

Gefördert durch:

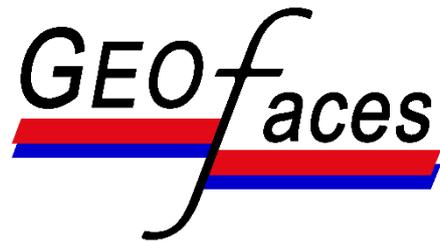


aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Landesamt für Umwelt,
Naturschutz und Geologie

Verbundvorhaben



Charakterisierung geothermischer Ressourcen unter Berücksichtigung von Grenz- und Trennflächen

Teilvorhaben B

Modellierung geothermischer Horizonte und hydraulischer Untersuchungsergebnisse mesozoischer Sandsteinreservoirs in Mecklenburg-Vorpommern

– Abschlussbericht –

Projektleiter:	Dr. Karsten Obst
Zuwendungsgeber:	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) Projektträger Jülich (PtJ-EEN)
Förderkennzeichen:	0324025B
Laufzeit des Vorhabens:	01.06.2016 – 30.11.2019
Berichtsdatum:	29.05.2020

*Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für
Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0324025B gefördert.*

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

Autoren:

KARSTEN OBST

GREGOR BARTH

JASMARIA WOJATSCHKE

MARTIN SATTELBERGER

OWEN DUNKERLEY

Geologischer Dienst, LUNG Mecklenburg-Vorpommern, Goldberger Str. 12, D-18273 Güstrow;
karsten.obst@lung.mv-regierung.de

Inhalt

1.	Einleitung.....	5
2.	Sandsteinreservoir des Toarc	6
2.1	Geologischer Rahmen	6
2.2	Datengrundlage und Methodik	7
2.3	Ergebnisse	11
2.3.1	Verbreitung des Toarc	11
2.3.2	Fazies des Toarc.....	12
2.3.3	Potenzialbewertung	15
2.3.4	3D-Modellhorizonte	17
3.	Sandsteine des Unteren und Mittleren Buntsandstein: Fazies und Potenzialbewertung	19
3.1	Geologischer Rahmen	19
3.2	Datengrundlage und Methodik	21
3.2.1	Stratifizierung von Bohrungen und Faziesanalysen	22
3.2.3	3D-Modellierung	23
3.3	Ergebnisse	23
3.3.1	Der Malchin-Sandstein	23
3.3.2	Volpriehausen-Vorläufer-Sandstein (= Quickborn-Sandstein).....	24
3.3.3	Volpriehausen-Sandstein	26
3.3.4	3D-Modellhorizonte	28
4.	Standortanalysen zur Bewertung des geothermischen Potenzials.....	29
4.1	Datengrundlage und Methodik	29
4.1.1	Mächtigkeitsverteilung und lithofazielle Analyse	30
4.1.2	Potenzialanalysen und Perspektivitätsbewertungen	30
4.2	Ergebnisse	30
4.2.1	Mächtigkeit und Lithologie der Detfurth- und Hardeggen-Formation.....	30
4.2.2	Geothermisches Potenzial.....	34
Region Darß.....		34
Region Usedom		36
5.	Potenzialanalyse für die Kaiserbäder auf Usedom auf Basis von 3D-Modellierungen	37
5.1	Datengrundlagen und Methodik	37
5.2	Volumenmodelle – Ergebnisse und Unsicherheiten	40
6.	Zusammenfassung.....	42
	Literatur.....	43

1. Einleitung

In Deutschland wird ein großer Teil der Primärenergie für die Wärmebereitstellung verwendet. Von diesem Wärmebedarf, der regional unterschiedlich verteilt ist, könnte in Zukunft ein erheblicher Anteil mit geothermischer Energie auf mittlerem oder niedrigem Temperaturniveau gedeckt werden und damit in vielen Bereichen wie zum Beispiel der Agrarwirtschaft, der Lebensmittelproduktion und der Gebäudeheizung einen Beitrag zur CO₂-Reduzierung leisten. Durch die reduzierte Leistungsanforderung an die Reservoirs können geologische Formationen interessant werden, die bisher in der geothermischen Erkundung eine eher untergeordnete Rolle spielten. Ein Schwerpunkt des Projekts war die Untersuchung von mitteltiefen geothermischen Reservoirs.

Entscheidend für die Nutzbarkeit eines geothermischen Reservoirs ist neben der Temperatur vor allem die Permeabilität der Gesteine. Sie ist an intergranuläre Poren und andere Hohlräume gebunden, deren Größe und Gestalt sowohl durch primäre Prozesse in den Ablagerungsräumen (Sedimenttransport, Fazies) als auch durch sekundäre Prozesse (Diagenese, Verwitterung, Tektonik) kontrolliert werden. Die hydraulischen Eigenschaften eines geothermischen Reservoirs sind daher ebenso wie die Tiefenlage oder die Ausdehnung das Resultat einer langen erdgeschichtlichen Entwicklung. Als geothermische Reservoirs kommen in Norddeutschland vor allem Sandsteine mit einer Mächtigkeit von mindestens 20 m, einer Porosität >20 % und einer Durchlässigkeit >500 mD in Frage (ROCKEL & SCHNEIDER 1992).

