 165-176, 1987.
- /URA 08/ Urai, J., Schléder, Z., Spiers, C.J., Kukla, P.: Flow and transport properties of Salt Rocks. In: *Dynamics of complex intracontinental basins: The Central European Basin System*, Littke, R., Bayer, U., Gajewski, D., Nelskamp, S. (Editoren), Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, 2008.
- /VAC 88/ Vacquier, V., Mathieu, Y., Legendre, E., Blondin, E.: Experiment on Estimating Thermal Conductivity of Sedimentary Rocks from Oil Well Logging. *AAPG Bulletin*, Vol. 72, No. 6, S. 758-764, 1988.
- /VEN 92/ Vendeville, B.C., Jackson, M.P.A.: The rise of diapirs during thin-skinned extension. *Marine and Petroleum Geology*, Vol. 9, S. 331-353, DOI 10.1016/0264-8172(92)90047-1.
- /VOS 02/ Voss, C.I., Provost, A.: SUTRA, A model for saturated-unsaturated variable-density ground-water flow with solute or energy transport. Version of September 22, 2010, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 02-4231, 2002.
- /WAL 07/ Wallner, M., Lux, K.H., Minkley, W. (Editoren): *The Mechanical Behavior of Salt: Understanding of THMC Processes in Salt*. 6th Conference (SaltMech6), Taylor and Francis: Hannover, Germany, 2007.
- /WAT 02/ Watanabe, T., Peach, C.J.: Electrical impedance measurement of plastically deforming halite rocks at 125°C and 50 MPa. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107, S. 12, DOI 10.1029/2001JB000204, 2002.
- /WAW 86/ Wawersik, W.R., Zeuch, D.H.: Modeling and mechanistic interpretation of creep of rock salt below 200°C. *Tectonophysics*, Vol. 121, No. 2-4, S. 125-152, DOI 10.1016/0040-1951(86)90040-5, January 1986.

- /WEB 11/ Weber, J.R., Hammer, J., Schulze, O.: Empfehlungen der BGR zur Berücksichtigung der Kohlenwasserstoff-Vorkommen im Hauptsalz des Salzstockes Gorleben im Rahmen einer vorläufigen Sicherheitsanalyse. Projekt Gorleben GE442800000, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2011.
- /WEI 06/ Weinberger, R., Lyakhovsky, V., Baer, G., Begin, Z.B.: Mechanical modeling and InSAR measurements of Mount Sedom uplift, Dead Sea Basin: Implications for rock-salt properties and diapir emplacement mechanism. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, Vol. 7, Q05014, 2006.
- /WEL 10/ Wellmann, J.F., Horowitz, F.G., Schill, E., Regenauer-Lieb, K.: Towards incorporating uncertainty of structural data in 3D geological inversion. *Tectonophysics*, Vol. 490, No. 3-4, S. 141-151, Juli 2010.
- /WIL 90/ Williams, C.F., Anderson, R.N.: Thermophysical properties of the Earth's crust: In situ measurements from continental and ocean drilling. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 95, No. B6, S. 9209-9236, DOI 10.1029/JB095iB06p09209, 1990.
- /WIL 02/ Willson, S.M., Fossum, A.F., Fredrich, J.T.: Assessment of Salt Loading on Well Casings. S. 10, Society of Petroleum Engineers, DOI: 10.2118/74562-MS, ISBN: 978-1-55563-940-2, Document-ID: 74562-MS, IADC/SPE Drilling Conference Dallas, Texas, 2002.
- /WOO 89/ Woodward, N.B., Boyer, S., Suppe, J.: Balanced Geological Cross-Sections: An Essential Technique in Geological Research and Exploration. American Geophysical Union, Short Course in Geology, Vol. 6, S. 1-132, ISBN: 0-87590-703-2, DOI 10.1029/SC006, 1989.
- /WYC 09/ Wycisk, P., Hubert, T., Gossel, W., Neumann, C.: High-resolution 3D spatial modelling of complex geological structures for an environmental risk assessment of abundant mining and industrial megasites. *Computers & Geosciences*, Vol. 35, No. 1, S. 165-182, DOI 10.1016/j.cageo.2007.09.001, January 2009.

