

**Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes  
Schleswig-Holstein  
Abteilung Geologie und Boden**

**Verbundvorhaben „StörTief“**

**Die Rolle von tiefreichenden Störungszonen bei der geothermischen  
Energienutzung**

**Teilprojekt (AP 1.2) Erarbeitung eines geothermischen 3D-Strukturmodells für  
den Glückstadtgraben in Schleswig-Holstein**

**Schlussbericht**

Leitung:	Sabine Rosenbaum
Projektsteuerung:	Claudia Thomsen, Thomas Liebsch-Dörschner
Projektwissenschaftler und Autoren:	Fabian Hese, Astrid Schaller, Katrin Lademann
Laufzeit des Vorhabens:	01.06.2013 - 31.05.2016; kostenneutral verlängert bis zum 31.10.2016

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0325623B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

10.03.2017

gefördert vom

# Inhalt

I. Kurze Darstellung .....	6
1. Aufgabenstellung.....	6
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	7
3. Planung und Ablauf des Vorhabens .....	7
4. Stand der Wissenschaft und Technik vor Projektbeginn.....	7
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	8
II. Eingehende Darstellung .....	9
1. Verwendung der Zuwendung, erzielte Ergebnisse des Forschungsvorhabens .....	9
1.1 Einleitung.....	9
1.2 Untersuchungsgebiet – Geologischer Rahmen .....	9
1.3 Daten und Methoden .....	11
1.4 Ergebnisse.....	25
1.5 Diskussion – Fazit – Ausblick .....	60
1.6 Referenzen .....	63
1.7 Anhang.....	68
2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	76
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	76
4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans .....	76
5. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	76
6. Gesamtliste der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen und Vorträge .....	77

## Tabellenverzeichnis

**Tab. 1:** Überblick über die bewilligten Mittel (inkl. Personalkosten). Die Einstellung des Personals und die Einrichtung der Arbeitsplätze (Investitionen bis 5.000 €) wurden 2014 vorgenommen. .... 76

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 1:</b> Strukturelle Gliederung (gelbe Linie), Salzdiapire und tiefreichende Störungen des tieferen Untergrundes von Schleswig-Holstein (Quelle: 3D-Modell SH – LLUR SH 2016 / Baldschuhn et al. 2001).....	10
<b>Abb. 2:</b> Bohrungen und seismische Daten im festländischen Teil von Schleswig-Holstein und angrenzender Bereiche (KW-Datenbank der Länder, LBEG Hannover). ....	12
<b>Abb. 3:</b> Schema zur Rekonstruktion von Ablagerungsräumen basierend auf der Auswertung von Logtrends (verändert nach Rider 2011). ....	14
<b>Abb. 4:</b> Konstruktion von Störungsflächen aus Störungsspuren des GTA (farbige Linien, rot: Hilfslinien) und geologischen Profilen. ....	17
<b>Abb. 5:</b> Rechts: Hüllflächen der Salzstrukturen Waabs-Moenkloh, Bohrungen und Salzstock - Verbreitungslinien aus dem GTA (Schwarz). Links/Mitte: Einzelkomponenten des Modells. ....	18
<b>Abb. 6:</b> Workflow zur Konstruktion von lithostratigraphischen Basisflächen. In der ersten Phase wurden triangulierte Flächen an Daten des GTA angepasst und mit Störungsflächen, Hüllflächen von Salzdiapiren und Diskordanzlinien (blaue Linien, Punkt 4) verschnitten. ....	20
<b>Abb. 7:</b> Workflow zur Konstruktion von lithostratigraphischen Basisflächen. In der zweiten Phase wurden Ausbisse an Störungen, Salzdiapiren und Diskordanzen bearbeitet und Korrekturen durchgeführt. Diese Arbeiten erfolgten in Regionen. ....	21
<b>Abb. 8:</b> Strukturmodell Glückstadt-Graben. Links: Abfolge. Rechts oben: Gesamtmodell. Rechts mitte: Unterkreide und jünger abgedeckt. Rechts unten: Basis Zechstein, Basis Buntsandstein, Salzstrukturen und Störungsflächen. ....	25
<b>Abb. 9:</b> Volumenmodell (GOCAD Model3D) eines Ausschnittes des Strukturmodells im Bereich Kiel – Neumünster – Plön – Bad Segeberg (O. Jura nicht verbreitet, U. Kreide und O. Kreide zusammengefasst).....	26
<b>Abb. 10:</b> Beispiel für die 2D Visualisierung von geometrischen Attributen, Verbreitungsgrenzen und Störungen des Reservoirkomplexes M. Buntsandstein: a) Tiefe Basis M. Buntsandstein, b) Tiefe Top M. Buntsandstein, c) Mächtigkeit M. Buntsandstein, d) Versatzbeträge der Basis M. Buntsandstein an Störungen. ....	27
<b>Abb. 11:</b> Störungsflächen des Strukturmodells (rot), zusammen dargestellt mit den Hüllflächen der Salzmauern und Diapire (blau) sowie der Basis des Buntsandsteins. Links unten: Streichrichtung und Einfallswinkel der Störungsflächen. ....	28
<b>Abb. 12:</b> Versatzbeträge (in Fallrichtung) der Basis des Mittleren Buntsandsteins. ....	29

<b>Abb. 13:</b> Generalisierte Darstellung einer Störung (verändert nach Torabi & Berg 2011). Breite, Struktur und Zusammensetzung der Kernzone und Randzonen variieren in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern (z.B. Lithologie, Geometrie, Länge, Versatzbeträge).....	29
<b>Abb. 14:</b> Geometrische Attribute von tiefreichenden Störungen. a) Vertikale Länge, b) Medianwert Versatz, c) Stratigraphische Einheit der Störungsflächenoberkante = ungefähres Alter der letzten Aktivierung (Einheit Zechstein nicht dargestellt, da nicht relevant), d) Summe der normalisierten Werte a-c.....	31
<b>Abb. 15:</b> Informationen zu Störungszonen aus Bohrdaten (KW-Datenbank der Länder). a) Bohrungen mit bzw. / ohne Störungsmarker, b) Störungsmarker mit bzw. / ohne Hinweise auf Zementation und Harnische.....	33
<b>Abb. 16:</b> Verbreitung, Tiefenlage der Basis (a), Mächtigkeit (b) des Mittleren Buntsandsteins. ....	35
<b>Abb. 17:</b> Beispiel für die vertikale und laterale lithologische Entwicklung des Mittleren Buntsandsteins basierend auf der Korrelation von Gamma-Ray-Logs von Bohrungen. SW – N Profil am westlichen Rand des Glückstadt-Grabens. Die Hardegsen-Formation wurde in diesem Gebiet erodiert. ....	35
<b>Abb. 18:</b> Bohransatzpunkte und lithologische Abfolgen der erbohrten Schichtfolge sowie Mächtigkeit des Mittleren Buntsandsteins. Die lithologischen Klassen sind maßstabsgetreu dargestellt.....	36
<b>Abb. 19:</b> Mächtigkeit (a) und fazielle Entwicklung (b) des Quickborn-Volpriehausen-Sandsteins. Faziesklassen semitransparent auf der Mächtigkeitskarte des Quickborn-Volpriehausen-Sandsteins. ....	37
<b>Abb. 20:</b> Zusammenstellung der Porositäts- und Permeabilitätsdaten für den Quickborn-Volpriehausen-Sandstein basierend auf den erhobenen Daten aus Kernproben und Loguntersuchungen.....	39
<b>Abb. 21:</b> Verbreitung, Basistiefe (a) und Mächtigkeit (b) des Rhäts sowie Basistiefe (c) und Mächtigkeit (d) des Mittelrhäts.....	41
<b>Abb. 22:</b> Kumulierte Sandsteinmächtigkeiten des Rhäts (a) und des Mittelrhäts (b), zusammenhängende Sandsteinmächtigkeit des Mittelrhäts (c) und fazielle Entwicklung des Mittelrhäts (d). Die Faziesklassen sind semitransparent auf der kumulierten Sandsteinmächtigkeitskarte des Mittelrhäts geplottet.....	42
<b>Abb. 23:</b> Zusammenstellung der Porositäts- und Permeabilitätsdaten für den maximal zusammenhängenden Sandstein im Mittelrhät basierend auf den erhobenen Daten aus Kernproben und Loguntersuchungen.....	45
<b>Abb. 24:</b> Verbreitung, Basistiefe (a) und Mächtigkeit (b) des Mittleren Juras. ....	46
<b>Abb. 25:</b> Verbreitung, Basistiefe (a), Sandsteinmächtigkeit (mit Toneinschaltung) (b), kumulierte Sandsteinmächtigkeit (Netto), (c) und fazielle Entwicklung des Varel-Sandsteins (d). ....	48
<b>Abb. 26:</b> Vertikale und laterale lithologische Entwicklung der unteren Einheiten (Oberes Aalen und Unteres Bajoc) des Mittleren Juras. ....	49
<b>Abb. 27:</b> Verbreitung, Basistiefe (a) und Sandsteinmächtigkeit (b) des Unteren Elsfleth-Sandsteins. ....	50
<b>Abb. 28:</b> Fazielle Entwicklung des Unteren Elsfleth-Sandsteins. ....	51
<b>Abb. 29:</b> Zusammenstellung der Porositäts- und Permeabilitätsdaten für den Varel-Sandstein basierend auf den erhobenen Daten aus Kernproben und Loguntersuchungen. ....	52
<b>Abb. 30:</b> Zusammenstellung der Porositäts- und Permeabilitätsdaten für den Unteren Elsfleth-Sandstein basierend auf den erhobenen Daten aus Kernproben und Loguntersuchungen.....	52
<b>Abb. 31:</b> N-S (A) und W-E (B) orientierte seismische Profile im äußeren Ostholstein-Trog nahe der Salzstruktur Warnau zur Darstellung der Störungszone Warnau. ....	55

<b>Abb. 32:</b> Räumliche Ansicht des Mittleren Jura im Bereich der Salzstruktur Warnau. a) Aufsicht des Reflektors Basis M. Jura farbkodiert nach Tiefe (ca. 2000 - 3600 m u. NHN), Störungen (schwarz) und Störungsmarker der Bohrungen (rot), zusammen visualisiert mit Modellflächen der Salzstruktur Warnau, der Basis M. Jura und Basis U. Jura. b) Perspektivische Ansicht mit Blick in Richtung N (Bohrpfade und Störungsmarker in rot).....	56
<b>Abb. 33:</b> Darstellung der untersuchungswürdigen Gebiete für die hydrothermale Nutzung des Quickborn-Volpriehausen-Sandsteins (braun farbkodiert nach Mächtigkeit).....	57
<b>Abb. 34:</b> Untersuchungswürdige Gebiete für die hydrothermale Nutzung des Mittelrhät Sandsteins (braun farbkodiert nach maximaler zusammenhängender Mächtigkeit).....	58
<b>Abb. 35:</b> Untersuchungswürdige Gebiete für die hydrothermale Nutzung des Varel-Sandsteins (oben) und Unteren Elsfluth-Sandsteins (unten, braun farbkodiert nach Mächtigkeit). ....	59
<b>Abb. A1:</b> Bohrungen der KW-Datenbank der Länder (LBEG, Hannover) farbkodiert nach Endhorizont. ....	68
<b>Abb. A2:</b> Seismische Daten der KW-Datenbank der Länder (LBEG, Hannover).....	69
<b>Abb. A3:</b> Verbreitung und Bezeichnung der Salzstrukturen gemäß Baldschuhn et al. (2001). ....	70
<b>Abb. A4:</b> Lithostratigraphische Differenzierung des Modells (verwendete Restmächtigkeitskarten des GTA sind rot markiert). Die Position der zusätzlich vorliegenden Grenzflächen der Sandsteinformationen sind nicht dargestellt. ....	71
<b>Abb. A5:</b> Störungsspuren des Geotektonischen Atlas (Baldschuhn et al. 2001). ....	72
<b>Abb. A6:</b> Orientierung der Störungsspuren des Geotektonischen Atlas (Baldschuhn et al. 2001). ....	72
<b>Abb. A7:</b> Störungsspuren von tiefreichenden Störungen (Baldschuhn et al. 2001). Störungsspuren von Scheitelgräben sind nicht dargestellt. ....	73
<b>Abb. A8:</b> Störungsspuren von Scheitelgräben (blau) und tiefreichenden Störungszonen (rot) zwischen Basis Buntsandstein und Basis M. Miozän (GTA). ....	74
<b>Abb. A9:</b> Störungen wurden in Störungszonen zusammengefasst und gemäß den Angaben im GTA bezeichnet. Die Notizen sind kurze Auszüge aus Berichten des GTA 1:100.000 (verschiedene Bearbeiter, BGR).....	75

# I. Kurze Darstellung

## 1. Aufgabenstellung

Im Rahmen des 6. Energieforschungsprogramms - Erneuerbare Energie des BMU - im Bereich Geothermie wurde (Einzelplan 09, Kapitel 0903, Titel 68302) das Verbundprojekt StörTief (Die Rolle von tiefreichenden Störungszonen bei der geothermischen Energienutzung) mit einer Laufzeit vom 01.04.2013 – 31.05.2016 gefördert. Das Projekt sollte als Verbundprojekt (3 eigenständige Anträge) unter der Koordination des LIAG (Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik, Hannover) durchgeführt werden.

### Verbundpartner:

- Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Angewandte Geowissenschaften, Karlsruhe: Prof. Dr. I. Stober
- Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig Holstein (LLUR), Flintbek: S. Rosenbaum
- Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG), Hannover: Dr. R. Schulz

Ziel des Verbundvorhabens war es, die tiefreichenden Störungszonen genauer in ihrer Geometrie zu erfassen, ihre thermisch-hydraulischen Eigenschaften zu charakterisieren sowie ihr geothermisches Potenzial neu zu berechnen und zu bewerten. Die Ergebnisse sollen über das Geothermische Informationssystem (GeotIS) allgemein zugänglich gemacht werden.

Die Inhalte des Verbundvorhabens umfassen in Bezug auf die förderpolitischen Ziele im Wesentlichen folgende Aspekte:

- die bedeutendsten tiefreichenden Störungszonen genauer in ihrer Geometrie zu erfassen und in geothermischen 3D-Strukturmodellen darstellen (LIAG, KIT,LLUR)
- diese Störungszonen mit ihren geophysikalischen, insbesondere ihren thermisch-hydraulischen Eigenschaften charakterisieren (LIAG, KIT,LLUR)
- das geothermische Potenzial für Störungszonen neu berechnen (LIAG)
- die Detektion von tiefreichenden Störungen durch die stereoskopische 3D-Visualisierung seismischer Daten optimieren (LIAG)
- neue Visualisierungs-Algorithmen für Störungszonen im Geothermischen Informationssystem (GeotIS) entwickeln (LIAG)

Die spezifischen Ziele des Teilprojektes AP 1.2 des LLUR sind für den Bereich des Glückstadtgrabens:

- Weiterentwicklung des bestehenden 3D-Basismodells
- Untersuchung, Visualisierung und Integration von Störungssystemen in das Untergrundmodell
- Geometrische Erfassung und Integration von potenziell geothermisch relevanten Aquiferen in das Untergrundmodell
- Parametrisierung von Störungssystemen und Aquiferen

Laufzeit des Teilprojektes AP 1.2 war vom 01.06.2013 bis zum 31.05.2016; es wurde kostenneutral verlängert bis zum 31.10.2016.

## **2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Die Entwicklung und der Einsatz von Techniken zur Förderung und zwischenzeitlichen Speicherung von erneuerbaren Energieformen ist ein wichtiger Baustein des zukünftigen Energiekonzeptes. Die Tiefe Geothermie liefert hierbei einen wichtigen Beitrag. Eine bundesweite Betrachtung des geothermischen Potenzials wurde durch die TAB Studie von Jung et al. (2002) erbracht. Hierin wurden weitere F&E Anstrengungen empfohlen. Das 6. Energieforschungsprogramm des BMWi (2011) fördert Projekte zur Minimierung des Fündigkeitsrisikos und Unterstützung von Pilotvorhaben durch Bereitstellung von geothermisch relevanten Informationen. Das vorliegende Projekt soll unter besonderer Berücksichtigung der tiefen Störungzonen zu diesen Punkten wesentlich beitragen.

## **3. Planung und Ablauf des Vorhabens**

Gemäß Arbeitsplan wurden zunächst die für die geologische Modellierung und die Parametrisierung benötigten Daten erfasst, bewertet und für die weitere Verwendung in verschiedenen Softwaresystemen vorbereitet. Im Rahmen der Konstruktion des 3D Strukturmodells wurden ein Störungsmodell und im Folgenden relevante Grenzflächen von Salzdiapiren und lithostratigraphischen Einheiten entwickelt. Wichtige Aspekte dieser Arbeit waren die Überprüfung der geologischen Plausibilität, Durchführung von Korrekturen und Konstruktion einer topologisch konsistenten Modellgeometrie. In einem zeitlich etwas versetzten Arbeitsablauf erfolgte die Charakterisierung von Störungzonen. Hierzu wurden weitere Informationen aus der Literatur bewertet, sowie Daten aus dem Störungsmodell und aus Bohrdaten extrahiert und ausgewertet. Zur Beschreibung von typischen Szenarien wurden seismische Profile interpretiert. Die lithologische und hydraulische Charakterisierung von Sandsteinformationen und Störungzonen erfolgte zunächst weitgehend parallel zu den oben genannten Arbeiten. Grundlage hierfür war die Auswertung und Korrelation von Bohrlogs und Schichtenverzeichnissen sowie die Extraktion und Aufbereitung von hydraulischen Daten und Angaben zur Zementation. In der letzten Phase des Projektes wurden in den strukturellen Rahmen des 3D-Modells Grenzflächen von Sandsteinformationen integriert. Im Ergebnis konnten so Kartensätze zur Darstellung von geothermisch relevanten Informationen und untersuchungswürdigen Gebieten erstellt werden.

## **4. Stand der Wissenschaft und Technik vor Projektbeginn**

Das Gebiet von Schleswig-Holstein liegt im Senkungsbereich des Norddeutschen Beckens. Es ist tektonisch in drei Großbereiche gegliedert: den Westschleswig-Block im Westen, den Ostholstein-Block im Osten und den zentral gelegenen – tektonisch angelegten - Glückstadtgraben mit seinen randlich angrenzenden Schollen. Während im Bereich der tektonisch relativ ungestörten Blöcke flache Salzkissen auftreten, dominieren im zentral gelegen Glückstadt-Graben NNE bis N verlaufende Salzdiapire und Salzmauern von einigen 10er km Länge in Verbindung mit Hauptstörungssystemen im Sockel des Präsalinar (Baldschuhn et al. 2001, Maystrenko et al. 2005). Darüber hinaus waren E-W bis NW-SE streichende Störungen insbesondere im Keuper wirksam, die nur lokal durch Salinarstrukturen im Oberbau markiert sind (Kockel 1998). Die Sockelstörungen können in einem sich im Verlauf der geologischen Entwicklung ändernden Stressfeld (mehrfach) reaktiviert worden sein und hatten einen maßgeblichen Einfluss auf die Salzstrukturentwicklung im Bereich des Glückstadtgrabens.

Horizontale und vertikale Bewegungen des Salzes erzeugen Deformationsmuster in den hangenden und randlich gelegenen Schichtfolgen. Dabei ist die Intensität der Störungen dort am größten, wo eine starke Beanspruchung stattfindet. Störungen im Dachbereich und Flankenbereich der Salzdiapire aufgrund von halokinetischen bzw. halotektonischen Bewegungen sind die Folge. Die Kinematik von Salzstrukturen hatte eine große Bedeutung für die nachsalinare Erdgeschichte insbesondere durch die Bildung von angrenzenden Randsenken, die infolge allmählicher Salzabwanderung über lange Zeiträume große Sedimentmengen aufnehmen konnten. Sie dokumentiert sich somit im Detail in den Sedimentfolgen, die während des Salzaufstieges abgelagert (Trusheim 1957, Vendeville 2002), in den Flankenbereichen aufgeschleppt wurden und/oder in den angrenzenden Randsenken in größere Tiefen verlagert worden sind. Durch eine großräumige Hebung des Landes im oberen Jura um etwa 700m (Jaritz 1969) wurde der größte Teil der damals jüngsten Schichten - bis auf die in den tiefen Randsenken tiefer gelegenen Schichtfolgen - teilweise bis zum Keuper abgetragen. Die Sedimentmächtigkeiten unterliegen somit einem kleinräumigen Wechsel.

Die Reservoireigenschaften von Sandsteinhorizonten, die für eine hydrothermale Nutzung von Bedeutung sein können, hängen dabei sowohl von den Ablagerungsbedingungen als auch von den diagenetischen Prozessen im Verlauf der geologischen Entwicklung insbesondere in den Randsenken ab. Durch die mechanische Verdichtung und die Bildung von Anwachs säumen an den Korngrenzen wird der Porenraum der Sandsteine verringert. Dies bewirkt eine generelle Abnahme der nutzbaren Porosität mit der Tiefe (Müller & Reinhold 2011). Darüber hinaus fanden porositäts-reduzierende Prozesse durch Ausfällung von z. B. Anhydrit und/oder Halite statt (z.B. Baermann et al. 2000), die mit Störungen am Rande von Salzstrukturen in Zusammenhang stehen können (Clauser 2003). Die geologische Charakterisierung von ausgewählten, potenziell nutzbaren Speicherreservoirs (Aquiferen) anhand von Bohrungsdaten im Rahmen des Projektes Speicherkataster (Müller & Reinhold 2011) zeigte für Schleswig-Holstein deutlich die Überprägungen von primären Reservoireigenschaften.

Der westliche Teil des Norddeutschen Beckens wurde durch die industrielle Exploration intensiv untersucht, sodass heute eine Vielzahl von Bohrungen und seismischen Profilen existieren. Zudem stand dieses Gebiet seit den 80iger Jahren zunehmend im Fokus von Forschungsprojekten, z. B. Geotektonischer Atlas von NW-Deutschland (GTA, Baldschuhn et al. 2001) und SPP1135 (Littke et al. 2008). Im Zuge des SPP1135 wurde ein regionales 3D Strukturmodell entwickelt (Maystrenko et al. 2005, 2006). Darauf aufbauend erfolgte die Ableitung eines Temperaturmodells für den Glückstadtgraben (Balling 2011). In den letzten Jahren wurde auf der Grundlage des GTA ein geologisches 3D-Basismodell des Landes Schleswig-Holstein entwickelt (z.B. Hese 2011), das zu einem besseren Verständnis der strukturgeologischen räumlichen Zusammenhänge führt.

## **5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Neben dem üblichen fachlichen Austausch mit den Projektpartnern wurden Daten zu Störungssystemen im Landesgebiet SH an das LIAG übermittelt. Die Partner des Verbundprojektes erarbeiteten einen gemeinsamen Artikel zur Erfassung der geothermischen Nutzbarkeit von tiefreichenden Störungszonen (Agemar et al. 2016, Kriterienkatalog für die Erfassung tiefreichender Störungen und ihrer geothermischen Nutzbarkeit in Deutschland). Mit dem Abschluss des Projektes werden dem LIAG Daten für das geothermische Informationssystem GeotIS zur Verfügung gestellt.

## **II. Eingehende Darstellung**

### **1. Verwendung der Zuwendung, erzielte Ergebnisse des Forschungsvorhabens**

#### **1.1 Einleitung**

Das Teilprojekt AP 1.2 (GD SH) beschäftigte sich mit der Entwicklung von Planungsgrundlagen für eine hydrothermale Nutzung des Glückstadt-Grabens. Ein zentrales Element der Projektarbeit war die Entwicklung eines geologischen 3D-Modells zur Darstellung von potenziell geothermisch relevanten Störungen und Reservoirkomplexen. Dies beinhaltete auch die Analyse von Störungszonen, Reservoirkomplexen und deren Sandsteinaquiferen mithilfe der zur Verfügung stehenden Daten, um geometrische, lithologische und petrophysikalische Attribute abzuleiten, die bei der Abschätzung eines geothermischen Potentials benötigt werden. Die Reservoireigenschaften der ausgewählten Sandsteinhorizonte wie z.B. Tiefenlage, Mächtigkeit, lithologische und fazielle Ausbildung wurden in ihrer räumlichen Variabilität erfasst und bewertet. Eine Aufgabe dabei war die Untersuchung der Anbindung von Störungszonen an geeignete Aquifere und ihr möglicher Einfluss auf die geothermischen und hydraulischen Eigenschaften. Hierzu sollten die ausgewählten Sandsteinhorizonte und deren Reservoireigenschaften in gestörten und ungestörten Bereichen verglichen werden.

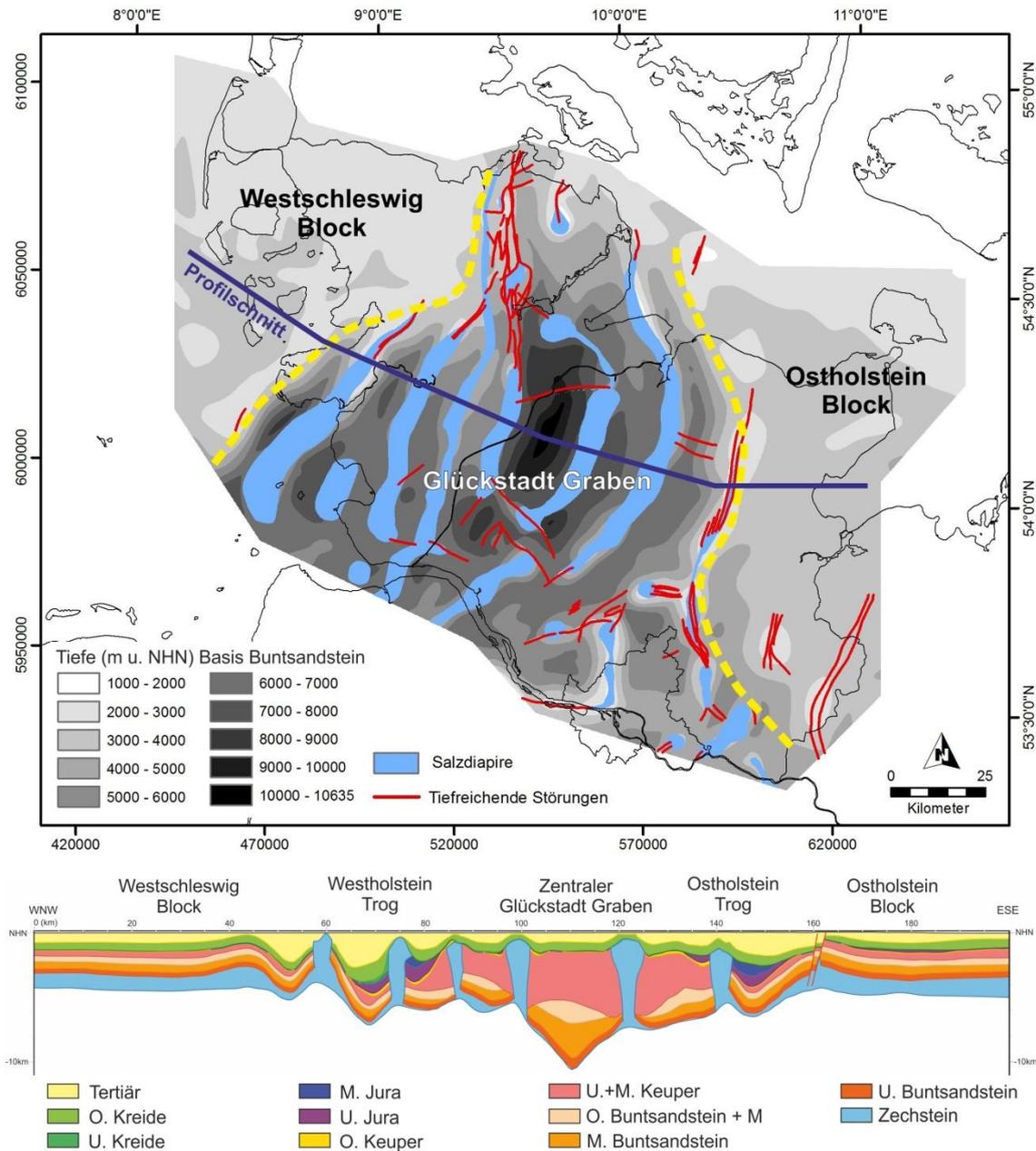
Als tiefreichende Störungen werden in diesem Teilprojekt Störungen in dem Bereich zwischen der Basis des Zechsteins und der Erdoberfläche, d.h. innerhalb des Meso- und Känozoikums verstanden, welche oftmals vom präsalinen Sockel entkoppelt sind (Abb. A7, A9). Störungen im präsalinen Basement stehen hingegen nicht im Fokus, da sie sich meist in sehr großen Tiefenlagen befinden (zwischen 7 bis zu mind. 12 km Tiefe), nur an wenigen Stellen durch seismische Daten belegt sind und oft von Salzdiapiren überlagert werden. Tertiäre und kretazische Störungen von Scheitelgräben im Hangendbereich von Salzdiapiren sind aufgrund ihrer relativ geringen Tiefenlage und vertikalen Erstreckung für diese Untersuchung ebenfalls nicht relevant (Abb. A8).

#### **1.2 Untersuchungsgebiet – Geologischer Rahmen**

Der Untergrund von Schleswig-Holstein wird durch den Westschleswig-Block im Westen, der weit in den deutschen Nordseesektor hineinreicht, dem Ostholstein-Westmecklenburg-Block im Osten und dem Glückstadt-Graben im Zentrum gegliedert (Abb. 1). Die beiden Blöcke sind nicht durch interne Sockelstörungen differenziert und es herrschen überwiegend söhliche Lagerungsverhältnisse. Die Blöcke und der Graben werden durch das Ringkøbing-Fyn-Hoch im Norden und durch den Pompeckj-Block in Niedersachsen im Süden begrenzt. Der Glückstadt-Graben ist eines der tiefsten post-permischen Strukturen des Norddeutschen Beckens mit Sedimentmächtigkeiten von bis zu 11 km (Baldschuhn et al. 2001, Maystrenko et al. 2005, Littke et al. 2008, Warsitzka et al. 2016). Der NNE-SSW streichende Glückstadt-Graben zeigt durch die Differenzierung in verschiedene Tröge und das Auftreten von tiefreichenden Störungszonen und Salzdiapiren eine komplexe struktureologische Entwicklung (Strukturbezeichnungen siehe Abb. A3, A9).

Innerhalb des Meso- und Känozoikums werden NNE bis N bzw. NNW verlaufende Strukturelemente von W-E bis NW-SE streichenden Störungen gequert (Baldschuhn et al. 2001). Die meisten der

tiefreichenden Störungen in Schleswig-Holstein orientieren sich an dem Hauptstörungssystem im prä-salinaren Sockel (Baldschuhn et al. 2001, Maystrenko et al. 2005), die in der geologischen Entwicklungsgeschichte durch das richtungsändernde regionale Stressfeld mehrfach reaktiviert worden sind und Einfluss auf die Salzstrukturentwicklung des Glückstadt-Grabens hatten.



**Abb. 1:** Strukturelle Gliederung (gelbe Linie), Salzdiapire und tiefreichende Störungen des tieferen Untergrundes von Schleswig-Holstein (Quelle: 3D-Modell SH – LLUR SH 2016 / Baldschuhn et al. 2001).

Der Glückstadt-Graben wurde vermutlich schon im Rotliegend und Zechstein angelegt (Kockel 1998). Die erste bedeutende Rifting Phase erfolgte im Mittleren Buntsandstein (vor allem Detfurth und Hardeggen Folge, Kockel 1998). In einem W-E gerichteten, extensionalen Spannungsfeld bildeten sich Störungszonen und es kam zu verstärkter Subsidenz im zentralen innersten Bereich des Grabens (Baldschuhn et al. 2001, Warsitzka et al. 2016). Erneute starke W-E gerichtete transtensionale Bewegungen und verstärkte Subsidenz setzten im Unteren Gipskeuper ein und hielten bis in den

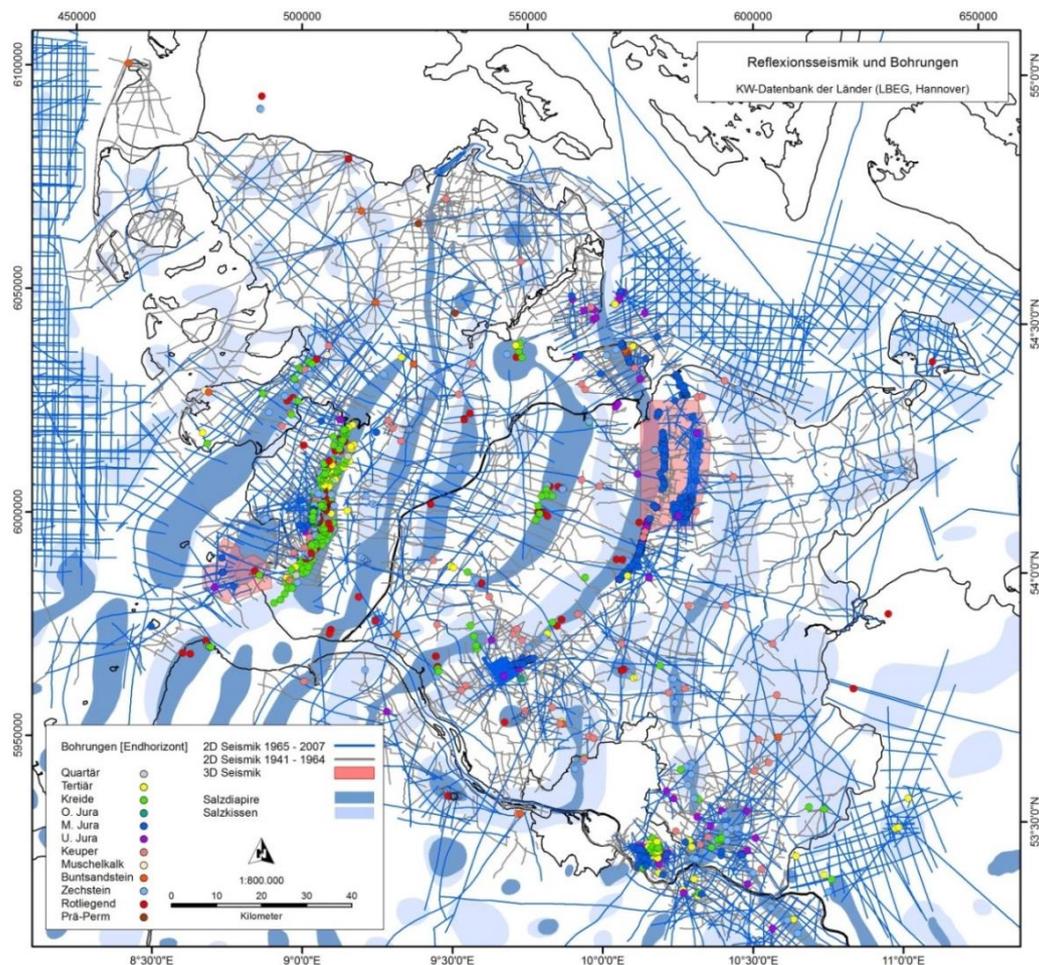
Steinmergelkeuper an (Kockel 1998), hierbei weitete sich der Graben. Störungszonen bildeten sich bevorzugt über aktiven Sockelstörungen und bildeten Schwächezonen, in die das vorher schon mobilisierte Zechstein- und zum Teil Rotliegend-Salinar eindrang. Kissenbildung in der frühen Trias und der im Keuper einsetzende Diapirismus (Baldschuhn et al. 2001, Doornenbal et al. 2010) führten zur Entstehung von primären und später sekundären Randsenken, die den Sedimentationsraum differenzierten und laterale Bewegungen des Perm Salzes zusätzlich verstärkten. Die Bildung der Salzdiapire wurde von tektonischen Prozessen beeinflusst und erfolgte zunächst im zentralen Teil des Glückstadt-Grabens und setzte sich dann von innen nach außen fort (z.B. Weber 1977, Maystrenko 2005). Die Intensität der Grabenentwicklung im Keuper spiegelt sich wider in der extremen Mächtigkeitzunahme von 300 – 700 m auf den Blöcken zu maximal 5000 m im zentralen Glückstadt-Graben (Baldschuhn et al. 2001). Im Unteren und Mittleren Jura folgte eine eher inaktive Phase mit anhaltender Subsidenz, wobei sich die Sedimentation, auch beeinflusst durch den sich fortsetzenden Diapirismus, zunehmend in die äußeren Trog-Bereiche des Grabens verlagerte (Maystrenko et al. 2013, Warsitzka et al. 2016). Angrenzend an die Depozentren des Keupers bildeten sich im Zuge des jurassischen Diapirismus sekundäre Tröge (Littke et al. 2008), die wiederum Einfluss auf die Salzmobilisierung nahmen. Im späten Jura und frühen Kreide folgte im Bereich des Glückstadt-Grabens eine tiefgreifende Erosionsphase durch Hebung (Jaritz 1969, Jaritz 1980, Rodon & Littke 2005), die zur Abtragung von Sedimenten des Juras und Oberen bis Mittleren Keupers führte. In den sich bildenden jurassischen Randtrögen sind die Abfolgen weitgehend erhalten (Baldschuhn et al. 2001). In der Kreide setzte wieder moderate Subsidenz ein und es kam zur flächendeckenden Ablagerung von marinen Sedimenten, die heute diskordant die triassischen und jurassischen Abfolgen abdecken. In einigen Bereichen des Norddeutschen Beckens kam es durch die alpidische Orogenese im frühen Tertiär zu Inversionstektonik (z.B. Niedersächsisches Becken). Für den Bereich des Glückstadt-Grabens existieren bisher keine Belege für kompressive Inversion, stattdessen überwog Subsidenz, die sich in den äußeren Grabenbereichen verstärkte. Im Verlaufe des Tertiärs setzte in einem WNW-ESE bis W-E gerichteten Spannungsfeld tektonische Aktivität und verstärkter Diapirismus ein (Baldschuhn et al. 2001, Maystrenko 2005, Warsitzka et al. 2016). Neben Nachbewegungen des Zechstein-Salinars und Reaktivierung von Störungen im gesamten Gebiet, entwickelten sich Salzdiapire und Störungen vor allem an den äußersten Rändern des Glückstadt-Grabens. Damit einhergehende Subsidenz führte zu der weiteren Entwicklung des Westholstein- und Ostholstein-Troges sowie des Hamburger-Troges (Baldschuhn et al. 2001).

## **1.3 Daten und Methoden**

### **1.3.1 Datenbestand**

Die Kenntnis des tieferen Untergrundes von Schleswig-Holstein basiert auf seismischen Profilen und Tiefbohrungen, die im Zeitraum 1870 bis 2007 maßgeblich von der Kohlenwasserstoff-Industrie zur Exploration erhoben wurden. Der festländische Teil des Landes wird durch 3250 seismische Profile, zwei 3D Surveys und 1236 Bohrungen (Anzahl ohne Ablenkungen bzw. Vertiefungen) abgedeckt (Abb. 2, KW-Datenbank der Länder, LBEG, siehe auch Abb. A1, A2). Zwei Drittel der seismischen Profile wurden vor 1965 produziert und liegen meist als „Linedrawings“ (Linien von charakteristischen Reflektoren, ursprünglich Einzelschussaufnahmen) vor. In der Mitte der 60er Jahre wurde die Methodik der seismischen Messung stark weiterentwickelt, sodass der Untergrund durch neuere Messungen mit höherer Auflösung abgebildet werden konnte. Ein Drittel der Profile entstand in dem

Zeitraum 1965 bis 2007. Diese Daten sind in unterschiedlichen Prozessierungsstadien und Qualitäten archiviert und zeigen eine relativ gute Abdeckung der Landesfläche. Der Datenbestand der Bohrungen ist hinsichtlich Qualität, Genauigkeit und Auflösung der geophysikalischen Bohrlochmessungen aufgrund des langen Erhebungszeitraumes sehr heterogen. In den 80er und 90er Jahren entwickelten Kockel und Baldschuhn et al. den Geotektonischen Atlas von NW-Deutschland in den Maßstäben 1:100.000 (BGR, unveröffentlicht) sowie 1:300.000 (Baldschuhn et al. 2001; GTA) und damit eine flächendeckende Interpretation des tieferen Untergrundes. Hierfür wurden alle damals zur Verfügung stehenden seismischen Daten und Bohrungen verwendet. Der Atlas enthält 14 Tiefenlinienpläne der Basis lithostratigraphischer Horizonte zwischen dem Mittleren Miozän und der Basis des Zechsteins. Darüber hinaus sind Restmächtigkeitskarten von ausgewählten Formationen, geologische Profile und Berichte enthalten. In einem früheren Projekt des LLUR SH entstand ein 3D-Modell des Geotektonischen Atlas (3D-Basismodell SH, Rosenbaum et al. 2012, Hese 2012), das eine wichtige Grundlage für die folgenden Arbeiten ist.



