

**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**



**Sachbericht
03ET6062B**

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Hannover, 30. Juni 2020

ENERGIESPEICHER
Forschungsinitiative der Bundesregierung



Eingereicht durch

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe,
Abteilung Unterirdischer Speicher- und Wirtschaftsraum (Fachbereich Nutzungspotenziale
des tieferen Untergrundes, geologische CO₂-Speicherung)



Wilhelmstraße 25-30
13593 Berlin

Ansprechpartnerin: Dr. Simone Röhling

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe,
Abteilung Unterirdischer Speicher- und Wirtschaftsraum (Fachbereich Geologisch-geo-
technische Erkundung)



Stilleweg 2
30655 Hannover

Ansprechpartnerin: Dipl.-Geogr. Stephanie Fleig

Disclaimer

Die Studie, das Informationssystem und die Arbeiten im Rahmen des Verbundprojektes wurden mit größtmöglicher Sorgfalt erstellt. Die Autoren übernehmen dennoch keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der bereitgestellten Inhalte und Informationen, da ein deutlicher Anteil der Annahmen auf Basis öffentlich zugänglicher Quellen basiert, deren Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität nicht in der Verantwortung der Verbundpartner liegt.

Das ermittelte Speicherpotenzial stellt auf Grund der Eigenschaften der Salinare und der internen und obertägigen Flächenbelegung ein theoretisches Potenzial dar. Da die Standortgeologie auf Annahmen mit unterschiedlichen Genauigkeiten entsprechend des jeweiligen Kenntnisstandes zu den einzelnen Salinarbereichen beruht, wird das Ergebnis vom tatsächlich umsetzbaren Speicherpotenzial abweichen. Diese Abweichung wird durch Faktoren, die je nach Umsetzungsbedarf und -zeitraum unterschiedlich ins Gewicht fallen können, verstärkt. Da ein Teil dieser Faktoren der Hoheit der genehmigenden Behörden, des aktuellen Stands der Technik und der Wirtschaftlichkeit in Bezug auf das Speicherkonzept unterliegen, wurden diese nicht in die Potenzialabschätzung aufgenommen.

Die Arbeiten und deren Ergebnisdarstellung der Verbundpartner stellen eigenständige, interagierende Arbeitspakete dar und liegen in der Eigenverantwortung des jeweiligen Verbundpartners.

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

Danksagung

An dieser Stelle möchten wir uns beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) für die finanzielle Förderung des Projektes InSpEE-DS und beim Projektträger Jülich (PTJ) für die gute Betreuung bedanken.

Wir möchten uns bei der Stadtwerke Kiel AG für die Bereitstellung von Kernmaterial und Daten zum besseren Verständnis des Rotliegend- und Keupersalinars bedanken.

Unser Dank gilt ebenfalls den Staatlichen Geologischen Diensten der Länder, die das Projekt durch Bereitstellung von Daten, Abstimmung der Ergebnisse und wertvolle Anregungen während der Projektlaufzeit unterstützt haben.



Zusammenfassung

Der von der Bundesregierung bis zum Jahr 2050 geplante Umbau der deutschen Energieversorgung bedarf technologischer Entwicklungen sowohl für viele Einzelkomponenten als auch für technologieübergreifende Bereiche des Energiesystems. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) treibt daher die systemorientierte Weiterentwicklung des 6. Energieforschungsprogramms unter Abbildung der gesamten Energiekette voran. Ein wichtiges Element dieser Energiekette stellt die Speicherung in verschiedenen Leistungs- und Energiebereichen dar. Eine Speicheroption für Leistungen im Netzmaßstab bildet die Erzeugung von Druckluft und Wasserstoff mit der Nutzung geologischer Strukturen als langfristiger Speicherraum. Insbesondere der Wasserstoffspeicherung kommt dabei eine besondere Bedeutung zu, da die Nutzung von Power-to-Gas zukünftig nicht nur in der Energieversorgung, sondern auch als Ersatz für fossile Rohstoffe in der chemischen Industrie und für Mobilitätsanwendungen und damit für die Sektorenkopplung eine wichtige Rolle spielen wird.

Bislang werden für die Errichtung und Planung von Kavernenspeichern zum größten Teil Salzstrukturen genutzt, die aus Zechstein-Salzen aufgebaut sind. Diese Strukturen sind in ihrer Verbreitung auf den Norden Deutschlands beschränkt. Aber auch für weitere Regionen Deutschlands ist die Kavernenspeicherung von Interesse, um einen Ausgleich zwischen dem Energiedargebot und dem Energiebedarf auch bei nicht ausreichender Leistungskapazität zu ermöglichen. Im Rahmen des Verbundprojektes InSpEE-DS wurde ausgehend von den geologischen Gegebenheiten in logischer Fortführung des Projektes InSpEE sowohl der regionale Bezug ausgeweitet als auch der Umfang auf die bisher nicht betrachteten Salzformationen erweitert.

Das Vorhaben baut auf dem Projekt „InSpEE – Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potenzialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft)“ auf, welches sich auf die Betrachtung von Salzstrukturen großer Mächtigkeiten im norddeutschen Raum beschränkte. Ziel des Vorhabens InSpEE-DS war daher die Erarbeitung und Bereitstellung von Planungsgrundlagen zur Standortauswahl und zur Errichtung von Salzkavernen für die Speicherung von erneuerbaren Energien in Form von Wasserstoff- und Druckluftspeicherung in den flach lagernden Salzschieben sowie in den aus verschiedenen Salinaren aufgebauten Salzstrukturen Deutschlands.

Gerade außerhalb von Niedersachsen und Schleswig-Holstein existiert ein großes Potenzial für eine dezentrale Speicherung erneuerbarer Energien, z. B. in Brandenburg, Nordrhein-Westfalen, Thüringen, Sachsen-Anhalt, und Thüringen. Für die Abschätzung der Speichermöglichkeiten wurden geologische Daten zu Verbreitung, Tiefenlage und Lagerungsverhältnissen der Salinargesteine aufgearbeitet und speziell ausgewertet. Ergänzend wurden mineralogisch-geochemische Untersuchungen und Bestimmungen geotechnisch relevanter Gesteinsparameter durchgeführt, flankiert durch umfangreiche numerische Modellrechnungen zur Kavernenauslegung.

Etwa 100 der ca. 700 Salzstrukturen Norddeutschlands bestehen nicht allein aus Salinaren der Zechstein-Folge. Über den inneren Aufbau der Mehrfachsalinare ist im Vergleich zu den ausschließlich aus Zechstein aufgebauten Salzstrukturen weniger bekannt. Im InSpEE-Projekt wurde daher im Sinne einer konservativen Herangehensweise für die Potenzialabschätzung das sich im Inneren eines Doppelsalinars befindliche Rotliegendesalinar über den



Einbezug eines Abschlagsfaktors für das nutzbare Speichervolumen berücksichtigt. Die geologischen und geomechanischen Kenntnisse wurden erweitert, um notwendige sicherheitstechnische Aspekte der Speicherung erneuerbarer Energien an derartigen Kavernenstandorten besser bewerten zu können.

Verbundpartner im Rahmen des InSpEE-DS-Verbundvorhabens sind die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), die Leibniz Universität Hannover, Institut für Geotechnik/Abteilung Unterirdisches Bauen (IGtH) sowie die DEEP.KBB GmbH.

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe ist (BGR) ist die zentrale geowissenschaftliche Beratungseinrichtung der Bundesregierung. Seit Gründung der BGR werden salzgeologische Untersuchungen zur Klärung der Verbreitung und Genese von Salzstrukturen sowie zwecks Bewertung ihrer wirtschaftlichen Nutzungsmöglichkeiten durchgeführt.

Das Verbundprojekt InSpEE-DS zeichnete sich durch eine starke Vernetzung der Arbeitspakete untereinander aus. Die Arbeitspakete 1 bis 3 schufen Grundlagenwissen, welches innerhalb dieser Arbeitspakete benötigt und ausgetauscht wurde und die Basis für die Durchführung der Arbeitspakete 4 bis 8 bildete.

Die Bearbeitung erfolgte in drei Teilprojekten mit den aufeinander aufbauenden und interagierenden Arbeitspaketen 1 bis 8 und folgenden Aufgabenschwerpunkten:

Teilprojekt Salz- und Strukturgeologie

(BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Abteilung B3 „Unterirdischer Speicher- und Wirtschaftsraum“)

- Arbeitspaket 1 (flach lagernde Salinar-Formationen):
Zusammenstellung und Auswertung der geologischen Daten zu den flach lagernden Salzschieben Deutschlands

Fachbereich Nutzungspotenziale des tieferen Untergrundes, geologische CO₂-Speicherung

Ansprechpartnerin: Simone Röhling
- Arbeitspaket 2 (flach lagernde Salinar-Formationen):
Untersuchung der Lagerungsverhältnisse und der Eigenschaften von flach lagernden Salinar-Formationen, stofflich-strukturelle Charakterisierung der Salinar-Formationen

Fachbereich Geologisch-geotechnische Erkundung

Ansprechpartnerin: Stephanie Fleig
- Arbeitspaket 3 (Doppel- und Mehrfachsalinare):
Stofflich-strukturelle Charakterisierung der Salinar-Formationen, Untersuchung des Internbaus und geologische 3D-Modelle

Fachbereich Geologisch-geotechnische Erkundung

Ansprechpartnerin: Stephanie Fleig



Teilprojekt Gebirgsmechanische Anforderungen
(Leibniz Universität Hannover, Institut für Geotechnik Hannover)

- Arbeitspaket 4 (flach lagernde Salinar-Formationen):
Gebirgsmechanische Anforderungen
- Arbeitspaket 5 (Doppel- und Mehrfachsalinare):
Gebirgsmechanische Anforderungen

Ansprechpartner: Dirk Zapf

Teilprojekt Bewertungskriterien und Potenzialabschätzung
(DEEP.KBB GmbH)

- Arbeitspaket 6 (flach lagernde Salinar-Formationen):
Kriterien und Planungsgrundlagen für die Potenzialabschätzung
- Arbeitspaket 7 (flach lagernde Salinar-Formationen):
Ermittlung des Speicherpotenzials
- Arbeitspaket 8 (Doppel- und Mehrfachsalinare):
Präzisierung des Speicherpotenzials

Ansprechpartner: Péter László Horváth

Verbundkoordination (Arbeitspaket 9) (DEEP.KBB GmbH).

Ansprechpartnerin: Sabine Donadei

Mit Ende des Verbundvorhabens liegt für Anwender und genehmigende Stellen ein Informationssystem vor, das belastbare geologische und geotechnische Grunddaten – neben denen für die Salzstrukturen des Zechsteins und des Rotliegenden – nun auch für die flach lagernden Salinarformationen Deutschlands enthält. Das Ziel, Projekte besser als bisher an den Erfordernissen der späteren Nutzung planbar zu machen, ist auf ganz Deutschland ausgeweitet worden. Es liegen Modellkavernen für eine große Breite an Mächtigkeiten und Teufenlagen vor. Erstmals wird für die flach lagernden Salinarformationen ein Speicherpotenzial quantifiziert.

Im Rahmen der Potenzialauswertung des Verbundvorhabens InSpEE-DS wurde

- durch die räumliche und geologische Erweiterung des Betrachtungsbereiches zusätzliches Speicherpotenzial in Höhe von 2,6 TWh für Druckluft und 1.712 TWh für Wasserstoff sowie
- durch die Detaillierung des Untersuchungsgrades der Mehrfachsalinare zusätzliches Speicherpotenzial in Höhe von 0,5 TWh für Druckluft und 152 TWh für Wasserstoff



zusätzlich zu dem Speicherpotenzial aus InSpEE ermittelt. Insgesamt ergibt sich damit ein deutschlandweites Speicherpotenzial von 7,6 TWh für Druckluft und 3.478 TWh für Wasserstoff.

Eine explizite wirtschaftliche Verwertung in Form von Verkauf des erarbeiteten Wissens existiert auf Grund des informierenden Charakters des Verbundvorhabens nicht.

Auf Basis der Ergebnisse können ein Vergleich des erforderlichen Speicherbedarfs mit dem abgeschätzten theoretischen Speicherpotenzial sowie eine räumliche Zuordnung potenziell geeigneter Speicherstandorte für die Errichtung von Kavernenspeichern in Salinarstrukturen und -bereichen erfolgen. Die Anbindung detaillierterer wissenschaftlicher Hintergrundinformationen zu den Einzelstrukturen und -bereichen trägt dazu bei, Auswahlverfahren für eine Erstausswahl von Strukturen zu erleichtern. Die Ergebnisse werden in Form von GIS-basierten Informationssystemen dargestellt und sind auf diese Weise sowohl für die Öffentlichkeit als auch für politische Entscheidungsträger leicht zugänglich. Die Informationssysteme sind im Geoviewer der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe unter dem Thema Geologie unter dem folgenden Link öffentlich zugänglich:

<https://geoviewer.bgr.de/mapapps/resources/apps/geoviewer/index.html?lang=de>

Mit dem Vorliegen dieses Sachberichtes enden die Verbundvorhaben InSpEE und InSpEE-DS. Eine weitere Fortsetzung ist nicht geplant.



Inhaltsverzeichnis

Disclaimer	ii
Danksagung	iii
Zusammenfassung	iv
Abkürzungsverzeichnis	0-2
0 Projektübersicht	0-8
1 Teilprojekt Salz- und Strukturgeologie – Arbeitspaket 1	1-1
2 Teilprojekt Salz- und Strukturgeologie – Arbeitspaket 2	2-1
3 Teilprojekt Salz- und Strukturgeologie – Arbeitspaket 3	3-1
9 Ausblick	9-1
Anhang	



Abkürzungsverzeichnis

A

AP Arbeitspaket

B

BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

BMWi Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

C

CAES Compressed Air Energy Storage

CEBS Central European Basin System

Cl Chlor

cr Zechstein-Hutgestein

D

DDR Deutsche Demokratische Republik

DEEP DEEP. Underground Engineering GmbH

DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

DGM Digitales Geländemodell

DSK Deutsche Stratigraphische Kommission

E

EA-IRMS Elemental analyzer – isotope ratio mass spectrometry

EDX Energiedispersive Röntgenspektroskopie

ϵ Verformung

EPSG European Petroleum Survey Group Geodesy

ESEM Environmental scanning electron microscope

ESE-WNW - Ost-Süd-Ost – West-Nord-West

ETRS Europäisches Terrestrisches Referenzsystem



F

Fm. Formation

G

GIS Geographisches Informationssystem

GFZ Deutsches GeoForschungszentrum Potsdam

GG Glückstadt-Graben

GOK Geländeoberkante

GTA Geotektonischer Atlas von Nordwestdeutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor

GWh Gigawattstunden

H

HG Horn-Graben

I

ICP-OES Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy

IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig

IGtH Institut für Geotechnik / Abteilung Unterirdisches Bauen

IHS Institut für Strömungsmechanik und Hydraulische Strömungsmaschinen

InSpEE Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potenzialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft)

InSpEE-DS Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potenzialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft) – Doppelsalinare und flach lagernde Salzschieben

J

jo Oberjura

ju Unterjura



K

k	Keuper
KBB	Kavernen Bau- und Betriebs-GmbH
DEEP.KBB	DEEP.KBB GmbH
km	Mittlerer Keuper
kro	Oberkreide
kru	Unterkreide

L

LBEG	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
LBST	Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH
LLUR	Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume

M

Ma	Millionen Jahre
µg	Mikrogramm
MPa	Megapascal
m u. NN	Meter unter Normalnull
m u. GOK	Meter unter Geländeoberkante

N

Na	Natrium
NDB	Norddeutsches Becken
NN	Normalnull
NNE-SSW	Nord-Nord-Ost-Süd-Süd-West
NE-SW	Nord-West – Süd-Ost
N-S	Nord-Süd
NW	Nord-West
NWGB	Northwest German Basin / Nordwestdeutsches Becken
NW-SE	Nord-West-Süd-Ost

**P**

PB	Polnisches Becken
Pol	Polarisatoren

Q

q-t	Känozoikum
-----	------------

R

RDA	Röntgendiffraktionsanalyse
ro	Oberrotliegend / Rotliegendesalinar
ros	Rotliegendesalinar
rot	Rotliegend-Residuum

S

SE	Süd-Ost
SGD	Staatliche Geologische Dienste
σ	Sigma
SO ₄	Sulfat
SPB	Southern Permian Basin
SPBA	Southern Permian Basin Area
SPIB	Sole Pit-Becken
SQL	Structured Query Language
SW	Süd-West

T

TC/EA-IRMS	thermal combustion – isotope ratio mass spectrometry
TUNB	Potenziale des unterirdischen Speicher- und Wirtschaftsraumes im Norddeutschen Becken, Tieferer Untergrund Norddeutsches Becken
TWh	Terrawattstunden

**U**

UTM Universal Transverse Mercator

V

V Volumen

VCDT Vienna-Canyon Diablo Troilit

VSMOW Vienna Standard Mean Ocean Water

W

W-E West-Ost

WNW-ESE West-Nord-West-Ost-Süd-Ost

Z

z Zechstein

z1 Werra-Folge

z1WA Werra-Anhydrit

z1ZK Zechsteinkalk

z2 Staßfurt-Folge

z2BS Basissalz der Staßfurt-Formation

z2DS Decksteinsalz der Staßfurt-Formation

z2HG Hangendsalz der Staßfurt-Formation

z2HS Hauptsalz der Staßfurt-Formation

z2BA Basalanhydrit der Staßfurt-Formation

z2SK Staßfurt-Karbonat

z2SF Kaliflöz Staßfurt innerhalb der Staßfurt-Formation

z3 Leine-Folge

z3AM Anhydritmittelsalz der Leine-Formation

z3BS-z3OS Basissalz-Orangesalz

z3GT-z3HA Grauer Salzton – Hauptanhydrit

z4 Aller-Folge

z5 Ohre-Formation

z6	Friesland-Formation
z7	Fulda-Formation



0 Projektübersicht

Inhaltsverzeichnis

0.1	Aufgabenstellung	0-9
0.2	Voraussetzungen, unter denen das Verbundvorhaben durchgeführt wurde.....	0-11
0.3	Planung und Ablauf des Verbundvorhabens.....	0-12
0.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Verbundvorhabens	0-13
0.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	0-13
0.6	Verwendung der Zuwendung und Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	0-14
0.7	Erzielte Ergebnisse im Einzelnen mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	0-14
0.8	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	0-16
0.9	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	0-16
0.10	Während der Durchführung des Verbundvorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Verbundvorhabens bei anderen Stellen.....	0-17
0.11	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen während der Projektlaufzeit.....	0-18



0.1 Aufgabenstellung

Der von der Bundesregierung bis zum Jahr 2050 geplante Umbau der deutschen Energieversorgung bedarf technologischer Entwicklungen sowohl für viele Einzelkomponenten als auch technologieübergreifende Systeme des Energiesystems. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) treibt daher die systemorientierte Weiterentwicklung des 6. Energieforschungsprogramms unter Abbildung der gesamten Energiekette voran. Ein wichtiges Element dieser Energiekette stellt die Speicherung in verschiedenen Leistungs- und Energiebereichen dar. Eine Speicheroption für Leistungen im Netzmaßstab bildet die Erzeugung von Druckluft und Wasserstoff mit der Nutzung geologischer Strukturen als Speicherraum, die als Langfristspeicher genutzt werden können. Insbesondere der Wasserstoffspeicherung kommt dabei eine besondere Bedeutung zu, da die Nutzung von Power-to-Gas zukünftig nicht nur in der Energieversorgung, sondern auch als Ersatz für fossile Rohstoffe in der chemischen Industrie und für Mobilitätsanwendungen und damit für die Sektorenkopplung eine wichtige Rolle spielen wird.

Bislang werden für die Errichtung und Planung von Kavernenspeichern zum größten Teil Salzstrukturen genutzt, die aus Zechstein-Salzen aufgebaut sind. Das sogenannte Hauptsalz der Staßfurt-Formation des Zechsteins zeichnet sich durch eine relativ große Homogenität und einen geringen klastischen Feststoffanteil aus und bietet daher aus geologischer und gebirgsmechanischer Sicht gute Voraussetzungen für die Anlage und den Betrieb von Kavernen. Diese Strukturen sind in ihrer Verbreitung auf den Norden Deutschlands beschränkt. Aber auch für weitere Regionen Deutschlands ist die Kavernenspeicherung von Interesse, um einen Ausgleich zwischen dem Energiedargebot und dem Energiebedarf bei nicht ausreichender Leistungskapazität zu ermöglichen. Im Rahmen des Verbundprojektes InSpEE-DS wurde ausgehend von den geologischen Gegebenheiten in logischer Fortführung des Projektes InSpEE sowohl der regionale Bezug ausgeweitet als auch der Umfang auf die bisher nicht betrachteten Salzformationen erweitert, um dazu beizutragen, politisch formulierte Ziele zur Energiespeicherung umzusetzen.

Ziel des Vorhabens war die Erarbeitung und Bereitstellung von Planungsgrundlagen zur Standortauswahl und zur Errichtung von Salzkavernen für die Speicherung von erneuerbaren Energien mittels Wasserstoff- und Druckluftspeicherung in den flach lagernden Salzschieben sowie in den aus verschiedenen Salinaren aufgebauten Salzstrukturen Deutschlands. Das Vorhaben baut damit auf dem Projekt „InSpEE – Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potenzialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft)“ auf, welches sich auf die Betrachtung von Salzstrukturen großer Mächtigkeiten im norddeutschen Raum beschränkte. Im Vorhaben InSpEE-DS wurden Anforderungen und Kriterien erarbeitet, auf deren Grundlage Eignungsbewertungen auch für flach lagernde Salinar-Formationen und Mehrfach- bzw. Doppelsalinare für Speicherprojekte in einem noch relativ frühen Stadium der Standorterkundung, d. h. bei noch relativ geringen Kenntnissen zum Internbau der Salinar-Formationen, möglich sind.

Erfassung zusätzlichen Speicherpotenzials durch räumliche und geologische Erweiterung des Betrachtungsbereiches

Ausgehend von den bisher vorliegenden geologischen Erkundungsergebnissen bieten flach lagernde Salzschieben außerhalb von Niedersachsen und Schleswig-Holstein ein großes Potenzial für eine dezentrale Speicherung erneuerbarer Energien, z. B. in Brandenburg, Nordrhein-Westfalen, Sachsen-Anhalt und Thüringen. Der Betrachtungsraum wurde daher sowohl geografisch auf Gesamtdeutschland als auch geologisch auf weitere Salinar-



Formationen gegenüber InSpEE erweitert. Für die Abschätzung der Speichermöglichkeiten wurden geologische Daten zu Verbreitung, Tiefenlage und Lagerungsverhältnissen der Salinargesteine aufgearbeitet und speziell ausgewertet sowie ergänzende mineralogisch-geochemische Untersuchungen und Bestimmungen geotechnisch relevanter Gesteinsparameter durchgeführt – ergänzt durch umfangreiche numerische Modellrechnungen zur Kavernenauslegung.

Erfassung zusätzlichen Speicherpotenzials durch Detaillierung der Untersuchung der Mehrfachsalinare

Etwa 100 der ca. 700 Salzstrukturen Norddeutschlands bestehen nicht allein aus Salinaren der Zechstein-Folge. Diese als Doppel- bzw. Mehrfachsalinare bezeichneten Strukturen enthalten zusätzlich auch Salinarschichten aus dem Rotliegend und teilweise aus dem Keuper, die sich hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und der sich daraus ergebenden spezifischen geomechanischen Eigenschaften von den Zechstein-Salinaren unterscheiden. Sie kommen in einem begrenzten Gebiet vor, das sich über Schleswig-Holstein, Hamburg, den nördlichen Teil Niedersachsens und Teile des deutschen Nordsee-Sektors erstreckt. Über den inneren Aufbau der Mehrfachsalinare ist im Vergleich zu den ausschließlich aus Zechstein aufgebauten Salzstrukturen weniger bekannt, da diese Strukturen bisher nicht bergbaulich genutzt werden. Im Rahmen des InSpEE-Projektes wurde daher im Sinne einer konservativen Herangehensweise für die Potenzialabschätzung das sich im Inneren eines Doppelsalinars befindliche Rotliegendesalinar über den Einbezug eines Abschlagsfaktors für das nutzbare Speichervolumen berücksichtigt. Da die Doppel- bzw. Mehrfachsalinare durchweg küstennah liegen und damit gute Möglichkeiten zur Soleverbringung als auch eine direkte Nähe zu bestehenden und zukünftigen Windkraftanlagen im Onshore- und Offshore-Bereich bieten, wurden die geologischen und geomechanischen Kenntnisse erweitert, um notwendige sicherheitstechnische Aspekte der Speicherung erneuerbarer Energien in derartigen Kavernenstandorten besser bewerten zu können.

Die Bearbeitung erfolgte in den aufeinander aufbauenden und interagierenden Arbeitspaketen 1 bis 8. Bestandteil des Teilprojektes „Salz- und Strukturgeologie“ sind die Arbeitspakete 1 bis 3.

Arbeitspaket 1: Flach lagernde Salinar-Formationen: Zusammenstellung und Auswertung der geologischen Daten zu den flach lagernden Salzschichten Deutschlands

Im Arbeitspaket 1 wurden die Grundlagen für die Potenzialabschätzung der flach lagernden Salze geschaffen. Innerhalb des Arbeitspaketes wurden die Datengrundlagen zusammengestellt und ausgewertet und auf der Basis aller verfügbaren Daten strukturgeologische Horizontkarten erstellt. Die planungsrelevanten Daten wurden in einer Datenbank erfasst und in einem neuen Geoinformationssystem für potenzielle Anwender zur Verfügung gestellt.

Arbeitspaket 2: Flach lagernde Salinar-Formationen: Untersuchung der Lagerungsverhältnisse und der Eigenschaften von flach lagernden Salinar-Formationen, stofflich-strukturelle Charakterisierung der Salinar-Formationen



In Ergänzung zu den in Arbeitspaket 1 erarbeiteten geologischen Grunddaten wurden im Arbeitspaket 2 Daten zu der Zusammensetzung und den speicherrelevanten Eigenschaften der flach lagernden Salze zusammengestellt und durch eigene mineralogisch-geochemische und geomechanische Untersuchungen ergänzt. Die Ergebnisse der Analysen flossen in die Berechnungen in Arbeitspaket 4 und Arbeitspaket 6 ein.

Arbeitspaket 3: Doppel- und Mehrfachsalinare: Stofflich-strukturelle Charakterisierung der Salinar-Formationen, Untersuchung des Internbaus und geologische 3D-Modelle

In Arbeitspaket 3 wurden die Erkenntnisse zu den im Vorhaben InSpEE bereits untersuchten Doppel- und Mehrfachsalinaren erheblich erweitert und vertieft. In Zusammenarbeit mit den Geologischen Landesämtern und Erdölfirmen sowie Kavernenbetreibern wurden alle verfügbaren Daten zu den Eigenschaften der Gesteine zusammengetragen und durch eigene mineralogisch-geochemische sowie geomechanische Untersuchungen gezielt ergänzt. Im Rahmen des Forschungsverbunds erstellte 3D-Modelle von Doppelsalinarstrukturen lieferten die Grundlage zur Verbesserung der Prognose des Internbaus von Doppelsalinaren und ermöglichen eine präzisere Abschätzung des für den Kavernenbau nutzbaren Anteils der Strukturen (Arbeitspaket 8).

0.2 Voraussetzungen, unter denen das Verbundvorhaben durchgeführt wurde

Die Arbeitspakete 1, 2 und 3 wurden durch die im Rahmen des Verbundvorhabens angestellten Mitarbeiter durchgeführt. Unterstützt und koordiniert wurden die Arbeiten durch das Stammpersonal der BGR aus den Fachbereichen B3.1 („Nutzungspotenziale des tieferen Untergrundes, geologische CO₂-Speicherung“, Koordination AP1) und B3.2 („Geologisch-Geotechnische Erkundung“, Koordination AP2 und AP3).

Die Bearbeitung der Arbeitspakete 1, 2 und 3 erfolgte in enger Absprache der jeweiligen Bearbeiter untereinander und mit den anderen Verbundpartnern. Im halbjährlichen Rhythmus fanden bei DEEP.KBB Projektgespräche statt, die bei fachlicher Notwendigkeit durch Arbeits- bzw. Abstimmungsgespräche auf Mitarbeitererebene ergänzt wurden. Die Arbeiten wurden fachlich von Kollegen der Fachbereiche B3.1 und B3.2 der BGR unterstützt, die über eine breite Expertise sowohl hinsichtlich der Abschätzung und Visualisierung der Nutzungspotenziale des geologischen Untergrundes (B3.1) bzw. zur Entstehung, Verteilung und zum inneren Aufbau von Salzstrukturen und der stofflich-strukturellen Charakterisierung der Salinare (B3.2) verfügen.

Die Ausführung der Teil-Arbeitspakete (s. Anhang 0-1) 1.2, 1.3 und 3.4 (Horizontkarten und Störungen sowie 3D-Modelle) wurde in Abstimmung mit den Staatlichen Geologischen Diensten (SGD) der Bundesländer durchgeführt. Dabei mussten neue Arbeitsweisen getestet und validiert werden.

In dem Teil-Arbeitspaket 3.4 (Anwendung von Auswahlkriterien und Entwicklung von Prognosemöglichkeiten zum Internbau) wurde eng mit den geologischen 3D-Modellierern der BGR zusammengearbeitet. Dabei wurden in der BGR das vorhandene Know-how und die



vorhandenen Modelldaten für Auswertungen innerhalb des InSpEE-DS-Verbundvorhabens genutzt.

Für die Bearbeitung der Arbeitspakete wurde neben den Standard Microsoft Office-Anwendungen (2016) auf weitere Programme zugegriffen, deren Zweck im Folgenden erläutert wird. Für die georeferenzierte Visualisierung von Punkt- und Flächeninformationen und die Zusammenführung aller geologischen Basisdaten wurde ArcGIS 10.4.1 for Desktop genutzt. Darüber hinaus erfolgte darin die Bearbeitung der Niveauschnittkarten, ggf. notwendige Koordinatentransformationen und die Bereitstellung der Daten für das öffentliche Informationssystem. Gocad 14.1 (Paradigm) wurde in beiden Arbeitspaketen für den Import, die Visualisierung, die 3D-Modellierung und den Export von strukturgeologischen Informationen aus den zur Verfügung gestellten 3D-Untergrundmodellen verwendet. Die 3D-Modellierung von Salinarstrukturen erfolgte im AP 3 mittels openGEO - einem Autocad basierten Programm, das durch die Firma bicad bereitgestellt und im Rahmen einer Beauftragung an die speziellen Erfordernisse des InSpEE-DS-Verbundvorhabens angepasst wurde. Die Nutzung des SQL Server Management Studio v17.9.1 ermöglichte die Speicherung räumlicher und salzstrukturspezifischer Informationen in einer Datenbank, um die im Verbundvorhaben definierten Vorgaben vereinfacht abfragbar zu machen.

Die genannten Programme sind in der BGR, sowohl im Dienstbereich Hannover als auch im Dienstbereich Berlin, hausweit lizenziert.

Die stofflich-strukturellen Untersuchungen in den Teil-Arbeitspaketen 2.3 und 3.3 erfolgten in der BGR. Die Langzeit-Kriechversuche des Teil-Arbeitspakets 3.3 wurden am Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig (IfG) durchgeführt (s. Anhang 0-1).

0.3 Planung und Ablauf des Verbundvorhabens

Das Verbundprojekt InSpEE-DS zeichnete sich durch eine starke Vernetzung der Arbeitspakete untereinander aus. Die Arbeitspakete 1 bis 3 schufen dabei Grundlagenwissen, welches innerhalb dieser Arbeitspakete benötigt und ausgetauscht wurde und auch die Basis für die Durchführung der Arbeitspakete 4 bis 8 bildete. Das Arbeitspaket 9 beinhaltete die arbeitspaketübergreifende Projektkoordination. Für den erfolgreichen Abschluss des Verbundvorhabens war ein regelmäßiger Austausch der Arbeitspakete einschließlich der Abstimmung von Randbedingungen für das weitere Vorgehen von hoher Bedeutung. Diese Abstimmung erfolgte durch regelmäßigen Arbeitstreffen, in denen der aktuelle Stand vorgestellt, diskutiert und im Rahmen der Fortschreibung eines sich entwickelnden Kriterienkataloges eingearbeitet sowie die für das gesamte Konsortium geltenden Randbedingungen festgehalten wurden. Eine genaue Übersicht des Ablaufplanes des Verbundvorhabens enthält [Anhang 0-1](#). Die Arbeitspakete sind in Unterarbeitspakete gegliedert, die eine rechtzeitige Datenübergabe an andere Arbeitspakete ermöglichte.

Der Aufbau des Endberichtes folgt der Aufteilung der Arbeitsschwerpunkte.



0.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Verbundvorhabens

Das Verbundprojekt InSpEE-DS stellt das Anschlussprojekt des Verbundprojektes InSpEE dar. Somit gilt dieses als grundlegender wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde. Darüber hinaus fokussiert sich die Erfassung des wissenschaftlichen Stands der Technik zu Beginn des Verbundvorhabens entsprechend den Schwerpunkten der Bearbeitung in den drei Häusern der Verbundpartner auf unterschiedliche Themen. Auf verwendete Fachliteratur und Informations- und Dokumentationsdienste wird in den Fachkapiteln an entsprechender Stelle hingewiesen. Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte wurden während der Durchführung des Verbundvorhabens nicht benutzt.

Zur Verbreitung und Tiefenlage der flach lagernden Salinar-Formationen in Deutschland sowie zu ihren geologischen Lagerungsverhältnissen liegen umfangreiche, in zahlreichen, z. T. unveröffentlichten Berichten und in Publikationen verstreute Informationen vor. Eine systematische Auswertung dieser Daten bezüglich Nutzung der Salzsichten für die Errichtung von Speicherkavernen existierte bisher nicht. Neben dem Fehlen grundsätzlicher geologischer Ausgangsinformationen (wie z. B. Tiefenlinienplänen oder Mächtigkeitkarten für die altersverschiedenen flach lagernden Salzsichten für einzelne regionalgeologische Einheiten) sind auch nicht ausreichende Daten zur Zusammensetzung und zu den petrophysikalischen Eigenschaften der Gesteine, des Deckgebirges sowie zur Auslegung von Kavernen zur Speicherung von Druckluft und Wasserstoff zu verzeichnen. Dies führte unter anderem dazu, dass mit dem bisherigen Kenntnisstand zum Beispiel in Süddeutschland keine Potenzialabschätzung vorgenommen werden konnte.

Die Lage der aus Zechstein- und Rotliegend- bzw. Keuper-Salinar aufgebauten Strukturen ist weitestgehend bekannt (Reinhold et al. 2008). Detailinformationen bezüglich lithologisch-strukturellem Internbau, Geometrie und Tiefenlage der Doppelsalinare sowie zu den Speicherkavernen-relevanten Eigenschaften der Gesteine beschränken sich aber auf sehr wenige, bisher genauer untersuchte Salzstrukturen, in denen Speicherkavernen bereits eingerichtet oder geplant sind. Eine systematische Auswertung dieser Daten hinsichtlich ableitbarer Aussagen zum Internbau existierte bisher nicht. Im Forschungsvorhaben InSpEE wurde daher der für den Kavernenbau nutzbare Bereich der Doppelsalinare pauschal für alle Strukturen abgeschätzt, ohne differenzierte Internbautypen für Doppelsalinare auszuweisen. Für eine verbesserte Abschätzung des Speicherpotenzials sind detailliertere Kenntnisse zum Internen Aufbau der einzelnen Doppel- bzw. Mehrfachsalinarstrukturen nötig. Dafür zusätzlich erforderliche Informationen zur Bewertung der Doppel-/Mehrfachsalinarstrukturen liegen bei den Geologischen Landesämtern Schleswig-Holsteins, Hamburgs und Niedersachsens sowie der Erdöl- und Kavernenspeicherindustrie vor, wurden aber bisher nicht im Zusammenhang ausgewertet.

0.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

In den Arbeitspaketen 1, 2 und 3 erfolgte eine intensive Zusammenarbeit mit den Geologischen Diensten der Länder, die sich über die Bereitstellung von Daten in Form von Publikationen, 3D-Modellen und Untersuchungsmaterial (Bohrkerne) bis hin zur Diskussion der gewonnenen Erkenntnisse erstreckte. In die Bearbeitung des Arbeitspaketes 3 flossen die



zum Zeitpunkt der Bearbeitung vorhandenen 3D-Modelle der Geologischen Landesämter von Schleswig-Holstein (LLUH) und Niedersachsen (LBEG) ein.

Der Hauptteil der Untersuchungen wurde an von der Stadtwerken Kiel AG zur Verfügung gestellten gekernten Abschnitten von drei Bohrungen der Salzstruktur Kiel durchgeführt. Durch Kernbefahrungen im Labor Wietze der Firma DEA konnten weitere Referenzproben für das Rotliegendesalinar des Salzstocks Büsum, sowie für den Rotliegend-Zechstein Übergang der Salinarstruktur Heide untersucht werden.

Die 3D-Modellierung des Kavernenstandortes Kiel-Honigsee in Arbeitspaket 3 wurde als Beauftragung durch die Firma DEEP.KBB durchgeführt.

0.6 Verwendung der Zuwendung und Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Zuwendung für das Verbundprojekt InSpEE-DS im Teilprojekt Salz- und Strukturgeologie (AP 1 – 3) wurde gemäß Tabelle 0-1 für Personal- und Reisekosten sowie Materialuntersuchungen aufgewendet.

Tabelle 0-1: Verwendung der Zuwendung

Projektpartner	Position	Kosten [€]
BGR	Personalkosten	857.362,77
	Reisekosten	7.885,80
	Beauftragungen	44.428,65
	Gesamtkosten	909.677,22

0.7 Erzielte Ergebnisse im Einzelnen mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die erzielten Arbeitsergebnisse werden detailliert in den Kapiteln zu den verschiedenen Arbeitsberichten dargestellt. Die Gegenüberstellung der vorgegebenen und erreichten Ziele ist nachfolgend aufgenommen.

Arbeitspaket 1: Flach lagernde Salinar-Formationen: Zusammenstellung und Auswertung der geologischen Daten zu den flach lagernden Salzschieben Deutschlands

Die wichtigsten Ziele des Arbeitspaketes 1 waren die Zusammenstellung, Sichtung und Auswertung geologischer Daten zu flach lagernden Salzschieben Deutschlands und somit die Schaffung einer aktuellen, fundierten geologisch-strukturgeologischen Datengrundlage,



die Erarbeitung von Horizontkarten zur Darstellung der Tiefenlage und Mächtigkeit der verschiedenen Salinarvorkommen sowie die Überführung der erarbeiteten Daten in ein Informationssystem.

Diese Ziele wurden vollumfänglich erreicht.

Die im AP1 erarbeiteten Horizontkarten erwiesen sich für die weiteren Arbeiten im Projekt als geeignet zur Abschätzung der Flächen für die Anlagen von Kavernen. Die zusätzliche 3D-Modellierung einer Region war daher nicht erforderlich.

Arbeitspaket 2: Flach lagernde Salinar-Formationen: Untersuchung der Lagerungsverhältnisse und der Eigenschaften von flach lagernden Salinar-Formationen, stofflich-strukturelle Charakterisierung der Salinar-Formationen

Wichtigste Ziele des Arbeitspaketes 2 waren die Zusammenstellung der Datengrundlagen für flach lagernde Salze, die Erfassung der Ergebnisse in einer Datenbank und Bereitstellung in einem Geoinformationssystem sowie die Erweiterung der Datenbasis durch eigene mineralogisch-geochemische und geomechanische Untersuchungen.

Diese Ziele wurden vollumfänglich erreicht.

Darüber hinaus waren in Arbeitspaket 2 mineralogisch-geochemische und geomechanische Untersuchungen von in Bergwerken aufgeschlossenen Fallstudien zu den Auswirkungen von Störungszonen auf die Barriereigenschaften von flach lagernden Salinarschichten vorgesehen.

Dieses Ziel wurde nicht verfolgt, da kein entsprechendes Probenmaterial zur Verfügung stand.

Arbeitspaket 3: Doppel- und Mehrfachsalinare: Stofflich-strukturelle Charakterisierung der Salinar-Formationen, Untersuchung des Internbaus und geologische 3D-Modelle

In Arbeitspaket 3 wurden Daten zum lithologisch-strukturellen Aufbau der Doppelsalinare zusammengetragen und in der Datenbank und im Informationssystem erfasst. Ergänzt wurde die Datenbasis durch eigene mineralogisch-geochemische und gesteinsphysikalische Analysen sowie die 3D-Modellierung von zwei Doppelsalinarstrukturen zur Charakterisierung des Internbaus.

Alle Ziele wurden vollumfänglich erreicht.



0.8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Da sich die politisch formulierten Ziele zur Energiespeicherung nicht nur auf den Norden Deutschlands beziehen, wurde es als notwendig angesehen, in logischer Fortführung des Projektes InSpEE, sowohl den regionalen Bezug auf ganz Deutschland auszuweiten als auch den Umfang auf die bisher nicht betrachteten Salzformationen zu erweitern, um zur Umsetzung der Ziele beizutragen.

Übergeordnetes Ziel des Verbundprojektes InSpEE-DS war daher die sowohl qualitative als auch räumliche Ermittlung eines Speicherpotenzials für ganz Deutschland sowie die Bereitstellung öffentlicher Daten zu den betrachteten Salinarstrukturen und -bereichen. Dafür wurden im Projekt die wissenschaftlich-technischen Grundlagen zur Auswahl von Salzvorkommen für eine weitere Erkundung in Hinblick auf die Errichtung von Kavernen für die Speicherung von Wasserstoff und Druckluft geschaffen. Die Ergebnisse des Vorhabens dienen der Politik und verschiedenen Branchen der Energiewirtschaft als Planungsgrundlage und haben allgemeinnützigen Charakter, d.h. sie sind öffentlich verfügbar.

Um eine ausreichend gesicherte Aussage zum quantitativen und räumlichen Speicherpotenzial in Deutschland treffen zu können, war es notwendig, eine geologische Datenbasis zu erstellen sowie hinreichend viele Modellkavernen entsprechend verschiedener Salzeigenschaften zu entwickeln. Aufgrund des großen Umfangs der erforderlichen Datenrecherche und Auswertung sowie des hohen Aufwands der Analyse der kleingliedrigen und stark divergierenden Salinarbereiche und -strukturen hinsichtlich ihrer potenziellen Eignung für eine Druckluft- und Wasserstoffspeicherung wird der benötigte Leistungsumfang als angemessenen angesehen.

0.9 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Mit Ende des Verbundvorhabens liegt für Anwender und genehmigende Stellen ein Informationssystem vor, das belastbare geologische und geotechnische Grunddaten – neben denen für die Salzstrukturen des Zechsteins und des Rotliegends – nun auch für die flach lagernden Salinare Deutschlands enthält. Das Ziel, Projekte besser als bisher an den Erfordernissen der späteren Nutzung planbar zu machen, ist auf ganz Deutschland ausgeweitet worden. Es liegen Modellkavernen für eine große Breite an Mächtigkeiten und Teufenlagen vor. Erstmals wird für die flach lagernden Salinare ein Speicherpotenzial quantifiziert. Eine explizite wirtschaftliche Verwertung in Form von Verkauf des erarbeiteten Wissens existiert auf Grund des informierenden Charakters des Verbundvorhabens nicht.

Auf Basis der Ergebnisse können ein Vergleich des erforderlichen Speicherbedarfs mit dem abgeschätzten theoretischen Speicherpotenzial sowie eine räumliche Zuordnung potenziell geeigneter Speicherstandorte für die Errichtung von Kavernenspeicher in Salinarstrukturen und -bereichen erfolgen. Die Anbindung detaillierterer wissenschaftlicher Hintergrundinformationen zu den Einzelstrukturen und -bereichen trägt dazu bei, Auswahlverfahren für eine Erstauswahl von Strukturen zu erleichtern. Die Ergebnisse werden in Form von GIS-basierten Informationssystemen dargestellt und sind auf diese Weise sowohl für die Öffentlichkeit als auch für politische Entscheidungsträger leicht zugänglich. Die Informationssysteme sind



im Geoviewer der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe unter dem Thema Geologie unter dem folgenden Link öffentlich zugänglich:

<https://geoviewer.bgr.de/mapapps/resources/apps/geoviewer/index.html?lang=de>

Mit der Veröffentlichung des Sachberichtes und des Informationssystems ist der Verwertungspflicht des Verbundprojektes nachgekommen. Das Berichtsblatt und das Document control sheet sind in Anhang 0-2 und Anhang 0-3 enthalten.

0.10 Während der Durchführung des Verbundvorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Verbundvorhabens bei anderen Stellen

Die innerhalb der Verbundvorhaben InSpEE und InSpEE-DS entwickelten Informationssysteme „Informationssystem Salzstrukturen“ und „Informationssystem flach lagernde Salze“ bleiben die bislang einzigen Kompilationen aller verfügbaren Daten zu den Zechsteinsalz- und Doppelsalinarstrukturen Norddeutschlands und stellen die erste Kompilation dieser Art für die flach lagernden Salinare dar. Die Weiterführung der Klassifizierung der Salzstrukturen in Internbautypen bleibt eine im Rahmen des Verbundvorhabens entwickelte Methodik. Vergleichbare methodische Ansätze oder Untersuchungsergebnisse liegen von keiner anderen Forschungseinrichtung oder Geologischem Dienst vor.

Die durch umfangreiche Untersuchungen an Bohrkernen gewonnenen neuen Daten zu den speicherrelevanten Eigenschaften flach lagernder Salze und des Rotliegendesalinars wurden ebenfalls ausschließlich innerhalb des Verbundvorhabens erhoben.

Studien, die sich ebenfalls mit der Ermittlung von Speicherpotenzialen in Deutschland beschäftigen, wurden während der Projektlaufzeit nicht veröffentlicht.



0.11 Erfolge und geplante Veröffentlichungen während der Projektlaufzeit

Vorträge

- Donadei, Sabine (2016): Kavernenpotenzial – Ergebnisse aus InSpEE, Rhein-Ruhr-Wasserstoff-Workshop 2016. „Think Big: Wasserstoff für die Energiewirtschaft“, 20.01.2016, Duisburg
- Horváth, Péter László (2016): Projekt InSpEE – GIS-basierte Potenzialabschätzung zur Speicherung von Erneuerbaren Energien in Salzkavernen, DBI-Fachforum GEO-Energie, 15./16.03.2016, Berlin
- Horváth, Péter László (2016): Projekt InSpEE – Bewertungskriterien, Planungsgrundlagen & Methodik der Potenzialabschätzung, BGR Hauskolloquium, 18.10.2016, Hannover
- Onneken, Julia., Henneberg, Mareike., Schlüter, Detlef. (2018): 3D models of internal structures in Rotliegend-Zechstein salt structures in the Glückstadt Graben, Northern Germany. GeoBonn, 2.-6. September 2018.
- Donadei, Sabine; Pollok, Lukas; Schneider, Gregor-Sönke; Zapf, Dirk (2018): Geological Basics, Rock Mechanical Calculations and Methodology for the Evaluation of CAES and H2 Storage Capacity in North Germany's Salt Structures, Saltmech IX, 12.-14.09.2018, BGR Hannover
- Donadei, Sabine (2019): Großspeicher für die Energiewende – Potenzial der Druckluftspeicherung in Salzkavernen, UMSICHT: Zur Sache!, 23.05.2019, Oberhausen
- Horváth, Péter László (2019): Speicherung Erneuerbarer Energien in flach lagernden Salzschichten – Strukturgeologische Grundlagen, Gebirgsmechanische Anforderungen und Potenzialabschätzung, 81. Tagung der Arbeitsgemeinschaft Norddeutscher Geologen, 12.06.2019, Sangerhausen.
- Henneberg, Mareike, Schramm, Michael, Strauss, Harald, Hammer, Jörg (2019): Diagenetic fabric buildup and conservation in evaporitic Rotliegend successions from stratiformal and diapiric settings in the North German Basin. Geophysical Research Abstracts Vol. 21. EGU General Assembly 2019.
- Fleig, Stephanie, Röhling, Simone, et al. (2019): InSpEE-DS: Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung erneuerbarer Energien in Doppelsalinaren und flach lagernden Salzen, BGR Hauskolloquium, 26.11.2019, Hannover.
- Röhling, Simone & Projektteam InSpEE-DS (BGR, IGtH-IUB, Univ. Hannover, DEEP.KBB Hannover) (2020): Das Verbundprojekt InSpEE-DS - Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potenzialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen in flach lagernden Salzschichten und Doppel-/ Mehrfachsalinaren zur Speicherung von Erneuerbaren Energien. BGR Hauskolloquium Dienstbereich Berlin, 12.02.2020, Berlin. https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Nachrichten/Veranstaltungen/2020/Vortragsreihe_Berlin_2020/2020-02-12_abstracts.html;jsessionid=A02AB814FEE36B20009A1469C31E98C8.1_cid331?nn=1545786



Posterbeiträge

- Horváth, Péter László; Donadei, Sabine; Schneider, Gregor-Sönke (2016): GIS-basierte Potenzialabschätzung für Salzkavernen und Aufbau des Informationssystems „Salz“ im Projekt InSpEE, DGMK/ÖGEW-Frühjahrstagung des Fachbereiches Aufsuchung und Gewinnung, 21./22.04.2016, Celle.
- Horváth, Péter László; Donadei, Sabine; Schneider, Gregor-Sönke (2016): GIS-basierte Potenzialabschätzung für Salzkavernen und Aufbau des Informationssystems „Salz“ in den Projekten InSpEE und InSpEE-DS, OLEC-Arbeitskreis H2 Fachveranstaltung „Batterie und Brennstoffzelle: Synergie oder Konkurrenz?“, 29.08.2018, Oldenburg
- Henneberg, Mareike, Hammer, Jörg, Mertineit, Michael (2017): Microstructures in naturally deformed Upper Rotliegend salt rocks from Northern Germany. Geophysical Research Abstracts Vol. 19. EGU General Assembly 2017.

Schriftliche Publikationen

- Donadei, Sabine; Horváth, Péter László; Schneider, Gregor-Sönke (2017): GIS-basierte Potenzialabschätzung für Kavernen in Salzstrukturen im Projekt InSpEE, Erdöl Erdgas Kohle, 133 Jg. 2017, Heft 11, S. 439-446.
- Donadei, Sabine; Pollok, Lukas; Schneider, Gregor-Sönke; Zapf, Dirk (2018): Geological Basics, Rock Mechanical Calculations and Methodology for the Evaluation of CAES and H2 Storage Capacity in North Germany's Salt Structures Saltmech IX Hannover 2018
- Henneberg, Mareike, Mertineit, Michael, Hammer, Jörg, Zulauf, Gernold (2018): Fabric, paleostress and mineralogical composition of impure Rotliegend rock salt (North German Basin). Proceedings of the 9th Conference on the Mechanical Behavior of Salt (SaltMech IX), Hannover, Germany, 12-14 September 2018.
- Horváth, Péter László; Donadei, Sabine; Röhling, Simone; Gast, Sascha; Zapf, Dirk (2019): Speicherung Erneuerbarer Energien in flach lagernden Salzschiefern – Strukturgeologische Grundlagen, Gebirgsmechanische Anforderungen und Potenzialabschätzung – In: Geowissenschaftliche Mitteilungen von Thüringen – Beiheft 12/2019: 81. Tagung der Arbeitsgemeinschaft Norddeutscher Geologen, 11.-14. Juni 2019 Tagungsband und Exkursionsführer: 36-38.
- Henneberg, M., Linckens, J., Schramm, M., Hammer, J., Gerdes, A., Zulauf, G. (submitted): Structural evolution of continental and marine Permian rock salt of the North German Basin: Constraints from microfabrics, geochemistry and U-Pb ages.



1 Teilprojekt Salz- und Strukturgeologie – Arbeitspaket 1

Flach lagernde Salinar-Formationen:

Zusammenstellung und Auswertung der geologischen Daten zu den flach lagernden Salzschiechten Deutschlands

Koordinator/in: Dr. Simone Röhling

Bearbeiter: Dipl. Geol. Sascha Gast, Alexandra Ruales

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	1-2
1.1 Einleitung	1-5
1.2 Geologischer Überblick	1-5
1.3 Projektinterne Kriterien.....	1-7
1.4 Datengrundlage	1-8
1.5 Salinare Bildungen als potenzielle Speichergebiete	1-9
1.5.1 Rotliegend-Salinar.....	1-9
1.5.2 Zechstein-Salinar	1-14
1.5.3 Röt-Salinar	1-31
1.5.4 Muschelkalk-Salinar	1-34
1.5.5 Keuper-Salinar	1-37
1.5.6 Malm-Salinar	1-40
1.5.7 Tertiär-Salinar	1-41
1.6 Planungsrelevante Daten.....	1-42
1.7 Informationssystem	1-45
Literaturverzeichnis.....	1-46



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Stratigraphische Übersicht zu salinaren Schichtenfolgen mit Steinsalzlagern in Deutschland (nach Krull et al. 2004, Menning & Hedrich 2016)	1-6
Abbildung 1-2: Die als Datengrundlage verwendete Geologische Karte „Salzstrukturen Norddeutschlands 1 : 500 000“ (Reinhold et al. 2008)	1-9
Abbildung 1-3: Halit führendes Rotliegend-Salinar innerhalb der Havel-Subgruppe (nach Schröder et al. 1995, Plein)	1-10
Abbildung 1-4: Halit führendes Rotliegend-Salinar innerhalb der Elbe-Subgruppe (nach Schröder et al. 1995, Plein 1995)	1-11
Abbildung 1-5: Schematische Verbreitung des Rotliegend-Salinars in Deutschland (onshore) (nach Katzung 1991, Baldschuhn et al. 1999, Krull et al. 2004, Reinhold et al. 2014)	1-13
Abbildung 1-6: Verbleibendes Bearbeitungsgebiet (ohne Schraffur) für das Rotliegend-Salinar im NDB nach Anwendung des Ausschlusskriteriums „Verbreitungsgebiet von Zechsteindiapiren“ (Kartengrundlage verändert nach Katzung 1991, Baldschuhn et al. 1999, Krull et al. 2004, Reinhold et al. 2008, Reinhold et al. 2014)	1-14
Abbildung 1-7: Schematische Verbreitung des Zechstein-Salinars in Deutschland (onshore) (nach Kulick et al. 1984, Freudenberger & Schwerd 1996, Krull et al. 2004, Reinhold et al. 2014)	1-16
Abbildung 1-8: Tiefenlage der Zechsteinbasis im zentralen Bereich des Südlichen Permbeckens (nach Peryt et al. 2010)	1-17
Abbildung 1-9: Korrelation der Zechstein-Formationen in Bereich des Bearbeitungsgebietes in Mecklenburg-Vorpommern (nach Zagora & Zagora 2004)	1-19
Abbildung 1-10: Schematische Schichtenfolge des Zechsteins in der Bohrung Loissin 1/70 (nach Hoth et al. 1993, LUNG frendl. Mitteilung)	1-20
Abbildung 1-11: Verbreitung und Mächtigkeit des Zechstein-Salinars im Niederrheinischen Zechsteinbeckens (nach Wrede 2016)..	1-22
Abbildung 1-12: Mächtigkeit des Werra-Steinsalzes am linken Niederrhein	1-23
Abbildung 1-13: Steinsalzvorkommen in der Werra-Formation im Niederrheinischen Zechsteinbecken, nach Wolf 1985, Reinhold 2014)	1-24



- Abbildung 1-14: Schematische Schichtenfolge des Zechsteins in der Bohrung Luckenwalde 1/70 (nach Hoth et al. 1993)..... 1-27**
- Abbildung 1-15: Schematisches Profil des Zechsteins vom Beckenzentrum zum Beckenrand im Bereich Südbrandenburgs (nach Koop et al. 2015)..... 1-28**
- Abbildung 1-16: Zechsteinmächtigkeiten im Thüringer Bereich der Thüringischen Senke 1-29**
- Abbildung 1-17: Schematische Verbreitung des Röt-Salinars in Deutschland (onshore) (nach Beutler 2004, Krull et al. 2004, Röhling & Lepper 2013, Reinhold et al. 2014) 1-32**
- Abbildung 1-18: Tiefenlage des Röt-Salinars im Norddeutschen Becken (nach Bachmann et al. 2010)..... 1-33**
- Abbildung 1-19: Verbleibendes Bearbeitungsgebiet (ohne Schraffur) für das Röt-Salinar im NDB nach Anwendung des Ausschlusskriteriums „Verbreitungsgebiet von Zechsteindiapiren“ (Kartengrundlage verändert nach Beutler 2004, Krull et al. 2004, Röhling & Lepper 2013, Reinhold et al. 2008, Reinhold et al. 2014) 1-33**
- Abbildung 1-20: Schematische Verbreitung des Muschelkalk-Salinars in Deutschland (onshore) (nach Seidel 1964, Gärtner & Röhling 1993, Freudenberger & Schwerd 1996, Krull et al. 2004, Reinhold et al. 2014)..... 1-35**
- Abbildung 1-21: Verbleibendes Bearbeitungsgebiet (ohne Schraffur) für das Muschelkalk-Salinar im NDB nach Anwendung des Ausschlusskriteriums „Verbreitungsgebiet von Zechsteindiapiren“ (Kartengrundlage verändert nach Gärtner & Röhling 1993, Krull et al. 2004, Reinhold et al. 2008, Reinhold et al. 2014)..... 1-36**
- Abbildung 1-22: Schematische Verbreitung des Keuper-Salinars in Deutschland (onshore) (verändert nach Kockel 1999, Krull et al. 2004, Reinhold et al. 2014) 1-38**
- Abbildung 1-23: Verbleibende Bearbeitungsgebiet (ohne Schraffur) für das Keuper-Salinar im NDB nach Anwendung des Ausschlusskriteriums „Verbreitungsgebiet von Zechsteindiapiren“ (Kartengrundlage verändert nach Gärtner & Röhling 1993, Krull et al. 2004, Reinhold et al. 2008, Reinhold et al. 2014)..... 1-39**
- Abbildung 1-24: Schematische Verbreitung des Malm-Salinars in Deutschland und verbleibendes Bearbeitungsgebiet (ohne Schraffur) nach Anwendung des Ausschlusskriteriums „Verbreitungsgebiet**



von Zechsteindiapiren“ (Kartengrundlage verändert Kockel & Roland 1977, Krull et al. 2004, Reinhold et al. 2008, Reinhold et al. 2014)..... 1-40

Abbildung 1-25: Durch Salzbergbau auszuschließende Gebiete innerhalb des potenziell nutzbaren Speichergebietes im Bereich des Thüringer Beckens (mit frdl. Unterstützung des Thüringer Landesamtes für Umwelt, Bergbau und Naturschutz)..... 1-42

Abbildung 1-26: Schächte des Kali- und Steinsalzbergbaus in Deutschland1-43

Abbildung 1-27: Schutzgebiete in Deutschland (nach Gast et al. 2012)..... 1-44



1.1 Einleitung

Für die Prognose von Speichermöglichkeiten erneuerbarer Energien in Salinarhorizonten ist es notwendig, die Verbreitung von Salz führenden Horizonten, ihre Mächtigkeiten und Ausdehnungen im tieferen Untergrund zu kennen. Während Details zur Ausdehnung von Salzstrukturen im tieferen Untergrund im Vorgängerprojekt InSpEE erarbeitet wurden (von Goerne et al. 2016) und in Form eines Online-Kartendienstes zugänglich sind, konzentrieren sich die Untersuchungen im Arbeitspaket (AP1) auf Vorkommen von flach lagernden Salzhorizonten in Deutschland außerhalb des Verbreitungsgebietes von Zechsteinsalzdapiiren. Berücksichtigung fanden dabei ausschließlich die onshore-Bereiche.

1.2 Geologischer Überblick

Gegenstand dieser Studie ist der deutsche Anteil des intrakontinentalen Zentraleuropäischen Beckensystems (*Central European Basin System, CEBS*) (van Wees et al. 2000; Maystrenko et al. 2008) einschließlich seiner südlichen Randgebiete. Dieses erstreckt sich über rund 1500 km in WNW-ESE-Richtung von Mittelengland über Norddeutschland bis nach Polen und besteht aus einer Reihe von Teilbecken mit dem sich im Zentrum befindlichen Norddeutschen Becken.

Im Laufe der erdgeschichtlichen Entwicklung kam es aufgrund anhaltender Subsidenz einzelner Beckenbereiche in Zusammenhang mit ariden Klimabedingungen und eingeschränkter Meeresswasserzufuhr zur Bildung salinärer Ablagerungen. Diese finden sich seit dem Perm wiederholt in z. T. mächtigen Salzakkumulationen. Zu nennen sind die paläozoischen Salinarbildungen im Oberrotliegend und Zechstein, die mesozoischen Salinare im Oberen Buntsandstein, im Mittleren Muschelkalk, im Mittleren Keuper und im Oberjura sowie die känozoischen Salinare im Paläogen (Menning & Hendrich 2005, Franz et al. 2018, Gebhardt et al. 2018, Mönning et al. 2018, Menning 2018, Nitsch et al. 2018, Paul et al. 2018, Röhling et al. 2018) (Abbildung 2-1). Auch räumlich variiert die Verteilung der einzelnen salinaren Horizonte. Charakteristisch sind großräumige flach und stratiform gelagerte Schichtenfolgen, die lokal begrenzt flachwellige Deformationsstrukturen und intern z. T. intensiv verfaltete Salzlagen aufweisen können (Reinhold 2014). Waren die Ablagerungen mächtig genug, was insbesondere die Salinare des Oberrotliegend und des Zechsteins betrifft, konnten diese im weiteren Verlauf der Erdgeschichte unter bestimmten geologischen Voraussetzungen mobilisiert werden. Es bildeten sich die heute im zentralen Norddeutschen Becken vorkommenden Salzstrukturen heraus. Außerhalb dieses Bereichs, aber auch zwischen den einzelnen Salzstrukturen, kommen die Salzgesteine in ihrer ursprünglichen flachen Lagerung vor.

Das CEBS entwickelte sich während des Perms in weiten Teilen Mitteleuropas und war in der Folgezeit über das gesamte Mesozoikum hinweg bestimmend für die geologische Entwicklung in diesem Gebiet. In einem Zeitraum von etwa 296 Millionen Jahren (Ma) (Perm bis rezent) kam es dabei zu bis 12 km mächtigen Sedimentfüllungen (Kockel 1999). Während des Unterperm (Rotliegend) wurden anfangs klastische Sedimentserien und Vulkanite in zunächst isoliert vorkommenden intramontanen Becken abgelagert, wobei sich diese Becken nach und nach zu wenigen großen, überregionalen Becken vereinigten. Später entwickelten sich im Zuge einsetzender thermischer Subsidenz flache Ablagerungsräume, die mit mächtigen Playa-Sedimenten (Sandsteine, Tonsteine, Evaporite einschließlich Halit) gefüllt wurden. Mit zunehmender Subsidenz erfolgte zu Beginn des Oberperm (Zechstein)



System	Serie / Gruppe	Stufe / Formation / Subgruppe	Salinar-Vorkommen				
Neogen	Quartär	Pliozän					
		Miozän					
	Paläogen	Oligozän	Chattium Rupelium	Tertiär-Salinar			
		Eozän	Priabonium Bartonium				
			Lutetium Ypresium				
		Paläozän	Thanetium Seelandium				
			Danium				
		Kreide	Oberkreide		Maastrichtium Campanium Santonium Coniacium Turonium	Malm-Salinar	
					Unterkreide		Cenomanium Albium Aptium Barremium Hauterivium
							Valanginium Berriasium
Jura	Oberjura			Tithonium Kimmeridgium Oxfordium			
	Mitteljura			Callovium Bathonium			
			Bajocium Aalenium				
Unterjura	Toarcium Pliensbachium Sinemurium Hettangium						
Trias	Keuper		Exter-Formation Arnstadt-Formation Weser-Formation Stuttgart-Formation Grabfeld-Formation	Keuper-Salinar			
			Muschelkalk		Erfurt-Formation Warburg-Formation Meißner-Formation Trachtenkalk-Formation		
					Buntsandstein		Diemel-Formation Heilbronn-Formation Karlstadt-Formation Jena-Formation
		Röt-Formation Solling-Formation Hardegsen-Formation Detfurth-Formation Volpriehausen-Formation Quickborn-Formation Bernburg-Formation Calvörde-Formation					
	Perm	Zechstein	Fulda-Formation Friesland-Formation Ohre-Formation Aller-Formation Leine-Formation Staßfurt-Formation Werra-Formation	Zechstein-Salinar			
			Rotliegend		Elbe-Subgruppe Havel-Subgruppe Müritz-Subgruppe Altmark-Subgruppe	Rotliegend-Salinar	

eine rasche Transgression, bei der das Norddeutsche Becken einschließlich seiner Nebenbecken als Teil des CEBS von Norden her geflutet wurde. Charakteristisch für den Zechstein waren zyklische Meeresvorstöße unter ansonsten wüstenhaften Bedingungen, die zur wiederholten Eindampfung des Meerwassers und zur Ablagerung von salinaren Gesteinen führten. Ein vollständiger Salinarzyklus beginnt typischerweise mit tonigen Sedimenten, über denen karbonatische, später sulfatische und schließlich chloridische Ausscheidungen (Stein- und Kalisalze) entgegen ihrer jeweiligen Wasserlöslichkeit folgen. Diese Abfolge wiederholte sich während des Zechsteins im Norddeutschen Becken siebenmal. Stratigraphisch werden diese Abfolgen vom Liegenden zum Hangenden als Werra-, Staßfurt-, Leine-, Aller-, Ohre-, Friesland- und Fulda-Formation bezeichnet (Paul et al. 2018).

Mit Beginn der Trias kam es zu einer deutlichen Vergrößerung des CEBS nach Süden mit Verbindungen zur Tethys. Die triassischen Ablagerungen werden sowohl von kontinentalen als auch von marinen Sedimenten geprägt. Im Wesentlichen sind es festländische Sedimente im Buntsandstein, flachmarine Karbonate und z. T. hypersalinare Sedimente im Muschelkalk sowie marin-brackische und fluviatile Sedimente im Keuper. In allen drei genannten stratigraphischen Einheiten kam es, aufgrund eingeschränkter Verbindungen zur Tethys zur z. T. großräumigen Ausbildung von stellenweise sehr mächtigen salinaren Horizonten.

Abbildung 1-1: Stratigraphische Übersicht zu salinaren Schichtenfolgen mit Steinsalzlagerstätten in Deutschland (nach Krull et al. 2004, Menning & Hedrich 2016)



Im Norddeutschen Becken kam es bereits im Buntsandstein zu ersten Salzbewegungen (von Goerne et al. 2016). Starke Riftbewegungen an Sockelstörungen sind im Keuper (Grabfeld- und Weser-Formation) zu verzeichnen. Dabei waren die Dilatationsbewegungen unter Umständen so stark, dass die Sedimenthülle über den Salzakkumulationen zerriss und das Salz in Form von Diapiren an die Oberfläche fließen konnte (z. B. Jaritz 1973; Kockel et al. 1995; Baldschuhn et al. 2001, Brückner-Röhling et al. 2002). Während des Jura kam es erneut zur Sedimentation von wechselnd marinen und kontinentalen Ablagerungen mit salinaren Bildungen im Oberjura. In der Kreide wurde das bis dahin extensiv geprägte Becken kompressiv beeinflusst. Es kam zu einer Beckeninversion, bei der einzelne Gebiete angehoben und mesozoische Sedimente teilweise großflächig erodiert wurden. Bereits existierende Strukturen wurden überprägt, alte (kaledonische) Störungssysteme reaktiviert und die Strukturen der heute NW-SE orientierten Salzstöcke im Norddeutschen Becken angelegt (u.a. Baldschuhn et al. 1991, Kockel 2003, Kley & Voigt 2008; Scheck-Wenderoth et al. 2008). Nach der Oberkreide-Inversion unterlag das Norddeutsche Becken ab dem Tertiär erneut einer Beckenabsenkung, die bis heute anhält. Verstärkt wurde dies durch einsetzende Dehnungsbewegungen als Folge der Alpidischen Orogenese, die auch die Diapirbildungsrate erhöhte.

Erwähnt werden soll hier noch der Oberrheingraben, ein durch Reaktivierung des unterkarbonisch angelegten Oberrhein-Scherzonensystems. (Illies 1965, Edel et al. 2007) NNE-SSW gerichtetes Grabenbruchsystem, dessen Riftphase im Eozän begann. Charakteristisch sind marine Ingressionen sowohl von Norden als auch von Süden. Mehrfach trocknete das Meer beim Rückzug aus, wodurch es insbesondere im Eozän und frühen Oligozän zur Ausbildung salinärer Sedimente bis hin zu Kalisalzen kam. Anhaltende Dehnungsbewegungen führten auch hier zu Diapirbildungen.

Im Quartär veränderten Gletscher und Schmelzwässer die Morphologie. Tiefe Rinnen entwässerten die Gletscher. Solche subglazialen Rinnen können bis zu 500 m (z. B. Stackebrandt 1999; Stackebrandt et al. 2010, Reinhardt et al. 2017) tief eingeschnitten sein. Sie sind meist mit Moränenmaterial verfüllt.

1.3 Projektinterne Kriterien

Für die Erarbeitung und Bereitstellung von Planungsgrundlagen zur Standortauswahl und zur Errichtung von Salzkavernen für die Speicherung von erneuerbaren Energien mittels Wasserstoff- und Druckluftspeicherung in flach lagernden Salzschieben ist es notwendig, die Verbreitung der einzelnen salzführenden Horizonte räumlich weiter zu differenzieren. Unter Beteiligung aller Verbundpartner wurden Anforderungen und Kriterien erarbeitet, auf deren Grundlage Eignungsbewertungen für diese salinaren Schichtenfolgen in einem noch relativ frühen Stadium der Standorterkundung, d. h. bei noch relativ geringen Kenntnissen zum Aufbau der Salinare möglich sind. Im Verlauf der Potenzialermittlung (AP6) wurden die unter Berücksichtigung der geologischen und gebirgsmechanischen Vorgaben entstandenen Kriterien überprüft und angepasst.

Die folgenden Kriterien wurden zur Bewertung und Abgrenzung von potenziell geeigneter Speichergebiete herangezogen:

- Maximale Teufenlage der Salzhorizontoberfläche 2.000 m
- Minimale Teufenlage 400 m
- Mindestmächtigkeit des Salzes 70 m



- Sicherheitspuffer von 250 m zu Störungen
- Ausschluss von Flächen innerhalb des Verbreitungsgebietes von Zechsteindiapiren
- Ausschluss von Flächen mit bergbaulichen Aktivitäten

Kriterien, die im Ausführungsfall zu berücksichtigen sind, wie z. B. Landschaftsschutz, die Soleverbringungsinfrastruktur und Wirtschaftsfaktoren wurden nicht berücksichtigt, da diese infrastrukturellen, technischen und politischen Bedingungen untergeordnet sind, welche Änderungen unterliegen können. Detailliert werden die Kriterien in Kapitel 6 beschrieben.

1.4 Datengrundlage

Für das gesamte Bundesgebiet existieren bislang keine einheitlichen Bearbeitungen hinsichtlich der Tiefenlage und Mächtigkeiten einzelner stratigraphischer Horizonte. Die Verwendung des Southern Permian Basin Area Atlas (SPBA) (Doornenbal & Stevenson 2010) für die Bearbeitung des Norddeutschen Raumes wurde bereits im Vorgängerprojekt InSpEE geprüft. Der SPBA enthält großflächig vereinheitlichte Strukturkarten verschiedener relevanter Horizonte, die jedoch u. a. auf Grund des kleinen Maßstabes (1 : 3 000 000) als Arbeitsgrundlage ungeeignet erschienen (von Goerne et al. 2016). Aufgrund dessen wurde auf die Kartenwerke des „Geotektonischen Atlas von Nordwestdeutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor“ (GTA) (Baldschuhn et al. 2001) und das „Regionale Kartenwerk der Reflexionsseismik“ (GPK) (Reinhardt et al. 1968-1991) zurückgegriffen, die beide auf ähnlichen Arbeitsweisen und Zielmaßstäben (1 : 300 000 bzw. 1 : 500 000, 1 : 200 000 und 1 : 100 000) beruhen. Berücksichtigt werden muss aber auch hier, dass im GTA die Grenzflächen stratigraphischer Einheiten betrachtet wurden, während im GPK die Isolinien auf der flächenmäßigen Darstellung der geophysikalisch erfassten seismischen Reflektoren und ihrer Zuordnung zu stratigraphischen Horizonten (s. a. Müller et al. 2016, Rappsilber et al. 2019) basieren. Aus den Kartengrundlagen wurden all jene Horizonte selektiert, die zur Ableitung vom Mächtigkeiten der jeweiligen steinsalzführenden stratigraphischen Horizonte notwendig waren. Mächtigkeiten von Salzhorizonten sind aus diesen Karten nicht ableitbar. Diese Aussagen werden dem Nutzer anhand von Referenzprofilen, die auf Grundlage veröffentlichter Bohrungen erarbeitet wurden zur Verfügung gestellt. Aussagen zum generellen lithologischen Aufbau in einer Region sind demzufolge möglich.

Darüber hinaus lieferte die Salzstrukturkarte (Reinhold et al. 2008) eine sehr gute übersichtsmäßige Darstellung zur Verbreitung norddeutscher Salzstrukturen im Untergrund Norddeutschlands (Abbildung 1-2). Der Karte können die jeweiligen Strukturtyp und -formen sowie die Verbreitungsgrenzen der Salzkissen und -diapire entnommen werden, so dass diese Karte als eine Grundlage bei der Anwendung der Bearbeitungskriterien herangezogen. Zusätzlich wurden bei der Bearbeitung auf eine Vielzahl von Archivunterlagen (Regionalberichte, Einzelberichte des GTA, Bohrungsdokumentationen) sowie in Abstimmung mit den SGD der Bundesländer auf vorhandene 3D-Modelle der Bundesländer zurückgegriffen (u. a. 3D-Modell des Thüringer Beckens).

Innerhalb des Bearbeitungsgebietes werden die Salzhorizonte vom Ältesten zum Jüngsten bearbeitet. Zur Potenzialabschätzung (AP 6) werden im Ergebnis des Arbeitspaketes Strukturkarten von Top (Oberfläche) und der Basis (Unterkante) und Karten der berechneten

Mächtigkeit sowie Referenzprofile der jeweiligen steinsalzführenden stratigraphischen Einheit übergeben und in einem zu erstellenden Informationssystem dem Nutzer zur Verfügung gestellt.

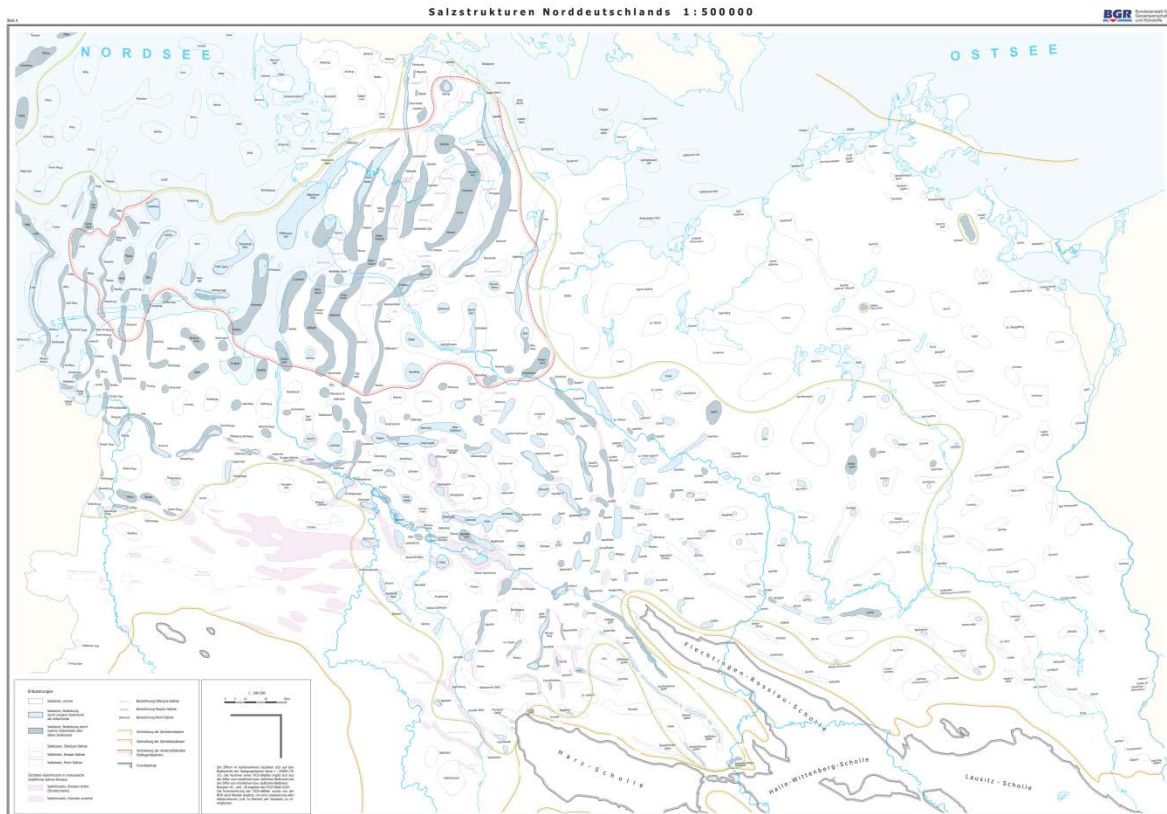


Abbildung 1-2: Die als Datengrundlage verwendete Geologische Karte „Salzstrukturen Norddeutschlands 1 : 500 000“ (Reinhold et al. 2008)

1.5 Salinare Bildungen als potenzielle Speichergebiete

1.5.1 Rotliegend-Salinar

Rotliegend-Salinare finden sich im Oberrotliegend in der Havel- und der Elbe-Subgruppe und konzentrieren sich auf die zentralen Bereiche des Norddeutschen Beckens als dem zentralen Teil des Südlichen Permbeckens (SPB) (u. a. Plein 1995, Gast et al. 2010). Nach Gebhardt (1994) sind die Salinare ausschließlich kontinentaler Entstehung und wurden in einem Playa-Environment unter semiariden bis ariden Klimabedingungen gebildet. Wasserspiegelschwankungen sind klimatisch gesteuert und werden darüber hinaus durch kurzzeitige marine Ingressionen beeinflusst (Gebhardt 1994, Plein 1995, Legler 2005, Stollhufen et al. 2008). Während die Salinarvorkommen in der Havel-Subgruppe noch auf relativ kleine, beckenzentralgelegene Gebiete (südöstliche Nordsee, Elbmündungsgebiet, Westmecklenburg) beschränkt sind, wird mit Beginn der Elbe-Subgruppe der Sedimentationsraum deutlich nach Westen und Nordwesten erweitert und ein großer perennierender Salzsee prägte das zentrale Norddeutsche Becken im Bereich der heutigen Nordsee. Im Verlauf der Elbe-Subgruppe dehnt sich dieser Salzsee zunehmend nach Osten und Süden bis nach Mecklenburg und Brandenburg aus (u. a. Plein 1995, Gast 2010, Legler et al. 2011).

Die ältesten Rotliegend-Salinare wurden in der Bohrung Schwerin 1/87 innerhalb der Havel-Subgruppe in der Parchim-Formation erbohrt. Es handelt sich um Playa ähnliche Sedimente mit einer ca. 75 m mächtigen Haliteinschaltung (Schröder et al. 1995). In der Mirow-Formation, obere Havel-Subgruppe, sind halitische Ausfällungen auf den südöstlichen Nordseeraum beschränkt, zwei sehr unreine Steinsalzlager wurden u. a. in der Bohrung Nordsee J-5-1 nachgewiesen (Gralla 1988, Schröder et al. 1995) (Abbildung 1-3).

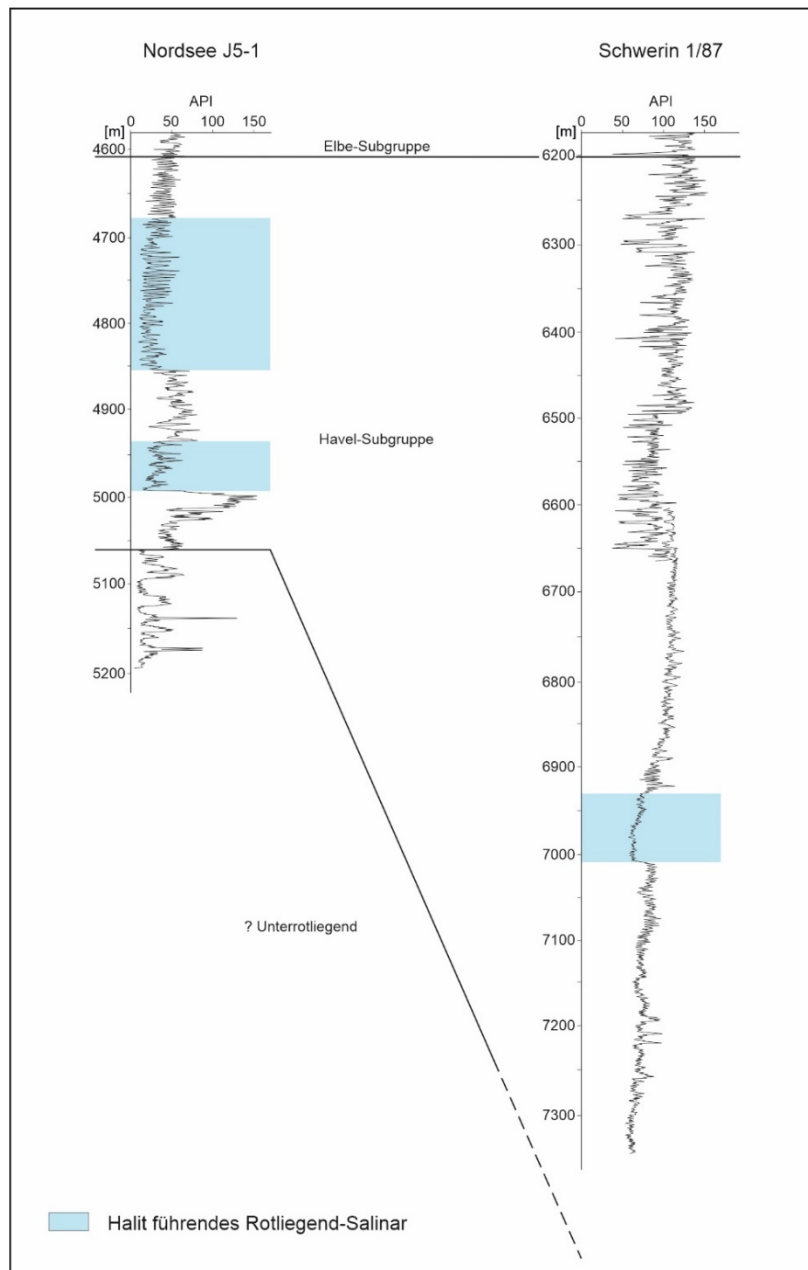


Abbildung 1-3: Halit führendes Rotliegend-Salinar innerhalb der Havel-Subgruppe (nach Schröder et al. 1995, Plein)

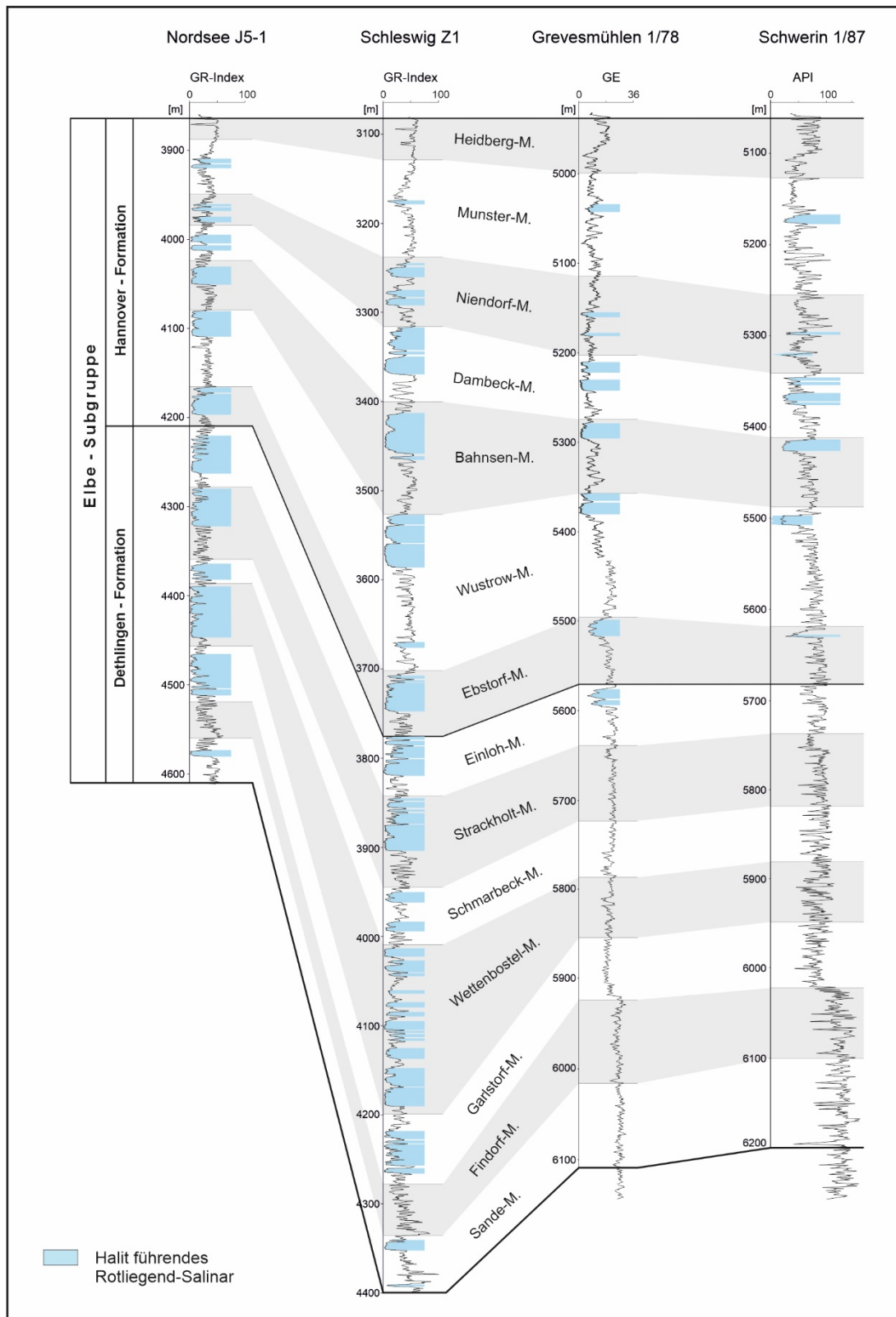


Abbildung 1-4: Halit führendes Rotliegend-Salinar innerhalb der Elbe-Subgruppe (nach Schröder et al. 1995, Plein 1995)



In der Elbe-Subgruppe dominieren Playa-Sedimente die Ablagerungen im zentralen Bereich des Norddeutschen Beckens. Hier wird die bis ca. 1300 m mächtige sedimentäre Abfolge von lakustrinen Ton-Siltsteinen, Halitbänken und geringmächtigen Anhydrit- und Kalklagen bestimmt (s. Kap. 2). Während innerhalb der Dethlingen-Formation die Halitbänke noch überwiegend auf einen Bereich zwischen dem Horn-Graben und der Elbmündung beschränkt sind, erreicht die Halitverbreitung innerhalb der Hannover-Formation ihren Höhepunkt (Plein 1995). Die z. T. mächtigen Steinsalzlager sind dabei bis nach Westmecklenburg durchgängig verbreitet, wobei der Halitanteil im westlichen Beckenzentrum wesentlich größer ist und hier – im Vergleich zum östlichen Beckenzentrum – auch die Abfolge dominiert (Abbildung 1-4). In Richtung der Beckenränder nimmt die Anzahl und Mächtigkeit der Steinsalzlager ab (Reinhold & Hammer 2016). In ihrem gesamten Verbreitungsgebiet werden die Salinare in Teufen deutlich unter 4000 m angetroffen (Gast et al. 2010). Lediglich im Verbreitungsbereich strukturbildender Rotliegend-Salinare ist mit deutlich geringeren Teufen zu rechnen (s. Kap. 3).

Heute finden sich die Rotliegend-Salinare in Norddeutschland von der südlichen Nordsee bis nach Mecklenburg. Die südliche Begrenzung entspricht in etwa einer Linie westlich von Norderney über Bremen – Uelzen – Salzwedel bis nach Nordwestbrandenburg und das nordöstliche Sachsen-Anhalt. Im Norden reicht die Verbreitung bis etwa zur dänischen Grenze, streift den Südtteil der Insel Fehmarn bis südlich Rostock, im Osten bis zur Dosse und Müritz. Darüber hinaus sind Salinare in einem NW-SE gerichteten begrenzten Gebiet nördlich des Flechtinger Höhenzugs verbreitet (Abbildung 1-5).

Entsprechend des Kriterium „Ausschluss von Flächen innerhalb des Verbreitungsgebietes von Zechsteindiapiren“ wurde die Flächen „Verbreitung von Rotliegend-Salinaren“ mit der Fläche „Verbreitungsgebiet von Zechsteindiapiren“ verschnitten, so dass sich das zu betrachtende Gebiet deutlich auf einen Bereich im nordöstlichsten Schleswig-Holstein und einen in Mecklenburg reduziert hat (Abbildung 1-6). Für diese Gebiete werden, u. a. abgeleitet aus Bohrungen sowie nach Gast (2010), für die Salinarhorizonte Teufen von mehr als 4000 m angenommen. Auf Grund dessen kommen die flach lagernden Rotliegend-Salinare als Potenziale für die Speicherung von Wasserstoff und Druckluft nicht in Betracht.