- /YIL 01/ Yilmaz, O.: Seismic Data Analysis and Processing, Inversion and Interpretation of Seismic Data. ISBN 978-0-931830-46-4, Society of Exploration Geophysicists: Tulsa, USA, 2001.
- /YOR 09/ Yordkayhun, S., Juhlin, C., Norden, B.: 3D seismic reflection surveying at the CO2SINK project site, Ketzin, Germany: a study for extracting shallow subsurface information. Near Surface Geophysics, Vol. 7, No. 2, S. 75-91, 2009.
- /ZAK 11/ Zakrevsky, K.E.: Geological 3D Modelling. 261 Seiten, ISBN 978-90-73781-96-2, European Association of Geoscientists & Engineers (EAGE) Publications bv, 2011.
- /ZEE 11/ Van der Zee, W., Ozan, C., Brudy, M., Holland, M.: 3D Geomechanical Modeling of Complex Salt Structures. 2011 SIMULIA Customer Conference, erreichbar unter: <http://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS/SIMULIA/PDF/scc-papers/En-3D-Geomechanical-Modeling-of-Complex-Salt-Structures.pdf>, zitiert am 21.01.2013.
- /ZIR 85/ Zirngast, M.: Dynamik des Salzstocks Gorleben. Archiv-Nr. 106 565, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1985.
- /ZIR 90/ Zirngast, M.: Begrenzung und Volumen des Salzstocks Gorleben. Bericht 106565, 8 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1990.
- /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.
- /ZIR 96/ Zirngast, M.: The development of the Gorleben salt dome (northwest Germany) based on quantitative analysis of peripheral sinks. In: Salt Tectonics, Vol. 100, Alsop, G.I., Blundell, D.J., Davison, I. (Editoren), S. 203-226, Geological Society Special Publication: London, 1996.

- /ZIR 00/ Zirngast, M.: Projekt Gorleben, Flachseismik Gorleben – Begleitung und Auswertung. Abschlussbericht zum Arbeitspaket 9G3313362000, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2000.
- /ZIR 03/ Zirngast, M., Zwirner, R., Bornemann, O., Fleig, S., Hoffmann, N., Köthe, A., Krull, P., Weiss, W.: Projekt Gorleben, Schichtenfolge und Strukturbau des Deck- u. Nebengebirges. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2003.
- /ZLA 02/ Zlatanova, S., Rahman, A.A., Pilouk, M.: Present status of 3D: The decisive step has been taken. Geomatics Info Magazine (GIM) International, Vol. 16, No. 6, S. 41-43, 2002.
- /ZOU 04/ Zoubtsov, S., Renard, F., Gratier, J.-P., Guiguet, R., Dysthe, D., Traskine, V.: Experimental pressure solution creep of polymineralic aggregates. Tectonophysics, Vol. 385, S. 45-57, 2004.
- /ZUL 05/ Zulauf, J., Zulauf, G.: Coeval folding and boudinage in four dimensions. Journal of Structural Geology, Vol. 27, No. 6, S. 1061-1068, DOI 10.1016/j.jsg.2005.04.003, June 2005.

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|----------|---|----|
| Abb. 1.1 | Übersicht der berücksichtigten Basisdaten der geologischen Standortbeschreibung..... | 3 |
| Abb. 1.2 | Übersicht möglicher wirksamer zeitabhängiger Parameter und Prozesse | 4 |
| Abb. 2.1 | Lage der Aufschlussbohrungen und Messstellen des hydrogeologischen Untersuchungsprogramms (aus /KLI 07/) | 7 |
| Abb. 2.2 | Darstellung der Aquifergliederung im Deck- und Nebengebirge (aus /KLI 07/) | 7 |
| Abb. 2.3 | Synoptische Übersicht der Durchlässigkeitsbeiwerte aus Pumpversuchen und Laboruntersuchungen (aus /KLI 07/) | 9 |
| Abb. 2.4 | Differenztemperaturen im Niveau –180 m (aus /BGR 03a/) | 12 |
| Abb. 2.5 | Beispiel für einen Vergleich gemessener und berechneter Temperaturlogs (aus /KLI 07/) | 13 |
| Abb. 2.6 | Aus Temperaturlogs und berechneten Wärmeleitfähigkeiten ermittelte Karte der Wärmestromdichte (aus /KLI 07/) | 14 |
| Abb. 2.7 | Beispiel für eine Anpassung der Rechenergebnisse an gemessene Werte (aus /SCH 99a/) | 18 |
| Abb. 2.8 | Schema des Salzwassertransportes aus der Gorlebener Rinne (aus /KLI 07/) | 22 |
| Abb. 4.1 | Messprinzip des EMR-Messverfahrens nach /BUN 07/ | 39 |
| Abb. 5.1 | Lageplan der Bohrungen, in welchen Temperaturmessungen durchgeführt wurden sowie das interpolierte, ungestörte Temperaturfeld der 840 m Sohle (aus /BGR 03a/) | 59 |
| Abb. 5.2 | Beispiel für eine Temperaturmessung in der Erkundungsbohrung RB032, wie sie in /BGR 03a/ dargestellt ist | 60 |
| Abb. 5.3 | Temperatur- und Gradientenlog der Go 1003 (aus /ALB 91/) | 60 |

