



Abschlussbericht 9S2022020000 – Hannover, März 2024

Standortauswahl

**Entwicklung einer Methode zur Bewertung von
Wirtsgesteinsanteilen mit Barrierefunktion
und der Internbauvariabilität in Salzstrukturen
(Teilgebiete in Steinsalz in steiler Lagerung)**

Standortauswahl

Datenbasis zu Salzstrukturen, Variabilitätsstudie und Entwicklung einer Prognosemethode zum Internbau von Salzstrukturen

Abschlussbericht

Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Wirtsgesteinsanteilen mit Barrierefunktion und der Internbauvariabilität in Salzstrukturen (Teilgebiete in Steinsalz in steiler Lagerung)

Autoren:	Pollok, Lukas Jähne-Klingberg, Fabian Paul, Benjamin
Auftraggeber:	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)
Auftragsnummer:	9S2022020000
Dienstbereich:	Hannover
Datum:	12.03.2024
Geschäftszeichen:	B3/B50161-23/2024-0001/001
Gesamtblattzahl:	119 zuzüglich 1 Anlage auf digitalem Datenträger

Im Auftrag:	gez. N. Schubarth-Engelschall Direktorin und Professorin N. Schubarth-Engelschall Stv. Abteilungsleitung B 3 und stv. Projektleitung Endlagerung
-------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Inhaltsverzeichnis

Verkürzte Zusammenfassung	4
Abstract	5
1 Veranlassung	6
2 Einleitung	7
2.1 Teilgebiete im Wirtsgestein Steinsalz in steiler Lagerung	7
2.2 Bisherige Studien zur Untersuchung und Bewertung von Salzformationen und Salzstrukturen als Untergrundspeicher	8
2.3 Übermittlung von Salzstruktur-Metadaten aus der InSpEE-Datenbank	9
3 Geologischer Rahmen	13
3.1 Bildung von Salzlagerstätten	13
3.2 Salzformationen in Deutschland	14
3.2.1 Perm: Rotliegend	17
3.2.2 Perm: Zechstein	19
3.3 Salztektonik und die Entstehung von Salzstrukturen	20
3.3.1 Verbreitung und Variabilität in Größe und Form von Salzstrukturen	23
4 Kenntnisstand zum Internbau von Salzstrukturen	27
4.1 Faltenbau	30
4.2 Fallbeispiele aus dem Norddeutschen Becken	34
5 Methodenentwicklung zur Bewertung der Wirtsgesteinsanteile und der Internbauvariabilität von Salzstrukturen (Salzformationen in steiler Lagerung)	44
5.1 Identifikation und Beschreibung von geologischen Faktoren	44
5.1.1 Entwicklungsgeschichte	45
5.1.1.1 Strukturaufbauendes Salinar	46
5.1.1.2 Entwicklungsphasen und regionalgeologisches Setting	51
5.1.2 Morphologie	54
5.1.2.1 Querschnittsfläche	54
5.1.2.2 Mächtigkeit	58
5.1.2.3 Formfaktor	60
5.1.3 Beckenlage	63
5.1.3.1 Primäre Steinsalzmächtigkeiten	63

5.1.3.2 Fazies	70
5.2 Übersicht der Wichtung der geologischen Faktoren	72
5.3 Weitere Faktoren mit fakultativer oder ohne Anwendung	72
5.3.1 Grundrissform bzw. -abmessungen	72
5.3.2 Vorkommen von Kalisalzen	79
5.4 Exemplarische Anwendung der Methode	80
5.5 Prognostizierbarkeit der Anteile potenzieller Wirtsgesteine nach Salzstrukturtypen und Strukturniveaus	84
5.6 Ungewissheiten und Einschränkungen der Methode	91
5.7 Möglichkeiten der Methodenanwendung im Rahmen des StandAG	93
6 Fazit und Empfehlungen	93
Literaturverzeichnis	96
Abkürzungsverzeichnis	109
Tabellenverzeichnis	110
Abbildungsverzeichnis	111
Anlageverzeichnis	116

Verkürzte Zusammenfassung

Autoren:	Pollok, Lukas Jähne-Klingberg, Fabian Paul, Benjamin
Titel:	Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Wirtsgesteinsanteilen mit Barrierefunktion und der Internbauvariabilität in Salzstrukturen (Teilgebiete in Steinsalz in steiler Lagerung)
Schlagwörter:	Diapir, Internbau, Methodenentwicklung, Salzstrukturen, Standortauswahl, Wirtsgestein

In Schritt 1 der Phase I des Standortauswahlverfahrens wurden 60 Teilgebiete in Salzdiapiren ("Steinsalz in steiler Lagerung") ausgewiesen. Die Salzdiapire sind durch Mobilisierung und Aufstieg von Salzgestein („Halokinese“) entstanden und weisen durch die damit verbundene Verfaltung einen teilweise komplexen Internbau auf. Neben Steinsalz kommen auch andere Evaporite und Gesteine vor. Dies stellt eine Herausforderung für die Prognose der Anteile und der räumlichen Verteilung zusammenhängender Wirtsgesteinsanteile mit Barrierefunktion dar. Hinzu kommt, dass in den 60 Teilgebieten nur wenig diesbezügliche ortsspezifische Daten vorliegen. Vor diesem Hintergrund wurde eine Methode zur Abschätzung und Bewertung der Anteile homogener Steinsalzbereiche und des Grades der Variabilität ihrer Lagerungsverhältnisse entwickelt. Basierend auf einer Literaturstudie und den Erkenntnissen aus der Erkundung von Salzlagerstätten in Mittel- und Norddeutschland wurden verschiedene geologische Faktoren unterschiedlicher Relevanz ermittelt, die Einfluss auf den internen Aufbau von Salzdiapiren bzw. die Verteilung von Steinsalzbereichen haben. Die entwickelte Methode bietet im Rahmen der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen die Möglichkeit, die 60 Teilgebiete in steilstehendem Steinsalz hinsichtlich ihrer geologischen Voraussetzungen für das Auffinden größerer Wirtsgesteinsbereiche mit Barrierefunktion (für die spätere Ausweisung eines ewG) systematisch zu bewerten.

Abstract

Authors:	Pollok, Lukas Jähne-Klingberg, Fabian Paul, Benjamin
Title:	Development of a method to assess host rock proportions with barrier function and internal variability in salt structures (sub-areas in steep rock salt formations)
Subject terms:	diapir, internal structure, method development, salt structures, site selection, host rock

In step 1 of phase I of the site selection procedure 60 sub-areas in salt diapirs („steep rock salt formations“) were determined. Salt mobilisation and rise (halokinesis) led to the formation of diapirs. In parts, associated folding led to complex internal structures. Besides rock salt other evaporates and other types of rock are also present. This poses a challenge for predicting proportions and spatial distribution of continuous and connected host rock zones with barrier effect. Furthermore, there is only few site-specific data available for the 60 sub-areas in this regard. Against this background, we developed a method for estimating and evaluating the proportions of zones where homogeneous rock salt is present and the degree to which their structural and bedding conditions vary. Various geological criteria of different relevance were identified that affect the internal structure and distribution of homogeneous rock salt zones. These criteria were developed based on a literature study and findings from exploration of salt deposits in Middle and Northern Germany. In the context of the representative preliminary safety analyses, this method provides a mean for a systematic assessment of the 60 sub-areas in „steep rock salt formations“ regarding their geological conditions to locate continuous and connected zones of homogeneous host rocks with barrier effect (for the subsequent designation of the containing providing rock zone).

1 Veranlassung

Im Rahmen der sog. Geosynthese der Teilgebiete für die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) werden vorhandene ortsspezifische geologische und geophysikalische Daten zur geologischen Charakterisierung der Teilgebiete mit Steinsalz in steiler Lagerung zielgerichtet von der BGE ausgewertet (BGE 2022a). Es ist absehbar, dass die Datenlage für eine belastbare Prognose der jeweiligen räumlichen und anteiligen Verteilung von Wirtsgesteinen mit Barrierefunktion (für die zukünftige Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG)), also Steinsalz gem. Wirtsgesteinsdefinition (BGE 2022a) in den einzelnen Salzstrukturen unzureichend ist.

In diesem Zusammenhang sollte im Rahmen dieses Arbeitspaketes zunächst die Möglichkeit der Entwicklung und Anwendung einer Methode zu Abschätzung und Bewertung der Anteile homogener Steinsalzbereiche und des Grades der Variabilität ihrer Lagerungsverhältnisse geprüft werden (BGE 2022a). Mit der Erarbeitung einer entsprechenden Methode hat die BGE die BGR am 01.03.2022 im Rahmen der Zusammenarbeitsvereinbarung zwischen BGE und BGR (BGE & BGR 2018) mit einem Arbeitspaket („Datenbasis zu Salzstrukturen, Variabilitätsstudie und Entwicklung einer Prognosemethode zum Internbau von Salzstrukturen“ (AP-Nr.: 9S 2022020000)) beauftragt. Daneben sollten für die Teilgebiete, für die bei der BGR geologische Daten zu den Salzstrukturen vorliegen bzw. in früheren Projekten erarbeitet wurden, übersichtlich zusammengestellt und an die BGE übermittelt werden.

I. d. R. sind Teilgebiete in Steinsalz in steiler Lagerung hinsichtlich ihres Internbaus ungenügend erkundet, da sie entweder vollkommen oder in großen Teilen unverritz sind. Zerstörungsfreie geophysikalische Messverfahren von der Erdoberfläche oder aus der Luft geben nach aktuellem Stand von Wissenschaft und Technik nur wenig Aufschluss über den Internbau von Salzstrukturen. Dies gilt z. B. für die Auswertung bereits vorhandener 2D- oder 3D-seismischer Datensätze. Sofern Bohrungen in den Teilgebieten abgeteuft wurden, hatten diese zumeist nicht den detaillierten Aufschluss der Salzlagerstätte zum Ziel, sondern dienten z. B. der Kohlenwasserstoffprospektion im Nebengebirge oder im Liegenden von Salzformationen. Auch wenn vereinzelt Bohrungen vorhanden sind, die ein Wirtsgestein in ausreichender Mächtigkeit entsprechend der Mindestanforderung gemäß § 23, Abs. 5, Nr. 5 StandAG (StandAG 2017) nachgewiesen haben, so kann dies nicht prinzipiell für das gesamte Teilgebiet angenommen werden. Im Umkehrschluss bedeutet ein Aufschluss von überwiegend nicht-halitischem Gestein nicht, dass größere Steinsalzpartien nicht an anderer Stelle der Salzstruktur vorhanden sein können. Ursächlich hierfür ist der Salzaufstieg (im Zuge der sog. „Halokinese“), der die Bildung von Salzstrukturen in der geologischen Vergangenheit ermöglichte und zu teilweise komplex verfalteten Gesteinsschichten innerhalb der Salzstrukturen führte.

Mit der entwickelten Methode sollen über Analogieschlüsse von gut erkundeten Salzstrukturen (z. B. durch Berg- oder Kavernenbau) geologische Informationen und Verhältnisse auf weniger gut erkundete Salzstrukturen übertragen werden. Gleichwohl soll der Internbau dieser gut erkundeten Fallbeispiele analysiert und mögliche Faktoren identifiziert und bewertet werden, die zur Bildung des vorliegenden Internbaus geführt haben.

Das Hauptziel der Entwicklung und späteren Anwendung dieser Methode ist es, die räumlichen und anteiligen Vorkommen von Steinsalzabfolgen in Salzstrukturen abzuschätzen, welche die Barrierefunktion eines später festzulegenden ewG voraussichtlich erfüllen. Der ewG kann erst zu einem späteren Zeitpunkt des Verfahrens festgelegt werden. Jedoch müssen bereits in dieser Phase bestmögliche Annahmen getroffen werden, um z. B. die Größe und Raumlage des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion (WbB) für die Anwendung der Anforderungen aus dem StandAG (StandAG 2017) und der Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiUntV) im Rahmen der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen abschätzen zu können (s. dazu BGE (2022a)).

Mit der Entwicklung einer anwendungsreifen Methode können die 60 Teilgebiete in Steinsalz in steiler Lagerung systematisch hinsichtlich ihrer geologischen Voraussetzungen für das Auffinden hinreichend großer WbB bewertet werden. Folglich kann die Methode bei der Reduzierung der Anzahl und Fläche von Teilgebieten für die übertägige Erkundung in Phase II unterstützen.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Entwicklung der Methode anhand von geologischen Faktoren, die Einfluss auf den internen Aufbau von Salzdiapiren bzw. die interne Verteilung von Wirtsgesteinsbereichen mit Barrierefunktion haben.

2 Einleitung

2.1 Teilgebiete im Wirtsgestein Steinsalz in steiler Lagerung

Die BGE hat im Jahr 2020 gem. § 13 StandAG 90 Teilgebiete ermittelt, die günstige geologische Voraussetzungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle erwarten lassen (BGE 2020). Davon wurden 74 Teilgebiete im Wirtsgestein Steinsalz ausgewiesen. Entsprechend ihrer Lagerungsform befinden sich davon 14 Teilgebiete in flachlagernden, meist stratiformen Schichten und 60 Teilgebiete in Steinsalz in steiler Lagerung. Darunter sind Salzdiapire zu verstehen, die in der geologischen Vergangenheit aus ursprünglich flach abgelagerten Evaporitserien durch Salzbewegungen aus dem Untergrund aufgestiegen sind und dabei ihr Deckgebirge diapirisch durchbrochen haben. Etwa 400 solcher Salzdiapire sind im Norddeutschen Becken bekannt (von Goerne et al. 2016), wovon 95 Diapire in den identifizierten 60 Teilgebieten liegen (Abb. 1). Die unterschiedliche Anzahl von Diapiren und Teilgebieten ergibt sich daraus, dass einige dieser Diapire in Strukturzügen (sog. „Salzmauern“) angeordnet sind und deshalb innerhalb eines Teilgebiets zusammengefasst wurden (vgl. Teilgebiet „068_00TG_163_00IG_S_s_z-ro“, BGE (2020)).

Salzdiapire in insgesamt 49 Teilgebieten (TG) werden allein von oberpermischen salinaren Gesteinen des Zechsteins und elf Teilgebiete zusätzlich durch Rotliegendesalinarabfolgen aufgebaut. Letztere werden daher auch Doppelsalinarstrukturen genannt. Während sich diese in den zentralen Beckenbereichen befinden (Bereiche mit den höchsten Zechstein- und Rotliegendesedimentmächtigkeiten), verteilen sich die dominant aus Zechsteinsalinen gebildeten Diapire über das gesamte Norddeutsche Becken. 53 TG liegen auf dem Festland, sieben vollständig oder teilweise unter Meeresbedeckung. Die TG in

Steinsalz in steiler Lagerung weisen unterschiedliche äußere Formen und Größen auf. Die Gesamtflächen variieren zwischen 6 km² und 274 km², die Mächtigkeiten der Salinarschichten in den TG zwischen 300 m und 1200 m im definierten endlagerrelevanten Teufenintervall von 300 – 1500 m u. GOK¹ (vgl. BGE 2020j).

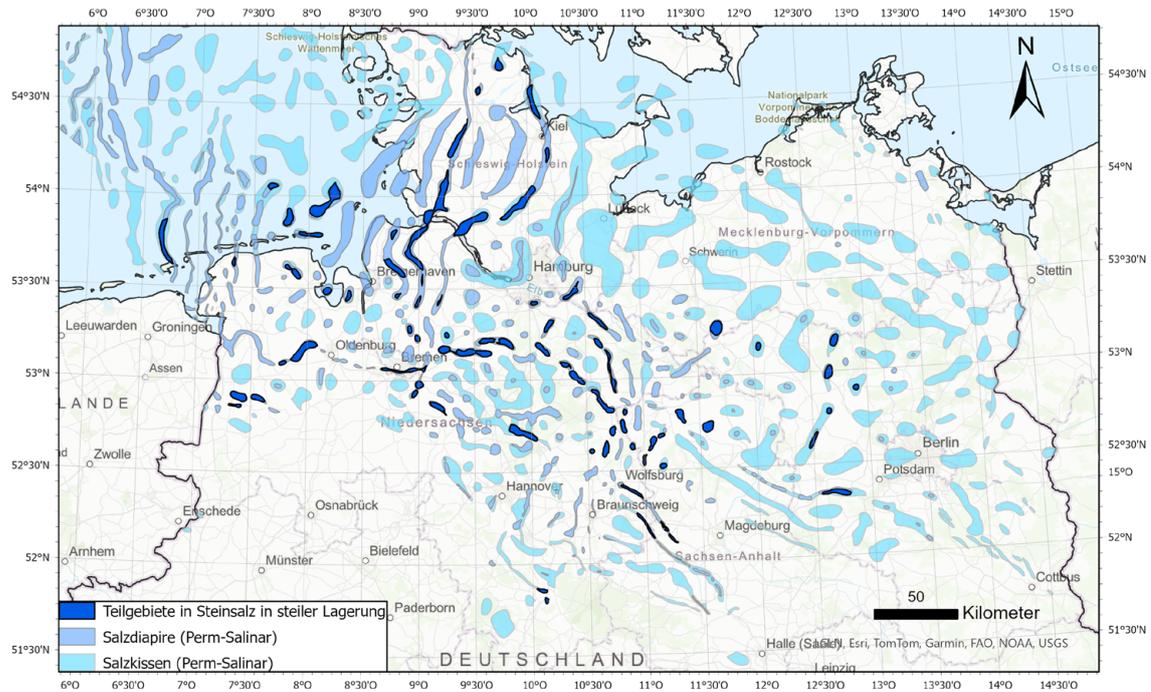


Abb. 1: Verbreitung von Salzstrukturen permischer Salinare in Norddeutschland (nach Reinhold et al. (2008) und von Goerne et al. (2016)) sowie ausgewiesene Teilgebiete in Steinsalz in steiler Lagerung (BGE 2020).

2.2 Bisherige Studien zur Untersuchung und Bewertung von Salzformationen und Salzstrukturen als Untergrundspeicher

In mehreren Studien wurde in Deutschland die Eignung von Salinarformationen und Salzdiapiren für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen untersucht (Kockel et al. 1995; Kockel & Roland 1977; Krull 1991; Reinhold et al. 2014). Unter systematischer Anwendung verschiedener Kriterien und Rahmenbedingungen, wovon sich einige (Tiefenlage, Endlagerfläche etc.) auch in den aktuellen Anforderungen des StandAG wiederfinden, wurden untersuchungswürdige Formationen und Salzstrukturen erarbeitet. Beschreibungen zum Internbau von Salzstrukturen finden sich nur dort wieder, wo ein Aufschluss durch Bohrungen erfolgte. Die Dokumentationen beschränken sich dann häufig auf eine kurze Darstellung der angetroffenen Schichtenfolgen. Es fehlen jedoch gezielte Analysen zu nutzbaren Steinsalzanteilen bzw. beschränken sich diese auf überschlägige Annahmen

¹ Ein ewG muss gem. § 23, Abs. 5, Nr. 3 StandAG mindestens 300 m u. GOK liegen (StandAG 2017); die maximale Suchteufe wurde von BGE auf 1500 m u. GOK festgelegt (BGE 2020j)

mit Blick auf das gesamte Salzvolumen im Untergrund. Teilweise wurde die Wahrscheinlichkeit von „Komplikationen“ im Internbau anhand folgender indirekter Kriterien beschrieben: bestimmte strukturmorphologische Indizien (z. B. Überhänge), die Beteiligung mehrerer Salinare (Rotliegend und Zechstein) oder eine komplizierte Genese (Kockel et al. 1995). Eine umfassende und differenzierte Analyse der Einflussfaktoren erfolgte jedoch nicht.

Weitere systematische Untersuchungen von stratiformen und diapirischen Salzvorkommen erfolgten im Zuge ihrer potenziellen Nutzung als Kavernenspeicher (Baldschuhn et al. 1979a, 1979b; von Goerne et al. 2016; Röhling et al. 2020; Zander-Schiebenhöfer et al. 2015). In den InSpEE-Projekten wurde erstmals ein Ansatz verfolgt, die norddeutschen Salzstrukturen entsprechend ihrer nutzbaren Wirtsgesteinsanteile zu bewerten. Als Grundlage dienten Erkenntnisse aus intern gut erkundeten Salzstrukturen, die auch in diesem Arbeitspaket berücksichtigt wurden. Als maßgebliche Faktoren wurden 1) das strukturaufbauende Salinar, 2) das Entwicklungsstadium (die Reife) der Salzstrukturen sowie 3) der tektonische Einfluss während ihrer Genese identifiziert. Der Einfluss dieser Faktoren wurde nachfolgend über Analogieschlüsse von gut erkundeten auf nicht bzw. wenig erkundete Salzstrukturen übertragen und bewertet. Dies bildete zusammen mit den zur Verfügung stehenden Salzvolumina die Grundlage für die Abschätzung des Energiespeicherpotenzials in den norddeutschen Salzstrukturen. Die entwickelte Bewertungsmethodik sollte als eine Basis für dieses Projekt genutzt und eine Weiterentwicklung geprüft werden.

Allen Untergrundspeichernutzungen in Salzstrukturen ist als wichtigste Anforderung gemein, dass ein ausreichendes Volumen und eine große Homogenität im Wirtsgestein Steinsalz vorhanden sein sollte.

2.3 Übermittlung von Salzstruktur-Metadaten aus der InSpEE-Datenbank

In den zwei InSpEE-Projekten wurden von der BGR Metadaten zu allen norddeutschen Salzstrukturen in einer Datenbank zusammengetragen. Für Salzdiapire in Teilgebieten wurden diese Daten von der BGE zur weiteren Verwendung angefragt. Zu diesem Zweck wurden die Daten nochmals auf Aktualität und Konsistenz geprüft, ergänzt und übersichtlich im PDF-Format bzw. maschinell lesbar als ASCII- und Shape-Dateien ausgegeben. Die an BGE übergebenen Daten sind in Form der PDF-Datenblätter Anlage 1 zu entnehmen.

Die Metadaten unterscheiden sich je nach Untersuchungsgrad der Salzstrukturen bzw. Dokumentationsumfang in ihrer Vollständigkeit und im Detaillierungsgrad. Für die InSpEE-Projekte zwingend erforderliche Daten sind mit einem * in der nachfolgenden Auflistung markiert und dementsprechend für alle Salzstrukturen vorhanden. Die Metadaten wurden, sofern vorhanden, in der folgenden Datenstruktur erfasst:

- Allgemeine Informationen
 - Strukturname*

Standortauswahl

Pollok, L. et al. (2024): Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Wirtsgesteinsanteilen mit Barrierefunktion und der Internbauvariabilität in Salzstrukturen – Abschlussbericht; Hannover (BGR)



- Anteil auf dem Festland* [%]
- Topographische Höhe* [mNN]
- Bundesland*
- TK25 Blattnummern

- Konkurrierende interne Nutzung
 - Nutzungsart* [z. B. Kavernenstandort, inkl. Status, z. B. in Betrieb]
 - Bemerkungen [Freitext]

- Konkurrierende Nutzung im Umfeld
 - Nutzungsart [z. B. Erdöl, inkl. Status, z. B. stillgelegt]
 - Nutzungslage [z. B. Flankenbereich]
 - Bemerkungen [Freitext]

- Strukturbeschreibung
 - Strukturtyp* [Salzkissen, Salzdiapir]
 - Strukturtop* [mNN/mGOK]
 - Maximalerstreckung* [Länge x Breite, km]
 - Sekundärmächtigkeit* [m]
 - Salzspiegel [mNN]
 - Zechsteinbasis [von/bis, mNN]
 - Dachrandtiefe [mNN]
 - Dachfläche [km²]
 - Strukturaufbauendes Salinar* [z. B. Rotliegend, Zechstein...]
 - Fläche in Niveauschnitten [km² in -500 m, -1000 m, -1500 m, -2000 m]

- Morphologie
 - Umriss [rund, oval, langgestreckt, unregelmäßig]
 - Streichrichtung [Himmelrichtung, z. B. NW-SE]
 - Anzahl der Kulminationen [1, 2...]
 - Intensität der Aufwölbung [z. B. stark]

Standortauswahl

Pollok, L. et al. (2024): Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Wirtsgesteinsanteilen mit Barrierefunktion und der Internbauvariabilität in Salzstrukturen – Abschlussbericht; Hannover (BGR)



- Kissenfuß [vorhanden/nicht vorhanden]
 - Bemerkungen [Freitext]
- Scheitelstörung [vorhanden/nicht vorhanden]
 - Bemerkungen [Freitext]
- Subrosionssenken [vorhanden/nicht vorhanden]
 - Bemerkungen [Freitext]
- Bemerkungen [Freitext]
- Flanken
 - Ausbildung [z. B. steil]
 - Symmetrie [vorhanden/nicht vorhanden]
 - Bemerkungen [Freitext]
 - Überhänge [vorhanden/nicht vorhanden]
 - Bemerkungen [Freitext]
- Deckgebirge
 - Quartäre Rinnen [vorhanden/nicht vorhanden]
 - Bemerkungen [Freitext]
 - Bemerkungen [Freitext]
- Hutgestein
 - Mächtigkeit [von/bis, m]
 - Bemerkungen [Freitext]
- Genese
 - Kissenstadium [stratigraphisches Kürzel, z. B. sm = Mittlerer Buntsandstein]
 - Diapirstadium [stratigraphisches Kürzel, z. B. ju = Unterjura]
 - Strukturentwicklung Bemerkungen [Freitext]
 - Primäre Randsenken [stratigraphisches Kürzel, inkl. Bemerkungen]
 - Sekundäre Randsenken [stratigraphisches Kürzel, inkl. Bemerkungen]
 - Tertiäre Randsenken [stratigraphisches Kürzel, inkl. Bemerkungen]

Standortauswahl

Pollok, L. et al. (2024): Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Wirtsgesteinsanteilen mit Barrierefunktion und der Internbauvariabilität in Salzstrukturen – Abschlussbericht; Hannover (BGR)



- Tektonik
 - Sockelstruktur [gestört/nicht gestört/unbekannt]
 - Bemerkungen [Freitext]
 - Regionaltektonische Lage
 - Scholle(n)/Strukturregion [z. B. Pompeckj-Block]
 - Störungszone(n) [z. B. Allertal-Lineament]
 - Bemerkungen [Freitext]
 - Salzkeil [vorhanden/nicht vorhanden/unbekannt]
 - Bemerkungen [Freitext]
 - Überprägung [Freitext]
 - Bemerkungen [Freitext]
- Internbau
 - Bemerkungen [Freitext]
 - Typ Einordnung* [z. B. Doppelsalinar Typ 1]
 - Anteil z2 [%; in -500 m, -1.000 m, -1.500 m, -2.000 m]
- Untersuchungsgrad
 - Bohrung(en) [Reichweite bis: Deckgebirge, Hutgestein, Salinar, Sockel]
 - Bergbau [Anzahl Schächte; Status, z. B. geflutet]
 - Tagesaufschluss [Freitext]
 - Bewertung Seismik [gut/mäßig etc.]
 - 3D-Seismik [vorhanden/nicht vorhanden]
 - Bemerkungen [Freitext]
 - Gesamtbewertung [gut/mäßig etc.]
- Literatur
 - Auflistung der Quellen als Literaturverzeichnis

Neben diesen Metadaten sind die maximale Salzstrukturausdehnung und die Salzstrukturausdehnungen in vier Teufen (-500 m, -1.000 m, -1.500 m, -2.000 m u. NN) als Horizontalschnitte sowie die Kulminationspunkte (höchster Punkt einer Salzstruktur) als ESRI-Shapedateien für alle Strukturen in der Datenbank hinterlegt.

3 Geologischer Rahmen

3.1 Bildung von Salzlagerstätten

Steinsalz ist ein durch Verdunstung (Evaporation) von Meerwasser entstandenes chemisches Sedimentgestein. Daher bezeichnet man saline Gesteine auch als Evaporite. Die sog. Barrentheorie, aufgestellt von Ochsenius (1877), veranschaulicht die Bildung von Salzlagerstätten, wonach ein flaches Meer durch eine untermeerische Barre zeitweise oder vollkommen vom offenen Ozean getrennt ist. Bei der Verdunstung von Meerwasser in dem abgeschnürten Meeresbecken fallen mit zunehmender Löslichkeit unterschiedliche Evaporite aus dem Wasser aus (Abb. 2). Bei idealer Ausscheidungsfolge beginnt die Abscheidung der Evaporite mit Karbonaten, gefolgt von Gips und Anhydrit, Steinsalz und schließlich Kali- und Magnesiumsalzen. In den meisten Evaporiten Deutschlands sind diese Ausscheidungszyklen allerdings mehr oder weniger unterbrochen. So kann die Salzabscheidung z. B. durch die Zufuhr frischen Meerwassers zur Verdünnung der Salzlauge und damit zur Ausfällung von Anhydrit führen. Steinsalzlager können daher durch verschiedene Einflüsse durch zwischengelagerte Anhydrit- und Tongesteine oder Kalisalze unterbrochen bzw. „verunreinigt“ sein.

Aufgrund glazieostatischer Meeresspiegelschwankungen und arider Klimabedingungen führen wiederholte marine Ingressionen zur Ausbildung mehrerer aufeinanderfolgender salinärer Zyklen (Paul et al. 2020). Abhängig von der paläogeographischen Beckenposition und den entsprechenden unterschiedlichen Sedimentationsbedingungen kommt es bei der Bildung der salinaren Abfolgen zu Variationen in den primären Mächtigkeitsverteilungen und in der faziellen Ausbildung der Evaporite. Die mächtigsten Steinsalz-Ablagerungen finden sich i. d. R. in gleichförmiger Fazies im Zentrum eines Salinarbeckens wieder (Fischbeck et al. 1986; Reinhold et al. 2014; Richter-Bernburg 1985).

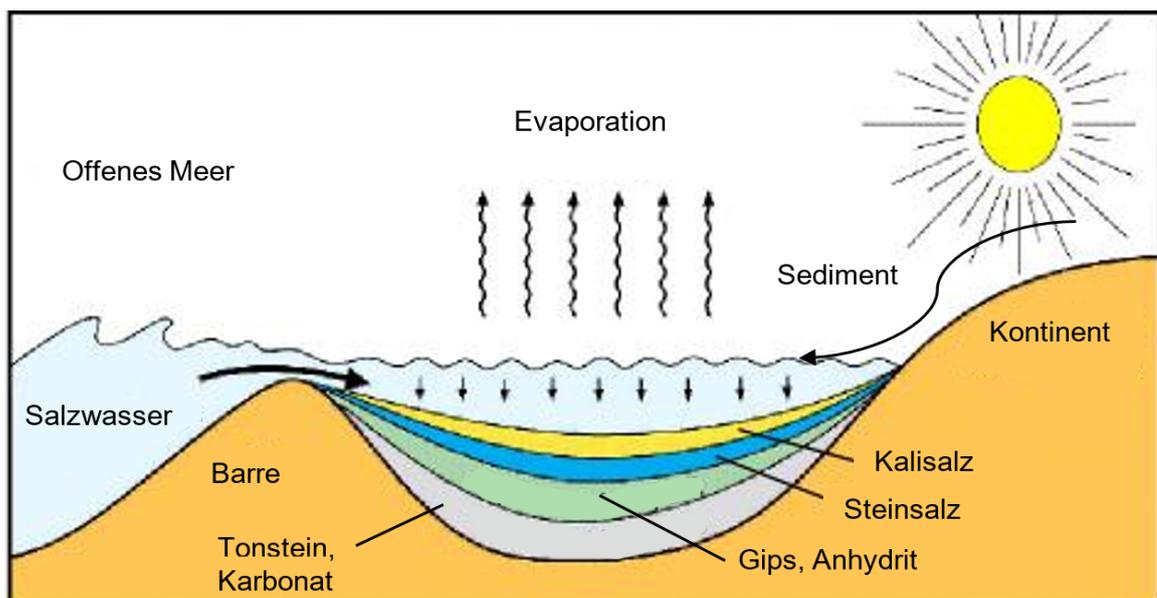


Abb. 2: Bildung von Salzlagerstätten (verändert nach Ochsenius (1877)).

Es ist an dieser Stelle festzuhalten, dass die sog. Salzlagerstätten oder Salzformationen in der Bundesrepublik Deutschland nicht nur aus Steinsalz (Halit), welches den gesuchten Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion darstellt, sondern auch aus anderen Evaporiten (s. o.) sowie eingeschalteten Tonsteinen (sog. „Salztone“) bestehen. Bei der Ausweisung eines ewG und der Endlagerplanung ist dem besondere Beachtung zu schenken, da die nicht-halitischen Gesteine die Wirtsgesteinsdefinition, d. h. die Anforderungen für den sicheren Einschluss, ggf. nicht erfüllen.

3.2 Salzformationen in Deutschland

Deutschland verfügt über außerordentlich große und vielfältige Salzvorkommen, insbesondere im Norddeutschen Becken. In der geologischen Vergangenheit wurden Steinsalzschieben im Rotliegend, Zechstein, Röt, Muschelkalk, Keuper, Malm und Tertiär abgelagert. Eine Übersicht zu den altersverschiedenen Salzvorkommen geben Reinhold et al. (2014) und Reinhold & Hammer (2016) sowie die Abb. 3 und Abb. 4.

Bei den Salzvorkommen ist zwischen stratiformen Salinarformationen, die noch in ihrer ursprünglichen flachen Lagerung auftreten, und durch halokinetische Vorgänge entstandene Salzkissen, -antiklinalen und -diapire zu unterscheiden. Wie in Kap. 2.1 erläutert, werden auch die von BGE ausgewiesenen Teilgebiete im Wirtsgestein Steinsalz entsprechend ihrer Lagerungsformen getrennt betrachtet (BGE 2020). Unter anderem auch, weil die Anforderungen aus dem StandAG unterschiedlich sind (StandAG 2017). Nach BGE-Definition zählen nur Salzdiapire zum Wirtsgestein Steinsalz in steiler Lagerung, während Salzkissen zu Steinsalz in stratiformer Lagerung zugeordnet werden. Im vorliegenden Bericht werden nur die diapirischen Salinare behandelt. Halokinetische Prozesse, die zur Bildung verschiedener Salzstrukturen führen, werden in Kap. 3.3 beschrieben.

Salzdiapire sind in Deutschland nur aus den permischen und den tertiären Evaporiten hervorgegangen. Die tertiären Vorkommen beschränken sich auf den Oberrheingraben und wurden aufgrund der Ausschlusskriterien „Aktive Störungzonen“ und „seismische Aktivität“ ausgeschlossen (BGE 2020). Für die Entwicklung einer Methode zur Internbauprognose verbleiben demnach allein die aus permischen Salzlagern (Rotliegend und Zechstein) entstandenen Salzdiapire (Abb. 3). Diese Salinare werden in den folgenden Kapiteln näher beschrieben.

Standortauswahl

Pollok, L. et al. (2024): Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Wirtsgesteinsanteilen mit Barrierefunktion und der Internbauvariabilität in Salzstrukturen – Abschlussbericht; Hannover (BGR)

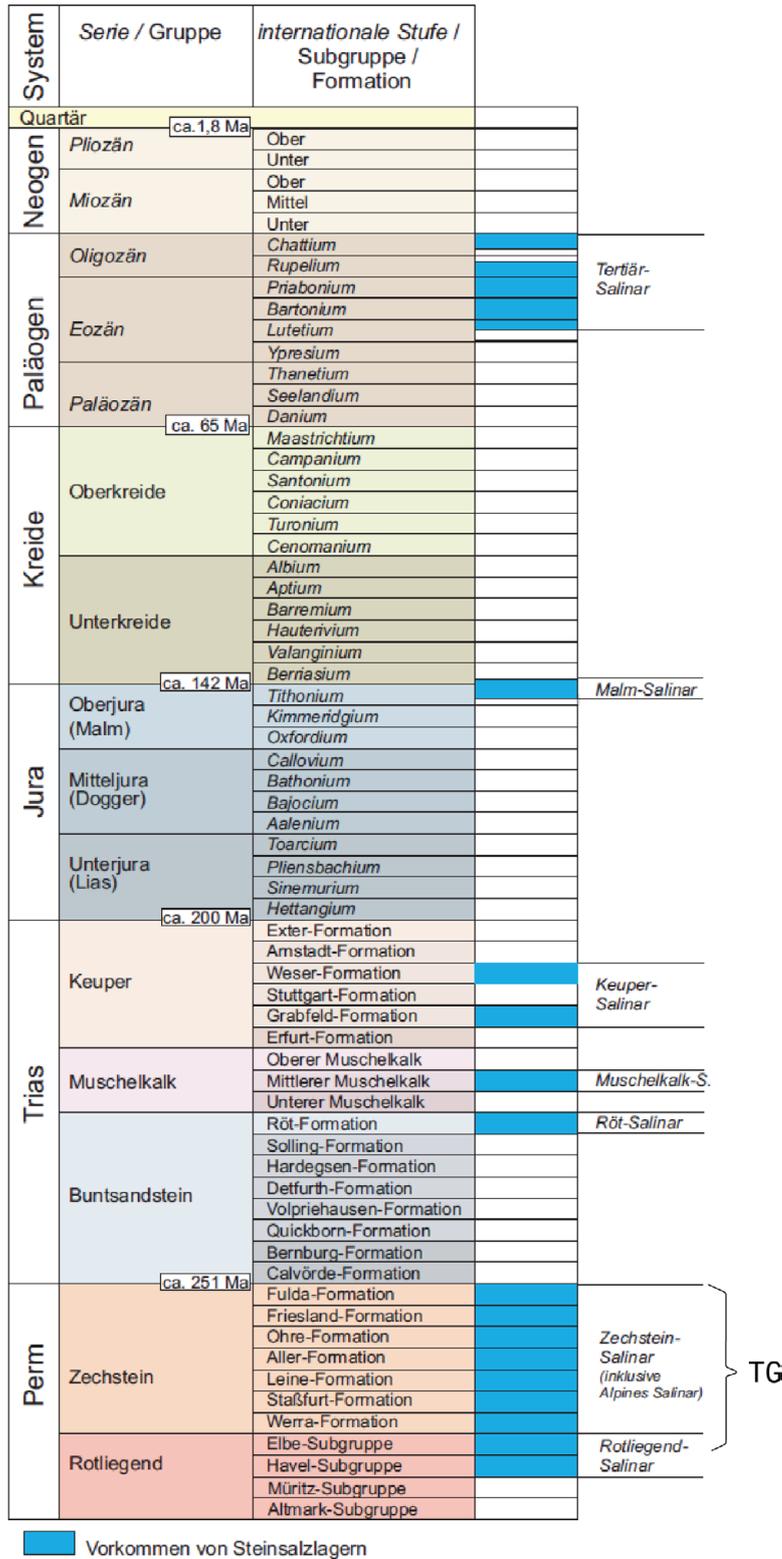


Abb. 3: Stratigraphische Position und Bezeichnung der in Deutschland vorkommenden salinaren Schichtenfolgen mit darin ausgewiesenen Teilgebieten (TG) (verändert nach Reinhold et al. 2014).

Standortauswahl

Pollok, L. et al. (2024): Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Wirtsgesteinsanteilen mit Barrierefunktion und der Internbauvariabilität in Salzstrukturen – Abschlussbericht; Hannover (BGR)

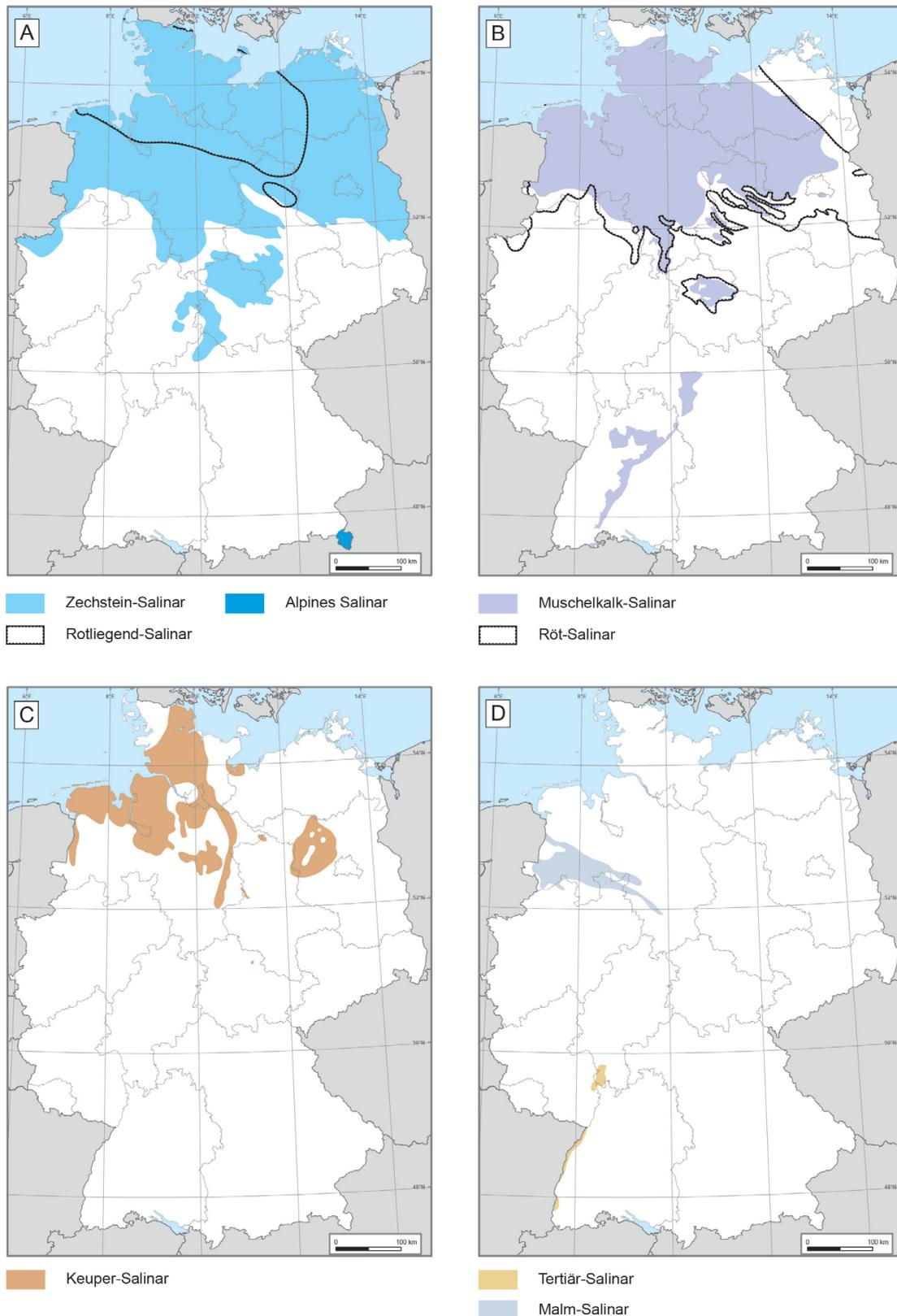


Abb. 4: Verbreitungsgebiete der altersverschiedenen salinaren Vorkommen (Reinhold et al. (2014)).

3.2.1 Perm: Rotliegend

Im Rotliegend sind außerhalb der tiefen Gräben (Horn Graben, Glückstadt Graben) saline Abfolgen nur in der Havel- und Elbe-Subgruppe entwickelt (Abb. 5). Dabei sind die Steinsalzlager der Havel-Subgruppe auf kleine Beckenbereiche konzentriert. Die Salinare der Elbe-Subgruppe weisen im Norddeutschen Becken eine größere Verbreitung und Mächtigkeit auf. Das Vorkommen der Rotliegendesalinare beschränkt sich regional auf den Unterelberaum, das südliche Schleswig-Holstein, Westmecklenburg bis zur Müritz, Ostfriesland und die innere Deutsche Bucht (Abb. 4) (Kockel et al. 1995; Reinhold & Hammer 2016; Trusheim 1971).

System	Gruppe	Formation	
PERM	Rotliegend Ober-Rotliegend II	Elbe-Subgruppe	Hannover 
			Dethlingen 
	Havel-Subgruppe	Mirow 	
		Parchim 	
	Ober-Rotliegend I	Müritz-Subgruppe	
Unter-Rotliegend	Altmark-Subgruppe		

Abb. 5: Stratigraphische Gliederung des Rotliegend und Vorkommen von Salzlager (blau) (Reinhold et al. 2014).

Bei den Salinaren der Elbe-Subgruppe handelt es sich, je nach regionaler Lage zum Subsidenzzentrum des Oberrotliegend, um bis zu 15 Steinsalz-Horizonte unterschiedlicher Mächtigkeit, die durch Tonstein- und z. T. Silt- und Sandsteinpakete mit karbonatischem oder dolomitischem Bindemittel voneinander getrennt sind (Henneberg et al. 2020; Langer & Hofrichter 1971; Trusheim 1971). Trusheim (1971) unterscheidet vier Gruppen (A-D) von Steinsalz-Einschaltungen, die sich jeweils in individuelle Salzlager und Tonmittel untergliedern. Nach seinen Untersuchungen wurde das mächtigste reine Steinsalzlager in normaler stratigraphischer Lagerung mit 23 m nachgewiesen, im Durchschnitt sind die Salzlagen nur 2 – 4 m mächtig. Die größte kumulative Mächtigkeit der Steinsalzlagen wurde mit ca. 200 m erbohrt. Kaliflöze sind nicht entwickelt (Trusheim 1971). Eine Gesamtmächtigkeit von 800 – 1.000 m wird in beckenzentralen Bereichen erreicht (Reinhold et al. 2014; Trusheim 1971), wo auch die meisten und mächtigsten Salzlager vorzufinden sind.

Allerdings sind die primären Mächtigkeiten in beckenzentralen Bereichen überwiegend nicht mehr bestimmbar, da das Oberrotliegend dort in die spätere Diapirbildung miteinbezogen wurde. Im Zuge der Halokinese wurden die Salinare zusammen mit den Tonmitteln mobilisiert und stiegen, nach Erkenntnissen aus den wenigen Bohrbefunden, als sog. Fluidal-Tektonit oder „Haselgebirge“ in Form eines brekziösen Salz-Ton-Gemisches (Abb. 6) in den Kernen der Diapire teilweise bis an die Oberfläche auf (Frisch & Kockel 2004; Krull et al. 2004).

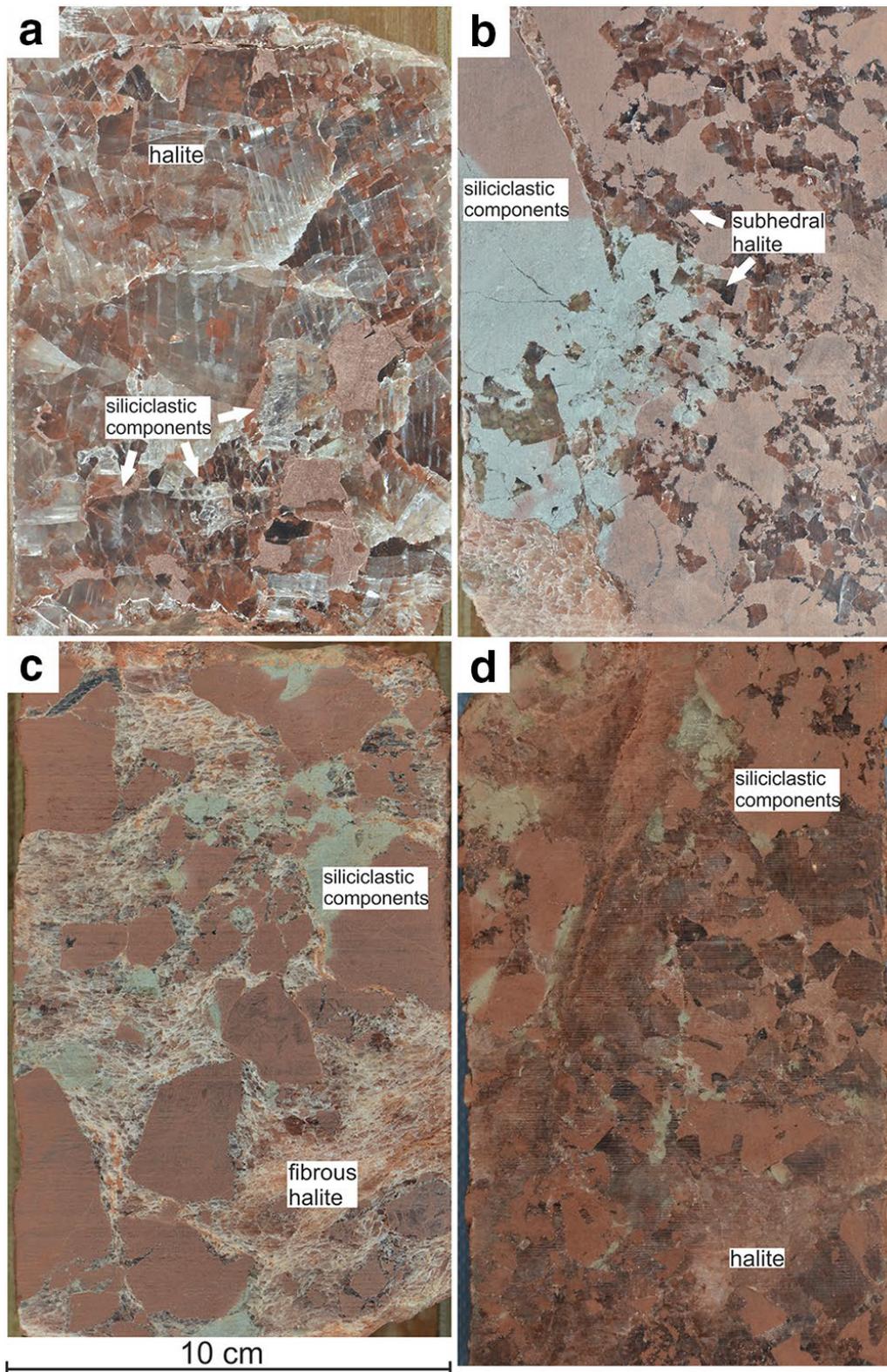


Abb. 6: Polierte Bohrkerne des Rotliegendesalinaris aus dem Salzdiapir Honigsee (aus: Henneberg et al. 2020). Neben Halit in unterschiedlicher Ausbildung sind siliziklastische Komponenten zu sehen.

