

Forschung & Entwicklung-Verbundvorhaben

– Sachbericht (Schlussbericht) –

Titel

Identifikation, Charakterisierung und Darstellung hydraulisch geeigneter Bereiche in geothermischen Hauptreservoirn Norddeutschlands (Buntsandstein, Lias, Unterkreide)

Kurztitel

Geothermische Potenziale des Norddeutschen Beckens

Akronym

GeoPoNDD

Förderkennzeichen

0325920 (0325920A, 0325920B)

Projektleitung

Prof. Dr. Martin Sauter, Universität Göttingen

Autoren

Dr. Matthias Franz, Dr. Markus Wolfgramm

Verbundpartner

- 1) Georg-August-Universität Göttingen
Geowissenschaftliches Zentrum
Abteilung Angewandte Geologie
Goldschmidtsraße 3, 37077 Göttingen
- 2) Geothermie Neubrandenburg GmbH
Seestraße 7A
17033 Neubrandenburg

Das diesem Sachbericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0325920 gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieses Sachberichts liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1.	Allgemein	1
1.1	Vorbemerkungen	1
1.2	Aufgabenstellung	1
1.3	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	1
1.4	Planung und Ablauf des Vorhabens	2
1.5	Wissenschaftlicher und technischer Stand	4
1.6	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	5
2.	Eingehende Darstellung	7
2.1	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	7
2.1.1	AP 1: Erfassung von Kernbohrungen, Erfassung geeigneter Aufschlüsse	7
2.1.2	AP 2: Bearbeitung ausgewählter Kernbohrungen und Aufschlüsse	7
2.1.3	AP 3: Sedimentologisch-fazielle Analyse, Erarbeitung von Aufschlussanalog- und Ablagerungsmodellen	11
2.1.4	AP 4: Sedimentpetrographie	15
2.1.5	AP 5: Petrologie und Diagenese	18
2.1.6	AP 6: Experimentelle Bestimmung von Porosität und Permeabilität, Ableitung aus Bohrlochmessungen	21
2.1.7	AP 7: Integration von Bohrlochmessungen zur Abschätzung von Porositäts- und Permeabilitätsdaten und Anwendung auf eine vorhandene Bohrdatei	24
2.1.8	AP 8: Datensynthese und Erstellung eines flächenhaften Kartenwerkes, modellhafte Darstellung des Einflusses von Fazies auf Diagenese und hydraulische Eigenschaften	29
2.1.9	AP 9: Bewertung des geothermischen Potenzials, Verschneidung der Karten mit dem Geothermischen Informationssystem	33
2.1.10	Das hydrothermale Reservoir der Bohrung Gt Schwerin 6/17	37
2.1.11	Bedeutung der Hauptreservoirs für die Wärmewende in Norddeutschland	39
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	40
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	41
2.4	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	42
2.5	Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	42
2.6	Erfolgt und gelante Veröffentlichungen	40
3.	Literaturverzeichnis	41

1. Allgemein

1.1 Vorbemerkungen

Das FuE-Verbundvorhaben *GeoPoNDD* wurde gemeinsam von der Universität Göttingen und der Geothermie Neubrandenburg GmbH (GTN) beantragt und durchgeführt. Mit dem Förderbeginn zum 1.11.2015 wurde das Laufzeitende zunächst auf den 31.10.2018 terminiert. Da bei GTN mit der Bearbeitung zeitnah begonnen werden konnte, erstreckte sich die Bearbeitung des Projektpartners auf den Förderzeitraum. An der Universität Göttingen wurde auf Grund zeitlicher Verzögerungen, die aus der Einstellung der Projektmitarbeiter resultiert, zum 1.4.2016 mit der vollständigen Bearbeitung begonnen. Der Verzögerung wurden durch kostenneutrale Verlängerungen des Laufzeitendes zum 31.7.2019 entsprochen. Da sich aus den unterschiedlichen Laufzeitenden der Projektpartner verschiedene Terminierungen der Schlussberichte ergeben, hat der Projektpartner GTN einen Teilbericht für das von GTN verantwortete Teilvorhaben zum 22.3.2019 erstellt (Wolfgramm et al. 2019). Der vorliegende Endbericht für das Gesamtvorhaben umfasst beide Teilvorhaben der Projektpartner.

1.2 Aufgabenstellung

Gesamtziel des Verbundvorhabens ist die Minimierung des Erkundungsrisikos bei der Exploration geothermischer Reservoirs zur Wärme- und Stromerzeugung in Norddeutschland. Im Rahmen des vorangegangenen Verbundvorhabens *Sandsteinfazies* (FKZ 0325285) erfolgte die geologische, hydrogeologische und geothermische Bearbeitung der Hauptreservoirs, deren hohes geothermisches Potenzial an einzelnen Standorten bereits nachgewiesen wurde bzw. genutzt wird (Rhät, Dogger). Das entstandene Kartenwerk stellt einzelne Geothermiehorizonte des Rhäts, Doggers und Schilfsandsteins hochauflösend dar und weist auf Potenzialkarten Gebiete mit hohem bzw. niedrigem geothermischem Potenzial aus.

Ziel des Vorhabens *GeoPoNDD* ist die Identifizierung und Charakterisierung der geothermischen Hauptreservoirs, die ein hohes Potenzial besitzen, deren Erkundung jedoch bislang mit einem hohen Risiko verbunden war (Buntsandstein, Lias, Unterkreide). Durch die räumlich hochauflösende Darstellung dieser Geothermiehorizonte auf Potenzialkarten und die Fortschreibung bzw. Erweiterung der bestehenden hydraulischen Datenbank entsteht das "Kartenwerk mesozoischer geothermischer Reservoirs Norddeutschland". Dieses Kartenwerk soll das Explorationsrisiko tiefegeothermischer Reservoirs in Norddeutschland umfassend und erheblich minimieren und weitere Geothermieprojekte ermöglichen. Durch die Integration in das Geothermische Informationssystem (GeotIS) sollen Fündigkeitsprognosen für konkrete Standorte verbessert werden.

1.3 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde, waren:

- Fristgemäße Einstellung von wissenschaftlichen Mitarbeitern an der Universität Göttingen
- Termine für die Bemusterung von Kernmaterial in Bohrkernlagern der jeweilige geologischen Landesämter sowie Möglichkeit zur Beprobung

- Möglichkeit der Nutzung von Bohrungsunterlagen (geophysikalische Bohrlochmessungen, mikropaläontologische Berichte, Berichte zu Porositäts- und Permeabilitätsmessungen etc.) der Altbohrungen aus dem Norddeutschen Becken
- Vorhandensein relevanter Aufschlüsse sowie die Möglichkeit deren Begehbarkeit und Beprobung
- Zeitnahe Bearbeitung der vergebenen Aufträge an Dritte

Diese Voraussetzungen wurden vollumfänglich erfüllt.

1.4 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Ablauf des Verbundvorhabens folgte dem Arbeitsplan, der in der Gesamtvorhabenbeschreibung detailliert dargestellt wurde. Die Gliederung des Arbeitsplans in neun Arbeitspakete, mit insgesamt 15 Meilensteinen, hat sich in der Durchführung als praktikabel erwiesen, so dass sämtliche Meilensteine erreicht werden konnten (Tab. 1).

In der Bearbeitung der Arbeitspakete musste nur geringfügig vom ursprünglichen Plan abgewichen werden. Gründe dafür sind u. a. die Einstellung von Dr. Jens Zimmermann bei GTN sowie die stärkere Gewichtung des Arbeitspaketes 5 „Petrologie und Diagenese“, dessen vertiefte Bearbeitung über die „normale“ beschreibende Petrographie und quantitative Analyse von Dünnschliffen hinausging.

Weitere Abweichungen begründen sich durch den zeitlich verzögerten Projektbeginn an der Universität Göttingen. Auf Grund der kurzen Vorlaufzeit zwischen Eingang des Zuwendungsbescheides und Projektstart sowie des Zeitbedarfs bei der Stellenbesetzung (Ausschreibung, Einbindung verschiedener Gremien der Universität), konnte die Stelle des Projektleiters erst zum 1.12.2015 mit Dr. Matthias Franz und die der wissenschaftlichen Mitarbeiter erst zum 1.4.2016 mit Sandra Franke und Sebastian Niegel besetzt werden (siehe entsprechende Zwischenberichte). Der Zeitverlust wurde durch eine kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit bis zum 31.3.2019 ausgeglichen.

Die thematische Bearbeitung des Buntsandsteins erfolgte durch Dr. M. Franz (Universität Göttingen), des Lias durch Dr. J. Zimmermann (GTN) und der Unterkreide durch S. Franke (Universität Göttingen). Die Bearbeitung des Arbeitspaketes 5 „Petrologie und Diagenese“ erfolgte durch S. Niegel (Universität Göttingen). Die Betreuung der Arbeiten an der Universität Göttingen erfolgte durch Dr. M. Franz.

Während der Vorhabenlaufzeit wurde mit den Bohrungsarbeiten für das Geothermievorhaben Schwerin-Lankow begonnen. Im Untergrund dieses Standortes wurde im Rahmen des Vorhabens *Sandsteinfazies* (FKZ 0325285) ein nutzbares geothermisches Reservoir in der sogen. „Unteren-Exter-Formation III“ prognostiziert (Franz et al. 2015 und www.geotis.de), für das die Stadtwerke Schwerin eine Nutzung zur Wärmegewinnung im Rahmen eines Dublettenbetriebs anstreben. Die Kernstrecke der fündigen Förderbohrung Gt Schwerin 6/17 erbrachte einen erheblichen Kenntnisfortschritt bzgl. des Aufbaus und der Architektur des Fündigkeitstyp fluvio-deltaischer Rinnensysteme, der im Rahmen einer weiteren kostenneutralen Verlängerung bis zum 31.7.2019 in die Reservoirprognose des Unteren Juras und der Unterkreide integriert werden konnte.

Tabelle 1: Detaillierter Arbeitsplan und Meilensteinplanung, orange Felder: beide Partner, grüne Felder: Universität Göttingen, blaue Felder: GTN.

	2015					2016					2017					2018								
	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7
Projekttreffen, Tagungsbesuche																								
Projekttreffen FG, NB	GO		NB			GO		NB			GO		NB			GO		NB			GO		NB	
Projekttreffen Hannover (GeotIS)											GO		NB			GO		NB			GO		NB	
Datenaustausch Polen, Niederlande, Dänemark																								
Messen Greifswald																								
Tagungsbesuche																								
1. Datenakquise Kernbohrungen, Aufschlüsse (UGOE)																								
Recherche geologische Landesämter	M1																							
Kooperationspartner POL, DS, S, NL	M1																							
Erstellung Datenbank	M1																							
2. Bearbeitung ausgewählter Kernbohrungen und Aufschlüsse (UGOE)																								
Mittlerer Buntsandstein																								
Lias																								
Unterkreide																								
Beprobung für Petrologie																								
Nachbearbeitung, Abstimmung																								
3. Sedimentologisch-fazielle Analyse der Hauptreservoire (UGOE)																								
Mittlerer Buntsandstein																								
Lias																								
Unterkreide																								
Nachbearbeitung, Abstimmung																								
4. Sedimentpetrographie (UGOE)																								
Bearbeitungsmatrix erstellen																								
Mittlerer Buntsandstein																								
Lias																								
Unterkreide																								
Nachbearbeitung, Abstimmung																								
5. Petrologie und Diagenese (GTN)																								
Bearbeitungsmatrix erstellen																								
Mittlerer Buntsandstein																								
Lias																								
Unterkreide																								
Diagenesemodell																								
6. Experimentelle Bestimmung Porosität und Permeabilität (GTN)																								
Siebanalysen, Auswertung																								
Bestimmung Dichte, Porosität (Labor)																								
Hg-, He-Porosimetrie																								
Bewertung Tonmineralinhalte																								
7. Integration von Bohrlochmessungen (GTN)																								
Digitalisierung Bohrlochmessungen																								
Literaturrecherche zur Korrelation																								
Korrelation Mittlerer Buntsandstein																								
Korrelation Lias																								
Korrelation Unterkreide																								
8. Datensynthese Sedimentologie/Fazies, Petrologie und Petrophysik (UGOE)																								
Thematische Karten Mittlerer Buntsandstein																								
Thematische Karten Lias																								
Thematische Karten Unterkreide																								
9. Bewertung geothermisches Potenzial (GTN)																								
Potenzialkarten Hauptreservoire																								
Kartensatz für GeotIS																								

Meilensteine:

- M1: Datenakquise Bohrrarchive und Übertageaufschlüsse abgeschlossen, Bohrrdatenbank liegt vor, Kooperationspartner kontaktiert;
- M2: Aufschlussbearbeitung abgeschlossen (einzelne Nacharbeiten möglich);
- M3: Aufschlussanalogmodelle Buntsandstein, Lias und Unterkreide erstellt;
- M4: Digitalisierung relevanter Bohrlochmessungen ist abgeschlossen;
- M5: Siebanalysen grundsätzlich abgeschlossen (einzelne Nacharbeiten später);
- M6: Kernaufnahme und Beprobung abgeschlossen (einzelne Nacharbeiten möglich);
- M7: Laborwerte für Porosität, Permeabilität, Wärme- und Temperaturleitfähigkeit liegen vor;
- M8: Bohrungslogs sind bzgl. synthetischer Temperaturprofile bearbeitet;
- M9: Ablagerungsmodelle Buntsandstein, Lias und Unterkreide im NDB liegen vor;
- M10: Sedimentpetrographische Bearbeitung abgeschlossen;

- M11: Petrologisch-diagenetische Bearbeitung abgeschlossen, Diagenesemodell liegt vor;
- M12: Bohrungslogs sind bzgl. Porositätsbestimmung bearbeitet;
- M13: Thematische Karten (Fazies, etc.) sind fertiggestellt;
- M14: Geothermische Potentialkarten liegen vor;
- M15: Übergabe der Daten an GeotIS.

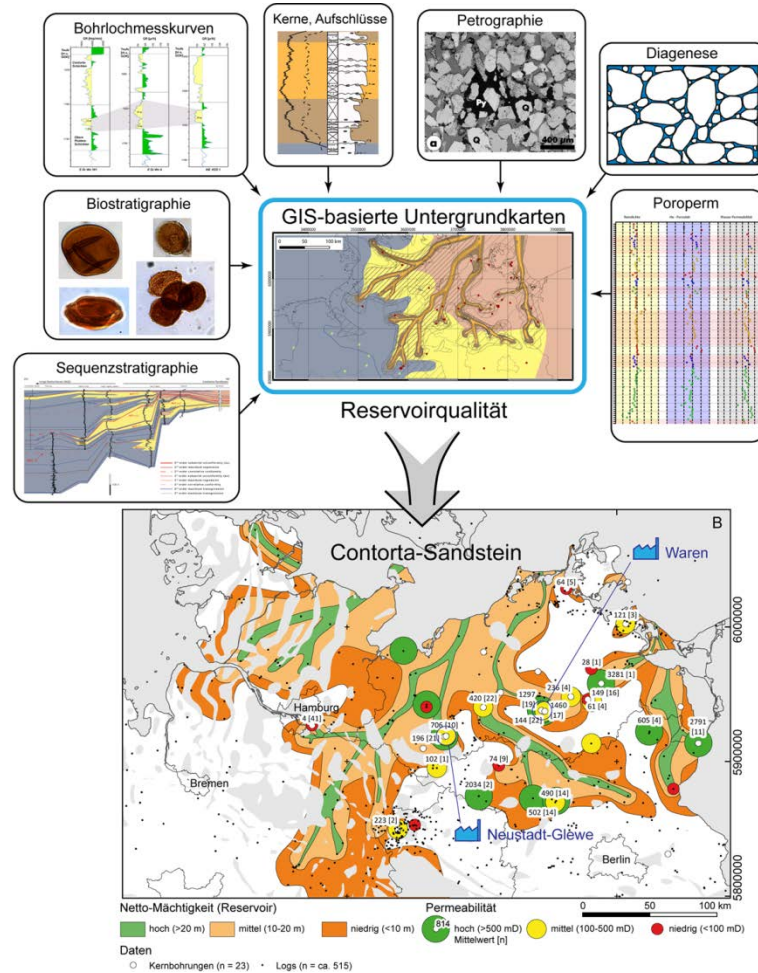


Abbildung 1: Methodik des Erkundungsansatzes *Sandsteinfazies* und Reservoirqualitätskarte des Contorta-Sandsteins, der an den Standorten Neustadt-Glewe und Waren bereits für die Gewinnung geothermischer Energie genutzt wird.

1.5 Wissenschaftlicher und technischer Stand

1.5.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Für das Vorhaben wurde der Erkundungsansatz *Sandsteinfazies*, der im gleichnamigen Vorhaben (FKZ 0325285) für die Reservoirprognose der geothermischen Hauptreservoirs Unterer–Mittlerer Keuper, Oberer Keuper und Mittlerer Jura entwickelt wurde (Franz et al. 2015), verwendet und für die geothermischen Hauptreservoirs Unterer Buntsandstein, Unterer Jura und Unterkreide weiterentwickelt (Abb. 1).

Weitere Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte fanden keine Anwendung.

1.5.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Für die Durchführung des Vorhabens wurde auf die einschlägige Fachliteratur zurückgegriffen, die thematisch die gesamte Bandbreite des Vorhabens abdeckt. Auf die Wiedergabe der mehrere einhundert Einträge umfassenden Datenbank wird an dieser Stelle verzichtet. Es wird auf die Literaturlisten der aus diesem Vorhaben hervorgegangenen Publikationen verwiesen, die in den Berichtsblättern im Anhang zu diesem Sachbericht aufgeführt sind.

Für die Literaturrecherche wurde auf die gängigen Datenbanken zugegriffen, z. B. *TIB* für geothermiebezogene Berichte aus Deutschland oder *Scopus* für internationale Fachliteratur. Die Bohrungsrecherche erfolgte mittels des geothermischen Informationssystems (GeotIS), sowie den Datenbanken der geologischen Landesämter, z. B. *NIBIS* für Niedersachsen.

1.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Vorhabens erfolgte eine Zusammenarbeit mit den Geologischen Landesämtern, die Bohrungsdaten und Kernmaterial zur Verfügung stellten: das Landesamt für Umwelt und Naturschutz Mecklenburg-Vorpommern (Dr. Karsten Obst, Juliane Brandes), das Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (Dr. Michael Göthel), das Landesamt für Geologie und Bergbau Sachsen-Anhalt (Thomas Koch, Karl-Heinz Friedel) sowie das Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen (Dr. Roberto Pierau, Dr. Gerd Röhling). Darüber hinaus konnten Bohrungsdaten der Firmen Neptune Energie Deutschland GmbH (vormals Engie E&P Deutschland GmbH), der K+S AG Kassel (Dr. Jens Barnasch) und der ExxonMobil Production Deutschland GmbH.

Die palynostratigraphische Datierung bzw. palynofazielle Charakterisierung umfangreicher Probensätze aus der Unterkreide und dem Unteren Jura wurde von Frau Dr. Carmen Heunisch vom Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen in Hannover durchgeführt.

Die in diesem Vorhaben erstellten Reservoirkarten werden in das geothermische Informationssystem implementiert, das vom Leibniz-Institut für angewandte Geophysik in Hannover betrieben wird.

2. Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

2.1.1 AP1: Erfassung von Kernbohrungen und Bohrungsdaten, Erfassung geeigneter Aufschlüsse

Für die Bearbeitung im Rahmen des Vorhabens erfolgte im Arbeitspaket 1 eine gemeinsame Recherche mit den geologischen Landesämtern (siehe Kap. 1.6) um vorhandene Kernbohrungen und Aufschlüsse in den jeweiligen Hauptreservoirien zu ermitteln. Zusätzlich wurde einschlägige Literatur konsultiert. Bei der Auswahl, der im Arbeitspaket 2 zu bearbeitenden Kernbohrungen, wurde darauf geachtet, dass diese flächenhaft im Untersuchungsgebiet Norddeutsches Becken verteilt waren. Im Rahmen der Recherche wurden vorhandene Bohrungsakten, Schichtverzeichnisse und Bohrungslogs, die in den geologischen Landesämtern und bei GTN vorhanden sind, gesichtet und zusammen mit verfügbaren Daten früherer Vorhaben in einer Datenbank erfasst (Schichtenverzeichnis, Bohrlochmessungen).

Eine weitere Recherche erfasste auch relevante Kernbohrungen benachbarter Kooperationspartner in Polen, Dänemark, Schweden und den Niederlanden. Da diese Länder auch Anteile am Norddeutschen Becken bzw. benachbarten Teilbecken des Mitteleuropäischen Beckensystems haben, sind dort teilweise die gleichen Hauptreservoirie ausgebildet.

Die Recherche konnte im ersten Halbjahr 2016 abgeschlossen werden; der **Meilenstein M1** (Datenakquise Bohrarchive und Übertageaufschlüsse abgeschlossen, Bohrdatenbank liegt vor, Kooperationspartner kontaktiert) wurde erreicht (Tab. 1).

2.1.2 AP 2: Bearbeitung ausgewählter Kernbohrungen und Aufschlüsse

Im Arbeitspaket 2 wurden ausgewählte Kernbohrungen und Aufschlüsse der Hauptreservoirie Unterkreide, Unterer Jura und Mittlerer Buntsandstein nach der im vorangegangenen Vorhaben *Sandsteinfazies* (FKZ 0325285) erarbeiteten Methodik bearbeitet (siehe Franz et al. 2015). Hierzu wurden die Kernbohrungen und Aufschlüsse bemustert, feinstratigraphisch aufgenommen und physikalische Texturen (Gefüge), Fossilien bzw. Spurenfossilien und die sedimentäre Zyklik erfasst. Die Ergebnisse der Bearbeitung wurden nach einem einheitlichen Schema dokumentiert (Abb. 2). Für weiterführende Bearbeitungen wurden Proben entnommen.