| | | |
|----------|---|----|
| Abb. 5.4 | Temperatur und Temperaturgradienten der Schachtvorbohrungen Go 5001 (links) und 5002 (rechts) vor der Verfüllung (oben) und nach der Verfüllung (unten) | 61 |
| Abb. 5.5 | Beispiel für die Auflistung der Daten in /GRE 91/ | 63 |
| Abb. 5.6 | Temperaturverteilung nach /DEL 80/ für einen Querschnitt durch den Salzstock (aus /BGR 03a/) | 64 |
| Abb. 5.7 | Das ungestörte Temperaturfeld in einem Vertikalschnitt durch die Bohrungen Go 1003, RB032 und Go 5001 (aus /BGR 03a/) | 65 |
| Abb. 5.8 | Geologischer Horizontalschnitt in der 840 m Sohle nach /BOR 08/ mit Isothermen des natürlichen Temperaturfeldes (aus /BGR 03a/) | 66 |
| Abb. 5.9 | Aus den Daten von /BGR 03a/ kompiliertes Histogramm für die Wärmeleitfähigkeit des Salzgesteins bei verschiedenen Temperaturen... | 69 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|----------|---|
| Tab. 2.1 | Ergebnisse der Pumpversuche: Transmissivität , Durchlässigkeitsbeiwert (k_f) und Speicherkoeffizient nach dem analytischen THEIS- Verfahren (aus /KLI 07/)8 |
| Tab. 2.2 | Verwendete Wärmeleitfähigkeiten der Sedimentkomponenten Ton, Quarzsand und Wasser (aus /KLI 07/)13 |
| Tab. 4.1 | Übersicht der eingesetzten Bohrlochmessverfahren in den Erkundungsbohrungen und den Schachtvorbohrungen /KLI 07/37 |
| Tab. 4.2 | Übersicht zu Frequenzbereichen und Auflösungsvermögen von EMR Messungen.....39 |
| Tab. 5.1 | Geothermisch vermessenen Bohrungen auf der Erkundungssohle (nach /BGR 03a/).....58 |
| Tab. 5.2 | Geothermisch vermessene vertikale Tiefbohrungen im Umfeld des Er- kundungsbereiches 1 (nach /BGR 03a/)58 |
| Tab. 5.3 | Anzahl der Messungen thermischer Gesteinsparameter.....70 |
| Tab. 5.4 | Thermische Kennwerte für das Deck-, Rand- und Grundgebirge nach /NIP 00/73 |
| Tab. 5.5 | Gemessene Wärmeleitfähigkeiten mit Streubereich für Steinsalze der Tiefbohrung Go 1003 bei T=35 °C nach /NIP 00/74 |