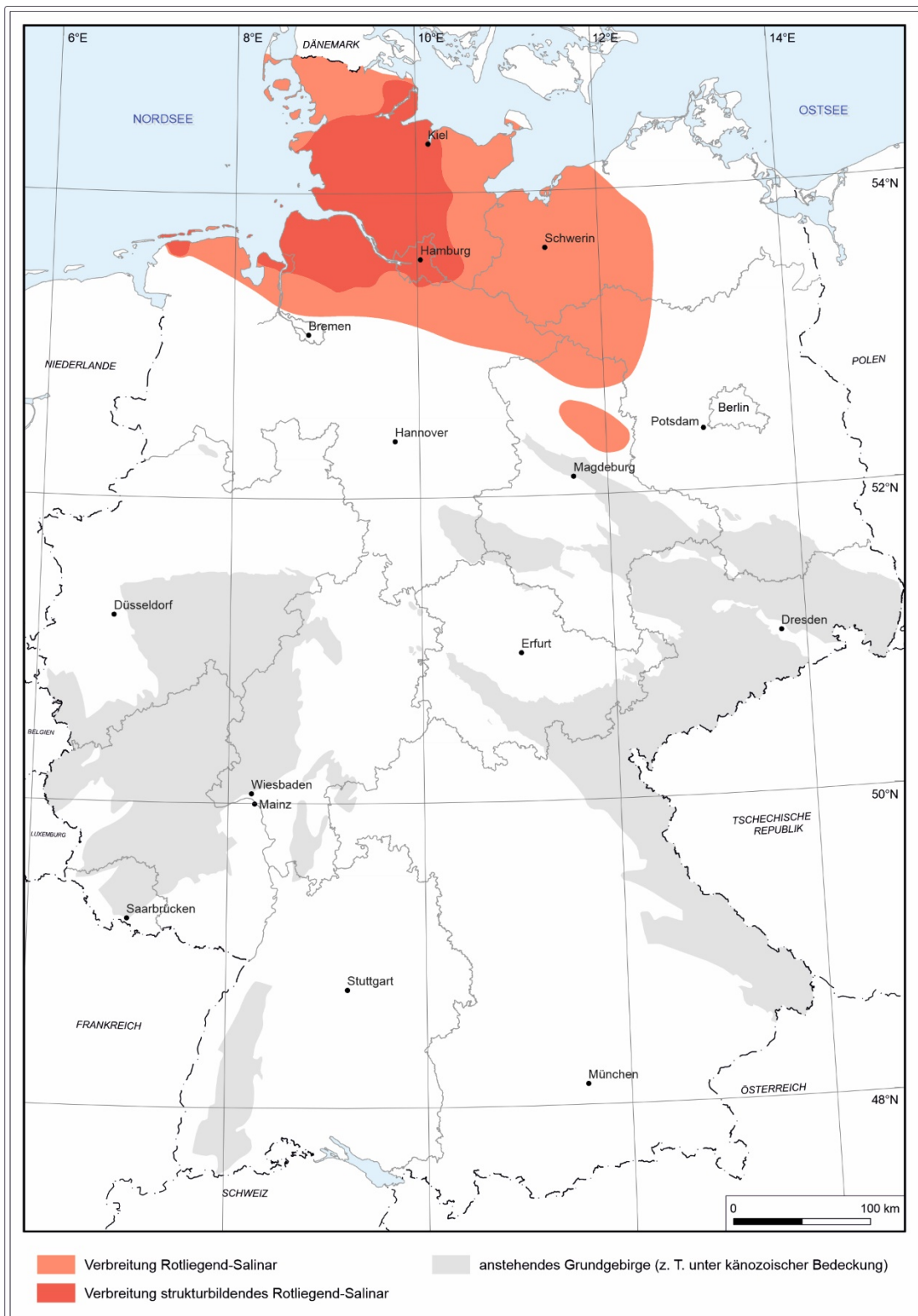


Abbildung 1-5: Schematische Verbreitung des Rotliegend-Salinars in Deutschland (on-shore) (nach Katzung 1991, Baldschuhn et al. 1999, Krull et al. 2004, Reinhold et al. 2014)



Abbildung 1-6: Verbleibendes Bearbeitungsgebiet (ohne Schraffur) für das Rotliegend-Salinars im NDB nach Anwendung des Ausschlusskriteriums „Verbreitungsgebiet von Zechsteindiapiren“ (Kartengrundlage verändert nach Katzung 1991, Baldschuhn et al. 1999, Krull et al. 2004, Reinhold et al. 2008, Reinhold et al. 2014)

1.5.2 Zechstein-Salinars

Das oberpermische marin geprägte Zechsteinbecken entwickelte sich infolge einer raschen marinen Flutung aus dem intrakontinentalen Rotliegend-Becken. Durch eine Kombination aus Rifting und eustatischem Meeresspiegelanstieg (Glennie & Buller 1983) hatte diese rasche Überflutung Auswirkungen auf die Lithosphäre, was zu weiteren regionalen Absenkungen und Überschreitungen der Ränder des Rotliegend-Beckens führte (Peryt et al. 2010). Existierten im Rotliegend neben dem großen Norddeutschen Becken viele kleinere isolierte Becken, so waren im Zechstein die Nebenbecken mit dem Hauptbecken verbunden. Hauptablagerungsraum war wiederum das NW-SE-streichende südliche Permbecken mit dem Norddeutschen Becken als zentralen Teil. Dieses Ablagerungsgebiet wird durch mehrere variszische Hochflächen begrenzt, darunter das Rheinische Massiv im Süden und die Hochflächen des Mittleren Nordsee-Hochs und des Ringkøbing-Fünen-Møn-Arkona-Hochs im Norden. Gebiete, in denen der Zechstein nicht vorhanden ist, stehen meist im Zusammenhang mit der Erosion, entweder im Zusammenhang mit der regionalen präkretazischen Diskordanz oder durch Hebung im Zusammenhang mit der Beckeninversion in der Spätkreide (Peryt et al. 2010).



Insbesondere aufgrund wiederholter glazieustatischer Meeresspiegelschwankungen und arider Klimabedingungen führten mehrmalige marine Ingressionen aus dem arktischen Bereich zur Ausbildung salinärer Zyklen, die im Idealfall mit einem transgressionalen marinen Tonstein beginnen. Mit steigender Salinität folgen Karbonate, Sulfate, Steinsalz und schließlich Kalium- und Magnesiumsalze. Ein terrestrischer evaporitischer Tonstein, früher als Salztone bezeichnet, schließt einen idealen Salinar-Zyklus ab (Paul et al. 2018). Innerhalb des Zechsteins entstanden so sieben zyklisch gegliederte Abfolgen, die stratigraphischen Formationen zugeordnet werden (u. a. Peryt et al. 2010, Paul et al. 2018). Vom Liegenden zum Hangenden sind dies die Werra-, Staßfurt-, Leine-, Aller-, Ohre-, Friesland und Fulda-Formationen (Paul et al. 2018). Steinsalzlager sind in diesen sieben Formationen in unterschiedlicher Mächtigkeit und Verbreitung entwickelt (Kockel 1999) und reichen von Norddeutschland bis in die Niederrheinische Bucht sowie weiter östlich bis nach Thüringen, Südhessen und Nordbayern (Abbildung 1-7). Diese Variationen in Verbreitung und Mächtigkeit, aber auch die faziellen Ausbildung der Evaporite, werden auf syndimentäre Tektonik zu Beginn des Zechsteins sowie die paläogeographische Position innerhalb des Zechsteinbeckens zurückgeführt. Für die beckenzentralen Bereiche werden ursprüngliche Zechsteinmächtigkeiten von ca. 1100 bis 1500 m angenommen, die zu den Randbereichen hin deutlich abnehmen (u. a. Ziegler 1990, Baldschuhn et al. 2001, Stollhofen et al. 2008, Stackebrandt 2010). Zum Beckenrand hin schließen sich Lagunen und Sabkas an, in denen zunehmend Mergel, tonige Sulfate und evaporitische Tonsteine dominieren. Diese Ablagerungsräume wiederum grenzen an die terrestrischen Beckenrandbereiche mit fluviatil dominierter Fazies (Paul et al. 2018).

Während des Mesozoikum und Känozoikum kam es in beckenzentralen Bereichen zu intensiven halokinetischen und halotektonischen Prozessen mit intensiven Salzbewegungen (Abwanderungen, Akkumulationen), die zur Ausbildung zahlreicher Salzstrukturen, insbesondere Salzdiapire und Salzkissen, führten.

Außerhalb der Verbreitung der Zechsteindiapire (Abbildung 1-7) kommen die Zechsteinsalinare in flacher konkordanter Lagerung vor. Zu nennen wären hier das nordöstliche und östliche Norddeutsche Becken sowie das südliche Norddeutsche Becken mit dem Niederrhein-Ems-Gebiet, dem Mittelweser-Gebiet und der Lausitz sowie die sich an das NDB südlich anschließenden Beckenteile wie das Thüringer Becken, das Werra-Fulda-Becken und das Fränkische Becken. Heute liegt die Basis des Steinsalzes in diesen Gebieten in wenigen hundert Metern unter Geländeoberkante, sinkt aber zum Beckenzentrum auf Teufen von über 5000 m (u. a. in Westmecklenburg sowie im westlichen Niedersachsen-Becken) ab (Krull et al. 2004, Peryt et al. 2010, s. a. Abbildung 1-8).

Für die Bearbeitung der Zechsteinsalinare wurden aufgrund der flächenhaften Datenverfügbarkeit auf kartenmäßige Darstellungen der Tiefenlage der Zechsteinbasis und auf Darstellungen zur Tielage des Top der Zechsteinsalinare, insbesondere im östlichen Bearbeitungsgebiet, sowie auf die Tiefenlage Top Zechstein, im westlichen Bearbeitungsgebiet, zurückgegriffen. Demzufolge spiegeln die Mächtigkeitsdarstellungen, die aus diesen Karten berechnet wurden, die Gesamtmächtigkeit des Zechsteins wieder und nicht die der reinen Zechsteinsalinare.

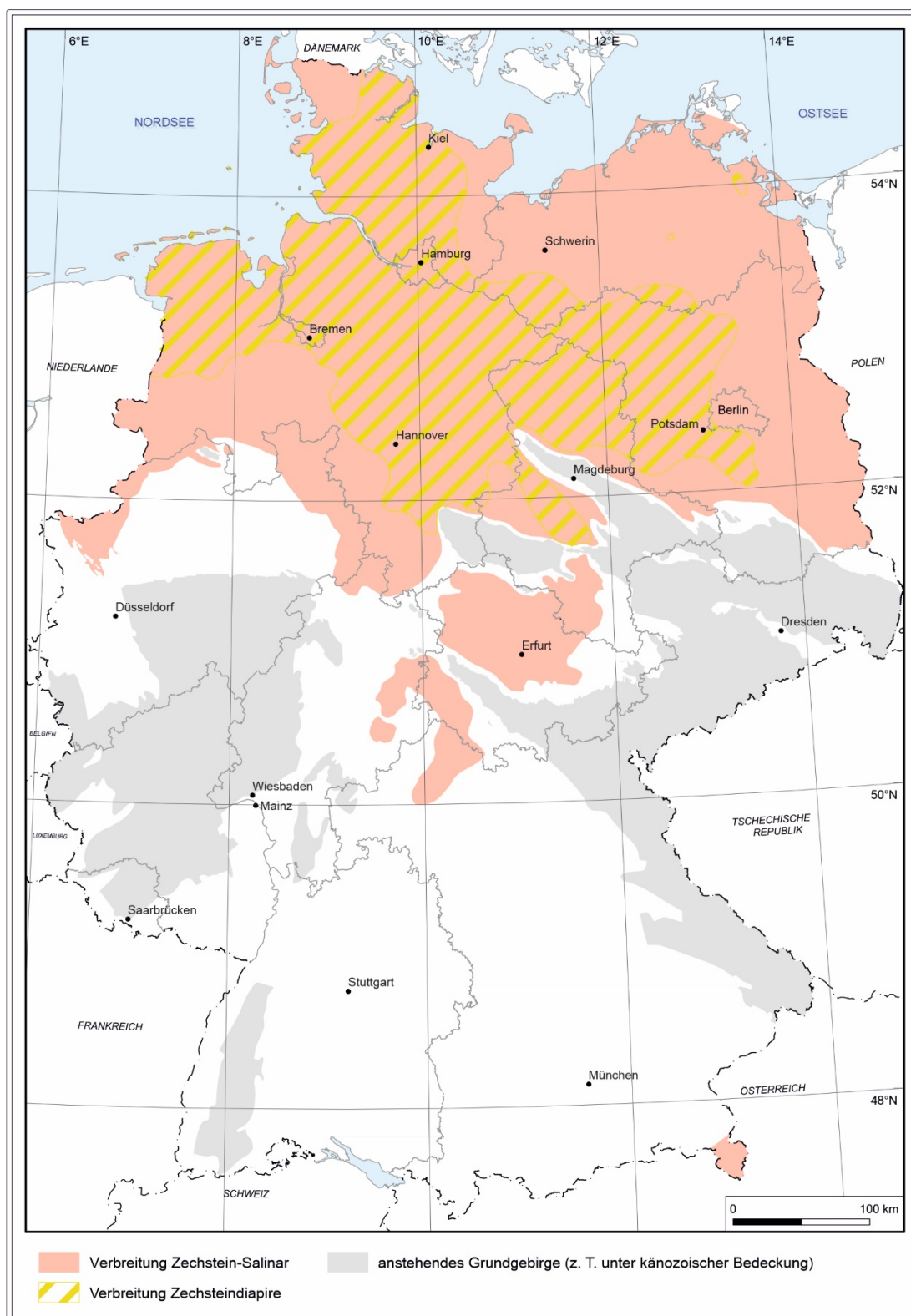


Abbildung 1-7: Schematische Verbreitung des Zechstein-Salinars in Deutschland (on-shore) (nach Kulick et al. 1984, Freudenberger & Schwerd 1996, Krull et al. 2004, Reinhold et al. 2014)

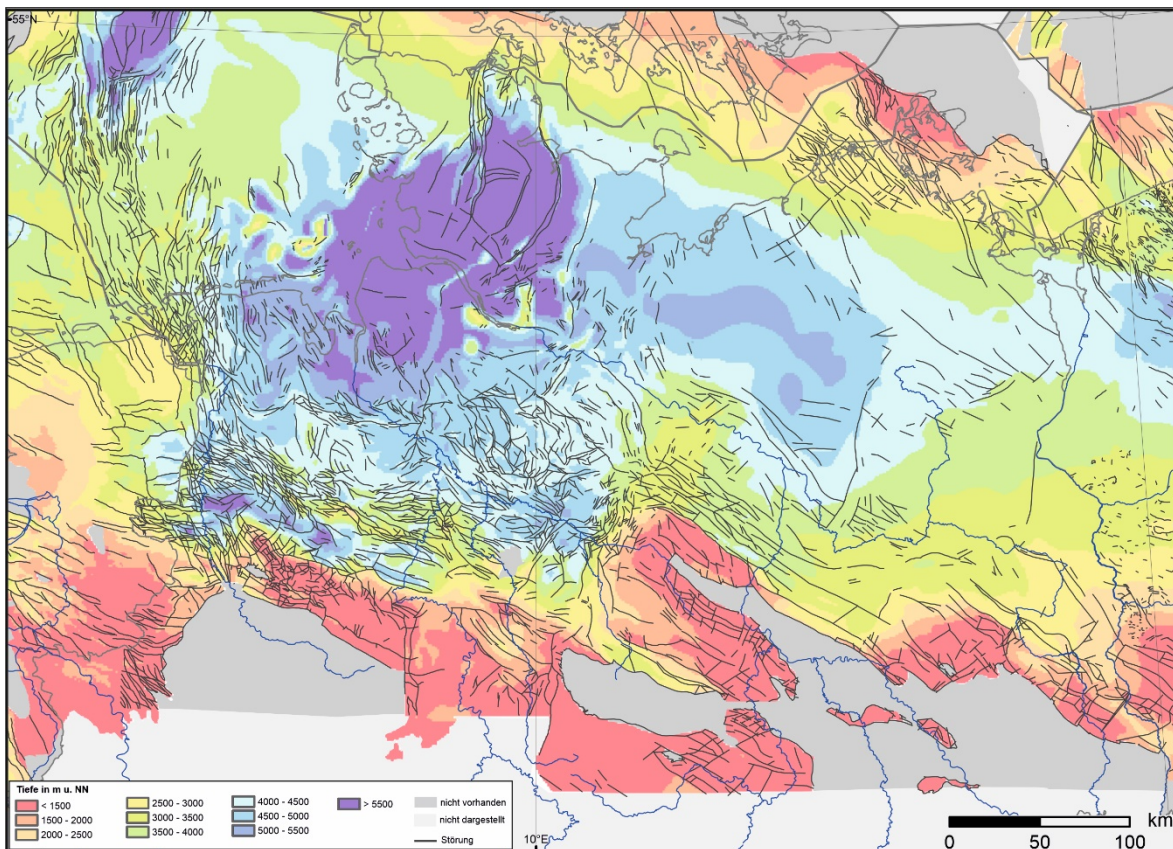


Abbildung 1-8: Tiefenlage der Zechsteinbasis im zentralen Bereich des Südlichen Permbeckens (nach Peryt et al. 2010)

Für die Untersuchungen zur Tiefenlage des Zechsteins standen für das Norddeutsche Becken zum einen der GTA (Baldschuhn et al. 2001) für das NW-deutsche Teilgebiet sowie zum anderen das GPK (Reinhardt et al. 1968-1991) für das NE-deutsche Teilgebiet zur Verfügung. Verwendung fanden dabei die Karten der Zechstein-Basis (GTA) und die Darstellungen der Tiefenlinien der reflexionsseismischen Horizonte Z1 (stratigraphische Zuordnung: Top Basalanhydrit) und Z3 (stratigraphische Zuordnung: Basis Zechstein) (GPK). Für die Bestimmung des Top Zechstein wurden ebenfalls die oben erwähnten Kartenwerke genutzt. Anwendung fanden hierbei die Karten der den Zechstein überlagernden Horizonte (GTA), in der Regel die Karten Basis Unterer Buntsandstein, sowie die Darstellungen der Tiefenlinien des reflexionsseismischen Horizontes X1 (stratigraphische Zuordnung: Top Zechsteinsalinar) (GPK). Die Bezugshöhen dieser Kartendarstellungen werden in Meter unter Normalnull (m u. NN) angegeben.

Darüber hinaus stand neben den genannten Kartenwerken eine Vielzahl von Studien und Publikationen insbesondere für Untersuchungen außerhalb des Norddeutschen Beckens zur Verfügung. Zu nennen wären hier u. a. die Geologischen 3D-Modelle von Thüringen und Brandenburg, die Erläuterungen zu den Geologischen Karten 1 : 25 000 von Hessen und Thüringen sowie Studien und Publikationen, u. a. Teichmüller (1957), Wolburg (1957), Kulick et al. (1984), Wolf (1985), Juch (1994), Beer & Stackebrandt (2000), Seidel (2003, 2004), Katzung (2004), Krull et al. (2004), Stackebrandt (2010), Reinhold et al. (2014), Stackebrandt & Franke (2015), Reinhold & Hammer (2016), Koop (2015). Bei unzureichender Datenlage werden keine Aussagen zu Teufenlagen gegeben. Die entsprechenden Gebiete werden als Unsicherheitsflächen dargestellt.



Entsprechend des Kriteriums „Ausschluss von Flächen innerhalb des Verbreitungsgebietes von Zechsteindiapiren“ wurden die Flächen „Verbreitung von Zechstein-Salinaren“ mit der Fläche „Verbreitungsgebiet von Zechsteindiapiren“ verschnitten, so dass sich das zu betrachtende Gebiet im Norden auf einen Bereich vom östlichen Schleswig-Holstein über Mecklenburg bis zur polnischen Grenze, im Osten auf das östliche und südliche Brandenburg und im Süden auf ein Gebiet vom Niederrhein über das Emsland bis Delmenhorst-Bremen und weiter nach Südosten bis Northeim-Hannoversch-Münden reduziert. Darüber hinaus umfasst das zu betrachtende Gebiet die Umrandung der Flechtingen-Rosslau-Scholle und Teile des Subherzyns sowie im Süden das Thüringer, das Werra-Fulda- und das Fränkische Becken (Abbildung 1-7).

Mit Anwendung des Kriteriums „Maximale Teufenlage der Salzhorizontoberfläche 2000 m“ wurden die zur Tiefenlage Top Zechstein erarbeiteten Grundlagen auf Flächen flacher als 2000 m u. NN (bzw. -2000 m ü. NN) beschränkt. Im Ergebnis finden sich die im Folgenden als potenziell nutzbare Speichergebiete bezeichneten Bereiche innerhalb des deutschen Zechsteinverbreitungsgebietes:

- Nördliches Norddeutsches Becken: Teilgebiet Mecklenburg-Vorpommern (Anl. 1-1)
- Südliches Norddeutsches Becken: Teilgebiet Nordrhein-Westfalen – SW-Niedersachsen (Anl. 1-2)
- Südliches Norddeutsches Becken: Teilgebiet NE-Nordrhein-Westfalen – S-Niedersachsen (Anl. 1-3)
- Südliches Norddeutsches Becken: Teilgebiet E-Niedersachsen – Sachsen-Anhalt (Anl. 1-4)
- Südliches Norddeutsches Becken: Teilgebiet Südbrandenburg (Anl. 1-5)
- Thüringer Becken (Anl. 1-6)
- Werra-Fulda-Becken und Fränkisches Becken (Anl. 1-7).

Nördliches Norddeutsches Becken: Teilgebiet Mecklenburg-Vorpommern (Anl. 1-1)

Im Bereich des Nördlichen Norddeutschen Beckens beschränken sich nach Anwendung der Kriterien „Ausschluss von Flächen innerhalb des Verbreitungsgebietes von Zechsteindiapiren“ und „Maximale Teufenlage der Salzhorizontoberfläche 2000 m“ potenziell nutzbare Speichergebiete, auch als Bearbeitungsgebiet bezeichnet, auf den Osten von Mecklenburg-Vorpommern auf einen Bereich östlich der Ortschaft Dierhagen einschließlich einzelner Teilgebiete der Halbinsel Fischland-Darß-Zingst, den südlichen Ausläufern der Insel Hiddensee und dem Südteil der Insel Rügen bis nördlich von Bergen auf Rügen. Nach Süden wird das Gebiet entlang einer Linie Dierhagen – Saal – Grimmen – Greifswald – Wusterhusen – Kröslin begrenzt.

Während die südliche Begrenzung durch das Teufenkriterium 2000 m gekennzeichnet ist, wird die nördliche Begrenzung des potenziellen Speichergebietes durch die Grenze der Verbreitung der Zechsteinsalinare nach Reinhold et al. (2008) bestimmt. Die Oberfläche des Zechsteins liegt dabei im nördlichen Gebietsteil bei ca. bei 1200 m u. NN und sinkt nach Süden relativ kontinuierlich ab. Die Basis Zechstein zeigt den gleichen Trend: im Bereich der nördlichen Verbreitungsgrenze der Zechsteinsalinare liegt sie bei 1400 m u. NN und fällt dann Richtung SW bis auf 3000 m u. NN ab. Die Zechsteinmächtigkeit nimmt von

NE nach SW kontinuierlich zu von ca. 100 m nördlich Bergen auf Rügen über 500 m in S-Rügen und nördlich Stralsund bis auf mehr als 1000 m im Bereich der südlichen Begrenzung des Bearbeitungsgebietes. Es ist davon auszugehen, dass diese bei primären Salzmächtigkeiten von mehr als 100 m, im Bearbeitungsgebiet etwa südlich einer Linie Stralsund-Greifswald-Wolgast, auch halokinetisch beeinflusst wurde (Zagora & Zagora 2004). Im Bearbeitungsgebiet finden sich eine Reihe von Salzkissen, die bei der Untersuchung ausgespart worden sind (Salzkissen Wustrow, Prerow, Zingst, Reinkenhausen, Reinkenhausen Nord, Grimmen und Mesekenhagen) (s. Anl. 1-1.1). Nach Norden streicht das Zechsteinsalinar vollständig aus.

Für die weiteren Untersuchungen wurden die Salzmächtigkeiten der einzelnen Zechsteinformationen anhand von Bohrungen abgeleitet. Stratigraphisch lassen sich im Bearbeitungsgebiet insbesondere die älteren Zechsteinformationen (Werra- bis Ohre-Formation) nachweisen, wobei von SW nach NE die jüngeren Formationen auslaufen (Abbildung 1-9). Steinsalz in unterschiedlichen Mächtigkeiten findet sich ebenfalls den genannten Formationen. Während das Werra-Steinsalz nur im südlichen Teil des Bearbeitungsgebietes und hier in Mächtigkeiten < 10 m nachgewiesen werden konnte (u. a. Bohrung Loissin 1/70, Abbildung 1-10), ist das Stassfurt-Steinsalz flächendeckend mit Mächtigkeiten zwischen ca. 60 m (auf Rügen) und 600 m (auf dem Festland) verbreitet (außerhalb des Bearbeitungsgebietes bis über 1000 m). Leine-, Aller- und Ohre-Steinsalz zeigen deutlich geringere Mächtigkeiten (s. Abbildung 1-9).

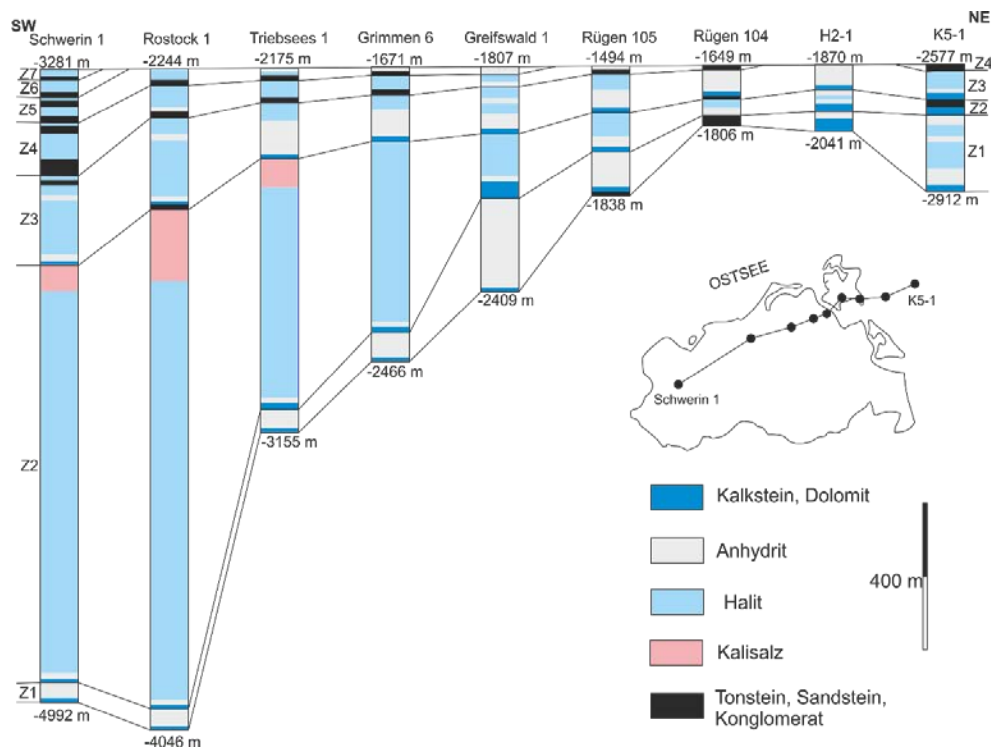


Abbildung 1-9: Korrelation der Zechstein-Formationen in Bereich des Bearbeitungsgebietes in Mecklenburg-Vorpommern (nach Zagora & Zagora 2004)

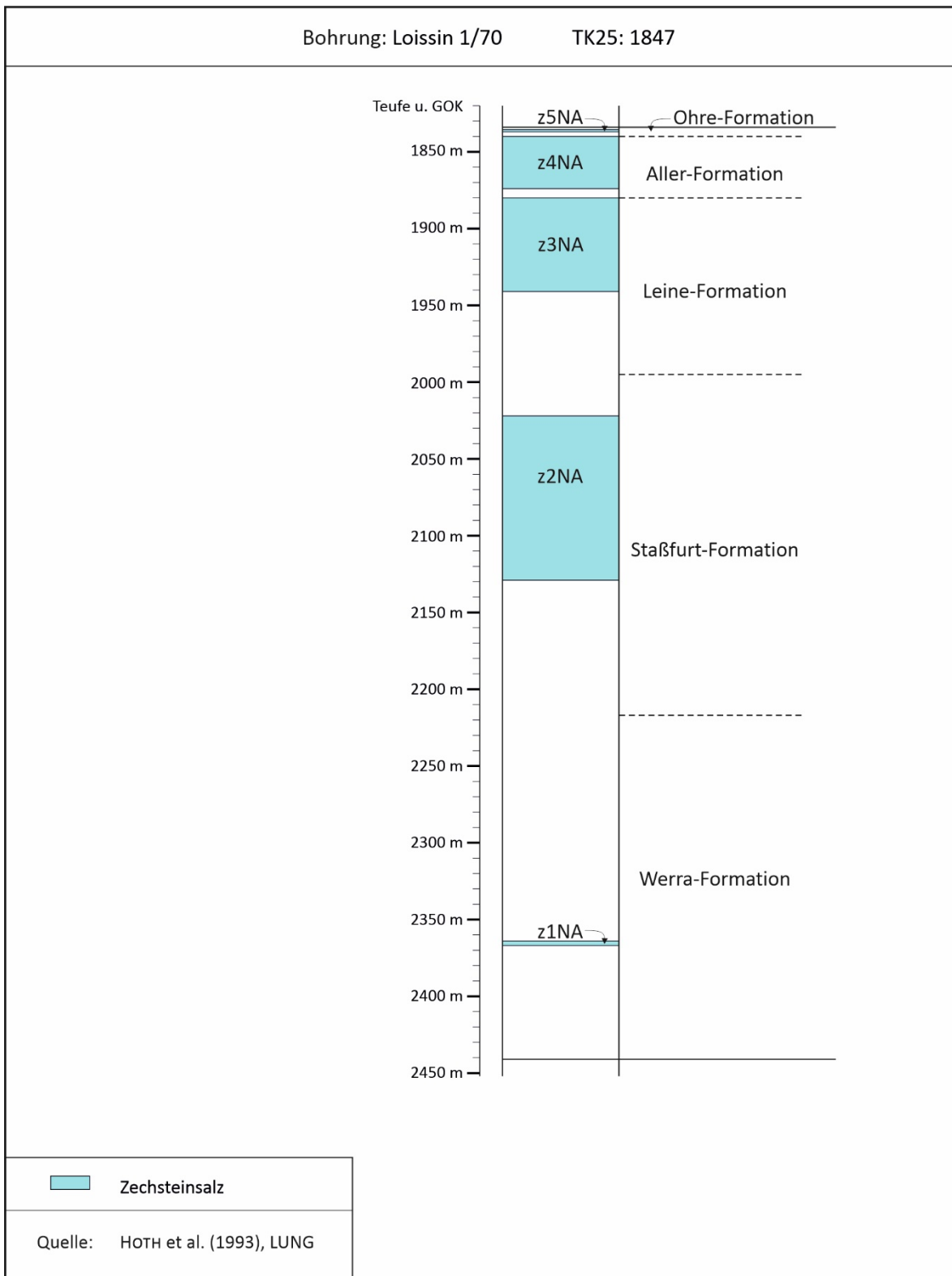


Abbildung 1-10: Schematische Schichtenfolge des Zechsteins in der Bohrung Loissin 1/70 (nach Hoth et al. 1993, LUNG freundl. Mitteilung)



Südliches Norddeutsches Becken: Teilgebiet Nordrhein-Westfalen - SW-Niedersachsen (Anl. 1-2)

Betrachtet man das westliche Norddeutsche Becken, so zeigt sich, dass sich das Bearbeitungsgebiet nach Anwendung der Kriterien „Ausschluss von Flächen innerhalb des Verbreitungsgebietes von Zechsteindiapiren“ und „Maximale Teufenlage der Salzhorizontoberfläche 2000 m“ hier nur auf ein südwestliches Gebiet im Bereich des Niederrheinischen Tieflandes sowie in Umrandung der Münsterland-Scholle beschränkt. Während die westliche Begrenzung durch die Grenze zu den Niederlanden bestimmt wird, entspricht die südöstliche und südliche Begrenzung des Gebietes der südlichen Verbreitung der Zechsteinsalinare nach Reinhold et al. (2008) sowie nach der Rohstoffkundlichen Übersichtskarte von Nordrhein-Westfalen 1:500 000 (GD NRW 2019). Die nördliche Begrenzung des potenziellen Speichergebietes wird durch das Teufenkriterium 2000 m bestimmt. Die Untersuchungen stützen sich auf den GTA (Baldschuhn et al. 2001) sowie auf Reinhold et al. (2014). Dementsprechend können für diesen südwestlichen Bereich des Norddeutschen Beckens nur für ein begrenztes Gebiet des Niederrheinischen Tieflandes, dem südlichen Teil des Niederrheinischen Zechsteinbeckens nach Teichmüller (1957) detaillierte Aussagen gegeben werden. Das Niederrheinische Zechsteinbecken wird dabei als Randbecken des Norddeutschen Beckens angesehen und erreicht nach Teichmüller (1957) bei einer Breite von etwa 30 – 50 km eine NE-SW-Ausdehnung von ca. 100 km (Abbildung 1-11). Nach Süden und Südosten hin streichen die Schichten des Zechsteins unter der transgredierenden Kreide aus, sodass hier im Regelfall Schichten der Kreide unmittelbar den Karbon-Schichten auflagern. Innerhalb der Zechsteinabfolge treten bis zu mehrere hundert Meter mächtige Salzgesteine auf, die der Werra- bzw. der Staßfurt-Formation zugeordnet werden können (Abbildung 1-8). Während linksrheinisch Steinsalz nur in der Werra-Formation 1 vorhanden ist (Teichmüller 1957), ist rechtsrheinisch zusätzlich noch Steinsalz der Staßfurt-Formation mit wenigen Zehnermetern Mächtigkeit in Bohrungen nachgewiesen worden (Wolburg 1957). Vorkommen und Mächtigkeit des Werra-Steinsalzes variieren jedoch auch regional sehr stark, was auf synsedimentäre Tektonik mit aktiven Grabenbildungen zurückgeführt wird. Darüber hinaus werden auftretende Mächtigkeitsschwankungen auch auf großflächige Salzablagungen zurückgeführt.

Die Zechsteinbasis (Anl. 1-2.2) entspricht in diesem Gebiet der Karbonoberfläche. Ihre Darstellung stützt sich im Bereich des Niederrheinischen Zechsteinbeckens u. a. auf Arbeiten von Juch (1994). Generell fallen die in diesem als Potenzialgebiet charakterisierten Bereich flach nach NW ein, wobei die Zechsteinbasis von ca. 400 m u. NN im S auf ca. 1200 m im NW des Gebietes abfällt. Einen ähnlichen Trend zeigt die Tiefenlage Top Zechstein mit ca. 400 m im S bis ca. 1300 m u. NN im NW des Potenzialgebietes. Daraus ergeben sich Mächtigkeiten für das Werra-Steinsalz von regional deutlich unter 100 m auf den Hochlagen bis zu 350 m in Grabenpositionen (Abbildung 1-9). Teilweise fehlt das Salz auf Hochlagen ganz (Abbildung 1-10, s. a. Wolf 1985, Reinhold et al. 2014).

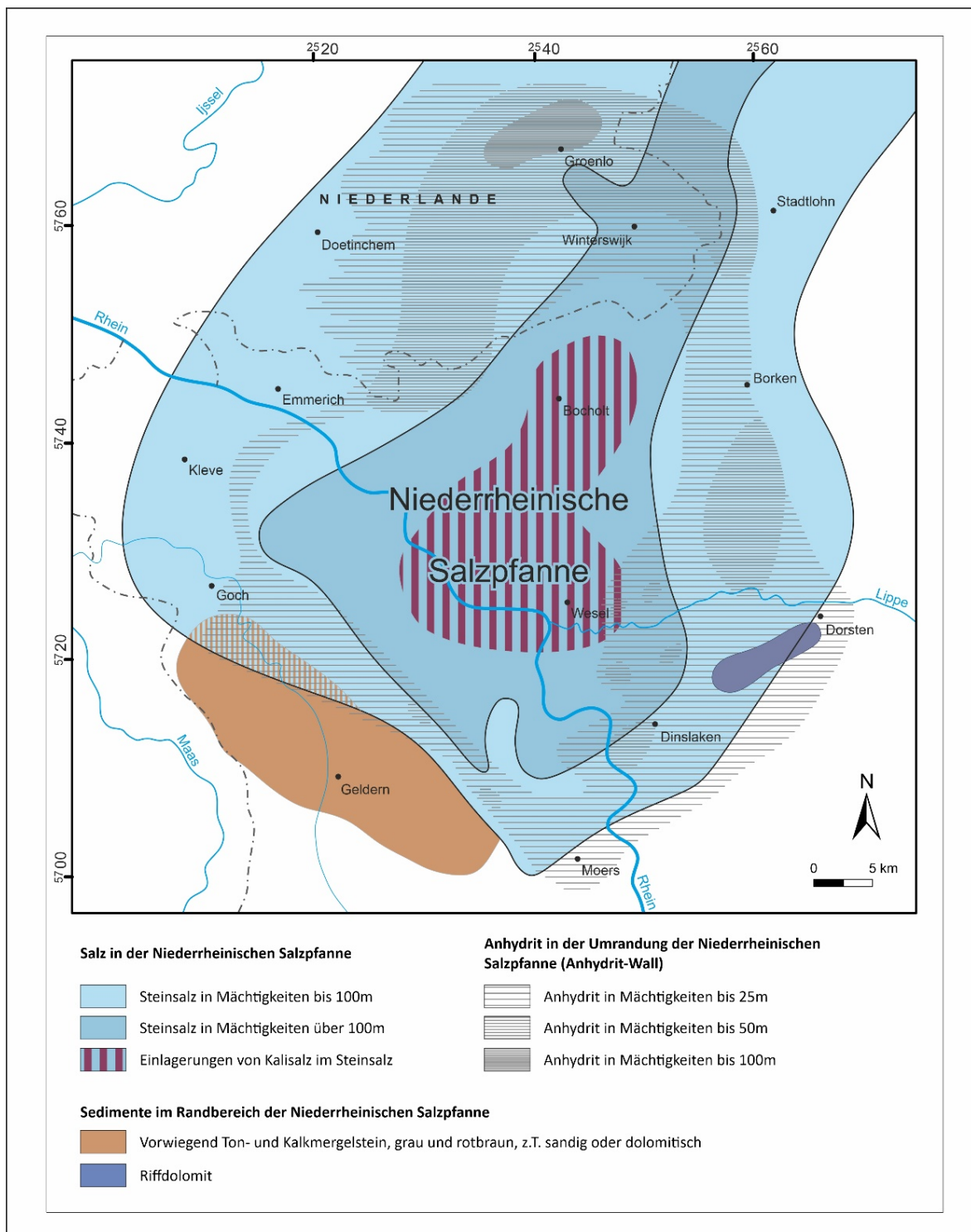


Abbildung 1-11: Verbreitung und Mächtigkeit des Zechstein-Salinars im Niederrheinischen Zechsteinbeckens (nach Wrede 2016)

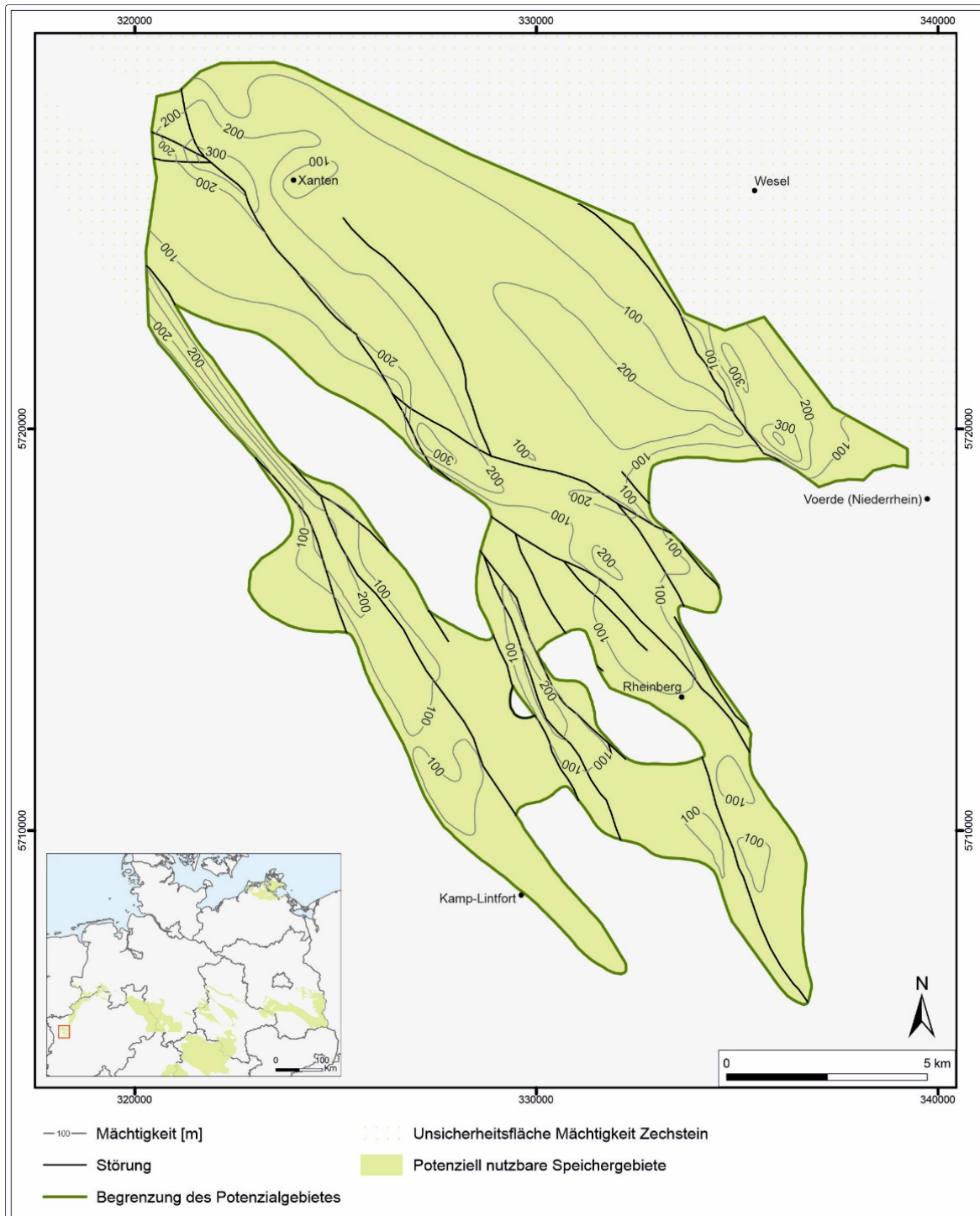


Abbildung 1-12: Mächtigkeit des Werra-Steinsalzes am linken Niederrhein

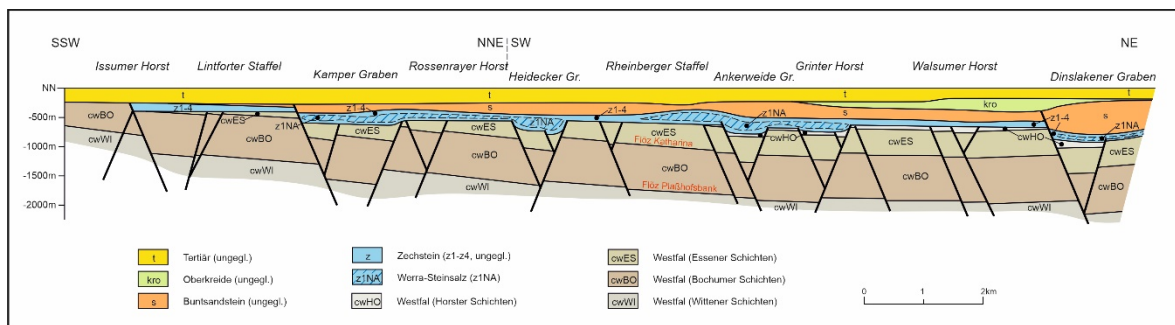


Abbildung 1-13: Steinsalzvorkommen in der Werra-Formation im Niederrheinischen Zechsteinbecken, nach Wolf 1985, Reinhold 2014)

Nach Nordosten in der Umrandung der Münsterland Scholle liegen die salinar geprägten Abfolgen des Zechsteins deutlich tiefer als im Bereich des Niederrheins. Ein genereller Trend mit zunehmender Tiefenlage der Zechsteinbasis Richtung NE ist gegeben, wobei die Zechsteinbasis in einzelnen Strukturen bis auf 2800 m abfällt. Der Zechstein ist in den ausgewiesenen einzelnen Potenzialgebieten in beckenrandlicher Fazies ausgebildet. Innerhalb der einzelnen Zechstein-Formationen (Werra-, Staßfurt, Leine- Aller-Formation) kam es jeweils zur Ablagerung unterschiedlich mächtiger Steinsalze, die entsprechend ihrer strukturellen Position heute in der Regel 0 bis 150 m mächtig sind. In der Werra-Formation entwickelte sich in diesem Gebiet eine NW-SE-streichende Lagune, in der z. T. bis 200 m mächtigen Steinsalzen ausgefällt wurden. Die Mächtigkeiten innerhalb der Werra-Formation können dadurch auf mehr als 400 m anschwellen (Frisch 1985). Das Gebiet ist intensiv strukturiert und bildet ein Schollenmosaik, das in eine Vielzahl von Tief- und Hochschollen zerlegt ist (Rockenbauch et al. 1998).

Südliches Norddeutsches Becken: Teilgebiet NE-Nordrhein-Westfalen – S-Niedersachsen (Anl. 1-3)

Im zentralen Bereich des Norddeutschen Beckens beschränkt sich das Bearbeitungsgebiet nach Anwendung der Kriterien „Ausschluss von Flächen innerhalb des Verbreitungsgebietes von Zechsteindiapiren“ und „Maximale Teufenlage der Salzhorizontoberfläche 2000 m“ auf den südlichen Beckenrand des Norddeutschen Beckens und hier auf ein Gebiet des nordöstlichen Nordrhein-Westfalens sowie des südöstlichen Niedersachsens. Während die westliche Begrenzung des Gebietes durch den Ausbiss der Zechsteinsalinare in der östlichen Umrandung des Münsterland-Scholle östlich Linie Melle – Bielefeld – Detmold – Bad Driburg bestimmt wird, bildet die 2000 m Teufenlage der Zechsteinoberfläche die nördliche Begrenzungslinie, hier in etwa entlang einer Linie Preußisch Oldendorf – Hameln bis nördlich Springe. Die östliche Begrenzung geht zurück auf die Verbreitung der Zechsteindiapire im Nordosten sowie den Ausbiss der Zechsteinsalinare im Südosten. Die südliche Begrenzung ist dem Umstand geschuldet, dass sich die Untersuchungen auf den GTA (Baldschuhn et al. 2001) stützen, der ein Gebiet bis nördlich Göttingen abdeckte.

Dieser südliche Bereich wird nach Käding (1987) als Solling-Becken bezeichnet, in dem eine bis 800 m mächtige salinare Schichtenfolge des Zechsteins nachgewiesen werden konnte. Weiter südlich wird das Norddeutschen Becken durch die Hunsrück-Oberharz-Schelle begrenzt (Paul 2020).

Im Bearbeitungsgebiet liegt die Oberfläche des Zechsteins im südlichen Bereich bei weniger als 200 m u. NN und erreicht Richtung Norden und Nordosten die „maximale Teufenlage



von 2000 m⁴. Dementsprechend können für die Zechsteinbasis Teufen von 200 m und mehr als 2000 m angegeben werden. Zechsteinsalinare wurden in den älteren Formationen (Staðfurt- bis Aller-Formation) in unterschiedlichen Mächtigkeiten nachgewiesen. Nach Käding (1987) erreicht das Staßfurt-Steinsalz Mächtigkeiten von 200- 500 m, Leine- und Allersteinsalz sind hingegen mit ca. 50-80 m bzw. ca. 40-70m deutlich geringer mächtig. Die halokinetisch entstandenen Salzkissen Volpriehausen und Silberborn wurden in der Kartendarstellung in ihrer Form angepasst und entsprechend ausgespart.

Südliches Norddeutsches Becken: Teilgebiet E-Niedersachsen - Sachsen-Anhalt (Anl. 1-4)

Die Verbreitung zechsteinzeitlicher Ablagerungen beschränkt sich innerhalb Sachsen-Anhalts insbesondere auf den nördlichen Teil von Landes, während der Süden im Bereich der Flechtingen-Rosslau-Scholle, der Harz-Scholle und der Halle-Wittenberg-Scholle zechsteinfrei ist (Martiklos et al. 2001). Nach Anwendung der Kriterien „Ausschluss von Flächen innerhalb des Verbreitungsgebietes von Zechsteindiapiren“ und „Maximale Teufenlage der Salzhorizontoberfläche 2000 m“ potenziell nutzbare Speichergebiete beschränken sich somit auf einen nur wenige Kilometer breiten Streifen in Umrandung der Flechtingen-Roßlau-Scholle innerhalb der Verbreitungslinie der Zechsteinsalinare und der Zechsteinsalzdiapire, auf den östlichen Bereich des Subherzyn-Beckens sowie im Süden Sachsen-Anhalts auf die nördöstliche Fortsetzung des Thüringer Beckens. Dort konnte ein potenziell geeignetes Gebiet zwischen Sangerhausen im Westen bis zu einer Linie westlich Halle und östlich Naumburg mit Zechsteinsalinaren identifiziert werden, welches innerhalb des Zechsteinbeckens zum Thüringer Becken-Bereich überleitete. Dieses Gebiet wird kartennmäßig zusammen mit dem Thüringer Becken dargestellt.

Die Oberfläche des Zechsteins liegt bei weniger als 100 m u. NN in der nordwestlichsten sowie südöstlichsten Umrandung der Flechtingen-Roßlau-Scholle, in den übrigen Bereichen meist 1000 bis 1700 m und fällt im NE des Gebietes auf 2000 m u. NN ab. Dementsprechend liegt die Zechsteinbasis in diesen Gebieten zwischen 200 und 2900 m u. NN.

Das nordöstlich der Flechtingen-Rosslau-Scholle gelegene Bearbeitungsgebiet gehört in seinem westlichen Bereich zur WNW-ESE streichenden Scholle von Calvörde. In diesem Bereich liegt der Zechstein in Beckenfazies vor. Während das Werra-Steinsalz fehlt, weist das Staßfurt-Steinsalz Mächtigkeiten von 100 bis 300 m auf, geringer mächtig sind das Leine- und das Aller-Steinsalz mit max. 145 m bzw. 50 m (Reichenbach 1970, Reinhold et al. 2014). Ähnliche Mächtigkeitsverhältnisse können für die das Subherzyne Becken sowohl auf sachsen-anhaltinischem als auch auf niedersächsischem Gebiet angenommen werden. Dresbach et al. (2010) geben im stratigraphischen Normalprofil für das Steinsalzbergwerk Bernburg, im Bereich des Gentscher Salzsattels und des Bernburger Hauptsattel gelegen, für das Werra-Steinsalz 8 m, für das Staßfurt-Steinsalz 300 m, das Leine-Steinsalz 115 m und das Aller-Steinsalz 20 m Mächtigkeit an. Außerhalb der Verbreitung der Zechsteindiapire wurde das Staßfurt-Steinsalz, in nur wenigen Kilometer Entfernung zum Steinsalzbergwerk, hingegen in Mächtigkeiten von 50 bis 130 m erbohrt.



Südliches Norddeutsches Becken: Teilgebiet Südbrandenburg (Anl. 1-5)

In dem zu Brandenburg gehörenden Teil des Norddeutschen Beckens beschränken sich nach Anwendung der Kriterien „Ausschluss von Flächen innerhalb des Verbreitungsgebietes von Zechsteindiapiren“ und „Maximale Teufenlage der Salzhorizontoberfläche 2000 m“ potenziell nutzbare Speichergebiete auf den südlichen Teil des Landes, wobei der Bereich des Lausitz-Blocks zechsteinfrei ist.

Während die westliche und nördliche Begrenzung des potenziellen Speichergebietes durch das Teufenkriterium 2000 m bestimmt wird, entspricht die südliche Begrenzung des Gebietes der südlichen Verbreitung der Zechsteinsalinare nach Reinhold et al. (2008). Diese liegt wenige Kilometer nördlich/nordöstlich der tektonisch bedingten südlichen Verbreitung des Zechsteins in der Umrandung des Lausitzer Blocks.

Die Oberfläche des Zechsteins liegt bei weniger als 500 m u. NN in der Umrandung des Lausitz-Blocks und sinkt Richtung Norden relativ schnell auf 2000 m ab. Damit umfasst das potenzielle Speichergebiet im Süden Brandenburgs einen durchschnittlich etwa 20 km breiten Streifen um den Lausitz-Block. Im Osten an der Grenze zu Polen, reicht das Gebiet ebenfalls als max. 30 km breiter Streifen in Richtung Norden bis zu einer Linie nördlich Eisenhüttenstadt – Fürstenwalde. Die Zechsteinbasis variiert im betrachteten Gebiet sehr deutlich mit Teufen zwischen ca. 1000 und 3000 m.

Paläogeographisch repräsentiert dieses Gebiet einen Bereich südlich des Beckenzentrums, den Plattformhang querend, in Richtung südöstlichem Beckenrand. Dabei entwickelte sich am Beckenrand eine ca. 400 m mächtige Anhydrit-/Karbonatplattform, auf der sich in lagunärer Position Werra-Steinsalz bis über 300 m Mächtigkeit einschaltete. So werden in einen NNE-SSW-streichenden Streifen östlich Cottbus die erhöhten Mächtigkeiten zwischen 50 m und mehr als 300 m angetroffen. Darüber hinaus ist das Werra-Steinsalz im Bereich des Potenzialgebietes überwiegend nur wenige 10er m mächtig. Das Stassfurt-Steinsalz ist in dieser paläogeographischen Position mit meist unter 100 m relativ geringmächtig, während das Leine-Steinsalz mit größtenteils mehr als 100 m wieder mächtiger ausgebildet ist (Abbildung 1-15). Lediglich im südöstlichen Potenzialbereich erreicht das Leine-Steinsalz die 100 m meist nicht. Als weiteres Steinsalz ist in diesem Gebiet das Aller-Steinsalz entwickelt, liegt aber auch hier überwiegend mit Mächtigkeiten von maximal 50 m vor. In der Bohrung Luckenwalde 1/80 wurde darüber hinaus noch geringmächtiges Steinsalz innerhalb der Ohre-Formation erbohrt (Abbildung 1-14). Entsprechend variieren die Gesamtmächtigkeiten für den Zechstein im Potenzialgebiet zwischen 300 und 900 m. Nur in der Umrandung einzelner Salzkissen können Mächtigkeiten von über 1000 m beobachtet werden.

An primären Salzmächtigkeiten werden von Merkel et al. (1998) für den Raum Südbrandenburg 300 bis 700 m angegeben.

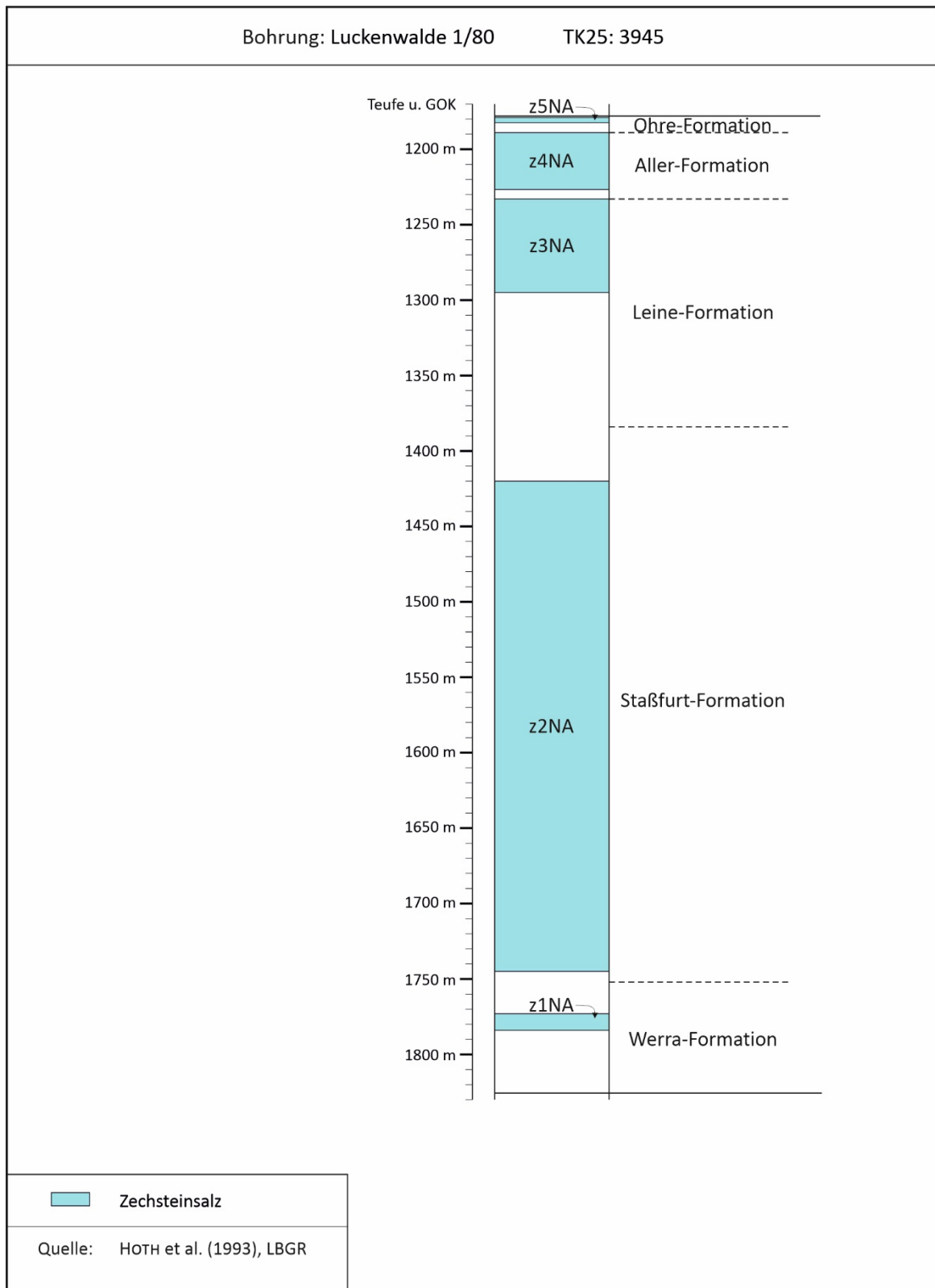


Abbildung 1-14: Schematische Schichtenfolge des Zechsteins in der Bohrung Luckenwalde 1/70 (nach Hoth et al. 1993)

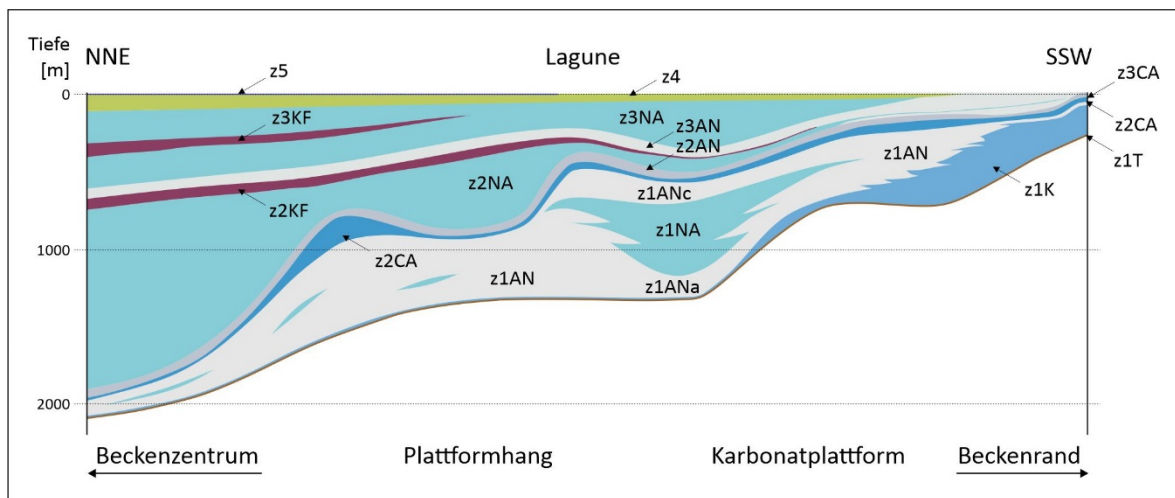


Abbildung 1-15: Schematisches Profil des Zechsteins vom Beckenzentrum zum Beckenrand im Bereich Südbrandenburgs (nach Koop et al. 2015)

Thüringer Becken (Anl. 1-6)

Das Thüringer Becken im geographischen Sinn ist eine große Mulde, in der überwiegend Gesteine des Zechsteins und der Trias vorkommen. Diese Mulde wird im Norden und Nordosten durch den Harz, den Kyffhäuser und die Finnestörung, im Süden und Südosten vom Thüringischen Schiefergebirge, im Südwesten vom Thüringer Wald sowie im Nordwesten durch die Buntsandstein-Aufwölbung der Eichsfeld-Schwelle und der Ohmgebirgsgrabenzone randlich geologisch begrenzt. Geologisch gesehen gehört dieses Gebiet zur Thüringer Senke, die durch die NW-SE streichende Hermundurische Scholle in einen südwestlichen und einen nordöstlichen Teil getrennt wird. Die Thüringer Senke bildet den südlichen Abschnitt der NNE-SSW gerichteten Thüringen-Westbrandenburg-Senke und stellt somit eine südliche Ausbuchtung bzw. Fortsetzung des Norddeutschen Beckens dar (Paul 2020, im Druck). Der Zechstein, der hier sowohl in Becken- als auch in Randfazies ausgebildet ist, erreicht Mächtigkeiten von 60 - 1000 m (Abbildung 1-16). Die größten Mächtigkeiten finden sich in den senkenzentralen Bereichen. Nach Nordwesten zur Eichsfeld-Schwelle und nach Osten hin treten Mächtigkeitsreduktionen auf (Kästner et al. 2003). An den o. g. Beckenrändern tritt der Zechstein zutage.

Grundlage der Darstellungen bildete das geologische 3D-Modell des Thüringer Beckens. Das hier dargestellte potenzielle Speichergebiete wird durch das Vorkommen der Zechsteinsalinare bestimmt, wobei Salinare regional differenziert in der Werra-, Staßfurt-, Leine- und Aller-Formation in unterschiedlichen Mächtigkeiten auftreten. Am weitesten verbreitet ist das durch Auslaugung begrenzte Werra-Steinsalz. Es erreicht mit mehr als 250 m seine größte Mächtigkeit in einem NW-SE-streichenden Gebiet zwischen Mühlhausen im Zentrum der Thüringer Senke und Ilmenau nordöstlich des Thüringer Waldes (s. Bohrung Gotha 1/63 im Anhang). Nach Nordosten gehen die Mächtigkeiten bis auf wenige Zehnermeter zurück (Seidel 2013). Das Staßfurt-Steinsalz erreicht mit mehr als 300 m seine größten Mächtigkeiten im Norden und Nordosten der Thüringer Senke und nimmt Richtung Süden schnell auf Mächtigkeiten unter 50 m ab. Die südliche, primäre Verbreitungsgrenze verläuft im mittleren Teil des Bearbeitungsgebietes in nahezu W-E-Richtung, während die Verbreitung des Staßfurt-Salinars im Norden und Nordwesten durch Auslaugung begrenzt wird.

(Seidel 2013). Eine dem Staßfurt-Steinsalz sehr ähnliche Verbreitung in Bereich der nord-westlichen Thüringer Senke zeigt das Leine-Steinsalz. Auch für dieses Salinar verläuft die südliche, primäre Verbreitungsgrenze im mittleren Teil des Bearbeitungsgebietes, die nördliche/nordwestliche Begrenzung ist wiederum durch Auslaugung bestimmt. Die Mächtigkeiten sind gegenüber dem Staßfurt-Steinsalz deutlich geringer. Nur im nordwestlichsten Bereich des Gebietes zeigt das Leine-Steinsalz größere Mächtigkeiten von mehr als 60 m (Seidel 2013). Das Aller-Steinsalz ist ebenfalls auf den nordwestlichen Bereich der Thüringer Senke beschränkt und erreicht lediglich ganz im Nordwesten maximale Mächtigkeiten von über 20 m. Es keilt im mittleren bis östlichen Teil der Senke aus, wobei die südliche Verbreitungsgrenze nördlich der von Staßfurt- und Leine-Steinsalz liegt. Die jüngsten Formationen (Ohre- bis Fulda-Formation) des Zechsteins sind mit 25-45 m deutlich geringmächtiger und bestehen hauptsächlich aus Peliten mit Schluff- und Sandsteineinlagen, teilweise noch mit karbonatischen und/oder anhydritischen Einlagerungen.

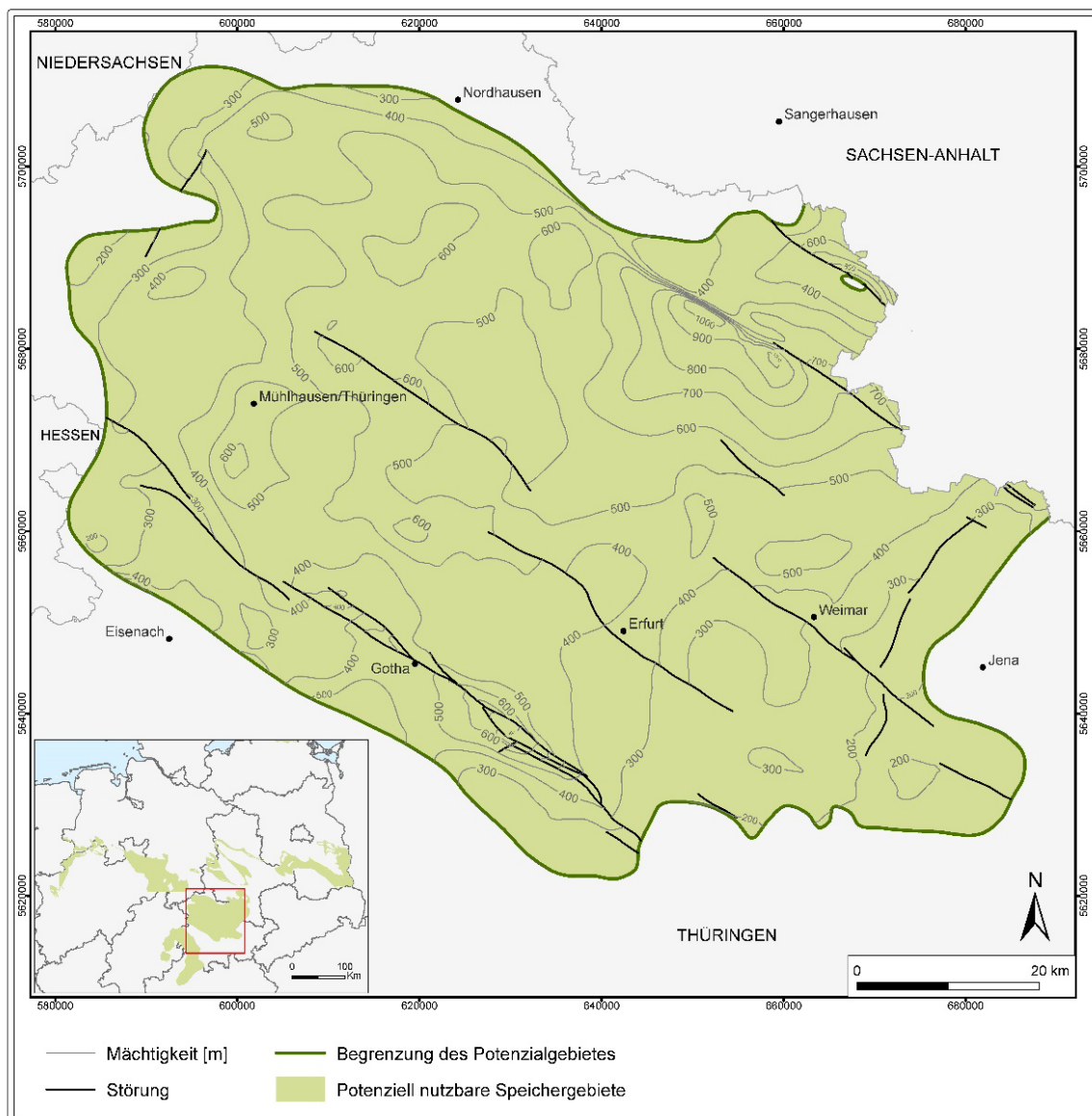


Abbildung 1-16: Zechsteinmächtigkeiten im Thüringer Bereich der Thüringischen Senke



Werra-Fulda-Becken und Fränkisches Becken (Anl. 1-7)

Das Werra-Fulda-Becken und das sich südostwärts anschließende Fränkische Becken werden als südlichstes Randmeer des Zechsteinmeeres angesehen (Beer & Barnasch 2020, im Druck). Geographisch befinden sich diese im Dreiländereck von Hessen – Thüringen – Bayern. Während das Werra-Fulda-Becken gegen Nordosten durch den Thüringer Wald begrenzt wird, begrenzt die NE-SW-streichende Hunsrück-Oberharz-Schwelle das Becken gegen Nordwest. Die sich nach Südost anschließende, ebenfalls NE-SW-streichende Spessart-Rhön-Schwelle trennt das Werra-Fulda-Becken von südöstlich gelegenen Fränkischen Becken. Nach Süden reicht die Salzverbreitung innerhalb des Fränkischen Beckens bis nördlich Würzburg., wobei die heutige Verbreitung des Zechsteinsalzes durch randliche Ablagerung deutlich eingeschränkt ist.

Die Zechsteinablagerungen sind vollständig entwickelt, wobei eine saline Entwicklung bis zur Ausbildung von chloridischen Salzen im Wesentlichen auf die Werra-Formation beschränkt ist. Nur wenige Meter mächtiges Staßfurt-Steinsalz wurde in der Bohrung Friedewald 2 erbohrt und markiert die südlichste Verbreitung von Staßfurt-Steinsalz im Südlichen Permbecken (Roth 1978, Käding 1987).

Für die Darstellung des Potenzialgebietes fanden Arbeiten von Kulick et al. (1984) sowie Seidel (2004) Verwendung. Auf Grund dessen wird hier nur die Basis des Zechsteins dargestellt. Diese findet sich in der südwestlichen Umrandung des Thüringer Waldes bei ca. 100 ü. NN und fällt im Allgemeinen kontinuierlich bis auf 600 m lokal teilweise bis auf über 800 m u. NN (südöstlich Bad Hersfeld) ab.

Für die einzelnen Zechstein-Formationen innerhalb des Werra-Fulda-Beckens geben Beer & Barnasch (2020) die folgenden Mächtigkeiten an: Werra-Formation: 200-400 m, Staßfurt-Formation: 25-35 m, Leine-Formation: 15-40 m, Aller-Formation: 6 m, Ohre-Formation: ca. 4 m, Friesland-Formation: 4 m und Fulda-Formation: 25-30 m. Innerhalb der Werra-Formation erreicht das nahezu durchgehend geschichtete Werra-Steinsalz, das in zwei Kaliflöze und drei Steinsalz-Horizonte gegliedert wird, eine durchschnittliche Mächtigkeit von 270 m (Beer & Barnasch 2020, im Druck). Dabei ist das Untere Werra-Steinsalz im Allgemeinen 100 m mächtig, das Mittlere Steinsalz durchschnittlich 50-60 m und das Obere Werra-Steinsalz 90-150 m, im Fulda-Gebiet jedoch weniger als 70 m, mächtig. Eine Besonderheit im Werra-Fulda-Becken sind Basaltgänge in den Steinsalzvorkommen, die im Zusammenhang mit dem tertiären Vulkanismus der Rhön stehen (Reinhold et al. 2014).

Im Fränkischen Becken wurden bei Mellrichstadt insgesamt 158 m Werra-Steinsalz erbohrt, bei Ostheim i.d.R. geht man von 167 m Werra-Steinsalz aus, wobei in Ostheim auch Kalilagen nachgewiesen wurden (Freudenberger 1996). Im Allgemeinen muss man jedoch von deutlich geringeren Mächtigkeiten des Werra-Steinsalzes ausgehen, entweder primär bedingt oder infolge Salzauslaugung, z. B. Salzauslaugungssenken bei Bad Neustadt (Freudenberger 1996).



1.5.3 Röt-Salinar

In den zentralen Beckenbereichen des Mitteleuropäischen Beckens weist der Obere Buntsandstein (Röt-Formation) abschnittsweise z. T. mächtige Evaporitabfolgen auf. Diese finden sich dabei vor allem im Norddeutschen Becken, aber auch in dem nördlich des Thüringer Waldes gelegenen Teil der Thüringen-Westbrandenburg-Senke sowie in der nördlichen Hessischen Senke (Abbildung 1-17; Röhling et al. 2018). Stratigraphisch sind die Evaporite innerhalb der sechs Subformationen unterteilten Röt-Formation an die Vitzenburg- und Glockenseck-Subformation gebunden, wobei das Glockenseck-Steinsalz gegenüber dem Vitzenburg-Steinsalz eine deutlich geringere Verbreitung mit Konzentration auf die zentralen Beckenbereiche zeigt. So erreicht das Glockenseck-Steinsalz in Westmecklenburg nur noch eine Mächtigkeit von wenigen Metern und ist in weiten Teilen Mecklenburg-Vorpommerns und Brandenburgs nicht verbreitet (Röhling 2013). Nordöstlich der Linie Rostock – Neubrandenburg ist das Röt-Salinar nicht mehr abgelagert worden (Beutler 2004).

Die maximale Steinsalz-Mächtigkeit liegt im Norddeutschen Becken bei 150 bis 170 m (Röhling 2013). Dabei entfallen in weiten Teilen des Norddeutschen Beckens auf das Vitzenburg-Steinsalz maximal bis 150 m, auf das Glockenseck-Steinsalz etwa 10 bis 20 m. Lokal zu beobachtende, deutlich höhere Mächtigkeiten stehen meist in engen Zusammenhang mit Störungen oder Fließvorgängen im Salz. Auf der Scholle von Calvörde und im Subherzyn werden von Schulze (1964) bzw. Beywl et al. (1974) für das Röt-Salinar Mächtigkeiten von teilweise 80 bis 100 m angegeben, jedoch kann hier das Salz auf Grund geringer Tiefenlagen subrosionsbedingt großflächig fehlen (Radzinski 2008). Zu den Beckenrändern gehen die Mächtigkeiten des Salzes kontinuierlich zurück. Aus dem Berliner Raum werden maximal etwa 45 m, aus der Niederlausitz etwa 15 m mächtige Röt-Salze beschrieben (Röhling 2013). Im Bereich der Thüringer Senke sind Vorkommen von Steinsalz an die etwa 20 bis 100 m mächtige Vitzenburg-Subformation gebunden, wobei auf Basis- und Deckanhydrit maximal 25 m entfallen und das Steinsalz durch ein mehrere Meter mächtiges anhydritisches Zwischenmittel in zwei Salzlagern getrennt wird (Puff & Radzinski 2013). Beispielfähig soll hier die nördlich Erfurt gelegene INFLUINS-Forschungsbohrung EF-FB 1/12 genannt werden, in der das Röt-Steinsalz in einer Teufe von 642,8-648,1 m (Oberes Steinsalz) und 651,5-692,0 m (Unteres Steinsalz) erbohrt worden ist (Kunkel et al. 2014). Die Röt-Salinarvorkommen beschränken sich auf den nördlichen Teil der Thüringer Senke bis etwa einer Linie Bad Langensalza – Erfurt – Ballstedt (Reinhold & Hammer 2016).

Die Basis des Röt-Salinars liegt im Norddeutschen Becken meist in mehreren Tausend Metern Tiefe und erreicht im Bereich des Glückstadt-Grabens die größten Tiefen von über 5000 m (Abbildung 1-18). Zu den Beckenrändern hin nehmen die Tiefen kontinuierlich ab, so dass die Basis der Röt-Formation in Mecklenburg bei über 2000 m, im Berliner Raum zwischen 1000 und 2000 m und in der Lausitz bei wenigen hundert Metern liegt (Bachmann et al. 2010, Brandes & Obst 2011, Bebiolka et al. 2011). Im Thüringer Becken findet sich die Basis der Röt-Formation in Teufen von weniger als 700 m (Huckriede & Zander 2011).

Nach Anwendung der Kriterien „Ausschluss von Flächen innerhalb des Verbreitungsgebietes von Zechsteindiapiren“ und „Maximale Teufenlage der Salzhorizontoberfläche 2000 m“ ist das zu betrachtende Verbreitungsgebiet des Röt-Salinars deutlich eingeschränkt und konzentriert sich auf Bereiche Ost-Brandenburgs, des Subherzyns und Teile Südniedersachsens (Abbildung 1-19). Aufgrund der dort auftretenden geringen Mächtigkeiten wird des Röt-Salinars in dieser Studie nicht weiter betrachtet.

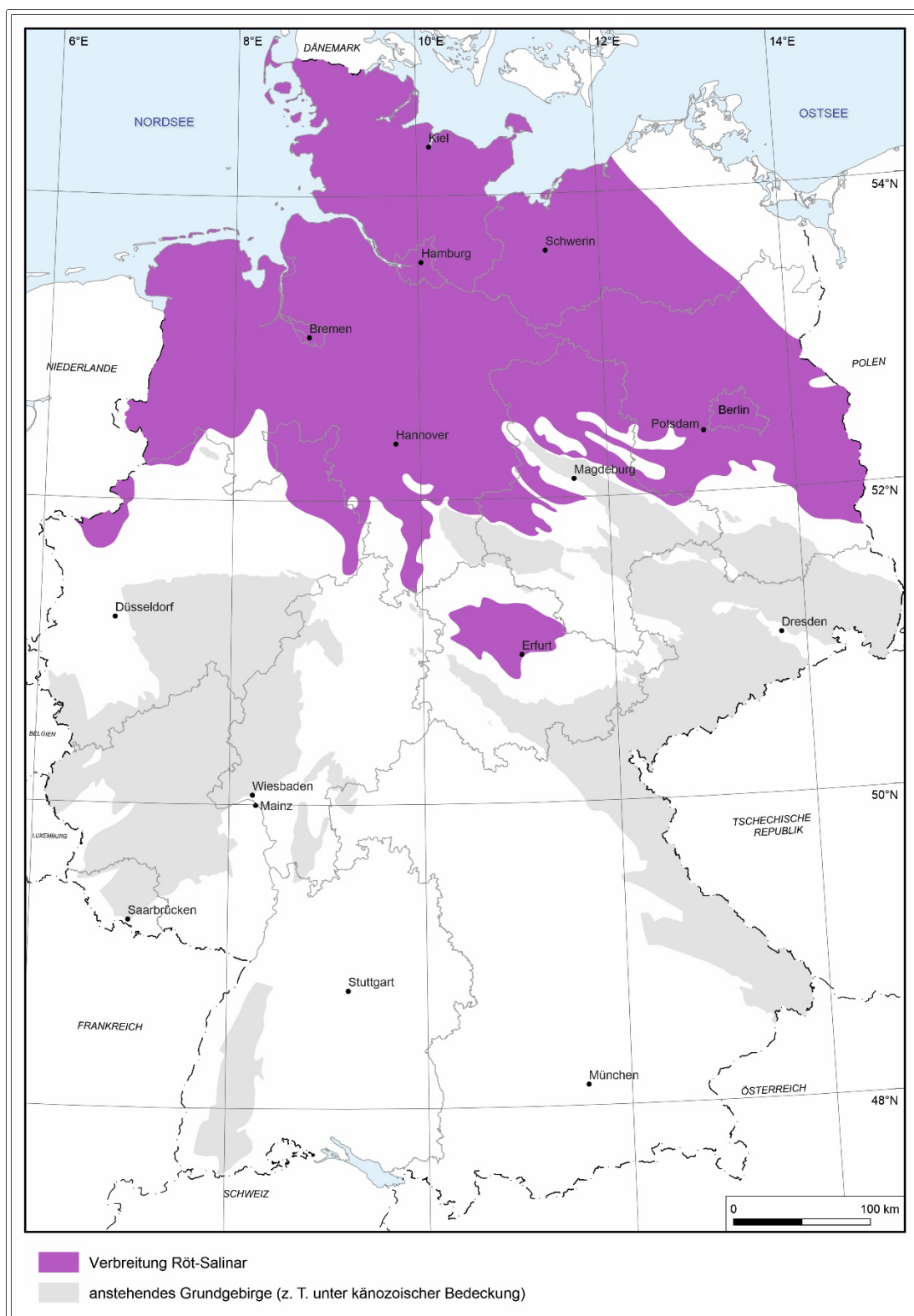


Abbildung 1-17: Schematische Verbreitung des Röt-Salinars in Deutschland (onshore) (nach Beutler 2004, Krull et al. 2004, Röhling & Lepper 2013, Reinhold et al. 2014)

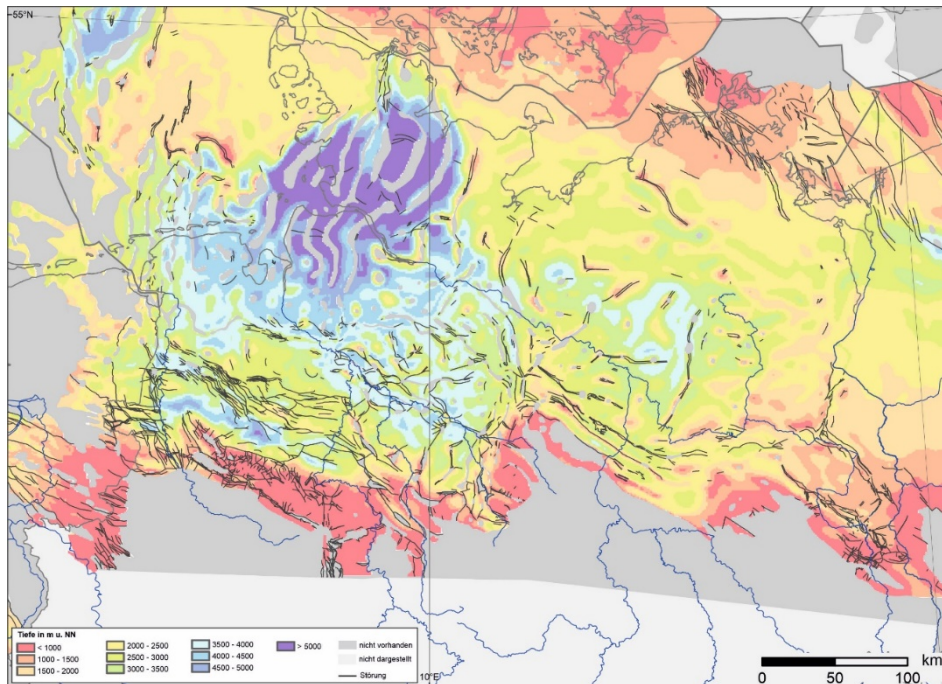


Abbildung 1-19: Tiefenlage des Röt-Salinars im Norddeutschen Becken (nach Bachmann et al. 2010)

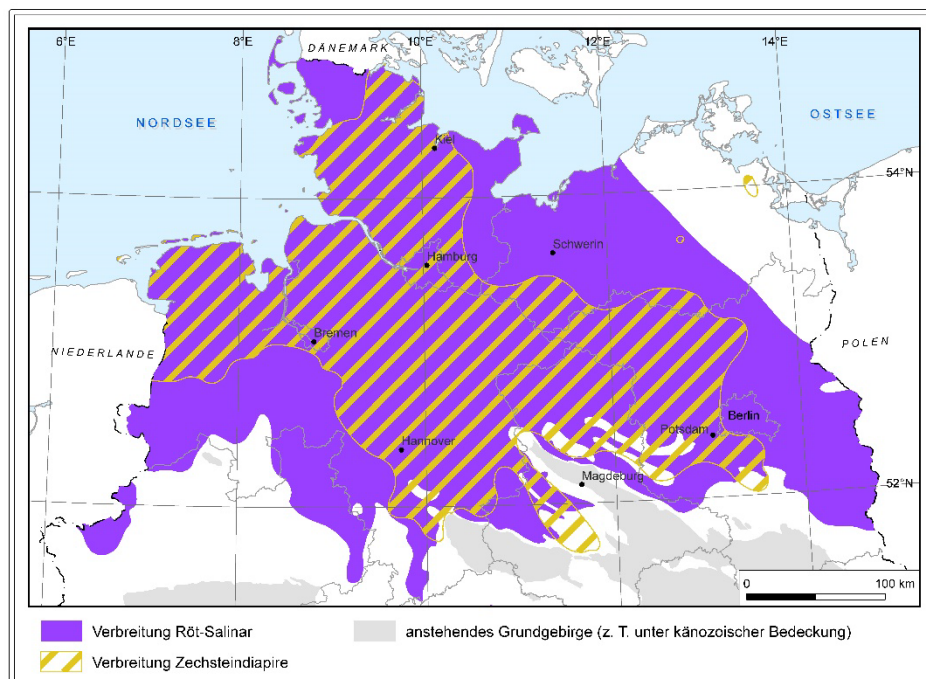


Abbildung 1-18: Verbleibendes Bearbeitungsgebiet (ohne Schraffur) für das Röt-Salinars im NDB nach Anwendung des Ausschlusskriteriums „Verbreitungsgebiet von Zechsteindiapiren“ (Kartengrundlage verändert nach Beutler 2004, Krull et al. 2004, Röhling & Lepper 2013, Reinhold et al. 2008, Reinhold et al. 2014)



1.5.4 Muschelkalk-Salinar

Das Muschelkalk-Salinar ist im Mitteleuropäischen Becken stratigraphisch an den Mittleren Muschelkalk gebunden, der in die drei Formationen Karlstadt-, Heilbronn- und Diemel-Formation untergliedert wird (DSK 2016). Anhand von Bohrungen untergliederte Röhling (2000) den Mittleren Muschelkalk in neun Zyklen, wobei der Zyklus 1 der Karlstadt-Formation, die Zyklen 2-8 der Heilbronn-Formation und der Zyklus 9 der Diemel-Formation zugeordnet werden. Steinsalzabfolgen sind ausschließlich in der Heilbronn-Formation zu finden (u. a. Hagdorn & Simon 2005), wobei nach Röhling (2000) bis zu 7 Steinsalzlager ausgebildet sein können. Geographisch konzentriert sich ihre heutige Verbreitung auf das Norddeutsche Becken, von der holländischen Grenze im Westen bis nach Mecklenburg und NW-Brandenburg, das Thüringer Becken sowie auf den süddeutschen Raum, im Bereich Unterfrankens (Kitzingen, Burgbernheim), des Mittleren Neckars (Heilbronn, Kochenfeld), des Oberen Neckars (Stetten, Haigerloch) und Hochrhein (Rheinfelden, Schweizerhalle) (Abbildung 1-20).

Im Norddeutschen Becken liegt das Hauptsubsidenzzentrum zur Zeit des Mittleren Muschelkalks im Bereich der niedersächsischen Küstenregion, wo Gesamtmächtigkeiten von mehr als 150 m nachgewiesen sind (Röhling 2000). Diese Mächtigkeiten gehen dann Richtung Norden, Osten und Süden zu den Randgebieten des Norddeutschen Beckens kontinuierlich zurück. Die zu beobachtenden Mächtigkeitsdifferenzierungen sind je nach paläogeographischer Situation vor allem an das Auftreten von Steinsalzen in den Zyklen 2 - 5 geknüpft. Während die älteren Steinsalzlager der Zyklen 2 - 5 eine flächenhafte Ausdehnung aufweisen, sind die jüngeren Steinsalze der Zyklen 6 und 7 an lokale Grabenstrukturen gebunden. Die einzelnen Steinsalzlager werden dabei durch wenige Meter mächtige tonige und/oder tonig-anhydritische Lagen von einander getrennt. Im Becken am weitesten verbreitet sind die Steinsalze der Zyklen 3 und 4, die sich bis nach Süddeutschland verfolgen lassen.

Die Basis des Mittleren Muschelkalks liegt im Norddeutschen Becken meist in mehreren Tausend Metern Tiefe und erreicht im Bereich des Glückstadt-Grabens die größten Tiefen von über 4500 m. Zu den Beckenrändern hin nehmen die Tiefen kontinuierlich ab, so dass die Basis des Muschelkalk-Salinars südlich/südwestlich der Weser überwiegend tiefer als 2000 m und in Mecklenburg tiefer als 1500 m liegt. Am südlichen Beckenrand fehlen die evaporitischen Anteile des Mittleren Muschelkalks heute z. T. großflächig bis in Teufen von 450 m unter Geländeoberfläche.

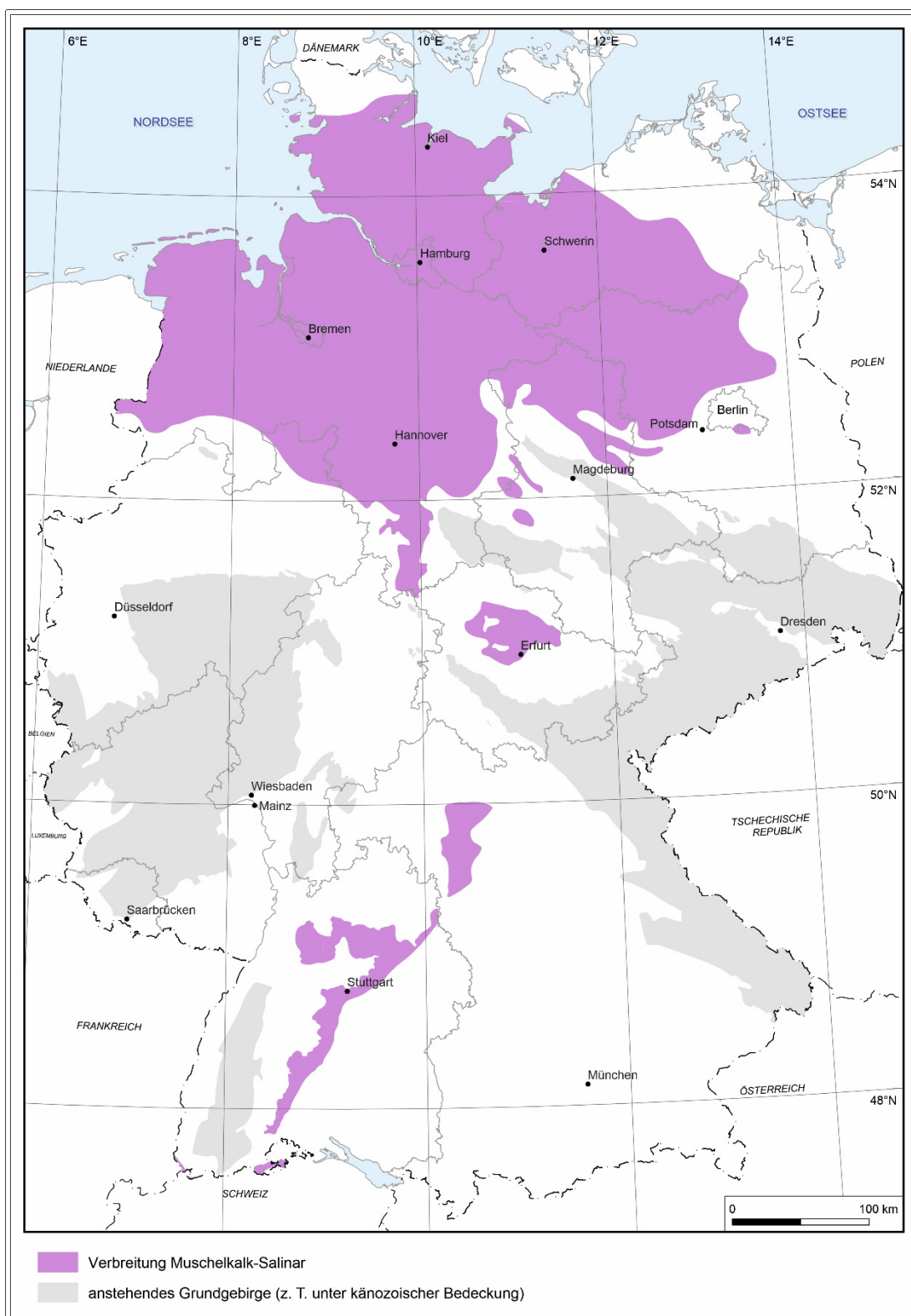


Abbildung 1-20: Schematische Verbreitung des Muschelkalk-Salinars in Deutschland (onshore) (nach Seidel 1964, Gärtner & Röhling 1993, Freudenberger & Schwerd 1996, Krull et al. 2004, Reinhold et al. 2014)

Nach Anwendung der Kriterien „Ausschluss von Flächen innerhalb des Verbreitungsgebietes von Zechsteindiapiren“ und „Maximale Teufenlage der Salzhorizontoberfläche 2000 m“ ist das zu betrachtende Verbreitungsgebiet des Muschelkalk-Salinar im Bereich des Norddeutschen Beckens deutlich eingeschränkt. Es konzentriert sich auf Bereiche Mecklenburgs, Teile des Subherzyns und Südniedersachsens (Abbildung 1-21).