Aus der Recherche (AP 1) wurden für die Bearbeitung im Arbeitspaket 2 ausgewählt (Tab. 2, 3):

- Unterkreide: 22 Kernbohrungen, ein Übertageaufschluss
- Unterer Jura: 16 Kernbohrungen, fünf Übertageaufschlüsse
- Mittlerer Buntsandstein: 21 Kernbohrungen, zwei Aufschlussregionen

Auf Grund der hohen Abdeckung mit Kernbohrungen konzentrierte sich die Bearbeitung auf den östlichen Teil des Norddeutschen Beckens. Zusätzlich wurden einzelne Kernbohrungen aus anderen Beckenteilen bearbeitet. Für die Bearbeitung der Unterkreide und des Unteren Juras bildeten vor allem die Bohrungen aus dem Kartierungsbohrprogramm (Kb-Bohrungen) der ehemaligen DDR die Grundlage für die Bearbeitung in diesem Vorhaben. Auf Grund seiner höheren Versenkungstiefe musste bei der Bearbeitung des Mittleren Buntsandsteins auf die Bohrungen aus dem Erdöl/Erdgasbohrprogramm der DDR zurückgegriffen werden (E-Bohrungen).

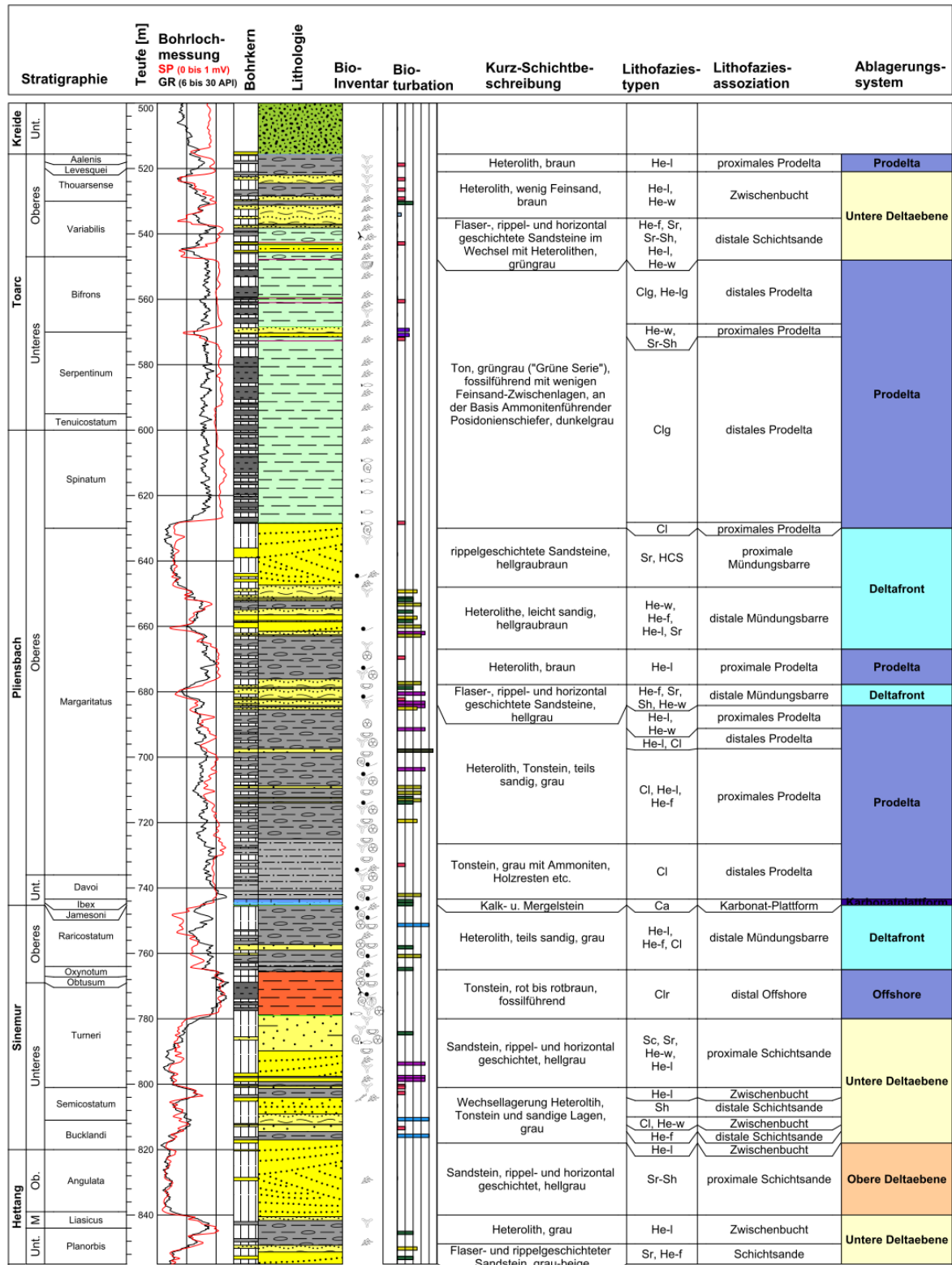


Abbildung 2: Beispieldokumentation des Unteren Juras in der Kb Tarnow 1/65.

Tabelle 2: Verzeichnis der bearbeiteten Kernbohrungen

Unterkreide	Unterer Jura	Mittlerer Buntsandstein
Kb Anklam 1/64 (M-V)	Kb Barth 10/65 (M-V)	E Arkona 101/62 (M-V)
Kb Barth 10/65 (M-V)	Kb Brunn 1E/66 (M-V)	Gt Burg 1/98 (BRB)
Kb Darßer Ort 1/60 (M-V)	Kb Gartz 1/65 (BRB)	Kb Fresendorf 1/61 (M-V)
Kb Darßer Ort 2/60 (M-V)	Kb JuraOstmecklenburg 1/65 (M-V)	E Grimmen 21/64 (M-V)
Eulenflucht 1/09 (Nds)	Kb JuraOstmecklenburg 3/66 (M-V)	E Hiddensee 3/67 (M-V)
Kb Garz 1-1a/61 (M-V)	Kb Krakow 1/62 (M-V)	Husum 202 (Nds)
Kb Gorlosen 1/63 (M-V)	Kb Karow-Sternberg-Schlieven 1/66 (M-V)	E Königsberg 7/71 (BRB)
Kb Gransee 1/63 (BRB)	Kb Karow-Sternberg-Schlieven 5/66 (M-V)	E Malchin 5/65 (M-V)
Kb Groß Schönebeck 1/64 (BRB)	Kb Löcknitz 1/65 (M-V)	E Perow 4/66 (M-V)
Gt Groß Buchholz 1/09 (Nds)	Dp Neubrandenburg 1/81 (M-V)	E Richtenberg 1/64 (M-V)
Isterberg 1001/82 (Nds)	Kb Sarow-Pieskow 2/60 (BRB)	E Richtenberg 9/66 (M-V)
E Lychen 2/59 (M-V)	Kb Tarnow 1/65 (M-V)	E Rügen 1/63 (M-V)
E Pasewalk 101/61 (M-V)	Kb Teetz 1/62 (BRB)	E Rügen 102/64 (M-V)
Kb Strausberg 1/63 (BRB)	Gt Waren 1/81 (M-V)	E Rügen 105/64 (M-V)
Kb Teetz 1/62 (BRB)	Kb Wernsdorf 2/63 (BRB)	E Samtens 101/62 (M-V)
Kb Ückeritz 1-1a/64 (M-V)	Kb Wolgast 1a/63 (M-V)	Gt Stralsund 1/85 (M-V)
Kb Usedom 1/60 (M-V)		Gt Stralsund 2/85 (M-V)
Kb Werle 19/67 (M-V)		E Stralsund 1/64 (M-V)
Kb Werle 20/67 (M-V)		E Wiek 101/62 (M-V)
Kb Wolgast 1a/63 (M-V)		Wippershain 2/14 (Hessen)
Kb Zechliner Hütte 1/65 (BRB)		E Wolgast 1/65 (M-V)
Zuckerfabrik 2/ (Nds)		

Tabelle 3: Verzeichnis der bearbeiteten Übertageaufschlüsse

Unterkreide	Unterer Jura	Mittlerer Buntsandstein
Tongrube Duingen (Nds)	Sandgrube Hohenwarth (By)	Aufschlussgebiet Nebra (S-A)
	Sandgrube Großweiglareuth (By)	Aufschlussgebiet um Bremke (Nds)
	Sandgrube nördlich Großweiglareuth (By)	
	Sandgrube Pechgraben (By)	
	Steinbruch Sauloch (By)	

Unterkreide

Auf Grund post-sedimentärer Erosion ist die heutige Verbreitung der Unterkreide regional sehr begrenzt. In größerem Umfang sind potenzielle hydrothermale Reservoirs lediglich in den Gebieten Darß-Rügen-Usedom sowie Prignitz-Altmark-Brandenburg vorhanden. Auf diese Gebiete konzentrierte sich folglich die Bearbeitung der Kernbohrungen. Weitere Verbreitungsgebiete liegen im südlichen Niedersächsischen Becken, in dem einzelne Kernbohrungen bearbeitet wurden (Tab. 2). Für weiterführende Bearbeitungen wurden die Bohrungen beprobt (Tab. 4). Auf Grund der oftmals geringen Versenkungstiefe der Unterkreide, sind die Sandsteine häufig zerfallen. Deshalb musste auf die Beprobung für die hydraulische Charakterisierung (Poroperm) verzichtet werden.

Für die Erarbeitung eines Aufschlussanalogmodells wurde die Tongrube Duingen in Niedersachsen mehrfach begangen, in der eine deltaische Abfolge der Deister-Formation (norddeutscher Wealden) aufgeschlossen ist (Tab. 3). Zusätzliche Geländearbeit wurde im Gebiet des Deisters mit Dr. R. Pierau (LBEG) durchgeführt, um das Aufschlussanalogmodell zu validieren. Weitere Aufschlussanalogstudien fanden gemeinsam mit Dr. T. Voigt (Universität Jena) in der Unterkreide des südlichen Niedersächsischen Beckens bzw. der Oberkreide des Elbsandsteingebirges bei Dresden und gemeinsam mit Dr. K. Obst (LUNG) auf Bornholm (Dänemark) statt.

Unterer Jura

Der Untere Jura ist im Norddeutschen Becken meist flächenhaft verbreitet. Auf Grund der Beckenkonfiguration bleiben fluvio-deltaische Ablagerungen, in denen potenzielle hydrothermale Reservoirare vorhanden sind, auf das Gebiet Vorpommern-Nordbrandenburg beschränkt. Auf dieses Gebiet beschränkte sich die Bearbeitung von Kernbohrungen, die für weiterführende Bearbeitungen beprobt wurden (Tab. 2, 4). Für die Erarbeitung eines Aufschlussanalogmodells wurden die Aufschlüsse der Bayreuth-Formation in der Region um Bayreuth ausgewählt, da keine Reservoiraufschlüsse des Unteren Juras im Norddeutschen Becken vorhanden sind. Nach einer gemeinsamen Geländebegehung mit Dr. Eckhard Mönnig (Naturhistorisches Museum Coburg) wurden fünf größere Sandgruben bzw. Steinbrüche bearbeitet und zur weiterführenden Bearbeitung beprobt (Tab. 3, 4). Geländearbeiten an klassischen Küstenaufschlüssen des Unteren Juras in SE-England, die im Anschluss an einen Tagungsbesuch in London durchgeführt wurden, sowie die Bearbeitung von Küstenaufschlüssen auf Bornholm mit Dr. K. Obst (LUNG), trugen zur Validierung des Aufschlussanalogmodells bei.

Mittlerer Buntsandstein

Der Mittlere Buntsandstein ist flächenhaft im Norddeutschen Becken verbreitet, jedoch sind potenzielle hydrothermale Reservoirare auf den südlichen Bereich des Norddeutschen Beckens sowie auf das Gebiet Darß-Rügen-Usedom begrenzt. Dazwischen ist der Mittlere Buntsandstein in vorwiegend toniger Beckenfazies ausgebildet. Da die teils hohen Versenkungstiefen im südlichen Bereich des Norddeutschen Beckens zu intensiver Zementation des Mittleren Buntsandsteins führten, wie das Beispiel der Bohrung Groß Buchholz 1/09 zeigt (Röhling & Heinig 2012), konzentrierte sich die Bearbeitung auf das Gebiet Darß-Rügen-Usedom, in dem durch vorangegangene Erkundung nutzbare Reservoirare nachgewiesen wurden (Schwaneberg et al. 1990). Für weiterführende Bearbeitungen wurden die Kernbohrungen beprobt (Tab. 4). Als Analogmodell für fluviatile Rinnen des Mittleren Buntsandsteins stand ein Ablagerungsmodell zur Verfügung, das in den Jahren 2011–2015 im Aufschlussgebiet um Nebra erarbeitet wurde (unpubliziert). Dieses Modell wurde im Rahmen dieses Vorhabens validiert und durch eine Aufschlussstudie im Gebiet um Bremke (bei Göttingen) erweitert.

Tabelle 4: Beprobung der Bohrungen und Aufschlüsse für weiterführende Bearbeitungen

	Unterkreide	Unterer Jura		Mittlerer Buntsandstein		Summe
	Bohrungen	Bohrungen	Aufschlüsse	Bohrungen	Aufschlüsse	
Mikropaläontologie	9	31	0	8	0	48
Palynologie	72	81	0	235	0	388
Dünnschliffe	79	71	0	61	80	291
Ringanschliffe	22	0	0	0	80	102
Granulometrie	14	144	130	68	41	397
Geochemie	66	0	0	287	0	353
Hydraulik	0	66	0	30	0	96

Zusammenfassung

Die für das Vorhaben notwendige Anzahl an Aufschlüssen und Kernbohrungen konnte bearbeitet und die Aufschlussanalogmodell konnten erstellt werden. Die **Meilensteine M2, M3 und M6** wurden erreicht (Tab. 1).

2.1.3 AP 3: Sedimentologisch-fazielle Analyse, Erarbeitung von Aufschlussanalog- und Ablagerungsmodellen

Durch die Aufschlussanalogstudien in der Unterkreide, dem Unteren Jura und dem Mittleren Buntsandstein konnten Aufschlussanalogmodelle erarbeitet werden, die für die fazielle Bearbeitung und Interpretation der Kernbohrungen zu Verfügung standen. Die Bearbeitung der Kernbohrungen konzentrierte sich zum einen auf die tonige Beckenfazies, um vorhandene biostratigraphische Datierungen zu überprüfen bzw. zu verbessern, und zum anderen auf die sandige Fazies, in der nutzbare hydrothermale Reservoirs vorhanden sind bzw. sein können.

Die Zusammenführung der Aufschlussanalogmodelle, der faziellen Bearbeitung der Kernbohrungen und der biofaziellen Daten erbrachte für die drei bearbeiteten Hauptreservoirs moderne Ablagerungsmodelle, die zu einem erheblich verbesserten Verständnis der Reservoirverbreitung und -architektur im Norddeutschen Becken führen. Der Meilenstein M9 (Ablagerungsmodelle Buntsandstein, Lias und Unterkreide im NDB liegen vor) wurde erreicht (Tab. 1).

Auf Grundlage vorhandener und neugewonnener biostatigraphischer Daten und der faziellen Bearbeitung der Kernbohrungen konnten für die bearbeiteten Hauptreservoirs sequenzstratigraphische Schemata abgeleitet werden, die die Grundlage der flächenhaften Kartierung einzelner Reservoirhorizonte bilden (siehe Kap. 2.1.8).

Unterkreide

Mit Beginn der Unterkreide setzte im Norddeutschen Becken eine schrittweise Transgression ein, durch die im Verlauf des Berrias die lagunäre bis evaporitische Fazies der Münder Mergel (Malm) verdrängt und durch die brackisch-marine Beckenfazies des sogen. Norddeutschen Wealden ersetzt wurde. Diese brackisch-marine Beckenfazies breitete sich von Westen über die Niederlande und von Südosten über Polen bis nach Norddeutschland aus. Der marine Einfluss

konnte im Rahmen dieses Vorhabens erstmals bis in den Raum Usedom nachgewiesen werden. Von den umliegenden Liefergebieten bauten sich große Flüsse gegen das Binnenmeer vor und bildeten beim Eintritt in das Becken deltaische Systeme aus, die im Raum Darß-Rügen-Usedom und in der Prignitz-Altmark-Brandenburg Senke detailliert bearbeitet werden konnten. Hinsichtlich ihrer grundsätzlichen Ausbildung ähneln diese deltaischen Systeme den Vorläufersystemen, die im Abschnitt Oberer Keuper–Mittlerer Jura im Norddeutschen Becken ausgebildet waren. Dementsprechend sind nutzbare hydrothermale Reservoirs hauptsächlich an den Fündigkeitstyp fluvio-deltaische Rinnensysteme, also an die Verteilerrinnen und deren proximale, sandreiche Begleitfazies geknüpft (siehe folgende Kapitel).

Durch die fortgesetzte Transgression breitete sich die marine Beckenfazies im Zeitabschnitt Valangin–Alb nahezu beckenweit aus. Im Arbeitsgebiet, dem Raum Darß-Rügen-Usedom und der Prignitz-Altmark-Brandenburg Senke, machte sich der verstärkte marine Einfluss durch einen Wechsel zu küstensiliklastischen Ablagerungsräumen (shoreface) bemerkbar, die schrittweise gegen die Beckenränder zurückgedrängt wurden. Im Bereich dieser küsten-siliklastischen Ablagerungsräume können ebenfalls Reservoirs ausgebildet sein, deren Qualität allerdings sehr eingeschränkt ist (siehe folgende Kapitel).

Für die skizzierte Abfolge konnten für das Arbeitsgebiet Ablagerungsmodelle und ein zeitliches Gerüst erarbeitet werden, die die flächenhafte Darstellung vorhandener Reservoirs für drei Zeitscheiben ermöglichte:

- Oberes Berrias (Ostrakodenzone Wealden 3)
- Oberes Hauterive
- Oberes Barrême–Unteres Apt

Unterer Jura

Im Unteren Jura setzte sich die im Oberen Keuper begonnene, schrittweise Flutung des Mitteleuropäischen Beckens fort. Über Pforten im Westen und Süden des Beckens griff das Jurameer in östliche Richtung auf das Becken über und erreichte im Untertoarc die, mit Bezug auf die Fläche, weiteste Verbreitung (Zimmermann et al. 2015). Ähnlich wie im Oberen Keuper bauten sich Flüsse über das Gebiet Darß-Rügen-Usedom in das Becken vor und bildeten beim Eintritt in das Becken große Deltasysteme aus. Diese Deltasysteme waren im Hettang und Sinemur flussdominiert, im Pliensbach machten sich vermehrt marine Einflüsse bemerkbar, die eine Modifikation der Deltasysteme durch küstenparallelen Sedimenttransport zur Folge hatten. Die übergeordnete Steuerung dieser Deltasysteme erfolgte durch (eustatische) Schwankungen des Meeresspiegels, die zur Ausbildung sogen. T-R Sequenzen 3. Ordnung führten. Eine jede solche Sequenz besteht aus einem transgressiven (unteren) Teil, der zu einer Phase der maximalen Ausdehnung des Jurameeres führte, die auch als Hochstandsphase (maximum flooding) bezeichnet wird. Der folgende regressive (obere) Teil beinhaltet die beckenwärts vorbauende Küstenfazies und führt zu einer Phase des Tiefstand des Jurameeres (maximum regression). Das Konzept und seine Anwendung auf den Jura im Norddeutschen Becken wird in Zimmermann et al. (2015) und Barth et al. (2018a, b) detailliert erläutert.

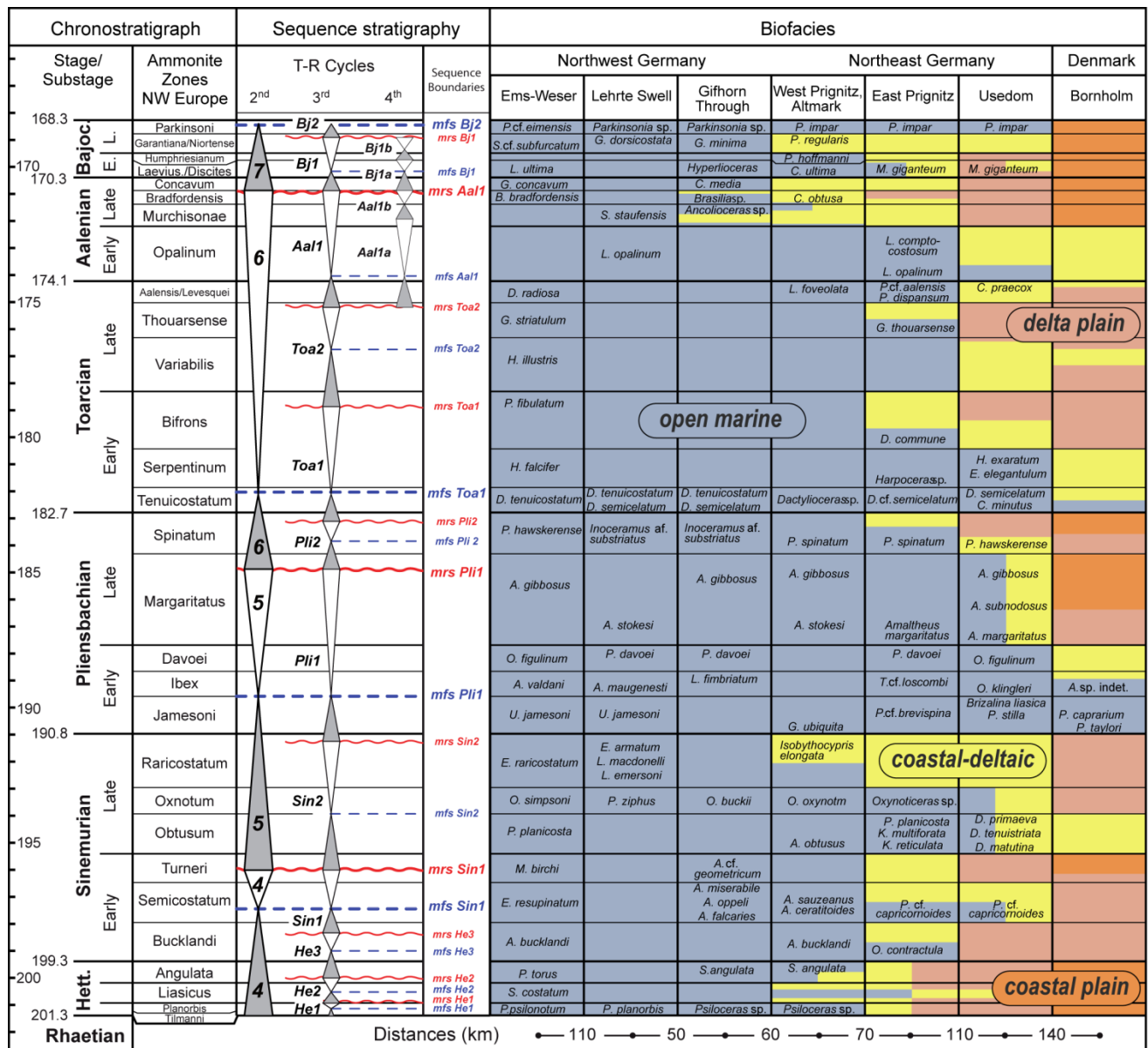


Abbildung 3: Die Sequenzen des Abschnittes Hettang–Bajoc im Norddeutschen Becken. Im Vorhaben GeoPoNDD erfolgten flächenhafte Reservoirkartierungen für die Zeitscheiben mrs He 1, mrs He 2, mrs Sin 1, mrs Sin 2, mrs Pli 1 und mrs Pli 2. Die Arbeiten ergänzen die flächenhaften Reservoirkartierungen für die Zeitscheiben mrs Toa 1, mrs Toa 2, mrs Aal 1 und mrs Bj 1, die im Vorhaben Sandsteinfazies durchgeführt wurden.