Verzeichnis der BGR Fachberichte „Gorleben“

Baharian-Shiraz, A.; Köthe, A. & Zwirner, R. (2002): Sedimentologische und biostratigraphische Untersuchungen des Deckgebirges Gorleben. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Boehme, H. A. J.; Bornemann, O.; Delisle, G.; Eisenburger, D.; Faber, E.; Fielitz, K.; Fischbeck, R.; Fritsch, J.; Gerling, P.; Giesel, W.; Hollmann, A.; Hunsche, U.; Jaritz, W.; Kopietz, J.; Leydecker, G.; Ludwig, R.; Nickel, H.; Nipp, H.-K.; Plischke, I.; Schelkes, K.; Schmidt, G.; Schulze, O.; Strebel, O.; Tittel, G. & Zirngast, M. (1991): Übertägige geowissenschaftliche Erkundung des Standortes Gorleben: Zusammenfassender Bericht. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Boehme, J. & Wernike, W. (1993): Grundwasserstandsdaten aus dem Bereich des Salzstockes Gorleben: Teil V, Auswertung. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Bornemann, O. (1989): Geologische Bearbeitung der Schächte Gorleben 1 und 2 (Hutgestein und Salinar): 1. Zwischenbericht zum Arbeitspaket Nr. 411210. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Bornemann, O.; Behlau, J.; Fischbeck, R.; Hammer, J.; Jaritz, W.; Keller, S.; Mingerzahn, G. & Schramm, M. (2008): Description of the Gorleben site Part 3: Results of the geological surface and underground exploration of the salt formation. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Bornemann, O.; Behlau, J.; Keller, S.; Mingerzahn, G. & Schramm, M. (2003): Standortbeschreibung Gorleben Teil III: Ergebnisse der Erkundung des Salinars. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Bornemann, O.; Behlau, J. & Mingerzahn, G. (2002): Projekt Gorleben - Geologische Bearbeitung der Erkundungssohle (Geologie, Mineralogie, Geochemie): 2. Geologischer Fachbericht (Geologische Schnitte zur untertägigen Erkundung). Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Bornemann, O.; Behlau, J.; Mingerzahn, G. & Schramm, M. (2002): Geologische Bearbeitung der Schächte Gorleben 1 und 2 (Hutgestein und Salinar): Abschlussbericht. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Bornemann, O.; Bäuerle, G. & Behlau, J. (2001): Endlagerprojekt Gorleben - Geologische Bearbeitung der Erkundungssohle (Geologie, Mineralogie, Geochemie) : 1. Geologischer Ergebnisbericht EB1. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Bornemann, O. & Fischbeck, R. (1990): Geologische Bearbeitung der Schächte Gorleben 1 und 2 (Hutgestein und Salinar): 2. Zwischenbericht zum Arbeitspaket Nr. 411210. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Bornemann, O. & Fischbeck, R. (1988): Salzstockuntersuchungsbohrung Gorleben 1004: Schichtenverzeichnis ab Oberfläche des Salzstocks. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Bornemann, O.; Fischbeck, R. & Mingerzahn, G. (1992): Geologische Bearbeitung der Schächte Gorleben 1 und 2 (Hutgestein und Salinar): 4. Zwischenbericht zum Arbeitspaket Nr. 411210. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Bräuer, V.; Eickemeier, R.; Eisenburger, D.; Grissemann, C.; Hesser, J.; Heusermann, S.; Kaiser, D.; Nipp, H.-K.; Nowak, T.; Plischke, I.; Schnier, H.; Schulze, O.; Sönke, J. & Weber, J. R. (2011): Description of the Gorleben site Part 4: Geotechnical exploration of the Gorleben salt dome. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Duphorn, K.; Kabel, C.; Schneider, U. & Schröder, P. (1983): Quartärgeologische Gesamtinterpretation Gorleben: Abschlussbericht. Fachbericht, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung.

Eisenburger, D. & Grissemann, C. (2003): Projekt Gorleben - Laboruntersuchungen zur Bestimmung der thermophysikalischen und elektrischen Gesteinsparameter. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Eisenburger, D. & Gudelach, V. (2003): Elektromagnetische Hochfrequenz-Reflexionsmessungen (EMR) im Erkundungsbergwerk Gorleben: Abschlussbericht. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Eisenburger, D.; Gudelach, V. & Kahnt, W. (2002): Elektromagnetische Hochfrequenz-Reflexionsmessungen (EMR) im Erkundungsbereich 1 des Erkundungsbergwerks Gorleben: Ergebnisbericht III. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Eisenburger, D.; Gudelach, V. & Kahnt, W. (2002): Elektromagnetische Hochfrequenz-Reflexionsmessungen (EMR) im Bereich der Infrastrukturräume (EB 1) im Erkundungsbergwerk Gorleben: Ergebnisbericht II. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Eisenburger, D.; Gudelach, V. & Kahnt, W. (2000): Elektromagnetische Hochfrequenzreflexionsmessungen (EMR) im Salinarteil der Schächte des Erkundungsbergwerks Gorleben. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Faber, E.; Gerling, P. & Bornemann, O. (1996): Bericht über Gasproben aus den Schächten Gorleben 1 und 2 sowie EB 1. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.