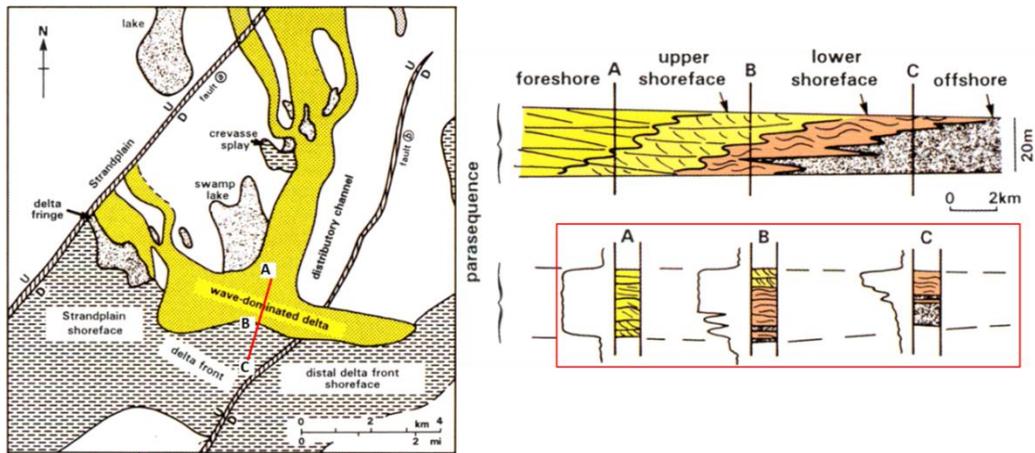
**Abb. 2:** Bohrungen und seismische Daten im festländischen Teil von Schleswig-Holstein und angrenzender Bereiche (KW-Datenbank der Länder, LBEG Hannover).

### 1.3.2 Auswertung und Interpretation von Bohrungsdaten

Die Bohrungsdaten der Kohlenwasserstoff-Industrie enthalten im unterschiedlichen Umfang geophysikalische Bohrlochmessungen, Schichtenverzeichnisse, mikro- und makropaläontologische Untersuchungen sowie Porositäts- und Permeabilitätsdaten aus Logauswertungen und Kernuntersuchungen der Bohrungen. In den Schichtenverzeichnissen der Bohrungen sind die stratigraphische Gliederung sowie die Gesteinsbeschreibung, die beim Bohrprozess dokumentiert wurden, zusammengefasst. Die geophysikalischen Bohrlochmessungen umfassen verschiedenste Messverfahren, z.B. der natürlichen Radioaktivität (Gamma-Ray Messungen), des Eigenpotentials, des Widerstands der durchteuften Gesteine.

Im Rahmen des Projektes wurden Schichtenverzeichnisse und geophysikalische Bohrlochmessungen wie Gamma-Ray-, Eigenpotential-, Widerstand- und Akustik-Logs zur lithologischen Charakterisierung der geologischen Einheiten und deren geothermisch relevanten Sandsteinhorizonte ausgewertet und interpretiert. Bei den Bearbeitungen wurde die stratigraphische Gliederung der Bohrungen überprüft und in vielen Fällen auf Basis neuester Erkenntnissen aus der Literatur (z.B. Röhling 1999, Brand & Mönning 2009) neu gegliedert und mittels Bohrungskorrelation harmonisiert. Anhand der Daten wurde eine detaillierte lithologische und stratigraphische (Neu-) Gliederung des Mittleren Buntsandstein, des Oberen Keupers und des Mittleren Jura für den festländischen Teil von SH vorgenommen. Basierend auf dem Abgleich von Bohrlochmessungen und Schichtenverzeichnis der jeweiligen Bohrungen wurden lithologische Klassen abgeleitet und Marker definiert. Lithologie sowie stratigraphische Gliederung aller bearbeiteten Bohrungen wurde in eine im Projekt entwickelte Datenbank gespeichert und als exportierbare Datensätze für andere Programme (z.B. Excel, Gocad) aufbereitet. Die definierten Marker umfassen Basis- und Topmarker von lithostratigraphischen Einheiten (Reservoirkomplexe bzw. Serien, wie z.B. Mittlerer Jura, Bajoc, Sonninien Schichten). Zudem wurden Basis und Top Marker von relevanten Sandsteinhorizonten eingefügt (z.B. Varel Sandstein). Die Marker wurden für die geologische 3D-Modellierung der Formationen und Sandsteinhorizonte weiter verwendet.

Die Auswertung von geophysikalischen Bohrlochmessungen ermöglichte nicht nur die lithologische Interpretation und die lithostratigraphische Korrelation sondern auch die Ableitung von vertikalen und lateralen lithofaziellen Veränderungen. Dabei wurden überwiegend Gamma-Ray- und Eigenpotential-Logs, in wenigen Fällen auch Widerstands- und Akustikmessungen verwendet. Die bohrlochgeophysikalischen Messkurven sind durch bestimmte geometrische Eigenschaften (Kurvencharakter wie z.B. glatter oder gezackt, scharfe Basis oder Top) und Logtrends (z.B. progradierender Logverlauf) charakterisiert (Rider 2011). Die Analyse von diesen Charakteristika ließ eine Interpretation sedimentärer Einheiten zu. In Verbindung mit lithologischen und paläontologischen Informationen aus den Schichtenverzeichnissen konnten somit Rückschlüsse auf die Ablagerungsbedingungen gezogen werden (Abb. 3). Mit Hilfe dieser Interpretationen sowie Erkenntnissen aus der Literatur (z.B. Wolfgramm et al. 2014) wurden Faziesklassen definiert. Für den Mittleren Buntsandstein wurden drei, für den Oberen Keuper sechs und für den Mittleren Jura vier bis sechs Faziesklassen unterschieden.



**Abb. 3:** Schema zur Rekonstruktion von Ablagerungsräumen basierend auf der Auswertung von Logtrends (verändert nach Rider 2011).

Für die Untersuchung der geologischen Einheiten und deren Sandsteinaquifere im Anschluss an Störungszonen wurden aus den Schichtenverzeichnissen Informationen über Kluft- und Harnischbildung und Zementation gesammelt, in Excel-Tabellen aufbereitet und in ArcGIS importiert und visualisiert. Dabei wurden zunächst die Schichtenverzeichnisse von Bohrungen mit bekannten Störungsmarkern, die in der KW-Datenbank der Länder abgelegt sind, gesichtet und im weiteren Verfahren hinsichtlich Klüfte und Zemente, die mit der Entwicklung von Störungszonen im Zusammenhang stehen könnten, analysiert. Die Unterscheidung der Zemente erfolgte in Anhydrit/Gips, Kalzit/Dolomit, Quarz, Ankerit und Pyrit. Eine Unterscheidung in störungsbedingte oder lithologisch/faziell bedingte Zementation wurde nicht vorgenommen. Über die Art des Zements lassen sich Annahmen treffen, inwiefern ein Einfluss einer nahegelegenen Salzstruktur existiert. In einem weiteren Schritt sind Hinweise auf Störungen in Schichtenverzeichnissen für die ausgewählten geothermisch relevanten Aquifere innerhalb der geologischen Einheiten gesammelt worden.

Für die Bewertung der hydraulischen Verhältnisse wurden Porositäts- und Permeabilitätsdaten aus Logauswertungen und Kernuntersuchungen der Bohrungen verwendet. Dabei wurden die hydraulischen Daten von dem entsprechenden Teufenbereich des jeweiligen Aquifers gemittelt. Da die Anzahl der vorhandenen Werte sehr gering ist, wurden Porositäts- und Permeabilitätswerte sowohl aus den Kernproben als auch aus den Logdaten zusammengefasst. Die Einteilung der Porositäts- und Permeabilitätsdaten erfolgte jeweils in drei Klassen.

Alle generierten Attribute aus den Schichtenverzeichnissen und geophysikalischen Bohrlochmessungen wie Lithologie, Fazies, Zemente, Harnisch/Kluft, Porosität und Permeabilität wurden in Excel-Tabellen zusammengefasst, für den Import nach ArcGIS aufbereitet und in ArcGIS visualisiert.

### 1.3.3 Geologische 3D-Modellierung

Ein wichtiger Bestandteil geothermischer Potenzialstudien ist die räumliche Erfassung und Kartierung des Untergrundes. Durch die geologische 3D-Modellierung werden geometrische Informationen ermittelt und räumliche strukturelle Zusammenhänge und Trends visualisiert. Gleichzeitig erfolgt damit eine geologische und topologische Konsistenzprüfung der Eingangsdaten. Der Fokus dieser Teilstudie lag in der Konstruktion eines Strukturmodells des Glückstadt-Grabens. Neben der Darstellung der relevanten Formationen und Strukturen des NW-Deutschen Beckens wurden hierbei

vor allem Störungszonen, Reservoirkomplexe und Sandsteinformationen untersucht und visualisiert. Die Modellgrenze umfasst den gesamten festländischen Bereich von Schleswig-Holstein (25527 km<sup>2</sup>), so werden auch die Randbereiche des Glückstadt-Grabens mit abgedeckt. Vertikal erstreckt sich das Modell von der Topographie bis zu der Basis des Zechsteins in einen maximalen Tiefenbereich von ca. 11 km. Zur Konstruktion des Modells wurde die 3D-Modellierungssoftware GOCAD eingesetzt (Paradigm).

### 1.3.3.1 Konstruktion des Strukturmodells

Die Eingangsdaten der Modellierung sind die Daten des Geotektonischen Atlas von NW-Deutschland (Baldschuhn et al. 2001). Bohrdaten wurden zur Korrektur verwendet. Seismische Interpretationen dienen der qualitativen Validierung der Interpretation in verschiedenen Regionen und wurden an wenigen Lokationen in die Störungsmodellierung einbezogen, um vereinzelt auffällige Lageungenauigkeiten zu korrigieren.

Eingangsdaten Störungen:

- Geotektonischer Atlas 1:300.000: Störungslinien der 14 Tiefenlinienpläne
- Geotektonischer Atlas 1:100.000: Geologische Profile
- Seismische Auswertungen an 5 Lokationen

Eingangsdaten Salzdiapire:

- Geotektonischer Atlas 1:300.000: Verbreitungsgrenzen des Typs „Ausbiss Salzstock“
- Geotektonischer Atlas 1:300.000/100.000: Tiefenlage der hangend abdeckenden Grenzflächen (bzw. entsprechende finalisierte Modellflächen)
- Geotektonischer Atlas 1:100.000: Verbreitungsgrenzen Liegendkontakt Zechstein-/Rotliegendesalinar in den betreffenden Tiefenlinienplänen (z.B. Unterkreide).
- Salzstudie der BGR (1994/95): Verbreitung und Tiefenlage der Dachbereiche von ausgewählten Salzstrukturen
- Bohrdaten: Marker Top-Perm, Bohrungen in Randlage von Salzstrukturen
- Basis Quartär (LLUR SH, W. Scheer pers. comm. 2014)
- Salzstockmodell des 3D-Basismodells SH

Eingangsdaten lithostratigraphische Grenzflächen:

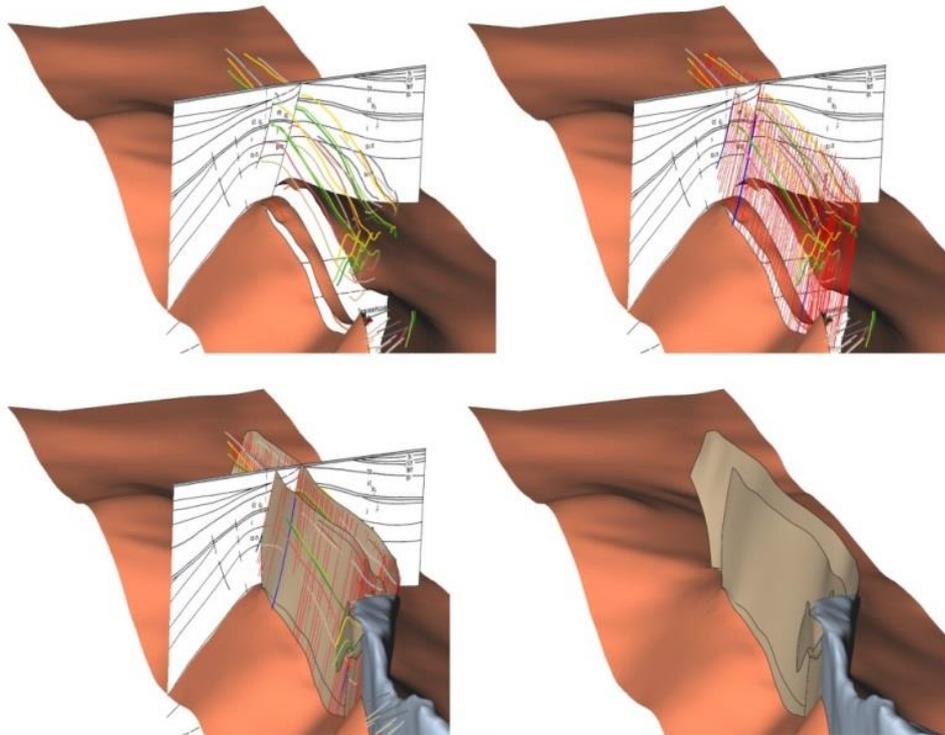
- Basis O. Paläozän bis U. Kreide: Geotektonischer Atlas 1:100.000 (Verbreitung und Störungssystem GTA 1:300.000)
- Basis O. Jura bis Zechstein: Geotektonischer Atlas 1:300.000 (lokal korrigiert durch GTA 1:100.000)
- Restmächtigkeitskarten O. Keuper und U. Buntsandstein (GTA 1: 300.000)
- Basis Quartär (LLUR SH, W. Scheer pers. comm. 2014)
- Küstenbereich Ostsee: Geotektonischer Atlas Nord (Wirth pers. comm. 2008, BGR)

Die lithostratigraphische Differenzierung orientiert sich an seismisch kartierbaren Reflektoren und gleicht größtenteils der Abfolge der Strukturkarten des Geotektonischen Atlas von NW-Deutschland. Es wurden 12 lithostratigraphische Horizonte ausgewählt: Basis O. Paläozän, O. Kreide, U. Kreide, O. Jura, M. Jura, U. Jura, O. Keuper, U. Keuper, O. Buntsandstein, M. Buntsandstein, U. Buntsandstein, Zechstein. Im Unterschied zur Abfolge des GTA wird das Tertiär nicht differenziert und bildet damit

die oberste abdeckende Einheit. Der tiefere Bereich wird ergänzt durch die Basis Oberer Keuper und Basis Mittlerer Buntsandstein, die mit Hilfe der Restmächtigkeitskarten des Rhät und des Unteren Buntsandsteins des GTA konstruiert wurden (Abb. A4).

Die topologische Konsistenz eines geologischen Modells ist nicht nur aus geologischer Sicht notwendig, sondern ist auch Voraussetzung zur Konstruktion von Volumenmodellen (3DVoxet, SGrid, TSolid, Model3D), die bei vielen Anwendungen eingesetzt werden (z.B. 3D-Modellierung des Temperaturfeldes). Topologische Konsistenz bedeutet, dass keine Überschneidungen oder Lücken auftreten und Flächengrenzen einen exakten Kontakt mit benachbarten Objekten besitzen. Das Modell besteht aus lithostratigraphischen Grenzflächen (konkordant und diskordant), Störungsflächen und Hüllflächen von intrusiven Salzstrukturen. Wird ein Objekt verändert, hat dies Änderungen aller benachbarten Objekte zur Folge. Daher wurde bei der Modellierung eine möglichst optimale Vorgehensweise gewählt. Die geologische Struktur des Projektgebietes und die verschiedenen Eingangsdaten (z.B. Einsatz von Basiskarten und Mächtigkeitskarten) führten zur folgenden Bearbeitungsreihenfolge: Topographie, Störungsflächen, Salzdiapire – Dachbereich im Tertiär, Basis O. Paläozän, O. Kreide, U. Kreide, Salzdiapire – Dachbereich an oder unter der Kreide, Basis O. Jura, M. Jura, U. Jura, Top Rhät (O. Keuper), Interpolation Mächtigkeit Rhät, Basis Rhät, Basis U. Keuper, O. Buntsandstein, U. Buntsandstein, Interpolation Mächtigkeit U. Buntsandstein, Basis M. Buntsandstein, Basis Zechstein.

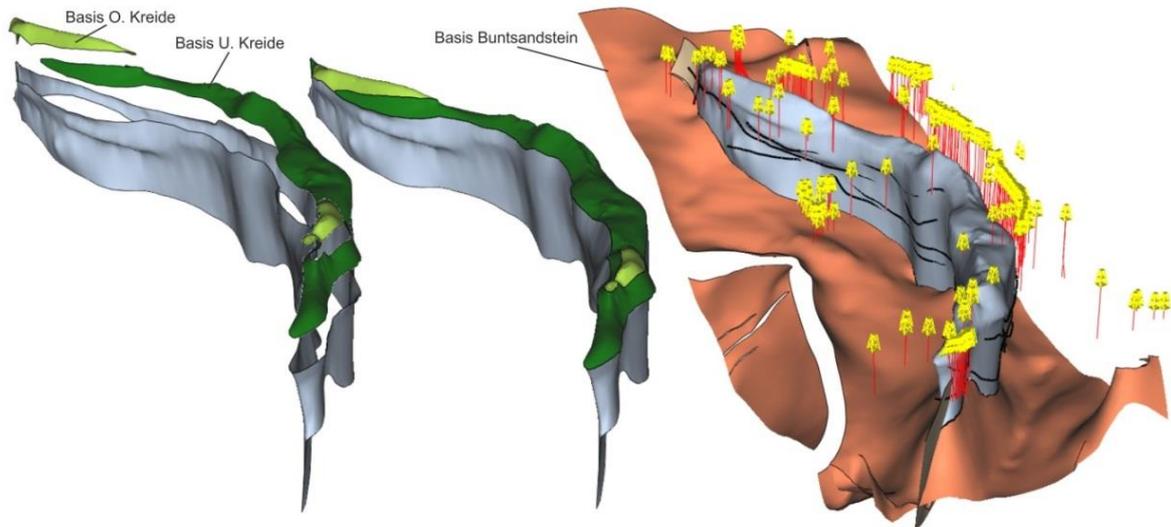
In der ersten Phase der Modellierung erfolgte die Konstruktion von Störungsflächen der Störungszonen. Die Konstruktion der triangulierten Störungsflächen basiert auf der Korrelation von Störungslinien im Raum. Hierfür wurden die in die jeweilige Tiefenlage projizierten Störungsspuren (Abb. A7-A9) und geologische Profile des GTA verwendet (Abb. 4). Zur Konstruktion von Flächen wurden die Störungsspuren nur in wenigen Fällen direkt verbunden. Meistens wurden Hilfslinien auf vertikalen Ebenen mit Hilfe von Anschnitten der GTA Daten digitalisiert, die orthogonal zur Streichrichtung der jeweiligen Struktur orientiert wurden. Dies ermöglichte eine vom Nutzer gesteuerte Interpolation, Generalisierung und Korrektur. Zudem wurde dadurch eine ausreichende Verdichtung der Datenpunkte im Raum erreicht. Es wurden Flächen von fast allen im GTA verzeichneten tiefreichenden Störungen bearbeitet und konstruiert. Wenige einzelne Störungen geringer Ausdehnung wurden aufgrund unzureichender Datenbasis nicht in das Modell integriert. Lokal mussten Generalisierungen erfolgen, da Details der vertikalen Veränderung des Störungssystems nicht nachvollzogen werden konnte. Das Störungsmodell erlaubt die überschneidungsfreie Darstellung der Beckenstrukturen. Da tektonische Prozesse im Glückstadt-Graben untrennbar mit halokinetischen Prozessen verbunden sind, wird das Modell der tiefreichenden Störungszonen durch das Modell der Salzstrukturen ergänzt und zum besseren kausalen Verständnis gemeinsam visualisiert.



**Abb. 4:** Konstruktion von Störungsflächen aus Störungsspuren des GTA (farbige Linien, rot: Hilfslinien) und geologischen Profilen.

Die Salzmauern und Diapire werden durch triangulierte Hüllflächen dargestellt, die an der Durchbruchposition Basis Buntsandstein abschließen. Voraussetzung zur Konstruktion des Modells sind zum einen Störungsflächen sowie unmittelbar abdeckende lithostratigraphische Flächen, da diese Elemente lokal Begrenzungen darstellen und daher eng in die Konstruktion mit eingebunden sind. Das Salzstockmodell des Basismodells SH basiert auf Daten des GTA und wurde im unterschiedlichen Maße verwendet. Einige Salzstrukturen wurden komplett neu konstruiert. Zum Teil wurden aber auch die unteren Flankenbereiche aus dem Basismodell SH übernommen und weiterentwickelt. Es erfolgte eine Neukonstruktion von allen Dachbereichen. In den Tiefenlinienplänen des GTA sind Ausbisse von lithostratigraphischen Horizonten an Salzstöcken verzeichnet, die in die jeweilige Tiefe projiziert zur Abgrenzung von Salzstrukturen verwendet wurden (Abb. 5). Zur Konstruktion der Hüllfläche einer Salzstruktur wurden zunächst die Grenzflächen der Flanken konstruiert. Dann folgte die Konstruktion der Dachfläche, meist aus hangend angrenzenden lithostratigraphischen Modellflächen (meist Basis U. Kreide oder O. Kreide). Bohrdaten wurden, so weit möglich, berücksichtigt.

Aufgrund der Schwierigkeit der lateralen Abgrenzung von Salzstrukturen im seismischen Abbild ergeben sich in Abhängigkeit von der Bohrungsdichte in Randlage mehr oder weniger große Unsicherheiten. Es gibt Regionen mit hoher Bohrungsdichte in Salzstockrandlage (z.B. Warnau – Schwedeneck – Waabs), in denen genauere Untersuchungen möglich sind. Diese Daten belegen zum Teil eine hohe Komplexität, die räumlich schwer darstellbar ist. Die seismische Bestimmung der Dachbereiche der Salzdiapire ist präziser möglich und vielerorts durch Bohrdaten zusätzlich abgesichert. Innerhalb der Hüllflächen wurden Caprock-Bereiche nicht gesondert ausgewiesen bzw. lithologisch differenziert.



**Abb. 5:** Rechts: Hüllflächen der Salzstrukturen Waabs-Moenkloh, Bohrungen und Salzstock - Verbreitungslinien aus dem GTA (Schwarz). Links/Mitte: Einzelkomponenten des Modells.

Es wurden offensichtliche Fehler, wie z.B. falsche Tiefenwerte von Isolinien, in den Punktdaten der Tiefenlinienpläne bereinigt und auf dieser Grundlage neue Grenzflächen erzeugt. Die Konstruktion der lithostratigraphischen Grenzflächen erfolgte in zwei Phasen. In der ersten Phase ging es um die Konstruktion und Bearbeitung von triangulierten Flächen im gesamten Projektgebiet (Abb. 6). In der zweiten Phase wurden Regionen separat voneinander bearbeitet (Abb. 7).

Die Tiefenlinienpläne des GTA wurden unverändert zur Konstruktion der Grenzflächen übernommen, sofern keine stichhaltigen Gründe zur Korrektur bestanden (Tiefenlage, Verbreitung, Ausbisse, Versatzbeträge an Störungen). Änderungen wurden meist an den Flächenrändern umgesetzt. In Bereichen geringer Mächtigkeit, Flanken von Salzdiapiren, an Diskordanzen und nahe Störungen mussten Durchdringungen korrigiert oder Lücken geschlossen werden. Inkonsistenzen sind lokal begrenzt auch abseits von Ausbissbereichen zu beobachten. Grund sind meist ungenaue räumliche Abstimmungen zwischen den Tiefenlinienplänen des GTA, inkonsistente Änderungen im Zuge der Homogenisierung und Generalisierung der ersten Kartenvorlagen und Digitalisierungsfehler. Unstimmigkeiten des GTA sind durch die Modellierung auffällig geworden und wurden korrigiert. Gleichzeitig ist festzustellen, dass große Bereiche im Rahmen des gegebenen Maßstabes stimmig kartiert wurden.

Zur Konstruktion der Basisflächen Oberer Keuper (Rhät) und Mittlerer Buntsandstein stehen keine Tiefenlinienpläne zur Verfügung, daher wurden die Restmächtigkeitskarten Rhät und Unterer Buntsandstein des GTA verwendet. Zur Konstruktion der Basis Rhät wurden zunächst Punktdaten aus den Flächenteilen, die das Top des Rhät bilden, extrahiert (Basis U. Kreide, Basis U. Jura und Basis M. Jura). Die Interpolation der Restmächtigkeitswerte erfolgte auf einem 2D Grid. Schließlich wurden die Werte auf die Punktdaten übertragen. Die durch Subtraktion der Restmächtigkeiten von den Tiefenwerten auf die Basis Rhät verschobenen Punktdaten waren die Eingangsdaten der Flächenmodellierung. Die Konstruktion der Basis des Mittleren Buntsandsteins verlief auf ähnliche Weise. Als Referenz wurden die Knotenpunkte der Basis des Unteren Buntsandsteins verwendet und durch Addition der Tiefenwerte mit der Restmächtigkeit Unterer Buntsandstein verschoben. Aufgrund der im Mittleren Buntsandstein verstärkt einsetzenden Subsidenz und tektonischen

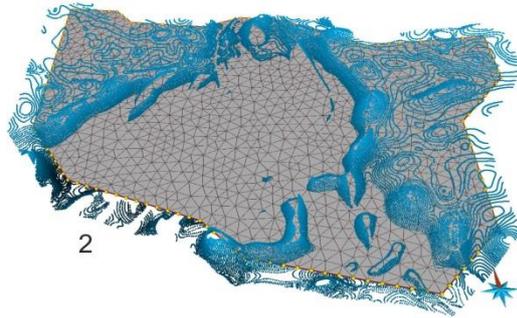
Aktivität sind die Mächtigkeitsschwankungen deutlich stärker ausgeprägt als im Unteren Buntsandstein. Durch Verwendung der Restmächtigkeit des Unteren Buntsandsteins können Unsicherheiten etwas minimiert werden. Es existieren Restmächtigkeitskarten des Mittleren Buntsandsteins ohne Solling und des Solling, die man alternativ verwenden könnte.

Obwohl die meisten Bohrungen im GTA berücksichtigt worden sind, mussten die Flächen lokal an die Bohrmarker angepasst werden. Wichtig war hierbei die Vermeidung von künstlichen Verzerrungen von Strukturen. Die Verwendung der DSI Interpolation kann bei ungünstiger Punktverteilung dazu führen, dass die maximale Verschiebung der Fläche nicht am Bohrmarker erfolgt, sondern in benachbarten Regionen (vergleichbar mit „Überschwingern“ bei der Spline-Interpolation). Die Korrektur erfolgte in einzelnen teils zusammenhängenden Regionen mit variablen Abständen zu Bohrmarkern (im Mittel 10 - 15 km), unter Berücksichtigung von strukturellen Trends. Durch diese räumliche Begrenzung der Korrektur konnten Artefakte weitgehend vermieden werden. Aufgrund der stark heterogenen Verteilung der Marker können je nach Markerdichte und Knotenpunktabstand der Fläche nicht alle lokalen Details exakt berücksichtigt werden.

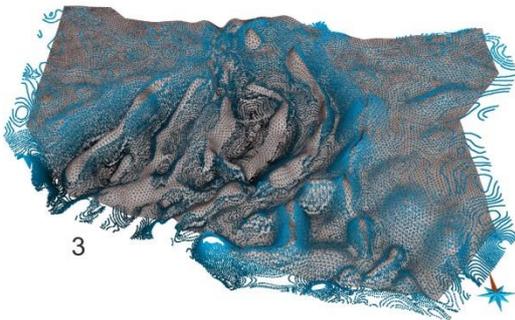
Polygon der Modellgrenze  
Eingangsdaten: Tiefenlinien des GTA



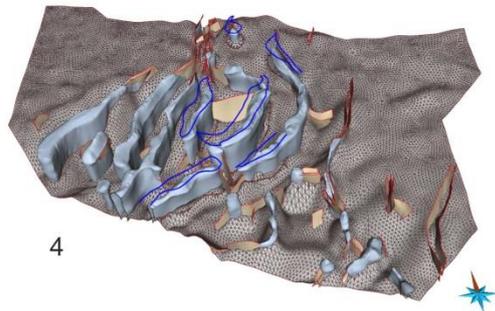
Flächenkonstruktion aus Polygon in mittlerer Tiefe  
der Eingangsdaten  
*interpolation / Anpassung an Tiefenlinien*  
Abstand der Knotenpunkte: 5000 m



2 Iterationen: *split triangles + interpolation*  
Abstand der Knotenpunkte: ca. 1250 m



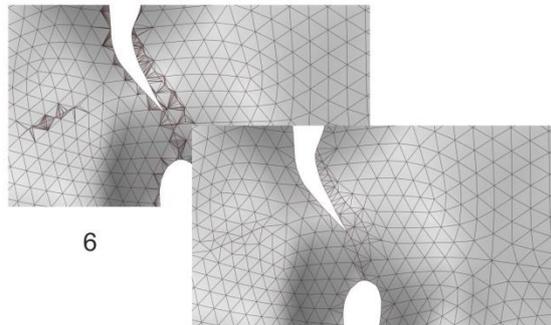
Verschneidung mit Störungs- und Salzstockmodell  
Verschneidung mit Verbreitungslinien „Diskordanz“ (blau)



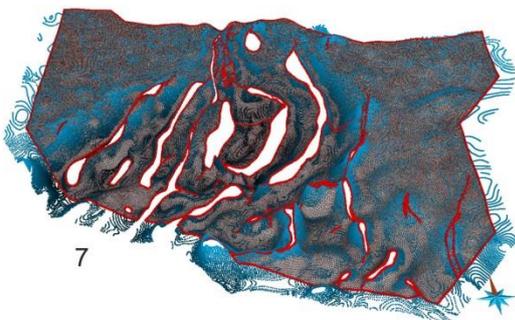
Entfernung überflüssiger Flächenteile



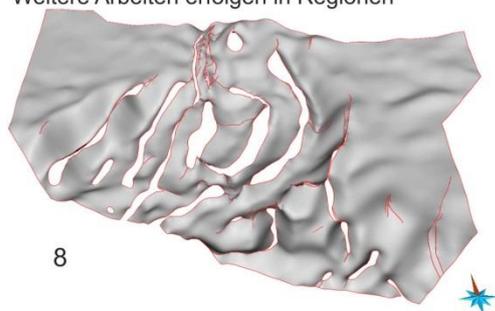
Optimierung der Vermaschung an allen Flächenrändern



Flächenränder fixiert (rot)  
*split triangles + interpolation*  
Abstand der Knotenpunkte: ca. 650 m



Abschluss der überregionalen Konstruktion  
Weitere Arbeiten erfolgen in Regionen

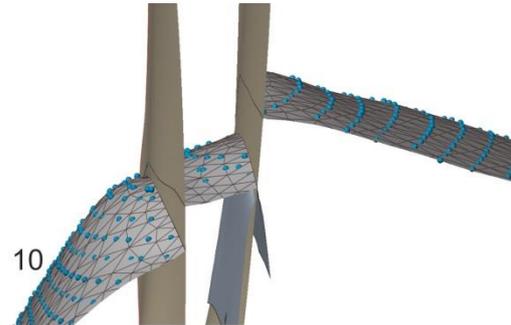


**Abb. 6:** Workflow zur Konstruktion von lithostratigraphischen Basisflächen. In der ersten Phase wurden triangulierte Flächen an Daten des GTA angepasst und mit Störungsflächen, Hüllflächen von Salzdiapiren und Diskordanzlinien (blaue Linien, Punkt 4) verschritten.

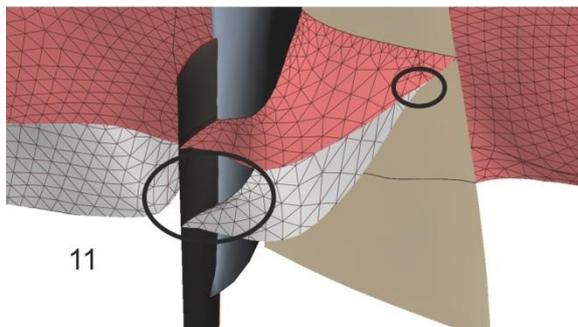
Anpassung von Flächenrändern an hangende Diskordanzflächen  
Korrektur von Schichtinterferenzen



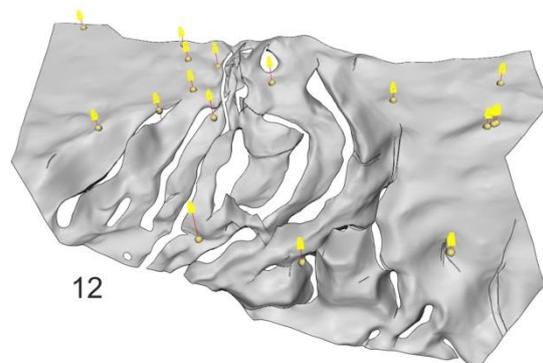
Anpassung von Flächenrändern an Störungsflächen - Sprunghöhen gemäß Daten des GTA  
Korrektur von Schichtinterferenzen



Anpassung der Flächengrenzen an Salzdiapiren und im Übergang Diskordanz und / oder Störungsfläche  
Korrektur von Schichtinterferenzen



Korrektur durch Bohrmarker in definierten Regionen



**Abb. 7:** Workflow zur Konstruktion von lithostratigraphischen Basisflächen. In der zweiten Phase wurden Ausbisse an Störungen, Salzdiapiren und Diskordanzen bearbeitet und Korrekturen durchgeführt. Diese Arbeiten erfolgten in Regionen.

### 1.3.3.2 Modellierung der Sandsteininformationen

Im Rahmen des Projektes wurde untersucht, ob und wie die sowohl vertikal als auch lateral variierende Lithologie eines Reservoirkomplexes räumlich visualisiert werden kann. Es wurden zwei mögliche Methoden gewählt. Im ersten Verfahren ging es um die Interpolation von lithologischen Auswertungen an Bohrlokalationen in einem Gittermodell (a). Nach der Erkenntnis, dass diese Vorgehensweise im landesweiten Maßstab nicht umsetzbar ist, wurde eine andere Methodik gewählt. Ziel des zweiten Verfahrens (b) war es, konsistente und geologisch plausible Grenzflächen von Sandsteinaquifere zu konstruieren, die in das 3D-Strukturmodell integriert werden können. Die Ausgangsdaten für die Modellierung der Basis- und Topflächen der Sandsteinhorizonte sind Restmächtigkeiten sowie Top- und Basistiefen der jeweiligen geologischen Einheiten (Reservoirkomplexe) des Strukturmodells bzw. des GTA (Baldschuh et al. 2001). Die auf Basis der lithologischen und faziellen Interpretationen generierten Basis- und Topmarker von geologischen Formationen und Sandsteinhorizonten wurden zur Mächtigkeitsberechnung und -interpolation verwendet.

### **a) Lithologische 3D Parametrisierung in einem Gittermodell**

Zur räumlichen Interpolation der Lithologie zwischen Bohrungen wurde ein Gittermodell des Mittleren Buntsandsteins in einem Testgebiet im Südosten von Schleswig-Holstein konstruiert (GOCAD SGrid). Die Interpolation von Werten erfolgt in einem solchen Gitter im lokalen Koordinatensystem (UVW), das am Ursprung mit dem regionalen Koordinatensystem (UTM32-ETRS89) verbunden ist. Das Ergebnis der Interpolation wird entscheidend von der (verzerrten, deformierten) Gitterstruktur beeinflusst. Das Gitter muss die Lagerungsverhältnisse möglichst gut abbilden, da sonst zwischen Bohrungen unrealistische Mächtigkeitsänderungen entstehen. Innerhalb des Gitters müssen daher Diskordanzen definiert werden. Im Testmodell wurden die Werte eines lithologischen Logs im Gitter interpoliert. Durch Definition der Hauptdiskordanzen konnte auch ein gutes Ergebnis erzielt werden. Es wurde jedoch deutlich, dass ein solches Vorgehen im landesweiten Maßstab problematisch ist. Ein Grund ist die hohe strukturelle Komplexität von Teilbereichen und die Tatsache, dass Diskordanzen meist nicht landesweit auftreten. Zur Umsetzung müsste man zunächst die räumliche Verbreitung der Diskordanzen kartieren. Zudem muss bei der Konstruktion des Gitters ermöglicht werden, dass eine Gittereinheit je nach Lage gleichzeitig konkordant und diskordant sein kann. Momentan können Diskordanzen im Modellierungssystem GOCAD lediglich für das gesamte Modellgebiet definiert werden. Da die Lösung dieser Probleme im zeitlichen Rahmen des Projektes nicht möglich war, wurde ein anderer Ansatz gewählt, der im Folgenden näher beschrieben wird.

### **b) Berechnung von Sandsteinmächtigkeiten und Konstruktion von Basis- und Topflächen**

Um von einer Basisfläche einer geologischen Einheit zu einer neuen Fläche z.B. einer Basisfläche eines Sandsteinhorizontes zu gelangen, mussten zunächst die Mächtigkeiten zwischen den Markern der Basisfläche einer geologischen Einheit und den Basismarkern eines Sandsteins bestimmt werden. Die Mächtigkeitsberechnung wurde für alle jeweiligen Bohrungen durchgeführt. Zur Konstruktion von landesweiten Grenzflächen von Sandsteinaquiferen wurden zwei Verfahren zur Berechnung und Interpolation von Mächtigkeiten verwendet. Bei dem ersten Verfahren wurden Sandsteinmächtigkeiten zwischen Basis- und Topmarker der jeweiligen Aquifere berechnet ohne diese in Verbindung zur Gesamtmächtigkeit eines Reservoirkomplexes zu betrachten. Diese Mächtigkeitsbestimmung wurde bei der Flächenkonstruktion im Mittleren Jura angewendet. Bei dem zweiten Verfahren hingegen wurde die an jedem entsprechenden Bohrpunkt ermittelte Sandsteinmächtigkeit ins Verhältnis zur Restmächtigkeit eines Reservoirkomplexes (bzw. einer lithostratigraphischen Einheit) gesetzt. Die berechneten Anteile wurden auf einer Referenzfläche interpoliert und mit der Gesamtmächtigkeit eines Reservoirkomplexes multipliziert, um die Mächtigkeit des Sandsteinhorizontes im Raum neu zu ermitteln. Diese Methode wurde für die Bestimmung der räumlichen Verteilung der Sandsteinmächtigkeiten im Mittleren Buntsandstein und im Oberen Keuper verwendet. Der letztgenannte Ansatz basiert auf der Annahme, dass bei hoher Gesamtmächtigkeit eines Reservoirkomplexes auch eine höhere Mächtigkeit einer untergeordneten Formation vorliegt. Diese Korrelation kann zumindest punktuell bestätigt werden.

Die Mächtigkeitswerte wurden interpoliert und auf eine Fläche, z.B. auf die Basisfläche der geologischen Einheit, projiziert. Im zweiten Arbeitsschritt wurde die Basisfläche der geologischen Einheit um den Betrag der interpolierten Mächtigkeit auf das Niveau der Basismarker des Sandsteins angehoben. Lokal wurde die neue Fläche an die entsprechenden Basismarker des Sandsteins angepasst. Die Basisfläche des Sandsteinhorizontes wurde mit darüber liegenden Flächen im dem

geologischen Strukturmodell verschnitten, um Überschneidungen zu vermeiden. Der Ausbiss der Fläche wurde somit modelltechnisch generiert.

Mit Hilfe der beschriebenen Methodik wurden mehrere Basis- und Topflächen von Sandsteinaquiferen konstruiert. Durch lokale Anpassungen der Flächen an die Bohrmarker der Sandsteine wurden die Flächengeometrien verändert. Bei der Modellierung von geothermisch relevanten Sandsteinaquiferen wurden sowohl Mächtigkeiten von einzelnen Sandsteinhorizonten als auch akkumulierte Sandsteinmächtigkeiten innerhalb geologischer Einheiten ermittelt.