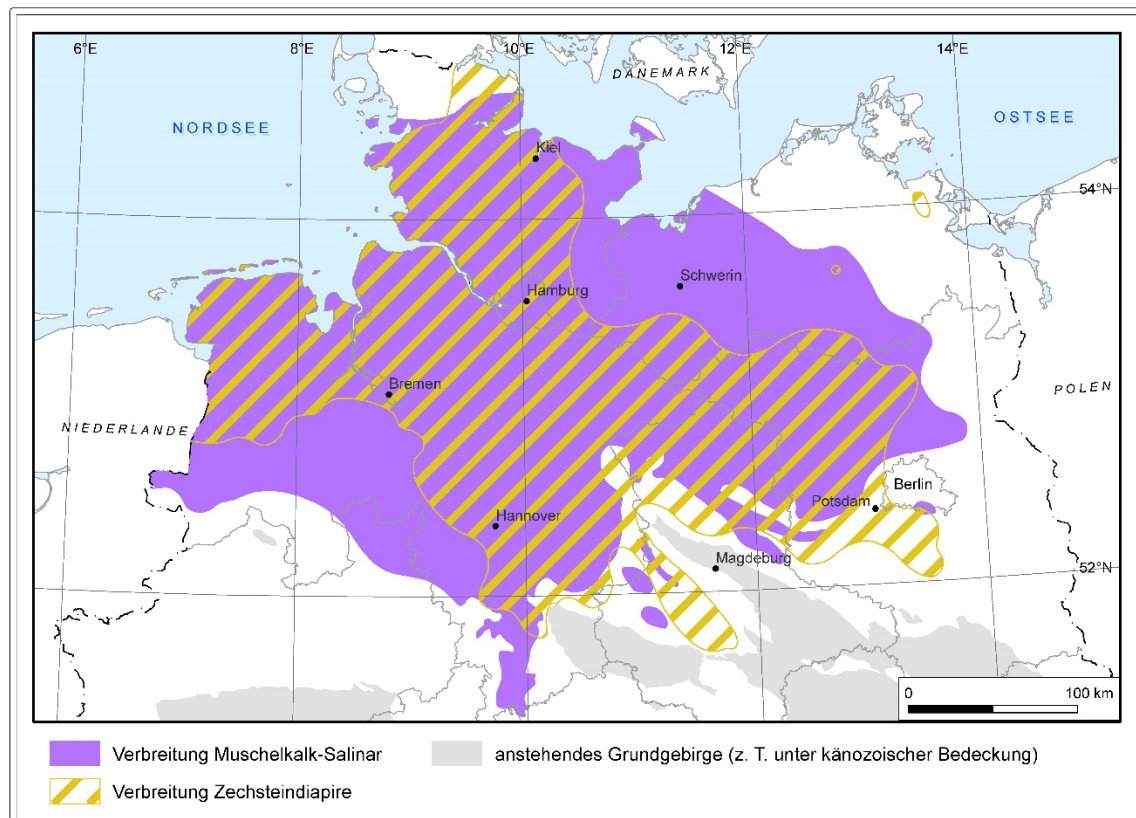


Abbildung 1-21: Verbleibendes Bearbeitungsgebiet (ohne Schraffur) für das Muschelkalk-Salinar im NDB nach Anwendung des Ausschlusskriteriums „Verbreitungsgebiet von Zechsteindiapiren“ (Kartengrundlage verändert nach Gärtner & Röhling 1993, Krull et al. 2004, Reinhold et al. 2008, Reinhold et al. 2014)

In Thüringen erreicht der Mittlere Muschelkalk Mächtigkeiten von ca. 45 bis 115 m, wobei die größten Mächtigkeiten im Bereich der SSW-NNE streichenden Thüringer Senke auftreten (Langbein & Seidel 2002). Zu den Randgebieten Ostthüringens und zur Eichsfeld-Altmark-Schwelle hin nimmt die Mächtigkeit primär und subrosionsbedingt deutlich ab. Innerhalb der Heilbronn-Formation erreicht das Muschelkalksalz Mächtigkeiten von wenigen Metern bis zu 40 m. Beispielhaft soll hier die nördlich Erfurt gelegene INFLUINS-Forschungsbohrung EF-FB 1/12 genannt werden, in der das Steinsalz im Mittleren Muschelkalk in einer Tiefe von 357,0-397,8 m in einer Mächtigkeit von 40,8 m erbohrt worden ist (Kunkel et al. 2014). Damit entspricht die in dieser Bohrung erbohrte Teufenlage des Muschelkalk-Salinar im Thüringer Becken den von Reinhold et al. (2014) erwarteten Teufenwerten von 300 – 400 m.

In Süddeutschland konzentriert sich die Verbreitung von Steinsalzen im Mittleren Muschelkalk auf die folgenden Bereiche: Unterfranken (Kitzingen, Burgbernheim), Mittlerer Neckar (Heilbronn, Kochenfeld), Oberer Neckar (Stetten, Haigerloch) und Hochrhein (Rheinfelden, Schweizerhalle), wobei die heutige Verbreitung und Mächtigkeit vom Auslaugungsgrad der



salinaren Gesteine abhängig ist. Die Basis des Mittleren Muschelkalks befindet sich meist wenige hundert Meter unter GOK. Innerhalb der Heilbronn-Formation können drei Steinsalzlager ausgehalten werden, das Untere Steinsalz, das Bändersalz und das Obere Steinsalz. Die größten Gesamtmächtigkeiten des Mittleren Muschelkalks betragen bei erhaltenem Steinsalz in Unterfranken zwischen 70 und 105 m (mit Steinsalzmächtigkeiten bis zu 30 m), im Raum Heilbronn ca. 100 m (Steinsalzmächtigkeiten bis zu 45 m) sowie im Süden Baden-Württembergs im Bereich des Oberen Neckars etwa 70 m (Steinsalzmächtigkeiten im Raum Stetten bis 16 m) (Simon 1988, Freudenberger 1996, Rogowski & Simon 2005, Geyer et al. 2011). Die im Gebiet um Stetten beobachteten geringeren Steinsalzmächtigkeiten werden auf das Fehlen von Oberen Steinsalz und Bändersalz zurückgeführt (Rogowski & Simon 2005).

Aufgrund seiner geringen Mächtigkeit ist das Muschelkalk-Salinar sowohl in Nord- als auch in Süddeutschland als Speicherhorizonte nicht geeignet.

1.5.5 Keuper-Salinar

Das Keuper-Salinar ist im Mitteleuropäischen Becken stratigraphisch an den Mittleren Keuper gebunden. Dieser wird in vier Formationen, Grabfeld-, Stuttgart-, Weser- und Arnstadt-Formation, untergliedert, wobei Steinsalzabfolgen in der Grabfeld- und der Weser-Formation zu finden sind (DSK 2016, Nitsch 2018). Insgesamt können bis zu acht Steinsalzlager nachgewiesen werden, bis zu fünf Salzlager in der Grabfeld-Formation (Salinare A bis E) und bis zu drei Salzlager in der Weser-Formation (Salinare F bis H) (Beutler 1995). Diese Salzlager sind über weite Bereiche des Norddeutschen Beckens horizontbeständig, variieren jedoch außerordentlich stark. Die größten Mächtigkeiten finden sich im Beckenzentrum im Bereich von NW-Niedersachsen, in den NW-Deutschland durchziehenden Riftzonen, wie dem Emsmündungs-Riftsystem mit Ems-Graben, dem Glückstadt-Graben und seiner südlichen Verlängerung, der Braunschweig-Gifhorn-Bruchzone, sowie in lokalen Subsidenzräumen und in den Randsenken der sich entwickelnden Salzstrukturen (Abbildung 1-21; Kockel 1999). Randlich werden diese Salinare durch Anhydrite und Gips vertreten (Beutler 1995). Die Salinarhorizonte erreichen im Allgemeinen zwischen zehn und mehreren hundert Metern Mächtigkeit, wobei sie aber in den Salinare A und H auf über 1000 m anschwellen können. Die größten Salzmächtigkeiten mit 2400 m erreicht das Salinar H im Bereich der Krummendeich-Scholle südlich der Elbe. In den Gebieten mit hoher Mächtigkeit konnten innerhalb des Salinars H sekundäre, halokinetisch bedingte Akkumulationen nachgewiesen werden. In den so entstandenen Salzkissen können mehr als 1700 m Steinsalz enthalten sein (Kockel 1999). Die in lokalen Subsidenzzentren Mecklenburgs, Sachsen-Anhalts und Brandenburgs verbreiteten Keuper-Salinare sind gegenüber denen in Niedersachsen wesentlich unreiner und geringmächtiger (Krull et al. 2004) So wurden in der Bohrung Grevesmühlen 1/78 sowohl in der Grabfeld- als auch in der Weser-Formation lediglich Steinsalzlager von 13 bzw. 14 m erbohrt (Hoth et al. 1993).

1 Teilprojekt Salz- und Strukturgeologie – Arbeitspaket 1

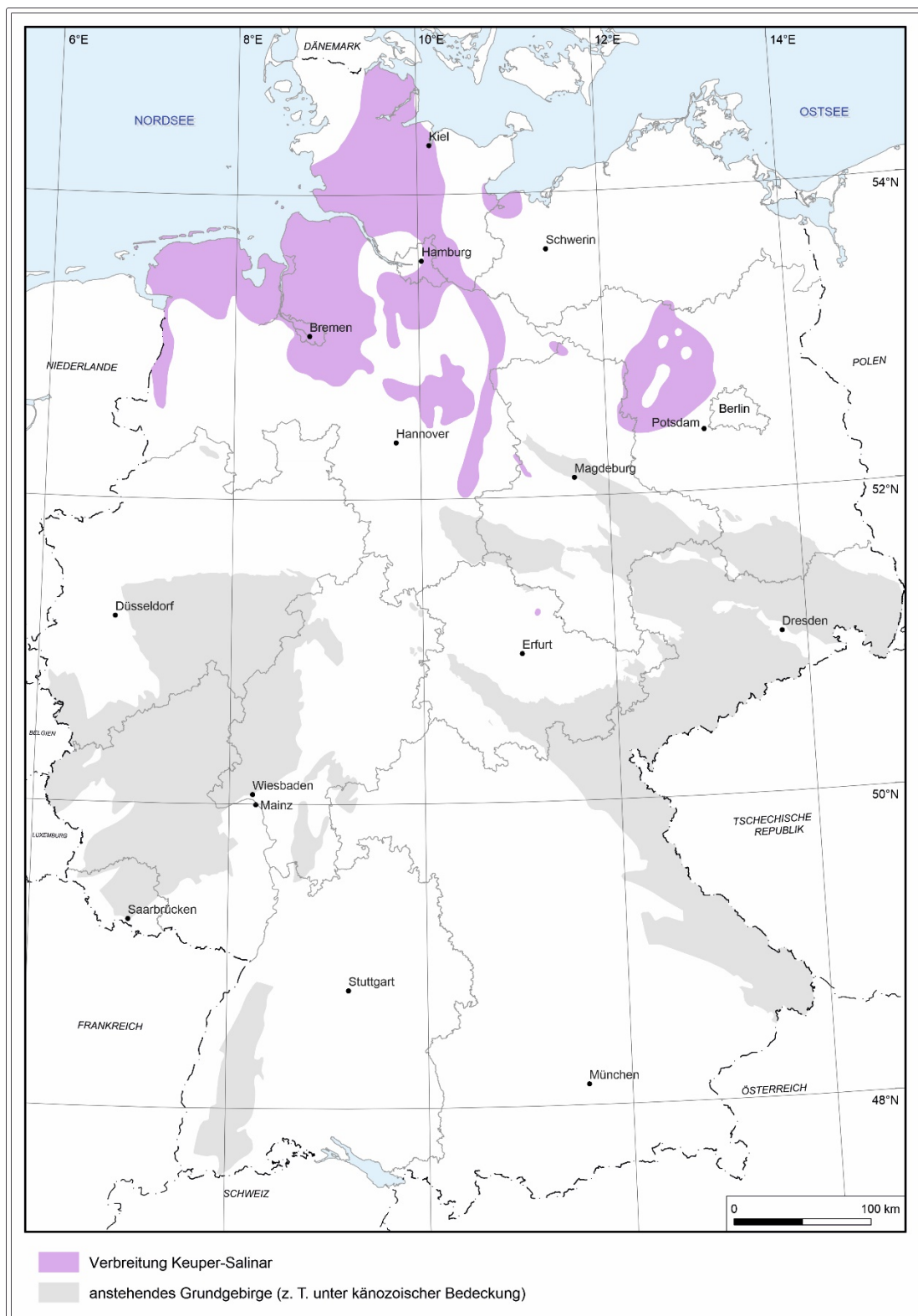


Abbildung 1-22: Schematische Verbreitung des Keuper-Salinars in Deutschland (onshore) (verändert nach Kockel 1999, Krull et al. 2004, Reinhold et al. 2014)

Innerhalb des Thüringer Beckens konnte bisher nur in der Schillingstedter Mulder Keuper-Salinar nachgewiesen werden (s. Abbildung 1-21). Dabei handelt es sich um ein anhydritisch-tonig verunreinigtes Steinsalz von ca. 25 m Mächtigkeit (Dockter & Langbein 2003).

Nach Anwendung der Kriterien „Ausschluss von Flächen innerhalb des Verbreitungsgebietes von Zechsteindiapiren“ ist das zu betrachtende Verbreitungsgebiet des Keuper-Salinars im Bereich des Norddeutschen Beckens deutlich eingeschränkt. Es konzentriert sich auf den südlichen Ems-Graben, den Bremen-Gaben, sowie auf ein lokales Subsidenzgebiet im Nordwesten Mecklenburgs (Abbildung 1-23). Bei Betrachtung der Tiefenlagen (Baldschuh et al. 1996) zeigt sich, dass das Keuper-Salinar tiefer als 2000 m liegt. In NW-Mecklenburg wurde geringmächtiges Keuper-Steinsalz in der Bohrung Grevesmühlen 1/78 in Teufen > 1700m erbohrt.

Nach Anwendung aller Kriterien wird deutlich, dass Keuper-Salinare als mögliche Speicherhorizonte nicht in Frage kommen.

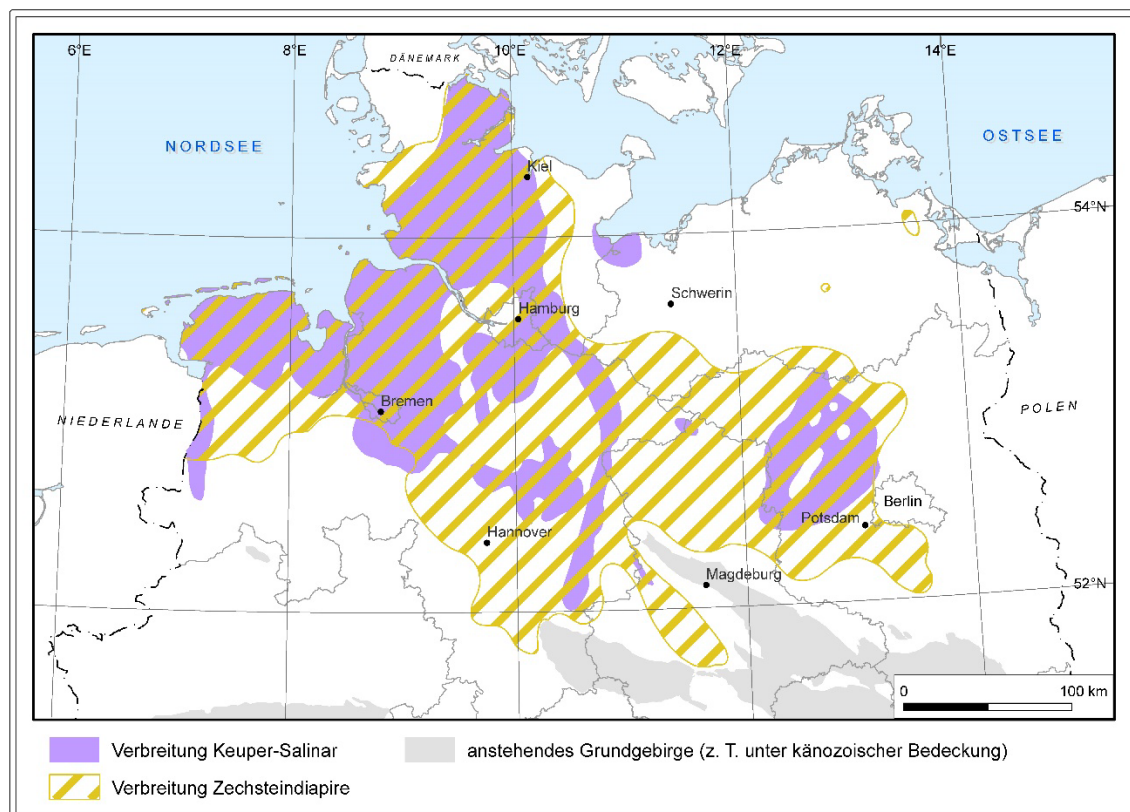


Abbildung 1-23: Verbleibende Bearbeitungsgebiet (ohne Schraffur) für das Keuper-Salinar im NDB nach Anwendung des Ausschlusskriteriums „Verbreitungsgebiet von Zechsteindiapiren“ (Kartengrundlage verändert nach Gärtner & Röhling 1993, Krull et al. 2004, Reinhold et al. 2008, Reinhold et al. 2014)

1.5.6 Malm-Salinar

Das Malm-Salinar ist im Mitteleuropäischen Becken stratigraphisch an den Oberjura gebunden, wobei Steinsalzabfolgen in der Münders-Formation vorkommen (Mönning et al. 2018). Innerhalb des Norddeutschen Beckens sind die Salinare auf die tief abgesunkenen Bereiche des zentralen und westlichen Niedersachsen-Beckens beschränkt (Kockel et al. 1995). Geographisch gesehen kommen die Salinare in einem Gebiet zwischen dem Emsland im Westen und nördlich des Weser-Wiehengebirges im Osten sowie südlich einer Linie südwestlich Papenburg – Nienburg vor. Darüber hinaus sind geringmächtige Vorkommen östlich der Weser in lokalen Senkungsgebieten nachgewiesen (Abbildung 1-24).

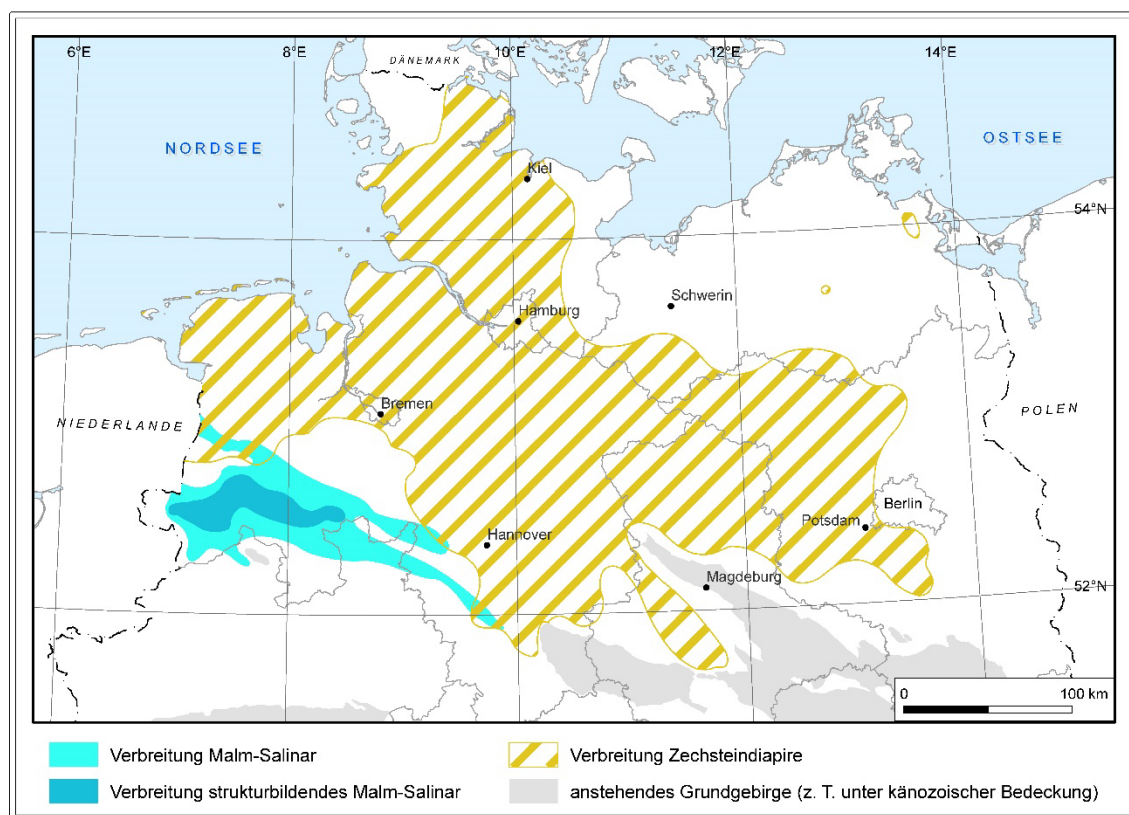


Abbildung 1-24: Schematische Verbreitung des Malm-Salinars in Deutschland und verbleibendes Bearbeitungsgebiet (ohne Schraffur) nach Anwendung des Ausschlusskriteriums „Verbreitungsgebiet von Zechsteindiapiren“ (Kartengrundlage verändert Kockel & Roland 1977, Krull et al. 2004, Reinhold et al. 2008, Reinhold et al. 2014)

In diesem Gebiet steuern syndesimentäre Gräben und Halbgräben und ihre jeweiligen, horstartigen Schulterbereiche die Ablagerungsprozesse (Gramann et al. 1997). Aufgrund dessen variieren sowohl die Tiefenlagen als auch die Mächtigkeiten lokal sehr stark, insbesondere in Grabenstrukturen kann die saline Schichtenfolge außerordentlich mächtig werden. Nach Trusheim (1971) beträgt die durchschnittliche Mächtigkeit in einzelnen Teilsenken ca. 800 m. Zu den Beckenrändern nehmen die Mächtigkeiten deutlich ab und sind östlich der Weser nur noch auf lokale Senken beschränkt bzw. werden durch sulfatische Gesteine vertreten (Kockel et al. 1995, Reinhold et al. 2014). Darüber hinaus kam es im westlichen Niedersachsen Becken infolge halokinetischer Prozesse in der Oberkreide zur



Salzkissenbildung, wobei diese Salzkissen Mächtigkeiten von 1000 bis über 2100 m erreichen und dabei relativ nahe der Oberfläche (ca. 100-700 m u. GOK) liegen können (Pollok et al. 2016). Zu nennen wären hier von Westen nach Osten die Strukturen Georgsdorf-Wietmarschen, Lohne, Baccum, Herzlake (Haselünne), Bippin (Orthe), Bersenbrück (Alfhausen), Damme und Lembruch (von Goerne et al. 2016, Reinhold et al. 2008, s. a. Abbildung 1-2). Diese Strukturen, die z. T. relativ reine, über 150 m mächtige Steinsalzlager enthalten können (Kockel et al. 1995), waren bereits Gegenstand des Vorgängerprojektes InSpEE (Pollok et al. 2016) und sollen aufgrund dessen hier nicht weiter behandelt werden. Allgemein werden die Steinsalze des Malm-Salinars jedoch als sehr unrein mit zahlreichen geringmächtigen Ton- und Anhydritmitteln beschrieben (Frisch & Kockel 2003, Reinhold et al. 2014).

Aufgrund der lokal sehr stark variierenden Mächtigkeit und Fazies der salinaren Schichtenfolge, insbesondere aufgrund von starken Verunreinigungen und zahlreichen geringmächtigen Ton- und Anhydritzwischenmitteln, dürfte das Malm-Salinar als Speicherpotenzial nicht in Frage kommen.

1.5.7 Tertiär-Salinar

Steinsalzlager des Tertiärs kommen in Deutschland ausschließlich im Oberrheingraben vor. Sie werden aus der Wittelsheim-Formation (Eozän bis Unterligozän) und der Bruchsal-Formation (Oberligozän) beschrieben (Gwinner et al. 2011). Depozentrum der Steinsalze führenden Schichten der Wittelsheim-Formation ist das Wittelsheimer Becken südwestlich des Kaiserstuhls im im südlichen Grabenbereich. Zu den randlichen und nördlicheren Grabenbereichen keilen die Steinsalzlager aus und die Wittelsheim-Formation wird von der Haguenau-Formation und der darüber folgenden Pechelbronn-Formation lateral vertreten (Gwinner et al. 2011, Menning & Hedrich 2016). In der Wittelsheim-Formation sind drei Steinsalzlager ausgebildet, die aus Wechselfolgen von Steinsalz und Süßwassermergeln bestehen, wobei der Steinsalzanteil im Wittelsheimer Becken mit 39 bis 74 % angegeben wird (Wagner 1955). An der Basis des Oberen Steinsalzlager kommen zwei geringmächtige Kaliflöze vor, die in früheren Jahren u. a. bei Buggingen (Salzstruktur Weinstetten) in Abbau standen (Wagner 1955, Gwinner et al. 2011). Der Abbau erfolgte in Teufen zwischen 600 und 1100 m. Die Mächtigkeiten der Steinsalzlager variieren auf Grund synsedimentär aktiver und durch Störungen begrenzter Senken sehr stark. In Bereichen hoher Salzmächtigkeit und mächtiger Sedimentbedeckung konnte es zur Mobilisation des Steinsalzes mit Bildung von Salzdiapiren kommen (Wagner 1955).

Innerhalb der oberligozänen Bruchsal-Formation finden sich geringmächtige Steinsalzlagen lediglich im nördlichen Grabenbereich in der Umgebung von Worms und zwischen Worms und Darmstadt (Wagner 1955). Wagner beschreibt aus der 1936 abgeteufften Bohrung Worms I eine rund 165 m mächtige, von braunen bituminösen Mergeln mit Anhydrit aufgebaute Schichtenfolge, in der sechs Steinsalzbänke mit zusammen 7 m reinem Steinsalz vorkommen. Von diesen konzentrieren sich die fünf unteren auf eine Teufenbereich von 1700 bis 1770 m.

Auf Grund der lokal sehr begrenzten, meist geringmächtigen und stark verunreinigten Steinsalzabfolgen dürfte das Tertiär-Salinar als Speicherpotenzial nicht in Frage kommen.

1.6 Planungsrelevante Daten

Als Informationsgrundlage für den Kavernenbau wurden über geologische Informationen hinaus weitere planungsrelevante Aspekte überprüft. Es zeigte sich, dass als Abschlagsfaktoren insbesondere eine Bebauung der Gebiete sowie eine Nutzungskonkurrenz, z. B. durch Bergbaugebiete, zu berücksichtigen sind (Abbildung 1-25, 1-26). Geschützte Flächen oberhalb der potenziell geeigneten Speichergebiete, die bei kleinmäÙstablicher Betrachtung deutschlandweit verbreitet sind (Abbildung 1-27), wurden nicht in den Kriterienkatalog aufgenommen, da diese infrastrukturellen und politischen Bedingungen unterworfen sind und Änderungen unterliegen können. Demzufolge sind diese erst bei individuellen Standortermittlung zu berücksichtigen. Die Erarbeitung der planungsrelevanten Daten erfolgte in Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern, entsprechende Daten wurden übergeben und werden im Informationssystem bereitgestellt.

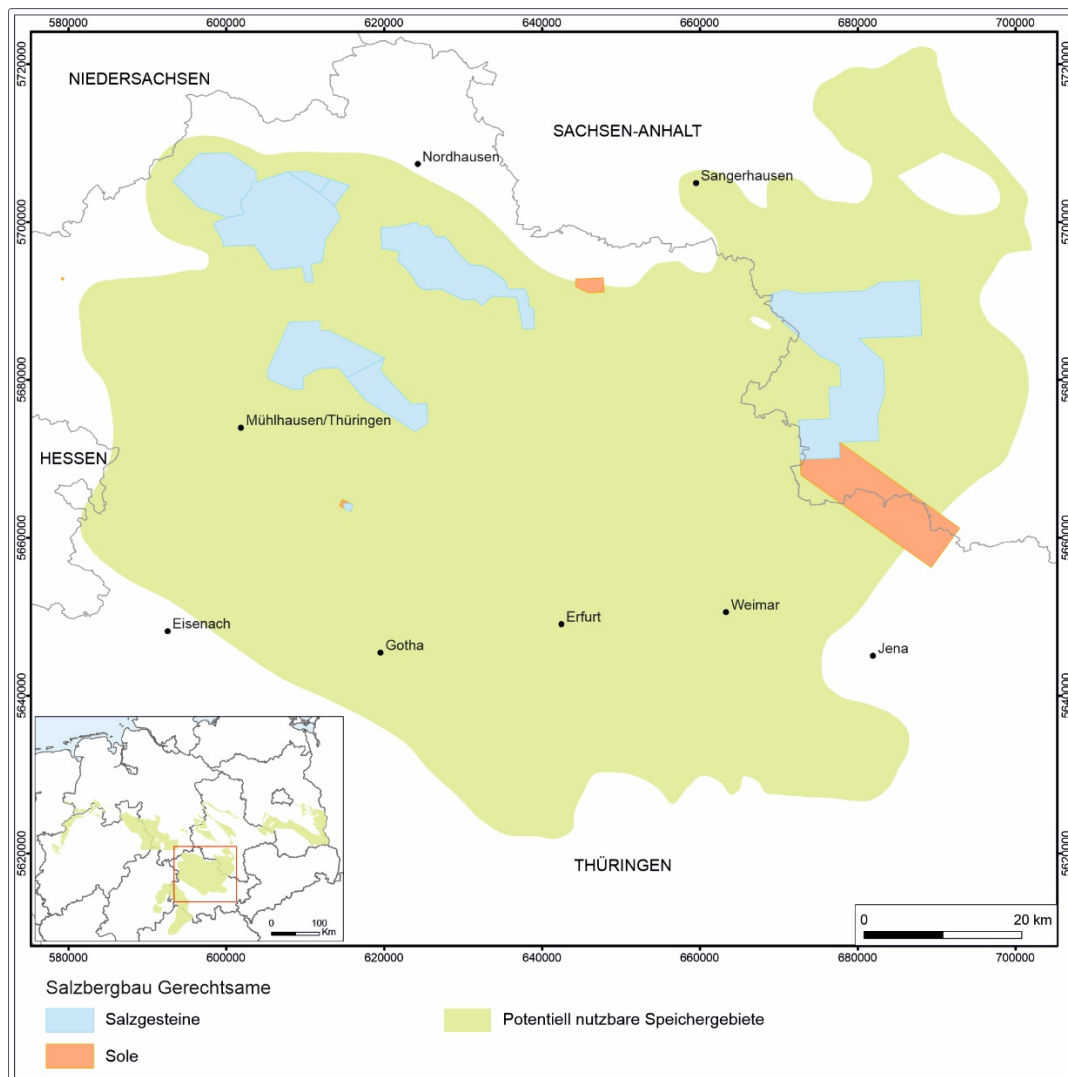


Abbildung 1-25: Durch Salzbergbau auszuschließende Gebiete innerhalb des potenziell nutzbaren Speichergebietes im Bereich des Thüringer Beckens (mit frdl. Unterstützung des Thüringer Landesamtes für Umwelt, Bergbau und Naturschutz)

1 Teilprojekt Salz- und Strukturgeologie – Arbeitspaket 1

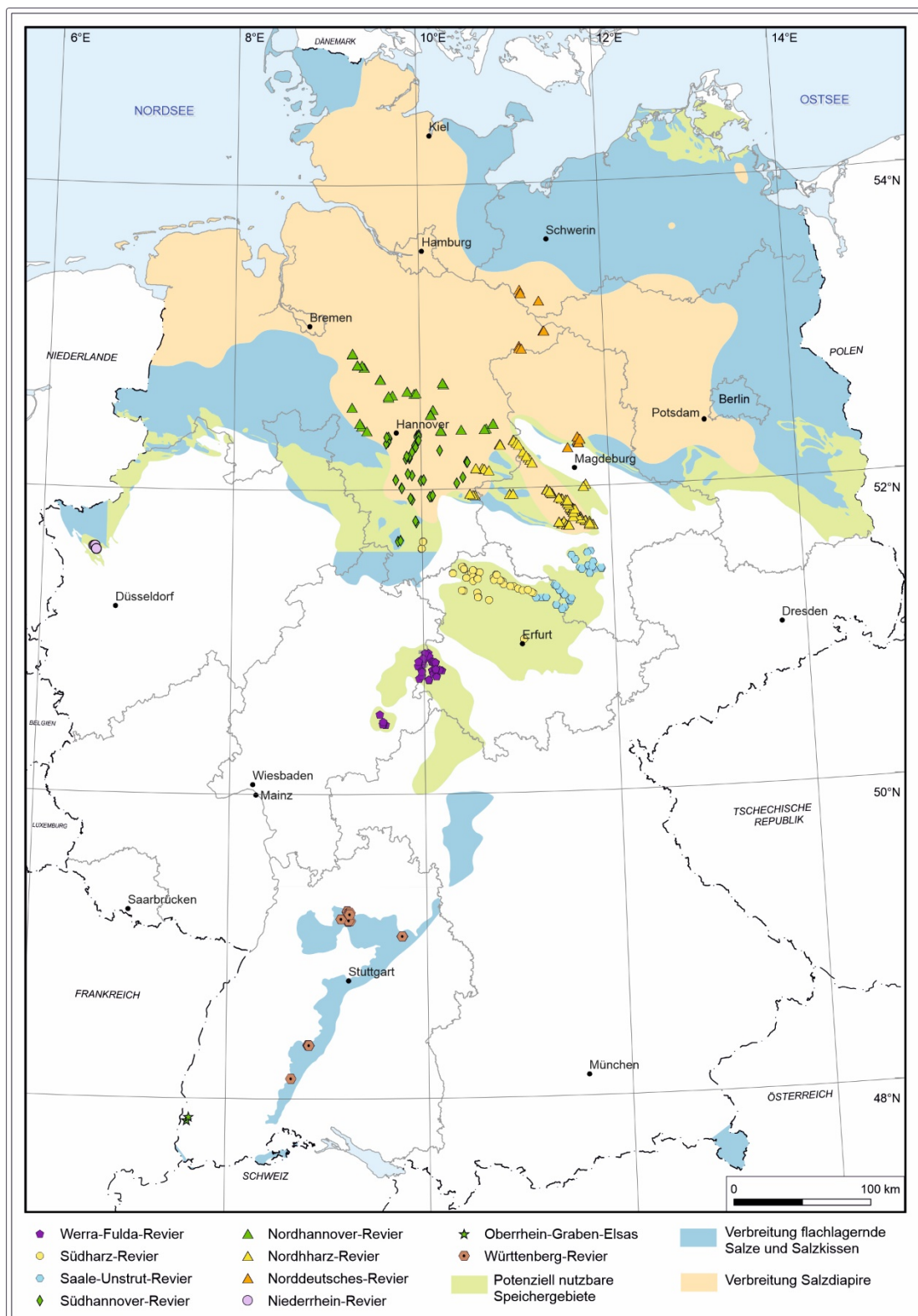


Abbildung 1-26: Schächte des Kali- und Steinsalzbergbaus in Deutschland

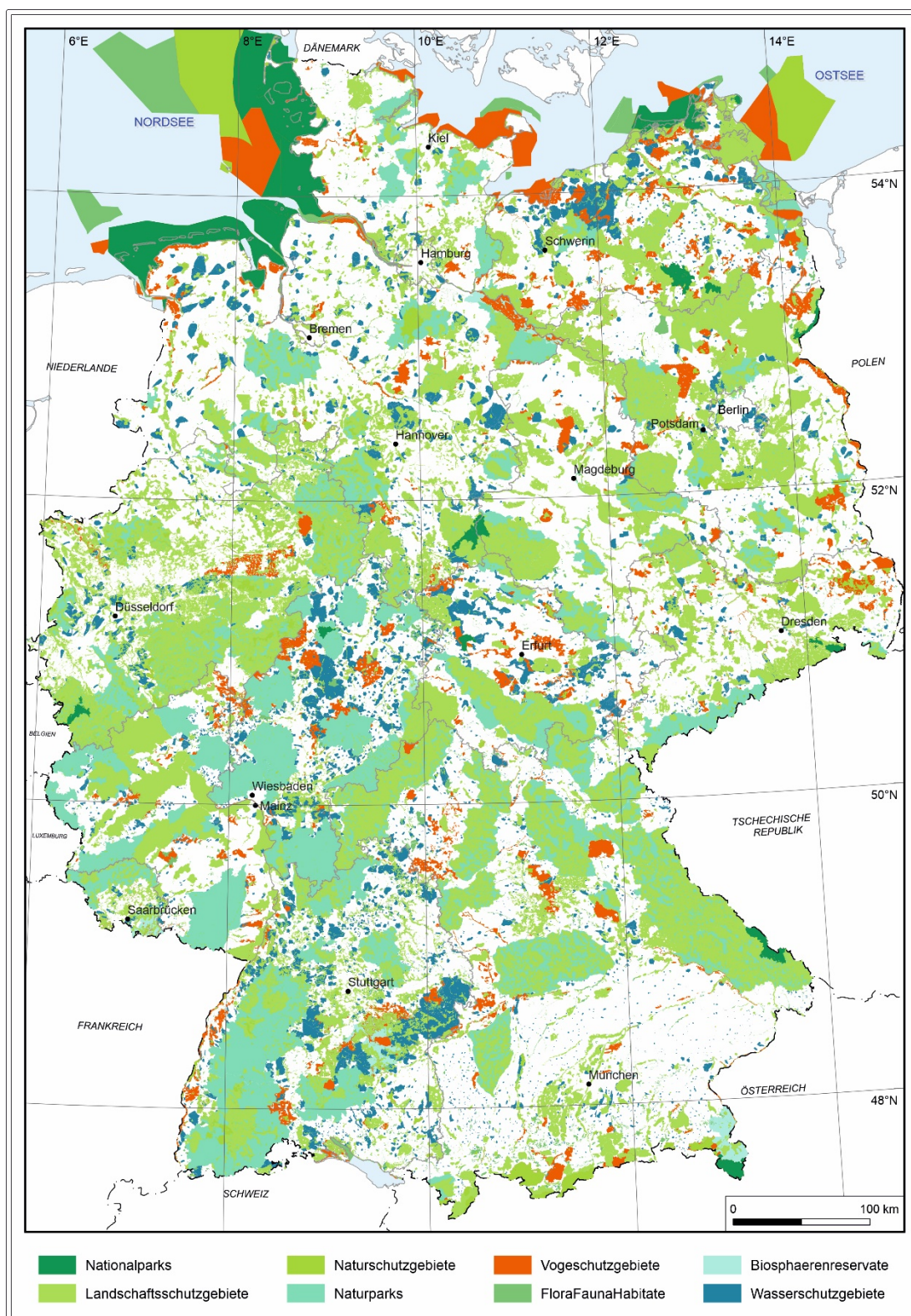


Abbildung 1-27: Schutzgebiete in Deutschland (nach Gast et al. 2012)



1.7 Informationssystem

Daten und Informationen, die während des Projektes als Informationsgrundlagen für die Bestimmung von potenziell nutzbaren Flächen für die Speicherung von erneuerbaren Energien in Form von Druckluft und Wasserstoff erarbeitet wurden, wurden in das Informationssystem INSPEE-DS integriert. Dieses System wird über den BGR-Geoviewer als Online-Kartendienst öffentlich zugänglich gemacht und bietet über eine grafische Benutzeroberfläche räumliche und attributive Suchfunktionen und Filterungsmöglichkeiten über die vorhandenen Datensätze an. Jeder Layer kann von den Nutzern nach Bedarf aktiviert oder deaktiviert werden, sowie mit Transparenz dargestellt werden.

Das erstellte Informationssystem bietet dem Nutzer die Möglichkeit, allgemeine Salzverbreitungen und potenzielle Speichergebiete von flach lagernden Salzen in den unterschiedlichen stratigraphischen Horizonten zu identifizieren, sowie ihre Kennzeichnung als *nutzbares* Potenzial entsprechend der Erfüllung der im Projekt definierten Kriterien zu erkennen. Der Kriterienkatalog, der für die Bestimmung der potenziellen Flächen diente, ist über einen Link im Info-Fenster der Datensätze aufrufbar.

Die identifizierten Flächen mit nutzbarem Potenzial, sind darüber hinaus individuell im Layer „Speicherpotenzial in den Bundesländern“ dargestellt, um die im Projekt generierte Informationen zum Druckluft- und Wasserstoff Speicherpotenzial an den Bundesländern zu koppeln und an den Nutzern über ein hinterlegtes Datenblatt zur Verfügung zu stellen.

Außerdem werden die erarbeiteten Strukturkarten zu Mächtigkeit und Teufenlage Basis und Top Zechstein innerhalb der identifizierten potenziell nutzbaren Speichergebiete dargestellt. Die Informationen umfassen Isolinien, Störungs- und Begrenzungselemente des Potenzialgebietes, sowie Unsicherheitsflächen. Unterschiedliche Abfragen an diesen Datensätzen sind ebenfalls möglich.

Der Layer „Bohrungen“ enthält relevante Bohrungen, deren Charakterisierung aus der Bohrpunktkarte Deutschland stammt, und bietet dem Nutzer über ein Link Zugriff auf Bohrprofile mit Steinsalzhorizonten. Auch Informationen und Abbildungen von wichtigen Bohrungs-Korrelationen in unterschiedlichen stratigraphische Horizonten werden über das Informationssystem zugänglich gemacht.

Der Darstellungsmaßstab ist auf 1:300.000 begrenzt, da der Bearbeitungsmaßstab des Systems nicht für detaillierter Untersuchungen geeignet ist.

Um die zukünftige langfristige Kompatibilität und Austauschfähigkeit der Daten zu gewährleisten, wurde bei der Erstellung des Informationssystems die INSPIRE-Richtlinie („Infrastructure for Spatial Information in Europe“) berücksichtigt. Das Informationssystem ist unter folgendem Link erreichbar: <http://geoviewer.bgr.de>.



Literaturverzeichnis

- Bachmann, G.H., Geluk, M.C., Warrington, G., Becker-Roman, A., Beutler, G., Hagdorn, H., Hounslow, M.W., Nitsch, E., Röhling, H.-G., Simon, T. & Szulc, A. (2010): Triassic. (In: Doornenbal, J.C. & Stevenson, A.G. (Hrsg.): Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area). S. 149-173; Houten (EAGE Publications b.v.).
- Baldschuhn, R., Best, G. & Kockel, F. (1991): Inversion tectonics in the north-west German basin. (In: Spencer, A.M. (Hrsg.): Generation, accumulation and production of Europe's hydrocarbons). Bd. 1: S. 149-159; (Special Publication of the European Association of Petroleum Geoscientists).
- Baldschuhn, R., Binot, F., Fleig, S. & Kockel, F. (2001): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor. Geol. Jb., A 153: S. 1-88.
- Baldschuhn, R., Frisch, U. & Kockel, F. (1996): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:300 000.: 19 Karten und 7 Tafeln mit Profilschnitten S.; Hannover (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe).
- Baldschuhn, R., Frisch, U. & Kockel, F. (1999): Strukturen im Untergrund NW-Deutschlands 1 : 500 000 1 Kt.; Hannover (Bundesanst. f. Geowiss. und Rohstoffe).
- Bebiolka, A., Göthel, M. & Höding, T. (2011): Endbericht Speicher-Kataster Deutschland für die Bundesländer Brandenburg, Berlin und ausgewählte Regionen in Sachsen. (In: Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland: eine Grundlage zur klimafreundlichen geotechnischen und energetischen Nutzung des tieferen Untergrundes (Speicher-Kataster Deutschland); Abschlussbericht; FZK 0327765). 53 S., 23 Abb., 2 Tab.
- Beer, H. (2010): Zechstein – Paläomorphologie, Mächtigkeit und Tiefenlage. (In: Stackebrandt, W. (Hrsg.): Atlas zur Geologie von Brandenburg, im Maßstab 1:1 000 000). 4. aktualisierte Aufl.: 84-85; (Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg.).
- Beer, H. & Stackebrandt, W. (2010): Tiefenlage der Zechsteinoberfläche. (In: Stackebrandt, W. (Hrsg.): Atlas zur Geologie von Brandenburg, im Maßstab 1:1 000 000). 4. aktualisierte Aufl.: 82-83; Cottbus (Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg).
- Beer, H. & Stackebrandt, W. (2000): Geologische Übersichtskarte des Landes Brandenburg 1 : 300 000, Tiefenlinienkarte der Zechsteinoberfläche. 1 Kt.; Kleinmachnow/Potsdam.
- Beer, W., Fauseweh, H. & Hunstock, F. (2003): Geologie und Bergbau am Standort des Steinsalzbergwerkes Borth. (In: Hartmann, O. & Schönberg, G. (Hrsg.): Kali-, Steinsalz und Kupferschiefer in Mitteldeutschland IV : Vorträge zum 15. Treffen des Arbeitskreises Bergbaufolgelandschaften, Magdeburg, 26./27. September 2003). Exkursionsführer und Veröffentlichungen der Gesellschaft für Geowissenschaften (GGW): 57-63, 10 Abb., 1 Tab.; Berlin.



- Beer, W.W. & Barnasch, J. (2020, im Druck): Werra-Fulda-Becken. (In: Deutsche Stratigraphische Kommission. Koordination und Redaktion: J. Paul & H. Heggemann für die Subkommission Perm-Trias) (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland XI. Zechstein). Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 89; Berlin.
- Beutler, G. (1995): Quantifizierung der altkimmerischen Bewegungen in Nordwestdeutschland, Teil I: Stratigraphie des Keupers, Band 1 und 2. BGR, Unveröff. Bericht: 147 S., 35 Abb., 13 Tab., 5 Anl.; Hannover.
- Beutler, G. (2004): Keuper. (In: Katzung, G. (Hrsg.): Geologie von Mecklenburg-Vorpommern). 140-151; Stuttgart (Schweizerbart).
- Beywl, T., Glander, H., Hessmann, W., Käbel, H., Lange, M., Putscher, S., Schirrmeister, W., Voigt, H.-J. & Zieschang, J. (1974): Höffigkeitseinschätzung UGS - Zechstein- und Triassalinare - Stauer und Speicher des Rät bis Unterkreide. 74 Blatt; Berlin (Zentrales Geologisches Institut).
- Bohnenberger, G. & Pause, R. (2003): Salzbergbau im Neckartal. (In: Hartmann, O. & Schönberg, G. (Hrsg.): Kali-, Steinsalz und Kupferschiefer in Mitteldeutschland IV : Vorträge zum 15. Treffen des Arbeitskreises Bergbaufolgelandschaften, Magdeburg, 26./27. September 2003). Exkursionsführer und Veröffentlichungen der Gesellschaft für Geowissenschaften (GGW), 222: 53-56; Berlin.
- Brandes, J. & Obst, K. (2011): Speicher- und Barrieregesteinskomplex in Mecklenburg-Vorpommern : Abschlussbericht zum Projekt "Speicher-Kataster Deutschland". (In: Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland: eine Grundlage zur klimafreundlichen geotechnischen und energetischen Nutzung des tieferen Untergrundes (Speicher-Kataster Deutschland); Abschlussbericht; FZK 0327765): 34 S., 16 Abb., 3 Tab.
- Brückner-Röhling, S., Espig, M., Fischer, M., Fleig, S., Forsbach, H., Kockel, F., Krull, P., Stiewe, H. & Wirth, H. (2002): Standsicherheitsnachweis Nachbetriebsphase: Seismische Gefährdung - Projekt Gorleben - Teil 1: Strukturgeologie. BGR, Unveröff. Bericht: 183 S.; Hannover.
- Dockter, J. & Langbein, R. (2003): Keuper. (In: Seidel, G. (Hrsg.): Geologie von Thüringen). 2. Aufl.: 357-391; Stuttgart (Schweizerbart).
- 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., Farkas, F. & Wendzel, J. (2010): Exkursion 2: ESCO Werk Bernburg. (In: Gerardi, J. (Hrsg.)). Staßfurt 2010 - Erkennen, analysieren, bewerten und prognostizieren der zukünftigen Entwicklung der Bergbaufolgeschäden. Exkursionsführer und Veröffentlichungen der Deutschen Geologischen Gesellschaft (EDGG), 244: 259-263.
- DSK - Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.; Redaktion, Koordination und Gestaltung: Menning, M. & Hedrich, A. (2016): Stratigraphische Tabelle von Deutschland 2016. Potsdam (GeoForschungsZentrum).



- Edel, J.B., Schulmann, K. & Rotstein, Y. (2007): The Variscan tectonic inheritance of the Upper Rhine Graben: evidence of reactivations in the Lias, LateEocene-Ologocene to recent. *International journal of earth sciences (Geol. Rdsch.)*, 96: 305-325.
- Enderlein, F., Jungwirth, J. & Ziegenhardt, W. (1972): Erläuterungen zur Geologischen Spezialkarte der Deutschen Demokratischen Republik 1:25 000 - Blatt Plaua 5231. Berlin (ZGI).
- Förderverein Erdöl & Heimat e. V. (Hrsg.) (2009): *Schatzsucher : eine Chronik des Grimmener Erdölbetriebes 1961 - 1990*. 2. Aufl.: 282 S.; Reinkenhagen (Förderverein Erdöl & Heimat).
- Franz, M., Bachmann, G.H., Barnasch, J., Heunisch, C. & Röhling, H.-G. (2018): Der Keuper in der stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2016 - kontinuierliche Sedimentation in der norddeutschen Beckenfazies (Variante B). *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 169, 2: 203-224, 5. Abb.
- Freudenberger, W. (1996a): Gesteinsabfolge des Deckgebirges nördlich der Donau und im Molasseuntergrund: Trias. (In: Freudenberger, W. & Schwerd, K. (Hrsg.): *Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500000*). 65-90; München (Bayerisches Geologisches Landesamt).
- Freudenberger, W. (1996b): Gesteinsfolge des Deckgebirges nördlich der Donau und im Molasseuntergrund - Perm. (In: Freudenberger, W. & Schwerd, K. (Hrsg.): *Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500 000*). 55-64; München (Bayerisches Geologisches Landesamt).
- Frisch, U. (1985): *Geotektonischer Atlas von Nordwestdeutschland 1 : 100 000*, Blatt Quakenbrück, C 3510. 62 S., 17 Abb., 4 Tab., 34 Anl.; Hannover (BGR).
- Frisch, U. & Kockel, F. (2003): Der Bremen-Knoten im Strukturnetz Nordwestdeutschlands. *Berichte aus dem Fachbereich der Geowissenschaften der Universität Bremen*, 223: 379 S.
- Gaertner, H. & Röhling, H.-G. (1993): Zur lithostratigraphischen Gliederung und Paläogeographie des Mittleren Muschelkalks im Nordwestdeutschen Becken. (In: Hagdorn, H. & Seilacher, A. (Hrsg.)). *Muschelkalk, Schöntaler Symposium 1991*. 85-103; (Goldschneck).
- Gast, R., Duser, M., Breikreuz, C., Gaupp, R., Schneider, J.W., Stemmerik, L., Geluk, M., Geißler, M., Kiersnowski, H., Glennie, K., Kabel, S. & Joines, N. (2010): Rotliegend. (In: Doornenbal, J.C. & Stevenson, A.G. (Hrsg.): *Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area*). 100-120; Houten (EAGE Publications b.v.).
- Gast, S., Wirth, H., Fischer, M. & Weber, K. (2012): *Planungsgrundlagen und geologische Informationen für die Entwicklung potenzieller CO₂-Speichervorhaben (COOSKA)*. 45 S.; Hannover.
- GD NRW - Geologischer Dienst NRW (2020): *Rohstoffkundlichen Übersichtskarte von Nordrhein-Westfalen 1: 500 000*. Kreefeld. <https://www.geoportal.nrw/>; 01.09.2019.
- Gebhardt, U. (1994): Zur Genese der Rotliegend-Salinare in der Norddeutschen Senke (Oberrotliegend II, Perm). *Freiberger Forschungshefte, C452*: 3 - 22.



- Gebhardt, U., Lützner, H., Ehling, B.-C., Schneider, J.W., Voigt, S. & Walter, H. (2018): Erläuterungen zur Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2016 - Rotliegend Variante B. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 169, 2: 129-137.
- Geyer, M., Nitsch, E. & Simon, T. (Hrsg.) (2011): Geologie von Baden-Württemberg. 5. völlig neu bearbeitete Auflage.: 594 S.; Stuttgart (Schweizerbart).
- Glennie, K.W. & Buller, A.T. (1983): The Permian Weissliegend of NW Europe: the partial deformation of aeolian dune sands caused by the Zechstein transgression. *Sedimentary Geology*, 35, 1: 43-81.
- Gralla, P. (1988): Das Oberrotliegende in NW-Deutschland - Lithostratigraphie und Faziesanalyse. *Geol. Jb.*, A 106, 3-59; Hannover.
- Gramann, F., Heunisch, C., Klassen, H., Kockel, F., Dulce, G., Harms, F.-J., Katschorek, T., Mönning, E., Schudack, M., Schudack, U., Thies, D., Weiss, M. & Hinze, C. (1997): Das Niedersächsische Oberjura-Becken - Ergebnisse interdisziplinärer Zusammenarbeit. *Z. dt. Geol. Ges.*, 148: 165-236.
- Grumbt, E., Kästner, H. & Lützner, H. (1997): Erläuterungen zur Geologischen Karte 1:25000 von Thüringen - Blatt Schlotheim, Nr. 4729 ; Blatt Ebeleben, Nr. 4730. 2. Aufl.: 262 S.; Weimar (Thüringische Landesanstalt für Geologie).
- Hagdorn, H. & Simon, T. (2005): Der Muschelkalk in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002. *Newsletters on Stratigraphy*, 41: S. 143-158.
- Hiss, M. & Milbert, G. (1983): Geologische Untersuchungen von Anhydritstrukturen im Steinsalzbergwerk Borth der Deutschen Solvay-Werke. Unveröff. Bericht, Geol. L.-A. Nordrhein-Westfalen: 1-43, 9 Abb., 44 Anl.; Krefeld.
- Hoth, K., Rusbült, J., Zagora, K., Beer, H. & Hartmann, O. (1993): Die tiefen Bohrungen im Zentralabschnitt der Mitteleuropäischen Senke - Dokumentation für den Zeitabschnitt 1962 - 1990. *Schriftenreihe für Geowissenschaften*, 2, 7: 7-145, 1 Abb., 2 Tab.
- Huckriede, H. & Zander, I. (2011): Geologische Charakterisierung der Speicher- und Barrieregesteine im tieferen Untergrund des Freistaats Thüringen (Deutschland). (In: Müller, C. & Reinhold, K. (Hrsg.): *Geologische Charakterisierung tiefliegender Speicher- und Barrierehorizonte in Deutschland - Speicher-Kataster Deutschland*). *Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*: 188-204; Stuttgart (Schweizerbart).
- Illies, J.H. (1965): Bauplan und Baugeschichte des Oberrheingebietes. *Oberrheinisch Geologische Abhandlungen*, 14: 1-54.
- Jaritz, W. (1973): Zur Entstehung der Salzstrukturen Nordwestdeutschlands. *Geologisches Jahrbuch*, A 10: 1-77, 3 Abb., 1 Tab., 2 Taf.
- Kaeding, K.-C. (1987): Exkursion C 1/2. Kali- und Steinsalzbergwerk Hattorf der Kali und Salz AG, Schachtanlage Hera - Befahrung von Bohrkernen aus dem Zechstein des Werra-Fulda-Beckens und des Solling-Beckens. (In: Kulick, J. & Paul, J. (Hrsg.): *Internationales Symposium Zechstein 1987 Kassel - Hannover : Exkursionsführer. - 1. Exkursionen A, B, C, G, H, K: Zechsteinsalinare und Bohrkernausstellungen*). 57-68.



- Kästner, H., Seidel, G. & Wiefel, H. (2003): Regionalgeologische Stellung und Gliederung. (In: Seidel, G. (Hrsg.): Geologie von Thüringen). 15-23; Stuttgart (Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).
- Katzung, G. (1991): Zu Auftreten, Ausbildung und Genese des Salinars in der mitteleuropäischen Saxon II-Senke (Oberperm). Zentralblatt für Geologie und Paläontologie. Teil I: Allgemeine, angewandte, regionale und historische Geologie, 1990, 11: 1565-1585.
- Katzung, G. (Hrsg.) (2004): Geologie von Mecklenburg-Vorpommern. 580 S.; Stuttgart (Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).
- Kley, J. & Voigt, T. (2008): Late Cretaceous intraplate thrusting in central Europe: Effect of Africa-Iberia-Europe convergence, not Alpine collision. *Geology*, 36, 11: 839-842. DOI:10.1130/g24930a.1
- Kockel, F. (1999): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1 : 300 000, Teil 18: Die paläogeographische und strukturelle Entwicklung Nordwestdeutschlands - Bd. 3: Der Zechstein, die Trias. BGR, Unveröff. Bericht: 133 S.; Hannover.
- (2003): Inversion structures in Central Europe - Expressions and reasons, an open discussion. *Geologie en Mijnbouw*, 4: 367-382, 26 Abb.
- 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. BGR: 48 S., 5 Abb., 16 Tab., 1 Anl., Anh.; Hannover.
- Kockel, F. & Roland, N. W. (1977): Langzeitlagerung radioaktiver Abfälle. Katalog geeigneter geologischer Formationen in der Bundesrepublik Deutschland. BGR-Archiv-Nr. 0078512: 42 S.; Hannover.
- Kopp, J. C., Beer, H. & Stackebrandt, W. (2015): Zechstein. (In: Stackebrandt, W. & Franke, D. (Hrsg.): Geologie von Brandenburg). 132-143; Stuttgart (Schweizerbart).
- Krull, P., Hoth, P., Bräuer, V. & Wirth, H. (2004): Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland - Untersuchungswürdige Regionen mit potenziellen Wirtsgesteinsformationen. BGR, unveröff. Zwischenbericht: 91 S.; Berlin/Hannover.
- Kulick, J., Leifeld, D., Meisl, S., Pöschl, W., Stellmacher, R., Strecker, G., Theuerjahr, A.-K. & Wolf, M. (1984): Petrofazielle und chemische Erkundung des Kupferschiefers der hessischen Senke und des Harz-Westrandes. *Geologisches Jahrbuch*, D 68: 3-223, 37 Abb., 15 Tab., 34 Taf.
- Kunkel, C., Abratis, M., Müller, B., Hofmann, J., Tiepner, T., Aehnelt, M., Voigt, T., Gaupp, R., Kukowski, N., Totsche, K.U. & Influids, u.d.w.B.v. (2014): Die Influids Forschungsbohrung EF-FB 1/12: Einführung und erste stratigraphische Ergebnisse zur neuen Tiefbohrung im Herzen der Thüringer Mulde. *Beitr. Geol. Thüringen*, N. F. 21: 68-84.
- Langbein, R. & Seidel, G. (2002): Muschelkalk. (In: Seidel, G. (Hrsg.): Geologie von Thüringen). 2. neubearbeitete Aufl.: 342-357; Stuttgart (Schweizerbart).
- Legler, B. (2005): Faziesentwicklung im Südlichen Permbecken in Abhängigkeit von Tektonik, eustatischen Meeresspiegelschwankungen des Proto-Atlantis und



- Klimavariabilität (Oberrotliegend, Nordwesteuropa). Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 47: 107 S., 53 Abb., 7. Tab.
- Legler, B., Schneider, J., Gebhardt, U., Merten, D. & Gaupp, R. (2011): Lake deposits of moderate salinity as sensitive indicators of lake level fluctuations; example from the Upper Rotliegend saline lake (Middle-Late Permian, northeast Germany). *Sedimentary Geology*, 234, 1-4: 56-69. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2010.11.006>
- Nitsch, E. (2018): Der Keuper in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2016: kontinuierliche oder lückehafte Überlieferung. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 169, 2: 181-201, 8 Abb.
- Martiklos, G., Beutler, G., Ehling, B.-C., Spieß, H., Klowsky, C. & Rappsilber, I. (2001): Geologische Übersichtskarte von Sachsen-Anhalt 1 : 400 000: Karte ohne känozoische Bildungen. Tektonische Übersichtskarte von Sachsen-Anhalt 1 : 500 000: saxonischer Strukturbaue mit Blattschnitt des geologischen Kartenwerkes 1 : 25 000. Karte und Erläuterung; Halle/Saale.
- Menning, M. & Hendrich, A. (2005): Erläuterungen zur Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2005 (ESTD 2005). *Newsletters on Stratigraphy*, 41,1/3: 405 S.
- Menning, M. (2018): Die Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2016 (STD 2016). *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 169, 2: 105-128, 1 Abb.
- Merkel, D., Behla, S. & Karnin, W.-D. (1998): Beckenentwicklung und Kohlenwasserstoffpotenzial. *Geologisches Jahrbuch*, A 149: 235-253.
- Mönning, E., Franz, M. & Schweigert, G. (2018): Der Jura in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland (STD2016). *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 169, 2: 225-246, 5 Abb. DOI:[10.1127/zdgg/2018/0148](https://doi.org/10.1127/zdgg/2018/0148)
- Müller, C., Jähne-Klingberg, F., Goerne, G.v., Binot, F. & Röhling, H.-G. (2016): Vom Geotektonischen Atlas ("Kockel-Atlas") zu einem 3D-Gesamtmodell des Norddeutschen Beckens: Basisinformationen zum tieferen Untergrund von Norddeutschland. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 167, 2: 65-106. DOI:<https://doi.org/10.1127/zdgg/2016/0072>
- Paul, J. (2020, im Druck): Paläogeographie und Fazies des Zechsteins. (In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.): *Stratigraphie von Deutschland XI. Zechstein*). Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 89; Berlin (DGGV).
- Paul, J., Heggemann, H., Dittrich, D., Hug-Diegel, N., Huckriede, H., Nitsch, E. & AG Zechstein der SKPT/DSK (2018): Erläuterungen zur Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2016: Die Zechstein Gruppe. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 169, 2: S. 139-145, 1 Tab. DOI:<https://doi.org/10.1127/zdgg/2018/0136>
- Peryt, T.M., Geluk, M.C., Mathiesen, A., Paul, J. & Smith, K. (2010): Zechstein. (In: Doornenbal, J.C. & Stevenson, A.G. (Hrsg.): *Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area*). 123-147; Houten (EAGE Publications b.v.).



- Pollok, L., Hölzner, M. & Fleig, S. (2016): AP2 - Erfassung des Internbaus von Salzstrukturen und geologische 3D-Modellierung. (In: von Goerne, G., Fleig, S., Rokahr, R. B. & Donadai, S. (Hrsg.): Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potenzialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff, Druckluft)). 53-117, 36 Abb., 13 Tab.; Hannover.
- Puff, P. & Radzinski, K.-H. (2013): Der Buntsandstein in der Thüringer Senke. (In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland XI. Buntsandstein). Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 69: 421-448; Stuttgart (Schweizerbart).
- Radzinski, K.-H. (2008): Buntsandstein. (In: Bachmann, G.H., Ehling, B.-C., Eichner, R. & Schwab, M. (Hrsg.): Geologie von Sachsen-Anhalt). 180-200; Stuttgart (Schweizerbart).
- Rappsilber, I., Göthel, M., Köhler, E., Küstermann, W., Lange, W., Malz, A., Obst, K. & Simon, A. (2019): Dr. Hans-Günter Reinhardt (14.5.1929 - 28.5.2018) – Seine Arbeiten im VEB Geophysik Leipzig als Grundlage moderner Untergrundmodelle der nordostdeutschen Bundesländer Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 170, 1: 27-45. DOI:10.1127/zdgg/2019/0185.
- Reichenbach, W. (1970): Die lithologische Gliederung der rezessiven Folgen von Zechstein 2-5 in ihrer Beckenausbildung. Ber. dt. Ges. geol. Wiss., A, Geol., Paläont., 15, 4: 555-563.
- Reinhardt, H.-G. & Gruppe Regionales Kartenwerk (1968-1991): Regionales Kartenwerk der Reflexionsseismik; Tiefenlinienpläne und Mächtigkeitskarten 1 : 100 000, 1 : 200 000, 1 : 500 000. VEB Geophysik Leipzig, unveröff.; Leipzig.
- Reinhold, K. & Hammer, J. (2016): Steinsalzlager in den salinaren Formationen Deutschlands. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften (ZDGG, 167, 2: 167-190. DOI:<https://doi.org/10.1127/zdgg/2016/0067>
- Reinhold, K., Hammer, J. & Pusch, M. (2014): Verbreitung, Zusammensetzung und geologische Lagerungsverhältnisse flach lagernder Steinsalzfolgen in Deutschland: Zwischenbericht. 98 S., 26 Abb., 12 Anl. S.; Hannover (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe).
- Reinhold, K., Krull, P. & Kockel, F. (2008): Salzstrukturen Norddeutschlands. 1 : 500 000, 1 Kt.; Berlin/Hannover.
- Reinkenhausen, F.E.H.e.V. (2009): Schatzsucher - Eine Chronik des Grimmener Erdölbetriebes. 282 S., 158 Abb., 23 Anl.; Greifswald.
- Rockenbach, K., Brauckmann, F., Schäfer, H.-G. & Utermöhlen, S. (1998): "Stacked Reservoirs" im Zechstein 2 Karbonat (Ca₂): Inversionstektonik im prä-Zechstein-salinaren Sockel des Niedersächsischen Beckens (NW-Deutschland). (In: Vorträge der Frühjahrstagung des DGMK-Fachbereichs "Aufsuchung und Gewinnung" am 27. und 28. April 1998 in Celle). DGMK-Tagungsband 9801: 171-181.
- Rogowski, E. & Simon, T. (2005): Salzerkundungsbohrung Stetten (Zollernalbkreis, Baden-Württemberg). LGRB-Informationen, 17: 136-150, 3 Abb.



- Röhling, H.-G. (2013): Der Buntsandstein im Nordeutschen Becken - regionale Besonderheiten. (In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland XI -Buntsandstein). Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 69: 269-384; Stuttgart (Schweizerbart).
- Röhling, H.-G. & Lepper, J. (2013): Paläogeographie des Mitteleuropäischen Beckens während der tiefen Trias. (In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland XI -Buntsandstein.). Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 69: 43-67; Stuttgart (Schweizerbart).
- Röhling, H.-G., Lepper, J., Diehl, M., Dittrich, D., Freudenberger, W., Friedlein, V., Hug-Diegel, N. & Nitsch, E. (2018): Der Buntsandstein in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2016. (In: Menning, M. (Hrsg.): Erläuterungen 2017/18 zur Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2016). Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 169: 151-180; Stuttgart (Schweizerbart).
- Röhling, S. (2000): Der Mittlere Muschelkalk in Bohrungen Norddeutschlands: Fazies, Geochemie, Zyklus- und Sequenzstratigraphie. 184 S.; Halle/Saale (Univers. Halle-Wittenberg, Diss.).
- Roth, H. (1978): Staßfurt-Salinar im Werra-Gebiet. Geol. Jb. Hessen, 106: 117-122.
- Scheck-Wenderoth, M., Krzywiec, P., Zühlke, R., Maystrenko, Y. & Froitzheim, N. (2008): Permian to Cretaceous tectonics. (In: McCann, T. (Hrsg.): The Geology of Central Europe). Bd. 2: 990-1030; London (The Geological Society).
- Schröder, L., Plein, E., Bachmann, G.H., Gast, R. E., Gebhardt, U., Graf, R., Helmuth, H.-J., Pasternak, M., Porth, H. & Süssmuth, S. (1995): Stratigraphische Neugliederung des Rotliegend im Norddeutschen Becken. Geologisches Jahrbuch, A 148: 3-21, 5 Abb., 1 Tab., 7 Taf.
- Schulze, G. (1964): Erste Ergebnisse geologischer Untersuchungsarbeiten im Gebiet der Scholle von Calvörde. Zeitschrift für angewandte Geologie, 10, 7: 338-348.
- Seidel, G. (Hrsg.) (2003): Geologie von Thüringen. 2. neubearb. Aufl.: 601 S., 138 Abb., 34 Tab., 5 Taf. ; Stuttgart (Schweizerbart).
- Seidel, G. (2004): Zur Lage und Entwicklung der Zechsteinbasis in Thüringen. Geowissenschaftliche Mitteilungen von Thüringen, 11: 63-69.
- (2013): Stratigraphie, Fazies und geologische Stellung des Zechsteins und der Trias Thüringens. Beiträge zur Geologie von Thüringen, N.F. 20: 21-78, 27 Abb., 12 Tab.
- SGD - Staatliche Geologische Dienste Deutschlands (2019): Bohrpunktnachweise in Deutschland. Hannover. https://www.infogeo.de/Infogeo/DE/Home/Bohrpunktnachweise/bohrpunktnachweise_node.html. 01.03.2019
- Simon, T. (1988): Geologische und hydrogeologische Ergebnisse der neuen Solebohrung Bad Rappenau, Baden-Württemberg. Jahreshefte des Landesamts für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, 30: 479-510, 7 Abb., 4 Tab.
- Stackebrandt, W. (Hrsg.) (2010): Atlas zur Geologie von Brandenburg, im Maßstab 1:1 000 000. 4. aktualisierte Aufl.: 157 S.; Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg.



- Stackebrandt, W. & Franke, D. (Hrsg.) (2015): Geologie von Brandenburg. XVIII, 805 S.; Stuttgart (Schweizerbart).
- Stollhofen, H., Bachmann, G.H., Barnasch, J., Bayer, U., Beutler, G., Franz, M., Kästner, M., Mutterlose, J., Legler, B. & Radies, D. (2008): Upper Rotliegend to Early Cretaceous basin development. (In: Littke, R., Bayer, U., Gajewski, D. & Nelskamp, S. (Hrsg.): Dynamics of Complex Intracontinental Basins: The Central European Basin System). 181-210; Berlin, Heidelberg (Springer).
- Teichmüller, R. (1957): Ein Querschnitt durch den Südteil des Niederrheinischen Zechsteinbeckens. Geol. Jb., 73: 39-50, 8 Abb., 1 Taf.
- Trusheim, F. (1971): Zur Bildung der Salzlager im Rotliegenden und Mesozoikum Mitteleuropas. Beih. Geol. Jb., 112: 51 S., 10 Abb., 2 Tab., 6 Taf.
- von Goerne, G., Fleig, S., Rokahr, R. B. & Donadai, S. (Hrsg.) (2016a): Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potenzialabschätzung für die Errichtung von Salzkaverne zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff, Druckluft). 203 S.; Hannover.
- von Goerne, G., Gast, S. & Riesenberg, C. (2016b): AP 1 – Erstellung eines Informationssystems über Salzstrukturen sowie von geologischen Niveauschnittkarten. (In: von Goerne, G., Fleig, S., Rokahr, R. B. & Donadai, S. (Hrsg.): Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potenzialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft)). 30-52; Hannover.
- Van Wees, J.-D., Stephenson, R., Ziegler, P., Bayer, U., McCann, T., Dadlez, R., Gaupp, R., Narkiewicz, M., Bitzer, F. & Scheck, M. (2000): On the origin of the southern Permian Basin, Central Europe. Marine and Petroleum Geology, 17, 1: 43-59.
- Wagner, W. (1955): Die tertiären Salzlagerstätten im Oberrheingraben. Z. dt. Geol. Ges., 105: 707-728, 8 Abb., 3 Taf.
- Wolburg, J. (1957a): Ein Querschnitt durch den Nordteil des Niederrheinischen Zechsteinbeckens. Geol. Jb., 73: 1-38, 3 Abb., 2 Taf.
- (1957b): Zur Frage der basalen Fazies des 2. Zechsteinzyklus im Innern des Niederrheinbeckens. Geol. Jb., 73: 165-170, 3 Abb.
- Wolf, R. (1985): Tiefentektonik des linksniederrheinischen Steinkohlengebietes. (In: Drodzdewski, G., Engel, H., Wolf, R. & Wrede, V. (Hrsg.): Beiträge zur Tiefentektonik westdeutscher Steinkohlenlagerstätten). 105-167, 37 Abb., 3 Tab., 9 Taf.; Krefeld (Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen).
- Wrede, V. (2016): Schiefergas und Flözgas - Potenziale und Risiken der Erkundung unkonventioneller Erdgasvorkommen in Nordrhein-Westfalen aus geowissenschaftlicher Sicht. scriptum, 23: 128 S., 42 Abb., 8 Tab.
- Zagora, I. & Zagora, K. (2004): Zechstein. (In: Katzung, G. (Hrsg.): Geologie von Mecklenburg-Vorpommern). 132-139, 2 Abb., 1 Tab.; Stuttgart (Schweizerbart).
- Ziegler, P.A. (1990): Geological Atlas of Western and Central Europe. 2nd and completely revised edition: 239 S., 100 Abb., 2 Tab. 13 Taf. S.; Den Haag (Shell International Petroleum Maatschappi B.V.).



2 Teilprojekt Salz- und Strukturgeologie – Arbeitspaket 2

Flach lagernde Salinar-Formationen:

Untersuchung der Lagerungsverhältnisse und der Eigenschaften von flach lagernden Salinar-Formationen, stofflich-strukturelle Charakterisierung der Salinar-Formationen

Koordinator/in: Dipl.-Geogr. Stephanie Fleig

Bearbeiter: M.Sc.-Geow. Mareike Henneberg

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	2-2
Tabellenverzeichnis.....	2-4
2.1 Einleitung	2-5
2.2 Rotliegendesalinar	2-6
2.2.1 Bisherige Erkundung von Rotliegendesalinar	2-6
2.2.2 Stoffliche Zusammensetzung des flach lagernden Rotliegendesalinales.....	2-8
2.3 Zechsteinsalinar	2-12
2.3.1 Werra-Formation (z1-Folge)	2-12
2.3.2 Staßfurt-Formation (z2-Folge)	2-15
2.4 Triassalinare	2-19
2.4.1 Rötalsalinar	2-19
2.4.2 Muschelkalksalinar	2-21
2.4.3 Keupersalinar	2-23
Literaturverzeichnis.....	2-28

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 2-1:** Probenlokationen der Perm- und Triassalinare, Zechstein-salinarverbreitung nach (Reinhold & Hammer 2016) sowie eine stratigraphische Übersicht über permische und triassische salinarführende Formationen in Norddeutschland 2-5
- Abbildung 2-2:** Salzverbreitung im südlichen Permbecken zum Sedimentationsbeginn der Hannover-Formation (Rotliegend) nach Gast et al. (2010) und zur Zeit der Ablagerung der Staßfurt-Formation (Zechstein) nach Best (1989) 2-7
- Abbildung 2-3:** Korrelation und Vorkommen von Salzlagen in der Elbe-Subgruppe der Bohrungen Boizenburg 1/74, Lübtheen 1Ah4/74 und Parchim 1/68 (verändert nach (Fischer et al. 1977)) 2-9
- Abbildung 2-4:** Makroskopisches Gefüge des flach lagernden Rotliegend-salinars und begleitender Horizonte 2-10
- Abbildung 2-5:** Mikroskopisches Gefüge des flach lagernden Rotliegend-salinars und begleitender Horizonte 2-11
- Abbildung 2-6:** Makroskopische und mikroskopische Gefüge des Salinars der Werra-Formation, Bohrung Friedland 2 2-14
- Abbildung 2-7:** Makroskopische und mikroskopische Gefüge des Salinars der Staßfurt-Formation, Bohrung Barth 1 2-17
- Abbildung 2-8:** Berechneter Mineralbestand [Gew.-%] und Bromidgehalte in Halit [$\mu\text{gBr/gHalit}$] des wasserlöslichen Anteils aus Proben aus dem nordostdeutschen Becken ... 2-18
- Abbildung 2-9:** Verbreitung der Triassalinare nach Reinhold & Hammer (2016)..... 2-19
- Abbildung 2-10:** Makroskopisches Gefüge des Rötalinars der Bohrung Remlingen 5 2-21
- Abbildung 2-11:** Makroskopisches Gefüge des Muschelkalksalinars der Bohrung Remlingen 5 2-23
- Abbildung 2-12:** Makroskopisches Gefüge des Keupersalinars der Salzstruktur Dedesdorf 2-25
- Abbildung 2-13:** Polarisations (A-D)- und Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen (E, F) aus dem Keupersalinar der Struktur Dedesdorf..... 2-26

Abbildung 2-14: Berechneter Mineralbestand und Bromidgehalte in Halit des wasserlöslichen Anteils aus Proben des Keupersalinaras aus der Struktur Dedesdorf 2-27



Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Stratigraphische Gliederung der Schichtenfolge des Oberrotliegenden und des Zechsteins nach (Plein 1995) und (DSK 2016).....	2-8
---------------------	---	------------

2.1 Einleitung

Abseits der mächtigen, im zentralen Norddeutschen Becken vorkommenden Salinarstrukturen, existieren flach lagernde Salzformationen mit teilweise großer, lateraler Verbreitung an den Beckenrändern, die tektonisch nicht oder nur in geringem Maße beeinflusst wurden. Während die Verbreitung der flach lagernden Salinare weitgehend bekannt ist, existieren über die mineralogisch-geochemische Zusammensetzung und stofflichen Eigenschaften einzelner Lagen weniger umfassende Untersuchungen. Dabei kann bei tektonischer Überprägung eine eindeutige stratigraphische Zuordnung der Salinarfolgen oftmals nur durch geochemische und petrographische Merkmale erfolgen.

Durch die lange Sedimentationsperiode und anhaltende Subsidenz im Norddeutschen Becken als epikontinentales Randmeer, bildeten sich insbesondere im Perm und der Trias unter anhaltend ariden Klimabedingungen und eingeschränkter bzw. abwesender Zufuhr von Meerwasser wiederholt mächtige Salinarformationen aus. Nach der Bildung der mächtigen Evaporitfolgen im Oberrotliegend und Zechstein, erfolgten weitere Zyklen der Salinarbildung im Oberen Buntsandstein (Röt-Formation), im Mittleren Muschelkalk und im Keuper der germanischen Trias (Abbildung 2-1).

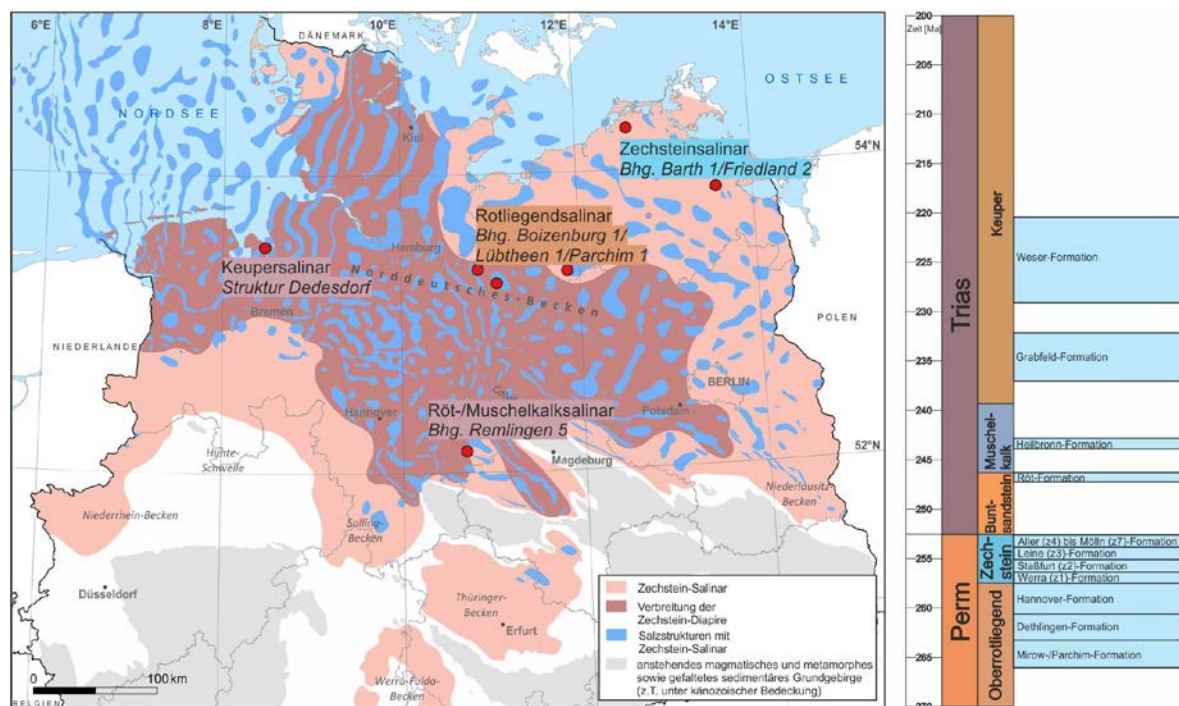


Abbildung 2-1: Probenlokationen der Perm- und Triassalinare, Zechsteinsalinarverbreitung nach (Reinhold & Hammer 2016) sowie eine stratigraphische Übersicht über permische und triassische salinarführende Formationen in Norddeutschland

In den dargestellten Untersuchungen wurden Bohrkernalter verschiedener Salinarfolgen analysiert, um exemplarisch die stofflich-strukturellen Eigenschaften und Charakteristika



der Salinarfolgen zu bewerten. Gegenstand der Untersuchungen waren dabei flach lagerndes, tief liegendes Rotliegendesalinar und Zechsteinsalinar (Werra- und Staßfurt-Formation) aus dem Nordostdeutschen Becken sowie Röt- und Muschelkalksalinar aus dem Nebengebirge der Salinarstruktur Asse und Keupersalinar aus der Randsenke der Salinarstruktur Dedesdorf. Neben der geologischen Bohrkernbearbeitung und makroskopischen Beschreibung wurden mikroskopische Analysen mit dem Polarisationsmikroskop und Rasterelektronenmikroskop sowie Untersuchungen zum Mineralbestand und Bromidgehalt in Halit des wasserlöslichen Gesteinsanteils durchgeführt. Das methodische Vorgehen entspricht dabei den in Kapitel 3.6.1 beschriebenen Analysen.

Aufgrund des zur Verfügung stehenden Untersuchungsmaterials ist insbesondere in den Triassalinaren eine lokale tektonische Überprägung durch die Randlage zu Salinarstrukturen gegeben. Abseits des Gebietes der Salzmobilisierung kann die Ausprägung der Salinarfolgen durch die Beckenrandlage während der Ablagerung sowie durch einen höheren Erhaltungsgrad an primären Schichtungsmerkmalen deutlich von dem hier beschriebenen abweichen.

2.2 Rotliegendesalinar

2.2.1 Bisherige Erkundung von Rotliegendesalinar

Das Rotliegendesalinar wurde im zentralen Teil des südlichen Permbeckens (SPB) (Abbildung 2-2) unter ariden Klimabedingungen während des Oberrotliegenden abgelagert (Gast et al. 2010). Das Beckenzentrum war durch einen kontinentalen Salzsee, die Beckenränder durch mächtige Dünenfelder charakterisiert. Die Sedimentation und die Ausbreitung des Salzsees wurde durch die Klimazyklen des Oberperm sowie tektonische Bewegungen und Meeresspiegelschwankungen gesteuert (Legler 2006). Episodische marine Ingressionen in das ansonsten kontinental geprägte Becken wurden mehrfach anhand von Fossilfunden und isotopengeochemischen Untersuchungen diskutiert (Plumhoff 1966; Gebhardt 1994; Legler 2006).

Erkenntnisse über die Verbreitung und das stoffliche Inventar des flach lagernden Rotliegendesalinar im Ostteil des Norddeutschen Beckens wurden im Rahmen der Kohlenwasserstoff-Exploration auf dem Gebiet der ehemaligen Deutschen Demokratischen Republik im Zeitraum 1962 bis 1990 gewonnen. Die in diesem Zeitraum abgeteufte Tiefbohrungen ermöglichten eine Korrelation der lithostratigraphischen Einheiten des Oberrotliegenden anhand der enthaltenen Salzlagen sowie an den niedersalinaren Einschaltungen, den sogenannten Laminiten. Diese begrenzen die Salzlagen im Hangenden und Liegenden und ersetzen diese lateral (Katzung 1991).

Die Korrelation der salinaren Folgen konnte im Anschluss auch mit dem Rotliegendesalinar in Westdeutschland außerhalb des diapirbildenden Bereiches (siehe Kap. 3) angeschlossen werden. Das flach lagernde Rotliegendesalinar ist z. B. aus der deutschen Nordsee bekannt (Trusheim 1971). Seismische Untersuchungen belegen salinare Einschaltungen, die in einzelne Salzlagen und Tonmittel gegliedert sind. Die Mächtigkeit einzelner Salzlagen erreicht maximal 23 m, im Durchschnitt sind die Salzlagen 2 m bis 4 m mächtig (Best et al. 1982).

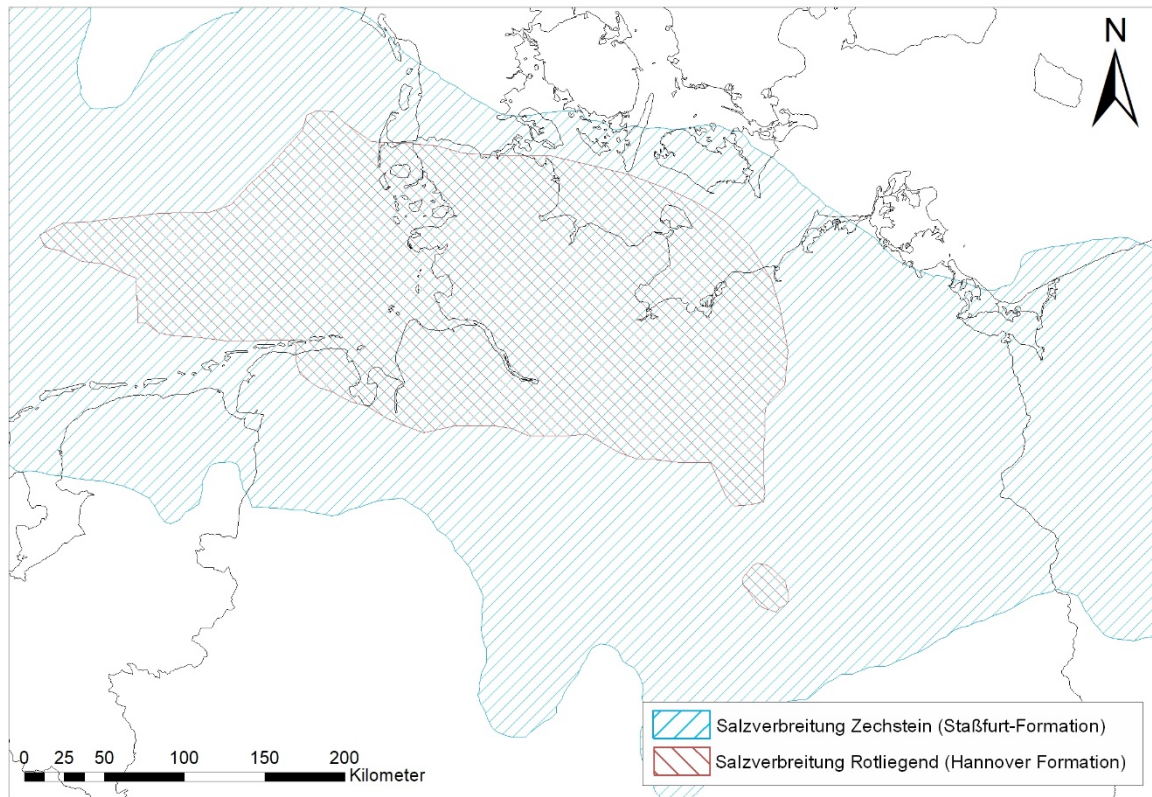


Abbildung 2-2: Salzverbreitung im südlichen Permbecken zum Sedimentationsbeginn der Hannover-Formation (Rotliegend) nach Gast et al. (2010) und zur Zeit der Ablagerung der Staßfurt-Formation (Zechstein) nach Best (1989)

Die Halitbildung erfolgte vorwiegend im obersten Rotliegenden, in der Elbe-Subgruppe, während der Ablagerung der Hannover- und der Dethlingen-Formation noch vor der zeitlich ältesten Zechstein-Formation (Werra-Formation) (Tabelle 2-1). Halitvorkommen in älteren Rotliegendgesteinen einzelner Bohrungen des Nordostdeutschen Beckens belegen den Beginn der Bildung salinärer Einschaltungen bereits während der Ablagerung der Havel-Subgruppe (Plein 1995).

Die salinaren Folgen der Dethlingen-Formation bildeten sich zunächst innerhalb des Bereiches der deutschen Nordsee zwischen Horngraben und der Elbmündung aus (Plein 1995). Die Verbreitung der Salinarfazies weitete sich vom Liegenden zum Hangenden immer weiter aus, sodass sich in der Hannover-Formation auch im Bereich von Mecklenburg und Brandenburg Salzlagen bildeten (Plein 1995). Die Gesteinsabfolge ist charakterisiert durch einen Wechsel von fluviatilen und lakustrin gebildeten Rotsedimenten mit zyklisch eingeschalteten Evaporitfolgen. Dort sind diese aber weniger zahlreich und geringmächtiger ausgebildet als im Bereich der deutschen Nordsee (Katzung 1991). In Bohrungen in Westmecklenburg sind Rotsedimente des Oberrotliegenden über Mächtigkeiten von bis zu 680 m durch zwischengeschaltete Halitlagen, Halitzemente oder Halitnester in Silt- und Tonlagen charakterisiert (Sigener et al. 1974). Im Mecklenburger Raum erreichen die flach lagernden Halitbänke eine Mächtigkeit von bis zu 25 m.

Begleitet werden die Halitbänke von niedersalinaren Horizonten mit wechselnden Gesteinsanteilen von Karbonat, Anhydrit, Halit und Siliziklastika. Das Gefügeinventar dieser Horizonte ist charakterisiert durch eine deutliche Laminierung, zusätzlich sind sie durch helle, violette, graue bzw. grüne Farbgebung deutlich von den Rotsedimenten des Oberrotliegenden zu unterscheiden. Im Gegensatz zu den umgebenden Rotsedimenten, welche unter vorwiegend oxidischen Bedingungen entstanden, wird die Buntfärbung hauptsächlich durch ein lokal reduzierendes Bildungsmilieu verursacht. Teilweise ist sie durch den wechselnden Karbonatgehalt bedingt. Diese beckenweit verfolgbaren Leithorizonte ermöglichen eine stratigraphische Korrelation über mehrere hundert Kilometer (Katzung & Obst 2004).

Die Sedimentation des Rotliegenden endete mit der Zechstein-Transgression und der Ablagerung der marinen Sedimente des basalen Zechsteins im südlichen Permbecken.

Tabelle 2-1: Stratigraphische Gliederung der Schichtenfolge des Oberrotliegenden und des Zechsteins nach (Plein 1995) und (DSK 2016)

Zechstein	Fulda-Formation (z7-Folge)	
	Aller-, Ohre-, Friesland-Formation (z4- – z6-Folge)	
	Leine-Formation (z3-Folge)	
	Staßfurt-Formation (z2-Folge)	
	Werra-Formation (z1-Folge)	
Oberrotliegend II	Elbe-Subgruppe	Hannover-Formation
		Dethlingen-Formation
	Havel-Subgruppe	Mirow-Formation
		Parchim-Formation

2.2.2 Stoffliche Zusammensetzung des flach lagernden Rotliegendensalinars

Im flach lagernden Rotliegendensalinar wurden sowohl Einheiten aus den Salzlagen als auch Proben aus den niedersalinaren Leithorizonten der Hannover-Formation aus Tiefbohrungen des nordostdeutschen Beckens untersucht (Abbildung 2-3).

In den Bohrungen Boizenburg 1/74 und Lübtheen 1Ah4/74 wurden Abschnitte in einem Teufenbereich von 4.310 m bis 4.480 m bearbeitet. Das Probenmaterial der Bohrung Parchim 1/68 umfasst fünf Proben aus dem Teufenbereich von 4.699,5 m bis 4.756,3 m aus den Siltsteinen der oberen Hannover-Formation außerhalb der diskreten Salzlagen, die jeweils Steinsalz einschalten in Form von Halitnestern oder -klüften aufweisen.

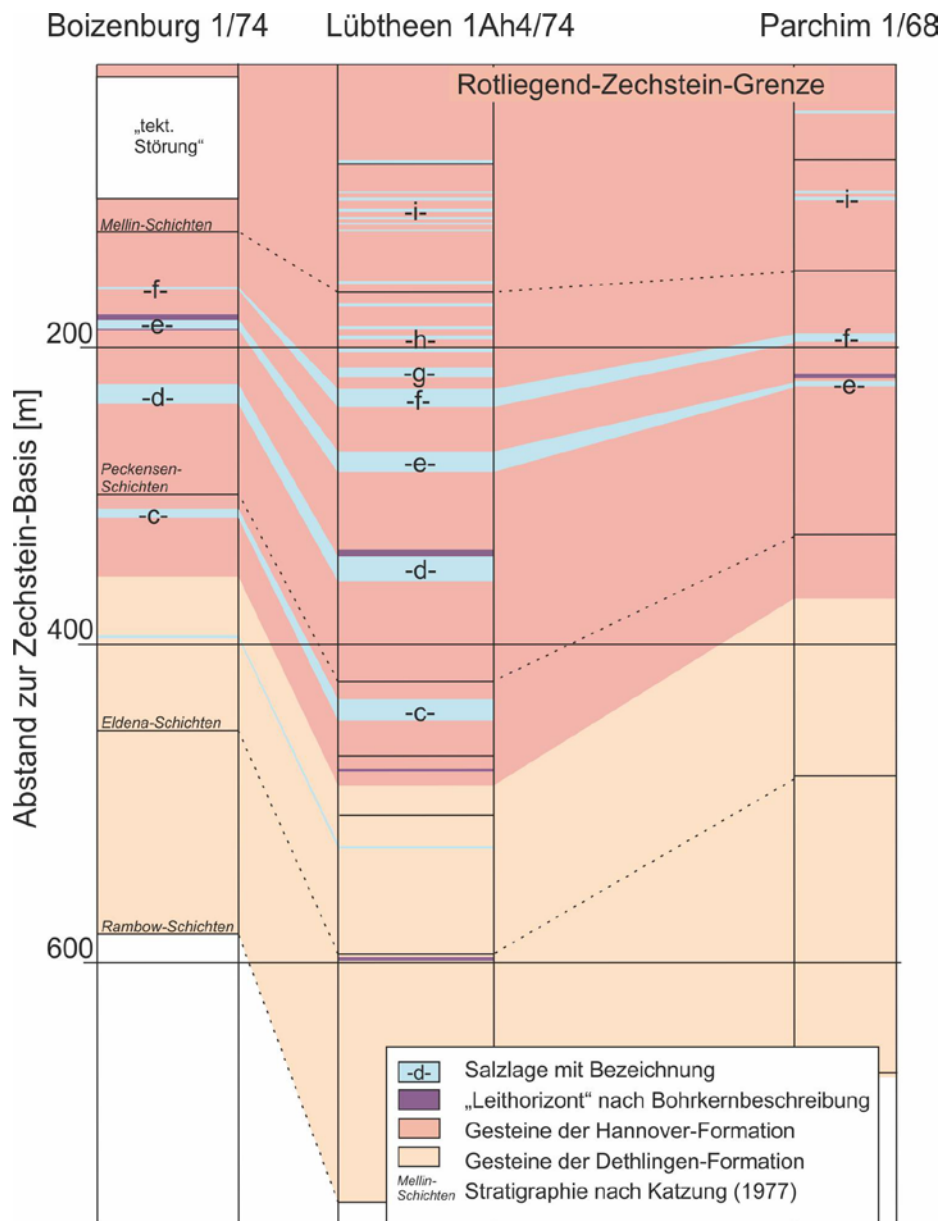


Abbildung 2-3: Korrelation und Vorkommen von Salzlagen in der Elbe-Subgruppe der Bohrungen Boizenburg 1/74, Lübtheen 1Ah4/74 und Parchim 1/68 (verändert nach Fischer et al. (1977)). Stratigraphie verändert nach Schröder et al. (1995).