Eine flächendeckende Kartierung der Reservoirseigenschaften ist vielfach nur möglich, wenn auch geophysikalische Bohrlochmessungen in die Datengrundlage einbezogen werden. Damit lassen sich ausgewählte Horizonte lithologisch und faziell klassifizieren sowie ihre hydraulischen Eigenschaften evaluieren. Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse früherer petrografischer, paläontologischer und petrophysikalischer Untersuchungen (z.B. hydraulische Testauswertung) können geothermische Nutzhorizonte im Detail charakterisiert werden.

Für das am LIAG Hannover betreute Geothermische Informationssystem für Deutschland (GeotIS) wurden seitens des LUNG bereits zwischen 2006 und 2009 geologische Daten für folgende potenzielle Nutzhorizonte für Nordostdeutschland aufbereitet: der Mittlere Buntsandstein (Detfurth-, Hardeggen und Solling-Sandstein), der Mittlere Keuper (Schilfsandstein), der Rhät/Lias-Aquiferkomplex (Postera- und Contorta-Sandstein sowie Sandsteine des Hettang, Sinemur und Pliensbach), der Mittlere Jura (Aalen-Sandsteine) und die Unterkreide (FELDRAPPE et al. 2008; AGEMAR et al. 2018).

Im Rahmen dieses Projekts wurde das geothermische Potenzial des Unteren Buntsandstein einschließlich des Übergangsbereiches zum Mittleren Buntsandstein (Volpriehausen-Formation) und des Toarc untersucht, die lokal sandige Abfolgen aufweisen. Dafür wurden vor allem Bohrungsdaten (Schicht- und Kernbeschreibungen, Bohrlochmessungen) und Ergebnisse seismischer Untersuchungen (interpretierte seismische Profile und Isobathen-Karten) genutzt. Mit diesen Daten wurden 3D-Strukturmodelle unter Verwendung der Software SKUA-GOCAD von Paradigm konstruiert, in denen neben Verbreitung und Tiefenlage auch Informationen über Fazies und Lithologie enthalten sind. Alle neuen Daten zur Struktur und zum Nutzungspotential wurden an das LIAG übergeben, damit diese Informationen in geeigneter Form im GeotIS dargestellt werden.

Ein weiteres Ziel des Projektes war die Charakterisierung und Visualisierung der hydraulischen Parameter von bereits im GeotIS erfassten Nutzhorizonten. Am Beispiel des Mittleren Buntsandstein wurde speziell für die Region der Usedomer Kaiserbäder ein parametrisiertes 3D-Modell entwickelt, wodurch die potenziell besten Reservoirbereiche sichtbar gemacht werden und sich Risiken für zukünftige geothermische Projektentwicklungen minimieren lassen.

Im Rahmen des Projektes, welches von Dr. Karsten Obst geleitet wurde, waren Gregor Barth (01/2017 bis 12/2018), Jasmara Wojatschke (01/2017 bis 01/2019), Martin Sattelberger (02-11/2019) und Owen Dunkerley (04-11/2019) beschäftigt. Neben halbjährlichen Zwischenberichten an den Projektträger Jülich erfolgte die Präsentation der Ergebnisse auf verschiedenen Fachtagungen.

2. Sandsteinreservoire des Toarc

Das Toarc besteht in NE-Deutschland überwiegend aus feinklastischen Sedimenten (Tonsteine, Schluffsteine), in die geringmächtige Sandsteine eingeschaltet sind. Auf der Basis lithologisch-fazieller Untersuchungen unter Berücksichtigung aktueller Forschungsergebnisse (ZIMMERMANN et al. 2015, 2018; BARTH et al. 2018; FRANZ et al. 2018) wurde das geothermische Potenzial dieser Sandsteinhorizonte bewertet.

2.1 Geologischer Rahmen

Im Toarc (= jüngste Stufe des Unterjura; vor ca. 180 Mio. Jahren) waren weite Teile Norddeutschlands von einem flachen Schelfmeer bedeckt, in das aus nordöstlicher Richtung deltaische Sedimente geschüttet wurden. Diese verzahnen mit marinen Stillwasserablagerungen im zentralen Bereich des Norddeutschen Beckens (NDB; Abb. 1). Die Sedimente des Toarc erreichen in Mecklenburg-Vorpommern eine durchschnittliche Mächtigkeit zwischen 80 und 120 m (PETZKA et al. 2004).