Für den Abschnitt Hettang–Pliensbach konnten für das Arbeitsgebiet Ablagerungsmodelle und ein zeitliches Gerüst erarbeitet werden, das vorhandene und neue biostratigraphische Daten integriert. Vorhandene biostratigraphische Datensätze umfassen makro- und mikropaläontologische Untersuchungen, die am Beispiel der Bohrungen Barth 10, KSS 5 und Wolgast 1/1a überprüft und taxonomisch aktualisiert wurden. Neue biostratigraphische Daten umfassen palynologische Datierungen des Intervalls Rhät–Sinemur in mehreren Bohrungen in Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg. Im Ergebnis ermöglichte die verbesserte Biostratigraphie die Verknüpfung von Beckenprofilen mit beckenrandlichen Profilen und die

Ableitung eines sequenzstratigraphischen Modells (Barth et al. 2018a, b). Aus den sieben T-R Sequenzen 3. Ordnung, die auf den Abschnitt Hettang–Pliensbach entfallen (Abb. 3), konnten in Rahmen dieses Vorhabens flächenhafte Reservoirkartierungen für sechs Tiefstandsphasen (maximum regression) erfolgen (siehe Kap. 2.1.8):

- mrs Pli 2 – Spinatum Chronozone
- mrs Pli 1 – Margaritatus Chronozone
- mrs Sin 2 – Raricostatum Chronozone
- mrs Sin 1 –Turneri Chronozone
- mrs He 2 – Angulata Chonozone
- mrs He 1 – Planorbis Chronozone

Analog zum Oberen Keuper (Franz et al. 2018a) und Mittleren Jura (Zimmermann et al. 2018) sind nutzbare hydrothermale Reservoir an den Fündigkeitstyp fluvio-deltaische Rinnensysteme geknüpft, die hinsichtlich ihrer Qualität und Nutzungsmöglichkeiten den Erschließungsbeispielen des Oberen Keupers vergleichbar sind (siehe folgende Kapitel).

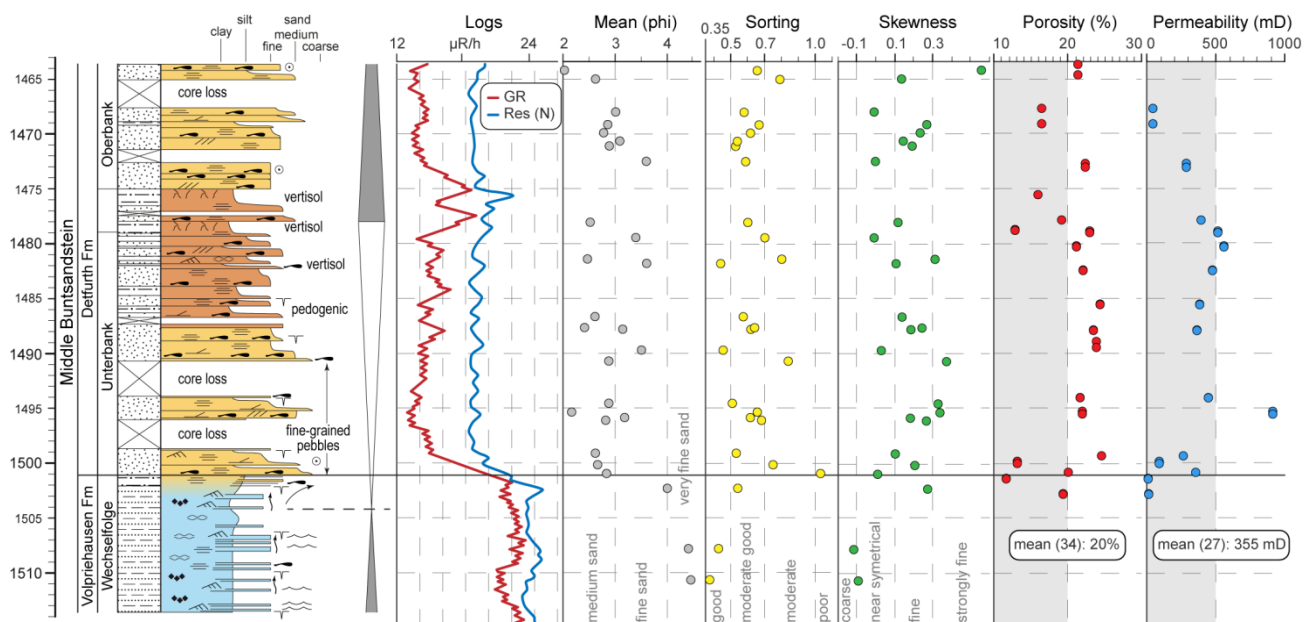


Abbildung 4: Potenzielles Reservoir des Fündigkeitstyps siliziklastische Küstensysteme am Beispiel der Detfurth-Unterbank in der Bohrung Prerow 4 (Darß). Das Beispiel zeigt die Überlagerung der heterolithischen Beckenfazies (hellblau) durch die sandigen Küstenfazies (gelb), der eine sandige Küstenebene (orange) folgt.

Mittlerer Buntsandstein

Im Mittleren Buntsandstein breitet sich im Norddeutschen Becken ein flaches, brackisch-marines Nebenmeer aus, das von Pforten im heutigen Südpolen mit der Tethys in Verbindung stand (Heunisch & Röhling 2016, Szulc 2019). Dementsprechend differenzierte sich der Ablagerungsraum Norddeutsches Becken in eine tonig-heterolithische Beckenfazies, die von sandiger Küstenfazies umsäumt war. Von den Liefergebieten, den Varisziden im Süden sowie den

Kaledoniden und Svecofenniden im Norden, bauten sich weitgespannte Schwemmebenen nach Norden bzw. Süden vor. Die potenziellen hydrothermalen Reservoirs sind auf die Verzahnungsbereiche Beckenfazies/Küstenfazies sowie die sandige Schwemmebene beschränkt, die den südlichen Bereich des Norddeutschen Beckens sowie das Gebiet Darß-Rügen-Usedom einnehmen.

Auf Grund ungünstiger taphonomischer Bedingungen und diagenetischer Prozesse sind die Möglichkeiten der körperlichen Erhaltung von Fossilien im Buntsandstein sehr ungünstig. Daraus resultiert eine eingeschränkte biostratigraphische Kontrolle, die im Wesentlichen auf palynostratigraphischer Grundlage beruht. Die im Rahmen dieses Vorhabens erfolgten mikropaläontologischen und palynologischen Bearbeitungen, erbrachten eine Verbesserung der palynostratigraphischen Kontrolle.

Im Arbeitsgebiet Darß-Rügen-Usedom sind potenzielle hydrothermale Reservoirs in der Küstenfazies und der daran angeschlossenen sandigen Schwemmebene ausgebildet. Die Reservoirs des Fündigkeitstyps siliziklastische Küstensysteme werden mit dem Volpriehausen-Sandstein und der Detfurth-Unterbank parallelisiert (Abb. 4). Die Reservoirs des Fündigkeitstyps fluviatile Rinnensysteme werden der Abfolge Hardeggen- bis Solling-Formation zugeordnet (z. B. Schüler 1976). In Kombination mit einem neu entwickelten sequenzstratigraphischen Konzept, konnte eine flächenhafte Darstellung potenzieller Reservoirs für vier Zeitscheiben erarbeitet werden:

- Solling-Formation
- Hardeggen-Formation
- Detfurth-Unterbank
- Volpriehausen-Sandstein

Zusammenfassung

Die Zusammenführung der Aufschlussanalogmodelle, der faziellen Bearbeitung der Kernbohrungen und der biofaziellen Daten erbrachte für die drei bearbeiteten Hauptreservoirs moderne Ablagerungsmodelle, die zu einem erheblich verbesserten Verständnis der Reservoirverbreitung und -architektur im Norddeutschen Becken führen. Der **Meilenstein M9** wurde erreicht (Tab. 1).

2.1.4 AP 4: Sedimentpetrographie

An den Sandsteinproben wurden die Korngrößen durch Siebung nach DIN 4022 ermittelt und granulometrische Kennwerte errechnet, z. B. Sortierung und Schiefe nach Folk & Ward (1957). Aus den Siebfraktionen 63–125 µm und >125 µm wurden Schwermineralkonzentrate hergestellt, als Körnerpräparate dünn geschliffen und die Zusammensetzung der durchsichtigen Schwermineralfraktion durch Auszählung unter dem Polarisationsmikroskop ermittelt. An Gesteinsdünnschliffen erfolgte mittels Polarisationsmikroskopie, KL, REM-EDX und Mikrosonde die Bestimmung der detritischen Bestandteile der Sandsteine. Ergänzend zur Untersuchung der Sandsteine wurden die feinklastischen Bestandteile der Hauptreservoirs mittels Gesamtgesteinsgeochemie und Tonmineralogie charakterisiert. Im Folgenden werden einige wesentliche Ergebnisse der Sandstein-Petrographie dargestellt.

Unterkreide

Die Sandsteine des Wealden sind überwiegend feinkörnig ausgebildet (Mittelwert: 0,17 mm), mäßig bis gut sortiert (Mittelwert: 0,56) und haben eine nahezu symmetrische Korngrößenverteilung (Mittelwert: 0,11). Hinsichtlich der Granulometrie bestehen keine grundsätzlichen Unterschiede zu den Sandsteinen des Hauterive bzw. Barrême.

Der detritische QFL-Modalbestand weist die Wealden-Sandsteine als hochmature Quarzarenite aus, in denen Quarz mit 98,4 % (94,3–100 %) dominiert, während Feldspäte mit 1,6 % (0–5,7 %) nur geringe Anteile einnehmen und Lithoklasten zumeist fehlen (Abb. 5). In den Sandsteinen des Wealden sind häufig kleine organische Partikel, die auf Pflanzenreste zurückgehen, als Nebengemengteile vorhanden. In den Sandsteinen des Abschnittes Hauterive–Alb, die küstensiliziklastischen Ablagerungsräumen entstammen, tritt zu den QFL-Komponenten noch detritischer Glaukonit in gesteinsbildenden Anteilen hinzu (3,8–47,4 %). Es handelt sich somit um klassische Grünsandsteine.

In der Bohrung Anklam 1 wird die Schwermineralassoziation der Wealden-Sandsteine von der ultrastabilen Zirkon-Tourmalin-Rutil-Gruppe dominiert, deren Gesamtanteil über alle Proben gemittelt 73,8 % beträgt. In den Einzelproben unterliegen die Anteile von Zirkon (26–68 %), Tourmalin (5–25 %) und Rutil (10–18 %), teils deutlichen Schwankungen, die auch abhängig von der Korngröße sind. Weiterhin sind noch Disthen (10–15 %), Staurolith (5–12 %), Granat (1–11 %), Apatit (1–10 %), Epidot (1–10 %), Brookit (1–5 %) und Silimanit (<3 %) in der Schwermineralassoziation vorhanden.

Unterer Jura

Die Hettang-Sandsteine aus dem Norddeutschen Becken sind überwiegend feinkörnig (Mittelwert: 0,15 mm), mäßig bis gut sortiert (Mittelwert: 0,59 = moderate good) und haben eine positive Schiefe der Korngrößenverteilung (Mittelwert: 0,21). Im Vergleich dazu sind die Hettang-Sandsteine aus der Aufschlußstudie mittelkörnig (0,55 mm), nur mäßig sortiert (0,86 = moderate) und haben eine nahezu symmetrische Korngrößenverteilung (0,1). Die Sandsteine des Sinemur sind überwiegend feinkörnig (0,2 mm), mäßig bis gut sortiert (0,62 = moderate good) und haben eine deutlich positive Schiefe der Korngrößenverteilung (0,46). Die Sandsteine des Pliensbach sind überwiegend feinkörnig (0,12 mm), mäßig bis gut sortiert (0,6 = moderate good) und zeigen eine leicht positive Schiefe der Korngrößenverteilung (0,13).

Der detritische Modalbestand (QFL) der Lias-Sandsteine (Hettang–Pliensbach) wird dominiert von Quarz (Mittelwert: 88,0 %), gefolgt von Lithoklasten (8,5 %) und Feldspäten (3,5 %). Damit sind die Sandsteine des Hauptreservoirs Unterer Jura hinsichtlich ihrer hohen kompositionellen Reife mit denen des Hauptreservoirs Oberer Keuper vergleichbar (Abb. 5). In der Einzelbetrachtung zeigen die Sandsteine des Hettangs durchschnittliche Gehalte von Quarz: 91,6 % (82,9–100), Lithoklasten: 5,5 % (0–11,4) und Feldspäten: 2,8 % (0–7,1). Die Sandsteine des Sinemurs enthalten durchschnittlich Quarz: 86,5 % (61,3–97,0), Lithoklasten: 9,9 % (1,8–37,3) und Feldspäte: 3,7 % (0–15,7 %) und die Sandsteine des Pliensbachs enthalten durchschnittlich Quarz: 91,7 % (77,4–100), Lithoklasten: 6,3 % (0–18,3) und Feldspäte: 2,0 % (0–5,5). Somit ist die kompositionelle Reife der Hettang- und Pliensbach-Sandsteine vergleichbar hoch, während die Sandsteine des Sinemurs eine niedrigere kompositionelle Reife zeigen. Dies liegt vor allem an Einzelproben des Sinemurs,

die bis zu 37,3 % Lithoklasten und bis 15,7 % Feldspäten enthalten. Zu den QFL-Komponenten treten in Einzelproben Glaukonit, Ooide, Onkoide und biogene Komponenten hinzu.

Für die Sandsteine des Lias liegen bereits umfangreiche Untersuchungen der Schwermineralassoziationen vor, die teilweise publiziert wurden (z. B. Häusser & Kurze 1975). Aus Literatureinträgen und weiteren unveröffentlichten Bohrungsberichten wurde bereits im Rahmen des vorangegangenen Vorhabens *Sandsteinfazies* eine Datenbank erstellt, die im Rahmen des Vorhabens *GeoPoNDD* genutzt werden konnte. In den Hettang-Sandsteinen dominiert die ultrastabile Zirkon-Tourmalin-Rutil-Gruppe, deren Gesamtanteil über alle Proben gemittelt 87,0 % beträgt (Z: 46,8 %; T: 18,0 %; R: 21,4 %). In geringen Anteilen sind Apatit (6,2 %), Disthen (5,5 %), Staurolith (5,1 %), Granat (3,9 %) und Epidot (1,2 %) vorhanden. Ein vergleichbares Spektrum liegt in den Sinemur-Sandsteinen vor, in denen die ultrastabile Zirkon-Tourmalin-Rutil-Gruppe einen über alle Proben gemittelten Anteil von 85,6 % hat (Z: 48,8 %; T: 20,0 %; R: 17,0 %). In geringen Anteilen sind Disthen (5,9 %), Granat (5,4 %), Staurolith (4,4 %), Apatit (4,0 %) und Epidot (3,2 %) vorhanden. In den Pliensbach-Sandsteinen nimmt der Anteil der ultrastabilen Zirkon-Tourmalin-Rutil-Gruppe auf einen über alle Proben gemittelten Anteil von 63,3 % ab (Z: 33,4 %; T: 14,8 %; R: 15,6 %). Dies wird vor allem durch einen höheren Anteil von Granat (22,6 %) ausgeglichen. In geringen Anteilen sind Apatit (6,6 %), Staurolith (3,8 %), Epidot (2,7 %) und Disthen (1,9 %) vorhanden.

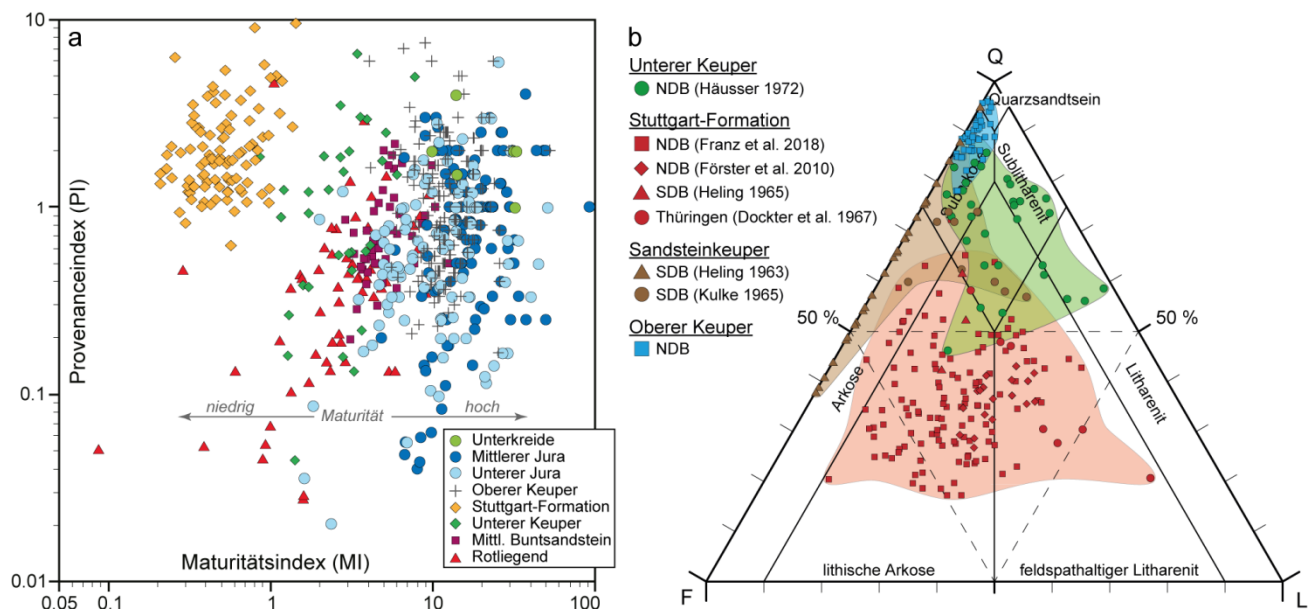


Abbildung 5: Detritischer Modalbestand (QFL) der permischen und mesozoischen Sandsteine des Norddeutschen Beckens. **a)** An Hand von Maturitätsindex $MI = Q/(F+L)$ und Provenanceindex $PI = F/L$ (Pettijohn 1957) zeigt sich die zunehmende kompositionelle Reife der Sandsteine vom Rotliegend zum Mesozoikum. Eine Ausnahme bildet vor allem der Schilfsandstein (Stuttgart-Formation), dessen Sandsteine die niedrigste Maturität in der gesamten Beckenfüllung aufweisen. **b)** Der QFL-Dreiecksplot nach McBride (1963) für typische triassische Sandsteine des Mitteleuropäischen Beckens zeigt, dass ab dem Oberen Keuper (Exter-Formation) hauptsächlich hochreife Quarzsandsteine sowie Subarkosen und Sublitharenite vorliegen.

Mittlerer Buntsandstein

Im Arbeitsgebiet Darß-Rügen-Usedom ist der Detfurth-Sandstein (Unter- und Oberbank) feinkörnig (Mittelwert: 0,13 mm) ausgebildet, insbesondere in der Unterbank treten jedoch lagenweise Feinkiese auf (Abb. 4). Die Sortierung ist mäßig bis gut (0,61) und die Korngrößenverteilung weist eine leicht positive Schiefe auf (0,15). Die Sandsteine der Hardeggen-Formation sind hinsichtlich der Korngrößenparameter ähnlich ausgebildet, während die Sandsteine der Solling-Formation als Mittel- bis Grobsandsteine deutlich gröber ausgebildet sind, in denen zudem Kieslagen vorhanden sind.

Der detritische Modalbestand (QFL) der Detfurth-Sandsteine im Raum Darß-Rügen-Usedom wird dominiert von Quarz (Mittelwert: 83,1 %), gefolgt von Lithoklasten (10,1 %) und Feldspäten (6,8 %). Eine ähnliche Zusammensetzung zeigt sich bei den Hardeggen-Sandsteinen mit Quarz: 80,2 % (Mittelwert), Lithoklasten: 13,9 % und Feldspäten 5,9 %. In den Solling-Sandsteinen dominiert Quarz: 79,8 % (Mittelwert), gefolgt von Feldspäten: 17,6 % und Lithoklasten: 2,6 %. Damit sind die Detfurth- und Hardeggen-Sandsteine überwiegend als Sublitharenite anzusprechen, während die Solling-Sandsteine als Arkosen zu bezeichnen sind. Im Detail zeigen sich vor allem bei den Solling-Sandsteinen erhebliche Schwankungen in der vertikalen Profilabfolge. Während an der Basis der Formation grobkörnige Arkosen vorliegen (Q: 68 %, F: 28 %, L: 4 %), nimmt zum Hangenden die Korngröße ab und die kompositioneller Reife zu. Dementsprechend sind am Top feinkörnige Quarzarenite vorhanden (Q: 96 %, F: 4 %).