Die als Salzlagen bezeichneten Einheiten bestehen überwiegend aus Halit mit nur geringen Anteilen, typischerweise wenige Gew.-% an weiteren Komponenten. Wie auch in den Doppelsalinaren variiert die Korngröße des Halits deutlich (vgl. Kap. 3.6). Der Hauptteil des nichthalitischen Gesteinsanteils besteht aus Anhydrit, Karbonat und Siliziklastika. Während der Nebenmineralanteil in der Halitbank d der Bohrung Lübtheen 1Ah4/74 teilweise geringmächtige, stratiforme Lagen ausbildet (Abbildung 2-4 B), ist er in der Halitbank e der Bohrung Boizenburg 1/74 größtenteils dispers in der Halitmatrix verteilt vorhanden.

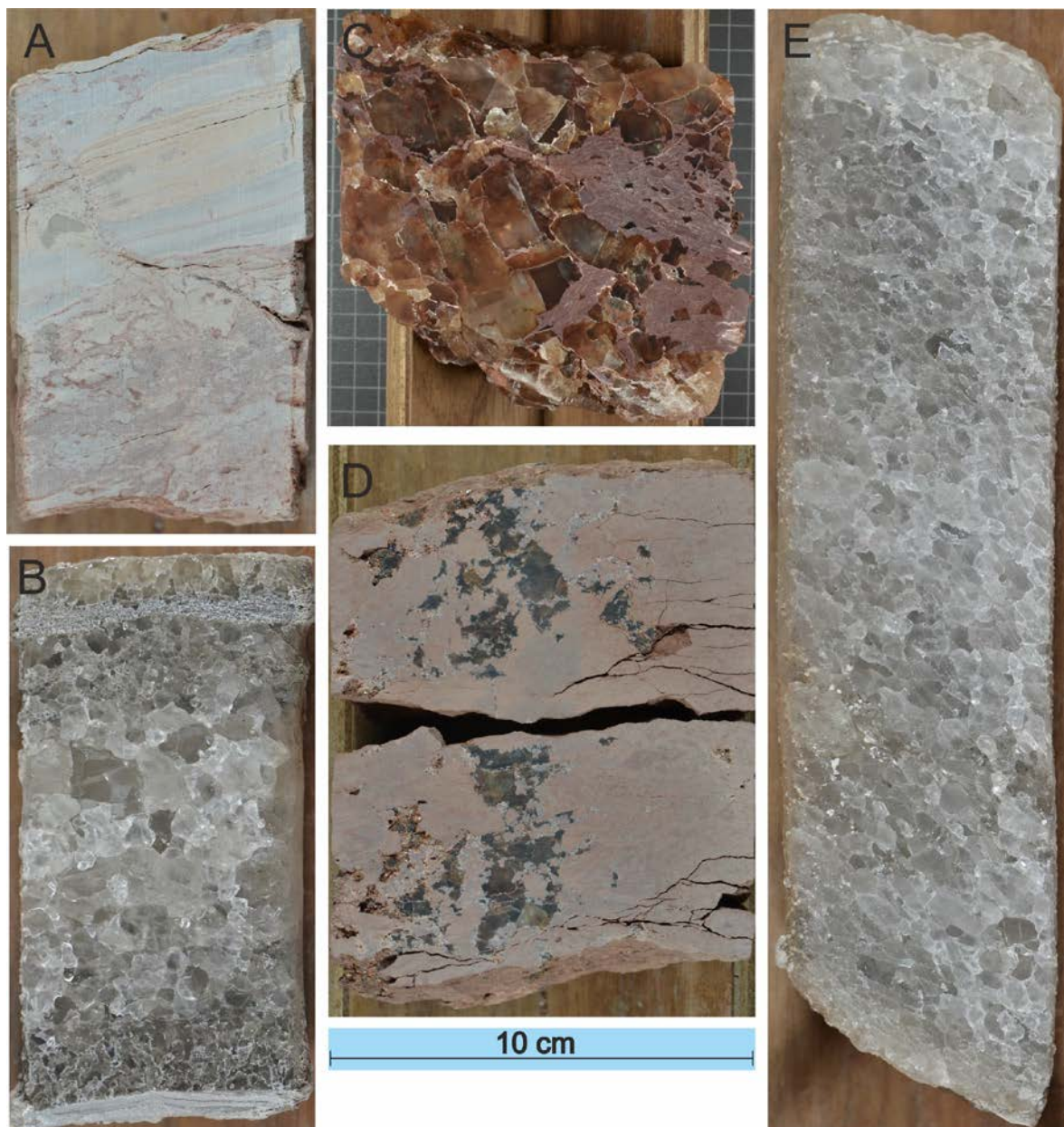


Abbildung 2-4: Makroskopisches Gefüge des flach lagernden Rotliegendesalinares und begleitender Horizonte

A, B: Laminite aus Wechsellagerung von Karbonat, Anhydrit und siliziklastischen Lagen, Bohrung Lübtheen 1Ah4/74

C: Rotliegendesalinar aus grobkörnigem Halit und rotgefärbten siliziklastischen Anteilen, Bohrung Boizenburg 1/74

D: Siltstein mit eingeschalteten Halitnestern, Bohrung Parchim 1/68

E: Rotliegendesalinar aus grauem Steinsalz mit geringem Anhydrit- bzw. Karbonatgehalt, Bohrung Lübtheen 1Ah4/74

Der beprobte Durchgang der Bohrung Lübtheen 1Ah4/74 weist im Gesamtgestein eine graue Eigenfarbe auf, während die Gesteine in der Bohrung Boizenburg vorwiegend violett, mit charakteristischer Bernsteinfarbe der großen Halitkristalle gefärbt sind, womit sie den Gesteinen der Doppelsalinare sowohl im Gefüge, als auch in der Farbgebung sehr ähneln (Abbildung 2-4 C). In beiden Bohrungen bestehen halitreiche Proben mit geringem Nebenmineralanteil fast ausschließlich aus Halitkörnern mit lobaten Korngrenzen, teilweise ist eine leichte Kornformvorzugsorientierung ausgebildet.

In Einzelproben der Bohrung Lübtheen 1Ah4/74 besteht das Gestein fast ausschließlich aus Halit und geringen Anteilen Anhydrit, wodurch das Gestein makroskopisch dem Zechsteinsalinar sehr ähnelt (Abbildung 2-4 E). Anhydrit ist in verschiedenen Ausprägungen über mikrokristallin-xenomorph bis idiomorph-stängelig (Abbildung 2-5 A) ausgebildet, in Wechsellagerung mit siliziklastischem Material kann eine starke Kornformvorzugsorientierung beobachtet werden.

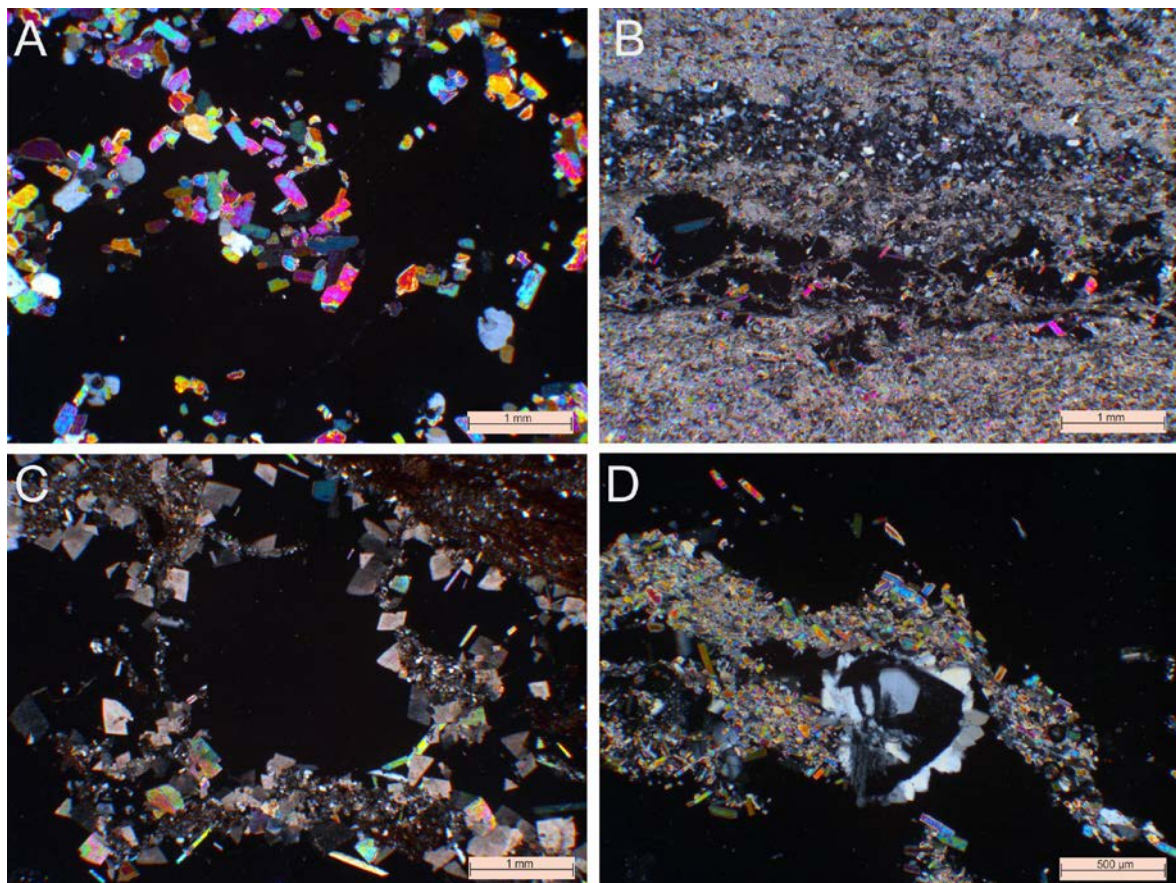


Abbildung 2-5: Mikroskopisches Gefüge des flach lagernden Rotliegendesalinars und begleitender Horizonte

A: Dispers verteilte Anhydritkristalle an Halitkorngrenzen, + Pol

B: Wechsellagerung aus anhydritisch, siliziklastisch und halitisch dominierten, 1-2 mm mächtigen Lagen, + Pol

C: Idiomorphe Karbonat- und Anhydritkristalle an siliziklastischem Gesteinsanteil im Übergang zum Halit

D: Feinkörnige Anhydritlage in Halit mit Chalcedon, + Pol

Weitere Nebenmineralanteile sind Karbonatrhomboeder sowie idiomorphe Quarze, die an der Grenze von Halit zu Nebenmineralen ausgebildet sind. In einzelnen Proben konnte auch Chalcedon beobachtet werden (Abbildung 2-5 D). Die Gesteinsfarbe variiert je nach Zusammensetzung von Nebenmineralanteilen von rötlich über violett nach grau.

Die als Leithorizonte bezeichneten Lagen sind charakterisiert durch eine engständige Wechsellagerung (1 mm bis 1 cm) von anhydritisch bzw. halitisch oder siliziklastisch dominierten Horizonten (Abbildung 2-5 B). Es sind sowohl stratiform laminierte sowie verfaltete als auch Lagen mit lokal geflasertem oder unregelmäßigem Gefüge erhalten. Die lokal unterschiedlich stark ausgebildete Verfaltung deutet auf vermutlich frühdiagenetische Entwässerungsvorgänge hin. Innerhalb dieser Wechsellagerungen können mikroskopisch lokal authigene Quarz- und Anhydritkristalle auftreten.

Außerhalb der Leithorizonte und Halitlagen existieren Haliteinschaltungen in Form von einzelnen bis zu 3 cm-großen Halitkristallen, die ungeordnet im Gefüge des Rotliegend-Siltgesteins vorkommen (Abbildung 2-5 D). Die Haliteinschaltungen in der Bohrung Parchim 1/68 beschränken sich lokal auf nur wenige cm des Gesteins. In diesen Bereichen ist ebenfalls Halit sowie Anhydrit als Zement zwischen den Siltkörnern vorhanden. Ebenso sind lokale Klufbildungen mit halitischer Mineralisation zu beobachten. Ähnlich wie in den Leithorizonten, sind authigene Minerale in den Haliteinschaltungen zu beobachten. Dies betrifft insbesondere die Bildung von rhomboedrischen Karbonaten sowie Anhydrit und Eisenoxiden. Durch die gleichförmige Korngröße der Mineralneubildungen (300-500 μm) sowie die charakteristische, regelmäßige Anordnung an der Phasengrenze von Halit zu detritischen Gesteinsanteilen, kann es sich hierbei um phreatische Zemente handeln (Abbildung 2-5 C).

Generell nimmt in den beiden untersuchten Halitbänken (-d- und -e-) der Anteil von karbonatischen und siliziklastischen Gesteinsanteilen vom Kontakt zum über- oder unterliegenden Leithorizont in das Zentrum der Halitbank ab. Der makroskopisch größte Unterschied in den beiden untersuchten Halitdurchgängen besteht in der Färbung der Nebenmineralbestandteile, die in den Proben der Bohrung Lübtheen 1Ah4/74 von grauem Gestein dominiert wird, während in der Bohrung Boizenburg 1/74 violette Farben vorherrschen. Dies deutet auf Ablagerung der Halitlagen unter unterschiedlichen Redox-Bedingungen hin.

Der Bromidgehalt in allen geochemisch untersuchten Proben beträgt weniger als 10 $\mu\text{g/g}_{\text{Halit}}$ (Abbildung 2-8). Dies spricht für eine Bildung des Halits aus kontinentaler Quelle, analog zu den Bromidgehalten der Halite aus dem diapirischen Rotliegendesalinar (vgl. Kap. 3.6). Dagegen wurde aufgrund der beckenweiten Korrelierbarkeit sowie hoher Anhydritgehalte (Behrendt 1990) bzw. aufgrund mariner Signaturen der Sulfatisotopie der Leithorizonte (Legler 2006) die Herkunft der Leithorizonte und Halitlagen häufig auf marine Ingressionen in das Rotliegendesbecken zurückgeführt. Geringe Bromidgehalte in den Haliten des nordostdeutschen Beckens unter 16 $\mu\text{g/g}_{\text{Halit}}$, die eine marine Herkunft der Halite ausschließen, wurden jedoch auch von Katzung (1991) aus der Bohrung Grevesmühlen 1/78 in der Mecklenburger Senke dokumentiert.

2.3 Zechsteinsalinar

2.3.1 Werra-Formation (z1-Folge)

Während der Ablagerung der Werra-Formation etablierte sich nach der Zechsteintransgression ein vollmarines Epikontinentalbecken mit Ablagerung von Karbonat- und Anhydritsequenzen. Das Vorkommen des flach lagernden Zechsteinsalinars der Werra-Formation

beschränkt sich auf beckenrandliche Lagen im heutigen Niederrhein- und Werra-Fulda-Becken. Geringmächtige bzw. lokal verbreitete Werrasalinare sind auch im Thüringer Becken, im Niederlausitz-Becken und im Fränkischen Becken ausgebildet (Reinhold & Hammer 2016). Ebenso existieren tiefliegende Salinare der Werra-Formation im Nordostdeutschen Becken.

Durch die Evaporitbildung während des Werra-Zyklus kam es zum Ausgleich von morphologischen Unterschieden in den Randbereichen des südpermischen Beckens, was zur Ablagerung von regional unterschiedlich mächtigen Evaporitfolgen führte (Richter-Bernburg 1987). Dies bedingt regionale Faziesänderungen und großen Schwankungen primärer Mächtigkeiten des Werra-Steinsalzes mit regionalen Vorkommen von Kalisalz-Einschaltungen.

Im polnischen Teil des Zechsteinbeckens konnte eine Regionalisierung der Halitpräzipitation in mehreren voneinander getrennten Teilbecken, bedingt durch Horst- und Grabenstrukturen, nachgewiesen werden. So wurden seismisch einzelne Halitkörper in der Abfolge der Werra-Formation detektiert, die durch Anhydritschwellen voneinander getrennt sind. Dies wird auf ein erhaltenes Paläorelief wie auch auf den Einfluss von lokaler Subsidenz zurückgeführt (Dyjański & Peryt 2014).

Innerhalb von Paläo-Hochlagen werden sowohl stark schwankende Mächtigkeiten der Steinsalzlagen sowie die Ausbildung von unterschiedlichen Steinsalz-Fazies beobachtet, die auf unterschiedlich stabile Ablagerungsbedingungen in tieferen Beckenpositionen bzw. flacheren, lagunären Positionen hindeuten (Czapowski 1987).

Die Zergliederung des Ablagerungsraumes durch syndesimentäre Grabenstrukturen bedingt in Deutschland beispielsweise im Niederrhein-Becken Unterschiede in der Tiefenlage und Mächtigkeit der Steinsalzlager über mehrere hundert Meter auf kurzen lateralen Distanzen. Zusätzlich werden geringfügige halokinetische Prozesse und Salzablaugungen als Grund für Mächtigkeitsschwankungen angenommen (Reinhold & Hammer 2016). In den mächtigsten Steinsalzlager der Werra-Formation im Niederrhein- und Werra-Fulda-Becken sind Kaliflöze ausgebildet, die das Steinsalz söhlig aufteilen.

Das untersuchte Steinsalz der Werra-Formation stammt aus der Bohrung Friedland 2 aus dem tief liegenden Zechstein des Nordostdeutschen Beckens. Die Bohrkerne stammen aus einer Teufe von 3.457 – 3.467 m. Die Gesamtmächtigkeit des Werrasalinars beträgt in dieser Position ca. 60 m

Das Gestein ist durch Wechsellagerung von Halit mit dünnen Anhydritlagen, welche zwischen 0,3 cm und 3 cm mächtig sind, charakterisiert (Abbildung 2-6 A-C). Der Abstand der Anhydritlagen variiert in den untersuchten Abschnitten von wenigen mm bis zu 20 cm bei horizontaler Lagerung bis leichter Verfaltung. Zwischen den Anhydritlagen sind grobkörnige Halitkristalle ausgebildet. Das Halitgefüge wird dominiert von cm großen, vorwiegend polygonal ausgebildeten Halitkristallen, die im Maximum Korngrößen von bis zu 8 cm erreichen können. Mittlere Halitkorngrößen im Gefüge betragen zwischen 4 und 8 mm (Nowara 2018). Zwischen engständigen Anhydritlagen sind lokal horizontal elongierte Halitkristalle mit einem durchschnittlichen Achsenlängenverhältnis von 1:3 erhalten (Abbildung 2-6 B). Die Salze sind fluidarm, wobei die Fluide vorwiegend an Halitkorn Grenzen orientiert sind. Dispers innerhalb der Halitkristalle vorkommende Anhydritkristalle (Abbildung 2-6 D) rufen eine milchige Trübung der großen Halitkristalle im Durchlicht hervor (Nowara 2018).

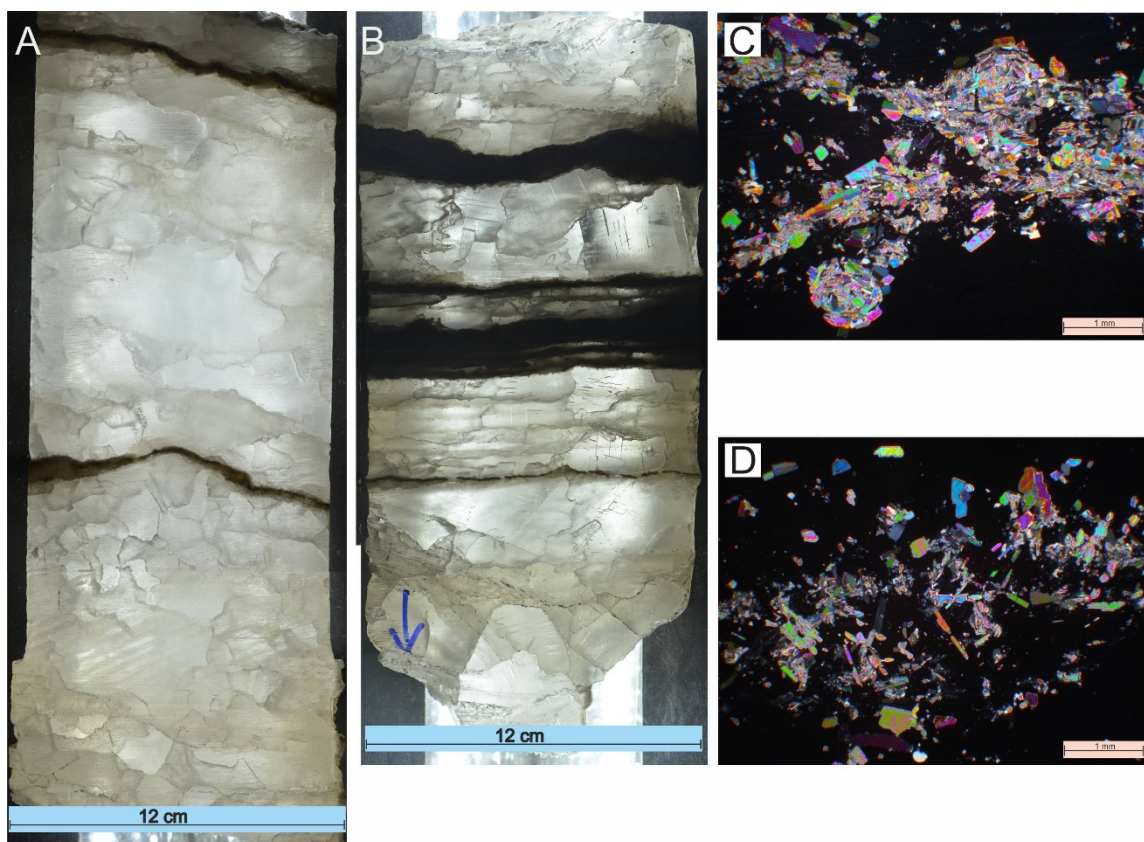


Abbildung 2-6: Makroskopische und mikroskopische Gefüge des Salinars der Werra-Formation, Bohrung Friedland 2

- A, B: Grobkörniges Halitgefüge im Durchlicht mit geringmächtigen Anhydrit-Zwischenlagen**
C: Mikroskopische Aufnahme von Anhydritkristallen innerhalb einer geringmächtigen Anhydritlage, + Pol
D: Mikroskopische Aufnahme von dispers verteilten Anhydritkristallen in Halitmatrix, + Pol

In den untersuchten Sequenzen der Werra-Formation wurden Bromidgehalte von $40 \mu\text{g/g}_{\text{Halit}}$ bis $51 \mu\text{g/g}_{\text{Halit}}$ ermittelt (Abbildung 2-8). Die Werte sind geringfügig niedriger, als es für primäre Präzipitate aus Meerwasser angenommen werden kann (Hardie 1984). Dies spricht dafür, dass sich der Halit aus Meerwasser unter Einfluss von Süßwasser oder durch Teillösung aus einer rezyklierten Meerwasserlösung gebildet hat. Die weitgehend horizontale Lagerung der Anhydritlagen belegt eine Erhaltung des abgelagerten Gesteinsverbandes bis in große Tiefe. Die großen Halitkörner können entweder ablagerungsbedingt erhalten sein oder aber Hinweise auf ein rekristallisiertes, sekundäres Halitgefüge geben.

Im Gegensatz zu den hier untersuchten Gesteinen mit wenigen Verformungsindikatoren zeigt das Steinsalz der Werra-Formation aus dem Fulda-Becken, in der Nähe des Kontaktes zu einer Kalilage, enge Verfaltung feinkörnigen Halitgesteins in Wechsellagerung mit Anhydrit. Dabei wird der Anhydrit von Klüften durchschlagen, welche mit grobkörnigen, idiomorphen Haliten verheilt sind. Die Faltung wird als Resultat von Festigkeitskontrasten zwischen anhydritreichen und -armen Lagen gedeutet (Schléder et al. 2008).

Das Auftreten von sowohl grob- als auch feinkörnigem Halitgestein in der Werra-Formation kann auf die Ausbildung unterschiedlicher Steinsalz-Fazies zurückgeführt werden, die sich in verschiedenen Teilbecken analog zu Czapowski (1987) in flachen, lagunären oder tieferen Beckenumgebungen bildeten. Es ist davon auszugehen, dass sich diese primär unterschiedlichen Ausprägungen auf das geomechanische Verhalten des Werra-Steinsalzes auswirken. Zusätzlich können lokale Mobilisierungsprozesse zu Gefügeveränderungen führen.

2.3.2 Staßfurt-Formation (z2-Folge)

Neben den Salzlagern der Staßfurt-Formation zwischen den diapirischen Salzstrukturen des Norddeutschen Beckens, die durch Salzabwanderung teilweise starke Mächtigkeitsunterschiede aufweisen, ist das Staßfurtsalinar in flacher Lagerung hauptsächlich auf der Calvörde-Scholle, im Thüringer Becken, im Solling-Becken sowie im Nordostdeutschen Becken verbreitet.

Für die Salinare der Staßfurt-Formation (Basissalz z2BS, Staßfurt-Hauptsalz z2HS, Hangendsalz z2HG, Decksteinsalz z2DS) ist eine weite Verbreitung innerhalb des Zechsteinbeckens belegt. In den flach lagernden Vorkommen schwankt die Mächtigkeit aufgrund von regionalen Unterschieden. So ist mit zunehmendem Abstand vom Beckenzentrum sowohl mit einer Zunahme an anhydritischen bzw. karbonatischen und feinklastischen Anteilen zu rechnen sowie mit einer Regionalisierung der Beckenfazies, da die Randgebiete durch Schwellen- und Beckenpositionen paläogeographisch in mehrere Subbecken unterteilt wurden und regional unterschiedliche Fazies aufweisen können.

Auf der Calvörde-Scholle beträgt die Mächtigkeit der Staßfurt-Formation zwischen 100 m und maximal 500 m (Reinhold & Hammer 2016; Schulze 1960). Ähnliche maximale Mächtigkeiten werden im Staßfurtsalinar des Thüringer Beckens erreicht (Seidel 2011). Die Mächtigkeitsunterschiede sind teilweise paläogeographisch bedingt, aber auch auf sekundäre Prozesse wie lokale Salzmobilisierung oder Subrosion zurückzuführen (Radzinski 2008).

Hauptsalz der Staßfurt-Formation wird in den beckenzentralen Diapirstrukturen durch die Verteilung und das Gefüge des Sulfatanteils faziell dreigeteilt: In Knäuelsalz (z2HS1), Streifensalz (z2HS2) und Kristallbrockensalz (z2HS3). Zusätzlich werden die unter höheren Eindunstungsstadien gebildeten hangenden Sequenzen petrographisch in Hangendsalz (z2HG) und Kieseritische Übergangsschichten (z2UE) geteilt (Bornemann et al. 2008). In den Salzlagern von Sachsen-Anhalt wird das Salinar nach dem dominierenden Nebenmineralgehalt in Anhydrit-, Polyhalit- und Kieseritregion unterteilt, wobei die Salze der Polyhalit- und Kieseritregion teilweise als stratigraphisches Analogon zu den Hangendsalzen und Kieseritischen Übergangsschichten des diapirischen Salinares zu sehen sind. Das Steinsalz der Anhydritregion wird durch feinverteilten Anhydrit und Ton sowie diskrete anhydritische Lagen gegliedert und weist eine glasklare, graue, weißgraue oder schwach bräunliche Farbe auf (Radzinski 2008; Schulze 1960). Allen bisher untersuchten Staßfurtsalinarfolgen gemeinsam ist der kontinuierliche Anstieg des Bromidgehaltes in Halit bis zum Kaliflöz Staßfurt (z2SF), über einen Bereich von $60 \mu\text{g}_{\text{Bromid}}/\text{g}_{\text{Halit}}$ bis zu $300 \mu\text{g}_{\text{Bromid}}/\text{g}_{\text{Halit}}$ (Bornemann et al. 2008; Küster et al. 2009; Schulze 1960). Die regionalen Schwankungen der Bromidgehalte lassen darüber hinaus auf ein Wandern der größten Beckentiefe von Süden nach Norden schließen (Radzinski 2008).

Neben den Randbedingungen Temperatur und Umgebungsdruck ist das Verformungsverhalten von polykristallinem Steinsalz abhängig von stofflichen Parametern wie der Korngröße, Anteil und Verteilung fremder Mineralphasen im Gestein und dem vorhandenen Fluidgehalt (Urai et al. 2008).

Aus dem diapirischen Zechsteinsalinar ist eine Streuung der Kriechraten einzelner Lithologien um mehrere Größenordnungen bekannt. So wurde beispielsweise für das Staßfurt-Hauptsalz im Salzstock Gorleben eine Abnahme der Kriechfähigkeit vom Liegenden ins Hangende experimentell nachgewiesen, welche auf die Veränderung der Mikrostruktur von größerem Volumen und geringerer Verteilung zu einem kleineren Volumen aber einer gleichmäßigen Verteilung der Nebenmineralanteile (vorwiegend Anhydrit) zurückgeführt wird. Sie stellen innerhalb des Steinsalzes Hindernisse dar und schränken somit die Kriechfähigkeit ein (Hunsche et al. 2003).

In flach lagernden salinaren Folgen ist von einer inhomogeneren Verformung bei Anwesenheit von diskreten Zwischenlagen auszugehen. Bei experimenteller Verformung von Salzgesteinen mit diskreten Anhydritlagen kommt es im Salzgestein sowie im Umfeld der Anhydritlagen zu Rissbildungen aufgrund des Kompetenzkontrastes zwischen den beiden Materialien. Zwischenlagen aus Tonstein führen experimentell zu einer rheologischen Schwächung des Gesamtgesteins (Liang et al. 2007).

Die untersuchten Bohrkern des flach lagernden Staßfurtsalinar stammen aus der Bohrung Barth 1, an der Nordgrenze des nordostdeutschen Beckens, aus einer Teufe von 2.240 m bis 2.273 m. Das Staßfurtsalinar weist innerhalb der Bohrung eine Gesamtmächtigkeit von 550 m auf. Die untersuchte Sequenz stammt aus dem Kontaktbereich zum Kaliflöz Staßfurt im Hangenden.

Das Gestein umfasst feinkörniges Steinsalz mit verfalteten Polyhalit-Zwischenlagen mit 3 mm bis 3 cm Mächtigkeit im Abstand von 5 cm bis 15 cm (Abbildung 2-7 A, B). Mittlere Korngrößen des Steinsalzes reichen von 1,7 mm bis 3 mm (Nowara 2018). Insbesondere in anhydritfreien Abschnitten ist eine deutliche Kornformvorzugsorientierung der Halitkristalle zu beobachten (Abbildung 2-7 E), ähnlich wie sie aus diapirischem Staßfurt-Steinsalz beschrieben ist (Bornemann et al. 2008). Die Kornform der Halite ist polygonal-interlobat ausgebildet (Abbildung 2-7 D). Darüber hinaus ist im Kontakt zu den Polyhalitlagen die Verfaltung auch durch eine Änderung der Vorzugsorientierung der Halitkörner abgebildet (Abbildung 2-7 A). Fluide im Steinsalz sind vorwiegend als Korngrenzfluide ausgebildet. Vereinzelt können intrakristalline Fluide beobachtet werden, die als Chevronstrukturen ausgebildet sind (Pape et al. 2002). Neben Halit und Polyhalit als Hauptbestandteile enthält das Gestein geringe Mengen an Anhydrit (ca. 1-2 Gew.-%) sowie Magnesit innerhalb der Polyhalitlagen. Anhydrit und Polyhalit kommen auch außerhalb der Polyhalitlagen an Halitkorngrenzen vor (Abbildung 2-7 C,D). Die ermittelten Bromidgehalte in Halit betragen zwischen $226 \mu\text{g/g}_{\text{Halit}}$ und $283 \mu\text{g/g}_{\text{Halit}}$ (Abbildung 2-8) und liegen somit höher als die durchschnittlich im Hauptsalz der Staßfurt-Formation ermittelten Bromidgehalte (Küster et al. 2009). Die Anwesenheit von Polyhalit als Hauptbestandteil der Zwischenlagen neben Halit belegt eine Genese des Gesteins unter höheren Eindunstungsgraden, was mit den hohen Bromidgehalten in Halit korreliert.

Die Kornformvorzugsorientierung sowie die Verfaltung der Polyhalitlagen stellen Verformungsindikatoren dar, die ein Hinweis auf synsedimentäre Mineralumwandlungen und damit verbundene Gefügeveränderung sowie auf laterale Mobilisierung der Steinsalzfolgen sein können.

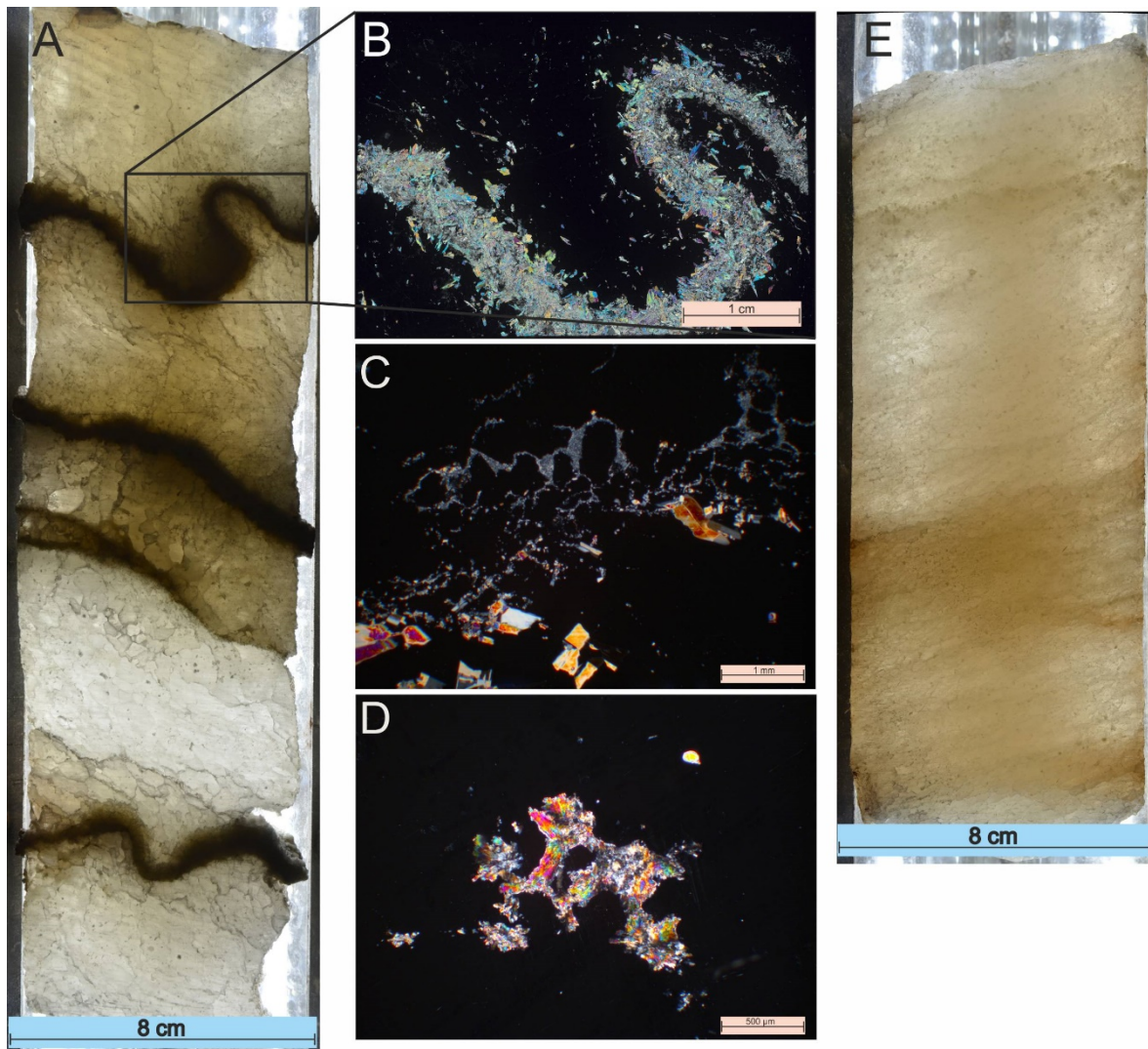


Abbildung 2-7: Makroskopische und mikroskopische Gefüge des Salinares der Staßfurt-Formation, Bohrung Barth 1

A: Halitgefüge mit Kornformvorzugsorientierung und verfalteten Polyhalitlagen im Durchlicht

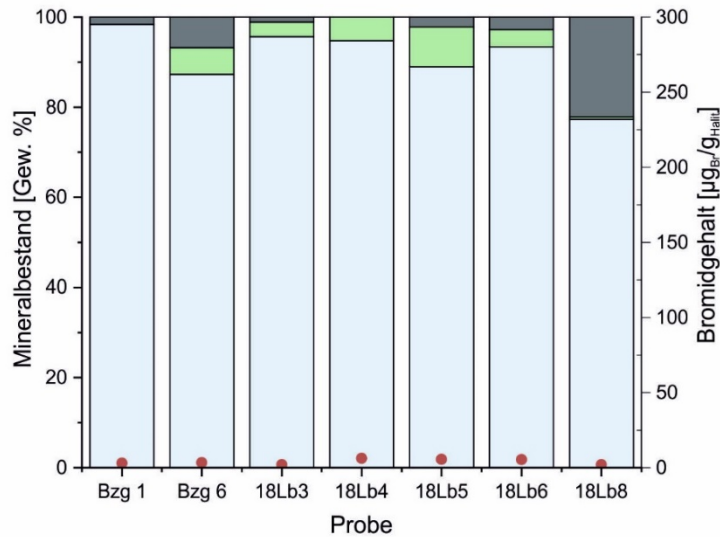
B: Aufnahme des Gefüges der Polyhalit-Zwischenlage, + Pol

C: Mikroskopische Aufnahme des Polyhalitgefüges außerhalb der Polyhalitlagen, + Pol

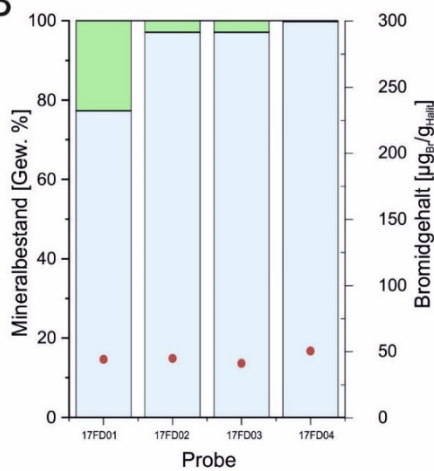
D: Mikroskopische Aufnahme von Anhydritkristallen in Halit, + Pol

E: Halitgefüge mit moderater Kornformvorzugsorientierung im Durchlicht

A



B



C

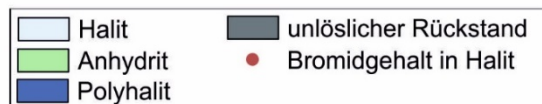
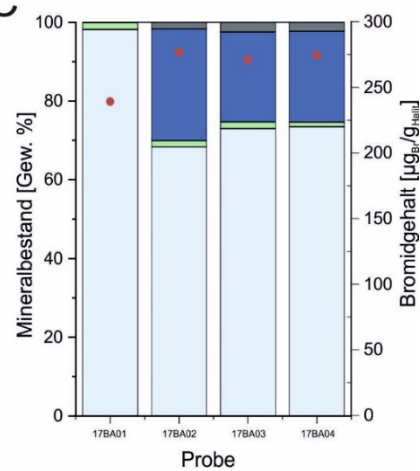


Abbildung 2-8: Berechneter Mineralbestand [Gew.-%] und Bromidgehalte in Halit [$\mu\text{gBr/gHalit}$] des wasserlöslichen Anteils aus Proben aus dem nordostdeutschen Becken

A: flach lagerndes Rotliegendesalinar, B: Werra-Formation (Zechsteinsalinar), C: Staßfurt-Formation (Zechsteinsalinar)

2.4 Triassalinare

Während die Salzbildung im epikontinentalen Norddeutschen Becken während des Zechsteins durch Meerwasserzuflüsse von Norden gesteuert wurde, entwickelte sich ab dem mittleren Buntsandstein episodisch eine Verbindung vom Norddeutschen Becken über die Ostkarpatenpforte nach Süden zur marinen Thetys (Beutler & Szulc 1999; McKie & Williams 2009).

Die anhaltende Extensionstektonik während der Trias führte zu einer weiteren Regionalisierung des südlichen Permischen Beckens durch Aktivität von Störungen und Grabenbildung (Geluk 2005). Die episodische Verbindung zum Ozean sowie die Aufteilung in mehrere Teilbecken begünstigte die Bildung von salinaren Folgen großer lateraler Verbreitung in allen drei Abschnitten der Germanischen Trias (Abbildung 2-9). Die Verbreitung sowie die stratigraphisch-fazielle Ausbildung der Salinarformationen wurde neben den oben genannten äußeren Faktoren auch von der jeweiligen paläogeographischen Situation im Norddeutschen Becken bestimmt.

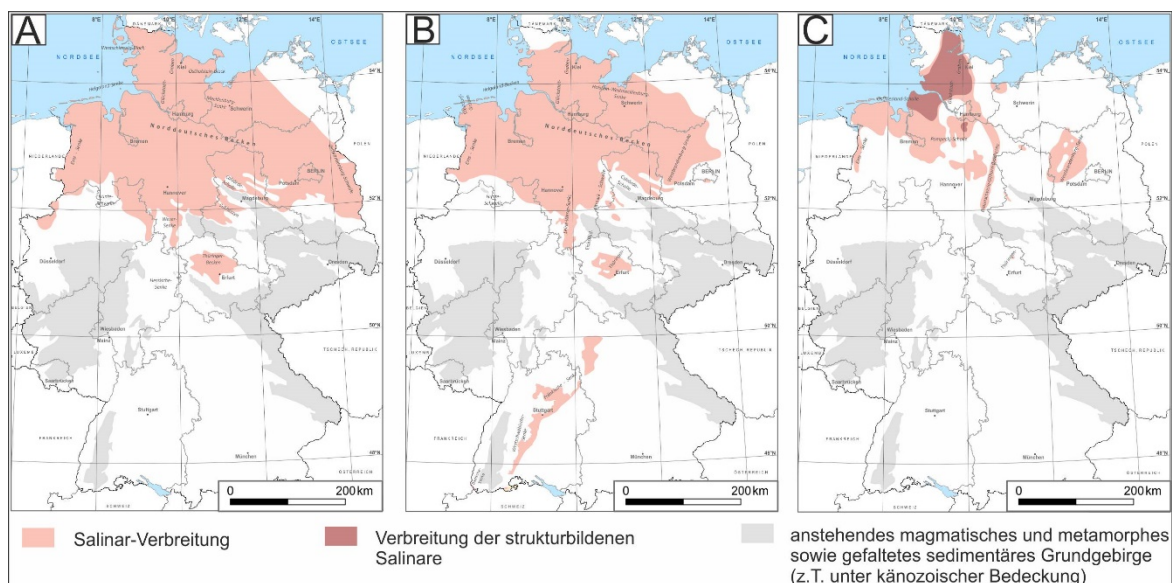


Abbildung 2-9: Verbreitung der Triassalinare nach Reinhold & Hammer (2016)

A: Rötalinare, B: Muschelkalksalinare, C: Keupersalinare

2.4.1 Rötalinare

Der evaporitisch geprägte Ablagerungsraum der Röt-Formation im Oberen Buntsandstein hatte eine ähnliche Ausdehnung wie das marine Zechsteinbecken (Paul 2006, Abbildung 2-9 A). Während der Bildung des Rötalinars lag das Beckenzentrum in Norddeutschland, wobei die Salzverbreitung bis in die Niederlande, die südliche Nordsee und Teile von Polen reicht (Bachmann et al. 2010). Die Einbettung der evaporitischen Sedimente des Röt erfolgte in Rotsedimente, die unter hauptsächlich oxidierenden Bedingungen gebildet wurden. Bromidgehalte von $40 \mu\text{g/g}_{\text{Halit}}$ bis $180 \mu\text{g/g}_{\text{Halit}}$ belegen eine marine Herkunft des Rötalinars (Holser & Wilgus 1981; Kovalevych et al. 2002).

Das Salinar der Vitzenburg-Subformation (Unteres Rötsalinar) erreicht Mächtigkeiten über 100 m und ist über das gesamte Norddeutsche Becken verfolgbar. Die Ablagerung der Salinarformation erfolgt über dem bis zu 6 m mächtigen Röt-Basisanhydrit und schließt mit dem Deckanhydrit ab (Röhling 2013).

Das Steinsalz wird durch drei horizontbeständige Zwischenmittel aus Anhydrit und Tonstein voneinander getrennt. Diese treten vorwiegend im hangenden Teil der Steinsalzfolge auf. Mit zunehmendem Abstand vom Beckenzentrum nimmt die Mächtigkeit der Halitfolgen ab, am Beckenrand werden diese durch Anhydrite vertreten, während die tonigen Zwischenmittel noch über die Halitverbreitung hinaus horizontbeständig sind (Röhling 2013).

Das Salinar der Glockenseck-Subformation (Oberes Rötsalinar) ist durch die bis 35 m mächtige, siliziklastisch-karbonatische Göschwitz-Subformation vom Unteren Rötsalinar getrennt. Wie im Unteren Rötsalinar wird die Halitfolge durch einen Basis- und Deckanhydrit begrenzt (Röhling 2013). Das Obere Rötsalinar ist geringmächtiger (etwa 10-20 m Mächtigkeit) und ist weniger verbreitet. Während das Untere Rötsalinar bis in die Hessische und Thüringer Senke und im nördlichen Teil der Eichsfeld-Schwelle ausgebildet ist, existiert das Obere Rötsalinar nur in Norddeutschland (Paul 2002).

Ebenso weist der Halit des Oberen Rötsalinales höhere Bromidgehalte auf als der des Unteren Rötsalinales, was vermutlich auf höhere Eindunstungsgrade zurückzuführen ist. Die sequenzstratigraphische Zuordnung der Salinare innerhalb des Ablagerungsraumes ist allerdings nicht eindeutig zu treffen (Paul 2002).

Das Rötsalinar der Niederlande umfasst bis zu vier Salzlagen (Kovalevych et al. 2002; Langer 1984). Die Mächtigkeiten betragen zwischen wenigen Metern bis zu 50 Metern. Zwischenlagen bestehen aus Tonstein, Anhydriten und Polyhalit. In Polen existieren die Salzlagen in Wechsellagerung mit Anhydrit und Dolomit. In Südpolen bildeten sich flachmarine Kalke und Dolomite, was dahingehend gedeutet wird, dass der Hauptzustrom in das Becken über die Schlesisch-Mährische Pforte bzw. über die Ostkarpaten Pforte erfolgte (Beutler & Szulc 1999; Bachmann et al. 2010).

Die Rötsalinare sind in Norddeutschland durch den Salzaufstieg und die Bildung von Zechsteinsalinarstrukturen regional tektonisch beeinflusst. Dabei kommt es unter anderem in invertierten und eingeengten Beckenbereichen zur Intrusion von Zechsteinsalzen in die flach lagernden Rötsalze unter Bildung von Salzkeilen.

Das Rötsalinar ist ein grob- bis mittelkörniges Steinsalz mit unterschiedlichem Grad an Anhydriteinlagerung in Form von Linsen und Zwischenlagen (Langer 1984; Röhling 2013). In Kriechversuchen aus dem Rötsalinar in Hengelo (Niederlande) wurden im Vergleich zum Zechsteinsalinar doppelt- bis dreifach höhere Kriechraten bei ähnlichen Langzeitfestigkeiten ermittelt (Langer 1984).

Das Rötsalinar der Bohrung Remlingen 5 im Subherzynen Becken zeigt eine große Variationsbreite der Gefüge und weist sowohl konkordante Schichtung von Anhydrit- und Halitlagen auf als auch ungeordnete Verteilung von bis zu faustgroßen Anhydritknollen. Der Halit ist rötlich und gelblich bis grau gefärbt (Abbildung 2-10). Besonders in feinkristallinen Lagen ist eine Schichtung über Kornformvorzugsorientierung und Kristallaugen ausgebildet. Der Nebenmineralbestandteil besteht vorwiegend aus feinkristallinem Anhydrit sowie feinkristallinem Magnesit und Tonmineralen. Lokal ist ebenso diagenetisch Dolomit am Übergang von Halit und Anhydrit vorhanden.

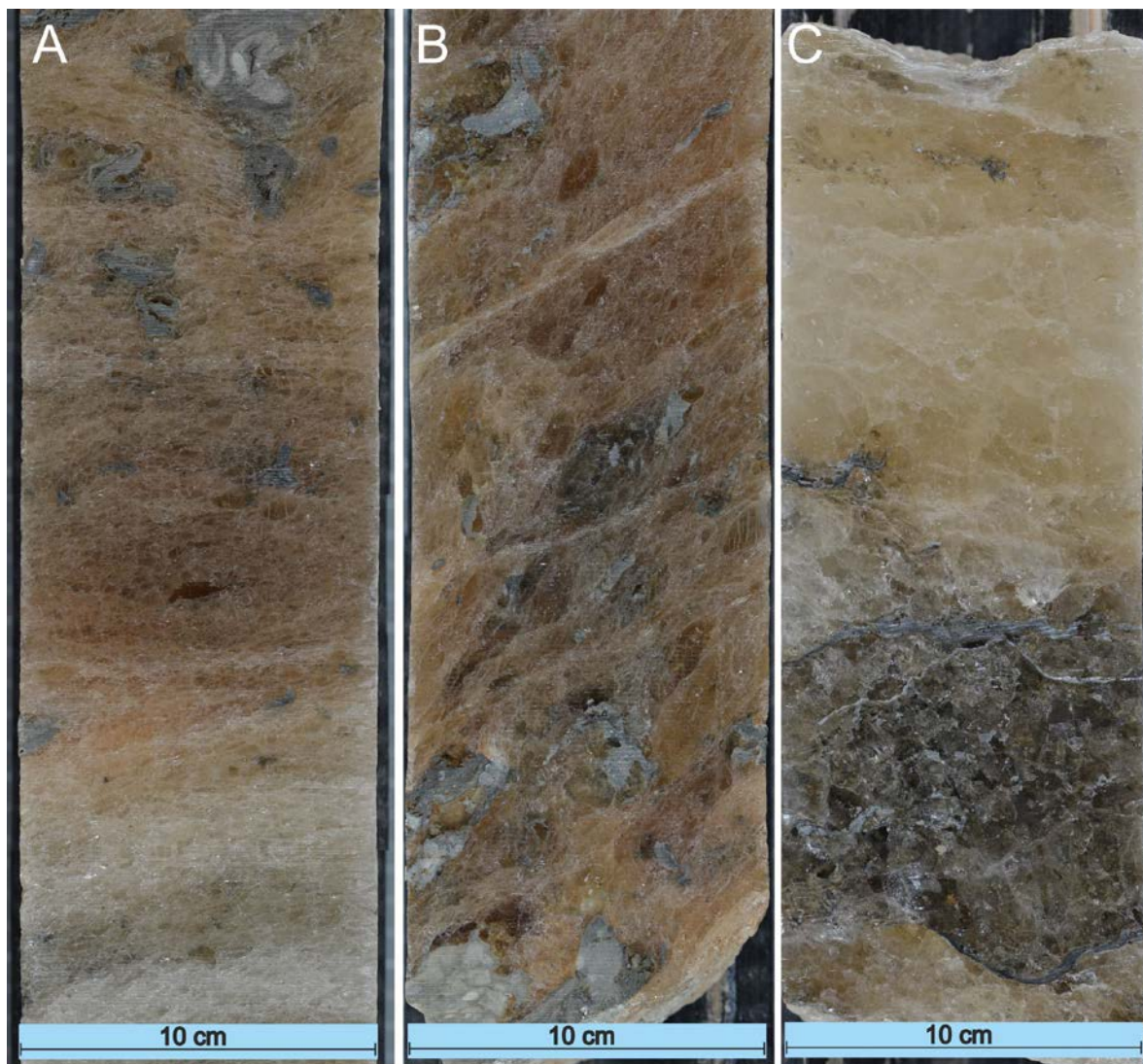


Abbildung 2-10: Makroskopisches Gefüge des Rötalinars der Bohrung Remlingen 5

A: Weißes bis rötliches mikrokristallines Steinsalz mit Anhydritknäueln, leichte Vorzugsorientierung der Halitkristalle zeigt söhlige Lagerung an

B: Mittel- bis grobkörniges, rötliches Steinsalz mit Anhydritflatschen und angedeuteten Bruchstrukturen

C: Mittel- bis grobkörniges, gelbliches Steinsalz mit anhydritisch-karbonatischen Einlagerungen im unteren Teil

2.4.2 Muschelkalksalinar

Nach der Transgression aus der Thetys im Unteren Muschelkalk führte im Mittleren Muschelkalk eine Regressionsphase zur Bildung von Evaporiten in Deutschland und Teilen von Polen. Im Gegensatz zur Verbreitung des Steinsalzes im Zechstein und Röt ist die Verbreitung des Muschelkalksalinars in der Heilbronn-Formation des mittleren Muschelkalks nicht ausschließlich auf das Norddeutsche Becken beschränkt, sondern ist über das heutige Baden-Württemberg bis in die Nordschweiz verbreitet (Abbildung 2-9 B). Bedingt

2 Teilprojekt Salz- und Strukturgeologie – Arbeitspaket 2

durch Ablaugungsprozesse wird die Steinsalzfolge im süddeutschen Raum häufig durch Residualgesteine (Mergel- und Sulfatgesteine) ersetzt. Nach Norden reichte der marine Einfluss bis nach Ostbrandenburg und ins nordwestliche Polen.

Die primäre Mächtigkeit des Muschelkalksalinares schwankt innerhalb des Norddeutschen Beckens bedingt durch triassisch angelegte, regionale Strukturräume. Die Ablagerung des Steinsalzes folgt mit scharfer Grenze im Wechsel mit Sulfat- und Karbonatgesteinen (Simon 1999).

Beckenweit lässt sich der Mittlere Muschelkalk in 9 Sedimentationszyklen unterteilen, die sich in ihrer lithologischen Ausbildung und Mächtigkeit innerhalb des Beckens unterscheiden. Die Zyklen 2 bis 5 können jeweils am Top des Zyklus Steinsalz umfassen. Davon ist das Steinsalz der Zyklen 3 und 4 am weitesten verbreitet. Zyklus 3 weist die mächtigsten Steinsalzfolgen auf. Bedingt durch den zyklischen Aufbau sind einzelne Steinsalzlager durch geringmächtige Anhydrit-Zwischenmittel voneinander getrennt, die sich geophysikalisch gut abbilden lassen. In Grabenstrukturen werden höhere Mächtigkeiten der Heilbronn-Formation beobachtet. So sind in der Bohrung Westdorf 2A in Ostfriesland sechs halitführende Folgen beschrieben, die eine Gesamtmächtigkeit des Steinsalzes von 416 m aufweisen (Röhling 2000).

Das Muschelkalksalinar im süddeutschen Raum weist als Besonderheit eine Senkrechstreifung aus Reinsalzlagen ohne makroskopisch erkennbare Verunreinigungen und bis zu 10 cm breite Streifen aus dunklen ton- und anhydrithaltigen Lagen auf. Des Weiteren finden sich an der Steinsalzbasis Mulden- und Buckelstrukturen im liegenden Anhydritgestein, im Ausmaß von mehreren Metern bis Zehnermetern. Diese Strukturen werden auf diagenetische Vorgänge im Zusammenhang mit Lösungsprozessen (Schachl 1952) oder auf tektonische Vorgänge nach der Sedimentation (Brunner et al. 1986) zurückgeführt. Im Raum Heilbronn weist der Halit des Mittleren Muschelkalks Bromidgehalte zwischen $3 \mu\text{g}/\text{g}_{\text{Halit}}$ und $73 \mu\text{g}/\text{g}_{\text{Halit}}$ auf, was auf eine vorwiegend sekundäre Bildung des Halits hindeutet (Fischbeck et al. 2005).

Das Muschelkalksalinar der Bohrung Remlingen 5 im Subherzynyen Becken ist über ein Teufenintervall von 57 m ausgebildet, wobei vier Anhydritmittel mit einer Mächtigkeit von 0,7-2 m zwischengeschaltet sind. Innerhalb des Salinares kommen diskrete Anhydritlinien bis ca. 1 cm Mächtigkeit vor, in einzelnen Fällen werden diese bis zu 5 cm mächtig. Das Steinsalz zwischen den Anhydritlinien weist vertikal elongierte Kristalle auf (Palisadenstruktur) und daher auf einen primären Ursprung des Gefüges hin (Röhling 2000). Durch die Aufschleppung des Salzlagers am Rand der Salzstruktur Asse beträgt das Schichteinfallen ca. $30-45^\circ$ (Abbildung 2-11). Daneben existieren im Salinar Bereiche ohne eindeutige Schichtungsmerkmale, mit scharf vom Halit abgegrenzten Anhydritkonkretionen. Ähnlich wie im Rötosalinar besteht der Großteil des nichthalitischen Anteils aus Anhydrit mit geringen Anteilen von dolomitischem Karbonat und Tonmineralen.

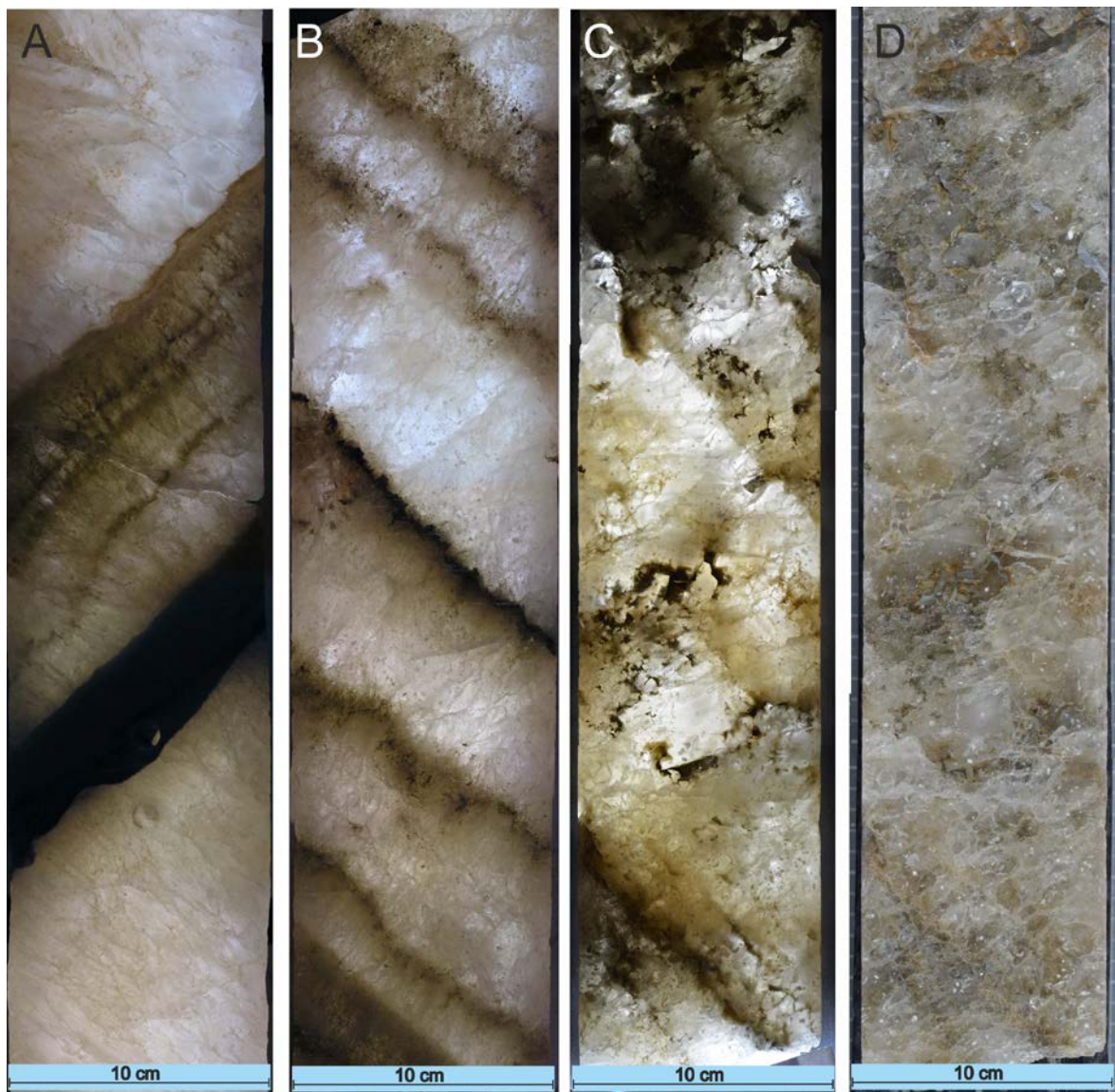


Abbildung 2-11: Makroskopisches Gefüge des Muschelkalksalinares der Bohrung Remlingen 5

A: Anhydritlagen bis 5 cm Mächtigkeit mit senkrecht dazu angeordneten Steinsalzkristallen (Palisadenstrukturen) im Durchlicht

B: Steinsalz mit Palisadenstrukturen und geringmächtigen Anhydritzwischenlagen im Durchlicht

C: Grobkörniges Steinsalz mit Anhydrit- und Tonflatschen im Durchlicht

D: Ausschnitt C unter Auflicht

2.4.3 Keupersalinar

Der Übergang vom Muschelkalk in den Unteren Keuper war charakterisiert durch eine Zunahme des Süßwassereintrags sowie der Sedimentfracht von Norden in das Norddeutsche Becken. Daraus folgte eine Verringerung des Meerwasser-Salzgehaltes sowie eine Unter-

drückung der karbonatischen Sedimentation (Beutler & Szulc 1999) bei ähnlicher Beckenkonfiguration wie im Muschelkalk. Bedingt durch eine klimatische Erwärmung und die tektonische Entwicklung mit Ausbildung von Riftzonen kam es im Mittleren Keuper zu einer erneuten Regression mit Sedimentation von bis zu acht Steinsalzlager im sogenannten Gipskeuper der Grabfeld- und Weser-Formation. Diese lagerten sich in einem vorwiegend lakustrinen Sedimentationsraum, im Wechsel mit Tonsteinen, Mergeln und Dolomiten ab (Beutler et al. 1999).

Die salinaren Folgen des Keupers sind als Beckenfazies in Zyklen aus grauen und bunten Tonsteinen, mit unterschiedlichem Dolomitgehalt, Knollengips und Steinsalz ausgebildet. Steinsalz kommt sowohl kristallin mit grauer bis rötlicher Farbe sowie dispers in Tonstein vor (Barnasch 2009). In der Grabfeld-Formation von Nordwestdeutschland konnten fünf Steinsalzlager (A-E) nachgewiesen werden, die sich stratigraphisch lateral korrelieren lassen. Während es sich bei Steinsalzlager A und B um 1-3 m mächtige Salzeinschaltungen in eine Wechsellagerung aus Tonstein und Anhydrit handelt, erreicht das Steinsalzlager C Mächtigkeiten von bis zu 10 m; die Steinsalzlager D und E jeweils 35 m, mit geringmächtigen Zwischenlagen (Beutler 1995). Begleitende Tonsteine weisen Knollenanhydrit mit einem Gehalt von 10-15 % am Gesamtgestein auf. Innerhalb der Salzlagen sind keine weiteren Sulfatabscheidungen ausgebildet. Dagegen sind in der südlichen Beckenfazies der Grabfeld-Formation, Sulfatgesteine in Form von mehreren Meter mächtigen Plattengipsen, in Wechsellagerung mit Tongestein, stark vertreten (Beutler et al. 1999).

Während der Ablagerung der Weser-Formation bildeten sich drei weitere Steinsalzlager (F-H). Das Steinsalzlager F stellt eine ca. 40 m mächtige, ungegliederte Steinsalzlager am Fuß der Weser-Formation dar. Während das Steinsalzlager G nur geringe Mächtigkeiten von bis zu 5 m aufweist, handelt es sich beim Lager H um die mächtigste Steinsalzlager, mit Mächtigkeiten von mehreren hundert Metern, ohne geregelte Einschaltungen von Anhydrit und Tonstein (Beutler et al. 1999).

Charakteristisch ist für das Keupersalinar die starke Konzentration der Halitführung auf einzelne Beckendepozentren, mit Mächtigkeiten der Salzlagen von mehreren hundert Metern. Diese finden sich vor allem in Grabenstrukturen, insbesondere der Ems-Senke, dem Glückstadtgraben, der Braunschweig-Gifhorn-Bruchzone und der Westbrandenburg-Senke (Abbildung 2-9 C). Insbesondere im Glückstadt-Graben sowie dem Unterelbe-Raum ist die Ablagerung von mächtigen Keupersalzen häufig an die Randsenkenbildung von Zechsteinsalzstrukturen gekoppelt, was zur Bildung von Keupersalzkissen mit deutlich über 1.000 m Salzmächtigkeit führte.

Ein direkter mariner Einfluss auf die Salzbildung ist nicht nachweisbar. Dagegen wird eine Zufuhr von Salzlösungen marinen Ursprungs aus Zechstein-Diapiren unter Bildung von sekundären keuperzeitlichen Salzen diskutiert (Trusheim 1971; Fürer & Heinke 1984).

Die stofflichen Untersuchungen am Keupersalinar wurden an Bohrkernen aus der Randsenke der Salzdiapirs Dedesdorf durchgeführt. Entlang der Westflanke kommen mächtige Randsenkenfüllungen mit Keupersalinar vor, welches bis in eine Teufe von 1.500 m in Bohrungen erteuft wurde (Fürer & Heinke 1984). Eine keuperzeitliche Einordnung konnte mittels palynologischer Untersuchungen vorgenommen werden.

Das Keuper-Steinsalz erreicht Mächtigkeiten von über 1.000 m. Durch Salzaufstiegsbewegungen der Struktur Dedesdorf im Lias kam es zu einer Vertiefung der sekundären Randsenke mit gleichzeitiger Überhangbildung des Zechsteinsalzes, sodass das Zechsteinsalinar über dem Keupersalinar liegt (Fürer & Heinke 1984).

Das Keupersalinar ist als mittel- bis grobkristallines, wasserklares bis milchig trübes Steinsalz ausgebildet, das einen geringen Tongehalt in Form von braunroten bis grauen Fetzen und Flatschen in Kornzwickeln, selten als Konkretion aufweist (Abbildung 2-12 A, B). Das Halitgefüge ist makroskopisch aus wenigen, mehrere cm großen Halitkristallen aufgebaut, die mittlere Korngröße beträgt 0,4 cm bis 2 cm. Das Gefüge tritt sowohl unregelmäßig als auch mit deutlicher Kornformvorzugsorientierung der großen Halitkristalle auf. Das Kornachsenlängenverhältnis kann an dieser Stelle bis 1:6 betragen (Abbildung 2-13 C). Darüber hinaus sind über einzelne Kernstrecken Halitkristalle von bis zu 10 cm Durchmesser, mit teilweise geraden Korngrenzen ausgebildet (Abbildung 2-12 D), die möglicherweise sekundär als Kluftmineralisation gebildet wurden.

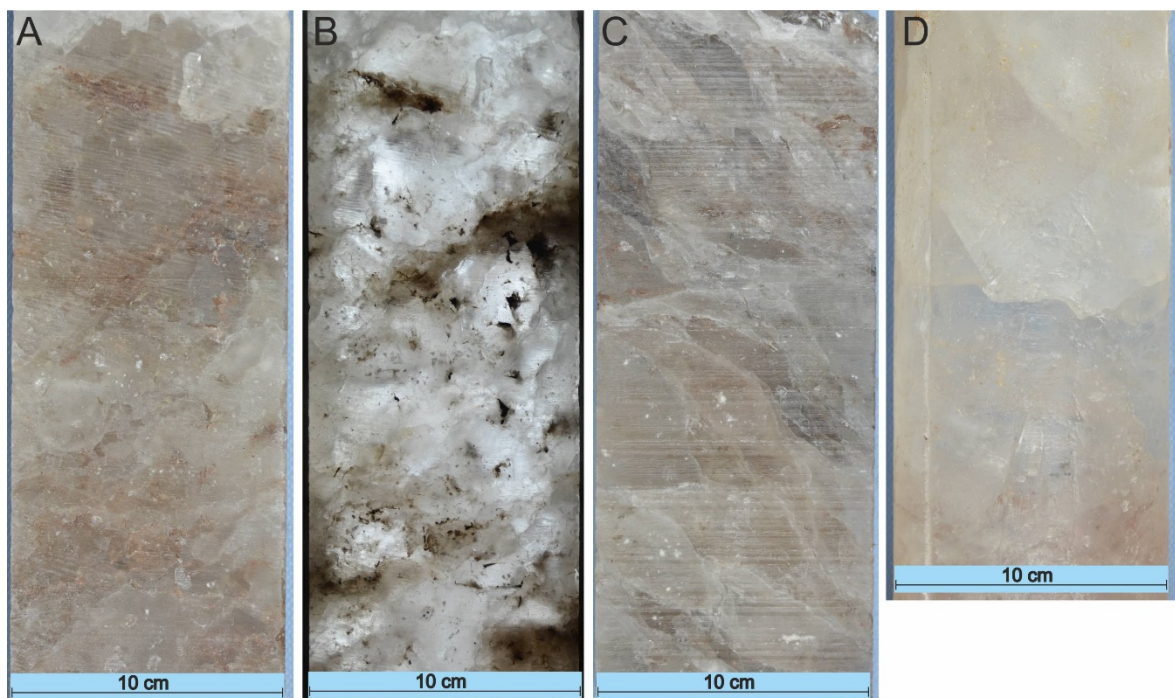


Abbildung 2-12: Makroskopisches Gefüge des Keupersalinars der Salzstruktur Dedesdorf

- A: Unregelmäßiges, grobkörniges Steinsalz mit rotbraunen Tonflatschen im Auflicht**
- B: Gleicher Ausschnitt wie in A im Durchlicht**
- C: Grobkörniges Steinsalz mit Kornformvorzugsorientierung und Tonflatschen im Auflicht**
- D: Große, transparente Haliteinkristalle im Auflicht**

Die Halitkornform ist rundlich bis unregelmäßig und die Korngrenzen sind teilweise lobat ausgebildet. Der detritische Gesteinsanteil ist sehr feinkörnig und vorwiegend entlang von Halitkorngrenzen angeordnet (Abbildung 2-13 A). Unter dem Rasterelektronenmikroskop konnten neben Tonmineralen (Smektit, Muskovit und Chlorit) auch detritische Komponenten wie Quarz, Feldspat und Eisenoxide nachgewiesen werden (Abbildung 2-13 E, F). Daneben sind große Karbonatkristalle am Kontakt zum Steinsalz ausgebildet. Neben lokal mikroskopisch nachweisbaren einzelnen Anhydritkristallen ist im Gestein kein Sulfatanteil nachweisbar (Abbildung 2-14). Viele Halitkristalle sind klar und einschlussfrei.

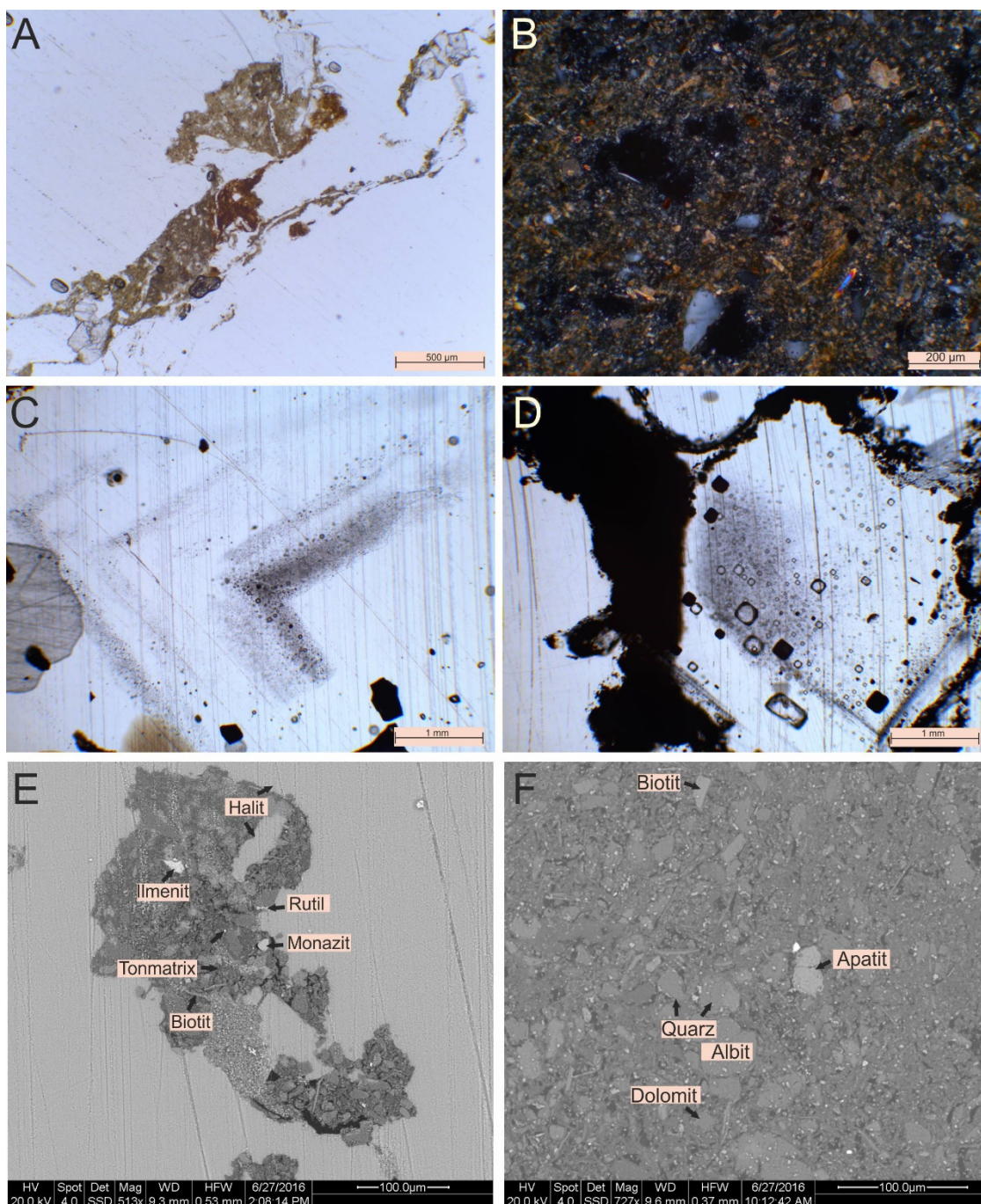


Abbildung 2-13: Polarisations (A-D)- und Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen (E, F) aus dem Keupersalinar der Struktur Dedesdorf

A: Verteilung detritischer Gesteinsanteile an Halitkorngrenzen, II Pol

B: Verteilung des detritischen Gesteinsanteils, +Pol

C: Chevronförmige Verteilung von Fluideinschlüssen in Halit, II Pol

D: Klare und dunkel gefüllte Fluideinschlüsse bis 0,2 mm Durchmesser in Halit (Dickschliff), II Pol

E: Verteilung detritischer Mineralphasen an Halitkorngrenzen

F: Regellose Verteilung detritischer Mineralphasen in Tonmineralmatrix

Insbesondere innerhalb großer Halit-Einkristalle finden sich jedoch zahlreiche, häufig kubische Fluideinschlüsse mit Durchmessern von bis zu 0,2 mm (Abbildung 2-13 D). Die geometrische, chevronförmige Anordnung der Fluideinschlüsse in einigen Kristallen (Abbildung 2-13 C) lässt analog zu Pape et al. (2002) auf eine Bildung im Flachwasser und Erhaltung primärer Halitgefüge schließen. Die gemessenen Bromidgehalte im Halit des Keupersalinaras liegen ausschließlich unter 10 $\mu\text{g}/\text{g}_{\text{Halit}}$ (Abbildung 2-14). Dies deutet auf eine Genese der Salze aus kontinentaler Quelle hin.

Bei den hier untersuchten Salzen liegt aufgrund der Mächtigkeit und des Stoffgehaltes eine Zugehörigkeit zum Salzlager H nahe. Dieses nimmt aufgrund der regionalen Verbreitung und der tektonischen Verknüpfung mit den Salzdiapiren des Zechsteins eine Sonderrolle ein. Die übrigen Salzlagen des Keupers weichen in ihren stofflichen Eigenschaften vermutlich deutlich von denen des hier beschriebenen Salzlagers ab.

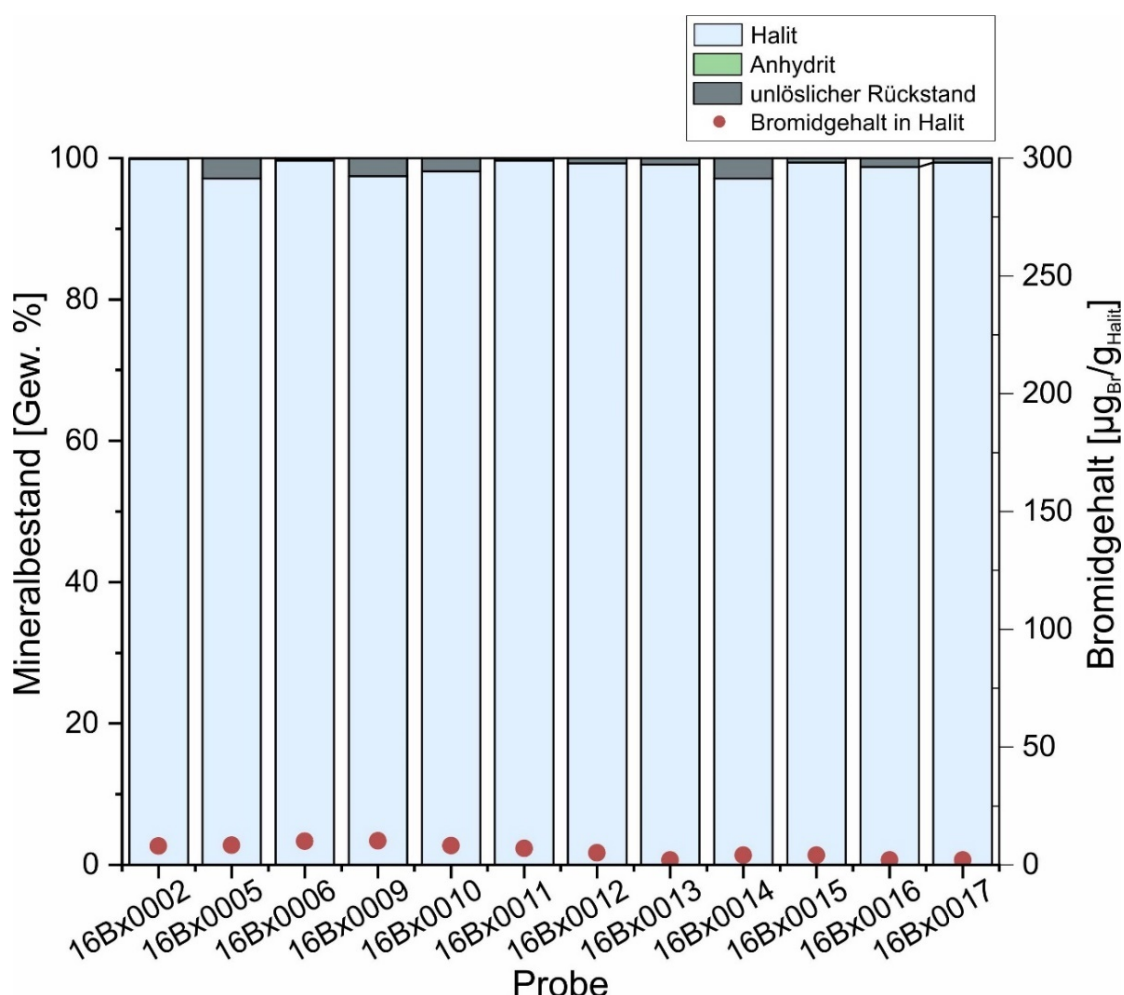


Abbildung 2-14: Berechneter Mineralbestand und Bromidgehalte in Halit des wasserlöslichen Anteils aus Proben des Keupersalinaras aus der Struktur Dedesdorf



Literaturverzeichnis

- Bachmann, G.H., Geluk, M.C., Warrington, G., Becker-Roman, A., Beutler, G., Hagdorn, H., Hounslow, M.W., Nitsch, E., Röhling, H.-G., Simon, T. & Szulc, A. (2010): Triassic. (In: Doornenbal, J.C. & Stevenson, A.G. (Hrsg.): Petroleum Geological Atlas of the South Permian Basin Area). S. 149-173; (EAGE Publications b.v. (Houten)).
- Barnasch, J. (2009): Der Keuper im Westteil des Zentraleuropäischen Beckens (Deutschland, Niederland, England, Dänemark): diskontinuierliche Sedimentation, Litho-, Zylo- und Sequenzstratigraphie. Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg: 222 S.
- Behrendt, L. (1990): Die sedimentologischen Leithorizonte im Saxon im Nordteil der DDR. Zeitschrift für angewandte Geologie, 36, 9: S. 333-335.
- Best, G. (1989): Die Grenze Zechstein/Buntsandstein in Nordwest-Deutschland nach Bohrlochmessungen. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, 140: S. 73-85.
- Best, G., Bornemann, O., Kockel, F. & Leydecker, G. (1982): Bewertung von Salzformationen außerhalb Niedersachsens für die Errichtung von Endlagern. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: S. 48.
- Beutler, G. (1995): Quantifizierung der altkimmerischen Bewegungen in Nordwestdeutschland. Teil I Stratigraphie des Keupers. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: S. 147; Hannover [unveröff.].
- Beutler, G., Hauschke, N. & Nitsch, E. (1999): Faziesentwicklung des Keupers im Germanischen Becken. (In: Hauschke, N. & Wilde, V. (Hrsg.): Trias - eine ganz andere Welt). S. 129-174; München (Verlag Dr. Friedrich Pfeil).
- Beutler, G. & Szulc, J. (1999): Die paläogeographische Entwicklung des Germanischen Beckens in der Trias und die Verbindung zur Tethys. (In: Hauschke, N. & Wilde, V. (Hrsg.): Trias - eine ganz andere Welt). S. 71-80; München (Verlag Dr. Friedrich Pfeil).
- 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. Geol. Jb., C 73: S. 211.
- Brunner, H., Adam, K.D., Müller, S., Simon, T. & Wild, H. (1986): Erläuterungen zu Blatt 6821 Heilbronn. Geologisches Landesamt Baden-Württemberg. Geologische Karte von Baden-Württemberg <1:25000>: S. 204.
- Czapowski, G. (1987): Sedimentary facies in the oldest rock salt (Na1) of the Leba elevation (Northern Poland). (In: Peryt, T.M. (Hrsg.): The Zechstein Facies in Europe). S. 207-224; (Springer).
- DSK (2016): Stratigraphische Tabelle von Deutschland (Hrsg.: M. Menning & A. Hendrich). Potsdam (GFZ).
- Dyjaczyński, K. & Peryt, T.M. (2014): Controls on basal Zechstein (Wuchiapingian) evaporite deposition in SW Poland. Geological Quarterly, 58, 3: S. 485-502, doi: 10.7306/gq.1166.

- Fischbeck, R., Werner, W. & Bornemann, O. (2005): Bromidgehalte im Halit des Muschelkalksalinars und der Staßfurt-Folge im Vergleich. Kali und Steinsalz, 1/2005: S. 16-25.
- Fischer, U., Katzung, G., Sigenege, W.D., Süßmuth, S., Warncke, D. & Albrecht, G. (1977): Einheitliche Lithostratigraphie des Saxon im Nordteil der DDR auf genetischer Grundlage (1. Überarbeitung). ZGI Berlin, Unpublished Report.
- Fürer, G. & Heinke, H. (1984): Salzstöcke im ehemaligen Großherzogtum Oldenburg, ihr Aufbau und ihre Nutzung. Nachrichten Deutsche Geologische Gesellschaft, 30: S. 108-124.
- Gast, R., Dusar, M., Breikreuz, C., Gaupp, R., Schneider, J.W., Stemmerik, L., Geluk, M., Geißler, M., Kiersnowski, H., Glennie, K.W., Kabel, S. & Jones, N.S. (2010): Rotliegend. (In: Dornenbaal, J.C. & Stevenson, A.G. (Hrsg.): Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area). S. 101-121; (EAGE Publications b.v. (Houten)).
- Gebhardt, U. (1994): Zur Genese der Rotliegend-Salinare in der Norddeutschen Senke (Oberrotliegend II, Perm). Freiburger Forschungshefte, C 452: S. 3 - 22.
- Geluk, M.C. (2005): Stratigraphy and tectonics of Permo-Triassic basins in the Netherlands and surrounding areas. Dissertation, Utrecht University: 151 S.
- Hardie, L.A. (1984): Evaporites; marine or non-marine? American Journal of Science, 284, 3: S. 193-240.
- Holser, W. & Wilgus, C. (1981): Bromide profiles of the Röt salt, Triassic of Northern Europe, as evidence of its marine origin. Neues Jahrbuch für Mineralogie - Monatshefte, 1981, 6: S. 267-276.
- Hunsche, U., Schulze, O., Walter, F. & Plischke, I. (2003): Thermomechanisches Verhalten von Salzgestein - Abschlussbericht. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: S. 157; Hannover.
- Katzung, G. (1991): Zu Auftreten, Ausbildung und Genese des Salinars in der mitteleuropäischen Saxon II-Senke (Oberperm) Zentralblatt für Geologie und Paläontologie Teil I: Allgemeine, angewandte, regionale und historische Geologie, 1990, 11: S. 1565 - 1585.
- Katzung, G. & Obst, K. (2004): Rotliegendes. (In: Katzung, G. (Hrsg.): Geologie von Mecklenburg-Vorpommern). S. 98-131; Stuttgart (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).
- Kovalevych, V., Peryt, T.M., Beer, W., Geluk, M. & Halas, S. (2002): Geochemistry of Early Triassic seawater as indicated by study of the Röt halite in the Netherlands, Germany, and Poland. Chemical Geology, 182: S. 549-563.
- Küster, Y., Schramm, M., Bornemann, O. & Leiss, B. (2009): Bromide distribution characteristics of different Zechstein 2 rock salt sequences of the Southern Permian Basin: a comparison between bedded and domal salts. Sedimentology, 56, 5: S. 1368-1391.

- Langer, M. (1984): Geotechnische Laboruntersuchungen an Bohrkernen des Kavernenfeldes Hengelo. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: S. 18; Hannover.
- Legler, B. (2006): Faziesentwicklung im Südlichen Permbecken in Abhängigkeit von Tektonik, eustatischen Meeresspiegelschwankungen des Proto-Atlantiks und Klimavariabilität (Oberrotliegend, Nordwesteuropa). 240 S.; Hannover (Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften).
- Liang, W.-g., Yang, C.-h., Zhao, Y.-s., Dusseault, M. & Liu, J. (2007): Experimental investigation of mechanical properties of bedded salt rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44, 3: S. 400-411.
- McKie, T. & Williams, B. (2009): Triassic palaeogeography and fluvial dispersal across the northwest European Basins. *Geological Journal*, 44, 6: S. 711-741.
- Nowara, P. (2018): Depth-dependent variations in microfabrics and deformation mechanisms of shallowly dipping rock salt. Implications from Salar de Uyuni, Waste Isolation Pilot Plant and lower Zechstein (z1-z2HS). Masterarbeit, Goethe Universität Frankfurt am Main: 70 S.
- Pape, T., Michalzik, D. & Bornemann, O. (2002): Chevronkristalle im Kristallbrockensalz (Zechstein 2) des Salzstocks Gorleben - Primärgefüge salinärer Flachwassersedimentation im Zechsteinbecken. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, 153, 1: S. 115-129.
- Paul, J. (2006): Facies analysis and sequence stratigraphy of an evaporitic-fluviatile unit: The Röt (Lower Triassic, Germany). *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie - Abhandlungen*, 242, 1: S. 103-132.
- Plein, E. (1995): Stratigraphie von Deutschland I - Norddeutsches Rotliegendbecken. Rotliegend-Monographie Teil II. Stratigraphie von Deutschland: 193 S.; Frankfurt (Courier Forschungsinstitut Senckenberg).
- Plumhoff, F. (1966): Marines Ober-Rotliegendes (Perm) im Zentrum des nordwestdeutschen Rotliegend-Beckens - Neue Beweise und Folgerungen. *Erdöl und Kohle Erdgas Petrochemie*, 19: S. 713-720.
- Radzinski, K.-H. (2008): Zechstein. (In: Bachmann, G.H., Ehling, B.-C., Eichner, R. & Schwab, M. (Hrsg.): *Geologie von Sachsen-Anhalt*). S. 160-178; Stuttgart (Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).
- Reinhold, K. & Hammer, J. (2016): Steinsalzlager in den salinaren Formationen Deutschlands. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 167, 2: S. 167 - 190.
- Richter-Bernburg, G. (1987): Exkursionen in den Deutschen Zechstein. (In: Kulick, J. & Paul, J. (Hrsg.): *Internationales Symposium Zechstein 1987 Kassel - Hannover. Exkursionsführer I. Zechsteinsalinare und Bohrkernaussstellungen.*). S. 15-24; Wiesbaden (Hessisches Landesamt für Bodenforschung).
- Röhling, H.-G. (2013): Der Buntsandstein im Norddeutschen Becken - regionale Besonderheiten. (In: Lepper, J. & Röhling, H.-G. (Hrsg.): *Stratigraphie von Deutschland XI - Buntsandstein*). S. 269-384; Stuttgart (Schweizerbart Science Publishers).

- Röhling, S. (2000): Der Mittlere Muschelkalk in Bohrungen Norddeutschlands: Fazies, Geochemie, Zyko- und Sequenzstratigraphie. Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg: 184 S.
- Schachl, E. (1952): Das Muschelkalksalz in Kochendorf, Heilbronn und Stetten/Hohenzollern. Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereines, 34: S. 30-41.
- Schléder, Z., Urai, J.L., Nollet, S. & Hilgers, C. (2008): Solution-precipitation creep and fluid flow in halite: a case study of Zechstein (Z1) rock salt from Neuhof salt mine (Germany). International Journal of Earth Sciences, 97, 5: S. 1045-1056.
- Schröder, L., Plein, E., Bachmann, G.H., Gast, R., Gebhardt, U., Graf, R., Helmuth, H.-J., Pasternack, M., Porth, H. & Süßmuth, S. (1995): Stratigraphische Neugliederung des Rotliegend im Norddeutschen Becken. Geologisches Jahrbuch, A 148: S. 3-21.
- Schulze, G. (1960): Stratigraphische und genetische Deutung der Bromverteilung in den mitteldeutschen Steinsalzlager des Zechsteins. Freiburger Forschungshefte, C 83: S. 1-116.
- Seidel, G. (2011): Stratigraphischer Vergleich des Zechsteins von Thüringen mit dem Zechstein angrenzender Gebiete. Mauritanica, 22: S. 1-15.
- Sigeneger, W.D., Weyrich, H. & Kühn, W. (1974): Abschlussbericht über die Bearbeitung des Saxon der Bohrung Lübtheen 1Ah4/71. Zentrales Geologisches Institut Berlin, Archivstück.
- Simon, T. (1999): Das Steinsalz des Mittleren Muschelkalks. (In: Hauschke, N. & Wilde, V. (Hrsg.): Trias - eine ganz andere Welt). S. 481-491; München (Verlag Dr. Friedrich Pfeil).
- Trusheim, F. (1971): Zur Bildung der Salzlager im Rotliegenden und Mesozoikum Mitteleuropas. Bd. 112. Beihefte zum Geologischen Jahrbuch: 51 S.; Hannover (Bundesanstalt für Bodenforschung).
- Urai, J., Schléder, Z., Spiers, C. & Kukla, P. (2008): Flow and transport properties of salt rocks. (In: Littke, R., Bayer, U., Gajewski, D. & Nelskamp, S. (Hrsg.): Dynamics of complex intracontinental basins: The central European basin system). S. 277-290; Berlin (Springer).