### **1.3.4 Charakterisierung von Störungszonen**

Vor der Modellierung der Störungen wurde der Datenbestand des Geotektonischen Atlas hinsichtlich Informationen zu Störungen und Störungszonen gesichtet (Abb. A5-A9). Die Störungslinien des GTA wurden nach Störungszonen gruppiert (Abb. A9) und in Form eines Kataloges eine Übersicht erstellt. Sie enthält unter anderem eine Sammlung von Texten aus den Berichten des GTA. Ergänzt werden diese Informationen durch seismische Auswertungen zur Darstellung und Beschreibung von Störungszonen in fünf Fallbeispielen.

Zur landesweiten Visualisierung und Auswertung von Störungsattributen wurden geometrische Parameter aus dem geologischen 3D-Modell der Störungen extrahiert und zusammen mit allgemeinen Informationen in einer Attributtabelle zusammengefasst. Die Attributierung orientierte sich an ableitbaren Informationen, die im Hinblick auf eine geothermische Nutzung relevant sein können.

- Allgemeine Metadaten
- Störungsattribute

*Typ (Störungstyp, z.B. Abschiebung)*

Bei den Störungen des Glückstadt-Grabens handelt es sich um Abschiebungen, Schrägabschiebungen und vermutlich zeitlich begrenzt um Blattverschiebungen. Da rezente Vorgänge nur durch Kenntnis des rezenten Stressfeldes des Suprasalinars erfasst werden können, ist die Relevanz im Kontext der geothermischen Störungscharakterisierung eher gering.

*Horiz\_Länge (Horizontale Länge)*

Die horizontale Länge einer Störung ist ein Maß für die regionale struktureologische Bedeutung und es können Hauptstörungen von Nebenstörungen unterschieden werden.

*Min\_Z (Minimale Tiefe), Max\_Z (Maximale Tiefe), Delta\_Z (Vertikale Länge)*

Störungen mit hoher vertikaler Länge sind Hauptstörungen, die in vielen Bereichen des Glückstadt-Grabens bis in das Basement reichen und große Bereiche der mesozoischen Abfolge betreffen. Zudem besitzen sie potenziell eine breitere geklüftete Randzone.

*Min\_Strat (Minimale stratigraphische Position), Max\_Strat (Maximale stratigraphische Position)*

Mit der Darstellung der stratigraphischen Reichweite der Störungsflächen kann das ungefähre Alter der letzten Aktivierung abgeschätzt werden.

*Mean\_DipAzimuth (Mittlere Einfallrichtung), Mean\_Strike (Mittlere Streichrichtung), Min\_DipAngle (Minimaler Einfallswinkel), Mean\_DipAngle (Mittlerer Einfallswinkel), Max\_DipAngle (Maximaler Einfallswinkel)*

Je nach Region und aktuellem Spannungsfeld können bestimmte Streichrichtungen die Wahrscheinlichkeit für vorhandene Fließwege parallel zum Störungsverlauf erhöhen (Agemar et al. 2016).

#### *Anbindung\_Reservoir*

Mit Hilfe dieses Eintrages kann visualisiert werden, ob und welche Reservoirkomplexe an einer Störung ausbeissen oder versetzt werden.

*Min\_Versatz\_BasisSM (Minimaler Versatz Mittl. Buntsandstein), Median\_Versatz\_BasisSM (Medianwert Versatz Mittl. Buntsandstein), Max\_Versatz\_BasisSM (Maximaler Versatz Mittl. Buntsandstein), Min\_Versatz\_BasisKO (Minimaler Versatz Oberer Keuper), Median\_Versatz\_BasisKO (Medianwert Versatz Oberer Keuper), Max\_Versatz\_BasisKO (Maximaler Versatz Oberer Keuper) Min\_Versatz\_BasisJM (Minimaler Versatz Mittl. Jura), Median\_Versatz\_BasisJM (Medianwert Versatz Mittl. Jura), Max\_Versatz\_BasisJM (Maximaler Versatz Mittl. Jura)*

Es wurden die Versatzbeträge der Basisflächen der Reservoirkomplexe bestimmt. Statistische Daten wurden dann mit den jeweiligen Störungen verknüpft.

*Min\_Versatz (Minimaler Versatz aller Grenzflächen), Max\_Versatz (Maximaler Versatz aller Grenzflächen), Mean\_Versatz (Mittelwert der Versätze aller Grenzflächen), Median\_Versatz (Medianwert der Versätze aller Grenzflächen)*

Die Versätze wurden an allen Grenzflächen (entlang der Störungsflächen) berechnet und auf die jeweilige Störungsfläche übertragen. Im Anschluss wurden im Bereich der Ausbisse statistische Daten ermittelt und diese in die Attributtabelle übertragen. Hohe Versatzbeträge deuten darauf hin, dass das Gestein einer höheren Belastung und Zerrüttung ausgesetzt war, entsprechend können größere Störungsbreiten und höhere Zerrüttungsgrade erwartet werden.

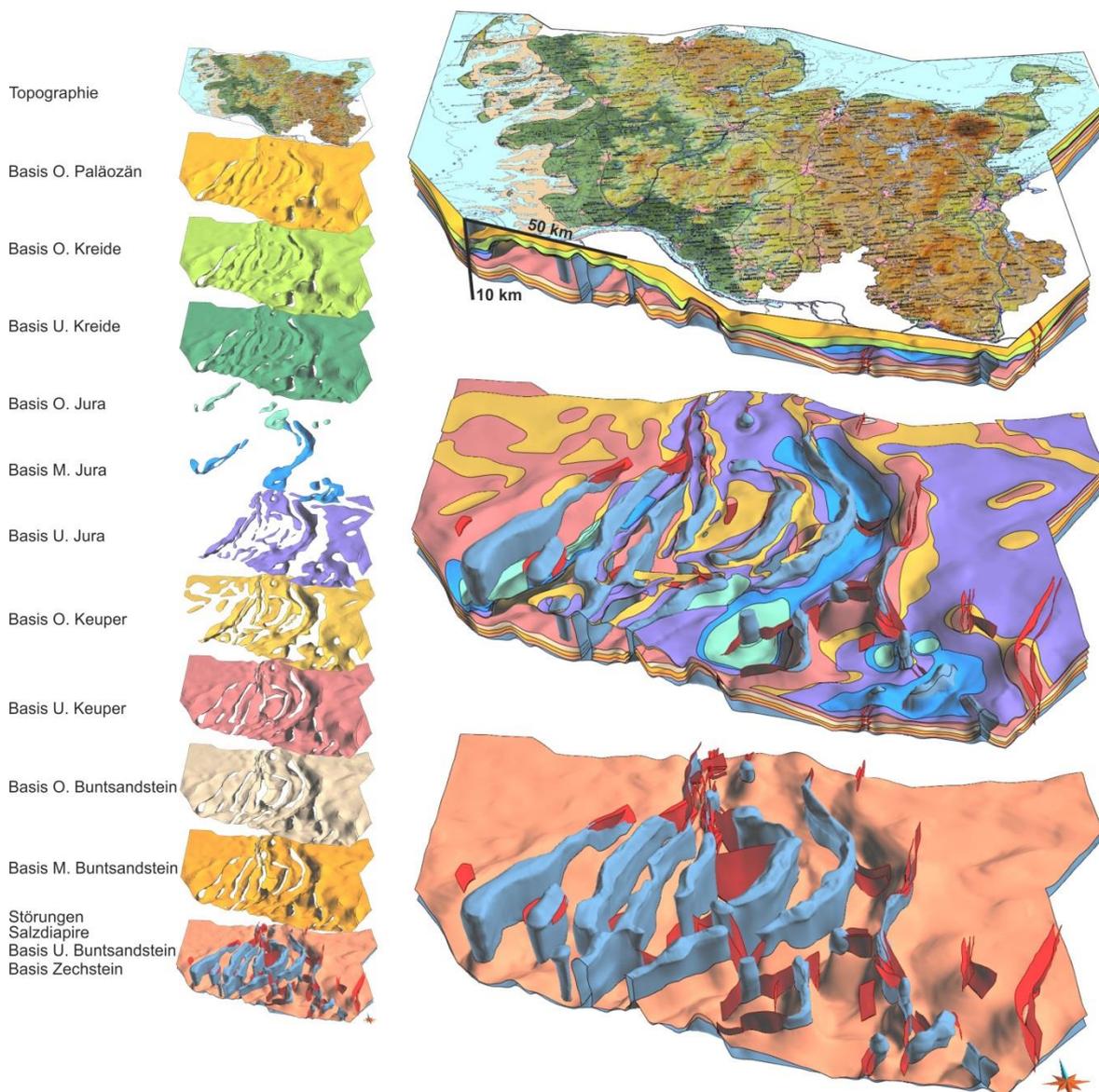
Zur 2D Visualisierung der Attribute wurden Mittellinien der Störungsflächen erzeugt und diese anschließend nach ArcGIS transferiert. Mittels einer ID erfolgte schließlich die Verknüpfung zwischen Einträgen der Attributtabelle und Störungslinien.

Ergänzende lokale Informationen zu Störungszonen, wie Harnische, Klüfte und Zementationen, liefern die Ergebnisse der Auswertung von Bohrdaten (siehe Kap. 3.2)

## 1.4 Ergebnisse

### 1.4.1 Strukturmodell

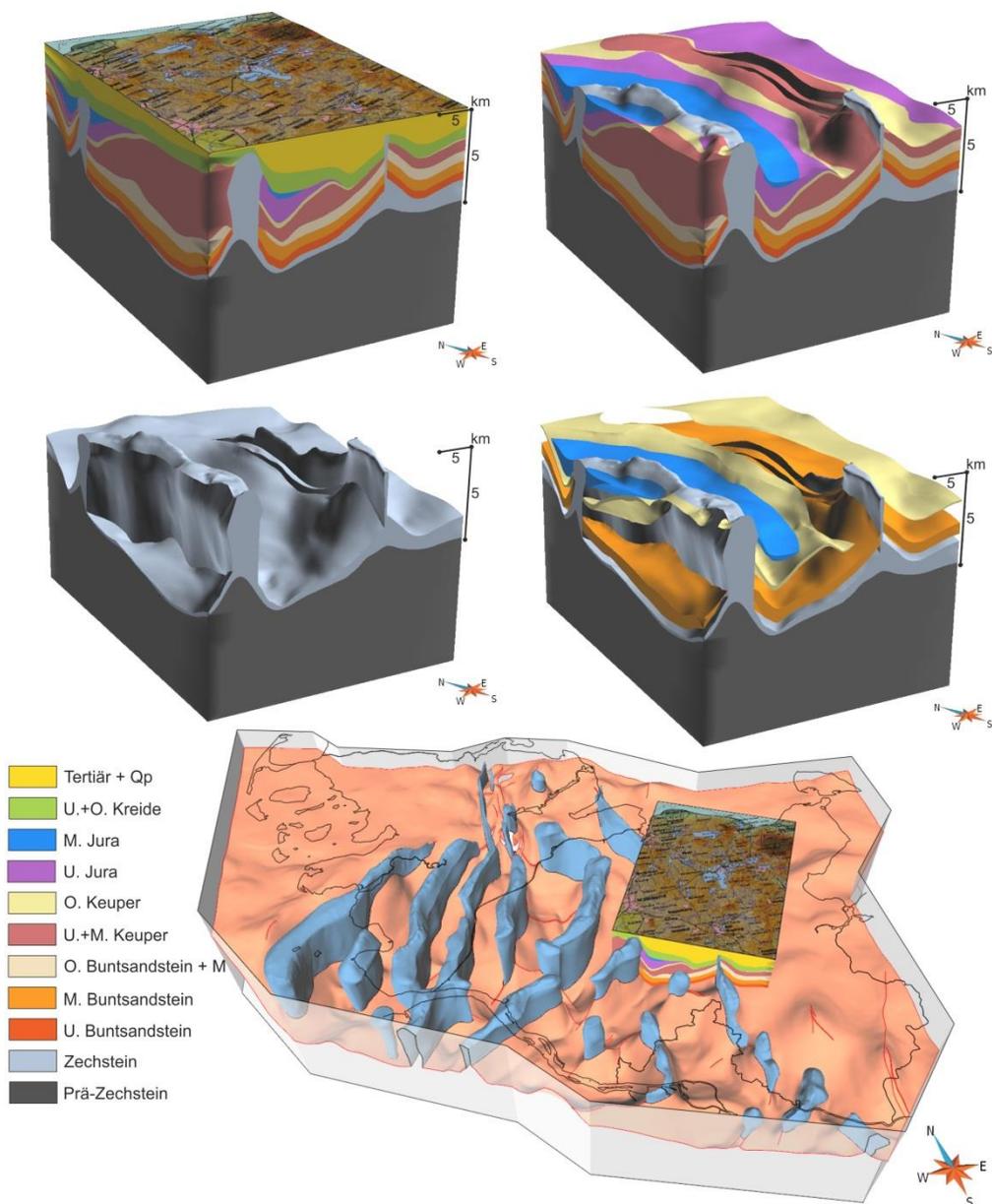
Das Basismodell SH (Rosenbaum et al. 2012, Hese 2012) ermöglichte die Detektion von geometrischen und geologischen Inkonsistenzen und erleichterte die Validierung. Im Verlaufe der Entwicklung des Strukturmodells des Glückstadt-Grabens (Abb. 8) wurde der Datenbestand des GTA korrigiert und das Modell durch zusätzliche Geo-Objekte erweitert (Störungsmodell, Salzstockmodell, zusätzliche Grenzflächen Basis O. Keuper und Basis Mittlerer Buntsandstein).



**Abb. 8:** Strukturmodell Glückstadt-Graben. Links: Abfolge. Rechts oben: Gesamtmodell. Rechts mitte: Unterkreide und jünger abgedeckt. Rechts unten: Basis Zechstein, Basis Buntsandstein, Salzstrukturen und Störungsflächen.

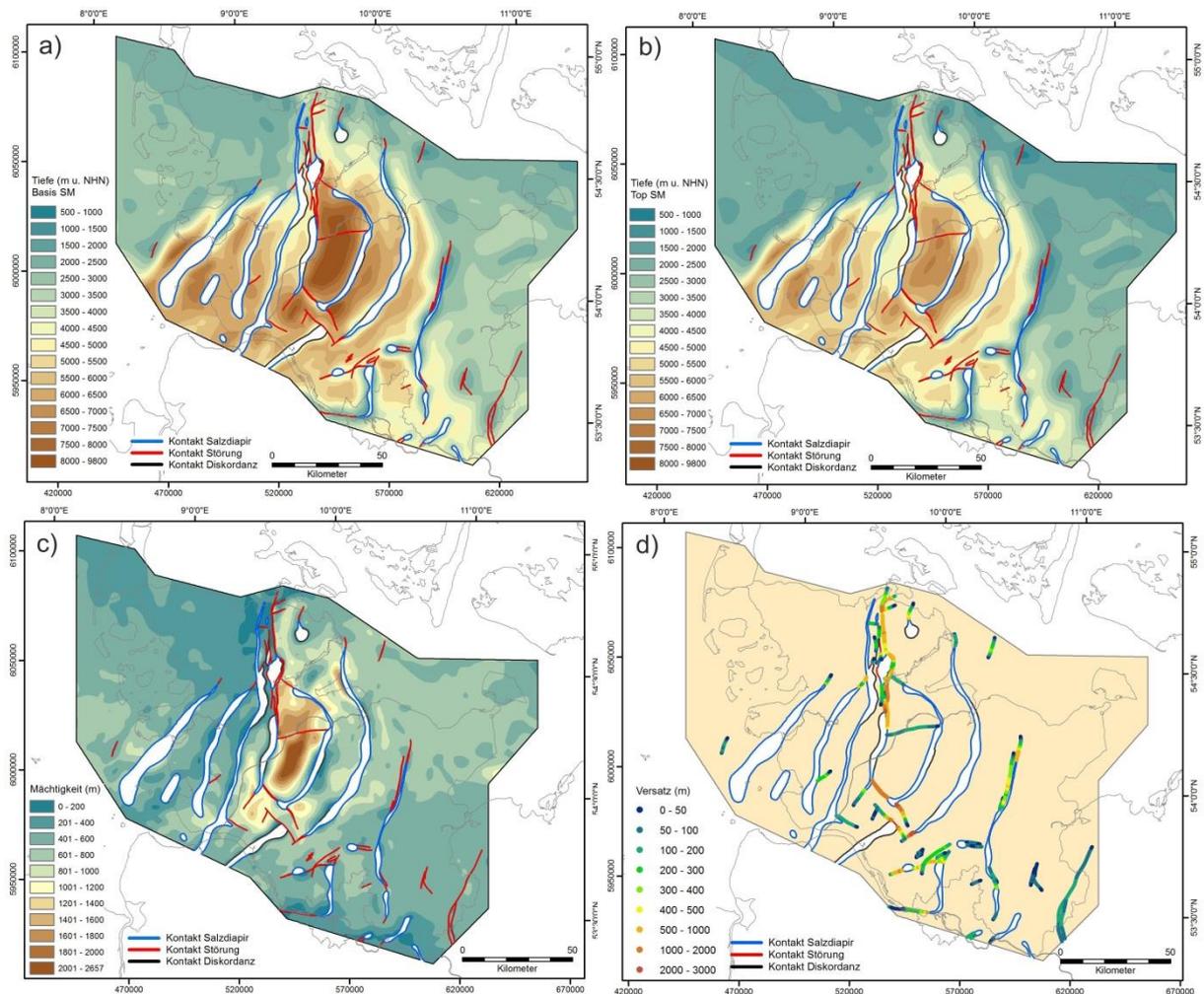
Das vorliegende Strukturmodell Glückstadt-Graben besteht aus 12 lithostratigraphischen Basisflächen, 95 Störungsflächen und 20 Hüllflächen der Salzdiapire. Die triangulierten Flächen besitzen einen Knotenpunktabstand von 300 – 800 m. Da das (Grenzflächen-) Modell topologisch konsistent ist, können Volumenmodelle erzeugt werden (Abb. 9), die für verschiedene Anwendungen oder Studien notwendig sind (z.B. Informationssysteme - GeotIS, 3D-Modellierung des Temperaturfeldes, Simulation von Prozessen). Zusätzliche Informationen liefern die Grenzflächen von Sandsteinaquiferen innerhalb der Reservoirkomplexe des Strukturmodells.

Die Unsicherheiten des Modells sind je nach Komplexität der geologischen Strukturen, Datenqualität und Abdeckung sehr unterschiedlich. Eine vollständige Einschätzung oder Visualisierung der Unsicherheiten ist schwer erreichbar, da viele Einflussfaktoren berücksichtigt werden müssen (z.B. Prozessierung und Interpretation von seismischen Profilen, Korrelation von Reflektoren zwischen seismischen Profilen, Geschwindigkeitsmodell und Zeit-Tiefen Konvertierung).



**Abb. 9:** Volumenmodell (GOCAD Model3D) eines Ausschnittes des Strukturmodells im Bereich Kiel – Neumünster – Plön – Bad Segeberg (O. Jura nicht verbreitet, U. Kreide und O. Kreide zusammengefasst).

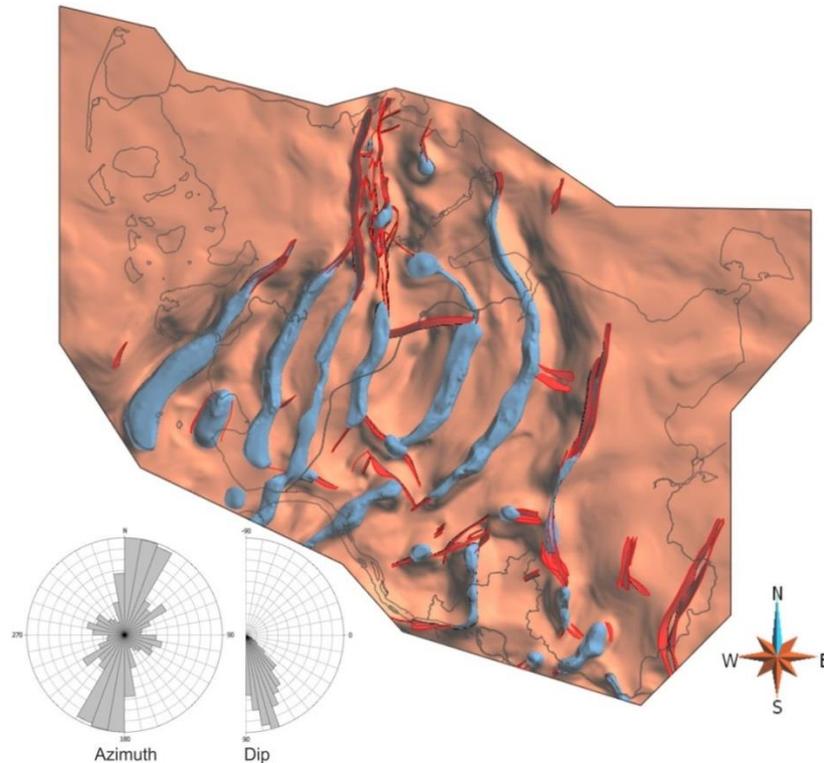
Für weitere Auswertungen und Erzeugung von Kartensätzen wurden im Rahmen des Projektes relevante Modelldaten extrahiert (Tiefenlage, Mächtigkeit und Verbreitung der Reservoirkomplexe, Daten zu den Störungen und Versatzbeträge sowie zur Verbreitung der Salzstrukturen) und für die GIS Anwendung aufbereitet (Abb. 10). Diese Informationen bilden den räumlichen strukturellen Rahmen für die lithologische und petrophysikalische Parametrisierung. Durch Zusammenführung der Ergebnisse dieser Teilstudien können landesweite Trends ermittelt und z.B. Potenzialräume zur hydrothermalen Nutzung ausgewiesen werden (siehe Kap. 4.5).



**Abb. 10:** Beispiel für die 2D Visualisierung von geometrischen Attributen, Verbreitungsgrenzen und Störungen des Reservoirkomplexes M. Buntsandstein: a) Tiefe Basis M. Buntsandstein, b) Tiefe Top M. Buntsandstein, c) Mächtigkeit M. Buntsandstein, d) Versatzbeträge der Basis M. Buntsandstein an Störungen.

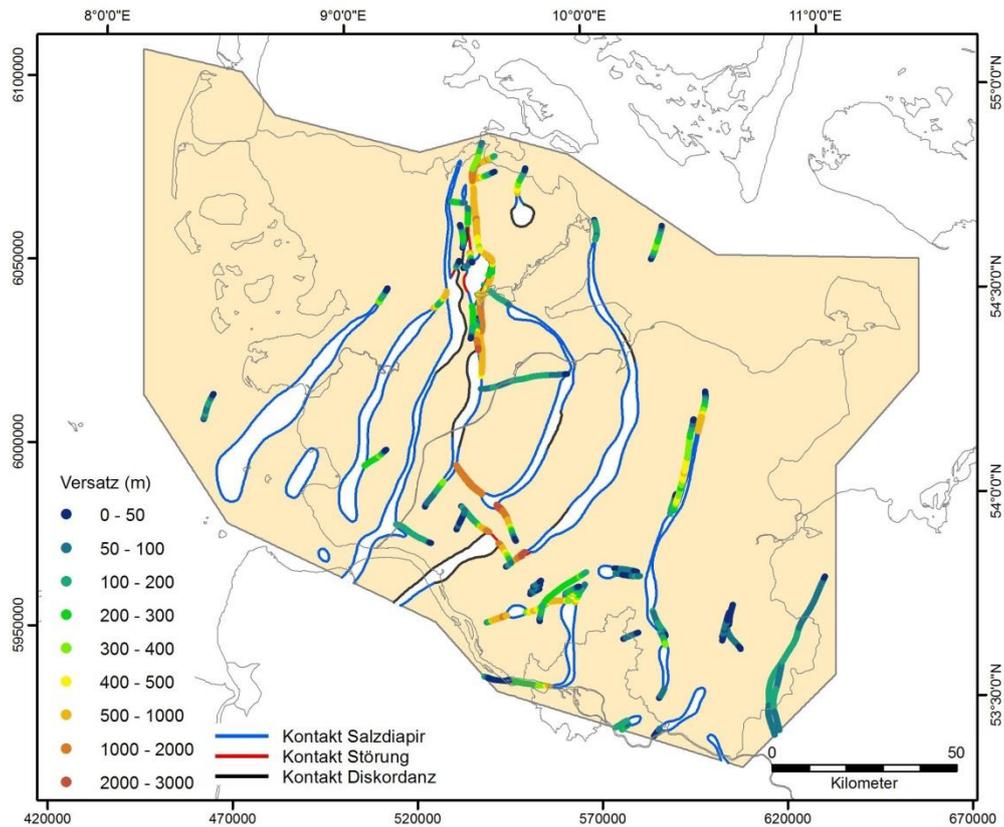
### 1.4.2 Charakterisierung von Störungen

Der Westschleswig- und Ostholstein-Block begrenzen den Glückstadt-Graben im Westen und Osten und sind - soweit seismisch detektierbar - größtenteils störungsfrei. Störungen entwickelten sich lediglich in der Nähe der Ränder des Glückstadt-Grabens und reichen meist von der Basis des Buntsandsteins bis in das jüngere Tertiär.



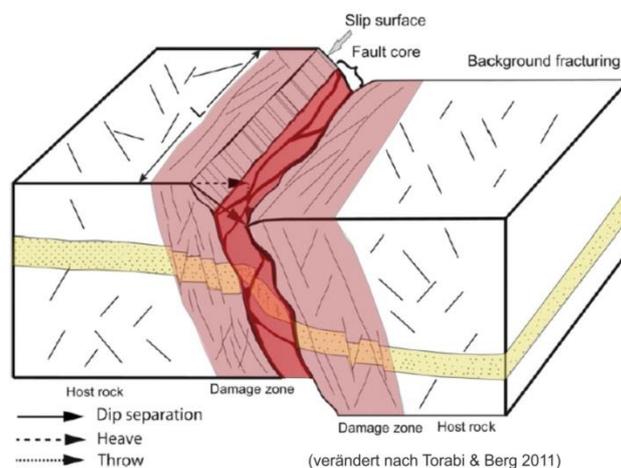
**Abb. 11:** Störungsflächen des Strukturmodells (rot), zusammen dargestellt mit den Hüllflächen der Salzmauern und Diapire (blau) sowie der Basis des Buntsandsteins. Links unten: Streichrichtung und Einfallswinkel der Störungsflächen.

Die tiefreichenden Störungen des Glückstadt-Grabens treten oft in Verlängerung von Salzmauern auf und sind N-S bis NNE-SSW orientiert. Darüber hinaus existieren Störungszonen, die quer zu Salzstrukturen W – E bis NW – SE orientiert sind. Untergeordnet sind auch NE – SW orientierte Störungen dokumentiert. Die Störungen verlaufen linear bis listrisch mit durchschnittlichen Fallwinkeln von 60 – 80° (Abb. 11). Es handelt sich hierbei um Abschiebungen, Schrägabschiebungen und vermutlich zeitlich begrenzt um Blattverschiebungen. Kompressive Inversionstektonik wie in südlichen Bereichen des Norddeutschen Beckens ist nicht bekannt. Man beobachtet einzelne oder mehrere parallele Abschiebungen, Graben- und Horst-Strukturen, sich kreuzende Abschiebungen, und auch kleinräumig vernetzte Störungen. In den Blockbereichen sind die Versätze mit 50 – 100 m gering, lokal werden 200 m erreicht. Die Versatzbeträge liegen im Graben meist bei 100 – 500 m, in einigen Bereichen werden 1000 – 2000 m erreicht (Abb. 12). Hierbei handelt sich sowohl um tektonische Versätze (z.B. am Ostrand des Grabens und am Nordwestrand) als auch um halokinetisch bedingte Versätze.



**Abb. 12:** Versatzbeträge (in Fallrichtung) der Basis des Mittleren Buntsandsteins.

Eine Störungszone besteht meist aus einer Kernzone, die von einer weniger stark zerrütteten, geklüfteten Randzone begrenzt wird (Abb. 13). Unter bestimmten äußeren Voraussetzungen (z.B. günstige Orientierung zum Spannungsfeld und Spannungsregime) können Fluide in den Klüften zirkulieren und aus tieferen, heißeren Bereichen aufsteigen. Eine Sandstein Formation kann in einer Störungszone eine deutlich erhöhte Permeabilität aufweisen. Es gibt jedoch einige Faktoren und Prozesse, die die hydraulische Durchlässigkeit einer Störungszone beeinflussen (z.B. lithologische Zusammensetzung, sekundäre Ausfällungen, ungünstige Orientierung zum rezenten Stressfeld).

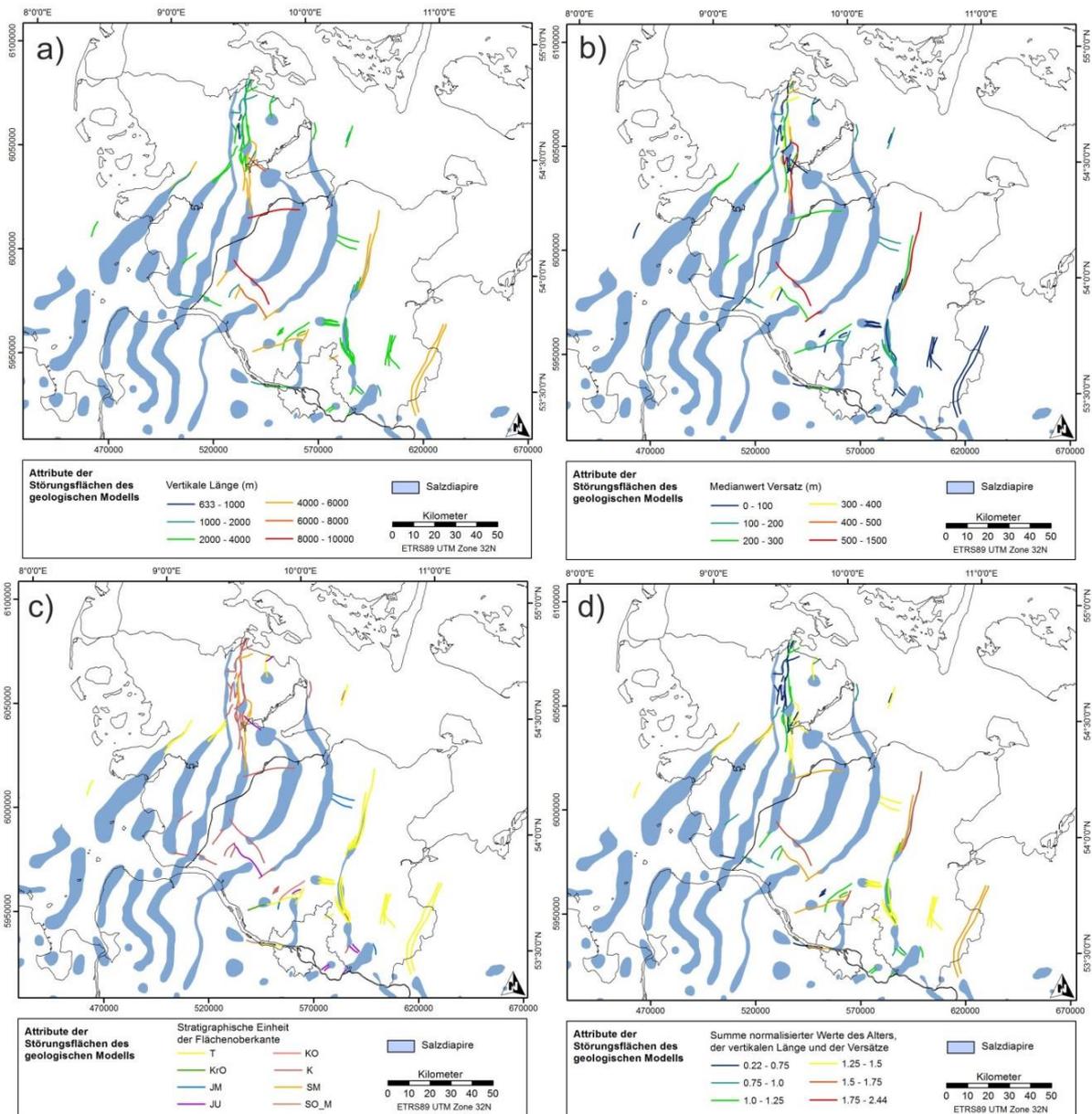


**Abb. 13:** Generalisierte Darstellung einer Störung (verändert nach Torabi & Berg 2011). Breite, Struktur und Zusammensetzung der Kernzone und Randzonen variieren in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern (z.B. Lithologie, Geometrie, Länge, Versatzbeträge).

Die Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit ist vor allem durch gezielte Durchörterung und hydraulische Tests möglich. Wegen fehlender Informationen zur Hydraulik können alternative Parameter herangezogen werden, von denen nur wenige mit den zur Verfügung stehenden Daten bestimmbar sind. Grundsätzlich relevante Parameter von Störungen werden im Folgenden aufgezählt. Die farbkodierte Wertung der Bestimmbarkeit bezieht sich auf den heutigen Datenbestand im Landesgebiet Schleswig-Holsteins (grün: bekannt - weniger unsicher, gelb: punktuell bekannt - unsicher, rot: nicht bekannt):

■ Typ	■ Vernetzung	■ Hydraulische Durchlässigkeit
■ Geometrie	■ Seismizität	■ Rezentens Spannungsfeld
■ Streichen, Fallwinkel	■ Lithologie	■ Orientierung zum Spannungsfeld
■ Versatz	■ Shale Gouge Ratio	■ Breite der Störungszone
■ Vertikale + horizontale Länge	■ Zementierung	
■ Alter / Reaktivierungen	■ Salzintrusion	
	■ Temperatur	

Hinweise auf eine theoretisch begünstigte Durchlässigkeit können sich durch eine Analyse des rezenten Spannungsfeldes sowie der Orientierung der Störungen relativ zum Spannungsfeld ergeben. Die Darstellung der World Stress Map (z.B. Heidbach et al. 2010) zeigt, dass für die Bestimmung des Spannungsfeldes im Suprasalinar Norddeutschlands, das von dem Subsalar durch das Zechstein Salz entkoppelt wird, nur wenige Daten östlich und südöstlich von Hannover vorliegen (Röckel & Lempp 2003). Aufgrund der ungenügenden Kenntnis des rezenten Spannungsfeldes im Glückstadt-Graben, ist eine Auswertung der Orientierung der Störungen nicht zielführend. Zu den Indikatoren, die zur Auswahl von untersuchungswürdigen Störungen verwendet wurden, zählen die Störungsattribute Versatzbetrag, vertikale Länge sowie Alter der letzten Aktivierung. Die Auswahl ist darin begründet, dass Störungen mit hohen Versätzen und größerer vertikalen Länge tendenziell eine breitere Zerrüttungszone aufweisen könnten. Dies könnte die hydraulische Durchlässigkeit begünstigen. Die Relation zwischen der Breite einer Störung und Attributen wie Länge und Versatz wurde unter anderem von Torabi & Berg (2011) sowie Kolyukhin & Torabi (2012) untersucht. Diese Studien wurden in verschiedenen Skalenbereichen und mit Messwerten unterschiedlicher Lithologie durchgeführt. Die Zunahme der Breite einer Störungszone korreliert positiv mit zunehmender Länge und Versatz, die Relation ist jedoch nicht linear. Das Alter der Entstehung oder letzten Reaktivierung einer Störung gibt Aufschluss über das Maß der sekundären Mineralisation oder auch „Verheilung“.



**Abb. 14:** Geometrische Attribute von tiefreichenden Störungen. a) Vertikale Länge, b) Medianwert Versatz, c) Stratigraphische Einheit der Störungsflächenoberkante = ungefähres Alter der letzten Aktivierung (Einheit Zechstein nicht dargestellt, da nicht relevant), d) Summe der normalisierten Werte a-c.

Es kann festgestellt werden, dass Störungen im zentralen Teil des Grabens und Störungen am äußersten Rand des Grabens hohe Versatzbeträge aufweisen und meist auch eine hohe vertikale Reichweite besitzen (Abb. 14a und b). Ältere Störungssysteme befinden sich im Bereich des zentralen Glückstadt-Grabens. Abgesehen von wenigen Ausnahmen im Norden (z.B. Sterup), handelt es sich hierbei um Störungen, die im Keuper oder Jura enden und von ungestörten Formationen der Kreide und des Tertiärs überlagert werden (Abb. 14c). Nach Brückner-Röhling et al. (2004) ist davon auszugehen, dass auch im zentralen Grabenbereich tektonische Aktivität von Sockelstörungen bis in das Tertiär hinein stattfand. Abgesehen von wenigen Ausnahmen im Norden lässt sich beobachten, dass sich die tiefreichenden Störungssysteme nicht in den Bereich der Kreide und des Tertiärs fortsetzen und man kann daher eine längere Inaktivität annehmen. Vermutlich wurden Sockelbewegungen durch das Zechstein-Salinar der Salzstrukturen maskiert. Die jüngsten Störungen waren im Tertiär aktiv und reichen oft bis an die Quartärbasis heran. Es handelt sich hierbei um

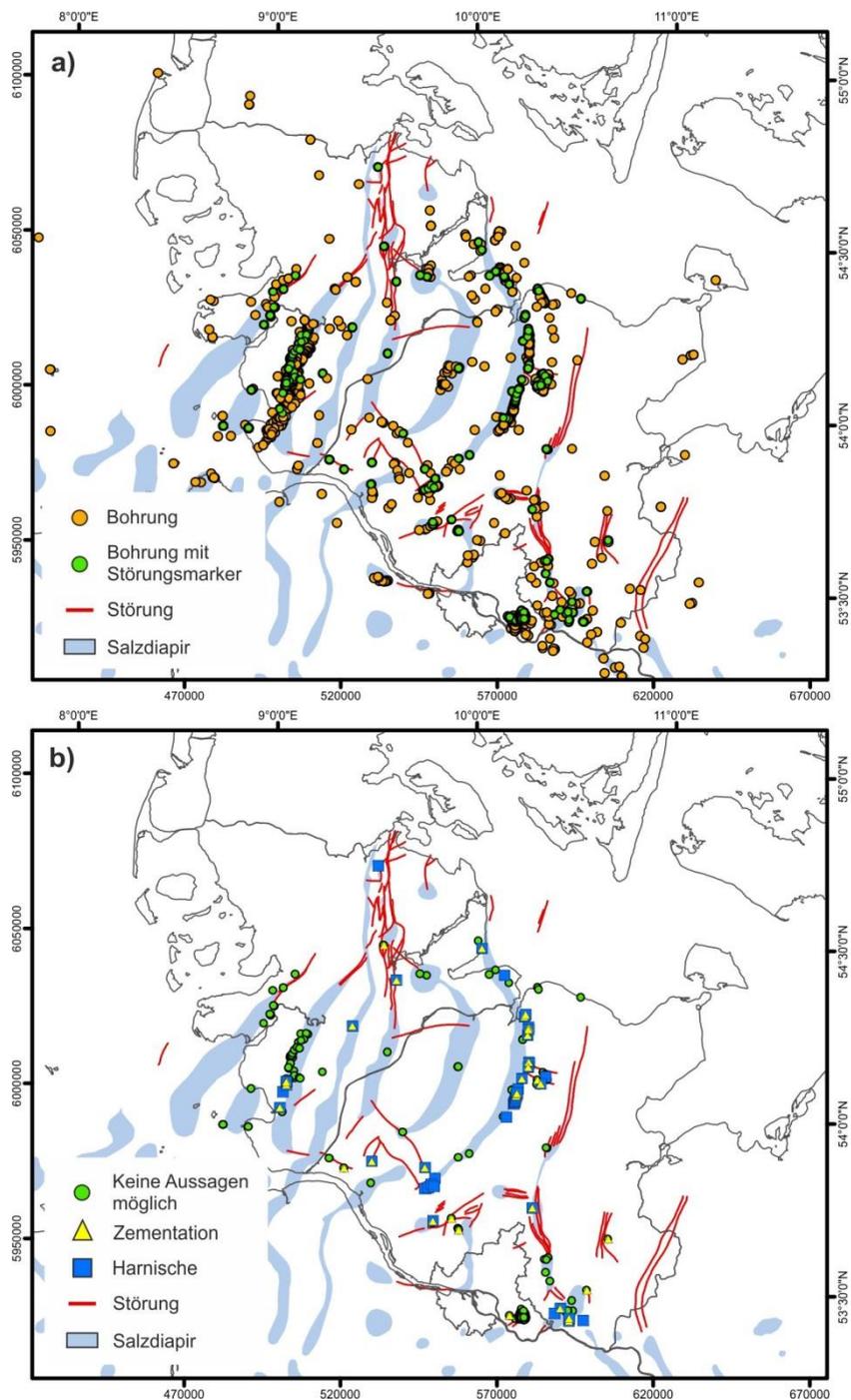
Störungszonen am heutigen Rand des Glückstadt-Grabens - im Senkungsbereich des Grabenrandes und auch im Randbereich der Blöcke (Abb. 14c, gelb).