3.2.2 Perm: Zechstein

Der Zechstein in salinaer Fazies wurde in ganz Norddeutschland abgelagert und erstreckt sich über Thüringen und Hessen bis nach Nordbayern (Abb. 4). Der Zechstein gliedert sich in Deutschland in bis zu sieben Evaporitfolgen bzw. Formationen (Abb. 7) (Käding 2005; Käding 2000; Paul et al. 2020; Richter-Bernburg 1955). Je nach regionalgeologischer Lage sind in allen sieben Formationen Steinsalzlager mit unterschiedlicher Reinheit, Mächtigkeit und Verbreitung entwickelt. Im Beckenzentrum sind für die Staßfurt- bis Fulda-Formation (z2 bis z7) die mächtigsten und vollständigsten Profile vorhanden, die zu den Beckenrändern hin bis zum vollständigen Ausfall ausdünnen. Die Werra-Formation (z1) weist dagegen eher zu den Beckenrändern hin höhere Mächtigkeiten auf und ist nur dort in salinaer Fazies vorhanden. Die Staßfurt-, Leine- und Aller-Formation sind im Norddeutschen Becken weitflächig verbreitet. Die petrographische Ausbildung der darin gebildeten Salzlager ist exemplarisch anhand der Bohrkernbilder in Abb. 8 dargestellt.

Das Staßfurt-Steinsalz bzw. Hauptsalz der Staßfurt-Formation markiert das mächtigste Salzager des Zechsteins. Im Beckeninneren wurden primäre Mächtigkeiten von maximal 650 – 800 m dokumentiert (Baldschuhn et al. 2001; Bornemann et al. 2008; Schachl 1987). In den anderen Zechstein-Formationen erreichen nur die Steinsalzager der Leine-Formation, bereichsweise der Aller-Formation sowie im Thüringer Becken der Werra-Formation primäre Mächtigkeiten von über 100 m (z. B. Reinhold et al. 2014). Das Staßfurt-Steinsalz weist zudem die größte zusammenhängende Verbreitung auf.

System	Gruppe	Formation
Perm	Zechstein	Fulda ■
		Friesland ■
		Ohre ■
		Aller ■
		Leine ■
		Staßfurt ■
		Werra ■

Abb. 7: Stratigraphische Gliederung des Zechsteins mit Vorkommen von Salzlagern (blau) (aus: Reinhold et al. (2014)).

Durch intensive Salzbewegungen (Abwanderung, Akkumulation in Salzstrukturen, s. Kap. 3.3) und Subrosionsprozesse sind die ursprünglich abgelagerten Zechsteinmächtigkeiten heute gebietsweise stark modifiziert und schwer zu rekonstruieren. In zentralen Beckenbereichen erreicht der Zechstein häufig Mächtigkeiten von 1.100 – 1.500 m. Zu den Beckenrändern nehmen die Mächtigkeiten sukzessiv ab (Baldschuhn et al. 2001; Doornenbal & Stevenson 2010; Fulda 1935; Scheck-Wenderoth et al. 2008; Stackebrandt et al. 2010).

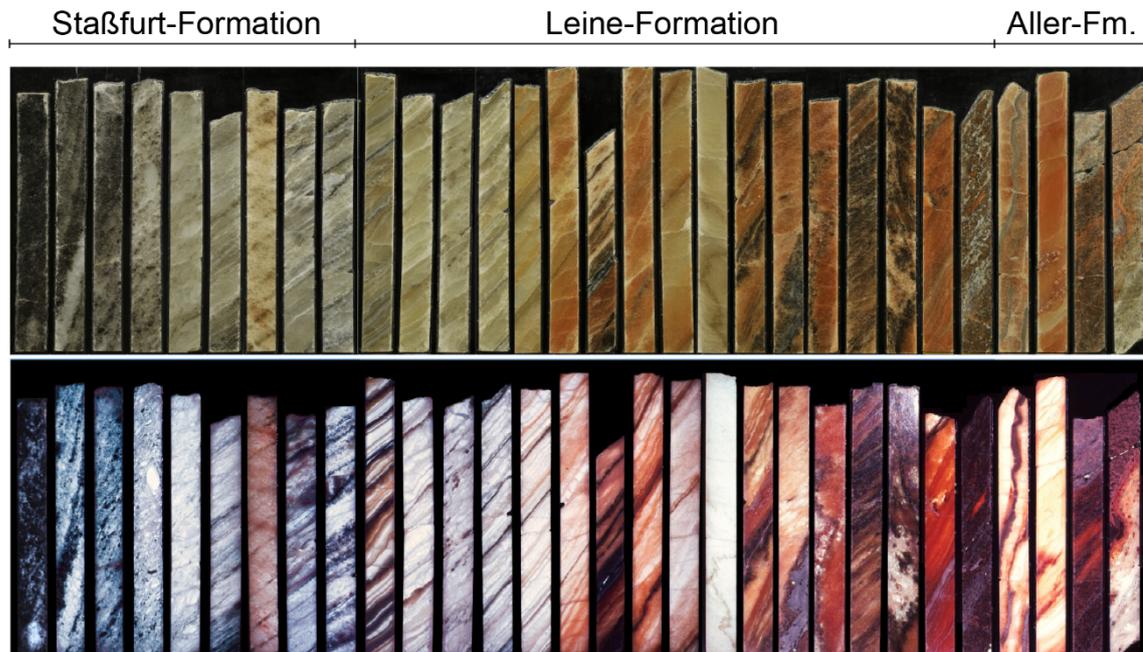
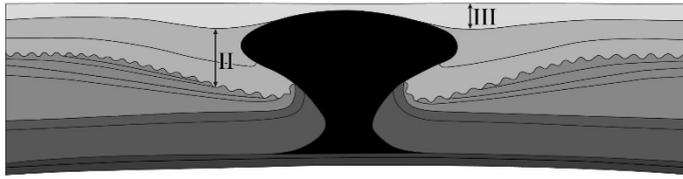


Abb. 8: Polierte Bohrkerne der Steinsalze verschiedener Zechstein-Formationen aus dem Salzstock Gorleben, obere Reihe im Auf-, untere Reihe im Durchlicht.

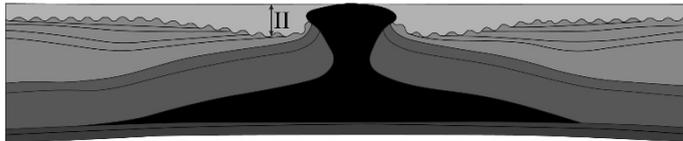
3.3 Salztektonik und die Entstehung von Salzstrukturen

Wesentliche Voraussetzung für halokinetische Prozesse ist die hohe Plastizität und geringe Dichte des Steinsalzes gegenüber der ihm auflagernden Deckgebirgssedimente. Unter der von Trusheim (1957) vorgestellten Theorie der „Halokinese“ wurden alle ursächlich mit der autonomen Salzbewegung verknüpften Vorgänge zusammengefasst. Salzbewegungen wurden somit als reines Schwerkraftphänomen beschrieben, sodass bei ausreichender Salzmächtigkeit und Versenkung, also erhöhter Temperatur und entsprechender Deckgebirgsauflast, das Salz ohne weitere Energiezufuhr von außen autonom beginnt zu fließen. Ist der Fließvorgang in Gang gebracht, so bilden sich zunächst beulenartige Salzkissen mit intaktem Deckgebirge und, sobald das Salz dieses durchbricht, Salzdiapire (Abb. 9).

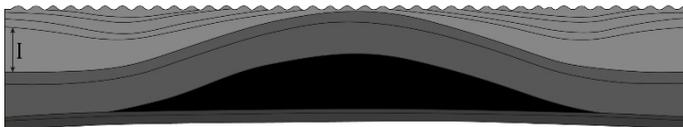
D: Post-diapirisches Stadium



C: Diapistadium



B: Kissenstadium



A: Stratiformes Salz



Abb. 9: Historische Theorie der Halokinese zur Entstehung von Salzstrukturen und syn-kinematischen Randsenken. Primäre Randsenken (I) korrelieren mit der Bildung von Salzkissen, sekundäre Randsenken (II) mit der Diapirbildung, tertiäre Randsenken mit darauf folgenden Nachschubbewegungen in einem späten Diapistadium (verändert nach Trusheim 1960).

Mit der umfangreichen Kohlenwasserstofferkundung und mit systematischen Untersuchungen von Salzstrukturen in den letzten Jahrzehnten wurde deutlich, dass die Theorie der „Halokinese“ nach Trusheim (1957) nicht alle salztektonischen Prozesse und die zeitliche Entstehung sowie die Formenvielfalt von Salzstrukturen abbilden kann (z. B. Vendeville 2002). Im Norddeutschen Becken (NDB) waren regionalgeologische Deformationsprozesse im Becken, z. B. Rifting, die zur Beckenbildung selbst aber auch zur Beckenstrukturierung beigetragen haben, ein wichtiger Auslöser für ihre Entstehung. So konnte nachgewiesen werden, dass die Bildung von Salzstrukturen zeitlich und räumlich häufig mit großtektonischen Ereignissen im Becken einhergeht (z. B. Frisch & Kockel 2004; Geluk 1998; Kockel 1999; Pollok et al. 2020; Richter-Bernburg 1987a; Scheck-Wenderoth et al. 2008; Warsitzka et al. 2019). Abhängig von der regionalgeologischen Position und der Orientierung des Paläo-Stressfelds lässt sich die Aktivität von Sockelstörungen mit der daran gebundenen Deformation im Salinar und Deckgebirge häufig mit der Initiierung von Salzfluss und Kissen- bzw. Diapirbildung korrelieren. Dementsprechend sind Salzmauern größter lateraler und vertikaler Erstreckung vor allem in größeren Grabenstrukturen (z. B. Glückstadt-Graben) zu finden, wohingegen in störungsarmen Beckenbereichen (z. B. auf dem Ostholstein-Westmecklenburg Block) tiefliegende Salzkissen mit mächtiger Überdeckung vorherrschen. Als weitere Faktoren, die zur Mobilisation und Akkumulation von Salz führen, wurden unter anderem auch die differenzielle Last des Deckgebirges, die Schwächung des Deckgebirges durch Störungen und gravitatives Abgleiten identifiziert (z. B. Jackson & Hudec 2017; Warsitzka et al. 2019).

Von der paläogeografischen Position und den Ablagerungsbedingungen im Becken hängt zusätzlich ab, ob Strukturbildung stattfindet und welche Salzformationen an der Strukturbildung beteiligt sind. Innerhalb der abgelagerten und versenkten Zechstein-Evaporite deformieren zunächst die Kalisalz-reichen Bereiche, welche die mobilsten Gesteine darstellen (Frisch & Kockel 2004; Geluk 1998; Rowan et al. 2019). Belege finden sich in stratiformen Evaporiten Deutschlands, in denen die Kaliflöze bereits komplex verfaltet vorliegen können (z. B. Richter-Bernburg 1980, 1987a). Gleichzeitig oder im weiteren Verlauf wird das mächtige Steinsalz der Staßfurt-Formation (z2Na) mobilisiert, welches für die eigentliche Salzakkumulation und Salzstrukturbildung verantwortlich ist. Die weniger kriechfähigen Steinsalzlagen der jüngeren Formationen (z. B. der Leine- und Aller-Formation, vgl. Hunsche et al. (2003)) werden mit aufgerichtet, verfaltet und deformiert, sind aber nur untergeordnet für die Strukturgeneese verantwortlich (de Boer 1971; Jaritz 1983; Kockel et al. 1995; Pollok et al. 2020). Die nicht chloridischen Schichten im Liegenden des z2Na (meist ca. 50 m), wie Kupferschiefer Flöz, Werra-Karbonat, Werra-Sulfat, Staßfurt-Karbonat und Staßfurt-Sulfat, werden nicht mobilisiert und verbleiben an der Zechstein-Basis. Nur am SW-Rand des NDB trägt das hier mächtige Steinsalz der Werra-Formation substantiell zur Salzstrukturbildung bei (Richter-Bernburg 1980).

Innerhalb seines Verbreitungsgebiets wurde auch teilweise das Rotliegendesalinar und untergeordnet Keupersalinare mit unterschiedlicher Intensität in den Diapirbildungsprozess einbezogen. Dabei wurde nach Kockel et al. (1995) zunächst das z2Na und in einer späteren Phase das Rotliegendesalinar mobilisiert und wanderte in die Diapire ein. Detaillierte Studien zu den genauen Prozessen und zeitlichen Abläufen fehlen bislang allerdings. Im Fall der Mobilisierung von Rotliegendesalinar werden die zuvor beschriebenen basalen Zechsteinschichten in die Salzstrukturgeneese einbezogen. Sind beide permischen Salinare an der Strukturbildung beteiligt, werden die entstandenen Strukturen häufig als „Doppelsalinar“-Strukturen bezeichnet (Baldschuhn et al. 2001; Röhling et al. 2020; Trusheim 1957; von Goerne et al. 2016).

Nach wie vor gültig aus der Theorie der Halokinese ist, dass der Massenschwund aus den Salzabwanderungsgebieten syn-kinematisch zur verstärkten Ablagerung von Sedimenten in den sog. Randsenken in der Peripherie der Salzstrukturen führt (Abb. 9). Durch die Datierung und Auskartierung dieser Sedimente konnten die zeitlichen Entwicklungsphasen der Salzstrukturen in Norddeutschland weitgehend flächendeckend rekonstruiert werden (Baldschuhn et al. 2001; Jaritz 1973; Sannemann 1968; Warsitzka et al. 2019; Zirngast 1996). Die Genese von Salzdiapiren vollzieht sich häufig in mehreren, unterschiedlich intensiven Etappen und dauert wenige 10er bis über 100 Mio. Jahre an. Anders als in Abb. 9 dargestellt, verläuft die Salzzufuhr und damit einhergehende Randsenkenfüllung häufig asymmetrisch, insbesondere dann, wenn Salzstrukturen mit Sockelstörungen assoziiert sind, die tektonisch unterschiedlich agierende Blöcke voneinander trennen. I. d. R. erhalten solche Salzstrukturen auch eine asymmetrische äußere Form. Die zeitliche Entwicklungsgeschichte spielt im Hinblick auf die im weiteren Verlauf des Berichts genannten relevanten geologischen Faktoren eine wichtige Rolle. Für weiterführende Beschreibungen zu Bildungsmechanismen, äußere Formen und Internbaustrukturen wird an dieser Stelle auf umfassende Übersichtsarbeiten verwiesen (Hudec & Jackson 2007; Jackson & Hudec 2017; Jackson & Talbot 1986; Pollok et al. 2020). Mit Salztektonik im Zusammenhang stehende Fachbegriffe wurden z. B. von Jackson & Talbot (1991), Jackson & Hudec (2017) und Frisch & Kockel (2004) zusammengestellt.

Im NDB wurden erste regional begrenzte Salzmobilisierungen und Kissenbildungen im Unteren Buntsandstein initiiert (z. B. Baldschuhn et al. 2001; Jaritz 1973; Maystrenko et al. 2005; Warsitzka et al. 2019). Erste Diapire bildeten sich im NDB bereits im Mittleren bis Oberen Buntsandstein (z. B. Warsitzka et al. 2016). Die meisten Salzdiapire entstanden im Mittleren Keuper durch eine intensive, E-W gerichtete Extensionsphase entlang von N-S gerichteten Störungszonen und Gräben (Baldschuhn et al. 2001; Pollok et al. 2020; Warsitzka et al. 2019). Durch weitere Extensionsereignisse im Mitteljura bis zur Unterkreide gingen weitere Salzstrukturen in die Diapirphase, vor allem an NW-SE streichenden Störungszonen, über. Auch in der Oberkreide entstanden neue Diapire. Vielmehr wurden allerdings bereits zuvor gebildete Salzstrukturen durch die einwirkende oberkretazische Einengung insbesondere in den invertierten südlichen Beckenbereichen tektonisch überprägt, z. B. durch die Bildung von Überhängen und Salzkeilen (Pollok et al. 2020). Jüngere Diapirentwicklungen im Tertiär sind vor allem entlang der Flanken des Glückstadt-Grabens aber auch auf dem Westmecklenburg-Block und der deutschen Nordsee belegt (Baldschuhn et al. 2001; Kockel 1995; Warsitzka et al. 2019). Heute sind nur noch vereinzelte Strukturen in der aktiven Diapirphase (z. B. Jaritz 1973).

Viele der Salzdiapire im NDB haben ihre Entwicklung abgeschlossen, werden genetisch als „reif“ bezeichnet und sind z. T. von mächtigen Sedimenten bedeckt. Sie weisen keine mobilisierfähigen Salinare mehr in ihrem Umfeld auf, da das Salz vollständig abgewandert ist. Die verbleibende Kontaktfläche zwischen dem Liegenden und dem Hangenden des vormals vorhandenen Salinars wird als „salt weld“ bezeichnet. Reife Salzdiapire können nur durch regionale Einengungstektonik „reaktiviert“ werden (Dooley et al. 2009). Sie überwiegen z. B. in Schleswig-Holstein und im nördlichen Niedersachsen im Glückstadt- und Ems-Graben und in großen Bereichen des sog. Pompeckj Blocks. Es gibt aber auch relativ kleine, meist jüngere Diapirstrukturen im NDB, die großen Salzkissen aufsitzen und somit noch ein großes Mobilisierungspotenzial aufweisen (z. B. in NW-Brandenburg).

3.3.1 Verbreitung und Variabilität in Größe und Form von Salzstrukturen

Im deutschen Raum sind nach vorliegender Datenlage ca. 700 Salzstrukturen entstanden, wovon ca. 400 gemäß ihrer Genese als Salzdiapire anzusprechen sind (z. B. Baldschuhn et al. 2001; Pollok et al. 2020; Reinhold et al. 2008; Zander-Schiebenhöfer et al. 2015). Eine Übersicht der Strukturen ist Abb. 10 zu entnehmen. Wie in Kap. 2.1 beschrieben, wurden in 95 Salzstrukturen insgesamt 60 Teilgebiete ausgewiesen bzw. zusammengefasst. Die aus Zechsteinsalinaren gebildeten Salzdiapire können im NDB eine vertikale Erstreckung von über 4.500 m, unter Beteiligung des Rotliegendesalinars von über 7.000 m erreichen (Pollok et al. 2020). Die größte laterale Erstreckung von teilweise über 100 km weisen die Salzmauern auf. Aufgrund ihrer Größe haben die aus permischen Salinaren gebildeten Diapire eine besondere Bedeutung für die Anlage von untertägigen Speichern, da in ihnen reine Steinsalzkörper von mehreren km Höhe und großer lateraler Erstreckung in zahlreichen Fallstudien nachgewiesen wurden.

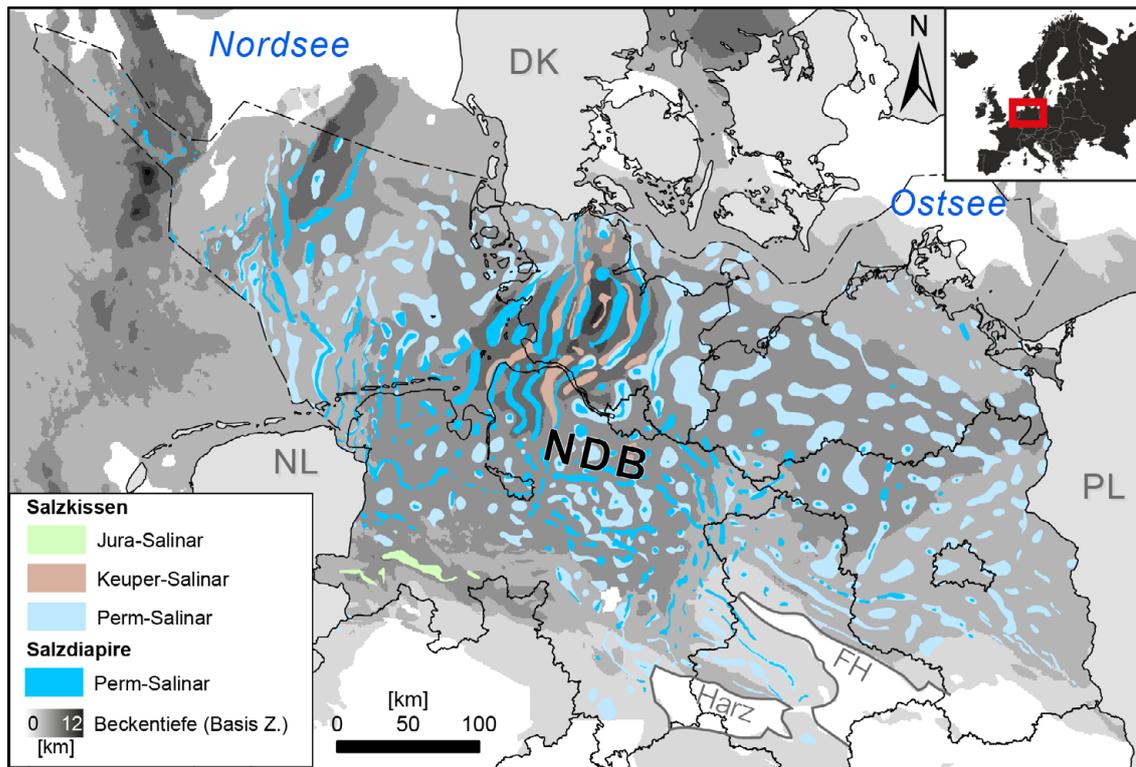


Abb. 10: Verbreitung von Salzstrukturen in Norddeutschland mit altersverschiedenen, strukturaufbauenden Salinaren (verändert nach Reinhold et al. (2008) und von Goerne et al. (2016)), Beckentiefe (Basis Zechstein) aus: Peryt et al. (2010)). NDB: Norddeutsches Becken, FH: Flechtinger Höhenzug.

Salzstrukturen lassen sich, insbesondere in Kombination mit ihrer Entstehungsgeschichte und äußeren Form, in weitere Typen gliedern. Um auf den Internbau von Salzstrukturen zu schließen, bedarf es einer gemeinsamen Betrachtung der beteiligten Salinare, der regionalgeologischen Position, der Genese und der äußeren Form der Salzstrukturen, durch die erst eine Zuordnung zu einem bestimmten Salzstrukturtyp ermöglicht wird. In verschiedenen wissenschaftlichen Arbeiten wurden die Gründe für die Vielfalt von Salzstrukturen beschrieben (z. B. Frisch & Kockel 2004; Geluk 1998; Jackson & Talbot 1986; Jackson & Talbot 1991; Kockel 1999; Lotze 1957; Pollok et al. 2020; Trusheim 1957). Für das NDB können u. a. nach Pollok et al. (2020) folgende Faktoren benannt werden:

- die jeweilige regionalgeologisch-tektonische Position der Salzstrukturen und daran gebundene unterschiedliche Deformationsintensitäten, wie z. B. über ggf. mehrfach bewegten Störungszonen des Sockels oder innerhalb wenig gestörter tektonischer Blöcke
- das kinematische Regime mit wechselnden Paläostressfeldern im Verlauf der Beckenentwicklung mit ungleichmäßigen dilatativen oder kompressiven Auswirkungen auf bestimmte Beckenbereiche
- der Reifegrad und die meist polystadiale Überprägung der Salzstrukturen während ihrer Genese

Standortauswahl

Pollok, L. et al. (2024): Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Wirtsgesteinsanteilen mit Barrierefunktion und der Internbauvariabilität in Salzstrukturen – Abschlussbericht; Hannover (BGR)



- die unterschiedliche Beteiligung von ggf. heterogen zusammengesetzten Salinargesteinen verschiedenen Alters bei der Salzstrukturentwicklung, die sich insbesondere in ihren primären Mächtigkeiten und mechanischen Eigenschaften unterscheiden können
- die Art und Mächtigkeit des Deckgebirges sowie dessen variierendes geomechanisches Reaktionsverhalten bei halotektonischen Prozessen
- das Verhältnis aus Beckensubsidenz sowie Sedimenttransport und -menge über die Zeit

Eine exemplarische Übersicht der Formenvielfalt von Salzstrukturen ist in Abb. 11 dargestellt. Die Übergänge zwischen den Salzstrukturtypen können fließend sein. So sind z. B. im NDB kleine bzw. schmale, juvenile Salzdiapire bekannt, die sich aus darunter liegenden Salzkissen bzw. -antiklinalen entwickelt haben und als Übergangsformen nicht in Abb. 11 abgebildet sind. Mit zunehmender Reife nimmt die Akkumulation von Steinsalz in der Salzstruktur zu.

Die meisten seitens BGE ausgewiesenen TG in Steinsalz in steiler Lagerung können Salzdiapiren (also Salzstöcken und Salzmauern) zugewiesen werden. Vereinzelt gibt es TG, die sich in den o. g. Übergangsformen befinden.

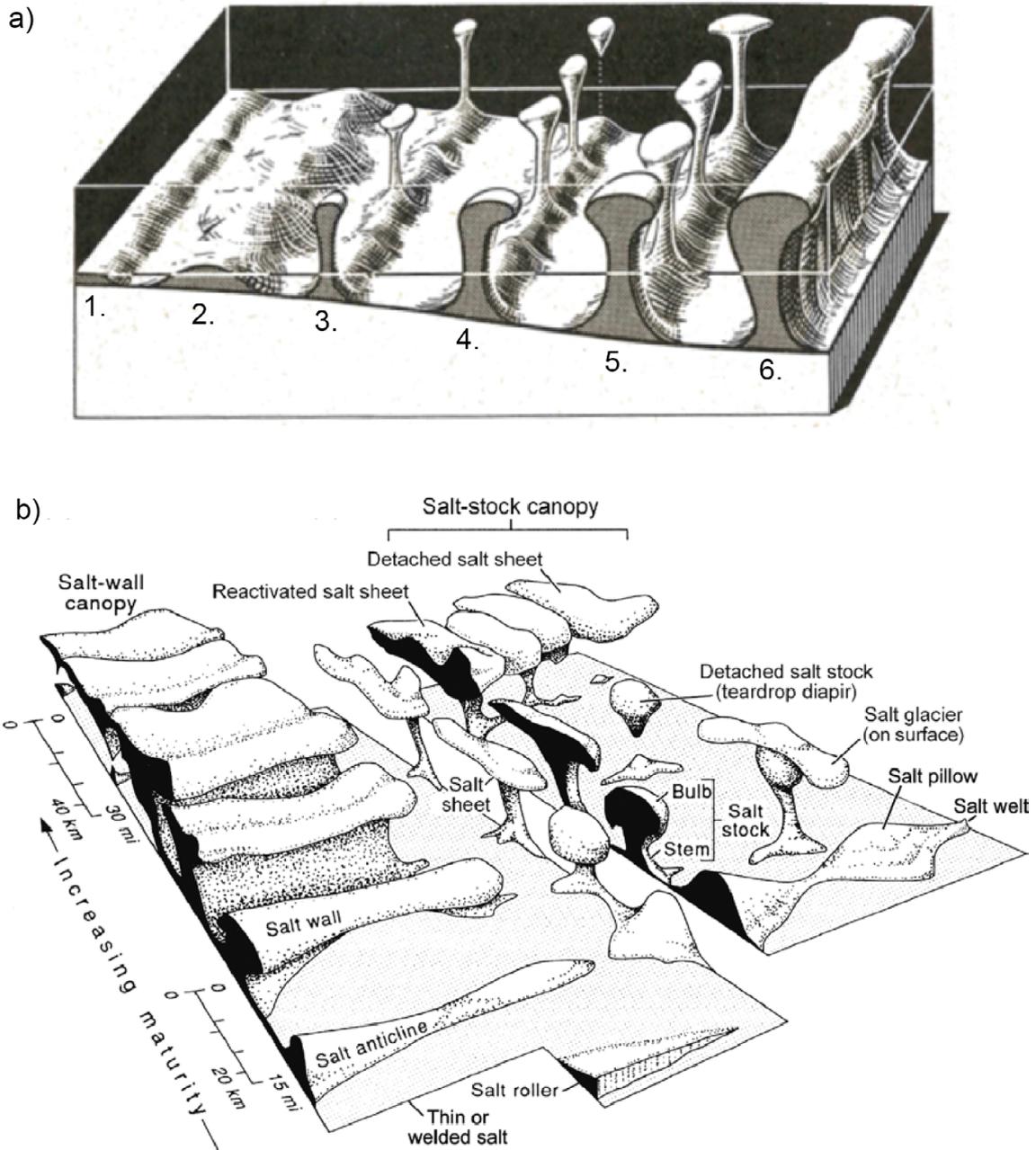


Abb. 11: Blockdiagramme mit verschiedenen schematischen Salzstrukturformen. a) 1. Salzantiklinale, 2. Salzkissen, 3.-5. Salzstöcke, 6. Salzmauer. 1. und 2. sind in Abb. 10 als Salzkissen, 3. bis 6. als Salzdiapire gekennzeichnet (verändert nach Trusheim (1957)). b) Salzstrukturformen in Abhängigkeit ihrer Reife (nach hinten zunehmender Reifegrad) (verändert nach Hudec & Jackson (2007)).

4 Kenntnisstand zum Internbau von Salzstrukturen

Im weltweiten Vergleich liegen in Deutschland aufgrund des ausgedehnten und mehr als 150-jährigen Kali- und Salzbergbaus im mittel- und norddeutschen Raum die umfassendsten Erkenntnisse zu Salzlagerstätten in verschiedenen Lagerungsformen vor. Bergwerke bieten durch die Möglichkeit der untertägigen Kartierung über mehrere Sohlen gerade in komplex verfalteten Schichten ausgezeichnete Aufschlussverhältnisse (Ahlborn & Richter-Bernburg 1953; Fulda 1935; Klarr et al. 1987; Löffler 1962; Lotze 1957; Middendorf & Kühn 1966; Richter-Bernburg 1980, 1987a; Schachl 1962, 1991, 1987; Seidl 1921; von Struensee 2000). Weitere Erfahrungen zum Internbau von Salzstrukturen liegen aus der Untersuchung von Erkundungsbergwerken und Endlagerstandorten (Behlau & Mingerzahn 2001; Bornemann et al. 2008; Essaid & Klarr 1982; Friedel et al. 2015; Pollok et al. 2022) sowie von Kavernenstandorten vor (z. B. Günnewig et al. 2001; Kleinfeld et al. 2008). Bei Letzteren erlauben die zahlreichen Tiefbohrungen, das daraus gewonnene Bohrkernmaterial und die darin durchgeführten geophysikalischen Bohrlochmessungen (z. B. Georadar) eine Interpretation des inneren Aufbaus. Aber auch außerhalb Deutschlands sind z. B. in Polen (Burliga 2014; Burliga et al. 2018), Österreich (Schorn & Neubauer 2014), Portugal (Davison et al. 2017) und Rumänien (Adamuszek et al. 2021) Salinare in Diapiren untertägig untersucht worden. Bei Standorten, die in den letzten Jahrzehnten in Betrieb waren oder noch sind, liegen z. T. veröffentlichte 3D-Modelle zur Darstellung des Internbaus vor (z. B. Behlau et al. 2000; Behlau et al. 2017; Buxbaum-Conradi 2018; Dresbach et al. 2010; Kleinfeld et al. 2008; Pollok et al. 2022).

In ariden Gegenden unterliegen die oberflächlich aufgeschlossenen Salzdiapire nicht oder nur geringfügig der Subrosion, sodass ihr interner Aufbau durch Geländekartierungen oder luftgestützte Verfahren untersucht werden kann. Umfangreiche Beispiele liegen z. B. aus dem Zagros Gebirge im Iran, aber auch aus Israel vor (Alsop et al. 2015; Aftabi et al. 2010; Jackson & Hudec 2017; Motamedi et al. 2011; Richter-Bernburg 1987a). In Deutschland stehen oberflächennahe Salzlager i. d. R. unter dem Einfluss von Ablaugung durch untersättigte Grundwässer (Subrosion), sodass nur noch das sog. Hutgestein („Gipshut“) erkennbar ist. Oberflächlich steht der Gipshut z. B. an den Salzstrukturen Lüneburg und Spereberg an.

Bis in die heutige Zeit stellt die genaue Abbildung von Salzdiapiren im Untergrund mittels geophysikalischer Oberflächenverfahren eine Herausforderung dar. Während der Dachbereich durch seismische Verfahren i. d. R. gut zu erfassen ist, sind die Flankenverläufe häufig nur mit Ungewissheiten ermittelbar (Abb. 12). Der Salzdiapirinternbau kann aufgrund der teilweise komplizierten geometrischen Lagerungsverhältnisse insbesondere in älteren seismischen Linien nicht oder nur punktuell aufgelöst werden. Durch die moderne 3D-Seismik wurde in den letzten Jahren in verschiedenen Salzbecken die Abbildung von einigen salzinternen Strukturen zunehmend verbessert und in zahlreichen Studien ausgewertet (z. B. Barnett et al. 2023; Harding & Huuse 2015; Jackson et al. 2014; Jackson et al. 2015; Raith et al. 2016; Strozyk et al. 2014; Strozyk et al. 2012). Eine vollständige und lagerrichtige Auflösung des Diapirinternbaus, insbesondere auf kleineren Skalen, bei steil einfallenden oder geringmächtigen Schichten unterhalb des seismischen Auflösungsvermögens und innerhalb von homogenen Steinsalzlagen, ist prinzipbedingt nach wie vor nicht möglich (z. B. Barnett et al. 2023; Geluk 1998; Jackson & Hudec 2017; Rowan et al. 2019). Daher wird das Diapirinnere im Vergleich zu flach

lagernden Salzschichten oder zu Salzkissen in der Seismik häufig durch chaotische Reflexionsmuster bzw. transparent abgebildet (Abb. 12a, c). Über Herausforderungen und mögliche Fehlinterpretationen in der Abbildung und Auswertung von Salzkörpern in seismischen Datensätzen berichten z. B. Jones & Davison (2014).

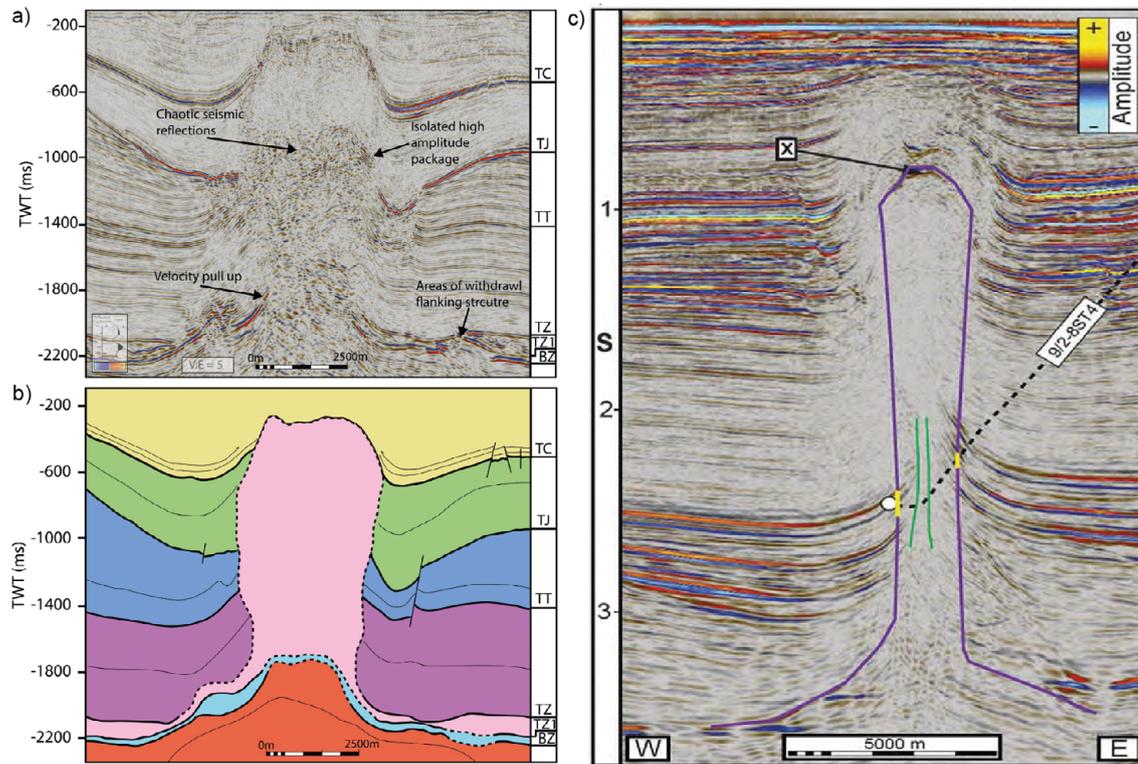


Abb. 12: a): Seismisches Profil durch einen Salzdiapir der südlichen Nordsee mit chaotischem und transparentem Abbild des nicht differenzierbaren Internbaus. b) Interpretation der Salzdiapirausdehnung (rosa) aus a). TWT: Zweiweglaufzeit (verändert nach Barnett et al. 2023). c) Seismisches Profil durch einen Salzdiapir in der norwegischen Nordsee mit transparentem Abbild des Internbaus sowie der Flankeninterpretation vor (lila) und nach Erstellung der Erkundungsbohrung (grün) (aus: Jones & Davison 2014).

Eine essenzielle Voraussetzung für die Untersuchung von Salzlagerstätten ist die Entwicklung eines detaillierten lithostratigraphischen Gerüsts. Erst die Kenntnis der feinstratigraphischen Stellung der aufgeschlossenen Schichtglieder erlaubt eine Analyse des internen Aufbaus von Salzstrukturen und eine Prognose in unverritzte Bereiche. Bei der räumlichen Orientierung innerhalb komplex verfalteter Strukturen wie z. B. in Salzdiapiren leisten häufig nicht-halitische Leithorizonte (wie z. B. Anhydritgesteine oder Salztone) einen wichtigen Beitrag zum Verständnis des strukturellen Aufbaus (z. B. Jackson & Hudec 2017; Pichat 2022; Pollok et al. 2022; Rowan et al. 2019). Im niederländischen Raum konnten z. B. durch die Auskartierung der Verteilung und Geometrie des mächtigen und damit in der Seismik auflösbaren sog. Hauptanhydrits (z3HA, im Hangenden des z2Na) insbesondere in flacher Lagerung und in Kissenstrukturen Fließmechanismen und interne Faltenmuster ausgewertet werden (Barnett et al. 2023; Geluk 1998; Raith et al. 2016; Strozyk et al. 2014).

Wie in Kap. 3.3 beschrieben, ist das Steinsalz der Staßfurt-Formation (z2Na) des Zechsteinsalinars aufgrund seiner Mächtigkeit und Homogenität mobiler als z. B. das Steinsalz der Leine- und Aller-Formationen (z. B. Hunsche et al. 2003). Somit ist das z2Na der Hauptträger der Halokinese im NDB. Aufgrund seiner guten Kriecheigenschaften wandert es bevorzugt z. T. mehrere 10er km im Umfeld von Salzstrukturen ab und nimmt unter erheblichem Mächtigkeitsanstieg die Kernbereiche in den Salzstrukturen ein (Abb. 17b). Ausnahmen werden bei Strukturen mit Überhängen beobachtet, die i. d. R. durch die Überfaltung der jüngeren Formationen durch das mobile z2Na entstehen, sodass dieses in den Dachrändern vorkommen kann. Eine weitere Ausnahme bilden die Doppelsalinarstrukturen, bei denen zusätzlich das ältere Rotliegendesalinar mobilisiert und in den zentralen Bereichen der Salzdiapire unterschiedlich stark akkumuliert wurde.

Durch die unterschiedlichen lithologischen Zusammensetzungen und rheologischen Eigenschaften sowie variierenden Kriechvermögen können bei der Halokinese unterschiedliche Deformationsintensitäten in den beteiligten Formationen beobachtet werden (Barnett et al. 2023; Bornemann et al. 2008; Burliga 1996). Beim halokinetischen Aufstieg der salinaren Gesteine ist es daher möglich, dass einzelne Schichtglieder bis zum totalen Schichtausfall ausdünnen, aber auch auf ein Vielfaches ihrer Normalmächtigkeit angestaut werden können. In Salzstrukturen lassen sich häufig zwei Zonen mit unterschiedlicher Deformation voneinander abgrenzen. Die jüngsten Zechstein-Formationen (Aller-Formation und jünger) sind durch relativ wenig Faltung gekennzeichnet (z. B. Barnett et al. 2023; Bornemann et al. 2008). Dagegen wird das hochmobile, im geschlossenen Verband aufsteigende z2Na mit hangendem Kaliflöz (z2SF) in Scharnierpositionen von Falten aller Größenordnungen häufig stark akkumuliert (z. B. Löffler 1962). Im Grenzbereich zur jüngeren und weniger kriechfähigen Leine-Formation kommt es zu einer intensiven Verfaltung. Dort vorkommende und kompetent auf Deformation reagierende mächtigere Anhydrit- und Tonsteine werden häufig gestreckt, ausgedünnt, zerblockt und abgeschert. Dadurch verbleiben große Teile von ihnen beim Salzaufstieg in der Tiefe oder in Scharnierposition tief reichender Mulden. Diesbezügliche Modellierungsarbeiten wurden z. B. von Koyi et al. (2013) und Chemia et al. (2009) vorgestellt. Aufgeschleppte Bruchstücke dieser Gesteine treten häufig zusammenhangslos an der Grenze zwischen Staßfurt- und Leine-Formation auf (Essaid & Klarr 1982; Hofrichter 1980). Die in modernen seismischen Datensätzen abgebildeten isolierten Blöcke kompetenter Schichten werden als „stringer“ bezeichnet (Abb. 13). Barnett et al. (2023) weisen allerdings darauf hin, dass es sich um durchgehende Schichten mit steilem Einfallen handeln könnte, die in den seismischen Daten aufgrund der o. g. Merkmale falsch bzw. nicht abgebildet werden.

Das Deformationsverhalten der kompetenten Schichtglieder innerhalb der Evaporitgesteine wurde umfassend beschrieben (Goscombe et al. 2004; Jackson & Hudec 2017; Mertineit et al. 2023; Ramberg 1955; Rowan et al. 2019; Zulauf et al. 2010; Zulauf et al. 2012). Rowan et al. (2019) prägten dabei den Begriff der „mechanischen Stratigraphie“ („Layered evaporite sequences“ (LES)), der beschreibt, wie die unterschiedlichen Salinargesteine auf einwirkende Spannungen reagieren. Ist das Salinar mächtig genug, was i. d. R. in akkumulierter Form in Salzstrukturen der Fall ist, ist die Deformation im Deck- und Grundgebirge mechanisch entkoppelt (z. B. Kley et al. 2008; ten Veen et al. 2012). Das bedeutet z. B., dass sich der intensive intrasalinare Faltenbau nicht im Deckgebirge einer Salzstruktur widerspiegelt (Abb. 13).

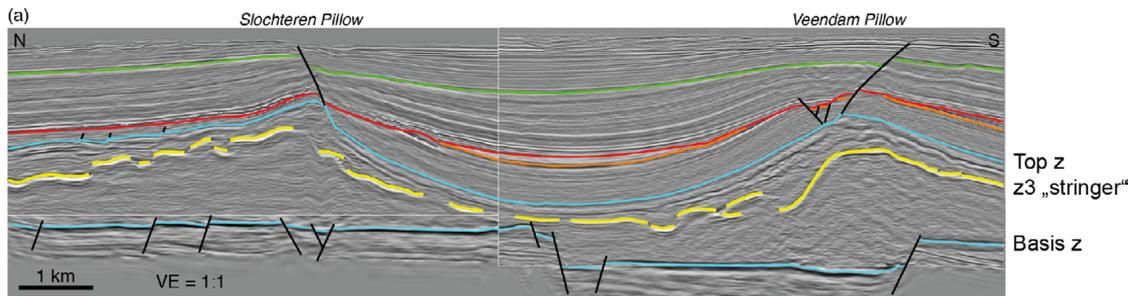


Abb. 13: Profile aus einem 3D-seismischen Datensatz über zwei Salzkissen (Basis und Top Zechstein in cyan) in den Niederlanden, mit teilweise boudinierten kompetenten Schichten (Grauer Salton, Plattendolomit, Hauptanhydrit) der Zechstein Leine-Formation (z3 stringer, gelb) (verändert nach Raith et al. 2016; Rowan et al. 2019).

4.1 Faltenbau

Als häufigstes strukturelles Phänomen tritt im Internbau von allen Salzstrukturformen die Fließfaltung auf (de Boer 1971; Jackson & Hudec 2017; Pollok et al. 2020). Die in Salzstrukturen gebildeten Falten können Amplituden und Wellenlängen verschiedener Größenordnungen einnehmen, vom Zentimeter- bis Kilometermaßstab. Die Achsenflächen der Fließfalten können alle möglichen räumlichen Orientierungen aufweisen, von aufrechten über vergenten und liegenden Falten zu Tauchfalten (Löffler 1962; Richter-Bernburg 1987a). Genauso können die Faltenachsen horizontal, tauchend bis vertikal orientiert sein (Abb. 16). Oft sind die Falten durch Scherkräfte und variierende Fließgeschwindigkeiten nicht zylindrisch ("sheath folds") und disharmonisch ausgebildet (Barnett et al. 2023; Jackson & Hudec 2017; Rowan et al. 2019). Obwohl jede Salzstruktur einen individuellen Internbau aufweist (Kockel et al. 1995; Richter-Bernburg 1970), lassen sich im Baustil der Großfalten allgemeine Gesetzmäßigkeiten für verschiedene Strukturbereiche von Salzdiapiren beschreiben.

Die Orientierung der Falten und Dehnung folgt im Allgemeinen den Fließmustern des Salzes, welche schematisch in Abb. 14 zweidimensional und in Abb. 15 dreidimensional dargestellt sind. I. d. R. fließt das Salz in Richtung des geringsten Widerstands und die Orientierung der Falten ändert sich in Abhängigkeit des Strukturniveaus und dem dort vorherrschenden Spannungszustand, meist fließend ohne feste Grenzen. In den Salzabwanderungsgebieten ("source layer") herrscht schichtparalleles Salzfließen mit horizontaler Dehnung vor (Abb. 14, Abb. 15), sodass dort liegende Falten dominieren (Abb. 16a) (Geluk 1998; Jackson & Hudec 2017). Mit Annäherung an den Aufstiegsbereich der Salzstrukturen rotieren die Falten im Fußbereich in eine aufrechte Position. Durch den konvergierenden Salzstrom kommt es zu einer horizontalen Verkürzung und vertikalen Extension (Abb. 14, Abb. 15). Im engen Schlotbereich überwiegen dann Falten mit (sub-)vertikalen Achsen, die als Kulissenfaltung beschrieben werden (de Boer 1971; Geluk 1998; Löffler 1962; Richter-Bernburg 1987a; Talbot & Jackson 1987). Die Faltenachsenflächen der Kulissenfalten sind im Aufstiegskanal eines runden oder ovalen Diapirs überwiegend radial angeordnet (Abb. 16a). Dadurch ist es möglich, dass jüngere Gesteine weiter ins Zentrum hineingefaltet werden (vgl. Salzstruktur Benthe, Abb. 22).

Im Schlot ist die vertikale Dehnung am größten (Abb. 14, Abb. 15). Mit Annäherung an das Diapirdach flachen die Falten wieder ab und zeigen eine Vergenz in Richtung der Salzdiapirränder, parallel zum Salzstrom. Folglich nimmt die horizontale Dehnung zu (Abb. 14, Abb. 15). Gerade bei Salzdiapiren mit Überhängen können die Falten dort überkippt (als inverse Mulden und Sättel, sog. „Tauchfalten“) vorkommen (Abb. 16b oben, Abb. 17b, 4.). Gebildet werden sie durch die Überfaltung von schneller kriechendem, älteren Steinsalz gegenüber geringer mobilen jüngeren Salinaren (Bornemann 1991; Richter-Bernburg 1987a). Die Internstrukturen von solchen pilzförmigen Diapiren wurden u. a. detailliert von Jackson & Talbot (1989) beschrieben.

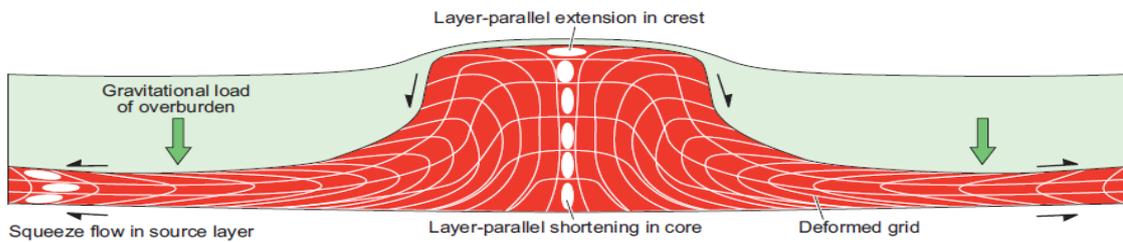


Abb. 14: Ein ursprünglich geradliniges Gitter zeigt die Fließrichtung des Salzes in eine Salzstruktur an. Die resultierende Deformation wird durch verformte Ellipsen dargestellt (aus: Jackson & Hudec 2017).