3 Teilprojekt Salz- und Strukturgeologie – Arbeitspaket 3

Doppel- und Mehrfachsalinare:

Stofflich-strukturelle Charakterisierung der Salinar-Formationen, Untersuchung des Internbaus und geologische 3D-Modelle

Koordinatorin: Dipl.-Geogr. Stephanie Fleig

Bearbeitende: M.Sc.-Geow. Mareike Henneberg, M.Sc.-Geow. Julia Onneken

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	3-4
Tabellenverzeichnis.....	3-8
3.1 Bisherige Untersuchungen	3-9
3.1.1 Definition der Doppel- und Mehrfachsalinare.....	3-9
3.1.2 Strukturelle Entwicklung des Glückstadt-Grabens	3-10
3.2 Zusammenstellung und Auswertung der Daten	3-14
3.2.1 Geotektonischer Atlas von Nordwest Deutschland	3-14
3.2.2 Bohrungen	3-15
3.2.3 Geologische 3D-Modelle der Bundesländer	3-15
3.2.3.1 Schleswig-Holstein	3-15
3.2.3.2 Niedersachsen.....	3-16
3.2.3.3 Stand der Modelle.....	3-16
3.3 Aktualisierung der Doppelsalinare in der InSpEE-Datenbank und dem InSpEE- Informationssystem.....	3-16
3.3.1 Kulminationspunkte.....	3-17
3.3.2 Maximalausdehnungen	3-18
3.3.3 Niveauschnitte.....	3-18
3.3.4 InSpEE-Datenbank und Informationssystem	3-20



3.4 Erarbeitung und Auswertung von geologischen 3D-Modellen für Doppelsalinare.....	3-21
3.4.1 Datenbasis und 3D-Modell der Salzmauer Heide	3-21
3.4.1.1 Modellerstellung mit openGEO	3-21
3.4.1.2 Konsistenzprüfung der Eingangsdaten	3-22
3.4.1.3 Modelleinheiten.....	3-23
3.4.1.4 Salzstrukturumhüllende von Heide.....	3-23
3.4.1.5 Stratigraphische Interpretation	3-25
3.4.1.6 3D-Modellierung und Strukturinterpretation.....	3-27
3.4.2 3D-Modell Honigsee.....	3-41
3.4.2.1 Datenbasis.....	3-41
3.4.2.2 Stratigraphische Interpretation	3-41
3.4.2.3 Datenbasis.....	3-43
3.4.2.4 Stratigraphische Interpretation	3-43
3.4.2.5 3D-Modellierung und Strukturinterpretation.....	3-43
3.5 Internbautypen der Doppelsalinare	3-47
3.5.1 Strukturaufbauendes Salinar	3-47
3.5.2 Bohrerergebnisse und darauf basierende Internbautypen	3-48
3.5.3 Internbautyp 1	3-51
3.5.4 Internbautyp 2	3-53
3.5.5 Internbautyp 3	3-54
3.5.6 Abschätzung der nutzbaren Wirtsgesteinsanteile	3-56
3.5.7 Abschätzung der Hutgesteinsmächtigkeit.....	3-58
3.5.8 Übergabe an Arbeitspaket 8.....	3-60
3.6 Stofflich-mikrostrukturelle Untersuchungen an Doppelsalinaren	3-60
3.6.1 Probenauswahl, Probenahme und Methodik	3-60
3.6.1.1 Dünnschliffherstellung und Lichtmikroskopie	3-61
3.6.1.2 Rasterelektronenmikroskopie (REM)	3-62
3.6.1.3 Paläopiezometrie	3-62
3.6.1.4 Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES) und Bestimmung des quantitativen Mineralbestandes	3-62



3.6.1.5 Röntgendiffraktometrie (RDA).....	3-63
3.6.1.6 Isotopengeochemische Untersuchungen an Sulfaten	3-63
3.6.1.7 Langzeit-Kriechversuche	3-63
3.6.2 Stoffliche Zusammensetzung des Rotliegendesalinales.....	3-64
3.6.3 Gefügeuntersuchungen.....	3-66
3.6.3.1 Rotliegendgefüge in Doppelsalinen	3-66
3.6.3.2 Karbonathaltige Zwischenlagen in Rotliegendesalinar	3-71
3.6.3.3 Zechsteingefüge in Doppelsalinen	3-74
3.6.3.4 Rotliegend-Zechstein-Übergang	3-75
3.6.3.5 Paläopiezometrie	3-77
3.6.4 Mineralbestand, Bromidgehalt und isotopengeochemische Eigenschaften.....	3-80
3.6.5 Langzeit-Kriechversuche an Rotliegendesalinar.....	3-84
3.6.6 Zusammenfassung.....	3-91
Literaturverzeichnis.....	3-93



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Karte der Salzstrukturen in Nordwestdeutschland	3-9
Abbildung 3-2: Karte der Salzstrukturen im und um den Glückstadt-Graben.....	3-13
Abbildung 3-3: Salzstrukturen mit 10 m- und 50 m-Isolinien zur Bestimmung der neuen Kulminationspunkte und der Segmentierung der Salzmauern	3-18
Abbildung 3-4: Die Salzstrukturumhüllenden aus den drei Modellen: StörTief, TUNB und Heide (Siehe Kapitel 3.4.1).....	3-19
Abbildung 3-5: Überarbeitete Niveauschnitte der auf dem Festland liegenden Doppelsalinare im Glückstadt-Graben (Maßstab 1:650.000).....	3-20
Abbildung 3-6: Salzstrukturumhüllende der Salzmauer Heide mit Bohrungen	3-24
Abbildung 3-7: Schematisches Profil der Rotliegend- und Zechsteingesteine in Heide nahe der Rotliegend-Zechstein-Grenze mit Darstellung der Modellflächen	3-26
Abbildung 3-8: Horizontalprofil für die Tiefenlage 840 m u. NN.....	3-27
Abbildung 3-9: Karte der Salzstrukturen im Bereich der Salzmauer Heide	3-28
Abbildung 3-10: Profilschnitt A im Bereich Marne.....	3-30
Abbildung 3-11: Aufnahme aus dem 3D-Raum im Bereich Marne.....	3-31
Abbildung 3-12: Profilschnitt B im Bereich Meldorf	3-32
Abbildung 3-13: Aufnahme aus dem 3D-Raum im Bereich Meldorf	3-34
Abbildung 3-14: Profilschnitt C im Bereich Heide, maximal 1.500 m weit entfernte Bohrungen sind auf den Schnitt projiziert.....	3-35
Abbildung 3-15: Aufnahme aus dem 3D-Raum im Bereich Meldorf und Heide	3-36
Abbildung 3-16: Aufnahme aus dem 3D-Raum im Bereich Heide	3-37
Abbildung 3-17: Aufnahme aus dem 3D-Raum im Bereich Heide	3-37
Abbildung 3-18: Profilschnitt D im Bereich Hennstedt.....	3-39
Abbildung 3-19: Aufnahme aus dem 3D-Raum im Bereich Hennstedt.....	3-40
Abbildung 3-20: Aufnahme aus dem 3D-Raum im Bereich Hennstedt.....	3-40



Abbildung 3-21: Karte der Salzstrukturen im Bereich der Doppelsalinar-Struktur Honigsee mit Lage des Modellgebietes und den Kulminationspunkten der Segmente.....	3-42
Abbildung 3-22: Aufnahme aus dem 3D-Raum im Bereich des Kavernenfeldes in Honigsee	3-44
Abbildung 3-23: Profilschnitt A in dem Bereich Honigsee mit zwei der drei Kavernenbohrungen.....	3-45
Abbildung 3-24: Profilschnitt B in dem Bereich Honigsee mit einer Kavernenbohrung.....	3-45
Abbildung 3-25: Aufnahme aus dem 3D-Raum im Bereich des Kavernenfeldes in Honigsee	3-46
Abbildung 3-26: Aufnahme aus dem 3D-Raum im Bereich des Kavernenfeldes in Honigsee	3-47
Abbildung 3-27: Karte der Doppelsalinare im Glückstadt-Graben mit den bohrungsbasierten Typ-Einteilungen	3-49
Abbildung 3-28: Karte der Doppelsalinare im Glückstadt-Graben	3-50
Abbildung 3-29: Schematisches Profil des Doppelsalinar-Internbautyps 1..	3-51
Abbildung 3-30: Mächtigkeitsverteilung in Bezug zur Zechstein-Basis und Geländeoberkante sowie Salzstrukturen (Kapitel 3-17 und 3-26), Lage und Bezeichnung der tektonischen Einheiten nach Maystrenko et al. (2017)	3-52
Abbildung 3-31: Schematisches Profil durch ein Doppelsalinar des Internbautyps 2.....	3-53
Abbildung 3-32: Schematische Bohrprofile aus Doppelsalinaren mit ausschließlich erbohrtem Zechsteinsalinar (Typ 2).....	3-54
Abbildung 3-33: Schematisches Profil durch ein Doppelsalinar des Internbautyps 3.....	3-55
Abbildung 3-34: Schematische Bohrprofile aus Doppelsalinaren mit ausschließlich erbohrtem Rotliegend in den Strukturrändern (Typ 3)	3-56
Abbildung 3-35: Niveauschnitte mit Flächenanteilen des Rotliegend in vier Teufen durch die Salzmauer Heide mit der Zechstein-Basis-Fläche (beige) aus dem Heide 3D-Modell (Kapitel 3.4.1).....	3-57
Abbildung 3-36: Erbohrte Zechstein-Hutgestein- und Rotliegend-Residual-Mächtigkeiten in 36 Salzstrukturen innerhalb des Untersuchungsgebietes gegen die Teufe Top Hutgestein bzw. Rotliegend-Residuum.....	3-59



Abbildung 3-37: Lage der untersuchten Bohrungen in den Doppelsalinarstrukturen	3-61
Abbildung 3-38: Darstellung des Dichte- und Gammaray-Logs im Verhältnis zum Anteil detritischer Gesteinsphasen in den Bohrkernen (mit jeweils 10 cm Durchmesser).	3-65
Abbildung 3-39: Makroskopische Gefüge des Rotliegendesalinars.....	3-66
Abbildung 3-40: Gefüge des Rotliegendesalinars am Beispiel von polierten Bohrkernquerschnitten aus den Salzstöcken Kiel (A-C) und Heide (D-F)	3-68
Abbildung 3-41: Mikrostrukturen im diapirischen Rotliegendesalinar der Salinarstrukturen Kiel und Krempe.....	3-70
Abbildung 3-42: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von detritischen Gesteinsanteilen im Rotliegendesalinar	3-71
Abbildung 3-43: Makroskopische und mikroskopische Merkmale der Karbonatlagen in der Salzstruktur Krempe	3-73
Abbildung 3-44: Makroskopische (A, B) und mikroskopische (C-E) Merkmale des Staßfurt Hauptsalzes der Salinarstruktur Kiel.....	3-75
Abbildung 3-45: Mikroskopische Aufnahmen der Gesteine der Werra-Formation im Rotliegend-Zechstein-Übergang der Salinarstruktur Heide	3-76
Abbildung 3-46: Rotliegend-Zechstein-Übergang in der Salinarstruktur Kiel-Honigsee, Bohrkernanschnitt.....	3-76
Abbildung 3-47: Subkörner in Halit unter Auflicht im Rotliegendesalinar der Salzstruktur Kiel-Honigsee	3-78
Abbildung 3-48: Aus Subkorndurchmessern in Halit berechnete Paläodifferenzialspannungen aus den beprobten Bereichen zweier Bohrungen der Salinarstruktur Kiel-Honigsee	3-79
Abbildung 3-49: Berechneter Stoffbestand und Bromidgehalte in Halit von Gesamtproben des Rotliegendesalinars (A) und Zechstein-salinars (B) aus der Salinarstruktur Kiel-Honigsee.....	3-81
Abbildung 3-50: Bromidgehalte im Rotliegendesalinar (rot) der untersuchten Doppelsalinarstrukturen	3-82
Abbildung 3-51: Quantitative mineralogische Zusammensetzung des wasserunlöslichen Anteils [Gew.-%] im Rotliegendesalinar der Salinarstrukturen Kiel-Honigsee (links) und Heide (rechts) (Henneberg et al. 2018)	3-82



Abbildung 3-52: Ergebnisse der Untersuchungen von stabilen Schwefel- und Sauerstoffisotopen an Sulfaten des Rotliegenden und Zechstein aus Doppelsalinen	3-83
Abbildung 3-53: Probenkörper vor der Verformung	3-84
Abbildung 3-54: Verlauf der Verformungskurve über zwei Laststufen am Beispiel der Probe GM 3	3-86
Abbildung 3-55: Kriechverhalten von Rotliegendesalzproben	3-88
Abbildung 3-56: Experimentell ermittelte Kriechraten im Verhältnis zur gemessenen Dichte der Probenkörper	3-89
Abbildung 3-57: Mikroskopische Aufnahmen von Subkörnern nach der Deformation unter Auflacht	3-90
Abbildung 3-58: Aus Subkorngrößen in Halit ermittelte Differenzialspannungen vor und nach der Deformation der Probenkörper unter Unterscheidung zweier Subkorntypen durch natürliche und technische Deformation	3-91



Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Stratigraphische Gliederung der Schichtenfolge der Salzmauer Heide	3-22
Tabelle 3-2:	Nutzbare Flächenanteile in Abhängigkeit von der Tiefe und Strukturtyp	3-58
Tabelle 3-3:	Ergebnisübersicht der Kriechversuche	3-85
Tabelle 3-4:	Kriechklassen und Vorfaktoren im BGR-a Kriechgesetz (Hunsche 2003).....	3-87

3.1 Bisherige Untersuchungen

3.1.1 Definition der Doppel- und Mehrfachsalinare

Salzstrukturen, deren aufbauendes Salinar aus zwei oder drei altersverschiedenen lithostratigraphischen Gruppen bestehen, werden als Doppelsalinar bzw. Mehrfachsalinare bezeichnet. Im Fall der Doppelsalinare bestehen die strukturbildenden Gesteine überwiegend aus dem Rotliegendesalinar gemeinsam mit dem jüngeren Zechsteinsalinar. An einigen Salzstrukturen sind Salzkissen aus keuperzeitlichem Salinar „angeschweißt“. Diese Doppel- und Mehrfachsalinare bilden langgestreckte Salzmauern und Salzdiapire und sind begrenzt auf den Glückstadt-Graben im Unterelbe Gebiet in Schleswig-Holstein, Hamburg und das nördliche Niedersachsen sowie die deutsche Nordsee angrenzend zum ostfriesischen Festland und den Horn-Graben (Abbildung 3-1).

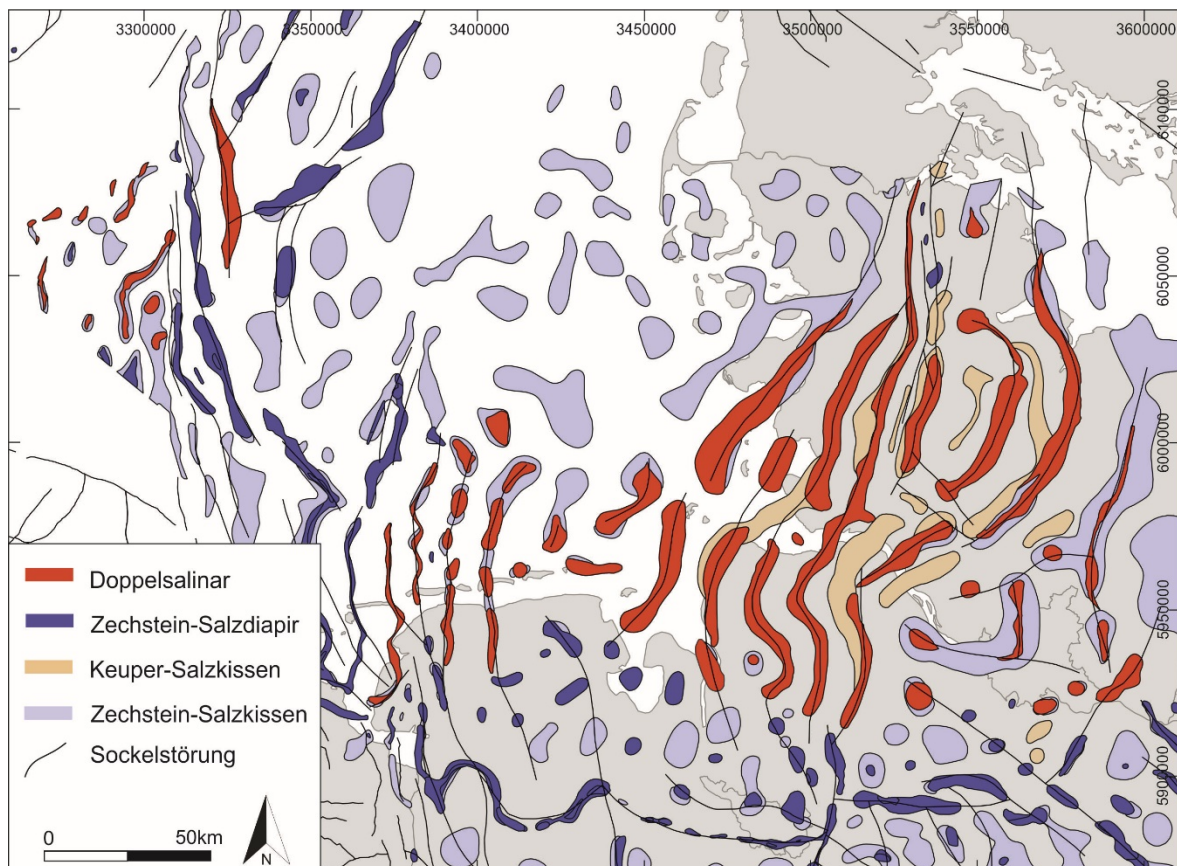


Abbildung 3-1: Karte der Salzstrukturen in Nordwestdeutschland

Doppelsalinare basieren auf der Neubearbeitung (siehe Kapitel 3.3), Zechstein-Salzdiapire und Salzkissen (Zechstein und Keuper) nach Reinhold et al. (2008), Hauptsockelstörungen nach Doornenbal & Stevenson (2010).



Diapirisches Rotliegendesalinar wurde erstmals bei der fiskalischen Tiefbohrung von Lieth im Jahr 1872 erbohrt und im Jahr 1925 zeitlich als Rotliegend eingestuft (Plein 1995). Zusätzlich wurden in Liether Tagesaufschlüssen bereits 1931 Gesteine der Werra-Formation des Zechstein detektiert (Schott 1943), die den basalen Kontakt zu den Rotliegend-Formationen darstellen. Der Salzstock Stade wurde als erster Salzstock zusammenhängend als Doppelsalinar im heutigen Sinne mit Anteilen von Rotliegend- und Zechsteinsalinar beschrieben (Haack 1935). Insbesondere im Zuge der Suche nach Kohlenwasserstoff-Lagerstätten in der Umgebung von Salzstöcken in Norddeutschland wurde Rotliegendesalinar in zahlreichen Bohrungen, vor allem in Schleswig-Holstein erteuft. Die erste Speicherkaverne im Rotliegendesalinar wurde im Jahr 1962 im Salzstock Heide zum Zweck der Flüssiggas-Speicherung angelegt (Rüddiger 1965). Im Folgenden wurden im Rahmen der Planung weiterer Speicherkavernen die technischen Eigenschaften des Rotliegendesalinars systematisch untersucht (Rüddiger 1965; Langer & Hofrichter 1971). Eine Zusammenfassung über die Genese und Altersstellung des Rotliegendesalinars findet sich in Kapitel 2.

3.1.2 Strukturelle Entwicklung des Glückstadt-Grabens

Die Datenrecherche für die Doppel- und Mehrfachsalinare zeigte, dass sich das Untersuchungsgebiet in InSpEE-DS vor allem auf den Glückstadt-Graben in Schleswig-Holstein, Hamburg und im nördlichen Niedersachsen erstreckt, da in diesem Gebiet viele Bohrungen abgeteuft wurden, die nicht in die Untersuchungen des Vorgängerprojektes InSpEE einfließen und Kernmaterial für die stofflichen Untersuchungen boten. Im Folgenden wird daher ein kurzer Abriss über die strukturelle Entwicklung des Glückstadt-Grabens und der damit einhergehenden Genese der dort überwiegend vorkommenden Doppel- und Mehrfachsalinarstrukturen dargelegt.

Der mit maximal ca. 12.000 m an permischen bis känozoischen Sedimenten gefüllte Glückstadt-Graben streicht NNE-SSW bis NE-SW über eine Länge von ca. 180 km und ist Teil des Norddeutschen Beckens bzw. Teil des zentraleuropäischen Beckensystems (CEBS) (Maystrenko et al. 2005). Strukturell ist der Glückstadt-Graben im Norden durch das Ringköbing-Fünen-Hoch und im Süden durch den Pompeckj-Block begrenzt (Ziegler 1990). Der Glückstadt-Graben kann in drei Teile untergliedert werden: In den triassischen, zentralen Glückstadt-Graben (1), die randlichen, jurassischen bis känozoischen Westholstein-, Ostholstein- und Hamburger-Tröge (2) und die Grabenschultern, Westschleswig-Block im Nordwesten und der Ostholstein-Mecklenburger-Block im Osten (3) (Abbildung 3-2). Die Bildung von Salzstrukturen hatte einen starken Einfluss auf die Subsidenz und Sedimentation innerhalb des Glückstadt-Grabens (Warsitzka et al. 2016) und lässt sich anhand ihrer Randsenken-Bildungen nachvollziehen. Der Zusammenhang von Halokinese und Randsenkenentwicklung wurde erstmals von Trusheim (1960) beschrieben. Sockelstörungen unterlagern die Salzmauern und Diapire im Glückstadt-Graben und zerteilen den Glückstadt-Graben in ein Schollenmosaik (Kockel & Krull 1998). Da die salinaren Ablagerungen des Oberrotliegend halotektonisch mobilisiert wurden, endet das Sockelstockwerk im letzten Oberrotliegendhorizont ohne salinare Einschaltungen (Frisch & Kockel 2003).

Großflächige vulkanische Aktivität und Transtensionstektonik im Oberkarbon bis Unteren Perm ging in eine lange andauernde Phase der thermalen Subsidenz über, die vom Oberen Perm bis zum Buntsandstein anhielt. Dies begünstigte die Ablagerung von mächtigen Oberrotliegend-Sedimenten im Bereich des Glückstadt-Grabens mit primären Rotliegendesalinar-Mächtigkeiten von ca. 1.500 m bis 2.000 m (Jaritz 1973), welche von mehr als 2.000 m mächtigen Zechstein-Evaporiten überlagert werden (Maystrenko et al. 2017). Die Entstehung des Glückstadt-Grabens verlief in drei Phasen:



1. Phase (Buntsandstein bis Unterer Keuper)

Während der Trias kam es zu regionaler E-W gerichteter Extension, die das Südliche Permbecken in separate Teilbecken zerfallen ließ, u. a. in den Glückstadt-Graben, den Horn-Graben und den Zentral-Graben (Kley & Voigt 2008). Im Unteren bis Mittleren Buntsandstein entstand der erst schmale, zentrale Glückstadt-Graben mit einer zentralen Randsenke zwischen den späteren Salzmauern Oldenburg und Eisdorf mit Sedimentmächtigkeiten von randlich 1.500 m bis zentral 4.500 m gegenüber 1.000 m bis 1.200 m im Westholstein-Block. Im Unteren Buntsandstein bis Unteren Keuper kam es im gesamten zentralen Glückstadt-Graben zu Subsidenz und Salzmobilisierung. Durch die Salzzakkumulation bilden sich Kissenstrukturen, was an den sie begleitenden primären Randsenken ersichtlich wird. Die Anlage aller permischen Salzstrukturen des gesamten Glückstadt-Grabens erfolgte bereits in dieser 1. Phase (mit Ausnahme der äußersten Salzkissen) (Warsitzka et al. 2016).

2. Phase (Mittlerer Keuper bis Oberjura)

Die anhaltende Extension im Mittleren Keuper (Grabfeld Formation und Weser Formation) führte zur einer Verbreiterung des Glückstadt-Grabens und zu initialem bzw. starkem Salzdiapirismus. Letzterer ist durch die mächtigen sekundären Randsenken an den Salzstrukturen belegt. Dabei begann die Bildung der Salzdiapire und Randsenken im zentralen Glückstadt-Graben und wanderte dann zu seinen Rändern (Warsitzka et al. 2016). Die Ablagerungen des Mittleren bis Oberen Keupers erreichten Mächtigkeiten zwischen 1.000 m und 6.000 m und beinhalten Salzablagerungen, deren Herkunft entweder auf Resedimentation am Beckenboden austretender permischer Salinarformationen (Trusheim 1960) oder auf einen primär-sedimentären Ursprung zurückgeführt wird (Beutler & Szulc 1999). Im Unter- bis Mitteljura gingen die äußeren Salzstrukturen des zentralen Glückstadt-Grabens (Heide und Honigsee) in die diapirische Phase über und die randlichen Tröge (Westholstein-, Ostholstein- und Hamburger-Trog) begannen einzusinken. In den Salzstrukturen Büsum und Eversand im Westholstein-Trog sowie Hohenhorn, Elmshorn, Reitbrook und Meckelfeld im Hamburger-Trog setzte die diapirische Phase, ebenfalls im Unter- bis Mitteljura ein. Im Mittel- bis Oberjura herrschte eine NE-SW gerichtete Extension vor (Kley & Voigt 2008). Vom Oberjura bis zur Unterkreide beobachtet man im zentralen Glückstadt-Graben Schichtausfälle und Erosion, die im zentralen Bereich ca. 800 m Sediment abtrug (Maystrenko et al. 2005). In den Trögen dauerte lokal die Subsidenz und Sedimentation an (u. a. an den Salzstrukturen Heide, Büsum, Honigsee, Hohenhorn).

3. Phase (Unterkreide bis rezent)

Die Unterkreide ist fast im gesamten Glückstadt-Graben 80 – 90 m mächtig, außer im Zentrum des Westholstein-Trogs (Hennstedt, Oldenswort-Süd, Büsum) und im Hamburger-Trog (Elmshorn), in denen sie höhere Mächtigkeiten aufweist (Maystrenko et al. 2006). In der Oberkreide setzte erneut Subsidenz im Glückstadt-Graben ein, während in Zentraleuropa die oberkretazeische NW-SE gerichtete Einengungstektonik vorherrschte. Der Glückstadt-Graben blieb davon größtenteils unbeeinflusst, wobei vereinzelt eine verstärkte Anhebung der Salzstrukturdächer auf die Inversionsphase zurückgeführt werden könnte, welche sich durch leichte Ausdünnung der Oberkreide-Sedimente äußert (Maystrenko et al. 2006). Die höchsten Mächtigkeiten der Oberkreide liegen mit bis zu 1.600 m im Westholstein-Trog (Hennstedt, Büsum, Oldenswort-Süd) und mit mehr als 1.300 m im Hamburger-Trog (Harsefeld). Während des Eozän bis Miozän führte ESE-WNW bis E-W gerichtete Extension zu hoher Subsidenz in den randlichen Trögen (Maystrenko et al. 2005; Scheck-Wenderoth et



al. 2008). Die känozoischen Ablagerungen erreichten bis zu 5.000 m Mächtigkeit und erstreckten sich im Vergleich zu den jurassischen und kretazischen Ablagerungen im Westholstein-Trog weiter nordwestlich und im Hamburger-Trog weiter südöstlich. Während in den Trögen in dieser 3. Phase intensive Salztektonik vorherrschte (inklusive der Bildung neuer Salzdiapire), entstanden im zentralen Glückstadt-Graben Scheitelgräben über den Salzmauern. Verringerte Sedimentmächtigkeiten der Oberkreide und des Känozoikums über den Salzstrukturen und leicht erhöhte Sedimentmächtigkeiten zwischen den Salzstrukturen wurden beobachtet, was für einen kontinuierlichen und geringen Aufstieg der Salzstrukturen spricht (Maystrenko et al. 2017).

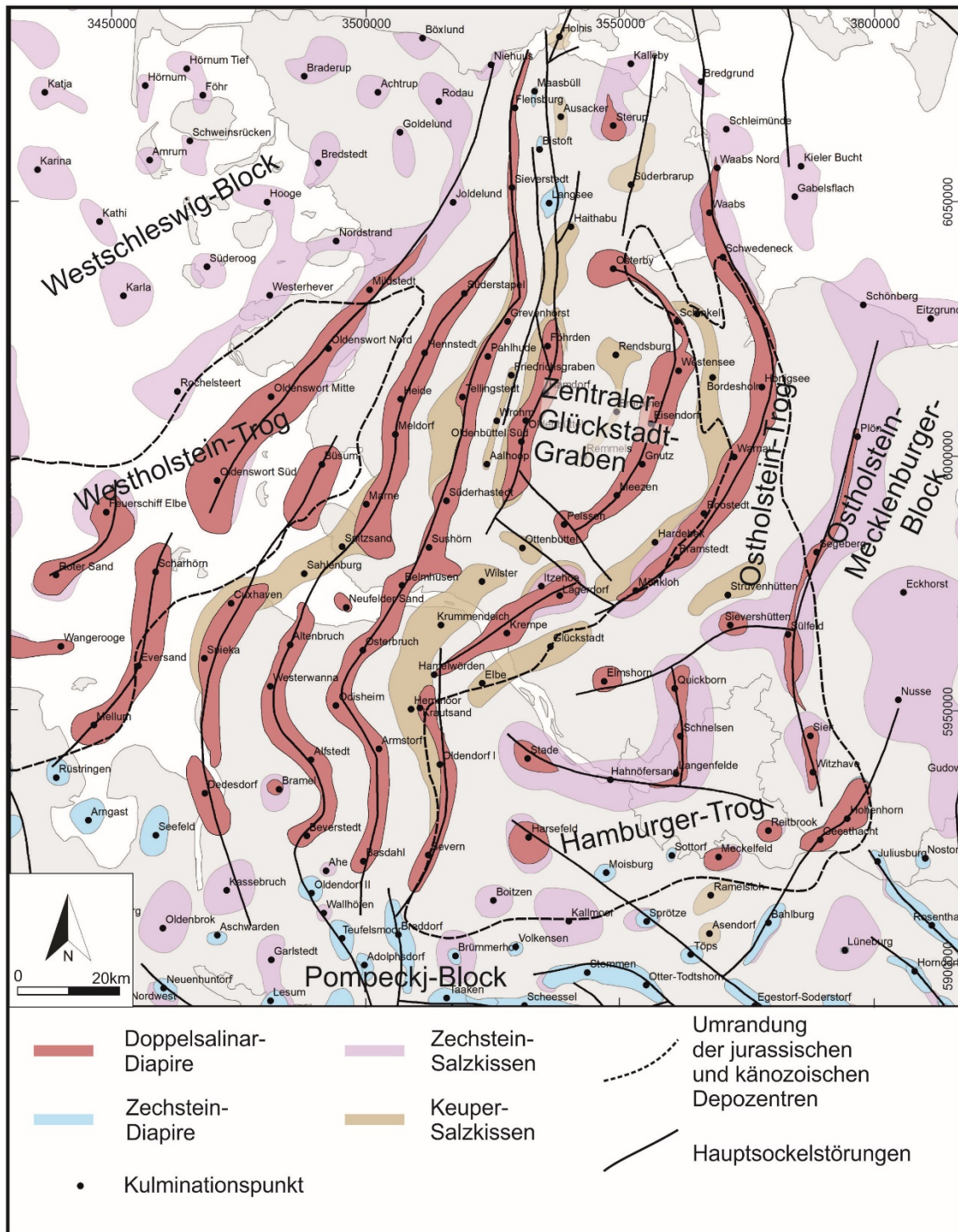


Abbildung 3-2: Karte der Salzstrukturen im und um den Glückstadt-Graben

Doppelsalinar-Diapire basieren auf der Neubearbeitung (siehe Kapitel 3.3), Zechstein-Diapire und Salzkippen (Zechstein und Keuper) nach Reinhold et al. (2008), Umrandungen der jurassischen und känozoischen Depozentren nach Maystrenko et al. (2017), modifiziert, Hauptsockelstörungen nach Doornenbal & Stevenson (2010).



3.2 Zusammenstellung und Auswertung der Daten

Alle verfügbaren und relevanten geologischen Daten, die im Folgenden näher beschrieben werden, wurden in das 3D-Modellierungsprogramm openGEO implementiert, dort bearbeitet, ausgewertet und interpretiert. Am Anfang des InSpEE-DS Projektes wurde openGEO besonders für die Zusammenführung unterschiedlicher raumbezogener Eingangsdaten benutzt und im weiteren Verlauf des Projektes wurde es in zwei Fallstudien zur 3D-Modellierung des internen Aufbaus der Salzmauern Heide (Kapitel 3.4.1) und Honigsee (Kapitel 3.4.2) verwendet.

3.2.1 Geotektonischer Atlas von Nordwest Deutschland

Die Profilschnitte des Geotektonischen Atlases (GTA) im Maßstab 1:100.000 der 15 relevanten Kartenblätter wurden eingescannt, digitalisiert und in openGEO koordinatentreu eingefügt. Es wurde dazu auf die unveröffentlichte ältere, aber großmaßstäbliche Version des GTA zurückgegriffen, da diese im Vergleich zu der veröffentlichten 1:300.000 Variante (Baldschuhn et al. 2001) einen höheren Detailgrad und weniger generalisierte Profilschnitte beinhaltet. Die Lage der Profile wurde den gescannten Strukturübersichtskarten der jeweiligen Kartenblätter entnommen, die in Gauß-Krüger Zone 3 georeferenziert und in openGEO importiert wurden. Die gescannten Profile wurden mit Hilfe von openGEO digitalisiert und die stratigraphischen Schichten den vordefinierten stratigraphischen Einheiten in openGEO zugeordnet. Die Profile folgender Kartenblätter wurden implementiert:

- C1118 + C1518 Süderlugum und Husum (Best 1982b)
- C1122 Glücksburg (Best 1986)
- C1526 Laboe (Best 1982a)
- C1914 Helgoland (Best 1983)
- C1918 Heide (Best 1985)
- C1922 Rendsburg (Best 1987)
- C1926 Kiel (Deneke 1983)
- C2314 Langen (Sattler-Kosinowski 1982)
- C2318 Cuxhaven (Jürgens 1986)
- C2322 Elmshorn (Frisch 1986)
- C2326 Bad Oldesloe (Schmitz 1984)
- C2714 Bremerhaven (Sattler-Kosinowski 1981)
- C2718 Bremervörde (Jürgens 1982)
- C2722 Hamburg-Harburg (Jürgens 1981)
- C2726 Hamburg-Wandsbek und Gudow (Frisch 1986)



Die Erläuterungen zu den Profilschnitten und Karten des GTA 1:100.000 beinhalten u. a. jeweils einen Überblick über die paläogeographische Entwicklung und Beschreibungen der Strukturen in Sockel und Deckgebirge sowie der Salzstrukturen.

3.2.2 Bohrungen

Die zumeist analogen Daten von 545 relevanten Bohrungen, die im Untersuchungsgebiet in Doppelsalinen abgeteuft wurden oder sich in ihrem Umfeld befinden, sind im Rahmen des Forschungsvorhabens gesichtet, auf Konsistenz geprüft, teils angepasst und in open-GEO eingefügt worden. In das Modellierungsprogramm wurden die Bohransatzpunkte und vertikalen Bohrendpunkte bzw., bei abgelenkten Bohrungen, die Bohrverläufe bis zur Endteufe sowie die räumlichen Strukturwerte und Schichtgrenzen aus den Bohrkernansprachen aufgenommen. Die stratigraphische Gliederung wurde gemäß den Schichtenverzeichnissen entlang der Bohrlochgeometrie ausgehalten. Diese Bohrungsdaten wurden exportiert und zusammen mit Metadaten wie Abteufzeitraum, Auftraggeber, etc. in einer Microsoft Access Datenbank gespeichert. 41 Bohrungen sind frei zugängliche Reichsbohrungen ohne Rechtsnachfolger und Sperrvermerk. Die Nutzungsrechte für die Bearbeitung der übrigen Bohrungen wurden von den Eigentümern eingeholt, wobei die Daten (wie beispielsweise Schichtenabfolgen, Bohrkernaufnahmen und Bohrlochmessungen) mit namentlich benannten Bohrungen nicht veröffentlicht werden dürfen. Im Folgenden kann daher nicht Bezug auf konkrete Bohrungen genommen werden.

Die verwendeten Tiefbohrungen wurden zwischen 1872 und 2006 abgeteuft, wobei die größte Bohraktivität im Zuge der Erdöl-Exploration und Produktion zwischen 1935 und 1960 zu verzeichnen war. Einige Salzstrukturen wurden für einen Kavernenbetrieb (Speicher oder Solegewinnung) erkundet, wobei zwei Kavernenspeicher-Standorte realisiert wurden (Heide und Kiel-Rönne). 354 von diesen 545 Bohrungen liegen in oder in der Nähe der Salzmauer Meldorf-Heide, davon der überwiegende Teil in ihrer westlichen Flanke. Die Bohrungen befinden sich zum überwiegenden Teil in den Salzmauer-Segmenten Meldorf und Heide (Abbildung 3-9).

Räumliche Strukturdaten wurden in ca. 1/5 der Bohrungen aufgenommen, aber im überwiegenden Teil ohne Einfallsrichtung, da die Kerne meist nicht orientiert gekernt wurden. Um diese Daten dennoch darzustellen, ist eine Einfallsrichtung von 90 bzw. 270° gewählt worden, welche ca. senkrecht zum generellen Streichen der Salzstruktur sind. Für die Interpretation dieser Daten muss daher die Variabilität der Orientierung bedacht werden. Für einzelne Bohrungen wurden analog vorliegende geophysikalische Messungen (u. a. Gamma Ray-, Dichte-, Kaliber-Logs) gescannt und mit Hilfe des Programmes Neuralog in numerische Daten (LAS-files) digitalisiert.

3.2.3 Geologische 3D-Modelle der Bundesländer

3.2.3.1 Schleswig-Holstein

Zwei 3D-Modelle des Untergrundes von Schleswig-Holstein wurden vom Geologischen Dienst des Landesamtes für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (LLUR) zur Nutzung zur Verfügung gestellt. Das Basismodell SH – GTA3D (Stand 2016, übergeben am 08.02.2017) beinhaltet 14 Basisflächen lithostratigraphischer Horizonte, vertikale Störungsflächen und Hüllflächen von Salzdiapiren (Hese 2012; Rosenbaum et al. 2012) und basiert auf dem Geotektonischen Atlas von Nordwest-Deutschland (Baldschuhn et al. 2001). Das



zweite, am 10.08.2017 übergebene 3D-Modell entstand im Rahmen des StörTief-Verbundvorhabens und umfasst neben der Geländeoberkante, 12 triangulierte Basisflächen lithostratigraphischer Horizonte zwischen Geländeoberkante und Basis Zechstein, Störungsflächen tieferreichender Störungen sowie Hüllflächen von Salzdiapiren (Thomsen et al. 2017). Dieses überarbeitete Modell fußt ebenfalls auf dem Geotektonischen Atlas von NW-Deutschlands sowie auf Bohrdaten, die diesen z. T. korrigieren, und seismischen Auswertungen an fünf Lokationen, die zur qualitativen Validierung der Interpretation herangezogen wurden. Die weiterführenden Arbeiten im Rahmen von InSpEE-DS beruhen weitestgehend auf dem letztgenannten, aktuelleren Modell StörTief. Beide Modelle decken außer Schleswig-Holstein auch Teile Hamburgs und Nordniedersachsens ab und wurden als Tsurf-Flächen (Gocad) in Gauß-Krüger Zone 3 an die BGR übergeben.

3.2.3.2 Niedersachsen

Innerhalb des Projektes „Potenziale des unterirdischen Speicher- und Wirtschaftsraumes im Norddeutschen Becken, Tieferer Untergrund Norddeutsches Becken (TUNB)“ wurden die drei Teilmodelle Aurich, Bremerhaven und Winsen vom Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) als Teil eines Großmodells des Norddeutschen Beckens modelliert. Durch die BGR als Projektkoordinator wurden diese drei Teilmodelle am 09.11.2017 an die InSpEE-DS-Projektbearbeiter übergeben (s. Kap. 3.2.3.3). Die Modelle bestehen aus 14 Horizonten, horizontübergreifenden Störungen sowie Salzstrukturen und basieren auf Neuinterpretationen von seismischen Daten sowie Bohrungsdaten. Die Modelle wurden als Tsurf-Flächen in ETRS 89 / UTM Zone 32N (EPSG: 4647) übermittelt und wurden in Gauß-Krüger Zone 3 transformiert.

3.2.3.3 Stand der Modelle

Die geologischen Landesämter von Schleswig-Holstein und Hamburg arbeiten zurzeit ebenfalls an einer Überarbeitung ihrer geologischen Untergrundmodelle im Rahmen des TUNB-Projektes. Auch das implementierte 3D-Modell von Niedersachsen ist ein Zwischenstand und könnte noch bis zum Abschluss des TUNB-Projektes überarbeitet werden. Durch die zeitliche Überschneidung der Projekte TUNB und InSpEE-DS war es nicht möglich auf die fertige Überarbeitung der TUNB-Modelle zu warten. In InSpEE-DS wurde daher mit dem Stand von August 2017 gearbeitet.

3.3 Aktualisierung der Doppelsalinare in der InSpEE-Datenbank und dem InSpEE-Informationssystem

Mit den Verbundpartnern wurden Kriterien festgelegt, um besonders geeignete bzw. untersuchungswürdige Doppelsalinare für den Bau und Betrieb von Wasserstoff- und Druckluftkavernen zu ermitteln. Diese Kriterien entstanden analog zu InSpEE unter Berücksichtigung der geologischen und gebirgsmechanischen Vorgaben (Arbeitspaket 5) und wurden im Verlauf der Potenzialermittlung (Arbeitspaket 8) hinsichtlich der Anwendbarkeit überprüft und teilweise angepasst. Die dafür erforderlichen geologischen Parameter, wie dem Strukturtop, den Tiefenniveauschnitten und dem strukturaufbauenden Salinar (Kapitel 3.5.1), waren Bestandteil dieses Arbeitspakets, während Einflussgrößen wie Mindestmächtigkeit und Mindestfläche des Wirtsgesteins auf Basis einer Minimalkavernenauslegung in unterschiedlichen Kavernenanordnungen von DEEP.KBB und IGtH berechnet und festgelegt wurden (Arbeitspaket 5 und Arbeitspaket 8).



Basierend auf den Salzstrukturumhüllenden aus den geologischen Modellen der beiden Länder (Kapitel 3.2.3) und der modifizierten Umhüllenden der Salzmauer Heide (Kapitel 3.4.1.4) wurden die Niveauschnitte, Maximalausdehnungen und Kulminationspunkte neu erstellt und in der InSpEE-Datenbank sowie dem InSpEE-Informationssystem aktualisiert.

3.3.1 Kulminationspunkte

Als Kulminationspunkt bezeichnet man die höchste Erhebung des Dachbereichs inklusive des Hutgesteins von Salzstrukturen. Speziell lang gestreckte Salzstrukturen wie die Salzmauern im Glückstadt-Graben haben mehrere Kulminationspunkte, woraus sich unterschiedliche Segmente ableiten lassen.

Die Salzstrukturumhüllenden des TUNB-Modells des LEBG sowie des StörTief-Modells des LLUR wurden zunächst in openGEO eingeladen. Die TSurf Flächen des StörTief-Modells des LLUR lagen im Zielkoordinatensystem Gauß-Krüger Zone 3 vor und konnten direkt in openGEO eingeladen werden, während für die Salzstrukturen des TUNB-Modells des LEBGs erst eine Koordinatentransformation mittels des Programms KTrafoGoCad durchgeführt wurde. Das StörTief-Modell des LLUR wurde über die Ländergrenze Schleswig-Holsteins nach Süden modelliert und deckt damit auch Hamburg und Teile Niedersachsens ab. In dieser überlappenden Zone, wurde das TUNB-Modell des LEBG gewählt und die betroffenen Flächen des StörTief-Modells entfernt. Des Weiteren wurde die Salzstrukturumhüllende von Heide entfernt und durch die modifizierte Umhüllende (Kapitel 3.4.1.4) ersetzt.

In openGEO wurden die Salzstrukturen in 50 m-Schritten horizontal bis 2.000 m u. NN und in den Dachbereichen der Salzstrukturen in 10 m-Schritten verschnitten (Abbildung 3-3). Die so generierten Isolinien bilden die Morphologie der Salzstrukturen und in höherem Detailgrad die der Dachbereiche ab. Die Mitte der höchsten Isolinie wurde mit Hilfe der Zentroid Berechnung in QGIS bestimmt und ergibt den Kulminationspunkt. Die Tiefe in m u. NN und m u. GOK wurde für die Kulminationspunkte bestimmt und in der InSpEE-Datenbank eingetragen. Die Höhe der Geländeoberkante über den neuen Kulminationspunkten wurde analog zur Vorgehensweise in InSpEE in ArcMap von dem digitalen Geländemodell mit einer Gitterweite von 200 m abgegriffen (DGM200 2015). In einigen Fällen zeigten Bohrungen ein höheres Strukturtop an, als die Kulminationspunkte aus den 3D-Modellen. Dort wurden die Bohrdaten verwendet.

Mit Hilfe der Isolinien der Salzstrukturen ließen sich nicht nur die Hochlagen, sondern auch die Tieflagen der Dachbereiche bestimmen. In diesen Depressionen wurden die zusammenhängenden Salzstrukturen in Teilbereiche geschnitten.

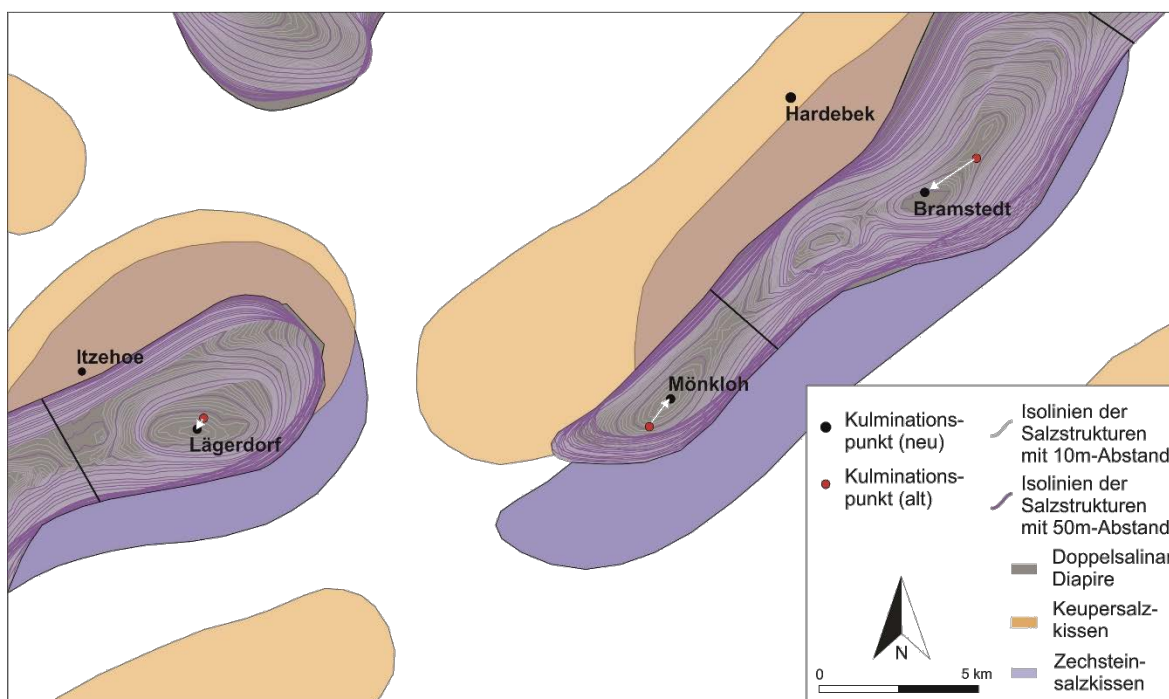


Abbildung 3-3: Salzstrukturen mit 10 m- und 50 m-Isolinien zur Bestimmung der neuen Kulminationspunkte und der Segmentierung der Salzmauern

3.3.2 Maximalausdehnungen

Zur Bestimmung der lateralen Maximalausdehnung der Salzstrukturen wurden die Salzstrukturumhüllenden durch den Export in das shape-Format in z-Richtung auf eine Höhe gestaucht, um die maximale Ausdehnung der Flächen zu erhalten und gleichzeitig in Gauß-Krüger Zone 3 überführt. Die einzelnen Strukturen wurden zu einem Polygon zusammengefügt sowie geglättet. Die Maximalausdehnung der Keuper- und Perm-zeitlichen Salzkippen wurde aus dem Vorgängerprojekt InSpEE übernommen, jedoch mit den neu bearbeiteten Salzstrukturen verschnitten.

3.3.3 Niveauschnitte

Analog zu dem Vorläuferprojekt InSpEE wurden die vier Tiefenniveaus 500, 1.000, 1.500 und 2.000 m u. NN gewählt, um die Morphologie der Salzstrukturen in der Tiefe zu erfassen (Gast & Riesenberg 2016; Pollok et al. 2016). Die ausgewählten Schnittebenen basieren auf gebirgsmechanischen Berechnungen für die Auslegung von Druckluft- und Wasserstoff-Kavernen (Zapf & Zachow 2016). Da die Errichtung von Offshore-Gaskavernen technisch und wirtschaftlich sehr anspruchsvoll ist, wurden nur Salzstrukturen oder Teile von Salzstrukturen, die auf dem Festland liegen, berücksichtigt. Auch Salzstrukturen unterhalb der deutschen Nordseeinseln bleiben unberücksichtigt. Die Niveauschnitte der Salzstrukturen geben einen Eindruck der Geometrie der jeweiligen Struktur und wie sie sich in der Vertikalachse bis 2.000 m entwickelt. Außerdem beruhen die gebirgsmechanischen Berechnungen (Arbeitspaket 5) und Potenzialabschätzungen (Arbeitspaket 8) auf diesen Daten.

Mit openGEO wurden die Salzstrukturumhüllenden in den vier o.g. Tiefenniveaus mittels automatisierter Horizontalverschneidung von Flächen geschnitten (Abbildung 3-4). Die auf diese Weise entstandenen Isolinien wurden aus AutoCAD in ArcMap in Gauß-Krüger Zone 3 überführt. Die Polylinien wurden geglättet, an Vertices (Punkte, die die Polylinien definieren) ausgedünnt und in 2,5 D-Polygone überführt (Abbildung 3-5). Die Modellflächen der beiden Modelle passen weitestgehend an der Ländergrenze gut zusammen, allerdings wurden die Flanken der Salzstrukturen Belmhusen und Osterbruch des TUNB-Modells weniger konvergent modelliert, welches am Kontakt der Modelle zu Sprüngen in den Niveauschnitten führte. An diesen Stellen wurden die Niveauschnitte stärker geglättet.

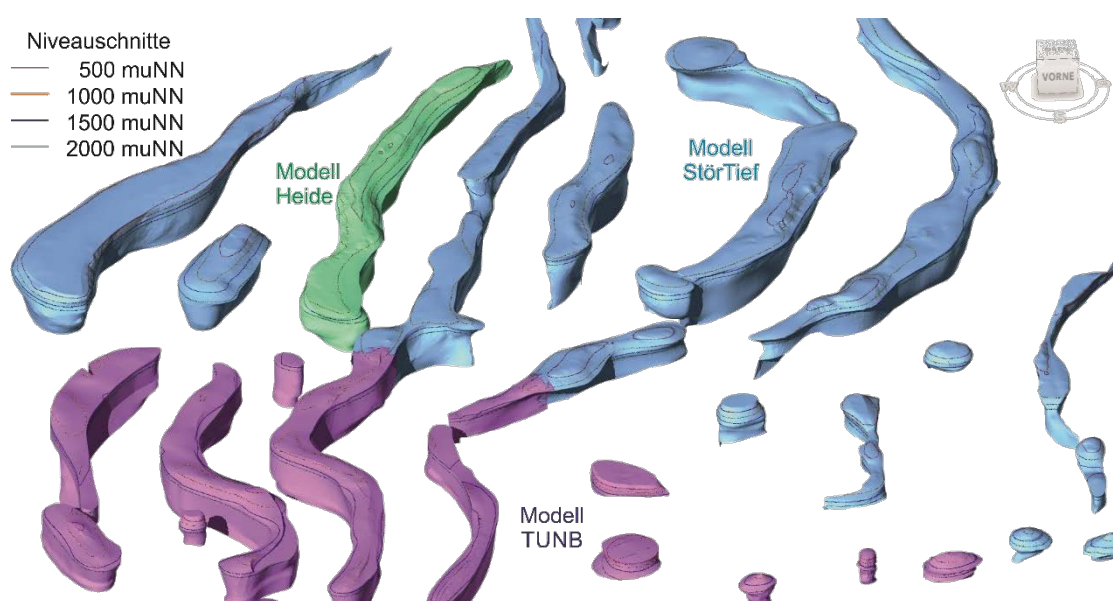


Abbildung 3-4: Die Salzstrukturumhüllenden aus den drei Modellen: StörTief, TUNB und Heide (Siehe Kapitel 3.4.1), Blickrichtung nach Nordnordost

Da für die Potenzialabschätzung die Niveauschnitte in Bezug zur Geländeoberfläche betrachtet werden, wurde die z-Koordinate der vier Polygone dementsprechend angepasst. Es wurde ein Mittelwert über die Geländehöhe über Salzdiapiren mit mehreren Teilbereichen ermittelt. Dafür wurde die Höhe der Geländeoberfläche für jeden Kulminationspunkt eines Salzstrukturzuges im Digitalen Geländemodell (DGM200 2015) abgegriffen und ein arithmetisches Mittel gebildet. Diese mittlere Geländeoberfläche in m ü. NN wurde von dem z-Wert der Niveauschnitte abgezogen.

Innerhalb der langen Salzmauern ist der Internbau nicht über die gesamte Struktur einheitlich. Innerhalb eines Strukturzuges können mehrere Internbautypen mit unterschiedlicher Verteilung des Wirtsgesteins nebeneinander vorkommen. Um einzelnen Strukturabschnitten unterschiedliche Internbautypen zuordnen zu können, wurden die Niveauschnitte an den einzelnen Salzstruktursegmenten, in den jeweiligen Depressionen der Dachbereiche geschnitten (Kapitel 3.3.1).

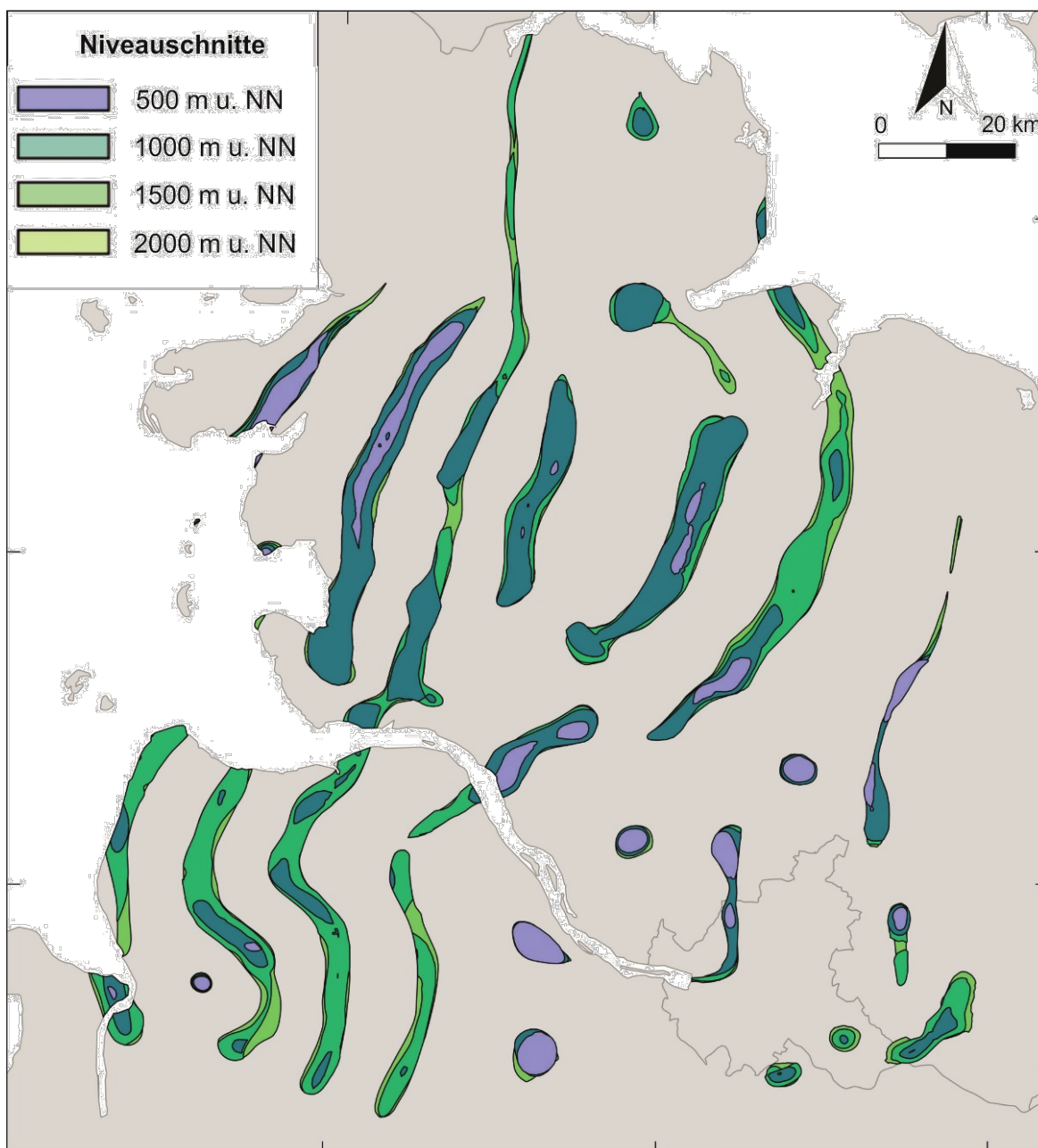


Abbildung 3-5: Überarbeitete Niveauschnitte der auf dem Festland liegenden Doppelsalinare im Glückstadt-Graben

3.3.4 InSpEE-Datenbank und Informationssystem

Im Vorgängerprojekt InSpEE wurde eine umfangreiche SQL-basierte Datenbank erstellt (Pollok et al. 2016), die nun mit den neuen Geometrien und erhobenen Daten der Doppel- und Mehrfachsalinare aktualisiert wurde. Folgende Parameter wurden erneuert:

- Geometrien (Shapes der Maximalausdehnung, Niveauschnitte, Kulminationspunkte)



- Strukturbeschreibungen: Strukturtop (m u. NN / GOK), Länge x Breite (km), etc.
- Internbau: Neue Erkenntnisse zur Verteilung des Wirtsgesteins
- Untersuchungsgrad: Informationen über vorher nicht berücksichtigte Bohrungen, die durch die Datenrecherche erschlossen werden konnten
- Literatur: Ergänzungen der Literatureinträge wurden vorgenommen

Als Planungs- und Informationsgrundlage wurde in InSpEE ein Informationssystem aufgebaut, in das die im Verbundvorhaben erarbeiteten Daten und Informationen integriert wurden und das über eine Internet-Kartenanwendung der Öffentlichkeit zugänglich gemacht wurde (Gast & Riesenberg 2016). Darin sind strukturgeologische Beschreibungen zu den einzelnen Salzstrukturen sowie Kavernenbau-relevante Eigenschaften enthalten. In Form eines kompakten Steckbriefs werden diese Strukturinformationen im öffentlichen Informationssystem angeboten. Das Informationssystem umfasst neben Niveauschnittkarten, Informationen über die Tiefenlage von Salzstrukturen auch das Alter der strukturbildenden Salinare, die Mächtigkeit der Salzstrukturen (Höhenunterschied von Strukturoberfläche und Salinarbasis) sowie weitere strukturbeschreibende Merkmale. Ferner werden den Nutzern zusätzliche Informationen und weiterführende Literaturverweise in Form von Datenblättern zur Verfügung gestellt. Die Steckbriefe und Geometrien wurden im Online-Kartendienst aktualisiert. Das Informationssystem ist über den Geoviewer-Service der BGR-Webseite abrufbar.

3.4 Erarbeitung und Auswertung von geologischen 3D-Modellen für Doppelsalinare

3.4.1 Datenbasis und 3D-Modell der Salzmauer Heide

Über 350 der in das Modell aufgenommenen Bohrungen befinden sich in und im näheren Umfeld der Salzmauer Heide. Obwohl viele dieser Bohrungen nur den Top der Salzstruktur aufgeschlossen haben, ist der Erkundungsgrad der Salzmauer Heide hinreichend gut, um ein detailliertes geologisches 3D-Modell der Salzmauer anzufertigen. Die bereits vorhandene Salzstrukturumhüllende aus dem StörTief-Modell wurde modifiziert. Die Fläche der Zechstein-Basis wurde in Bereichen mit Bohrungsdaten, in den Salzmauerabschnitten von Marne bis Hennstedt, bis zu einer Tiefe von 2.200 m u. NN modelliert. Daneben wurde der Top der basalen Zechsteineinheiten, welche aus Zechsteinkalk bis Basalanhydrit bestehen, in Bereichen bearbeitet, in denen diese nachgewiesen wurden (siehe Kapitel 3.4.2.4).

3.4.1.1 Modellerstellung mit openGEO

Die Modellierungsarbeiten wurden mit dem Programm openGEO durchgeführt. OpenGEO basiert auf einem grafischen CAD-Kern und wird innerhalb der BGR mit Hilfe des Ingenieurbüros bicad (Detlef Schlüter) weiterentwickelt. Dieses Modellierungsprogramm eignet sich sowohl als Datenspeicher als auch für die Modellierung komplexer geologischer Strukturen. Remeshing oder Neutriangulierung von Modellflächen zwecks Schaffung einer harmonischen Dreiecksvernetzung erfolgten mit dem Programm GINA_OGS (Kunz et al. 2017).



3D-Flächen in openGEO basieren auf einem formgebenden Liniengerüst. Das Liniengerüst setzt sich u. a. aus Isolinen, Schichtgrenzen und Ausbissen zusammen, die sich aus den Ausgangsdaten ergeben. Durch zusätzliche Hilfslinien werden diese Linien miteinander verbunden und der konstruierten Fläche wird auf diese Weise eine bestimmte Form gegeben. Die Schnittpunkte zwischen den Linien des Liniengerüsts werden mit sogenannten multiplen Punkten verbunden. Das Verschieben eines Punktes führt zur Verschiebung der zwei davon betroffenen Linien. Die Konstruktionslinien sind auf diese Weise miteinander verbunden und erzeugen geschlossene Umrandungen. Innerhalb dieser geschlossenen Umrandungen findet die Triangulation von Flächen statt. Durch die 3D-Triangulation wird die Grenzfläche (Umhüllende) einer bestimmten Modelleinheit erzeugt.

3.4.1.2 Konsistenzprüfung der Eingangsdaten

Bei der Konsistenzprüfung der Eingangsdaten fiel auf, dass nicht alle Zechstein und Rotliegend-Schichteinheiten der aufgenommenen Bohrungen innerhalb der Salzstrukturumhüllenden des Störtief-Modells des LLUR lagen (Abbildung 3-6A). Für die korrekte Modellierung der Internstrukturen wurde die Salzstrukturumhüllende durch die Anpassung an die Bohrungen modifiziert.

Tabelle 3-1: Stratigraphische Gliederung der Schichtenfolge der Salzmauer Heide

Nach Deecke (1949) auf der linken Seite und nach der Zechstein Stratigraphie nach Richter-Bernburg (1955) und Bornemann et al. (2008) auf der rechten Seite

Schichtenfolge der Salzmauer Heide nach der Zechstein-Stratigraphie nach Deecke (1949)		Zechstein-Stratigraphie nach Richter-Bernburg (1955) und Bornemann et al. (2008)	
Oberer Zechstein	Älteres Steinsalz	Basissalz (z2BS), Hauptsalz (z2HS)	Steißfurt-Formation (z2)
	Basalanhydrit	Basalanhydrit (z2BA)	
Mittlerer Zechstein	Stinkschiefer	Steißfurt-Karbonat (z2SK)	
	Anhydrit mit karbonatischen Einlagerungen	Werra-Anhydrit (z1WA)	Werra-Formation (z1)
	Anhydrit		
Blasenschiefer bzw. Anhydrit-Knotenschiefer			
Unterer Zechstein	Zechsteinkalk	Zechsteinkalk (z1ZK)	



Der Abteufzeitraum der bearbeiteten Bohrungen umfasst mehr als ein Jahrhundert und es war des Öfteren notwendig, die Schichtenverzeichnisse der aktuellen stratigraphischen Nomenklatur anzugleichen. Für Änderungen im Deckgebirge diente die stratigraphische Tabelle Deutschlands (DSK 2012) als Bezug. In den Salzstrukturen wurden vor allem Zechstein-Einheiten der Werra- und Staßfurt-Formation erbohrt, die bis Mitte der 1950er Jahre in Unteres, Mittleres und Oberes Zechstein gegliedert wurden (Tabelle 3-1, Fulda (1923) und Deecke (1949)). Die Schichtenfolgen wurden den äquivalenten Zechstein-Einheiten nach Richter-Bernburg (1955) und Bornemann et al. (2008) zugeordnet.

3.4.1.3 Modelleinheiten

Zusätzlich zu den importierten lithostratigraphischen Modelleinheiten aus den geologischen 3D-Modellen der Länder (siehe 3.2.3) wurden Modelleinheiten modifiziert bzw. neu modelliert:

- Geländeoberkante (importiert)
- Basis Tertiär (importiert)
- Basis Oberkreide (importiert)
- Basis Unterkreide (importiert)
- Basis Oberjura (importiert)
- Basis Mitteljura (importiert)
- Basis Unterjura (importiert)
- Basis Keuper (importiert)
- Basis Buntsandstein (importiert)
- Salzstrukturumhüllende (modifiziert)
- Interne Basis Zechstein bzw. Rotliegend-Zechstein Übergang (neu)
- Top Basale Zechsteineinheiten (neu)
- Basis Zechstein (importiert)

3.4.1.4 Salzstrukturumhüllende von Heide

Alle lithostratigraphischen Einheiten des Rotliegend und des Zechsteins werden der Salzstruktur Heide zugeordnet, inklusive des sekundär durch Ablaugung im Dachbereich der Salzstruktur entstandenen Rotliegend-Residuums bzw. des Zechstein-Hutgesteins. Sogenannte Schuttbildungen, die aus brekzierten Gesteinen des Rotliegend, Zechsteins oder des Deckgebirges bestehen und limnischen Ablagerungen, die sich am Top der Salzstruktur befinden, werden dem Deckgebirge zugerechnet (Abbildung 3-6).

Die Salzstrukturumhüllende des LLUR-Modells wurde horizontal automatisch alle 80 m geschnitten, um auf diese Weise Isolinien zu erzeugen. Diese wurden in einem sogenannten

Horizontalprofil an die Bohrungen angepasst. Die Baueinheiten Top Hutgestein bzw. Rotliegend Residuum der Bohrungen wurden mit sogenannten Leitachsen (formgebende Hilfslinien) an das Liniengerüst der Salzstrukturumhüllenden angebunden. Basierend auf den Linien, die durch multiple Punkte miteinander verbunden sind und somit Kacheln bilden, innerhalb derer die Triangulation erfolgt, werden die 3D-Flächen kreiert. Bei dieser Methode können Überschneidungen der Kacheln und Dreiecke mit ungünstigem Länge-Breite-Verhältnis entstehen. Um die invaliden Elemente aus dem Triangel-Netz zu entfernen, wurde die mit openGEO erzeugte 3D-Fläche mit dem Programm GINA_OGS remeshed (Kunz et al. 2017). Dabei wurden die Durchstoßpunkte der Bohrungen durch die Salzstrukturumhüllenden, sowie morphologische Kanten der Salzmauer in Scheitel-, Flanken- und Überhangsbereichen als Fixpunkte festgesetzt. Die entstandene 3D-Fläche weist im Vergleich zur Originalfläche kleinere Dreiecke mit Kantenlängen von ca. 150 – 200 m zu vorher ca. 300 m auf und alle Einheiten der Salzstruktur liegen nach der Bearbeitung innerhalb der Salzstrukturumhüllenden (Abbildung 3-6).

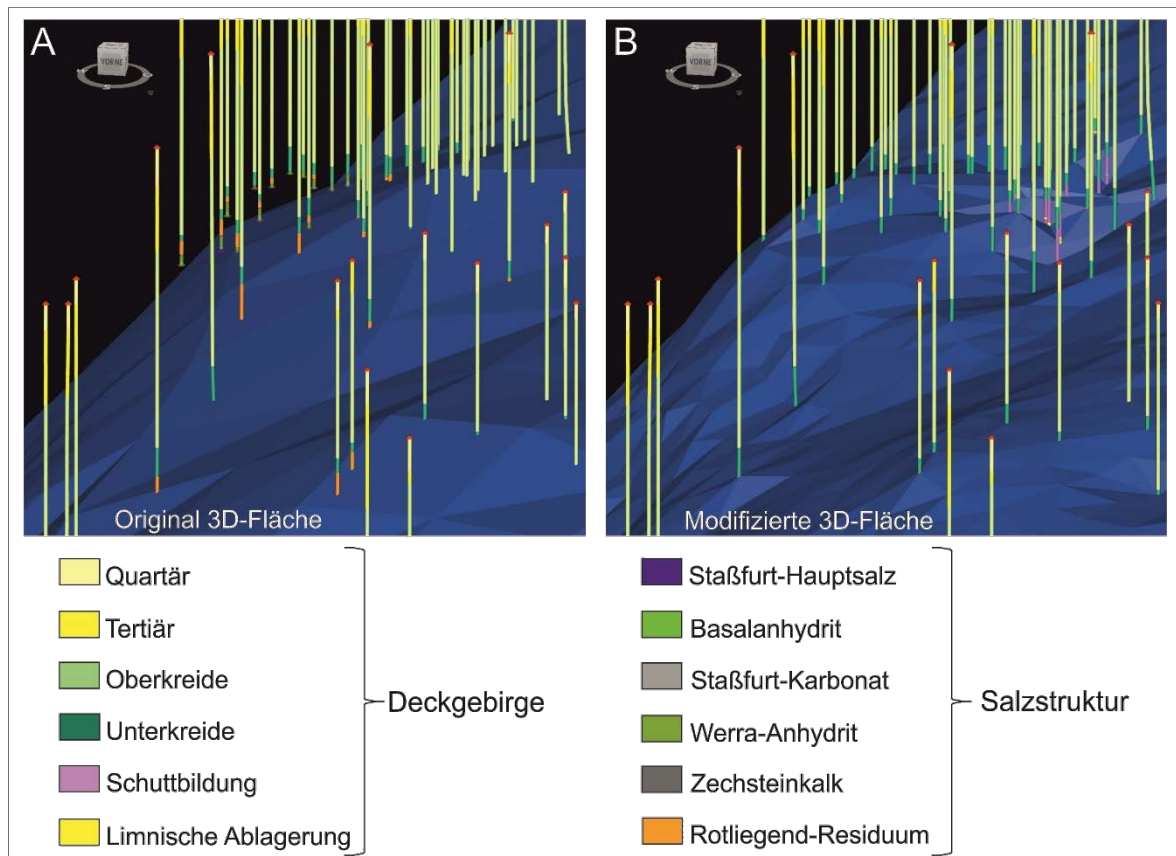


Abbildung 3-6: Salzstrukturumhüllende der Salzmauer Heide mit Bohrungen

A: Original 3D-Fläche aus dem StörTief Modell des LLUR, B: an die Bohrergergebnisse angepasste 3D-Fläche des BGR-Modells, Legende der Bohrungen mit Zuordnung zu Deckgebirge bzw. Salzstruktur, Blickrichtung nach Nordnordwest



3.4.1.5 Stratigraphische Interpretation

Generell sind im Kern der Salzmauer Rotliegendgesteine verbreitet, während Zechsteineinheiten randlich vertreten sind. Das Rotliegendesalinar, welches in den Kernbeschreibungen als Haselgebirge bezeichnet wird, weist ein vermengtes Gefüge aus Steinsalz und siliziklastischen Bestandteilen sowie eine charakteristische Rotfärbung auf. Innerhalb des relativ homogenen Rotliegendesalinars sind in Heide keine Leithorizonte erkennbar. Am Top der Salzstruktur haben sich Residualgesteine (Rotliegend-Residuum) durch Ablaugung des Steinsalzes gebildet, die zwischen einigen Metern bis 150 m mächtig ausgebildet sind. Ausführliche makro- und mikroskopische Beobachtungen des Rotliegendesalinars sowie geochemische und geomechanische Ergebnisse werden in Kapitel 3.6 beschrieben.

In 68 Bohrungen wurde der Übergang von Gesteinen des Rotliegendes zu Zechsteineinheiten durchteuft und in Abbildung 3-7 ist ein entsprechendes, schematisches stratigraphisches Profil dargestellt. In den meisten Bohrungen wurde dieser Kontakt mit Rotliegendes Residuum zu Zechsteinkalk (z1ZK) angetroffen. In sechs Bohrungen lag der Kontakt von Rotliegendes Residuum bzw. Rotliegendesalinar auf Basissalz/Hauptsalz des Zechstein 2 (Staßfurt-Formation) vor. Selten fiel Zechsteinkalk aus oder wurde nicht beschrieben und als tiefste Zechsteineinheit wurde Werra-Anhydrit (z1WA) erbohrt.

Die Basis der Zechstein-Formation in der Salzmauer Heide setzt sich aus Zechsteinkalk (z1ZK), Werra-Anhydrit (z1WA), Staßfurt-Karbonat (z2SK) und/oder Basalanhydrit (z2BA) zusammen. Diese Schichten werden im Folgenden als basale Zechsteineinheiten benannt. Top oder Basis der basalen Zechsteineinheiten können im Bohraufschluss z. B. erosionsbedingt fehlen. Die hangende Grenze bildet der Kontakt zum Basissalz bzw. Hauptsalz der Staßfurt-Formation. Zechstein-Konglomerat und Kupferschiefer fehlen in Heide und wurden nur in einer Bohrung anhand von geophysikalischen Logs beschrieben, die allerdings keinen charakteristischen Gamma Ray Peak für den Kupferschiefer zeigen. Schon Schott (1942) und Deecke (1949) postulierten eine Schwellenposition für das Gebiet Heide-Oldenswort-Osterby, die einen Ausfall des Kupferschiefers durch die paläogeographische Position erklären könnte. In Legler et al. (2005) wurden dünne Steinsalz-Ablagerungen anstelle von Kupferschiefer in der Nordsee-Bohrung C1 beschrieben, was mit einer paläogeographischen Position getrennt vom Zechsteinbecken innerhalb einer flachen Bucht hinter einer Schwelle erklärt wurde. Im Rahmen der Kernmaterial-Sichtung für InSpEE-DS wurde ein ähnlich ausgeprägter Rotliegendes-Zechstein-Übergang in einer Bohrung im nordwestlichen Kissenfuß der Salzstruktur Oldenswort aufgenommen. Auch in dieser Bohrung fehlen Zechstein-Konglomerat und Kupferschiefer und werden von einer ca. 30 cm mächtigen Steinsalzlage vertreten.

In acht Bohrungen der Salzmauer Heide wurde die Schichtenfolge der basalen Zechsteineinheiten komplett durchteuft. In all diesen Bohrungen existieren in diesem Bereich Strukturwerte (meist nur das Schichteinfallen) sowie die Bohrpfade. Anhand dieser Informationen konnte eine vage Abschätzung der bankrechten Mächtigkeit aus den erbohrten Mächtigkeiten errechnet werden. Die durchschnittliche Mächtigkeit beträgt demnach ca. 55 m. Die Schichtenverzeichnisse wurden an die aktuelle Zechstein-Stratigraphie angeglichen (Tabelle 3-1).

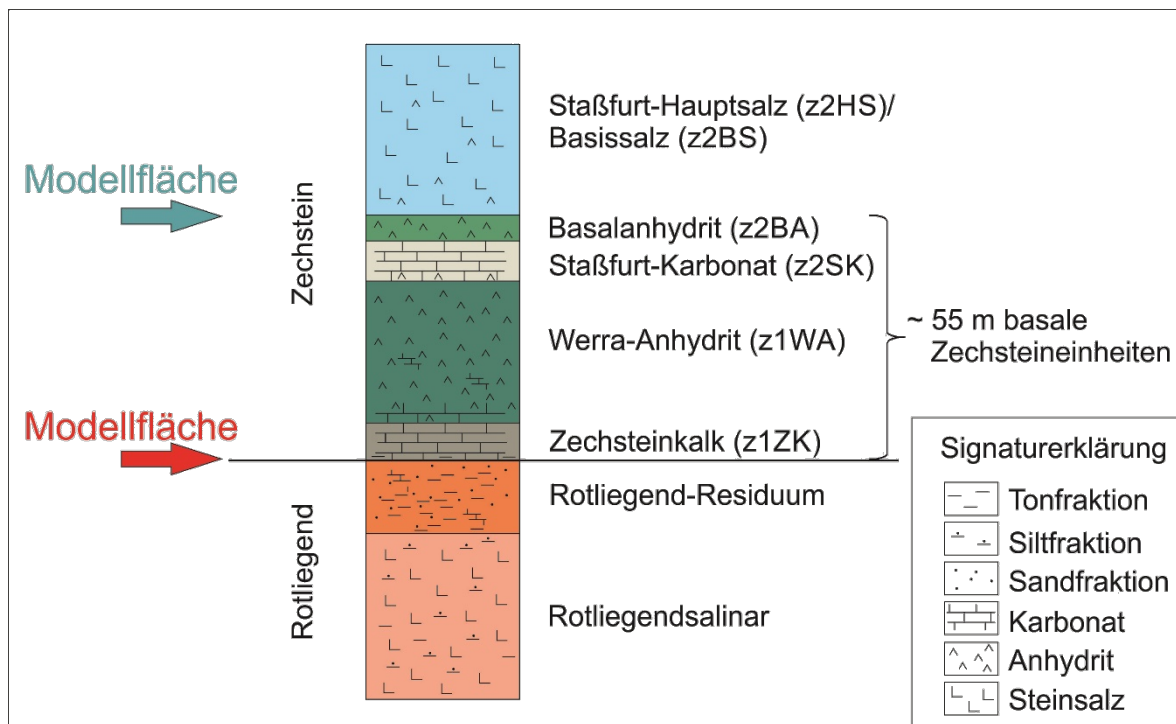


Abbildung 3-7: Schematisches Profil der Rotliegend- und Zechsteingesteine in Heide nahe der Rotliegend-Zechstein-Grenze mit Darstellung der Modellflächen

Nachfolgend wird eine Kurzbeschreibung der basalen Zechsteineinheiten in Heide nach Schott (1942) aufgeführt:

- Zechsteinkalk (z1ZK): 4 – 20 m, im Durchschnitt 8 m mächtig, grauer, teils bituminöser Kalkstein mit roten Mergellagen im Liegenden im Kontakt zum Rotliegenden
- Werra-Anhydrit (z1WA): 25 – 37 m, im Durchschnitt 31 m mächtig, an der Basis feingeschichteter, dichter Kalkstein mit Anhydritknötchen. Zum Hangenden geht der Karbonatanteil zurück und der Anhydritgehalt steigt innerhalb der Feinschichtung (Linienanhydrit), am Top karbonatfrei
- Staßfurt-Karbonat (z2SK): 5 – 18 m, im Durchschnitt 9 m mächtig, kalkiger Anhydrit mit rückläufigem Anhydritanteil zum Top (Hauptdolomitregion), am Top anhydritfreier, bituminöser Kalkstein mit Feinschichtung (Stinkschiefer)
- Basalanhydrit (z2BA): 2 – 13 m, im Durchschnitt 6 m mächtiger Anhydrit

Das „ältere Steinsalz“ des oberen Zechsteins wurde zu Basissalz/Hauptsalz der Staßfurt-Formation interpretiert (Tabelle 3-1). Höhere Zechsteineinheiten wurden nur in neun Bohrungen erteuft und schlossen Kieseritische Übergangsschichten (z2UE) bis Anhydritmittelsalz (z3AM) der Leine-Formation auf.

3.4.1.6 3D-Modellierung und Strukturinterpretation

Als Grundlage für die 3D-Modellierung der Zechsteinbasis-Fläche und des Tops der basalen Zechsteinseinheiten wurden erstrangig die Bohrdaten herangezogen. Hilfsprofilschnitte, die vor allem entlang von Bohrungen verlaufen, wurden ungefähr senkrecht und parallel zum Streichen der Salzmauer erstellt. In horizontalen Profilschnitten wird der 3D-Raum in einem bestimmten Abstand geschnitten und die jeweiligen Durchstoßpunkte der Bohrungen und Hilfsprofile für diese Tiefe angezeigt (Abbildung 3-8). Auf diese Weise wurden die Isolinien für die 3D-Flächen erzeugt und im freien 3D-Raum auf Plausibilität überprüft. Durch Hinzufügen von Hilfslinien (Leitachsen) wurden das Liniengerüst und die 3D-Flächen erstellt.

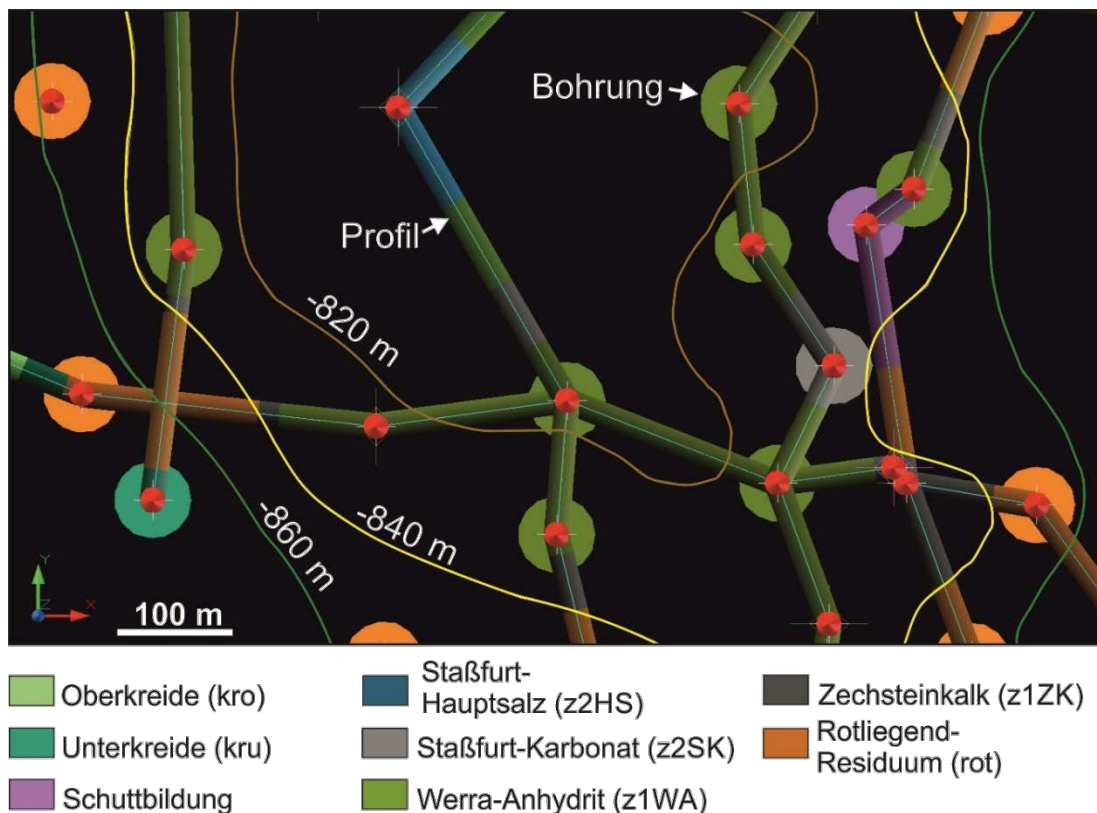


Abbildung 3-8: Horizontalprofil für die Tiefenlage 840 m u. NN mit der dazugehörigen Isolinie Basis-Zechstein (gelb), den Isolinien oberhalb (braun) und unterhalb der Schnittebene (grün), sowie den Durchstoßpunkten der Bohrungen und den Profilschnitten für diese Tiefe

Im Folgenden werden die fünf Teilbereiche der Salzmauer Heide (Marne, Meldorf, Heide, Hennstedt und Süderstapel) von Süden nach Norden dargestellt. Die Segmentierung der Teilbereiche basiert auf der Morphologie des Dachbereichs der Salzstruktur und wird in Kapitel 3.3.2 aufgezeigt. Um die Internstrukturen aufzuzeigen, wird, außer für Süderstapel, jeweils ein repräsentativer Profilschnitt pro Segment dargestellt, dessen Lage in Abbildung 3-9 zu entnehmen ist.

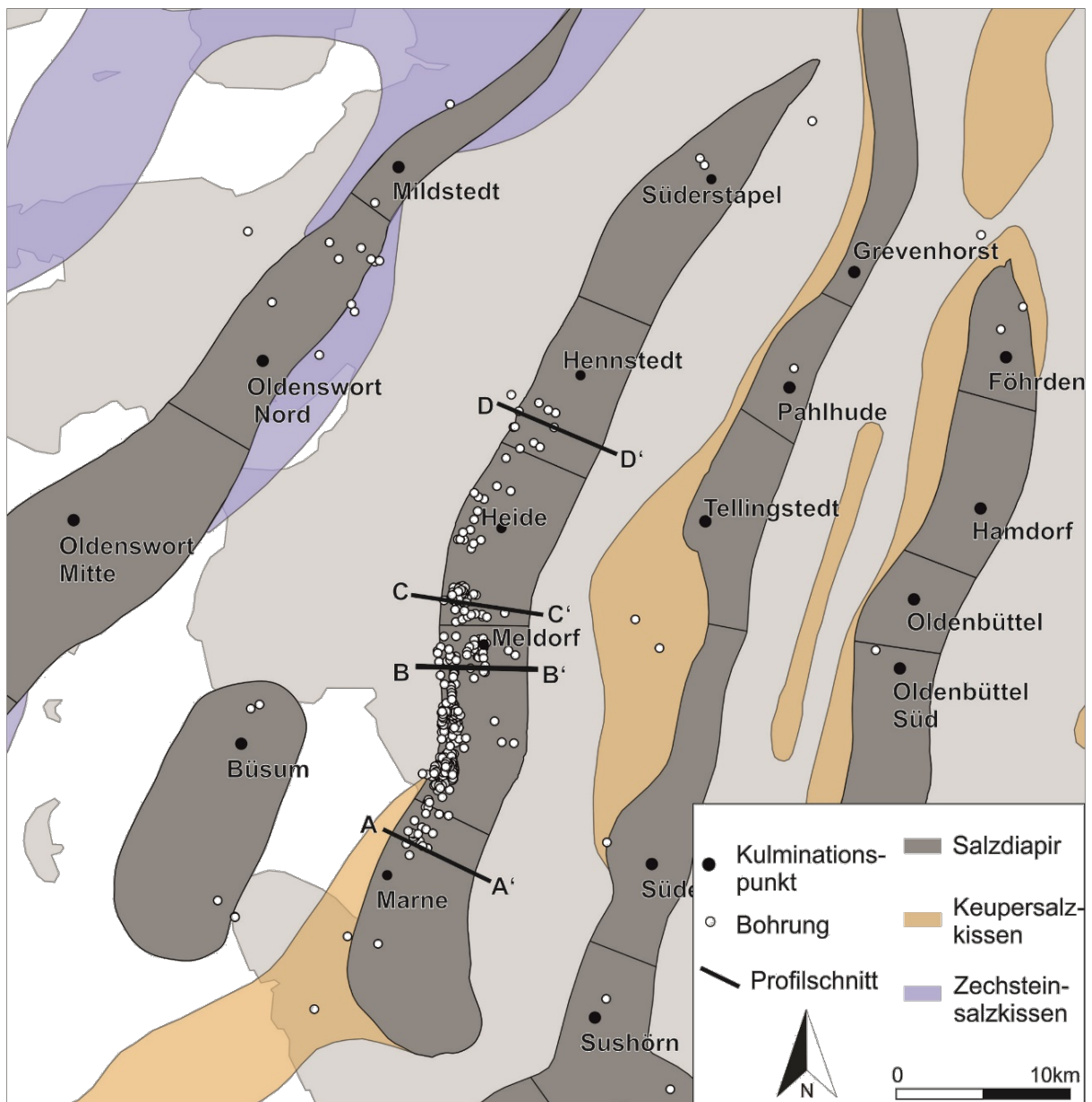


Abbildung 3-9: Karte der Salzstrukturen im Bereich der Salzmauer Heide mit Lage der vier Profilschnitte A – D (Abbildung 3-10, Abbildung 3-12, Abbildung 3-14 und Abbildung 3-18), Kulminationspunkten, Bohrungen und Unterteilung in Segmente

Für diese vier Profilschnitte (Abbildung 3-10, Abbildung 3-12, Abbildung 3-14 und Abbildung 3-18) wurden maximal 1.500 m entfernte Bohrungen auf die Profile projiziert. Neben den Bohrungsdaten wurden die Profilschnitte nach vertikalen Durchstoßpunkten mit den folgenden 3D-Flächen im 3D-Modell konstruiert: modifizierte Salzstrukturumhüllende (siehe Abbildung 3-6), Basisflächen der Deckgebirgsschichten sowie Störungsflächen aus beiden Modellen des LLUR (siehe Kapitel 3.2.3.1). Des Weiteren basieren die Profilschnitte auf den vertikalen Durchstoßpunkten mit den neu modellierten 3D-Flächen der Rotliegend-



Zechstein-Grenze und dem Top der basalen Zechsteineinheiten. Innerhalb der Salzstruktur wurde unterhalb 2.000 m u. NN Rotliegend und Zechstein aufgrund fehlender geologischer Informationen generalisiert, während oberhalb von 2.000 m u. NN, basierend auf Bohrdaten das Rotliegend in Rotliegend-Residuum und Rotliegendsalinar differenziert werden konnte. Einheiten des Zechsteins wurden in Hutgestein, basale Zechsteineinheiten (z1ZK, z1WA, z2SK und/oder z2BA), Einheiten der Staßfurt-Formation (z2) und Einheiten der Leine-Formation (z3) unterteilt. Begonnen wird jeder Teilbereich mit einem kurzen Abriss der Salzstrukturgenese, wie sie sich aus den jeweiligen Randsenken-Sedimenten erschließt. Generell ist festzustellen, dass die zeitliche Entwicklung der Salzmauer Heide von Süden nach Norden erfolgte. Die Kissenbildung setzte in Marne im Mittleren Buntsandstein und in Süderstapel erst im Keuper ein. Auch die diapirische Phase setzte im Süden eher als im Norden und jeweils im Ostflankenbereich vor dem Westflankenbereich ein.

Marne

Marne ist die südlichste Struktur der Salzmauer Heide. Südwestlich schließt sich das Keupersalz-kissen Spitzsand an, welches durch eine Bohrung nachgewiesen wurde.

Die Salz-kissenbildung der permischen Salze erfolgte im Mittleren Buntsandstein und die diapirische Phase startete im Mittleren Keuper erst im Ostflankenbereich und später im Westflankenbereich. In der Oberkreide und im Alttertiär kam es zu weiterer Salz-mobilisation und Aufwölbung des Diapirdaches. Die randlichen Keupersalze wurden ebenfalls mobilisiert und an die Permstruktur angefügt (Jürgens 1986).

Alle 26 Bohrungen im Bereich Marne liegen auf dem westlichen Strukturteil (Abbildung 3-9). Das Dach der Salzstruktur ragt im Westen höher auf (ca. 1.000 m u. NN) als im Osten (Abbildung 3-10). Da keine Bohrungen im östlichen Strukturteil existieren, ist die Verbreitung des Rotliegend- und Zechsteinsalinars dort unklar.