Zur zusammenfassenden Visualisierung wurden die Werte der drei Attribute zunächst auf Werte zwischen 0 und 1 normalisiert. Das Alter wurde hierbei numerisch durch Punkte zwischen 1 (alt) und 9 (jung) ausgedrückt und ebenfalls normalisiert. Anschließend erfolgte die Aufsummierung der normalisierten Werte (Abb. 14d). Aus den Einzeldarstellungen der Attribute ergibt sich eine Zweiteilung der Summen. Störungen mit Werten kleiner als 1.25 sind meist ältere Störungen mit geringen Versätzen oder auch geringer vertikaler Ausdehnung (Abb. 14d, blau bis grün). Störungen mit Werten größer als 1.25 weisen mindestens in zwei Kategorien hohe Werte auf und liegen im zentralen Grabenbereich sowie an den äußersten Rändern des Glückstadt-Grabens (Abb. 14d, gelb bis rot). Diese Störungszonen werden als untersuchungswürdig betrachtet. Die jüngeren Störungen besitzen tendenziell eine höhere Relevanz. Im Rahmen von zukünftigen Detailstudien müssen relevante Parameter näher untersucht werden (z.B. Lithologie, rezentes Spannungsfeld, Vernetzung), damit Aussagen zum hydrothermalen Potenzial möglich sind.

Im Verlaufe der Entwicklung des Glückstadt-Grabens existierte eine enge Kopplung zwischen tektonischen und halokinetischen Prozessen. Viele vor allem N und NNE gerichtete Störungen verlaufen daher in Verlängerung der Salzdiapire oder fungieren als Verbindungselemente von Strukturen. Im Nahbereich der Salzstrukturen können in verschiedenen seismischen Profilen schmale Salzintrusionen interpretiert werden, die sich negativ auf die hydraulische Durchlässigkeit auswirken. Sie nehmen mit der Entfernung je nach struktureller Position rasch ab und fehlen schließlich gänzlich. Für quer zu den Salzdiapiren orientierte Störungen ist anzunehmen, dass nur der unmittelbare Kontaktbereich durch Salzeinpressung beeinflusst wird. Seismisch gut belegt sind Salzeinpressungen zum Beispiel an den Rändern und im nördlichen Bereich des Grabens (nördlich der Struktur Segeberg-Plön, nordöstlich Sülfeld oder auch nördlich des Diapirs Sterup).

Neben den aus seismischen Profilen (GTA) abgeleiteten Daten zu Störungen existieren Informationen in den Bohrdaten, die auf zweierlei Weise gesichtet und analysiert wurden. Es erfolgte eine Abfrage von allen Störungsmarkern aus der digitalen KW-Datenbank ohne Bezug zu relevanten Formationen. Aus den betreffenden Schichtenverzeichnissen wurden dann Informationen extrahiert und visualisiert. Ergebnisse hierzu werden im Folgenden zusammengefasst. Unabhängig davon wurden Sandsteinbereiche in Schichtenverzeichnissen hinsichtlich Störungen gesichtet auch wenn kein digitaler Datenbankeintrag einer Störung vorlag (s. Kap. 4.3, 4.4).

Von den 1236 Bohrungen (Onshore; mit Ablenkungen bzw. Vertiefungen: 1499) enthalten 148 Bohrungen der digital abfragbaren KW-Datenbank Hinweise auf Störungen (Abb. 15a), davon wurden 72 relevante (tiefreichende) Bohrungen bearbeitet. Bekannte und im Strukturmodell enthaltene Störungen sind an einigen Lokationen durch Bohrungen belegt. In der Nähe der seismisch detektierbaren Störungen belegen Bohrmarker zudem die Existenz von vielen bisher unbekanntem (und seismisch schwer abbildbaren) Störungen und zeigen damit wertvolle punktuelle Details von Störungszonen (z.B. im Bereich der Struktur Warnau / Ostholstein-Trog, südlich von Kiel). Aus den Schichtenverzeichnissen wurde auch die Existenz von Störungen deutlich, die bisher nicht dokumentiert sind. Die Bohrdaten enthalten zum Teil Informationen zu Harnischen, Klüften und Zementationen (Anhydrit/Gips, Kalzit, Ankerit, Dolomit und Pyrit; Abb. 15b). Selbst bei Fehlen von Informationen zu Zementen, können sie nicht ausgeschlossen werden. Vermerke oder Daten, die auf hydraulische Eigenschaften schließen lassen, sind nicht vorhanden.



**Abb. 15:** Informationen zu Störungszonen aus Bohrdaten (KW-Datenbank der Länder). a) Bohrungen mit bzw. / ohne Störungsmarker, b) Störungsmarker mit bzw. / ohne Hinweise auf Zementation und Harnische.

Die Daten zeigen, dass viele Bohrungen, die im Nahbereich der Salzdiapire an den dortigen Störungen liegen, Hinweise auf Zementationen enthalten. Es gibt jedoch auch Ausnahmen und aufgrund der Datenverteilung (sehr viele Bohrungen liegen im Nahbereich eines Salzdiapirs) sind Prognosen oder eindeutige Aussagen zur räumlichen Verteilung von Zementen nicht möglich. Im Bereich der Salzdiapire wird die Fluidzusammensetzung zusätzlich durch Evaporite des Perm-Salinars beeinflusst. Die Frage zur Genese der Zemente kann nicht eindeutig beantwortet werden (z.B. Baermann 2000, Kühn & Günther 2007).

Die Porenraumzementation kann prinzipiell durch verschiedene Prozesse erfolgen. Zum einen durch eine normale Diageneseentwicklung (Mineralum- und Neubildungen) und zum anderen durch Mischung unterschiedlicher Fluide in Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung, Druck und Temperatur (z.B. Wolfgramm et al. 2010). Aufgrund der Relevanz für verschiedene Anwendungen zur Nutzung von Reservoirgesteinen stehen Zementierungsprozesse im Fokus der Forschung (z.B. Baermann et al. 2000, Clauser & Pape 2003, Kühn & Günther 2007).

### **1.4.3 Geothermisch relevante Sandsteinhorizonte**

Beutler et al. (1994) gaben eine erste zusammenhängende Darstellung von geothermisch nutzbaren Sandsteinhorizonten in Nordwestdeutschland heraus, gefolgt von neueren Einschätzungen von Feldrappe et al. (2008) für Nordostdeutschland. Nach dem heutigen Kenntnisstand stellen die Sandsteine des Mittleren Buntsandsteins, der Schilfsandstein, die Sandsteine des Oberen Keupers (Rhät) und des Mittleren Juras sowie die sandigen Abfolgen des Oberen Juras und der Unterkreide (Wealden) geothermisch relevante Reservoirgesteine im Norddeutschen Becken dar. Zur Untersuchung von Reservoirseigenschaften hinsichtlich einer geothermischen Nutzung wurden im Projekt die Sandsteinhorizonte des Mittleren Buntsandsteins, des Oberen Keupers (Rhät, nach neuer Nomenklatur Exter-Formation) und des Mittleren Juras bearbeitet. Der Schilfsandstein sowie Sandsteine des Wealden / Unterkreide liegen nicht im Fokus der Studie, da sie lediglich lokal von Bedeutung und in weiten Teilen Schleswig-Holsteins nicht oder nur geringmächtig verbreitet sind.

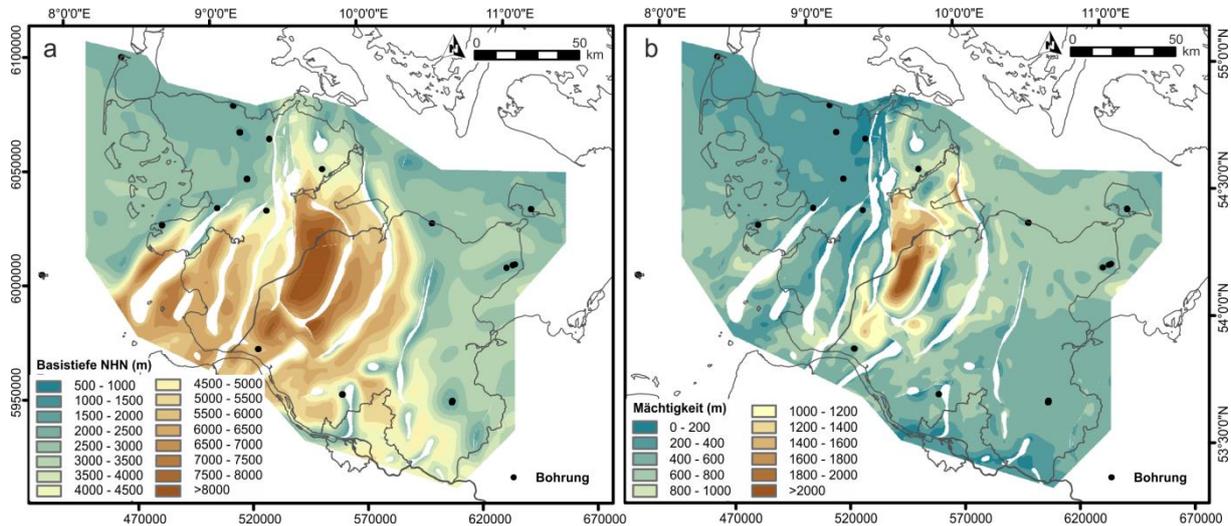
Als geothermisch nutzbare Reservoirs werden Sandsteinaquifere angesprochen, die neben einer flächenhaften Verbreitung, eine Mächtigkeit von mindestens 20 m, eine Porosität von mindestens 20 % und eine Permeabilität von mindestens 250 mD, optimaler sind 500 mD aufwiesen (Beutler et al. 1994, Feldrappe et al. 2008, Wolfgramm et al. 2014). Aufgrund der mit der zunehmenden Tiefe abnehmenden Porosität (Thomsen et al. 2014) und der einhergehenden mechanischen und chemischen Kompaktion von Sedimentgesteinen, befinden sich die untersuchungswürdigen Sandsteinhorizonte in Schleswig-Holstein in wirtschaftlich günstigen Tiefenlagen zwischen 1000 und 3000 m. Gemäß des durchschnittlichen geothermischen Temperaturgradienten von 30 K / 1000 m, entspricht dies einem Temperaturbereich von etwa 40-100 °C. Allerdings zeigt eine Temperaturmodellierung für das nördliche Gebiet von Schleswig-Holstein und Süd Jütland (Projekt GeoPower, Fuchs & Balling 2016) deutlich wechselnde Gradienten infolge der stark variierenden Wärmeleitfähigkeiten der Gesteine, insbesondere bedingt durch die Salzstrukturen.

#### **1.4.3.1 Mittlerer Buntsandstein**

Der Mittlere Buntsandstein ist in Schleswig-Holstein nahezu flächenhaft verbreitet (Abb. 16). Die Basis befindet sich im Bereich des Westholstein-Blocks und des Ostholstein-Westmecklenburg-Blocks in Tiefenlagen von 1500 m bis etwa 3000 m unter NHN, während die Basis im Bereich des zentralen Glückstadt-Grabens in Tiefen von 6000 m bis über 8000 m unter NHN vorzufinden ist (Abb. 16a). Die Gesamtmächtigkeit des Mittleren Buntsandsteins schwankt zwischen wenigen Metern und 800 m auf den Blöcken. Im Bereich des zentralen Glückstadt-Grabens wird eine Mächtigkeit von über 2000 m erreicht (Abb. 16b).

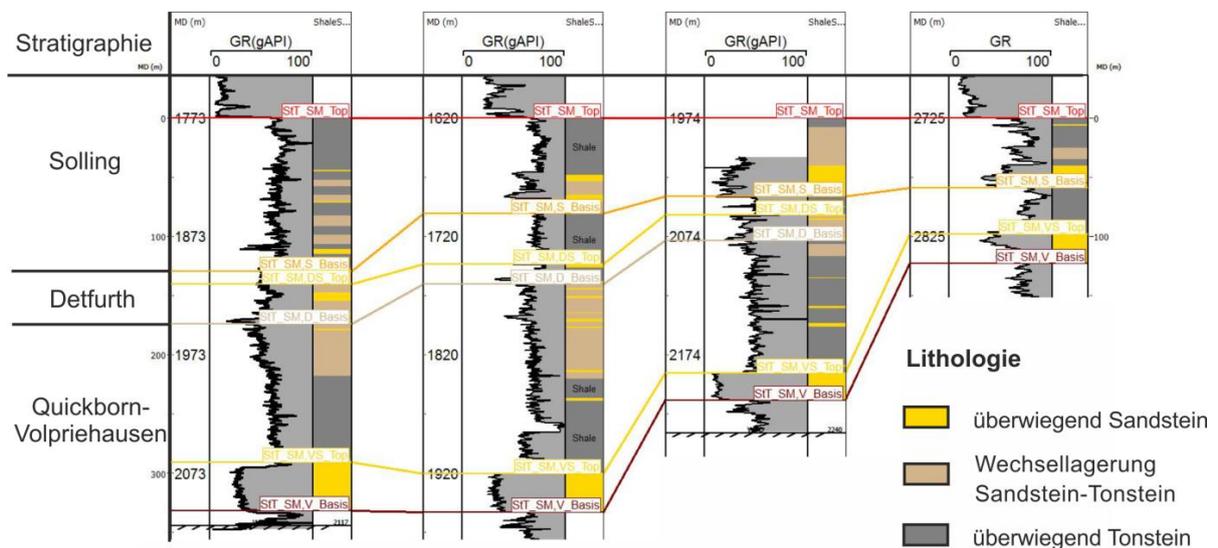
Auf dem festländischen Gebiet von Schleswig-Holstein haben 18 Tiefbohrungen den Mittleren Buntsandstein erfasst. Die stratigraphische Gliederung des Buntsandsteins in Norddeutschland geht auf Boigk (1959) und Trusheim (1961) zurück. Der Mittlere Buntsandstein wurde nach Röhling (1999) in Quickborn-, Volpriehausen-, Detfurth- und Hardeggen-Folge eingeteilt, die durch basale, sich regional über große Distanzen erstreckende Diskordanzen charakterisiert sind. Die Unterteilung in

die Quickborn-Folge bzw. Quickborn-Sandstein ließ sich basierend auf den Logkorrelationen landesweit nicht verfolgen und von dem darüber lagernden Volpriehausen-Sandstein abgrenzen. Beide Formationen bzw. Sandsteine werden daher zusammengefasst und als Quickborn-Volpriehausen-Formation bzw. Quickborn-Volpriehausen-Sandstein bezeichnet (Speicher-Kataster Deutschland, Kaufhold et al. 2011).

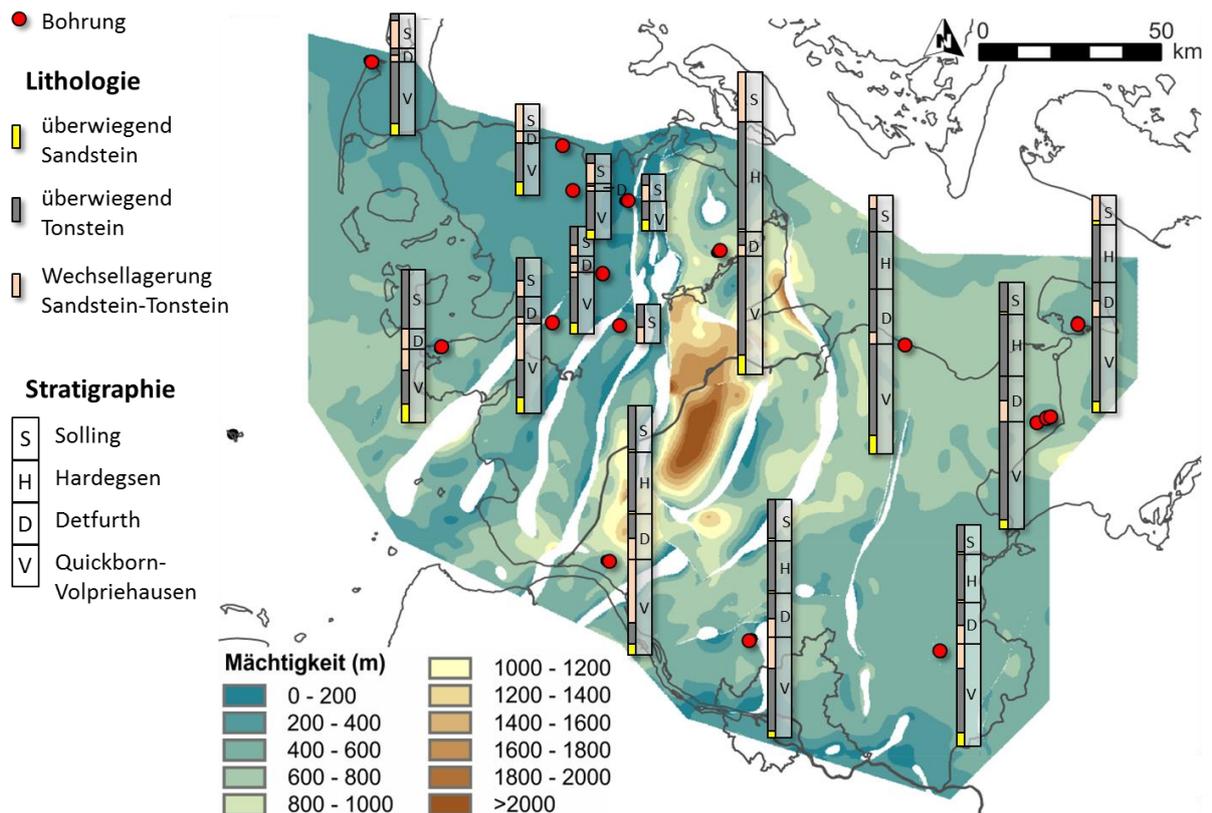


**Abb. 16:** Verbreitung, Tiefenlage der Basis (a), Mächtigkeit (b) des Mittleren Buntsandsteins.

Die Ablagerungen des Mittleren Buntsandsteins zeigen einen typischen Aufbau in Form von Sohlbankzyklen und umfassen meist rote bis violettgraue, basale Sandsteine und darüber folgende Wechselfolgen aus braunroten, ooid-führenden Feinsandsteinen und roten, manchmal grünlich bis violetten Ton- bis Schluffsteinen (Abb. 17 und Abb. 18).

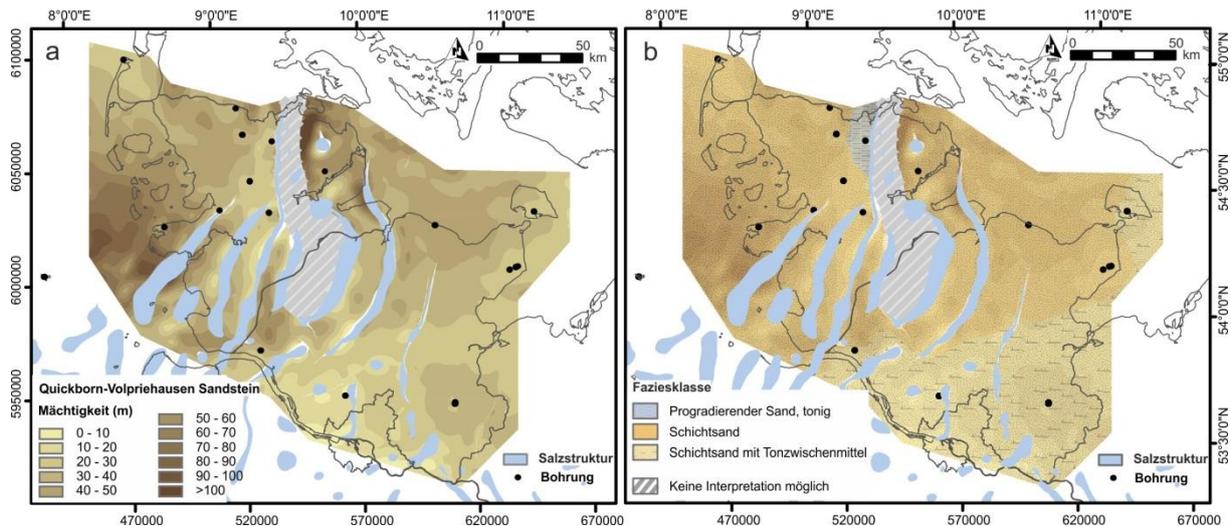


**Abb. 17:** Beispiel für die vertikale und laterale lithologische Entwicklung des Mittleren Buntsandsteins basierend auf der Korrelation von Gamma-Ray-Logs von Bohrungen. SW – N Profil am westlichen Rand des Glückstadt-Grabens. Die Hardeggen-Formation wurde in diesem Gebiet erodiert.



**Abb. 18:** Bohransatzpunkte und lithologische Abfolgen der erbohrten Schichtfolge sowie Mächtigkeit des Mittleren Buntsandsteins. Die lithologischen Klassen sind maßstabsgetreu dargestellt.

Untersuchungswürdige Sandsteine im Mittleren Buntsandstein sind der Quickborn-Volpriehausen-Sandstein sowie lokal der Solling-Sandstein. Der Solling-Sandstein liegt z.T. diskordant auf unterlagernden Formationen und ist besonders im Bereich des Westschleswig-Blocks durch deutliche Mächtigkeitsunterschiede von 10 m bis 44 m gekennzeichnet. In anderen Gebieten von Schleswig-Holstein liegen die Sandsteinmächtigkeiten unter 20 m. Der Quickborn-Volpriehausen-Sandstein hingegen schwankt in seiner Mächtigkeit in den Bohrungen zwischen 16 m und 29 m im Osten, Nordosten und Südosten und von 25 m bis 42 m im Südwesten. Im Norden wurden in einzelnen Bohrungen Mächtigkeiten über 40 m erreicht. Der generelle Trend zeigt, dass im Südwesten die höchsten und im Südsüdosten die geringsten Sandsteinmächtigkeiten auftreten (Abb. 19a). Der an der Basis der Quickborn-Volpriehausen-Formation auftretende Sandstein ist durch die stratigraphischen Überarbeitungen der Bohrungen gut zu korrelieren und bildet die Basis Mittlerer Buntsandstein (vgl. Abb. 16a). Es ist anzunehmen, dass der Sandstein im Bereich des zentralen Glückstadt-Grabens ebenfalls abgelagert und erhalten ist, allerdings kann diese Annahme und insbesondere die Mächtigkeit durch Bohrungen nicht belegt werden (grau schraffierter Bereich in Abb. 19).



**Abb. 19:** Mächtigkeit (a) und fazielle Entwicklung (b) des Quickborn-Volpriehausen-Sandsteins. Faziesklassen semitransparent auf der Mächtigkeitkarte des Quickborn-Volpriehausen-Sandsteins.

### Lithofazielle Entwicklung

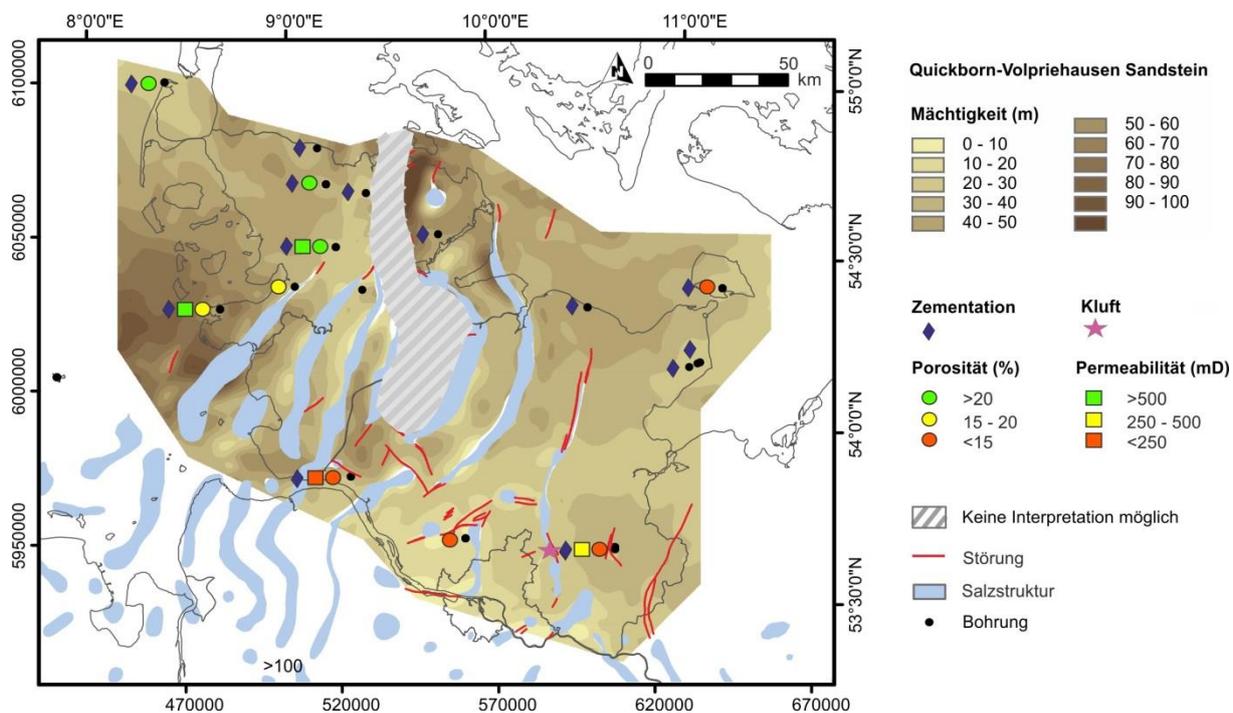
Lithofaziell können für den Quickborn-Volpriehausen-Sandstein drei Faziesklassen unterschieden werden (Abb. 19b). Die Ausbildung der Schichtsandsteine zeigt eine geringe laterale Differenzierung. Die geringmächtigeren Schichtsandsteine im Osten und Südosten sind zweibankig ausgebildet, durch ein markantes Tonzwischenmittel geteilt und unterscheiden sich deshalb von den kompakten Schichtsandsteinen im Westen und Norden (Abb. 19b). Die Basis als auch der Top des Sandsteins ist durch einen oftmals scharfen, gelegentlich leicht progradierenden Übergang charakterisiert. Die untere Bank ist überwiegend schluffig bis feinsandig, z.T. mittelsandig ausgeprägt, während die obere Bank größtenteils aus Mittel- und Grobsandsteinen besteht. Im Westen und Norden (bei Sterup) ist der Schichtsand ohne Tonzwischenmittel ausgebildet, gekennzeichnet durch eine abrupte, scharfe Basis und Top im Gamma-Ray-Log. Die Fein- bis Grobsandsteine zeigen jedoch noch einen geringen tonigen bis schluffigen Anteil. Nach Nordwesten hin nimmt der Anteil an Ton und Schluff zu und der Sandstein zeigt progradierende Basis- und Topkontakte. Es tritt häufig flaserige Schichtung innerhalb der Ablagerungen auf.

Die lithologischen Auswertungen deuten darauf hin, dass gut sortierte Fein- bis Mittelsandsteine im Südwesten überwiegen und gut bis schlecht sortierte Mittel- bis Grobsandsteine im Norden und im Osten auftreten. Der rot bis rotbraun, gelegentlich braunviolett bis hellgrau gefärbte, stark glimmerführende Quickborn-Volpriehausen-Sandstein zeigt unterschiedliche Schichtungselemente von Horizontal-, Flaser-, Rippel-, Schräg- bis Kreuzschichtung, die auf ein wechselndes Strömungsregime hinweisen. Die Quarzkörner sind kantengerundet bis gut gerundet. Basierend auf den Informationen aus den Schichtenverzeichnissen der Bohrungen, ist der Sandstein ooidführend, partiell kalzitisch bis dolomitisch zementiert und lokal treten Anhydritknoten oder -flaser auf. In den Schichtenverzeichnissen wird der Sandstein oftmals auch als oolitischer Kalksandstein charakterisiert. Im Osten (Bereich Cismar) wurden Brauneisenoide dokumentiert. Da die Sandsteine zum Teil als „mürbe absandend, porös“ beschrieben werden, ist der Zementationsgrad wahrscheinlich gering.

Das Auftreten von Karbonaten und Evaporiten sowie von oolithischen Sandstein bzw. -lagen, als auch die auffallend roten bis violetten Farben der Sedimente lassen sich für die hangenden Ablagerungen des Mittleren Buntsandsteins teilweise ebenfalls beobachten. Diese Indizien weisen auf flachbewegte, hypersalinare, kalkübersättigte und aride bis semi-aride Ablagerungsbedingungen hin. Die epikontinentalen, zyklischen Sedimente des Mittleren Buntsandsteins können als fluviatile bis lakustrine Ablagerungen interpretiert werden (Ziegler 1990, Paul 1999a, Geluk 2005), die in ephemeren (periodisch trocken fallenden) Ebenen abgelagert wurden. Detailliertere Faziesstudien des Mittleren Buntsandsteins im Norddeutschen Becken liegen noch nicht vor. Nach Wolfgramm et al. (2014) deuten sich geringe laterale Faziesunterschiede innerhalb einer litoralen Flachküste bzw. fluviatil geprägten Ebene an. Es wird angenommen, dass die fluviatilen Ebenen von suspensionsarmen anastomosierenden Rinnen durchzogen wurden (Wolfgramm et al. 2014). Nach Tietze (1982) und Olsen (1988) sind mäandrierende Rinnenkörper aus südlichen Aufschlussgebieten bekannt. Ein flachmariner Einfluss zu Zeiten der Ablagerung der Volpriehausen- bis Detfurth-Formation ist nicht auszuschließen (Ziegler 1990, Geluk & Röhling 1997, Roman 2004, Feist-Burkhardt et al. 2008). Ein Indiz für ein flachmarines Milieu ist das Auftreten von dem grünlichen Glimmermineral Glaukonit innerhalb des Quickborn-Volpriehausen-Sandsteins im Nordwesten und Westen von Schleswig-Holstein (in den Bohrungen Westerhever 2T und Flensburg Z1). Als Liefergebiet für die Siliziklastika kann das Fennoskandische Hochland im Norden angenommen werden. Die hohe Mächtigkeit des Quickborn-Volpriehausen-Sandsteins im Südwesten lässt jedoch vermuten, dass ein siliziklastischer Eintrag auch von weit entfernten Liefergebieten aus dem Südwesten stattfand.

### **Hydraulische Eigenschaften**

Zur Bewertung der hydraulischen Eigenschaften des Quickborn-Volpriehausen-Sandsteins liegen an 10 Bohrlokalationen Porositätswerte und an 4 Lokationen Permeabilitätswerte aus Log- und Kernuntersuchungen vor (teilweise nur mit Maximalangaben). Auf dieser Grundlage sind keine statistisch signifikanten Aussagen möglich. Es zeigt sich, dass die Bohrungen im Norden bzw. im Nordwesten von Schleswig-Holstein hohe (>20 %) bis mittlere (15-20 %) Porositäten aufweisen (Abb. 20). Für die im Osten, Südosten und Süden befindlichen Bohrungen liegen meist geringere Werte vor (<15 %). Es ist zu vermuten, dass die hydraulischen Eigenschaften eines Sandsteins, in diesem Fall besonders die Porosität, von der faziellen Ausbildung abhängen (vgl. Abb. 19b Fazies und Abb. 20 hydraulische Daten). Trotz der wenigen Werte lassen sich die hohen Porositäten in Bereichen beobachten, in denen die Schichtsandsteine einen geringen tonigen und schluffigen Anteil basierend auf den Angaben der Schichtenverzeichnisse und Verlauf der Gamma-Ray-Logs zeigen. Die geringen Porositäten könnten durch das Auftreten von Tonzwischenlagen in den Schichtsandsteinen im Osten und Südosten begründet werden. Der niedrige Zementationsgrad an Bohrlokalationen im Nordwesten wird darin deutlich, dass trotz des partiellen Auftretens von Zementen wie Kalzit, Dolomit und Anhydrit im Bereich des Sandsteins sowohl die Porosität als auch die Permeabilität nicht maßgeblich verschlechtert wurden.



**Abb. 20:** Zusammenstellung der Porositäts- und Permeabilitätsdaten für den Quickborn-Volpriehausen-Sandstein basierend auf den erhobenen Daten aus Kernproben und Loguntersuchungen.

Innerhalb des Sandsteinhorizontes können die Porositäts- und Permeabilitätswerte faziell bedingt deutlich variieren, sodass hohe Permeabilitäten (>500mD) auftreten können (Abb. 20). Im südlichen Teil des Glückstadt-Grabens, in dem der Quickborn-Volpriehausen-Sandstein in großen Tiefenlagen verbreitet ist (Abb. 16a), wurde in einer Bohrung (Glückstadt T1, etwa 5600 m) in Kernproben Quarzzement dokumentiert, der für die diagenetische Umwandlung des Sandsteins auf Grund der Versenkungstiefe spricht. Diagenetische Umbildungen könnten auch die Ursache für die verminderte Porosität in der Bohrung Quickborn T1 sein.

### 1.4.3.2 Oberer Keuper

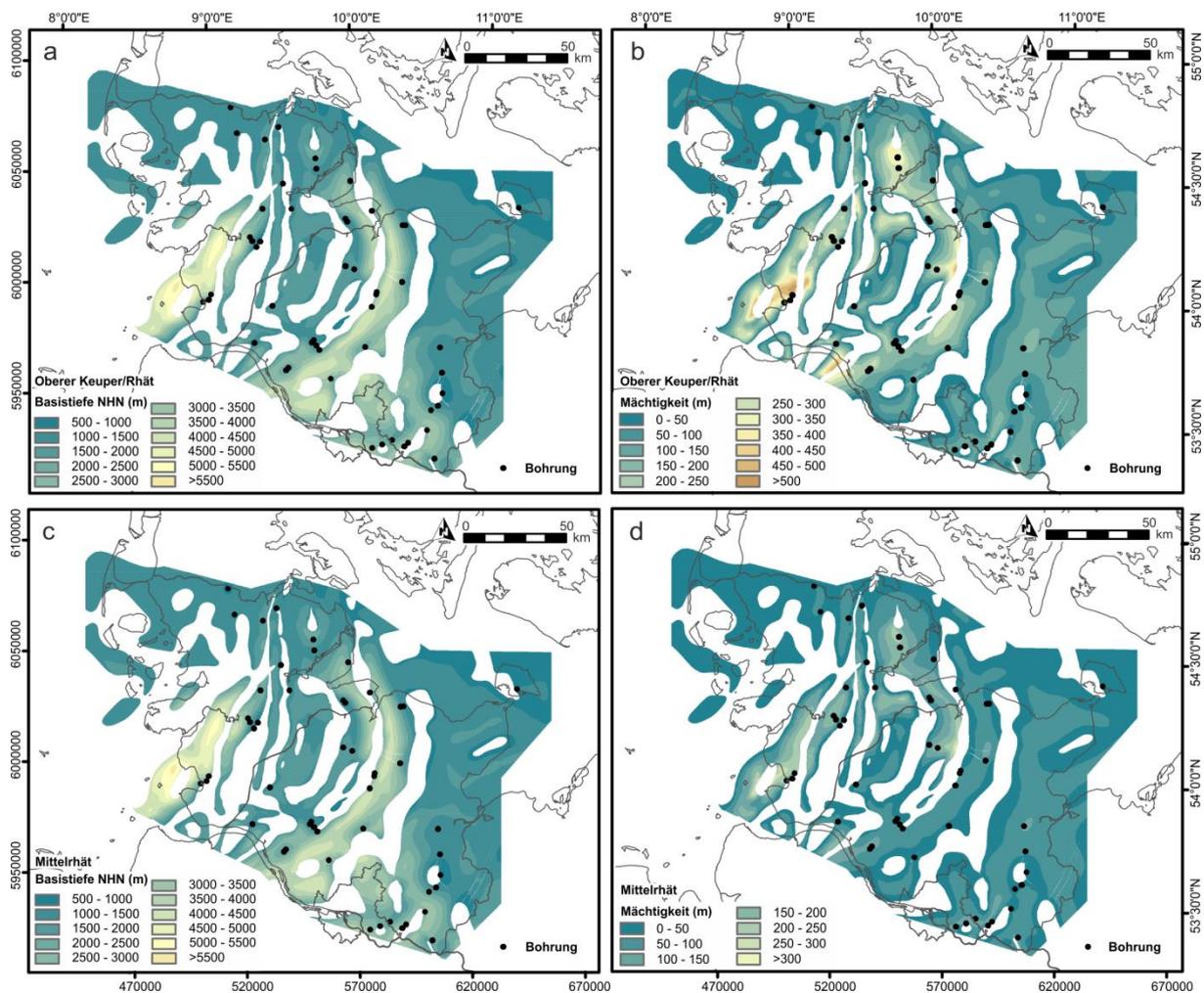
Die Verbreitung und Mächtigkeit des Oberen Keupers, nach DSK 2005 Exter-Formation und herkömmlich Rhät genannt, ist durch die strukturgeologische Entwicklung des Glückstadt-Grabens mit seinen Salzstockrandsenken und durch halokinetische Prozesse seit Beginn der Trias geprägt. Aufgrund der jungkimmerischen Hebung im Oberen Jura bis Wealden wurde das Gebiet um etwa 700 m gehoben (Jaritz et al. 1969, Rodon & Littke 2005), sodass ein großer Teil der känozoischen bis spätriasischen Sedimente erodiert worden war. Aufgrund der Erosionsvorgänge stellen die Mächtigkeiten des Rhäts Restmächtigkeiten dar. Das Rhät ist weiterhin durch regionale Diskordanzen geprägt, die jeweils an der Basis bzw. am Top der drei Unterformationen Unterrhät (Posterschichten), Mittlerrhät (Contorta-Schichten) und Oberrhät (Triletes Schichten) auftreten (Aigner & Bachmann 1992, Beutler 1995). Die Sedimente des Rhäts variieren zwischen Ablagerungen eines terrestrisch geprägten Playa- bis Sabkha-ähnlichen hin zum fluvialen Ablagerungsmilieu im Osten und deltalischen bis marinen Siliziklastika im Westen des epikontinentalen Zentraleuropäischen Beckens (Nitsch 1996, Reinhardt & Ricken 2000, Franz & Wolfgramm 2008, Doornenbal et al. 2010, Feist-Burkhardt et al. 2008). Die Ablagerungen kennzeichnen den Übergang vom kontinental geprägten Steinmergelkeuper zum marinen Unteren Jura. Dieser grundlegende Fazieswechsel wurde durch eine Transgression im Rhät über mehrere Pforten im Westen des epikontinentalen Zentraleuropäischen Beckens gesteuert (Seeling & Kellner, 2002, Wolfgramm et al. 2014). Das Meer

breitete sich im Verlauf des Rhäts und des Unteren Juras von Westen nach Osten sukzessive aus. Der Fazieswechsel in Norddeutschland ist somit diachron, d.h. der marine Einfluss erfolgte im Westen eher als im Osten.

Es wurden 49 Bohrungen lithologisch sowie stratigraphisch, und davon 35 Bohrungen lithofaziell ausgewertet. Da viele der Bohrungen nicht vollständig die Abfolge des Rhäts durchteuften oder die Unterformationen oftmals vor Ablagerung der Sedimente des Unteren Juras und der Kreide erodiert wurden, war die lithostratigraphische Korrelation teilweise stark eingeschränkt. Weiterhin ist das Rhät in Schleswig-Holstein durch starke vertikale und laterale Faziesvariationen charakterisiert. Im Projekt wurde die bisherige stratigraphische Drei-Gliederung des Rhäts, die auf den Dokumentationen aus den Schichtenverzeichnissen basiert, nur geringfügig geändert. Um detailliertere Studien zur Fazies und genauere lithostratigraphische Korrelationen für das Rhät in Schleswig-Holstein durchführen zu können, sind biostratigraphische Untersuchungen der Bohrungen zukünftig notwendig. Die vorliegenden Ergebnisse zur Mächtigkeits- und Faziesentwicklung spiegeln lediglich Trends wider. Nach neuesten Studien können Mittel- und Oberrhät in Norddeutschland aufgrund von litho- und biostratigraphischen Neubearbeitungen als Obere Exter-Formation zusammengefasst werden (Wolfgramm et al. 2014, Barth & Franz 2016, pers. comm.).