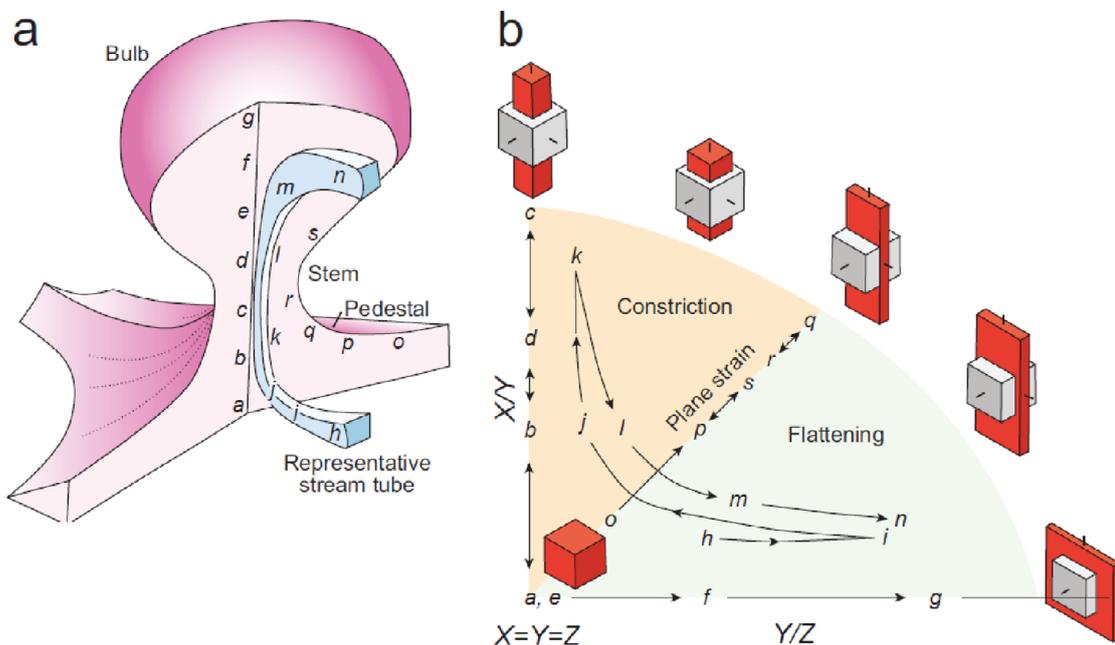


Abb. 15: Dreidimensional dargestellte Deformationsmuster innerhalb eines Salzdiapirs. Die in a) mit Buchstaben markierten Strukturbereiche sind in b) als Verlaufskurve und Deformation eines Quaders dargestellt (aus: Jackson & Hudec 2017).

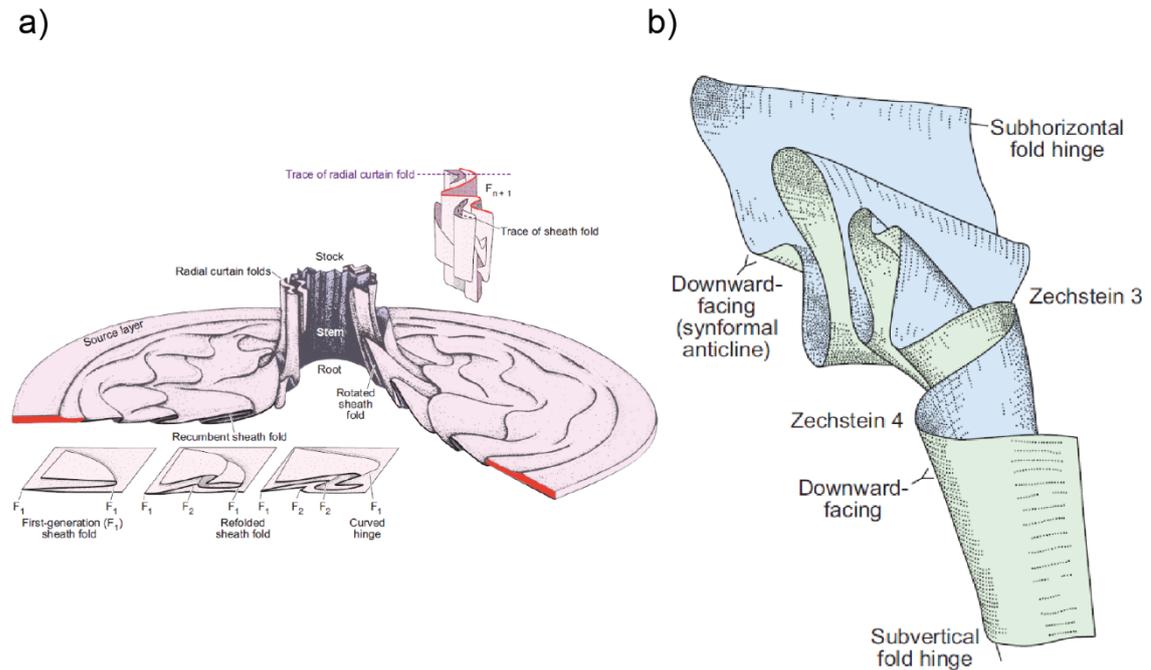


Abb. 16: Dominierende Faltenorientierungen je nach Strukturbereich innerhalb eines Salzdiapirs. a) + b) Liegende Falten (mit flachen Faltenachsebenen) treten vor allem in Salzabwanderungsgebieten, am Diapirfuß sowie in den Randbereichen der Diapirdächer auf. Falten mit stark abtauchenden bis vertikalen Faltenachsen (sog. „Kulissenfalten“) dominieren im engen Aufstiegsbereich des Diapirschlots. a) aus: Jackson & Hudec (2017), b) von Jackson & Hudec (2017) verändert nach Richter-Bernburg (1980).

Insgesamt folgt die Großfaltenstruktur dem Erscheinungsbild der äußeren Form der Salzstruktur (Abb. 17) insbesondere mit Annäherung an die Salzstrukturrränder, wo die Grenzflächenwirkung des Deckgebirges zunimmt. So ist insbesondere in den jüngeren und damit randnäheren Salzschieben eine höhere Tendenz der Parallelität zum Deckgebirge zu sehen (Bornemann et al. 2008; de Boer 1971; Jackson & Hudec 2017; Strozyk et al. 2014; Talbot & Jackson 1987). Dies lässt sich vor allem in frühen Entwicklungsstadien (Salzkissen, Salzantiklinalen, reaktive Diapire) beobachten und wenn die Salzstruktur noch nicht tiefgründig erodiert wurde. Bei tiefgreifender Erosion oder Subrosion von Salzdiapiren können die für den Dachbereich sonst typischen Faltenmuster entfernt worden sein. Mit Übergang ins diapirische Stadium bzw. bei zunehmendem Reifegrad der Salzstruktur nimmt die Variabilität des Faltenbaus zu (Abb. 17b, 3. und 4.).

Überwiegend halokinetisch gebildete Salzkissen und -antiklinalen weisen einen einfachen und oft symmetrischen Internbau auf, da die Großfalten die Form der Salzstrukturgrenzen annehmen, während das mobile z_2Na im Zentrum in einem oder mehreren Sätteln akkumuliert wird (Abb. 17a unten). Bei langen Antiklinalstrukturen verlaufen die Achsen der Salzfallen parallel oder subparallel zu den Hauptstrukturelementen mit einem geringeren Anteil an Querfaltung. Gleiches gilt für lang gestreckte Salzdiapire (Barnett et al. 2023; Bornemann et al. 2008; Frisch & Kockel 2004; Jackson et al. 2015). In kompressiv beeinflussten Salzantiklinalen und -kissen ist eine Faltenvergenz in Einengungsrichtung erkennbar. Sind andere Prozesse für die Strukturgenese verantwortlich (Sedimentprogradation und

differenzielle Last, Deformation an unterlagernden Sockelstörungen oder regionale Kompression) oder ist der Salzzustrom asymmetrisch, können auch äußerlich einfach gebaute Salzstrukturen (z. B. Salzkissen) intern eine höhere Variabilität aufweisen (Abb. 17b, 2.) (Barnett et al. 2023; Jackson et al. 2015; Jackson & Hudec 2017). So können Salzkissen und Salzantiklinalen (gem. BGE Definition = Teilgebiete in Steinsalz stratiformer Lagerung) je nach zugrundeliegendem Entstehungsmechanismus in ihrem inneren Aufbau größere Ähnlichkeiten mit Salzvorkommen steiler Lagerung als mit flachen Salzlagerstätten aufweisen.

Durch Dehnung (z. B. Rifting) hervorgerufenen Salzfließen erfolgt entgegen der Zugrichtung und senkrecht zum Streichen von Störungen (Jackson et al. 2015; Richter-Bernburg 1987a). Liegt eine Salzstruktur im Vergitterungsbereich verschieden orientierter tektonischer Elemente (z. B. Kreuzungspunkt unterlagernder Sockelstörungen unterschiedlicher Streichrichtung, sog. „Strukturknoten“) ist mit größerer Variabilität im Faltenbau zu rechnen (Dooley et al. 2005; Frisch & Kockel 2004; Geluk 1998; Löffler 1962; Lotze 1957; Rimmelts 1996). Die Variabilität des Faltenbaus nimmt ebenfalls zu, wenn die Salzstruktur eine mehrphasige Genese aufweist, z. B. unter Einfluss regionaler Einengung (Kockel et al. 1995; Pollok et al. 2020; von Goerne et al. 2016). Daneben wird Salzstrukturen mit kleinem und rundem Querschnitt sowie pilzförmigem Profilschnitt ein komplexer Internbau zugesagt (Bornemann et al. 2008; Frisch & Kockel 2004; Jackson & Hudec 2017; Jackson & Talbot 1989; Kockel & Roland 1977; Pichat 2022; Richter-Bernburg 1970). Salzdiapire mit asymmetrischer Außenform weisen i. d. R. auch einen asymmetrischen Faltenbau auf (Abb. 17a oben) (z. B. Burliga 1996; Jackson et al. 2015; Jackson & Talbot 1989; Talbot & Jackson 1987). Löffler (1962) schreibt, dass die innentektonische Verformung mit der außertektonischen Komplikation, d. h. der äußeren Form zunimmt (vgl. Abb. 17a oben, Abb. 17b, 4.).

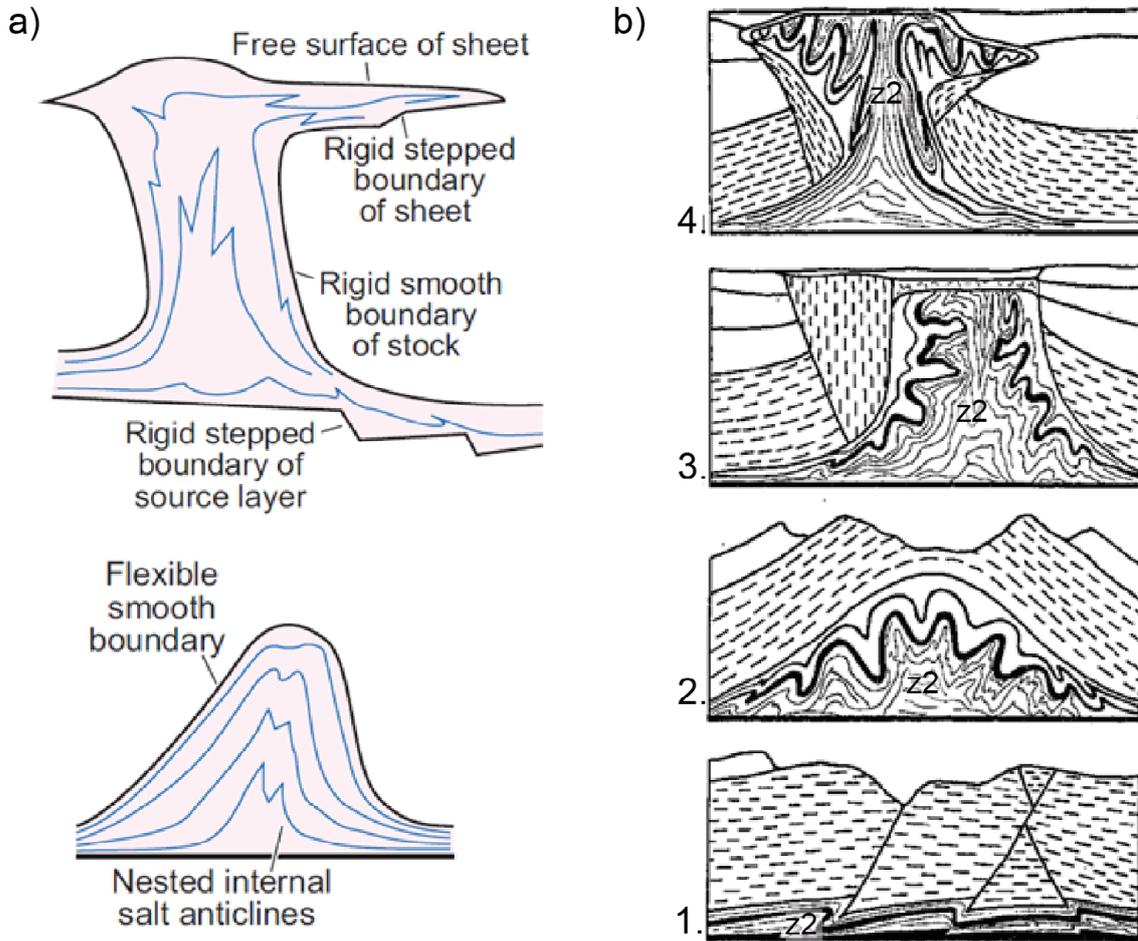


Abb. 17: a) Zum Salzstrukturrand zunehmende Abhängigkeit des internen Faltenbaus von der äußeren Form der Salzstruktur (nach: Jackson & Hudec 2017). b) Formung und Rotation der Großfalten in unterschiedlichen Lagerungsformen von Salzlagerstätten: stratiforme Lagerung (1., Werra-Fulda-Becken), Salzsattel (2., Hildesheimer Wald), Diapir ohne (3., Lehrte-Sehnde) und mit Überhängen (4., Wathlingen-Hänigsen) (nach: de Boer 1971).

4.2 Fallbeispiele aus dem Norddeutschen Becken

Im Folgenden soll ein Überblick von Salzstrukturen im NDB gegeben werden, die hinsichtlich ihres inneren Aufbaus gut untersucht sind. Wie zuvor in der Kapiteleinführung geschildert, handelt es sich dabei in erster Linie um Salzstrukturen mit Bergwerken oder Kavernenspeichern (Abb. 18). Anzumerken ist, dass sich die bergmännisch erschlossenen Salzstrukturen im Wesentlichen auf den südlichen Teil des Norddeutschen Beckens (im sog. Hannoverschen und Nordharzer Revier) sowie teilweise auf die Altmark konzentrieren und die meisten Erkenntnisse zum Internbau von Salzstrukturen aus diesem Bereich stammen. Im Gegensatz dazu wurden Kavernenspeicher vor allem in den Salzstrukturen des zentralen, nordwestlichen Teils des NDB angelegt. Das einzige Teilgebiet, für das Informationen zum Internbau aus benachbarten Strukturteilen (außerhalb des TG) mit Bergwerken herangezogen

werden können, ist die Allertal-Salzstruktur (052_00TG_119_00IG_S_s_z). Im Strukturteil Honigsee des TG 069_00TG_168_00IG_S_s_z-ro liegen Informationen aus den Erkundungsbohrungen zum Kavernenspeicher Kiel-Rönne vor.

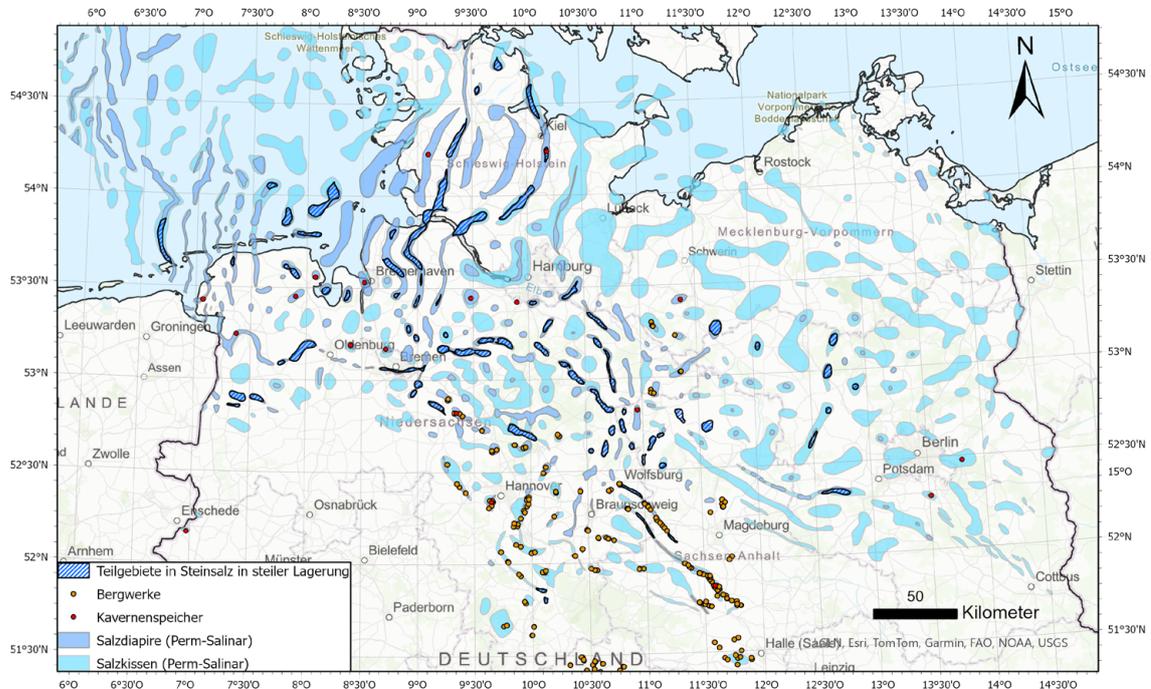


Abb. 18: Übersicht der Bergwerke und Kavernenspeicher im permischen Steinsalz im Vergleich zu den ausgewiesenen TG (nach: BGE 2020) in Steinsalz in steiler Lagerung. Verbreitung von Salzstrukturen permischer Salinare in Norddeutschland nach Reinhold et al. (2008) und von Goerne et al. (2016).

Im vorausgehenden Kapitel wurde dargelegt, dass jede Salzstruktur einen eigenständigen Innenaufbau besitzt, es aber in den verschiedenen Genesestadien und Strukturbereichen von Salzstrukturen dennoch grundlegende Gemeinsamkeiten gibt. Diese werden nachfolgend anhand von Salzstrukturbeispielen vorgestellt. Die Faktoren, die für die Vielfalt der Salzstrukturen aber auch für Ähnlichkeiten oder Unterschiede in den Internbaumustern verantwortlich sind, wurden in Kap. 3.3.1 beschrieben.

Es existieren zahlreiche Beschreibungen von Salzlagerstätten für einzelne Fallbeispiele und Bergbau-regionen (Ahlborn & Richter-Bernburg 1953; Bornemann 1991; Fulda 1935; Klarr et al. 1987; Löffler 1962; Lotze 1957; Middendorf & Kühn 1966; Richter-Bernburg 1987a; Schachl 1962, 1987, 1991; Seidl 1921; von Struensee 2000). Im Folgenden wird nur beispielhaft und kurz auf einige Fallstudien eingegangen. Für Einzelheiten wird auf die angegebene Literatur verwiesen.

Bereits Seidl (1921) erkannte einen Zusammenhang von Internbautypen und Salzstrukturen (sog. Salzhorsten) mit ähnlicher Entwicklung und regionaltektonischer Lage. Mit dem Ziel die bergmännische Kaligewinnung wirtschaftlicher zu gestalten, entwarf er eine Systematik und unterschied zwischen

für sog. „Salzspalten“ oder besonders reife Kissen mit Übergang zu juvenilen Diapiren abgeleitet. Genauso können die Grenzen zwischen den einzelnen Typen fließend sein. Die Übersicht zeigt allerdings deutlich, wie variabel die verschiedenen Salinarformationen (und mögliche WbB) in den unterschiedlichen Strukturtypen verteilt sind. Sie stellt auch heraus, dass das jeweilige relative Tiefenniveau bei der Verteilung von potenziellen WbB berücksichtigt werden muss. Dieser Punkt wird in Kap. 5.5 ausführlicher beleuchtet. Abb. 21 zeigt eine Gegenüberstellung der Salzstrukturen mit den dort ausgewiesenen TG und der in den InSpEE-Projekten zugewiesenen Internbau-Typen. Vereinzelt wurden die Typzuordnungen auf Grundlage neuer Erkenntnisse angepasst.

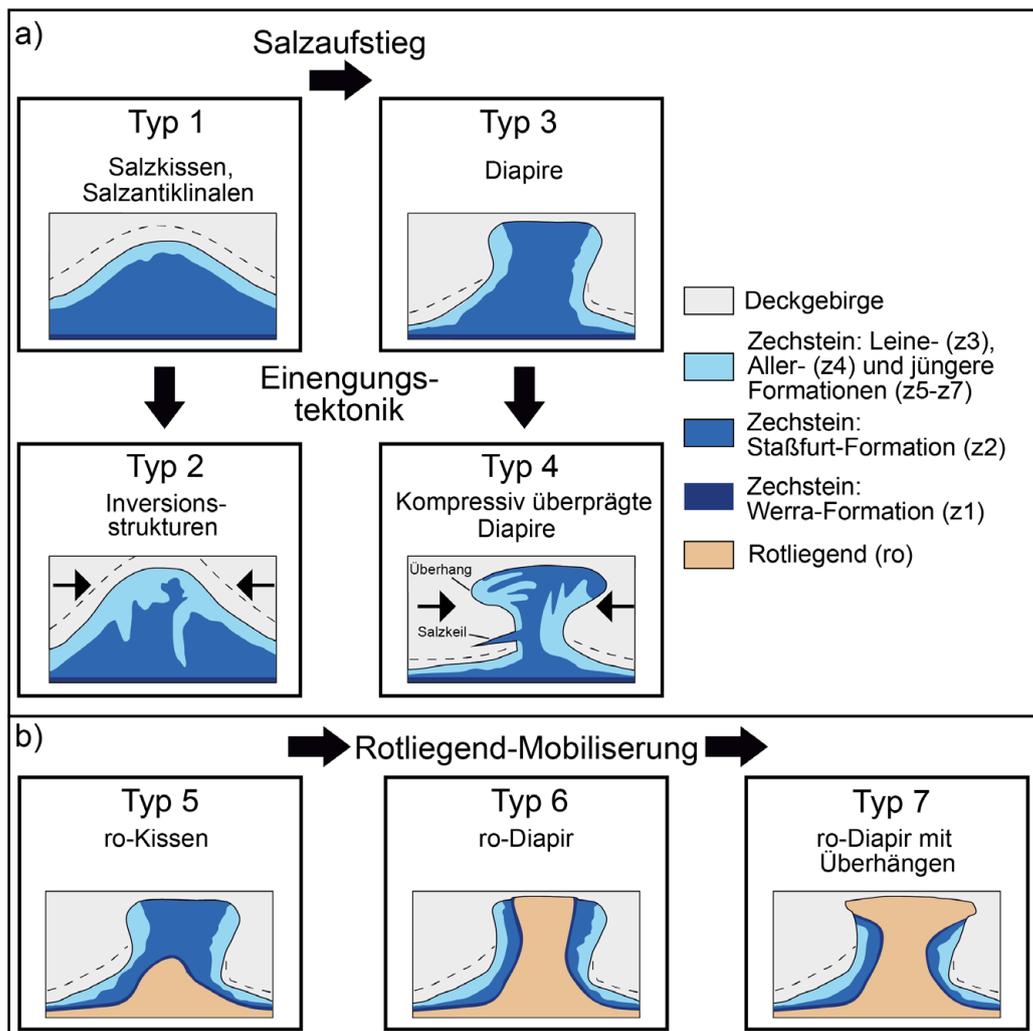


Abb. 20: Von der BGR in den InSpEE-Studien entwickelte charakteristische Internbautypen für Salzstrukturen im Norddeutschen Becken. a) Ausschließlich durch Zechsteinsalinare gebildete Salzstrukturen, b) Doppelsalinarstrukturen unter Beteiligung von Zechstein- und Rotliegendesalinaren (verändert nach: Pollok & Henneberg 2021; Röhling et al. 2020; von Goerne et al. 2016).

Standortauswahl

Pollok, L. et al. (2024): Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Wirtsgesteinsanteilen mit Barrierefunktion und der Internbauvariabilität in Salzstrukturen – Abschlussbericht; Hannover (BGR)

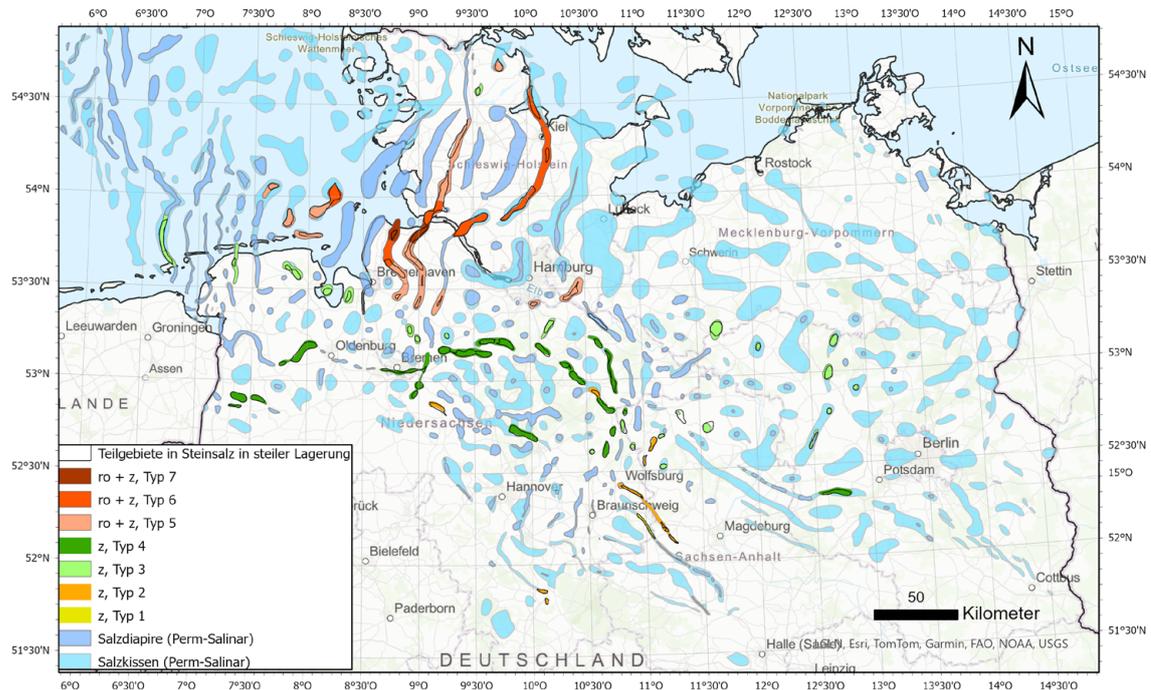


Abb. 21: Zuordnung der in den InSpEE-Projekten definierten Internbau-Typen (vgl. Abb. 20) zu Salzstrukturen in Teilgebieten (verändert nach: Pollok & Henneberg 2021; Röhling et al. 2020; von Goerne et al. 2016). Anpassungen in der Typenzuordnung im Bereich der deutschen Nordsee beruhen auf laufenden Arbeiten im BGR-Vorhaben „Potenziale des unterirdischen Speicher- und Wirtschaftsraums Deutschland (PuDEL)“.

Vielfach belegt und dadurch allgemein anerkannt ist, dass in deutschen Salzstrukturen, an deren Aufbau ausschließlich Zechsteinsalinare beteiligt sind, das älteste Salz der Staßfurt-Formation (z_{2Na}) in der Regel im Kern, die jüngeren Salze hingegen randnah anzutreffen sind (Abb. 17b, Abb. 20a, Abb. 22). Der Hauptsattel kann in mehrere Teilsättel kleinerer Ordnung gegliedert sein, die durch Mulden mit jüngeren Salinaren getrennt sind (Abb. 19c-f, Abb. 20a, Abb. 23). Das akkumulierte z_{2Na} bildet die größten zusammenhängenden Steinsalzhomogenbereiche in deutschen Salzstrukturen und stellt daher i. d. R. den Zielhorizont für Speicherkavernen dar. Dies gilt insbesondere dann, wenn das z_{2Na} die jüngeren Zechstein-Formationen und anschließend das Deckgebirge durchbricht und Salzdiapire entstehen (Übergang von Typ 1 zu Typ 3, Abb. 20a). Bei Antiklinalstrukturen (Abb. 20a, Typ 1, 2; Abb. 23), kleinen juvenilen Diapiren (Abb. 24) und solchen, die keine tiefgreifende Erosion/Subrosion des Dachbereichs erfahren haben, sind noch viele jüngere Zechsteinsalinare im oberen Bereich vorhanden. Mit zunehmender Evakuierung von z_{2Na} aus den Liefergebieten und Akkumulation sowie Aufstieg im Salzdiapir (fortgeschrittenes „downbuilding“), d. h. mit zunehmendem Reifegrad, nimmt die Platznahme von z_{2Na} in den oberen Diapirteilen zu (Abb. 20a, Typ 3).

Standortauswahl

Pollok, L. et al. (2024): Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Wirtsgesteinsanteilen mit Barrierefunktion und der Internbauvariabilität in Salzstrukturen – Abschlussbericht; Hannover (BGR)

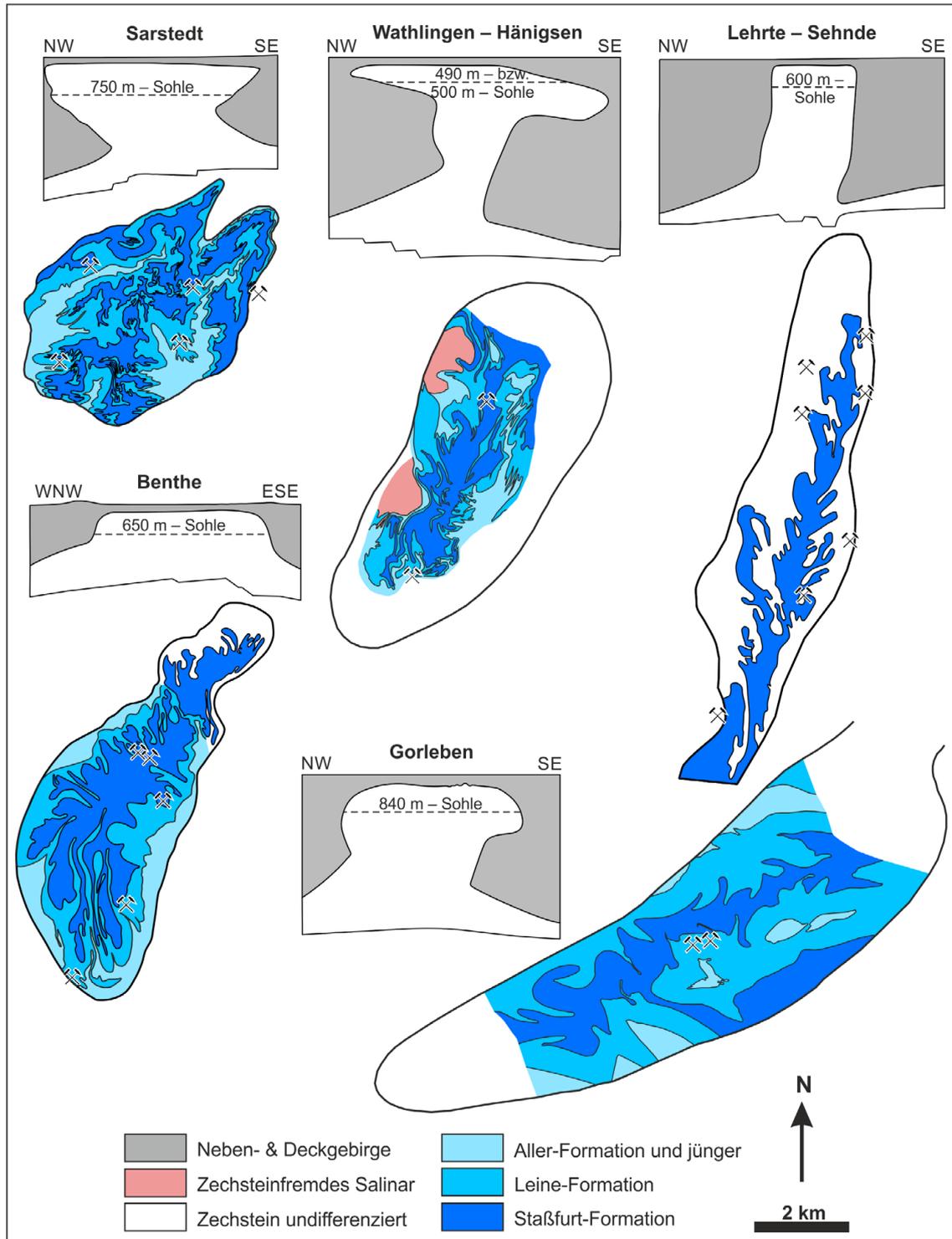


Abb. 22: Internbau und Verteilung verschiedener Zechstein-Formationen in fünf über- und untertägig erkundeten Salzstrukturen mit Darstellung des jeweils am umfangreichsten erkundeten Tiefenschnitts („Sohlenrisses“) (aus: Pollok et al. 2020). Diese gut erkundeten Salzdiapire wurden u. a. als Referenzstrukturen für die Methodenentwicklung herangezogen.

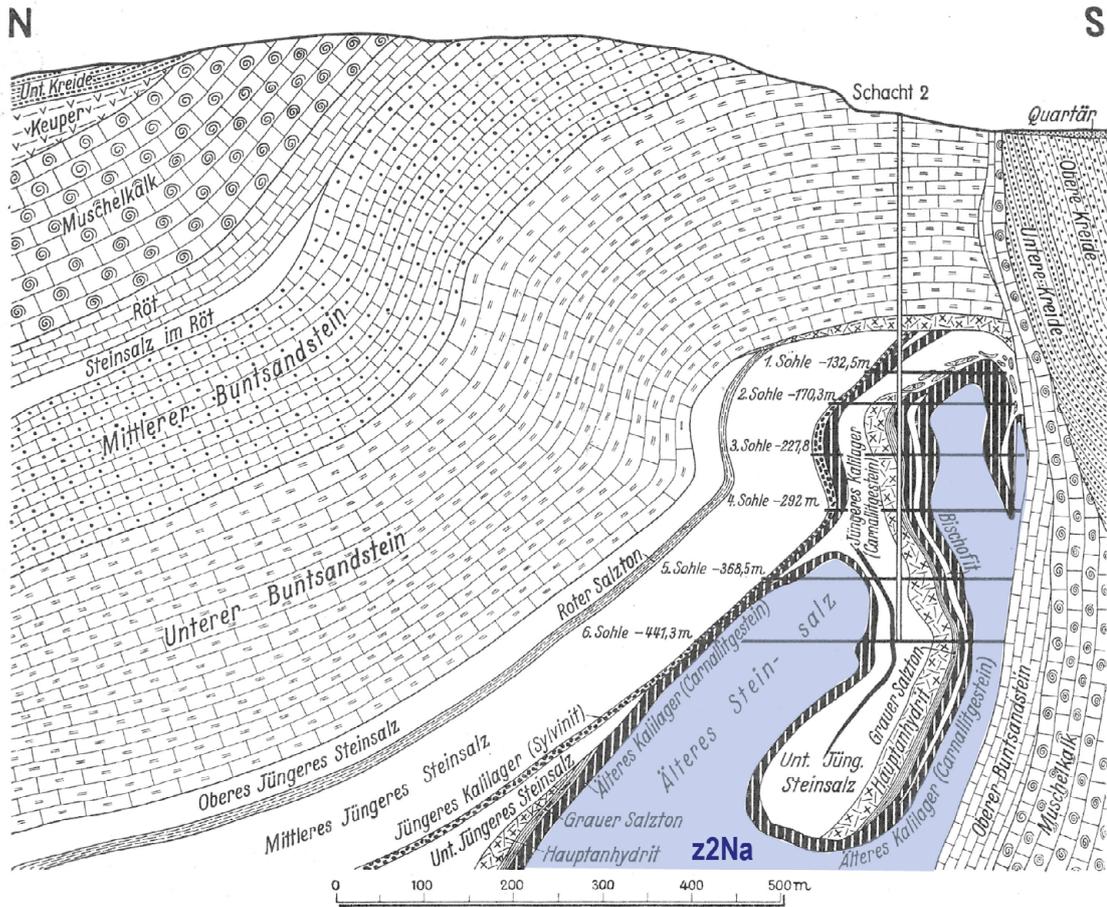


Abb. 23: Geologischer Schnitt durch eine durch Einengungstektonik beeinflusste Salzantiklinale (Salzstruktur Harli) mit zwei Sätteln von z2Na (blau), getrennt durch eine Mulde mit Salinaren der Leine-Formation. Im Topbereich der Struktur nehmen die jüngeren Zechstein-Formationen große Bereiche ein (verändert nach: Fulda 1935).

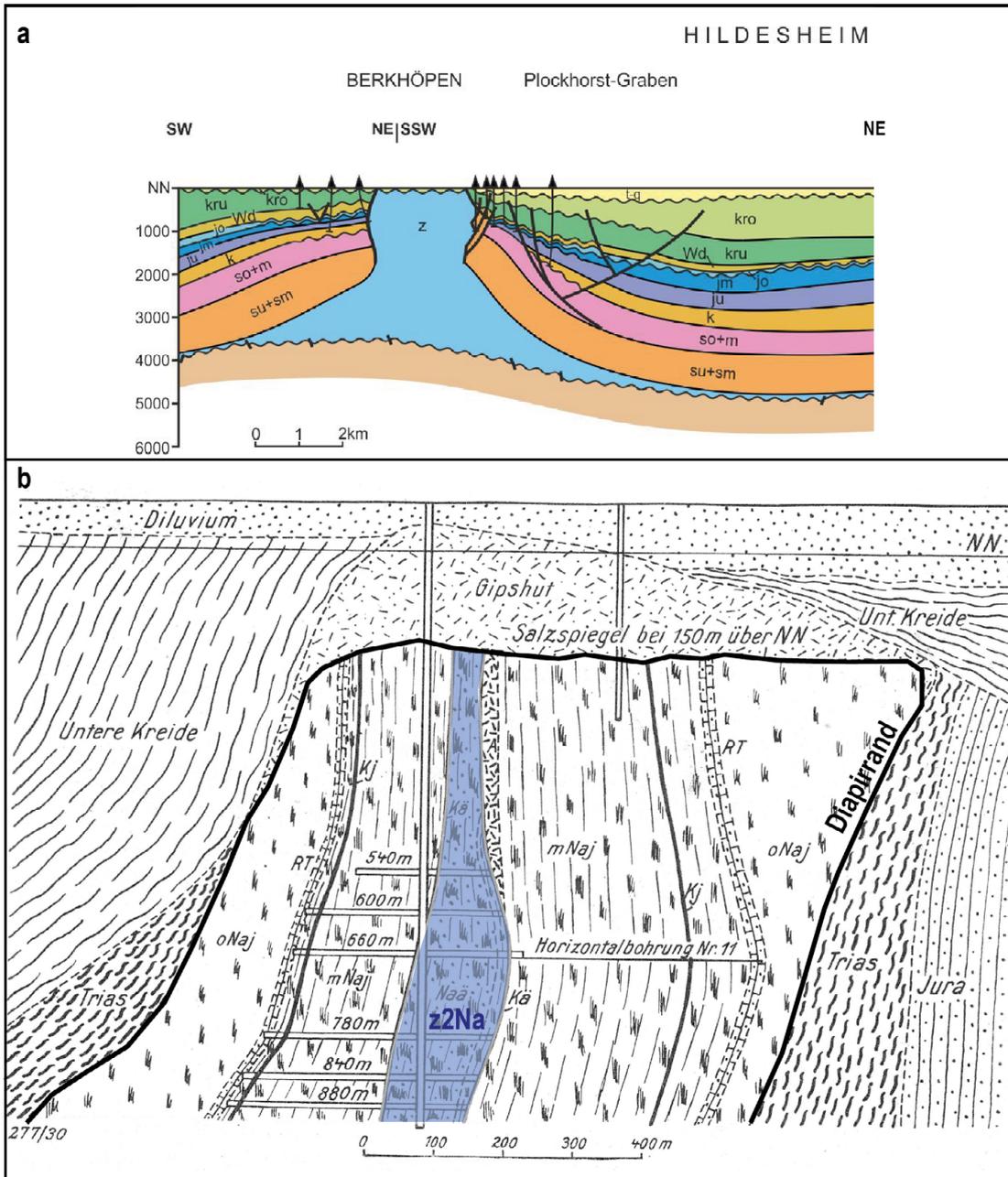


Abb. 24: a) Geologischer Schnitt durch den jungen Salzdiapir Berkhöpen mit großen Kissenfüßen (aus: Baldschuhn et al. 2001). b) Geologischer Schnitt durch den oberen Teil des Salzdiapirs Berkhöpen mit Darstellung des Internbaus. Deutlich wird der schmale z2Na-Zentralsattel (blau) im Verhältnis zum Gesamtdiapir sowie die relativ hohen Anteile an jüngeren Zechsteinsalinaren (verändert nach: Fulda 1935).

Die Vorkommen bzw. Aufstiegsbereiche von z2Na können von ihrer zentralen Lage abweichen, wenn die Salzstruktur in ihrer äußeren Form oder Genese durch Asymmetrie gekennzeichnet ist. Wie in Kap. 4.1 beschrieben, ist dann auch der Faltenbau und damit die räumliche Verteilung der verschiedenen Salinarformationen durch Asymmetrie geprägt. Weitere Beispiele für asymmetrische

Salzstrukturen sind vor allem über regionalen Sockelstörungen bekannt, die tektonische Blöcke trennen und mehrfach und ggf. in gegensätzliche Richtungen bewegt wurden (Salzstruktur Lehrte-Sehnde, Abb. 22, Abb. 25). Auch durch Einengungstektonik beeinflusste Salzantiklinalen (Abb. 23) und -kissen, sog. Spaltenintrusionen sowie Salzstrukturen mit räumlich über die Zeit variierender Salzzufuhr aus den Liefergebieten (z. B. Salzstruktur Gorleben, Abb. 22) zeigen derartige Tendenzen. Die regionalgeologische Stellung und Entwicklungsgeschichte der Salzstrukturen sind demnach zu beachten.

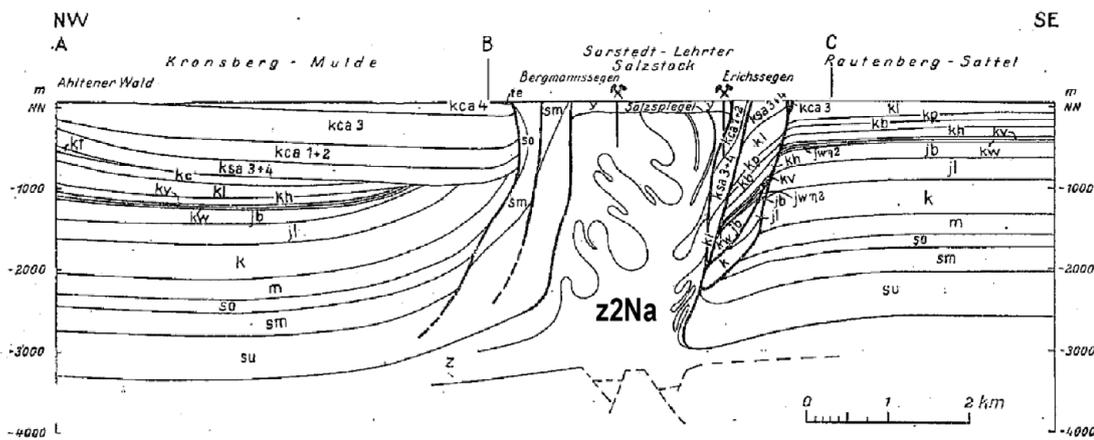


Abb. 25: Salzdiapir Lehrte-Sehnde über einer mehrfach in verschiedene Richtungen bewegten Sockelstörung, die den Hildesheimer von dem Hannover Block trennt. Beide Flanken sowie der Internbau sind asymmetrisch entwickelt (verändert nach: Schott & Dietz 1961).

Bei Salzdiapiren mit stark gegen die Tiefe konvergierenden Flanken bzw. solchen mit Überhängen kann das hochmobile z2Na die jüngeren, gegen die Flanken verdrängten Salinare überfalten und sich in den äußeren Dachbereichen anreichern. Daraus resultiert häufig überkippte Schichtlagerung in diesen Strukturbereichen (Typ 4, Abb. 20a). In diesen Fällen können Synformen überkippte Sättel (mit z2Na im Kern) und Antiformen überkippte Mulden (mit Leine-, Aller- und jüngeren Formationen im Kern) darstellen („Tauchfalten“, s. Kap. 4.1). de Boer (1971) und Schachl (1987) belegen dies eindrücklich an Fallbeispielen der Salzstrukturen Sarstedt und Wathlingen-Hänigsen (Abb. 17b, Abb. 22). Daher weisen Überhänge nach aktuellem Kenntnisstand einen besonders komplexen Internbau auf (Frisch & Kockel 2004; Jackson & Talbot 1989; Kockel et al. 1995; Pollok et al. 2020; Schachl 1987). Vorwiegend treten diese komplexeren Lagerungsverhältnisse in Strukturen auf, die unter Einfluss der oberkretazischen Einengungstektonik standen und entsprechende morphologische Charakteristika aufweisen (Salzkeile, -überhänge oder -überschiebungen im Deckgebirge, komplex aufgebaute Flanken- und Deckgebirgsbereiche; Typ 4, Abb. 20a, Abb. 26). In solchen Strukturen wurde zudem eine intensivere bzw. kleinräumigere und variabelere Verfaltung beschrieben (Bornemann et al. 2008; Kockel et al. 1995; Pollok et al. 2020) (z. B. Strukturen Sarstedt und Wathlingen-Hänigsen in Abb. 22). Dooley et al. (2009) haben allerdings dargelegt, dass Salzdiapire, die überprägt wurden, nicht zwangsläufig Kompressionserscheinungen im Neben- und Deckgebirge aufweisen.

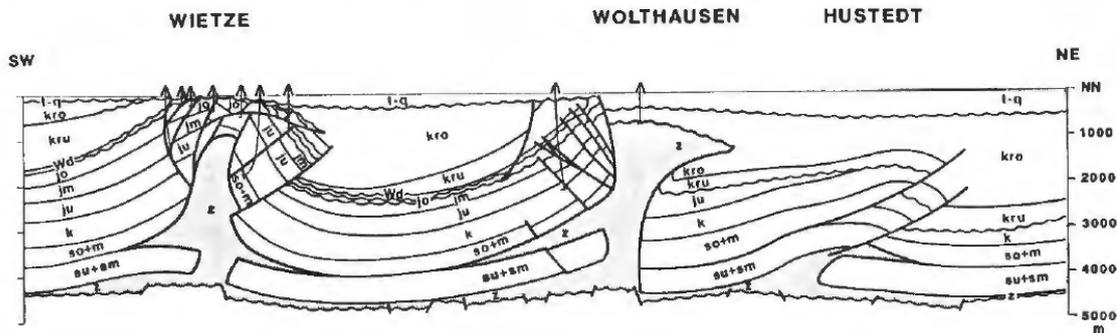


Abb. 26: Beispiele für Salzstrukturen im Niedersächsischen Becken, die durch oberkretazische Einengungstektonik überprägt wurden und entsprechende äußerliche Charakteristika aufweisen (Salzkeil und Salzüberhang bzw. Salzüberschiebung im komplex aufgebauten Deckgebirge) (aus: Kockel 1998).

Wird wie in Kap. 3.3 beschrieben zusätzlich das ältere Rotliegendes mobilisiert, so kann dieses je nach Mobilisierungsgrad unterschiedliche Anteile der oberen Diapirbereiche einnehmen und Zechstein-Formationen gegen die Ränder verdrängen und sogar überfalten (Abb. 20b). Je nachdem welches Salinar das gesuchte Wirtsgestein darstellt (z2Na oder Rotliegend), ist die unterschiedliche Umverteilung der Salinare in den verschiedenen Doppelsalinartypen zu berücksichtigen.