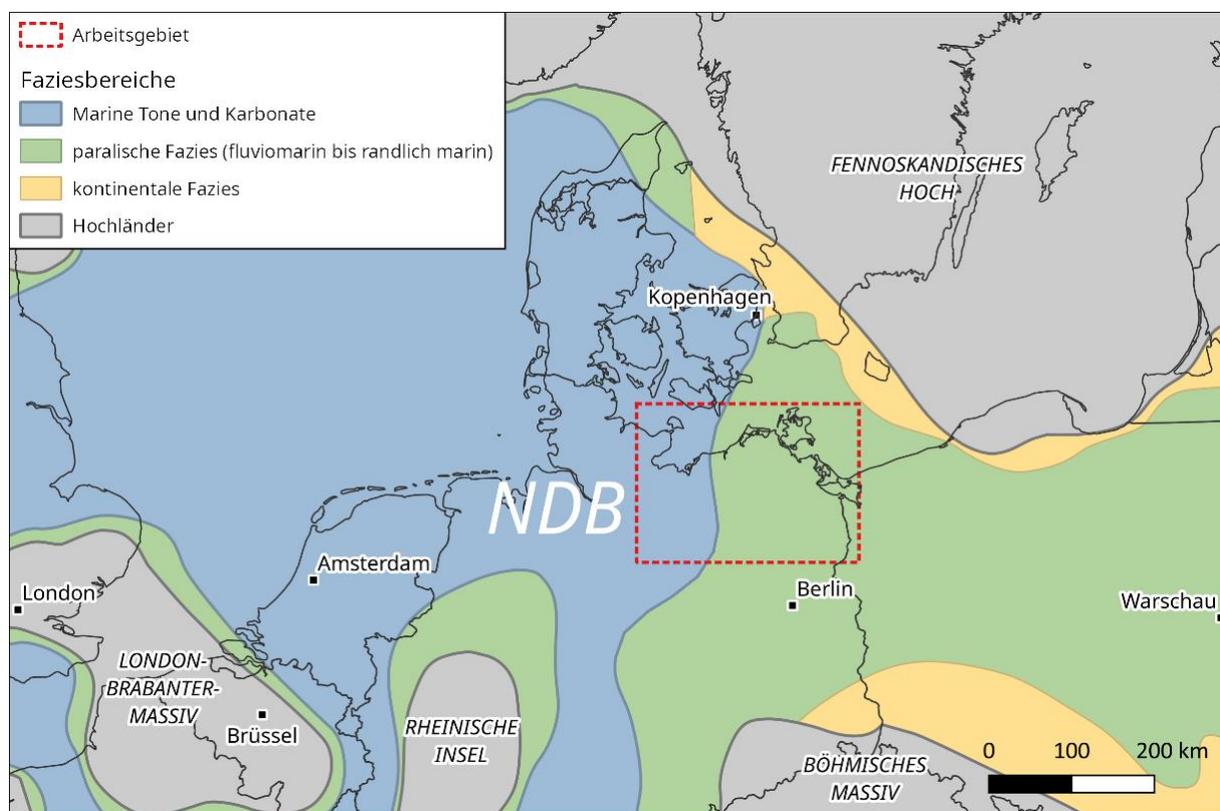


Abb. 1: Paläogeografie und Fazies des Unter-Toarc in Mitteleuropa (nach LOTT et al. 2010, verändert). Lage des Arbeitsgebietes ist rot umrandet. NDB = Norddeutsches Becken

Im Unter-Toarc wurden kohlenstoffreiche Ton- und Schluffsteine unter reduzierenden Bedingungen abgelagert. Diese Posidonienschiefer genannte Beckenfazies ist überwiegend im Westen von Mecklenburg-Vorpommern entwickelt (bis 70 m mächtig) und wird nach Osten faziell durch die sog. Grüne Serie vertreten (HOFFMANN 1966; ERNST 1991; OBST et al. 2015; Abb. 1). Dabei handelt es sich um eine Abfolge fetter, auch schluffiger graugrüner Tone und Tonsteine brackischen Charakters. Im höheren Teil des Unter-Toarc, aber auch im Ober-Toarc, kommt es vermehrt zu sandigen Einschaltungen bis

mehrere Zehner Meter Mächtigkeit. Dieser klastische Eintrag stammt vorrangig vom Fennoskandischen Hochland im Norden und wurde über ein deltaisches Verteilerrinnensystem von Vorpommern bis in den Raum Rostock–Schwerin transportiert und abgelagert (ZIMMERMANN et al. 2018).

Die stratigrafische Gliederung des Toarc erfolgt nach Ammoniten (z. B. HOFFMANN 1966; SIMMS 2004). Andere Makrofossilien (Bivalven, Gastropoden) haben nur abschnittsweise Leitwert (z.B. im Posidonienschiefer). In Mecklenburg-Vorpommern sind fast alle Ammoniten-Zonen des Toarc durch Belege aus Bohrungen (insgesamt 25 Einzelnachweise) und Aufschlüssen nachgewiesen. Da die Ammonitenfunde sich überwiegend auf den westlichen Teil von Mecklenburg-Vorpommern beschränken, müssen im Osten und Süden des Landes mikropaläontologische Nachweise (Megasporen, Phytoplankton, Foraminiferen) herangezogen werden, die aber ebenfalls eine sichere Grenzziehung ermöglichen.

In den sandigen Einschaltungen im Osten von Mecklenburg-Vorpommern fehlen aus faziellen Gründen biostratigrafisch geeignete Fossilien. Hier erfolgt die stratigrafische Einteilung der Bohrprofile nach lithostratigrafischen Gesichtspunkten und mit Hilfe der Korrelation von Bohrlochmesskurven.