Zusammenfassung

Die Daten und Ergebnisse Sedimentpetrographie wurden in eine bestehende Datenbank (Fortschreibung) integriert, die nun umfangreiche Datensätze zu den sechs geothermischen Hauptreservoirn des Mesozoikums im Norddeutschen Becken enthält; der **Meilenstein M10** wurde erreicht (Tab. 1).

2.1.5 AP 5: Petrologie und Diagenese

Die authigenen Neubildungen des Porenraums bzw. der Porenraumfüllungen wurden an An- und Dünnschliffen untersucht (siehe Kap. 2.1.2). Hierzu kamen mikroskopische Methoden (Polarisation, Kathodolumineszenz, REM) sowie mineralchemische Untersuchungen (Mikrosonde) zur Anwendung. Weiterhin wurden an Karbonat- und Sulfatzementen die Verhältnisse der stabilen C-, O- und S-Isotope sowie Flüssigkeitseinschlüsse untersucht. Die qualitative und quantitative Erfassung der authigenen Neubildungen des Porenraums bzw. der Porenraumfüllungen zielten vor allem auf die tiefenabhängige Charakterisierung diagenetischer Prozesse, welche dann als Prognosewerkzeug für die Exploration geothermischer Reservoirn verwendet werden können. In Ergänzung zur Sedimentpetrographie in AP 4 (Kap. 2.1.4) wurde an Dünnschliffen die Kontaktstärke (tiefen- und diageneseabhängige Kompaktion) und die Korngrößenverteilung mittels Sehnenschnittverfahren und mit den zuvor durchgeführten Siebanalysen verglichen.

Hinsichtlich ihres detritischen Modalbestandes lassen sich die Sandsteine der mesozoischen Hauptreservoirn in zwei Gruppen unterteilen: (1) quarzreiche Sandsteine und (2) feldspat- und

lithoklastische Sandsteine. Zur ersten Gruppe gehören die hochreifen Sandsteine der Unterkreide, des Mittleren Juras, des Unteren Juras und des Oberen Keupers. Zur zweiten Gruppe gehören die Sandsteine des Unteren–Mittleren Keupers (insbes. der Schilfsandstein) und teilweise die Sandsteine des Mittleren Buntsandsteins, die durch eine niedrige bis mittlere kompositionelle Reife gekennzeichnet sind (Abb. 5). Im Rahmen des Vorhabens *GeoPoNDD* wurden die Sandsteine des Oberen Keupers als Vertreter der ersten Gruppe und die Sandsteine des Schilfsandsteins als Vertreter der zweiten Gruppe in Fallstudien detailliert bearbeitet. Hierfür konnten umfangreiche Probe- und Dünnschliffsätze verwendet werden, die aus dem vorangegangenen Vorhaben *Sandsteinfazies* vorhanden waren (Fortschreibung). Zusätzlich wurde ein Kontrollprobensatz aus dem Unteren Jura bearbeitet, um die Ergebnisse des Oberen Keupers zu verifizieren (siehe Sachbericht GTN, Teilvorhaben 0325920A).

Da die Diagenese vom Ausgangsgestein (geochemisch, mineralogisch), dem Ablagerungsraum, der Zusammensetzung des Tiefenwassers als auch Druck und Temperatur abhängig sind, lassen sich die Ergebnisse auf die weiteren Hauptreservoire der jeweiligen Gruppe übertragen, da die Zusammensetzung der Tiefenwässer als auch Temperatur und Druck vergleichbar sind. Die Rekonstruktion der Diagenese sollte vor allem die Frage beantworten, warum in Teufen bis ca. 2.500 m Sandsteine mit niedriger Kontaktstärke (Kompaktion) und großen, offenen Porenräumen und hoher hydraulischer Durchlässigkeit vorhanden sind. Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse der Fallstudie aus dem Schilfsandsteins zusammengefasst.

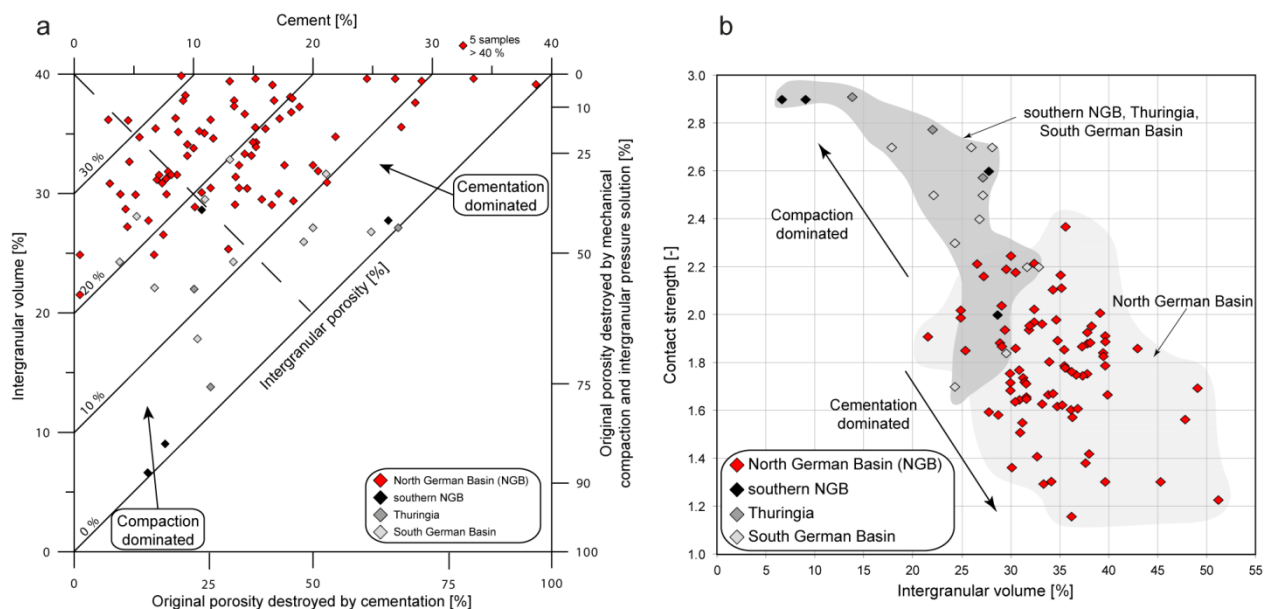


Abbildung 6: Zementationsdominierte und kompaktionsdominierte Diagenese im Fallbeispiel Schilfsandstein (Niegel et al. in Vorber.). Die Diagramme für **a)** intergranuläres Porenvolumen (IGV) vs. authigener Zement nach Houseknecht (1987) und **b)** intergranuläres Porenvolumen (IGV) vs. Kontaktstärke zeigen, dass die Diagenese im Norddeutschen Becken (NDB) überwiegend durch frühdiagenetischen (marin-brackischen) Karbonatzement gesteuert wurde, der während der Versenkungsdiagenese die Kompaktion verhinderte. Im südlichen NDB, Thüringen und dem Süddeutschen Becken, wo der Schilfsandstein in fluviatiler Fazies ausgebildet ist, fehlte dieser Stützzement, was sich in stärkerer Kompaktion und geringeren Porenvolumen bemerkbar macht.

Schilfsandstein

Die Diagenese des Schilfsandsteins wurde in erheblichem Maße durch die primäre fazielle Ausbildung geprägt. Die fluvio-deltaischen Sandsteine des Unteren Schilfsandsteins bzw. die fluviatilen Sandsteine des Oberen Schilfsandsteins, in denen lokal jeweils potenzielle hydrothermale Reservoirs vorhanden sein können (Franz et al. 2018b), weisen Diageneseabläufe auf, die sich deutlich von denen der Sandsteine der Deltaebene bzw. Schwemmebene unterscheiden. Neben einer primär faziellen Steuerung, erfolgte im Verlauf der Versenkungsdiagenese eine sekundäre Steuerung durch Inversionsprozesse in der Kreide und dem Tertiär. Aus den gewonnenen Daten und Ergebnissen wurde ein Diagenesemodell erstellt, das in Kürze publiziert werden soll (Niegel et al. in Vorber.).

Am Beispiel der fluvio-deltaischen Sandsteine des Unteren Schilfsandsteins des Norddeutschen Beckens zeigt sich eine weitestgehend zementationsgesteuerte Diagenese, bei der die Zementation des Porenraumes durch frühdiaogenetischen (marin-brackischen) Karbonatzement bereits in den obersten Sedimentschichten erfolgte. Im Verlauf der Versenkungsdiagenese wurde dieser Karbonatzement mehrfach umgewandelt, stützte jedoch das Korngerüst beständig ab und verhinderte so eine intensivere Kompaktion der Sandsteine (Abb. 6). Dies erklärt vor allem die niedrige Kontaktstärke von 1,9 (Mittelwert), die sich aus den hauptsächlich vorhandenen Punkt- und Langkontakten ergibt. Im Verlauf der Versenkungsdiagenese erfolgte die Bildung zumeist schmaler Quarz- bzw. Feldspatanwachssäume (4,2 bzw. <0,3 % am Gesamtgestein) und die Bildung von Tonmineralen (7,1 %). Hinzu kommt als spätdiaogenetische authigene Bildung Analcim (4,2 %). Sowohl die authigenen Tonminerale als auch der Kristallhabitus des Analcim zeigt Abhängigkeiten zur primären Sedimentfazies (Abb. 7).

Flüssigkeitseinschlüsse (Karbonat- und Quarzzement) und Sauerstoff-Isotopenuntersuchungen (Karbonatzement) weisen auf maximale Versenkungstiefen, die teils erheblich von der heutigen Teufenlage des Schilfsandsteins abweichen. Flüssigkeitseinschlüsse im Karbonatzement des Schilfsandsteins der Bohrung Wolgast 1a belegen deren Bildung in einem Temperaturbereich von 86–137°C mit einem Häufigkeitsmaximum bei 120°C. Unter Annahme eines höheren (paläo-) geothermischen Gradienten von 40°K pro 1.000 m ergibt sich eine Versenkungstiefe von ca. 3.000 m, die etwa 2.000 m von der heutigen Teufenlage bei ca. 1.000 m abweicht. An Hand der vorhandenen Schichtenfolge kann diese maximale Versenkung in den Zeitraum später Oberjura (Tithon) eingeordnet werden. In der nachfolgenden Kreide führten Inversionsprozesse zu Hebung und Abtragung, wodurch der Schilfsandstein in der Bohrung Wolgast 1a in den Bereich seiner heutigen Tiefenlage aufstieg. In Folge dieses Aufstiegs wurde der Karbonatzement bis auf wenige Reste gelöst, und der Porenraum verblieb weitestgehend offen. *Dieser Zusammenhang aus tieferer Versenkung und kreidezeitlicher Inversion, durch die porenraumfüllende Karbonatzemente gelöst wurden, scheint für die Qualität der hydrothermalen Reservoirs im gesamten östlichen Teil des Norddeutschen Beckens von Bedeutung zu sein.*

Wie die exemplarische Studie des Schilfsandsteins weiterhin zeigt, ist im östlichen Teil des Norddeutschen Beckens der laterale Zutritt von Zechsteinwässern und die Bildung porenraumfüllender Sulfatzemente die Ausnahme, was vor allem an der geringen Anzahl von Salzstöcken in diesem Teil des Beckens liegt. Die Schwefel-Isotopenverhältnisse an Sulfatzementen zeigen deren Abstammung von aufsteigenden basinalen Wässern, die als Mischung verschiedener Formationswässer aus dem Liegenden des Schilfsandsteins entstanden.

Zusammenfassung

Es wurden Diagenesemodelle für (1) quarzreiche Sandsteine (Fallstudie Oberer Keuper) und (2) feldspat- und lithoklastreiche Sandsteine (Fallstudie Schilfsandstein) der mesozoischen Hauptreservoirs erstellt, die deren diagenetische Charakteristik exemplarisch darstellen und insbesondere einen Erklärungsansatz für die großen Porenraumvolumina liefern, die bis in 2.500 m Tiefe häufig ausgebildet sind. Der **Meilenstein M11** wurde erreicht (Tab. 1).

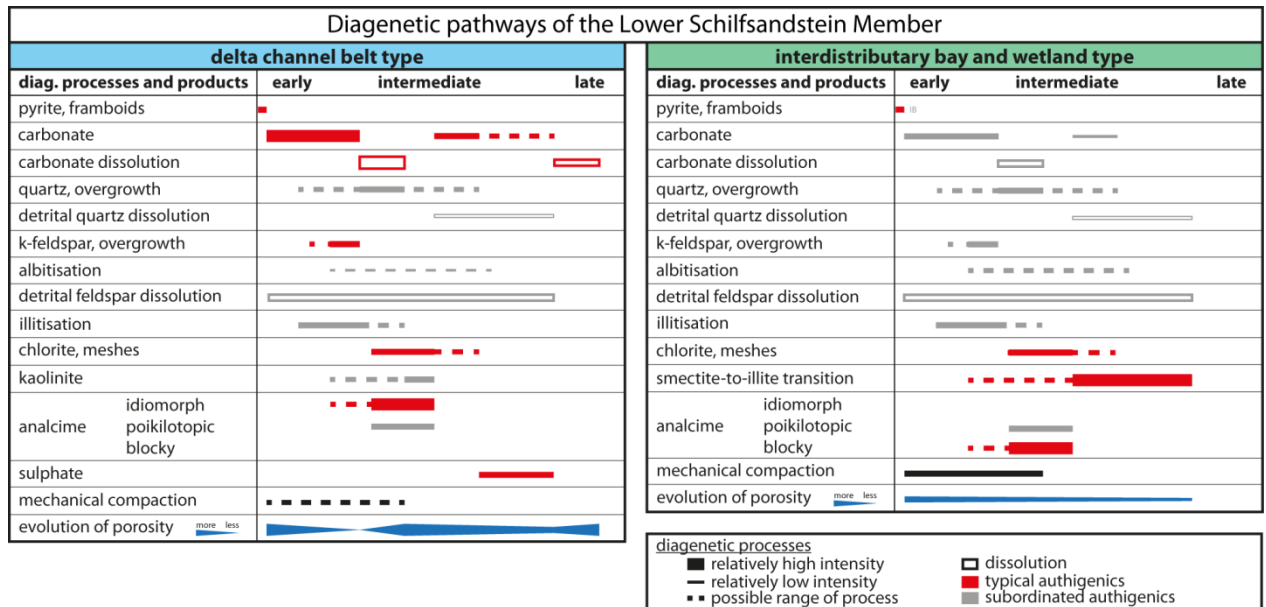


Abbildung 7: Die schematische Diageneseabfolge des Unteren Schilfsandsteins zeigt Unterschiede für die Sandsteine des Fündigkeitstyps fluvio-deltaische Rinnensysteme (links: delta channel belt type), deren Diageneseverlauf vor allem durch frühdiagenetische Karbonatzemente und deren spätere Lösung kontrolliert wurde, und Sandsteine der Zwischenrinnenbuchten und Deltaebene (keine Reservoirs), deren Diageneseverlauf stärker durch Kompaktion und nachfolgende Zementation gekennzeichnet ist (Niegel et al. in Vorber.).

2.1.6 AP 6: Experimentelle Bestimmung von Porosität und Permeabilität

An 156 Proben aus Aufschlüssen und Bohrungen wurde experimentell die nutzbare Porosität (verschiedene Wägungsmethoden, z. B. Trocknungsmethode), Dichte und weitere Parameter ermittelt. Zusätzlich wurden hydraulische Parameter (z. B. kf-Wert) aus den Korngrößenverteilungen (Siebung nach DIN 4022 an 397 Proben, siehe Kap. 2.1.2) der Siebungsproben berechnet. Eine laborative Bestimmung ausgewählter Kennwerte, z. B. Porosität, Permeabilität, Temperaturleitfähigkeit, erfolgte an 96 Sandsteinproben.

Die neugewonnenen Daten wurden in einer vorhandenen Datenbank integriert (Fortschreibung) und insgesamt 450 Datensätze (je 150 pro Unterkreide, Unterer Jura und Mittlerer Buntsandstein) für einen Methodenvergleich verwendet, z. B. Porosität aus Dünnschliffintegration im Vergleich zu verschiedenen Methoden der Porositätsbestimmung im Labor. Des Weiteren wurden die Datensätze verwendet, um den Einfluss der sedimentären Fazies auf die granulometrischen Kenngrößen sowie die hydraulische Durchlässigkeit zu untersuchen.

Im Ergebnis der Untersuchungen zeigt sich, dass zwischen der Porosität, die aus Punktzählung im Dünnschliff abgeleitet wird (Dünnschliffintegration), und der Porosität die über die Auftriebsmethode errechnet wird, keine Korrelation besteht. Ebenso wenig korrelieren die Porositäten, die aus Dünnschliffintegration abgeleitet werden mit der Porosität, die mit Helium im Labor ermittelt wird (Gasporosität). Gute Korrelation besteht dagegen zwischen den im Labor bestimmten Porositäten (Auftriebsmethode und Gasporosität) und mit der im Labor ermittelten Permeabilität (Gaspermeabilität). Detailliertere Darstellungen sind dem Sachbericht GTN (Teilvorhaben 0325920A) zu entnehmen.

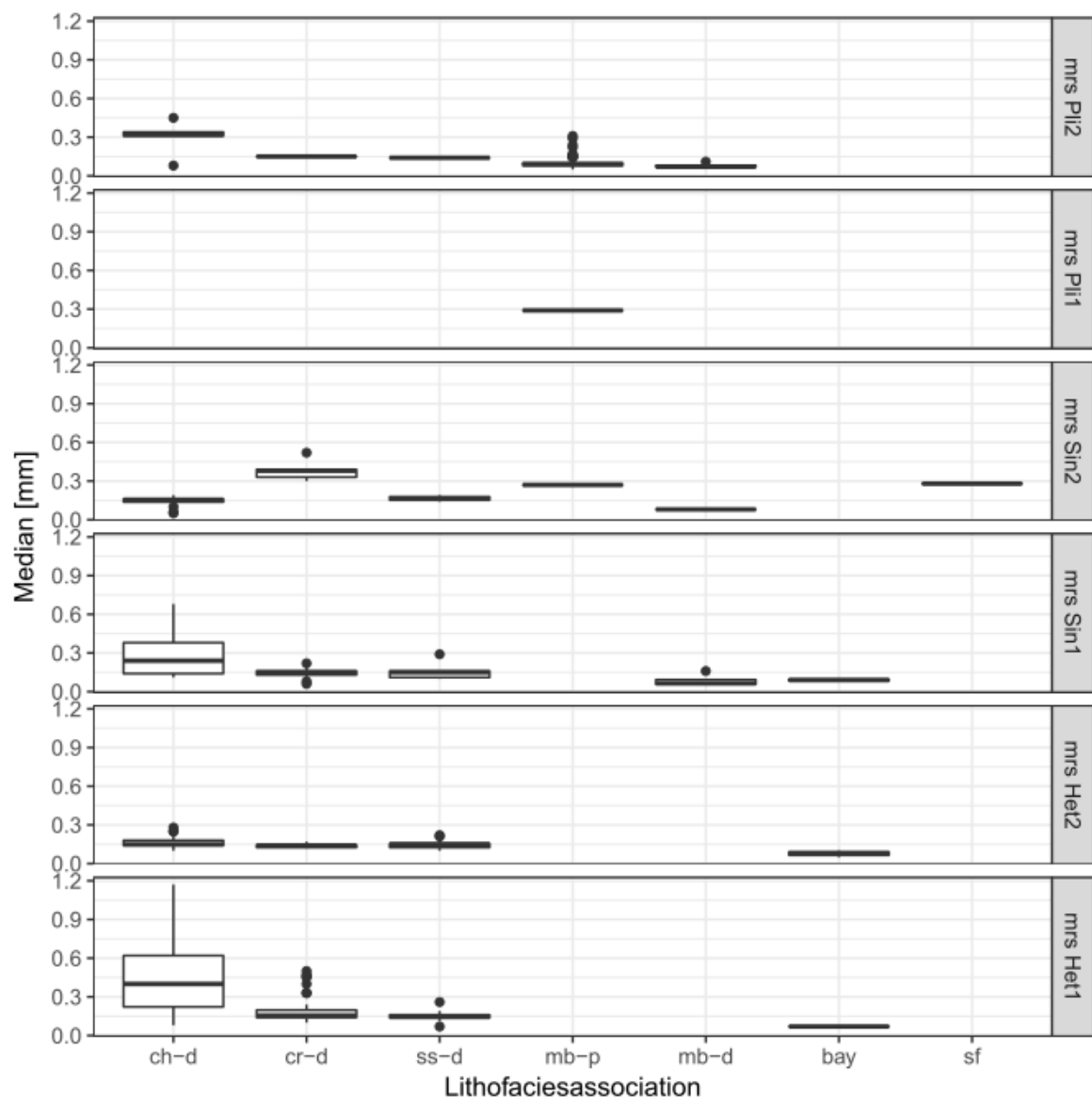


Abbildung 8: Einfluss der sedimentären Fazies auf die granulometrischen Kenngrößen Verteilung am Beispiel der Mediane für verschiedene Faziesassoziationen des Unteren Juras. Die Darstellung erfolgt für die sechs Tiefstandsphasen (maximum regression), für die flächenhafte Reservoirkartierungen vorliegen (siehe Kap. 2.1.3). Der Fündigkeitstyp fluvio-deltaische Rinnensysteme umfasst die Lithofaciesassoziationen ch-d (deltaic channel) und cr-d (crevasse splay) und ist durch größere Korngrößen gekennzeichnet als die Sandsteine der Deltaebene (ss-d), der Mündungsbarren (mb-p, mb-d), der Zwischenrinnenbuchten (bay) und der Küstenfazies (sf).