Im Rahmen dieser Studie wurden die oben genannten Informationen aus gut erkundeten Salzlagerstätten als eine Grundlage für die Methodenentwicklung angewandt. Nicht zu allen Standorten mit untertägiger Erkundung liegen verwendbare Daten zum internen geologischen Aufbau vor. Zwar wurden Archivunterlagen gesichtet, im Ergebnis lässt sich allerdings feststellen, dass häufig nur die Geologie um die erstellten Strecken und Bohrungen („Saumgeologie“) dokumentiert wurde. Wiederholt wurde dabei nur die petrographische Ausbildung der Gesteine (z. B. „Steinsalz“, „Hartsalz“, „Salzton“ usw.) ohne stratigraphische Einordnung erfasst. Damit ist eine geologische Interpretation des internen Aufbaus, auch in unverritzte Bereiche hinein, nicht oder nur unzureichend möglich. Überdies sind i. d. R. nur Teilbereiche der Salzstrukturen aufgeschlossen und dokumentiert worden. Die Daten dieser Standorte konnten demnach nicht für die vorliegende Studie verwendet werden. Weiterhin war zu einigen Standorten der Zugang zu Daten in Rahmen dieser Studie nicht gegeben. Eine Analyse dieser bisher nicht bewerteten Lagerstätten sowie weiterer Standorte im Bereich des zentraleuropäischen Beckensystems in Dänemark, Polen und den Niederlanden könnte weitere Erkenntnisse zur Internbaustruktur von Diapiren im NDB liefern.

5 Methodenentwicklung zur Bewertung der Wirtsgesteinsanteile und der Internbauvariabilität von Salzstrukturen (Salzformationen in steiler Lagerung)

Ziel der Methodenentwicklung ist es, Wirtsgesteinsanteile und die Internbauvariabilität von Salzstrukturen abzuschätzen und darauf basierend Untersuchungsräume herauszuarbeiten, die besonders günstige geologische Voraussetzungen für das Auffinden großer homogener Steinsalzbereiche (WbB) zur späteren Ausweisung eines ewG bzw. die technische Realisierbarkeit eines HAW-Endlagers erwarten lassen. Gemäß (BGE 2022a) sind Strukturen mit mächtigen homogenen, relativ großräumig verfalteten Steinsalzbereichen vorteilhaft gegenüber Strukturen mit kleinräumig verfaltetem, komplexem internen Aufbau. Im Wesentlichen sind für die Methodenentwicklung also zwei Eigenschaften von Salzstrukturen relevant:

1. Die Größe bzw. der Anteil an homogenen Steinsalzgebirgsbereichen gemäß Definition Wirtsgestein mit Barrierefunktion, das einen ewG aufnehmen kann.
2. Die Variabilität des internen Aufbaus bzw. Intensität und Heterogenität interner Verfaltungen, die eine Prognose zur Existenz ausreichend großer Steinsalz-Homogenbereiche erschweren bzw. unwahrscheinlich werden lassen.

Während erstere durch die im Folgenden beschriebene Methode teilweise quantitativ beschrieben werden kann, wird die Variabilität der internen Struktur empirisch ermittelt.

5.1 Identifikation und Beschreibung von geologischen Faktoren

Anhand der Literaturstudie zu allgemeinen Gesetzmäßigkeiten der Salztektonek und Salzstrukturbildung (Kap. 3.3) sowie zu Fallbeispielen mit untersuchtem Salzstruktur-Internbau (Kap. 4.2) werden im Folgenden geologische Faktoren beschrieben, die Einfluss auf den Internbau von Salzstrukturen haben können. Bestimmte Internbaumuster gut untersuchter Salzstrukturen können i. d. R. nicht einem einzelnen, konkreten Einflussfaktor zugeordnet werden, sondern sind auf die Kombination bzw. komplexe Interaktion mehrerer geologischer Einflüsse zurückzuführen. Daher ist für die Bewertung von Salzdiapiren ihre vollständige Entwicklungsgeschichte genauso wie die Gesamtheit der geologischen Faktoren zu berücksichtigen. Dabei kann sich ein Faktor auch aus der Betrachtung verschiedener indirekter Indikatoren ergeben. In diesem Bericht wird einheitlich der Begriff „geologischer Faktor“ verwendet, auch um eine Abgrenzung zu den in den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (geoWK) des StandAG genannten „Indikatoren“ zu schaffen.

Systematische Analysen oder Vergleiche von Salzstrukturen mit speziellem Fokus auf die Internstrukturen liegen bislang kaum vor (vgl. Kap. 4). Einzelne Hinweise zu diesbezüglichen geologischen Einflussfaktoren wurden aus der Literatur und aus den Fallbeispielen zusammengetragen, überprüft, miteinander verglichen und bewertet. Insgesamt wurden sieben wesentliche geologische Faktoren identifiziert, die entsprechend ihrer Gruppenzuordnung (s. Tab. 1) in den nachfolgenden Kapiteln „Entwicklungsgeschichte“

(Kap. 5.1.1), „Morphologie“ (Kap. 5.1.2) und „Beckenlage“ (Kap. 5.1.3) detaillierter beschrieben werden. Um eine zweckmäßige Methode zu entwickeln, wurden die Faktoren so ausgearbeitet, dass sie in der Regel auf alle Teilgebiete und damit systematisch angewendet werden können.

Tab. 1: Übersicht und Eingruppierung zu identifizierten geologischen Faktoren.

Gruppe	Nr.	Geologischer Faktor
Entwicklungsgeschichte	1	Strukturaufbauendes Salinar
	2	Entwicklungsphasen und regionalgeologisches Setting
Morphologie	3	Querschnittsfläche
	4	Mächtigkeit
	5	Formfaktor
Beckenlage	6	Primäre Steinsalz-Mächtigkeit
	7	Fazies

Darüber hinaus gibt es weitere in der Literatur beschriebene, aber in der Methode nicht berücksichtigte geologische Faktoren. Sie wurden bei der Methodenentwicklung entweder als nicht relevant oder als fakultativ anwendbar eingestuft oder stehen in einem engen Zusammenhang zu den hier aufgelisteten Faktoren. Weitere Erläuterungen dazu finden sich in Kap. 5.3. Für die Abschätzung der Verteilung von Wirtsgesteinsbereichen mit Barrierefunktion ist nach Anwendung der Methode eine Einzelfallbetrachtung des Teilgebiets bzw. Untersuchungsraums erforderlich (Kap. 5.5).

Um unter Anwendung der Methode letztlich eine Bewertung der Salzstrukturen zu ermöglichen, werden Wertungsgruppen für die verschiedenen Faktoren eingeführt. In den Wertungsgruppen wurde ein drei- bis vierstufiges System genutzt („sehr günstig“, „günstig“, „bedingt günstig“ und „weniger günstig“). Bei den vorgeschlagenen Wichtungen zu den Faktoren wird zwischen „sehr hoch“, „hoch“, „mittel“ und „gering“ unterschieden.

5.1.1 Entwicklungsgeschichte

Um Annahmen über das Maß der Variabilität des Internbaus von Salzstrukturen treffen zu können, ist deren gesamtheitliche Entwicklungsgeschichte, von der primären Salzablagerung bis zum heutigen Stadium, zu betrachten. Zu den wichtigsten umfassenden Analysen der zeitlichen Entwicklungsphasen der Salzstrukturen im Norddeutschen Becken zählen die Studien von: Baldschuhn et al. (1979a, 1979b, 2001); Jaritz (1973, 1987); Kockel et al. (1995); Kockel (1999); Krull (1991); Pollok et al. (2020); Warsitzka et al. (2019).

Bewegungsphasen von Salinarstrukturen sind häufig an großtektonische Ereignisse im NDB, wie z. B. Senkungsphasen während des Rifting oder Einengungsphasen während Gebirgsbildungsprozessen, gekoppelt. Je nach Ereignis hat die tektonische Deformation verschiedene bzw. unterschiedlich große Beckenbereiche umfasst. Nach Pollok et al. (2020) und Warsitzka et al. (2019) wird die Verteilung und Form (Kap. 5.1.2) von Salzstrukturen dadurch bestimmt, unter welchen geologischen Rahmenbedingungen die halokinetischen bzw. halotektonischen Prozesse ablaufen. Die Ursache für die große Formenvielfalt der norddeutschen Salinarstrukturen ist in ihren individuellen Entwicklungsgeschichten und ihren jeweiligen Beckenpositionen begründet. Gemäß den in Kap. 3.3.1 genannten und dafür verantwortlichen Faktoren werden in der Gruppe „Entwicklungsgeschichte“ zwei geologische Faktoren beschrieben, die Einfluss auf die Bildung, Verteilung und äußere und innere Formgebung von Salzdiapiren haben:

- die Beteiligung altersverschiedener, strukturaufbauender Salinare (Kap. 5.1.1.1),
- die Entwicklungsphasen und das jeweilige regionalgeologische Setting (Kap. 5.1.1.2).

5.1.1.1 Strukturaufbauendes Salinar

In Kap. 3.2 wurden die in Deutschland vorkommenden Salzformationen beschrieben. Von Ihnen haben lediglich die permischen Salinarschichten des Rotliegend und des Zechsteins im NDB sowie die tertiären Salinarschichten im Oberrheingraben Diapire, also Salzformationen in steiler Lagerung gebildet. Teilgebiete wurden dabei ausschließlich in den von permischen Salinaren aufgebauten Salzdiapiren ausgewiesen (s. Kap. 2.1). Insofern sind hier nur das Rotliegend- sowie das Zechsteinsalinar als strukturbildende Salinare zu betrachten bzw. zu unterscheiden.

Von den 60 Teilgebieten wurden 49 Teilgebiete ausschließlich von Zechsteinsalinaren und elf Teilgebiete zusätzlich durch Rotliegendsalinar gebildet (sog. „Doppelsalinarstrukturen“). Die Verbreitung strukturbildender Rotliegendsalinare wurde in verschiedenen Quellen dokumentiert (Baldschuh et al. 2001; Reinhold et al. 2008; von Goerne et al. 2016). Eine systematische Untersuchung der Beteiligung der diapirischen permischen Salinare und eine Eingruppierung in bestimmte Internbautypen wurde, wie bereits in Kap. 4.2 beschrieben, in den InSpEE-Studien vorgelegt (Röhling et al. 2020; von Goerne et al. 2016).

Abhängig vom Anteil des Rotliegendsalinars an der Strukturbildung können vier Internbautypen von Salzdiapiren unterschieden werden (vgl. Kap. 4.2). Die beiden Endglieder sind: 1) keine ro-Beteiligung und 2) ro-Beteiligung mit diapirinterner Überhangsbildung (Abb. 27). Die Übergänge zwischen den einzelnen Typen können fließend sein. Dass die Rotliegendsalinare im Zentrum des Diapirs aufsteigen und mit zunehmender Mobilisierung die Zechsteinschichten nach oben aus der Struktur heraus bzw. gegen ihre Flanken verdrängen, ist durch Untersuchungen belegt (Kap. 4.2) und kann als allgemeingültig angenommen werden.

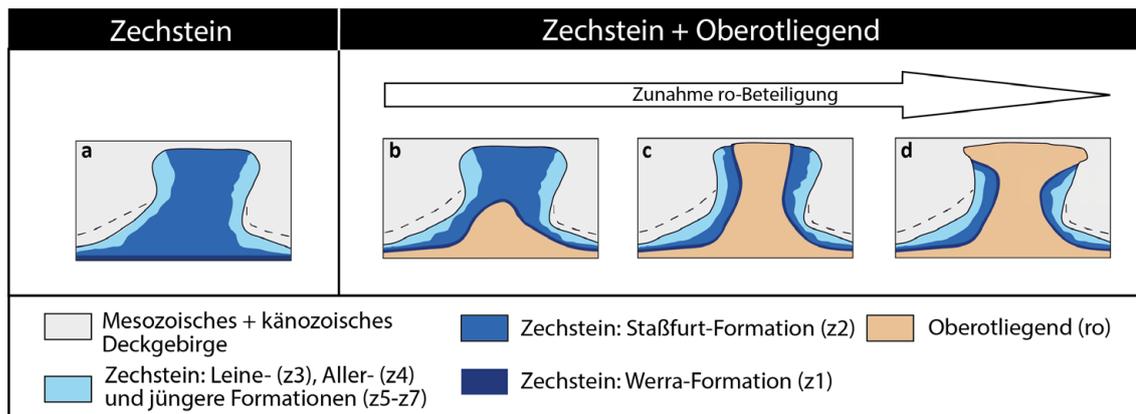


Abb. 27: Schematische Profile durch Salzdiapire mit ausschließlicher Beteiligung von Zechsteinsalinen (a) am Salzstrukturaufbau sowie zunehmender Rotliegendesalinarbeteiligung (b-d), den sog. Doppelsalinarstrukturen.

In Kap. 3.2 wurden die Bildung, die Mächtigkeit und Verbreitung der Zechstein- und Rotliegendesalinare beschrieben. Demnach sind gemäß der primären Ablagerung die mächtigsten reinen Steinsalzfolgen im Zechsteinsalinar, speziell in der Staßfurt-Formation zu erwarten. Es ist also a priori davon auszugehen, dass auch diese in den Diapiren die größten zusammenhängenden homogenen Steinsalzbereiche bilden, zumal die Staßfurt-Salze (z2Na) hauptverantwortlich für die Salzdiapirbildung sind. D. h., dass sie durch halokinetische Mobilisierung und Akkumulation Steinsalzkörper mit großer vertikaler und lateraler Ausdehnung in den Diapiren gebildet haben. In gut erkundeten Salzstrukturen wurde dieser Sachverhalt mehrfach belegt (Kap. 4.2). Neben der großen Mächtigkeit ist ein weiterer Vorteil des z2Na, dass es sehr rein ist und nach vorliegenden Informationen nicht von eingeschalteten Anhydritgesteinen oder Kaliflözen unterbrochen wird (Kockel et al. 1995). Nach aktuellem Kenntnisstand bietet daher das z2Na für die Auffindung von großen WbB zur zukünftigen Ausweisung eines ewG die günstigsten geologischen Voraussetzungen.

Vor dem Hintergrund der Anforderung, möglichst große und homogene Wirtsgesteine mit Barrierefunktion in Teilgebieten mit Steinsalz in steiler Lagerung vorzufinden, bekräftigt die BGR die Empfehlung früherer Salzstudien (z. B. Kockel et al. (1995); Krull (1991)) sowie den Vorschlag der BGE (BGE 2022a), den Fokus auf die Steinsalzabfolgen der Staßfurt-Formation zu legen.

Dies bedeutet nicht, dass ausreichend große Steinsalzvolumen nicht auch z. B. in der Leine-Formation gefunden werden können. Die jüngeren Zechstein-Formationen wie auch das Rotliegendesalinar weisen aber durch nachweislich geringere Primärmächtigkeiten a priori eine gegenüber dem Staßfurt-Steinsalz geringere Wahrscheinlichkeit auf, große zusammenhängende Volumina in Diapiren zu bilden (Kockel & Roland 1977). Sie werden auch häufiger durch nicht-halitische Gesteine, wie Ton- und Anhydritzwischenmittel, z. T. auch von Kaliflözen (z. B. Kaliflöze Ronnenberg und Riedel), unterbrochen („verunreinigt“). Nach de Boer (1971) weist die Leine-Formation mit dem Grauen Salzton, Hauptanhydrit, Anhydritmittel- und Tonmittelsalz einen klastischen bzw. anhydritischen Anteil von ca. 30 % auf, die Staßfurt-Formation von nur ca. 5 %. Insofern wird bei einigen im weiteren Verlauf

beschriebenen geologischen Faktoren, ausschließlich Bezug auf das Staßfurt-Steinsalz genommen, da dieses die günstigsten geologischen Voraussetzungen für Wirtsgesteine mit Barrierefunktion bietet.

Beim Rotliegendesalinar liegen nur wenige Untersuchungen zur heterogenen Zusammensetzung in steiler Lagerung vor. Im Beckenzentrum besteht nach Best et al. (1982) durch den höheren Anteil an abgelagertem Steinsalz die Möglichkeit, dass in den Diapirkernen mit Rotliegend-Salinar größere Steinsalzhomogenbereiche vorkommen. Insgesamt lassen sich für die Rotliegendesalinare bzw. für die Doppelsalinare nach aktuellem Kenntnisstand folgende Eigenschaften festhalten, die gegenüber dem Staßfurt-Steinsalz des Zechsteins bzw. Zechstein-Salzstrukturen als eignungs-mindernd gewertet werden können:

- Bedingt durch die Ablagerungsbedingungen sind die Steinsalzbänke des Rotliegenden geringmächtiger und häufig durch andere Gesteine unterbrochen bzw. die Steinsalze selbst stärker durch Nebengemengteile wie z. B. Siliziklastika „verunreinigt“ (s. Kap. 3.2.1). Dabei können die Nebengemengteile stark variieren, sodass zu prüfen ist, ob diese Abfolgen noch der Wirtsgesteinsdefinition von Steinsalz entsprechen bzw. ausreichend große Homogenbereiche zu erwarten sind.
- Durch den halokinetischen Salzaufstieg ist größtenteils aus der Wechsellagerung von Steinsalz- und Tonbänken ein stark deformierter Tektonit (sog. „Haselgebirge“) in Form eines Salz-Ton-Gemisches im Kern der Doppelsalinarstrukturen entstanden, welcher keine lithostratigraphische Detailzuordnung und Orientierung z. B. anhand von Leithorizonten erlaubt (Best et al. 1982; Hofrichter 1980; Trusheim 1971). Räumliche Prognosen über den Verlauf von Steinsalzhomogenbereichen oder lithostratigraphischen Einheiten sind kaum möglich. Dies gilt z. B. auch für solche, die nicht als Barrieregestein anzusehen und zu denen ggf. Sicherheitspfeiler einzuhalten sind. Aus diesem Grund kann auch nicht gezielt auf im Beckenzentrum möglicherweise vorhandene, bislang aber nicht belegte reinere Steinsalzpartien in den Diapiren prospektiert werden.
- Im Vergleich zu reineren Steinsalzen des Zechsteins, ist infolge des hohen und stark schwankenden Tongehalts von verminderten petrophysikalischen Eigenschaften in Bezug zum Verformungs- und Bruchverhalten, geochemischen Verhalten, zur Wärmeleitfähigkeit, Dichtigkeit, Standfestigkeit, Konvergenz und thermischen Belastbarkeit im Langzeitverhalten zu rechnen. Vergleichende diesbezügliche Untersuchungen stehen allerdings aus und liegen nicht im gleichen umfangreichen Maße wie für die Zechsteinsalze vor (Kockel et al. 1995).
- Der Anteil und die räumliche Verbreitung des Rotliegend- und des Zechsteinsalinars bzw. seiner einzelnen Formationen ist nach derzeitiger Daten- und Erkenntnislage in den Diapiren quantitativ unzureichend abschätzbar, wodurch eine Prognose von homogenen Steinsalzbereichen im Diapir erschwert wird.
- Nicht chloridische Schichtglieder des basalen Zechstein (Werra- und basale Staßfurt-Formation) wurden mitmobilisiert, sodass mit ihrem Vorkommen, wenn auch ggf. in boudinierter Form, in endlagerrelevanten Teufen zu rechnen ist. Dabei handelt es sich überwiegend um Anhydrit- und Karbonatgesteine ohne Barrierefunktion.

- Durch Platznahme des im Zentrum aufsteigenden Rotliegendesalinars könnten große Anteile von z2Na verloren gegangen sein.
- Bei Vorhandensein des z2Na ist dieses flankennäher zu vermuten als in Zechsteindiapiren, sodass im Hinblick auf die räumliche Konfiguration der Gesteinskörper bzw. des Wirtsgesteins mit Barrierefunktion durch die Randlage ggf. von geringerer Robustheit und geringeren Sicherheitsreserven auszugehen ist.

Insofern sollten nur Salzdiapire bzw. Teile davon günstig bewertet werden, die günstige geologische Voraussetzungen erwarten lassen. Je größer die ro-Beteiligung innerhalb der Salzdiapire ist, desto geringer dürfte das nutzbare Volumen an Staßfurt-Steinsalz (z2Na) sein. Kockel et al. (1995) folgend besteht deshalb die Möglichkeit, dass das z2Na schon in der Diapirphase am Top der Struktur ausgestoßen sowie subrodiert wurde und somit ggf. quantitativ nicht mehr zur Verfügung steht, während sich die weniger mobilen jüngeren und älteren Zechsteingesteine mit geringeren Steinsalzvolumina, stark deformiert in den Flankenbereichen konzentrieren. Hinsichtlich der internen Variabilität kann daraus ebenfalls geschlussfolgert werden, dass diese mit zunehmender Beteiligung des Rotliegendesalinars zunimmt.

Bewertung:

Gemäß obiger Beschreibungen schlägt die BGR für den geologischen Faktor „strukturaufbauendes Salinar“ folgende Bewertung vor:

Tab. 2: Bewertung des geologischen Faktors „strukturaufbauendes Salinar“.

Bewertung	Strukturaufbauendes Salinar
sehr günstig	z
günstig	ro+z (ro-Aufwölbung/-Kissen)*
bedingt günstig	ro+z (ro-Diapir)
weniger günstig	ro+z (ro-Diapir mit internen Überhängen)

* Erreicht das Rotliegendesalinar nachweislich nicht die endlagerrelevanten Teufen, so ist eine „sehr günstige“ Bewertung möglich.

Die günstigsten geologischen Voraussetzungen sind in Diapiren mit ausschließlich aufgestiegenem Zechstein in endlagerrelevanten Teufen zu erwarten. Bei den kissenförmigen Aufwölbungen des Rotliegendesalinars innerhalb des Diapirs ist zu prüfen, ob diese bis in die endlagerrelevanten Teufen (von z. B. 1.500 m u. GOK plus Sicherheitspfeiler) reichen. Kann dies mit hinreichender Sicherheit ausgeschlossen werden, können solche Teilgebiete auch in die Bewertungsgruppe „sehr günstig“ aufgenommen werden, da im Betrachtungsbereich nur Zechsteinsalinare vorkommen. Ist dies nicht

möglich, wird eine „günstige“ Bewertung vorgeschlagen, da das Auftreten von Rotliegendesalinaren nicht ausgeschlossen werden kann. Auch das Vorkommen nahe der vorgesehenen Endlagerteufen könnte ein Hinweis darauf sein, dass nennenswerte Anteile des zu favorisierenden z2Na bereits aus dem Diapir herausgehoben und entfernt wurden. Dies wäre ein weiterer Grund, solche Strukturen gegenüber den reinen Zechsteinstrukturen als geringer geeignet (hier: „günstig“) einzustufen.

Bedingt günstige geologische Verhältnisse liegen vor, wenn das Rotliegendesalinare in endlagerrelevanten Teufen nachgewiesen wurde oder zu erwarten ist. Dies wird üblicherweise in solchen Salzstrukturen der Fall sein, in denen das Rotliegendesalinare die Zechsteinsalinare diapirisch durchbrochen hat und bis zum Top des Diapirs emporgestiegen ist. Nachweise können i. d. R. durch Bohrungen erbracht werden, die auch nur das Top entsprechender Salzstrukturen erreichen. Im Allgemeinen sind die aus Zechstein- bzw. Rotliegendesalinaren gebildeten Hutgesteine derart unterschiedlich ausgebildet, dass eine eindeutige lithostratigraphische Trennung und Prognose in tiefere Bereiche möglich ist. Erreichen Bohrungen das Salinar, so ist eine stratigraphische Zuordnung der Gesteine i. d. R. ebenfalls möglich. Untersuchte Fallstudien im InSpEE-DS-Projekt haben aufgezeigt, dass die Platznahme der Rotliegendesalinare im Diapirzentrum unterschiedlich groß sein kann und die an den Flanken vorkommenden Anteile von Zechsteinsalinaren, und somit des Staßfurt-Steinsalzes, stark variieren können (Röhling et al. 2020).

Eine „weniger günstige“ Bewertung wird für diejenigen Teilgebiete vorgeschlagen, in denen zuverlässig ausschließlich Rotliegendesalinare in endlagerrelevanten Teufen zu erwarten oder flankennahe Zechsteinsalinare anteilig so gering sind, dass in ihnen keine ausreichend großen Wirtsgesteinsbereiche mit Barrierefunktion angenommen werden können. Solche Fälle sind aus Sicht der BGR für Salzdiapire mit internen Rotliegendesalinärüberhängen zu erwarten.

In groben Zügen lässt sich eine Korrelation zwischen dem Maß der Rotliegendesalzbeteiligung an der Strukturbildung mit dem Verbreitungsgebiet der Rotliegendesalinare herstellen. Je weiter man sich den äußeren Bereichen des Verbreitungsgebiets nähert, desto geringmächtiger war die ursprüngliche Ablagerung der Steinsalzhorizonte im Rotliegend und desto geringer war seine Mobilisierung. Dagegen sind Diapire mit „internen Rotliegendesalzüberhängen“ vornehmlich im Zentrum des Rotliegendesalinare Verbreitungsgebiets vorzufinden (vgl. Röhling et al. (2020)).

Für alle Salzdiapire mit potenzieller ro-Beteiligung empfiehlt die BGR, sofern vorhanden, eine Prüfung der ortsspezifischen Bohrungsdaten. Damit sind ggf. Rückschlüsse auf die Anteile und räumliche Verteilung der altersverschiedenen Salinare möglich, die eine Zuordnung und Bewertung, wie oben angegeben, ermöglichen. Die Arbeiten im InSpEE-DS-Vorhaben haben gezeigt, dass ein solcher Nachweis nur durch im Salzdiapir niedergebrachte Tiefbohrungen zu erbringen ist. Solche Bohrungen liegen nur stellenweise vor und erreichten häufig nur die obersten Teile des Salzdiapirs bzw. wurden vielfach im Hutgestein eingestellt. Liegen keine Bohrungsbelege vor, wird empfohlen, Kenntnisse über den Internbau mittels Analogieschlüssen von besser untersuchten Nachbarstrukturen zu übertragen. Sofern vorhanden, sollte mit den Bohrungsdaten zudem überprüft werden, ob die Steinsalzanteile im Rotliegendesalinare tatsächlich zu gering sind, um ausreichend große Homogenbereiche für WbB zu bilden.

Bei Salzstrukturen ohne Bohraufschlüsse wurde die Rotliegendesalzmobilisierung i. d. R. aus einem seismisch auflösbaren Störungsversatz und einer Verfaltung oder Aufwölbung an der Basis Zechstein am Fuß der jeweiligen Salzstruktur geschlussfolgert. Nach aktuellem Stand der Technik bzw. nach aktueller Datenlage der geophysikalischen Oberflächenverfahren (i. d. R. Seismik) lässt sich der Verlauf der altersverschiedenen Salinare und damit das Maß der Rotliegendesalzmobilisierung größtenteils nicht sicher erfassen. Damit ist der Anteil von Zechsteinsalzen quantitativ schlecht abschätzbar bzw. nicht prognostizierbar. Gegenüber Zechstein-Salzstrukturen liegt ein deutliches Kenntnisdefizit zum Internbau von Doppelsalinarstrukturen vor, insbesondere zur Verteilung und Interaktion bzw. Deformation der altersverschiedenen Salinarschichten (Kockel et al. 1995).

Vorschlag für Wichtung: hoch

5.1.1.2 Entwicklungsphasen und regionalgeologisches Setting

In der Kapiteleinführung (Kap. 5.1.1) wurde erwähnt, dass Bewegungsphasen von Salinarstrukturen im NDB häufig im Zusammenhang mit großtektonischen Ereignissen stehen und diese nicht immer einheitlich unterschiedliche Beckenbereiche und damit Salzstrukturen beeinflussten. Einige Salzstrukturen liegen in stärker strukturierten bzw. gestörten und in der Vergangenheit häufiger bewegten Beckenteilen, während andere auf großen, kaum gestörten tektonischen Blöcken liegen. Bei Letzteren kann davon ausgegangen werden, dass ihre Bildung nicht im direkten Zusammenhang mit großtektonischen Ereignissen steht und eine Folge von z. B. Änderungen des Beckengradienten oder von großräumigen Sedimentationsmustern ist (Pollok et al. 2020; Warsitzka et al. 2019). Generell kann man daher davon ausgehen, dass eine Salzstruktur in einer Region mit größeren Steinsalz-Primärmächtigkeiten (vgl. Kap. 5.1.3.1) und ohne extensive Graben- oder Inversionstektonik über längere geologische Zeiträume ein kontinuierliches Wachstum ohne zu starke Beeinflussung durch Störungen im Grundgebirge erreichen kann, was vermutlich zu einem weniger variablen Internbau bei reifen Diapiren führt.

Oberhalb von Sockelstörungen, die tektonische Blöcke trennen, oder in Grabenstrukturen, die im Mesozoikum und Känozoikum mehrfach und ggf. in gegensätzliche Richtungen bewegt wurden, ist eine höhere Variabilität innerhalb der dort gebildeten Salzdiapire anzunehmen. In Kap. 4.1 wurde dargelegt, dass die Variabilität in den Faltungsmustern mit der Zunahme der außertektonischen Komplexität einhergeht. Kockel et al. (1995) beobachteten asymmetrisch gebaute Salzstrukturen vor allem oberhalb von mehrfach bewegten Sockelstörungen. Je nach Intensität, Bewegungssinn und Häufigkeit der Bewegungen an den unterlagernden Sockelstörungen ist in den umliegenden Salzdiapiren auch nach Abklingen der Bewegungen an den jeweiligen Sockelstörungen mit darauf reagierenden mehrphasigen Salzbewegungen zu rechnen (z. B. Warsitzka et al. 2017). Primär halokinetisch angelegte Faltengeometrien, die nach Richter-Bernburg (1987a) parallel zu den Hauptstrukturelementen bzw. zum generellen Streichen der Salzstruktur verlaufen, werden immer weiter modifiziert und überprägt. Ein mit zunehmendem tektonischen Einfluss komplexerer Falten- bzw. Internbau und räumlich schwierig zu prognostizierende WbB sind die Folge.

Dabei ist besondere Beachtung den südlichen Beckenbereichen (z. B. Niedersachsen-Becken) zu schenken, die sowohl durch Dehnung als auch Einengung beeinflusst wurden. Salzstrukturen in

diesen sog. invertierten Beckenteilen und insbesondere über invertierten Hauptsockelstörungen zeigen eindeutige morphologische Kompressionserscheinungen in unterschiedlicher Ausbildung, wie z. B. stark verschmälerte Stiele mit weit ausladenden Überhängen („Salzpilze“) und Salzintrusionen („Salzkeile“) im Nebengebirge. Die genannten morphologischen Charakteristika gelten als weitere Belege für die Mehrphasigkeit der Entstehung bzw. die tangentiale Einengung (z. B. Kockel et al. 1995).

Die oberkretazische Einengung dürfte, genauso wie für die äußere Form, auch für den internen Baustil Überprägungen und grundlegende Veränderungen zur Folge gehabt haben. Es gibt nur wenig gut erkundete Salzdiapire dieser Art (z. B. die Salzstrukturen Sarstedt, Wathlingen-Hänigsen, Höfer und Wietze-Hambühren), die jedoch durchweg eine hohe Komplexität belegen. Dadurch wird die Prognostizierbarkeit der räumlichen Verteilung von Wirtsgesteinen weiter eingeschränkt. Noch verstärkt wird dieser Effekt, wenn Salzstrukturen Sockelstörungen mit unterschiedlichen Streichrichtungen aufsitzen, sog. Strukturknoten, über denen es zu einer Überlagerung verschiedener tektonischer Tendenzen kommt (Dooley et al. 2005; Frisch & Kockel 2004; Geluk 1998; Lotze 1957; Remmelts 1996).

Eine Quantifizierung der Einengungsbeträge während der Inversion liegt noch nicht flächendeckend für das NDB vor, sodass hier keine weitere darauf basierende Differenzierung des Einflusses vorgenommen werden kann.

Bewertung:

Für den geologischen Faktor „Entwicklungsgeschichte und regionalgeologisches Setting“ wird die in Tab. 3 folgende Bewertung vorgeschlagen.

Tab. 3: Bewertung des geologischen Faktors „Entwicklungsgeschichte und regionalgeologisches Setting“.

Bewertung	Entwicklungsgeschichte, regionalgeologisches Setting
sehr günstig	Extension oder „passive downbuilding“, außerhalb großer Gräben/ Störungszonen, kleine oder keine Sockelstörungen innerhalb tektonisch einheitlich agierender Schollen/Blöcke
günstig	Extension oder „passive downbuilding“, innerhalb von großen Gräben/ Störungszonen*
bedingt günstig	Extension mit folgender Einengung außerhalb großer Gräben/ Störungszonen
weniger günstig	Extension mit folgender Einengung, im Einflussbereich invertierter großer Gräben/Störungszonen*; Falten und Überschiebungen in der direkten Umgebung
*weitere Abwertung	Liegen Bereiche von TG oder ganze TG über Sockelstörungen verschiedener Streichrichtung (sog. Strukturknoten), sollten diese eine zusätzliche Abwertung erhalten. Ausschließlich relevant für die Bewertungen „bedingt günstig“ und „weniger günstig“.

Standortauswahl

Pollok, L. et al. (2024): Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Wirtsgesteinsanteilen mit Barrierefunktion und der Internbauvariabilität in Salzstrukturen – Abschlussbericht; Hannover (BGR)



Dieser geologische Faktor hat Einfluss auf die Verteilungsmuster der Zechsteingesteine bzw. die interne Variabilität und weniger auf die zu erwartenden Steinsalzanteile. Die günstigsten geologischen Bedingungen im Kontext dieses Faktors liegen in zentralen Beckenbereichen vor, z. B. auf der nördlichen Pompeckj-Scholle in NW-Deutschland bis hin zum Ostholstein-Westmecklenburg Block in NE-Deutschland. Die variabelsten Internbaumuster bzw. „weniger günstigen“ Voraussetzungen sind in den am stärksten invertierten Beckenbereichen, z. B. im Niedersächsischen Becken, und dort über sich kreuzenden, invertierten Sockelstörungen (z. B. im Kreuzungsbereich des Allertal- und Emtinghausen-Krautsand-Lineaments) zu erwarten. Insbesondere dann, wenn die dort lokalisierten Salzdiapire eindeutige morphologische Inversionsanzeichen aufweisen (breite Überhänge, schmale Stiele, Salzkeile), die noch im Kap. „Formfaktor“ (Kap. 5.1.2.3) behandelt werden. Bei in Kreuzungsbereichen von Sockelstörungen vorkommenden Salzdiapiren, sollte nur der Strukturteil/Diapirbereich in diesem Bereich eine Abwertung gem. Tab. 3 erhalten (vgl. Abb. 28).

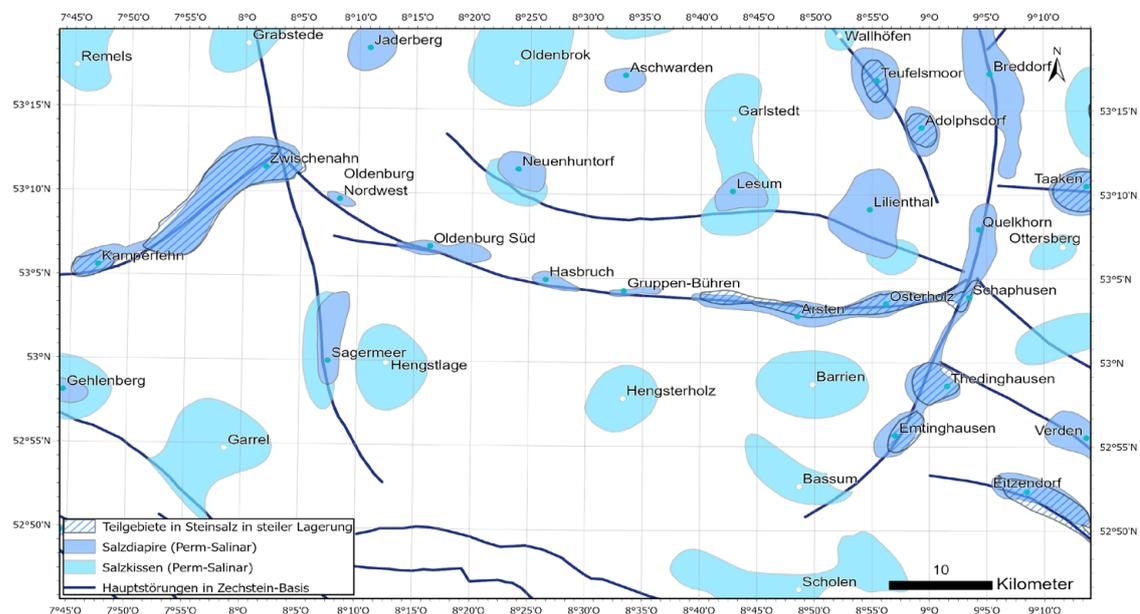


Abb. 28: Exemplarischer Ausschnitt mit der Verteilung von Salzstrukturen (aus: Reinhold et al. 2008; von Goerne et al. 2016), Teilgebieten (BGE 2020) und Hauptsockelstörungen (Störungen in Zechstein-Basis, aus: Baldschuh et al. (2001)). Abschnittsweise liegen die Teilgebiete Zwischenahn, Schaphusen und Thedinghausen in Kreuzungsbereichen („Strukturknoten“) von Hauptsockelstörungen.

In einigen Quellen sind Beckenbereiche und Sockelstörungen beschrieben worden, die von oberkretazischen Kompressionsbewegungen erfasst wurden (Kockel et al. 1995). Es wird angeraten, die in der Literatur bzw. in den übergebenen Salzstrukturdatenblättern (s. Kap. 2.3) dokumentierten Entwicklungsgeschichten einzelner Salzdiapire zu analysieren und kartographisch für das NDB zusammenzutragen. Eine entsprechende Zusammenstellung war innerhalb dieses Projekts nicht geplant und ressourcenbedingt nicht möglich.

Vorschlag für Wichtung: hoch

5.1.2 Morphologie

In der Gruppe der Morphologie werden neben der äußeren Form auch Merkmale wie die Querschnittsfläche und Mächtigkeit als geologische Faktoren zusammengefasst. Es handelt sich also i. W. um die geometrische Charakterisierbarkeit der geologischen Verhältnisse.

Hinsichtlich des zur Verfügung stehenden Salzvolumens (Fläche x Mächtigkeit) erscheint es aus Sicht der BGR nicht zielführend, verschiedene Salzdiapire eines Strukturzugs (z. B. entlang einer sog. Salzmauer) gemeinsam als ein/en Teilgebiet/Untersuchungsraum zu betrachten und zu bewerten. Entsprechend ihrer teufenabhängigen Ausdehnung sollten Salzstrukturen, die sich i. d. R. durch eigene Aufstiegsbereiche mit eigenen Kulminationen auszeichnen, räumlich differenziert bearbeitet werden. Zwischen den Aufstiegsbereichen können in den sog. Depressionen die Salzausdehnungen und -mächtigkeiten oberhalb von 1.500 m u. GOK in den vorgesehenen Endlagerteufen so gering sein, dass sie für eine Ausweisung eines ewG nicht in Frage kommen.

5.1.2.1 Querschnittsfläche

Zweifelsohne spielt die Querschnittsfläche bei den zu erwartenden Wirtsgesteinsanteilen und ihre räumliche Konfiguration im Hinblick auf die Ausweisung eines WbB sowie die technische Realisierbarkeit, die Robustheit und Sicherheitsreserven für den sicheren Einschluss (vgl. geoWK2, Anlage zu § 24 Absatz 3 StandAG) eine fundamentale Rolle. Entscheidend ist die Ausdehnung des Salzkörpers innerhalb der endlagerrelevanten Teufen. Bei diesem geologischen Faktor gilt es zudem abzu prüfen, wie groß die WbB-Anteile im Verhältnis zur gesamten Salzstruktur sind und ob eine entsprechende Abhängigkeit nachgewiesen werden kann.

Gemäß dieser Fragestellung wurden gezielt Fallstudien aus dem NDB (vgl. Kap. 4.2) ausgewertet. Anhand von geologischen Sohlenrissen verschiedener Salzdiapire wurden die Anteile und die räumliche Verteilung der unterschiedlichen Zechstein-Formationen analysiert. Dabei lag i. d. R. pro Salzstruktur nur ein geologischer Sohlenriss einer bestimmten Teufe vor, der häufig den am besten erkundeten Teufenschnitt einer Struktur darstellt. Für insgesamt zehn verschiedene Salzstrukturen lagen vollständige Sohlenrisse vor, bzw. konnten durch geringfügige Anpassungen vervollständigt werden. Die Sohlenrisse zeigen häufig eine stratigraphische Differenzierung gemäß den Zechstein-Formationen. Es genügt also nicht, nur die Staßfurt-Formation zu betrachten, da nur das darin liegende Steinsalz (z2Na bzw. z2HS) den WbB darstellt. Das heißt, dass nicht-halitische Evaporite (z. B. das Kaliflöz Staßfurt, z2SF) und Anhydritgesteine (z. B. Deckanhydrit, z2DA) noch vom z2-Flächenanteil subtrahiert werden mussten. Eine entsprechende Korrektur erfolgte in allen Referenzsalzstrukturen überschlägig auf Basis von stratigraphischen Normalprofilen.

Durch die systematische Analyse von Referenzsalzstrukturen kann eine lineare Abhängigkeit zwischen der Gesamtquerschnittsfläche eines Diapirs und der z2Na-Fläche angenommen werden (Abb. 29). Somit sind größere Salzstrukturen bzw. Untersuchungsräume kleineren vorzuziehen, da in ihnen größere WbB-Anteile und dementsprechend eine größere Flexibilität für die zukünftige Ausweisung eines ewG sowie die technische Realisierbarkeit des Endlagers zu erwarten sind. Dieser Sachverhalt wurde bereits in früheren Salzstudien als allgemein gültig festgestellt (vgl. Kap. 2.2) und ist durch

die InSpEE-Studien (vgl. Kap. 4.2) und in Erweiterung in diesem Arbeitspaket quantitativ mit Daten belegt worden. Für die Bewertung der Untersuchungsräume kann die jeweils zur Verfügung stehende Gesamtquerschnittsfläche in die lineare Funktionsgleichung eingesetzt (Abb. 29) und somit die zu erwartende Fläche für ein WbB überschlägig abgeschätzt werden (Abb. 30).

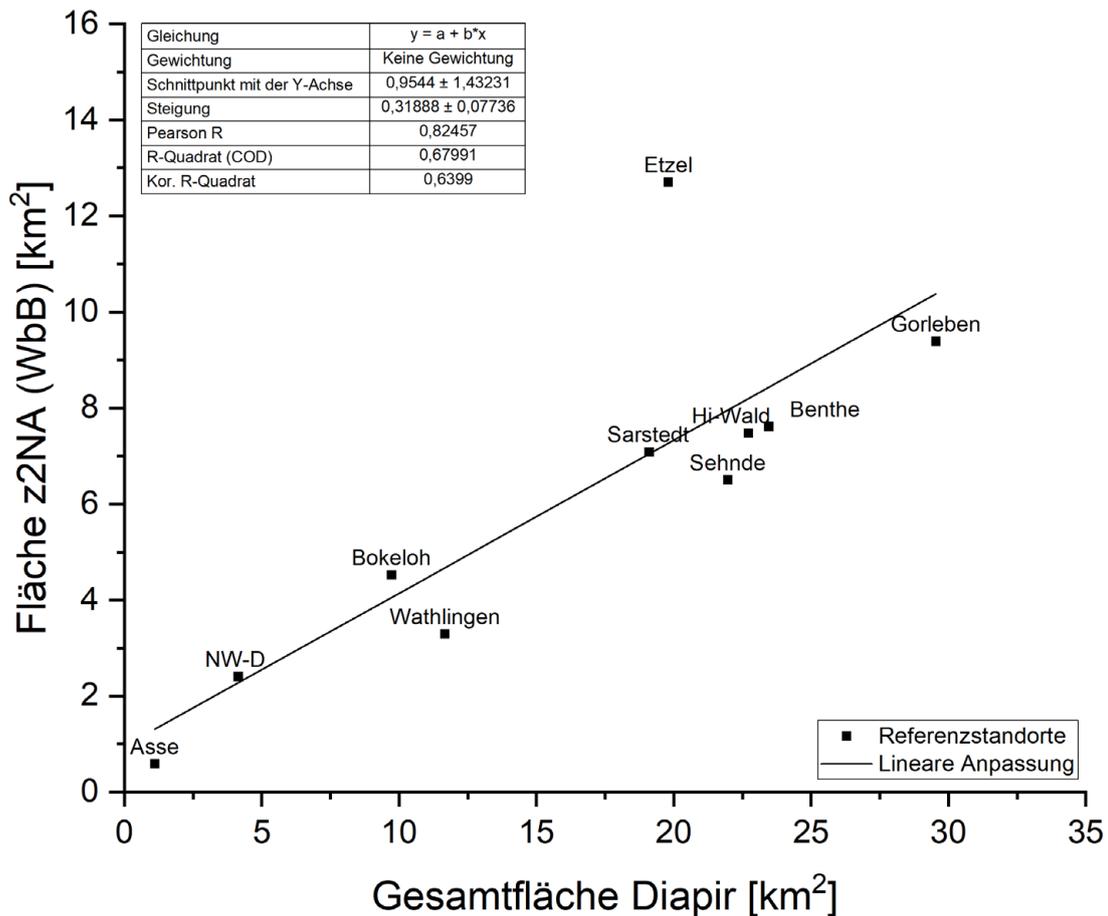


Abb. 29: Fläche an z2Na im Bezug zur Gesamtfläche des Diapirs gemäß ausgewerteter Sohlenrisse in Referenzsalzstrukturen.

Die Querschnittsfläche sollte im Bezug zur Mächtigkeit betrachtet werden, sodass aus der gemeinsamen Betrachtung eine Volumenabschätzung möglich wird. Sofern verfügbar, eignen sich dazu vorzugsweise 3D-Modelle (z. B. Jähne-Klingberg et al. (2022)) unter Berücksichtigung der zugrundeliegenden Datenlage und Ungewissheiten.

Für die gemachten Auswertungen sollten verschiedene Aspekte diskutiert werden:

1. Insgesamt ist die Datenverfügbarkeit für die Bearbeitung dieses geologischen Faktors als gering und über das NDB heterogen verteilt einzustufen. Die meisten Daten (geologische Sohlenrisse) stammen aus den Bergbaurevieren im südlichen NDB und decken nur bestimmte Salzstrukturtypen ab (vgl. Kap. 5.5).

2. Die ausgewerteten geologischen Sohlenrisse geben nur einen kleinen Einblick in die räumliche Verteilung der WbB in den Salzstrukturen, welche in unterschiedlichen Salzstrukturtypen und mit der Teufe variieren können. Häufig stammen die Sohlenrisse aus den oberen Bereichen der Salzstrukturen (z. B. Dachregionen). Die Betrachtung des jeweiligen Anschnitt- bzw. Struktur-niveaus unterschiedlicher Salzstrukturtypen wird in Kap. 5.5 ausführlich diskutiert.
3. Die z2Na-Flächen aus den geologischen Sohlenrissen wurden vollständig und ohne Einschränkungen ermittelt. Daher wurden auch kleine Apophysen bei der Berechnung des Flächeninhalts berücksichtigt, die für die technische Realisierung eines Endlagers ggf. zu klein sind. Dadurch, dass sich der Internbau von Salzstrukturen unterscheidet und zu einem späteren Zeitpunkt individuell und ortsspezifisch erkundet werden muss und zum jetzigen Zeitpunkt mit vorläufigen sowie vereinfachten Endlagerauslegungen gearbeitet wird, wurde kein entsprechender Korrekturfaktor angewandt. Im Fall einer komplexen Verfaltung innerhalb eines Salzdiapirs ist damit zu rechnen, dass nicht alle z2Na-Anteile für einen ewG nutzbar sein werden und die obigen Auswertungen als etwas überschätzend einzustufen sind. Dem wird entgegengewirkt, indem bei der Bewertung dieses Faktors (s. u.) eine günstige Bewertung nur dann erreicht wird, wenn ein Vielfaches des Mindestflächenbedarfs nachgewiesen wird.
4. Die obige Auswertung erfolgte anhand von vollständigen Querschnitten der Referenzsalzstrukturen. Teilgebiete können entsprechend den Anforderungen an z. B. maximale Teufen ggf. nur Teile von Salzdiapiren umfassen. Dies kann bspw. dann der Fall sein, wenn Diapire in den zentralen Bereichen höher aufgestiegen sind als in den Randbereichen. Da z2Na-Vorkommen i. d. R. gerade in den zentralen Bereichen erwartet werden, können die hier ermittelten z2Na-Anteile bei Übertragung auf solche Teilgebiete ggf. als tendenziell unterschätzend der dort tatsächlich vorhandenen z2Na-Anteile angesehen werden. In solchen Fällen sind die zu tiefliegenden Randbereiche, vorwiegend aus jüngeren Zechstein-Formationen und vsl. ohne bzw. kleinen WbB bestehend, bereits aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

Dennoch ermöglicht die Auswertung der wenigen Referenzsalzstrukturen mit Blick auf die zu erwartenden WbB-Anteile eine überschlägige, aber belastbarere bzw. realitätsnähere und somit dem "best estimate" Ansatz folgende Abschätzung gegenüber der vereinfachten und überschätzenden Annahme, das gesamte Salzstockvolumen zu betrachten (vgl. BGE 2020).