2.2 Datengrundlage und Methodik

Als Datengrundlagen für die Kartierung der Sandsteinreservoire des Toarc dienten Schichtenverzeichnisse und Ergebnisberichte von Bohrungen sowie zugehörige Bohrlochmessungen, die im Archiv des LUNG Mecklenburg-Vorpommern verfügbar sind. Zusätzlich wurden auch Kernmaterial und Fossilproben untersucht, die in der Geologischen Landessammlung Sternberg aufbewahrt werden. Insgesamt standen Informationen aus 351 Tiefbohrungen in Mecklenburg-Vorpommern zur Verfügung, die Schichten des Toarc erreicht oder durchteuft haben (Abb. 2).

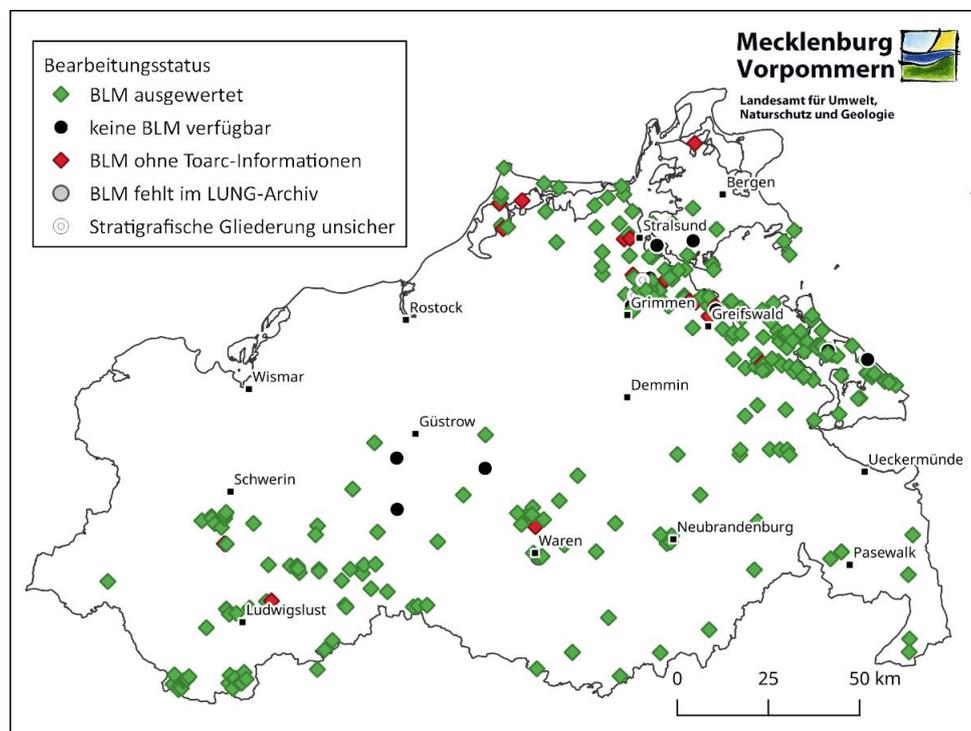


Abb. 2: Übersichtskarte von Mecklenburg-Vorpommern mit Bohrungen, die Schichten des Toarc erbohrt haben. Für einen Großteil der Bohrungen liegen auch Bohrlochmesskurven (BLM) für eine lithofazielle Analyse vor.

2.2.1 Stratifizierung von Bohrungen und Faziesuntersuchungen

Zunächst wurde geprüft, in welchen Bohrungen laut Schichtenverzeichnis sowie in mikro-/makropaläontologischen Berichten Toarc vorhanden ist. Verfügbare Bohrlochmesskurven (n = 328) wurden digitalisiert; für 14 Bohrungen liegen keine Bohrlochmessungen vor. Folgende Arbeitsschritte wurden für die Neustratifizierung von Bohrungen durchgeführt:

- durch Kombination biostratigrafischer Informationen und Interpretation von Bohrlochmesskurven konnten die (heutige) Tiefenlage von jeweils Basis und Top Toarc, Unter-Toarc, Ober-Toarc, Posidonienschiefer und „Grüne Serie“ sowie vorhandener Sandstein-Einschaltungen bestimmt werden (Abb. 3),
- wichtige Grenzmarker (Pliensbach/Toarc, Toarc/Aalen) wurden anhand mikro- und/oder makropaläontologischer Daten festgelegt,
- die fazielle Interpretation (Lithofazies-Assoziation) der Sandstein-Einheiten erfolgte weitgehend nach den Bohrlochmesskurven der Widerstands-, Eigenpotential- und Gamma-Ray-Messungen.

Teilweise wurden Daten angrenzender Bundesländer (10 km-Bereich) einbezogen, um das fazielle Bild in der Grenzregion zu vervollständigen. Sämtliche ausgewerteten Informationen (Schichtparameter, Lithofazies, Porositäts-/Permeabilitätswerte, biostratigrafische Marker, Verfügbarkeit und Zustand von geophysikalischen Messkurven etc.) wurden in Datenbanken hinterlegt. Sie dienen als Grundlage für die 3D-Modellierung.