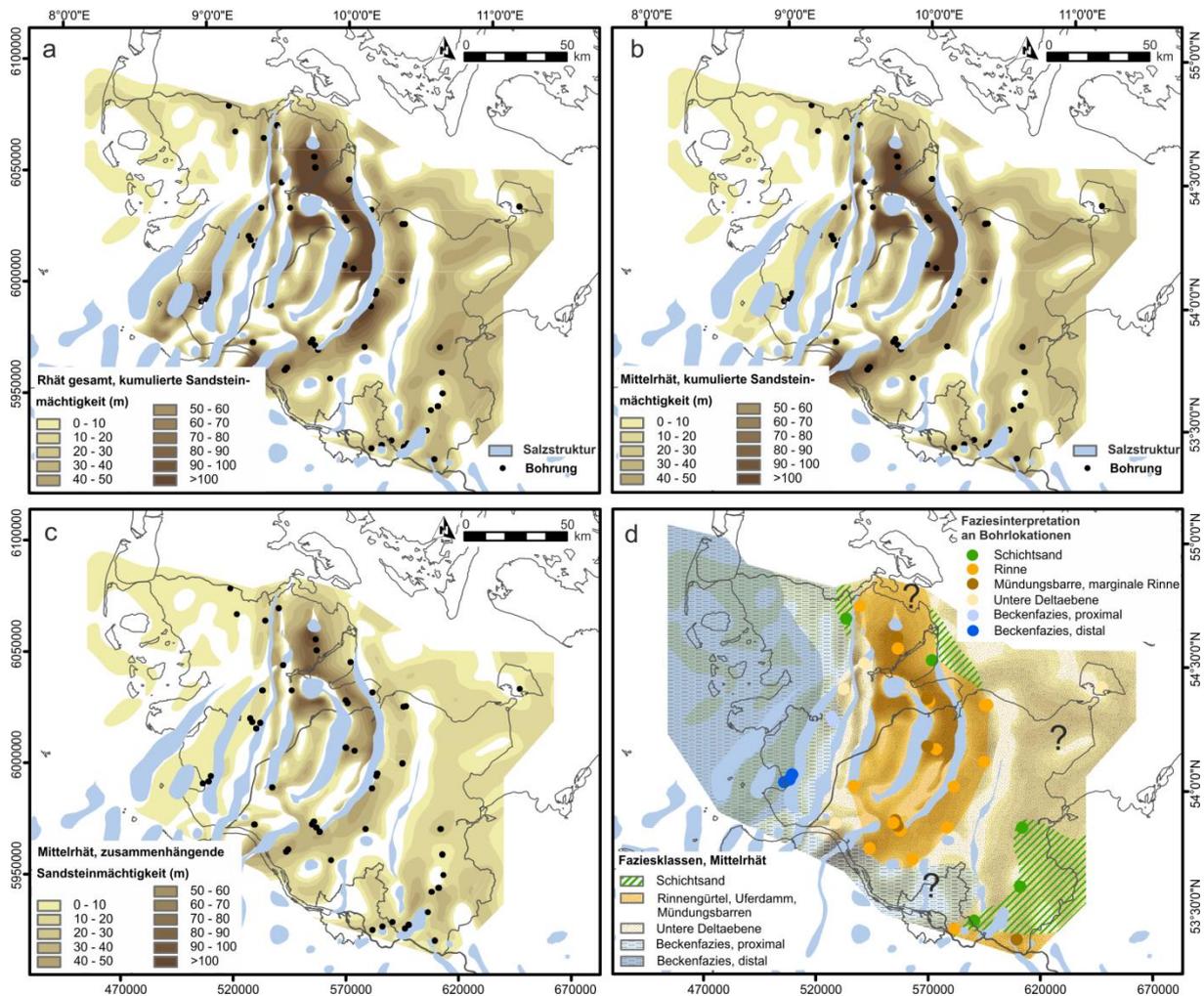
Das Rhät ist in Schleswig-Holstein nahezu landesweit verbreitet (Abb. 21). Die heutige Basis des Rhäts befindet sich zwischen durchschnittlich 800 m und etwa 2000 m unter NHN. In den Randsenken der Salzstrukturen ist der Rhät bis 4000 m unter NHN, im Westholstein-Trog sogar über 5500 m unter NHN abgesenkt (Abb. 21a). Der Top des Rhäts ist in Tiefen zwischen 400 m und 3200 m vorzufinden. Die Mächtigkeit des Rhäts schwankt zwischen wenigen Metern und etwa 50 m auf dem Westschleswig-Block, auf dem Ostholstein-Westmecklenburg-Block zwischen wenigen Metern und etwa 200 m (Abb. 21b). Die Mächtigkeit in den Randsenken im zentralen Teil des Glückstadt-Grabens steigt bis etwa 500 m an. Da das Mittelrhät in den Bohrungen einerseits nahezu vollständig erfasst und gut dokumentiert ist, sowie die Sandsteine des Mittelrhäts andererseits weit verbreitet und von größerer Mächtigkeit sind, erfolgten die lithologischen und faziellen Untersuchungen im Wesentlichen für diese Formation.

Die Basis des Mittelrhäts befindet sich durchschnittlich in Tiefen zwischen 1000 m und 1500 m unter NHN auf den Blöcken und in den Randsenken zwischen 3500 m und 5500 m (Abb. 21c). Aufgrund der geringen Mächtigkeit des Unterrhäts differieren die Basistiefen von Rhät und Mittelrhät nur geringfügig (vgl. Abb. 21a und c). Die Mächtigkeit des Mittelrhäts reicht bis etwa 100 m auf den beiden Blöcken und bis 300 m in den Trögen.



**Abb. 21:** Verbreitung, Basistiefe (a) und Mächtigkeit (b) des Rhäts sowie Basistiefe (c) und Mächtigkeit (d) des Mittelrhäts.

Basierend auf den Logkorrelationen und lithologischen Auswertungen der Bohrungen wurden verschiedene Sandsteinmächtigkeiten für das Rhät und für das Mittelrhät bestimmt. Die Mächtigkeiten wurden im Verhältnis zur Gesamtmächtigkeit des Rhäts berechnet. Auffällig ist, dass die akkumulierten Sandsteinmächtigkeiten des Rhäts und des Mittelrhäts sowie die Mächtigkeit des maximal zusammenhängenden Sandsteins im Mittelrhät im zentralen Teil des Glückstadt-Grabens und im Ostholstein-Trog am höchsten sind und miteinander korrelieren (Abb. 22a, b, c). Die Sandsteinmächtigkeiten zwischen Rhät und Mittelrhät unterscheiden sich jedoch im Bereich des Westholstein-Trogs (in der Nähe des Salzstockes Büsum). Generell nehmen nach Westen bzw. Südwesten die Mächtigkeiten sandsteinführender Horizonte zugunsten hoher Tonsteineinschaltungen im Mittelrhät ab. Die Sandsteinmächtigkeiten des Mittelrhäts reichen von wenigen Metern bis etwa 50 m auf den Westschleswig- und den Ostholstein-Westmecklenburg-Block und bis über 100 m im nördlichen Zentralteil des Glückstadt-Grabens (Abb. 22b). Im westlichen Landesteil sowie in den Ausbissbereichen liegen die Sandsteinmächtigkeiten bei wenigen Metern (Abb. 22b, c). Im Ostholstein-Trog steigen die Mächtigkeiten lokal bis zu 75 m an. Das Schichteinfallen ist meist sehr flach, kann aber in den Flanken der Salzstrukturen Einfallswinkel von 45° bis 70° erreichen. Die landesweiten Mächtigkeitsschwankungen des Mittelrhäts werden aufgrund lateraler Faziesveränderungen zum einen (Abb. 22d) und durch gleichzeitige Subsidenz und damit bevorzugter Akkumulation im Zentrum des Glückstadt-Grabens sowie in den Trögen zum anderen verursacht.



**Abb. 22:** Kumulierte Sandsteinmächtigkeiten des Rhäts (a) und des Mittelrhäts (b), zusammenhängende Sandsteinmächtigkeit des Mittelrhäts (c) und fazielle Entwicklung des Mittelrhäts (d). Die Faziesklassen sind semitransparent auf der kumulierten Sandsteinmächtigkeitskarte des Mittelrhäts geplottet.

### Lithofazielle Entwicklung

Aufgrund der diachronen Fazieswechsel der Ablagerungen im Mittelrhät, war es bisher nicht gelungen, die in den Schichtenverzeichnissen beschriebenen sogenannten „Mittelrhät-Hauptsandsteine“ biostratigraphisch konsequent und landesweit in allen Bohrungen zu identifizieren und zu korrelieren. Im Projekt wurde deshalb davon abgesehen, diesen dominierenden Sandstein (d.h. den maximal zusammenhängenden Sandstein) isoliert zu betrachten. Um das Ablagerungsmilieu der Sandsteine besser zu verstehen, wurden vielmehr die dominierenden Faziesbereiche des gesamten Mittelrhäts erfasst (Abb. 22d).

Im westlichen Bereich von Schleswig-Holstein wird der Mittelrhät basierend auf den Kernbeschreibungen als bankige Wechselfolge von Tonsteinen und Sandsteinen charakterisiert. Die Ausbildung der vorkommenden Feinsandsteine variiert von cm-mächtigen Sandsteinlagen bis zu maximal 10 m mächtigen Bänken. Die Sandsteine zeigen meist eine Kreuzschichtung. Die einzelnen Sandsteinschichten sind manchmal intern durch basale Aufarbeitungslagen gekennzeichnet. Das Auftreten von Aufarbeitungslagen, Muschelschill sowie Kreuzschichtungselementen deuten auf ein

höheres Strömungsregime während der Ablagerung der Sande hin. Die Logsignaturen dieser sedimentären Abfolgen in diesen Gebieten verdeutlichen ein undulierendes Überlagerungsmuster bestehend aus zyklischen Schüttungen von geringmächtigen Sanden und Tonen, die für eine Beckenfazies typisch sein können. Besonders der Bereich des Mittelrhäts zeigt im Westen von SH eine typische distale Beckenfaziesentwicklung mit mehreren kleinskaligen „coarsening-upward“ (Vergrößerungs-) Zyklen. Der Sedimentationsraum ist flachmarin bis vollmarin geprägt und wird aufgrund des Fossilinhalts der Ablagerungen als Teil einer Beckenfazies bzw. eines Prodeltas im Übergang zu einer subaquatischen Deltaebene interpretiert (Abb. 22d). Der Fossilinhalt zeigt eine Dominanz an Fischresten, Mollusken und Ostrakoden. Weiter nach Westen belegen die Abnahme der Sandsteinschüttungen bzw. Mächtigkeiten sowie das Auftreten von Belemnitenresten in den Ablagerungen ein distaleres und vollmarines Sedimentationsmilieu. Aufgrund des transgressiven Einflusses im Mittelrhät aus westlicher Richtung postulieren Franz & Wolfgramm (2008) ebenfalls den Übergang in eine vollmarine Beckenfazies, die dann weiter zur Nordsee hin ausschließlich aus mächtigen grauen Tonsteinen besteht.

Die Faziesentwicklung in den übrigen Landesteilen von Schleswig-Holstein ist hingegen überwiegend durch deltaisiche Ablagerungen geprägt (Abb. 22d, in ockerfarbenen gehaltenen Gebiete). In den Bohrungen im Bereich des zentralen und östlichen Teils des Glückstadt-Grabens, die den Mittelrhät erschlossen, wurden überwiegend sanddominierte Abfolgen dokumentiert. Basierend auf den Trendauswertungen der Logs können die mächtigen Fein- bis Mittelsandsteine als Sandsteine von Verteilerrinnen, Mündungsbarren und Schichtsandsteinen einer weitgespannten Deltaebene interpretiert werden (Abb. 22d). Die deltaisichen Ablagerungen werden durch einen relativ hohen detritischen Anteil an kohligem Pflanzenresten charakterisiert, die Anzeiger für eine paralische Kohlenbildung auf der Deltaebene sein könnten. Häufig auftretende Schichtungselemente sind Kreuz- und Horizontalschichtung. Je nach Tonanteil der Sedimente tritt Flaserschichtung auf.

Die Rinnensandsteine sind oft durch eine scharfe, erosive Basis und einen scharfen Top im Logbild erkennbar. Teilweise ist der Basisbereich auch progradierend ausgebildet und die Sandsteine wechseln allmählich in Tonstein dominierte Abfolgen. In den Ablagerungen deuten sich intern einzelne Schüttungseinheiten an, die teilweise mit geringmächtigen Lagen aus Ton- oder Tonmergelgesteinen enden und bei der Ablagerung der nächsten Schüttung auch wieder erodiert worden sein können. Generell zeigen die Rinnensandsteine einen relativ geringen Anteil an Ton, Tonmergel oder Schluff.

Die Sandsteine von Mündungsbarren sind oftmals durch einen progradierenden Logtrend gekennzeichnet. Je nach Tonanteil in den Sandsteinen kann zwischen proximalen und distalen Mündungsbarren unterschieden werden, das sich in einem mehr oder weniger undulierenden Logverlauf der Gamma-Ray- bzw. Eigenpotentialkurven widerspiegelt. Basierend auf Franz & Wolfgramm (2008) und Wolfgramm et al. (2014) sind die Mündungsbarren von Uferdambereichen eingefasst, können sich beckenwärts subaquatisch fortsetzen und kennzeichnen somit den Übergang zwischen Deltaebene und mariner Beckenfazies (Prodeltafazies). In der Abb. 22d wurden die Sandsteine der Rinnengürtel und Mündungsbarren zu einer Faziesklasse zusammengefasst.

Die Schichtsandsteine treten lateral neben den Rinnensandsteinen auf und sind geringmächtiger als Rinnensandsteine. Sie sind meist flächenhaft auf der Deltaebene verbreitet, wie beispielsweise im Südosten des Landes (vgl. Abb. 22d). Die Liegend- als auch die Hangendgrenze der Schichtsandablagerungen sind scharf. Die Sandsteine deuten eine rasche Sedimentation an und

wechseln abrupt in tonige Abfolgen der Deltaebene. Der Wechsel kann durch eine rasche Abnahme der Transportenergie begründet werden.

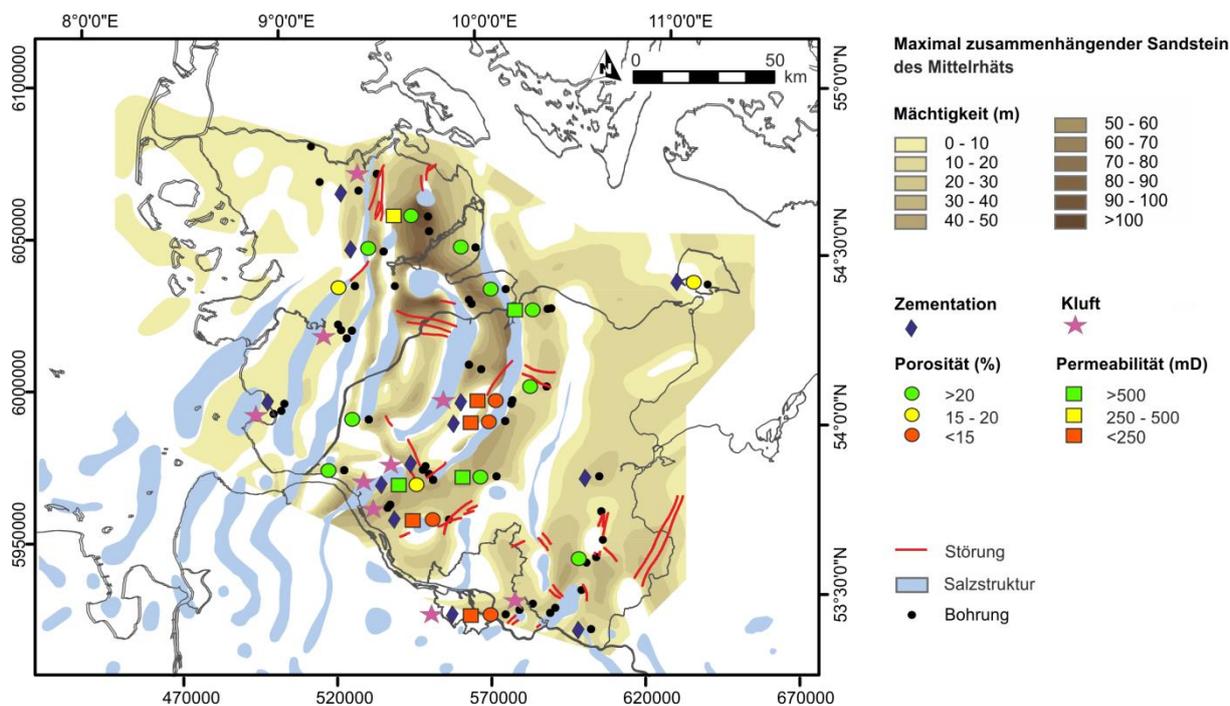
Die in den Kernbeschreibungen dokumentierten flaserig geschichteten und Ton dominierenden Sandstein-Tonstein-Wechselfolgen sowie feingeschichtete Ton- bis Tonmergelsteine des Mittelrhät werden nach Franz & Wolfgramm (2008) als Sedimente einer Zwischenrinnenfazies oder als Stillwasserbuchten einer Deltaebene interpretiert. Aufgrund der Nähe zum marin geprägten Ablagerungsraum im Westen von Schleswig-Holstein kann ein mariner bis brackischer Einfluss im Bereich des deltaischen Rinnengürtels und der Deltaebene nicht ausgeschlossen werden. Nach Fisher (1976) ist die Untere Deltaebene durch einen teilweise subaquatischen Ablagerungsraum charakterisiert, bei dem ein deutlicher mariner Einfluss auftritt.

Als Liefergebiet der klastischen Sedimente des Rhäts wird das im Norden gelegene Fennoskandische Hochland angenommen (Paul et al. 2008). Die fein- bis mittelkörnigen, mäßig bis gut sortierten Sandsteine bestehen überwiegend aus kantengerundeten Quarzkörnern. Untergeordnet treten Feldspäte, Glimmer, polykristalline Gesteinsfragmente sowie Schwerminerale auf. Der in den Porenraum vorhandene unterschiedlich hohe Tonanteil ist primär durch die Faziesentwicklung bedingt. In einigen Kernuntersuchungen wurden fleckig verteilte Kalzitminerale dokumentiert. Die mittelmäßige bis gute texturale und kompositionelle Reife der Sandsteine könnte ein Indiz für einen relativ kurzen Transportweg zwischen Liefergebiet und Ablagerungsraum sein.

Aufgrund der komplexen strukturellen Entwicklung des Glückstadt-Grabens und der Bildung der Salzstockrandsenken im Rhät bzw. im Mittelrhät bleiben die konkreten Verläufe der Rinnen und Mündungsbarren unsicher. Aufgrund der geringen Bohrungsdichte im Osten und Nordosten konnte keine weitere detaillierte Gliederung der Unteren Deltaebene durchgeführt werden.

### **Hydraulische Eigenschaften**

Zur Bewertung der hydraulischen Eigenschaften wurden auf Basis der vorhandenen Porositäts- und Permeabilitätsdaten 17 gemittelte Porositätswerte und 8 gemittelte Permeabilitätswerte aus den Bereichen der maximal zusammenhängenden Sandsteine bzw. kumulierten Sandsteine des Mittelrhäts in den jeweiligen Bohrungen herangezogen. Hohe Porositäten (>20 %) wurden für die Bereiche ermittelt, in denen der Sandstein recht mächtig ist und einer Rinnenfazies zugeordnet werden kann (Abb. 23 und vgl. Abb. 22d). Aufgrund der granulometrischen Eigenschaften der Sandsteine und geringen primären Ton- bzw. Zementanteil lassen sich im Allgemeinen die hohen Porositäten begründen. Aus den vorhandenen Daten ist jedoch nicht eindeutig erkennbar, inwiefern die hydraulischen Eigenschaften von der faziellen Ausbildung des Mittelrhäts abhängen.



**Abb. 23:** Zusammenstellung der Porositäts- und Permeabilitätsdaten für den maximal zusammenhängenden Sandstein im Mittelrhät basierend auf den erhobenen Daten aus Kernproben und Loguntersuchungen.

Je nach Art und Verteilung von Zementen im Porenraum, kann sich die Zementation unterschiedlich auf die Porosität und Permeabilität auswirken. Die Anhydritzementation im Bereich der Sandsteine, beispielsweise in zwei Bohrungen im Bereich des Ostholstein-Troges und in einer Bohrung im Hamburg-Hohenhorn-Trog im Südosten (Allermöhe 1), mindert die Porosität und Permeabilität. Trotz des Auftretens von Klüften in diesen Sandsteinen sind die hydraulischen Eigenschaften gering (Porosität <15 %, Permeabilität <250 mD). Das Auftreten von Anhydritzementation im Porenraum kann durch die Nähe zu Salzstrukturen und entsprechend perkolierende Fluide verursacht worden sein. Ursache für die geringen Porositäten und Permeabilitäten des Sandsteins in der Bohrung Allermöhe 1 ist die fast vollständige Anhydritzementation, deren Lösungsangebot wahrscheinlich aus dem nahen Salzstock Reitbrook und alternativ aus tieferen Keuperschichten oder aus dem Rhät selbst kommt. Ein Nachweis der Herkunft ist noch offen (Baermann 2000).

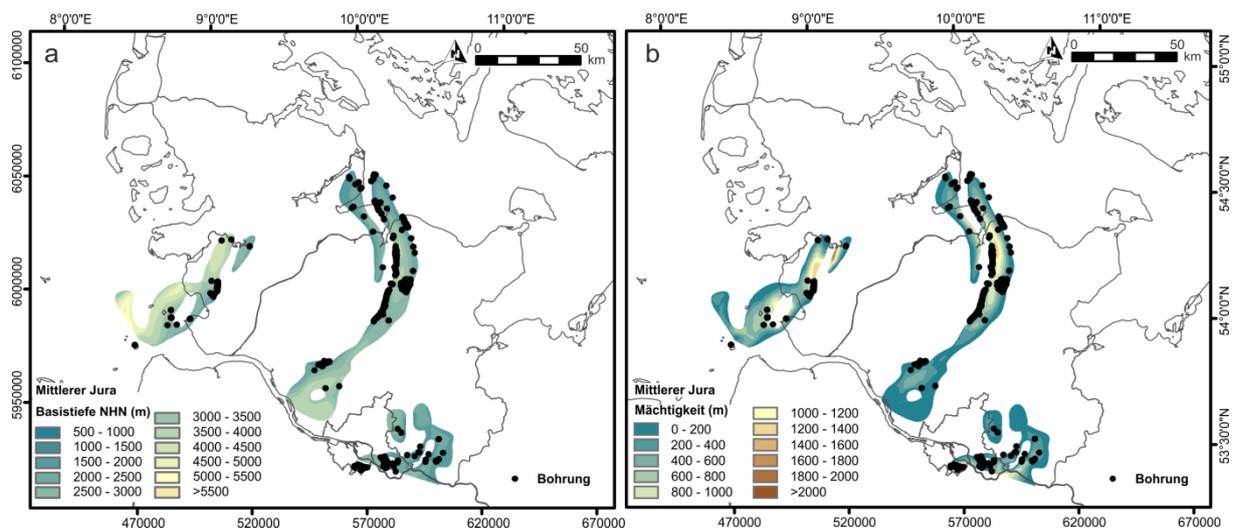
Einzelne Sandsteinbereiche zeigen eine mittlere Porosität (15-20 %) und eine hohe Permeabilität (>500 mD). Dokumentierte Klüfte im Sandstein könnten trotz seiner Feinkörnigkeit und des Auftretens von karbonatischen und pyritischen Bindemitteln die hohe Permeabilität verursacht haben.

### 1.4.3.3 Mittlerer Jura

Die heutige Verbreitung des Mittleren Jura ist in Schleswig-Holstein auf den West- und Ostholstein-Trog sowie auf den Glinde-Trog und Hamburg-Hohenhorn-Trog beschränkt. Es ist anzunehmen, dass der Mittlere Jura ursprünglich vollständig und flächendeckend vorhanden war. Die jungkimmerische Hebung führte zur Abtragung von Sedimenten des Mittleren Juras. Nur in den Salzstockrandsenken, den o.g. heutigen Jura-Trögen, sind die Ablagerungen in Abhängigkeit von der jeweiligen strukturellen Entwicklung in teilweise stark reduzierter, bis auf die untersten Einheiten erodierter Schichtenabfolgen erhalten geblieben. Salzdiapirismus und Randsenkenbildung führten zur Aufschleppung und damit zur Deformation der flankierenden Ablagerungen. Die Sedimentschichten

am Rand der Salzstrukturen zeigen häufig ein Einfallen bis zu 70° und werden durch die Kreide diskordant überlagert.

Aufgrund lokal verschiedener Subsidenzraten in den Salzstockrandsenken befindet sich die heutige Basis des Mittleren Jura in unterschiedlichen Tiefenlagen. Die Basistiefe im Westholstein-Trog reicht von etwa 2500 m bis über 5000 m (Abb. 24a). Die Mächtigkeiten schwanken zwischen etwa 200 m und 1000 m (Abb. 24b). Lokal werden bis zu 1200 m erreicht. Die tiefsten Bereiche des Ostholstein-Trogs liegen bei etwa 3500 m im Norden und bei etwa 4000 m im Süden. Aufgrund unterschiedlicher Phasen der Salzstockrandsenkenbildung im Bereich des Ostholstein-Troges variieren die Mächtigkeiten und erreichen im Trogtiefsten bis zu 1400 m. Die Ablagerungen im Bereich des Hohenhorn-Hamburg-Troges und des Troges bei Glinde sind in Basistiefen zwischen 1600 m und etwa 3000 m vorzufinden.



**Abb. 24:** Verbreitung, Basistiefe (a) und Mächtigkeit (b) des Mittleren Juras.

Aufgrund der Erdöllagerstätten in den Randlagen der Salzstockrandsenken orientieren sich die Bohrungen meist an den Salzstrukturen wie beispielsweise im Ostholstein-Trog. Die Mehrzahl der Erdölbohrungen des Ostholstein- und Hamburg-Hohenhorn-Trogs schlossen die Sandsteine des Oberen Aalens (Dogger Beta) bis Unteres Bajoc (Dogger gamma bis Dogger delta) auf, die als Reservoirgesteine mit guten Speichereigenschaften eingestuft worden waren. Vergleichsweise wenige Bohrungen im Bereich Bramstedt, Preetz, Kiel sowie Bohrungen des Glinde-Troges und des Westholstein-Troges erfassten die höheren Abfolgen des Mittleren Juras, Bathon (Dogger epsilon) und Callov (Dogger zeta). Im Rahmen der Erdölexploration in den 60 bis 80er Jahren stand der Mittlere Jura (Dogger) im Fokus (Rüddiger 1957, Brand & Hoffmann 1963, Zimmerle 1963, Boigk 1981).

Nach Brand & Mönnig (2009) und Zimmermann et al. (2015) lässt sich der Jura sequenzstratigraphisch interpretieren, wodurch sich die Ablagerungszyklen und die lateralen Faziesveränderungen verschiedener progradierender Sandsteineinheiten in den Regressionsphasen rekonstruieren lassen. Der in der Altmark Region (bei Wolfsburg) fluviatil bis deltatisch abgelagerte über 100 m mächtige „Altmark-Sandstein“ splittet sich westwärts in vier einzelne Sandsteinkörper auf, die durch Tonsteineinheiten abgegrenzt sind (Brand & Hoffmann 1963, Brand & Mönnig, 2009). Diese vier Oberaalen Sandsteine, Sinon-, Staufensis-, Boostedt (Obtusa)- und Wöhrden (Concava)-Sandsteine, sind im Bereich der Jura-Tröge in Schleswig-Holstein als überwiegend feinkörnige bis

mittelkörnige Flasersandsteine mit tonigen Zwischenlagen ausgebildet. Während Sinon- und Staufensis-Sandstein im Hamburger-Hohenhorn-Trog allmählich vertonen, lassen sich der Boostedt-Sandstein in dem Ostholstein-Trog bis nach Schwedeneck und der Wöhrden-Sandstein im Westholstein-Trog anhand der Bohrerergebnisse verfolgen. Aufgrund des hohen Tonanteils der Sandsteine, die als Deltafrontablagerungen eines im Osten des Norddeutschen Beckens befindlichen Deltasystems interpretiert werden können (Zimmermann et al. 2015), stellen die Oberaalen-Sandsteine keine untersuchungswürdigen Aquifere hinsichtlich einer geothermischen Nutzung dar.

Als geothermisch untersuchungswürdige Aquifere können die Sandsteine der Sonninien- und Coronaten-Schichten des Unteren Bajocs eingestuft werden (Varel und Elsfleth). Die Sandsteine sind im Ostholstein- und Westholstein-Trog gleichermaßen entwickelt und zeigen eine kontinuierliche Mächtigkeitsabnahme in südliche Richtung (Abb. 25 und Abb. 27).

Der im Oberbajoc abgelagerte Suderbruch-Sandstein, die im Bathon abgelagerten Württembergica-Sandsteine und die Mittelplate-Sandsteine sind relativ mächtige Sandsteinabfolgen, jedoch lassen sich die Sandsteine nur lokal in Schleswig-Holstein durch einzelne Bohrungen belegen. In vielen Teilen des Ostholstein-Troges sind diese Sandsteine in den Bohrungen teilweise nicht aufgeschlossen, da oftmals die Kreide diskordant auf die unteren Einheiten (Dogger gamma) des Mittleren Juras aufliegt. Der Suderbruch-Sandstein ist durchschnittlich 20 bis 40 m mächtig und ist in allen Jura-Trögen in Schleswig-Holstein nachweisbar (Speicher-Kataster Deutschland, Kaufhold et al. 2011), jedoch wird der Sandstein basierend auf den Schichtenverzeichnissen als eisenoolithischer Kalksandstein und als schlechter Speicher beschrieben. Die kalkig-dolomitischen, fein- bis mittelkörnigen Unteren und Oberen Württembergica-Sandsteine sind im Hamburger-Trog aufgeschlossen. Der bis zu 130 m mächtige Mittelplate-Sandstein ist im Westholstein-Trog verbreitet. Aufgrund der unterschiedlichen Verbreitung und teilweise ungünstigen lithologischen Eigenschaften hinsichtlich der Gesteinsdurchlässigkeiten sind die Sandsteine im Projekt nicht detaillierter untersucht worden.

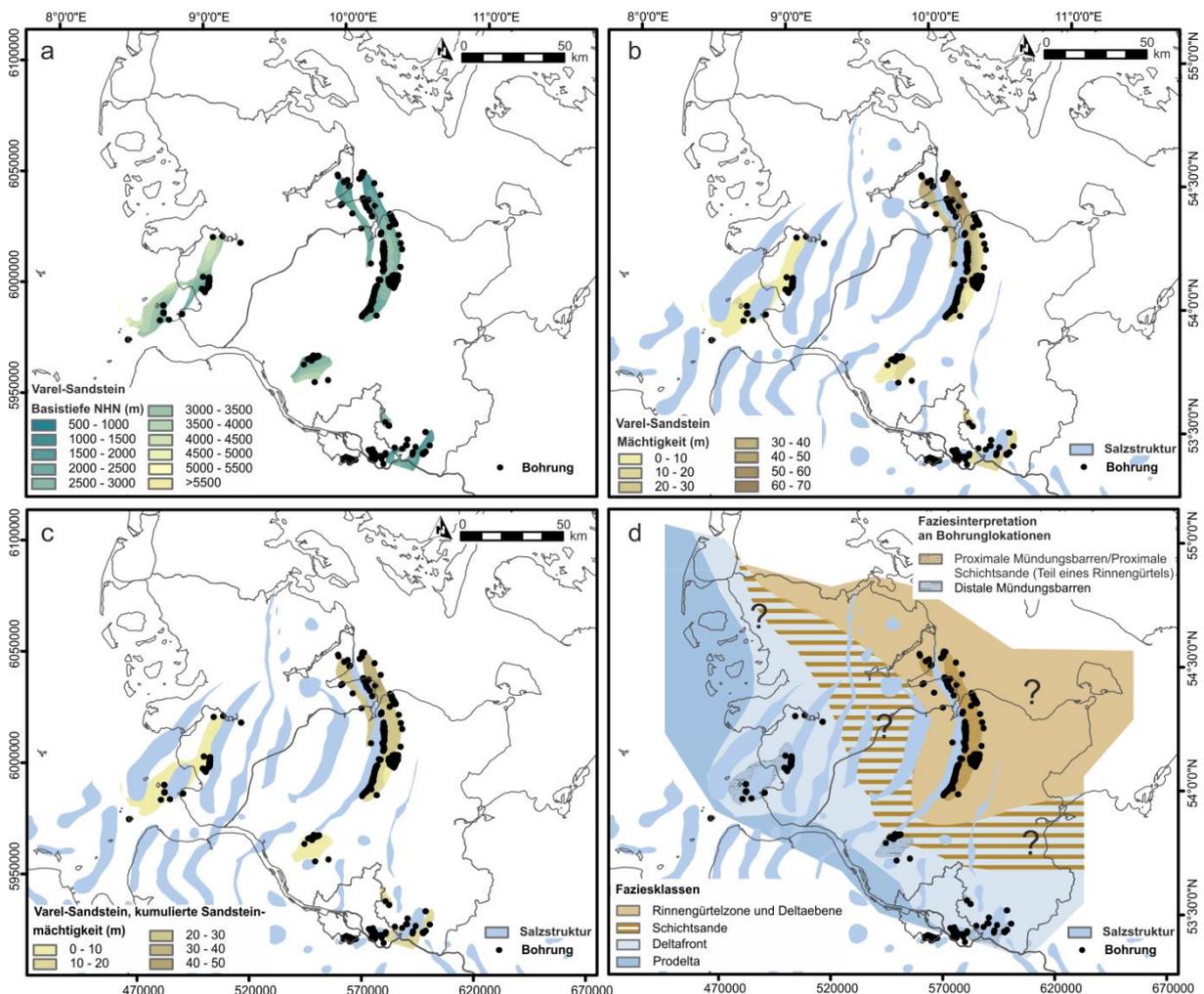
Der Varel-Sandstein und der Untere Elsfleth-Sandstein sind für die Untersuchungen hinsichtlich einer geothermischen Nutzbarkeit im Projekt ausgewählt worden da sie gute Speichereigenschaften besitzen (Abb. 26). Sie werden im Folgenden behandelt.

Insgesamt gibt es etwa 589 Bohrungen (KW-Datenbank der Länder), davon wurden 52 lithologisch und stratigraphisch untersucht. Weitere 20 Bohrungen wurden zusätzlich im Rahmen der geologischen Modellierung für die Generierung von Markern stratigraphisch ausgewertet. Bei der Auswahl ging es um eine möglichst gute räumliche Abdeckung und die Erfassung von repräsentativen Lokationen. Die Arbeit von Brand & Mönning (2009) stellte eine wesentliche Grundlage für die Korrelationen und Überarbeitung der stratigraphischen Gliederung der Bohrungen dar.

Der Varel-Sandstein ist in einer Tiefe von etwa 2500 bis 5500 m im Westholstein-Trog zu erwarten (Abb. 25a). Im Ostholstein- und Hamburg-Hohenhorn-Trog befindet sich der Sandstein in einer durchschnittlichen Tiefenlage von 2500 m. Im Westholstein-Trog ist die Mächtigkeit sehr gering (<10 m). Im Bereich Bramstedt des Ostholstein-Troges und im Hohenhorn-Trog ist der Sandstein zwischen 10 und 20 m mächtig. Im Ostholstein-Trog reichen die Mächtigkeiten von 20 m im Süden bis zu 70 m im Norden (Abb. 25b). Zu bemerken ist, dass der Sandstein im nördlichen Teil des Troges zwischen Warnau und Schwedeneck zweigeteilt und mit einem maximal 20 m mächtigen Tonzwischenmittel

ausgebildet ist. Die akkumulierten Sandsteinmächtigkeiten liegen in diesem Bereich zwischen 20 und 50 m (Abb. 25c).

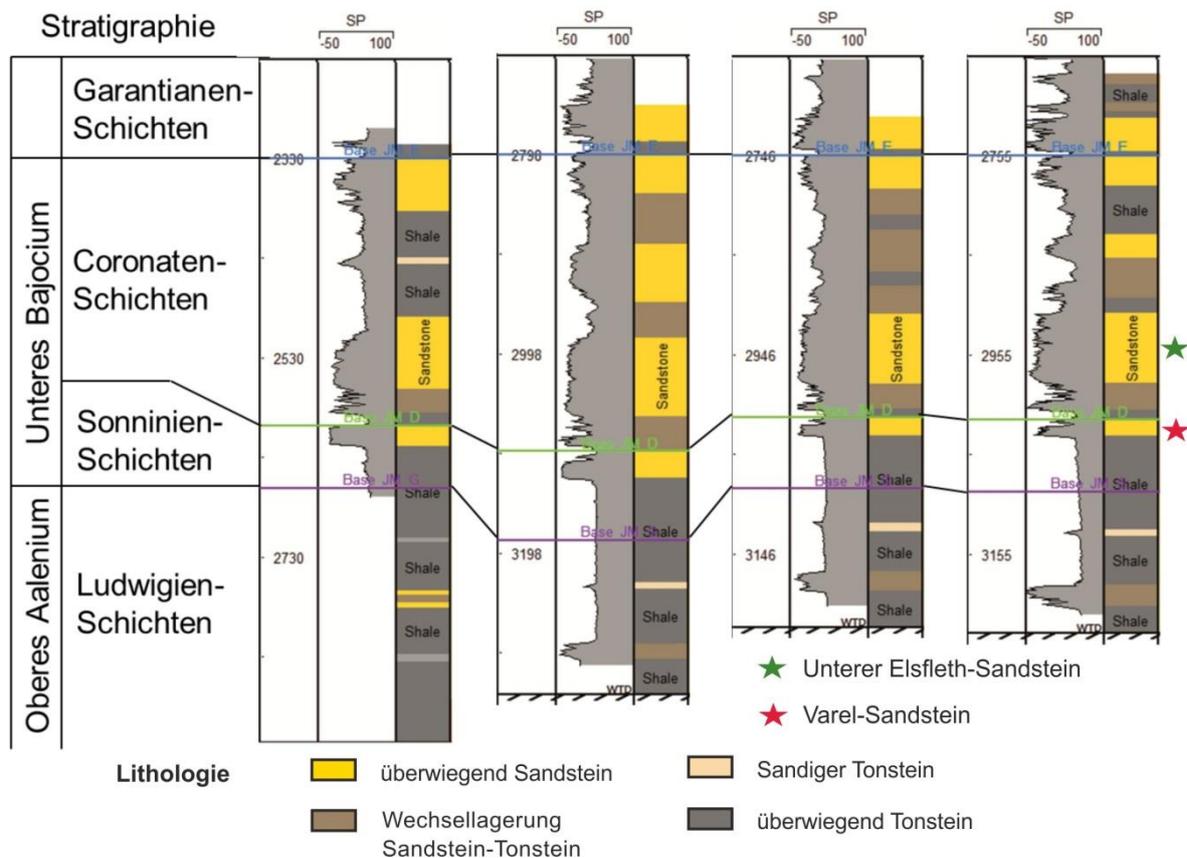
Im Hangenden des Varel-Sandsteins folgen die Coronaten-Schichten, die in Schleswig-Holstein aus zwei mächtigen klastischen Serien bestehen. Da der Obere Elsfleth-Sandstein nicht in allen Trögen durch Bohrungen aufgeschlossen ist, wurde im Projekt der Untere Elsfleth-Sandstein lithofaziell detaillierter untersucht. Der Untere Elsfleth-Sandstein befindet in Tiefen zwischen 1500 m und 3500 m im Ostholstein-Trog und bei etwa 4500 m im Westholstein-Trog (Abb. 27a). Im Westholstein-Trog schwankt die Mächtigkeit des Unteren Elsfleth-Sandsteins zwischen 70 und 90 m (Abb. 27b). Im nördlichen Teil des Ostholstein-Trogs wurden Sandsteinmächtigkeiten bis über 100 m ermittelt. Der Untere Elsfleth-Sandstein zeigt eine kontinuierliche Mächtigkeitsabnahme in südlicher Richtung. Die Mächtigkeiten im Bereich Bramstedt im Süden des Troges erreichen maximal 30 m. Nach Südosten hin keilen die Sandsteine aus und gehen in dunkelgraue schwach feinsandige Tonsteinabfolgen über.



**Abb. 25:** Verbreitung, Basistiefe (a), Sandsteinmächtigkeit (mit Toneinschaltung) (b), kumulierte Sandsteinmächtigkeit (Netto), (c) und fazielle Entwicklung des Varel-Sandsteins (d).