Bewertung:

Als Grundlage wurden für die Ermittlung des Flächenbedarfs für das Wirtsgestein Steinsalz Berechnungen aus der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) und Angaben aus einem Gutachten der DBE TEC von der BGE verwendet (BGE 2022a; Bollingerfehr et al. 2012; DBE TEC 2016). Demnach ergibt sich ein Flächenbedarf von mindestens 2,3 km² bei einer Einlagerungstemperatur von 100° C und 600 m Teufe, der mit zunehmender Teufe und entlang des geothermischen Gradienten weiter ansteigt. Für die Anwendung der geoWK in Phase I, Schritt 1 wurde von der BGE der vorsorglich empfohlene Endlagerflächenbedarf aus dem Gesetzentwurf zum StandAG übernommen (Deutscher Bundestag 2017), um daraus entsprechende Wertungsgruppen für Anlage 2 zu § 24 Absatz 3 zu bilden (BGE 2020k). Für Steinsalz ergibt sich demnach ein Flächenbedarf von mindestens 3 km², bzw. ein

Vielfaches davon, um gemäß des geoWK2-Indikators („Vielfaches des Mindestflächenbedarfs“) eine günstige Bewertung zu erlangen (vgl. Tab. 4).

Die gleichen Wertungsgruppen wurden hier für die Methode übernommen. Allerdings mit dem Unterschied, dass die Flächen nicht auf die gesamte Diapirfläche (gem. BGE (2020)), sondern nur auf die ermittelten Flächenanteile für WbB, wie oben beschrieben, angewendet wurden. Demzufolge kommt es zu einer deutlich differenzierteren Bewertung der flächenhaften Ausdehnung in den Teilgebieten (Tab. 4, Abb. 30). Bei den kleinsten Teilgebieten (< 6 km²) ist nach jetziger Erkenntnislage davon auszugehen, dass ein hier beispielhaft angenommener Flächenbedarf von 3 km² für einen WbB nicht bzw. nur mit erheblichen Ungewissheiten angenommen werden kann.

Weiterhin wird in der Literatur beschrieben, dass bei kleinen Salzdiapiren eine höhere Internbaukomplexität anzunehmen ist als bei großen. Allerdings werden keine quantitativen Angaben dieser Auswirkungen bzw. im Hinblick auf die nutzbaren Flächenanteile gemacht (z. B. Bornemann et al. 2008; Frisch & Kockel 2004; Jaritz 1983; Kockel et al. 1995; von Goerne et al. 2016).

Es muss darauf geachtet werden, dass die Flächenbedarfe an WbB bzw. die daraus abgeleiteten Gesamtquerschnittsflächen TG-spezifisch geprüft und angepasst werden. Variiert z. B. die Teufe des geplanten Einlagerungsbereichs, so ergeben sich entsprechend des geothermischen Gradienten unterschiedliche Flächenbedarfe. Flächenreduzierend würde sich z. B. auch eine erhöhte Grenztemperatur (deutlich > 100 °C) der eingelagerten Behälter auswirken, die momentan für Steinsalz diskutiert wird (z. B. ESK 2022).

Tab. 4: Bewertung des geologischen Faktors „Querschnittsfläche“ entsprechend definierter Anforderungen (vgl. BGE 2020k; StandAG 2017). Gesamtflächenbedarfe für Diapire wurden anhand der linearen Funktion in Abb. 29 ermittelt.

Bezug	Wertungsgruppe			Mindestanforderung Fläche des Endlagers
	günstig	bedingt günstig	weniger günstig	Ausschluss
Fläche WbB (z2Na)	> 9 km ²	6 – 9 km ²	3 – 6 km ²	< 3 km ²
Gesamtfläche Diapir (z)	> 25 km ²	16 – 25 km ²	6 – 16 km ²	< 6 km ²

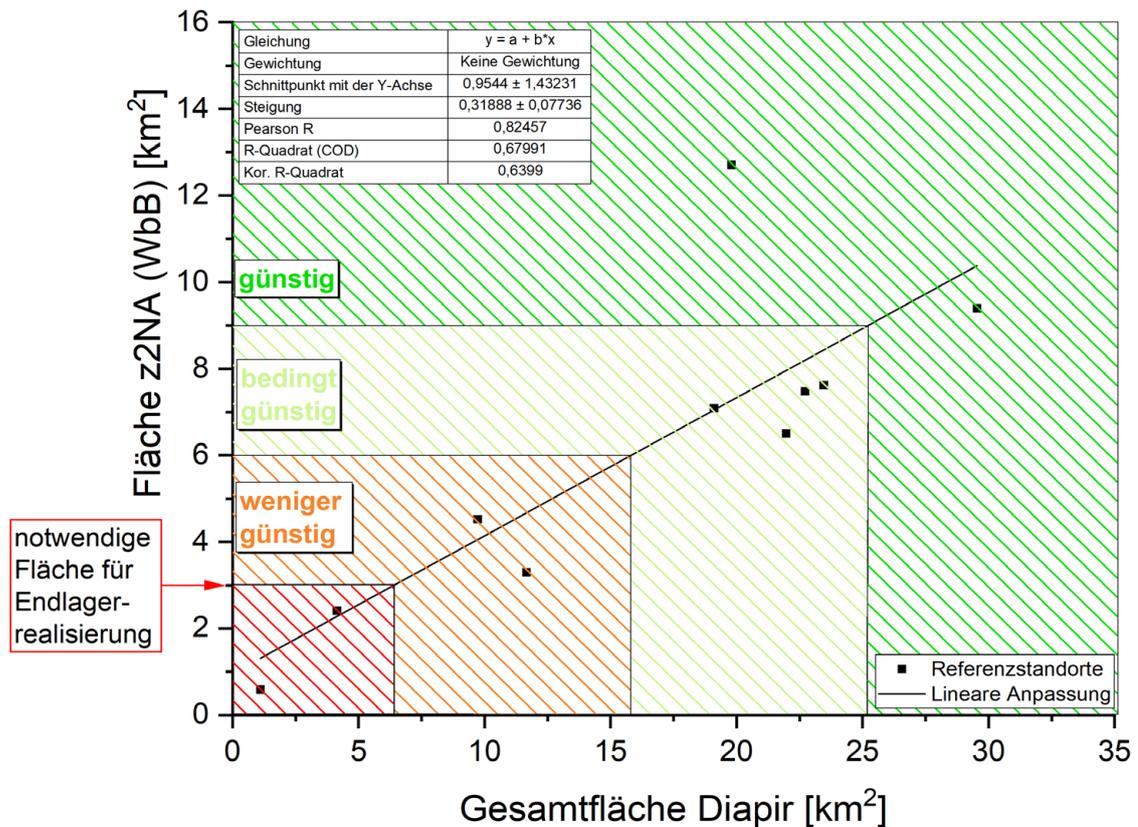


Abb. 30: Bewertung der Querschnittsgesamtfläche und Fläche des WbB (z2Na) von Salzdiapiren anhand definierter Flächenanforderungen.

Es wird empfohlen, die größte zur Verfügung stehende Querschnittsfläche bei gegebener Mächtigkeit in dem für das Wirtsgestein Steinsalz in steiler Lagerung favorisierten Endlagerteufenintervall (beispielhaft: 800 – 1.200 m Teufe) TG-spezifisch zu bewerten. Die Querschnittsfläche wird als entscheidender Faktor hinsichtlich der Möglichkeit zur Ausweisung eines ewG, der technischen Realisierbarkeit eines Endlagers und der Robustheit bzw. Sicherheitsreserven hinsichtlich des erreichbaren Einschlussvermögens bewertet. Im Vergleich mit allen anderen geologischen Faktoren erhält dieser somit die höchste Wichtung.

Vorschlag für Wichtung: sehr hoch

5.1.2.2 Mächtigkeit

Neben der lateralen Ausdehnung ist die Mächtigkeit des Salzkörpers für die Eignungshöflichkeit zu berücksichtigen. Neben der Mindestmächtigkeit, die sich aus der Mindestmächtigkeit des zukünftigen ewG (100 m gem. 2. Mindestanforderung, StandAG) und der Salzschebe (300 m gem. 3. Mindestanforderung, StandAG) ergibt, verspricht eine größere Mächtigkeit des WbB eine höhere Robustheit und eine höhere Flexibilität bei der technischen Realisierbarkeit eines Endlagers. Dagegen muss die Mächtigkeit und Zusammensetzung des Deckgebirges abgewogen werden,

welches das Barrieregestein z. B. vor exogenen Prozessen (z. B. glaziale Erosion) schützen soll. Aus sicherheitsgerichteter Sicht ist ein ausgewogenes Verhältnis zwischen hoher Barrierenmächtigkeit und ausreichender Deckgebirgsmächtigkeit anzustreben. Das Deckgebirge wurde in diesem Vorhaben nicht betrachtet und muss außerhalb der hier entwickelten Methode bewertet werden.

Eine weitere Sicherheitsrelevanz der Mächtigkeit ergibt sich aus dem geoWK2, und zwar aus dem Indikator „Barrierenmächtigkeit“. Die BGE folgt der Definition von Alfarrá et al. (2020), wonach unter Barrierenmächtigkeit der kleinste vertikale Abstand zwischen der mittleren Teufenlage des Einlagerungsbereichs und dem Rand des Barrieregesteins verstanden wird. Von BGE angewendet wurde die verdoppelte Barrierenmächtigkeit (BGE 2020k, 2022b), wobei sich bei mittlerer vertikaler Lage des Einlagerungsbereichs die gleiche Barrierenmächtigkeit im Hangenden und Liegenden ergibt. Entsprechend den Vorgaben des StandAG (Anlage 2 zu § 24 Absatz 3) muss diese Barrierenmächtigkeit mind. 150 m ober- und unterhalb des Einlagerungsbereichs (also insgesamt mind. 300 m) betragen, damit für einen Untersuchungsraum eine günstige Bewertung für diesen Indikator hervorgeht. Dadurch, dass aus den TG für Steinsalz in steiler Lagerung eine Mindestmächtigkeit von 400 m (s. o.) gefordert ist, ergab sich in der Bewertung dieses Indikators für 56 TG eine günstige und für vier TG eine bedingt günstige Bewertung (BGE 2020). Dabei wurde im Schritt 1 der Phase I (Ermittlung von Teilgebieten) die maximale Mächtigkeit innerhalb des TG zu Grunde gelegt.

In dem zweiten Schritt der Phase I (Ermittlung von Standortregionen für die übertägige Erkundung) gilt es daher, die Mächtigkeiten in den Untersuchungsräumen flächendifferenziert zu betrachten und zu bewerten (vgl. BGE (2022a)) bzw. in der gemeinsamen Betrachtung mit der zur Verfügung stehenden Querschnittsfläche (s. Kap. 5.1.2.1) zu einer Volumenabschätzung, analog zum geoWK2 Indikator „flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit“, zu gelangen. Wie bereits in Kap. 5.1.2.1 angedeutet, können für diesen Zweck u. a. vorhandene 3D-Modelle genutzt werden.

Bewertung:

Neben der zur Verfügung stehenden Querschnittsfläche (s. 5.1.2.1) sollte die Mächtigkeit in den endlagerrelevanten Teufen untersuchungsgebietspezifisch und räumlich differenziert als geologischer Faktor betrachtet werden. Es empfiehlt sich an dieser Stelle eine Bewertung durch die Betrachtung der Volumina (unter Berücksichtigung und im Zusammenspiel mit den Indikatoren „Barrierenmächtigkeit“, „Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen ewG“, „flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit“ zusammen mit der technischen Realisierbarkeit sowie notwendigen Deckgebirgsmächtigkeit) im favorisierten Teufenintervall.

Eine besonders günstige geologische Voraussetzung könnte sich z. B. wie folgt ergeben: ein Untersuchungsraum weist in einer Teufe von 800 – 1.200 m, als beispielhaft angenommene Zielteufe für ein Endlager, durchgängig eine Mächtigkeit von z. B. ≥ 450 m auf, bei einer lateralen Ausdehnung, die mehr als das Zweifache des benötigten Endlagermindestflächenbedarfs beträgt (z. B. > 9 km² WbB (z2Na), vgl. Kap. 5.1.2.1). Eine Bewertung der Barrierenmächtigkeit inkl. berücksichtigter Salzscheibe könnte entsprechend den Angaben in Tab. 5 erfolgen.

Tab. 5: Bewertung des geologischen Faktors „Mächtigkeit“ unter Berücksichtigung der Anforderungen gem. StandAG. Als Bezugshorizont gilt die mittlere vertikale Lage des Einlagerungsbereichs im WbB.

Bezug	Wertungsgruppe			Mindestanforderung (Mächtigkeit ewG (100 m) + Salzschwebe (300 m))
	günstig	bedingt günstig	weniger günstig	Ausschluss
Barrierenmächtigkeit	> 150 m	100 – 150 m	50 – 100 m	< 50 m
Salzschwebe	300 m	300 m	300 m	< 300 m
Gesamtmächtigkeit	> 450 m	400 – 450 m	350 – 400 m	< 350 m

Dadurch, dass Salzdiapire durch das Zusammenströmen und Akkumulieren von Salzmassen entstanden sind, verfügen diese über große sog. sekundäre Mächtigkeiten. Die größten sekundären Mächtigkeiten werden i. d. R. im zentralen Aufstiegsbereich der Salzdiapire bzw. in den verschiedenen Aufstiegsbereichen von Salzmauern erreicht. Die als Teilgebiete ausgewiesenen Salzdiapire sind in endlagerrelevante Teufen aufgestiegen und verfügen alle über Mächtigkeiten > 400 m. Die Herausforderung, ausreichend große Volumina für WbB zu finden, besteht also weniger in der Mächtigkeit als vielmehr in der Querschnittsfläche eines Salzdiapirs. Deshalb wird hier eine gegenüber der Querschnittsfläche geringere, aber für die gemeinsame Volumenbetrachtung immer noch hohe Wichtung des Faktors vorgeschlagen. Relativ große Salzvolumina in endlagerrelevanten Teufen weisen günstige geologische Voraussetzungen für die technische Realisierbarkeit und Flexibilität in der Planung des Endlagers sowie eine hohe Robustheit und Sicherheitsreserven auf.

Vorschlag für Wichtung: hoch

5.1.2.3 Formfaktor

Der interne Aufbau von Salzstrukturen nimmt mit zunehmender Reife von der flachen Lagerung über das Salzkissenstadium hin zu Salzdiapiren generell an Variabilität zu (vgl. Kap. 4). Auch wenn sich Salzdiapire in der Regel komplexer in ihrem Internbau darstellen als andere Salzstrukturen, so gibt es doch eine beachtliche Bandbreite von relativ gleichförmig deformierten, in ihrer Geschichte einfach zu verstehenden Salzdiapiren, bis hin zu Strukturen, deren Internbau sich auf den ersten Blick einer Prognose verschließt. In der Literatur wird vielfach darauf hingewiesen, dass eine enge Beziehung zwischen der äußeren und inneren Tektonik einer Salzlagerstätte besteht. Daraus lässt sich also folgern, dass die interne Variabilität der Fließ- und Faltenmuster mit der Komplexität der äußeren Diapirform einhergeht (vgl. Kap. 4.1).

In zahlreichen Arbeiten wird angegeben, dass insbesondere Salzdiapire mit verhältnismäßig großen Überhängen und schmalen oder nicht mehr vorhandenen Stielen („Salzpilze“, „Salztropfen“) einen besonders komplizierten Internbau haben (z. B. Bornemann et al. 2008; Frisch & Kockel 2004; Jackson & Talbot 1989; Jaritz 1983; Pollok et al. 2020). In Überhangsbereichen ist mit mehr

Querfaltungen, also Falten mit flachen, horizontalen bis überkippten Faltenachsen (= inverse Mulden- und Sattelstrukturen) zu rechnen. Dadurch ist es möglich, dass die besonders mobilen Steinsalze der Staßfurt-Formation vermehrt in die Außenbereiche der Diapire gelangt sind und Übergänge gebildet haben. Gleichzeitig sind jüngere Zechstein-Formationen in die zentraleren Teile hineingefaltet worden, z. B. durch Kulissenfalten. Befinden sich Überhänge im endlagerrelevanten Teufenintervall, ist eine geringere Prognostizierbarkeit der räumlichen Verteilung des WbB abzuleiten. Dabei sind die Bildungsmechanismen der Überhänge zu beachten. Aus Einengung gebildete Salzgletscher und Salzüberhänge sind anhand der äußeren Form kaum zu unterscheiden, obwohl deren Internbau als unterschiedlich anzunehmen ist. Gebildete Salzkeile im Nebengebirge von Salzdiapiren sind ein weiteres deutliches Indiz für frühere Einengungsbewegungen, mit Auf- und Überschiebungen im angrenzenden Deckgebirge, welche auf komplexe Fließmuster des Salzes hinweisen. In Kap. 5.1.1.2 wurde beschrieben, dass solche Diapirformen in invertierten Beckenbereichen in Erscheinung treten.

Für die Untersuchung der Internbaumuster kompressiv überprägter Diapire eignet sich z. B. die gut untersuchte Salzstruktur Sarstedt (vgl. Kap. 4.2). Dort ist das Steinsalz der Staßfurt-Formation in die Flanken- und Übergangsbereiche geflossen und der zentrale Aufstiegsbereich (Zentralsattel) ist im Horizontalschnitt der ausgewerteten Sohle kaum mehr erkennbar. Dabei stellen große Steinsalzbereiche im Diapirzentrum mit Blick auf die Robustheit und Sicherheitsreserven geologisch günstigere Voraussetzungen dar als WbB in Flankennähe. Ebenfalls sichtbar wird am o. g. Beispiel die relativ kleinräumige Verfaltung der Staßfurt-Formation mit jüngeren Zechstein-Formationen, wodurch die zusammenhängenden z_2Na -Bereiche sehr schmal sind. Daraus resultiert ebenfalls eine geringere Eignung bzgl. der Robustheit und insbesondere der technischen Realisierbarkeit.

Wie in Kap. 4 ausgeführt, stellt eine weitere Herausforderung bis heute die exakte Kartierung der lateralen Ausdehnungen und Flankenverläufe von Salzdiapiren dar. Dies gilt insbesondere für Salzstrukturen mit Überhängen, deren Abbildung in den häufig älteren, zu Grunde liegenden Seismikdaten mit großen Ungewissheiten behaftet ist. Überhänge bzw. schmale Stielbereiche von Salzdiapiren wurden nicht selten erst durch Tiefbohrungen festgestellt. In moderneren Pre-Stack migrierten 3D-seismischen Daten kann eine verbesserte Abbildung der Salzdiapire mit höherer Lagegenauigkeit gegenüber älteren seismischen Bearbeitungen gelingen.

Bewertung:

In diesem Faktor werden Bezüge zwischen der äußeren Form und der Variabilität im Internbau hergestellt. Insofern ist beim „Formfaktor“ der gesamte Salzdiapir, von seiner Basis bis zu seinem Top, zu untersuchen. Es wird vorgeschlagen, die teufenabhängige Varianz des Diapirquerschnitts zu bewerten. Ein Bewertungsvorschlag ist Tab. 6 zu entnehmen. Wie für die anderen beiden geologischen Faktoren der Morphologiegruppe, können auch hier vorhandene 3D-Modelle bzw. alternativ oder ergänzend dazu Profilschnitte herangezogen werden. Je geringer die Varianz ist, also je mehr der Diapir einer Zylinderform mit vertikalen, parallelen Flanken mit kaum oder nicht gewölbtem Dach gleicht, desto geringer ist seine interne Variabilität anzunehmen und desto günstiger ist seine Bewertung in diesem Faktor. Das Vorkommen morphologischer Inversionsanzeichen (Überhänge, Salzkeile) ist zu berücksichtigen.

Die Bewertung des Formfaktors ist erheblich vom Wissensstand zur jeweiligen Salzstruktur abhängig. So basieren Darstellungen von Salzstrukturen in Profilen häufig auf älteren Modellvorstellungen und ggf. auf Auswertungen älterer seismischer Datensätze. Bei aktuellen 3D-Modellen ist der Generalisierungsgrad der dargestellten Salzstrukturen zu berücksichtigen, wodurch ggf. ein vereinfachtes Bild gegenüber der eigentlichen Komplexität gezeigt wird. Somit sollten bei der Bewertung des Formfaktors stets die zugrundeliegenden Basisdaten berücksichtigt werden.

Tab. 6: Bewertung des geologischen Faktors „Formfaktor“.

Bewertung	Formfaktor / teufenabhängige Varianz	Beispiele mit schematischen Grundrissen in verschiedenen Teufen
sehr günstig	keine bis geringe teufenabhängige Varianz; vertikale, parallele Flanken, geringfügig mit der Teufe konvergierend, keine bis geringe Dachwölbung	
günstig	divergierende oder asymmetrische Flanken, mit Dachwölbung	
bedingt günstig	starke Dachwölbung, deutlich mit der Teufe divergierende Flanken	
weniger günstig	ausgeprägte Pilzform, schmaler Stiel, weitreichende, flache Überhänge („Salzüberschiebungen“) oder starke Teufenvarianz / Unregelmäßigkeit; Salzintrusionen /-keile im Nebengebirge	
		

Eine Weiterentwicklung der Methode für diesen Faktor ist möglich, indem die teufenabhängige Varianz in den endlagerrelevanten Teufen quantitativ analysiert wird. D. h., dass die laterale Erstreckung in bestimmten Teufensegmenten gegenübergestellt und der Anteil der jeweiligen Überschneidungsbereiche betrachtet wird. Möglich ist dies allerdings nur, wenn für alle Untersuchungsräume möglichst wenig generalisierte 3D-Modelle zur Verfügung stehen. Mit diesen ist die vollumfängliche Abbildung der Diapirformen in den Untersuchungsräumen und eine nachvollziehbare Bewertung dieses Faktors möglich. Die in Tab. 6 gezeigten Beispiele von Grundrissen sind schematisch und an dieser Stelle der Methodenentwicklung als exemplarisch anzusehen.

Dadurch, dass die Mächtigkeit und die Querschnittsfläche (das Volumen) bereits als geologische Faktoren bearbeitet wurden, welche Rückschlüsse auf die WbB-Anteile zulassen, ist die hier betrachtete teufenabhängige Varianz lediglich ein Anzeiger für die Prognostizierbarkeit der Verteilung der WbB (= interne Komplexität). Insofern wird für diesen Faktor eine geringe Wichtung vorgeschlagen.

Vorschlag für Wichtung: gering

5.1.3 Beckenlage

Die fazielle Ausbildung der Evaporite ist im Wesentlichen von der paläogeografischen Beckenlage abhängig. Lokationsabhängig bilden sich verschiedene Evaporite mit unterschiedlichen Verbreitungen und Mächtigkeiten aus (s. Kap. 3). Insofern werden in dieser Gruppe die geologischen Einflussfaktoren „primäre Steinsalzmächtigkeit“ und „Fazies“ untersucht und diskutiert.

5.1.3.1 Primäre Steinsalzmächtigkeiten

Wie in Kap. 3.2.2 beschrieben, bietet das Steinsalz der Staßfurt-Formation für die Auffindung von großen WbB zur zukünftigen Ausweisung eines ewG die günstigsten geologischen Voraussetzungen. Dies ist u. a. in seiner hohen primär abgelagerten Mächtigkeit und Reinheit begründet. Insofern wird im Rahmen dieses geologischen Faktors die primär abgelagerte Mächtigkeit des zu favorisierenden Staßfurt-Steinsalzes betrachtet.

Für diesen geologischen Faktor gilt es zu untersuchen, ob die primär abgelagerte Steinsalzmächtigkeit des z_{2Na} im Verhältnis zur Gesamtmächtigkeit des Zechsteins innerhalb des Beckens variiert bzw. ihr Anteil in beckenzentralen Bereichen größer ist als in Beckenrandlagen. Die zu prüfende Hypothese ist, ob mit größeren primären Steinsalzmächtigkeiten das in Diapire eingewanderte z_{2Na} anteilig zur gesamten mobilisierten Zechsteinschichtenfolge zunimmt. Daraus ließen sich potenziell größere zusammenhängende Steinsalzhomogenbereiche in den Salzstrukturen schlussfolgern.

Jedoch ist eine Rekonstruktion der primär abgelagerten Zechsteinmächtigkeiten bzw. der einzelnen Steinsalzhorizonte nur mit großen Einschränkungen möglich, da das Zechsteinsalz im Norddeutschen Becken vielerorts weitestgehend mobilisiert worden und in Salzstrukturen eingewandert ist. Intensive laterale Salzbewegungen haben in den Abwanderungsgebieten teilweise bis zum totalen Verlust des mobilisierbaren Zechstein-Anteils geführt. In den oberen Teilen der Salzstrukturen wiederum können große Mengen des Salinars über die Zeit subrodiert oder erodiert worden sein. Derzeit liegen keine konsistenten beckenübergreifenden Verteilungskarten für die ursprünglichen Mächtigkeiten des z_{2Na} vor. Zwar wurde von Richter-Bernburg (1985) eine Fazies- und Mächtigkeitsverteilung vorgelegt. Sie enthält aber lediglich in den Beckenrandbereichen konkrete Mächtigkeitsinformationen in Form von Isobathen. Ab einer Mächtigkeit von 200 m wird in zentralen Beckenbereichen eine Mächtigkeitsspanne von 200 – 600 m angegeben. Dort muss daher mit Literaturangaben gearbeitet werden, in denen für einige Salzstrukturlokationen Zechstein-Standardprofile hinterlegt sind (vgl. Kap. 4.2).

Insgesamt sind die Daten über das NDB heterogen verteilt, mit höherer Datendichte in den südlichen Bergbauregionen und wenig bis fehlenden Daten insbesondere im Beckenzentrum. In wenigen

Standardprofilen fehlten teilweise Angaben zu bestimmten Zechsteinformationen (z. B. zur Werra-Formation). In diesen Fällen wurden vorliegende Daten aus anderen, naheliegenden Standardprofilen übertragen. In älteren Werken ergibt sich die Herausforderung, dass alte Symbolschlüssel und Schichtenbezeichnungen in neuere lithostratigraphische Systeme übersetzt werden müssen. Ggf. liegen in den Archiven der Staatlichen Geologischen Dienste noch weitere, nicht publizierte Mächtigkeitsangaben oder -karten zum Zechstein vor.

Die Ergebnisse aus der Literaturstudie sind in Abb. 31 bis Abb. 33 dargestellt. Dabei ist zunächst eine Korrelation (lineare Beziehung) zwischen der abgelagerten Gesamtmächtigkeit des Zechsteins und der z2Na-Mächtigkeit festzustellen (Abb. 31). Eine vergleichbare systematische Auswertung ist bislang aus keiner anderen Arbeit hervorgegangen. Die geringfügige Datenstreuung kann auf lokale Unterschiede im Becken oder auch auf Unschärfen in der Erstellung der Standardprofile zurückgeführt werden. Profile, die aufgrund einer voraussichtlich doch schon eingesetzten Salzmobilisierung eine zu hohe z2Na-Mächtigkeit aufweisen, blieben in der Auswertung entsprechend unberücksichtigt.

Die höchsten dokumentierten Mächtigkeiten betragen zwischen 600 – 750 m für das z2Na und korrespondieren mit Zechsteingesamtmächtigkeiten von 1.000 m – ca. 1.350 m. Dabei spiegeln diese Standardprofile nicht die zentralsten und tiefsten Beckenbereiche im Oberen Perm wieder. Für diese liegen keine repräsentativen Daten vor. Im Bereich des heutigen Glückstadtgrabens und Unterelbebeckens, in denen die obersten Zechstein-Formationen bis hin zur jüngsten Fulda-Formation entwickelt sind, können Best (1989) folgend noch höhere primäre Mächtigkeiten angenommen werden. Best weist darauf hin, dass die mächtigste und vollständigste, bisher durch eine Tiefbohrung nachgewiesene Zechsteinabfolge in Ostholstein erschlossen wurde. Demzufolge hält die BGR maximale Mächtigkeiten von 1500 m und mehr im Beckenzentrum für den gesamten Zechstein für möglich. Dies wird durch neueste Erkenntnisse aus anderen Teilen des südlichen Permbeckens, im Bereich der südlichen Nordsee (Barnett et al. 2023) gestützt. Gemäß der in Abb. 31 vorgestellten Korrelation würde dies in etwa z2Na-Mächtigkeiten von ca. 820 m im Beckenzentrum entsprechen.

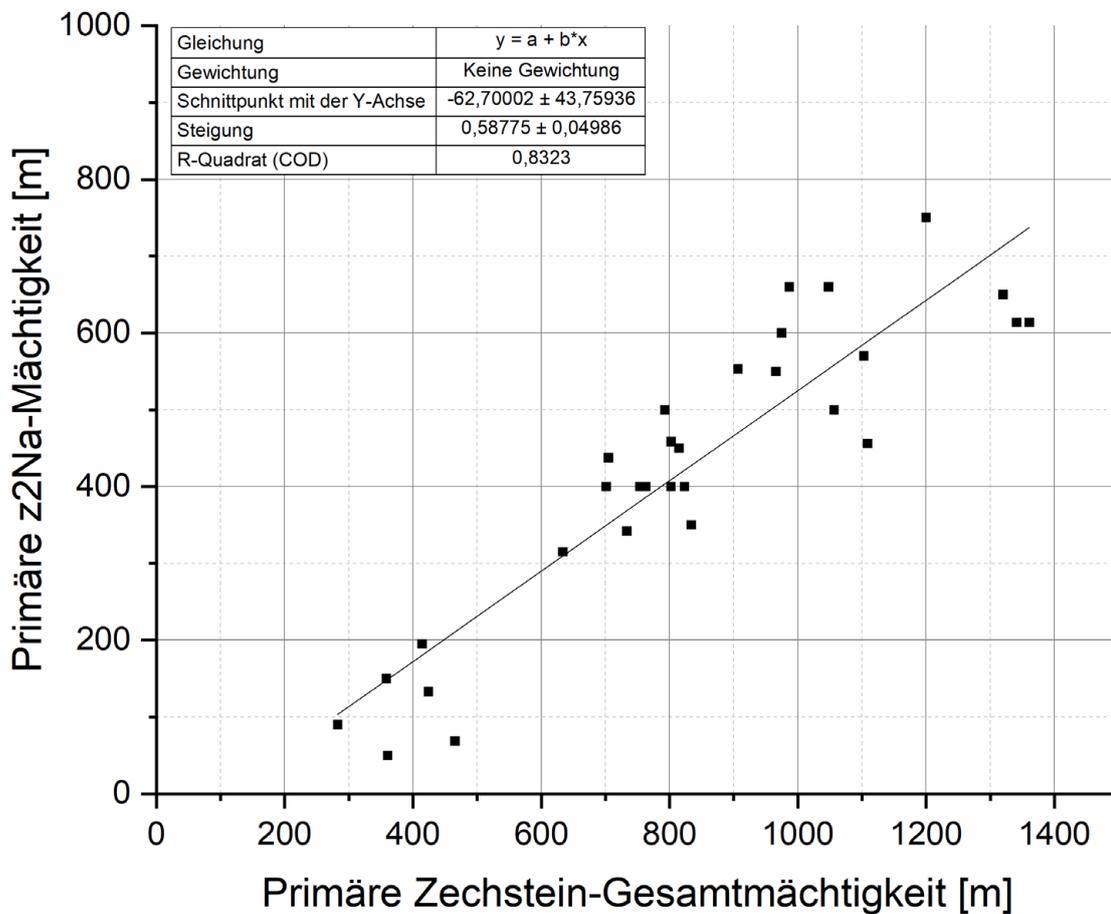


Abb. 31: Auswertung der primär abgelagerten z2Na-Mächtigkeiten im Bezug zur primären Zechstein-Gesamtmächtigkeit.

Nun spielen für die Salzdiapire nur diejenigen salinaren Abfolgen eine Rolle, die am Salzaufstieg beteiligt sind. In der logischen Folge muss die z2Na-Mächtigkeit in Relation zu der kumulierten Mächtigkeit eben dieser Schichten gesetzt werden. In Kap. 3.3 wurde beschrieben, dass die im Liegenden des z2Na vorkommenden Schichtglieder des Zechsteins nicht am Strukturaufbau beteiligt sind und an der Zechsteinbasis verbleiben, sofern es sich um Diapire ohne Rotliegendesalinarbeteiligung handelt. Diese basalen Schichten bilden die Differenz zwischen der ursprünglich abgelagerten Zechstein-Gesamtmächtigkeit (schwarze Datenpunkte und Ausgleichsgerade in Abb. 32) und der „mobilisierten Zechstein-Mächtigkeit“ (blaue Datenpunkte und Ausgleichsgerade in Abb. 32).

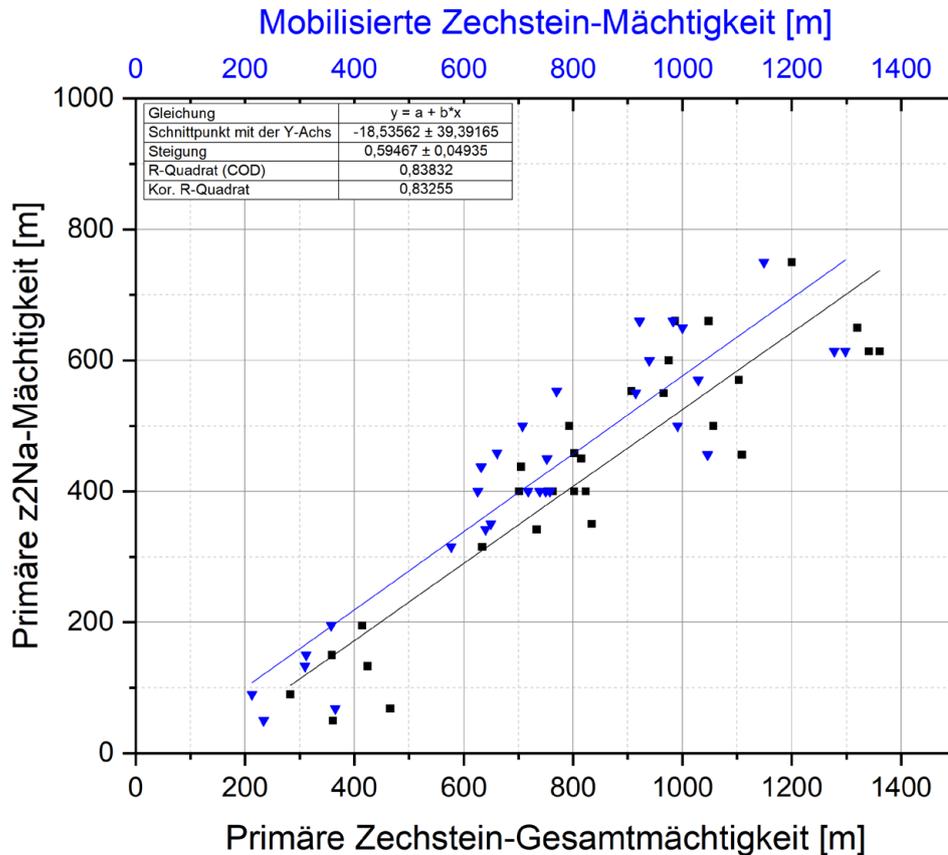


Abb. 32: Primär abgelagerte z2Na-Mächtigkeiten und Zechsteingesamtmächtigkeiten (schwarz) im Vergleich zur mobilisierten Zechsteinmächtigkeit (blau). Sie umfasst die kumulative primäre Mächtigkeit aller Zechsteinschichten, die an der Diapirbildung beteiligt sind. Die Differenz aus beiden ergibt die Mächtigkeit der Zechsteinschichten, die nicht mobilisiert wurden und an der Zechsteinbasis verblieben sind.

Um den z2Na-Anteil an der mobilisierbaren Zechsteinschichtenfolge zu untersuchen, wird die z2Na-Mächtigkeit ins Verhältnis zu der mobilisierbaren Zechsteinmächtigkeit gesetzt (Abb. 33). Anders als im Faktor „Querschnittsfläche“, in dem die rezenten Mengenverhältnisse in Diapiren analysiert wurden, stellt der z2Na-Anteil hier die Ausgangsbedingungen nach der Zechsteinablagerung und vor der Diapirbildung dar. Eine differenzierte Betrachtung in unterschiedlichen geologischen Faktoren ist notwendig, da sich durch die Salzzakkumulation und Verfallung im Diapir oder auch die Subrosion an der Diapiroberfläche die ursprünglichen („primären“) Verhältnisse verschieben können.

Die ermittelten Daten belegen eine Steigerung des z2Na-Anteils mit zunehmender primärer z2Na-Mächtigkeit. Die höchsten z2Na-Anteile wurden mit ca. 0,72 ermittelt. Sie liegen in einem Bereich zwischen ca. 500 – 650 m ursprünglich abgelagerter z2Na-Mächtigkeit. Höhere Anteile können bei noch größeren Mächtigkeiten aus den bestehenden Daten nicht abgelesen werden. Dennoch ist ein klarer Trend zu sehen: mit zunehmender z2Na-Mächtigkeit, also vom Beckenrand zum Beckenzentrum, steigen die Anteile und somit die Mengen an z2Na, die potenziell zur Diapirbildung zur Verfügung standen.

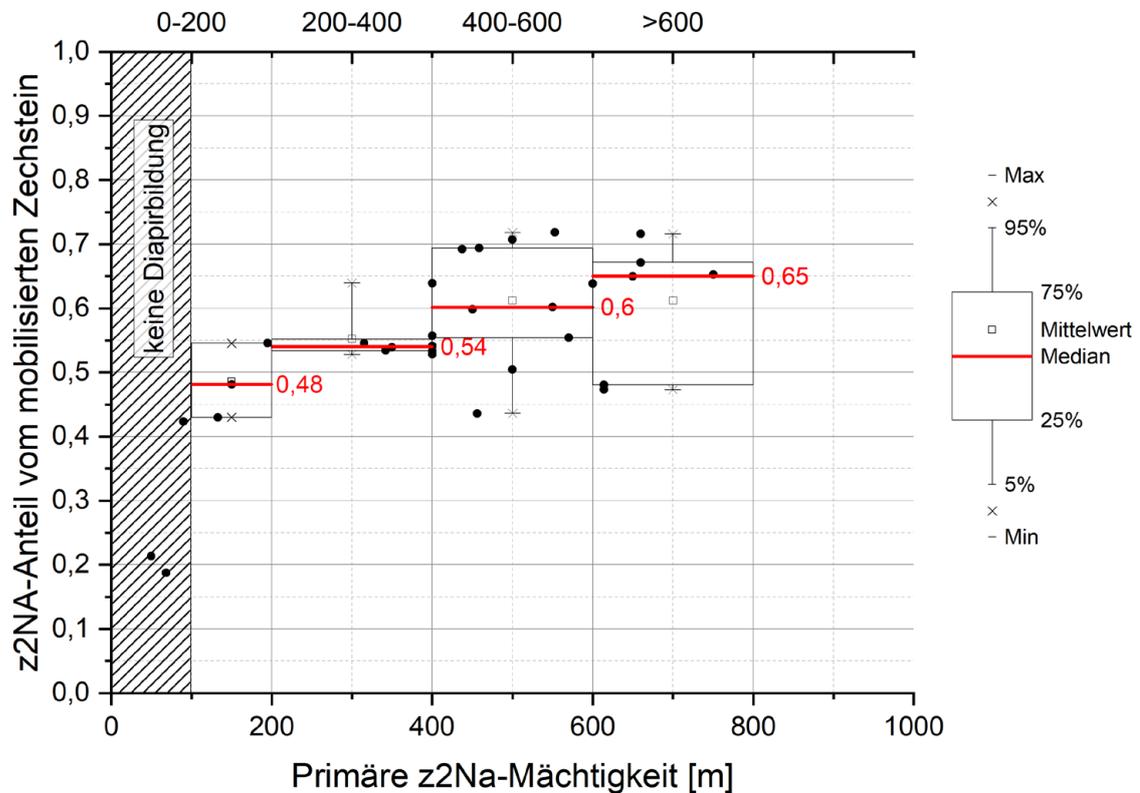


Abb. 33: z2Na-Anteil vom mobilisierten Zechstein im Verhältnis zur primären z2Na-Ablagerungsmächtigkeit (schwarze Punkte). Daneben Boxplots (schwarz umrandeter Kasten) mit ermittelten Medianen (rote Linie und Beschriftung), eingeteilt in 4 Gruppen: 100 – 200 m, 200 – 400 m, 400 – 600m, > 600 m. Unterhalb von 100 m primärer z2Na-Mächtigkeit gibt es keine Diapirbildung im NDB.

Bewertung:

Entsprechend der Verteilung des z2Na-Anteils wurden in Abb. 33 fünf Gruppen erzeugt. In Beckenbereichen mit 0 – 100 m (Gruppe 1) primärer z2Na-Mächtigkeit wurden keine Diapire gebildet. Damit entfällt dieser Wertebereich aus der Bewertung. Nur vereinzelte Diapire bzw. Diapirteile liegen im Bereich von 100 – 200 m z2Na-Primärmächtigkeit. Hier ist nach derzeitigen Stand nicht eindeutig zu belegen, ob die 100 – 200 m z2Na tatsächlich der initialen Mächtigkeit bei beginnender Strukturbildung entsprechen, also auch eine Mindestmächtigkeit für Diapirbildung im NDB darstellen. Ggf. ist es vor der Strukturbildung durch großräumige Änderungen im Beckengradienten oder regionale Besonderheiten zu einem Zufluss an mobilisierbaren Zechsteinanteilen gekommen, wodurch dann ggf. erst die Salzstrukturgenese ermöglicht wurde. Der z2Na-Anteil an der mobilisierten Zechsteinabfolge liegt in diesen Bereichen laut den analysierten Standardprofilen bei 0,48 (Median). Im Mächtigkeitsintervall von 200 – 400 m ist eine geringe Streuung der Anteile zu erkennen, bei einem Median von 0,54. Da eine Vielzahl an Diapiren in diesen Gebieten entlang der Zechsteinbeckenränder vorliegen, kann davon ausgegangen werden, dass z2Na-Mächtigkeiten > 200 m eine Salzstrukturbildung ermöglichen.

Der Median steigt bei 400 – 600 m primärer z2Na-Mächtigkeit auf 0,6, bei > 600 m auf 0,65 an. Dementsprechend werden die Wertungsgruppen in Tab. 7 gebildet.

Es konnten Korrelationen zwischen primär abgelagerter Zechsteinmächtigkeit und den jeweiligen z2Na-Mächtigkeiten (Abb. 31, Abb. 32), wie auch zwischen den primären z2Na-Mächtigkeiten und den z2Na-Anteil am mobilisierten Zechstein (Abb. 33) festgestellt werden. Diese Verhältnisse stellen allerdings die Ausgangsbedingungen vor der Halokinese dar, vorausgesetzt es kam zuvor zu keiner Salzumverteilung. Diese Mengenverhältnisse können sich naturgemäß durch Salzakumulation während der Diapirbildung aber auch durch Subrosion und Erosion in den oberen Diapirbereichen verändern (s. auch Kap. 4.2 und Kap. 5.5). In Kap. 5.5 wird zudem darauf hingewiesen, dass die Mengenverhältnisse in unterschiedlichen Salzstrukturen und insbesondere in unterschiedlichen Typen von Salzstrukturen variieren und vom jeweils betrachteten Strukturniveau abhängig sind. Die Datenlage und Verteilung von Informationen über das NDB hinweg lässt, insbesondere im Beckenzentrum, keinen systematischen und belastbaren Abgleich zwischen rezenten und ursprünglichen z2Na-Anteilen zu. Damit lässt sich der Einfluss des z2Na-Anteils aus primärer Ablagerung auf die heutigen Mengenverhältnisse in den Diapiren weder ausschließen noch belegen.

Ein weiterer Grund für die Anwendung und Bewertung dieses Faktors ist, dass mit höheren initialen Mächtigkeiten durch das viskose Materialverhalten des Steinsalzes eine zunehmende mechanische Entkopplung zu Beginn von Deformationsprozessen im Grundgebirge einhergeht (z. B. Stück et al. 2020; ten Veen et al. 2012). Die Wahrscheinlichkeit, dass sich Störungszonen des Grundgebirges als Scherzonen mit höherer Deformation (gekennzeichnet z. B. durch intensivere Verfaltung) im hangenden Salinar fortpflanzen, sinkt mit zunehmender Steinsalzmächtigkeit (Abb. 34). Im unverritzten und lithostatisch eingespannten Zustand sind diese Scherzonen hydraulisch dicht (vgl. Hammer et al. 2016; Popp 2022). Geringere Salinarmächtigkeiten oder Salzzuströme über die Zeit in einen Diapir könnten die Anfälligkeit für bruchhafte Deformation erhöhen, Scherung auf wenige Strukturzonen fokussieren und letztlich so auch die z2Na-Querschnittsflächen verringern oder in ihrer Verteilung komplexer werden lassen. So zeigen gerade einige Diapire in SE-Niedersachsen aufgrund ihrer zeitweise nur geringen Entkopplung zum Grundgebirge einen oft komplexen asymmetrischen Internbau (vgl. Kap. 4.2).

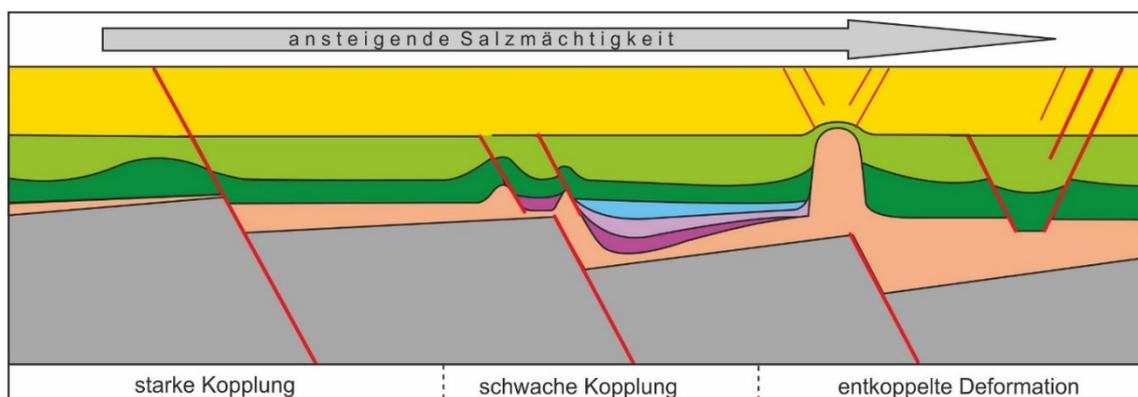


Abb. 34: Schematische Darstellung von Störungen und vom Beckenrand zum Beckenzentrum zunehmenden primären Salzmächtigkeiten sowie damit einhergehender zunehmender mechanischer Entkopplung (verändert nach ten Veen et al. 2012).

Zudem sinkt mit steigender Mächtigkeit des z_2Na , welches in die Diapirbildung einbezogen wird, vermutlich der Einfluss jüngerer Zechsteinabfolgen, die eingefaltet werden könnten. Da das z_2Na generell schneller kriecht als hangende Zechsteinseinheiten, füllt es i. d. R. den Kernbereich von Diapiren aus. So lässt sich generell annehmen, dass, je größer das zuströmende z_2Na -Salzvolumina pro Zeiteinheit in eine Salzstruktur ist, desto mehr Volumenanteile sollte dieses Salinar innerhalb der Salzstruktur auch einnehmen. Wie oben bereits angemerkt, lässt sich aber aufgrund der Datenlage kein belastbarer Vergleich zwischen rezenten Verhältnissen in den Diapiren und den ursprünglichen z_2Na -Anteilen herstellen. Höhere initiale Salinarmächtigkeiten können darüber hinaus, abhängig von den Rahmenbedingungen im jeweiligen Beckenbereich, einen Effekt auf die Dauer und Intensität der diapirischen Phase und letztlich auf die zu erreichende mögliche Reife von Salzdiapiren haben (vgl. Kap. 5.5).

Trotz der angesprochenen heterogenen und lückenhaften Datenlage, der teils schwer quantifizierbaren Salzumverteilungen vor und während des eigentlichen Diapirbildungsprozesses und der bereits im Faktor Querschnittsfläche behandelten rezenten z_2Na -Anteile im Diapir wird aufgrund der mehrfachen Einflussnahme auf die Genese des Internbaus eine mittlere Wichtung für diesen geologischen Faktor empfohlen.

Zur Anwendung dieses Faktors ist es notwendig, über Analogieschlüsse primäre Mächtigkeiten aus Literaturangaben für die TG herzuleiten. Es wird angeregt zu prüfen, ob anhand der wenigen und heterogen verteilten Informationen zu primär abgelagerten Mächtigkeiten dennoch eine Rekonstruktion der Mächtigkeitsverteilung über das gesamte Norddeutsche Becken möglich ist. Für den Fall, dass ein solches Kartenwerk erstellt werden kann, könnten flächendifferenziert Regionen mit unterschiedlicher ursprünglicher Steinsalzmächtigkeit ausgewiesen werden und dortige Teilgebiete entsprechend bewertet werden. In Beckenrandlagen können die Karten von z. B. Richter-Bernburg (1987b) für den NW-deutschen und z. B. von Franke (2022) für den NE-deutschen Teil als Grundlage für solch eine Studie verwendet werden. Liegen genauere Daten aus Bohrungen oder geophysikalischen Untersuchungen in den Teilgebieten oder in ihrer näheren Umgebung vor, sollten diese berücksichtigt werden. Entsprechend der Mächtigkeitsspannbreiten wird vorläufig folgendes Bewertungsschema vorgeschlagen:

Tab. 7: Bewertung des geologischen Faktors „Primäre Steinsalzmächtigkeit“.