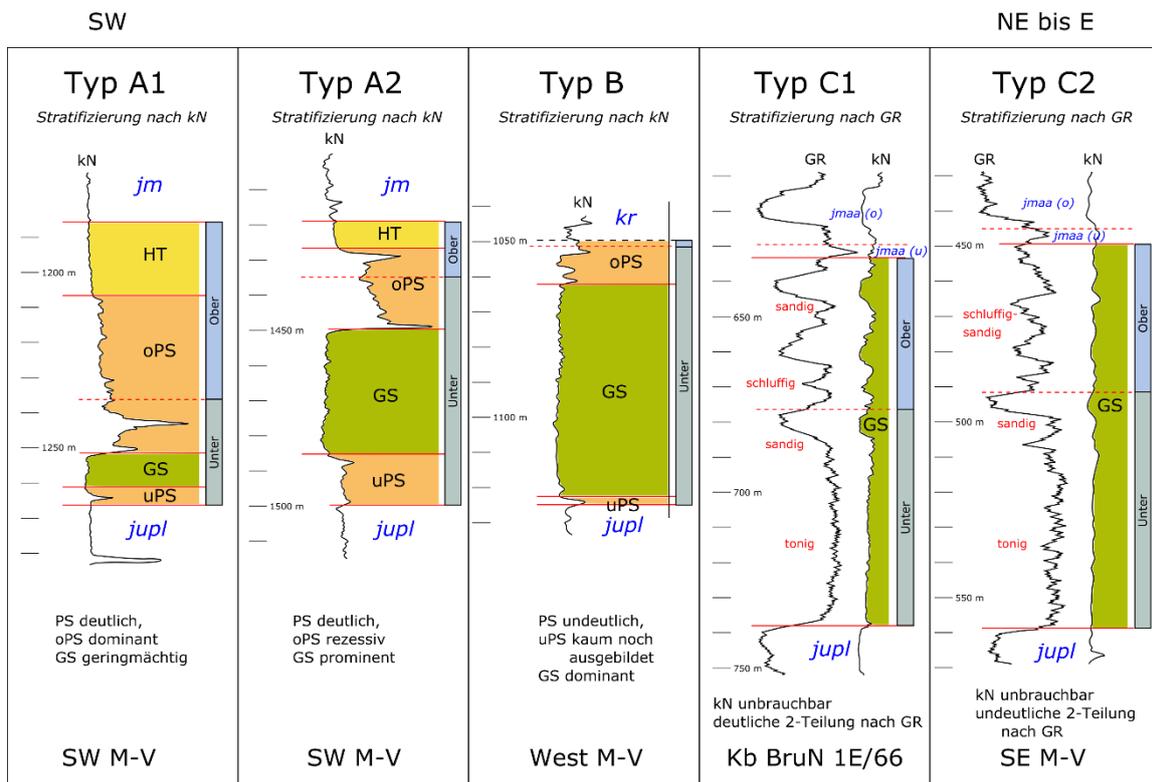


Abb. 3: Beispiele für die Lithofaziesanalyse der Toarc-Abfolgen anhand verfügbarer Bohrlochmessungen. Deutlich ist eine Veränderung der Fazies vom Zentrum des NDB im SW in Richtung zum nordöstlichen Beckenrand zu erkennen. Die fazielle Einteilung des Toarc folgt BAUSS (1976). Die Typeneinteilung (A1–C2) dient der Zuordnung der untersuchten Bohrungen zu Faziesbereichen. Bohrlochmesskurven: kN = kleine Normale (Widerstand), GR = Gamma-Ray. jupl = Unterer Jura (Pliensbach), uPS/oPS = (Unterer/Oberer) Posidonienschiefer, GS = Grüne Serie, HT = „Hangend-Ton“, jm = Mittlerer Jura, jmaa = Mittlerer Jura (Aalen), kr = Kreide.

2.2.2 Verbreitungs- und Lithofazieskarten

Als Ausgangspunkt für die Darstellung der Toarc-Verbreitung wurde der L1-Horizont des Geophysikalischen Kartenwerkes der DDR (REINHARDT & GRUPPE REGIONALES KARTENWERK 1968-1991; REINHARDT 1993) gewählt, welcher auf seismischen Messungen basiert. Dieser Reflektor liegt im Toarc (REINHARDT & KSCHICKUS 1978). Anschließend wurden die Verbreitungsgrenzen mit Informationen aus Schichtenverzeichnissen sowie mikro- und makropaläontologischen Berichten abgeglichen.

Bestehende Fazieskarten (ZIMMERMANN et al. 2018) wurden durch Neuinterpretation von Bohrlochmessungen und ergänzende Informationen aus Kerndokumentationen weiterentwickelt.