Aus den vorliegenden Datensätzen kann eindeutig ein Zusammenhang der sedimentären Fazies und granulometrischer Kenngrößen abgeleitet werden. Dies ist für die Fündigkeitstypen fluvio-deltaischer Rinnensysteme, die in allen drei untersuchten Hauptreservoirien vorliegen, der Fall, wie auch für den Fündigkeitstyp „Siliziklastische Küstensysteme“. Die Datensätze zeigen sowohl für die Aufschlussanalogmodelle wie auch für die Ablagerungsmodelle Korngrößenmaxima für die genannten Fündigkeitstypen (Abb. 8). An diese Korngrößenmaxima sind für alle drei Hauptreservoirie höhere hydraulische Kennwerte, insbesondere der Permeabilität, geknüpft, die eine hydrothermale Nutzung möglich machen (Abb. 16–17). Damit bestätigen die durchgeführten Untersuchungen die Zusammenhänge zwischen Fazies und geohydraulischen Kenngrößen, die bereits im vorangegangenen Vorhaben *Sandsteinfazies* (FKZ 0325285) für die Hauptreservoirie Unterer–Mittlerer Keuper, Oberer Keuper und Mittlerer Jura herausgearbeitet werden konnten (Franz et al. 2015, 2018a, b).

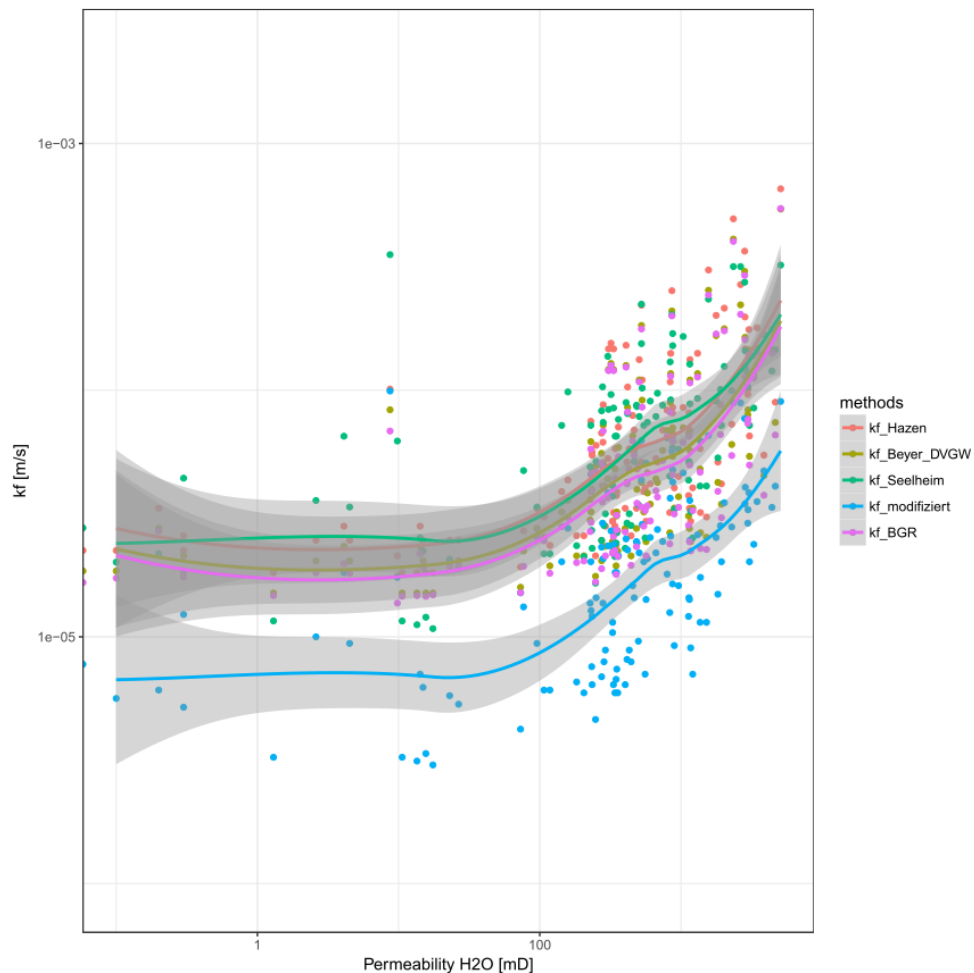


Abbildung 9: Der Vergleich von Wasserpermeabilität mit, aus der Korngrößenverteilung abgeleiteten, k_f -Werten (verschiedene Autoren) zeigt eine signifikante Korrelation ab Werten größer ca. 100 mD. Die grau unterlegten Bereiche markieren jeweils die Standardabweichung.

Aus dem Zusammenhang der sedimentären Fazies und granulometrischer Kenngrößen folgt auch in den hier untersuchten Hauptreservoirien ein Zusammenhang der sedimentären Fazies und der hydraulischen Durchlässigkeit. Potenziell nutzbare Reservoirie sind auf die Fündigkeitstypen fluvio-deltaischer Rinnensysteme und siliziklastische Küstensysteme beschränkt, da nur innerhalb dieser

Fündigkeitstypen Reservoirs mit Nettomächtigkeiten >20 m und effektiven Permeabilitäten >500 mD nachgewiesen werden konnten (siehe Ka. 2.1.8).

Die verschiedenen Methoden zur Ableitung des Durchlässigkeitsbeiwertes (kf-Wert) aus der Korngrößenverteilung wurden an den untersuchten Sandsteinen getestet und mit den im Labor gemessenen Porositäten und Permeabilitäten verglichen. Dabei zeigt sich, dass die Methoden nach Hazen, Beyer, Seelheim und Houben (BGR) vergleichbare Werte liefert. Einzig die modifizierte kf-Wert-Berechnung ergibt niedrigere Werte. Das begründet sich daraus, dass ein geringerer Multiplikator (0,001) verwendet wurde. Im Gegensatz dazu verwenden die anderen Verfahren Multiplikatoren von 0,003 bis 0,013 verwendet worden.

Das Verhältnis der kf-Werte zu den gemessenen Wasserpermeabilitäten zeigt eine Korrelation ab Permeabilitäten von ca. 100 mD (Abb. 9). Eine Abschätzung der Wasserpermeabilität aus dem durch Korngrößenanalyse ermittelten kf-Wert sollte ab einem kf-Wert von ca. 0,0004 möglich sein.

Zusammenfassung

Verschiedene Methoden der experimentellen Bestimmung von Porosität und Permeabilität wurden getestet und miteinander verglichen. Die neugewonnenen Daten in einer vorhandenen Datenbank integriert. Durch die Fortschreibung dieser Datenbank liegen nun umfangreiche Datensätze der sechs Hauptreservoirs vor. Der **Meilensteine M5** und **M7** wurden erreicht (Tab. 1).

2.1.7 AP 7: Integration von Bohrlochmessungen zur Abschätzung von Porositäts- und Permeabilitätsdaten und Anwendung auf eine vorhandene Bohrdatei

Bohrlochgeophysikalische Daten wurden im Rahmen des Vorhabens verwendet um (1) Porositäten und (2) Wärmeleitfähigkeiten abzuschätzen. Hierfür wurden 61 Abschnitte in geeigneten Bohrungen digitalisiert und in eine bestehende Datenbank integriert (Tab. 5). Die Bearbeitung konzentrierte sich jeweils darauf, die Eignung von Altdaten zu überprüfen und gegebenenfalls Verfahren zum geeigneten Umgang mit Altdaten zu entwickeln. Logs, die für die Bewertung der Permeabilität geeignet sind, z. B. LLm und LLd, lagen für die relevanten Formationen nicht in ausreichender Anzahl vor, weshalb eine Permeabilitätsabschätzung aus Bohrlochmessungen nicht durchgeführt wurde. Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse zusammengefasst; eingehendere Darstellungen, wie auch Angaben zu den mathematischen Grundlagen sind dem Sachbericht GTN (Teilvorhaben 0325920A) zu entnehmen.

2.1.7.1 Porositätsberechnung

Im vorangegangenen Vorhaben *Sandsteinfazies* (FKZ 0325285) wurden bereits verschiedene Logtypen auf ihre Eignung zur Porositätsabschätzung untersucht, insbesondere Gamma-Gamma-Logs (Dichte), Neutron-Logs (Wasserstoffadsorption), Akustiklogs (P-Wellengeschwindigkeit) und kN-, UK-, LL- bzw. IL-Logs (scheinbarer elektrischer Widerstand; Franz et al. 2015). Im Vorhaben *GeoPoNDD* wurde die Methodik weiterentwickelt und um die Porositätsabschätzung aus geoelektrischen Bohrlochmessungen ergänzt. Durch diese Fortschreibung liegt nun eine

umfangreiche Methodik zur Porositätsabschätzung aus Bohrlochmesskurven für die Hauptreservoir des Norddeutschen Beckens vor.

Tabelle 5: In AP 7 digitalisierte bohrlochgeophysikalischen Messungen

Bohrungen	Hauptreservoir	Methode (Logs)
Dabendorf 2/74	Unterer Jura	GR, kN
E Binz 1/73	Unterkreide, Unterer Jura, Mittlerer Buntsandstein	GR, kN
E Friedland 1/71	Unterkreide, Unterer Jura, Mittlerer Buntsandstein	GR
E Schwerin 1/87	Unterkreide, Unterer Jura	GR, GG, AL
Gt Prenzlau 3/89	Unterer Jura	GG, AL, IL
Gt Berlin-Wartenberg 2/86	Unterkreide, Unterer Jura	GR, kN
Gt Berlin-Wartenberg 2/86	Mittlerer Buntsandstein	GR
Gt Neubrandenburg 5/87	Unterkreide, Unterer Jura	GR
Gt Neubrandenburg 6/87	Unterkreide, Unterer Jura	GR
Gt Waren 5/90	Unterkreide, Unterer Jura	GR
Gt Karlshagen 2/87	Mittlerer Buntsandstein	GG, AL, NN, VSh
E Kietz 1/73	Unterer Jura	GR
E Pasewalk 2/76	Mittlerer Buntsandstein	AL
E Prerow 4/66	Unterkreide	GR
E Prerow 4/66	Unterer Jura, Mittlerer Buntsandstein	GR, kN
Gt Allermöhe 1/97	Unterer Jura	GR, LLd
Dp Kröpelin 1/65	Unterkreide, Unterer Jura	GR, kN
Lehnin 1	Unterkreide	Normale
E Peckatel 1/71	Unterkreide	GR, AL
E Camin 13/71	Unterkreide, Unterer Jura, Mittlerer Buntsandstein	GR
E Klinken 1/71	Unterkreide, Unterer Jura, Mittlerer Buntsandstein	GR
E Barth 8/78	Unterkreide, Unterer Jura, Mittlerer Buntsandstein	GR
E Königsberg 7/71	Unterer Jura, Mittlerer Buntsandstein	GR
Lalendorf 1/75	Unterkreide, Unterer Jura, Mittlerer Buntsandstein	GR
Gt Stralsund 2/85	Unterkreide, Unterer Jura, Mittlerer Buntsandstein	GR
E Mirow 1/74	Unterkreide, Unterer Jura, Mittlerer Buntsandstein	GR
E Schwaan 1/76	Unterkreide, Unterer Jura, Mittlerer Buntsandstein	GR
E Wustrow 4/77	Unterer Jura, Mittlerer Buntsandstein	GR
E Polssen 1/74	Unterkreide, Unterer Jura, Mittlerer Buntsandstein	GR
E Greifswald 1/62	Unterkreide, Unterer Jura, Mittlerer Buntsandstein	GR

Die Porositätsabschätzung für die mesozoischen Hauptreservoire des Norddeutschen Beckens erfolgte nach Archie (1942) und Kühn (1983). Entscheidend für eine möglichst gute Porositätsabschätzung ist die Bestimmung bzw. Abschätzung des spezifischen Widerstands des Formationswassers R_w , der sowohl von der Salinität als auch von der Temperatur abhängig ist und jeweils mit steigender Temperaturen und Salinität abnimmt.

Diese Beziehungen wurden untersucht, indem für dynamische Temperatur-Widerstands-Salinitäts-Beziehungen Porositäten aus verschiedenen Logtypen für variable Salinitätsgradienten bei konstantem Temperaturgradienten bzw. variablen Temperaturgradienten bei konstantem Salinitätsgradienten abgeschätzt wurden (Abb. 10, 11).

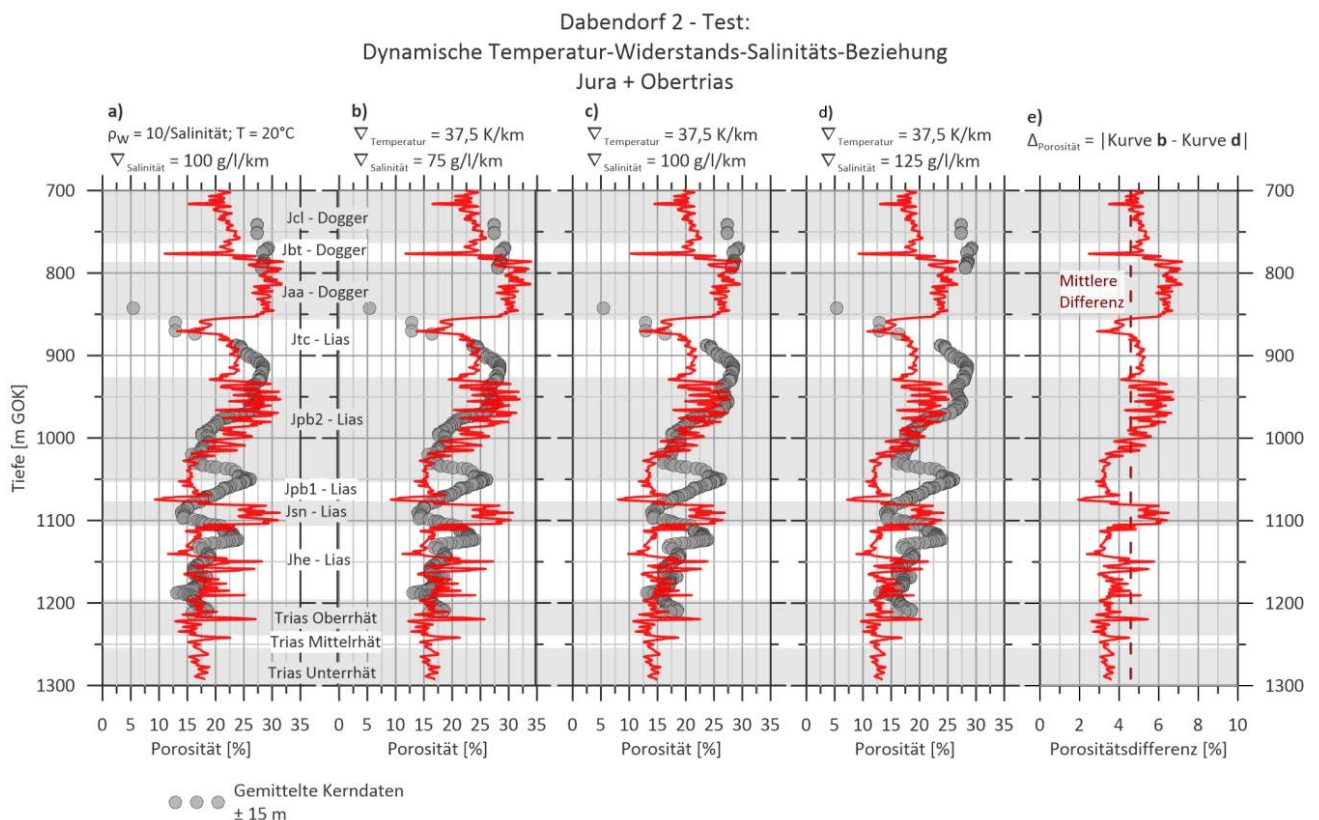


Abbildung 10: Porositätsabschätzungen für dynamische Temperatur-Widerstands-Salinitäts-Beziehung bei variablem Salinitätsgradienten und konstantem Temperaturgradienten am Beispiel der Bohrung Dabendorf 2; rote Linien: aus Elektrolog (kN) berechnete Porosität, graue Punkte: gleitender Mittelwert der Laborporosität.

Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse wurde versucht, den Widerstand basierend auf Salinitäts-, Temperaturgradient und der Widerstands-Konversion aus Schlumberger (2009) für jeden einzelnen Tiefenpunkt der Bohrung zu ermitteln. Das bedeutet, dass nicht mehr nur eine temperaturspezifische Widerstands-Salinitäts-Beziehung betrachtet werden kann, sondern die Änderung aufgrund der Temperaturzunahme mit der Tiefe berücksichtigt wird. Die so erhaltenen Werte wurden mit vorhandenen im Labor an Kernmaterial ermittelten Porositäten abgeglichen. Da diese Porositätswerte mitunter hohe Streuungen aufweisen, wurden das gleitende Mittel mit einem Fenster von ± 15 m um den jeweiligen Messpunkt bestimmt.

Im Ergebnis hat sich gezeigt, dass die Verwendung von Temperatur- und Salinitätsgradienten in jedem Fall eine bessere Anpassung ermöglicht, als wenn jeweils ein Parameter festgehalten wird. Beim Vergleich der beiden Zustandsvariablen Temperatur und Salinität zeigte sich, dass der Einfluss der Salinität auf das Endergebnis größer ist. Insofern kommt einer guten Bestimmung des Salinitätsgradienten eine hohe Bedeutung zu.

Zusammenfassung

Im Rahmen des Vorhabens *GeoPoNDD* wurden die Bohrlochmesskurven von 60 Intervallen, die jeweils ein Hauptreservoir abdecken, digitalisiert und daraus Porositätswerte berechnet. Die **Meilensteine M4** und **M12** wurden erreicht (Tab. 1). Die gewonnenen Daten wurden in eine bestehende Datenbank integriert (Fortschreibung).

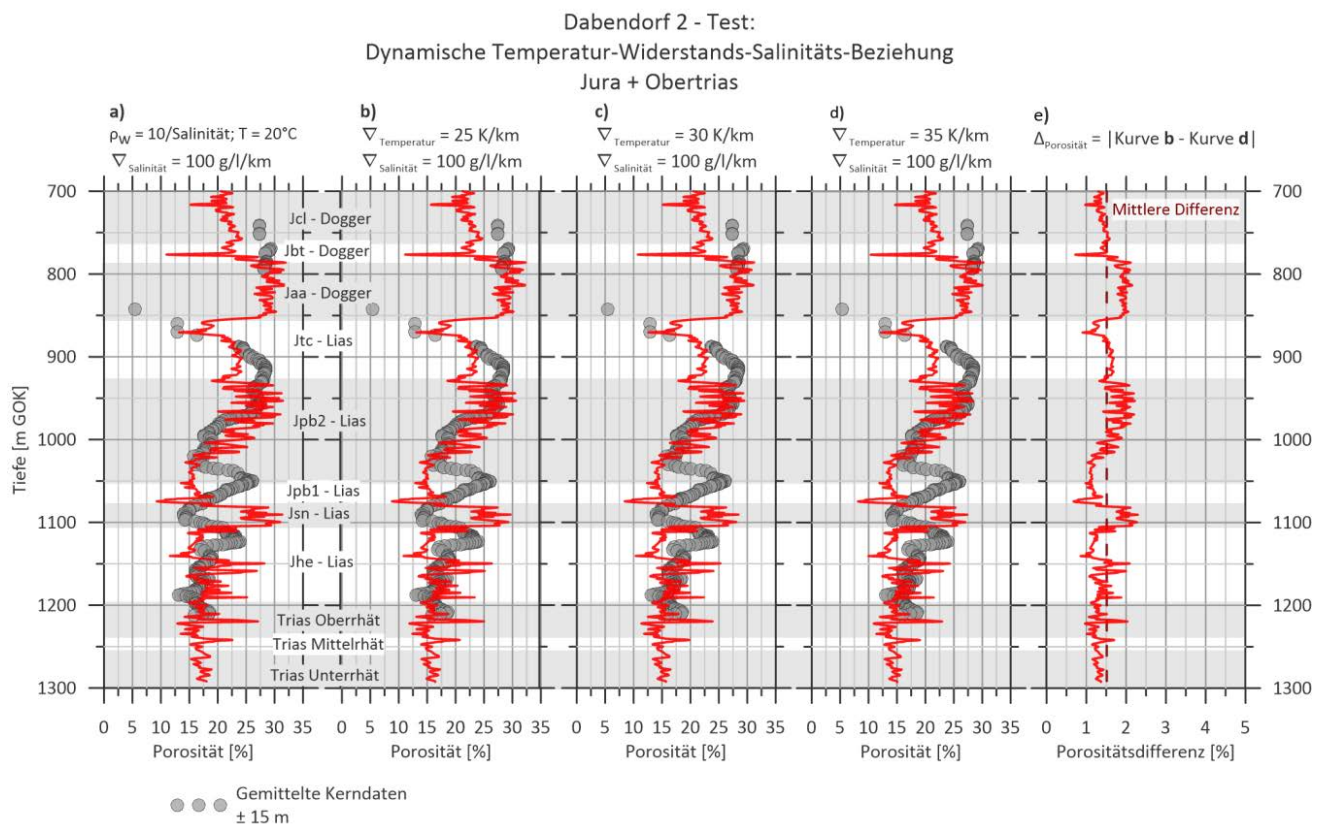


Abbildung 11: Porositätsabschätzungen für dynamische Temperatur-Widerstands-Salinitäts-Beziehung bei variablem Temperaturgradienten und konstantem Salinitätsgradienten am Beispiel der Bohrung Dabendorf 2; rote Linien: aus Elektrolog (kN) berechnete Porosität, graue Punkte: gleitender Mittelwert der Laborporosität.