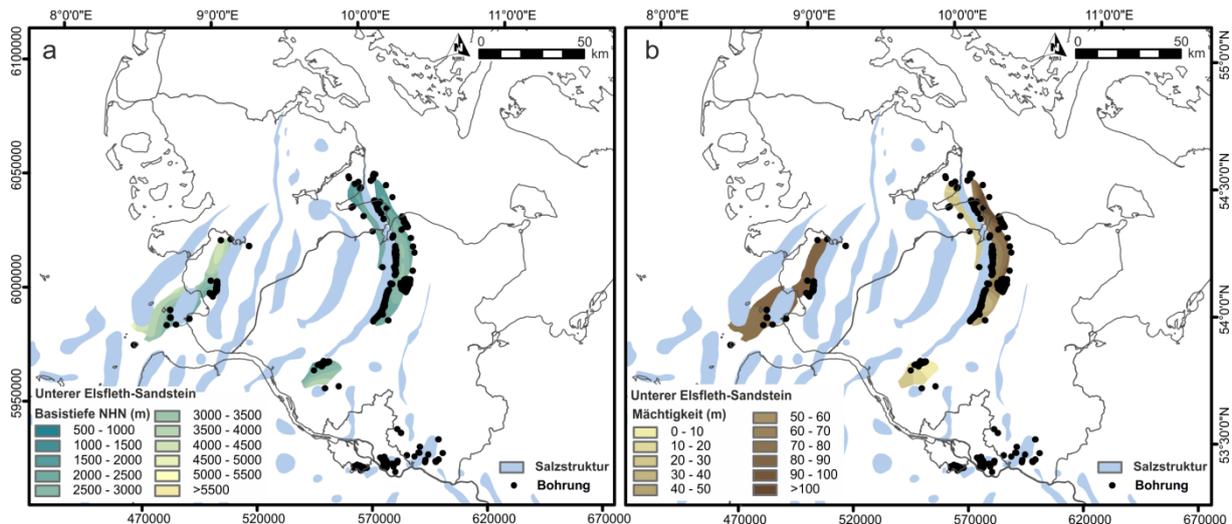
## Lithofazielle Entwicklung des Varel-Sandsteins

Die überwiegend hell- bis mittelgrauen, mit dünnen Tonfasern durchsetzten Fein- bis Mittelsandsteine sind im Norden des Ostholstein-Troges als massive Sandsteinkörper mit scharfer Basis und scharfem Top ausgebildet, die gemäß Logbild als proximale Schichtsandsteine oder proximale Mündungsbarren interpretiert werden können (Abb. 25d). In einigen Bohrungen im Bereich Warnau (Warnau und Plön Ost Bohrungen) und Boostedt wurden z.T. Einschaltungen von grobsandigem Material in den Kern- und Spülproben dokumentiert. Auffällig ist für dieses Gebiet auch, dass die Sandsteine quer zur Trogachse zu der Ausbissgrenze nach Osten hin geringmächtiger werden und Toneinschaltungen auftreten. Diese laterale Änderung in Mächtigkeit und Lithologie könnte ein Indiz für die im Mittleren Jura bereits vorhandene Asymmetrie des Troges sein (vgl. Abb. 26), dessen Entwicklung durch den Diapirismus der Salzmauern gesteuert wurde.



**Abb. 26:** Vertikale und laterale lithologische Entwicklung der unteren Einheiten (Oberes Aalen und Unteres Bajoc) des Mittleren Juras.

Der Varel-Sandstein wechselt nach Süden hin teilweise in eine Sandstein-Tonstein-Wechsellagerung. Dieser lithofazielle Wechsel macht sich in einem undulierenden (gezackten) Logtrend der Gamma-Ray, Eigenpotenzial- oder Widerstandsmessungen bemerkbar. Die Liegend- bzw. Hangendgrenze ist oftmals scharf oder progradierend/graduell ausgebildet. Die brackisch bis marinen Ablagerungen bei Bramstedt des Ostholstein-Troges und im Hohenhorn-Trog sowie im Westholstein-Trog können als distale Mündungsbarren interpretiert werden, die nach Fisher (1976) Teil von Deltafrontablagerungen sind und allmählich in eine vollmarine Prodeltafazies übergehen (Abb. 25d). Im Bereich Bramstedt wird der marine Einfluss durch Belemnitenfunde in Kernproben bestätigt.

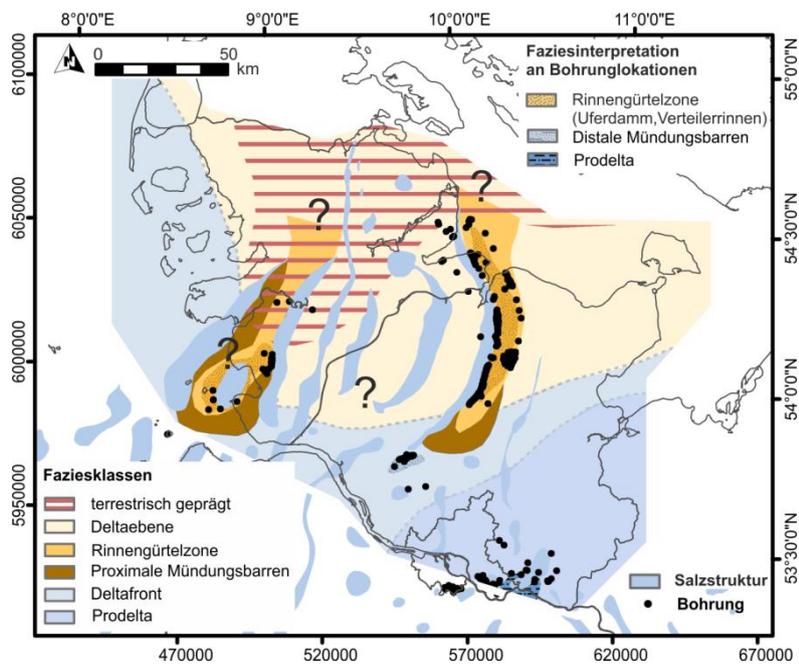


**Abb. 27:** Verbreitung, Basistiefe (a) und Sandsteinmächtigkeit (b) des Unteren Elsfleth-Sandsteins.

### Lithofazielle Entwicklung des Unteren Elsfleth-Sandsteins

Der Untere Elsfleth-Sandstein ist ein überwiegend gut sortierter Mittel- bis Grobsandstein, der partiell auch feinsandig ist. Sandstein ist oftmals mit dünnen Tonlagen durchsetzt und mit kohligen Holz- und Pflanzenresten angereichert. Aufgrund der sehr markanten Logsignatur, die einen massigen Sandstein mit scharfer, abrupter Basis und oftmals scharfen Top zeigt, wird der Untere Elsfleth-Sandstein im Bereich des Ostholstein-Troges als Verteilerrinne eines Rinnengürtels interpretiert (Abb. 28). Im Bereich Boostedt des Ostholstein-Troges ist der Elsfleth-Sandstein eher feinsandig und schwach karbonatisch ausgebildet und zeigt bioturbate Strukturen, die eher auf Flachwasser-Sedimentationsbedingungen z.B. im Bereich einer Mündungsbarre deuten. In südliche Richtung im Bereich Bramstedt wechselt der Sandstein bei gleichzeitiger Mächtigungsabnahme in eine Wechsellagerung aus hellgrauen mittelkörnigen Sandsteinen und dunkelgrauen Tonsteinen. Dieser Wechsel zeigt einen undulierenden Logtrend und deutet auf distale Sedimentation hin. Der Bereich wird als distale Mündungsbarre, als Teil einer Deltafront, interpretiert (Brand & Mönnig 2009). Der Einfluss von Sandsteinen nimmt nach Südosten hin weiter ab und es dominieren feinsandige Tonsteine im Bereich des Hamburg-Hohenhorn-Trogs, die für eine Prodeltafazies typisch sind.

Der Bereich des Westholstein-Troges ist lithofaziell schwer zu interpretieren. Brand & Mönnig (2009) vermuten jedoch für beide Tröge einen deltaisich geprägten Ablagerungsraum. Es deuten sich in einigen Bohrungen rinnenartige Bildungen an (Abb. 26), jedoch undulieren die Logkurven von Gammay-Ray, Eigenpotential- und Widerstandmessungen in anderen Bohrungen sehr stark, die auch auf „shore“-Bildungen (Küstensandbereich) hinweisen könnten. In den Schichtenverzeichnissen der höheren Coronaten-Schichten wird ein terrestrischer Einfluss beschrieben. Aufgrund der differierenden Hinweise können keine detaillierten Aussagen zur Faziesinterpretation in diesem Bereich getroffen werden.

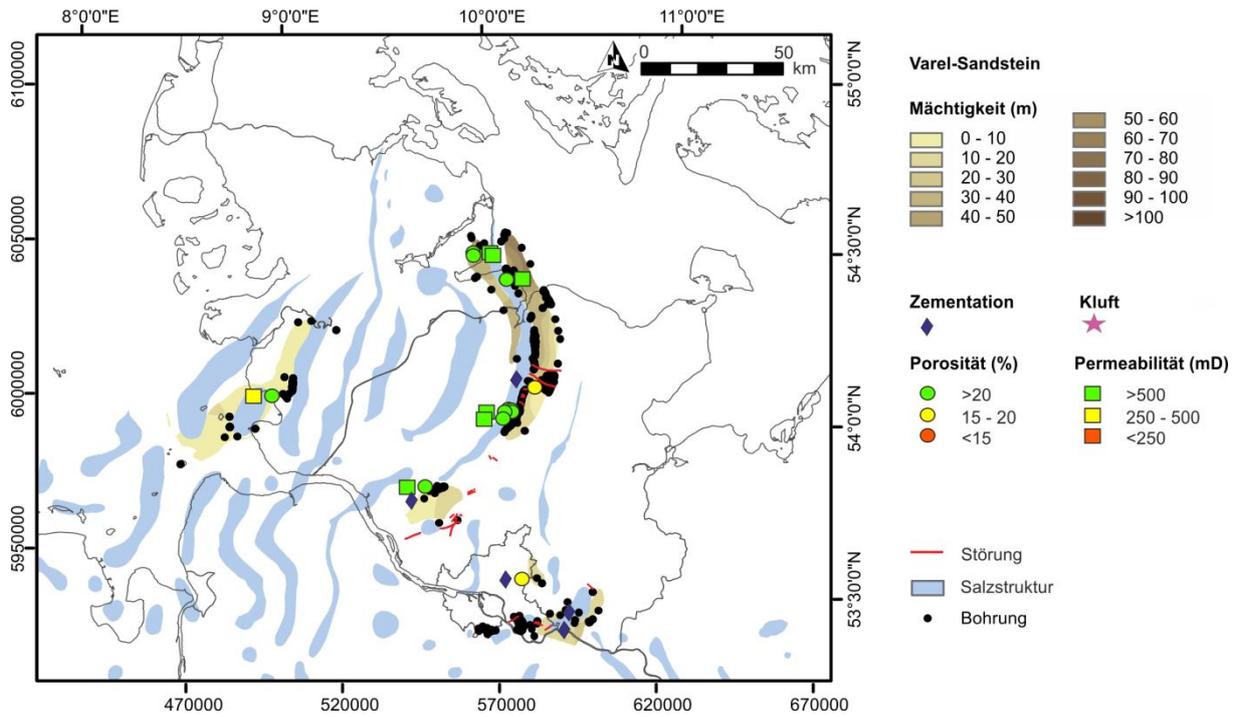


**Abb. 28:** Fazielle Entwicklung des Unteren Elsfleth-Sandsteins.

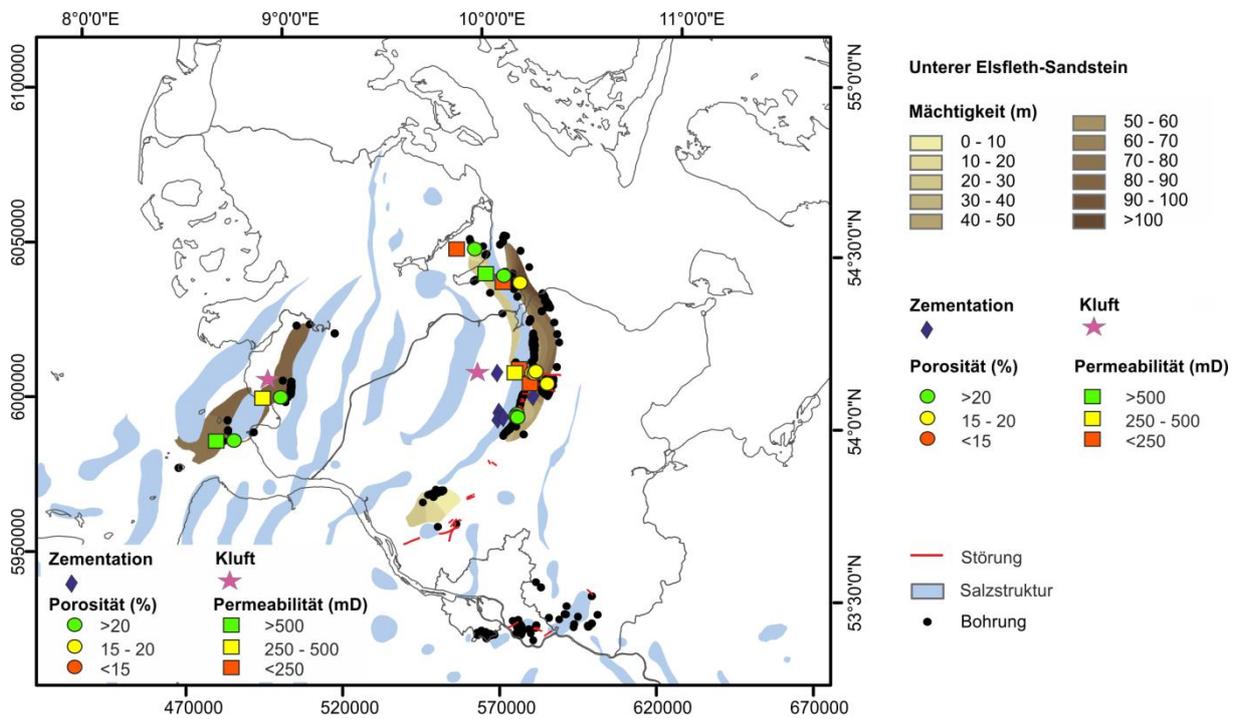
### Hydraulische Eigenschaften

Für die Bewertung der hydraulischen Eigenschaften der untersuchten Sandsteine des Mittleren Juras liegen für den Varel-Sandstein 12 Porositätswerte und 7 Permeabilitätswerte (Abb. 29) und für den Unteren Elsfleth-Sandstein 12 Porositätswerte und 9 Permeabilitätswerte vor (Abb. 30). Diese gemittelten Werte zeigen für den Varel-Sandstein hohe Porositäten (>20 %) und Permeabilitäten (>500 mD). Die lokal mäßig hohen Porositätswerte (15-20 %) werden teilweise durch entsprechende Zementation im Porenraum verursacht. Basierend auf den vorhandenen Daten lässt sich kein Zusammenhang zwischen hydraulischen Eigenschaften der Sandsteine und ihrer fazialen Veränderungen erkennen.

Der Untere Elsfleth-Sandstein zeigt mittlere bis hohe Porositäten und mittlere bis geringe Permeabilitäten. Die Korrelation belegt, dass hohe Permeabilitäten von >200 mD meist erst bei Porositäten >20 % erwartet werden können. Besonders im Bereich von Warnau-Plön des Ostholstein-Troges geht der Elsfleth-Sandstein partiell in einen Kalksandstein über. Aufgrund der Nähe zur Salzstruktur Warnau-Honigsee ist darüber hinaus eine Anhydrit-Zementierung des Porenraums sowie von Klüften, die sich permeabilitätsmindernd auswirkt, nicht auszuschließen. Lokal wurden 20-30° einfallende, meist flaserig ausgebildete Harnische und Klüfte dokumentiert, die mit hellweißen bis gelblichen Anhydritbelag zementiert sind.



**Abb. 29:** Zusammenstellung der Porositäts- und Permeabilitätsdaten für den Varel-Sandstein basierend auf den erhobenen Daten aus Kernproben und Loguntersuchungen.



**Abb. 30:** Zusammenstellung der Porositäts- und Permeabilitätsdaten für den Unterer Elsfleth-Sandstein basierend auf den erhobenen Daten aus Kernproben und Loguntersuchungen.

#### **1.4.4 Anbindung der Störungen an Sandsteinhorizonte**

Im Rahmen der Untersuchungen zur potenziellen geothermischen Nutzbarkeit von Sandsteinformationen wurden mögliche Veränderungen der Permeabilität in Störungszonen betrachtet. Hydraulisch durchlässige Störungen, Zerüttungszonen bzw. „offene“ Kluftnetzwerke könnten höhere Temperaturen aufweisen und höhere Förderraten ermöglichen. Geklüftete, gestörte Reservoirgesteine rückten seit den 80er Jahren vermehrt in den Fokus der Forschung der Kohlenwasserstoff-Industrie. Hierbei geht es sowohl um ein Verständnis und die Prognose der Migrationsprozesse als auch um die Bildung und Detektion von störungsgebundenen Fallenstrukturen (z.B. Aydin 2000). Störungen können sowohl Barrieren darstellen als auch hohe Durchlässigkeiten aufweisen. Aufgrund der Komplexität von Störungen und der vielen Einflußfaktoren der Permeabilität, ist die Untersuchung und Voraussage der Durchlässigkeit ein umfangreiches Forschungsthema, das insbesondere für die Geothermie relevant ist. Trotz der intensiven Forschungsaktivitäten und verschiedenen Methoden bleibt die Voraussage der Durchlässigkeit und Fluidmigration in gestörten Reservoiren mit großen Unsicherheiten behaftet. Die Durchlässigkeit einer Störung bzw. Kluftnetzwerkes in einem Sandstein wird nach Fisher & Knipe (2001) u.a. von dem Tongehalt, der Versenkungsgeschichte, der Temperaturgeschichte, der Deformationsgeschichte und von dem Stressfeld beeinflusst. Weitere allgemeine Faktoren wurden im Kapitel 4.2 erläutert und im Rahmen des Verbundprojektes StörTief von Agemar et al. (2016, subm.) zusammengefasst.

Im Glückstadt-Graben und den randlichen Blockbereichen werden Reservoirkomplexe und deren Sandsteinformationen an zahlreichen tiefreichenden Störungszonen unterbrochen und versetzt (Abb. 20, Abb. 23, Abb. 29, Abb. 30). Zum Vergleich der Eigenschaften von gestörten und ungestörten Sandsteinen wurden Bohrdaten gesichtet und ausgewertet. Im Bereich der beschriebenen Sandsteinaquifere (Quickborn-Volpriehausen-Sandstein, Sandsteine des Mittelrhäts, Varel- und Unterer Elsfluth-Sandstein des Mittleren Juras) liegen jedoch nur wenige Bohrungen in der Nähe von Störungszonen. Zu bemerken ist, dass nur bei Vorhandensein von gezogenen Kernen Hinweise zu Störungen zu erwarten sind. Daher sind in den gesichteten Schichtenverzeichnissen, die meist auf Spülproben und Logs basieren, nur wenige Störungen beschrieben. Hydraulische Daten von gestörten Bereichen fehlen. Mit Hilfe der wenigen hydraulischen Daten der jeweiligen Sandsteine lässt sich nicht systematisch ableiten, dass Störungssysteme die Durchlässigkeit der angebundenen Sandsteine verbessern oder verschlechtern. Die Hinweise auf Klüfte und Harnische sowie eine Zementation der Klüfte eines Sandsteins können mit nahegelegenen Störungszonen kausal in Verbindung gebracht werden.

#### **Mittlerer Buntsandstein – Quickborn-Volpriehausen Sandstein**

Nur wenige Bohrungen, die den Mittleren Buntsandstein durchteuften, liegen in der Nähe von Störungszonen (z.B. nahe der Störungzone Mildstedt Nord, Störungzone Marne-Krempe und Störungzone Nusse). Im Bereich der Sandsteine sind keine Störungen in den Bohrdaten dokumentiert. Bei der Struktur Nusse im Südosten des Landes sind Klüfte im Bereich des Quickborn-Volpriehausen-Sandsteins beschrieben. Aus den Kernuntersuchungen lassen sich (im betreffenden Teufenbereich) keine signifikanten Erhöhungen der Permeabilität ableiten.

## **Rhät – Mittelrhät-Sandstein**

Es wurden Klüfte und Harnische in Bohrungen nahe der Looft-Störungszone, in zwei Bohrungen im südlichen und nördlichen Bereich der Flensburger Sieverstedt-Störungszone und in der Nähe der Störungszone Nusse dokumentiert. Hinweise auf Störungen und Klüfte bestehen im Bereich der Salzstruktur Honigsee-Warnau und an der Westflanke der Salzstruktur Heide. Die Klüfte können offen, mit Belegen versehen oder verheilt sein. Ein statistischer Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Klüften und Einfallen der Schichten zeichnet sich nicht ab. Zahlreiche Sandsteine weisen trotz des Auftretens von Klüften keine signifikante Porenraumzementation oder erhöhte Permeabilität auf.

## **Mittlerer Jura**

Störungen wurden in Bohrungen der KW-Datenbank im Bereich des Büsum Salzstockes (Mittelplate), im Bereich Bramstedt in der Nähe der Looft Störung, im Bereich Boostedt, Plön sowie Preetz an der Salzstruktur Warnau-Honigsee, bei Warnau und Plön-Ost sowie im Hohenhorner Trog dokumentiert. Zusätzlich zu Störungen existieren für die Sandsteine Informationen zu zahlreichen Klüften und Harnischen. Mit Anhydrit/Gips zementierte Sandsteine sind durch das Auftreten von Klüften und/oder durch ihre unmittelbare Nähe zu Salzstrukturen gekennzeichnet.

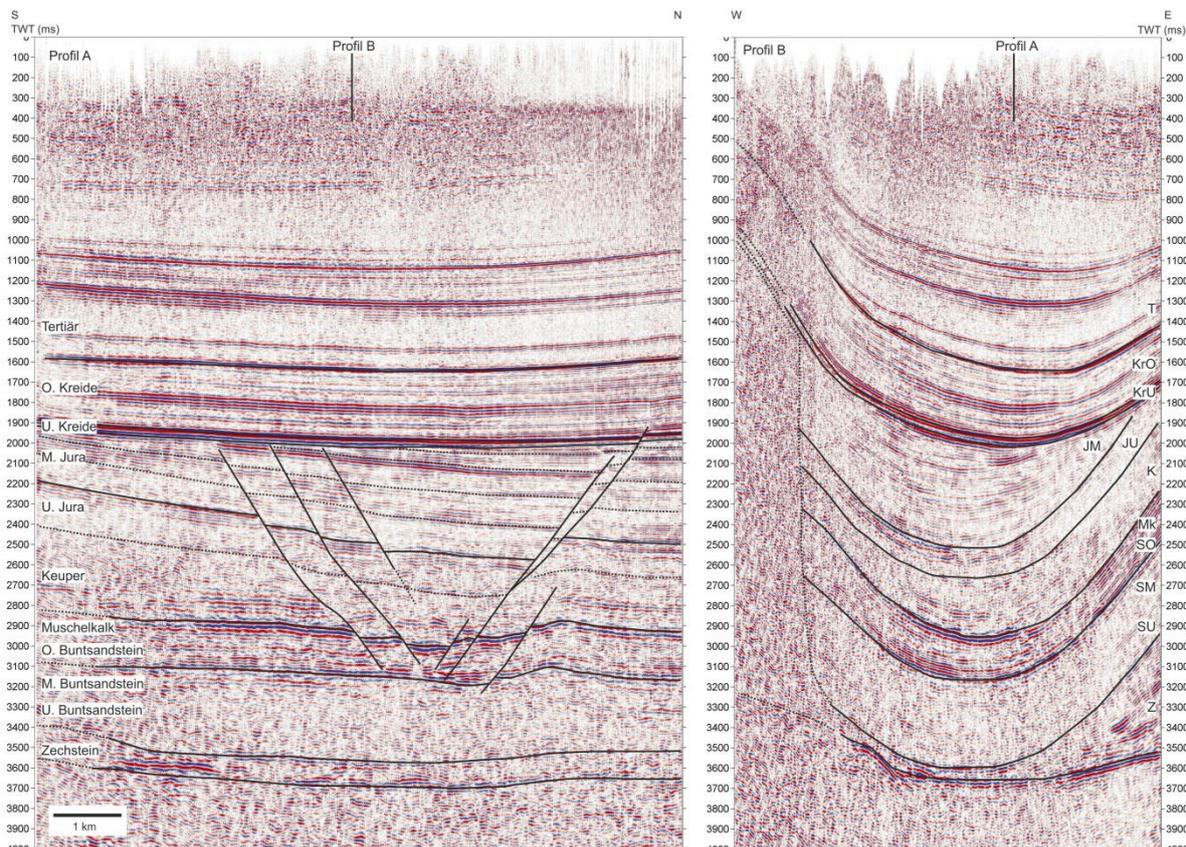
## **Mittlerer Jura – Fallbeispiel Ostholstein-Trog – Störungszone Warnau**

Als Fallbeispiel einer gestörten Sandsteinformation des Mittleren Juras wurde die Struktur Warnau im Ostholstein-Trog aufgrund der guten Datenabdeckung ausgewählt. Die Störungszone Warnau liegt im äußeren Ostholstein- (Jura) Trog und läuft in etwa WNW-ESE Richtung orthogonal in die Salzstruktur Warnau hinein. Die Struktur wird von einem 3D Survey abgebildet, der im Jahr 2007 entstand (RWE-DEA) und sich in nördlicher Richtung bis in den Kieler Raum erstreckt. Das Profil B (Abb. 31) zeigt die generelle Trogsituation, die Abfolgen des Juras sind hier weitgehend erhalten und werden diskordant von der Unterkreide abgedeckt. Am westlichen Profilrand beißen die Abfolgen der Trias und des Juras am Salzdiapir aus, der Kontaktbereich ist jedoch sehr unscharf und lediglich mit Hilfe der Bohrungen punktuell etwas genauer abschätzbar. Der Salzdiapir zeichnet sich durch ein „chaotisches“ Reflektionsbild unscharf ab. Das Dach wird in 1000 – 2000 m Tiefe von Unterkreide abgedeckt. Die Basis des Mittleren Juras liegt im Bereich Warnau in Teufen von 2000 – 3600 m (u. NHN).

Die Störungszone ist eine Grabenstruktur, bestehend aus Nord und Süd mit 50 – 70° einfallenden konvergierenden Störungen (Abb. 31, Profil A). Die Hauptstörungen besitzen eine horizontale Ausdehnung von etwa 11 km und reichen von der Salzstruktur bis vor den Ostrand des Troges. Vertikal erstrecken sich die Störungen von der Unterkreide bis in den oberen Bereich des Mittleren Buntsandsteins, die vertikale Ausdehnung beträgt etwa 3400 m.

Die Versatzbeträge der Abfolge des Mittleren Juras sind meist gering und liegen im Mittel bei 50 – 150 m. Die höchsten Versätze liegen bei 200 – 250 m und sind an der nördlichen Hauptstörung zu beobachten. Aus der vertikalen Reichweite der Störungen ist abzuleiten, dass diese Störungszone vermutlich im Oberen Jura entstand. Da die nördliche Hauptstörung in einem kleinen Areal in die unterste Oberkreide reicht, ist eine geringfügige Reaktivierung während der Oberkreide wahrscheinlich. Nördlich und südlich sind weitere Störungen dokumentiert, die jedoch nur in Teilbereichen kartiert wurden, da sie sehr kleinräumig in Salzstockrandlage liegen und teils nicht in den seismischen Daten erkennbar sind. Es sind lokal Störungen dokumentiert, die parallel zum

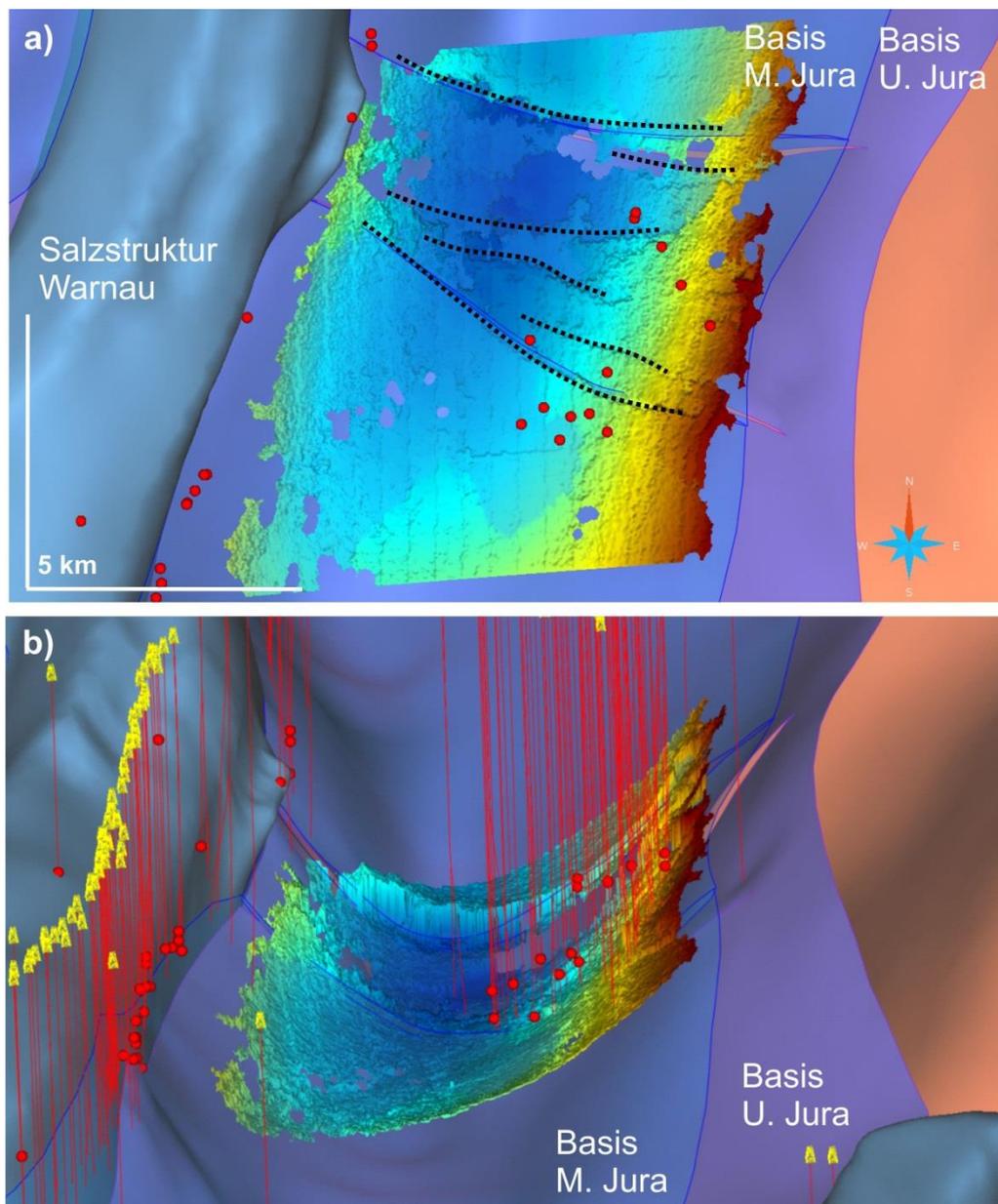
Salzdiapir verlaufen. An diesen Störungen sind Schichtabrisse und Aufschleppungen ableitbar. Es werden in unveröffentlichten Studien auch lokal überkippte Lagerungsverhältnisse beschrieben. Die Entstehung der Störungen kann zum Teil auf den Diapirismus zurückgeführt werden, der im Mittleren Keuper zunächst im Süden einsetzte und sich etwas später nach Norden ausdehnte. Diese erste diapirische Phase hielt bis in den Mittleren Jura an (Baldschuhn et al. 2001). Die nachfolgende Nachschubphase setzte im Oberen Jura ein und setzte sich bis in das Tertiär fort, wobei sich die Strukturabschnitte nicht gleichzeitig weiterentwickelten, sondern Nachschübe zeitweise auf den zentralen Teil beschränkt waren (Baldschuhn et al. 2001). Zum einen kommt es durch den Diapirismus zur Aufschleppung, Überkipfung und vertikalen Verstellung von Abfolgen in Salzstockrandlagen. Zum anderen können auch Spannungen durch die in Nord Süd Richtung zeitlich unterschiedliche Salzstockentwicklung zur Entstehung der Störungszonen geführt haben. Bei der Frage nach den Ursachen der Entwicklung dieser Störungzone muss der Einfluss des regionalen Spannungsfeldes im Oberen Jura berücksichtigt werden. Angaben hierzu aus anderen Regionen des Norddeutschen Beckens sind nicht einheitlich und bedingt übertragbar (z.B. Kockel 2002, Lohr 2007, Warsitzka et al. 2016).



**Abb. 31:** N-S (A) und W-E (B) orientierte seismische Profile im äußeren Ostholstein-Trog nahe der Salzstruktur Warnau zur Darstellung der Störungzone Warnau.

Der Bereich Warnau wird nicht nur durch seismische Daten abgedeckt, es existieren zudem sehr viele Bohrungen am Rand des Salzdiapirs und auch im Bereich des östlichen Ausbisses des Mittleren Jura, der im Fokus der Exploration stand (Abb. 32). Die Bohrungen enden daher auch meist im Mittleren Jura. In vielen Bohrungen werden Störungen mit den entsprechenden Schichtausfällen und Versätzen erwähnt. Oftmals sind auch Klüfte und Harnische beschrieben, die mit den Störungen entstanden

sein könnten. Die Klüfte bzw. Störungen sind oft und vor allem im Nahbereich der Salzmauer durch Anhydrit zementiert. Die Visualisierung der Störungsmarker zusammen mit Auswertungen von Reflektoren und Störungen der 3D Seismik bestätigen seismisch bekannte Störungen. Zudem zeigen die Störungsmarker der Bohrungen viele seismisch nicht detektierte Störungen. Durch die punktuellen Zusatzinformationen ergibt sich hieraus ein detaillierteres Bild der Struktur der Störungszone (Abb. 32). Die Sandsteine des Mittleren Juras und Oberen Keupers werden an den Störungen der Störungszone Warnau versetzt (Abb. 31) und es ist fraglich, ob dadurch die Durchlässigkeit und Porosität im Störungsbereich erhöht ist oder durch Prozesse wie z.B. Tonverschmierung oder auch Zementation verringert wird. Es existieren vereinzelte Hinweise auf eine Zementation des Porenraumes durch Anhydrit.



**Abb. 32:** Räumliche Ansicht des Mittleren Jura im Bereich der Salzstruktur Warnau. a) Aufsicht des Reflektors Basis M. Jura farbkodiert nach Tiefe (ca. 2000 - 3600 m u. NHN), Störungen (schwarz) und Störungsmarker der Bohrungen (rot), zusammen visualisiert mit Modellflächen der Salzstruktur Warnau, der Basis M. Jura und Basis U. Jura. b) Perspektivische Ansicht mit Blick in Richtung N (Bohrpfade und Störungsmarker in rot).

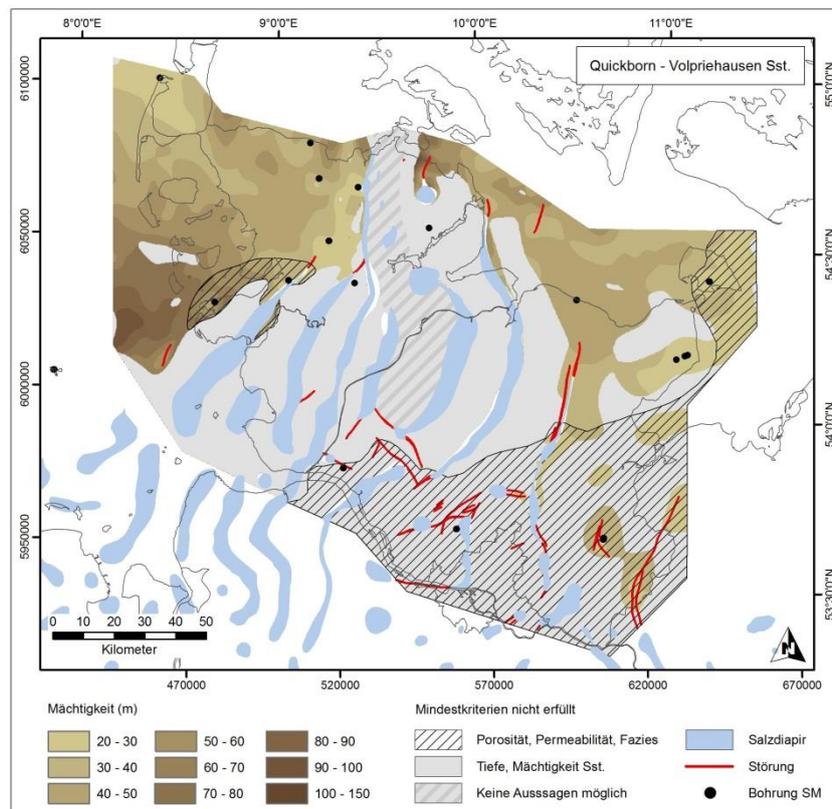
### 1.4.5 Untersuchungswürdige Gebiete

Zur wirtschaftlichen hydrothermalen Nutzung von Sandsteinaquiferen ergeben sich Mindestanforderungen an die Fördertemperatur und Fördermenge. Daraus abgeleitet werden von Beutler et al. (1994) geologische Kriterien wie Tiefe, Mächtigkeit, Porosität und Permeabilität mit der Empfehlung: Mindestmächtigkeit 20 m, Nutzporosität mindestens 20 %, Mindestpermeabilität 250 – 500 mD.

Aufgrund der mit der Tiefe stark abnehmenden Porositäten und Permeabilitäten werden die oben genannten Kriterien nur für Sandsteine im Tiefenbereich bis 3000 m angewendet. Ein zusätzliches Kriterium ist die lithofazielle Ausbildung der Sandsteine (Ausschluss bei anteilmäßig relevanten Tonmitteln oder Vertonung).

Außerhalb der als untersuchungswürdig bezeichneten Gebiete können Sandsteine angetroffen werden, die aufgrund geringer Mächtigkeit und/oder fazieller ungünstiger Entwicklung sowie aufgrund diagenetischer Einflüsse wenig untersuchungswürdig erscheinen. Aufgrund der teils unzureichenden Datenbasis ist eine geothermische Nutzung in diesen Gebieten jedoch nicht vollständig ausgeschlossen.

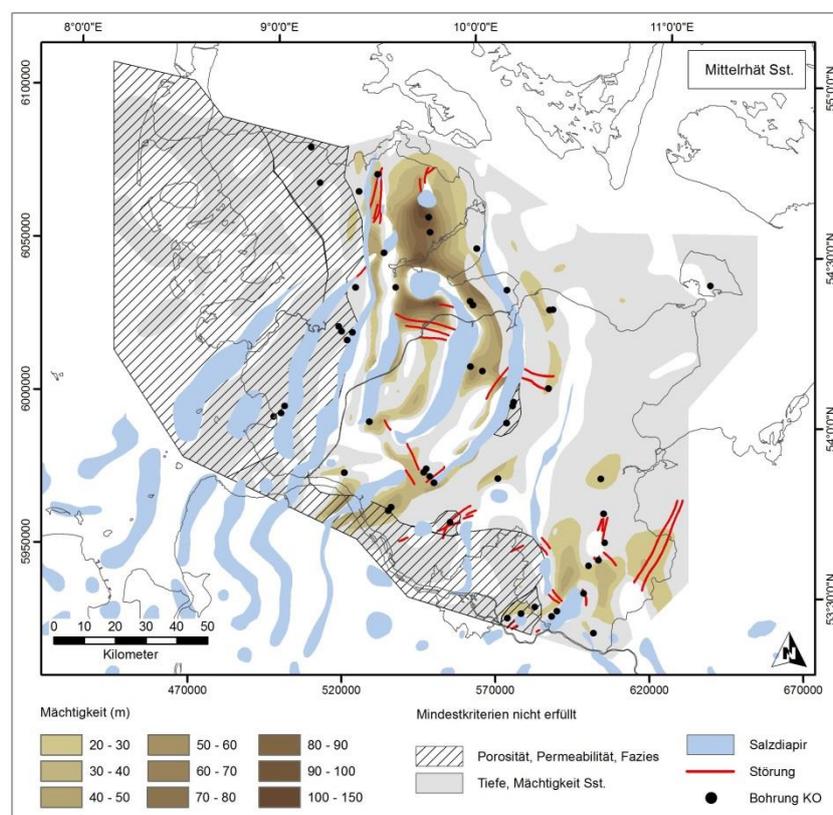
### Mittlerer Buntsandstein



**Abb. 33:** Darstellung der untersuchungswürdigen Gebiete für die hydrothermale Nutzung des Quickborn-Volpriehausen-Sandsteins (braun farbkodiert nach Mächtigkeit).