Die Rotliegend-Zechstein-Grenze wurde in einer Bohrung im Bereich des Profilschnitts A durchteuft und hat einen Einfallswinkel von ca. 60°. Die Einfallsrichtung ist zwar durch die Strukturwerte nicht eindeutig, anhand der Schichtenabfolgen in den umliegenden Bohrungen wird aber ein Einfallen nach Osten angenommen. Unter Rotliegend-Residuum wurde Rotliegendsalinar erbohrt, welches mit einer gestörten Kontaktzone auf dem Hauptsalz der Zechstein-Formation liegt. Westlich dieser Bohrung wurden Kieseritische Übergangsschichten unter Hauptsalz erbohrt, welche gemeinsam eine überkippte Abfolge darstellen. Da keine weiteren Zechstein-Einheiten aufgeschlossen wurden, ist der restliche Westteil bis zur Flanke als ungegliedertes Zechstein dargestellt. In diesem Profilschnitt haben die Zechstein-Formationen im westlichen Strukturteil eine horizontale Verbreitung von ca. 2.200 m in einer Tiefe von 2.000 m u. NN bei einer Gesamtbreite des Diapirs von ca. 5.300 m (Abbildung 3-10).

Die 3D-Fläche der Zechsteinbasis innerhalb des Diapirs wurde im Westflankenbereich anhand der Bohrdaten am Top modelliert und bis in 2.200 m u. NN nahezu saiger mit leichtem Einfallen nach Osten extrapoliert. Die Rotliegend-Zechstein-Grenze fällt 1.800 m weiter nördlich mit ca. 30° nach Osten ein, wobei wiederum die basalen Zechsteineinheiten fehlen (Abbildung 3-11). Dazwischen wurde die 3D-Fläche extrapoliert. Im Ostteil liegen keine Bohrdaten vor, daher wurde die östliche 3D-Fläche zwar konstruiert, aber obliegt einer großen Unsicherheit.

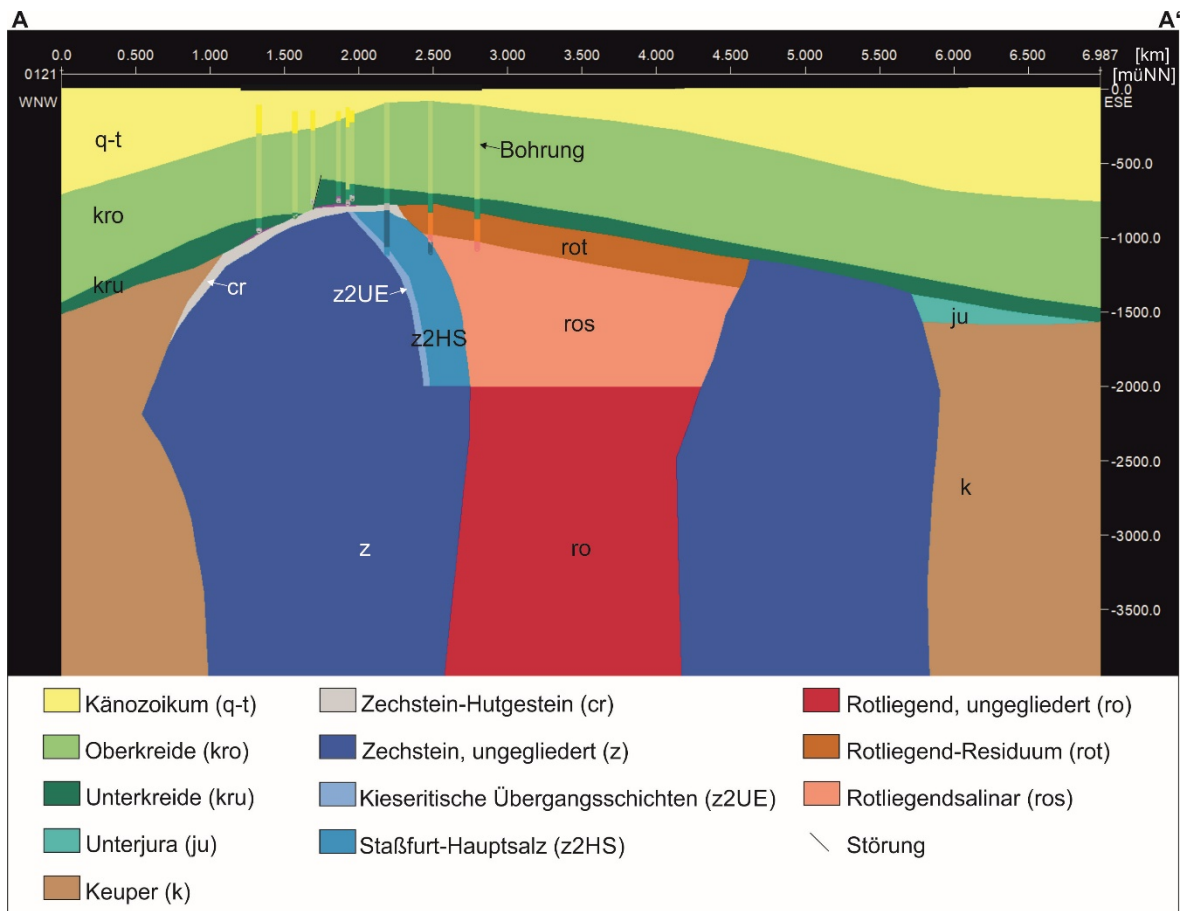


Abbildung 3-10: Profilschnitt A im Bereich Marne, maximal 1.500 m weit entfernte Bohrungen sind auf den Schnitt projiziert

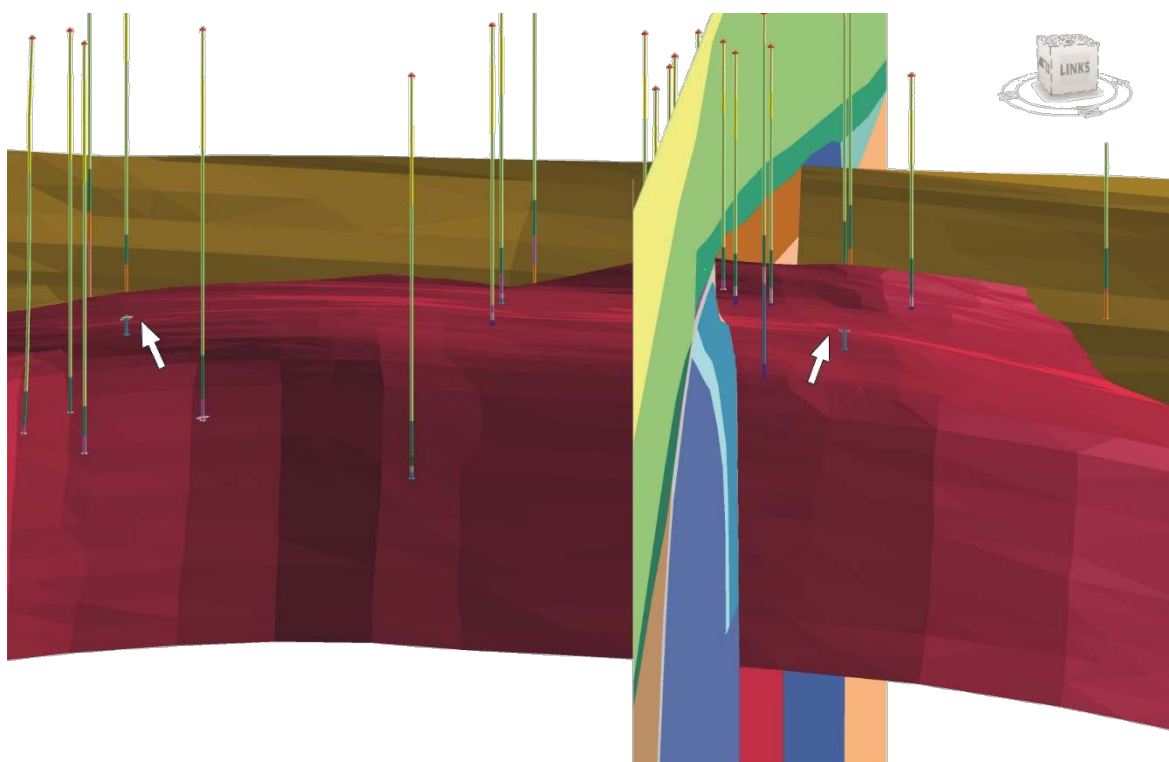


Abbildung 3-11: Aufnahme aus dem 3D-Raum im Bereich Marne mit den 3D-Flächen der westlichen Zechstein-Basis (rot) im Vordergrund und der östlichen im Hintergrund (ocker), zwei Bohrungen durchteufen die Rotliegend-Zechstein-Grenze (Pfeile), nahezu parallel zur Blickrichtung nach Ost-südost verläuft der Profilschnitt A.

Meldorf

Der Strukturteil Meldorf liegt zwischen den Segmenten Marne und Heide. Die Kissenbildung in Meldorf erfolgte im Muschelkalk. Die diapirische Phase begann, durch mächtige sekundäre Randsenken ersichtlich, im Ostteil bereits im Mittleren Keuper bis Unterjura während der Westteil erst im Oberen Keuper durchbrach und bis in den Oberjura Salze aufdrängen. In der Oberkreide und im Alttertiär kam es zu Nachschubbewegungen und zur Bildung eines Scheitelgrabens im Dachbereich (Best 1985). Das Diapirdach drang bis in eine Tiefe von 500 m u. NN auf.

Im Abschnitt Meldorf wurden 237 der 354 Bohrungen in der Salzmauer Heide abgeteuft (Abbildung 3-9). Von diesen Bohrungen liegen ca. 200 im westlichen Teil, von denen viele nur bis zum Hutgestein gebohrt wurden. Das Kavernenfeld Heide und weitere Bohrungen (insgesamt ca. 30) liegen im nördlichen, zentralen Bereich von Meldorf. Weitere fünf Bohrungen wurden im Ostteil abgeteuft. Dreizehn Bohrungen durchteufen die Rotliegend-Zechstein-Grenze, eine davon im östlichen Strukturteil. Der Profilschnitt B im Bereich Meldorf (Abbildung 3-12) liegt ca. 7 km nördlich des Profilschnittes A.

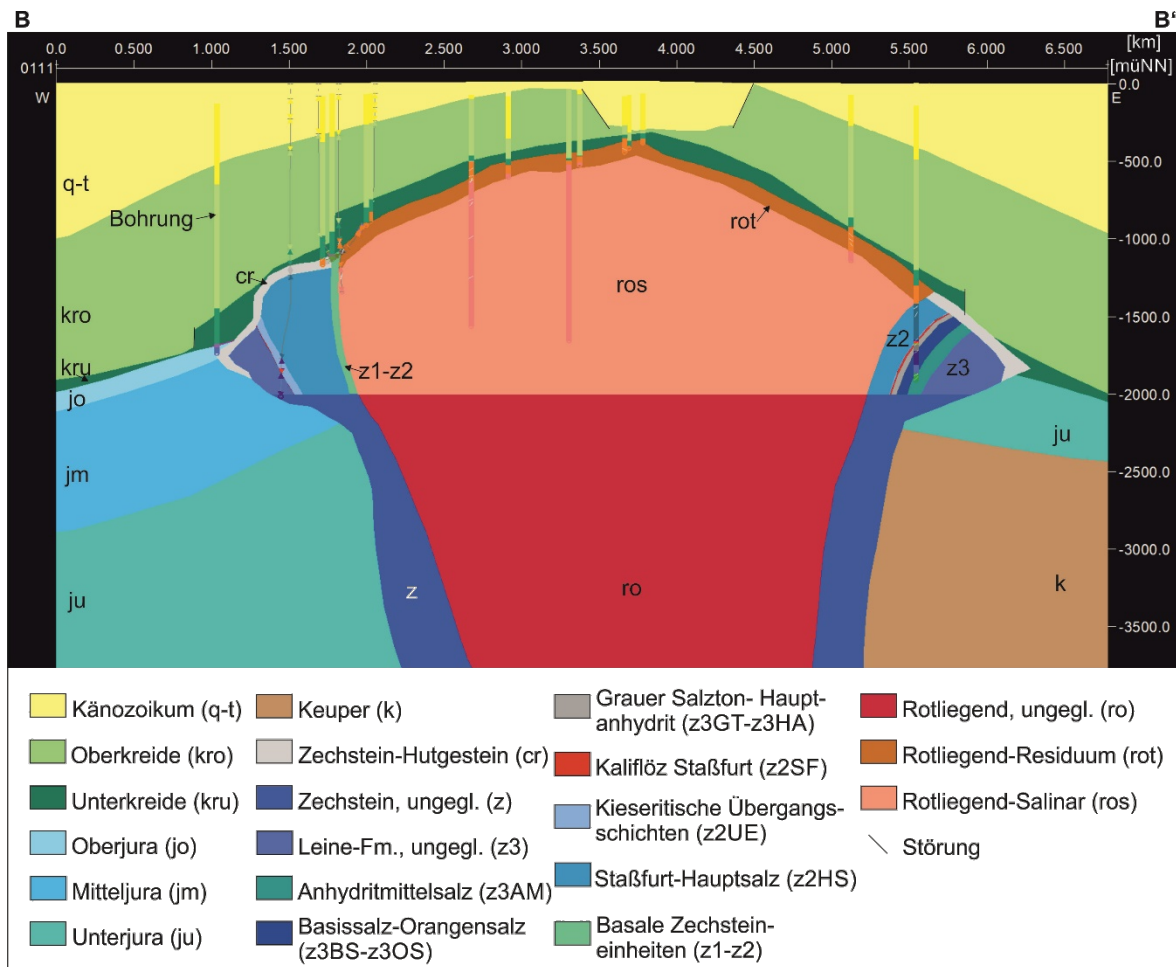


Abbildung 3-12: Profilschnitt B im Bereich Meldorf, maximal 1.500 m weit entfernte Bohrungen sind auf den Schnitt projiziert

Die Salzstrukturumhüllende weist in diesem Abschnitt in beiden Flanken Überhänge bis ungefähr 2.000 m u. NN auf, die in jurassischen und unterkretazischen Sedimenten des Nebengebirges liegen. Es existieren Bohrungen sowohl in den randlichen als auch in den zentralen Diapirbereichen. Am Top über der Salzstruktur ist in Gesteinen des Känozoikums und der Oberkreide ein Scheitelgraben mit einer Sprunghöhe von ca. 300 m und einer Breite von ca. 800 m an der Basis des Grabens ausgebildet. An der Westflanke wurden neben saiger stehenden basalen Zechsteineinheiten Staßfurt-Hauptsalz (z2HS), kieseritische Übergangsschichten (z2UE), Kaliflöz Staßfurt (z2SF) und Steinsalz der Leine-Formation erbohrt. Die Rotliegend-Zechstein-Grenze ist in der Morphologie des Dachbereichs abgebildet. Die basalen Zechsteineinheiten liegen vom Zechsteinkalk, über Werra-Anhydrit und Staßfurt-Karbonat bis zum Basalanhydrit vor und haben eine bankrechte Mächtigkeit von ca. 63 m.

Im Ostteil wurde der Kontakt Rotliegend zu Zechstein mit Rotliegend-Residuum über Staßfurt-Hauptsalz erbohrt. In Richtung der Ostflanke wurden ebenfalls jüngere Gesteine der Staßfurt- und Leine-Formationen bis zum Anhydritmittelsalz (z3AM) durchteuft (Abbildung 3-12). Die Rotliegend-Zechstein-Grenze fällt im Ostteil mit ca. 35° nach Westen ein,



während die Zechsteinschichten zwischen 30 bis 50° einfallen. Im zentralen Bereich der Salzstruktur des Schnittes B liegen zwei Bohrungen des Heide Kavernenfeldes, die das Rotliegendesalinar bis in eine Tiefe von über 1.500 m u. NN aufschließen. Die petrographische Zusammensetzung des Rotliegendesalinars ist in Kapitel 3.6 beschrieben. Im östlichen Dachbereich ist die Rotliegend-Zechstein-Grenze nicht anhand der Morphologie auszumachen.

Im Westen sind in der Profilebene maximal 800 m und im Osten maximal 1.000 m Zechsteinsalinar an den Flanken verbreitet, während das Rotliegendesalinar ca. 3.900 m im Zentrum des Diapirs einnimmt. Im Vergleich zum südlich gelegenen Strukturteil Marne (Profilschnitt A) hat sich die Zechsteinverbreitung an der Westflanke in Profilschnitt B damit ungefähr halbiert. Daraus lässt sich folgern, dass die Salzaufstiegsbereiche für das Rotliegend- und Zechsteinsalinar entlang der Salzmauer nicht identisch sind und sich daher die Akkumulationen sowie Verbreitung dieser Einheiten lateral unterscheiden.

Die Zechstein-Basis im Westteil ist im Bereich Meldorf weitestgehend steilstehend, welches direkt durch Bohrungen, die den Durchgang durchteufen oder durch eng nebeneinanderstehenden Bohrungen mit Rotliegend bzw. Zechstein-Einheiten belegt ist (Abbildung 3-13, schwarzer Pfeil). Ausnahmen bilden der angrenzende Bereich an Marne im Süden, in dem der Rotliegend-Zechstein-Übergang flach nach Osten einfällt sowie ca. 4 km weiter nördlich, wo der Durchgang mit 10° bis 40° nach Westen einfällt (Abbildung 3-13, weiße Pfeile). Im letztgenannten Bereich wurden basale Zechsteineinheiten in fünf Bohrungen erbohrt, die ein Einfallen mit ca. 45° nach Westen anzeigen. Das Einfallen nach Westen spricht für ein leichtes „Überfließen“ des Zechsteinsalinars über die Rotliegend-Einheiten, welches nur dort in der gesamten Doppelsalinar-Struktur nachgewiesen werden konnte. Weiter nördlich wurden in zwei weiteren Bereichen basale Zechsteineinheiten angetroffen. In drei Bohrungen in denen Strukturwerte aufgenommen wurden, zeigt sich ein Einfallen von ca. 50° am Top, welches in die Tiefe bis auf 90° ansteigt. Eine geneigte Bohrung nahe des Profilschnitts B hat die dort saiger stehenden basalen Zechsteineinheiten komplett durchörtert. Der steilstehende Charakter der westlichen Zechstein-Basis ändert sich im Norden kurz vor dem Bereich Heide grundlegend von steil einfallend zu überkippt und aufgewölbt (siehe Heide).

Die östliche 3D-Fläche der Zechsteinbasis wurde anhand des Schichteinfallens in der Bohrung in Profilschnitt B modelliert und gibt ein steiles Einfallen wieder. Da keine andere Bohrung die Rotliegend-Zechstein-Grenze im Ostteil von Meldorf durchörterte, wurde die 3D-Fläche von Profilschnitt B nach Süden extrapoliert.

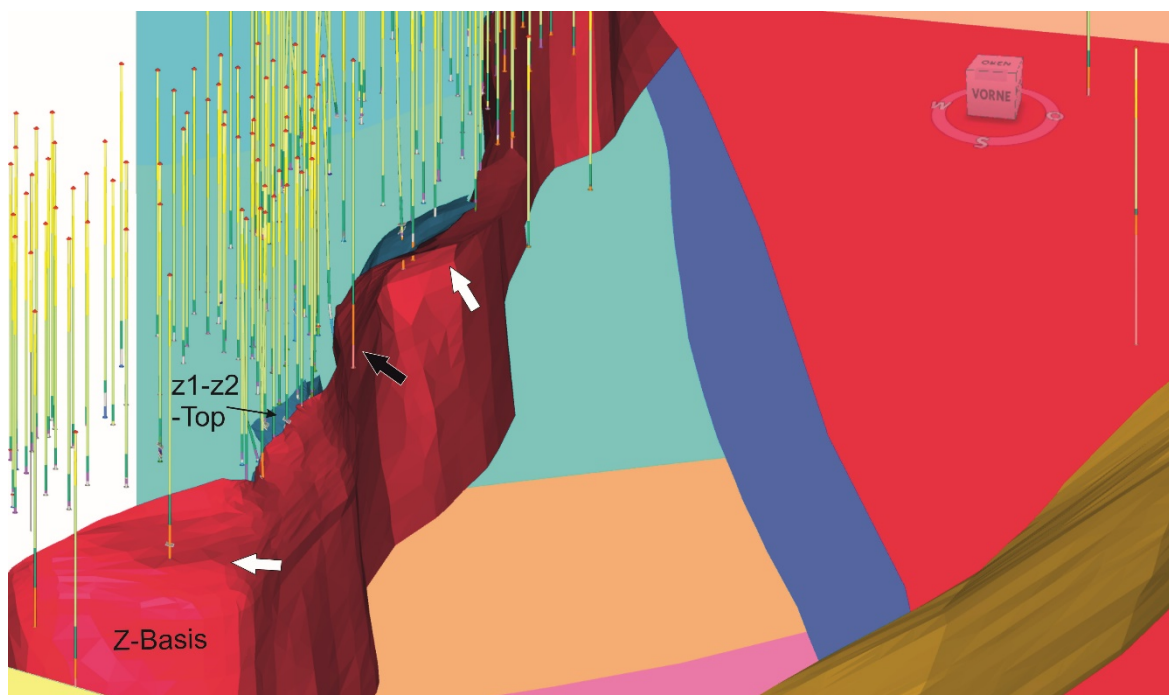


Abbildung 3-13: Aufnahme aus dem 3D-Raum im Bereich Meldorf mit den 3D-Flächen Basis Zechstein im West- (rot) und Ostteil (gelb) sowie Top basale Zechsteineinheiten (petrol). Weiße Pfeile weisen auf Bereiche, in denen die Rotliegend-Zechstein-Grenze nach Osten (im Süden) bzw. nach Westen (im Norden) einfällt, der schwarze Pfeil zeigt den Bereich von engstehenden Bohrungen an, in denen die basalen Zechsteineinheiten fehlen, im Hintergrund ist Profilschnitt B zu sehen, Blick nach Nordnordwest

Heide

Der Teilbereich Heide der Salzmauer liegt zwischen Meldorf im Süden und Hennstedt im Norden. Die Kissenbildung verlief im Unteren Keuper. Das Diapirstadium erfolgte im Ostteil im Mittleren Keuper bis Unterjura und im Westteil im Unterjura bis Mitteljura. Starke Nachbewegungen gab es im westlichen Teil in der Kreide und Alttertiär bis zum Miozän (Best 1985).

In der Salzstruktur Heide wurden über 70 Bohrungen abgeteuft, wovon nur eine im östlichen Strukturteil anzutreffen ist. Die meisten Bohrungen befinden sich im Westteil, im sogenannten „Rickelshof“, der das bedeutendste Erdölfeld im Bereich der Salzstruktur darstellte (Deecke 1949). Profilschnitt C im Bereich Heide (Abbildung 3-14) liegt 2,8 km nördlich des Profilschnittes B. Im zentralen Bereich über der Salzstruktur liegt wie im Strukturteil Meldorf (Profilschnitt B) ein Scheitelgraben. Der aus Rotliegend bestehende zentrale Dachbereich ragt ca. 400 m über den westlichen Flankenbereich auf und liegt bei ca. 500 m u. NN. In Richtung der Westflanke haben Bohrungen geringmächtiges (15 m bis 100 m) Rotliegend-Residuum auf überkippten, basalen Zechsteineinheiten angetroffen, wobei am Top der Aufwölbung in ca. 840 m u. NN und im nordwestlichen Bereich des Rickelshofs das Rotliegend-Residuum komplett abgetragen wurde. Über dem Rotliegend-Residuum wurden in kleinen Trögen oberjurassische bis unterkretazische „Schuttbildungen“ angetroffen. Die Schichten

aus Rotliegend-Residuum und basalen Zechsteineinheiten fallen am Top parallel zur Westflanke mit 45° nach Westen ein, während die basalen Zechsteineinheiten im Zentrum des Diapirs mit ca. 50° nach Osten einfallen. Die Rotliegend- und Zechsteinschichten der Bohrungen im zentralen Bereich der Aufdomung haben ein Einfallen von 10 bis 20°. Im älteren östlichen Diapirteil sind die basalen Zechsteinschichten und die Rotliegend-Zechsteingrenze ebenfalls überkippt angetroffen worden. In der Bohrung fallen sie mit ca. 30° nach Westen ein.

In der Profilebene sind an der Westflanke maximal 1.800 m und in der Ostflanke im Überhang maximal 1.700 m Zechsteineinheiten vertreten. Das Rotliegendesalinar nimmt im Kern in 2.000 m Tiefe ca. 1.800 m laterale Verbreitung ein und dehnt sich zum Top auf 4.100 m inklusive des Rotliegend-Überhangs im Westen aus.

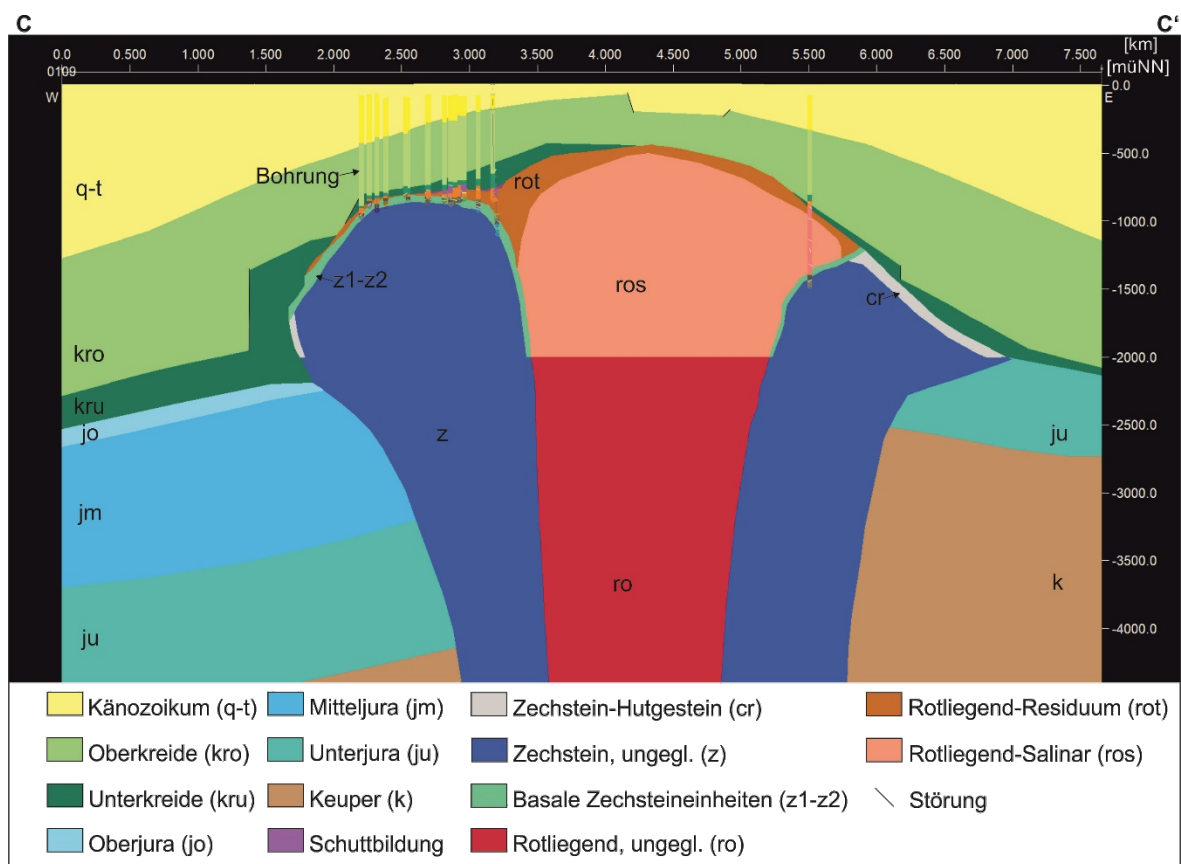


Abbildung 3-14: Profilschnitt C im Bereich Heide, maximal 1.500 m weit entfernte Bohrungen sind auf den Schnitt projiziert

Im Ostteil des Diapirs durchteufte eine Bohrung Rotliegend-Residuum über Rotliegendesalinar. Der direkte Kontakt zu den liegenden Zechsteinschichten wurde nicht gekernt. Allerdings schloss die Bohrung 20-30° einfallenden Zechsteinkalk, Werra-Anhydrit, Staßfurt-Karbonat und Basalanhydrit auf. Die östliche 3D-Fläche der Basis Zechstein wurde aus strukturellen Überlegungen nach Westen einfallend konstruiert und nach Norden analog zum westlichen Strukturteil ebenfalls als Rotliegend-Überhang modelliert.

Knapp südlich von Heide ändern sich die Strukturwerte der Zechstein-Basis stark. Bis zum Struktursegment Hennstedt im Norden liegt die Rotliegend-Zechstein-Grenze überkippt und flach, teilweise steil einfallend im äußeren Diapirabschnitt vor. Zum zentralen Aufstiegsbereich hin fällt diese Grenze ebenso steil ein (Abbildung 3-15).

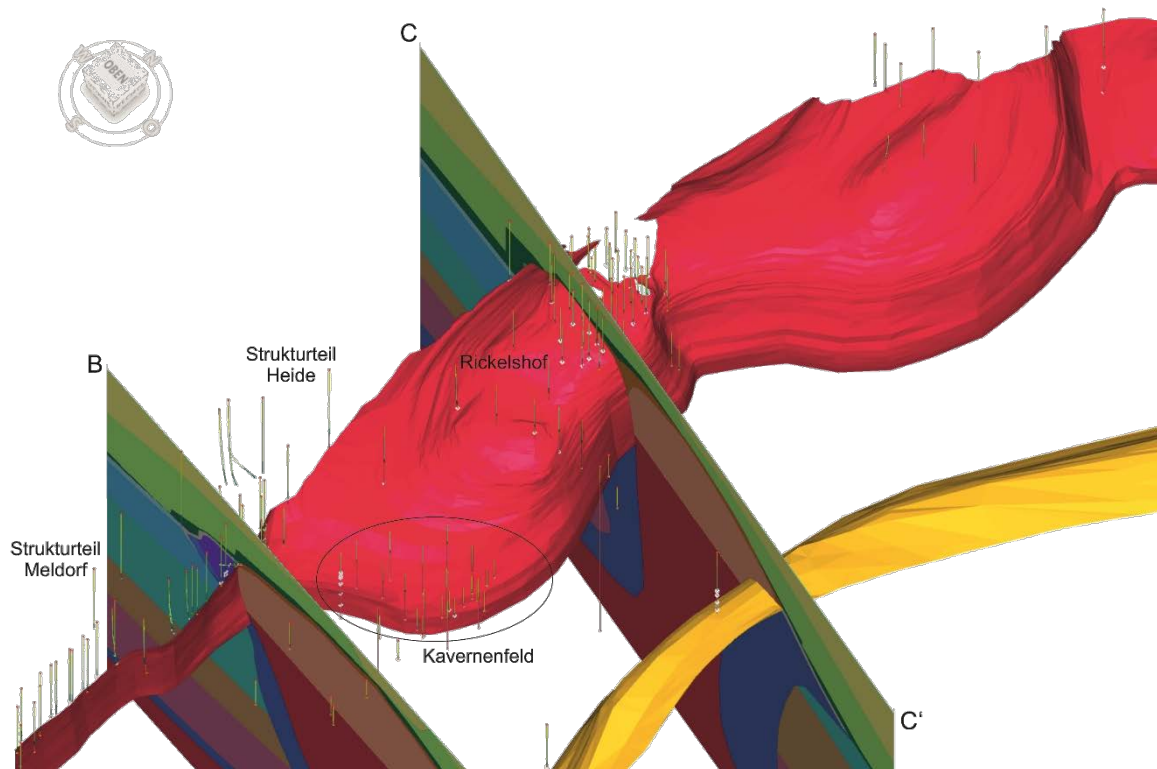


Abbildung 3-15: Aufnahme aus dem 3D-Raum im Bereich Meldorf und Heide mit den 3D-Flächen der Rotliegend-Zechstein-Grenze. Im West- (rot) und Ostteil (gelb) mit Bohrungen, der Lage des Kavernenfeldes Heide sowie des Erdölfeldes „Rickelshofs“; die westliche Schichtgrenze zeigt einen Überhang zwischen den Strukturteilen Meldorf (Profilschnitt B) und Heide (Profilschnitt C), der sich nach Nordosten fortsetzt, Blickrichtung nach Nordwest.

Nordöstlich des Rickelshofs weisen weitere Bohrungen den überkippten und dort teilweise weiter aufgedomten Charakter der Rotliegend-Zechstein-Grenze nach, wobei die Tiefe des Durchgangs zwischen 800 m und 1.900 m u. NN schwankt (Abbildung 3-16). Ursache dieser partiellen Aufdomung könnten Nachschubbewegungen des Zechsteinsalinars sein, welche die überlagernden Rotliegend-Einheiten in unterschiedlichem Maße auftürmten und die Zechstein-Basis verfalteten (Abbildung 3-16).

In Heide wurden unterhalb der aufgewölbten und überkippten Zechstein-Basis in fast 50 Bohrungen basale Zechsteineinheiten angetroffen. Belegt durch eine Bohrung fällt südlich des Profilschnittes C das basale Schichtpaket am Top der Aufwölbung aus und Rotliegend-salinar liegt direkt auf Staßfurt-Hauptsalz (Abbildung 3-17, schwarzer Pfeil links).

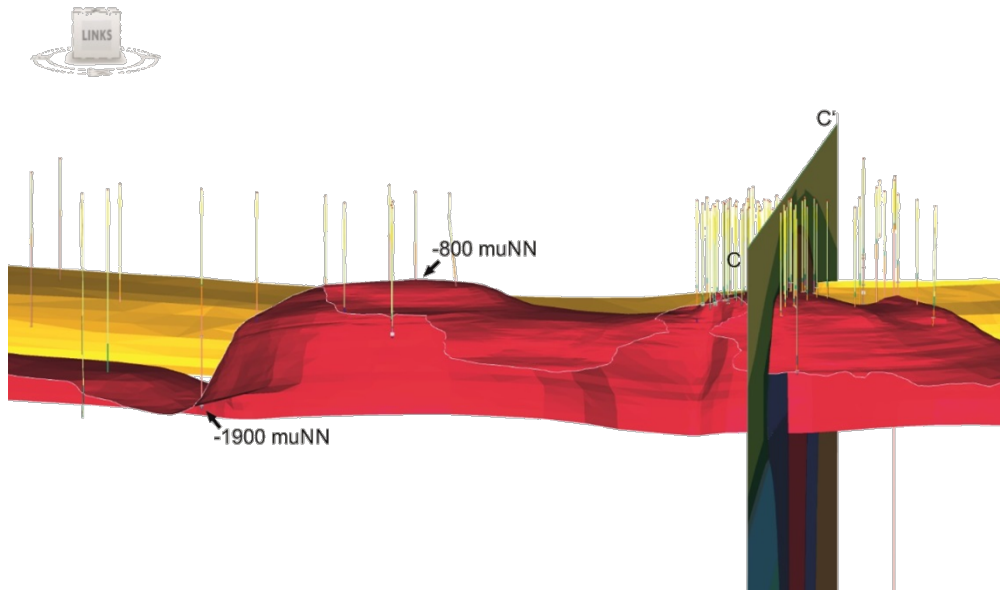


Abbildung 3-16: Aufnahme aus dem 3D-Raum im Bereich Heide mit den 3D-Flächen der Rotliegend-Zechstein-Grenze im Westteil (rot) mit Ausbisslinie (weiß) im Vordergrund und im Ostteil (gelb) im Hintergrund, die Pfeile zeigen die Tieflagen der Schichtgrenze, der Profilschnitt C verläuft spitz zur Blickrichtung nach Westen

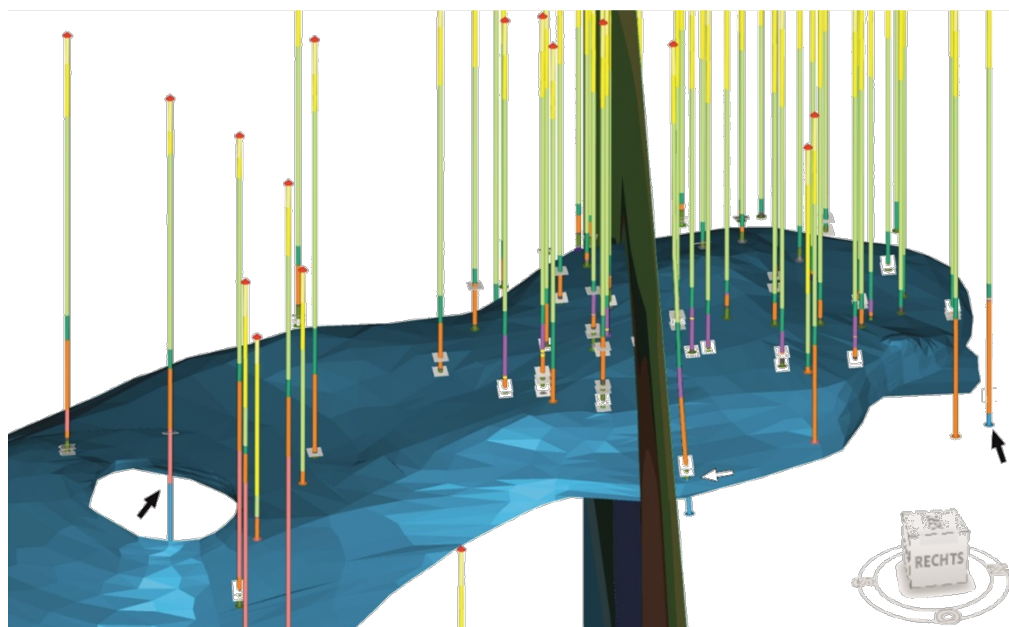


Abbildung 3-17: Aufnahme aus dem 3D-Raum im Bereich Heide mit der 3D-Fläche der basalen Zechsteinheiten (blau), die schwarzen Pfeile deuten auf Bohrungen in denen Hauptsalz unter Rotliegend erbohrt wurde, der weiße Pfeil zeigt auf den Ausbiss von Staßfurt-Karbonat und Basalanhydrit, graue Plättchen in den Bohrsäulen zeigen die räumlichen Strukturwerte einiger geologischer Schichten in den Bohrungen an, nahezu parallel zur Blickrichtung nach Westen verläuft Profilschnitt C



In der Ostflanke der Aufwölbung durchteufte eine Bohrung Zechsteinkalk und Werra-Anhydrit über Hauptsalz (weißer Pfeil). Staßfurt-Karbonat und Basalanhydrit fehlen folglich. Dort wurde ein Ausbiss der basalen Zechsteineinheiten modelliert, welcher sich nach Norden fortsetzt, da dort die basalen Zechsteineinheiten nachweislich gänzlich ausstreichen (Abbildung 3-17, schwarzer Pfeil rechts). Auch ca. 3 km weiter nördlich fehlen die basalen Zechsteineinheiten am Top der aufgewölbten Zechstein-Basis, während sie am Rand der Aufwölbung angetroffen wurden. In der Ostflanke im Bereich Heide hat eine Bohrung Zechsteinkalk bis Basalanhydrit erbohrt. Darauf basierend wurde eine räumlich begrenzte 3D-Fläche für diesen Bereich erstellt, die mit ca. 30° nach Westen einfällt.

Hennstedt

Dieser Abschnitt der Salzmauer liegt zwischen Heide und Süderstapel. Die Kissenbildung erfolgte zwischen dem Mittleren Buntsandstein und dem Mittleren Keuper. Auch in Hennstedt vollzog sich das diapirische Stadium asymmetrisch: generell im Süden und Osten früher, als im Norden und Westen. Im südlichen Ostabschnitt begann der Durchbruch im Mittleren Keuper bis Unterjura und im Norden im Unter- bis Mitteljura. Im Westteil begann die diapirische Phase im Unterjura und hielt bis zur Unterkreide an. In der Oberkreide bis ins Jungtertiär bildeten sich tertiäre Randsenken, die ein Nachschubstadium belegen (Best 1985).

Im Teilbereich Hennstedt wurden zehn Bohrungen abgeteuft, wobei zwei Bohrungen die Rotliegend-Zechstein-Grenze durchteuften und eine weitere durch das Deckgebirge in die Basalen Zechsteineinheiten stieß. Alle Bohrungen befinden sich im Süden von Hennstedt und im zentralen, westlichen Bereich. Profilschnitt D im Bereich Hennstedt (Abbildung 3-18) liegt ca. 11,5 km nordöstlich des Profilschnittes C. Am Top der Salzstruktur liegt ein ca. 2 km breiter Scheitelgraben in dessen Zentrum känozoische Sedimente direkt auf Rotliegend-Residuum liegen. Das Dach ist in diesem Bereich bis ca. 500 m u. NN aufgewölbt. In der Westflanke ist ein Überhang in Unter- und Oberkreide-Sedimenten ausgebildet und die Strukturflanken verbreitern sich im oberen, westlichen Bereich. Diese Merkmale deuten auf hohe Salzaufstiegsraten hin. Rotliegend-Sedimente liegen in diesem Bereich auf überkipptem Zechsteinsalinar. Unter 695 m Rotliegend-Residuum wurden 9 m Zechsteinkalk und 25 m flach einfallender Werra-Anhydrit erbohrt. Eine weitere Bohrung in Hennstedt, die 1 km weiter südlich liegt, durchteufte das Deckgebirge und traf randlich die Salzstruktur mit basalen Zechsteineinheiten (z1WA), die ein Ausstreichen des Rotliegend in der Westflanke in 1.700 m anzeigen und damit auf einen Überhang von ca. 900 m Tiefe nahelegen (Abbildung 3-19, weißer Pfeil). Die Tiefe der westlichen Rotliegend-Zechstein-Grenze schwankt lateral vom südlichen Anschluss zu Heide von 1.320 m zu ca. 1.670 m und wieder zu 1.470 m u. NN im Bereich des Profilschnittes D. Die Top-Fläche der basalen Zechsteineinheiten wurde parallel zur Basis Zechstein-Fläche im oberen Bereich modelliert (Abbildung 3-20).

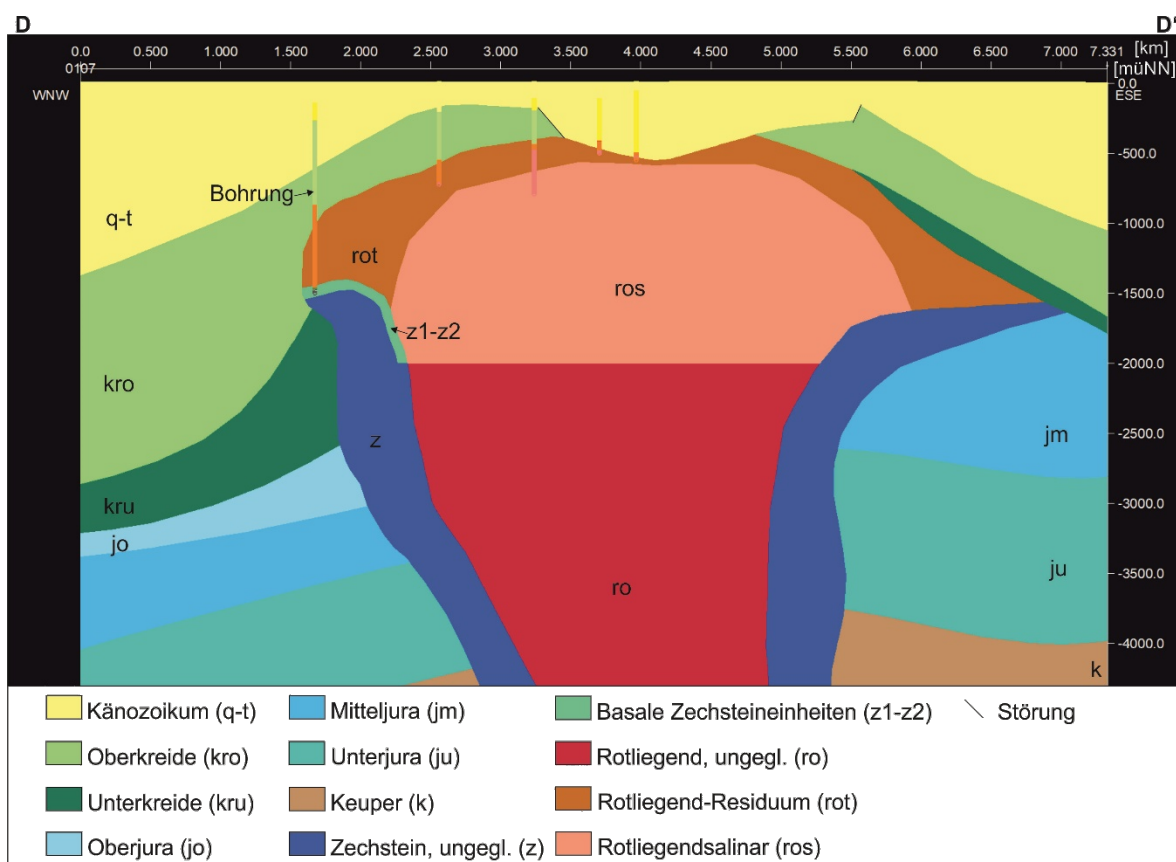


Abbildung 3-18: Profilschnitt D im Bereich Hennstedt, maximal 1.500 m weit entfernte Bohrungen sind auf den Schnitt projiziert

Die Ostflanke weist einen markanten Überhang in den Sedimenten des Mittleren Jura auf, der auf intensive Salzaufstiegsbewegungen im Mittleren Jura zurückzuführen sein könnte. Da es keine Bohrdaten für den Bereich der Ostflanke gibt, wurde die 3D-Fläche analog zur Westflanke modelliert. Im Gegensatz zu den drei zuvor beschriebenen Struktursegmenten ist der gesamte Dachbereich in Hennstedt aus Rotliegend aufgebaut, welches die Zechsteinschichten bis zu beiden Flanken „überflossen“ hat. Das Zechsteinsalinar nimmt in der Westflanke eine Breite von maximal 600 m in der Profilebene ein. Beide Rotliegend-Zechstein-Grenzen wurden bis ca. 2 km nördlich des Profilschnittes D konstruiert.

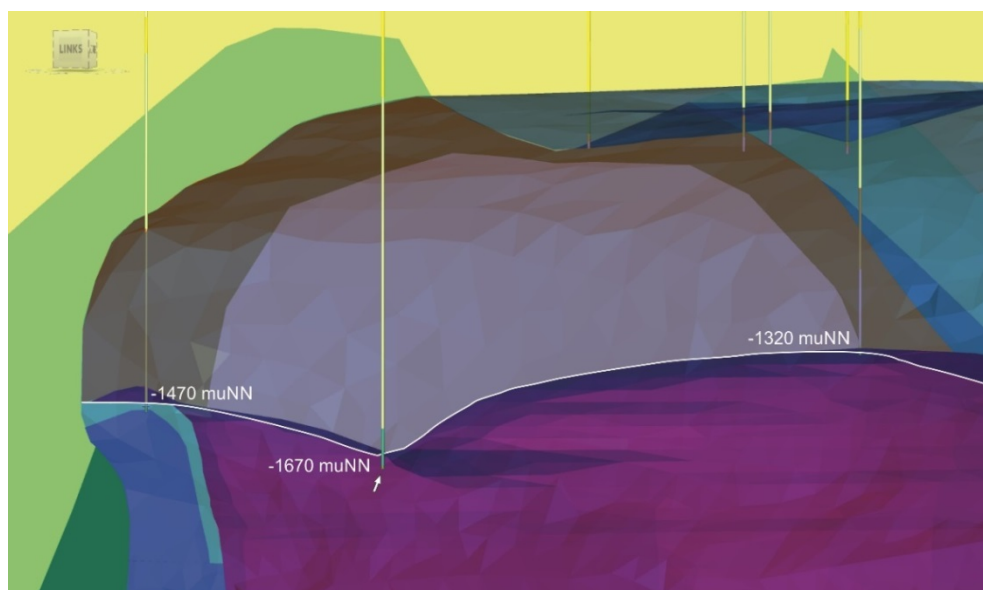


Abbildung 3-19: Aufnahme aus dem 3D-Raum im Bereich Hennstedt mit den 3D-Flächen der westlichen Zechsteinbasis (violett) mit Ausbisslinie (weiß), der Salzstrukturumhüllenden (transparent-blau) und im Hintergrund mit dem Profilschnitt D, die in einer Bohrung durch das Nebengebirge angetroffenen basalen Zechsteineinheiten in der Flanke (Pfeil) und die Tiefe der Rotliegend-Zechstein-Grenze sind dargestellt, Blickrichtung nach Nordost

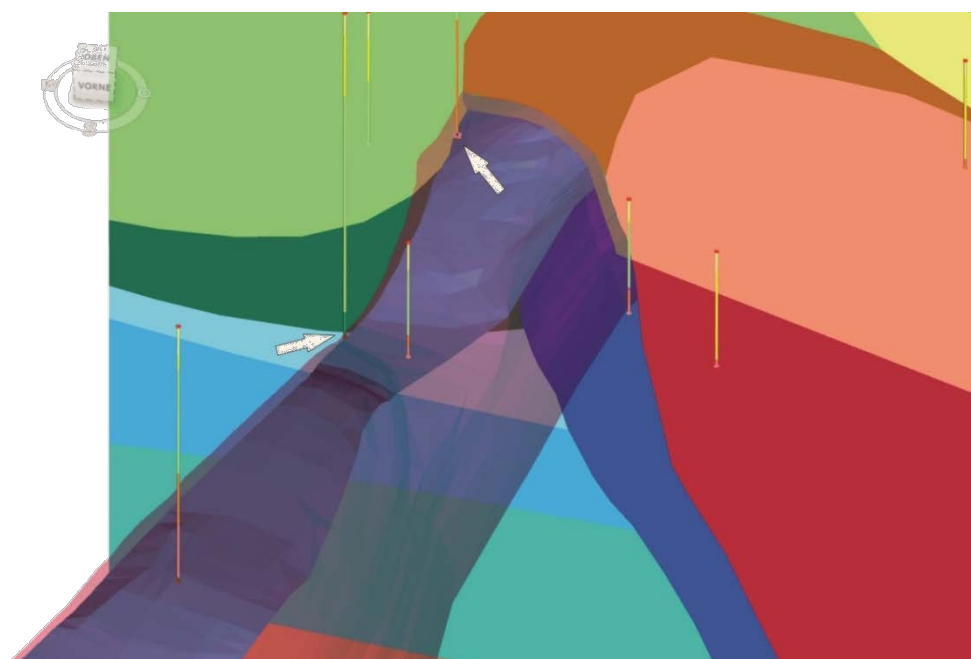


Abbildung 3-20: Aufnahme aus dem 3D-Raum im Bereich Hennstedt mit den 3D-Flächen der basalen Zechsteineinheiten (blau) und der Basis Zechstein (transparent rosa) sowie Bohrungen, die Pfeile markieren Bohrungen mit basalen Zechsteineinheiten, Blickrichtung nach Norden



Süderstapel

Süderstapel bildet das nördliche Ende der Salzmauer Heide, die sich nach Norden in eine enge Salzintrusion fortsetzt (Best 1985). Die Kissenbildung erfolgte im Keuper und das diapirische Stadium im Unteren Jura. Starke Nachbewegungen gab es in der Oberkreide vor allem im Westabschnitt. In Süderstapel liegen nur zwei Bohrungen vor, die die Salzstruktur erbohrt haben. In beiden Bohrungen wurden quartäre Ablagerungen direkt auf dem anhydritischen Hutgestein angetroffen. Die randliche Bohrung hat außerdem Zechstein-Steinsalz unterhalb des Hutgesteins erbohrt.

3.4.2 3D-Modell Honigsee

Die Doppelsalinar-Salzstruktur Honigsee liegt am östlichen Rand des zentralen Glückstadt-Grabens zum Ostholstein-Trog. Die Salzmauer ist ca. 100 km lang und ca. 3 bis 7 km breit. Sie erstreckt sich NE-SW vom südlichsten Teil Monklöh bis Warnau, N-S streichend bis Honigsee bei Kiel und verläuft danach NNW-SSE streichend bis Waabs Nord (Abbildung 3-21). Das 3D-Modell Honigsee bildet nur einen kleinen Teil der Salzmauer ab und die Lage ist in Abbildung 3-21 aufgezeigt.

3.4.2.1 Datenbasis

Im Süden der Stadt Kiel wurden drei Kavernenbohrungen zwischen 1966 bis 2007 im Auftrag der Stadtwerke Kiel AG abgeteuft und zu Kavernen gesolt. An zwei dieser Bohrungen wurden Strukturmessungen an Bohrkernen durchgeführt, die für das Zechsteinsalinar ein schlüssiges Bild ergeben und im makroskopisch strukturlosen Rotliegendesalinar räumlich stark streuen. Sonarvermessungen der Kavernen während der Solungsphase und im Betrieb flossen in die geologische Interpretation ein, sind aber nicht im Modell dargestellt. Ca. 100 Erdölaufschlussbohrungen befinden sich in der östlichen Randsenke der Salzstruktur, wobei drei Bohrungen im Bereich der Kavernenbohrungen die Salzstruktur erbohrten und danach in den Zielhorizont Dogger abgelenkt wurden. Zwei weitere Bohrungen im Norden von Honigsee haben ebenfalls das Salinar in der Ostflanke angetroffen.

Die Salzstrukturumhüllende des StörTief-Modells des LLUR floss unbearbeitet in das 3D-Modell ein. Die Basisflächen der Deckgebirgseinheiten des StörTief-Modells wurden für die Profilerstellung herangezogen.

3.4.2.2 Stratigraphische Interpretation

Für die drei Kavernenbohrungen liegt eine vergleichsweise detaillierte Dokumentation, inklusive Bohrlogs und stratigraphischer Profile vor. Anhand der Gamma Ray und Dichtemessdaten war es möglich, die Zechsteineinheiten feiner zu untergliedern, wie z. B. Hauptsalz (z2HS) in Streifensalz (z2HS2) und Kristallbrockensalz (z2HS3). Des Weiteren wurden in der zentralen Bohrung vormals als ältere Schichten der Staßfurt-Formation inklusive Basalanhydrit alternativ zu jüngeren Schichten der Staßfurt- und Leine-Formation uminterpretiert.

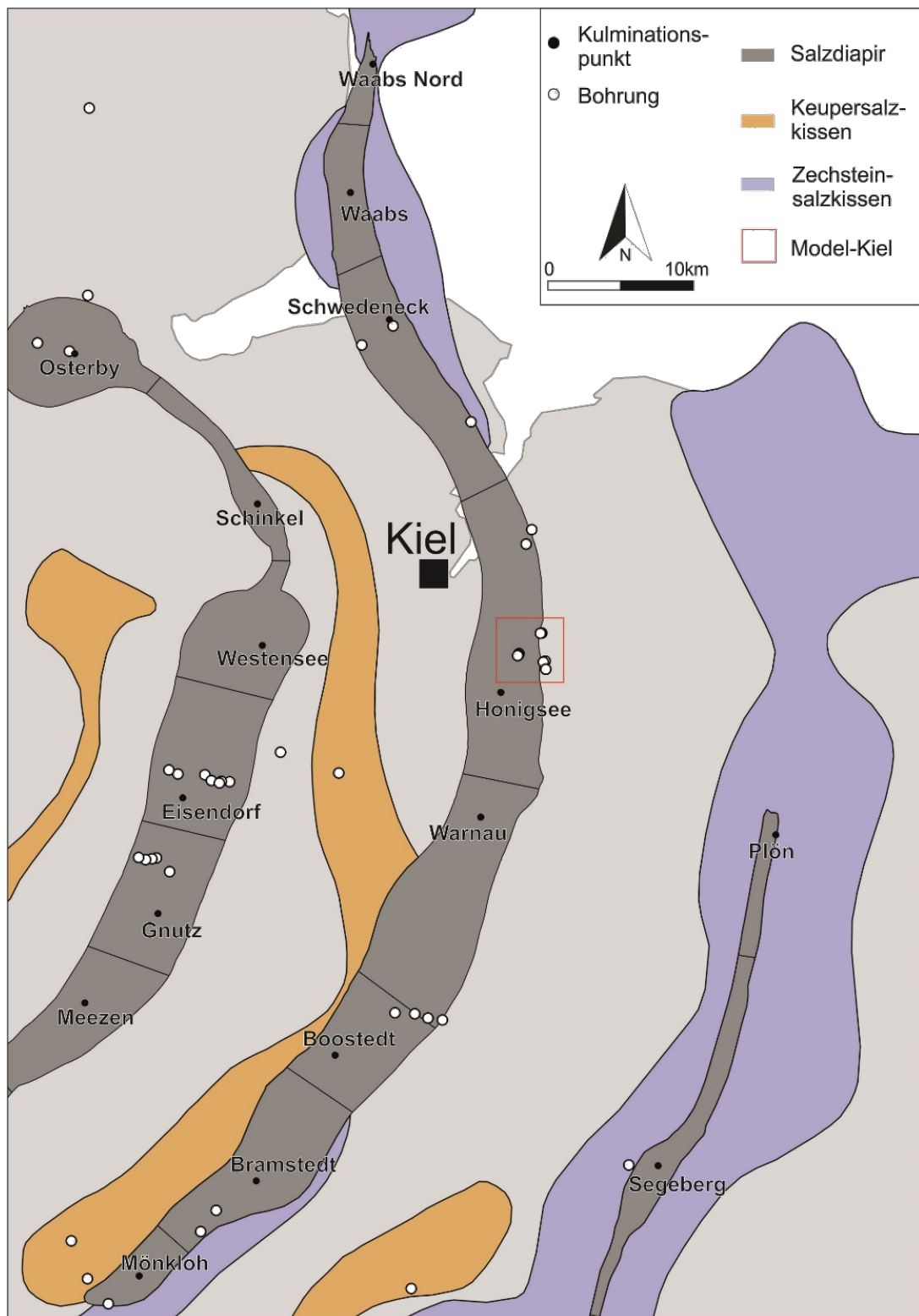


Abbildung 3-21: Karte der Salzstrukturen im Bereich der Doppelsalinar-Struktur Honigsee mit Lage des Modellgebietes und den Kulminationspunkten der Segmente.



3.4.2.3 Datenbasis

Im Süden der Stadt Kiel wurden drei Kavernenbohrungen zwischen 1966 bis 2007 im Auftrag der Stadtwerke Kiel AG abgeteuft und zu Kavernen gesolt. An zwei dieser Bohrungen wurden Strukturmessungen an Bohrkernen durchgeführt, die für das Zechsteinsalinar ein schlüssiges Bild ergeben und im makroskopisch strukturlosen Rotliegendesalinar räumlich stark streuen. Sonarvermessungen der Kavernen während der Solungsphase und im Betrieb flossen in die geologische Interpretation ein, sind aber nicht im Modell dargestellt. Ca. 100 Erdölaufschlussbohrungen befinden sich in der östlichen Randsenke der Salzstruktur, wobei drei Bohrungen im Bereich der Kavernenbohrungen die Salzstruktur erbohrten und danach in den Zielhorizont Dogger abgelenkt wurden. Zwei weitere Bohrungen im Norden von Honigsee haben ebenfalls das Salinar in der Ostflanke angetroffen.

Die Salzstrukturumhüllende des StörTief-Modells des LLUR floss unbearbeitet in das 3D-Modell ein. Die Basisflächen der Deckgebirgseinheiten des StörTief-Modells wurden für die Profilerstellung herangezogen.

3.4.2.4 Stratigraphische Interpretation

Für die drei Kavernenbohrungen liegt eine vergleichsweise detaillierte Dokumentation, inklusive Bohrlogs und stratigraphischer Profile vor. Anhand der Gamma Ray und Dichtemessdaten war es möglich, die Zechsteineinheiten feiner zu untergliedern, wie z. B. Hauptsalz (z2HS) in Streifensalz (z2HS2) und Kristallbrockensalz (z2HS3). Des Weiteren wurden in der zentralen Bohrung vormals als ältere Schichten der Staßfurt-Formation inklusive Basalanhydrit alternativ zu jüngeren Schichten der Staßfurt- und Leine-Formation uminterpretiert.

3.4.2.5 3D-Modellierung und Strukturinterpretation

Die drei Kavernenbohrungen sowie die Explorationsbohrungen wurden in openGEO implementiert und im 3D-Raum dargestellt. Die Kavernenbohrungen liegen östlich der zentralen Strukturachse der Salzstruktur, während sich die übrigen Bohrungen in der Ostflanke befinden. Die drei Kavernenbohrungen liegen fast genau in einer E-W verlaufenden Ebene und ungefähr senkrecht zur Strukturachse. Der Kulminationspunkt des Doppelsalinars Honigsee liegt ca. 2,5 km weiter südlich des Kavernenfeldes bei ca. 740 m u. GOK (Abbildung 3-22). Von dort fällt das Strukturtop nach Norden ab und liegt im Kavernenfeld bei ca. 1.100 m u. GOK.

Im Verhältnis zu den Bohrungsaufschlüssen liegt die 3D-Fläche der Salzstrukturumhüllenden (aus dem StörTief Modell) im Dachbereich ca. 70 m zu tief und die Ostflanke verläuft ca. 400 m westlich der Explorationsbohrungen vorbei (Abbildung 3-22). Aus zeitlichen Gründen wurde jedoch auf die Anpassung der Salzstrukturumhüllenden an die Bohrergergebnisse verzichtet.

Zwei sich kreuzende Profilschnitte (Abbildung 3-22) wurden basierend auf Bohrdaten und den vertikalen Durchstoßpunkten der 3D-Flächen aus dem StörTief-Modell konstruiert. Profilschnitt A (Abbildung 3-23) verläuft W-E, während Profilschnitt B senkrecht dazu SSW-NNE (Abbildung 3-24) positioniert ist. Beide Profilschnitte bilden nur einen kleinen Teil der gesamten Salzstruktur ab.

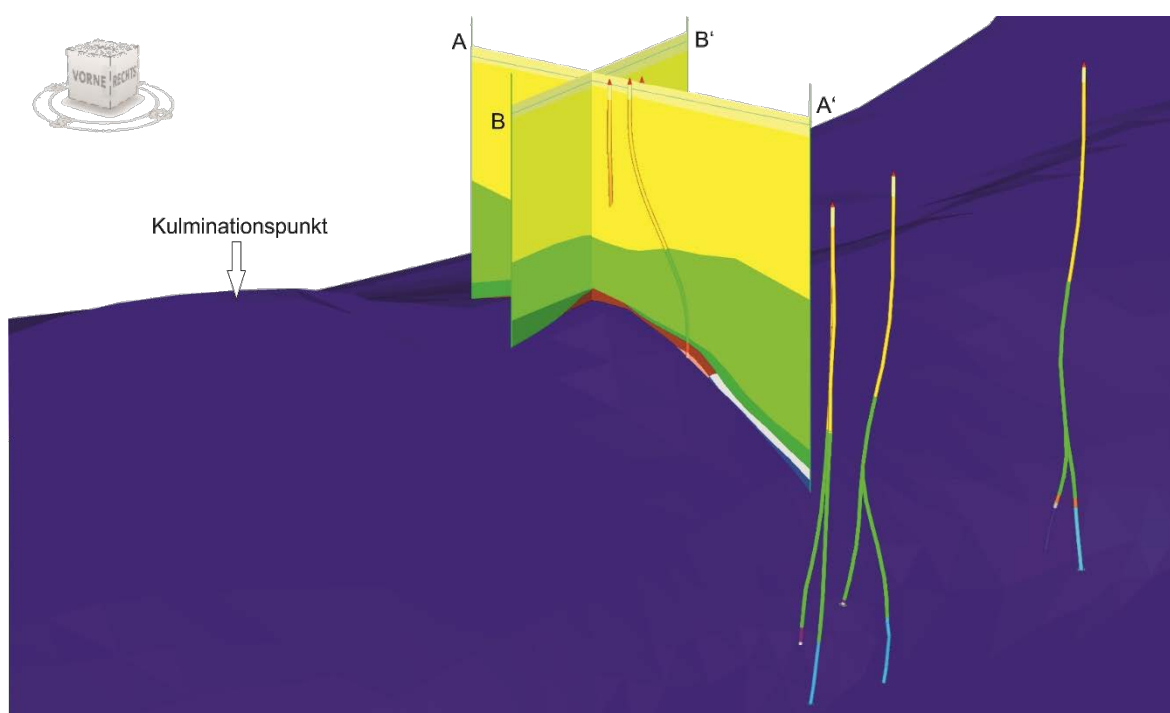


Abbildung 3-22: Aufnahme aus dem 3D-Raum im Bereich des Kavernenfeldes in Honigsee mit den 3D-Flächen der Salzstrukturumhüllenden (blau) und deren Kulminationspunkt, die drei Kavernenbohrungen liegen auf dem Profilschnitt A, Profilschnitt B verläuft senkrecht dazu, rechts im Bild sind die sechs Erdölexplorationsbohrungen in der östlichen Flanke der Salzstruktur dargestellt, Blickrichtung nach Nordwesten

Profilschnitt A (Abbildung 3-23) zeigt den Bereich um die zentrale und östliche Kavernenbohrung. Die östliche Bohrung traf die Rotliegend-Zechstein-Grenze drei Mal an. Diese Bohrung durchteufte unter Rotliegend-Residuum Rotliegendesalinar und eingefaltetes Hauptsalz (Streifensalz, z2HS2) und dann wieder Rotliegendesalinar. Der dritte Rotliegend-Zechstein-Übergang traf den Übergang von Rotliegendesalinar zu Hauptanhydrit (z3HA) der Leine-Formation. Im Liegenden wurde Zechsteinsalinar der Staßfurt- und Leine-Formation aufgeschlossen. In der zentralen Bohrung wurden unter Rotliegend-Residuum und Rotliegendesalinar eine Zechsteingesteinen in einer Mulde aus Schichten der Staßfurt- und Leine-Formation angetroffen.

In Profilschnitt B (Abbildung 3-24) ist nur die westlichste der drei Kavernenbohrungen dargestellt, die unter Rotliegend-Residuum Zechsteinsalinar mit unterlagerndem Rotliegendesalinar antraf. Bemerkenswert ist, dass kein Zechstein-Hutgestein über dem Zechsteinsalinar durchteuft wurde. Sonarvermessungen der gesolten Kaverne zeigten in der Teufe des Rotliegendesalinars, dass dort auch Zechsteinsalinar angesolt wurde und es folglich nahe der Bohrspur vertreten ist. Dieser Befund wurde im Profilschnitt umgesetzt, in dem die Zechstein-Mulde nah an den tieferen Teil der Bohrung heranreicht.

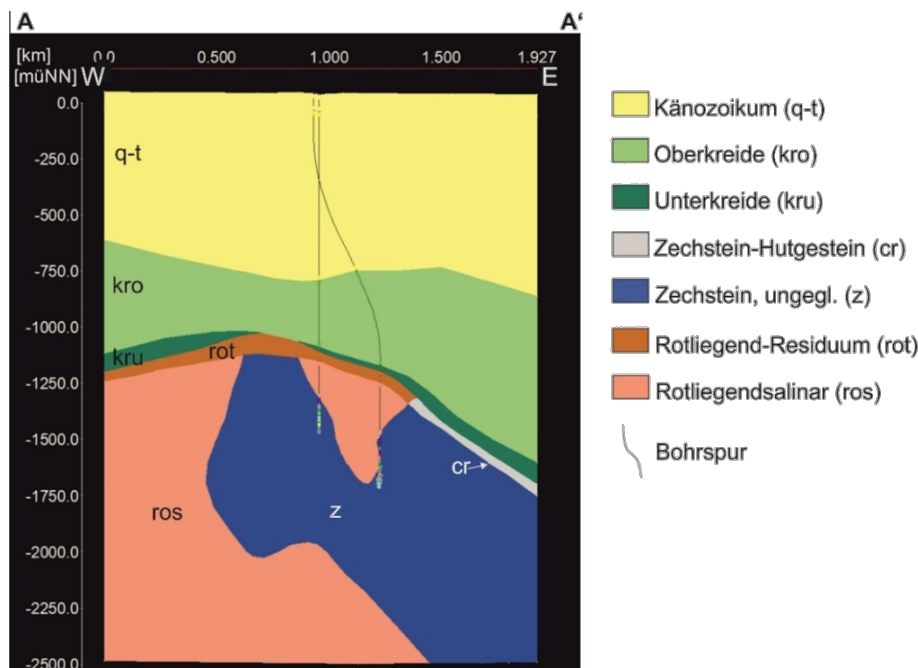


Abbildung 3-23: Profilschnitt A in dem Bereich Honigsee mit zwei der drei Kavernenbohrungen

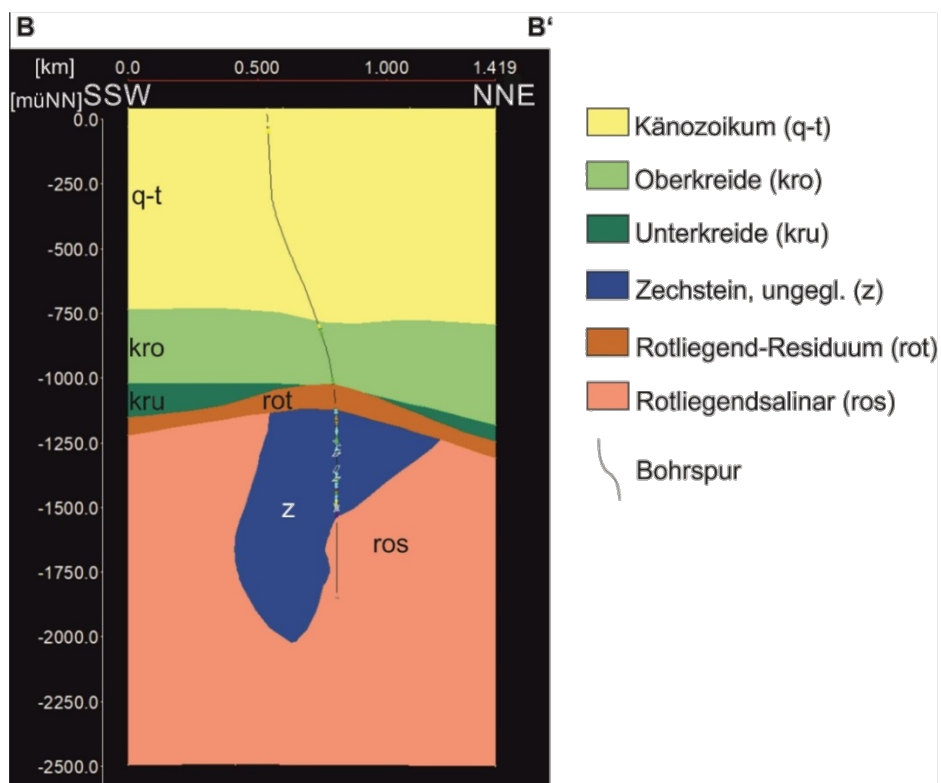


Abbildung 3-24: Profilschnitt B in dem Bereich Honigsee mit einer Kavernenbohrung

Dem 3D-Modell liegt die Annahme zugrunde, dass das Rotliegendesalinar wie in anderen Doppelsalinaren den Kern der Struktur bildet und in der Aufstiegsdynamik die treibende Kraft war. Die Schichtlagerung wird anhand der in den Bohrungen gemessenen Strukturwert als halbsteil bis steil angenommen. Die im Bereich der östlichen Kavernenbohrungen angetroffene Rotliegend-Tauchfalte wurde in den Raum salzstrukturparallel extrapoliert (Abbildung 3-25). Die eingemessenen geologischen Schichten streichen in dieselbe Richtung. Es wäre auch eine alternative Interpretation als kulissenartige Einfaltung (mit vertikaler Achse) aus Richtung Südwest denkbar.

In der westlichen Kavernenbohrung zeigen die Strukturwerte und die Formentwicklung des Kavernenhohlraums einen Wechsel der Schichtstreichrichtung von N-S nach NW-SE (Abbildung 3-26). Die Einfaltung des Zechsteins in dieser Bohrung könnte man als Kulissenfaltung interpretieren, die parallel zum Hauptstreichen der Salzstruktur liegt. Sie wurden häufiger in den zentralen Aufstiegsbereichen von Salzstrukturen beobachtet (z. B. De Boer 1971; Richter-Bernburg 1987).

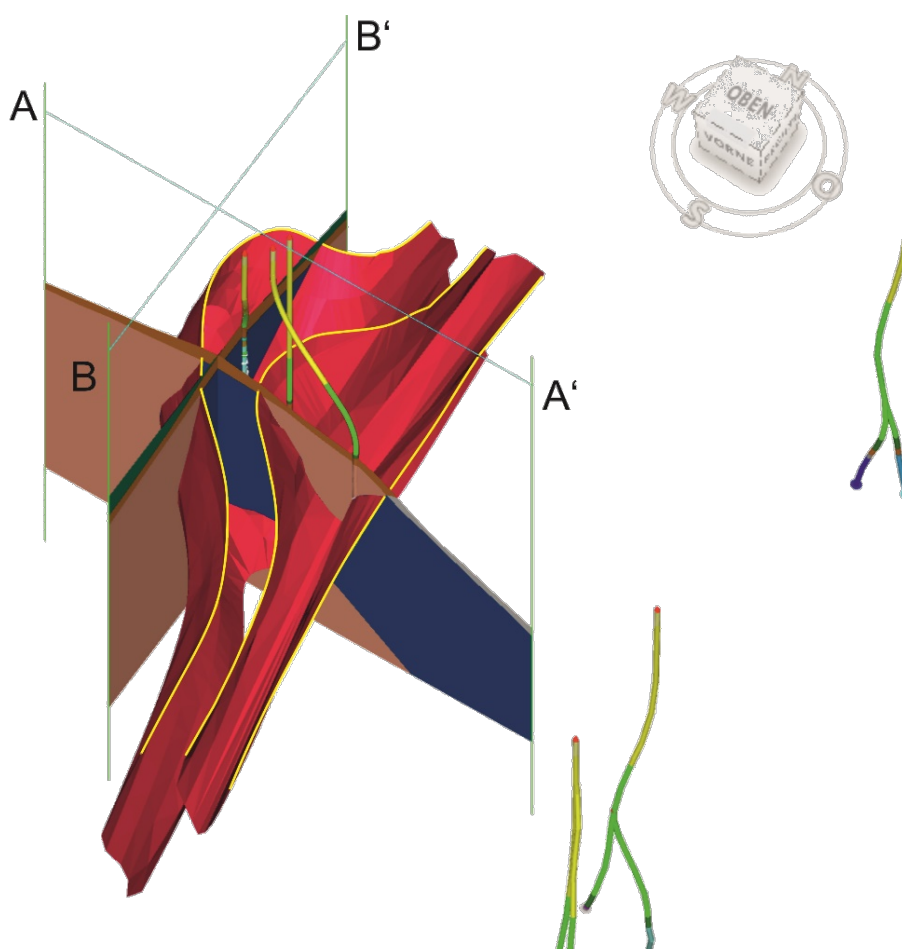


Abbildung 3-25: Aufnahme aus dem 3D-Raum im Bereich des Kavernenfeldes in Honigsee mit den 3D-Flächen der Zechstein-Basis, den Kavernenbohrungen und nahe gelegenen Explorationsbohrungen, die Ausbisslinie zur Salzstrukturumhüllenden ist in gelb dargestellt, die Profilschnitte A und B sind ohne Deckgebirgsschichten abgebildet, Blickrichtung nach Nordnordwest

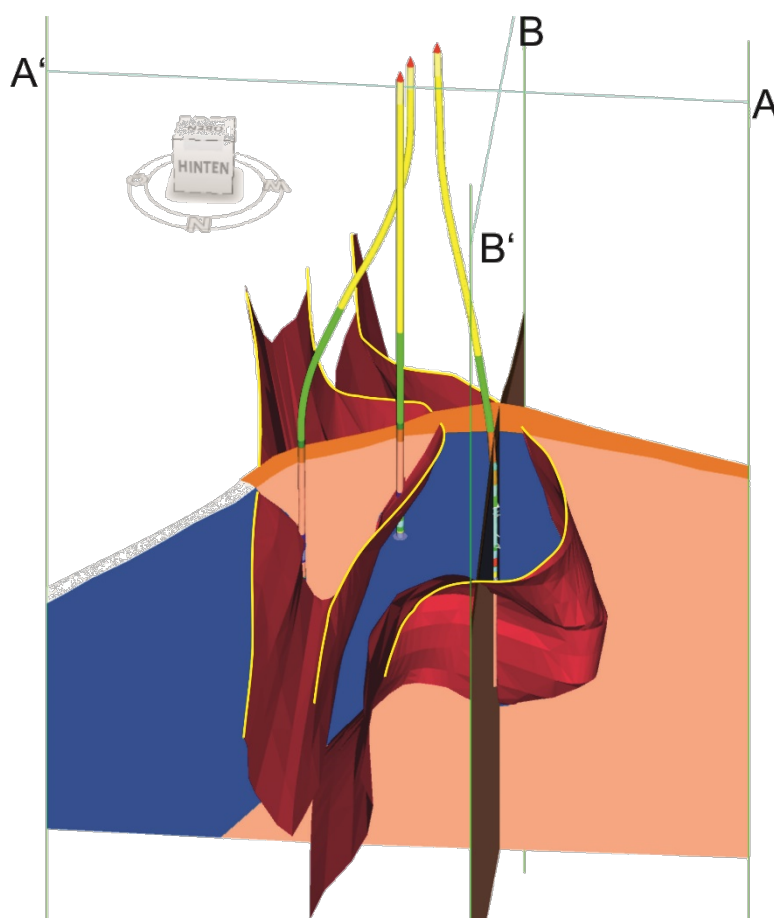


Abbildung 3-26: Aufnahme aus dem 3D-Raum im Bereich des Kavernenfeldes in Honigsee mit den 3D-Flächen der Zechstein-Basis, die bis zur Ausbisslinie (gelb) modelliert wurden sowie den Kavernenbohrungen, die Profilschnitte A und B sind ohne Deckgebirgsschichten abgebildet, Blickrichtung nach Süden

3.5 Internbautypen der Doppelsalinare

3.5.1 Strukturaufbauendes Salinar

Das Rotliegendesalinar ist wie in Kapitel 3.6 dargelegt relativ homogen aus Steinsalz und einem unterschiedlich hohen Anteil an Detritus (Silt- und Tonstein) ausgebildet. Durchgängige und mehrere Meter mächtige Lagen an Ton- und Siltstein wurden nicht in Bohrkernen und Bohrlochmessungen beobachtet und karbonatische Leithorizonte wurden nur in einer Salzstruktur (Krempe) beschrieben. Kalisalze fehlen gänzlich im Rotliegendesalinar, die ebenfalls störend für die Kavernensolung sind, da sie zu vorausschreitender Lösung (Fingerbildung) führen können. Trotz des im Vergleich zum Zechsteinsalinar (Stassfurt-Hauptsalz) erhöhtem Detritusanteil von durchschnittlich 16,5 % (Kapitel 3.6.4) ist die Anlegung von Kavernen im Rotliegendesalinar durchaus von Vorteil durch die Homogenität des Ge-



steins und des Fehlens von Kalisalzen und mächtigen, unlöslichen Schichten. Die Durchführbarkeit und Langlebigkeit von Speicherkavernen im Rotliegend-salinar sind in den Kavernenfeldern Heide und Kiel-Rönne ersichtlich. Jedoch sollte die Rotliegend-Zechsteingrenze vermieden werden, die wie in Kapitel 3.4.1 beschrieben mit nicht solfähigen basalen Zechsteineinheiten ausgebildet sein kann. Des Weiteren könnten die unterschiedlichen Eigenschaften der Salinare, wie z. B. die Kriechfähigkeit störend für die Anlage von Speicherkavernen sein.

In Zechsteinsalzen werden in Deutschland seit knapp 50 Jahren Speicherkavernen angelegt und betrieben. Es konnten ausreichend zusammenhängende und solfähige Partien in Zechsteineinheiten nachgewiesen werden (z. B. De Boer 1971; Richter-Bernburg 1987). Die mächtigen, anhydritarmen und homogenen Steinsalze der Staßfurt-Formation kommen vor allem in Betracht.

Im Untersuchungsgebiet sind an manchen Doppelsalinaren Keupersalz-kissen angeschweißt. Das Keupersalinar ist im Vergleich zum Rotliegend- und Zechsteinsalinar nur wenig untersucht. Die Salinarstruktur Dedesdorf besteht aus einem Zechstein-Diapir mit einem Überhang über randlich gelegene Keupersalze in der westlichen Randsenke. Das Kavernenfeld Blexen mit acht Kavernenbohrungen befindet sich im zentralen Bereich dieser Struktur. Der Salzspiegel liegt dort bei ca. 430 bis 450 m und unter ca. 50 bis 200 m Zechstein wurde ca. 1.000 m Keupersalinar erbohrt (Hedemann et al. 1984). Das Keupersalinar in Dedesdorf ist bemerkenswert rein mit einem Detritusgehalt von ca. 1 Gew.%. Da keine weiteren stofflichen Daten von Keupersalinar anderer Salzstrukturen erhoben vorliegen, kann über die Repräsentativität der stofflichen Ausprägung keine Aussage getroffen werden. Für Dedesdorf wurde kein eigener Doppelsalinar-Internbautyp geschaffen. Die Struktur wurde für die Potenzialberechnung als Zechstein-Diapir behandelt.

3.5.2 Bohrergergebnisse und darauf basierende Internbautypen

Als zusätzliche Datenquelle kamen in diesem Projekt im Vergleich zum Vorgängerprojekt vor allem bisher nicht berücksichtigte Bohrdaten hinzu. In Abbildung 3-27 sind alle Doppelsalinare im Glückstadt-Graben und die aufgenommenen sowie interpretierten Bohrdaten abgebildet. Anhand der Bohrbefunde konnte eine Einteilung in drei verschiedene Internbautypen von Doppelsalinaren getroffen werden (Abbildung 3-27). Lagen keine oder nicht eindeutige Erkenntnisse zum internen Aufbau einer Salzstruktur vor, so wurden die Bohrungen und Strukturen zunächst keinem Typen zugeteilt. Die Prognose des Internbaus aller Doppelsalinare folgt in Kapitel 3.5.6.

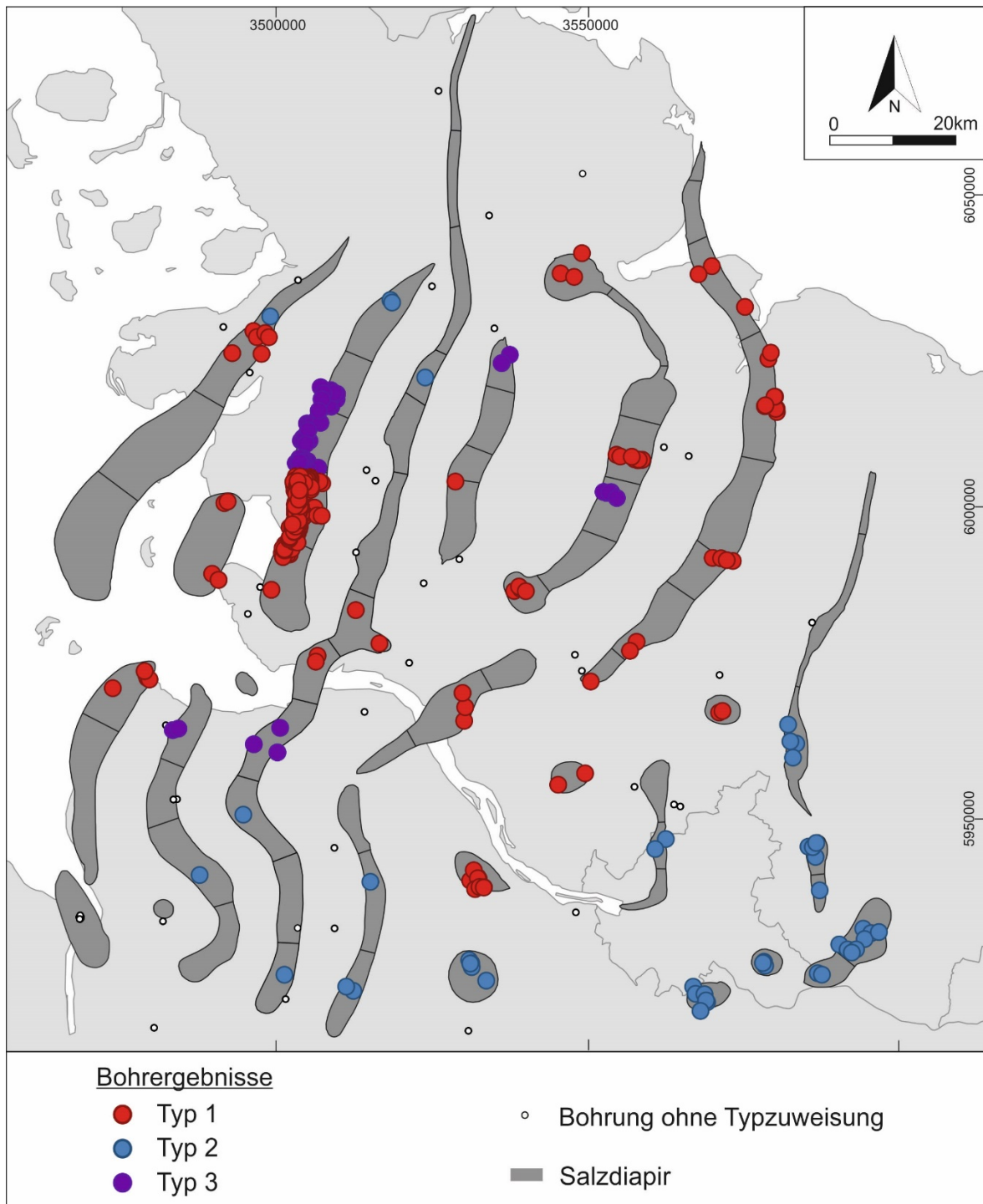


Abbildung 3-27: Karte der Doppelsalinare im Glückstadt-Graben mit den bohrungsbasierten Typ-Einteilungen

3.5.3 Internbautyp 1

Doppelsalinare dieses Typs sind aus Rotliegendesalinar im Zentrum und Zechsteinsalinar an den Rändern aufgebaut (Abbildung 3-29).

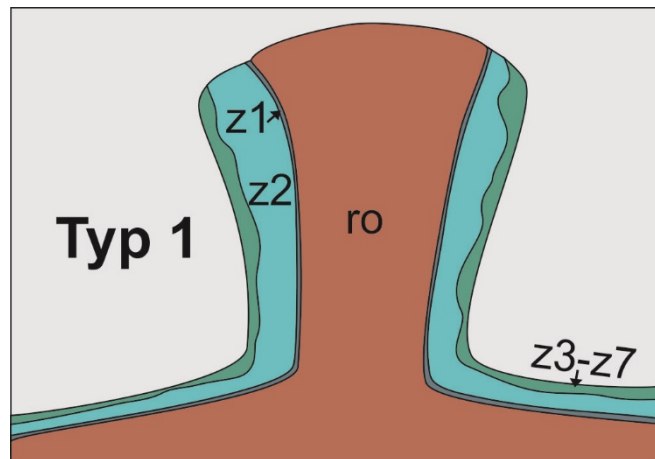


Abbildung 3-29: Schematisches Profil des Doppelsalinar-Internbautyps 1

Bohrbefunde

Bohrungen schlossen in den Doppelsalinen des Typs 1 Rotliegend im Zentrum auf und in randlichen Bohrungen, falls vorhanden, wurde Zechstein angetroffen. Das Rotliegendesalinar wurde im Strukturzentrum bis 3.500 m u. GOK und das Zechsteinsalinar im Flankenbereich bis 2.000 m u. GOK erbohrt.

Die Rotliegend-Zechstein-Grenze wurde in zwei Ausprägungen in diesem Typ von Doppelsalinen angetroffen. Der Kontakt lag entweder von Rotliegendesalinar zu Staßfurt-Hauptsalz vor oder war mit dazwischen aufgeschlossenen basalen Zechsteineinheiten ausgeprägt. Dieses ca. 55 m mächtige Schichtpaket wurde nicht nur in Heide angetroffen, sondern auch in den Salzstrukturen Osterby, Stade und Elmshorn, so wie in den Kissenfüßen der Diapire Mildstedt und Bramel. In Stade, Elmshorn und Bramel wurden an der Zechstein-Basis zusätzlich unter Zechsteinkalk, Zechsteinkonglomerat und Kupferschiefer aufgeschlossen (Schott 1942). Die basalen Zechsteineinheiten bestehen aus nicht oder nur kaum wasserlöslichen Gesteinen (vor allem Karbonaten und Sulfaten), die für die Solung von Kavernen unvorteilhaft sind. Die Rotliegend-Zechstein-Grenze ohne basale Zechsteineinheiten wurde u. a. in Honigsee mehrfach durchteuft, wo auch ein Kavernenspeicher errichtet wurde (Speicher Kiel-Rönne). Dennoch birgt diese Schichtgrenze ein potenzielles soltechnisches und kavernenbetriebliches Risiko. Anhand des 3D-Modells der Salzmauer Heide konnte gezeigt werden, dass das Vorkommen bzw. der Ausfall der basalen Zechsteineinheiten lokal schwer zu prognostizieren ist. Die Verbreitung sollte daher durch geeignete geophysikalische Erkundungen (z. B. Bohrlochgeoradar) bei konkreten Speichervorhaben untersucht werden.

Interpretation der Genese/Verbreitung

Salzstrukturen dieses Typs liegen vor allem in den zentralen Bereichen des Glückstadt-Grabens, sowie im Westholstein- und Ostholstein-Trog und den inneren Bereichen des Hamburger Trogs (Abbildung 3-28). In diesen Bereichen finden sich mächtige Randsenkenfüllungen, die meist eine Mächtigkeit von mehr als 6.500 m aufweisen (Abbildung 3-30). Ausnahmen sind die Doppelsalinare des Typ 1 in dem Hamburger Trog und die Salzmauer Cuxhaven. Im zentralen Glückstadt-Graben wurden vor allem triassische Sedimente in den Randsenken abgelagert, während in den randlichen Trögen überwiegend jurassische bis paläogene Sedimente die Randsenken auffüllten, welche zeitlich mit dem Salzaufstieg korrelieren (Maystrenko et al. 2006). Während das Zechstein- und Rotliegendesalinar in der Salzmauer Heide (3.4.1) mit geringem Grad und ausschließlich randlich verfault ist, zeigt sich in der Salzmauer Honigsee (3.4.2) eine intensivere Verfaltung, die auch aus Bohrungen in Stade und Büsum beobachtet wurde. Die Aufschlussverhältnisse für diese verfaulten Doppelsalinare, in denen das Zechsteinsalinar auch in zentralen Strukturen vorliegt, sind sehr kleinräumig und lassen keine prozentuale Abschätzung der Verteilung des nutzbaren Wirtsgesteins wie für die Salzmauer Heide zu. Im Folgenden wurde sich daher mit den Verbundpartnern darauf verständigt, die minimal abgeschätzten Durchschnittswerte von 50 % aus Abbildung 3-35 für die nutzbaren Flächenanteile des Rotliegendesalinars in allen Niveauschnitten zu verwenden (Tabelle 3-2).

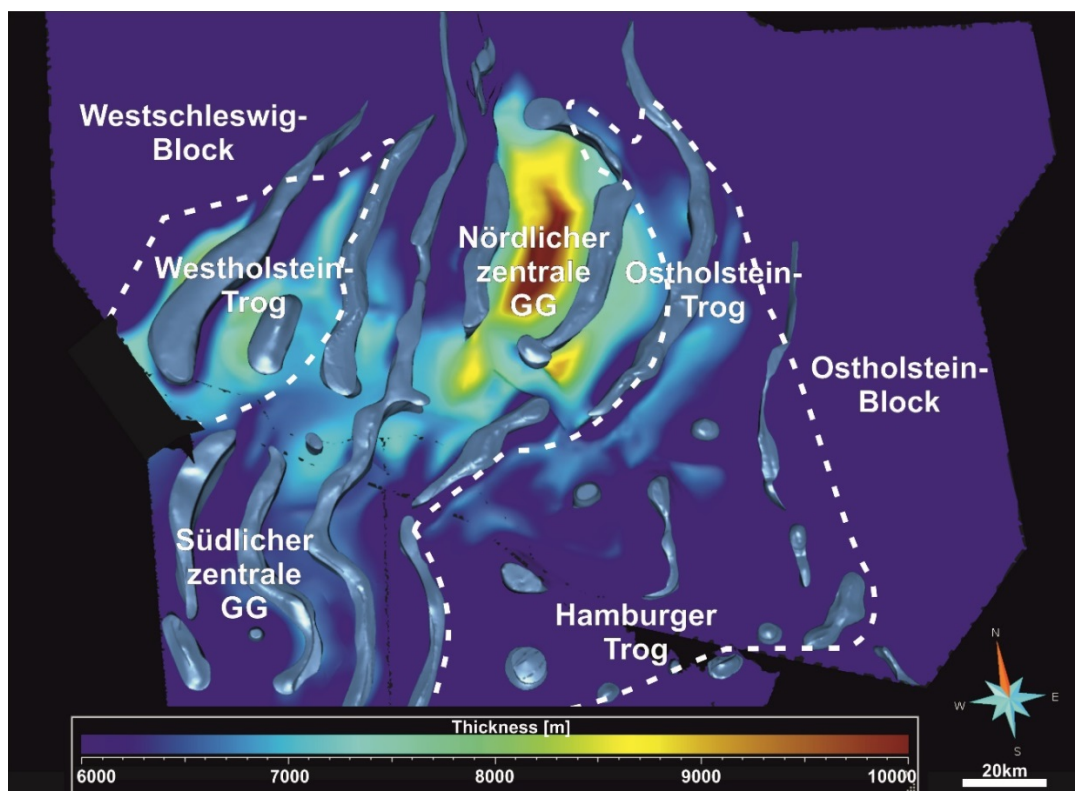


Abbildung 3-30: Mächtigkeitsverteilung in Bezug zur Zechstein-Basis und Geländeoberkante sowie Salzstrukturen (Kapitel 3-15 und 3-23), Lage und Bezeichnung der tektonischen Einheiten nach Maystrenko et al. (2017)

3.5.4 Internbautyp 2

Die Salzstrukturen des Internbautyps 2 weisen Zechsteinsalinar am Top und eine aufgewölbte Zechstein-Basis im Wurzelbereich auf, die für mobilisiertes Rotliegendesalinar spricht. Diese Strukturen können als „unreife“ Doppelsalinare angesehen werden, in denen das Rotliegendesalinar das überlagernde Zechstein nicht oder nicht vollständig durchbrochen hat.