Gerling, J. P.; Faber, E. & Wehner, H. (2002): Projekt Gorleben - Geologische Bearbeitung der Erkundungssohle: Interpretation der chemischen Analysen von gasförmigen und flüssigen Kohlenwasserstoffen (einschließlich der Daten aus der obertägigen Erkundung und der Schächte). Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Greinwald, S.; Thierbach, R. & Eisenburger, D. (1991): Geophysikalische Grundlagen der Erkundung: Elektromagnetik und Thermophysik. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.

Grisseemann, C. & Czora, C. (2003): Projekt Gorleben - Das natürliche Temperaturfeld im Erkundungsbereich 1. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Hesser, J. & Schnier, H. (2002): Ergebnisse festigkeitsmechanischer Laboruntersuchungen an Bohrkernen aus den Schächten Gorleben 1 und 2. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Hunsche, U.; Schulze, O.; Walter, F. & Plischke, I. (2003): Projekt Gorleben - Thermo-mechanisches Verhalten von Salzgestein. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Klinge, H. (1994): Zusammenfassende Bearbeitung der chemischen und isotopengeochemischen Zusammensetzung der Grundwässer im Deckgebirge des Salzstocks Gorleben und seiner Randsenken - Projektgebiet Gorleben-Süd. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Klinge, H. & Baharian-Shiraz, A. (2004): Projekt Gorleben - Dokumentation hydrogeologischer Basisdaten. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Klinge, H.; Boehme, J.; Grisseemann, C.; Houben, G.; Ludwig, R. R.; Schelkes, K. & Schildknecht, F. (2004): Projekt Gorleben - Standortbeschreibung Teil II: Deckgebirge Hydrogeologie. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Klinge, H.; Boehme, J.; Grisseemann, C.; Houben, G.; Ludwig, R.-R.; Rübel, A.; Schelkes, K.; Schildknecht, F. & Suckow, A. (2007): Description of the Gorleben site Part 1: Hydrogeology of the overburden of the Gorleben salt dome. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Klinge, H.; Margane, A.; Mrugalla, S.; Schelkes, K. & Söfner, B. (2001): Hydrogeologie des Untersuchungsgebietes Dömitz-Lenzen. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Klinge, H. & Wernike, W. (1994): Dokumentation der chemischen und isotopengeochemischen Analysen an Grundwässern aus dem Deckgebirge des Salzstocks Gorleben und seiner Randsenken - Projektgebiet Gorleben Süd: Band 1. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.

Klinge, H. & Wippermann, T. (1993): Auswertung von Vergleichsanalysen an Grundwässern aus dem Bereich des Salzstocks Gorleben. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Kooi, H. & Groen, J. (2001): Offshore continuation of coastal groundwater systems: predictions using sharp-interface approximations and variable-density modeling. *Journal of Hydrology* 246, 19-35.

Kopietz, J. (1988): Hydrogeologische, geohydraulische und geothermische Untersuchungen an geplanten Standorten für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.

Köhler, N.; Spies, T. & Dahm, T. (2009): Seismicity patterns and variation of the frequency-magnitude distribution of microcracks in salt. *Geophysical Journal International* 179(1): 489--499.

Köthe, A.; Hoffmann, N.; Krull, P.; Zirngast, M. & Zwirner, R. (2007): Description of the Gorleben site Part 2: Geology of the overburden and adjoining rock of the Gorleben salt dome. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Köthe, A.; Strahl, J. & Weiß, W. (1999): Biostratigraphie Dömitz-Lenzen - Ergebnisse der biostratigraphischen Untersuchungen des tertiären und quartären Deckgebirges. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Köthe, A.; Zirngast, M. & Zwirner, R. (2003): Dokumentation von Daten und Unterlagen der geologischen, biostratigraphischen und strukturgeologischen Erkundung des Deckgebirges. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Köthe, A.; Zirngast, M. & Zwirner, R. (2003): Projekt Gorleben - Standortbeschreibung Teil I: Deckgebirge Geologie. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Köthe, A. & Zwirner, R. (2004): Projekt Gorleben - Zur Aufbewahrung von Daten und Unterlagen der geologischen, übertägigen Erkundung. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.

Langkutsch, U.; Lotsch, D. & Ziermann, H. (1991): Sachstandsbericht zu den geologisch-hydrogeologischen Kenntnissen über das jüngere Känozoikum im zukünftigen Untersuchungsgebiet Gorleben-Nord und angrenzenden Gebieten. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.