Untersuchungswürdige Gebiete hinsichtlich einer geothermischen Nutzung des Quickborn-Volpriehausen-Sandsteins sind der nördliche Ostholstein-Block und nördliche Glückstadt-Graben sowie der Westschleswig-Block (Abb. 33). An den Rändern und im Norden des Glückstadt-Grabens existieren Anbindungen an tiefreichende Störungszonen (z.B. Segeberg-Plön Störungszone). In weiten Teilen des Glückstadt-Grabens liegt der Quickborn-Volpriehausen-Sandstein zu tief (Abb. 33, graue Bereiche). Gebiete im Südosten und Norden wurden aufgrund von Einschaltungen von Tonmitteln, die zur Reduzierung der nutzbaren Mächtigkeit führen, ausgeschlossen. Ein Bereich am Westrand des Grabens wurde aufgrund zu niedriger Porositäten ausgeschlossen (<20%, Abb. 33, schraffiert). An einer Lokation ist dort jedoch eine ausreichend hohe Permeabilität belegt. In diesem Fall ist der Ausschluss mit größeren Unsicherheiten behaftet.

## Rhät

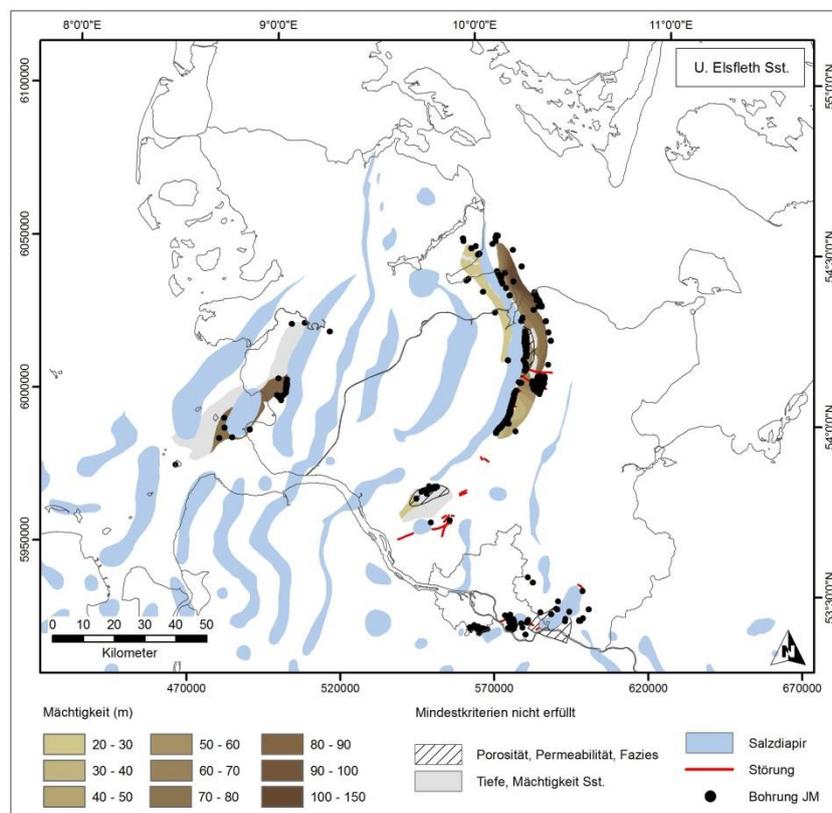
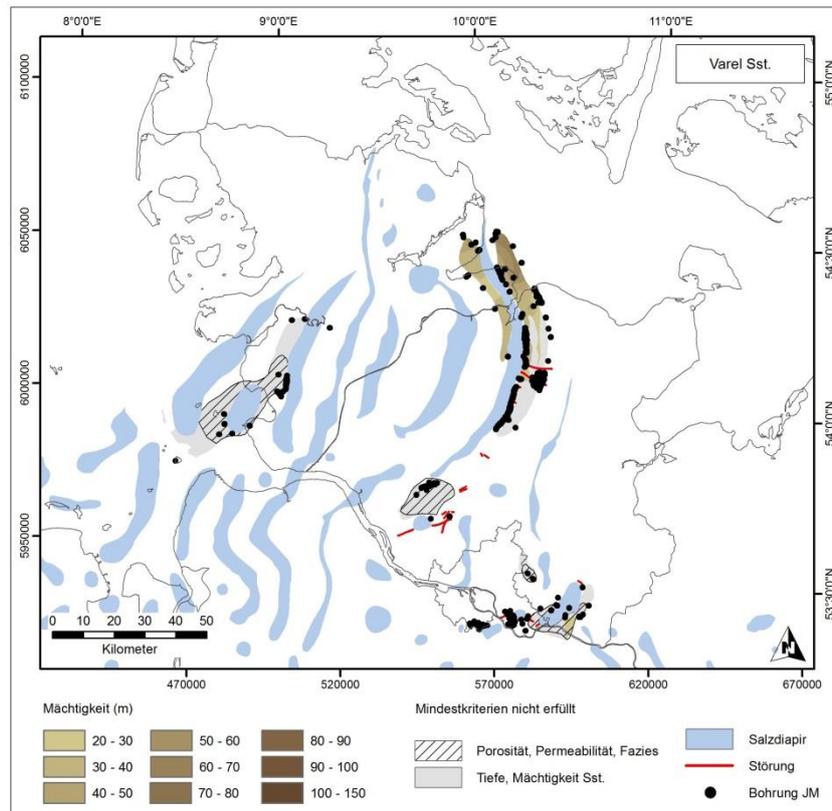


**Abb. 34:** Untersuchungswürdige Gebiete für die hydrothermale Nutzung des Mittelrhät Sandsteins (braun farbkodiert nach maximaler zusammenhängender Mächtigkeit).

Untersuchungswürdige Gebiete für die Sandsteine des Mittelrhäts sind der Zentralteil des Glückstadt-Grabens und der südliche Teil des Ostholstein-Westmecklenburg-Blocks (Abb. 34). Sie erfüllen hinsichtlich der Mächtigkeit und der hydraulischen Eigenschaften die Anforderungen einer hydrothermalen Nutzung. Der Ausschluss von Gebieten ist vor allem durch geringe Mächtigkeit und zu große Tiefe begründet. Im Westen und Süden sind zusätzlich fazielle Gründe gegeben.

Trotz fehlender Indizien zur hydraulischen Durchlässigkeit von Störungen, sollten gestörte Bereiche der Mittelrhät-Sandsteine zukünftig beachtet werden (z.B. Flensburg-Sieverstedt Störungszone, Looft-Itzehoe-Mönkloh Störungszone, Warnau-Honigsee Störungszone).

## Mittlerer Jura



**Abb. 35:** Untersuchungswürdige Gebiete für die hydrothermale Nutzung des Varel-Sandsteins (oben) und Unteren Elsfleth-Sandsteins (unten, braun farbkodiert nach Mächtigkeit).

Der Varel- und der Untere Elsfleth-Sandstein sind vor allem im mittleren und nördlichen Ostholstein-Trog als untersuchungswürdig einzustufen (Abb. 35). Es existieren einige Störungen, die orthogonal zur Salzstruktur orientiert sind. Nennenswert ist die Störungszone Warnau, die Nahbereiche bei der Salzstruktur sind jedoch aufgrund der Anhydritisierung des Porenraums nicht geeignet.

### **1.5 Diskussion – Fazit – Ausblick**

Das Ziel des Teilprojektes war die Modellierung und Parametrisierung von tiefreichenden Störungszonen und Sandsteinformationen des Glückstadt-Grabens zur Entwicklung und Optimierung von geothermischen Planungsgrundlagen. Hierbei wurden geometrische, strukturgeologische, lithologische und hydraulische Daten ausgewertet und zusammengeführt. Die vorliegende Studie gewährt einen landesweiten Überblick der potenziellen geothermischen Nutzungsoptionen und unterstützt damit die zukünftige Planung von darauf aufbauenden Detailstudien.

Die Karten des GTA waren Grundlage zur Konstruktion des Strukturmodells Glückstadt-Graben, da sie eine flächendeckende Interpretation der seismischen Profile darstellen und die komplette digitale Aufbereitung und Neuauswertung der Seismik im Zeitrahmen des Projektes nicht möglich gewesen wäre. Im Verlauf der geologischen Modellierung wurde der GTA weiterentwickelt und Unstimmigkeiten korrigiert. Zur Darstellung von tiefreichenden Störungszonen wurden Störungsflächen konstruiert und integriert. Es erfolgte eine weitere Differenzierung der Abfolge durch die Ergänzung von zwei wichtigen lithostratigraphischen Grenzflächen (Basis Oberer Keuper, Basis Mittlerer Buntsandstein). Darüber hinaus wurde das Modell der Salzstrukturen des Basismodells SH neu konstruiert und überarbeitet. Das Strukturmodell Glückstadt-Graben war Grundlage und ein struktureller Rahmen von Studien des Teilprojektes, so wurden z.B. geometrische Attribute des Störungsmodells verarbeitet und Informationen zur Verbreitung, Tiefenlage und Mächtigkeit von Reservoirkomplexen mit lithologischen und hydraulischen Daten kombiniert. Das Modell ist zukünftig vielseitig nutzbar – es wird dem geothermischen Informationssystem GeotIS zur Verfügung gestellt und ist als Informationsquelle für zukünftige Projekte relevant. Es kann für nachfolgende Studien wie 3D-Temperaturmodellierungen oder Simulationen von Prozessen verwendet werden. Gemäß dem Maßstab der Eingangsdaten (1:300.000) sowie der landesweiten Abdeckung bietet das Modell die Möglichkeit der Ableitung von großräumigen Trends und der Ausweisung von untersuchungswürdigen Gebieten. Es ersetzt jedoch keine Detailstudien in Teilgebieten. Zur Untersuchung des tieferen Untergrundes stehen Tiefbohrungen, seismische Daten und daraus abgeleitete Daten zur Verfügung, deren räumliche Abdeckung, Qualität, Genauigkeit, inhaltliche Vollständigkeit und Interpretation die Detailgenauigkeit und Aussagekraft der Ergebnisse bestimmt. Es verbleiben daher Unsicherheiten, die in Zukunft weiter minimiert werden müssen.

Es wurden ausgewählte seismische Daten räumlich visualisiert und mit Hilfe von Bohrungen in der Zeit-Domäne interpretiert. Der Vergleich dieser Auswertungen mit Daten des GTA und die Erfahrungen aus der Konstruktion des Modells ermöglicht eine erste Einschätzung der Aussagekraft und der Unsicherheiten in verschiedenen Strukturdomänen. Die Interpretation der Autoren des GTA kann, soweit momentan überprüfbar, größtenteils bestätigt werden. In verschiedenen strukturell komplexen und tieferen Bereichen des Glückstadt-Grabens existiert jedoch weiterer Untersuchungs- bzw. Forschungsbedarf (z.B. Flensburg-Sieverstedt Störungszone). Einige komplexe Bereiche sind nur von älteren seismischen Profilen abgedeckt, die zum Teil lediglich als Stapelsektionen vorliegen und

mitunter ein nicht interpretierbares Reflexionsbild aufweisen. In diesen Fällen stellt sich die Frage, inwieweit Reinterpretationen zukünftig möglich sind. Es kann festgestellt werden, dass einige stimmig kartierte Strukturen laterale und vertikale Ungenauigkeiten aufweisen. Dies betrifft zum Beispiel Ausbisse oder auch den Verlauf und die Lage von Störungen. Ein spezieller Fall ist die Abgrenzung von Salzdiapiren. Es ist zu vermuten, dass viele Salzstrukturen schmaler sind als heute dargestellt. Trotz der Schwierigkeit der lateralen Abgrenzung im seismischen Profil, könnte eine Neukartierung sinnvoll sein. Weitere Unsicherheiten betreffen die Tiefenlage, Mächtigkeitsentwicklung und Krümmung von Strukturen. Diese lokal auftretenden Unplausibilitäten bzw. Unsicherheiten (abseits von Bohrungen) sind teilweise auf das damals verwendete Geschwindigkeitsmodell (Jaritz et al. 1991) und die Zeit-Tiefen Konversion zurückzuführen. Um das Modell zukünftig überarbeiten und erweitern zu können, sollte zunächst das für den GTA verwendete Geschwindigkeitsmodell rekonstruiert werden. Damit kann das bestehende 3D-Modell in die Zeit Domäne konvertiert werden und es besteht die Möglichkeit neue seismische Auswertungen direkt in das Modell zu integrieren. Gewinnbringend ist z.B. die (partielle) Neukartierung des Störungssystems, die weitere Validierung der im GTA und im Modell dargestellten Einheiten und die Kartierung von Grenzflächen bzw. Reflektoren, die bisher über Mächtigkeitskarten rekonstruiert wurden. Ein weiterer umfangreicher Schritt zur Reduzierung der Unsicherheiten wäre die Überarbeitung des GTA Geschwindigkeitsmodells. Hierbei gilt es z.B. zu prüfen, ob das Geschwindigkeitsmodell die starken lateralen faziellen oder auch diagenetischen Änderungen im Glückstadt-Graben (z.B. im Keuper) ausreichend berücksichtigt.

In dem Teilprojekt ging es um die Modellierung und Charakterisierung von tieferreichenden Störungen des Glückstadt-Grabens, die unter bestimmten Voraussetzungen (z.B. Durchlässigkeit, Temperatur) geothermisch nutzbar sein können. Mit den in diesem Bericht vorliegenden Ergebnissen und nach zugrunde liegenden und durchgeführten Arbeiten können aufgrund fehlender Daten keine Aussagen zur hydraulischen Leitfähigkeit von Störungen, weder im Detail noch landesweit, getroffen werden. Bohrdaten bestätigen Klüfte und Störungen im Bereich von bekannten (und modellierten) Störungszonen und liefern punktuelle Hinweise auf Zementierungsprozesse. Modelldaten (und seismische Profile) liefern geometrische Informationen und ermöglichen die Rekonstruktion der Entstehungsgeschichte bzw. die Datierung der letzten Reaktivierung. Durch die Verwendung der Kriterien Alter, Länge und Versatz wurden Störungszonen als untersuchungswürdig selektiert, die potenziell einen hohen Zerrüttungsgrad aufweisen und weniger stark zementiert (verheilt) sein können. Hiernach sollten vor allem die relativ jungen Störungen an den Grabenrändern im Fokus von zukünftigen Studien stehen. Die Studie von Faults & Hinz (2015) zeigt, dass sich viele hydrothermale Systeme an den Enden von Abschiebungen, im Bereich von Relais Rampen oder kreuzenden Störungen befinden (siehe dazu auch Agemar et al. 2016, subm.). Im Glückstadt-Graben existieren zwar solche Strukturen. Es existieren jedoch keine bestätigenden Hinweise auf hydrothermale Systeme. Diese Sachverhalte sollten bei zukünftigen Studien beachtet werden. Zudem sollte das rezente Spannungsfeld im Glückstadt-Graben untersucht werden, damit Aussagen zur präferentiellen Öffnung von Störungen oder Klüften möglich sind.

Im Vorfeld von geothermischen Machbarkeitsstudien werden detaillierte Informationen zu Sandsteinformationen (und Störungszonen) benötigt, die nur durch Auswertung von Bohrdaten gewonnen werden können. Ein Problem hierbei stellen die mitunter großen Abstände der Bohrungen und die meist begrenzte vertikale Reichweite dar, die nur durch Methoden der Interpolation und geologischen Modellvorstellungen des Bearbeiters überbrückt werden können. Durch räumliche Korrelationen der Parameter kann festgestellt werden, ob großräumige Trends existieren, die von mehreren Bohrungen gestützt sind. Falls vorhanden, besitzen interpolierte Parameter zwischen

Bohrungen eine etwas höhere Aussagekraft. Trotz erkennbarer Trends zeigen Bohrdaten z.B. im Mittleren Jura mitunter deutliche kleinräumige lithologische und hydraulische Änderungen. Die daraus folgenden Unsicherheiten sind ohne neue Daten nicht ohne weiteres minimierbar. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die hydraulischen Parameter eine etwas höhere Variabilität aufweisen als z.B. Mächtigkeit oder lithologische Zusammensetzung.

Ein Ziel war die 3D-Modellierung von Sandsteinformationen zur Differenzierung der Reservoirkomplexe des Strukturmodells. Die durch Interpolation von Mächtigkeiten zwischen Bohrpunkten generierten Grenzflächen ermöglichen eine erste Eingrenzung von Nutzungsräumen. Es existieren zwar lokale tektonisch und halokinetisch bedingte kleinräumige Variationen, die nicht darstellbar sind, meist werden die landesweiten Trends jedoch von mehreren Bohrungen gestützt. Lokal begrenzt kann die Raumlage (Tiefenlage und Verbreitung) von Sandsteinen mittels seismischer Interpretation genauer kartiert werden, falls die entsprechenden Reflektoren identifiziert werden können. Aufgrund der limitierten vertikalen Auflösbarkeit von Strukturen in seismischen Profilen (ca. 10 – 20 m), müsste die Mächtigkeit dennoch zwischen Bohrlokationen interpoliert werden. Eine Teilstudie des Teilprojektes hat ergeben, dass die 3D-Darstellung der Lithologie eines Reservoirkomplexes in einem landesweiten 3D-Gittermodell problematisch, jedoch in kleineren Teilgebieten möglich ist. Ein Grund hierfür ist die strukturgeologische Komplexität im landesweiten Maßstab. Darüber hinaus müssten mehrere landesweit variierende Diskordanzen in das Gittermodell integriert werden, damit realistische Mächtigkeitsänderungen resultieren. Solche Gitterstrukturen können momentan mit GOCAD nicht konstruiert werden, da nur durchlaufende Diskordanzen definierbar sind. Das Problem kann möglicherweise durch Definition von virtuellen Bohrungen überbrückt werden.

Die Identifikation und Korrelation der Lithologie erfolgte anhand von Logdaten und Angaben aus Schichtenverzeichnissen. In einigen Fällen verhinderte jedoch die fehlende Datierung oder eindeutige Angaben zum Fossilinhalt eine stimmige stratigraphische Zuordnung. Daher wären biostratigraphische Untersuchungen an Kernen sinnvoll, damit eine genauere stratigraphische Einordnung, wichtigste Voraussetzung für die Bohrlochkorrelation, ermöglicht wird. Durch spezifische mineralogisch-sedimentologische Untersuchungen können mehr Informationen zur Petrographie (z.B. Feldspatanteil, Zemente) und zur Geometrie des Porenraums (hydraulische Eigenschaften in Abhängigkeit zum Sortierungsgrad) generiert werden.

Die Sandsteinhorizonte zeigen eine hohe Streuung der Permeabilitäts- und Porositätsdaten. Dabei führen diagenetische Prozesse, insbesondere bei Versenkungstiefen von mehr als 3000 m zu einer starken Abnahme der Porositäten und Permeabilitäten. Es ist zu bemerken, dass die hydraulischen Eigenschaften eines Sandsteins, in diesem Fall besonders die Porosität, nicht zwangsläufig von der faziellen Ausbildung abhängen. Die Visualisierung der lithologischen Auswertungen erfolgte durch Interpolation von Mächtigkeiten sowie durch die landesweite Darstellung der Faziesräume. Die Angaben zur Porosität und Permeabilität sind nicht räumlich darstellbar und werden daher in klassifizierter Form an Bohrlokationen angegeben.

Die Darstellung der untersuchungswürdigen Regionen zeigt, dass nahezu landesweit geothermische Nutzungsoptionen in verschiedenen Tiefenniveaus und Reservoirkomplexen bestehen könnten. Die Untersuchungen zu der geothermischen Relevanz von tiefreichenden Störungen führen zwar aufgrund der Datenlage nicht zu eindeutigen Aussagen, dennoch können die Störungssysteme im Norden und an den Rändern des Glückstadt-Grabens für weitergehende Studien als untersuchungswürdig ausgewiesen werden.

## 1.6 Referenzen

Agemar, T., Hese, F., Moeck, I., Stober, I. (2016): Kriterienkatalog für die Erfassung tieferreichender Störungen und ihrer geothermischen Nutzbarkeit in Deutschland. ZDGG, subm.

Aigner, T. & Bachmann, G.H. (1992): Sequence-stratigraphic framework of the German Triassic. *Sediment. Geol.* 80: 115-135.

Aydin, A. (2000): Fractures, faults, and hydrocarbon entrapment, migration and flow. *Marine and Petroleum Geology* 17:797-814.

Baermann, A., Kröger, J., Taug, R., Wüstenhagen, K., Zarth, M. (2000): Anhydritzemente im Rhätsandstein Hamburgs – Morphologie und Strukturen. *Z. angew. Geologie*, 46: 144-152.

Baldschuhn, R., Binot, F., Fleig, S., Kockel, F. (2001): Geotektonischer Atlas von Nordwestdeutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor. *Geol. Jb., Reihe A* 153.

Beutler, G., Röhling, H.G., Schulz, R. & Werner, K.H. (1994): Geothermie Nordwestdeutschland – Regionale Untersuchungen von geothermischen Reserven und Ressourcen in Nordwestdeutschland. – Unveröff. Bericht, Archiv.-Nr. 111758: 161 S., Hannover (Inst. für Geowiss. Gemeinschaftsaufgaben).

Beutler, G. (1995): Stratigraphie des Keupers. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hannover). Archiv Nr.113087 (unveröffentlichter Bericht). S. 147ff.

Boigk, H. (1959): Zur Gliederung und Fazies des Buntsandsteins zwischen Harz und Emsland. *Geol. Jb.*, 76: 597-636. Hannover.

Boigk, H. (1981): Erdöl und Erdölgas in der Bundesrepublik Deutschland: Erdölprovinzen, Felder, Förderung, Vorräte, Lagerstättentechnik. 2 Falttaf., 51 Tab. Enke.

Brand, E. & Hoffmann, K. (1963): Stratigraphie und Fazies des nordwestdeutschen Jura und Bildungsbedingungen seiner Erdöllagerstätten. *Erdöl u. Kohle*, 16: 468-477. Hamburg.

Brand, E. & Mönnig, E. (2009): Litho- und Biostratigraphie des Mittel-Jura (Dogger) in Bohrungen Norddeutschlands. – In: Beitrag zur Stratigraphie von Deutschland, *Z. dt. geol. Ges.*, 54.

Brückner-Röhling, S., Fleig, S., Forsbach, H., Kockel, F., Krull, P. & Wirth, H. (2004): Die Bewegungsphasen tektonischer Störungen im Tertiär Norddeutschlands – Ergebnisse struktureologischer Untersuchungen. *Z. geol. Wiss.* 32 (5/6): 295-321.

Clauser, C. & Pape, H. (2003): Das Erkennen, Beschreiben und Erklären von Mustern der Permeabilitätsverteilung in zementierten Speichergesteinen mit geophysikalischen Logs, fraktalen Strukturmodellen und gekoppelten numerischen Simulationen. Endbericht des DFG Projektes CL 121/11-1, RWTH Aachen.

Doornenbal, H., Stevenson, A. (2010): Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area. Houten, Netherlands, European Association of Geoscientists & Engineers.

Faulds, J. E. & Hinz, N. (2015): Favorable Tectonic and Structural Settings of Geothermal Systems in the Great Basin. Proceedings World Geothermal Congress 2015, 19-25 April 2015, Melbourne, Australia. #11100.

Feist-Burkhardt, S., Götz, A. E., Szulc, J., Borkhataria, R., Geluk, M., Haas, J., Hornung, J., Jordan, P., Kempf, O., Michalik, J., Nawrocki, J., Reinhardt, L., Ricken, W., Röhling, H.-G., Ruffer, T., Török, A., Zuhlke, R. (2008): Triassic. - In: McCann, T. (Eds.): The Geology of Central Europe. Volume 2: Mesozoic and Cenozoic. Chapter 13, 749-822. Geological Society, London.

Feldrappe, H., Obst, K., Wolfgramm, M. (2008): Die mesozoischen Aquifere des Norddeutschen Beckens und ihr Potential für die geothermische Nutzung. Z. geol. Wiss 36 (4-5): 199-222.

Fisher, W.L., Brown, L.F., Scott, A.J., McGowen, J.H. (1976): Delta Systems in the Exploration for Oil and Gas; A research Colloquium, Bureau of economic geology. University of Texas, Austin.

Fisher, Q.J., Knipe, R.J. (2001): The permeability of faults within siliclastic petroleum reservoirs of the North Sea and Norwegian Continental Shelf. Marine and Petroleum Geology 18: 1063-1081.

Franz, M. & Wolfgramm, M. (2008): Sedimentologie, Petrologie und Fazies geothermischer Reservoirs des Norddeutschen Beckens am Beispiel Exter-Formation (Oberer Keuper, Rhaetium) NE-Deutschlands. Z. geol. Wiss, 36: 223-247.

Fuchs, S. & Balling, N. (2016): Improving the temperature predictions of subsurface thermal models by using high-quality input data. Part 1: Uncertainty analysis of the thermal-conductivity parameterization. Geothermics 64: 42-54.

Fuchs, S. & Balling, N. (2016): Improving the temperature predictions of subsurface thermal models by using high-quality input data. Part 2: A case study from the Danish-German border region. Geothermics 64: 1-14.

Geluk, M.C. (2005): Stratigraphy and tectonics of Permo-Triassic basins in the Netherlands and surrounding areas. Dissertation. Utrecht University.

Geluk, M.C. & Röhling, H.-G. (1997): High-resolution sequence stratigraphy of Lower Triassic Buntsandstein in the Netherlands and northwestern Germany. Geologie en Mijnbouw 76: 227-246.

Heidbach, O., Tingay, M., Barth, A., Reinecker, J., Kurfeß, D., & Müller, B. (2010): Global crustal stress pattern based on the World Stress Map database release 2008. Tectonophysics, 482(1-4): 3-15, doi:10.1016/j.tecto.2009.07.023.

Hese, F. (2012): 3D-Modellierungen und Visualisierung von Untergrundstrukturen für die Nutzung des unterirdischen Raumes in Schleswig-Holstein. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Jaritz, W. (1969): Epirogenese in Nordwestdeutschland im höheren Jura und in der Unterkreide. Geol Rundsch 59: 114-121, doi:10.1007/BF01824946.

Jaritz, W. (1980): Einige Aspekte der Entwicklungsgeschichte der nordwestdeutschen Salzstöcke. Zeitschr Dt Geol Gesellschaft, 131: 307–408.

Kaufhold, H., Hable, R., Liebsch-Dörschner, T., Thomsen, C. & Taugs, R. (2011): Verbreitung und Eigenschaften mesozoischer Sandsteine sowie überlagernder Barrieregesteine in Schleswig-Holstein und Hamburg – Basisinformationen zur energiewirtschaftlichen Nutzung des tieferen Untergrundes. – In: Müller, C. & Reinhold, K. (Hrsg.): Geologische Charakterisierung tiefliegender Speicher- und Barrierehorizonte in Deutschland – Speicher-Kataster Deutschland. – Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Heft 74: 38-60; Hannover.

Kockel, F. (1998): Die paläogeographische und strukturelle Entwicklung NW-Deutschlands - Band1. Geotektonischer Atlas von NW-Deutschland 1:300.000, BGR.

Kockel, F. (2002): Rifting processes in NW-Germany and the German North Sea Sector. Netherlands Journal of Geosciences / Geologie en Mijnbouw 81 (2): 149-158.

Kolyukhin, D. & Torabi, A. (2012): Statistical analysis of the relationships between faults attributes. Journal of Geophysical Research, 117.

Kuehn, M. & Günther, A. (2007): Stratabound Rayleigh convection observed in a 4D hydrothermal transport model based on the regional geological evolution of Allermöhe (Germany). Geofluids, 7: 301-312.

Lohr, T. (2007): Seismic and sub-seismic deformation on different scales in the NW German Basin. Dissertation, Freie Universität Berlin.

Littke, R., Bayer, U., Gajewski, D., Nelskamp, S. (2008): Dynamics of Complex Intracontinental Basins: The Central European Basin System: 590 S., Berlin/Heidelberg (Springer).

Maystrenko, Y. (2005): Evolution and structure of the Glueckstadt Graben by use of borehole data, seismic lines and 3D structural modelling, NW Germany. Dissertation, Freie Universität Berlin.

Maystrenko, Y., Bayer, U., Scheck-Wenderoth, M. (2005): The Glueckstadt Graben, a sedimentary record between the North and Baltic Sea in north Central Europe. – Tectonophysics, 397: 113–126, Amsterdam.

Maystrenko, Y., Bayer, U., Scheck-Wenderoth, M. (2013): Salt as a 3D element in structural modeling—example from the Central European Basin System. Tectonophysics 591: 62–82.

Nitsch, E. (1996): Fazies, Diagenese und Stratigraphie der Grabfeld-Gruppe Süddeutschlands (Keuper, Trias). Dissertation. Universität Köln.

Olsen, H. (1988): The architecture of sandy braided-meandering river system: an example from the Lower Triassic Solling Formation (M Buntsandstein) in W-Germany. *Geol Rundsch* 77: 797-814.

Paul, J. (1999): Fazies und Sedimentstrukturen des Buntsandsteins. – In: Hauschke, N. und Wilde, V. (Hrsg.): *Trias- eine ganz andere Welt*. 105-114. München.

Paul, J., Wemmer, K., Ahrendt, H. (2008): Provenance of siliciclastic sediments (Permian to Jurassic) in the Central European Basin. *Z. dt. Ges. Geowiss.*, 159/4: 641–650, Stuttgart.

Reinhardt, L., Ricken, W. (2000): The stratigraphic and geochemical record of playa cycles: monitoring a Pangean monsoon-like system (Triassic, Middle Keuper, S. Germany). *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol* 195: 99-124.

Röckel, T. & Lempp, C. (2003): Der Spannungszustand im Norddeutschen Becken. *Erdöl Erdgas Kohle* 119. Jg., Heft 2.

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 CO<sub>2</sub>-MoPa Modellierung und Parametrisierung von CO<sub>2</sub>-Speicherung in tiefen, salinen Speichergesteinen für Dimensionierungs- und Risikoanalysen; Vorhaben: Dimensionierung und Risikoanalysen bei der CO<sub>2</sub>-Speicherung - Sonderprogramm GEOTECHNOLOGIEN; 107 S., LLUR SH, Flintbek.

Rider, M. & Kennedy, M. (2011): *The Geological Interpretation of Well Logs*. Rider-French Consulting Limited, 3rd Revised edition, Glasgow.

Röhling, H.-G. (1999): The Quickborn Sandstone – a new stratigraphic unit in the Lower Triassic of the Mid-European Basin.- In: Bachmann, G.H. & Lerche, I. (Eds.): *The Epicontinental Triassic*. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie* 7-8: 797-812.

Rodon, S. & Littke, R. (2005): Thermal maturity in the Central European Basin system (Schleswig-Holstein area): results of 1D basin modelling and new maturity maps. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)*, 94: 815–833.

Roman, A. (2004): Sequenzstratigrafie und Fazies des Unteren und Mittleren Buntsandsteins im östlichen Teil des Germanischen Beckens (Deutschland, Polen). Dissertation. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.

Rüddiger, G. (1957) Petrographische und fazielle Ausbildung der Doggersande Schleswig-Holsteins. *Erdöl u. Kohle*, 10: 349-355. Hamburg.

Seeling, M., Kellner, A. (2002): Sequenzstratigraphie des Nor und Rhät im Nordwestdeutschen Becken unter Berücksichtigung Süddeutschlands. *Z. dt. geol. Ges.*, 153: 93-114; Stuttgart.

Thomsen, C. (2004): Geothermische Nutzhorizonte in Schleswig-Holstein. In: Thomsen, C., Kirsch, R., Liebsch-Dörschner, T.: Geothermie in Schleswig-Holstein. Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein, Flintbek.

Tietze, K. W. (1982): Zur Geometrie einiger Flüsse im Mittleren Buntsandstein (Trias). Geol Rundsch. 71: 813-828.

Torabi, T. & Berg, S.S. (2011): Scaling of fault attributes: A review. Marine and Petroleum Geology 28: 1444-1460.

Trusheim, F. (1961): Über Diskordanzen im Mittleren Buntsandstein Norddeutschlands zwischen Ems und Weser. – Erdöl Zeitschrift, 79: 277-292, Wien/Hamburg.

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. Int J Earth Sci (Geol Rundsch), 1-25.

Weber, H. (1977): Salzstrukturen, Erdöl und Kreidebasis in Schleswig-Holstein – Geologisches Landesamt Schleswig-Holstein: 106 S., Kiel.

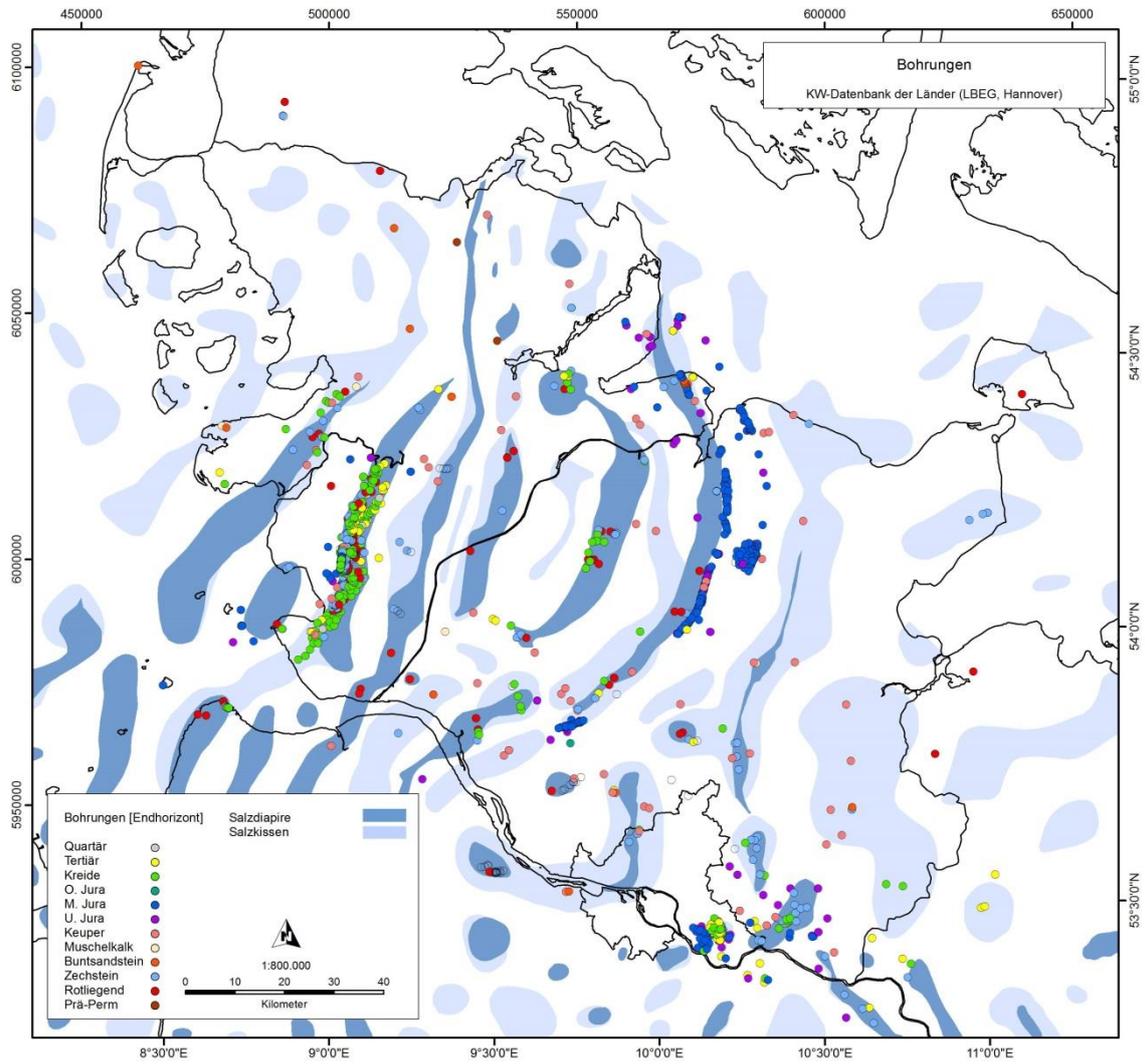
Wolfgramm, M., Karp, T., Lenz, G., Thorwart, K, Taug, R. (2010): Tiefengeothermische Erkundung in Hamburg-Wilhelmsburg. Der Geothermiekongress 2010, Karlsruhe, technical paper.

Wolfgramm, M., Franz, M., Agemar, T. (2014): Explorationsstrategie tiefer geothermischer Ressourcen am Beispiel des Norddeutschen Beckens. – In: Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H. , Neu, T. (Hrsg.): Handbuch Tiefe Geothermie: Prospektion, Exploration, Realisierung, Nutzung. Springer Spektrum, Berlin/Heidelberg.

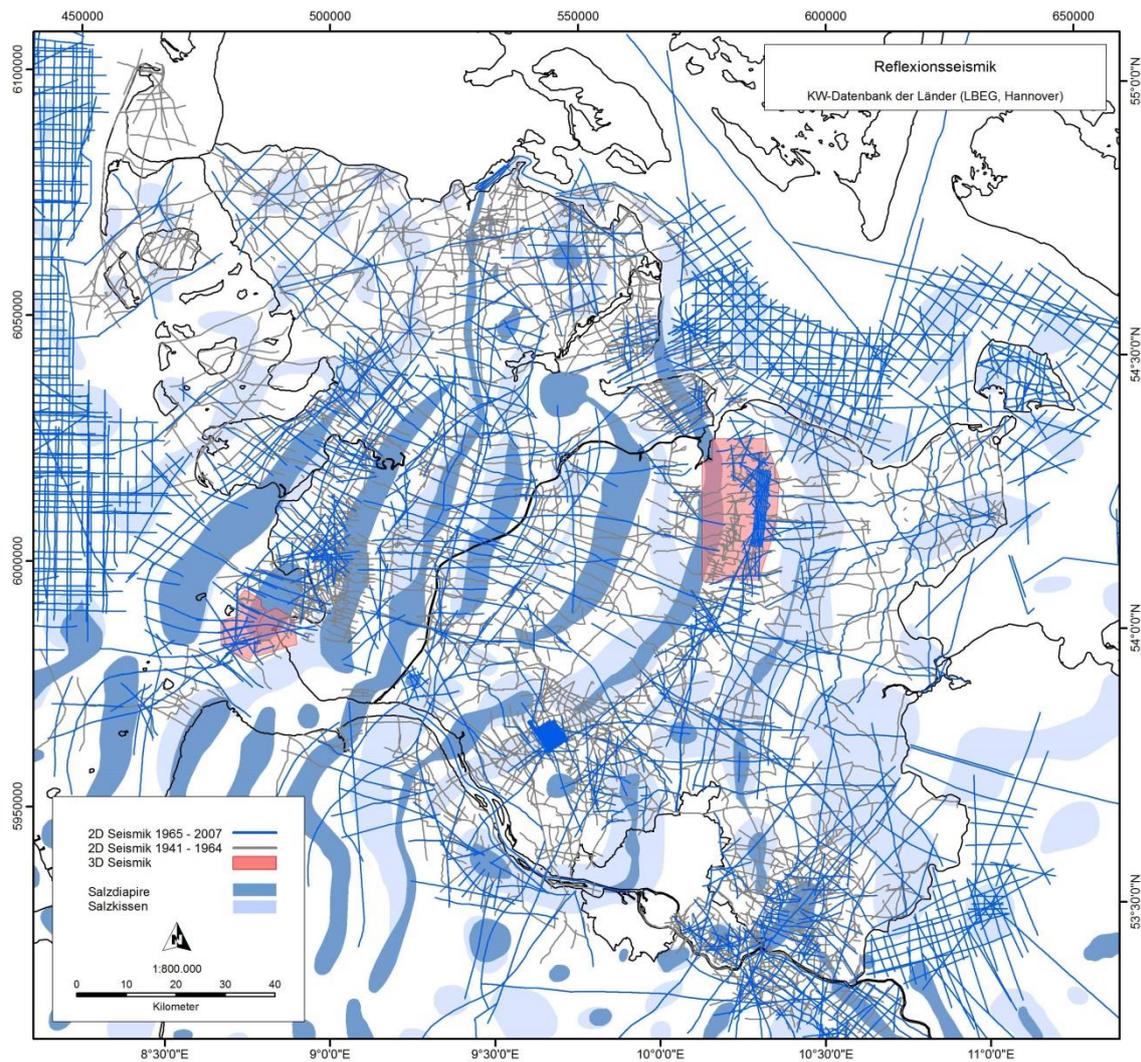
Ziegler, P. (1990): Geological Atlas of Western and Central Europe. Shell International Petroleum Mij.B.V., The Hague.