2.2.3 Temperaturdaten und Porositäts-/Permeabilitätsdaten

Temperaturdaten zum Top des Toarc standen aus dem Geothermisches Ressourcenkartenwerk (GRK) der DDR bzw. Nordostdeutschland 1:200.000 (vgl. FELDRAPPE et al. 2008; BRANDES & OBST 2011) zur Verfügung. Hierfür wurden die Toarc-Temperaturkarten der Blätter Neubrandenburg, Rostock/Stralsund und Eberswalde digitalisiert, welche die Temperaturen am Top Toarc (entspricht im Wesentlichen der Dogger- oder der Unterkreide-Basis) angeben. Da für die Blätter Güstrow, Neuruppin, Schwerin und Wittenberge keine Toarc-Temperaturkarten vorliegen, wurden stattdessen die Temperaturkarten der Schichttemperatur des Aalen-Sandsteins (= Dogger-Basis) ausgewertet.

Für die Bewertung des geothermischen Potenzials wurden auch Porositäts- und Permeabilitätswerte ausgewertet, die für Schichten des Toarc verfügbar sind. Die Werte wurden aus den folgenden Unterlagen entnommen:

- LUNG-Archiv: Aufschlussakten von 30 Bohrungen
- FRANZ et al. (2015): Ergebnisse des Sandsteinfazies-Projektes, Kapitel 7
- WOLFGRAMM et al. (2008): Tab. 2
- Geothermisches Ressourcenkartenwerk (GRK), Blatt Rostock/Stralsund, 1:200.000, Anlage 24

2.2.4 Abschätzung des Nutzungspotenzials (Perspektivität)

- Abgrenzung der Sandstein-Horizonte mit Hilfe von Schichtenverzeichnissen und Bohrlochmesskurven (Planimetrierungsmethode).
- Berechnung kumulativer Sandstein-Mächtigkeiten, d.h. Sandsteinhorizonte mit weniger als 2 m Zwischenmittel (Schluff- oder Tonsteine) wurden als zusammenhängender Sandsteinkörper betrachtet. Von Sandsteinhorizonten, die zusammenhängend die Toarc-Aalen-Grenze überschreiten, wurde nur der Toarc-Anteil bewertet.
- Vergleich bekannter geohydraulischer Messwerte (Porosität und Permeabilität) nach Tiefe mit der Lithologie nach Bohrlochmesskurve. Zahlreiche Messwerte wurden aus der Statistik ausgeschlossen, da sie (a) zwar im Toarc, aber nach Bohrlochmessung außerhalb eines Sandsteinpakets liegen; (b) im Unter-Toarc-Tonstein gemessen wurden; (c) stratigrafisch im Pliensbach, Mittel-Jura oder sogar der Kreide liegen; oder (d) einem Mittelwert aus anderen Proben entsprechen. Bei der statistischen Auswertung blieb die Methode der Datenerhebung (Altdaten von Kernproben, Laboranalysen oder Granulometrie an Dünnschliffen sowie neue Analysen im Rahmen Sandsteinfazies-Projekt – s. FRANZ et al. 2015) unberücksichtigt. Eine Berechnung der Nutzporosität auf Grundlage der Amplitude von Widerstandsmesskurven ist möglich und erfordert Informationen zum Formationswasser (Schichtmineralisation etc.) der betreffenden Bohrung. Da diese nur in Einzelfällen vorliegen, wurden derartige Berechnungen nicht durchgeführt.

- Ergänzung der Temperatur für die identifizierten Sandsteinbereiche nach Temperatur-Log der jeweiligen Bohrung.
- Da die mächtigsten Sandsteinhorizonte im Ober-Toarc auftreten, wurde eine getrennte Betrachtung der Perspektivität nach Unter-Toarc, Ober-Toarc und Toarc gesamt vorgenommen.
- Zuordnung einer Perspektivität (I bis V) basierend auf einer Bewertungstabelle aus dem GRK, Blatt Neubrandenburg/Torgelow von WORMBS et al. (1989), modifiziert entsprechend den derzeit realisierbaren Nutzungsarten (Tab. 1). Über die Perspektivität entscheidet der jeweils schlechteste Parameter.

Tab. 1: Perspektivität der Sandstein-Aquifere.

Kategorie	Perspektivität (mögliche Nutzung)	Aquiferparameter		Temperatur
		Mächtigkeit	Nutzporosität	
I	sehr gut geeignet (z.B. Doublette)	>20 m aushaltend	>25 %	>50°C
II	gut geeignet (z.B. mitteltiefe Erdwärmesonde)	~20 m (15–20 m) wechselnd	~25 %	40-50°C
III	geeignet (z.B. mitteltiefe Erdwärmesonde)	<20 m (10–20 m) stark wechselnd	20–25 %	30-40°C
IV	bedingt geeignet (z.B. Wärmespeicher)	<10 m wechselnd	<20 %	20-30°C
V	ungeeignet	kein Aquifer		<20°C

2.2.5 3D-Modellierung

Die 3D-Modellierung der stratigrafischen Grenzflächen des Toarc basiert auf 3D-Modellflächen, die bereits im GeotIS vorlagen: Lias-Basis, Pliensbach-Top und Aalen-Basis. Anhand der Interpretation von Bohrlochmesskurven und Schichtenverzeichnissen wurden die stratigrafische Basis und der Top des Toarc, die Grenze zwischen Unter- und Ober-Toarc sowie Basis und Top potenzieller Nutzhorizonte (Sandsteine) ermittelt. Diese Daten wurden bei der Modellierung der neuen Horizonte berücksichtigt.