2.1.7.2 Berechnung der Wärmeleitfähigkeit aus GR-Daten

Für ausgewählte Bohrungen erfolgte eine Berechnung der Wärmeleitfähigkeit (TC) nach FUCHS et al. (2015). Dabei sollte die Frage beantwortet werden, inwieweit die Methodik anwendbar ist, wenn (1) nur Daten aus GR-Logs vorhanden sind bzw. verwendet werden, und (2) zumeist nur Altdaten vorliegen, also z. B. GR in GE statt in API gemessen wurde.

Die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit erfordert als Eingangsgröße die Berechnung des Tongehalts (Vsh – volume fraction of shale) über den Gamma Ray Index (GRI). Hierfür müssen GR_{min} und GR_{max} jeweils für einzelne Abschnitte der Bohrungen separat ermittelt werden; zusätzlich wird ein Korrekturfaktor benötigt, der entsprechend der formationellen Kennwerte und des Kompaktionsgrades ausgewählt werden kann (siehe Sachbericht GTN, Teilvorhaben 0325920A). Anschließend wurden die berechneten Werte mit den, an Kernmaterial gemessenen, Daten verglichen (Fuchs & Förster 2010). Da solche Messwerte jedoch nur für wenige Bohrungen verfügbar sind, wurden alternative Möglichkeiten für den Vergleich von berechneter und gemessener Wärmeleitfähigkeit gesucht. Viel häufiger als Kerndaten sind Temperaturverlaufsmessungen vorhanden, aus denen sich geothermische Gradienten berechnen lassen, die über die Tiefe der Bohrung variabel sind. Aus TC und Wärmefluss Q lässt sich wiederum der geothermische Gradient berechnen. Angaben zum Wärmefluss wurden entweder der Literatur entnommen oder geschätzt.

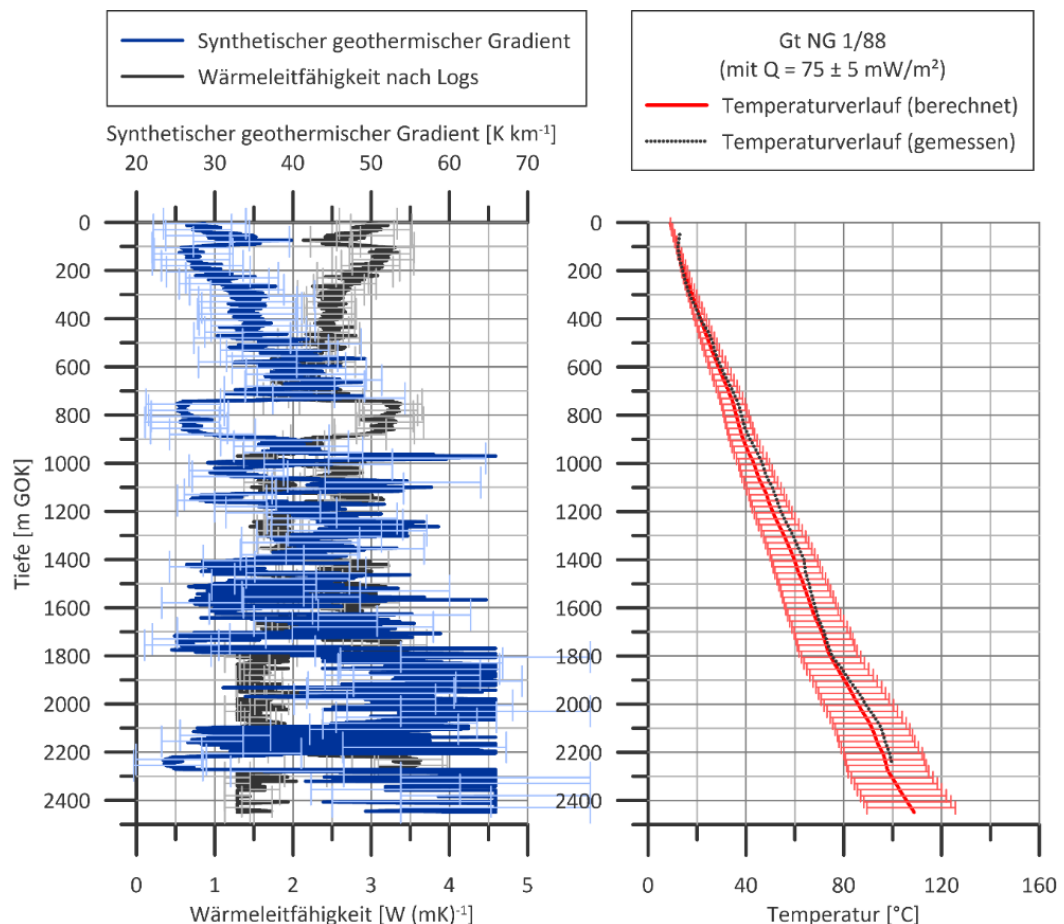


Abbildung 12: Nach GR berechnete Wärmeleitfähigkeit (links: grau), synthetischer geothermischer Gradient (links: blau) und synthetischer Temperaturverlauf (rechts: rot) gegen gemessene Temperatur (rechts: schwarz) am Beispiel der Bohrung Gt NG 1/88. Die Temperaturen ergeben sich aus aufsummierten Gradienten, beginnend bei 9°C Oberflächentemperatur.

Bohrungen, die sich gut für Vergleiche der Gradienten eignen, verfügen idealerweise über:

- Ein ausgeglichenes Temperaturlog: ca. 10°C an Oberfläche, lange Standzeit, keine starken Anomalien
- GR Daten in möglichst hoher Qualität
- Ein ausführliches Schichtenverzeichnis

Dies wird exemplarisch für die Bohrung Gt Neustadt-Glewe 1/88 dargestellt (Abb. 12).

Zusammenfassung

Im Rahmen des Vorhabens *GeoPoNDD* wurden die Wärmeleitfähigkeiten und Temperaturgradienten für die sechs mesozoischen Hauptreservoirs in verschiedenen Bohrungen berechnet. Die an Kernen bestimmten Daten der Wärmeleitfähigkeiten sowie die an Bohrungen gemessenen Temperaturverläufe konnten durch diese Berechnungen zumeist gut reproduziert werden, so dass die vorhandenen GR-Logs (Altdaten) als grundsätzlich geeignet zu betrachten sind. Der **Meilenstein M8** wurde erreicht (Tab. 1).

2.1.8 AP 8: Datensynthese und Erstellung eines flächenhaften Kartenwerkes, modellhafte Darstellung des Einflusses von Fazies auf Diagenese und hydraulische Eigenschaften

Auf der Grundlage der vorangegangenen Arbeitspakete wurden flächenhafte Datenpunktkarten zu Reservoirfazies und -qualität (jeweils Nettomächtigkeit und Durchlässigkeit) für die im Vorhaben *GeoPoNDD* untersuchten Hauptreservoirs erstellt. Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse zusammengefasst. Die eingehendere Darstellung eines Kartensatzes aus dem Hauptreservoir Unterer Jura (mrs He 1 – Planorbis Chronozone) dient als Beispiel, da der gesamte Kartensatz hier nicht darstellbar wäre.

Der in *GeoPoNDD* erstellte Kartensatz komplettiert den im Vorhaben *Sandsteinfazies* erstellten Kartensatz, so dass nun für die sechs Hauptreservoirs ein einheitliches Erkundungskartenwerk für die Standortvorauswahl vorhanden ist.

Unterkreide

Für die Unterkreide wurden flächenhafte Karten der Reservoirfazies und der Reservoirqualität (effektive Reservoirmächtigkeit und -durchlässigkeit) für drei Zeitscheiben erstellt, die den östlichen Teil des Norddeutschen Beckens abdecken:

- Oberes Berrias (Ostrakodenzone Wealden 3)
- Oberes Hauterive
- Oberes Barrême–Unteres Apt

Dadurch können potenzielle Reservoirs der Fündigkeitstypen fluvio-deltaische Rinnensysteme (oberes Berrias) und siliziklastische Küstensysteme (Oberes Hauterive, Oberes Barrême–Unteres Apt) räumlich hochauflösend dargestellt werden.

Unterer Jura

Für den Unteren Jura wurden flächenhafte Karten der Reservoirfazies und der Reservoirqualität (effektive Reservoirmächtigkeit und -durchlässigkeit) für sechs Zeitscheiben erstellt:

- mrs Pli 2 – Spinatum Chronozone
- mrs Pli 1 – Margaritatus Chronozone
- mrs Sin 2 – Raricostatum Chronozone
- mrs Sin 1 –Turneri Chronozone
- mrs He 2 – Angulata Chronozone
- mrs He 1 – Planorbis Chronozone

Auf Grund der paläogeographischen Verhältnisse sind nutzbare Reservoirs ausschließlich im östlichen Teil des Norddeutschen Beckens ausgebildet. Im westlichen Teil des Beckens sind überwiegend tonige und heterolithische Abfolgen vorhanden, in denen keine Sandsteine vorkommen.

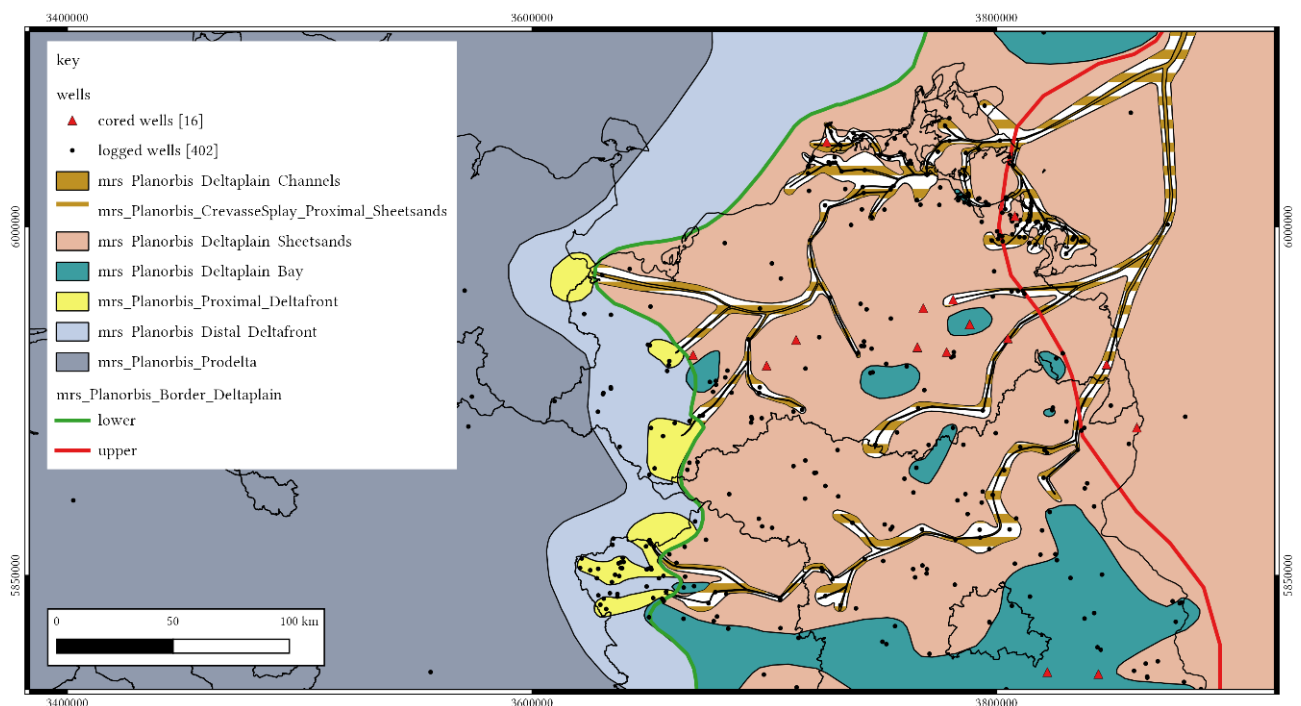


Abbildung 13: Lithofaziesrekonstruktion des Unterhettang-Deltasystems (mrs Het1 – Planorbis Chronozone).

Wie im Oberen Keuper (Franz et al. 2015, 2018a) bildeten sich an den Mündungen eines skandinavischen Flusssystems große Flussdeltas, die den antransportierten Detritus in das Meer verfrachteten. In morphologischer Hinsicht liegen auch im Unteren Jura flussdominierte Deltatypen vor, die durch ein distributives Muster an Verteilerrinnen gekennzeichnet sind, zwischen denen Stillwasserbuchten ausgebildet waren (Abb. 13). Vom Oberen Keuper ausgehend drängte das schrittweise vorrückende Meer die deltaische Küstenebene, deren Küstenlinie etwa in Nord-Süd-Richtung durch das östliche Norddeutsche Becken verlief, nach Osten zurück, bis das Meer im Untertoarc seine flächenhafteste Ausdehnung erreicht. Im Anschluss baute sich das

Toarc-Bajoc-Deltasystem schrittweise gegen das Becken vor (Franz et al. 2015, Zimmermann et al. 2018).

Nutzbare Reservoirs des Fündigkeitstyps fluvio-deltaische Rinnensysteme sind an die Verteilerrinnen des Flussdeltas geknüpft (Abb. 14.). An dem gezeigten Beispiel aus dem Unterhettang wird deutlich, dass Sandsteinreservoir mit Nettomächtigkeiten >20 m nur innerhalb der Verteilerrinnen ausgebildet sind.

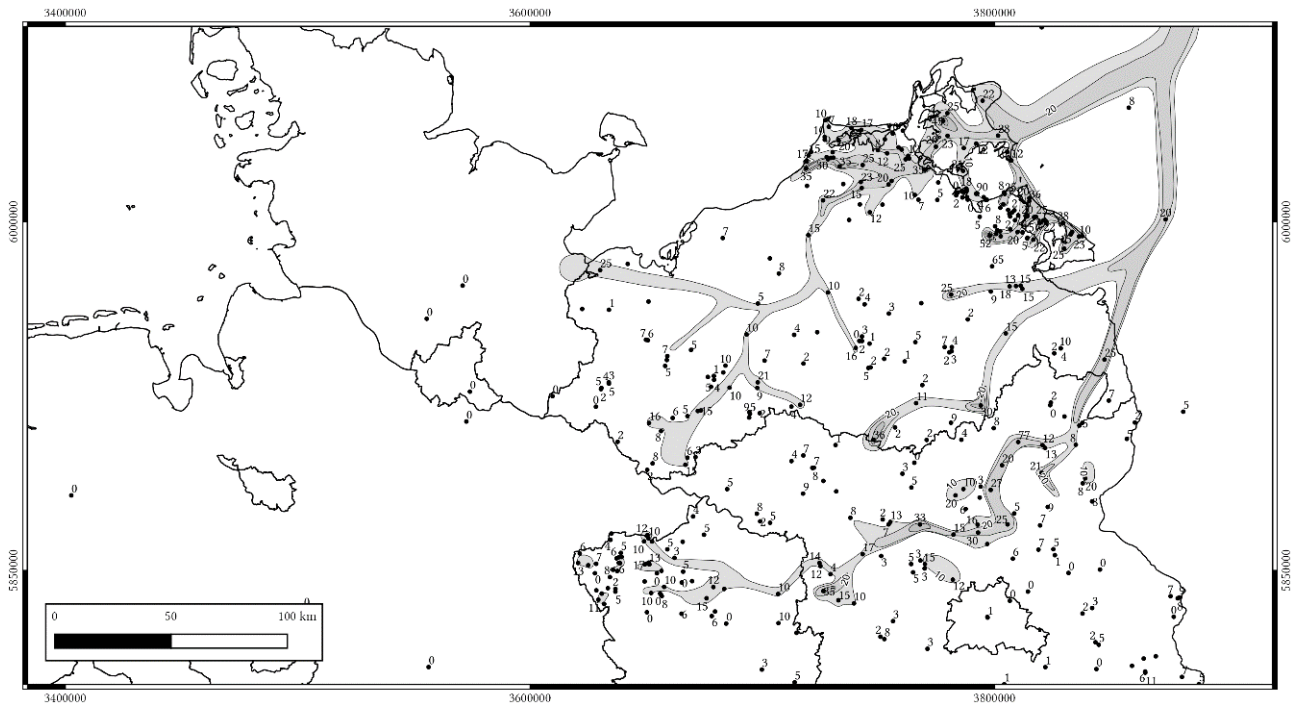


Abbildung 14: Sandmächtigkeitsverteilung des Unterhettang-Deltasystems (mrs Het1 – Planorbis Chronozone). Die Zahlen entsprechen den Nettomächtigkeiten der Sandsteinreservoirs, grau hinterlegt sind Nettomächtigkeiten >20 m.

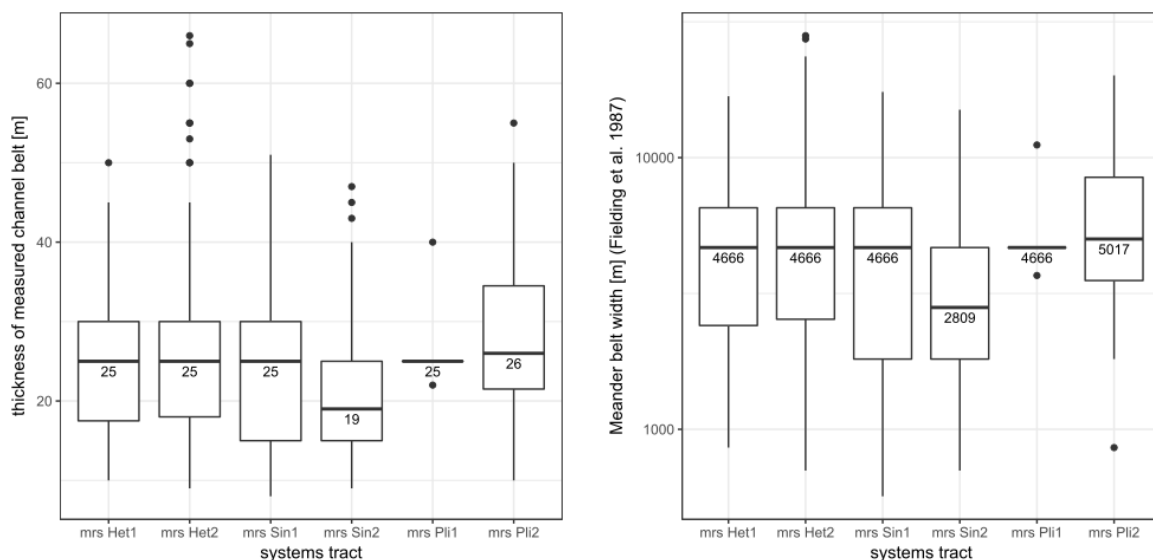


Abbildung 15: Durchschnittliche Breiten und Nettomächtigkeiten der Sandsteine für die Verteilerrinnen der deltaischen Systeme des Unteren Juras.

Aus dem Mächtigkeiten der Rinnenfüllungen wurden mittels empirischer Formeln die Breiten der mäandrierenden Verteilerrinnen und die Breiten der Rinnengürtel ermittelt (siehe Franz et al. 2015, Zimmermann et al. 2018). Für das gezeigt Beispiel des Unterhettangs sind innerhalb der durchschnittlich 4,7 km breiten Verteilerrinnengürtel durchschnittliche Nettomächtigkeiten der Sandsteine von 25 m zu erwarten (Abb. 15). Innerhalb des Unterhettang-Deltas weisen die Sandsteine der Verteilerrinnengürtel Korngrößenmaxima auf, denen große Porenvolumina und, daran geknüpft, hohe hydraulische Durchlässigkeiten folgen (Abb. 16, 17).

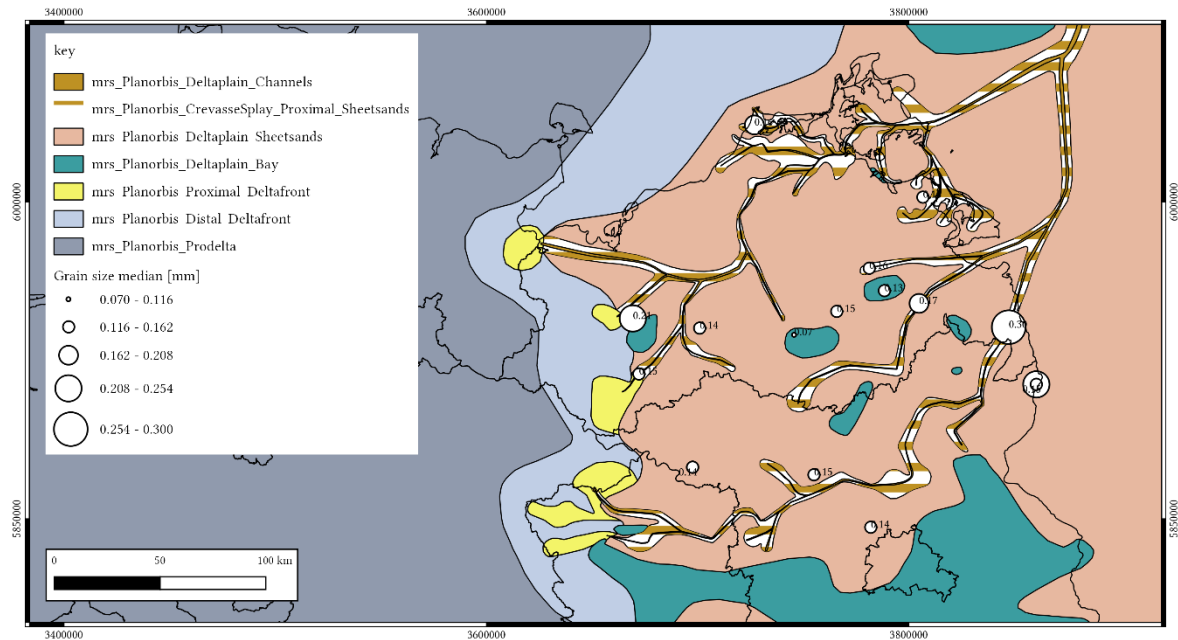


Abbildung 16: Medianwerte der Korngrößenverteilung pro Bohrung innerhalb des Unterhettang-Deltasystems (mrs Het1, Planorbis Chronozone).