Zimmermann, J. , Franz, M., Heunisch, C., Luppold, F. W., Mönnig, E., Wolfgramm, M. (2015): Sequence stratigraphic framework of the Lower and Middle Jurassic in the North German Basin: Epicontinental sequences controlled by Boreal cycles. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 440: 395-416.

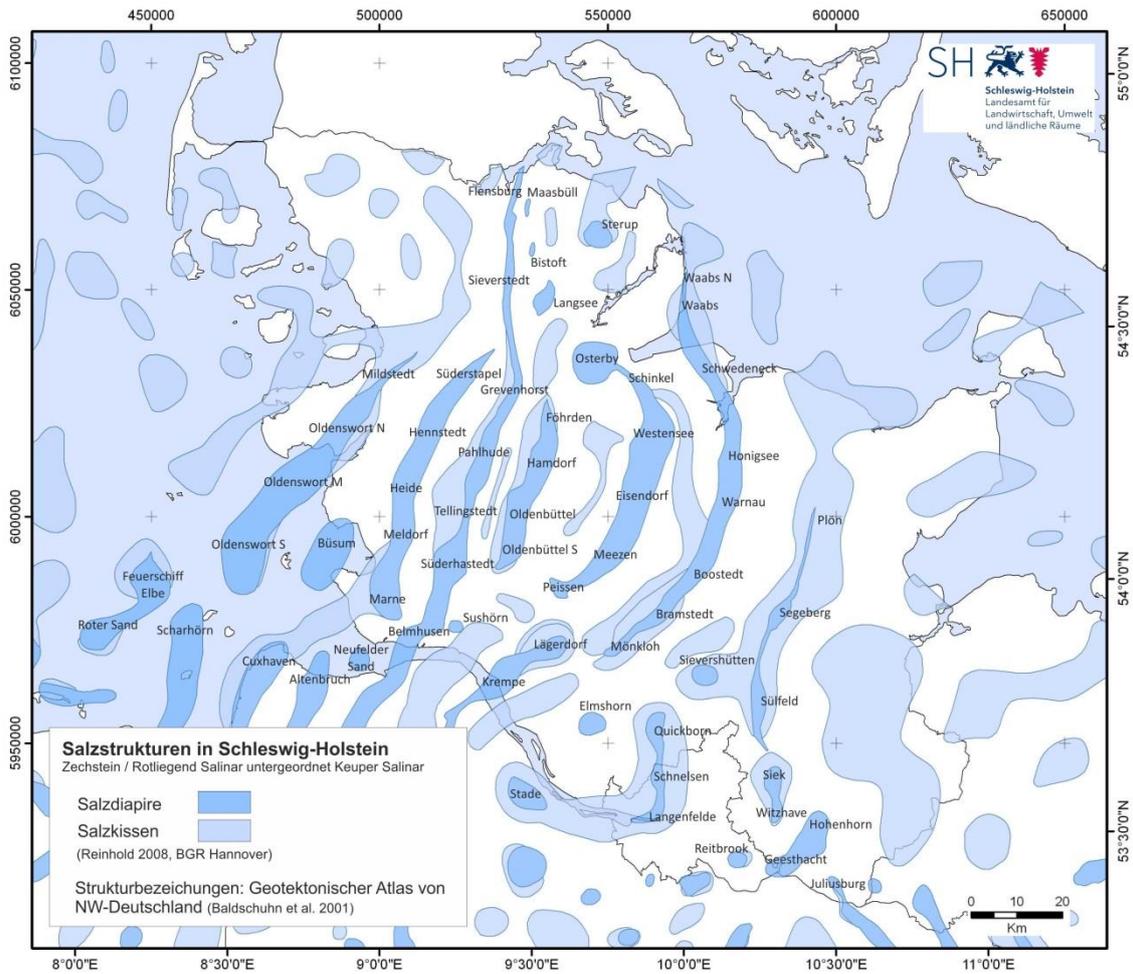
## 1.7 Anhang



**Abb. A1:** Bohrungen der KW-Datenbank der Länder (LBEG, Hannover) farbkodiert nach Endhorizont.



**Abb. A2:** Seismische Daten der KW-Datenbank der Länder (LBEG, Hannover).



**Abb. A3:** Verbreitung und Bezeichnung der Salzstrukturen gemäß Baldschuhn et al. (2001).

Periode / Epoche		Alter / Formation	3D Modell	Geotektonischer Atlas von NW-Deutschland	
Quartär	Tertiär	ca. 1,8			
		Pliozän		tmiR - tpi	
		Miozän		tmu	
		Oligozän	Chatt		tolm - tolo
		Eozän	Rupel		teom - tolu
Kreide	Oberkreide	ca. 65			
		Maastricht			
		Campan			
		Santon			
		Coniac			
	Unterkreide	Turon			kro (+td)
		Cenoman			
		Alb			
		Apt			
		Barrême			
Jura	Oberjura (Malm)	ca. 145			
		Berrias / Wealden			
		Tithon			jo (+Wd)
	Mitteljura (Dogger)	Kimmeridge			
		Oxford			
		Callov			
	Untejura (Lias)	Bathon			
		Bajoc			jutco - jmclo
		Aalen			
Trias	Keuper	ca. 205			
		O			
		M			
		U			
		Lettenkeuper			k
	Muschelkalk	Ob. Muschelkalk			
		Mittl. Muschelkalk			
	Buntsandstein	O			so
		M			
		U			
Bernburg-Folge					
Calvörde-Folge				su	
Perm	Zechstein	ca. 250			
		Fulda-Folge			
		Friesland-Folg			
		Ohre-Folge			
		Aller-Folge			
		Leine-Folge			
		Stälfurt-Folge			
Werra-Folge			z		
Rotliegend	Oberrotliegend				
	Unterrotliegend				
Karbon	Oberkarbon				

**Abb. A4:** Lithostratigraphische Differenzierung des Modells (verwendete Restmächtigkeitskarten des GTA sind rot markiert). Die Position der zusätzlich vorliegenden Grenzflächen der Sandsteinformationen sind nicht dargestellt.

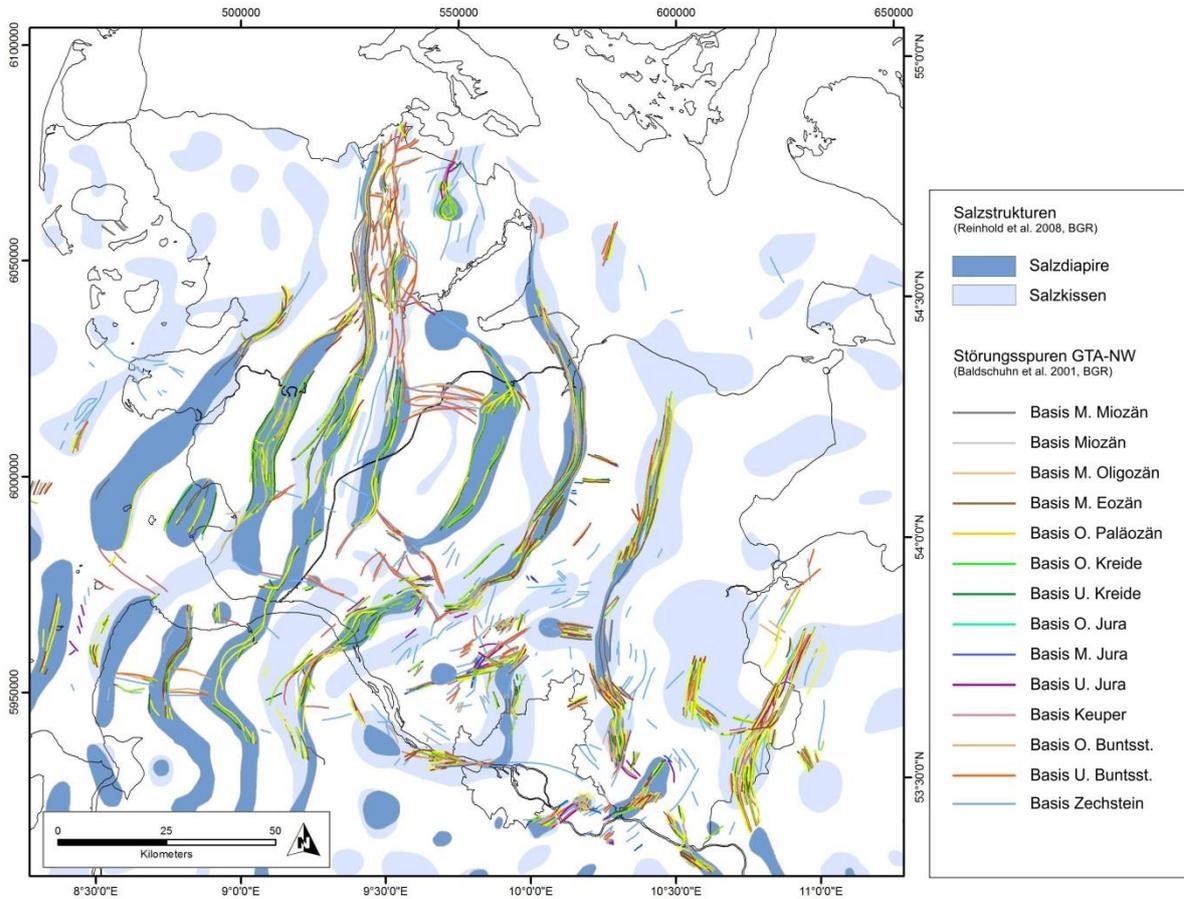


Abb. A5: Störungsspuren des Geotektonischen Atlas (Baldschuhn et al. 2001).

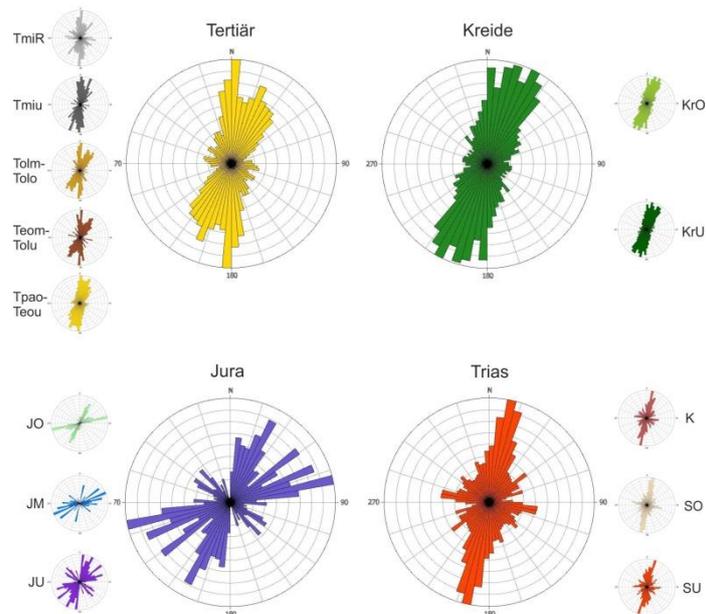
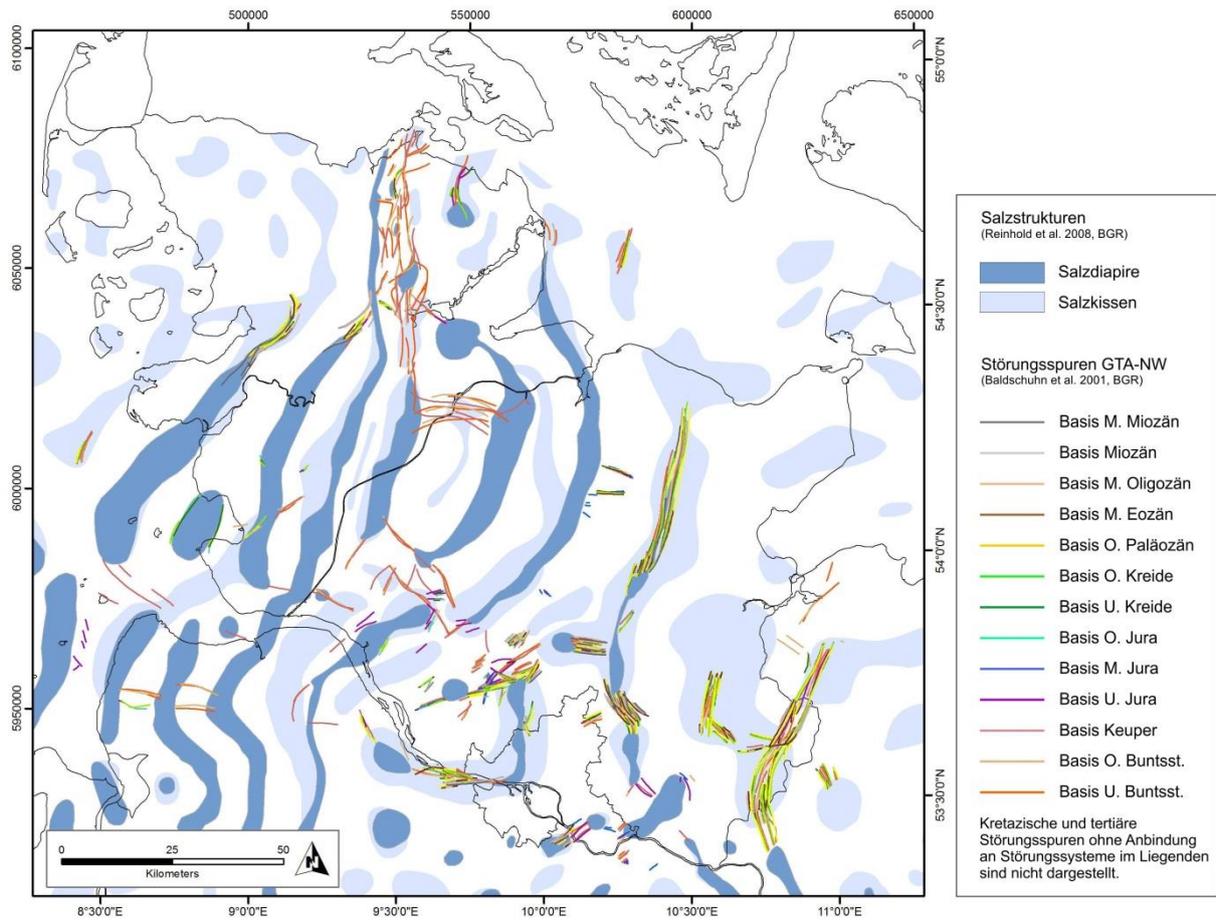
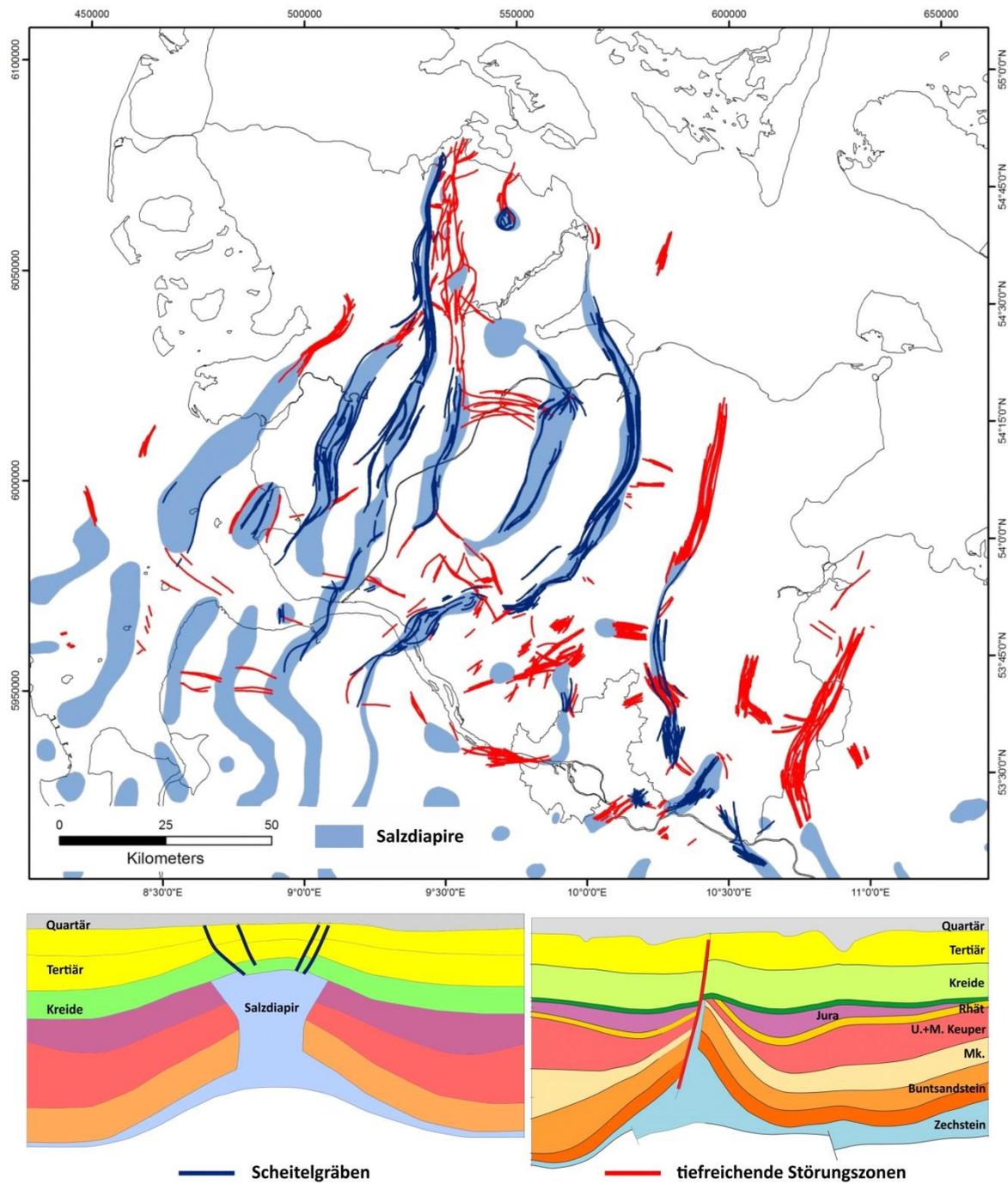


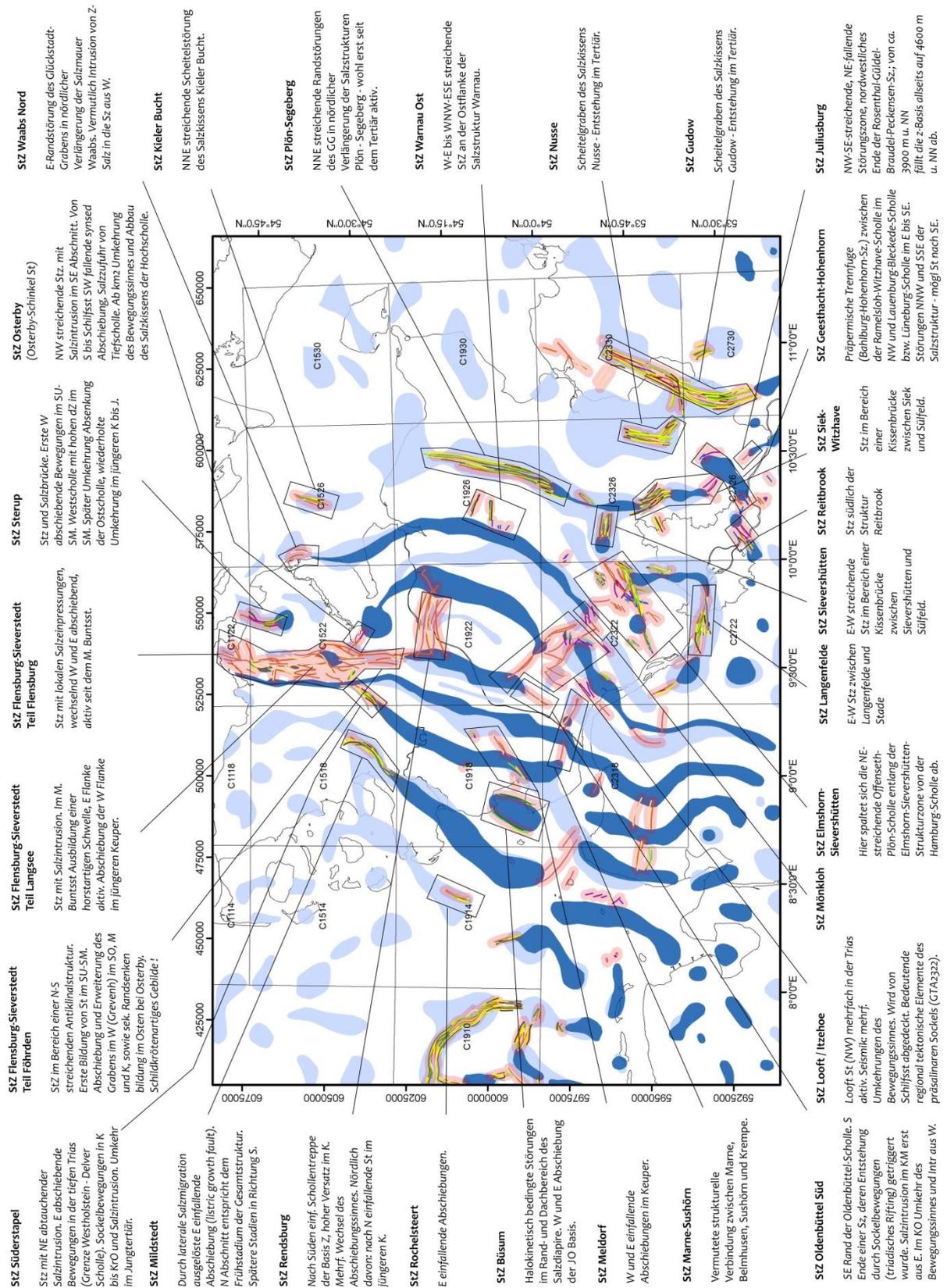
Abb. A6: Orientierung der Störungsspuren des Geotektonischen Atlas (Baldschuhn et al. 2001).



**Abb. A7:** Störungsspuren von tiefreichenden Störungen (Baldschuhn et al. 2001). Störungsspuren von Scheitelgräben sind nicht dargestellt.



**Abb. A8:** Störungsspuren von Scheitelgräben (blau) und tiefreichenden Störungszonen (rot) zwischen Basis Buntsandstein und Basis M. Miozän (GTA).



**Abb. A9:** Störungen wurden in Störungszonen zusammengefasst und gemäß den Angaben im GTA bezeichnet. Die Notizen sind kurze Auszüge aus Berichten des GTA 1:100.000 (verschiedene Bearbeiter, BGR).

## 2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises umfassen Personalstellen, die Beschaffung von leistungsfähigen PC-Einheiten und die notwendigen Reisekosten für den internen Informationsaustausch im Projekt sowie für die Vorstellung der Ergebnisse auf Tagungen.

Kostenart	812	831	843	846	850
Zweck	Personalkosten	Literatur	Allgemeine Sachausgaben	Reisen	Investitionen bis € 5.000,-
Ausgaben in €	336.295,77	356,19	390,59	4.608,57	8.748,88

**Tab. 1:** Überblick über die bewilligten Mittel (inkl. Personalkosten). Die Einstellung des Personals und die Einrichtung der Arbeitsplätze (Investitionen bis 5.000 €) wurden 2014 vorgenommen.

## 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Zur Erarbeitung des 3D-Strukturmodells und die Parametrisierung der geothermisch relevanten Sandsteininformationen zeigte sich der Einsatz von zwei Personalstellen als angemessen und notwendig. Die sonstigen Kosten (Sachmittel, Reisekosten und Investitionen) bewegen sich im notwendigen Rahmen. Dabei waren die Investitionen (Leistungsfähige PC-Einheiten) Grundvoraussetzung für die Durchführung des Vorhabens.

## 4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die Ergebnisse des Vorhabens sind wichtige Grundlagen im Vorfeld einer wirtschaftlichen geothermischen Nutzung von tiefreichenden Störungszonen und tiefen Aquiferen. Die Forschungsergebnisse tragen dazu bei, das Fündigkeitsrisiko zu vermindern und eine geothermische Nutzung voranzubringen. Alle neuen (nicht vertrauliche oder freigegebene) Daten, wie z.B. das 3D-Strukturmodell Glückstadt Graben, Modelldaten von Störungszonen und Aquiferen, sowie lithologische und hydraulische Informationen sind zugänglich, können also von Behörden, Kommunen, Firmen oder sonstigen Interessierten genutzt werden, und werden über das Geothermische Informationssystem für Deutschland (GeotIS) zur Verfügung gestellt.

## 5. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die Vorgehensweise zur Erfassung und Darstellung mittels 3D-Untergrundmodellierungen wird mittlerweile von mehreren Institutionen verstärkt verfolgt. Auf nationaler Ebene sind hier die Projekte der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), des Geoforschungszentrums Potsdam (GFZ) und des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) sowie weitere Forschungsansätze der Universitätsinstitute zu nennen. Daneben existieren diverse geothermische Potenzialstudien mit ähnlichen methodischen Ansätzen der 3D-Modellierung und Parametrisierung des Untergrundes (z.B. F&E Projekt 3D Modell der geothermischen Tiefenpotenziale von Hessen, Interreg Projekt GeORG, EU Projekt GeoMol). Auf Grund der Vielzahl der verschiedenen Projekte wird auf eine detaillierte Angabe verzichtet. Gerade zur Darstellung komplexer geologischer Systeme und Ableitung von Risikoszenarien werden die Modelle als Grundlage für Simulationen genutzt. Zusätzlich ist hier auch das Anschlussprojekt GeoFaces (Gemeinschaftsprojekt) des LIAG, des KIT und des Staatlich Geologischen Dienstes Mecklenburg-Vorpommern zu benennen. In dem Projekt sollen die geothermischen Potenziale von Erosionsdiskordanzen erfasst werden.

## 6. Gesamtliste der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen und Vorträge

Hese, F. (2013): Projekt GeoPower – Grenzüberschreitende Erkundung geothermischer Potentiale in Schleswig-Holstein und Dänemark. – 6. Norddeutsche Geothermietagung, 23. – 24. Oktober 2013, Geozentrum Hannover, Vortrag.

Hese, F. (2013): 3D Modellierung von tiefen geothermischen Reservoirformationen im Norden von Schleswig-Holstein. – Der Geothermiekongress 2013, 12. – 14. November 2013, Essen, Vortrag.

Hese, F., Kirsch, R. (2013): Projekt GeoPower - Grenzüberschreitende Erkundung geothermischer Potenziale im Norden Schleswig-Holsteins und Süden Dänemarks. AMS Online - Advanced Mining Solutions, 04/2013, S. 35-39, [www.advanced-mining.com](http://www.advanced-mining.com).

Hese, F. (2014): 3D Modellierung des tiefen Untergrundes von Schleswig-Holstein. Kick-Off Meeting des DGMK-Projektes 771 (Zur integrativen Modellierung von Potentialfeldern und ihrer Gradienten mittels dreidimensionaler Modellierung und Visualisierung), 08.05.2014, Universität Kiel, Institut f. Geowissenschaften, Abt. Geophysik, Vortrag.

Hese, F., Lademann, K., Thomsen, C. (2014): Geothermie im Glückstadt-Graben? Geologische 3D-Modellierung von Reservoirkomplexen und Störungssystemen. – LIAG-Austauschsitzung 2014, 05. - 06.11.2014, Hannover, Vortrag.

Hese, F., Lademann, K., Rosenbaum, S., Thomsen, C. (2014): 3D-Modellierung und Charakterisierung von Reservoirkomplexen und Störungszonen des Glückstadt-Grabens in Schleswig-Holstein. - Poster, „StörTief“ Messestand bei der Geo-T Expo und Geothermiekongress 2014, 11. - 13.11.2014, Essen, Poster.

Hese, F., Kirsch, R. (2015): 3D Modelle des Untergrundes von Schleswig-Holstein für geothermische Potenzialstudien. 8. Norddeutsche Geothermietagung – Hotspot Hannover, 6. – 7. Oktober 2015, Hannover, Vortrag.

Hese, F., Lademann, K., Schaller, A., Thomsen, C. (2015): Geological 3d modelling of the Northwest German Basin in Schleswig-Holstein for investigations of the geothermal potential of reservoirs and fault zones. GeoBerlin 2015 – Annual Meeting DGGV DMG, 4. – 7. Oktober 2015, Berlin, Vortrag.

Schaller, A., Hese, F., Thomsen, C. (2015): Modellierung und Charakterisierung von Störungszonen und Reservoirformationen des Glückstadt Grabens. Der Geothermie Kongress 2015, 2. – 4. November 2015, Essen, Poster.

Hese, F., Lademann, K., Offermann, P., Schaller, A., Thomsen, C. (2016): Geological Models as a Tool for the Planning of Deep Geothermal Projects. 1st International Conference on Energy Geotechnics 2016, 29.-31.08.2016, Kiel, Technical Paper, Vortrag.

Hese, F. (2016): Tiefreichende Störungszonen in Schleswig-Holstein. Seminar für aktuelle Forschungsthemen, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Institut für Geowissenschaften, Abt. Geophysik, 08.06.2016, Vortrag.

Agemar, T., Hese, F., Moeck, I., Stober, I. (2016): Kriterienkatalog für die Erfassung tiefreichender Störungen und ihrer geothermischen Nutzbarkeit in Deutschland. ZDGG, subm.

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Verbundvorhaben Störtief – Die Rolle von tiefreichenden Störungszonen bei der geothermischen Energienutzung; Teilprojekt 1.2 – Erarbeitung eines geothermischen 3D-Strukturmodells für den Glückstadt-Graben in Schleswig-Holstein	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Thomsen, Claudia, Hese, Fabian, Schaller, Astrid, Lademann, Katrin, Rosenbaum, Sabine, Liebsch-Dörschner, Thomas	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.10.2016
	6. Veröffentlichungsdatum Noch nicht bekannt
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein – Geologischer Dienst Hamburger Chaussee 25 D-24220 Flintbek	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 0325623B
	11. Seitenzahl 77
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 60
	14. Tabellen 1
	15. Abbildungen 44
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Projektträger Jülich, Forschungszentrum Jülich GmbH, Rostock, TIB, Hannover, Verbundprojektpartner	

## 18. Kurzfassung

Das Ziel der Studie ist die Entwicklung von Planungsgrundlagen zur geothermischen Nutzung von Sandsteinformationen und tiefreichenden Störungszonen im Bereich des Glückstadt-Grabens. Im Fokus der Untersuchungen stehen die in Schleswig-Holstein potenziell zur geothermischen Nutzung geeigneten Sandsteine des Mittleren Buntsandsteins, Oberen Keupers und Mittleren Juras sowie Störungssysteme im Meso- und Känozoikum. Zur Ermittlung von möglichst aussagekräftigen Informationen erfolgten Studien in verschiedenen Themenfeldern. Ein Ziel war die Entwicklung eines geologischen 3D-Modells des Glückstadt-Grabens zur Darstellung der Beckenstruktur sowie der Störungssysteme und Reservoirkomplexe. Relevante Störungssysteme sollten hinsichtlich ihrer geometrischen und lithologischen Attribute anhand der bestehenden Datenbasis charakterisiert werden. Darüber hinaus ging es um die Analyse der Störungssysteme in Bereichen von nutzbaren Aquiferen sowie des möglichen Einflusses auf die geothermischen und hydraulischen Eigenschaften. Dazu sollten für relevante Sandsteine die hydrogeologischen Bedingungen von gestörten und ungestörten Bereichen systematisch miteinander verglichen werden. Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten waren Untersuchungen der lithologischen und hydraulischen Eigenschaften relevanter Aquifere, die Kartierung der räumlichen Variabilität sowie die räumliche Darstellung und Integration von Grenzflächen in das geologische Modell.

Auf der Grundlage des Geotektonischen Atlas und unter Einbezug von Daten der KW-Datenbank der Länder entstand ein geologisches Modell des Glückstadt-Grabens. Es besteht aus 12 Grenzflächen lithostratigraphischer Einheiten (Basis Zechstein – Tertiär), Störungsflächen und Hüllflächen von Salzdiapiren. Im Zuge der Modellierung wurden Korrekturen durchgeführt und eine topologisch konsistente Modellgeometrie erreicht. Das Modell umfasst u.a. die Grenzflächen der geothermisch relevanten Reservoirkomplexe, die intern mittels Mächtigkeitkartierung an Bohrlokationen durch zusätzliche Grenzflächen der Sandsteinformationen ergänzt wurden. Das Störungsmodell wurde im Folgenden zur Analyse von geometrischen Attributen von tiefreichenden Störungen verwendet. Aufgrund von fehlenden hydraulischen Daten in Störungsbereichen zur Untersuchung der Durchlässigkeit und der ungenügenden Kenntnis des rezenten Stressfeldes im Bereich Glückstadt-Grabens, das zur Abschätzung einer potenziellen Durchlässigkeit relevant ist, wurden die Attribute vertikale Länge, Versatzbetrag und Alter der letzten Aktivierung visualisiert, um untersuchungswürdige Störungszonen ausweisen zu können. Zusätzlich zu den geometrischen Attributen wurden Informationen zu Störungen aus Bohrdaten extrahiert und analysiert. Die lithologische, hydraulische und fazielle Parametrisierung der Sandsteinformationen erfolgte durch Auswertung und Korrelation von Logdaten und Schichtenverzeichnissen. Herausforderungen der verschiedenen Studien waren die Heterogenität der Datenqualität und des Bestandes (z.B. flächenhafte Abdeckung durch Seismik, punktuelle Information durch Logdaten) sowie die Überbrückung der heterogenen Datenverteilung. Die flächendeckende Darstellung von geometrischen und lithologischen Daten weist daher eine unterschiedliche Detailgenauigkeit auf.

Auf Grundlage der Ergebnisse der verschiedenen Teilstudien wurden Kartensätze erstellt, die die geometrischen, lithologisch-faziellen und hydraulischen Informationen darstellen und untersuchungswürdige Gebiete zur hydrothermalen Nutzung von Sandsteinformationen und tiefreichenden Störungszonen ausweisen.

In dem Tiefenbereich bis 3000 m sind in verschiedenen Bereichen ausreichend mächtige Sandsteinformationen mit (punktuell belegten) mittleren bis hohen Porositäten und Permeabilitäten verbreitet, der Quickborn-Volpriehausen Sandstein im Bereich des Westschleswig-Blockes und nördlichem Ostholstein-Block sowie an den Grabenrändern, der Mittelrhät Sandstein im zentralen Teil des Glückstadt-Grabens und die Varel und Elsfleth Sandsteine des Mittleren Jura im nördlichen Teil des Ostholstein-Troges. Gestörte Sandsteine im Umfeld tiefreichender Störungen sind in verschiedenen Arealen des Glückstadt-Grabens nachgewiesen und möglicherweise hydrothermal nutzbar. In den Nahbereichen der Salzstrukturen belegen seismische Profile und Bohrdaten eine hohe Wahrscheinlichkeit von Salzintrusionen und einer Zementation von Klüften oder Störungen durch Anhydrit. Tendenziell sollten die jüngeren Störungen an den Grabenrändern im Fokus von zukünftigen Detailstudien stehen. Aufgrund des limitierten Datenbestandes zur hydraulischen Durchlässigkeit sind eindeutige Aussagen zur geothermischen Nutzbarkeit von Störungszonen nicht möglich.

## 19. Schlagwörter

Tiefe Geothermie, Schleswig-Holstein, Glückstadt-Graben, Norddeutsches Becken, Störungszonen, Sandsteinformationen, Geologische 3D-Modellierung, Reservoircharakterisierung

## 20. Verlag

## 21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN planned	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title  Joint project StörTief – The role of deep reaching fault zones in the geothermal energy use; Subproject 1.2 – Development of a geothermal 3D Model of the Glückstadt Graben in Schleswig-Holstein	
4. author(s) (family name, first name(s)) Thomsen, Claudia, Hese, Fabian, Schaller, Astrid, Lademann, Katrin, Rosenbaum, Sabine, Liebsch-Dörschner, Thomas	5. end of project 31.10.2016
	6. publication date unknown
	7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address) State agency for agriculture, environment and rural areas Schleswig-Holstein - Geological Survey Hamburger Chaussee 25 24220 Flintbek, Germany	9. originator's report no.
	10. reference no. 0325623B
	11. no. of pages 77
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. no. of references 60
	14. no. of tables 1
	15. no. of figures 44
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) Projekträger Jülich, Forschungszentrum Jülich GmbH, Rostock, TIB, Hannover, Verbundprojektpartner	

18. abstract

The aim of the study is the development of planning tools to support the geothermal utilization of sandstone formations and deep reaching fault zones in the Glückstadt Graben area. The investigations are focused on sandstone formations of the Middle Buntsandstein, Upper Keuper and Middle Jurassic, which are potentially suitable for geothermal use in the Schleswig-Holstein area, as well as on Mesozoic and Cenozoic fault zones. First, a geological 3d model of the Glückstadt Graben had to be developed to visualize the overall basin structure, the fault system and reservoir complexes. Secondly, relevant fault zones ought to be characterized regarding their geometrical and lithological attributes on the basis of the existing datasets. The analysis was also directed on faulted areas of hydrothermal aquifers and their influence on geothermal and hydraulic properties. This ought to be done by systematic comparisons of the hydrogeological properties of relevant sandstone aquifers in faulted and non-faulted areas. A third key topic was the investigation of lithological and hydraulic properties of relevant aquifers, the mapping of spatial variations and geometrical modelling.

A geological model of the Glückstadt Graben was developed on the basis of the Tectonic Atlas of NW-Germany and datasets of the hydrocarbon database of the federal states. It consists of twelve boundary surfaces of lithostratigraphic units (Base Zechstein – Tertiary), fault surfaces and hull surfaces of salt diapirs. In the course of the modelling workflow corrections have been applied resulting in topological consistent model geometry. Among others the model comprises boundary surfaces of geothermal reservoir complexes, which have been differentiated by additional surfaces of sandstone formations using thickness information at well locations. In the following the fault model was used to analyze geometrical attributes of deep reaching faults. Due to missing hydraulic data in fault zones, necessary to determine the hydraulic conductivity, and missing information on the recent stress field, attributes like vertical length, displacement and age of last reactivation have been used to rule out fault zones, which are worthy of future more detailed investigations. In addition, information on faults has also been extracted from well data. The lithological, hydraulic and facies parameterization of the sandstone formations was based on the interpretation and correlation of log data and well reports. The challenges of the different studies have been the heterogeneity of the data quality and distribution and the bridging of the heterogenic distribution and area-wide visualization of geometrical and lithological data, which is showing a varying level of detail dependent on the distribution of input constraints (e.g. area-wide seismic data, punctual well datasets).

The results of the different studies have been used to produce map sets, showing geometrical, lithological and hydraulic information. They are the basis to rule out areas, which might be suitable for the hydrothermal utilization of sandstone formations and deep reaching faults. In the depth range of 3000 m relevant sandstone formations with sufficient thickness and punctual proven intermediate to high porosity and permeability are distributed in several areas, the Quickborn-Volpriehausen sandstone in the area of the Westschleswig Block, northern Eastholstein Block and near the rims of the Graben, the Middle Rhät sandstone in the central part of the Graben and the Varel and Elsfleth sandstones in the northern part of the Eastholstein Trough. Faulted sandstones are proven at various locations near main fault zones and might possibly be suitable for hydrothermal use. In the vicinity of salt diapirs one have to expect a high likelihood for salt intrusions into faults and cementation processes, documented at various locations by seismic profiles and well datasets. Future studies should focus on the relatively young deep reaching faults near the flanks of the Glückstadt Graben. Due to insufficient data on hydraulic processes it is not possible to make explicit statements on the geothermal usability of fault zones.

19. keywords

Deep Geothermics, Schleswig-Holstein, Glückstadt-Graben, North German Basin, fault zones, sandstone formations, geological 3d modelling, reservoir characterization

20. publisher

21. price