Ludwig, R.; Beushausen, M.; Kantor, W. & Köthe, A. (1991): Hydrogeologisches Untersuchungsprogramm Gorleben - Tätigkeitsbericht 1990: Geologische Bearbeitung der Schächte Gorleben 1 und Gorleben 2, Deckgebirge und Hohlraumfüllungen im Hutgestein. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Ludwig, R. R. (2001): Hydrogeologische Untersuchungen Gorleben - Hydrogeologische Grundlagen für Modellrechnungen - Kenntnisstand 2000. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Majorowicz, J. & Wybraniec, S. (2011-06-01): New terrestrial heat flow map of Europe after regional paleoclimatic correction application. *International Journal of Earth Sciences* 100(4): Springer Berlin / Heidelberg, 881-887--887.

Nipp, H.-K.; Eckmeier, R. & Heusermann, S. (2003): Projekt Gorleben - Erkundungsbegleitende großräumige gebirgsmechanische Berechnungen. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Nipp, H.-K. & Heusermann, S. (2000): Erkundungsbergwerk Gorleben – Gebirgsmechanische Beurteilung der Integrität der Salzbarriere im Erkundungsbereich EB 1 für das technische Endlagerkonzept 1 (Bohrlochlagerung BSK3): Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Nowak, T.; Richard, J. R. & Bornemann, O. (2002a): Gas- und Lösungsreservoir im Salzstock Gorleben. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Nowak, T. & Weber, J. R. (2002b): Hydraulische Charakterisierung der Salzbarriere Gorleben. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Ochmann, N. (1993): Auswertung der Elektromagnetischen Meßdaten aus der Überfliegung des Raumes Gorleben. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Ochmann, N. (1992): Projekt Gorleben - Berechnung von Tiefenprofilen des Tongehalts und der Porosität aus Bohrlochmessungen in Lockersedimenten. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.

Ophori, D. U. (1998): The significance of viscosity in density-dependent flow of groundwater. *Journal of Hydrology* 204(1-4): 261--270.

Plischke, I. (2002): Projekt Gorleben - Gebirgsmechanische und geotechnische Untersuchungen im Labor und in situ: Ingenieurgeologische Erkundung der Homogenbereiche. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Plischke, I. (2002): Laboruntersuchungen an Proben aus dem Salinarteil der Schächte Gorleben. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Post, V. & Kooi, H. (2003-10-01): Rates of salinization by free convection in high-permeability sediments: insights from numerical modeling and application to the Dutch coastal area. *Hydrogeology Journal* 11(5): Springer Berlin / Heidelberg, 549-559--559.

Schildknecht, F. (1999): Dichteschichtung und Druckverteilung im salinen Grundwasser des Untersuchungsgebiets Dömitz-Lenzen. Ergebnisse der Auswertung von Induction-Logs und Absolutdruckmessungen. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.

Schmidt, G. (1987): Die Bewegung des Grundwassers im Deckgebirge über dem Salzstock Gorleben. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Schnier, H. (2003): Bewertung der Verformungsmessungen in den Schächten Gorleben 1 und 2 (Salinar): Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Schnier, H. (2003): Projekt Gorleben - Ergebnisse festigkeitsmechanischer Laboruntersuchungen an Bohrkernen von der Erkundungssohle. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Schramm, M.; Kühnlenz, T.; Mingerzahn, G. & Hammer, J. (2009): Lösungen im Salzstock Gorleben - eine Dokumentation und genetische Interpretation. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Zhou, Y. & Li, W. (2011): A review of regional groundwater flow modeling. *Geoscience Frontiers* 2(2): 205--214.

Zimmer, U. (2001): Quantitative Untersuchung zur Mikrorissigkeit aus akustischen Gesteinseigenschaften am Beispiel von Steinsalz und Anhydrit. PhD thesis, TU Berlin.

Zirngast, M. (2004): Randsenkenanalyse des Salzstocks Rambow. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Zirngast, M. (1991): Strukturgeologie der Umgebung des Salzstocks Gorleben. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Zirngast, M.; Zwirner, R.; Bornemann, O.; Fleig, S.; Hoffmann, N.; Köthe, A.; Krull, P. & Weiß, W. (2003): Projekt Gorleben - Schichtenfolge und Strukturbau des Deck- und Nebengebirges. Fachbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

**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

**international nuclear safety
engineering GmbH**
Jesuitenstraße 4
52062 Aachen

ISBN 978-3-939355-52-6