Bewertung	Primäre z2Na-Mächtigkeit
sehr günstig	> 600 m
günstig	400 – 600 m
bedingt günstig	200 – 400 m
weniger günstig	100 – 200 m
keine*	< 100 m

* unterhalb einer primären z2Na-Mächtigkeit von ca. 100 m ist keine Diapirbildung im NDB bekannt.

Weitere Möglichkeiten zur Ermittlung von Primärmächtigkeiten sowie Mächtigkeitsvariationen über die Zeit sind z. B. Randsenkenanalysen (z. B. Zirngast 1996) oder die Backstripping-Methode, wie sie z. B. von Warsitzka et al. (2016) im Glückstadt-Graben angewendet wurde. Damit sind Ab- bzw. Zuflüsse von Salz und mögliche Relationen zwischen initialen Salinarmächtigkeiten, über die Zeit ausgeflossene und erodierte Salzvolumina einer Salzstruktur abschätzbar. Solche Studien sind allerdings sehr aufwendig und sind in Anbetracht der Vielzahl von Teilgebieten vermutlich nicht umfänglich durchführbar. Eine Bearbeitung ist ggf. bei einer Auswahl weniger, geologisch gut geeigneter Teilgebiete zu prüfen.

Vorschlag für Wichtung: mittel

5.1.3.2 Fazies

In Kap. 3.1 und 3.2 wurde beschrieben, dass in Abhängigkeit der Lage im Zechsteinbecken die Mächtigkeiten aber auch die fazielle Ausbildung der Evaporite aufgrund der unterschiedlichen Paläomorphologie variiert. Von der Beckenfazies hin zum Beckenrand mit Hang- und Schelffazies nehmen die Mächtigkeiten der Steinsalzlager ab und die der Sulfate sowie Karbonate zu. Die Steinsalzmächtigkeiten wurden bereits betrachtet (Kap. 5.1.3.1). An dieser Stelle werden die Sulfate und Karbonate analysiert und zwar jene, die im Hangenden des zu favorisierenden z2Na (als WbB) vorkommen. Es wird dargestellt werden, warum diese für die Internbauprognose eine Rolle spielen, obwohl sie keine WbB darstellen.

In den Kap. 3.3 und 4 wurde aufgezeigt, dass in Salzdiapiren insbesondere der Übergangsbereich von der Staßfurt- zur Leine-Formation häufig stark deformiert ist und eine intensive Verfaltung, z. T. mit Abscherung von Schichten beobachtet wird. Die Ursache hierfür liegt an den in dieser stratigraphischen Position anzutreffenden Schichten unterschiedlicher Kompetenz und deren Kontakt zueinander. In der Abfolge Deckanhydrit (z2DA) bis Hauptanhydrit (z3HA) treten relativ kompetente, d. h. relativ fließfeste Schichten auf, die spröde-bruchhaft deformieren. Inkompetentere Schichten stellen z. B. das Kaliflöz Staßfurt (z2SF) im Liegenden und die im Hangenden des Hauptanhydrits (z3HA) auftretenden

Salze dar. In Beckenfazies ist die Abfolge Deckanhydrit (z2DA) bis Hauptanhydrit (z3HA) in etwa gleichmächtig ausgebildet. In randlichen Positionen nimmt ihre Mächtigkeit stark zu, sodass diese auch volumenmäßig einen höheren Anteil in den dort gebildeten Diapiren einnehmen. Daher ist hinsichtlich des Internbaus mit zunehmender Komplexität und geringeren WbB-Anteilen, sowie in der Folge mit einer ggf. schlechteren Prognostizierbarkeit zu rechnen. Die Zunahme der Vorkommen von mächtigen Sulfaten und Karbonaten kann einen negativen Einfluss auf die technische Realisierbarkeit eines Bergwerks durch ggf. einzuhaltende Sicherheitspfeiler, und bei Streckenauffahrungen in diesen Gesteinen, auf die Betriebssicherheit haben.

Dem z2Na und den oben genannten Karbonaten und Sulfaten ist im Zechstein-Normalprofil noch beckenweit ein Kaliflöz (Kaliflöz Staßfurt, z2SF) zwischengeschaltet, welches ebenfalls betrachtet wurde. In der Auswertung konnte allerdings keine allgemeingültige Mächtigkeitsabhängigkeit festgestellt werden, die auf die paläogeografische Beckenlage zurückgeführt werden kann. Weitere Informationen sind im Kapitel der nicht berücksichtigten geologischen Faktoren zu finden (Kap. 5.3.2). Anders als z. B. in den Niederlanden (Pichat 2022) sind im NDB keine innerhalb des z2Na zwischengeschalteten Kalisalzlagen bekannt.

Bewertung:

Für Teilgebiete, die sich am Beckenrand mit sog. Karbonat- oder Sulfatwällen befinden, wird eine geringere Eignung vorgeschlagen. Da ihr räumliches Vorkommen mit geringeren Steinsalzmächtigkeiten einhergeht und diese bereits als geologischer Faktor behandelt wurden (Kap. 5.1.3.1), sollte hier eine geringe Wichtung angewandt werden. Dadurch wird auch einer "Doppelbelastung" von entsprechend einzuordnenden Teilgebieten entgegengewirkt.

Analog der Empfehlungen in Kap. 5.1.3.1 können zur Anwendung dieses geologischen Faktors ebenfalls die Karten von Richter-Bernburg (1987b) und Franke (2022), ergänzt durch ortsspezifische geowissenschaftliche Daten, verwendet werden.

Tab. 8: Bewertung des geologischen Faktors „Fazies“.

Bewertung	Beckenlage / Fazies
günstig	In Beckenfazies
bedingt günstig	Teilweise oder randlich auf einer Karbonatplattform (z3LK), einem Sulfatwall (z3HA)
weniger günstig	Vollkommen auf einer Karbonatplattform (z3LK), einem Sulfatwall (z3HA)

Vorschlag für Wichtung: gering

5.2 Übersicht der Wichtung der geologischen Faktoren

Gemäß den Beschreibungen in den vorausgehenden Kapiteln wird an dieser Stelle eine übersichtliche tabellarische Zusammenfassung der geologischen Faktoren mit ihren Wichtungen dargestellt (Tab. 9).

Tab. 9: Zusammenfassung und Wichtung der geologischen Faktoren mit Einfluss auf den Internbau von Salzdiapiren bzw. die Anteile und Verteilung von WbB.

Gruppe	Nr.	Geologischer Faktor	Wichtung
Entwicklungsgeschichte	1	Strukturaufbauendes Salinar	hoch
	2	Entwicklungsphasen und regionalgeologisches Setting	hoch
Morphologie	3	Querschnittsfläche	sehr hoch
	4	Mächtigkeit	hoch
	5	Formfaktor	gering
Beckenlage	6	Primäre Steinsalz-Mächtigkeit	mittel
	7	Fazies	gering

5.3 Weitere Faktoren mit fakultativer oder ohne Anwendung

5.3.1 Grundrissform bzw. -abmessungen

In einigen Facharbeiten sind Hinweise zu finden, dass der Internbau in länglichen gegenüber rundlichen Salzstrukturen weniger komplex gestaltet ist. Eine Begründung lautet, dass die Salzmigration dann nur quer zu Strukturachse erfolgt (Jaritz 1983). In einigen Studien konnte dagegen belegt werden, dass Salzfluss auch entlang des Hauptstreichens lang gezogener Salzstrukturen mit entsprechender Faltung stattfindet (z. B. de Boer 1971; Klarr 1981). Teilweise erfolgt die Herleitung der höheren Komplexität runder Formen in Kombination mit einem kleinen Querschnitt (Bornemann et al. 2008; Kockel & Roland 1977). Der Querschnitt wurde in dieser Arbeit als geologischer Faktor betrachtet (Kap. 5.1.2.1), allerdings unabhängig des Grundrisses. Jackson & Hudec (2017) vermuten ebenfalls ein komplexeres, dreidimensionales Zusammenfließen von Salz gegenüber dem zweidimensionalen Zusammenfließen in Salzmauern, schränken allerdings ein, dass dies noch nicht systematisch untersucht bzw. modelliert wurde.

Der BGR sind ebenfalls keine diesbezüglichen Arbeiten bekannt bzw. liegen für systematische Untersuchungen zum Einfluss der äußeren Grundrissform zu wenige Daten vor. Zur Überprüfung wurde in den untersuchten geologischen Sohlenrissen der Referenzsalzstrukturen das flächenmäßig größtmögliche Rechteck (als Analogon für eine zusammenhängende WbB-Fläche) mithilfe eines

speziell entwickelten Algorithmus ermittelt (Abb. 35) und mit den Diapirabmessungen (Länge/Breite) ins Verhältnis gesetzt (Abb. 36). In dieser Weise konnte keine Abhängigkeit hinsichtlich der Größe von zusammenhängenden WbB-Anteilen festgestellt werden, die sich allein auf die Konturform (rund, oval oder langgezogen) bezieht. Daher wird empfohlen, die Grundrissform nicht als geologischen Faktor bzw. Einschränkung zu verwenden. Darüber hinaus wird zum jetzigen Zeitpunkt des Verfahrens mit vorläufigen Endlagerplanungen gearbeitet (BGE 2022a), die konkretisiert und angepasst werden können, sobald eine ortsspezifische Kenntnis des Salzdiapirinternbaus und des Platzangebots vorliegt.

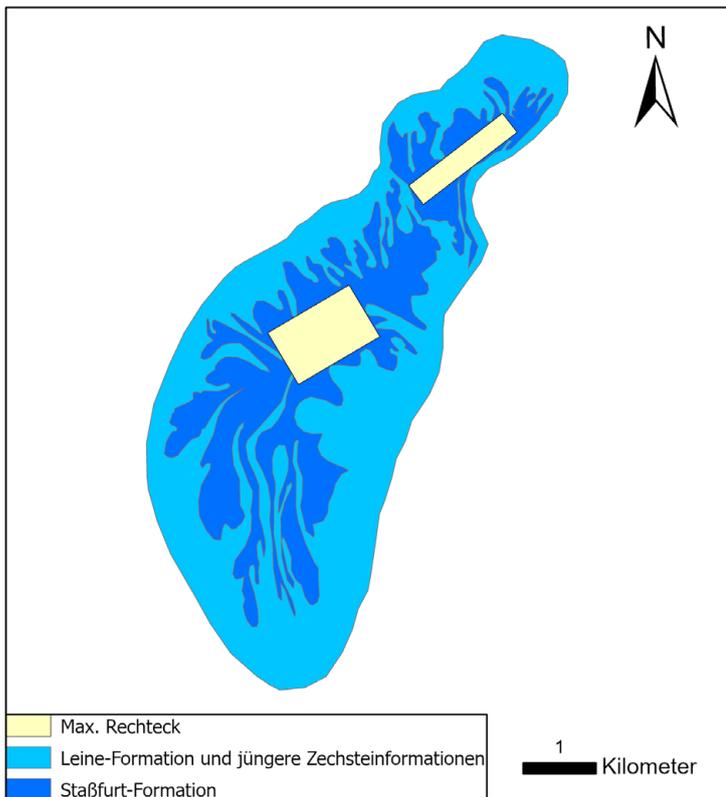


Abb. 35: Geologischer Riss der 650-m-Sohle in der Salzstruktur Benthe (verändert nach Richter-Bernburg 1980) mit algorithmisch ermittelten größtmöglichen Rechtecken (in Analogie für eine zusammenhängende, rechteckige WbB-Fläche) innerhalb der Verbreitungen der Staßfurt-Formation.

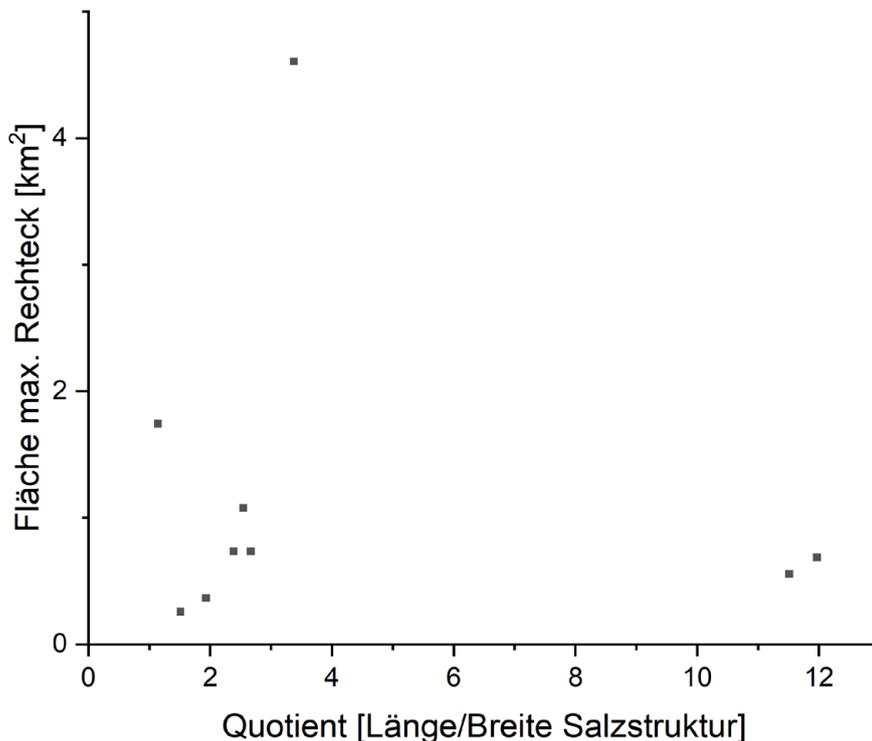


Abb. 36: Fläche des ermittelten größtmöglichen Rechtecks innerhalb der WbB der Referenzsalzstrukturen im Verhältnis zur jeweiligen Diapirabmessung, dargestellt als Quotient der Diapirlänge und -breite. Ein Quotient von 1 entspricht einem runden Diapir.

Gemäß den bereits erwähnten vorläufigen Endlagerauslegungen schreibt BGE (2022a), dass die Endlagerbreite vom Platzangebot in den Untersuchungsräumen abhängt. Ist dieses ausreichend groß, wird eine Endlagerbreite von 1000 m veranschlagt. Bei einem kleinen oder schmalen Salzdiapir kann die Endlagerbreite und -länge flexibel an die Platzverhältnisse angepasst werden. Um jedoch zu vermeiden, dass sich die daraus ggf. resultierenden großen Richtstreckenlängen nicht nachteilig auf die Schädigung der geologischen Barriere auswirken, sollte eine Endlagerbreite geringer 100 m vermieden werden (BGE 2022a).

Zu diesem Zweck wurde geprüft, ob sich aus den Erkenntnissen der untertägig untersuchten Salzstrukturen bestimmte Diapirabmessungen ableiten lassen, die diese Anforderung erfüllen bzw. eine größere Endlagerbreite ermöglichen. Auch hierfür wurden alle verfügbaren geologischen Sohlenrisse genutzt. Die Salzstrukturen wurden dazu nach gleichem Schema in Zonen eingeteilt (Abb. 37). In jeder Zone wurden quer zum Streichen der Salzstruktur die Strecken im z2Na mit einer Breite > 100 m aufsummiert und ins Verhältnis zur an den Messstellen vorhandenen Diapirbreite gesetzt (Abb. 37; Abb. 38).

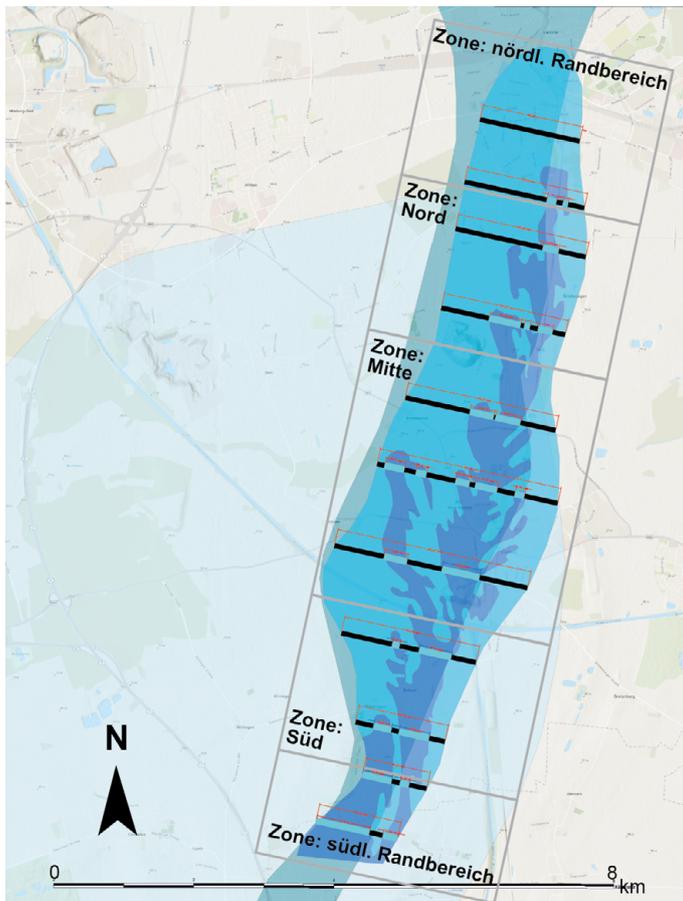


Abb. 37: Exemplarische Darstellung der Analyse von maßstäblichen Streckenbreiten des z2Na (dunkelblau) im Vergleich zur Gesamtdiapirbreite am Beispiel der Salzstruktur Lehrte-Seebrine. Die Berechnung und Mittelwertbildung der Streckenanalysen bezieht sich auf eine Unterteilung der Struktur in einzelne Zonen, die entlang des Streichens der Struktur ausgerichtet sind.

In Abb. 38 sind drei aus der Analyse resultierende Verhältnisse der Streckenbreite z2Na zur Gesamtbreite des Diapirs dargestellt. Zum einen sind alle ermittelten Streckenbreiten als Mittelwerte aus jeder Zone der untersuchten Salzstrukturen aufgetragen (graue Datenpunkte). Hier ergibt sich im Mittel ein Anteil von 0,32 von z2Na zur Diapirbreite (schwarze Gerade). Konzentriert man sich in jeder Salzstruktur ausschließlich auf die identifizierte Zone größtmöglicher Streckenbreiten im z2Na, ergibt sich ein Verhältnis von 0,5 im Mittel (blaue Datenpunkte und Gerade). Der "Best-Case"-Fall repräsentiert die Zone und Salzstruktur mit dem größten ermittelten Anteil (Anteil: 0,74; grüne Gerade).

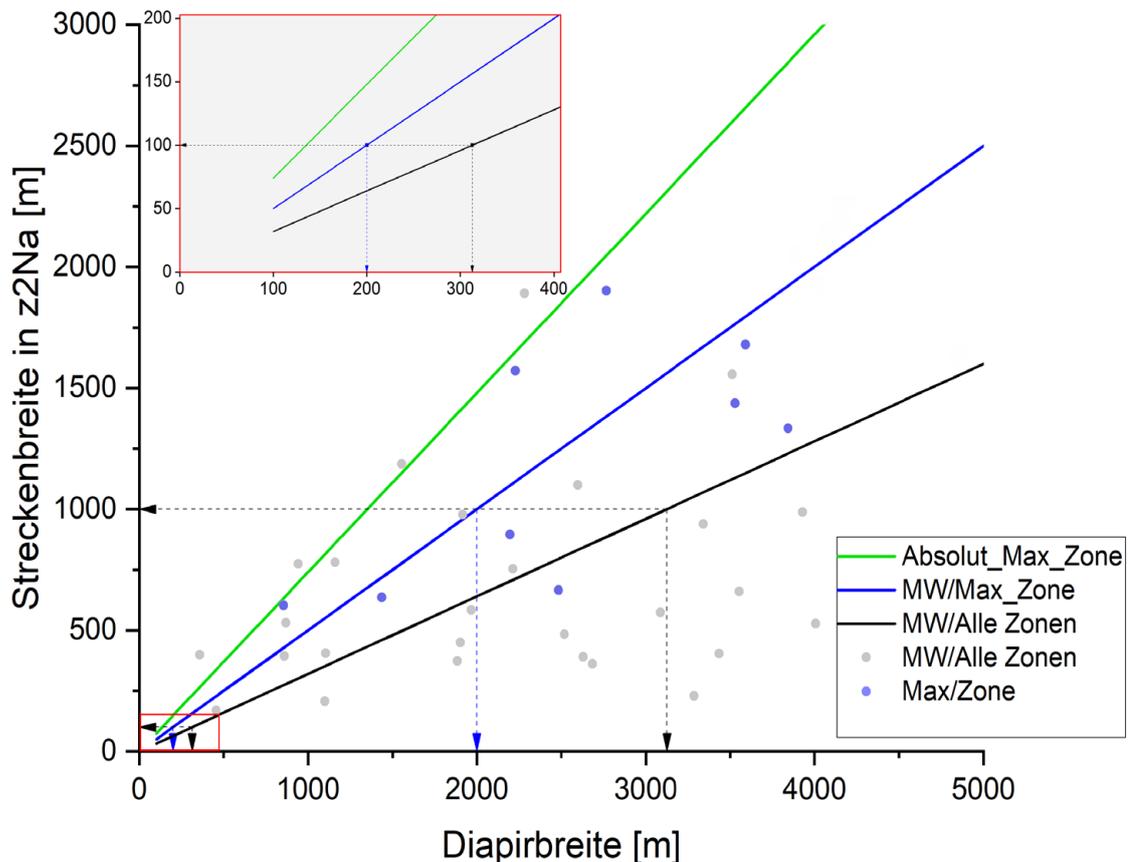


Abb. 38: Ermittelte summarische Streckenbreiten (> 100 m Mindestbreite) im z2Na bezogen auf die jeweils an der Messstelle vorhandene Diapirbreite. Graue Datenpunkte und schwarze Gerade: Ermittelte Streckenbreitenmittelwerte aller untersuchter Salzstrukturen und ihrer jeweiligen Zonen (n=41). Blaue Datenpunkte und Gerade: Mittelwert der Zonen größter Streckenbreite der untersuchten Sohlenrisse (n=9). Grüne Gerade: absolut größte gemittelte Streckenbreite einer Zone des analysierten Datensatzes im Verhältnis zur Diapirbreite (n=1). Gestrichelte Linien zeigen für eine beispielhaft gewählte Streckenbreite von 1000 m im z2Na, welche notwendige Diapirbreite pro Fall (grau, blau, grün) abzuleiten ist. Im roten Bildausschnitt ist dieser Zusammenhang mit einer Mindeststreckenbreite von 100 m angegeben. MW: Mittelwert.

Nun können zwei exemplarisch gewählte Anwendungsfälle (100 m bzw. 1.000 m Endlagerbreite im z2Na) näher betrachtet werden. Je nachdem, von welchem der o. g. Anteile man ausgeht, ergeben sich für den Anwendungsfall 100 m Endlagerbreite Mindestdiapirbreiten von ca. 135 m (Best Case, grüne gestrichelte Linie; Abb. 38, roter Kasten) bis ca. 310 m (Mittelwert, schwarz gestrichelte Linie). Dabei ist der beschriebene „Best-Case“-Fall eher ein hypothetisches Szenario, da derart enge diapirische Spalten im Norddeutschen Becken die Ausnahme darstellen und zudem notwendige Sicherheitsabstände zu den Flanken bzw. zum Deckgebirge vermutlich nicht eingehalten werden könnten. Zudem wären in einem solchen „Minimalfall“ kaum Sicherheitsreserven nach geoWK2 (StandAG 2017) vorhanden. Bei einer Erhöhung der Endlagerbreite auf 1000 m sind je nach anzulegenden Verhältnis entsprechend

Mindestdiapirbreiten zwischen ca. 1.350 – 3.100 m erforderlich (Abb. 38). Die große Streuung in den Einzelstreckenmessungen zeigt allerdings auch, dass diese Verhältnisse je nach Zone und Salzstruktur stark variieren können und die geologisch geeignetste Zone standortspezifisch erkundet werden muss.

In Abb. 39 wird ein Zusammenhang zwischen den ermittelten Streckenverhältnissen des z2Na entlang der Längsachsen von Salzstrukturen mit dem Verhältnis aus z2Na-Fläche und Diapirfläche hergestellt (vgl. Kap. 5.1.2.1). Dazu wurden für den Fall einer angenommenen Minimalfläche von 3 km² des z2Na (entspricht 6,41 km² Diapirfläche) für die Anlage eines Endlagers verschiedene gestreckte Ellipsen desselben Flächeninhalts der Diapirfläche und z2Na-Fläche erstellt und die in Abb. 38 dargestellten Verhältnisse berücksichtigt.

Dabei zeigt sich, dass unter der Annahme dieser idealisierten Geometrie der z2Na- und Diapirfläche, bei Einhaltung des Streckenverhältnisses von 0,32 (Abb. 39, Fall a), keine Lösung möglich ist, ohne dass die z2Na-Fläche die Ellipse der Diapirumhüllenden kreuzt. Daraus folgt auch, dass bei einem solch gemittelten Streckenverhältnis von 0,32 oder kleiner die z2Na-Fläche komplexer in der Diapirfläche verteilt sein muss oder eher kleinere z2Na-Flächen zu erwarten sind. Mit zunehmenden Streckenverhältnissen (0,5 und 0,74) werden mehr generalisierte Ellipsenlösungen bei Einhaltung der Flächeninhaltsbeziehung aus Kap. 5.1.2.1 möglich (Abb. 39, Fälle b, c). Dies könnte ein Hinweis auf eine abnehmende Komplexität der z2Na-Fläche in diesen Fällen sein und es bestätigt die Anwendbarkeit der getroffenen Annahmen zum Flächenverhältnis z2Na/Diapir aus Kap. 5.1.2.1.

Kockel & Roland (1977) nehmen an, dass kleine Diapire mit Durchmessern von < 1 km allgemein einen sehr komplizierten Internbau aufweisen und nicht über die notwendigen sekundären Steinsalzmächtigkeiten verfügen. Aus diesem Grund stufen sie salzgefüllte Überschiebungszonen, Ausquetschungs- und Extrusionsstrukturen als geologisch weniger geeignet ein. Die hier vorgestellten Analysen bestätigen diese Beobachtung, da mit abnehmendem Diapirdurchmesser weniger Lösungen für einfache z2Na-Flächengeometrien möglich sind.

Standortauswahl

Pollok, L. et al. (2024): Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Wirtsgesteinsanteilen mit Barrierefunktion und der Internbauvariabilität in Salzstrukturen – Abschlussbericht; Hannover (BGR)

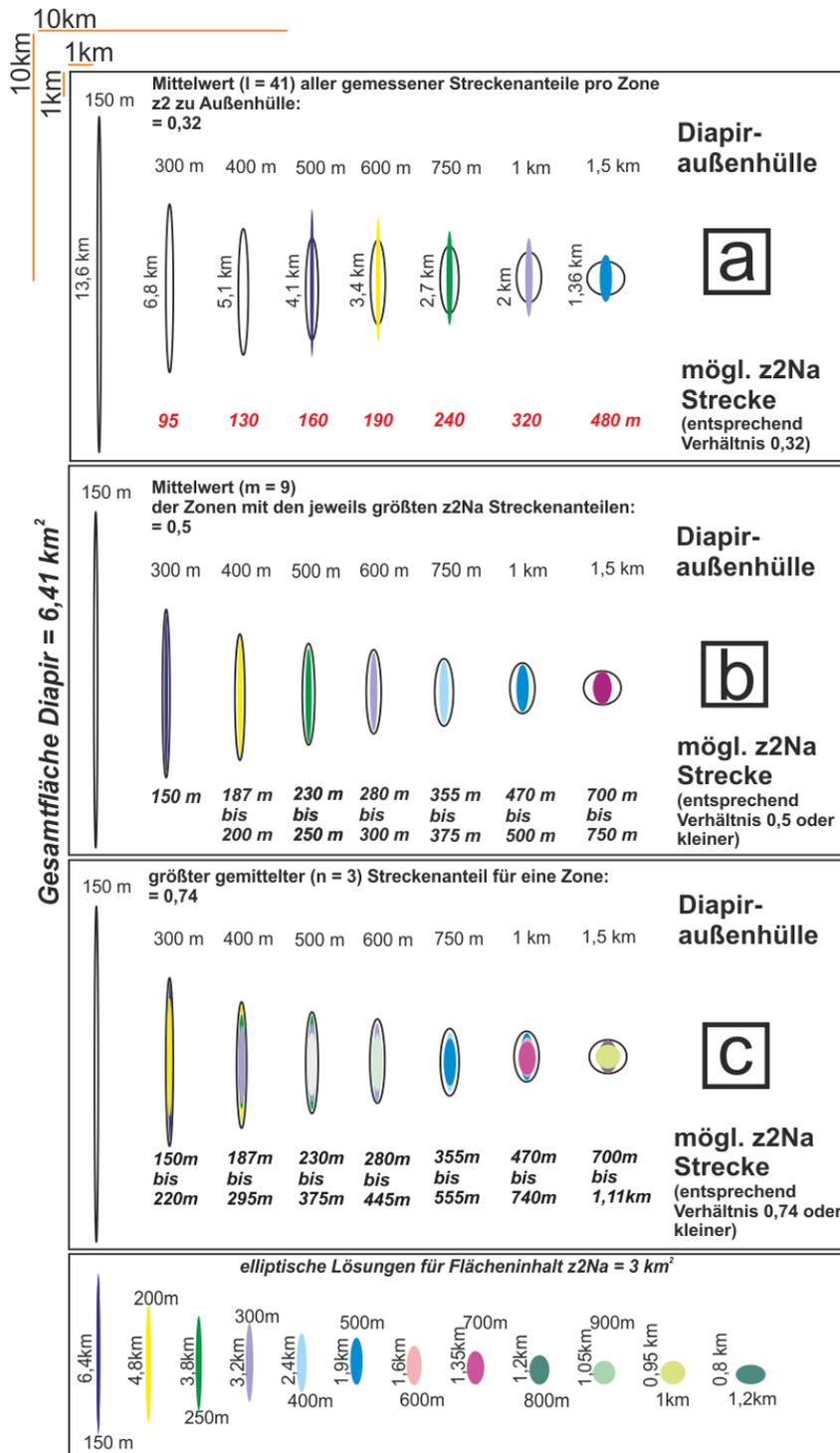


Abb. 39: Darstellung der im Diagramm in Abb. 38 ausgewiesenen Verhältnisse aus z2Na-Streckenbreite zur Diapirbreite entlang der Längsachse einer Salzstruktur. a: Verhältnis = 0,32; b: Verhältnis = 0,5; c: Verhältnis = 0,74. Die Darstellung beruht auf der Annahme der Einhaltung der Flächenbeziehung aus Kap. 5.1.2.1, unter gleichzeitiger Einhaltung der Streckenverhältnisse (Abb. 38) entlang der Längsachse einer Salzstruktur. Die Flächeninhalte des z2Na und der Diapirfläche sind generalisiert durch Ellipsen dargestellt, in diesem Fall für das Minimum einer zur Verfügung stehenden z2Na-Fläche von 3 km².

In Kap. 5.5 wird die Abhängigkeit der z2Na-Streckenbreitenverhältnisse von unterschiedlichen Strukturniveaus und Salzstrukturtypen betrachtet. Wie bereits erwähnt, ist die Streuung der Einzelmessungen in einigen Salzstrukturen von Zone zu Zone, aber auch innerhalb einer betrachteten Zone z. T. groß (Abb. 38). Dies deutet darauf hin, dass unterschiedliche Typen und Tiefenniveaus von Salzstrukturen getrennt betrachtet werden sollten, um gezielt nach hohen Wirtsgesteinsanteilen zu explorieren. So zeigen z. B. eingeengte Salzstrukturen teilweise Zunahmen der z2Na-Streckenbreite zu den Diapirrändern hin und teilweise Abnahmen der z2Na-Streckenbreite in Richtung des Strukturzentrums (z. B. Wathlingen-Hänigsen, Sarstedt). Dies kann durch die Verkürzung der Bereiche um den zentralen Schlot und das Fließen des mobilen z2Na in die randlichen Dachbereiche erklärt werden. Dabei muss dieser Umverteilungsprozess nicht symmetrisch erfolgen (Wathlingen-Hänigsen).

Mit Hilfe der in diesem Kapitel vorgestellten Analysen und Korrelationen können ggf. zu kleine oder zu schmale Diapirbereiche in den Untersuchungsräumen ausgeschlossen werden. Eine Empfehlung für Mindestdiapirbreiten ist abhängig von der vorläufigen Endlagerplanung und kann daher an dieser Stelle nicht gegeben werden.

5.3.2 Vorkommen von Kalisalzen

Kalireiche Salzgesteine sind aufgrund ihrer Eigenschaften als Wirtsgesteine ungeeignet. Sie können sehr unterschiedliche mineralogische Zusammensetzungen haben (z. B. Bornemann et al. 2008; Löffler 1962; Schramm 2013), woraus sich u. a. ein komplexes Verformungsverhalten ergibt (z. B. Popp 2022). Zusätzlich enthält ein Kaliflöz i. d. R. das kristallwasserführende Mineral Carnallit als Hauptkomponente. Carnallit setzt bei Atmosphärendruck bereits bei relativ geringen Temperaturen (ab ca. 67 – 80° C) sein Kristallwasser frei bis es bei ca. 167° C schmilzt. Freies Wasser im Endlagerbereich ist mit Blick auf die Korrosion und Gasbildung sowie die damit einhergehende Neigung zur Bildung von sekundären Fluidwegsamkeiten zu vermeiden.

Im stratigraphisch Hangenden lagert dem z2Na das Kaliflöz Staßfurt (z2SF) auf. Anders als für die im Kapitel Fazies beschriebenen Sulfat- und Karbonatgesteine (Kap. 5.1.3.2) liegen für das z2SF keine publizierten paläogeographischen Karten zu Mächtigkeitsverteilungen vor. Eine Analyse der z2SF-Mächtigkeiten anhand verschiedener Zechstein-Normalprofile lässt keine allgemeingültige Abhängigkeit von der paläogeografischen Beckenlage bzw. der primären Staßfurtsteinsalz-Mächtigkeit erkennen (Abb. 40). Des Weiteren wird in der Literatur beschrieben, dass die Sedimentation während der Staßfurt-Formation über das Becken relativ gleichmäßig ablief (z. B. Richter-Bernburg 1985) und in etwa von gleichen Mächtigkeiten, zumindest für die Beckenfazies, auszugehen ist. Weiterhin wurde dem Einfluss der z2SF-Mächtigkeit bereits durch Korrekturrechnungen in der Bewertung des geol. Faktors „Querschnittsfläche“ Rechnung getragen. Eine gesonderte Behandlung der Mächtigkeit des Kaliflöz Staßfurt wird daher nicht empfohlen.

Ebenfalls nicht zu betrachten sind die in jüngeren Zechstein-Formationen vorkommenden Flöze (z. B. die Kaliflöze Riedel und Ronnenberg der Leine-Formation), da der Fokus für die Identifikation großer WbB und bei der Entwicklung dieser Methode hier auf der Staßfurt-Formation bzw. dem z2Na liegt.

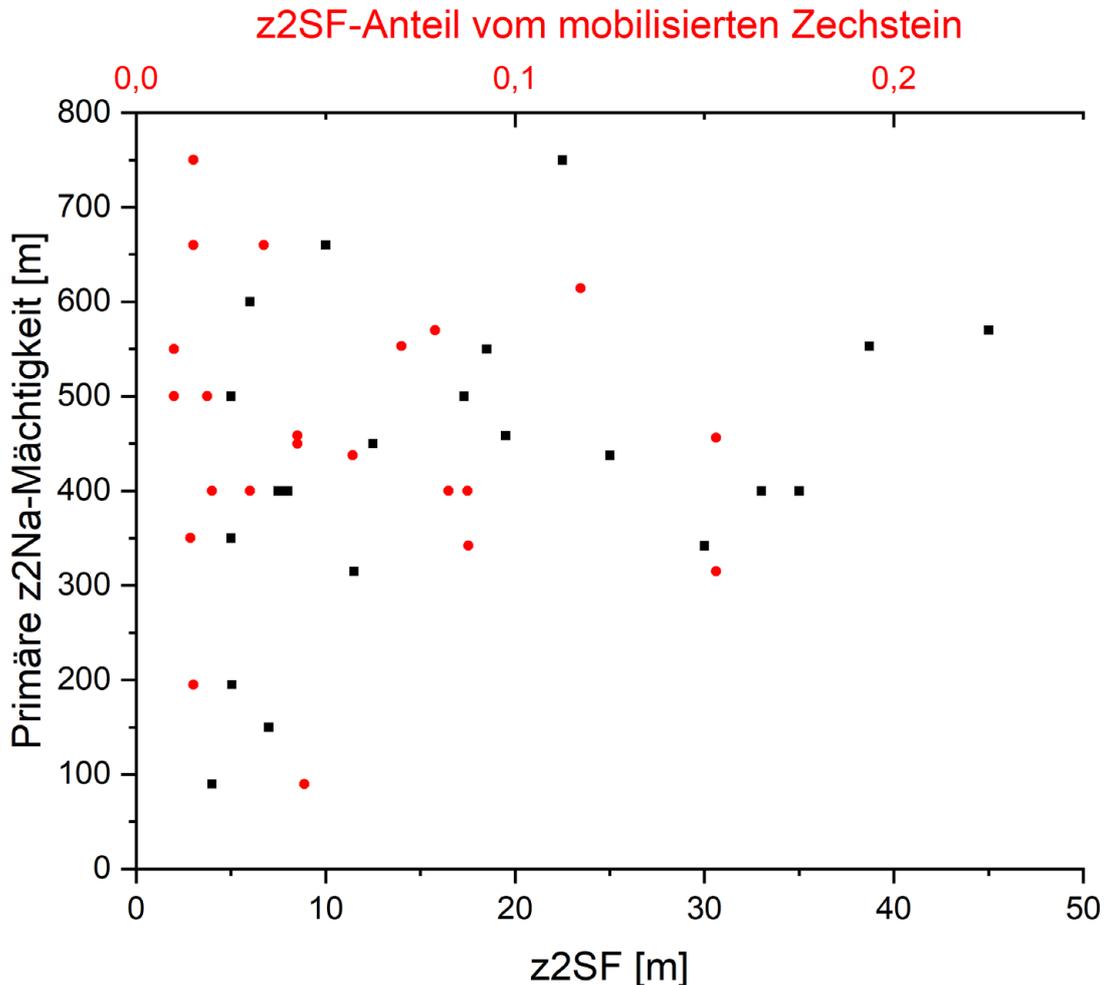


Abb. 40: z2SF-Mächtigkeiten und -Anteile zeigen keine Abhängigkeit von der primären z2Na-Mächtigkeit oder der paläogeografischen Beckenlage.

5.4 Exemplarische Anwendung der Methode

Die geologische Beschreibung der Teilgebiete / Untersuchungsräume mit Steinsalz in steiler Lagerung auf der Grundlage der derzeit verfügbaren Daten ist Aufgabe der Vorhabenträgerin BGE. Dies schließt auch die Zusammenstellung der für die Anwendung der Methode erforderlichen Daten und Beschreibungen sowie die anschließende Bewertung der geologischen Faktoren ein. In diesem Projekt sollte die Anwendung der entwickelten Methode exemplarisch erprobt werden. Für diesen Zweck wurden einige der in Kap. 4.2 vorgestellten, gut untersuchten Salzstrukturen herangezogen, die keine Teilgebiete im Sinne des § 13 StandAG (StandAG 2017) darstellen (Tab. 10). Daneben wurden in Abstimmung mit der BGE sechs exemplarische Teilgebiete für die Methodenerprobung ausgewählt (Tab. 10). Damit ist keine Vorfestlegung für eine potenzielle (Nicht-)Eignung der in der Phase II übertägig zu erkundenden Standortregionen verbunden. Die Auswahl dieser Teilgebiete richtete sich nach den unterschiedlichen geologischen Charakteristika der Salzstrukturen, um

möglichst große Spannbreiten in den geologischen Faktoren abbilden zu können. Kriterien für die beispielhafte Auswahl waren z. B.:

- Unterschiedliche Größen der Salzstrukturen
- Unterschiedliche regionaltektonische Lage und Genese der Salzstrukturen
- Unterschiedliche äußere Formen der Salzstrukturen
- Unterschiedliche Beteiligung der Salinare des Rotliegenden und Zechstein an der Struktur- bildung in den Salzstrukturen

Tab. 10: Gut erkundete Salzstrukturen und beispielhaft ausgewählte Teilgebiete für die exemplarische Anwendung und Erprobung der Methode, alphabetisch sortiert. Die ausgewählten Teilgebiete stellen keine Vorfestlegung hinsichtlich einer (Nicht-)Eignung für die in Phase II übertägig zu erkundenden Untersuchungsräume dar.

Salzstrukturname	Teilgebiet	Teilgebietskennung
Bahlburg	x	035_00TG_057_00IG_S_s_z
Berdum-Jever	x	031_00TG_050_00IG_S_s_z
Etzel	-	-
Gorleben	-	-
Heide	-	-
Krempe	x	063_00TG_149_00IG_S_s_z-ro
Lehrte-Sehnde	-	-
Meckelfeld	x	64_00TG_151_00IG_S_s_z-ro
Sarstedt	-	-
Wahn	x	024_00TG_029_00IG_S_s_z
Wathlingen-Hänigsen	-	-
Wittingen	x	049_00TG_106_00IG_S_s_z

Die Ergebnisse der exemplarischen Methodenanwendung sind in Tab. 11 dokumentiert. Als Daten- grundlage wurden die bei der BGR vorliegenden geologischen Informationen verwendet. Dazu zählten insbesondere die Salzstrukturbeschreibungen aus den InSpEE-Vorhaben in Anlage 1, die Angaben in der Literatur aus Kap. 2.2 und Kap. 4 sowie das 3D-Modell aus dem TUNB-Projekt (Jähne-Klingberg et al. 2022). Die von der BGE bei den Staatlichen Geologischen Diensten angeforderten und ggf. von der BGE weiterverarbeiteten Daten zu den Teilgebieten lagen der BGR nicht vor. Die Bewertungen sind daher entsprechend der verfügbaren ortsspezifischen Daten zu überprüfen und ggf. zu aktualisieren.

Aus der Kombination, aber auch aus der Gruppierung der geologischen Faktoren, können sich unterschiedliche Anwendungsoptionen ergeben. Zum einen können alle Teilgebiete gemeinsam

Standortauswahl

Pollok, L. et al. (2024): Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Wirtsgesteinsanteilen mit Barrierefunktion und der Internbauvariabilität in Salzstrukturen – Abschlussbericht; Hannover (BGR)



und systematisch mit dieser Methode bearbeitet werden. Zum anderen kann es z. B. sinnvoll sein, Doppelsalinarstrukturen als eigene Gruppe zu behandeln und untereinander zu bewerten und zu vergleichen. Eine andere Möglichkeit wäre der Vergleich von Salzstrukturen mit ähnlicher historischer Entwicklung (z. B. durch Einengungstektonik überprägte Salzstrukturen) innerhalb einer regionaltektonischen Einheit (z. B. Niedersächsisches Becken) oder entlang eines Strukturzugs (z. B. entlang des Uelzen-Lineaments). Darüber hinaus ist die entwickelte Methode soweit anpassbar, dass Faktoren entfernt, weitere für BGE relevante Faktoren (z. B. die Deckgebirgsmächtigkeit) hinzugefügt sowie ihre Gewichtung mit Kennziffern belegt oder verändert werden kann.

Tab. 11: Ergebnisse der beispielhaften Methodenanwendung an gut erkundeten Salzstrukturen und exemplarisch ausgewählten Teilgebieten (TG), alphabetisch sortiert.

Salzstruktur	Geologischer Faktor mit Gewichtung						
	1	2	3*	4	5	6**	7
	hoch	hoch	sehr hoch	hoch	gering	mittel	gering
Bahlburg (TG)	++	+	+	++	o	++	++
Berdum-Jever (TG)	++	++	+	o	++	++	++
Etzel	++	++	++	++	++	++	++
Gorleben	++	++	++	++	+	++	++
Heide	-	+	k. A.	k. A.	o	++	++
Krempe (TG)	o	+	k. A.	k. A.	o	++	++
Lehrte-Sehnde	++	o	+	++	+	+	++
Meckelfeld (TG)	+	++	o	++	o	++	++
Sarstedt	++	o	+	++	o	+	++
Wahn (TG)	++	-	++	++	o	+	++
Wathlingen-Hänigsen	++	-	o	++	-	++	++
Wittingen (TG)	++	-	o	++	-	++	++

Erläuterung der Bewertungen: ++ = sehr günstig; + = günstig; o = bedingt günstig; - = weniger günstig; k. A. = keine Angabe bzw. nicht zutreffend. Erläuterung der geologischen Faktoren bzw. deren Anwendung: 1 = Strukturaufbauendes Salinar; 2 = Entwicklungsphasen und regionalgeologisches Setting; 3 = Querschnittsfläche (*bei gut erkundeten Salzstrukturen (keine TG) wurden die ortsspezifisch ermittelten z2Na-Anteile (Datenpunkte in Abb. 29) verwendet, bei Teilgebieten wurden die Flächenanteile nach der Funktion der Ausgleichsgeraden aus Abb. 29 anhand der TG-Flächenangaben (aus: BGE 2020) ermittelt und bewertet; 4 = Mächtigkeit, 5 = Formfaktor, 6 = Primäre Steinsalz-Mächtigkeit (**es lagen keine konsistenten beckenübergreifenden Karten zu primären Steinsalzmächtigkeiten vor, die Daten sind tw. über Analogieschlüsse ermittelt worden und sollten, ggf. durch eine Kartenkonstruktion, überprüft und ggf. aktualisiert werden; 7 = Fazies.

5.5 Prognostizierbarkeit der Anteile potenzieller Wirtsgesteine nach Salzstrukturtypen und Strukturniveaus

Nach der Bewertung der Teilgebiete mit der entwickelten Methode sollte eine genauere Analyse der geologischen Eigenschaften der Teilgebiete durchgeführt werden. Dabei sind der jeweilige Salzstrukturtyp, der sich aus der Betrachtung der Genese bzw. der Salzstrukturreife ergibt, und das betrachtete Strukturniveau zu berücksichtigen. Abhängig davon ergeben sich unterschiedliche Internbaustile und Verteilungen sowie Anteile potenzieller Wirtsgesteine, die überschlägig prognostiziert werden können. Es kann zielführend sein, diese Detailbetrachtung nur für diejenigen Teilgebiete durchzuführen, die unter Anwendung der zuvor dargestellten Methode und der Prüfschritte in der rvSU besonders günstige geologische Voraussetzungen erwarten lassen (z. B. Kategorie A Gebiete (nach: BGE 2022b, 2023)). Durch den direkten Vergleich von Teilgebieten bzw. Untersuchungsräumen und deren lokalspezifischen geologischen Eigenschaften kann eine weitere räumliche Eingrenzung ermöglicht werden. Die Detailcharakterisierung erfordert jedoch die gleichzeitige Berücksichtigung einer Vielzahl von bestimmten geologischen Faktoren.

Die verschiedenen Entwicklungsphasen und damit die Reife einer Salzstruktur wurden in Kap. 3.3 erläutert. Die Genese und Reife einer Salzstruktur lässt sich aus der Salzstrukturform, aus Implikationen aus dem umgebenden Deckgebirge, aus den Mächtigkeiten der Ursprungsschichten, dem tektonischen Setting und, soweit bekannt, aus dem Internbau herleiten. Im Folgenden werden unterschiedlich gebildete Salzstrukturen gegenübergestellt. Analog zu den InSpEE-Studien werden die dort konzipierten „Internbautypen“ (vgl. Abb. 20) weiterentwickelt bzw. stärker differenziert (Tab. 12). Zu diesem Zweck wurden geologische Profilschnitte, die den inneren Aufbau gut untersuchter Salzstrukturen (vgl. Kap. 4.2) darstellen, eingehend untersucht. Dies ist nur für die ausschließlich aus Zechsteinsalinen aufgebauten Salzstrukturen möglich, da für die wenig erforschten Doppelsalinarstrukturen (Rotliegend- und Zechsteinsalinare, InSpEE Typ 5, 6 und 7, vgl. Abb. 20b) keine detaillierten Analysen zum Internbau vorliegen. Mangels neuer Erkenntnisse wird für diese Strukturen und die dort ausgewiesenen Teilgebiete auf die Untersuchungen im InSpEE-DS-Vorhaben verwiesen (Röhling et al. 2020). Der InSpEE Typ 1 wird hier ebenfalls nicht weiter behandelt, da es sich hierbei um Salzkissen ohne diapirischen Durchbruch handelt, die nach BGE (2020) zur stratiformen Lagerung gezählt und somit nicht in diesem Projekt berücksichtigt werden. Abschätzungen zu nutzbaren Anteilen dieses Typs können den Auswertungen des ersten InSpEE-Projekts entnommen werden (von Goerne et al. 2016).

Bei den nachfolgend dargestellten Auswertungen handelt es sich um erste, nicht abgeschlossene Auswertungen der BGR, die noch durch weitere Daten und vertiefende Analysen ergänzt und diskutiert werden müssen. Diese Analysen sind nicht Bestandteil dieses Projektes und werden daher hier nur kurz vorgestellt.

Tab. 12: Übersicht der Salzstruktur-Internbautypen mit gut erkundeten Salzstrukturbeispielen, die sich durch Unterschiede in ihrer Genese, Reife, Form und damit im Internbau auszeichnen. Einige Salzstrukturen können aufgrund ihrer Entwicklung und ihrer Merkmale ggf. zu mehreren Klassen zugeordnet werden. Je nach Grad der Erosion der Struktur können Relikte vorangegangener Entwicklungsphasen im Gebirgsbau enthalten bleiben.