Für die Modellierung der Störungen wurden die für den Rhät/Lias-Aquiferkomplex (Rhätkeuper bis Ober-Pliensbach) bereits vorliegenden Störungsspuren verwendet (Abb. 4). Anschließend wurden die Störungsflächen im Toarc – wie für alle Störungen im GeotIS – senkrecht (saiger) modelliert. Im Störungsbereich erfolgte die Anpassung der Horizonte anhand interpretierter seismischer Profile.



Abb. 4: Störungsflächen des Vorpommern-Störungssystem (VPSS), die im GeotIS bereits für den Rhät/Lias-Aquiferkomplex vorlagen, waren die Basis zur Konstruktion der Störungsflächen im Toarc.

2.3 Ergebnisse

2.3.1 Verbreitung des Toarc

Ein Vergleich der Verbreitung des Toarc nach bisherigen reflexionsseismischen Erkenntnissen (L1-Horizont 1:500.000 Stand 1989; Abb. 5) mit Angaben aus Schichtenverzeichnissen und paläontologischen Ergebnisberichten ergab im Detail einige Widersprüche. Bohrungen mit Toarc-Nachweisen lagen teilweise außerhalb des von REINHARDT & GRUPPE REGIONALES KARTENWERK (1968-1991) ausgewiesenen Bereiches, z.B. zwischen Schwerin und Güstrow. Andererseits befanden sich auch Bohrungen ohne nachgewiesene Toarc-Abfolgen innerhalb desselben. In wenigen Fällen wurden bisher getrennt ausgewiesene Areale miteinander verbunden, z.B. zwischen Schwerin und Ludwigslust, sofern dies Bohrungsdaten rechtfertigten. Basierend auf den neuen Daten wurde die Toarc-Verbreitung ergänzt. In einem Bereich nordwestlich der Linie Schwerin–Güstrow–Grimmen sowie in großen Teilen Rügens ist das Toarc infolge erosiver Prozesse während der marinen Transgression ab dem Mittel-Alb (Unterkreide) nicht mehr erhalten. Am Südrand Mecklenburg-Vorpommerns kann das Toarc durch halokinetische Bewegungen ebenfalls fehlen (Abb. 5).

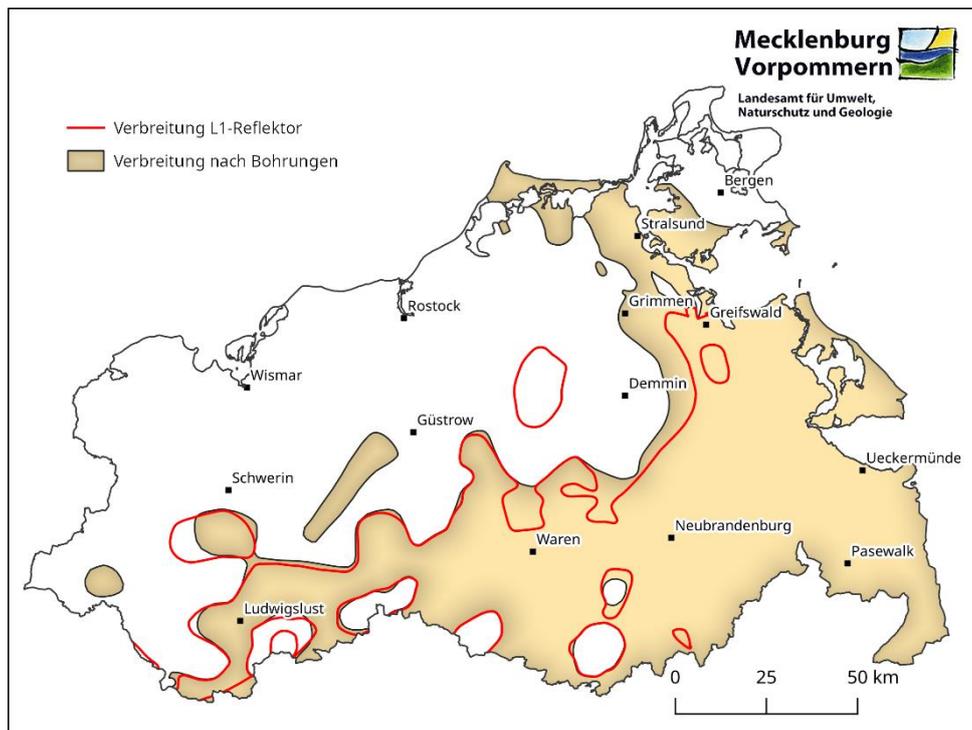


Abb. 5: Rezente Verbreitung des Toarc in Mecklenburg-Vorpommern aufgrund neu interpretierter Bohrungsdaten (beige Fläche) im Vergleich zu den Ergebnissen seismischer Erkundungen (rote Linie). Letztere basiert auf den Karten des L1-Horizontes, 1:500.000 (1989) von REINHARDT & GRUPPE REGIONALES KARTENWERK (1968-1991).