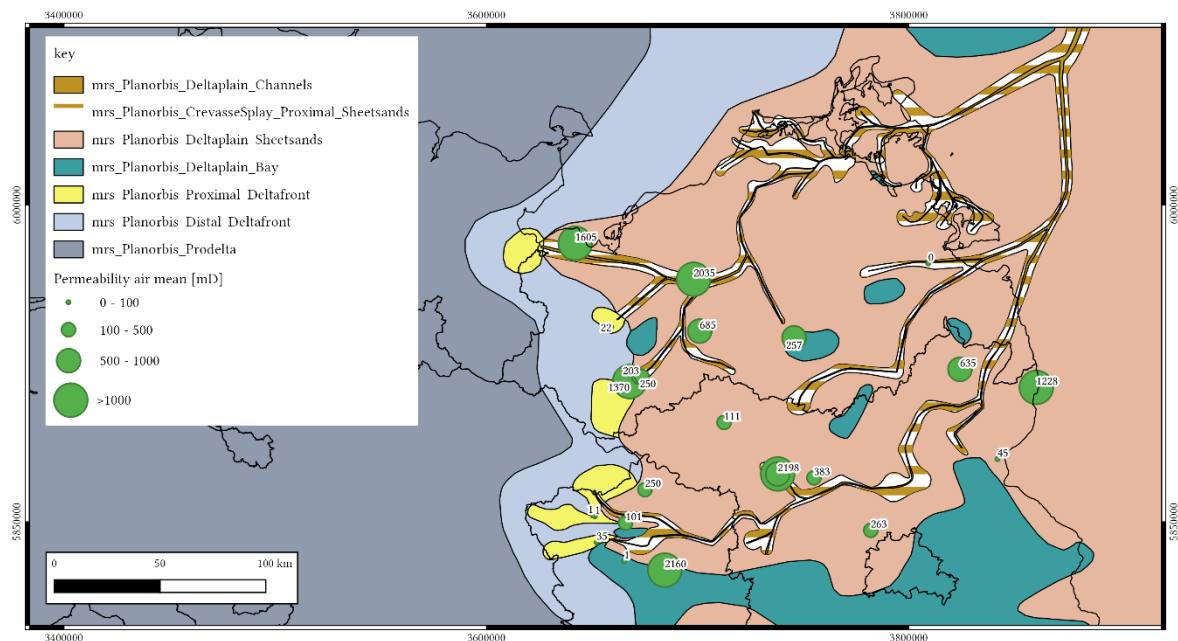


Abbildung 17: Mittelwerte der Permeabilitätsverteilung pro Bohrung innerhalb des Unterhettang-Deltasystems.

Insgesamt bestätigen die im Vorhaben *GeoPoNDD* durchgeführten Untersuchungen des Hauptreservoirs Unterer Jura, die im vorangegangenen Vorhaben *Sandsteinfazies* aufgezeigten Zusammenhänge zwischen primärer Sedimentfazies und der Ausbildung des Fündigkeitstyps fluvio-deltaischer Rinnensysteme in deltaischen Systeme (Franz et al. 2015).

Mittlerer Buntsandstein

Für den Mittleren Buntsandstein wurden flächenhafte Karten der Reservoirfazies und der Reservoirqualität (effektive Reservoirmächtigkeit und -durchlässigkeit) für vier Zeitscheiben erstellt, die das Gebiet Darß-Rügen-Usedom abdecken:

- Solling-Formation
- Hardeggen-Formation
- Detfurth-Unterbank
- Volpriehausen-Sandstein

Dadurch können potenzielle Reservoirs des siliziklastische Küstensysteme (Volpriehausen-Sandstein, Detfurth-Unterbank) und fluviatile Rinnensysteme (Hardeggen-Formation, Solling-Formation) räumlich hochauflösend dargestellt werden.

Zusammenfassung

Für die Hauptreservoirs Unterkreide, Unterer Jura und Mittlerer Buntsandstein wurden flächenhafte Karten der Reservoirfazies und der Reservoirqualität (effektive Reservoirmächtigkeit und -durchlässigkeit) erstellt. Der **Meilenstein M13** wurde erreicht (Tab. 1). Der neue Kartensatz komplettiert den im Vorhaben *Sandsteinfazies* erstellten Kartensatz, so dass nun ein einheitliches Erkundungskartenwerk für die sechs Hauptreservoirs eine verbesserte Standortvorauswahl ermöglicht.

2.1.9 AP 9: Bewertung des geothermischen Potentials, Verschneidung der Karten mit GeotIS

Zusätzlich zu den Reservoirfazies- und der Reservoirqualitätskarten (Kap. 2.1.8) wurden durch den Vorhabenpartner GTN Analysedaten der Formationswässer des Norddeutschen Beckens flächenhaft dargestellt und im GIS verschnitten. Die Analysedaten des Fluidchemismus (Salinität) stammen aus Erdöl/Erdgasbohrungen bzw. Geothermiebohrungen und wurden durch Wolfgramm & Seibt (2008) aus der Literatur und im Rahmen verschiedenen Forschungsvorhaben zusammengetragen und in einer Datenbank integriert.

Unterkreide

Reservoirs der Unterkreide erreichen in Salzstockrandsenken des östlichen Norddeutschen Beckens Tiefenlagen, die für eine direkte geothermische Nutzung in Frage kommen. Bei einem durchschnittlichen geothermischen Gradienten von 33 °C/km und einer Jahresmitteltemperatur von 8 °C werden erst ab ca. 1.600 m Teufe Temperaturen von ca. 60 °C erreicht. Im westlichen Norddeutschen Becken ist die Unterkreide weiträumig in Teufen größer 1.600 m verbreitet. Lokal

werden auch Teufen >2.000 m in Salzstockrandsenken erreicht, in denen Temperaturen von ca. 80°C vorliegen. Der Mittelwert der Salinität liegt bei 123 g/l (n= 231), maximale Werte liegen bei 350 g/l, minimale bei 0,6 g/l. Auf Grund häufiger lateraler Zuflüsse aus den benachbarten Salzstöcken ist der Salinitätsgradient von ca. 13 g/l pro 100 m im Vergleich zu anderen Hauptreservoirien erhöht (Abb. 18). Dementsprechend zeigen Salinität und Teufe nur geringe Korrelationen. Die Formationswässer der Unterkreide Reservoirie sind überwiegend Na-Cl-Wässer, vereinzelt kommen auch Na-Ca-Cl-Wässer vor.

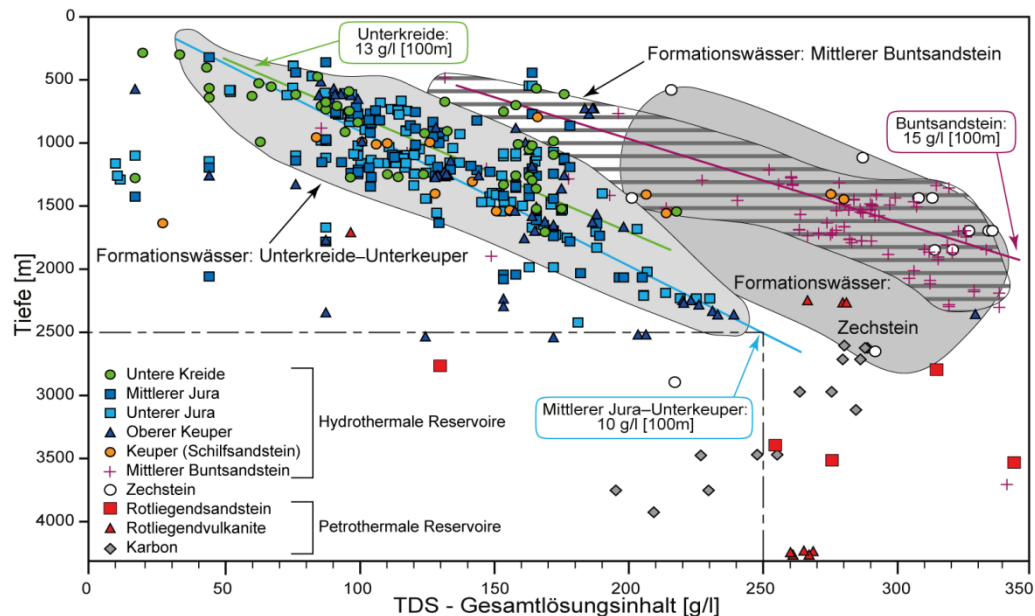


Abbildung 18: Salinität hydrothormaler und petrothormaler Reservoirie des Norddeutschen Beckens, verändert nach Wolfgramm et al. (2008), Wolfgramm & Franz (2020).

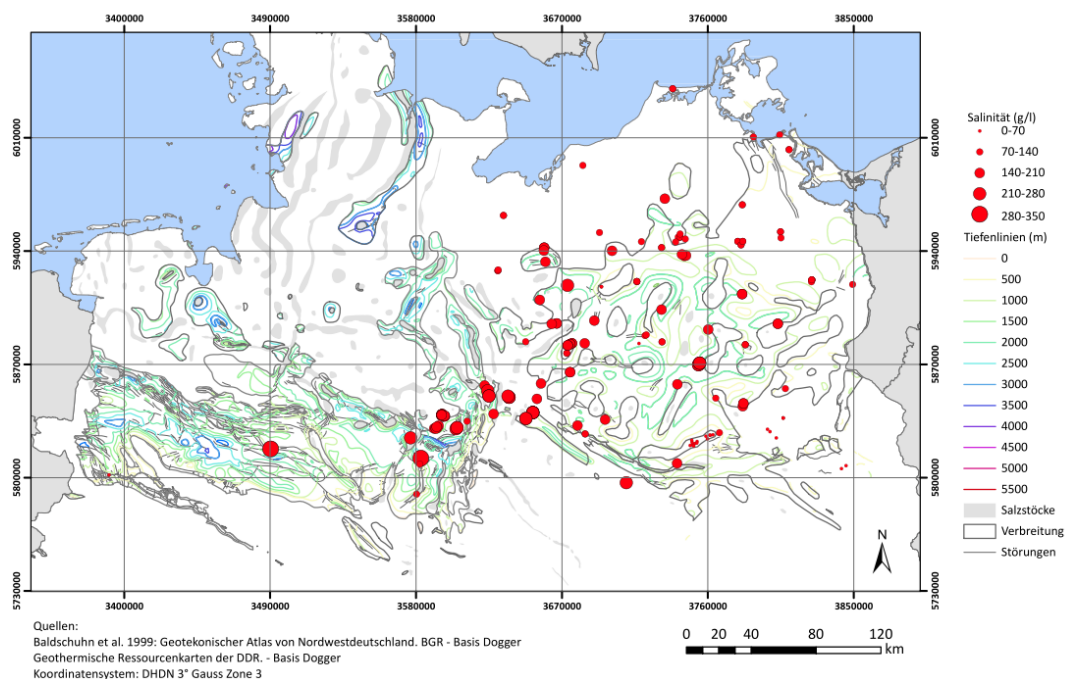


Abbildung 19: Salinität der Formationswässer des Unteren Juras.

Unterer Jura

Die Formationswässer des Unteren Juras weisen im Mittelwert eine Salinität von 139 g/l auf (n= 198), maximale Werte erreichen 325 g/l, minimale Werte liegen bei 62 g/l (Abb. 19). Der Salinitätsgradient liegt bei 10 g/l je 100 m und entspricht dem allgemeinen Salinitätsgradienten, der von Wolfgramm et al. (2008) für die geothermischen Hauptreservoire oberhalb des Mittleren Buntsandsteins ermittelt wurde (Abb. 18). Da Salinität und Teufe korrelieren, sind lateral Zuflüsse von Zechsteinwässern nur von lokaler Bedeutung für die Fluidchemie. Die Wässer des Lias sind zumeist Wässer des Na-Cl-Typs, selten sind auch Na-Ca-Cl-Wässer vorhanden (Abb. 20).

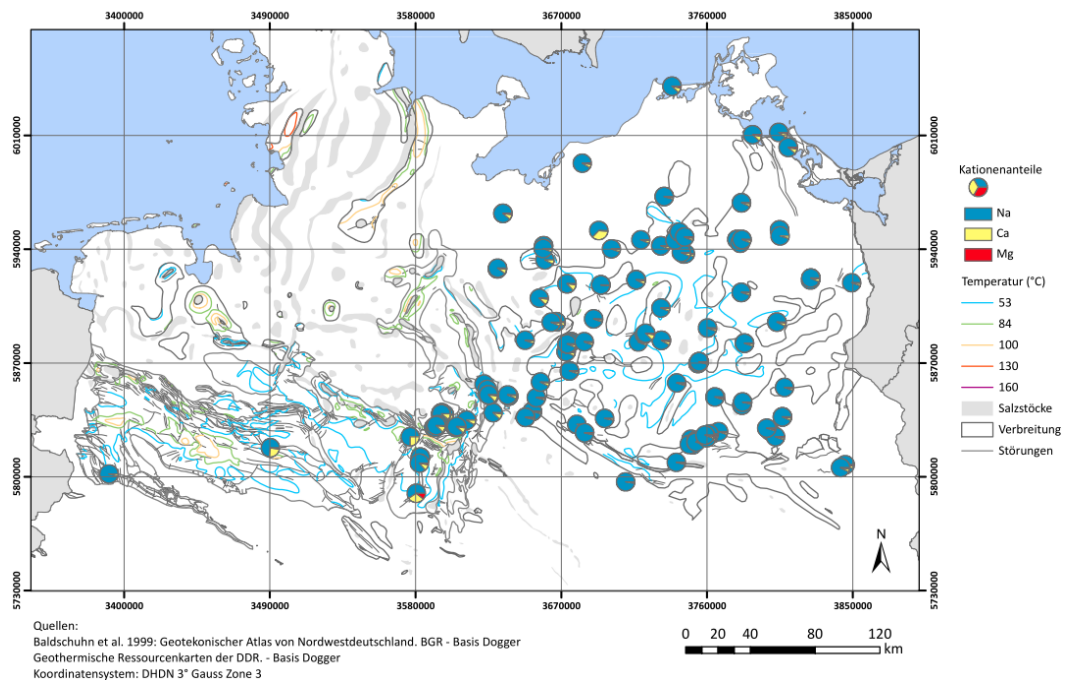


Abbildung 20: Chemische Zusammensetzung der Formationswässer des Unteren Juras.

Mittlerer Buntsandstein

Die Salinität der Formationswässer des Mittleren Buntsandsteins unterliegen starken Schwankungen. Der Mittelwert liegt bei 263 g/l (n= 263), der Maximalwert erreicht 380 g/l, der Minimalwert liegt bei 17 g/l. Niedrige Werte gehen auf niedrigere Teufen in den randlichen Beckengebieten zurück, z. B. Rügen (Abb. 21). Die Maximalwerte sind zum einen an Standorte mit hohen Teufen bis 4100 m gebunden, und zum anderen an Störungen, auf denen Tiefenwässer mit höherer Salinität aufsteigen. Aus den Daten leitet sich ein Salinitätsgradient ab, der 15 g/l je 100 m beträgt und damit höher ist als in den jüngeren Hauptreservoiren (Abb. 18; Wolfgramm et al 2008). Dies kann an der Beeinflussung der Fluidchemie durch salinare Formationswässer des Zechsteins oder des Oberen Buntsandsteins (Salinarröt) liegen. Die Formationswässer des Mittleren Buntsandsteins sind überwiegend Wässer des Na-Cl-Typs (Abb. 22). Allerdings kommen bei geringeren Salinitäten durch höhere prozentuale Anteile an Calcium und Magnesium auch Na-Ca-Cl- und Ca-Na-Cl-Wässer vor. Calcium-reiche Wässer sind jedoch auch bei höheren Salinitäten und größeren Teufen vorhanden. In Wolfgramm et al. (2008) wurde angegeben, dass die Wässer

bis zu einer Tiefe von ca. 1500 m Natrium dominiert sind und ab 1500 m der Calciumanteil zunimmt. Als Ursache für wurden diagenetische Prozesse angeführt.

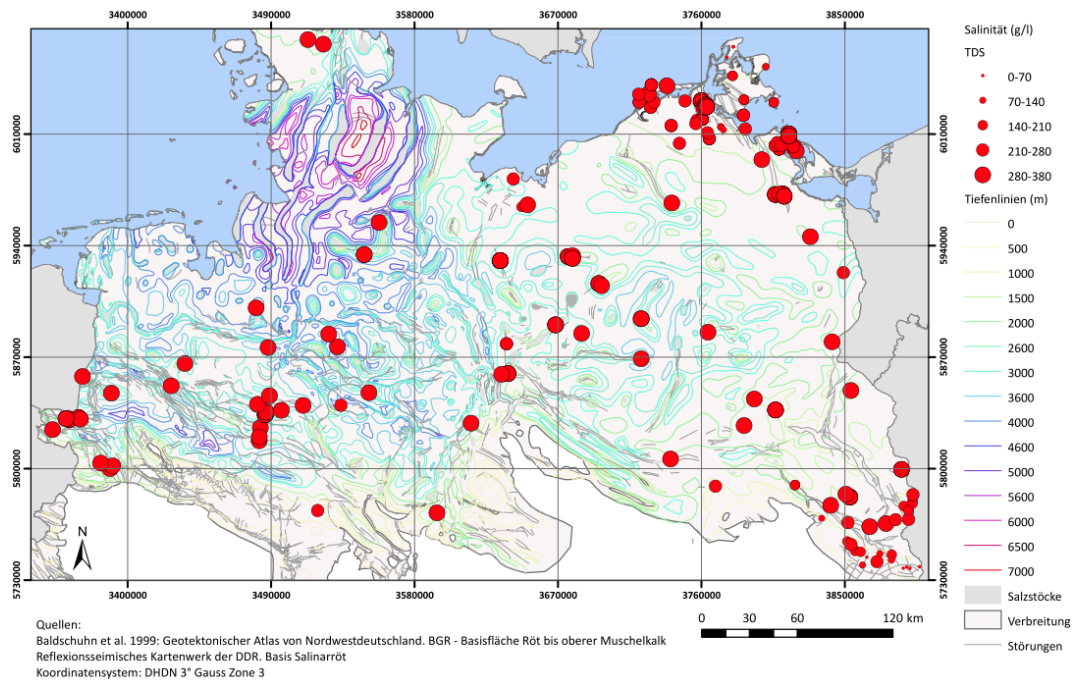


Abbildung 21: Salinität der Formationswässer des Mittleren Buntsandsteins.

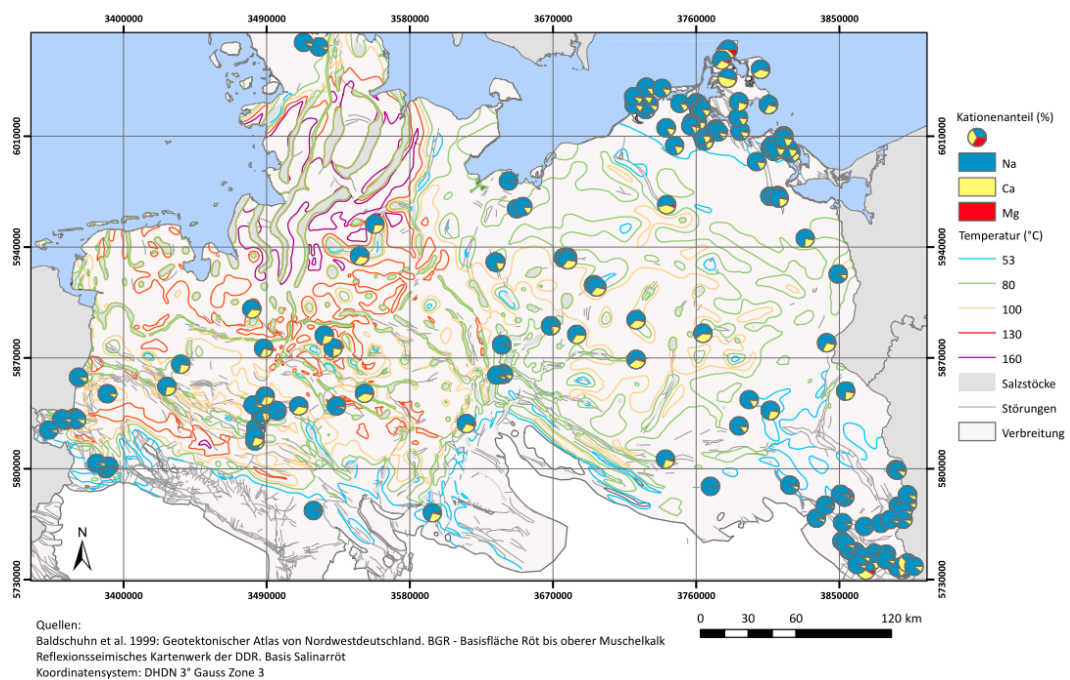


Abbildung 22: Chemische Zusammensetzung der Formationswässer des Mittleren Buntsandsteins.

Implementierung der Karten in das *Geothermische Informationssystem*

Das im Vorhaben *GeoPoNDD* erstellte Kartenwerk wurde für die Übergabe an die online-Plattform *Geothermisches Informationssystem* (GeotIS) vorbereitet. Bezüglich der Integration des Kartenwerks in GeotIS bestehen mit dem LIAG erste Absprachen. Die Übergabe der Daten soll im Laufe des Jahres 2020 erfolgen, d.h. sobald die Finanzierung und der Betrieb des *Geothermischen Informationssystems* mittelfristig sichergestellt sind.

Zusammenfassung

Aus der vorhandenen Datenbank Fluidchemie wurden durch Verschneidung mit dem GIS Potenzialkarten für die Hauptreservoirs erstellt, die Salinität und Chemismus der Formationswässer flächenhaft darstellen. Durch die Fortschreibung der Datenbank Fluidchemie stehen nun umfangreiche Potenzialkarten für die Standortbewertung im Rahmen von Kenntnisstandsanalysen und Machbarkeitsstudien vor. Die **Meilensteine M14** und **M15** wurden erreicht.