Typ	Salzstruktur-Internbautyp	Geologische Charakteristika	Beispiel-Salzstrukturen
A1	Eingeengte Salzantiklinalen	Durch Einengungstektonik entstandene Antiklinalstrukturen mit Salz im Kern, teilweise mit erodiertem Deckgebirge. Überwiegend oberkretazisch entstanden. Ggf. in Regionen mit Hinweisen auf „Rafting“ auch triassisch angelegt (bisher im NGB nicht eindeutig belegt). Mit steigender Einengung nimmt die Wellenlänge ab und die Amplitude der Strukturen zu, Flanken überschieben sich oft gegenseitig in fortgeschrittenen Stadien. Häufig kommt es auch zu Intrusionen des z2Na in Salinarformationen des Deckgebirges (insb. ins Rötosalinar)	Asse, Harli, Wietze-Hambühren
A2	Eingeengte Salzantiklinalen mit diapirischem Durchbruch	wie A1, aber mit diapirischem Durchbruch durch das Deckgebirge aufgrund starker Erosion im Deckgebirge während der Heraushebung der Struktur. Im Salzstrukturumfeld sind häufig steile Winkeldiskordanzen zum liegenden Deckgebirge erkennbar.	Lehrte-Sehnde
B1	Juvenile Salzdiapire	Durch das Deckgebirge durchgebrochene, rel. kleine Diapire mit großen Salzreserven in Liefergebieten und Kissenfüßen; Diapire haben kaum Abtragung erfahren und keine oder schwach entwickelte sekundäre Randsenken. Daher sind im Dachbereich große Anteile der jüngeren Zechsteinzyklen erhalten.	Lübtheen
B2	Mittelreife Salzdiapire	Gegenüber juvenilen Diapiren weiter entwickelte Diapire, mit wenig Salzreserven in Liefergebieten. Sekundäre Randsenken sind vorhanden. Durch tiefer einschneidende Erosion wurden Teile der jüngeren Zechsteinzyklen im Dachbereich entfernt.	Gorleben
B3	Sehr reife Salzdiapire	Sehr weit entwickelte Diapire mit großer vertikaler Ausdehnung und somit starker Streckung der Salinarformationen; mit vollständiger oder teilweiser Ausprägung sog. „welds“, somit mit wenig Salzreserven aus umliegenden Liefergebieten; ausgeprägte sekundäre Randsenken sind vorhanden; langanhaltendes Diapistadium mit meist starker Erosion des Topbereichs in der Trias oder im Jura.	Etzel

Typ	Salzstruktur-Internbautyp	Geologische Charakteristika	Beispiel-Salzstrukturen
C	Eingeengte Salzdiapire	Durch Einengungstektonik überprägte Salzdiapire, oft pilzförmig mit weitreichenden Überhängen bzw. Salzüberschiebungen. Die teils große Spannweite im Internbau und der äußeren Geometrie ergibt sich durch die große Spannweite der vor der Einengung bestehenden Salzstrukturtypen (Typen B1-B3; D)	Sarstedt
D	Salzspalten	Reaktiver Diapirismus mit Spaltenintrusionen in insb. extensionale/transtensionale Störungszonen. Meist größere Asymmetrie im Gebirgsbau und intern höherer Ordnungsgrad im Großfaltenbau oft mit einheitlicher/ähnlicher Faltenvergenz	Allertal

Um die Verteilung der unterschiedlichen Salinare und damit auch der potenziellen WbB umfassend zu erfassen, wurden die gut erkundeten Salzstrukturen in ihrer gesamten vertikalen Ausdehnung untersucht. Also auch in flachen (mit Salzscheibe) und deutlich tieferen Bereichen, als sie für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Betracht gezogen werden. Dabei wurden die Salzstrukturen in bis zu vier verschiedene Strukturniveaus unterteilt. Diese sind: Dach, Schlot, Kern/Kissen und Fuß. Wo möglich, wurden diese Ebenen noch in Top, Mitte und Basisbereiche eingeteilt. Welche Strukturniveaus überhaupt in einer Salzstruktur entwickelt sind, hängt vom jeweiligen Strukturtyp bzw. der Reife ab. So besitzen z. B. Salzantiklinalen keinen Schlotbereich, da sich dieser nur bei Diapiren bestimmten Typs ausbilden kann. Zur Veranschaulichung dieser Unterteilung werden die verschiedenen Strukturniveaus anhand von schematischen Profilschnitten verschiedener Strukturtypen wiedergegeben (Abb. 41).

Am tiefsten liegt der sog. Fußbereich, der weitgehend dem regionalen Tiefenniveau und der Mächtigkeit der an die Salzstruktur angrenzenden flachlagernden Salinarformationen ("source layer") entspricht. Darüber liegt die Kern- oder Kissenzone, die die ursprüngliche kissenförmige Akkumulation oder Reste davon zeigt. Zur Definition der Strukturniveaus Fuß, Kissen oder Kern sind u. a. die Schichtabrisssgeometrien der post-salinaren Sedimente zu beachten. Kissen zeigen generell eine konkordante Schichtenfolge zum Hangenden. Der Kernbereich beschreibt Bereiche, in denen Salz kompressiv eingeschert wird und auch prä-existierenden Kissen aufsitzen kann. Der Kern kann sich sowohl im Liegenden des ursprünglich konkordant auflagernden Post-Salinars als auch bei Überprägung bereits vorhandener Salzstrukturen oberhalb der Abrisse des Post-Salinars ausbilden. Als oberstes folgt der Dachbereich. Im Falle von weit entwickelten Diapiren liegt zwischen Kissen- bzw. Kernzone und Dach noch der Schlot. Ohne detaillierte Informationen aus Bohr- und Seismikdaten ist der Übergang zwischen den Strukturniveaus z. T. nur mit größerer Unschärfe zu definieren.

Nicht jeder genutzte Profilschnitt erstreckte sich über die gesamte vertikale Ausdehnung der Salzstruktur. Dies liegt vor allem daran, dass häufig nur die oberen bis mittleren Strukturbereiche durch Bergbau und Bohrungen erkundet wurden. Die tieferen, weniger oder nicht erkundeten Zonen wurden dann entweder nicht in den Profilschnitten dargestellt oder durch geologische Modellvorstellungen ergänzt.

Dies bedeutet gleichzeitig, dass die Kenntnis zum internen Aufbau in den oberen bis mittleren Strukturteilen größer und besser mit Daten belegt ist. Zudem kann ein Profilschnitt nur einen Teil des Internbaus einer Salzstruktur abbilden. Entsprechende Ungewissheiten sind zu berücksichtigen.

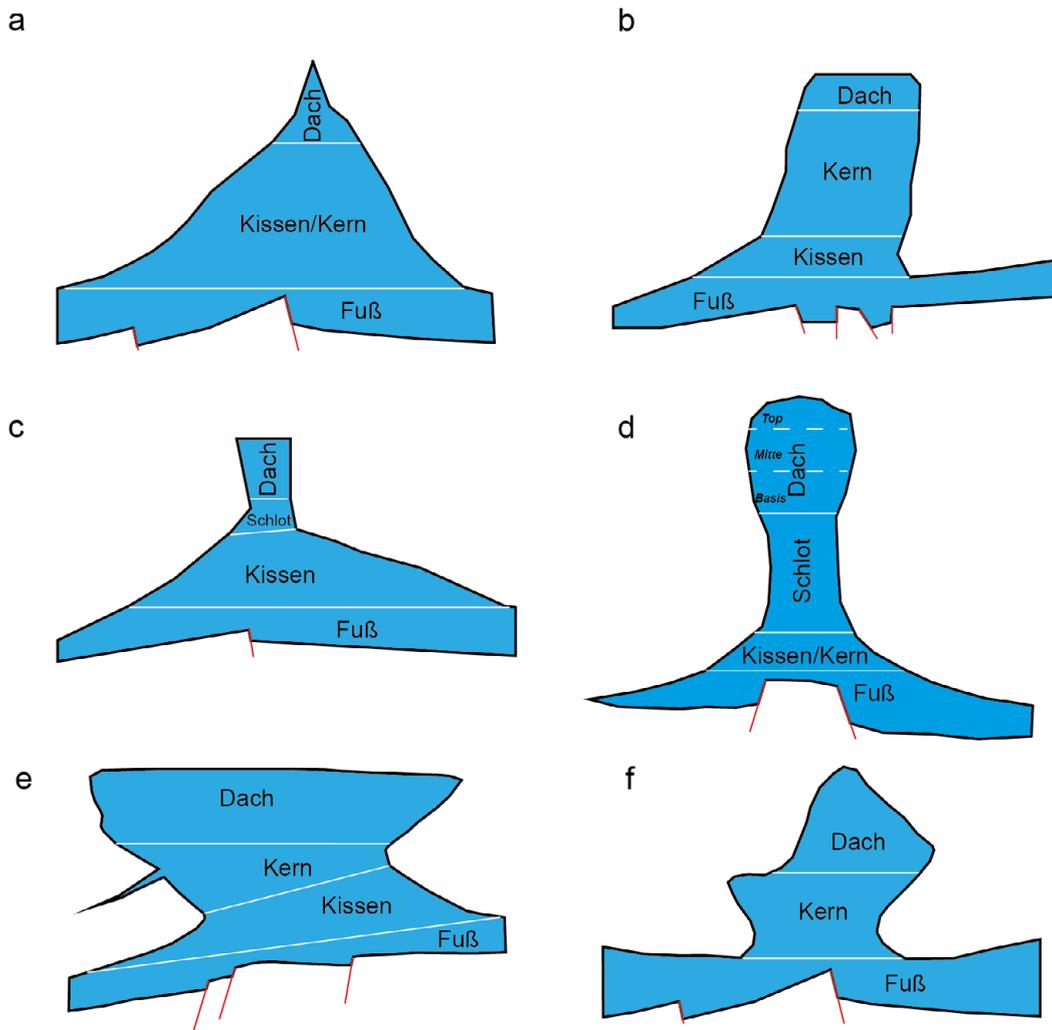


Abb. 41: Darstellung unterschiedlicher Strukturniveaus in unterschiedlichen Salzstrukturtypen. Teilweise konnten die einzelnen Bereiche zusätzlich in Top, Mitte, Basis unterteilt werden (d). Strukturtypen: a) Eingeeengte Salzantiklinale (A1), b) Eingeeengte Salzantiklinale mit diapirischem Durchbruch (A2), c) juveniler Salzdiapir (B1), d) mittelreifer Salzdiapir (B2), e) eingeeengter Salzdiapir (C), f) Salzspalte (D); vgl. Tab. 12. Blau: Salinarkörper, rote Linien: Sockelstörungen mit Versatz. Zur Definition der Fuß-/Kissen- und Kernbereiche sind die Geometrien und Abrisse der post-salinaren Sedimente zu beachten (s. Text).

In jedem Strukturniveau wurden die Verteilung und Anteile des z_{2Na} (als potenzieller WbB) auskartiert. Eine beispielhafte Analyse ist in Abb. 42 für die Salzstruktur Sarstedt dargestellt (entspricht Typ C in Abb. 41e). Dabei wurden die Anteile von z_{2Na} in den genannten Strukturniveaus entlang einer horizontalen Strecke in Relation zu den anderen Salinarschichten bzw. zum Gesamtdurchmesser der Salzstruktur gesetzt.

Standortauswahl

Pollok, L. et al. (2024): Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Wirtsgesteinsanteilen mit Barrierefunktion und der Internbauvariabilität in Salzstrukturen – Abschlussbericht; Hannover (BGR)

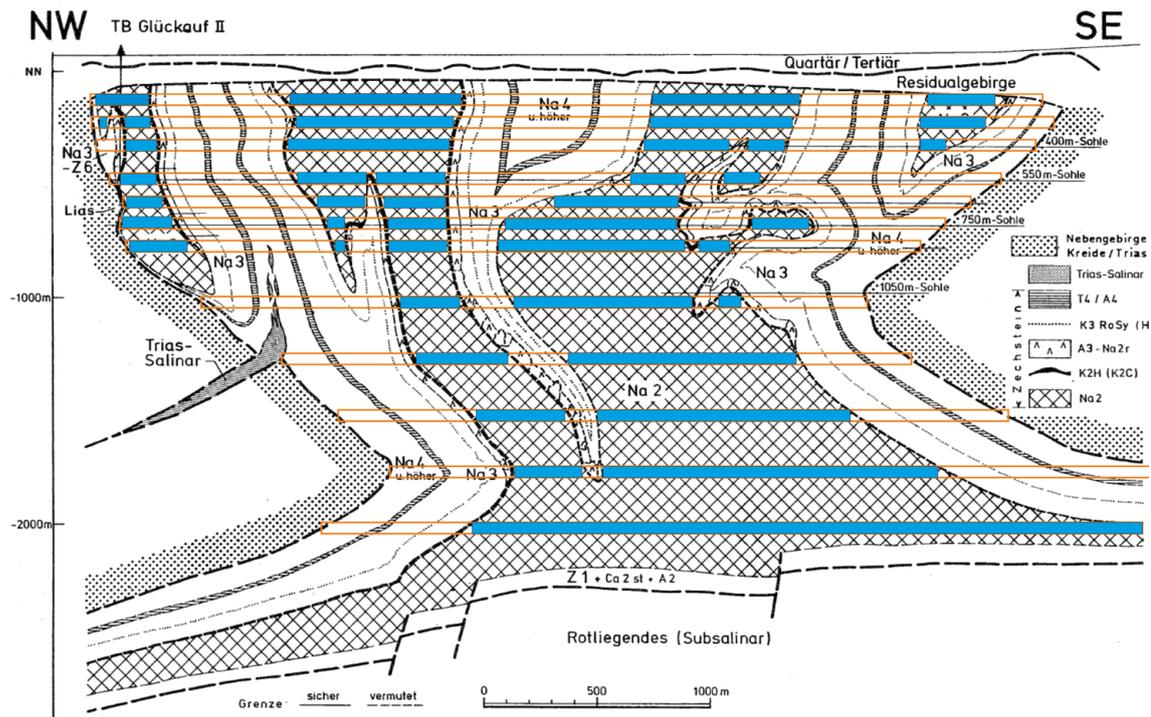


Abb. 42: Auswertung der Verteilung von z2Na (als potenzieller WbB, markiert durch „Na2“ und Kreuzschraffur) entsprechend der zuvor definierten Strukturniveaus (von Fuß- bis Dachbereich) in der gut erkundeten Salzstruktur Sarstedt (Typ C, vgl. Tab. 12). Blaue Strecken stellen die Anteile des z2Na, orangefarbene Linien die anderen Salinareinheiten dar (verändert nach: Lepper et al. 1984).

Die Ergebnisse aus den Profilauswertungen werden gemäß der Strukturtypdifferenzierung in Tab. 12 in Abb. 43 angegeben und können auf Teilgebiete mit ähnlichen geologischen Eigenschaften übertragen werden. Die Ergebnisse stellen die Mittelwerte pro Strukturniveau aus den untersuchten Salzstrukturen desselben Strukturtyps dar und werden im Folgenden kurz erläutert.

Insgesamt variieren die z2Na-Anteile in den verschiedenen Typen und Strukturniveaus zwischen 0,01 und 0,85. Typ A1 (eingengte Salzantiklinalen) zeigt einen stetigen Anstieg vom Dach bis zur Kissenbasis und dann eine Abnahme des z2Na-Anteils im Fußniveau. Die geringen Anteile im Dachbereich sind durch die dort noch vorkommenden jüngeren Salinare zu erklären, die bei diesem Typ auch in tiefere Bereiche eingefaltet sein können (vgl. Abb. 20a, InSpEE Typ 2; Abb. 23).

Stärker herausgehobene Salzantiklinalen (Typ A2) zeigen einen vergleichbaren Trend, jedoch mit grundsätzlich höheren z2Na-Anteilen in allen Strukturebenen und stärkerem Anstieg in der Dachregion. Dies ist auf die größere Salzakkumulation innerhalb dieser Strukturen gegenüber den Typ A1 Salzantiklinalen und die teilweise Erosion der jüngeren Formationen in den Dachbereichen zurückzuführen.

Die juvenilen Diapire (Typ B1) sind entsprechend ihrer Genese etwas weiterentwickelt als die Salzantiklinalen, was sich durch ein größeres diapirisch durchbrochenes Salzvolumen auszeichnet.

Sie zeigen im Dachbereich die gleiche Tendenz wie die Salzantiklinalen vom Typ A2, jedoch mit etwas geringeren z2Na-Anteilen. Innerhalb der Gruppe der Diapire weisen die juvenilen Diapire im Vergleich die geringsten Anteile im Dach auf. Dies liegt daran, dass in ihnen nur ein schmaler z2Na-Zentralsattel vorliegt (vgl. Abb. 24), der die jüngeren Zechsteinfohlen nur geringfügig gegen die Flanken verdrängt hat und somit noch kein nennenswertes laterales Wachstum des Diapirs stattgefunden hat. Daher nehmen die Anteile in Richtung des Schlots stark zu und in tieferen Kissenbereichen, aus denen z2Na abgewandert ist, wieder ab. Dieser Trend ergibt sich auch aus der geringen Abtragung des Dachbereiches, wodurch das liegende z2Na noch nicht exhumiert werden konnte.

Mittlereife (Typ B2) und eingeeengte Salzdiapire (Typ C) zeigen abnehmende z2Na-Anteile vom Top bis zur Basis ihrer Dachbereiche, die dann im Schlot bis zum Fuß wieder ansteigen. Die höchsten z2Na-Anteile in den Dachbereichen werden durch sehr reife Salzdiapire (Typ B3) repräsentiert. Hier ist das z2Na aus der Umgebung vollständig in den Diapir eingewandert und hat die jüngeren Salinare verdrängt bzw. sind diese durch Erosion weitgehend entfernt worden. Mengenverhältnisse zu tieferen Strukturniveaus dieses Typs liegen leider nicht vor, da diese aufgrund der großen Tiefenlagen nicht bergmännisch aufgeschlossen und nur punktuell erteuft wurden.

Die z2Na-Anteile in Salzspalten (Typ D) zeigen einen ähnlichen Trend zu den Salzantiklinalen des Typs A1. Sie liegen etwa zwischen den Anteilen des Typs A1 und A2. Da das Salz in diesen Strukturen im Wesentlichen nur die Störungszonen („Spalten“) ausgefüllt hat, ohne diese durch Akkumulation wesentlich zu verbreitern, nehmen die Anteile vom Dach bis zur Basis ihres Kerns zu.

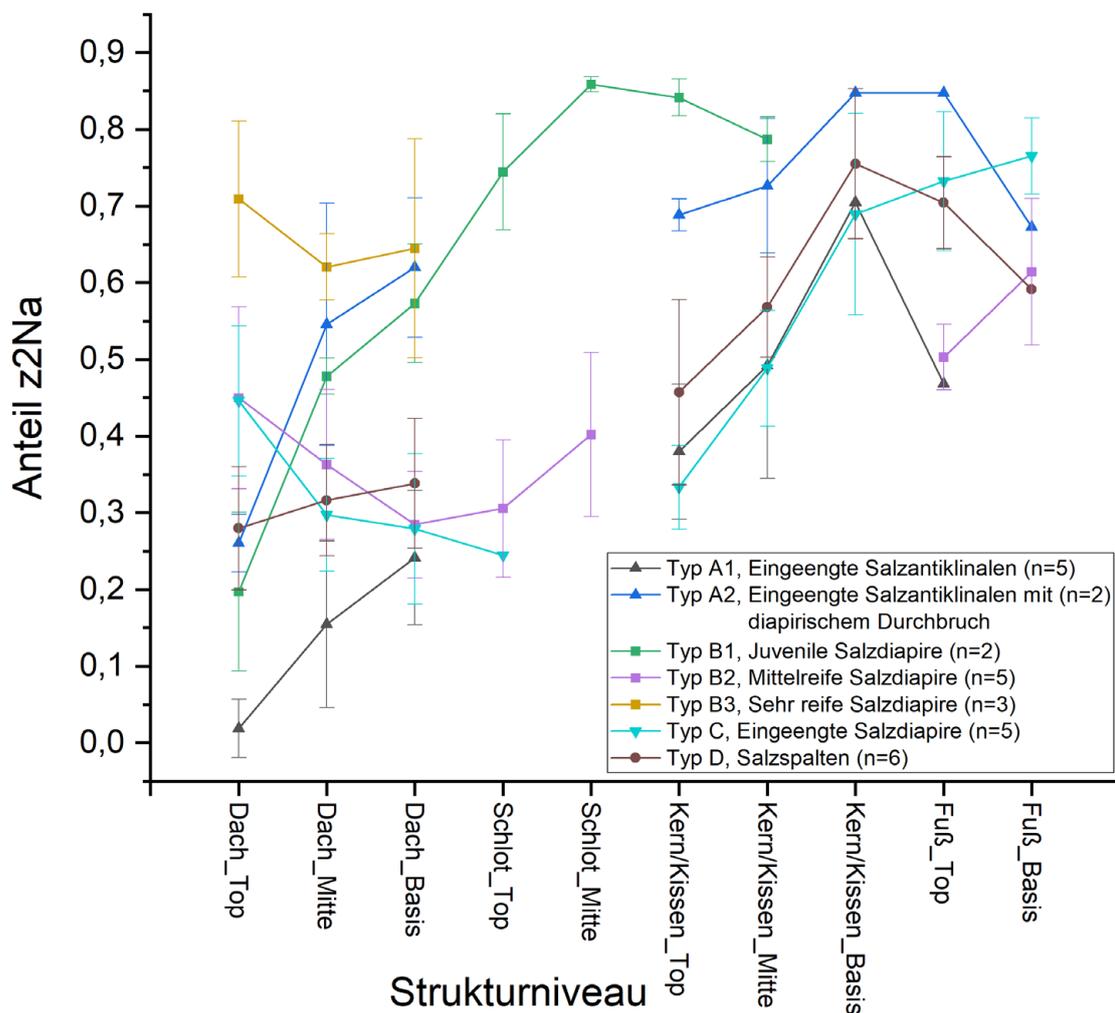


Abb. 43: Verteilung der Anteile von z2Na (potenzieller WbB) über verschiedene Strukturturniveaus unterschiedlicher Salzstrukturtypen (Mittelwerte mit Standardabweichung). Einige Strukturtypen enthalten nicht alle Strukturturniveaus und die ausgewerteten Profilschnitte umfassen nicht immer alle Niveaus. „n“ gibt die Anzahl ausgewerteter Profilschnitte pro Strukturtyp an. Die Dachbereiche von Salzstrukturen sind i. d. R. wesentlich besser bergmännisch erkundet als tiefere Strukturturniveaus, sodass die Analyse in diesen Bereichen größere Unschärfen aufweist.

Die im Rahmen dieses Projekts exemplarisch für die Methodenerprobung ausgewählten Teilgebiete (vgl. Kap. 5.4) können den folgenden Typen zugeordnet werden:

- Typ B2: Bahlburg, Meckelfeld
- Typ B3: Berdum-Jever
- Typ C: Wahn, Zwischenahn
- Krempe: siehe Projekt InSpEE-DS (Röhling et al. 2020)

An dieser Stelle ist anzumerken, dass bis zur maximalen Suchteufe von 1500 m u. GOK vsl. davon auszugehen ist, dass sich die Suche nach WbB in den meisten Teilgebieten auf die Dachbereiche und z. T. auf die oberen bis mittleren Kern- bzw. Schlotbereiche konzentrieren wird. Hierauf können die hier skizzierten Analysen fokussiert durchgeführt werden. Die anderen Strukturniveaus liegen i. d. R. zu tief.

Bei den durchgeführten Untersuchungen wurden z. T. über mehrere Strukturen gemittelte Trends für Anteile von WbB für unterschiedliche Strukturtypen und -niveaus erarbeitet. Diese Trends sind als überschlägige Abschätzungen zu verstehen, die strukturspezifisch abweichen können (s. Fehlerbalken) und in der späteren Erkundung zu verifizieren sind. Diese Tendenzen widersprechen auch nicht den Analysen und Ermittlungen der Anteile potenzieller WbB im Faktor „Querschnittsfläche“ (Kap. 5.1.2.1). Die dort erzielten Ergebnisse wurden auf der Grundlage von überwiegend detailliert auskartierten und mit umfangreichen Daten belegten geologischen Sohlenrissen generiert. Die in diesem Kapitel ausgewerteten Profilschnitte dürften hingegen in vielen Tiefenbereichen schlechter durch Daten belegt und stärker nach den geologischen Modellvorstellungen der Ersteller generalisiert sein. Dennoch konnten anhand mehrerer analysierter Fallbeispiele pro Strukturtyp vergleichbare Tendenzen erkannt werden. Die Trends sollen bei der näheren Betrachtung der ggf. wenigen verbleibenden Untersuchungsräume mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen dabei unterstützen, einerseits zwischen verschiedenen Strukturtypen zu unterscheiden und andererseits die jeweils geologisch günstigsten Strukturniveaus mit höheren Wirtsgesteinsanteilen zu identifizieren.

5.6 Ungewissheiten und Einschränkungen der Methode

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Untersuchung und Prognose des Internbaus von Salzstrukturen mit verschiedenen Einschränkungen verbunden ist. In den vorangegangenen Kapiteln wurden verschiedene Ungewissheiten angesprochen, die im Folgenden kurz zusammengefasst werden.

Für die entwickelte Methode gab es keine Vorlage aus der bestehenden Fachliteratur, es handelt sich um eine Neuentwicklung. Die einzelnen geologischen Faktoren, die der Methode zugrunde liegen, wurden durch umfangreiche Recherchen in der Fachliteratur und Erfahrungen aus Standorterkundungen identifiziert und beziehen sich in dieser Form zunächst nur auf die Salinarstrukturen des Norddeutschen Beckens. Die in gut untersuchten Salzstrukturen erkennbaren Internbaumuster lassen sich in der Regel nicht einem einzelnen konkreten geologischen Faktor zuordnen, sondern sind auf ein komplexes Zusammenwirken mehrerer geologischer Einflüsse zurückzuführen. Daher ist auch die differenzierte Gewichtung einzelner Faktoren mit Ungewissheiten behaftet.

In Relation zur Anzahl von in Norddeutschland vorkommenden Salzstrukturen gibt es insgesamt nur wenige gut untersuchte Fallbeispiele, was die statistische Absicherung der erzielten Ergebnisse einschränkt. Gleichwohl bleibt an dieser Stelle festzuhalten, dass in Deutschland die umfangreichsten und vielfältigsten aufschlussgebundenen Kenntnisse zum Internbau von Salzstrukturen vorliegen. Die in größerem Umfang untertägig erkundeten Salzstrukturen und damit die Kenntnisse über den Internbau konzentrieren sich vor allem auf den südlichen Rand des Norddeutschen Beckens, während in den übrigen Teilen des Beckens nur einzelne Strukturen umfassend erkundet sind. Gegenüber den

aus Zechsteinsalinaren aufgebauten Salzstrukturen weisen die Doppelsalinare mit Beteiligung des Rotliegendesalinars ein großes Untersuchungsdefizit auf.

Mit geophysikalischen Luft- oder Oberflächenmethoden ist der Salzstrukturinternbau nicht oder nur punktuell auflösbar. Zur Erkundung der internen Detailstrukturen sind invasive Erkundungsmethoden erforderlich. Auch wenn eine Erkundungsbohrung keine ausreichend mächtigen Steinsalz-homogenbereiche für einen WbB angetroffen hat, ist dies kein Beleg, dass diese nicht an anderer Stelle vorhanden sind. Das Prozessverständnis der Halokinese und die zahlreichen Fallbeispiele in Norddeutschland belegen, dass ausreichend große Steinsalz-Homogenbereiche bei bestimmten Salzstrukturtypen und -niveaus i. d. R. zu erwarten sind. Daneben sind die äußeren Abmessungen und damit die Volumina der Salzstrukturen und der darin enthaltenen Teilgebiete je nach Art und Alter der Daten mit Unsicherheiten behaftet. Dies ist bei der Anwendung von Faktoren, die auf die Geometrie und Morphologie der Salinarkörper abzielen (z. B. vorhandene Fläche in einer bestimmten Tiefe), zu berücksichtigen. Gegebenenfalls sind ältere seismische Daten im Einzelfall mit modernen Auswerteverfahren zu überprüfen. Dies gilt insbesondere für geologisch vielversprechende Untersuchungsräume, um eine bessere Vergleichbarkeit herzustellen.

Die aus der Literatur entnommenen geologischen Profilschnitte und Sohlenrisse der norddeutschen Fallstudien wurden nahezu unverändert übernommen, nur in begrenztem Umfang auf ihre Plausibilität hin überprüft und z. B. nicht mit den Ergebnissen der Erkundungen verglichen, die zu ihrer Erstellung geführt haben. Das Strukturbild außerhalb der bergmännischen Aufschlüsse ist überwiegend hypothetisch. Die geologischen Modellvorstellungen zur Salztektone können je nach Standort, Erstellungsdatum und Bearbeiter variieren. Die Darstellungen aus den Bergwerken sind z. T. mehrere Jahrzehnte alt und nach den damals existierenden Kenntnissen zur Salzstratigraphie und Salztektone erzeugt worden. Die dargestellten internen Strukturen können nur für einen bestimmten Bereich des Salzdiapirs repräsentativ sein, sofern es sich um zweidimensionale Profilschnitte und Sohlenrisse handelt. Geologische 3D-Modelle des Salzgebirges sind erst in den letzten Jahren und nur in wenigen Fällen erstellt worden.

Auch in der feinstratigraphischen Gliederung des Zechsteins sind in den letzten Jahrzehnten Fortschritte erzielt worden, die in älteren Aufnahmen des Salzgebirges möglicherweise noch nicht in diesem Detail vorlagen. Die verwendeten älteren stratigraphischen Bezeichnungen und Kürzel lassen sich in der Regel problemlos in die neuen Bezeichnungen übersetzen.

Die ursprünglichen Ablagerungsverhältnisse, d. h. die primär abgelagerten Zechsteinmächtigkeiten bzw. die einzelnen Steinsalzhorizonte, können nur eingeschränkt und mit großem Aufwand rekonstruiert werden, da das Zechsteinsalz im Norddeutschen Becken vielerorts weitgehend mobilisiert und in Salzstrukturen migriert ist.

Die Methode ist nicht geeignet, um den jeweiligen inneren Aufbau (z. B. räumlicher Verlauf von Schichtabfolgen) von Untersuchungsräumen exakt vorherzusagen, der nur durch standortspezifische Erkundungsdaten detailliert analysiert werden kann. Die entwickelte Methode ersetzt daher keinesfalls die notwendige über- und untertägige Erkundung.

5.7 Möglichkeiten der Methodenanwendung im Rahmen des StandAG

Die räumliche Konfiguration von Gesteinskörpern ist eine wesentliche Grundlage für die Geosynthese der Teilgebiete im Rahmen der rvSU (BGE 2022a). Die Lagerungsverhältnisse von verschiedenen Gesteinsabfolgen, insbesondere jene der Wirtsgesteine mit Barrierefunktion (WbB) zur späteren Ausweisung eines ewG, wirken sich direkt auf die sicherheitsgerichtete Bewertung der Teilgebiete bzw. der Untersuchungsräume (UR) aus. Weiterhin bilden diese die Grundlage für die Bewertungen der Mindestanforderungen 2 (Mindestmächtigkeit) und 4 (Fläche des Endlagers) sowie der geoWK2 (Konfiguration der Gesteinskörper) und geoWK3 (räumliche Charakterisierbarkeit) in den rvSU gemäß StandAG (StandAG 2017). Für die Bewertung der vorgenannten Kriterien und Anforderungen kann die hier entwickelte Methode wichtige Beiträge zur Evaluierung der UR hinsichtlich ihrer geologischen Voraussetzungen für potenzielle Wirtsgesteinsvorkommen leisten.

Gemäß diesen gesetzlichen Anforderungen kommt insbesondere dem Faktor „Querschnittsfläche“ im Hinblick auf die technische Realisierbarkeit sowie die Robustheit und Sicherheitsreserven für den sicheren Einschluss und damit für die Reduzierung der Anzahl bzw. der Flächen der Untersuchungsräume eine hohe Bedeutung zu. Der Faktor kann bei der Anwendung des geoWK-2 („Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper, Indikator „flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)“, Anlage 2 zu § 24 Absatz 3 StandAG) oder im Rahmen der rvSU in den Prüfschritten 1 und 2 (gemäß § 7 Abs. 6 Nr. 3f, EndlSiUntV (BGE 2023; EndlSiUntV) berücksichtigt werden. Besonders bei relativ kleinen UR sollte die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ anhand der erzielten Ergebnisse zielgerichtet überprüft werden. Die Querschnittsfläche sollte im Verhältnis zur verfügbaren Mächtigkeit betrachtet werden, so dass aus der gemeinsamen Betrachtung eine Volumenabschätzung möglich ist (geowK-2, Kriterium „Volumen des ewG“, Anlage 2 zu § 24 Absatz 3 StandAG).

6 Fazit und Empfehlungen

Basierend auf einer Literaturstudie und den Erkenntnissen aus der jahrzehntelangen Erkundung von Salzlagerstätten in Mittel- und Norddeutschland wurden sieben geologische Faktoren unterschiedlicher Relevanz ermittelt, die Einfluss auf den internen Aufbau von Salzdiapiren bzw. die Verteilung von Steinsalzbereichen und potenziellen Wirtsgesteinsbereichen mit Barrierefunktion in diesen Salzdiapiren haben. Die auf der Grundlage dieser geologischen Charakteristika entwickelte Methode bietet im Rahmen der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen die Möglichkeit, die 60 Teilgebiete in Steinsalz in steiler Lagerung hinsichtlich ihrer geologischen Voraussetzungen für das Auffinden größerer Wirtsgesteinsbereiche mit Barrierefunktion (für die spätere Ausweisung eines ewG) systematisch zu bewerten. Die systematische Bewertung der Teilgebiete bzw. Untersuchungsräume ist Aufgabe der Vorhabenträgerin BGE. Gegenstand dieses Arbeitspaketes war die Entwicklung und exemplarische Darstellung der Anwendungsreife der Methode.

Eine weniger günstige Bewertung, die sich aus der Methode in der Summe oder für einzelne geologische Faktoren ergibt, ist nicht in jedem Fall gleichbedeutend mit einer Nichteignung. Es ist

auch nicht zu erwarten, dass die Untersuchungsräume alle geologischen Faktoren optimal erfüllen. Vielmehr sollen mit Hilfe dieser Methode untersuchungswürdige Gebiete bzw. Salzstrukturen mit den voraussichtlich günstigsten geologischen Rahmenbedingungen für die übertägige Erkundung in Phase II des Verfahrens identifiziert werden. Damit kann die Methode dazu beitragen, die große Anzahl und Fläche der Untersuchungsräume zu reduzieren.

Die aus der Anwendung der Methode resultierenden Ergebnisse können beispielsweise in die Prüfung der Mindestanforderungen 2 (Mindestmächtigkeit) und 4 (Fläche des Endlagers) sowie in die Bewertung des geoWK2 (Konfiguration der Gesteinskörper) und geoWK3 (räumliche Charakterisierbarkeit) in den rvSU (gem. StandAG 2017) oder in die Prüfschritte 1 und 2 der rvSU (gem. § 7 Abs. 6 Nr. 3f, EndISiUntV (BGE 2023; EndISiUntV) einfließen.

Es wird empfohlen zu prüfen, ob mehrere Salzdiapire, die zu einem Teilgebiet zusammengefasst wurden, hinsichtlich ihrer geologischen Faktoren unterschiedlich bewertet werden und damit ggf. zu unterschiedlichen Ergebnissen bei der Anwendung der Methode führen. In diesen Fällen wird eine differenzierte Bewertung für die einzelnen Diapire empfohlen, ggf. unter Aufteilung des Teilgebiets in verschiedene Untersuchungsräume mit einheitlichen geowissenschaftlichen Eigenschaften gemäß BGE (2022b).

Eine exakte Vorhersage des jeweiligen Internbaus der Untersuchungsräume in Salzdiapiren ist auf Basis geologischer Faktoren und bestehender Datenlage sowie methodisch nach dem Stand von Wissenschaft und Technik nicht möglich und kann nur durch standortspezifische Erkundungsdaten erreicht werden. Auch dann können, je nach Explorationsdichte, noch skalenabhängige Restungewissheiten bestehen bleiben. Aus den bisherigen Erkenntnissen gut untersuchter deutscher Salzstrukturen lassen sich jedoch einige grundsätzliche Charakteristika ableiten. In Abhängigkeit folgender Faktoren können überschlägige Prognosen zum Großfaltenbau und zu den Anteilen und der Verteilung potenzieller Wirtsgesteine in Salzdiapiren abgeleitet werden:

- Strukturaufbauende Salinare in den Salzdiapiren
- Entwicklungsgeschichte, Reifegrad und strukturgeologisches Setting der Salzstruktur
- Größe der Salzstruktur (Fläche und Mächtigkeit) in endlagerrelevanten Teufen
- Äußere Form der Salzstruktur
- Paläogeographische Beckenlage mit abgelagerten primären Steinsalzmächtigkeiten
- Strukturniveau (Dach, Schlot, Kern, Kissen, Fuß) innerhalb der Salzstruktur

Nach derzeitigem Kenntnisstand und vielfach in norddeutschen Salzstrukturen nachgewiesen, bietet das sehr reine, ursprünglich in großen Mächtigkeiten abgelagerte und in großen Volumina akkumulierte Steinsalz der Zechstein-zeitlichen Staßfurt-Formation (z2Na) die besten geologischen Voraussetzungen für das Vorkommen großer WbB für die zukünftige Ausweisung eines ewG in TG mit Steinsalz in steiler Lagerung.

Die gut erkundeten und ausgewerteten Referenzsalzstrukturen belegen, dass Steinsalz-Homogenbereiche in ausreichender Größe in Teilgebieten für die Realisierung eines HAW-Endlagers vorhanden sein sollten, deren Anteile jedoch je nach Strukturgröße, Strukturtyp, dem jeweiligen Strukturniveau und der Entwicklung der Struktur variieren. Die aus Sicht der BGR günstigsten geologischen Verhältnisse liegen für Salzdiapire vor, die möglichst viele der folgenden Merkmale aufweisen:

- Diapire mit ausschließlich Zechsteinsalinen als strukturbildende Salze in endlagerrelevanten Teufen,
- Diapire mit großen Querschnittsflächen in endlagerrelevanten Teufen,
- Diapire mit langsamer, einphasiger Genese (ohne tektonische Überprägung durch z. B. in der Vergangenheit anders orientierte oder kompressive Deformation),
- Diapire außerhalb von größeren Störungszonen und invertierten Beckenbereichen, z. B. auf tektonisch stabilen Blöcken,
- Beckenzentral gelegene Diapire gegenüber solchen in Beckenrandlagen,
- Diapire mit wenig komplexer äußerer Morphologie (z. B. mit vertikalen Flanken, ohne schmalen Schlot und keinen sehr weit ausladenden Überhängen).

Diese Eigenschaften bzw. geologischen Faktoren gelten ausschließlich für die norddeutschen Salzdiapire (Steinsalz in steiler Lagerung). Eine Übertragbarkeit auf in diesem Projekt nicht betrachtete stratiforme Salzformationen und Salzkissen sowie dort ausgewiesene Teilgebiete ist gesondert zu prüfen.

Literaturverzeichnis

- Adamuszek, M.; Tămaş, D. M.; Barabasch, J. & Urai, J. L. (2021): Rheological stratification in impure rock salt during long-term creep: morphology, microstructure, and numerical models of multilayer folds in the Ocnele Mari salt mine, Romania. *Solid Earth*, 12, 9: 2041 – 2065 S. DOI: 10.5194/se-12-2041-2021.
- Aftabi, P.; Roustaie, M.; Alsop, G. I. & Talbot, C. J. (2010): InSAR mapping and modelling of an active Iranian salt extrusion. *Journal of the Geological Society*, 167, 1: 155 – 170 S. DOI: 10.1144/0016-76492008-165.
- Ahlborn, O. & Richter-Bernburg, G. (1953): Exkursion zum Salzstock Benthe (Hannover), mit Befahrung der Kaliwerke Ronnenberg und Hansa am 13. Mai 1953. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 105, 4: 855 – 865 S.
- Alfarra, A.; Bertrams, N.; Bollingerfehr, W.; Eickemeier, R.; Flügge, J.; Frenzel, B.; Maßmann, J.; Mayer, K.-M.; Mönig, J.; Mrugalla, S.; Müller-Hoeppe, N.; Reinhold, K.; Rübel, A.; Schubarth-Engelschall, N.; Simo, E.; Thiedau, J.; Thiemeyer, T.; Weber, J. R. & Wolf, J. (2020): Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Tongesteins-formation geringerer Mächtigkeit (T2) - Ergebnisse aus dem Vorhaben RESUS. BGE TECHNOLOGY GmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH, Bericht: 186 S.; Peine.
- Alsop, G. I.; Weinberger, R.; Levi, T. & Marco, S. (2015): Deformation within an exposed salt wall: Recumbent folding and extrusion of evaporites in the Dead Sea Basin. *Journal of Structural Geology*, 70: 95 – 118 S. DOI: 10.1016/j.jsg.2014.11.006.
- Baldschuhn, R.; Jaritz, W.; Kockel, F. & Roth, W. (1979a): Katalog der niedersächsischen Salzlagerstätten. Teil I: Adolphsdorf – Krummendeich. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Bericht, 217 S.; Hannover.
- Baldschuhn, R.; Jaritz, W.; Kockel, F. & Roth, W. (1979b): Katalog der niedersächsischen Salzlagerstätten. Teil II: Landschaftspolder – Zwischenahn. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Bericht: 221 S.; Hannover.
- Baldschuhn, R.; Binot, F.; Fleig, S.; Kockel, F.; Best, G.; Brückner-Röhling, S.; Deneke, E.; Frisch, U.; Hoffmann, N.; Jürgens, U.; Krull, P.; Röhling, H.-G.; Schmitz, J.; Sattler-Kosinowski, S.; Stancu-Kristoff, G. & Zirngast, M. (2001): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor: Strukturen, Strukturentwicklung, Paläogeographie. *Geologisches Jahrbuch*, A, 153: 88 S.
- Barnett, H. G.; Ireland, M. T. & Van der Land, C. (2023): Characterising the internal structural complexity of the Southern North Sea Zechstein Supergroup Evaporites. *Basin Research*, 35, 5: 1651 – 1673 S. DOI: <https://doi.org/10.1111/bre.12768>.

Standortauswahl

Pollok, L. et al. (2024): Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Wirtsgesteinsanteilen mit Barrierefunktion und der Internbauvariabilität in Salzstrukturen – Abschlussbericht; Hannover (BGR)



- Behlau, J.; Mingerzahn, G. & Bornemann, O. (2000): ERA Morsleben. Erarbeitung eines geologischen Lagerstättenmodells Morsleben. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Verfahrensunterlage. Teil 1/2: 73 S.; Hannover.
- Behlau, J. & Mingerzahn, G. (2001): Geological and tectonic investigations in the former Morsleben salt mine (Germany) as a basis for the safety assessment of a radioactive waste repository. *Engineering Geology*, 61, 2 – 3: 83 – 97 S. DOI: 10.1016/s0013-7952(01)00038-2.
- Behlau, J.; Mingerzahn, G. & Rose, S. (2017): Erstellung eines 3D-Lagerstättenmodells mit dem Grubengebäude des Erkundungsbergwerkes Gorleben: Stand des geologischen 3D-Lagerstättenmodells für den Salzstock Gorleben (Stand: 31.12.2012): Ergebnisbericht: Projekt Gorleben: 23 S.; Hannover (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)).
- Best, G.; Leydecker, G.; Bornemann, O. & Kockel, F. (1982): Bewertung von Salzformationen außerhalb Niedersachsens für die Errichtung von Endlagern. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Bericht: 91 S.; Hannover.
- Best, G. (1989): Die Grenze Zechstein/Buntsandstein in Nordwest-Deutschland nach Bohrlochmessungen. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 140, 1: 73 – 85 S.
- BGE & BGR (2018): Vereinbarung über die Zusammenarbeit zwischen der BGE und der BGR. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: 9 S.
- BGE (2020): Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG. Bundesgesellschaft für Endlagerung, SG01101/16-1/2-2019#3: 444 S.; Peine.
- BGE (2020j): Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG. Bundesgesellschaft für Endlagerung, Untersetzende Unterlage des Zwischenberichts Teilgebiete, Geschäftszeichen: SG02103/9-1/2-2020#12: 431 S.; Peine.
- BGE (2020k): Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG – Teilgebiete und Anwendung. Bundesgesellschaft für Endlagerung, Untersetzende Unterlage des Zwischenberichts Teilgebiete, Geschäftszeichen: SG02102/5-5/2-2020#7: 213 S.; Peine.
- BGE (2022a): Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung. Bundesgesellschaft für Endlagerung, Bericht, SG02303/97-2/2-2022#10: 744 S.; Peine.
- BGE (2022b): Konzept zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung. Bundesgesellschaft für Endlagerung, Bericht, SG02303/97-1/1-2022#1: 62 S.; Peine.

Standortauswahl

Pollok, L. et al. (2024): Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Wirtsgesteinsanteilen mit Barrierefunktion und der Internbauvariabilität in Salzstrukturen – Abschlussbericht; Hannover (BGR)



- BGE (2023): Vorgehen zur Ermittlung von Standortregionen aus den Teilgebieten. Bundesgesellschaft für Endlagerung, Bericht: 80 S.; Peine.
- Bollingerfehr, W.; Filbert, W.; Lerch, C. & Tholen, M. (2012): Endlagerkonzepte – Bericht zum Arbeitspaket 5. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS - 272. DBE TECHNOLOGY GmbH, Bericht: 187 S.; Peine.
- Bornemann, O. (1991): Zur Geologie des Salzstocks Gorleben nach den Bohrerergebnissen. BfS-Schriften: 67 S.
- Bornemann, O.; Behlau, J.; Fischbeck, R.; Hammer, J.; Jaritz, W.; Keller, S.; Mingerzahn, G. & Schramm, M. (2008): Standortbeschreibung Gorleben – Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. Geologisches Jahrbuch, C, 73: 211 S.
- Burliga, S. (1996): Kinematics within the Kłodawa salt diapir, central Poland. Geological Society, London, Special Publications, 100, 1: 11 – 21 S. DOI: 10.1144/gsl.Sp.1996.100.01.02.
- Burliga, S. (2014): Heterogeneity of folding in Zechstein (Upper Permian) salt deposits in the Kłodawa Salt Structure, central Poland. Geological Quarterly, 58, 3: 565 – 576 S. DOI: 10.7306/gq.1153.
- Burliga, S.; Krzywiec, P.; Dąbroś, K.; Przybyło, J.; Włodarczyk, E.; Żróbek, M. & Słotwiński, M. (2018): Salt tectonics in front of the Outer Carpathian thrust wedge in the Wieliczka area (S Poland) and its exposure in the underground salt mine. Geology, Geophysics & Environment, 44, 1: 71 – 90 S. DOI: 10.7494/geol.2018.44.1.71.
- Buxbaum-Conradi, C. (2018): Geologische 3D-Modellierung der Steinsalzlagerstätte Braunschweig-Lüneburg - Ein Beitrag zur nachhaltigen Nutzung einer komplexen Steinsalzlagerstätte. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Fakultät für Georesourcen und Materialtechnik: 206 S.; Aachen.
- Chemia, Z.; Schmeling, H. & Koyi, H. (2009): The effect of the salt viscosity on future evolution of the Gorleben salt diapir, Germany. Tectonophysics, 473, 3 – 4: 446 – 456 S. DOI: 10.1016/j.tecto.2009.03.027.
- Davison, I.; Barreto, P. & Andrade, A. J. M. (2017): Loulé: the anatomy of a squeezed diapir, Algarve Basin, southern Portugal. Journal of the Geological Society, 174, 1: 41 – 55 S. DOI: doi:10.1144/jgs2016-035.
- DBE TEC (2016): Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle. DBE Technology GmbH, Gutachen: 112 S.; Peine. DOI: K-MAT 58.
- de Boer, H. v. (1971): Gefügeregelung in Salzstöcken und Hüllgesteinen. Kali und Steinsalz, 7, 5: 403 – 425 S.

Deutscher Bundestag (2017): Drucksache des Deutschen Bundestages 18/11398 vom 07.03.2017 – Gesetzentwurf der Fraktionen CDU/CSU, SPD und BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN – Gesetz zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze. 80 S.; Berlin (Deutscher Bundestag – 18. Wahlperiode).

Dooley, T.; McClay, K. R.; Hempton, D. & Smit, D. (2005): Salt tectonics above complex basement extensional fault systems: results from analogue modelling. (In: Dore, A.G. & B.A., V. (Hrsg.): Petroleum Geology: North-West Europe and Global Perspectives Proceedings of the 6th Petroleum Geology Conference). 1631 – 1648. S.; London (Geological Society).

Dooley, T. P.; Jackson, M. P. A. & Hudec, M. R. (2009): Inflation and deflation of deeply buried salt stocks during lateral shortening. *Journal of Structural Geology*, 31, 6: 582 – 600 S. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2009.03.013>.

Doornenbal, J. C. & Stevenson, A. G. (2010): Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area. 342 S.; Houten (EAGE Publications b.v.).