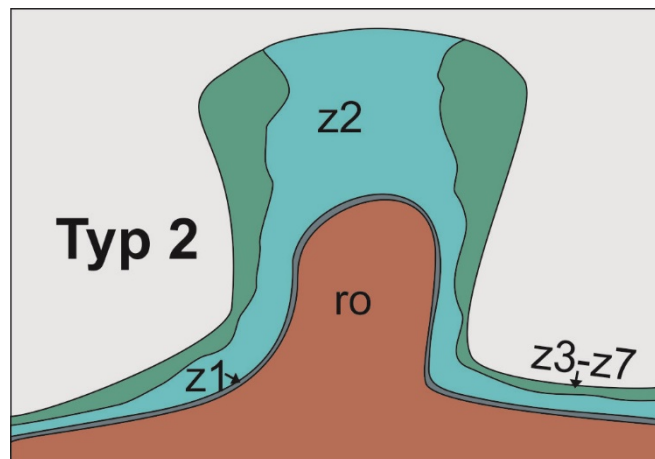


Abbildung 3-31: Schematisches Profil durch ein Doppelsalinar des Internbautyps 2

Bohrbefunde

In Strukturen dieses Internbautyps wurde in zentralen Bereichen Zechsteinsalinar bis in eine Tiefe von 2.300 m u. GOK angetroffen. Bohrungen haben im Zentrum der Doppelsalinare ausschließlich Zechsteinsalinar erbohrt (Abbildung 3-32). Laut seismischen Auswertungen im GTA ist in diesen Salzstrukturen die Zechstein-Basis durch Mobilisierung des Rotliegendesalinars aufgewölbt. Dadurch wurde oftmals postuliert, dass das Rotliegendesalinar auch in die höheren bzw. kavernenrelevanten Salzstrukturbereich aufgestiegen ist. Allerdings konnte in diesen Strukturen kein Rotliegendesalinar durch Bohrungen belegt werden. Das Zechsteinsalinar unter dem Strukturtop wurde in vielen Fällen durch gut für den Kavernenbau nutzbares Staßfurt-Hauptsalz aufgebaut (Abbildung 3-32). Eine Ausnahme bildet u. a. die Salzstruktur Harsefeld, in der das Zechsteinsalinar aus verfalteten Gesteinen der Staßfurt- und Leine-Formation besteht.

Interpretation der Genese/Verbreitung

Salzstrukturen des Typs 2 sind vor allem nahe der nördlichen, südlichen und östlichen Verbreitungsgrenze des strukturbildenden Rotliegendesalinars, sowie in den peripheren Lagen der Salzmauern verbreitet (Abbildung 3-28). In den Salzmauern Oldenswort, Heide, Honigsee und Krempe wurde in den äußersten Segmenten der Salzmauern ausschließlich Zechsteinsalinar erbohrt. Gleiches gilt für den nördlichen Teil des Glückstadt-Grabens (Mildstedt, Süderstapel, Sterup, Waabs Nord). Im südlichen zentralen Glückstadt-Graben erstreckt sich dieser Internbautyp nicht nur auf das letzte Segment der Salzmauern, sondern reicht weiter nach Norden. In diesem Bereich ist der zentrale Glückstadt-Graben weniger stark

ingesunken wie der nördliche Bereich und die Zechstein-Basis liegt bei max. 6.500 m u. GOK statt 10.000 m u. GOK (Abbildung 3-30). In der Salzmauer Basdahl-Flensburg, die vom südlichen bis zum nördlichen Rand des Glückstadt-Grabens und durch den zentralen Glückstadt-Graben verläuft, wurde Zechsteinsalinar im Zentrum der Struktur Pahlhude erbohrt. Dort wurde knapp 600 m Zechsteinsalinar bis in eine Teufe von 1345 m u. GOK aufgeschlossen. Die Salzstruktur weist in diesem Bereich einen sehr schmalen Wurzelbereich mit stark vergrößertem Dach auf. Des Weiteren sind Doppelsalinare des Typs 2 auf dem äußeren Rand des Hamburger Trogs zu finden.

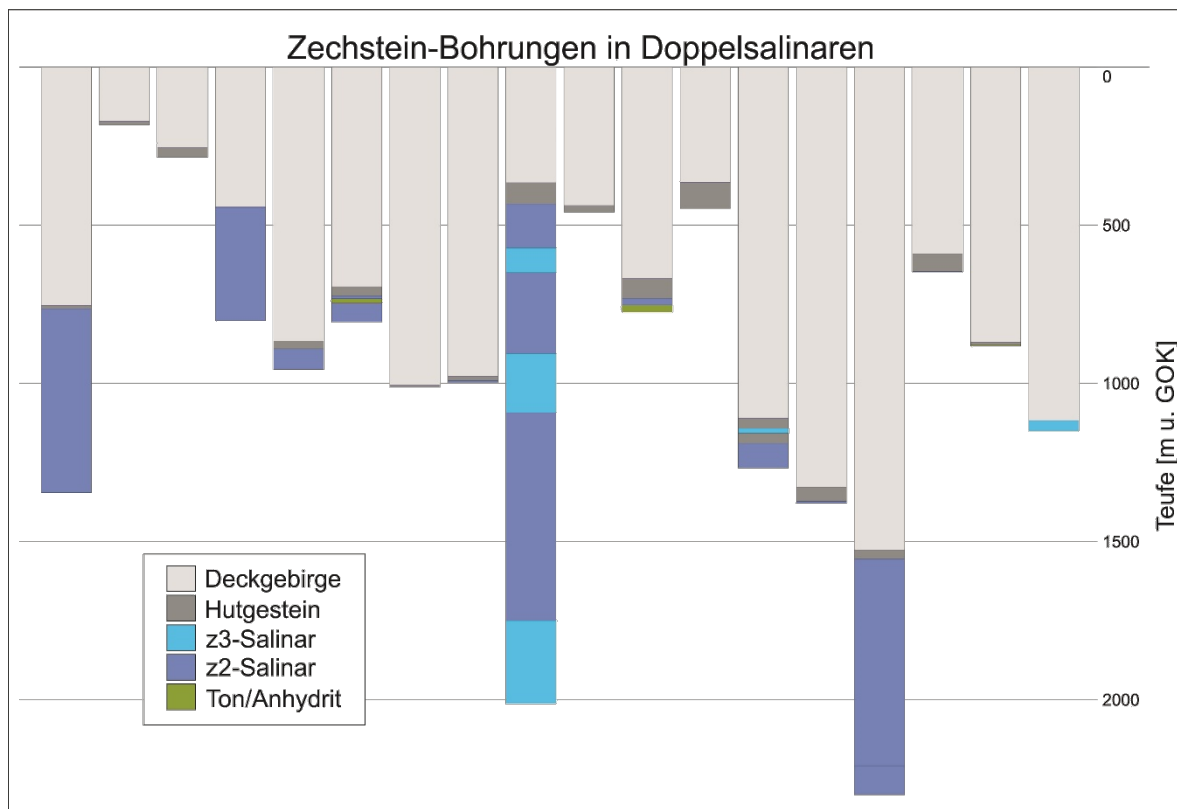


Abbildung 3-32: Schematische Bohrprofile aus Doppelsalinen mit ausschließlich erbohrtem Zechsteinsalinar (Typ 2)

3.5.5 Internbautyp 3

Dieser Internbautyp beschreibt Salzstrukturen, in denen am Top in mindestens einer Flanke ausschließlich Rotliegend anzutreffen ist (Abbildung 3-33). Das Rotliegendesalinar hat das Zechsteinsalinar in diesen Bereichen überfahren und liegt in Inverslagerung vor. An den Salzstrukturen Heide, Hennstedt, Förden, Gnutz, Altenbruch und Osterbruch wurde mindestens an einer Flanke Rotliegend am Top nachgewiesen. Das vormals überlagernde Zechsteinsalinar ist zu weiten Teilen im Laufe der Strukturgenese abgelautet worden und das zentrale Rotliegendesalinar überfuhr die randlichen Bereiche durch weiteren Salzaufstieg.

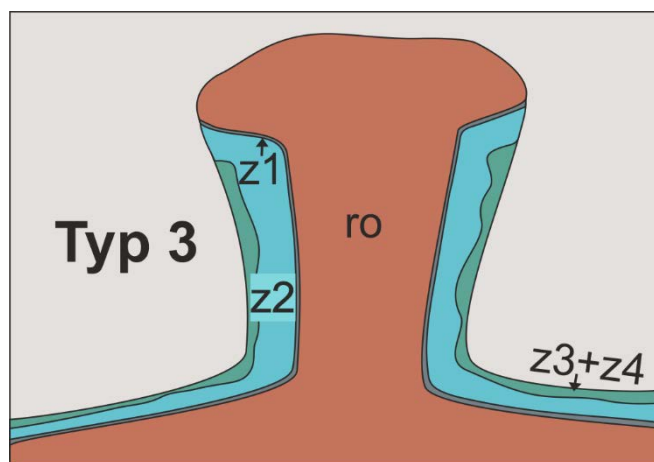


Abbildung 3-33: Schematisches Profil durch ein Doppelsalinar des Internbautyps 3

Bohrbefunde

In Bohrungen dieses Typs wurden Gesteine des Rotliegend sowohl in randlichen als auch zentralen Bereichen der Doppelsalinare am Top erbohrt. Wie in Heide und Hennstedt gezeigt (Kapitel 3.4.1.6), ist das Rotliegendesalinar in der Lage, das randlich gelegene Zechstein komplett zu überfahren und selbst Überhänge an den Strukturflanken auszubilden. Die Rotliegendgesteine in den Überhängen wurden in drei Bohrungen komplett durchteuft und können demnach Mächtigkeiten von mehr als 500 m aufweisen (Abbildung 3-34). Die übrigen Bohrungen wurden noch innerhalb des Rotliegend eingestellt.

Interpretation der Genese/Verbreitung

Ursächlich für die Entwicklung des Typs 3 scheint eine sehr asymmetrische Entwicklung der Salzstruktur zu sein, dennoch ist dieser Internbautyp schwer zu prognostizieren, da diese Salzstrukturen sich nicht offenkundig in Lage, Morphologie oder Genese von den Doppelsalinen des Typ 1 abheben.

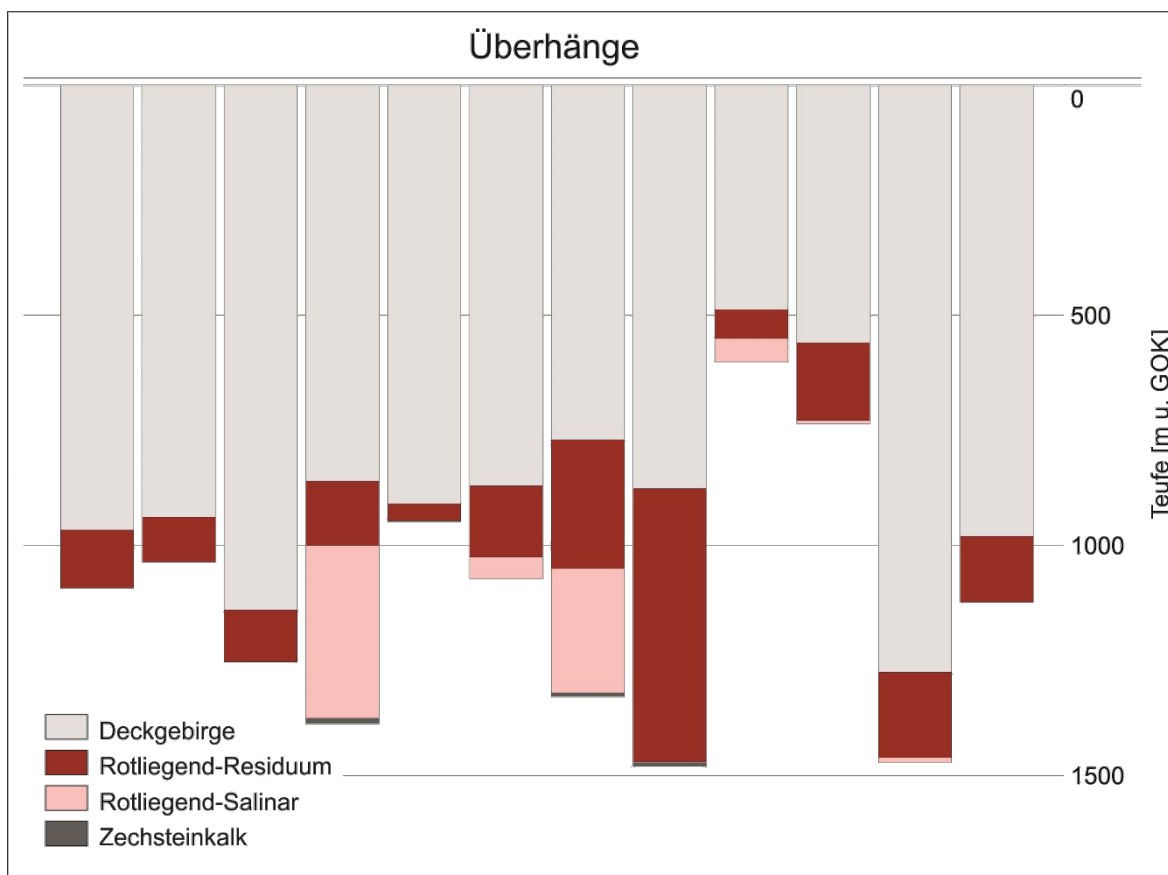


Abbildung 3-34: Schematische Bohrprofile aus Doppelsalinaren mit ausschließlich erbohrtem Rotliegend in den Strukturrändern (Typ 3)

3.5.6 Abschätzung der nutzbaren Wirtsgesteinsanteile

Um eine quantitative Abschätzung des Speicherpotenzials der Salzstrukturen vornehmen zu können, ist es nötig, den zur Anlage von Kavernen zur Verfügung stehenden Bereich abzuschätzen. Die Salzstrukturen Norddeutschlands wurden im Vorgängerprojekt in fünf Internbauklassen eingeteilt, wobei die Doppelsalinare in einer Internbauklasse zusammengefasst wurden. Wichtiges Ziel dieses Projektes war es, für die innerhalb der hier neu definierten Internbauklassen differenzierte Aussagen zu den Wirtsgesteinsanteilen in verschiedenen Teufen zu treffen, um den nutzbaren Bereich noch besser abschätzen zu können.

In den Doppelsalinartypen 1 und 3 ist das Rotliegendsalinar das Wirtsgestein für die Anlage von Kavernen. Wirtsgestein in Typ 2 sind die Zechstein-Gesteine der Staßfurt-Formation (z2). Als Datenbasis für die Abschätzung des Flächenanteils des Wirtsgesteins in den Teufen der Niveauschnitte wurden vorrangig die beiden neu erstellten geologischen 3D-Modelle des Internbaus der Salzmauern Heide und Honigsee genutzt. Des Weiteren wurden die erhobenen Daten der Doppelsalinare im Glückstadt-Graben im 3D-Raum gesichtet und strukturell interpretiert.

Die Fallstudie Heide bietet ein großräumiges Modell auf dessen Basis vier Niveauschnitte in 500 m, 1.000 m, 1.500 m und 2.000 m u. NN mit der Verteilung der Zechstein-Basis-Fläche angefertigt und die prozentualen Flächenanteile bestimmt wurden (Abbildung 3-35). Die südlichen und nördlichen Teilbereiche der Salzmauer wurden aus Mangel an Daten nicht komplett modelliert. Die zwei südlichen Teilbereiche entsprechen anhand der Bohrbe-funde dem Typ 1 und die zwei nördlichen Segmente dem Typ 3.

In Abbildung 3-35 sind die wechselnden Wirtsgesteinsanteile innerhalb der Salzstruktur dargestellt. Im südlichen Segment Marne sind die Rotliegend-Anteile durchweg geringer als in den nördlichen Teilbereichen. Im Durchschnitt über alle vier Bereiche liegt der Rotliegendanteil bei knapp 50 % und höher. Als konservative Annahme wurde daher dem Typ 1 ein Wirtsgesteinsanteil von 50 % über alle Tiefenbereiche zugewiesen. Typ 3 weist als Besonderheit im Topbereich durch die Rotliegendüberhänge sogar einen Wirtsgesteinsanteil von 100 % auf (Tabelle 3-2).

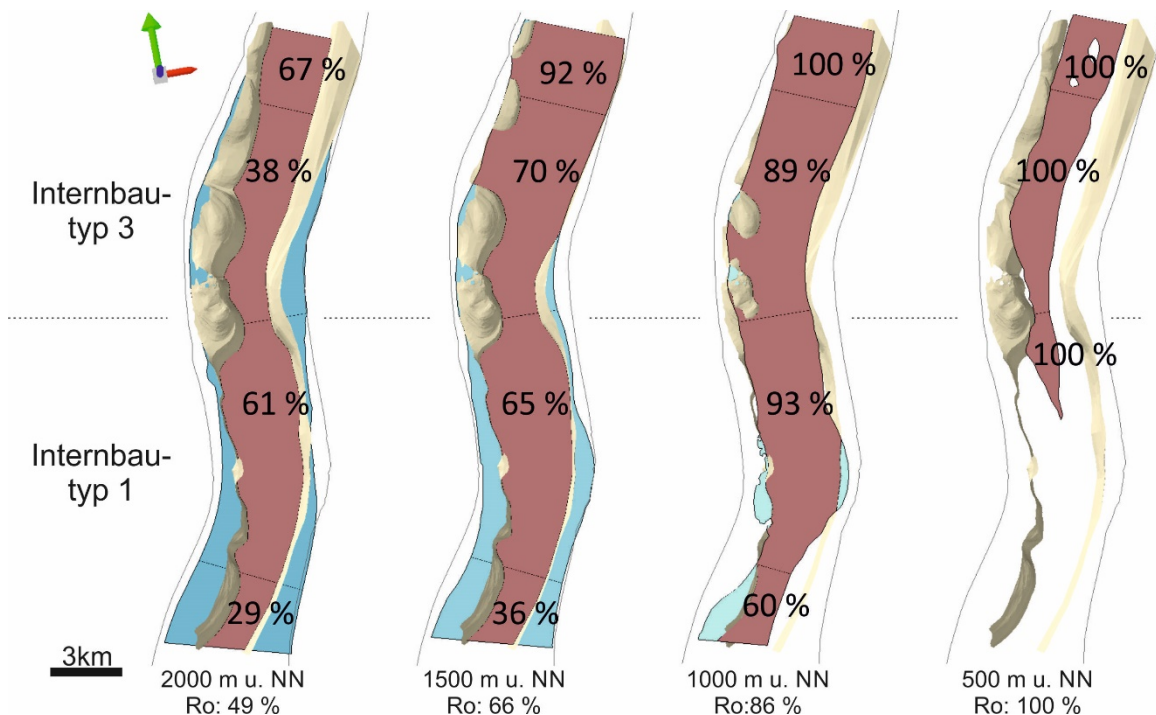


Abbildung 3-35: Niveauschnitte mit Flächenanteilen des Rotliegend in vier Teufen durch die Salzmauer Heide mit der Zechstein-Basis-Fläche (beige) aus dem Heide 3D-Modell (Kapitel 3.4.1)

Für Doppelsalinare des Internbautyps 2 existieren keine 3D-Modelle. Da die Rotliegend-Zechstein-Grenze nicht erbohrt wurde und somit die Existenz des Rotliegendsalinars in Teufen bis 2.000 m u. NN fraglich ist, wurde ausschließlich das Zechsteinsalinar als Wirtsgestein gewählt. Basierend auf dem InSpEE-Internbautyp 3 „Diapir“ wurde eine Flächenverteilung von 67 % in allen Niveauschnitten ausgewiesen (Pollok et al. 2016).



Wie in Kapitel 3.5.2 beschrieben, wurden durch Bohrdaten unterschiedliche Ausprägungen der Doppelsalinare detektiert. Basierend auf diesen Bohrergebnissen wurden die Doppelsalinare in drei Internbautypen eingeteilt. Salzstrukturen ohne (aussagekräftige) Bohrdaten wurden mit den Interpretationen aus dem GTA 1:300.000 ergänzt, in dem in Profilschnitten zwischen den drei Typen unterschieden wurde. Daraus ergibt sich die in Abbildung 3-28 gezeigte Verteilung von Internbautypen.

Die Doppelsalinar-Struktur Dedesdorf besteht aus einem Zechstein-Diapir mit einem Überhang über randlich in der westlichen Randsenke gelegenen Keupersalinen (Hedemann et al. 1984). Es handelt sich nicht um eine Rotliegend-Zechstein-Salzstruktur. Sie wurde folglich ebenfalls als Zechstein-Diapir behandelt.

Der nutzbare Wirtsgesteinsanteil der Doppelsalinare ist je nach Internbautyp und Tiefe unterschiedlich. In Tabelle 3-2 sind die nutzbaren Anteile unter Normalnull angegeben.

Tabelle 3-2: Nutzbare Flächenanteile in Abhängigkeit von der Tiefe und Strukturtyp

Nutzbare Wirtsgesteinsanteile (ro bzw. z2) je nach Internbautyp und Tiefe [%]			
Tiefe [m u. NN]	Typ 1 (ro)	Typ 2 (z2)	Typ 3 (ro)
500	50	67	100
1.000	50	67	50
1.500	50	67	50
2.000	50	67	50

3.5.7 Abschätzung der Hutgesteinsmächtigkeit

Als ein Kriterium und Salzstrukturmerkmal zur Vorauswahl untersuchungswürdiger Doppelsalinare wird die maximale Tiefenlage der Strukturoberflächen angewendet. Der Top einer Salzstruktur bezieht sich immer auf den höchsten Punkt der Hutgesteinsoberfläche, also den Kulminationspunkt (Kapitel 3.3.1).

Das Zechstein-Hutgestein oder Rotliegend-Residuum bildet den obersten Teil der diskordant durch das Deckgebirge gebrochenen Salzstrukturen, die durch salzuntersättigte Grundwässer abgelagert wurden und durch chemische Umwandlungsprozesse entstanden sind. Die Hutgesteinsoberfläche der Salzstruktur kann meist recht genau aus seismischen Profilen abgelesen werden, da sie einen markanten Reflektor in der Seismik darstellt. Allerdings ist der „Salzspiegel“ schwieriger zu identifizieren. Der Salzspiegel ist die Fläche an der Basis des Hutgesteins bzw. Residuums, die den intakten Salzkörper vom abgelagerten Teil der Salzstruktur trennt. Der Salzspiegel kann durch Bohrungen, aber nicht oder kaum durch geophysikalische Methoden von der Erdoberfläche detektiert werden. Allerdings ist der Salzspiegel die wichtigste Referenzfläche, von welcher ausgehend in die Tiefe wichtige gebirgsmechanische Parameter, wie z. B. die vertikale Hangendschwebe, berechnet wer-

den (Arbeitspaket 5). Dennoch sind die Tiefenangaben in dieser Studie immer auf Hutgesteins- bzw. Residuumsoberflächen bezogen, da sie für alle Strukturen relativ genau und flächendeckend bekannt sind oder bestimmt werden können.

Für die Ermittlung des Salzspiegels müssen also zunächst die Residualgesteine des Zechsteins und Rotliegenden näher betrachtet werden. Die Mächtigkeiten variieren in Abhängigkeit von der Strukturgenese, den am Salzspiegel anstehenden unterschiedlichen Salzgesteinen sowie den lokalen hydrogeologischen Standortbedingungen und können mehrere hundert Meter erreichen. Aus diesem Grund wurden durch die BGR alle vollständig durchteuften Zechstein-Hutgestein- und Rotliegend-Residuum-Durchgänge, aus insgesamt 36 Doppelsalinaren, in Teufenbereichen von 0 bis 1.500 m u. GOK untersucht und nach ihren Mächtigkeiten ausgewertet (Abbildung 3-36). Bei Salzstrukturen mit mehr als einem Bohrungsaufschluss wurden arithmetische Mittelwerte gebildet.

In dem Untersuchungsgebiet haben 67 Bohrungen in 19 Salzstrukturen das abgelaugte Rotliegend-Residuum am Top der Doppelsalinare vollständig durchbohrt (Abbildung 3-36).

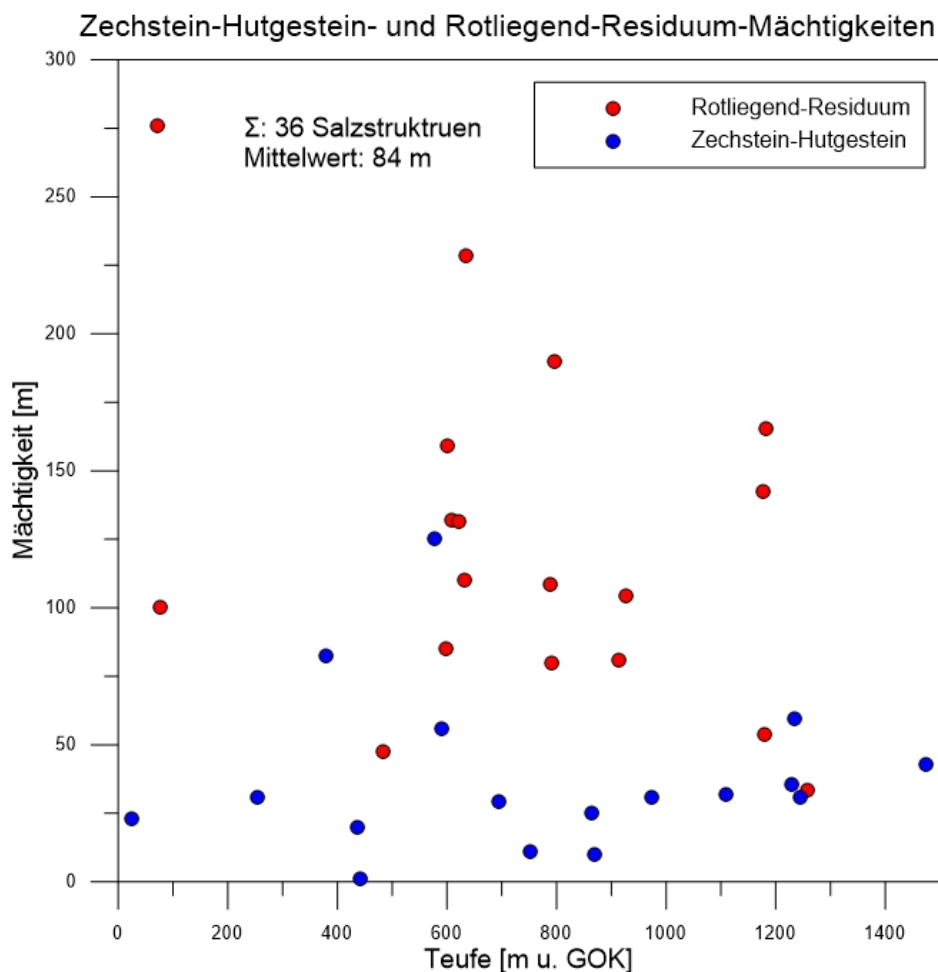


Abbildung 3-36: Erbohrte Zechstein-Hutgestein- und Rotliegend-Residual-Mächtigkeiten in 36 Salzstrukturen innerhalb des Untersuchungsgebietes gegen die Teufe Top Hutgestein bzw. Rotliegend-Residuum



Der Mittelwert für das Rotliegend-Residuum liegt bei 124 m, wobei die erbohrten Mächtigkeiten insgesamt zwischen 4 m und 311 m und die über mehrere Bohrungen einer Salzstruktur gemittelten Werte zwischen 34 m und 276 m schwanken. In den 17 Salzstrukturen in denen Hutgestein aus Zechsteineinheiten im Dachbereich ansteht, schwanken die erbohrten Mächtigkeiten des Residualgesteins insgesamt zwischen 0,1 m und 200 m sowie die über Salzstrukturen gemittelten Werte zwischen 1 m und 125 m (Abbildung 3-36). Im Durchschnitt liegen die Zechstein-Hutgesteinsmächtigkeiten bei 38 m. Die Daten belegen, dass die Hutgesteinsmächtigkeiten unabhängig von der aktuellen Tiefenlage der Salzstruktur sind. Beide Datensätze zusammen genommen ergeben eine durchschnittliche Mächtigkeit der Hut- bzw. Residualgesteine von 84 m. Anhand dieser Datenlage wurde mit den Verbundpartnern gleichbleibend zum Vorgängerprojekt InSpEE die Annahme von 100 m Hutgesteinsmächtigkeit für die Kavernenkonfiguration (Arbeitspaket 5) vereinbart.

3.5.8 Übergabe an Arbeitspaket 8

Die ermittelten nutzbaren Anteile wurden für die untersuchungswürdigen Doppelsalinare, abhängig von der jeweiligen Typenzuteilung, in die InSpEE-Datenbank eingetragen. An Arbeitspaket 8 wurde die Zuordnung zu den Internbautypen zusammen mit der Angabe des nutzbaren Flächenanteils in den vier Niveauschnitten sowie die Geometrien der Salzstrukturen (3.3) übergeben.

3.6 Stofflich-mikrostrukturelle Untersuchungen an Doppelsalinaren

3.6.1 Probenauswahl, Probenahme und Methodik

Für die stofflich-mikrostrukturellen Untersuchungen konnten nach vorangehender Recherche zu existierendem Material Bohrkerne aus abschnittsweise gekernten Kavernenbohrungen bzw. Kavernenerkundungsbohrungen aus den Salzstrukturen Kiel-Honigsee, Heide und Krempe genutzt werden (Abbildung 3-37).

Der Hauptteil der Untersuchungen wurde an gekernten Abschnitten von drei Bohrungen der Salzstruktur Kiel in einem Teufenbereich von 1.220 m bis 1.790 m durchgeführt, in welchen durch die interne Verfallung der Salzstruktur (Kapitel 3.4.2) sowohl Rotliegend- als auch Zechsteinsalinar erbohrt wurde. Die Bohrkerne vom Kavernenstandort „Kiel-Rönne“ wurden von der Stadtwerke Kiel AG für die Untersuchungen im Projekt InSpEE-DS zur Verfügung gestellt.

Weiteres Kernmaterial wurde aus einer Bohrung der Salinarstruktur Krempe im Teufenbereich von 660 m bis 1.280 m untersucht, sowie aus mehreren Bohrungen der Salinarstruktur Heide im Teufenbereich von 460 m bis 1.150 m.

Durch Kernbefahrungen im Labor Wietze der Firma DEA konnten weitere Referenzproben für das Rotliegendesalinar des Salzstocks Büsum, sowie für den Rotliegend-Zechstein Übergang der Salinarstruktur Heide untersucht werden. Die Lage der stofflich untersuchten Doppelsalinarstrukturen ist in Abbildung 3-37 dargestellt.

Die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen umfassen die petrographische Beschreibung der Bohrkerne sowie stofflich-strukturelle Untersuchung des Gesteins mittels opti-

scher und Rasterelektronenmikroskopie, Gefügeanalytik mittels Paläopiezometrie und Untersuchungen zum wasserlöslichen Mineralbestand mittels Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES), der wasserunlöslichen Bestandteile mit der Röntgendiffraktometrie sowie isotopengeochemische Untersuchungen. Darüber hinaus wurde das Langzeit-Kriechverhalten des Rotliegendesalinars in Dauerstandversuchen experimentell untersucht.

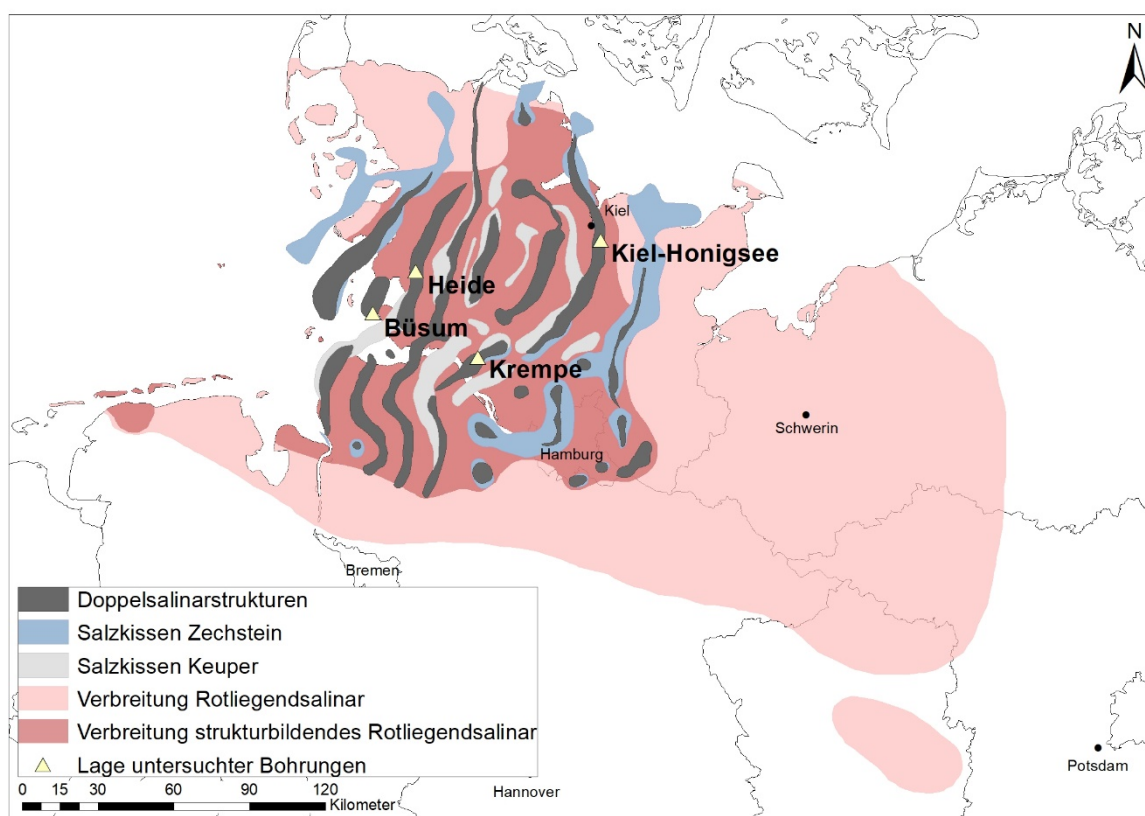


Abbildung 3-37: Lage der untersuchten Bohrungen in den Doppelsalinarstrukturen. Onshore-Verbreitung des Rotliegendesalinars nach Reinhold & Hammer (2016).

3.6.1.1 Dünnschliffherstellung und Lichtmikroskopie

Die petrographische Ansprache der Bohrkerns wurde durch eine detaillierte Untersuchung von abgedeckten Dünnschliffen am Polarisationsmikroskop ergänzt.

Für die Herstellung von Dünnschliffen aus Salzgestein werden sämtliche Säge- und Polierarbeiten während des Präparationsprozesses für die Dünnschliffherstellung trocken durchgeführt. Abgedeckte Dünnschliffe für die Untersuchung am Polarisationsmikroskop wurden mit einer Dicke von ca. 30 µm präpariert.

Für die Rasterelektronenmikroskopie und Paläopiezometrie wurden nicht abgedeckte, polierte Dickschliffe mit einer Dicke von ca. 100 µm hergestellt.



Die lichtmikroskopische Untersuchung der Dünnschliffe erfolgte mit einem Leica DMRM Mikroskop, ausgestattet mit einer Mikroskopkamera Leica DFC 450C.

3.6.1.2 Rasterelektronenmikroskopie (REM)

Die Untersuchungen am Rasterelektronenmikroskop wurden anhand von präparierten Dickschliffen durchgeführt und zur Analyse von polarisationsmikroskopisch nicht differenzierbaren Gefügemerkmalen genutzt, sowie in Kombination mit der Energiedispersiven Röntgenspektroskopie (EDX) zur Analyse der ortsaufgelösten, phasenanalytischen Bestimmung einzelner Mineralphasen.

Für die durchgeführten Untersuchungen wurde ein FEI Quanta 600 FEG ESEM Rasterelektronenmikroskop genutzt in Kombination mit einem EDX-Detektor APOLLO XL der Firma EDAX.

3.6.1.3 Paläopiezometrie

In natürlich deformiertem Steinsalz kann über die Analyse von Subkörnern bzw. über die Ermittlung der Subkorngröße eine Ableitung der Paläodifferenzialspannung erfolgen. Die Probenpräparation erfolgte über das Anätzen von Dickschliffen nach der von Urai et al. (1987) beschriebenen Methode. Die Differenzialspannung (σ) wird über den mittleren Subkorndurchmesser (D) über folgende für Halit experimentell kalibrierte Formel (Carter et al. 1993; Schléder & Urai 2005) berechnet:

$$D = 215 \cdot \sigma^{-1.15} \quad (1)$$

Das Ausmessen der Subkorndurchmesser erfolgte händisch mithilfe der Software ImageJ. Aufgrund der hohen Spanne an ermittelten Subkorndurchmessern wurde zur Berechnung des arithmetischen Mittels ein Konfidenzintervall der mittleren 95 % der Messwerte betrachtet (Schleder & Urai 2005).

3.6.1.4 Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES) und Bestimmung des quantitativen Mineralbestandes

Die Analyse mittels ICP-OES wurde am wasserlöslichen Anteil des Gesteins durchgeführt. Die Zerkleinerung der Probe erfolgte in einer Scheibenschwingmühle mit einem Mahlbecher aus Achat auf eine Korngröße $< 125 \mu\text{m}$. Zur Probenpräparation werden 2.500 mg des Gesteinsmehls in 250 ml demineralisiertem Wasser gelöst. Anschließend erfolgte eine Anionen- und Kationenbestimmung mittels Fünffachmessung an der ICP-OES Spectro Ciros nach DIN 38406. Für die Bestimmung der Hauptkomponenten Na^+ , Cl^- und SO_4^{2-} beträgt der analytische Fehler $\pm 1 \%$. Bromid kann ab einem Gehalt von $2 \mu\text{g/g}$ analytisch nachgewiesen werden. Der analytische Fehler für den Bromidgehalt beträgt $< 5 \%$.

Der quantitative Mineralbestand sowie der Bromidgehalt in Halit wurden mithilfe des Programms ZECHMIN-7 (Bornemann et al. 2008) aus den Ergebnissen der ICP-OES berechnet. Aufgrund der gemessenen Hauptkomponenten können die Minerale Halit, Anhydrit, Carnallit, Sylvinit, Polyhalit, und Kieserit bestimmt und deren Gehalte berechnet werden. Die berechneten Mineralgehalte haben einen Fehler von $< \pm 1 \text{ Gew.}\%$; der Fehler der Bromidgehalte in Halit beträgt $< \pm 5 \%$.



3.6.1.5 Röntgendiffraktometrie (RDA)

Die mineralogische Zusammensetzung des unlöslichen Gesteinsanteils wurde mittels RDA bestimmt. Um auch Phasen mit geringem Gesamtanteil im Gestein erfassen zu können, wurden ausgewählte Proben vor der Analyse zunächst in bi-distilliertem Wasser gelöst und anschließend mittels Unterdruckfiltration unter Nutzung eines Membranfilters mit 0,1 µm Porenweite vom unlöslichen Gesteinsanteil mit mehrfachem Spülen vom löslichen Gesteinsanteil getrennt. Anschließend erfolgte die Messung mittels RDA unter Verwendung eines PANalytical MPD Pro Röntgendiffraktometers. Die quantitative Analyse erfolgte unter Nutzung der Rietveld-Software BGMN.

3.6.1.6 Isotopengeochemische Untersuchungen an Sulfaten

Die Messungen der Verhältnisse von stabilen Isotopen in Sulfaten wurden am Institut für Geologie und Paläontologie der Universität Münster in der Arbeitsgruppe für Historische und Regionale Geologie durchgeführt. Die Darstellung der Isotopenergebnisse erfolgt in der Standard Delta-Notation als $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ (‰, VCDT) bzw. $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ (‰, VSMOW).

Das Sulfat wurde in 10 %-iger NaCl-Lösung gelöst und anschließend durch Zugabe von BaCl₂-Lösung ausgefällt. Das Präzipitat wurde in Zinnkapseln eingewogen und anschließend im continuous flow-Verfahren mittels EA-IRMS (elemental analyzer – isotope ratio mass spectrometry) die Schwefelisotopie bestimmt. Die Bestimmung des $\delta^{18}\text{O}$ erfolgte ebenfalls aus den Bariumsulfatpräzipitaten im continuous flow-Verfahren mittels TC/EA-IRMS (thermal combustion – isotope ratio mass spectrometry).

Die Darstellung der Daten erfolgt in der Standardnotation $\delta^{18}\text{O}$ ‰ VSMOW für die Sauerstoffisotope, und $\delta^{34}\text{S}$ ‰ VCDT für die Schwefelisotope. Die Fehler betragen $\pm 0,5$ ‰ für die dargestellten $\delta^{18}\text{O}$ Werte und 0,3 ‰ für die $\delta^{34}\text{S}$ Werte.

3.6.1.7 Langzeit-Kriechversuche

Die Kriechversuche wurden am Institut für Gebirgsmechanik (IfG) Leipzig durchgeführt. Für die Versuche wurden zylindrische Prüfkörper mit einem Durchmesser von 60 mm und einer Höhe von 120 mm verwendet. Die Versuchsdurchführung erfolgte in hydraulischen Versuchsständen auf einem 3-säuligen Prüfrahmen und einem mittig angeordneten Hydraulikzylinder. Dieser wirkt über den Axialstempel der Druckzelle auf die Probe, die sich in einer beheizbaren Druckzelle befindet. Die vertikale Belastung der Probe im Dauerstandgerät wird über die Regelung des axialen Hydraulikdrucks realisiert. Vor der Versuchsdurchführung wurde durch Wiegen und Bestimmung von Durchmesser und Höhe der Versuchskörper mit einer digitalen Schublehre die Dichte der Prüfkörper mit einer Genauigkeit von 0,002 g/cm³ bestimmt.

Die Proben wurden mit ölresistenten Gummimanschetten ummantelt und in Triaxialzellen eingebaut. Die Regelung der Temperatur erfolgte über zwei Heizmanschetten auf der Außenseite der Druckzelle, die über einen eingebauten Temperatursfühler betrieben werden. Eine zusätzliche Kontrolle der Temperatur erfolgt über eine händische Messung in einer Sackbohrung der Druckzelle mit einem externen Digitalthermometer. Die Genauigkeit der Temperatur in der Zelle beträgt $\pm 0,2$ K.

Die Belastung der Proben erfolgte in zwei Laststufen bei einem Manteldruck von 20 MPa und einer Deviatorspannung von 11 MPa in der ersten und 16 MPa in der zweiten Laststufe



bei einer Versuchstemperatur von 65 °C. Pro Laststufe wurden die Probenkörper über eine Dauer von mindestens 50 Tagen (ca. 7 Wochen) verformt. Zu Beginn der Belastung wurden die Proben über einen Zeitraum von 7 bis 10 Tagen in einer Konsolidierungsphase hydrostatisch belastet.

Die Erfassung der Verformungsmesswerte erfolgte über die tägliche Ablesung von drei an der oberen Druckplatte des Prüfrahmens um 120° versetzt angebrachte 10 mm-Messuhren. Gemessen wird der Stempelvorschub, wobei bei einer Ablesegenauigkeit von 0,002 mm die Verformung der Probe aus dem Mittelwert bestimmt wird.

3.6.2 Stoffliche Zusammensetzung des Rotliegendesalinars

In allen untersuchten Bohrkernen konnte das Rotliegendesalinar als halitisches Gestein mit unterschiedlichen Anteilen feinklastischen Materials definiert werden. Diese silikatisch-karbonatischen Einschaltungen sind innerhalb des diapirischen Rotliegendesalinars größtenteils rot bis violett gefärbt. Violette Färbung ist mit einem hohen Karbonatanteil assoziiert. Lokal grünlich entfärbte Bereiche (Abbildung 3-39 A) sind in allen untersuchten Durchgängen ein typisches Charakteristikum.

In den untersuchten Kernabschnitten nimmt der detritische Gesteinsanteil lokal stark schwankende Anteile ein. Die Variation reicht von weniger als 1 Vol.-% bis zu ca. 70 Vol.-% detritischem Gesteinsanteil. In vielen der untersuchten Sequenzen ist der detritische Gesteinsanteil gleichmäßig scherben- oder flaserartig im umgebenden Steinsalz verteilt; lokal ist aber auch der Erhalt von sedimentären, siliziklastischen Lagen in Wechsellagerung mit Steinsalz zu beobachten (Abbildung 3-39).

Im Hauptteil der untersuchten Bohrkernabschnitte erscheint der detritische Gesteinsanteil homogen und ohne erkennbare interne Schichtung; in manchen Bereichen ist durch Farb- bzw. Korngrößenänderung eine Schichtung bzw. Flaserung oder Ausbildung von Konkretionen aus Anhydrit/Karbonat oder detritischem Material anderer Korngröße zu beobachten.

Der Steinsalzanteil im Gestein erscheint bedingt durch die Nebenmineralanteile bzw. durch Hämatitanteil an den Korngrenzen häufig ziegelrot bis fleischfarben. Große Halit-Einkristalle erscheinen häufig kristallklar bzw. weisen teilweise eine charakteristische Bernsteinfarbe auf, die nicht auf mikroskopisch detektierbare Einschlüsse zurückzuführen ist. Anhydrit konnte mikroskopisch nachgewiesen werden und tritt als Nebenmineralbestandteil jedoch nicht gesteinsbildend auf. Kali- bzw. magnesiumhaltige Salzminerale wurden im Rotliegendesalinar nicht beobachtet.

Der Grad der Beimengung detritischer Gesteinsanteile korreliert geophysikalisch mit Ausschlägen in Dichte- und Gamma-ray-Logs (Abbildung 3-38). Die Daten aus den Bohrlochmessungen erlauben jedoch keinen Rückschluss auf das Gefüge bzw. die Verteilung der unterschiedlichen Gesteinsanteile. Abseits hoher lokaler Anteile detritischen Materials und Erhalt von sedimentärem Lagenbau wird in Abhängigkeit der Halitkorngröße häufig eine gleichmäßige Verteilung von detritischen und halitischen Gesteinsanteilen beobachtet (Abbildung 3-39 B).

Während wenige Zentimeter mächtige detritische Lagen innerhalb des untersuchten Materials häufiger beobachtet werden, umfasst der Untersuchungsumfang trotz lokal hoher detritischer Gesteinsanteile keine halitfreie Sequenz. Laut Rüdiger (1965) sind bis zu 3 m

mächtige siliziklastische Bänke im Rotliegend-Salinar der Bohrung Heide 101 eingeschaltet. Im untersuchten Gestein mit hohem Detritusanteil ist Halit stets in Form von Klüften oder als Zement (siehe Kapitel 3.6.3) enthalten.

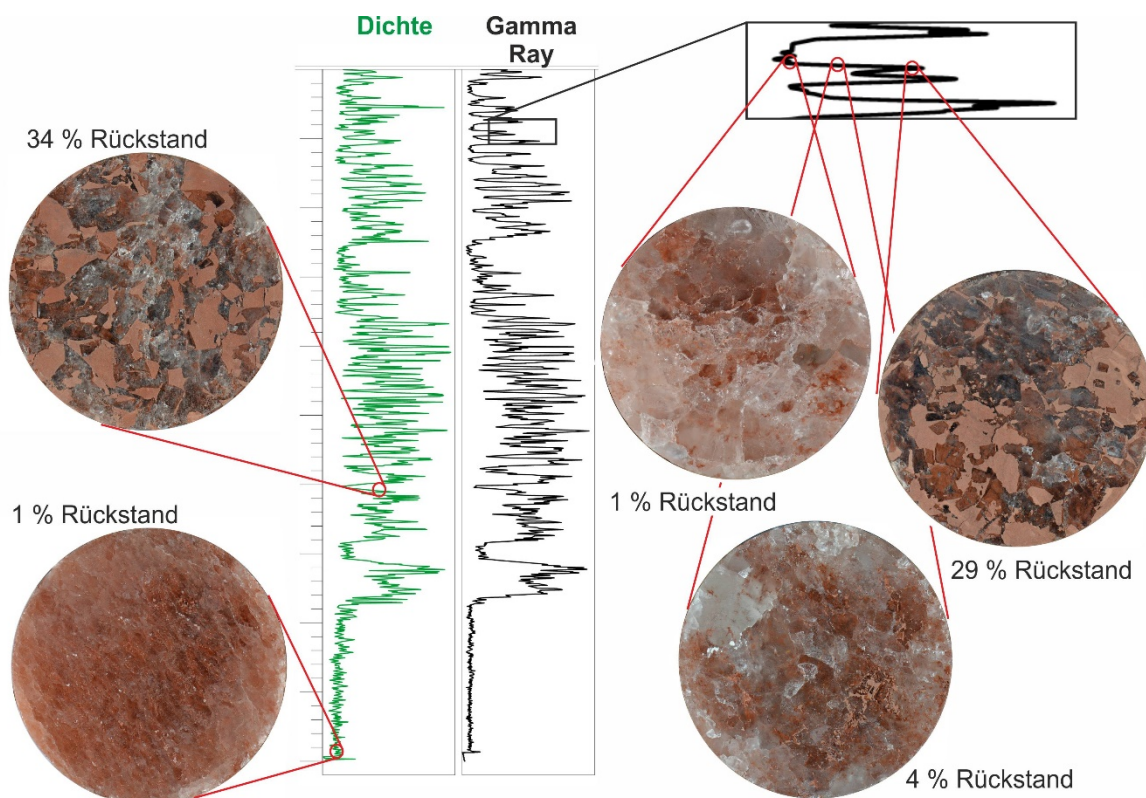


Abbildung 3-38: Darstellung des Dichte- und Gammaray-Logs im Verhältnis zum Anteil detritischer Gesteinsphasen in den Bohrkernen (mit jeweils 10 cm Durchmesser).

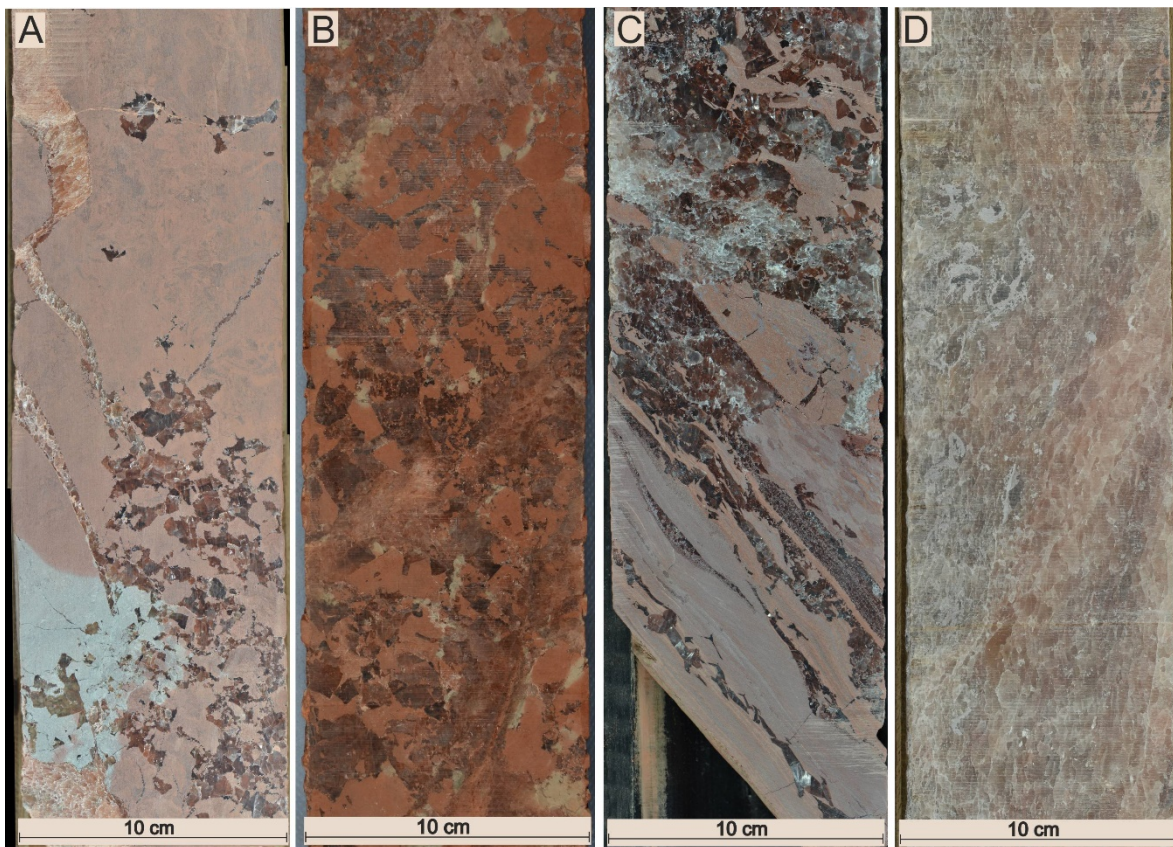


Abbildung 3-39: Makroskopische Gefüge des Rotliegendesalinales

Polierte (A, C, D) bzw. angefeuchtete (B) Bohrkernanschnitte:

- A: Hoher detritischer Gesteinsanteil (rot/grün) mit eingelagerten idiomorphen Halitkristallen (unten) und halitgefüllten Klüften (oben), Salzstruktur Kiel**
B: Gleichmäßig verteilter, scherbenartig ausgebildeter detritischer Gesteinsanteil in teilweise kluftartig ausgebildeter Halitmatrix, Salzstruktur Kiel
C: Wechsellagerung aus halitischen und siliziklastischen Lagen mit teilweise erhaltenem sedimentärem Gefüge, Salzstock Büsum
D: Halitdominiertes Rotliegendesalinar mit Kornformvorzugsregelung, Salzstruktur Krempe

3.6.3 Gefügeuntersuchungen

3.6.3.1 Rotliegendgefüge in Doppelsalinen

Der detritische Gesteinsanteil ist hauptsächlich an Halitkorn Grenzen bzw. zu einem kleineren Teil innerhalb der Halitkristalle orientiert. Das Halitgefüge lässt sich vorwiegend in drei Hauptgefügetypen einteilen (Henneberg et al. 2018):

- In Anwesenheit von idiomorphen bzw. hypidiomorphen Halitkristallen sind Halitkorn Grenzen im Kontakt zum detritischen Gesteinsanteil oft gerade ausgebildet; Kornkontakte von Halit zu Halit weisen größtenteils leicht lobate Korngrenzgeometrien



auf (Abbildung 3-41 A). Halitkörner, die teilweise oder ganz von detritischem Material umgeben sind weisen häufig eine idiomorphe bzw. hypidiomorphe Geometrie auf (Abbildung 3-40 D). Grobkörnige Halitkristalle weisen häufig intrakristalline Mikrorisse auf, die vermutlich auf hohe Spannungen während des Bohrens bzw. der späteren Bearbeitung (sägen, polieren) zurückzuführen sind. Häufig ist das Halitgefüge bimodal aufgebaut, wobei die Existenz von großen Halitkristallen mit Korndurchmessern von über einem Zentimeter beobachtet wird (Abbildung 3-40 C-E).

- Der zweite Halitgefügetyp zeigt ein makroskopisch gleichförmigeres Gefüge aus Halitkristallen mit lobaten Korngrenzen. Detritische Gesteinsanteile sind hier ausschließlich an Halitkorngrenzen gebunden. Dieser Gefügetyp tritt vorwiegend in Sequenzen mit geringem Gehalt an detritischem Gesteinsanteil auf (Abbildung 3-40 C, E, F).
- Innerhalb der detritischen Gesteine ist häufig ein Auseinanderbrechen von zusammenhängenden Gesteinsanteilen mit assoziierter Kluftbildung zu beobachten (Abbildung 3-41 D). Die Kluftfüllung weist in vielen Fällen eine starke Kornformvorzugsorientierung auf, wodurch makroskopisch Faserhalit bzw. Faseranhydrit ausgebildet ist. Die Öffnungsweite der Klüfte kann von wenigen mm bis zu mehreren cm betragen. Die Kluftbereiche sind vorwiegend mit Halit gefüllt, bei Kluftweiten unter 1 cm auch teilweise mit Anhydrit und Coelestin. Insbesondere in Bohrkernen aus den Salzstöcken Kiel und Krempe ist Faserhalit über den gesamten halitischen Gesteinsanteil einzelner Bohrkernabschnitte ausgebildet (Abbildung 3-40 B).

Insgesamt handelt es sich beim Rotliegendesalinar vorwiegend um ein grob- bis mittelkörniges Steinsalz. Die Nähe der unterschiedlichen Halittypen zueinander deutet makroskopisch eine inhomogene Verformung an, die durch die Verteilung von detritischen Phasen bedingt ist. Die gleichmäßige Verteilung von halitischen und detritischen Gesteinsanteilen unter Erhaltung von idiomorphen Halitkristallen deutet auf einen teilweise sedimentär-frühdiagenetischen Ursprung der Gesteine dieses Gefügetyps hin (Hovorka et al. 2007; Handford 1982).

Der detritische Gesteinsanteil ist mikroskopisch durch einen hohen Anteil an siliziklastischen Komponenten in Siltkorngröße charakterisiert. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen zeigen überwiegend ein Gefüge aus detritischen Komponenten ohne Kornformvorzugsorientierung an. Die Kornzwischenräume sind in den untersuchten Proben zu großen Anteilen vollständig mit Halit zementiert. Daneben existieren lokale Vorkommen an Anhydritzement bzw. phyllosilikatischen Zementen (Abbildung 3-42).

Mineralogisch setzt sich der detritische Gesteinsanteil aus Einzelkörnern von Quarz, Feldspat, Schichtsilikaten, Karbonat und opaken Gesteinsanteilen zusammen. Der opake Gesteinsanteil konnte durch Untersuchungen am Rasterelektronenmikroskop größtenteils als Hämatit bestimmt werden. Zu einem geringeren Anteil ist auch Ilmenit bzw. Titandioxid enthalten. Mittels Rasterelektronenmikroskopie konnten ebenfalls Einzelkörner von Schwermineralen wie Monazit, Apatit sowie mittels Polarisationsmikroskopie Turmalin bestimmt werden. Lokal treten ebenfalls geringe Mengen von Baryt und Coelestin im detritischen Gesteinsanteil oder am Kontakt zu Halit auf.

Die detritischen Komponenten weisen keine Anzeichen von Kompaktion auf, sondern sind häufig ausschließlich durch Punktkontakte verbunden oder berühren sich teilweise gar nicht. Dies deutet auf eine sedimentäre oder frühdiagenetische Ausbildung der evaporitischen Zemente hin.

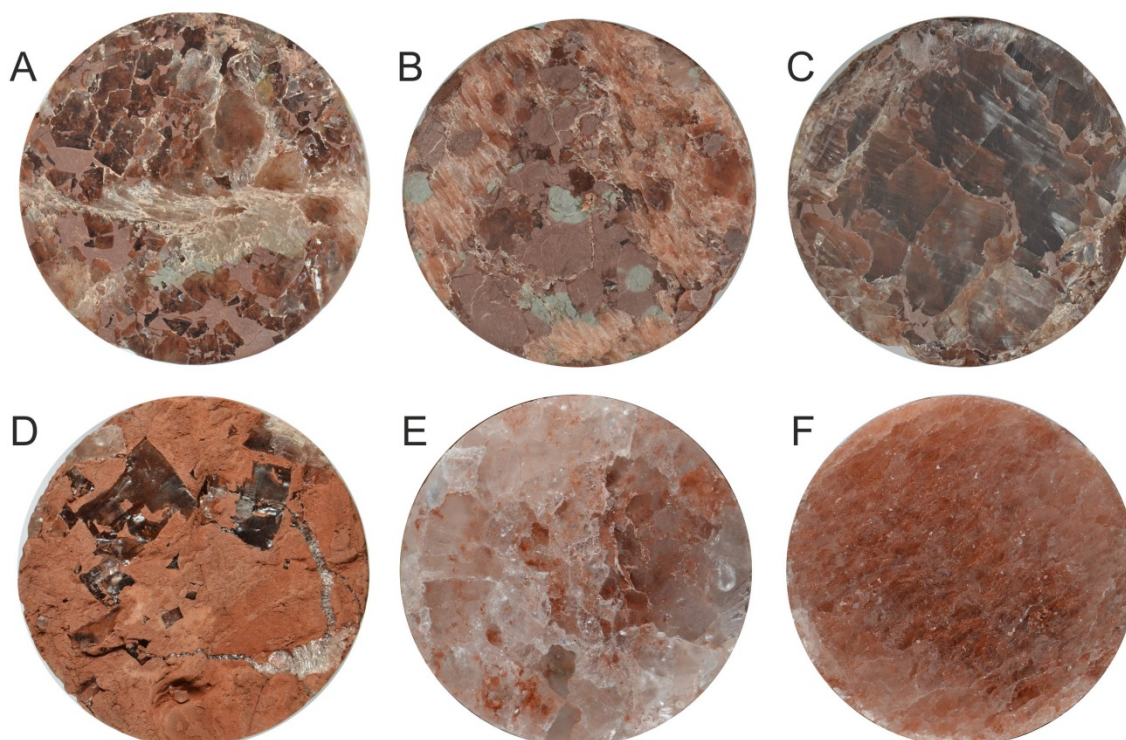


Abbildung 3-40: Gefüge des Rotliegendesalines am Beispiel von polierten Bohrkernquerschnitten aus den Salzstöcken Kiel (A-C) und Heide (D-F)

Bohrkerndurchmesser jeweils 10 cm:

- A: idiomorphe Halitkristalle in detritischem Material, Zwischenräume sind lokal mit Faserhalit verfüllt (Bildmitte)**
- B: Hell und violett gefärbter detritischer Gesteinsanteil (Mitte), umgeben von Faserhalit**
- C: Mehrere cm große Halitkristalle mit lobaten Korngrenzen und intra- sowie interkristallinem, geringen detritischem Gesteinsanteil**
- D: Siltstein mit cm-großen idiomorphen Halitkristallen und mit Halit verfüllten Klüften**
- E: grobkörniger Reinsalzbereich mit geringem detritischem Anteil an den Halitkorngrenzen**
- F: Feinkörniger Reinsalzbereich mit gleichmäßig verteiltem, geringen detritischem Gesteinsanteil an Halitkorngrenzen**

Anhydrit ist in den halitisch-detritischen Mischgesteinen des Rotliegenden durchschnittlich nur zu einem Anteil von ca. 1 Gew.-% am Gesamtgestein vorhanden (siehe Kapitel 3.6.4), manche Sequenzen sind vollständig anhydritfrei. Höhere Anhydritgehalte werden ausschließlich in den in den aus der Salzstruktur Krempe beschriebenen Karbonatlagen erreicht (Kapitel 3.6.3.2). Anhydrit liegt in Form von Knollen in detritischen Gesteinsanteilen, als Füllung von geringmächtigen Klüften oder in unzusammenhängenden Lagen vor.

Neben einem Anteil von ca. 10 Gew.-% Karbonat am detritischen Gesteinsanteil (Kapitel 3.6.3.2) zeigen einzelne Gesteinsanteile im Salzstock Kiel authigene Dolomitbildungen am Übergang von halitischer zu detritischer Gesteinsphase. Die rhomboedrischen Kristalle weisen Korngrößen von ca. 200 μm und eine hohe Einschlussdichte im Zentrum der Kristalle



auf, was auf zonares Wachstum hindeuten könnte. Im Salzstock Krempe sind lokal begrenzt ebenfalls an der Grenze von halitischer zu detritischer Phase authigene, stängelige Eisenoxidbildungen zu beobachten.

Im Halit wurden ebenfalls am Kontakt zum detritischen Gesteinsanteil lokal fein verteilte Hämatitsäume an den Korngrenzen nachgewiesen (Abbildung 3-41 E). Darüber hinaus kommt es in Klüften oder im Kontakt zum Detritus lokal zu einem gehäuften Auftreten von Korngrenzfluiden (Abbildung 3-41 B). Intrakristalline Fluide bzw. Chevronstrukturen, wie sie beispielsweise aus tonreichen Lagen des Zechstein beschrieben wurden (Onneken et al. 2018), sind nicht zu beobachten. An den Kornkontakten von Halit zu Halit sind Korngrenzfluide vorwiegend in Form einzelner Tröpfchen/Bläschen vorhanden.

Neben dem oben beschriebenen Gefüge ist in der Salinarstruktur Krempe ein weiterer Gefügetyp ausgebildet (Abbildung 3-39 D). Die Farbe des Halits ist hier gelblich-grau bis fleischrot ausgeprägt und zeichnet sich durch eine makroskopisch zu beobachtende Kornformvorzugsorientierung aus, wobei kein Faserhalit ausgeprägt ist. Die Korngrößen im Halit betragen durchschnittlich ca. 2 mm, wobei leicht gelängte, xenomorphe Halitkörner mit leicht lobaten Korngrenzen ausgebildet sind. Durch die Gefügemerkmale ähnelt dieser Gefügetyp daher makroskopisch eher dem Zechsteinsalinar, als dem übrigen Rotliegendesalinar. Im Unterschied zum Zechsteinsalinar sind aber in den Nebenmineralbestandteilen die siliziklastischen Anteile omnipräsent. Zusätzlich weist der niedrige Bromidgehalt von unter $10 \mu\text{g/g}_{\text{Halit}}$ (Kapitel 3.6.4) auf eine Zugehörigkeit zum Rotliegendesalinar hin.

Häufig sind die Nebenmineralanteile als eine Wechsellagerung aus Siliziklastika, mikritischem Karbonat und teilweise stark idiomorphen, eingeregelt Anhydritkristallen zu beobachten. Anhydrit tritt aber auch fein dispers im Gestein verteilt oder am Kontakt von Halit und Nebenmineralbestandteilen auf. Ebenso sind in Bereichen mit hohem Anhydritanteil teilweise Pseudomorphosen von Halit nach Gips/Selenit ausgebildet (Abbildung 3-41 F), diese sind ebenfalls am Kontakt von Halit zum Nebenmineralanteil lokalisiert. Vereinzelt kommt es zur Neubildung von Quarzphasen in Form von idiomorphen Kristallen mit Haliteinschlüssen oder Chalcedon (vgl. Kapitel 3.6.3.2). Generell ist in den Bohrkernen der Salinarstruktur Krempe im Vergleich zu den Salinarstrukturen Kiel und Heide ein durchschnittlich höherer Karbonat- sowie Anhydritgehalt zu beobachten.

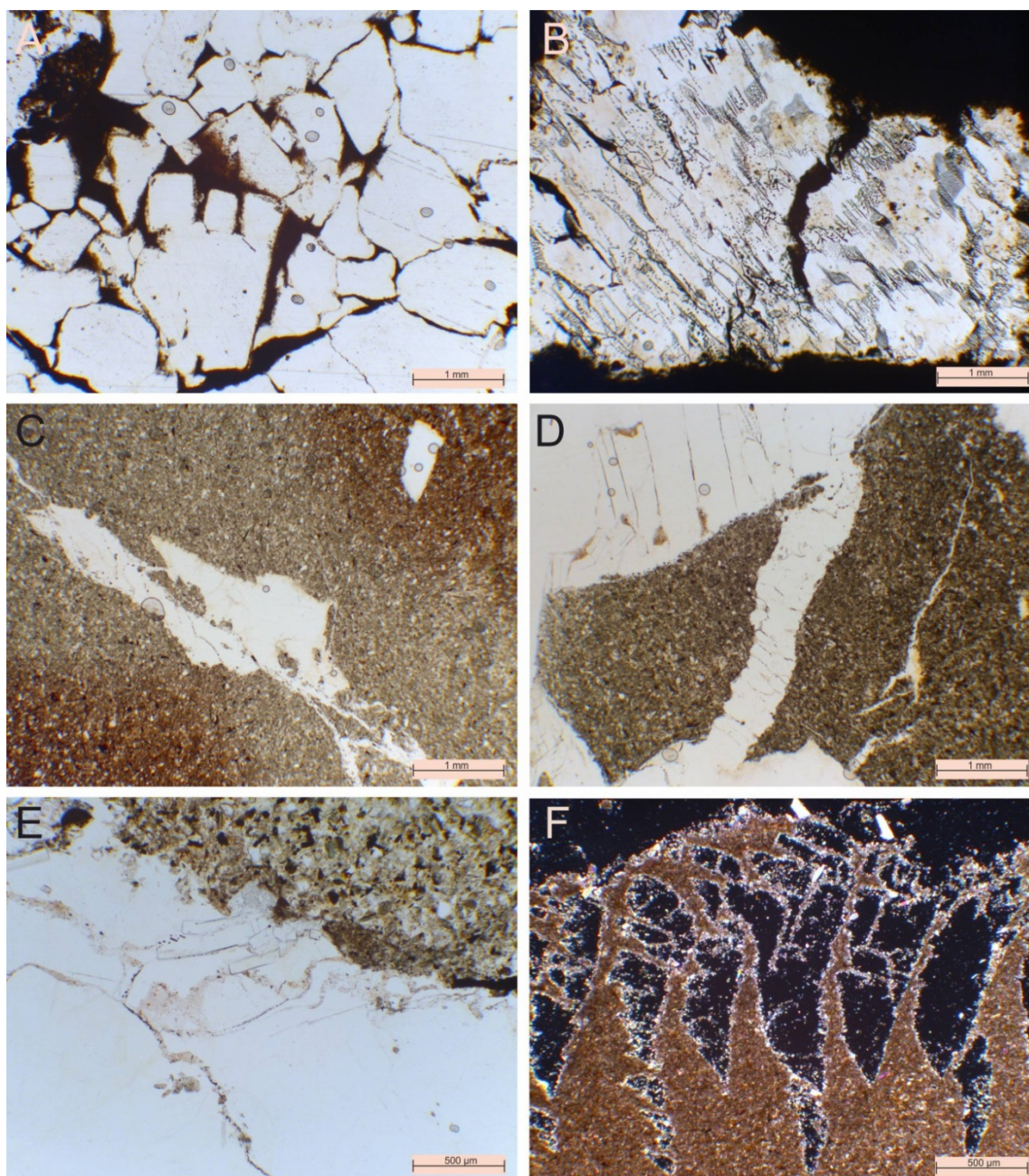


Abbildung 3-41: Mikrostrukturen im diapirischen Rotliegendesalinar der Salinarstrukturen Kiel und Krempe

- A: Idiomorphe Halitkristalle (farblos) umgeben von detritischem Gesteinsanteil (braun), II Pol**
- B: Feinkristalliner Halit im Kontakt zu Detritus mit hohem Fluidanteil an Korngrenzen, sowie feindispers verteilten Hämatitschuppen in Halit, II Pol**
- C: Detritischer Gesteinsanteil mit Haliteinschlüssen, im Zentrum des Bildes ist der Detritus entfärbt, II Pol**
- D: Halitgefüllte Kluft in Detritus, II Pol**
- E: Anreicherung von Anhydrit und Hämatitschuppen an Halitkornengrenzen am Übergang zum Detritus**
- F: Halitpseudomorphosen nach Gips/Selenit, + Pol**

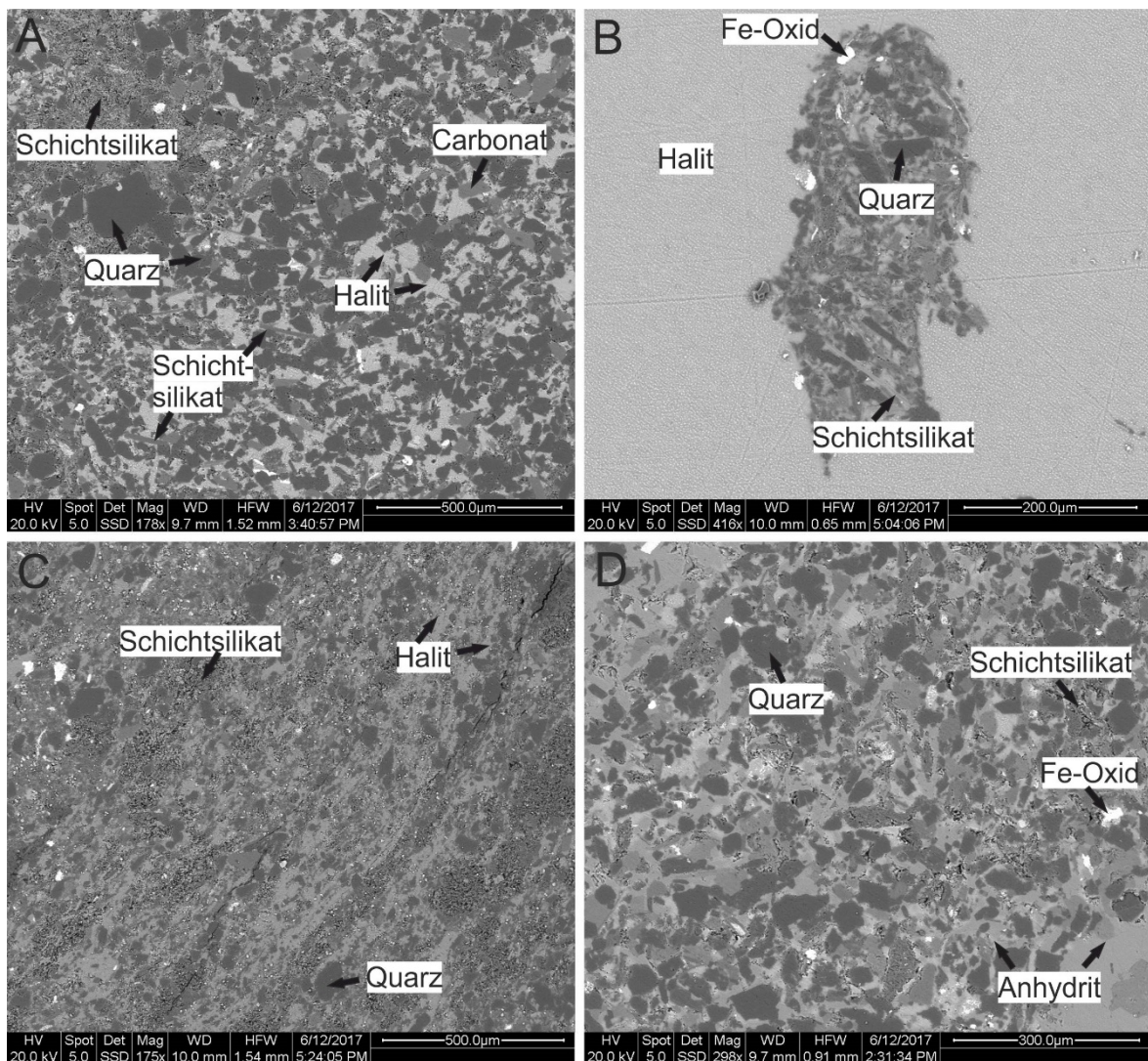


Abbildung 3-42: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von detritischen Gesteinsanteilen im Rotliegendesalinar

- A:** Regellos orientierte detritische Gesteinskomponenten, umgeben von Halitzement, lokal treten Schichtsilikate als Zement auf (oben links), Salzstock Krempe
- B:** Lokal begrenzter Detritus in Halitkorn, Salzstruktur Kiel
- C:** Bereich mit reliktsicher Lagerung und lokal hohem Anteil an Halitzement, Salzstruktur Krempe
- D:** Lokal mit anhydritischem Zement umgebene detritische Gesteinsanteile, Salzstruktur Kiel

3.6.3.2 Karbonathaltige Zwischenlagen in Rotliegendesalinar

In der Salzstruktur Krempe wurden neben der in Kapitel 3.6.3 beschriebenen halitisch-siliklastischen Ausprägung des Rotliegendesalinars vereinzelt karbonatische Lagen erbohrt.

Die Karbonatdurchgänge sind anhand ihrer grauen bis hellroten Farbe deutlich von den übrigen Gesteinen des Rotliegendesalinars zu unterscheiden. Sie umfassen dichte, teilweise laminierte Karbonatgesteine, die von Halitklüften durchwirkt sind. Häufig ist innerhalb der



Laminierung eine deutliche Verfaltung bzw. Verkippung der sedimentären Lagerung zu erkennen (Abbildung 3-43 A).

Die Laminierung ist aus einer Wechsellagerung aus mm-mächtigen Lagen von Siliziklastika und mikritischem Karbonat mit wechselnden Anteilen von Anhydrit und Halit aufgebaut. Dabei überwiegt der karbonatische Anteil im Gestein. Siliziklastische Lagen weisen eine nicht konstante Mächtigkeit auf und laufen keilförmig aus (Abbildung 3-43 C). Verformung ist makroskopisch durch lokale, teilweise starke Faltung der Lagen sichtbar. In anderen Bereichen ist die Lagerung durch Falten und Störungen im mm-Maßstab unterbrochen, wodurch makroskopisch der Eindruck eines Flasergefüges entsteht (Abbildung 3-43 B).

Eine Besonderheit dieser Lagen ist die häufig zu beobachtende Existenz von diagenetischen Mineralneubildungen. Dies umfasst hauptsächlich die Bildung von authigenen Quarzkristallen (Abbildung 3-43 E), Quarzsäumen, Karbonat- und Anhydritneubildungen. Lokal wird auch Chalcedon beobachtet. Die Authigenese tritt entweder schichtkonform oder am Kontakt von Halit zum Nebengestein auf. Die authigenen Mineralphasen zeigen häufig zahlreiche Einschlüsse von Halit, Anhydrit und/oder Karbonat. Des Weiteren sind lokal Glaukonitkonkretionen zu beobachten. Zusätzlich sind in den karbonatischen Lagen häufig Kupferkieskonkretionen ausgebildet (Abbildung 3-43 D). Diese stellen im Zusammenhang mit den vorwiegend grauen Farben einen Hinweis auf reduzierende Bedingungen während der Mineralbildung dar, im Gegensatz zum vorwiegend ferritisch-oxidisch geprägten Gefüge des in Kapitel 3.6.3 beschriebenen Rotliegenden Salinars.

Alle karbonatischen Lagen sind zu unterschiedlichem Grad halitisch durchsetzt, entweder schichtkonform oder aber in Form von faserhalitgefüllten Klüften. Diese können im Gestein eine Öffnungsweite von bis zu 30 cm erreichen. Der Halit weist häufig eine fleischfarbene Eigenfarbe auf, die auf lokal starke Anreicherung von Hämatitplättchen an Korngrenzen und teilweise innerhalb der Halitkörner zurückzuführen ist, insbesondere an Kontakten zum karbonatisch-siliziklastischen Gesteinsanteil (Abbildung 3-43 A). Die halitischen Bestandteile des Gesteins weisen Bromidgehalte von unter 10 µg/g auf (Abbildung 3-50), was die Zugehörigkeit der Karbonatsequenzen zum Rotliegenden belegt. In Spülproben konnte das Karbonatgestein über eine Länge von bis zu 30 m in der Bohrung nachgewiesen werden, allerdings bei unbekannter struktureller Lagerung. Gesteinsmerkmale wie Farbe, sedimentäre Schichtung sowie der Gehalt an Kupferkies legen eine Analogie zu den nach Behrendt (1990,1993) beschriebenen Leithorizonten als Begleithorizonte der Salzlagen aus dem flach lagernden Rotliegenden nahe.

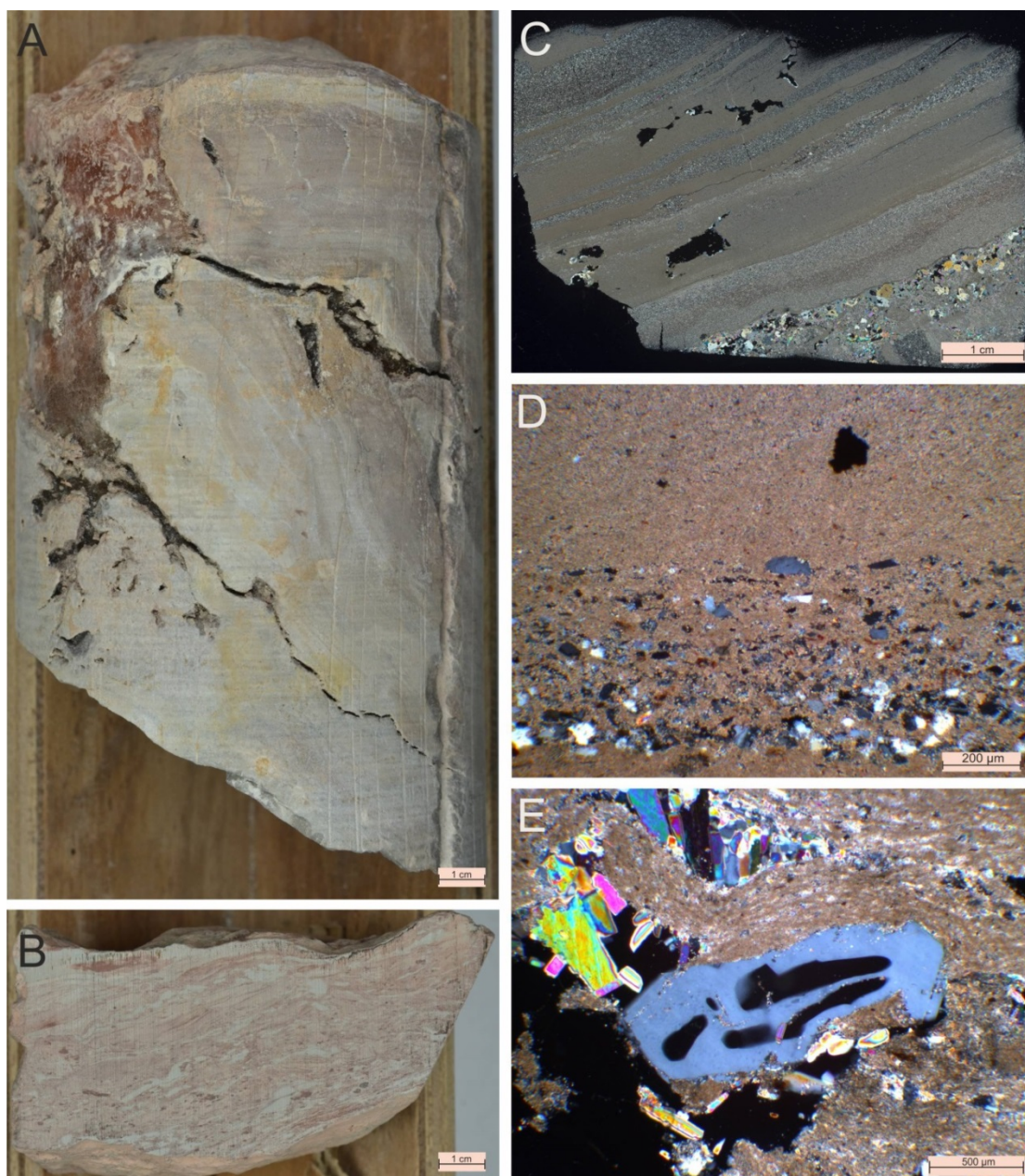


Abbildung 3-43: Makroskopische und mikroskopische Merkmale der Karbonatlagen in der Salzstruktur Krempe

- A: Karbonatlage im Bohrkern, das laminierte und verfaltete Karbonat wird von Halitklüften durchschlagen**
- B: Ungeordnete Flaserschichtung von hellroten, siliziklastischen und grauen karbonatisch-anhydritischen Gesteinsanteilen**
- C: Wechsellagerung aus karbonatischen und siliziklastischen Lagen mit großen Halitkristallen, + Pol**
- D: Quarzdominierte siliziklastische Lagen in feinkörniger Karbonatmatrix, Kupferkies-Konkretion (schwarz) im oberen Bildteil, + Pol**
- E: Authigen gebildeter Quarzkristall mit Haliteinschlüssen, umgeben von Karbonat, Halit und Anhydrit, + Pol**



3.6.3.3 Zechsteingefüge in Doppelsalinaren

Durch die interne Verfaltung von Rotliegend- und Zechsteinsalinar in der Salzstruktur Kiel wurden innerhalb der Kavernenerkundungsbohrungen beide Lithologien angetroffen (Kapitel 3.4.2). Innerhalb des Zechsteins wurden sowohl Lithologien der Staßfurt-Formation als auch der Leine-Formation erbohrt.

Im Kontakt zum Rotliegendsalinar wurde ausschließlich das Staßfurt Hauptsalz angetroffen. Das Hauptsalz lässt sich makroskopisch vom Rotliegendsalinar durch seine graue Eigenfarbe abgrenzen. Die Untereinheiten des Hauptsalzes (z2HS), das Streifensalz (z2HS2) und das Kristallbrockensalz (z2HS3), sind makroskopisch gut voneinander zu unterscheiden (siehe auch Bornemann et al. (2008)).

Im Kristallbrockensalz (z2HS3) werden cm-große Einkristalle mit zahlreichen Fluideinschlüssen beobachtet (Abbildung 3-44 A,B), die auf eine Existenz als ehemalige, nun zerblockt vorliegende Einkristalllage hindeuten (Küster et al. 2009).

Diese liegen in einer Matrix, die durch lobate Halitkorn Grenzen charakterisiert ist, mit mittleren Korngrößen von 0,1 bis 1 cm. Der Gehalt an Nebenmineralphasen ist gering (Kapitel 3.6.4). Mikroskopisch konnten sowohl Anhydrit, vorwiegend entlang von Korngrenzen orientiert (Abbildung 3-44 E), sowie Polyhalit (Abbildung 3-44 G) beobachtet werden. Daneben ist Karbonat in Form weniger μm großer Kristalle in Verbindung mit Anhydrit enthalten.

Das Streifensalz (z2HS2) weist höhere Anhydritgehalte als das Kristallbrockensalz auf, vorwiegend in Form von fragmentierten Lagen oder Anhydritfasern. Diese sind sowohl aus mikrokristallinen (20-50 μm) xenomorphen Anhydriten, sowie aus bis zu 500 μm großen hypidiomorph bis xenomorphen Anhydritleisten aufgebaut (Abbildung 3-44 F) und zeigen mikro- sowie makroskopisch häufig leichte Verfaltung bzw. Rotation an. Des Weiteren enthalten die Anhydritknäuel innerhalb diskreter Lagen wenige μm große Karbonatkristalle sowie geringe Mengen an zwischen den Anhydritkristallen lokalisierbaren Tonmineralen, was makroskopisch die Abgrenzbarkeit einzelner Lagen innerhalb der Anhydritfasern zulässt (Abbildung 3-44 C). Durch das Fehlen der Kristallbrocken ist das Halitgefüge gleichförmiger aufgebaut, mit Korngrößen von 0,1 bis 0,5 mm.

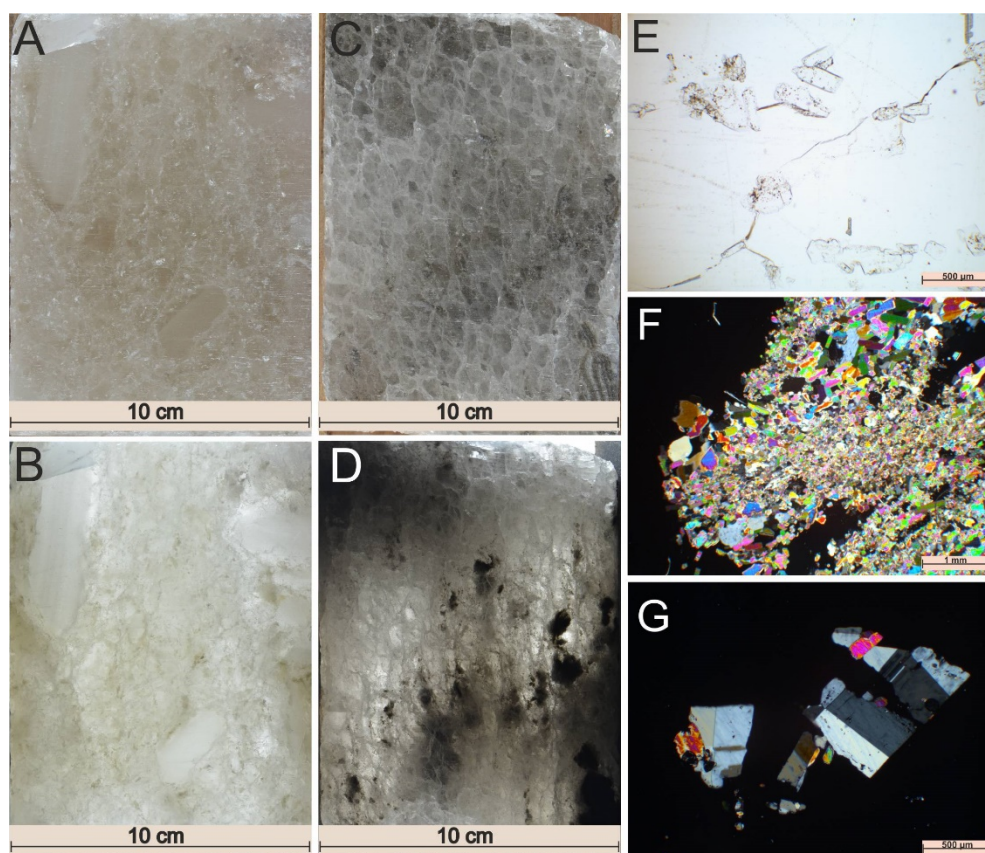


Abbildung 3-44: Makroskopische (A, B) und mikroskopische (C-E) Merkmale des Staßfurt Hauptsalzes der Salinarstruktur Kiel

- A: Kristallbrockensalz (z2HS3), Bohrkernanschnitt unter Auflicht**
- B: Kristallbrockensalz (z2HS3), Bohrkernanschnitt im Durchlicht**
- C: Streifensalz (z2HS2), Bohrkernanschnitt unter Auflicht**
- D: Streifensalz (z2HS2), Bohrkernanschnitt im Durchlicht**
- E: Entlang von Halitkorngrenzen angeordnete Anhydritkristalle, II Pol**
- F: Anhydritknäuel in Halit, + Pol**
- G: Polyhalitkristalle mit Verwachsungen und Durchkreuzungszwillingen in Halit, + Pol**

3.6.3.4 Rotliegend-Zechstein-Übergang

In der Salzmauer Heide konnte anhand von Bohrungen der Aufbau des Rotliegend-Zechstein-Übergangs mit Zwischenschaltung der vorwiegend anhydritischen und karbonatischen Gesteine der basalen Zechsteineinheiten (Werra- und Liegendes der Staßfurt-Formation) aufgeschlossen werden (siehe Kapitel 3.4.1.5).

Gesteine der Werra-Formation, die unterhalb des Rotliegend-Residualmergels innerhalb des überkippten Teils der Salinarstruktur Heide (Kapitel 3.4.1.6) erbohrt wurden, bestehen aus feinkörnigem, rötlich-braun gefärbten massigen Karbonatgestein mit geringen Anteilen von Anhydrit und detritischen Phasen (Abbildung 3-45 A, Werra-Karbonat) sowie einer engen Wechsellagerung von rhomboedrischen Karbonatkristallen und vorwiegend stengelig ausgebildetem Anhydrit, der teilweise bis über die Karbonatlagen hinweg in großen Kristallen vorliegt (Abbildung 3-45 B, Werra-Anhydrit).