2.1.10 Das hydrothermale Reservoir der Bohrung Gt Schwerin 6/17

Im Rahmen des Vorhabens *GeoPoNDD* wurde das Kernmaterial der fündigen Förderbohrung Gt Schwerin 6/17 bemustert. In Kombination mit vorhandenen Analysedaten wurde ein Ablagerungs- und Reservoirmodell für den Fündigkeitstyp „Fluvio-deltaische Rinnensysteme“ am Standort Schwerin erstellt, das für die Bewertung der Ablagerungsmodelle der Unterkreide und des Unteren Juras zur Verfügung stand. Die Bearbeitung wurde durch den Vorhabenpartner Universität Göttingen im Rahmen einer kostenneutralen Verlängerung der Vorhabenlaufzeit durchgeführt.

Das Geothermievorhaben Schwerin-Lankow

Bereits 2011 wurde durch den Vorhabenpartner GTN eine Kenntnisstandsanalyse im Auftrag der Stadtwerke Schwerin GmbH ausgeführt, die die Möglichkeiten der geothermalen Wärmenutzung für den im östlichen Teil der Stadt gelegenen Standort „Waisenhausgärten“ aufzeigt. In einem nächsten Schritt erarbeitete GTN im Jahr 2014 jeweils Machbarkeitsstudien für hydrothermale Reservoirs des Eozäns, des Unteren Juras und des Oberen Keupers für diesen Standort, die auch verschiedene anlagentechnische Konzeptionen und deren Wirtschaftlichkeit in Betracht zogen. 2015 folgte die Ausarbeitung einer weiteren Machbarkeitsstudie für einen Ausweichstandort in Schwerin-Lankow im westlichen Schwerin. In dieser Studie kam zum ersten Mal das Erkundungskartenwerk zum Einsatz, das im Vorhaben *Sandsteinfazies* entwickelt wurde (Franz et al. 2015, 2018a). Auf Grundlage des Kartenwerks wurde für den Standort Schwerin-Lankow ein hydrothermales Reservoir in der Unteren Exter-Formation (Postera-Sandstein) prognostiziert (Wolfgramm et al. 2015). Ein vergleichbares Reservoir wird bereits am Standort Neubrandenburg als saisonaler Wärmespeicher genutzt.

Die Bohrung Gt Schwerin 6/17

Die Bohrung Gt Schwerin 6/17 wurde im Zeitraum Oktober 2018–Januar 2019 als erste Bohrung einer Dublette abgeteuft. Der Bohrlochausbau wird in Buse et al. (2019) und Franz & Wolfgramm (2019) detaillierter dargestellt. Insgesamt wurden im Abschnitt von ca. 1.103 bis 1.286 m acht Kernmärsche mit insgesamt 87,8 m Kernmaterial gezogen. Zur Bestimmung der hydraulischen Eigenschaften des erschlossenen Reservoirs wurden zwei Kurzzeitpumpversuche (Fördertest und Flowmetertest) in Form eines N2-Lift-Tests durchgeführt. Im Zuge des siebenstündigen Fördertestes wurde ein Gesamtvolumen von 633 m³ Schichtwasser entnommen. Nach einer anfänglichen Slug-Flow-Förderung konnte zum Ende des Testes eine nahezu konstante Förderrate von 36 l/s bei einer sehr geringen Absenkung von etwa 1 bar realisiert werden. Als maximale Fördertemperatur wurden 56,8 °C gemessen. Aus den Testdaten errechnen sich eine Durchlässigkeit von 6,2 Darcy bzw. 304 Darcy-Metern und ein Produktivitätsindex von 36 l/(s×bar) bzw. ca. 1300 m³/(h×MPa). Das geförderte Schichtwasser ist Wasser vom Na-Cl-Typ mit einer Salinität von ca. 145 g/l und einem Gasgehalt von ca. 110 Nml/l, wobei das Gas CO₂-dominiert ist und nur in Spuren von Methan enthält.

Auf Grund der hervorragenden Testergebnisse wurde die Bohrung Schwerin 6 zur Förderbohrung ausgebaut und mit der Planung der Bohrung Schwerin 7 begonnen, die im Herbst 2020 abgeteuft werden soll.

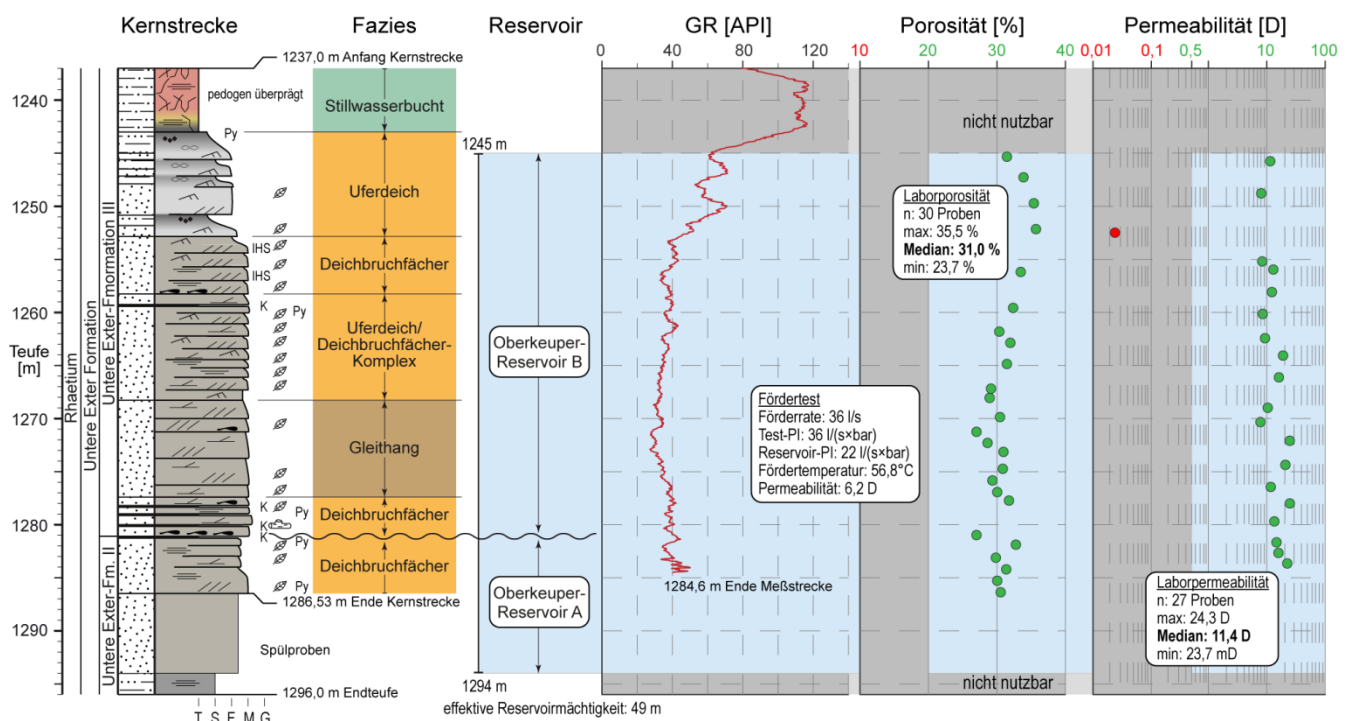


Abbildung 23: Das Reservoir der Bohrung Gt Schwerin 6/17 mit wesentlichen Kennzahlen, verändert nach Franz & Wolfgramm (2019).

Das Reservoir

Im Anschluss an den Fördertest wurden an den Kernstrecken des Reservoirs sedimentologisch-fazielle bzw. hydraulische Untersuchungen durchgeführt. Dabei konnte die Bildung des Reservoirs in einem fluviatilen Rinnengürtel bestätigt werden (vgl. Franz et al. 2015). Durch die schrittweise laterale Verlagerung der mäandrierenden Rinne kamen die eigentliche Rinnenfüllung (Gleithang) sowie die rinnennahen Ablagerungen, z. B. Deichbruchfächer und Uferdeiche, zur Überlagerung und bildeten ein, in lithofazieller Hinsicht, komplex aufgebautes Sandsteinreservoir von relativ hoher Mächtigkeit (Abb. 23). Die hohe Gesamtmächtigkeit von 49 m erklärt sich auch aus der Amalgamierung der Oberkeuper-Reservoirs A und B, d. h. aus zwei unterschiedlichen Generationen des Flusssystems. Aus der Mächtigkeit der Rinnenfüllung von 9,22 m kann nach Collinson (1978) eine Breite des Rinnengürtels von ca. 2000 m abgeleitet werden, innerhalb dessen der Fündigkeitstyp fluviatile Rinnengürtel sicherlich ausgebildet ist.

Analysedaten der Porosität und Permeabilität ergaben eine Porosität mit Median von 31,0 % (30 Werte) und eine Permeabilität mit Median von 11,4 Darcy (27 Proben). Damit liegt die im Labor gemessene Permeabilität deutlich über der Permeabilität des Feldtests.

Zusammenfassung

Durch die Bohrung Gt Schwerin 6/17 wurde ein hydrothermales Reservoir der Unteren Exter-Formation erschlossen, das hervorragende hydraulische Eigenschaften aufweist und für den Dublettenbetrieb bestens geeignet ist. Innerhalb des Norddeutschen Beckens stellt die fündige Bohrung Schwerin 6/17 die erste Neuerschließung eines Standortes für die kommunale Wärmeversorgung seit über 30 Jahren dar. Durch die Bearbeitung des Kernmaterials im Vorhaben *GeoPoNDD* konnte ein Ablagerungs- und Reservoirmodell erstellt werden, das die in den BMWi-finanzierten Projekten *Sandsteinfazies* und *GeoPoNDD* entwickelte Methodik der Reservoirkartierung und -prognose vollumfänglich bestätigte! Für die in diesem Vorhaben bearbeiteten Hauptreservoirs der Unterkreide und des Unteren Juras ergaben sich aus der Bearbeitung wichtige weitere Rückschlüsse.

2.1.11 Bedeutung der Hauptreservoirs für die Wärmewende in Norddeutschland

Die enormen geothermischen Ressourcen des Norddeutschen Beckens werden momentan nur an den Standorten Neubrandenburg, Neustadt-Glewe und Waren für die kommunale Wärmeversorgung genutzt. An diesen Standorten wurden jeweils Reservoirs des Oberen Keupers erschlossen. Somit liegen für das Hauptreservoir Oberer Keuper langjährige Betriebserfahrungen vor. Über diese wenigen Standorte hinaus wird geothermische Energie bislang nicht für die Wärmeversorgung genutzt. Dies lag bislang vor allem an den hohen Risiken einer Standorterschließung. Die Vorhaben *Sandsteinfazies* und *GeoPoNDD* haben für die sechs Hauptreservoirs des Mesozoikums ein umfangreiches Erkundungskartenwerk erstellt, auf dessen Grundlage belastbare Standortprognosen vorgenommen werden können; wie das Beispiel des Geothermievorhabens Schwerin-Lankow zeigt. Durch weitere Standorterschließungen nach dem Beispiel Schwerin-Lankow könnte zukünftig ein erheblicher Anteil des Wärmebedarfs im Norddeutschen Becken abgedeckt werden, und die Geothermie somit einen entscheidenden Beitrag für die Wärmewende leisten.

2.6 Im Berichtszeitraum erfolgte Veröffentlichungen

- 1 Wolfgramm, M., Franz, M. (2016): Das geothermische Potential mesozoischer Sandsteine des Norddeutschen Beckens. *Geothermische Energie* 85, 6-7.
- 2 Wolfgramm, M., Budach, I., Nowak, K., Zimmermann, J. (2017): Bewertung des Fündigkeitsrisikos bei geothermischen Bohrungen im Norddeutschen Becken. Tagungsband Geothermiekongress 02.9.-04.9. 2014 in München, 1-12.
- 3 Barth, G., Franz, M., Heunisch, C., Ernst, W., Zimmermann, J., Wolfgramm, M., (2018a). Marine and terrestrial sedimentation across the T-J transition in the Central European Basin. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 489, 74–94.
- 4 Barth, G., Pienkowski, G., Zimmermann, J., Franz, M., Kuhlmann, G. (2018b): Palaeogeographical evolution of the Lower Jurassic: high-resolution biostratigraphy and sequence stratigraphy in the Central European Basin. In: Kilhams, B., Kukla, P. A., Mazur, S., Mc Kie, T., Mijnlief, H. F., Van Ojik, K. (eds): *Mesozoic Resource Potential in the Southern Permian Basin*. Geological Society, London, Special Publications 469, 341–369.
- 5 Franz, M., Barth, G., Zimmermann, J., Budach, I., Nowak, K., Wolfgramm, M. (2018a): Geothermal resources of the North German Basin: exploration strategy, development examples and remaining opportunities in Mesozoic hydrothermal reservoirs. - In: Kilhams, B., Kukla, P. A., Mazur, S., Mc Kie, T., Mijnlief, H. F., Van Ojik, K. (eds): *Mesozoic Resource Potential in the Southern Permian Basin*. Geological Society, London, Special Publications, 469, 193–222.
- 6 Franz, M., Nowak, K., Niegel, S., Seidel, E., Wolf, M., Wolfgramm, M. (2018b): Deep geothermal resources of the North German Basin: the hydrothermal reservoirs of the Stuttgart Formation (Schilfsandstein, Upper Triassic). *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften* 169, 353–387.
- 7 Wolfgramm, M., Zimmermann, J., Franz, M. (2018): Die Fazies von Sandsteinen als Schlüssel erfolgreicher Geothermieprojekte. *bbr – Brunnenbau, Leitungsbau, Geothermie* 2 (2018): 33–39.
- 8 Zimmermann, J., Franz, M., Schaller, A., Wolfgramm, M., 2018. The Toarcian-Bajocian deltaic system in the North German Basin: subsurface mapping of ancient deltas – morphology, evolution and recent analogue. *Sedimentology* 65, 897–930.
- 9 Buse, C., Thiem, S., Wolfgramm, M., Franz, M., 2019. Das Geothermieprojekt Schwerin-Lankow. *bbr – Brunnenbau, Leitungsbau, Geothermie* 10 (2019), 46–53.
- 10 Franz, M., Wolfgramm, M., 2019. Geothermie Schwerin-Lankow – ein Leuchtturmprojekt im Norddeutschen Becken. *Geothermische Energie* 93, 10–13.
- 11 Zimmermann, J., Budach, I., Metz, M., Barth, G., Franz, M., Seibt, P., Wolfgramm, M., 2019. Reservoir prediction and risk assessment of hydrothermal reservoirs in the North German Basin – combining deep subsurface reservoir mapping with Monte-Carlo Simulation. *Proceedings of the European Geothermal Congress 2019, Den Haag, The Netherlands, 11-14 June 2019*. <http://europeangeothermalcongress.eu/wp-content/uploads/2019/11/proceedings-V3.pdf>

3. Literaturverzeichnis

- Archie, G.E. (1942): The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Trans. AIME*, 146, 54–62.
- Barth, G., Franz, M., Heunisch, C., Ernst, W., Zimmermann, J., Wolfgramm, M. (2018a): Marine and terrestrial sedimentation across the T-J transition in the Central European Basin. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 489, 74–94.
- Barth, G., Pieńkowski, G., Zimmermann, J., Franz, M., Kuhlmann, G. (2018b): Evolution of the Lower Jurassic in the Central European Basin: bio- and sequence-stratigraphic reconstructions. In: Kilhams, B., Kukla, P. A., Mazur, S., McKie, T., Mijnlief, H. F., Van Ojik, K. (eds) *Mesozoic Resource Potential in the Southern Permian Basin*. Geological Society, London, Special Publications 469, 341–369.
- Buse, C., Thiem, S., Wolfgramm, M., Franz, M. (2019): Das Geothermieprojekt Schwerin-Lankow. *bbr – Brunnenbau, Leitungsbau, Geothermie* 10 (2019), 46–53.
- Collinson, J.D. (1978): Vertical sequence and sand body shape in alluvial sequences. In: Miall, A.D. (ed.): *Fluvial sedimentology*. Canadian Society of Petrologists and Geologists, Memoir 5: 577–586.
- Folk, R.L., Ward, W.C. (1957): Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology* 27: 3–26.
- Franz, M., Wolfgramm, M. (2019): Geothermie Schwerin-Lankow – ein Leuchtturmprojekt im Norddeutschen Becken. *Geothermische Energie* 93, 10–13.
- Franz, M., Barth, G., Zimmermann, J., Budach, I., Nowak, N., Wolfgramm, M. (2018a): Deep geothermal resources of the North German Basin: exploration examples of Mesozoic hydrothermal reservoirs. In: Kilhams, B., Kukla, P. A., Mazur, S., McKie, T., Mijnlief, H. F., Van Ojik, K. (eds) *Mesozoic Resource Potential in the Southern Permian Basin*. Geological Society, London, Special Publications 469, 193–222.
- Franz, M., Nowak, K., Niegel, S., Seidel, E., Wolf, M., Wolfgramm, M. (2018b): Deep geothermal resources of the North German Basin: The hydrothermal reservoirs of the Stuttgart Formation (Schilfsandstein, Upper Triassic). *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften* 169 (3), 353–387.
- Franz, M., Wolfgramm, M., Barth, G., Nowak, K., Zimmermann, J., Budach, I., Thorwart, K. (2015): Verbundprojekt: Identifikation hydraulisch geeigneter Bereiche innerhalb der mesozoischen Sandsteinaquifere in Norddeutschland. Sachbericht FKZ 0325285, TU Bergakademie Freiberg, 317 S.
- Fuchs, S., Balling, N., Förster, A. (2015): Calculation of thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat capacity of sedimentary rocks using petrophysical well logs. *Geophysical Journal International* 203, 1977–2000.
- Fuchs, S., Förster, A. (2010): Rock thermal conductivity of Mesozoic geothermal aquifers in the Northeast German Basin. *Chemie der Erde – Geochemistry* 70, 13–22.
- Häusser, I., Kurze, M. (1975): Sedimentationsbedingungen und Schwermineralführung im Mesozoikum des Nordteils der DDR. *Zeitschrift für Geologische Wissenschaften*, 3: 1317–1332.
- Heunisch, C., Röhling, H.-G. (2016): Early Triassic phytoplankton episodes in the Lower and Middle Buntsandstein of the Central European Basin. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 167 (2/3): 227–248.
- Houseknecht, D.W., 1987. Assessing the relative importance of compaction processes and cementation to reduction of porosity in sandstones. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin* 71, 633–642.

- Kühn, B. (1983): Bericht über die Auswertung von Bohrlochmessungen zur Ermittlung der Nutzporosität und Permeabilität mesozoischer Speicher im Nordteil der DDR. VEB Geophysik Leipzig.
- McBride, E.F. (1963): A classification of common sandstones. *Journal of Sedimentary Petrology* 33: 664–669.
- Niegel, S., Wolfgramm, M., Franz, M. (in Vorber): Facies controls on sandstone diagenesis: The example of the Stuttgart Formation (Schilfsandstein) in the Central European Basin.
- Pettijohn, F.J. (1957): *Sedimentary rocks*. New York (Harper & Bros.), 718 S.
- Röhling, H.-G., Heinig, S. (2012): Lithostratigraphie und Petrographie des Mittleren Buntsandstein in der Geothermiebohrung Groß Buchholz Gt1 und der Bohrung Hämelerwald-Z1. *Erdöl-Erdgas-Kohle* 4: 144–153.
- Schlumberger (2009): Schlumberger log interpretation charts. Schlumberger, 2009 Edition.
- Schüler, F. (1976): Der Buntsandstein im Nordosten der DDR. *Jahrbuch für Geologie* 7/8 (1971/72): 81–86.
- Schwaneberg, G., Reh, B., Seibt, P., Poppei, J., Kellner, T., Müller, T., Lenz, G., Fehlhaber, H., Rinke, M., Weber, W. (1990): Präzisierte Ergebnisbericht über die auf dem Geothermieobjekt Stralsund durchgeführten Untersuchungsarbeiten und Eignungsnachweis für die Gewinnbarkeit geothermischer Energie. Geothermie Neubrandenburg GmbH, 144 S.
- Szulc, J., (2019): Lower Triassic marine Buntsandstein deposits in the Central European Basin. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 170 (3–4), p. 311–320.
- Wolfgramm, M., Franz, M. (2020): D8. Geothermische Reservoirs der Germanischen Trias. In: Hauschke, N., Bachmann, G., Franz, M. (Hrsg.). *Trias – Aufbruch in das Erdmittelalter*, 2. Auflage, Verlag Dr. Pfeil, München.
- Wolfgramm, M., Kabus, F., Hoffmann, F., Diaz-Stawiszynski, S., Thorwart, K., Kabus, B. (2015): Machbarkeitsstudie zur Bewertung von Thermischen Nutzungsmöglichkeiten der am Standort Schwerin-Lankow erschließbaren Thermalsole. Geothermie Neubrandenburg GmbH, 99 S.
- Wolfgramm, M., Rauppach, K., Thorwart, K. (2008): Hydraulische Eigenschaften mesozoischer Aquifere im Norddeutschen Becken (NDB). GTV-Tagung in Karlsruhe 2008, 517–527.
- Wolfgramm, M., Seibt, A., (2008): Zusammensetzung von Tiefenwässern in Deutschland und ihre Relevanz für geothermische Anlagen. GtV-Tagung in Karlsruhe 2008, 503-516.
- Wolfgramm, M., Zimmermann, J., Nowak, K., Budach, I., Buse, C. (2019): Sandsteinfazies regional geeigneter Standorte. Sachbericht FKZ 0325920A, Geothermie Neubrandenburg GmbH, 73 S.
- 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.
- Zimmermann, J., Franz, M., Schaller, A., Wolfgramm, M. (2018): The Toarcian-Bajocian deltaic system in the North German Basin: subsurface mapping of ancient deltas – morphology, evolution and recent analogue. *Sedimentology* 65, 897–930.