Dresbach, C.; Pusch, M.; Mingerzahn, G.; Fleig, S.; Hammer, J. & Behlau, J. (2010): 3D-Modelle der Kali- und Steinsalzbergwerke des Staßfurter Sattels und geologisches 3D-Modell der Region Staßfurt. Staßfurt 2010 - Erkennen, analysieren, bewerten und prognostizieren der zukünftigen Entwicklung der Bergbaufolgeschäden: Abschlusstagung Forschungsverbundvorhaben "Dynamik Abgesoffener oder Gefluteter Salzbergwerke und ihres Deckgebirgsstockwerks", 18. - 20. November, Staßfurt. 46 – 62 S.

EndlSiUntV: Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094, 2103).

ESK (2022): Stellungnahme der Entsorgungskommission zum 100 Grad Celsius Kriterium in § 27 (4) des Standortauswahlgesetzes. Entsorgungskommission: 13 S.

Essaid, S. & Klarr, K. (1982): Zum Innenbau der Salzstruktur Asse. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 133: 135 – 154 S.

Fischbeck, R.; Hofrichter, E. & Richter-Bernburg, G. (1986): Salzlagerstätten. (In: Bender, F. (Hrsg.): *Angewandte Geowissenschaften*). 228 – 267 S.; Stuttgart (Enke Verlag).

Franke, D. (2022): Regionale Geologie von Ostdeutschland – Ein Kompendium. Homepage. www.regionalgeologie-ost.de

- Friedel, C.-H.; Blanke, H.; Leiss, B.; Patzschke, M. & Wagner, B. (2015): Geologie und Tektonik der Allertalsalzstruktur im ehemaligen Salzbergwerk Morsleben (In: Röhling, H.-G. (Hrsg.): GeoBerlin 2015. DYNAMISCHE ERDE – von Alfred Wegener bis heute und in die Zukunft – Exkursionsführer – Exkursionsführer und Veröffentlichungen der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften). 255: 87 – 102 S.; Hannover (Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften).
- Frisch, U. & Kockel, F. (2004): Der Bremer Knoten im Strukturnetz Nordwest-Deutschlands. Stratigraphie, Paläographie, Strukturgeologie. Berichte aus dem Fachbereich Geowissenschaften der Universität Bremen, 223: 379 S.
- Fulda, E. (1935): Zechstein. Handbuch der vergleichenden Stratigraphie Deutschlands. 409 S.; Berlin (Gebrüder Borntraeger).
- Geluk, M. C. (1998): Internal tectonics of salt structures. *Journal of Seismic Exploration*, 7, 3/4: 237 – 250 S.
- Goscombe, B. D.; Passchier, C. W. & Hand, M. (2004): Boudinage classification: end-member boudin types and modified boudin structures. *Journal of Structural Geology*, 26, 4: 739 – 763 S.
- Günnewig, R.; Borgmeier, M. & Ziegler, K. (2001): Kavernenspeicher Kraak. *Erdöl Erdgas Kohle*, 117, 1: 10 – 18 S.
- Hammer, J.; Mertineit, M.; Kühnlenz, T.; Paul, B.; Hesser, J. & Shao, H. (2016): Deformation und hydraulische Durchlässigkeit der Gorleben-Bank. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Bericht; Hannover.
- Harding, R. & Huuse, M. (2015): Salt on the move: Multi stage evolution of salt diapirs in the Netherlands North Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 61: 39-55 S. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2014.12.003.
- Henneberg, M.; Linckens, J.; Schramm, M.; Hammer, J.; Gerdes, A. & Zulauf, G. (2020): Structural evolution of continental and marine Permian rock salt of the North German Basin: constraints from microfabrics, geochemistry and U-Pb ages. *International Journal of Earth Sciences*, 109, 7: 2369 – 2387 S. DOI: 10.1007/s00531-020-01905-w.
- Hofrichter, E. (1980): Probleme der Endlagerung radioaktiver Abfälle in Salzformationen. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, 131: 409 – 430 S.
- Hudec, M. R. & Jackson, M. P. A. (2007): Terra infirma: Understanding salt tectonics. *Earth-Science Reviews*, 82, 1 – 2: 1 – 28 S.
- Hunsche, U.; Schulze, O.; Walter, F. & Plischke, I. (2003): Projekt Gorleben, Thermomechanisches Verhalten von Salzgestein: 157 S. Hannover.

- Jackson, C. A. L.; Jackson, M. P. A.; Hudec, M. R. & Rodriguez, C. (2014): Internal structure, kinematics, and growth of a salt wall: Insights from 3-D seismic data. *Geology*, 42, 4: 307 – 310 S. DOI: 10.1130/g34865.1.
- Jackson, C. A. L.; Jackson, M. P. A.; Hudec, M. R. & Rodriguez, C. R. (2015): Enigmatic structures within salt walls of the Santos Basin – Part 1: Geometry and kinematics from 3D seismic reflection and well data. *Journal of Structural Geology*, 75: 135 – 162 S. DOI: 10.1016/j.jsg.2015.01.010.
- Jackson, M. P. A. & Talbot, C. J. (1986): External shapes, strain rates, and dynamics of salt structures. *Geological Society of America Bulletin*, 97: 305 – 323 S.
- Jackson, M. P. A. & Talbot, C. J. (1989): Anatomy of mushroom-shaped diapirs. *Journal of Structural Geology*, 11, 1 – 2: 211 – 230 S. DOI: 10.1016/0191-8141(89)90044-8.
- Jackson, M. P. A. & Hudec, M. R. (2017): *Salt Tectonics: Principles and Practice*. Cambridge (Cambridge University Press). DOI: 10.1017/9781139003988.
- Jackson, P. A. & Talbot, C. J. (1991): A Glossary of Salt Tectonics. (In: Circular, G. (Hrsg.)). 1 – 44; Austin, Texas (Bureau of Economic Geology, University of Texas at Austin).
- Jähne-Klingberg, F.; Steuer, S.; Thöle, H. & von Goerne, G. (2022): *Geologisches 3D-Modell Tieferer Untergrund Norddeutsches Becken (TUNB)*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Abschlussbericht: 50 S.; Hannover.
- Jaritz, W. (1973): Zur Entstehung der Salzstrukturen Nordwestdeutschlands. *Geologisches Jahrbuch*, A 10: 1 – 77 S.
- Jaritz, W. (1983): Eignung von Salzstöcken in Niedersachsen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): 105 S.; Hannover.
- Jaritz, W. (1987): The Origin and Development of Salt Structures in Northwest Germany. (In: Lerche, I. & O' Brien, J.J. (Hrsg.): *Dynamical Geology of Salt and Related Structures*). 479 – 493 S.; Orlando/Florida.
- Jones, I. F. & Davison, I. (2014): Seismic imaging in and around salt bodies. *Interpretation*, 2, 4: SL1 – SL20 S. DOI: 10.1190/int-2014-0033.1.
- Käding, K.-C. (2000): Die Aller-, Ohre-, Friesland- und Fulda-Folge (vormals Bröckelschiefer-Folge) – Stratigraphie und Verbreitung des z4 bis z7 im Zechstein-Becken. *Kali und Steinsalz*, 13, 14: 86 – 96 S.
- Käding, K.-C. (2005): Der Zechstein in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland. *Newsletters on Stratigraphy*, 41, 1 – 3: 123 – 127 S.

- Klarr, K. (1981): Grundlagen zur Geologie der Asse. Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung, Institut für Tieflagerung, GSF-Bericht: 92 S.; München.
- Klarr, K.; Richter-Bernburg, G. & Rothfuchs, T. (1987): Der Zechstein der Asse südöstlich Braunschweig und geowissenschaftliche Versuche der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. (In: Kulick, J. & Paul, J. (Hrsg.): Exkursionsführer I. Exkursionen A, B, C, G, H, K). 101 – 122 S.; Kassel, Hannover (Int. Symp. Zechstein).
- Kleinefeld, B.; Behlau, J. & Schweinsberg, H.-J. (2008): Safe and economic cavern construction in the Etzel Cavern Field based on geological 3D-Modelling. Spring SMRI Conference, 27. – 29. April 2008. Technical conference papers., Porto, Portugal. 229 – 237 S.; (SMRI).
- Kley, J.; Franzke, H.-J.; Jähne, F.; Krawczyk, C.; Lohr, T.; Reicherter, K.; Scheck-Wenderoth, M.; Sippel, J.; Tanner, D. C. & van Gent, H. (2008): Strain and Stress. (In: Littke, R.; Bayer, U.; Gajewski, D. & Nelskamp, S. (Hrsg.): Dynamics of Complex Intracontinental Basins: The Central European Basin System). 97 – 124 S.; Berlin/Heidelberg.
- Kockel, F. & Roland, N. W. (1977): Langzeitlagerung radioaktiver Abfälle. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): 42 S.; Hannover.
- Kockel, F. (1995): Structural and Palaeogeographical Development of the German North Sea Sector. Beiträge zur regionalen Geologie der Erde, 26: 1 – 96 S.
- Kockel, F.; Krull, P.; Fischer, M.; Frisch, U.; Heßmann, W. & Stiewe, H. (1995): Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Salzformationen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Bericht: 66 S.; Hannover.
- Kockel, F. (1998): Salt Problems in Northwest Germany and the German North Sea Sector. Journal of Seismic Exploration, 7, Sp. Iss. 3 – 4: 219 – 235 S.
- Kockel, F. (1999): Die Bildung von Salzstrukturen in Norddeutschland - neue Einsichten, offene Fragen. Mitteilungen der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, 3: 38 – 47 S.
- Koyi, H.; Schmeling, H.; Burchardt, S.; Talbot, C.; Mukherjee, S.; Sjöström, H. & Chemia, Z. (2013): Shear zones between rock units with no relative movement. Journal of Structural Geology, 50: 82 – 90 S. DOI: 10.1016/j.jsg.2012.08.008.
- Krull, P. (1991): Bewertung der Salzformationen der Bundesländer Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Thüringen für die Errichtung von Endlagern wärmeentwickelnder Abfälle. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Bericht: 133 S.; Berlin.

- Krull, P.; Hoth, P.; Bräuer, V. & Wirth, H. (2004): Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Zwischenbericht: 91 S.; Berlin/Hannover.
- Langer, M. & Hofrichter, E. (1971): Gutachten über die Eignung von Salzstöcken des Rotliegenden zur Anlegung von Gas-Speicherkavernen. Bundesanstalt für Bodenforschung, Gutachten: 20 S.; Hannover.
- Lepper, J.; Dörhöfer, G.; Ernst, G.; Fauth, H.; Goldberg, G.; Gramann, F.; Heine, H.-W.; Irrlitz, W.; Jordan, R.; Kemper, E.; Kockel, F.; Kosmahl, W.; Look, E.-R.; Roeschmann, G.; Rohde, P.; Schmid, F.; von Struensee, G. & Büchner, K.-H. (1984): Geol. Karte von Niedersachsen 1 : 25000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 3725, Sarstedt. 177 S.; Hannover.
- Löffler, J. (1962): Die Kali- und Steinsalzlagerstätten des Zechsteins in der Deutschen Demokratischen Republik - Teil III Sachsen-Anhalt. Freiburger Forschungshefte, C 97 / III, Geologie: 347 S.
- Lotze, F. (1957): Steinsalz und Kalisalze. 2. Aufl.: 466 S.; Berlin (Gebr. Bornträger).
- Maystrenko, Y.; Bayer, U. & Scheck-Wenderoth, M. (2005): Structure and evolution of the Glueckstadt Graben due to salt movements. *International Journal of Earth Sciences*, 94, 5 – 6: 799 – 814 S.
- Mertineit, M.; Schramm, M.; Thiemeyer, N.; Blanke, H.; Patzschke, M. & Zulauf, G. (2023): Paleostress, deformation mechanisms and finite strain related to chocolate-tablet boudinage and folding of a Permian rock salt/anhydrite sequence (Morsleben site, Germany). *Tectonophysics*, 847: 229703. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.229703>.
- Middendorf, E. & Kühn, R. (1966): Befahrung des Kalibergwerks Siegfried-Giesen, Groß-Giesen bei Hildesheim, 8. September 1965. *Fortschritte der Mineralogie*, 43, 2: 145 – 187 S.
- Motamedi, H.; Sepehr, M.; Sherkati, S. & Pourkermani, M. (2011): Multi-Phase Hormuz Salt Diapirism in the Southern Zagros, Sw Iran. *Journal of Petroleum Geology*, 34, 1: 29 – 43 S. DOI: 10.1111/j.1747 – 5457.2011.00491.x.
- Ochsenius, C. (1877): Die Bildung der Steinsalzlager und ihrer Mutterlaugensalze unter spezieller Berücksichtigung der Flötze von Douglasshall in der Egelnschen Mulde. 173 S.; Halle (Pfeffer).
- Paul, J.; Heggemann, H. & Hug-Diegel, N. (2020): Einführung in die Stratigraphie des Zechsteins. (In: Deutsche Stratigraphische Kommission; Koordination/Redaktion: Paul J. & Heggemann, H., für die Subkommission Perm-Trias, (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland XII – Zechstein). Bd. 89, Schriftenr. Dt. Ges. Geowiss.. 19 – 27 S.; Berlin (Schweizerbart Science Publishers).

- Peryt, T. M.; Geluk, M.; Mathiesen, A.; Paul, J. & Smith, K. (2010): Zechstein. (In: Doornenbal, H. & Stevenson, A. (Hrsg.): Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area (SPBA)). 123 – 147 S.; Houten (EAGE Publ.).
- Pichat, A. (2022): Stratigraphy, Paleogeography and Depositional Setting of the K–Mg Salts in the Zechstein Group of Netherlands – Implications for the Development of Salt Caverns. *Minerals*, 12, 486, 1 - 30 S.
- Pollok, L.; Hammer, J. & Musmann, P. (2020): Salinarstrukturen – Entstehung, Außenformen und Internbau. (In: Deutsche Stratigraphische Kommission; Koordination/Redaktion: Paul J. & Heggemann, H., für die Subkommission Perm-Trias, (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland XII - Zechstein). Bd. 89, Schriftenr. Dt. Ges. Geowiss.. 559 – 594 S.; Berlin (Schweizerbart Science Publishers).
- Pollok, L. & Henneberg, M. (2021): Sub-areas in steep rock salt formations – what do we know about the geological composition of North German salt structures? *Saf. Nucl. Waste Disposal*, 1: 73 – 74 S. DOI: 10.5194/sand-1-73-2021.
- Pollok, L.; Saßnowski, A.; Henneberg, M.; Pusch, M.; Gundelach, V.; Thiemeyer, T.; Beilecke, T. & Holländer, R. (2022): Progress in the geoscientific exploration of the Asse salt structure as a base for the construction of a new mine for the retrieval of radioactive waste from the Asse II mine. (In: J.H.P. de Bresser; Drury, M.R.; Fokker, P.A.; Gazzani, M.; Hangx, S.J.T.; Niemeijer, A.R. & Spiers, C.J. (Hrsg.)). *Mechanical Behaviour of Salt X*, 5.7.-8.7.2022, Utrecht. 467 – 475 S.; (CRC Press). DOI: 10.1201/9781003295808.
- Popp, T. (2022): Eigenschaften und Potential stratiformer Salz-Formationen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Bericht: 104 S.; Leipzig.
- Raith, A. F.; Strozyk, F.; Visser, J. & Urai, J. L. (2016): Evolution of rheologically heterogeneous salt structures: a case study from the NE Netherlands. *Solid Earth*, 7, 1: 67 – 82 S. DOI: 10.5194/se-7-67-2016.
- Ramberg, H. (1955): Natural and experimental boudinage and pinch-and-swell structures. *Journal of Geology*, 63: 512 – 526 S.
- Reinhold, K.; Krull, P. & Kockel, F. (2008): Salzstrukturen Norddeutschlands 1: 500 000. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR); Berlin/Hannover.
- Reinhold, K.; Hammer, J. & Pusch, M. (2014): Verbreitung, Zusammensetzung und geologische Lagerungsverhältnisse flach lagernder Steinsalzfolgen in Deutschland (BASAL). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Bericht: 98 S.; Hannover.

- Reinhold, K. & Hammer, J. (2016): Steinsalzlager in den salinaren Formationen Deutschlands. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 167, 2 – 3: 167 – 190 S. DOI: 10.1127/zdgg/2016/0067.
- Remmelts, G. (1996): Salt tectonics in the southern North Sea, the Netherlands. (In: Rondeel, H.E.; Batjes, D.A.J. & Nieuwenhuijs, W.H. (Hrsg.): *Geology of Gas and Oil under the Netherlands*). 143 – 158 S.; (Springer Netherlands). DOI: 10.1007/978-94-009-0121-6_13.
- Richter-Bernburg, G. (1955): Stratigraphische Gliederung des deutschen Zechsteins. 843 – 854 S.
- Richter-Bernburg, G. (1970): Geologische Voraussetzungen für die Anlage von Rohöl-Speichern in Salzkavernen. *Oel*, 8. Jahrgang: 209 – 213 S.
- Richter-Bernburg, G. (1980): Salt tectonics, interior structures of salt bodies. *Bulletin des Centre de Recherches Exploration-Production Elf-Aquitain*, 4, 1: 373 – 393 S.
- Richter-Bernburg, G. (1985): Zechstein-Anhydrite, Fazies und Genese. *Geologisches Jahrbuch*, A 85: 3 – 82 S.
- Richter-Bernburg, G. (1987a): Deformation within salt bodies. (In: Lerche, I. & O'Brien, J.J. (Hrsg.): *Dynamical Geology of Salt and Related Structures*). 39 – 75 S.; Orlando.
- Richter-Bernburg, G. (1987b): Exkursionen in den deutschen Zechstein, Einführung. (In: Kulick, J. & Paul, J. (Hrsg.): *Exkursionsführer I. Exkursionen A, B, C, G, H, K*). Bd. 1: 15-24 S.; Kassel, Hannover (Int. Symp. Zechstein).
- Röhling, S.; Fleig, S.; Gast, S.; Ruales, A.; Henneberg, M. & Onneken, J. (2020): Informationssystem Salz: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potenzialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft) – Doppelsalinare und flach lagernde Salzsichten. Teilprojekt Salz- und Strukturgeologie. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Sachbericht 03ET6062B: 234 S.; Hannover.
- Rowan, M. G.; Urai, J. L.; Fiduk, J. C. & Kukla, P. A. (2019): Deformation of intrasalt competent layers in different modes of salt tectonics. *Solid Earth*, 10, 3: 987 – 1013 S. DOI: 10.5194/se-10-987-2019.
- Sannemann, D. (1968): Salt-Stock Families in Northwestern Germany. (In: Braunstein, J. & O'Brien, G.D. (Hrsg.): *Diapirism and Diapirs*). Bd. 8: 261 – 270 S.; Tulsa/Oklahoma (Amer. Assoc. Petrol. Geol. Spec.).
- Schachl, E. (1962): Die Lagerungsverhältnisse im Kaliwerk Salzdetfurth (Hildesheimer-Wald-Sattel) und ihre Beziehungen zum Bau des Deckgebirges. (In: Aldinger, H. & Geyer, O.F. (Hrsg.): *Festschrift Hermann Aldinger zur Vollendung des 60.*). 139 – 158 S.; Stuttgart.

- Schachl, E. (1987): Kali-und Steinsalzbergwerk Niedersachsen-Riedel der Kali und Salz AG, Schachtanlage Riedel. Zechsteinstratigraphie und Innenbau des Salzstockes von Wathlingen-Hänigsen. (In: Kulick, J. & Paul, J. (Hrsg.): Exkursionsführer I. Exkursionen A, B, C, G, H, K). 69 – 100 S.; Wiesbaden (Int. Symp. Zechstein).
- Schachl, E. (1991): Das Steinsalzbergwerk Braunschweig-Lüneburg - Schichtlagerung in der Wurzelzone eines Salzstockes. Zentralblatt für Geologie und Paläontologie Teil 1 – Allgemeine, angewandte, regionale und historische Geologie, 4: 1223-1245 S.
- Scheck-Wenderoth, M.; Maystrenko, Y.; Hübscher, C.; Hansen, M. & Mazur, S. (2008): Dynamics of salt basins. (In: Littke, R.; Bayer, U.; Gajewski, D. & Nelskamp, S. (Hrsg.): Dynamics of Complex Intracontinental Basins: The Central European Basin System). 307 – 322 S.; Berlin/Heidelberg.
- Schorn, A. & Neubauer, F. (2014): The structure of the Hallstatt evaporite body (Northern Calcareous Alps, Austria): A compressive diapir superposed by strike-slip shear? Journal of Structural Geology, 60: 70 – 84 S. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2013.12.008>.
- Schott, W. & Dietz, C. (1961): Geologische Karten und Profile der Struktur Lehrte-Sehnde-Sarstedt 1936 – 1961. NLFb, Archivstück; Hannover.
- Schramm, M. (2013): ERA Morsleben: Mineralogisch-geochemische Nachuntersuchungen des Kaliflözes Staßfurt im Grubengebäude der Schachtanlagen Bartensleben und Marie. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 105 S.; Hannover.
- Seidl, E. (1921): Schürfen, Belegen und Schachtabteufen auf deutschen Zechstein-Salzhorsten. 26:1 – 209 S.; Berlin (Preußische Geologische Landesanstalt).
- Stackebrandt, W.; Andreae, A. & Strahl, J. (2010): Atlas zur Geologie von Brandenburg. Bd. 4. Auflage: 159 S.; Cottbus (L.-Amt Bergbau, Geol. u. Rohstoffe Brandenburg).
- StandAG (2017): Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 7. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2760) geändert worden ist – Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG). 31 S.
- Strozyk, F.; Van Gent, H.; Urai, J. L. & Kukla, P. A. (2012): 3D seismic study of complex intra-salt deformation: An example from the Upper Permian Zechstein 3 stringer, western Dutch offshore. Geological Society, London, Special Publications, 363, 1: 489 – 501 S. DOI: 10.1144/sp363.23.
- Strozyk, F.; Urai, J. L.; Gent, H. v.; Keijzer, M. d. & Kukla, P. A. (2014): Regional variations in the structure of the Permian Zechstein 3 intrasalt stringer in the northern Netherlands: 3D seismic interpretation and implications for salt tectonic evolution. Interpretation, 2, 4: SM101 – SM117 S. DOI: 10.1190/int-2014-0037.1.

- Stück, H. L.; Bense, F. A.; Frenzel, B.; Henneberg, M.; Kneuker, T. D.; Lang, J.; Mertineit, M.; Noack, V. & Pollok, L. (2020): Ausschlusskriterium "Aktive Störungszonen". Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Abschlussbericht: 115 S.; Hannover, Berlin.
- Talbot, C. J. & Jackson, M. P. A. (1987): Internal Kinematics of Salt Diapirs. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 71, 9: 1068 – 1093 S.
- ten Veen, J.; van Gessel, S. & den Dulk, M. (2012): Thin-and thick-skinned salt tectonics in the Netherlands; a quantitative approach. *Netherlands Journal of Geosciences*, 91, 4: 447 – 464 S.
- Trusheim, F. (1957): Über Halokinese und ihre Bedeutung für die strukturelle Entwicklung Norddeutschlands. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 109: 111 – 151 S.
- Trusheim, F. (1971): Zur Bildung der Salzlager im Rotliegenden und Mesozoikum Mitteleuropas. *Beihefte zum Geologischen Jahrbuch*, 112: 1 – 51 S.
- Vendeville, B. C. (2002): A New Interpretation of Trusheim's Classic Model of Salt-Diapir-Growth. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 52: 943 – 952 S.
- von Goerne, G.; Fleig, S.; Rokahr, R.; Donadei, S.; Gast, S.; Riesenberger, C.; Pollok, L.; Hölzner, M.; Zapf, D.; Zachow, R.; Crotogino, F.; Horvath, P.-L.; Kepplinger, J.; Zander-Schiebenhöfer, D. & Schneider, G.-S. (2016): Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potentialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (InSpEE) (Wasserstoff und Druckluft). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Leibniz Universität Hannover, Institut für Geotechnik Hannover, KBB Underground Technologies GmbH, Sachbericht 03ESP323B: 203 S.; Hannover.
- von Struensee, G. (2000): 110 Jahre Kaliwerk Salzdettfurth – ein Beitrag zur lagerstättenkundlichen Übersicht des Hildesheimer Waldes. *Glückauf mit Kali und Steinsalz*, 135, 12: 25 S.
- Warsitzka, M.; Kley, J.; Jähne-Klingberg, F. & Kukowski, N. (2016): Dynamics of prolonged salt movement in the Glückstadt Graben (NW Germany) driven by tectonic and sedimentary processes. *International Journal of Earth Sciences*, 106, 1: 131 – 155 S. DOI: 10.1007/s00531-016-1306-3.
- Warsitzka, M.; Kukowski, N. & Kley, J. (2017): Salt flow direction and velocity during subsalt normal faulting and syn-kinematic sedimentation – implications from analytical calculations. *Geophysical Journal International*, 213, 1: 115 – 134 S. DOI: 10.1093/gji/ggx552.
- Warsitzka, M.; Jähne-Klingberg, F.; Kley, J. & Kukowski, N. (2019): The timing of salt structure growth in the Southern Permian Basin (Central Europe) and implications for basin dynamics. *Basin Research*, 31, 2: 337 – 360 S. DOI: 10.1111/bre.12323.

- Zander-Schiebenhöfer, D.; Donadei, S.; Horvath, P.-L.; Zapf, D.; Staudtmeister, K.; Rokahr, R. B.; Fleig, S.; Pollok, L.; Hölzner, M.; Hammer, J.; Gast, S.; Riesenberger, C. & von Goerne, G. (2015): Bestimmung des Speicherpotenzials Erneuerbarer Energien in den Salzstrukturen Norddeutschlands: Projekt InSpEE. Erdöl Erdgas Kohle, 131, 7/8: 289 – 293 S.
- Zirngast, M. (1996): The development of the Gorleben salt dome (northwest Germany) based on quantitative analysis of peripheral sinks. Geological Society, London, Special Publications, 100, 1: 203 – 226 S. DOI: 10.1144/gsl.Sp.1996.100.01.13.
- Zulauf, G.; Zulauf, J.; Bornemann, O.; Brenker, F. E.; Höfer, H. E.; Peinl, M. & Woodland, A. B. (2010): Experimental deformation of a single-layer anhydrite in halite matrix under bulk constriction. Part 2: Deformation mechanisms and the role of fluids. Journal of Structural Geology, 32, 3: 264 – 277 S. DOI: 10.1016/j.jsg.2009.12.001.
- Zulauf, G.; Zulauf, J.; Mertineit, M. & Hammer, J. (2012): Boudinage of anhydrite in rock-salt matrix: The impact of bulk finite strain geometry. (In: Bérest, P.; Ghoreychi, M.; Hadj-Hassen, F. & Tijani, M. (Hrsg.): Mechanical Behavior of Salt VII - Proceedings of the 7th Conference on the Mechanical Behavior of Salt). 65 – 69 S.; Leiden [u.a.] (CRC Press/Balkema).

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
ewG	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich
geoWK	Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG
GOK	Geländeoberkante
HAW	Hochradioaktive Abfälle, "high level radioactive waste"
InSpEE	<u>I</u> nformationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potentialabschätzung für die Errichtung von <u>S</u> alzavernen zur <u>S</u> peicherung von <u>E</u> rneuerbaren <u>E</u> nergien
NDB	Norddeutsches Becken
NN	Normal Null
PuDEL	Potenziale des unterirdischen Speicher- und Wirtschaftsraums Deutschland
ro	Oberrotliegend
rvSU	Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen
TG	Teilgebiet(e)
WbB	Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion
UR	Untersuchungsraum
z	Zechstein
z2SF	Kaliflöz Staßfurt (Staßfurt-Formation, Zechstein)
z2Na	Staßfurt-Steinsalz (Staßfurt-Formation, Zechstein)
z3HA	Hauptanhydrit (Leine-Formation, Zechstein)
z3LK	Leine-Karbonat (Leine-Formation, Zechstein)

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Übersicht und Eingruppierung zu identifizierten geologischen Faktoren.	45
Tab. 2:	Bewertung des geologischen Faktors „strukturaufbauendes Salinar“.	49
Tab. 3:	Bewertung des geologischen Faktors „Entwicklungsgeschichte und regionalgeologisches Setting“.	52
Tab. 4:	Bewertung des geologischen Faktors „Querschnittsfläche“ entsprechend definierter Anforderungen (vgl. BGE 2020k; StandAG 2017). Gesamtflächenbedarfe für Diapire wurden anhand der linearen Funktion in Abb. 29 ermittelt.	57
Tab. 5:	Bewertung des geologischen Faktors „Mächtigkeit“ unter Berücksichtigung der Anforderungen gem. StandAG. Als Bezugshorizont gilt die mittlere vertikale Lage des Einlagerungsbereichs im WbB.	60
Tab. 6:	Bewertung des geologischen Faktors „Formfaktor“.	62
Tab. 7:	Bewertung des geologischen Faktors „Primäre Steinsalzmächtigkeit“.	70
Tab. 8:	Bewertung des geologischen Faktors „Fazies“.	71
Tab. 9:	Zusammenfassung und Wichtung der geologischen Faktoren mit Einfluss auf den Internbau von Salzdiapiren bzw. die Anteile und Verteilung von WbB.	72
Tab. 10:	Gut erkundete Salzstrukturen und beispielhaft ausgewählte Teilgebiete für die exemplarische Anwendung und Erprobung der Methode, alphabetisch sortiert. Die ausgewählten Teilgebiete stellen keine Vorfestlegung hinsichtlich einer (Nicht-)Eignung für die in Phase II übertägig zu erkundenden Untersuchungsräume dar.	81
Tab. 11:	Ergebnisse der beispielhaften Methodenanwendung an gut erkundeten Salzstrukturen und exemplarisch ausgewählten Teilgebieten (TG), alphabetisch sortiert.	83
Tab. 12:	Übersicht der Salzstruktur-Internbautypen mit gut erkundeten Salzstrukturbeispielen, die sich durch Unterschiede in ihrer Genese, Reife, Form und damit im Internbau auszeichnen. Einige Salzstrukturen können aufgrund ihrer Entwicklung und ihrer Merkmale ggf. zu mehreren Klassen zugeordnet werden. Je nach Grad der Erosion der Struktur können Relikte vorangegangener Entwicklungsphasen im Gebirgsbau enthalten bleiben.	85

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Verbreitung von Salzstrukturen permischer Salinare in Norddeutschland (nach Reinhold et al. (2008) und von Goerne et al. (2016)) sowie ausgewiesene Teilgebiete in Steinsalz in steiler Lagerung (BGE 2020).	8
Abb. 2:	Bildung von Salzlagerstätten (verändert nach Ochsenius (1877)).	13
Abb. 3:	Stratigraphische Position und Bezeichnung der in Deutschland vorkommenden salinaren Schichtenfolgen mit darin ausgewiesenen Teilgebieten (TG) (verändert nach Reinhold et al. 2014).	15
Abb. 4:	Verbreitungsgebiete der altersverschiedenen salinaren Vorkommen (Reinhold et al. (2014)).	16
Abb. 5:	Stratigraphische Gliederung des Rotliegend und Vorkommen von Salzlager (blau) (Reinhold et al. 2014).	17
Abb. 6:	Polierte Bohrkerne des Rotliegendsalinars aus dem Salzdiapir Honigsee (aus: Henneberg et al. 2020). Neben Halit in unterschiedlicher Ausbildung sind siliziklastische Komponenten zu sehen.	18
Abb. 7:	Stratigraphische Gliederung des Zechsteins mit Vorkommen von Salzlager (blau) (aus: Reinhold et al. (2014)).	19
Abb. 8:	Polierte Bohrkerne der Steinsalze verschiedener Zechstein-Formationen aus dem Salzstock Gorleben, obere Reihe im Auf-, untere Reihe im Durchlicht.	20
Abb. 9:	Historische Theorie der Halokinese zur Entstehung von Salzstrukturen und syn-kinematischen Randsenken. Primäre Randsenken (I) korrelieren mit der Bildung von Salzkissen, sekundäre Randsenken (II) mit der Diapirbildung, tertiäre Randsenken mit darauf folgenden Nachschubbewegungen in einem späten Diapistadium (verändert nach Trusheim 1960).	21
Abb. 10:	Verbreitung von Salzstrukturen in Norddeutschland mit altersverschiedenen, strukturaufbauenden Salinaren (verändert nach Reinhold et al. (2008) und von Goerne et al. (2016)), Beckentiefe (Basis Zechstein) aus: Peryt et al. (2010)). NDB: Norddeutsches Becken, FH: Flechtinger Höhenzug.	24
Abb. 11:	Blockdiagramme mit verschiedenen schematischen Salzstrukturformen. a) 1. Salzantiklinale, 2. Salzkissen, 3.-5. Salzstöcke, 6. Salzmauer. 1. und 2. sind in Abb. 10 als Salzkissen, 3. bis 6. als Salzdiapire gekennzeichnet (verändert nach Trusheim (1957)). b) Salzstrukturformen in Abhängigkeit ihrer Reife (nach hinten zunehmender Reifegrad) (verändert nach Hudec & Jackson (2007)).	26
Abb. 12:	a): Seismisches Profil durch einen Salzdiapir der südlichen Nordsee mit chaotischem und transparentem Abbild des nicht differenzierbaren Internbaus. b) Interpretation der Salzdiapirausdehnung (rosa) aus a). TWT: Zweiweglaufzeit (verändert nach Barnett et al. 2023). c) Seismisches Profil durch einen Salzdiapir in der norwegischen Nordsee mit transparentem Abbild des Internbaus sowie der Flankeninterpretation vor (lila) und nach Erstellung der Erkundungsbohrung (grün) (aus: Jones & Davison 2014).	28
Abb. 13:	Profile aus einem 3D-seismischen Datensatz über zwei Salzkissen (Basis und Top Zechstein in cyan) in den Niederlanden, mit teilweise boudinierten kompetenten Schichten (Grauer Salzton, Plattendolomit, Hauptanhydrit) der Zechstein Leine-Formation (z3 stringer, gelb) (verändert nach Raith et al. 2016; Rowan et al. 2019).	30

Abb. 14:	Ein ursprünglich geradliniges Gitter zeigt die Fließrichtung des Salzes in eine Salzstruktur an. Die resultierende Deformation wird durch verformte Ellipsen dargestellt (aus: Jackson & Hudec 2017).	31
Abb. 15:	Dreidimensional dargestellte Deformationsmuster innerhalb eines Salzdiapirs. Die in a) mit Buchstaben markierten Strukturbereiche sind in b) als Verlaufskurve und Deformation eines Quaders dargestellt (aus: Jackson & Hudec 2017).	31
Abb. 16:	Dominierende Faltenorientierungen je nach Strukturbereich innerhalb eines Salzdiapirs. a) + b) Liegende Falten (mit flachen Faltenachsebenen) treten vor allem in Salzabwanderungsgebieten, am Diapirfuß sowie in den Randbereichen der Diapirdächer auf. Falten mit stark abtauchenden bis vertikalen Faltenachsen (sog. „Kulissenfalten“) dominieren im engen Aufstiegsbereich des Diapirschlots. a) aus: Jackson & Hudec (2017), b) von Jackson & Hudec (2017) verändert nach Richter-Bernburg (1980).	32
Abb. 17:	a) Zum Salzstrukturrand zunehmende Abhängigkeit des internen Faltenbaus von der äußeren Form der Salzstruktur (nach: Jackson & Hudec 2017). b) Formung und Rotation der Großfalten in unterschiedlichen Lagerungsformen von Salzlagerstätten: stratiforme Lagerung (1., Werra-Fulda-Becken), Salzsattel (2., Hildesheimer Wald), Diapir ohne (3., Lehrte-Sehnde) und mit Überhängen (4., Wathlingen-Hänigsen) (nach: de Boer 1971).	34
Abb. 18:	Übersicht der Bergwerke und Kavernenspeicher im permischen Steinsalz im Vergleich zu den ausgewiesenen TG (nach: BGE 2020) in Steinsalz in steiler Lagerung. Verbreitung von Salzstrukturen permischer Salinare in Norddeutschland nach Reinhold et al. (2008) und von Goerne et al. (2016).	35
Abb. 19:	Unterscheidung von sog. Salzhorsten mit charakteristischem Internbau nach Staßfurter (a, b), Asse (c) und Hannover Typ (d-f) (Seidl 1921).	36
Abb. 20:	Von der BGR in den InSpEE-Studien entwickelte charakteristische Internbautypen für Salzstrukturen im Norddeutschen Becken. a) Ausschließlich durch Zechstein-salinare gebildete Salzstrukturen, b) Doppelsalinarstrukturen unter Beteiligung von Zechstein- und Rotliegendesalinaren (verändert nach: Pollok & Henneberg 2021; Röhling et al. 2020; von Goerne et al. 2016).	37
Abb. 21:	Zuordnung der in den InSpEE-Projekten definierten Internbau-Typen (vgl. Abb. 20) zu Salzstrukturen in Teilgebieten (verändert nach: Pollok & Henneberg 2021; Röhling et al. 2020; von Goerne et al. 2016). Anpassungen in der Typenzuordnung im Bereich der deutschen Nordsee beruhen auf laufenden Arbeiten im BGR-Vorhaben „Potenziale des unterirdischen Speicher- und Wirtschaftsraums Deutschland (PuDEL)“.	38
Abb. 22:	Internbau und Verteilung verschiedener Zechstein-Formationen in fünf über- und untertägig erkundeten Salzstrukturen mit Darstellung des jeweils am umfangreichsten erkundeten Tiefenschnitts („Sohlenrisses“) (aus: Pollok et al. 2020). Diese gut erkundeten Salzdiapire wurden u. a. als Referenzstrukturen für die Methodenentwicklung herangezogen.	39
Abb. 23:	Geologischer Schnitt durch eine durch Einengungstektonik beeinflusste Salzantiklinale (Salzstruktur Harli) mit zwei Sätteln von z2Na (blau), getrennt durch eine Mulde mit Salinaren der Leine-Formation. Im Topbereich der Struktur nehmen die jüngeren Zechstein-Formationen große Bereiche ein (verändert nach: Fulda 1935).	40

Abb. 24:	a) Geologischer Schnitt durch den jungen Salzdiapir Berkhöpen mit großen Kissenfüßen (aus: Baldschuhn et al. 2001). b) Geologischer Schnitt durch den oberen Teil des Salzdiapirs Berkhöpen mit Darstellung des Internbaus. Deutlich wird der schmale z2Na-Zentralsattel (blau) im Verhältnis zum Gesamtdiapir sowie die relativ hohen Anteile an jüngeren Zechsteinsalinen (verändert nach: Fulda 1935).	41
Abb. 25:	Salzdiapir Lehrte-Sehnde über einer mehrfach in verschiedene Richtungen bewegten Sockelstörung, die den Hildesheimer von dem Hannover Block trennt. Beide Flanken sowie der Internbau sind asymmetrisch entwickelt (verändert nach: Schott & Dietz 1961).	42
Abb. 26:	Beispiele für Salzstrukturen im Niedersächsischen Becken, die durch oberkretazische Einengungstektonik überprägt wurden und entsprechende äußerliche Charakteristika aufweisen (Salzkeil und Salzüberhang bzw. Salzüberschiebung im komplex aufgebauten Deckgebirge) (aus: Kockel 1998).	43
Abb. 27:	Schematische Profile durch Salzdiapire mit ausschließlicher Beteiligung von Zechsteinsalinen (a) am Salzstrukturaufbau sowie zunehmender Rotliegendesalinarbeteiligung (b-d), den sog. Doppelsalinarstrukturen.	47
Abb. 28:	Exemplarischer Ausschnitt mit der Verteilung von Salzstrukturen (aus: Reinhold et al. 2008; von Goerne et al. 2016), Teilgebieten (BGE 2020) und Hauptsockelstörungen (Störungen in Zechstein-Basis, aus: Baldschuhn et al. (2001)). Abschnittsweise liegen die Teilgebiete Zwischenahn, Schaphusen und Thedinghausen in Kreuzungsbereichen („Strukturknoten“) von Hauptsockelstörungen.	53
Abb. 29:	Fläche an z2Na im Bezug zur Gesamtfläche des Diapirs gemäß ausgewerteter Sohlenrisse in Referenzsalzstrukturen.	55
Abb. 30:	Bewertung der Querschnittsgesamtfläche und Fläche des WbB (z2Na) von Salzdiapiren anhand definierter Flächenanforderungen.	58
Abb. 31:	Auswertung der primär abgelagerten z2Na-Mächtigkeiten im Bezug zur primären Zechstein-Gesamtmächtigkeit.	65
Abb. 32:	Primär abgelagerte z2Na-Mächtigkeiten und Zechsteingesamtmächtigkeiten (schwarz) im Vergleich zur mobilisierten Zechsteinmächtigkeit (blau). Sie umfasst die kumulative primäre Mächtigkeit aller Zechsteinschichten, die an der Diapirbildung beteiligt sind. Die Differenz aus beiden ergibt die Mächtigkeit der Zechsteinschichten, die nicht mobilisiert wurden und an der Zechsteinbasis verblieben sind.	66
Abb. 33:	z2Na-Anteil vom mobilisierten Zechstein im Verhältnis zur primären z2Na-Ablagerungsmächtigkeit (schwarze Punkte). Daneben Boxplots (schwarz umrandeter Kasten) mit ermittelten Medianen (rote Linie und Beschriftung), eingeteilt in 4 Gruppen: 100 – 200 m, 200 – 400 m, 400 – 600m, > 600 m. Unterhalb von 100 m primärer z2Na-Mächtigkeit gibt es keine Diapirbildung im NDB.	67
Abb. 34:	Schematische Darstellung von Störungen und vom Beckenrand zum Beckenzentrum zunehmenden primären Salzmächtigkeiten sowie damit einhergehender zunehmender mechanischer Entkopplung (verändert nach ten Veen et al. 2012).	68

Abb. 35:	Geologischer Riss der 650-m-Sohle in der Salzstruktur Benthe (verändert nach Richter-Bernburg 1980) mit algorithmisch ermittelten größtmöglichen Rechtecken (in Analogie für eine zusammenhängende, rechteckige WbB-Fläche) innerhalb der Verbreitungen der Staßfurt-Formation.	73
Abb. 36:	Fläche des ermittelten größtmöglichen Rechtecks innerhalb der WbB der Referenzsalzstrukturen im Verhältnis zur jeweiligen Diapirabmessung, dargestellt als Quotient der Diapirlänge und -breite. Ein Quotient von 1 entspricht einem runden Diapir.	74
Abb. 37:	Exemplarische Darstellung der Analyse von maßstäblichen Streckenbreiten des z2Na (dunkelblau) im Vergleich zur Gesamtdiapirbreite am Beispiel der Salzstruktur Lehrte-Sehnde. Die Berechnung und Mittelwertbildung der Streckenanalysen bezieht sich auf eine Unterteilung der Struktur in einzelne Zonen, die entlang des Streichens der Struktur ausgerichtet sind.	75
Abb. 38:	Ermittelte summarische Streckenbreiten (> 100 m Mindestbreite) im z2Na bezogen auf die jeweils an der Messstelle vorhandene Diapirbreite. Graue Datenpunkte und schwarze Gerade: Ermittelte Streckenbreitenmittelwerte aller untersuchter Salzstrukturen und ihrer jeweiligen Zonen (n=41). Blaue Datenpunkte und Gerade: Mittelwert der Zonen größter Streckenbreite der untersuchten Sohlenrisse (n=9). Grüne Gerade: absolut größte gemittelte Streckenbreite einer Zone des analysierten Datensatzes im Verhältnis zur Diapirbreite (n=1). Gestrichelte Linien zeigen für eine beispielhaft gewählte Streckenbreite von 1000 m im z2Na, welche notwendige Diapirbreite pro Fall (grau, blau, grün) abzuleiten ist. Im roten Bildausschnitt ist dieser Zusammenhang mit einer Mindeststreckenbreite von 100 m angegeben. MW: Mittelwert.	76
Abb. 39:	Darstellung der im Diagramm in Abb. 38 ausgewiesenen Verhältnisse aus z2Na-Streckenbreite zur Diapirbreite entlang der Längsachse einer Salzstruktur. a: Verhältnis = 0,32; b: Verhältnis = 0,5; c: Verhältnis = 0,74. Die Darstellung beruht auf der Annahme der Einhaltung der Flächenbeziehung aus Kap. 5.1.2.1, unter gleichzeitiger Einhaltung der Streckenverhältnisse (Abb. 38) entlang der Längsachse einer Salzstruktur. Die Flächeninhalte des z2Na und der Diapirfläche sind generalisiert durch Ellipsen dargestellt, in diesem Fall für das Minimum einer zur Verfügung stehenden z2Na-Fläche von 3 km ²	78
Abb. 40:	z2SF-Mächtigkeiten und -Anteile zeigen keine Abhängigkeit von der primären z2Na-Mächtigkeit oder der paläogeografischen Beckenlage.	80
Abb. 41:	Darstellung unterschiedlicher Strukturtypen in unterschiedlichen Salzstrukturtypen. Teilweise konnten die einzelnen Bereiche zusätzlich in Top, Mitte, Basis unterteilt werden (d). Strukturtypen: a) Eingeengte Salzantiklinale (A1), b) Eingeengte Salzantiklinale mit diapirischem Durchbruch (A2), c) juveniler Salzdiapir (B1), d) mittelreifer Salzdiapir (B2), e) eingeengter Salzdiapir (C), f) Salzspalte (D); vgl. Tab. 12. Blau: Salinarkörper, rote Linien: Sockelstörungen mit Versatz. Zur Definition der Fuß-/Kissen- und Kernbereiche sind die Geometrien und Abrisse der post-salinaren Sedimente zu beachten (s. Text).	87
Abb. 42:	Auswertung der Verteilung von z2Na (als potenzieller WbB, markiert durch „Na2“ und Kreuzschraffur) entsprechend der zuvor definierten Strukturtypen (von Fuß- bis Dachbereich) in der gut erkundeten Salzstruktur Sarstedt (Typ C, vgl. Tab. 12). Blaue Strecken stellen die Anteile des z2Na, orangefarbene Linien die anderen Salinareinheiten dar (verändert nach: Lepper et al. 1984).	88

Abb. 43: Verteilung der Anteile von z_{2Na} (potenzieller WbB) über verschiedene Strukturniveaus unterschiedlicher Salzstrukturtypen (Mittelwerte mit Standardabweichung). Einige Strukturtypen enthalten nicht alle Strukturniveaus und die ausgewerteten Profilschnitte umfassen nicht immer alle Niveaus. „n“ gibt die Anzahl ausgewerteter Profilschnitte pro Strukturtyp an. Die Dachbereiche von Salzstrukturen sind i. d. R. wesentlich besser bergmännisch erkundet als tiefere Strukturniveaus, sodass die Analyse in diesen Bereichen größere Unschärfen aufweist. 90

Anlageverzeichnis

Anlage 1:

Salzstrukturbeschreibungen aus den InSpEE-Vorhaben:

- Adolphsdorf
- Alfstedt
- Allertal
- Altenbruch
- Armstorf
- Arngast
- Arsten
- Bahlburg
- Basdahl
- Belmhusen
- Berdum-Jever
- Bevern
- Beverstedt
- Bodenteich
- Bonese
- Boostedt
- Börger
- Bramstedt
- Brümmerhof
- Dannefeld
- Düderode-Oldenrode
- Ebstorf
- Egestorf-Soderstorf
- Eitzendorf

Standortauswahl

Pollok, L. et al. (2024): Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Wirtsgesteinsanteilen mit Barrierefunktion und der Internbauvariabilität in Salzstrukturen – Abschlussbericht; Hannover (BGR)



- Emtinghausen
- Feuerschiff Elbe
- Friesack
- Geesthacht
- Grevenhorst
- Hamelwörden
- Harle Riff
- Harriehausen
- Helle
- Hohenhorn
- Honigsee
- Horndorf
- Jahrstedt
- Justine
- Kamperfehn
- Kotzen
- Krempe
- Lägerdorf
- Langsee
- Lathen
- Lehnin
- Lisa
- Lüge-Liesten
- Meckelfeld
- Meissendorf
- Meßdorf
- Mönkloh

Standortauswahl

Pollok, L. et al. (2024): Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Wirtsgesteinsanteilen mit Barrierefunktion und der Internbauvariabilität in Salzstrukturen – Abschlussbericht; Hannover (BGR)



- Nettgau
- Netzeband
- Niendorf II
- Odisheim
- Offlebener Sattel
- Osterbruch
- Osterholz
- Ostervesede
- Otter-Todtshorn
- Pahlhude
- Poppau
- Ristedt
- Rosche-Thondorf
- Rosenthal
- Roter Sand
- Schaphusen
- Scheessel
- Schwedeneck
- Seefeld
- Stemmen
- Sterup
- Süderhastedt
- Taaken
- Tellingstedt
- Teufelsmoor
- Thedinghausen
- Vorhop

Standortauswahl

Pollok, L. et al. (2024): Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Wirtsgesteinsanteilen mit Barrierefunktion und der Internbauvariabilität in Salzstrukturen – Abschlussbericht; Hannover (BGR)



- Waabs
- Waabs Nord
- Waddekath
- Wahn
- Wangerooge
- Warnau
- Werle
- Wesendorf
- Westdorf
- Westerwanna
- Wettenbostel
- Wieren
- Wittingen
- Wolthausen
- Wulkow
- Zechlin
- Zwischenahn

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Stilleweg 2
30655 Hannover
poststelle@bgr.de
www.bgr.bund.de