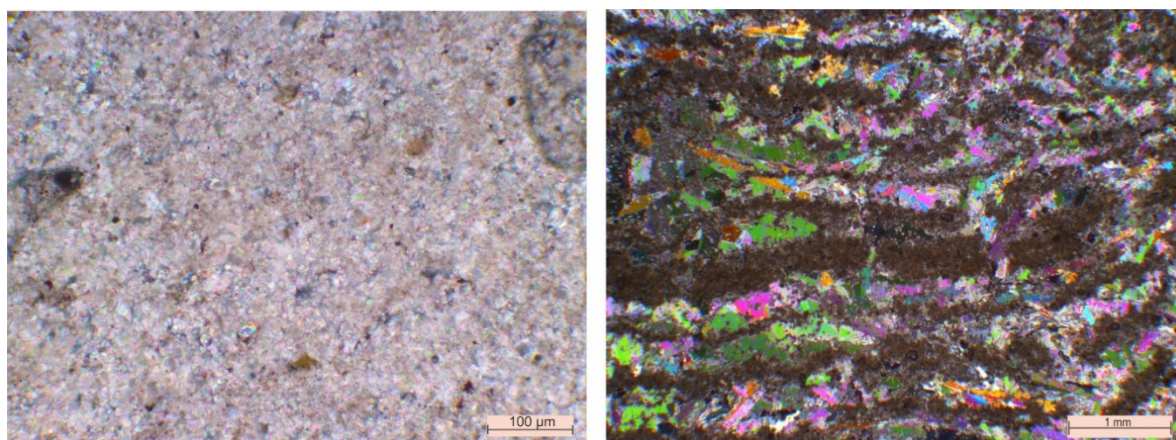


Abbildung 3-45: Mikroskopische Aufnahmen der Gesteine der Werra-Formation im Rotliegend-Zechstein-Übergang der Salinarstruktur Heide

Links: Feinkörniges Karbonatgestein (Werra-Karbonat), + Pol

Rechts: Engständige Wechsellagerung aus Karbonat und Anhydrit (Werra-Anhydrit), + Pol

In der Salinarstruktur Kiel dagegen fehlt die Zwischenschaltung der Werra-Formation und der Übergang vom Rotliegend- zum Zechsteinsalinar wurde lithologisch als Kontakt innerhalb der Salinarfolgen angetroffen (Abbildung 3-46). Dieser ist makroskopisch durch einen Farbwechsel von rotbraunem Rotliegendesalinar zu grauem Zechsteinsalinar charakterisiert, der durch den Materialwechsel in den dominierenden Nebenmineralanteilen von rotbraunen Siliziklastika zu hellgrauem Anhydrit hervorgerufen wird. Der Kontakt ist steil einfallend erbohrt worden und leicht undulierend ausgebildet. Indikatoren für eine Scherung entlang des Kontaktes konnten nicht ermittelt werden.

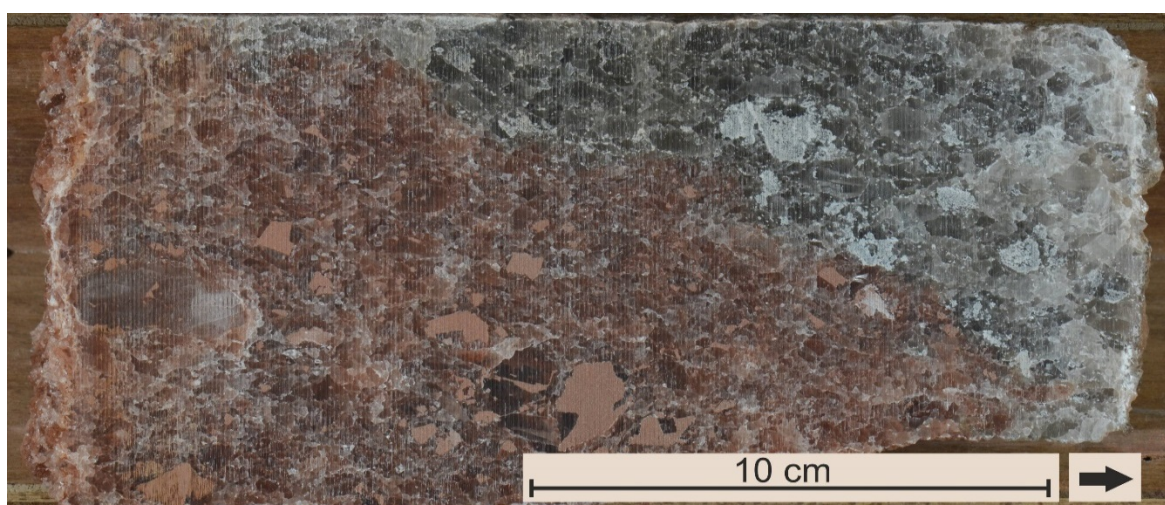


Abbildung 3-46: Rotliegend-Zechstein-Übergang in der Salinarstruktur Kiel-Honigsee, Bohrkernanschnitt

Der Pfeil markiert die Bohrrichtung.



Unmittelbar angrenzend zum Kontakt beträgt der Anhydritgehalt im Zechsteinsalinar 4,6 Gew.-% des löslichen Gesteinsanteils, im Rotliegendesalinar ist das Gestein anhydritfrei. Trotz des makroskopisch sichtbaren Materialunterschiedes unterscheiden sich die Bromidwerte über den Verlauf des Kontaktes nur geringfügig mit 54 µg/g im Zechsteinsalinar und 47 µg/g im Rotliegendesalinar.

3.6.3.5 Paläopiezometrie

Für die Paläopiezometrie (Kapitel 3.6.1.3) wurden sowohl Proben aus dem Rotliegend- wie auch aus dem Zechsteinsalinar der Struktur Kiel-Honigsee ausgewählt. In allen untersuchten Dickschliffen konnten Subkörner nachgewiesen werden. Diese sind nicht in allen Halitkörnern zu finden, teilweise liegen subkornfreie Körner direkt neben subkornreichen Körnern vor (Abbildung 3-47 B).

Das Vorkommen von Subkörnern ist nicht an bestimmte Kristallformen und -größen des Halits gekoppelt. Während Subkörner typischerweise eine unregelmäßige, rundliche Subkornrenzgeometrie aufweisen (Abbildung 3-47 A, C), konnten in faserhalitischen Bereichen in einzelnen Halitkörnern Subkörner mit gelängter Geometrie beobachtet werden (Abbildung 3-47 C).

Die gemessenen Subkorngrößen liegen in einem Intervall von $135 \pm 76 \mu\text{m}$ und $189 \pm 111 \mu\text{m}$, was mittleren Paläodifferenzialspannungen, berechnet nach Gleichung (1), von 1,13 MPa (+1,14/-0,36 MPa) bis 1,5 MPa (+1,57/-0,48 MPa) entspricht.

Aus den Ergebnissen ist weder eine Abhängigkeit der Paläodifferenzialspannungen von der stratigraphischen Zugehörigkeit noch von der Teufenlage zu beobachten (Abbildung 3-48). Daraus ergibt sich ein homogenes Feld intrakristalliner Spannung innerhalb des durch Bohrungen erschlossenen Teils der Salinarstruktur. Die ermittelten Paläodifferenzialspannungen liegen im unteren Bereich der Paläospannungen, die in natürlich deformiertem, diapirischen Salinar ermittelt wurden (Urai & Spiers 2007; Thiemeyer et al. 2016).

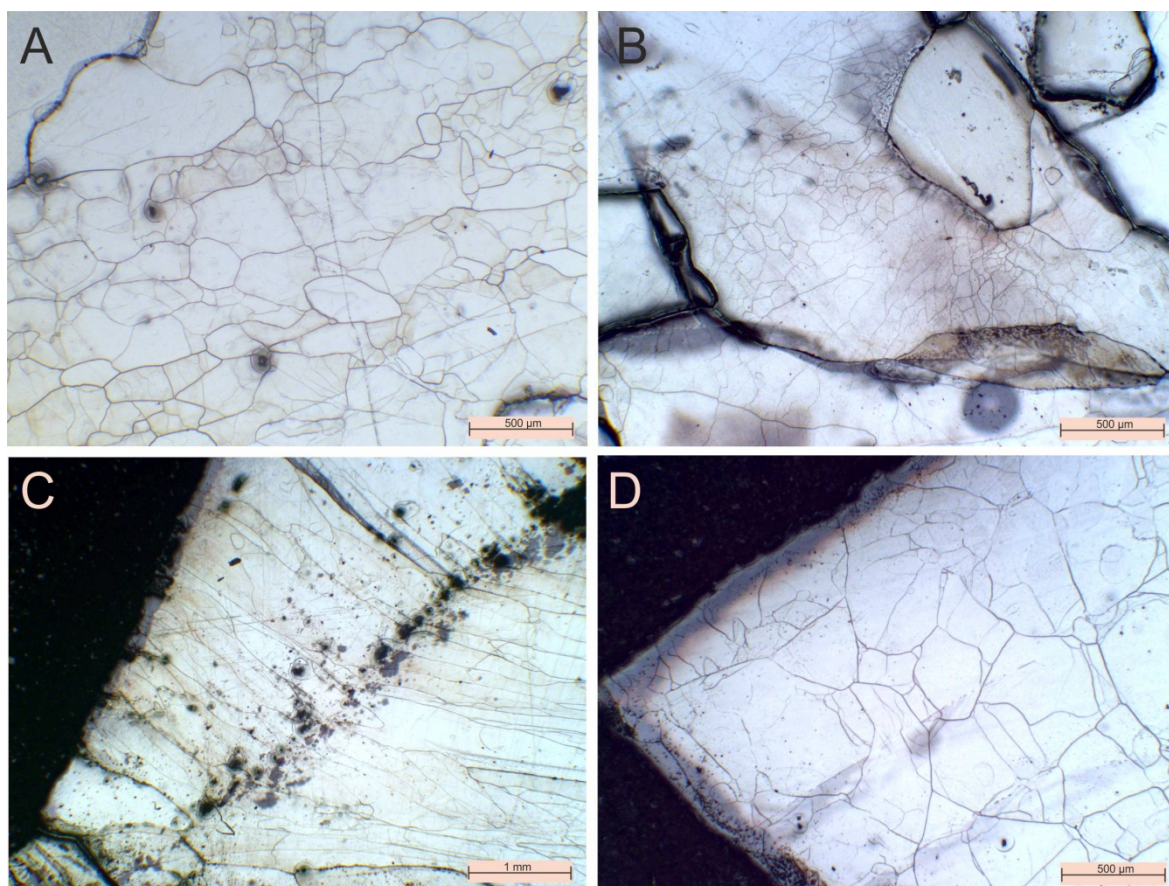


Abbildung 3-47: Subkörner in Halit unter Auflicht im Rotliegendesalinar der Salzstruktur Kiel-Honigsee

- A: Gleichmäßige Subkornverteilung innerhalb eines Halitkorns**
- B: Große Halitkörner mit Subkörnern neben kleinen, subkornfreien Halitkörnern**
- C: Elongierte Subkörner in halitischer Kluffüllung**
- D: Subkörner im Randbereich eines idiomorph ausgebildeten Halitkorns in detritischer Matrix (dunkel)**

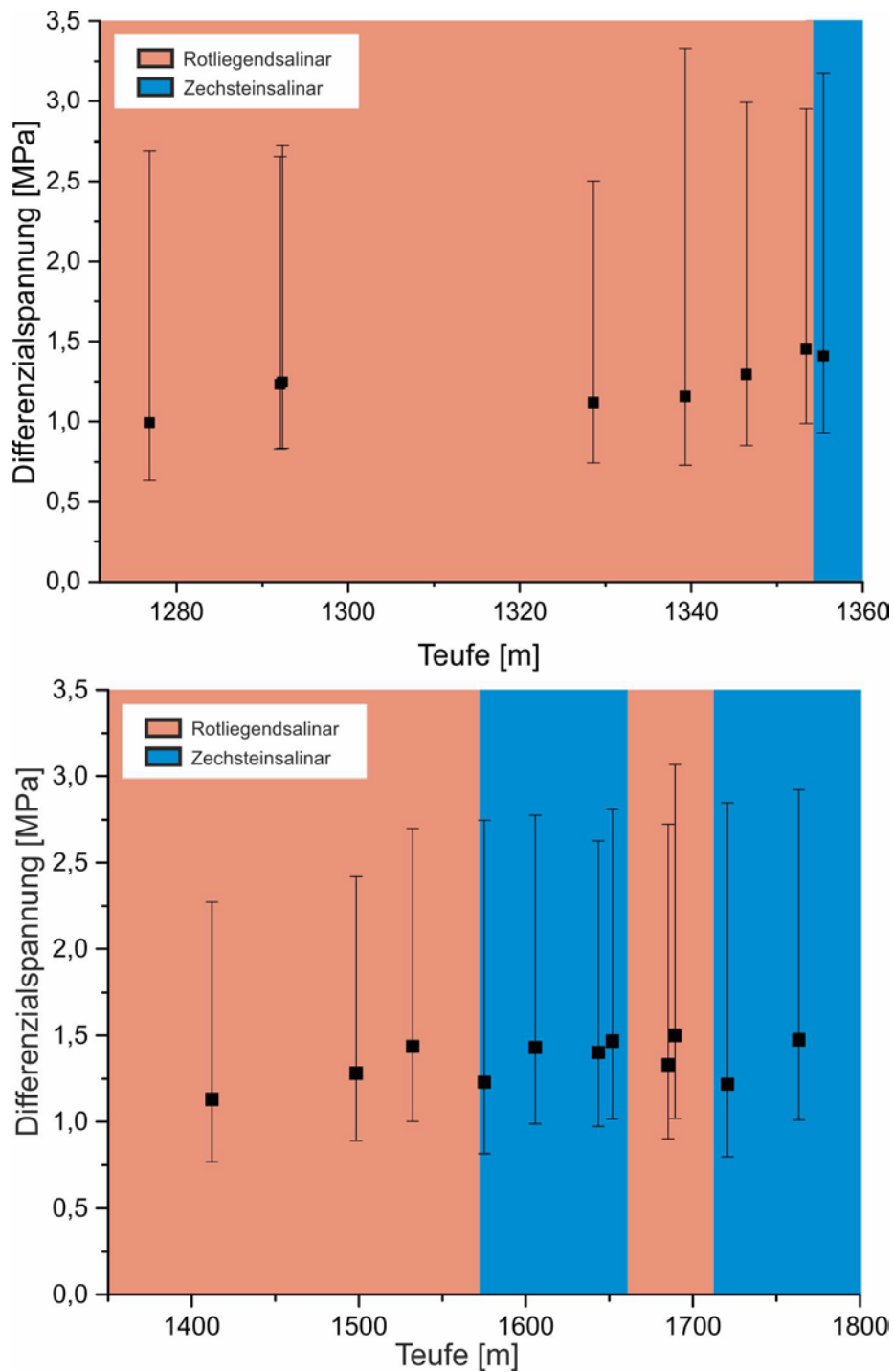


Abbildung 3-48: Aus Subkorndurchmessern in Halit berechnete Paläodifferenzialspannungen aus den beprobten Bereichen zweier Bohrungen der Salinarstruktur Kiel-Honigsee



3.6.4 Mineralbestand, Bromidgehalt und isotopengeochemische Eigenschaften

Der Mineralbestand der Proben wird hier am Beispiel der Salinarstruktur Kiel-Honigsee vorgestellt (Abbildung 3-49, Henneberg et al. (submitted)). Die in den Bohrungen als Rotliegend und Zechstein angesprochenen Lithologien unterscheiden sich sowohl durch die mineralogische Zusammensetzung der löslichen Gesteinsanteile als auch durch die Bromidgehalte in Halit.

Die geochemisch untersuchten Rotliegendproben bestehen ausschließlich aus Halit, Anhydrit und unlöslichen Gesteinsanteilen. Der Anteil an unlöslichem Rückstand in den Rotliegendproben schwankt stark zwischen unter 1 Gew.-% und 56 Gew.-%. Der Anhydritgehalt ist gering bei maximal 4,6 Gew. %. In über 50 % der Proben ist kein Anhydrit enthalten. Die durchschnittliche geochemische Zusammensetzung als Mittelwert aller Rotliegendproben beträgt 82,6 Gew.-% Halit, 0,9 Gew.-% Anhydrit und 16,5 Gew.-% unlösliche Bestandteile.

Im Gegenzug dazu bestehen die Zechsteinproben bis auf eine Probe zu über 90 Gew.-% aus Halit mit geringen Anteilen von Anhydrit und Spuren von Polyhalit, Kieserit und Sylvin. Der Anteil unlöslicher Bestandteile beträgt ausnahmslos unter 1 Gew. %. Die durchschnittliche mineralogische Zusammensetzung der Zechsteinproben beträgt 95,9 Gew.-% Halit, 2,5 Gew.-% Anhydrit, 0,7 Gew.-% Polyhalit. Kieserit und Sylvin sind nur in Einzelproben enthalten.

Der Bromidgehalt im Halit der Rotliegendproben schwankt von $3 \mu\text{g/g}_{\text{Halit}}$ bis $69 \mu\text{g/g}_{\text{Halit}}$ und liegt somit durchschnittlich deutlich höher als der Gehalt in den untersuchten Proben anderer Doppelsalinarstrukturen (Abbildung 3-50). In den Zechsteinproben ist der durchschnittliche Bromidgehalt mit $60 \mu\text{g/g}_{\text{Halit}}$ bis $247 \mu\text{g/g}_{\text{Halit}}$ deutlich höher. Hohe Bromidgehalte von über $157 \mu\text{g/g}_{\text{Halit}}$ korrelieren mit dem Vorkommen von K-Mg Phasen wie Polyhalit, Kieserit und Sylvin im Gestein.

Der Anhydritgehalt der Rotliegendproben ist in den Einzelproben ähnlich hoch wie in den Zechsteinproben. Insgesamt ist der durchschnittliche Anhydritgehalt im Rotliegendsalinar geringer, bedingt durch die hohe Anzahl an anhydritfreien Proben.

Außerhalb der Salzstruktur Kiel-Honigsee wurden im Rotliegendsalinar ausschließlich Bromidgehalte in Halit unter $10 \mu\text{g/g}$ bestimmt (Abbildung 3-50), was auf eine Genese des Halits aus ausschließlich kontinentaler Quelle in diesen Salinarstrukturen hindeutet. Die höheren Gehalte in der Struktur Kiel-Honigsee können auf Einfluss von möglicherweise rezyklierten Meerwasserlösungen während der Salzbildung hindeuten.

Die Messungen mittels Röntgendiffraktometrie an 16 unterschiedlichen Proben aus dem Rotliegendsalinar der Salzstrukturen Krempe, Heide und Kiel-Honigsee ergeben eine homogene Zusammensetzung des unlöslichen Gesteinsanteils aus den Mineralen Quarz, Feldspat (Kalifeldspat und Plagioklas), Hellglimmer, Chlorit, Calcit, Dolomit und Hämatit. Dies deckt sich mit den Beobachtungen der Rasterelektronenmikroskopie (Kapitel 3.6.3.1). Die quantitative Analyse von jeweils drei Proben aus dem Rotliegendsalinar der Strukturen Heide und Kiel-Honigsee ergibt eine Zusammensetzung von 25 Gew.-% bis 30 Gew.-% Quarz, 30 Gew.-% bis 40 Gew.-% Schichtsilikate (Hellglimmer und Chlorit), 20 Gew.-% bis 25 Gew.-% Feldspat (Plagioklas und Kalifeldspat) und 10 Gew.-% Karbonat (Calcit und Dolomit) in der unlöslichen Phase. Der Hämatitanteil beträgt zwischen 2 Gew.-% und 5 Gew.-% Prozent. Innerhalb des Probensets bestehen nur geringe Abweichungen in der Gesamtzusammensetzung, trotz der Probenherkunft aus verschiedenen Teufen und zwei unterschiedlichen Probenlokalationen (Abbildung 3-51).

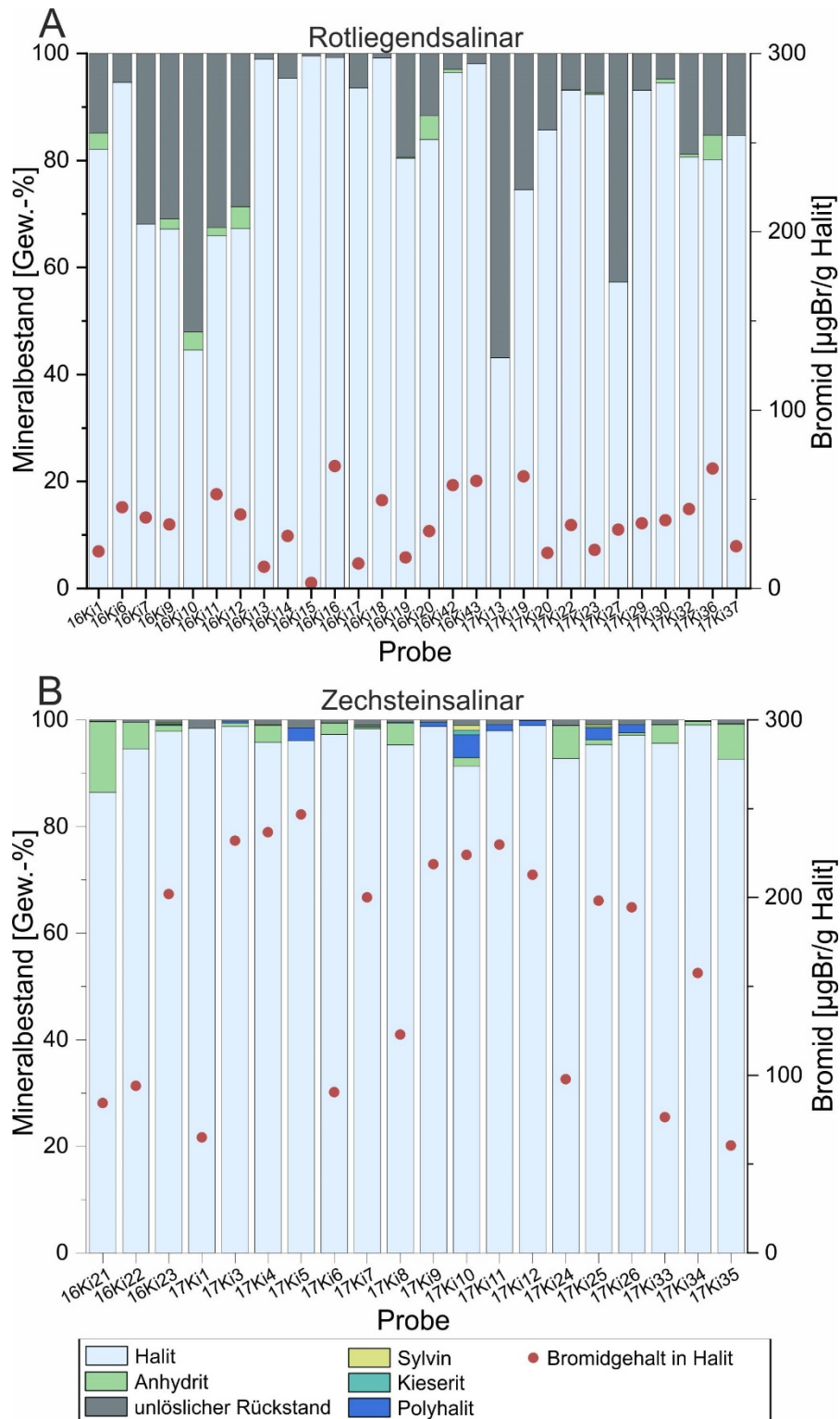


Abbildung 3-49: Berechneter Stoffbestand und Bromidgehalte in Halit von Gesamtproben des Rotliegendesalinars (A) und Zechsteinsalinars (B) aus der Salinarstruktur Kiel-Honigsee

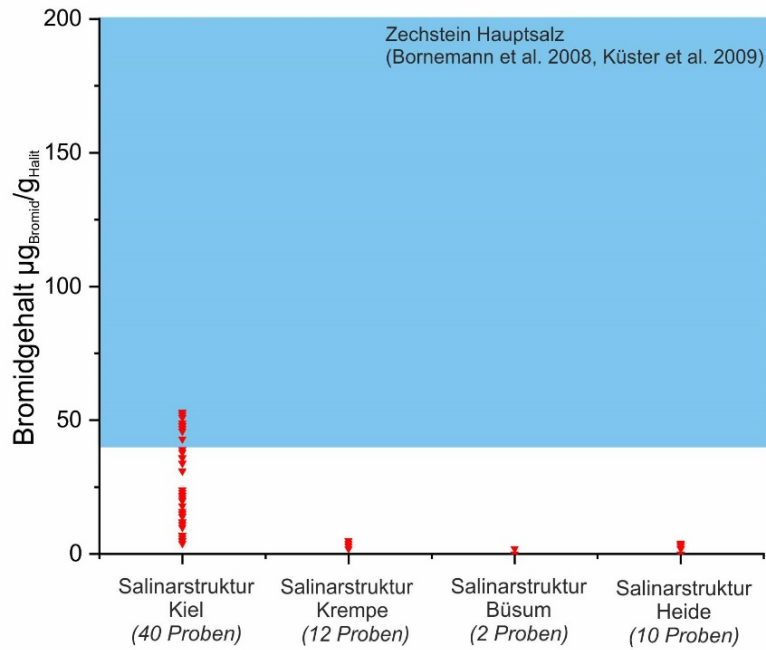


Abbildung 3-50: Bromidgehalte im Rotliegendesalinar (rot) der untersuchten Doppelsalinarstrukturen

Als Vergleich sind die Bromidgehalte des Staßfurt-Hauptsalzes dargestellt (blau)

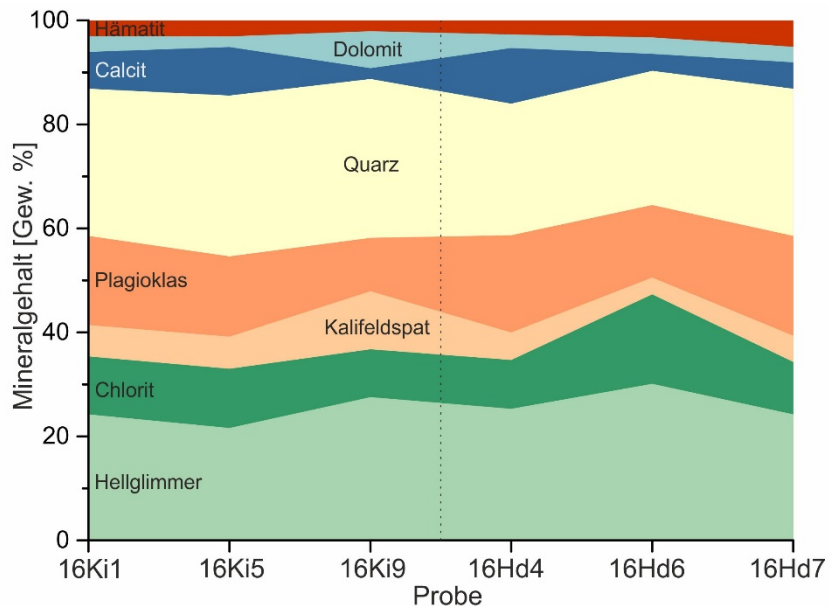


Abbildung 3-51: Quantitative mineralogische Zusammensetzung des wasserunlöslichen Anteils [Gew.-%] im Rotliegendesalinar der Salinarstrukturen Kiel-Honigsee (links) und Heide (rechts) (Henneberg et al. 2018)

Für die Messung von stabilen Schwefel- und Sauerstoffisotopen wurden Einzelproben aus allen untersuchten Bohrabschnitten untersucht. Das Probenet umfasst Proben aus dem Rotliegenden sowie dem Zechstein aus Doppelsalinen.

Die gemessenen $\delta^{34}\text{S}$ -Werte der Sulfatproben des Zechsteins liegen im Intervall von 10,4 ‰ bis 11,3 ‰ und weisen somit eine geringe Streubreite auf. Die Werte der Sauerstoffisotopie in den Zechsteinproben schwanken mit 9,3 ‰ bis 13,5 ‰ etwas stärker (Abbildung 3-52).

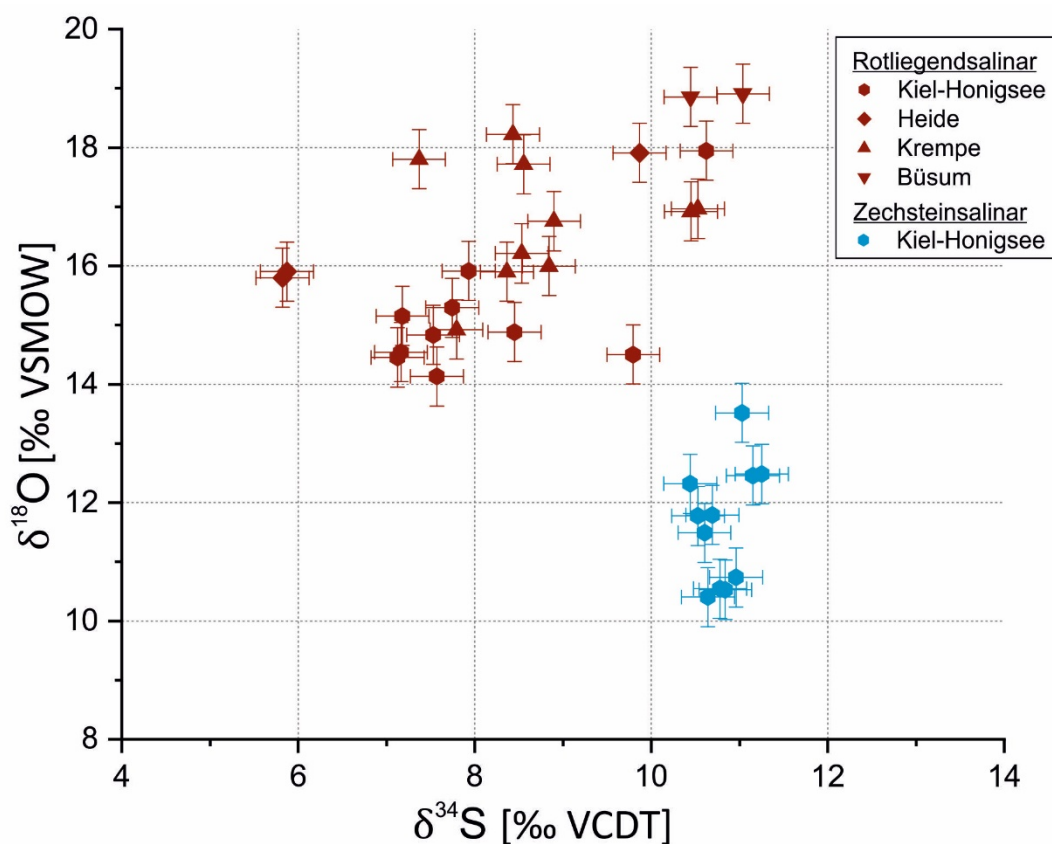


Abbildung 3-52: Ergebnisse der Untersuchungen von stabilen Schwefel- und Sauerstoffisotopen an Sulfaten des Rotliegenden und Zechstein aus Doppelsalinen

Die Schwefelisotopie in den Proben aus sulfathaltigen Gesteinen des Rotliegenden schwankt mit einem Intervall von 5,8 ‰ bis 10,6 ‰ deutlich stärker als die des Zechsteins. Die Sauerstoffisotopie variiert zwischen 14,1 ‰ und 18,2 ‰ (Abbildung 3-52). Da die Sauerstoffisotopie in den Rotliegendeproben durchschnittlich deutlich höhere Werte aufweist als in den Zechsteinproben und durch die Sauerstoffisotopie, abhängig von der Lithologie, verschiedene Intervalle abgedeckt werden, lassen sich die beiden stratigraphischen Gruppen deutlich voneinander abgrenzen. Innerhalb des diapirischen Rotliegenden scheinen höhere $\delta^{34}\text{S}$ -Werte mit höheren $\delta^{18}\text{O}$ -Werten zu korrelieren.

Die $\delta^{34}\text{S}$ -Werte der Zechsteinproben liegt innerhalb des Intervalls von 9 ‰ bis 13,4 ‰, das für marin gebildete Sulfate des oberen Perms bekannt ist (Claypool et al. 1980; Stemmerik et al. 1988; Kramm & Wedepohl 1991).

Dies gilt ebenso für einen Teil der Rotliegendproben. Leichtere Schwefelisotopie zwischen 5,8 ‰ und 9 ‰, wie in der überwiegenden Anzahl der Rotliegendproben gemessen, wurde sowohl bereits von Holser (1979) aus Rotliegend-Anhydriten in Deutschland und der Niederlande dokumentiert, sowie von Platt (1994) durch Untersuchungen an frühdiaogenetischen Anhydritzementen aus Rotliegend-Sandsteinen. Diese leichten Isotopenverhältnisse wurden als Sulfatbildung aus kontinentalen Rotliegend-Wässern gedeutet.

Schwankungen der Sulfatisotopie, wie in den Rotliegend-Proben beobachtet, wurden bereits von Legler (2006) an Anhydriten des Oberrotliegenden im Nordostdeutschen Becken dokumentiert. Diese Variationen werden als Resultat von prä-Zechstein Ingressionen mit Vermischung von marinen und nicht-marinen Wässern gedeutet.

3.6.5 Langzeit-Kriechversuche an Rotliegendsalinar

Zur Ermittlung der Kriecheigenschaften des Rotliegendsalinares wurden zehn zylinderförmige Probenkörper mit einer Länge von 12 cm und einem Durchmesser von 6 cm ausgewählt, die sich in ihrem Gehalt und der Verteilung der detritischen Phasen bzw. in der Korngröße des Halits unterscheiden und die Bandbreite der Ausprägungsformen im Rotliegendsalinar abbilden (Abbildung 3-53). Die Probenkörper stammen aus dem Rotliegendsalinar der Strukturen Kiel-Honigsee und Krempe aus Teufenbereichen zwischen 660 m (GM1 und GM2) und 1.535 m (GM9 und GM10). Die Kriechversuche wurden als triaxiale Dauerstandversuche bei konstantem deviatorischen Spannungszustand und konstanter Temperatur durchgeführt.



Abbildung 3-53: Probenkörper vor der Verformung

Abgebildet ist jeweils ein Körper von Probenpaar 1 (links) bis Probenpaar 5 (rechts)

Innerhalb der Probenpaare wurden die Probenkörper aus direkt benachbarten Kernabschnitten entnommen (Probenpaar 1-4), der maximale Abstand der Kerne eines Probenpaares beträgt 2,8 Meter (Probenpaar 5).

Die Dichte der Probenkörper variiert in einem Intervall von 2,18 g/cm³ bis 2,37 g/cm³ (Tabelle 3-3). Die Dichteunterschiede beruhen in erster Linie auf der Variation im Gehalt detritischer Phasen mit einer höheren Dichte als der von reinem Steinsalz (2,16 g/cm³).

Tabelle 3-3: Ergebnisübersicht der Kriechversuche

Probe	Dichte	Temperatur	σ_1	σ_3	σ_{Diff}	Gesamtverformung ϵ	Ermittelte Kriechrate $d\epsilon/dt$
	[g/cm ³]	°[C]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[1/d]
GM1	2,32	65	31	20	11	1,4	3,70E-05
		65	36	20	16		1,17E-04
GM2	2,38	65	31	20	11	0,87	1,48E-05
		65	36	20	16		3,68E-05
GM3	2,21	65	31	20	11	3,17	5,24E-05
		65	36	20	16		3,17E-04
GM4	2,21	65	31	20	11	3,49	5,18E-05
		65	36	20	16		2,14E-04
GM5	2,21	65	31	20	11	4,21	9,85E-05
		65	36	20	16		3,59E-04
GM6	2,22	65	31	20	11	3,34	9,68E-05
		65	36	20	16		4,13E-04
GM7	2,22	65	31	20	11	3,17	3,95E-05
		65	36	20	16		3,59E-04
GM8	2,18	65	31	20	11	1,98	1,51E-05
		65	36	20	16		1,49E-04
GM9	2,25	65	31	20	11	2,8	6,87E-05
		65	36	20	16		2,02E-04
GM10	2,18	65	31	20	11	3,78	7,59E-05
		65	36	20	16		2,18E-04

Alle Probenkörper zeigen im Lauf der Verformung das typische Kriechverhalten von Salzgestein, das bei stufenförmiger Belastung zunächst eine primäre, transiente Kriechphase durchläuft, bevor eine sekundäre, stationäre Kriechphase mit nahezu konstanter Kriechrate erreicht wird (Abbildung 3-54, vgl. Cristescu & Hunsche (1998)).

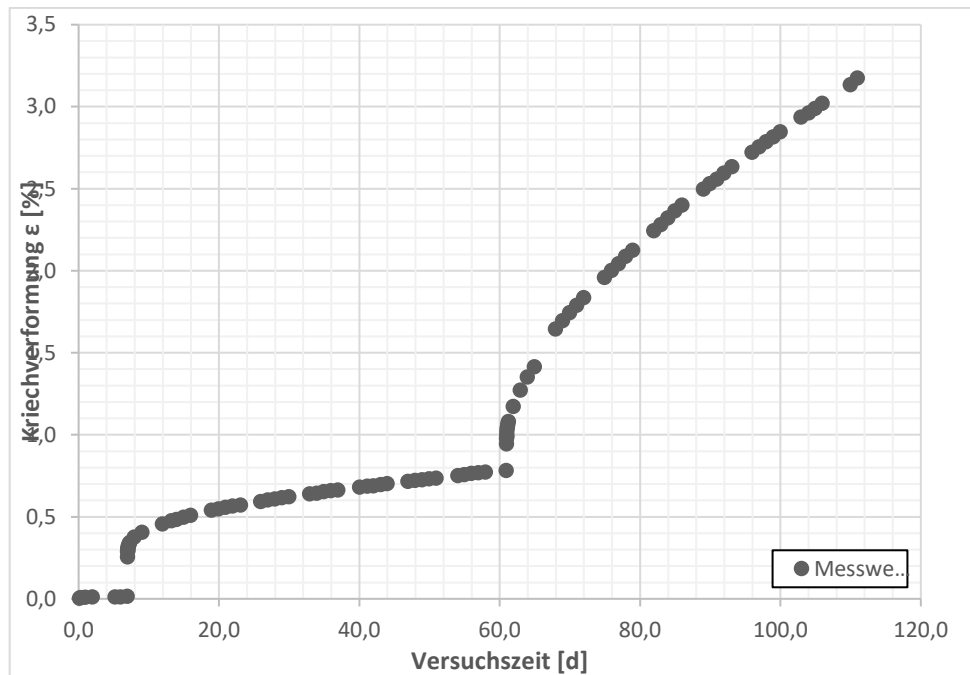


Abbildung 3-54: Verlauf der Verformungskurve über zwei Laststufen am Beispiel der Probe GM 3

Die Temperatur- und Spannungsabhängigkeit des stationären Kriechens von Steinsalz kann mithilfe des als BGR-a bezeichneten Kriechgesetzes dargestellt werden (Wallner et al. 1979; Hunsche 2003):

$$\dot{\varepsilon} = V \cdot A \cdot \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T}\right) \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^n \quad (2)$$

mit

- Vorfaktor V
- Experimentelle Konstante $A = 0,18 \text{ [d}^{-1}\text{]}$
- Spannungskoeffizient $n = 5$
- Bezugsspannung $\sigma^* = 1 \text{ MPa}$ (Normierung)



- Aktivierungsenergie $Q = 54$ [kJ/mol]
- Gaskonstante $R = 8,314 \cdot 10^{-3}$ [kJ/mol K]
- Temperatur T [K]

Abweichungen vom durch das Gesetz definierten Referenzwert werden durch sogenannte Kriechklassen beschrieben, die durch die Angabe des Vorfaktors V definiert sind (Tabelle 3-4). Die Kriechklasse 5 entspricht dabei dem Referenzgesetz BGR-a. Der Vorfaktor wird dem Kriechgesetz vorangestellt und ist definiert durch:

$$V = \frac{2^K}{32} \quad (3)$$

K = Kriechklasse

Tabelle 3-4: Kriechklassen und Vorfaktoren im BGR-a Kriechgesetz (Hunsche 2003)

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

Die aus der stationären Kriechphase bestimmten Kriechraten der experimentell verformten Probenkörper betragen $1,48E-5 \text{ d}^{-1}$ bis $9,85E-5 \text{ d}^{-1}$ in der niedrigeren Laststufe und $3,68E-5 \text{ d}^{-1}$ bis $4,13E-4 \text{ d}^{-1}$ in der höheren Laststufe (

Tabelle 3-3, Abbildung 3-55). Es ergeben sich Unterschiede innerhalb einer Größenordnung zwischen den Kriechraten einzelner Probenkörper.

Die höchsten Kriechraten werden innerhalb der Probenkörper GM5 und GM6 erreicht (Kriechklasse 4). Ähnlich hohe Kriechraten weisen die Probenkörper GM3 und GM4 (Kriechklasse 3 bis 4), sowie die Probenkörper GM9 und GM10 (ebenfalls Kriechklasse 3 bis 4) auf. Die geringsten Kriechraten wurden in den Probenkörpern GM1 und GM2 ermittelt (Abbildung 3-55). Innerhalb dieser Proben ist die Veränderung der Kriechrate durch die höhere Laststufe nahezu kongruent. Die Kriechklasse erniedrigt sich mit zunehmender Laststufe. In den Probenkörpern GM7 und GM8 erfolgt nach anfänglich geringeren Kriechraten eine stärkere Erhöhung der Kriechrate mit Aufbringen der höheren Laststufe.

Alle ermittelten Kriechraten liegen unterhalb des Referenzwertes für das Kriechgesetz BGR-a, das durch die Kriechklasse 5 dargestellt wird. Die Versuchsreihe charakterisiert das Rotliegendesalinar somit als langsam kriechendes Salinargestein.

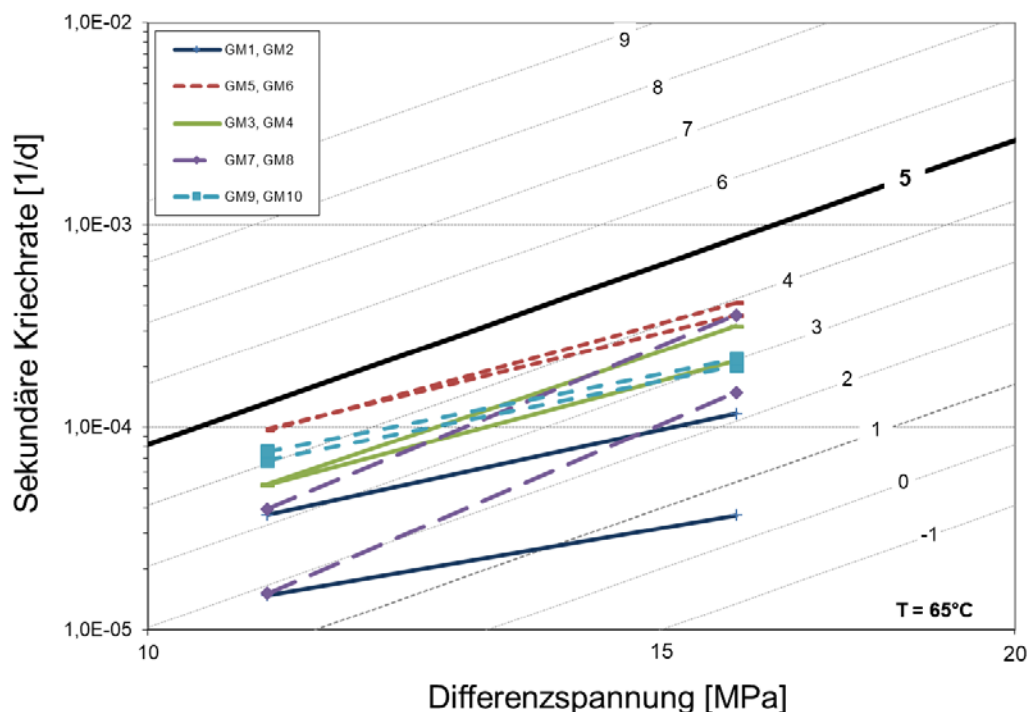


Abbildung 3-55: Kriechverhalten von Rotliegendesalzproben

Stationäre Kriechraten aufgetragen gegen den Spannungsdeviator; dargestellt sind die experimentell ermittelten Kriechraten der Versuchskörper gegen die Kriechklassen nach BGR-a Kriechgesetz bei einer Temperatur von 65 °C

Die Streuung von Kriechraten aus experimenteller Verformung innerhalb einer lithologischen Einheit über mehr als eine Größenordnung ist aus dem diapirischen Staßfurt Hauptsalz bekannt und lässt sich insbesondere auf die Menge, Verteilung und mineralogische Zusammensetzung von Fremdphasen zurückführen (Hunsche et al. 1996; Cristescu & Hunsche 1998). Im hier vorgestellten Probenstet werden in den Proben mit der höchsten Dichte die geringsten Kriechraten erreicht, sodass ein einschränkender Effekt auf das Kriechverhalten durch den hohen Anteil an Fremdphasen abgeleitet werden kann. Eine generelle Abhängigkeit von Dichte und experimentell erreichter Kriechrate kann jedoch nicht festgestellt werden (Abbildung 3-56). Im Gegenteil weisen die Proben GM7 und GM8 mit sehr geringer Dichte eine initial geringe Kriechrate auf. Dies kann im hohen Gehalt an Halit-Einkristallen begründet sein, die sich ebenfalls einschränkend auf das Kriechverhalten auswirken können.

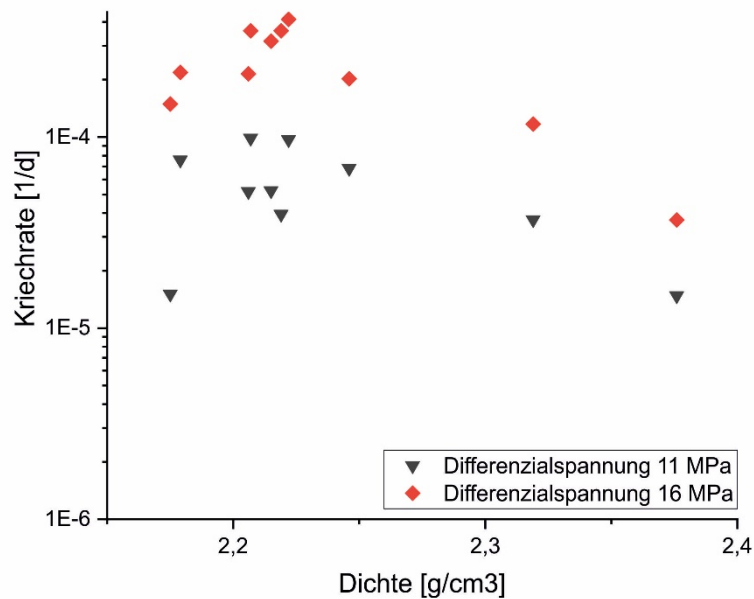


Abbildung 3-56: Experimentell ermittelte Kriechraten im Verhältnis zur gemessenen Dichte der Probenkörper

Der Kriechvorgang in Salzgestein äußert sich mikrostrukturell durch die Bildung von Subkörnern als Resultat der Bewegung von Versetzungen innerhalb des Kristallgitters.

Das Auftreten von Subkörnern als Resultat natürlicher Deformation wurde am Nebengestein der experimentell verformten Probenkörper untersucht. Nach Abschluss der Kriechversuche wurden fünf der Probenkörper auf das Auftreten von Subkörnern als Resultat der experimentellen Verformung hin analysiert. Dafür wurden Dickschliffe aus radialer, sowie axialer Orientierung zur Langachse der Probenkörper hergestellt und wie in Kapitel 3.6.1.3 beschrieben untersucht.

Im nicht experimentell deformierten Nebengestein finden sich große Subkörner mit einem mittleren Durchmesser von 111 μm bis 185 μm als Resultat natürlicher Deformation des Salzgesteins im Laufe der Salzstrukturgeneese. Durch Anwendung der in Kapitel 3.6.1.3 genannten Gleichung (1) ergibt sich aus den Subkorngrößen eine Größenordnung der natürlichen Paläodifferenzialspannungen von 1,8 MPa bis 1,1 MPa. Dadurch wird ein etwas größeres Intervall für die natürliche Paläospannung abgebildet als durch die Auswertungen in Kapitel 3.6.3.5.

In den deformierten Probenkörpern konnten kleinere Subkörner mit einem Durchmesser von durchschnittlich 7 μm bis 12 μm mikroskopisch nachgewiesen werden. Diese sind vorwiegend in der Umgebung von Phasen- oder Halitkorn Grenzen lokalisiert und selten über ein gesamtes Halitkorn zu beobachten (Abbildung 3-57). Dabei scheint es sich um während der experimentellen Verformung neu entstandene Subkörner zu handeln. Für diese Subkörner ergibt sich eine mittlere Differenzialspannung von 12,1 MPa bis 17,5 MPa. Mit Ausnahme eines Probenkörpers (GM1) wurden mittlere Differenzialspannungen von 15,7 MPa bis 17,5 MPa ermittelt, die in einem engen Intervall um die experimentell tatsächlich aufge-

brachte Differenzialspannung von 16 MPa liegen. Zusätzlich sind in den deformierten Proben analog zum Nebengestein die „großen“ Subkörnern mit einer Größe um 100 μm - 200 μm erhalten, die natürliche Differenzialspannungen abbilden (1,8 MPa bis 1,1 MPa). In den Probenkörpern sind somit nach der Deformation zwei Subkornstypen zu unterscheiden (Abbildung 3-58), die sich auf die natürliche Paläodifferenzialspannung sowie auf die technisch aufgebrachte Differenzialspannung während der Verformung rückbeziehen lassen.

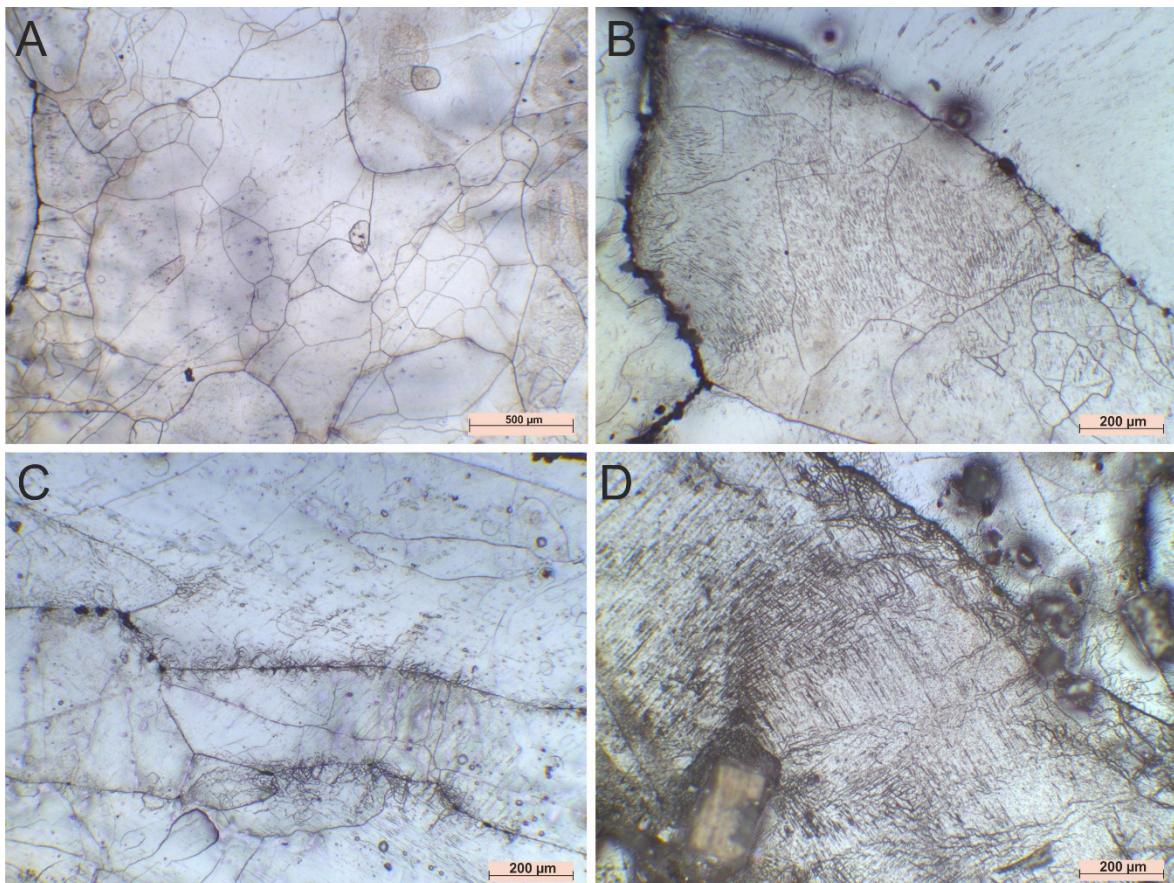


Abbildung 3-57: Mikroskopische Aufnahmen von Subkörnern nach der Deformation unter Aufsicht

- A: großflächige Subkörner**
- B: großflächige Subkörner und kleine Subkörner in einem Halitkorn**
- C: kleine, an Korngrenzen lokalisierte Subkörner**
- D: über die Fläche eines Halitkorns verteilte, kleine Subkörner**

Die großen Standardabweichungen der rechnerisch ermittelten Differenzialspannungen ergeben sich aus der Berechnungsweise aus den absoluten Subkorndurchmessern und der Berechnungsgrundlage, die ursprünglich für geringere, natürliche Differenzialspannungen kalibriert wurde. Die Untersuchungen weisen darauf hin, dass in diesen Proben die im Experiment aufgebrachte Spannung vollständig über Versetzungskriechen im Gestein aufgefangen wird.

Die Abweichung von tatsächlich aufgebrachter Differenzialspannung und durch Subkorngrößen ermittelter Differenzialspannung in der Probe GM1 (12 - 12,3 MPa) kann einerseits darin begründet liegen, dass es während der höheren Laststufe, bedingt durch den starken Materialkontrast, bereits zu bruchhafter Verformung gekommen sein kann. Andererseits liegt die aufgebrachte Spannung innerhalb des sehr großen Fehlerbereiches und die Abweichung kann methodisch dadurch bedingt sein, dass die piezometrische Methode für geringere Spannungsintervalle entwickelt wurde und die Fehler durch den exponentiellen Zusammenhang mit abnehmender Subkorngröße stark zunehmen.

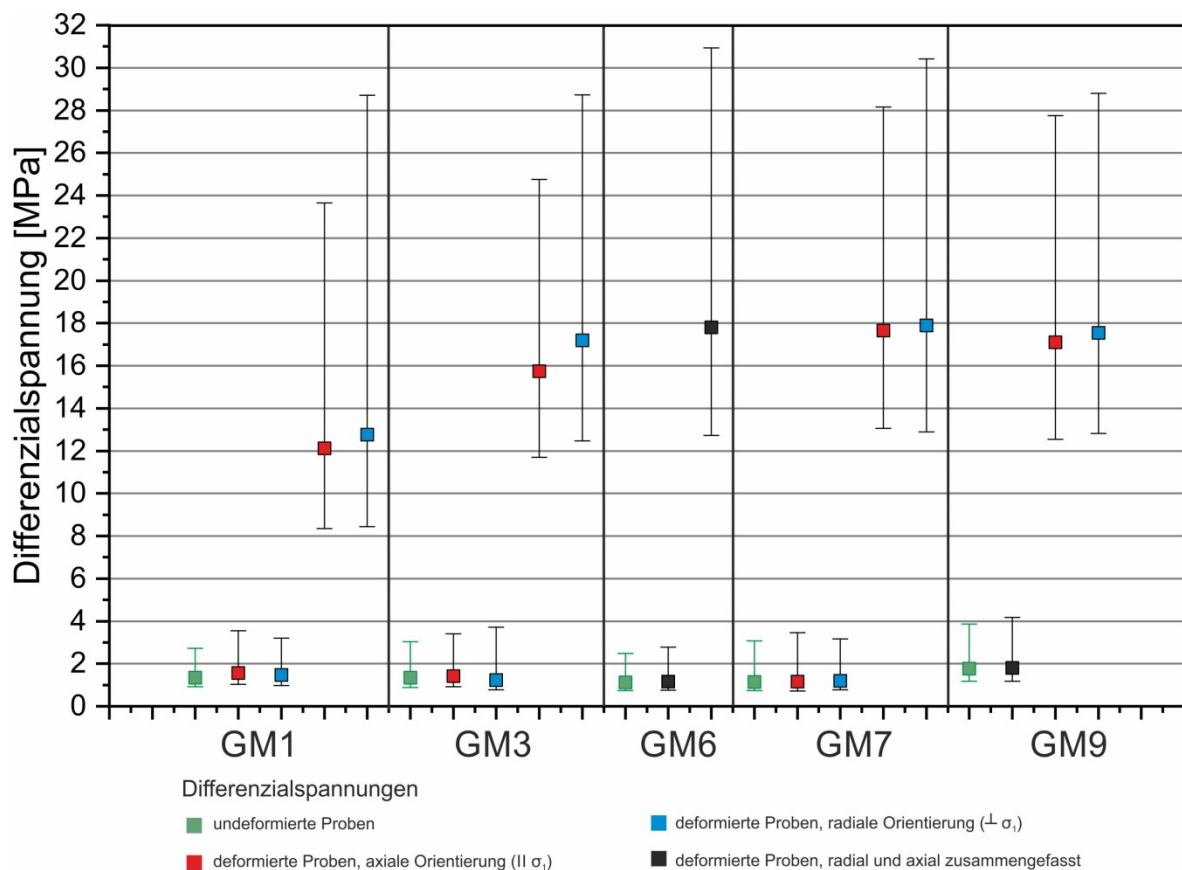


Abbildung 3-58: Aus Subkorngrößen in Halit ermittelte Differenzialspannungen vor und nach der Deformation der Probenkörper unter Unterscheidung zweier Subkorntypen durch natürliche und technische Deformation

3.6.6 Zusammenfassung

Das Rotliegendesalinar konnte in allen Proben des Untersuchungsumfangs als Mischgestein aus halitischen und siliziklastisch-karbonatischen Phasen, die zwischen 1 Gew.-% und 56 Gew.-% am Gesteinsanteil einnehmen können, charakterisiert werden. Im Halit sind unterschiedliche Gefügetypen erhalten, hervorgerufen durch unterschiedliche Korngrößen und -formen. Der siliziklastische Gesteinsanteil mit vorwiegend roter Eigenfarbe ist aus



Quarz, Schichtsilikaten, Feldspat, Karbonat und Hämatit aufgebaut und besteht aus Einzelkörnern mit bis zu 100 µm Korngröße. Diese bilden eine Matrix, die von Halit-, Anhydrit- oder Schichtsilikatzement umgeben ist.

Karbonatische Zwischenlagen werden in den Doppelsalinaren sowohl innerhalb des Rotliegendesalinars sowie teilweise am Übergang zum Zechsteinsalinar (Werra-Formation) angetroffen.

Neben der makroskopisch farblichen Unterscheidung lässt sich das Rotliegendesalinar geochemisch vom Zechsteinsalinar durch geringe Bromidgehalte in Halit (max. 60 µg/g, häufig < 10 µg/g) sowie durch durchschnittlich geringere $\delta^{34}\text{S}$ -Werte (5,8 ‰ bis 10,6 ‰) bei gleichzeitig höherem $\delta^{18}\text{O}$ (14,1 ‰ und 18,2 ‰) in Sulfaten abgrenzen.

Weitere Untersuchungen zu den Gefügen und Mikrostrukturen im Rotliegend- und Zechsteinsalinar der Doppelsalinarstruktur Kiel sind in Henneberg et al. (submitted) zusammengefasst.

In Kriechversuchen konnten hohe Gehalte an detritischem Gesteinsanteil mit geringeren Kriechraten korreliert werden. Insgesamt weisen die Rotliegendesalinarproben bei aufgebrachtener Spannung geringere Kriechraten auf als der entsprechende Referenzwert für das BGR-a Gesetz, mit Schwankungen der Kriechraten innerhalb einer Größenordnung. Paläodifferenzialspannungen im Gestein aus natürlicher Deformation, ermittelt anhand der Subkorngröße in Halit, betragen zwischen 1,1 MPa und 1,5 MPa. Die in den Kriechversuchen aufgebrachten Spannungen konnten in den Probenkörpern piezometrisch anhand einer sich während der Deformation gebildeten, neuen Generation von Subkörnern in Halit nachvollzogen werden



Literaturverzeichnis

- Baldschuhn, R., Binot, F., Fleig, S. & Kockel, F. (2001): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor. Strukturen, Strukturentwicklung, Paläogeographie. Geol. Jb., A 153, Reihe A: S. 88.
- Behrendt, L. (1990): Die sedimentologischen Leithorizonte im Saxon im Nordteil der DDR. Zeitschrift für angewandte Geologie, 36, 9: S. 333-335.
- (1993): Die sedimentologischen Leithorizonte im Saxon NE-Deutschlands. Zeitschrift für angewandte Geologie, 39, 2: S. 70-78.
- Best, G. (1982a): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Laboe, C 1526. Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe: S. 67; Hannover [unveröff.].
- (1982b): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Süderlügum, C 1118 und Blatt Husum, C 1518. Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe,: S. 67; Hannover [unveröff.].
- (1983): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Helgoland, C 1914. Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe: S. 25; Hannover [unveröff.].
- (1985): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Heide, C 1918. Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe: S. 81; Hannover [unveröff.].
- (1986): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Glücksburg, C 1122 und Blatt Schleswig, C 1522. Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe: S. 95; Hannover [unveröff.].
- (1987): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Rendsburg, C 1922. Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe: S. 66; Hannover [unveröff.].
- Beutler, G. & Szulc, J. (1999): Die paläogeographische Entwicklung des Germanischen Beckens in der Trias und die Verbindung zur Tethys. (In: Hauschke, N. & Wilde, V. (Hrsg.): Trias - Eine ganz andere Welt). S. 71-80; München (Pfeil).
- 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. Geol. Jb., C 73: S. 211.
- Carter, N., Horseman, S., Russell, J. & Handin, J. (1993): Rheology of rocksalt. Journal of Structural Geology, 15, 9-10: S. 1257-1271.
- Claypool, G.E., Holser, W.T., Kaplan, I.R., Sakai, H. & Zak, I. (1980): The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfate and their mutual interpretation. Chemical Geology, 28: S. 199-260.
- Cristescu, N.D. & Hunsche, U. (1998): Time effects in rock mechanics. 342 S.; Chichester (John Wiley & Sons).
- De Boer, H.U. (1971): Gefügeregelung in Salzstöcken und in ihren Hüllgesteinen. Kali und Steinsalz, 5, 12: S. 403-425.



- Deecke, H. (1949): Erdölgeologie - Schichtfolge und Tektonik des Rotliegend-Zechstein-Salzaufbruches von Heide. (In: Bentz, A. (Hrsg.): Erdöl und Tektonik in Nordwestdeutschland). S. 173-190; Hannover (Amt für Bodenforschung).
- Deneke, E. (1983): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Kiel, C 1926. Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe: S. 61; Hannover [unveröff.].
- DGM200 (2015): Digitales Geländemodell Gitterweite 200 m. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie; Leipzig. 22.05.2018.
- Doornenbal, J.C. & Stevenson, A.G. (2010): Petroleum geological atlas of the Southern Permian Basin area. Houten (EAGE Publ.).
- DSK (2012): Stratigraphische Tabelle von Deutschland Kompakt 2012 (Hrsg.: M. Menning & A. Hendrich). 2012; Potsdam (GFZ).
- Frisch, U. (1986): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Hamburg-Wandsbek, C 2322 und Gudow, C 2730. Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe: S. 71; Hannover [unveröff.].
- Frisch, U. & Kockel, F. (2003): Der Bremen-Knoten im Strukturnetz Nordwestdeutschlands. Berichte aus dem Fachbereich der Geowissenschaften der Universität Bremen. Bd. 223: 379 S.
- Fulda, E. (1923): Zur Entstehung der deutschen Zechsteinsalze. Z. dt. geol. Ges., 75: S. 1-13.
- Gast, S. & Riesenberg, C. (2016): AP 1: Erstellung eines Informationssystems über Salzstrukturen sowie von geologischen Niveauschnittkarten. (In: Sachbericht 03ESP323B). S. 30-52; Hannover.
- Haack, W. (1935): Das Salzgebirge von Stade in Nordhannover - ein Rotliegend-Zechstein-Salzstock. Jahrbuch der preußischen geologischen Landesanstalt, 56: S. 672-711.
- Handford, C.R. (1982): Terrigenous clastic and evaporite sedimentation in a Recent continental-sabkha playa basin, Bristol Dry Lake, California. (In: Depositional and Diagenetic Spectra of Evaporites. SEPM Core Workshop No. 3). S. 65-74.
- Hedemann, H.A., W., M., Paulus, B. & Plein, E. (1984): Mitteilung zur Lithostratigraphischen Gliederung des Oberrotliegenden im Nordwestdeutschen Becken. Nachrichten Deutsche Geologische Gesellschaft, 30, : S. 100-107.
- Henneberg, M., Mertineit, M., Hammer, J. & Zulauf, G. (2018): Fabric, paleostress and mineralogical composition of impure Rotliegend rock salt (North German Basin). (In: Fahland, S., Hammer, J., Hansen, F., Heusermann, S., Lux, K.-H. & Minkley, W. (Hrsg.): Proceedings of the 9th Conference on the Mechanical Behavior of Salt (SaltMech IX)). S. 131-1421; Hannover.
- Henneberg, M., Linckens, J., Schramm, M., Hammer, J., Gerdes, A., Zulauf, G. (submitted): Structural evolution of continental and marine Permian rock salt of the North German Basin: Constraints from microfabrics, geochemistry and U-Pb ages



- Hese, F. (2012): 3D-Modellierungen und Visualisierung von Untergrundstrukturen für die Nutzung des unterirdischen Raumes in Schleswig-Holstein. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel: 156 S.; Kiel.
- Holser, W.T. (1979): Rotliegend Evaporites, Lower Permian of Norhtwestern Europe - Geochemical confirmation of the non-marine origin. *Erdöl und Kohle*, 32, 4: S. 159-162.
- Hovorka, S., Holt, R. & Powers, D. (2007): Depth indicators in Permian Basin evaporites. *Geological Society, London, Special Publications*, 285, 1: S. 335-364.
- Hunsche, U. (2003): Thermomechanisches Verhalten von Salzgestein. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover, unveröffentlicht.
- Hunsche, U., Mingerzahn, G. & Schulze, O. (1996): The influence of textural parameters and mineralogical composition on the creep behavior of rock salt. (In: Ghoreychi, M., Berest, P., Hardy, H. & Langer, M. (Hrsg.): *The Mechanical Behavior of Salt. (Proc of the 3rd Conference)*). S. 143-151; Clausthal-Zellerfeld (Trans Tech Publications).
- Jaritz, W. (1973): Zur Entstehung der Salzstrukturen Nordwestdeutschlands. *Geologisches Jahrbuch, Reihe A: Allgemeine und regionale Geologie BR Deutschland und Nachbargebiete*, 10: S. 1-77.
- Jürgens, U. (1981): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Hamburg-West/NE, C 2722. Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe: S. 64; Hannover [unveröff.].
- (1982): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Bremervörde, C 2718. Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe: S. 68; Hannover [unveröff.].
- (1986): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Cuxhaven, C 2318. Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe: S. 90; Hannover [unveröff.].
- Kley, J. & Voigt, T. (2008): Late Cretaceous intraplate thrusting in central Europe: Effect of Africa-Europe-Iberia convergence, not Alpine collision. *Geology*, 36: S. 839-842.
- Kockel, F. & Krull, P. (1998): Aufbau, Strukturierung und Kinematik des Sockels unter dem Norddeutschen Zechsteinbecken : Arbeitspaketinterner Zwischenbericht des AP 9G 26 431 -vorläufiger Bericht. Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, Archivstück; Hannover.
- Kramm, U. & Wedepohl, K.H. (1991): The isotopic composition of strontium and sulfur in seawater of Late Permian (Zechstein) age. *Chemical Geology*, 90, 3-4: S. 253-262.
- Kunz, H., Kühnlenz, T. & Fahland, S. (2017): Transformation von openGEO-Geologiemoellen mit dem Programmsystem GINA_OGS in FEM-Modelle. BGR, Ergebnisbericht: S. 1 - 17; Hannover.
- Küster, Y., Schramm, M., Bornemann, O. & Leiss, B. (2009): Bromide distribution characteristics of different Zechstein 2 rock salt sequences of the Southern Permian Basin: a comparison between bedded and domal salts. *Sedimentology*, 56, 5: S. 1368-1391.



- Langer, M. & Hofrichter, E. (1971): Gutachten über die Eignung von Salzstöcken des Rotliegenden zur Anlegung von Gas-Speicherkavernen. Bundesanstalt für Bodenforschung: S. 20; Hannover.
- Legler, B. (2006): Faziesentwicklung im Südlichen Permbecken in Abhängigkeit von Tektonik, eustatischen Meeresspiegelschwankungen des Proto-Atlantiks und Klimavariabilität (Oberrotliegend, Nordwesteuropa). 240 S.; Hannover (Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften).
- Legler, B., Gebhardt, U. & Schneider, J.W. (2005): Late Permian non-marine–marine transitional profiles in the central Southern Permian Basin, northern Germany. *International Journal of Earth Sciences*, 94, 5-6: S. 851-862.
- 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, : S. 799-814.
- (2006): 3D reconstruction of salt movements within the deepest post-Permian structure of the Central European Basin System - the Glueckstadt Graben. *Netherlands Journal of Geoscience - Geologie en Mijnbouw*, 85, 3: S. 181-196.
- (2017): Structure and evolution of the Glueckstadt Graben in relation to the other post-Permian sub-basins of the Central European Basin System. (In: Soto, J.I., Flinch, J. & Tari, G. (Hrsg.): *Permo-Triassic Salt Provinces of Europe, North Africa and the Atlantic Margins*). S. 632; Amsterdam (Elsevier).
- Onneken, J., Schramm, M. & Hammer, J. (2018): Mineralogy and geochemistry of the Tonmittelsalz (z3TM) and Tonbrockensalz (z4TS) as “zuber” equivalents in the German Zechstein (Upper Permian). *Geological Quarterly*, 62, 4: S. 896-916, doi: 10.7306/gq. 1446.
- Platt, J.D. (1994): Geochemical evolution of pore waters in the Rotliegend (Early Permian) of northern Germany. *Marine and Petroleum Geology*, 11, 1: S. 66-78.
- Plein, E. (1995): Stratigraphie von Deutschland I - Norddeutsches Rotliegendbecken. Rotliegend-Monographie Teil II. Stratigraphie von Deutschland: 193 S.; Frankfurt (Courier Forschungsinstitut Senckenberg).
- Pollok, L., Hölzner, M. & Fleig, S. (2016): AP 2 : Erfassung des Internbaus von Salzstrukturen und geologische 3D-Modellierung. (In: Sachbericht 03ESP323B). S. 53-117; Hannover.
- Reinhold, K. & Hammer, J. (2016): Steinsalzlager in den salinaren Formationen Deutschlands. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 167, 2: S. 167 - 190.
- Reinhold, K., Krull, P. & Kockel, F. (2008): Salzstrukturen Norddeutschlands 1: 500.000. Publisher; Berlin/Hannover.
- Richter-Bernburg, G. (1955): Stratigraphische Gliederung des deutschen Zechsteins. *Z. dt. geol. Ges.*, Band 105, 4. Teil: S. 843 - 854.
- (1987): Deformation within salt bodies. (In: Lerche, I. & O'Brien, J.J. (Hrsg.): *Dynamical Geology of Salt and Related Structures*). S. 39-75; Orlando (Academic Press).



- Rosenbaum, S., Hese, F., Liebsch-Dörschner, T., Offermann, P., Rheinländer, J. & Thomsen, C. (2012): Geologische Modelle der Deck- und Speichergesteine Schleswig-Holsteins. Schlussbericht des Teilvorhabens M6 im Rahmen des Verbundprojektes CO₂-MoPa Modellierung und Parametrisierung von CO₂-Speicherung in tiefen, salinen Speichergesteinen für Dimensionierungs- und Risikoanalysen; Vorhaben: Dimensionierung und Risikoanalysen bei der CO₂-Speicherung. LLUR SH, Sonderprogramm GEOTECHNOLOGIEN: S. 107; Flintbek.
- Rüddiger (1965): Eigenschaften und Eignung des Rotliegend-Haselgebirges zur Anlage unterirdischer Speicherkavernen und deren volumetrische Vermessung. Erdöl und Kohle, 18, 1: S. 6-10.
- Sattler-Kosinowski, S. (1981): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Bremerhaven, C 2714. Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe: S. 64; Hannover [unveröff.].
- (1982): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Langen, C 2314. Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe: S. 29; Hannover [unveröff.].
- Scheck-Wenderoth, M., Krzywiac, P., Zühlke, R., Maystrenko, Y. & Froitzheim, N. (2008): Permian to Cretaceous tectonics. (In: McCann, T. (Hrsg.): The Geology of Central Europe. Mesozoic and Cenozoic). Bd. 2: S. 999-1030; London (Geolog. Soc.).
- Schleder, Z. & Urai, J.L. (2005): Microstructural evolution of deformation-modified primary halite from the Middle Triassic Röt Formation at Hengelo, The Netherlands. International Journal of Earth Sciences, 94, 5-6: S. 941-955.
- Schléder, Z. & Urai, J.L. (2005): Microstructural evolution of deformation-modified primary halite from the Middle Triassic Röt Formation at Hengelo, The Netherlands. International Journal of Earth Sciences, 94, 5-6: S. 941-955.
- Schmitz, J. (1984): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Bad Oldesloe, C 2326 und Blatt Lübeck, C 2330. Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe: S. 74; Hannover [unveröff.].
- Schott, W. (1942): Das Perm und seine Erdölführung in Schleswig-Holstein und Nordhannover. Jahrbuch des Reichsamtes für Bodenforschung, 63: S. 567-589.
- (1943): Das Perm und seine Erdölführung in Schleswig-Holstein und Nordhannover. Jahrbuch des Reichsamtes für Bodenforschung Berlin, 63: S. 567-589.
- Stemmerik, L., Rouse, J.E. & Spiro, B. (1988): S-isotope studies of shallow water, laminated gypsum and associated evaporites, Upper Permian, East Greenland. Sedimentary Geology, 58, 1: S. 37-46.
- Thiemeyer, N., Zulauf, G., Mertineit, M., Linckens, J., Pusch, M. & Hammer, J. (2016): Microfabrics and 3D grain shape of Gorleben rock salt: Constraints on deformation mechanisms and paleodifferential stress. Tectonophysics, 676: S. 1-19.
- Thomsen, C., Hese, F., Schaller, A., Lademann, K., Rosenbaum, S. & Liebsch-Dörschner, T. (2017): Verbundvorhaben StörTief: Die Rolle von tiefreichenden Störungszonen bei der geothermischen Energienutzung, Teilprojekt 1.2 - Erarbeitung eines geothermischen 3D-Strukturmodells für den Glückstadtgraben in Schleswig-Holstein. . LLUR SH, Technische Informationsbibliothek, Schlussbericht: S. 66; Hannover.



- Trusheim, F. (1960): Mechanism of Salt Migration in Northern Germany. Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists, 44, 9: S. 1519-1540.
- Urai, J. & Spiers, C. (2007): The effect of grain boundary water on deformation mechanisms and rheology of rocksalt during long-term deformation. Proc. 6th Conf. Mech. Beh. of Salt. S. 149-158.
- Urai, J., Spiers, C., Peach, C., Franssen, R.C. & Liezenberg, J.L. (1987): Deformation mechanisms operating in naturally deformed halite rocks as deduced from microstructural investigations. Geologie en Mijnbouw, 66: S. 165-176.
- Wallner, M., Caninenberg, C. & Gonther, H. (1979): Ermittlung Zeit- und Temperaturabhängiger mechanischer Kennwerte von Salzgesteinen. Proceedings 4th International Congress on Rock Mechanics, 1: S. 313-318.
- 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: S. 131-155.
- Zapf, D. & Zachow, R. (2016): AP 3: Gebirgsmechanische Anforderungen an die Speicherkavernen für Druckluft und Wasserstoff. (In: Sachbericht 03ESP323B). S. 118-203; Hannover.
- Ziegler, P.A. (1990): Geological Atlas of Western and Central Europe (2nd edition). 239 S.; Bath (Shell Internationale Petroleum Maatschappij B.V.; Geological Society Publishing House).



9 Ausblick

Auf der Basis der in diesem Verbundvorhaben erarbeiteten geologischen und gebirgsmechanischen Grundlagen konnten die flach lagernden Salinare in potenziell geeignete beziehungsweise ungeeignete Bereiche für die Speicherung von erneuerbaren Energien eingeteilt werden. Ebenfalls wurde das Speicherpotenzial der Rotliegend-Zechstein-Doppelsalinare auf Basis zusätzlicher geologischer und gebirgsmechanischer Erkenntnisse aktualisiert.

Für einige Salinar-Formationen konnten auch im Rahmen des Projektes nicht genügend Informationen gesammelt werden, um eine Einschätzung ihrer Eignung hinsichtlich des Baus von Speicherkavernen durchzuführen. Eine Darstellung dieser Formationen ist als Übersichtskarte in Anhang 7-1 im Sachbericht 03ET6062A des Projektpartners DEEP.KBB enthalten.

In Kap. 2 werden Beispiele über die mikrostrukturellen, petrographischen und geochemisch-mineralogischen Eigenschaften der altersverschiedenen flach lagernden Salinarfolgen dargestellt. Durch die unterschiedlichen paläogeographischen Voraussetzungen können die altersverschiedenen Salinarfolgen petrographisch und geochemisch-mineralogisch voneinander abgegrenzt werden. Dabei sind aber laterale, regionalgeologische Schwankungen der geochemisch-petrographischen Eigenschaften, insbesondere abseits der Permsalinare noch wenig untersucht. Es zeigt sich, dass trotz der stratiformen Lagerung, aufgrund der rheologischen Eigenschaften des Steinsalzes, die Bewertung der Formationen oftmals stark abhängig von der lokalen tektonischen Überprägung ist. Dies kann sich auf die petrographischen sowie mechanischen Eigenschaften auswirken, sodass hier von einer größeren Variation ausgegangen werden muss, als sie hier angegeben werden kann. Um die Eigenschaften des flach lagernden Salinares über eine allgemeine Charakterisierung hinaus bewerten zu können, müssen weitere, detaillierte und vergleichende Untersuchungen an Einzelstandorten vorgenommen werden.

Durch zusätzliche Kavernenmodelle in variabler Teufenlage und in geringmächtigen Salinarschichten konnten einige Salzstrukturen, die im Rahmen des InSpEE-Projektes auf Grund nicht ausreichender Modellvarianten als ungeeignet bewertet wurden, als potenziell geeignet umgruppiert werden (s. Übersichtskarte der geeigneten Salinarbereiche und -strukturen in Anhang 7-1 im Sachbericht 03ET6062A des Projektpartners DEEP.KBB). Eine quantitative Auswertung erfolgte nicht, so dass diese weiteres Potenzial darstellen.

Auf Grund der geschaffenen Grundlagen in den Arbeitspaketen 1 bis 5 sind die wissenschaftlichen Erfolgsaussichten nach Auftragsende als hoch einzustufen. Gerade die Neustrukturierung der Doppelsalinare, die Ergebnisse der Materialtests sowie die Fortführung des Informationssystems Salz werden über den Rahmen der Laufzeit des Projektes für entsprechende Bewertungen von Salzstrukturen als umfangreicher, bisher nicht in Deutschland in dieser Form existierender Datenpool zur Verfügung stehen und genutzt werden. Dies betrifft ebenfalls die teufenvariable Auslegung von verschiedenen Modellkavernen für die Druckluft und Wasserstoffspeicherung. Das ermittelte Speicherpotenzial ermöglicht eine Überprüfung der Umsetzbarkeit des in verschiedenen Studien ermittelten Speicherbedarfs im Rahmen der Umsetzung der Energiewende einschließlich einer regionalen Zuordnung.

Mit dem Vorliegen dieses Sachberichtes enden die Verbundvorhaben InSpEE und InSpEE -DS. Eine weitere Fortsetzung ist nicht geplant.



Anhang

Anhangsverzeichnis

- Anhang 0-1:** Ablaufplan des Verbundvorhabens
- Anhang 0-2:** Berichtsblatt
- Anhang 0-3:** Document Control Sheet

Anlagenverzeichnis

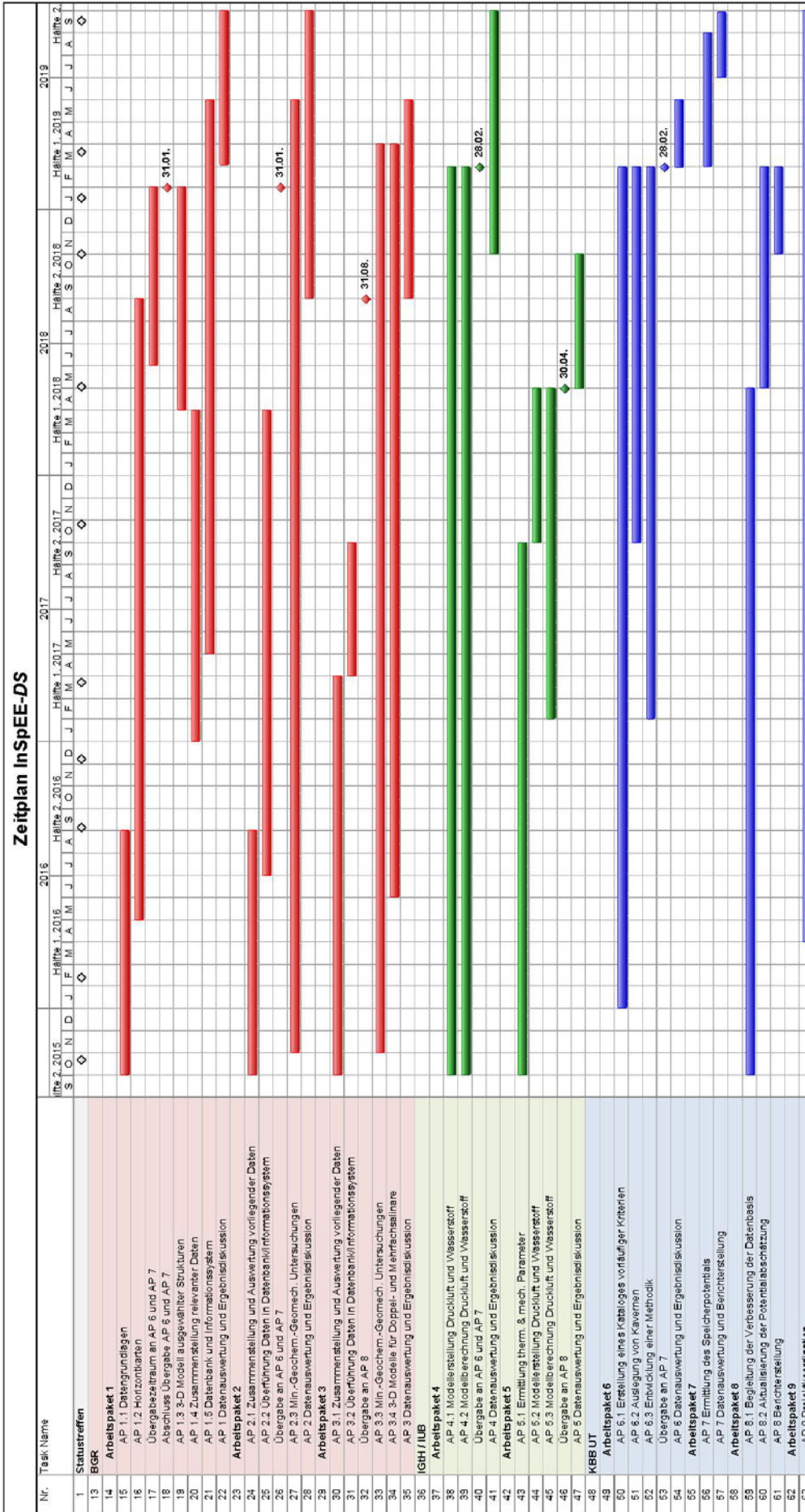
- Anlage 1-1.1:** Strukturkarte Top Zechstein, Nördliches Norddeutsches Becken, Teilgebiet Mecklenburg-Vorpommern
- Anlage 1-1.2:** Strukturkarte Basis Zechstein, Nördliches Norddeutsches Becken, Teilgebiet Mecklenburg-Vorpommern
- Anlage 1-1.3:** Strukturkarte Mächtigkeit Zechstein, Nördliches Norddeutsches Becken, Teilgebiet Mecklenburg-Vorpommern
- Anlage 1-2.1:** Strukturkarte Top Zechstein, Südliches Norddeutsches Becken, Teilgebiet Nordrhein-Westfalen - SW-Niedersachsen
- Anlage 1-2.2:** Strukturkarte Basis Zechstein, Südliches Norddeutsches Becken, Teilgebiet Nordrhein-Westfalen - SW-Niedersachsen
- Anlage 1-3.1:** Strukturkarte Top Zechstein, Südliches Norddeutsches Becken, Teilgebiet NE-Nordrhein-Westfalen - S-Niedersachsen
- Anlage 1-3.2:** Strukturkarte Basis Zechstein, Südliches Norddeutsches Becken, Teilgebiet NE-Nordrhein-Westfalen - S-Niedersachsen
- Anlage 1-4.1:** Strukturkarte Top Zechstein, Südliches Norddeutsches Becken, Teilgebiet E-Niedersachsen - Sachsen-Anhalt
- Anlage 1-4.2:** Strukturkarte Basis Zechstein, Südliches Norddeutsches Becken, Teilgebiet E-Niedersachsen - Sachsen-Anhalt
- Anlage 1-5.1:** Strukturkarte Top Zechstein, Südliches Norddeutsches Becken, Teilgebiet Brandenburg
- Anlage 1-5.2:** Strukturkarte Basis Zechstein, Südliches Norddeutsches Becken, Teilgebiet Brandenburg

- Anlage 1-5.3:** Strukturkarte Mächtigkeit Zechstein, Südliches Norddeutsches Becken, Teilgebiet Brandenburg
- Anlage 1-6.1:** Strukturkarte Top Zechstein, Thüringer Becken
- Anlage 1-6.2:** Strukturkarte Basis Zechstein, Thüringer Becken
- Anlage 1-7:** Strukturkarte Basis Zechstein, Werra-Fulda- und Fränkisches Becken

Anhang 0-1

Ablaufplan des Verbundvorhabens

Zeitplan InSpEE-DS



Anhang 0-2

Berichtsblatt

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht		
3. Titel InSpEE-DS - Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potenzialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft) - Doppelsalinare und flach lagernde Salzschieben - Sachbericht - Arbeitspakete 1, 2 und 3			
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Fleig, Stephanie; Gast, Sascha; Henneberg, Mareike; Onneken, Julia; Röhling, Simone; Ruales, Alexandra		5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.09.2019	
		6. Veröffentlichungsdatum 30.06.2020	
		7. Form der Publikation Schlussbericht	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Stilleweg 2 30655 Hannover		9. Ber.-Nr. Durchführende Institution	
		10. Förderkennzeichen 03ET6062B	
		11. Seitenzahl 219	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) BMW		13. Literaturangaben 238	
		14. Tabellen 6	
		15. Abbildungen 99	
16. Zusätzliche Angaben Der Projektbericht wird in drei Teilberichten durch die jeweiligen Projektpartner eingereicht. AP 4-5: IGtH, Leibniz Universität Hannover AP 6-8: DEEP.KBB Hannover			
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Technische Informationsbibliothek (TIB), Welfengarten 1 B, 30167 Hannover			
18. Kurzfassung <p>Mit dem Übergang auf fluktuierende erneuerbare Energieträger stellt sich die Frage der Speicherung elektrischer Energie. Energiespeicherkraftwerke, welche aus erneuerbarem Strom Druckluft bzw. Wasserstoff erzeugen und einspeichern können, um bei Energiebedarf diese den Energiemärkten wieder zur Verfügung zu stellen, können dabei eine wesentliche Rolle spielen. Eine großvolumige Speicherung dieser Medien kann dabei im geologischen Untergrund erfolgen.</p> <p>Das Vorgängerprojekt InSpEE erarbeitete Grundlagen für eine Bewertung verschiedener Speicherstandorte sowie für eine fundierte Abschätzung, welche Energiemengen im geologischen Untergrund in Deutschland speicherbar sind (Speicherpotenzial). Es stellte den Stand der Wissenschaft und Technik zu Beginn der Projektlaufzeit dar. Der Fokus lag auf den Salzstrukturen Nord- und Mitteldeutschlands.</p> <p>InSpEE-DS legt als Anschlussprojekt den Fokus auf das Potenzial der flach lagernden Salzschieben sowie eine Verbesserung des Kenntnisstands der Doppelsalinare (Rotliegend-Zechstein-Doppelsalinare). Ziel ist, die Potenzialbetrachtung auf den gesamtdeutschen Raum auszuweiten. Das Vorgehen beruht auf der Schaffung einer geeigneten geologischen Datenbasis (Arbeitspakete 1 bis 3, Projektpartner BGR), einer gebirgsmechanischen Betrachtung (Arbeitspakete 4 und 5, Projektpartner IGtH) sowie der Zusammenführung der Basisdaten und die Durchführung einer Potenzialabschätzung für Wasserstoff und Druckluft. (Arbeitspakete 6 bis 8, Projektpartner DEEP.KBB). Die Ergebnisse der geologischen Basisarbeit und der Potenzialabschätzung werden, sofern öffentlich freigegeben, in das bestehende "Informationssystem Salz" integriert.</p> <p>Wesentlich Ergebnisse der Arbeitspakete 1 bis 3 sind die Auswertung und Ergänzung geologischer Grundlagendaten zu flach lagernden Salzen und Doppelsalinen sowie die Bereitstellung der Projektergebnisse im Geoinformationssystem.</p>			
19. Schlagwörter 3D-Modellierung, Bewertungskriterien, Doppelsalinare, Druckluft, flach lagernd, Gebirgsmechanik, Geologie, Informationssystem, Internbau, Niveauschnittkarten, Potenzialabschätzung, Salzschieben, Salzstrukturen, Speicherkavernen, Wasserstoff			
20. Verlag		21. Preis	

Anhang 0-3

Document Control Sheet

Document control sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) report, publication		
3. title InSpEE-DS- Information system salt structures: planning basis, selection criteria and estimation of the potencial for the construction of salt caverns for the storage of renewables (hydrogen and compressed air) – multi-salt-formation structures and bedded salt deposits – report – work packages 1, 2 and 3			
4. author(s) [family name, first name(s)] Fleig, Stephanie; Gast, Sascha; Henneberg, Mareike; Onneken, Julia; Röhling, Simone; Ruales, Alexandra		5. end of project 30.09.2019	
		6. publication date 30.06.2020	
		7. form of publication project report	
8. performing organization(s) (name, address) Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR) Stilleweg 2 30655 Hannover		9. originators report no.	
		10. reference no. 03ET6062B	
		11. no. of pages 219	
12. sponsoring agency (name, address) BMW		13. no. of references 238	
		14. no. of tables 4	
		15. no. of figures 99	
16. supplementary notes The project report will be delivered in 3 partial reports by the respective project partners AP 4-5: IGtH, Leibniz University Hanover AP 6-8: DEEP.KBB GmbH Hanover			
17. presented at (titel, place, date) Leibniz Information Center for Science and Technology University Library (TIB), Welfengarten 1B, 30167 Hanover			
18. abstract The transition to fluctuating renewable energy sources raises the question of electrical energy storage. Energy storage power plants will play an essential role, as they can produce and store compressed air and/or hydrogen from renewable energy sources. This stored energy can subsequently be made available to the energy markets based on demand. The large-scale storage of these media can take place in underground geological structures. InSpEE previously developed a basis for the evaluation of storage locations as well as a thorough assessment of how much energy could be stored in underground geological structures in Germany (storage potencial). The focus of this project was on salt structures in Northern and Central Germany. The follow-up project InSpEE-DS is focused on the potencial of the bedded salt deposits, as well as enhancing the knowledge of the multi-salt-formations (Upper Rotliegend, Zechstein). The goal is to assess the storage potencial of the entire country of Germany. The approach is based on the creation of a suitable geological data base (work packages 1-3, project partner BGR), a rock mechanical assessment (work packages 4 and 5, project partner IGtH), as well as the consolidation of the base data and an assessment of the potencial for hydrogen and compressed air (work packages 6-8, project partner DEEP.KBB). The results of the geological groundwork and the assessment of the potencial will be integrated into the existing "information system salt", as long as they are publicly available. Major results of work packages 1-3 are the evaluation and expansion of basic geological data for flat-lying salts and double salinars as well as the provision of project results in a geographic information system.			
19. keywords 3D modelling, assessment criteria, compressed air, bedded salt, rock mechanics, geology, information system, internal structure, horizontal geological cross section, assessment of the potencial, salt layers, salt structures, storage caverns, hydrogen			
20. publisher			21. price