In weiten Teilen Mecklenburg-Vorpommerns sind unterjurassische Schichten durch jüngere Erosionsprozesse völlig abgetragen oder nur noch in geringer Mächtigkeit vorhanden. Im Osten des Landes lagern mitteljurassische Ablagerungen (zumeist Aalen-Sandsteine) mit einer erosiven Grenze mächtigkeitsreduzierten Toarc-Abfolgen auf (Abb. 6). Im Mittleren Bereich von Mecklenburg-Vorpommern fehlen Teile des oberen Toarc aufgrund der unter- und oberkretazischen Meeresvorstöße. Im Bereich des Grimmener Walls liegen sogar quartäre Schichten direkt über dem Toarc (in der Karte nicht dargestellt), teilweise wurden lokale Schollen glazitektonisch eingeschuppt.

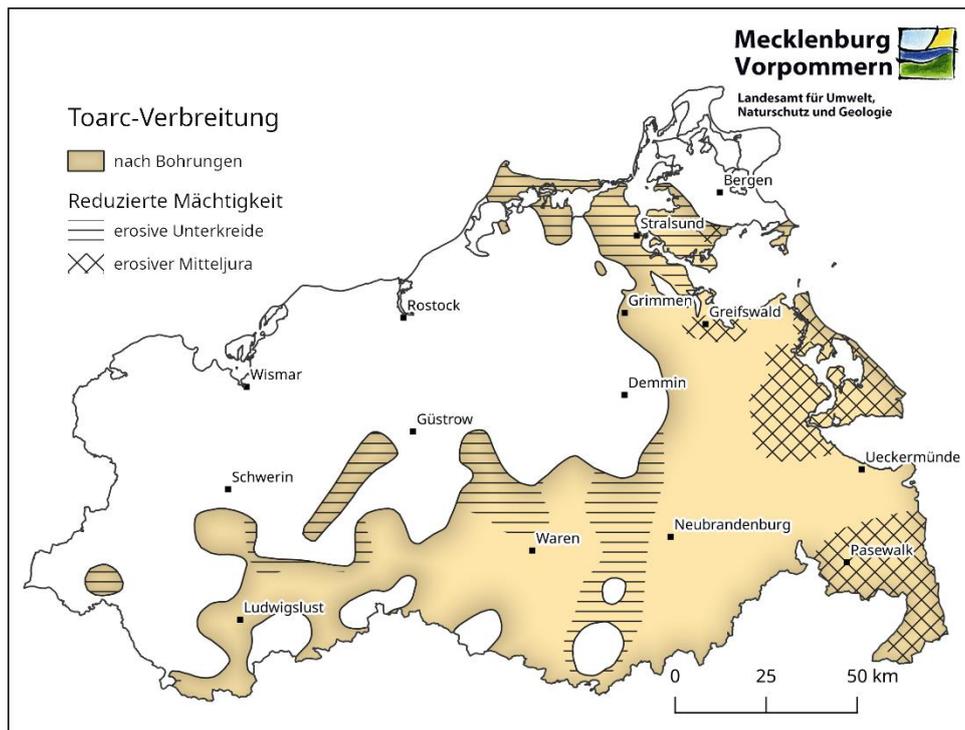


Abb. 6: Verbreitung des Toarc anhand neu interpretierter Bohrungen. Aufgrund jüngerer Transgressionen, insbesondere während des Mittleren Jura und ab dem Mittel-Alb (Unterkreide) können die Abfolgen im oberen Teil erodiert sein. Schichtreduktionen durch pleistozäne Eisvorstöße treten nur lokal auf und sind nicht dargestellt.

2.3.2 Fazies des Toarc

Auf Grundlage von Schichtenverzeichnissen und biostratigrafischen Befunden wurden auch fazielle Verbreitungsgrenzen für den Posidonienschiefer und den tonig-schluffig dominierte Ablagerungen der „Grünen Serie“ abgeleitet (Abb. 7). Der Posidonienschiefer ist ein bituminöser Tonstein, dessen Hauptverbreitungsgebiet im westlichen Norddeutschen Becken liegt. In SW-Mecklenburg ist er deutlich in Bohrlochmesskurven oder durch lithologische und biostratigrafische Befunde nachweisbar. Die Mächtigkeit liegt durchschnittlich unter 10 m und erreicht nur in Ausnahmefällen bis 15 m. Weiter nach Osten wird der Posidonienschiefer von zunehmend mächtigeren Ablagerungen der „Grünen Serie“ (überwiegend brackische Ton- und Schluffsteine, teilweise Sandsteine) überlagert und faziell ersetzt. In den südöstlichen Landesteilen ist der Posidonienschiefer nicht mehr eindeutig nachweisbar.

Der Unterjura Mecklenburg-Vorpommerns ist charakterisiert durch eine Wechsellagerung aus marinen Sedimenten, in die aus nördlicher und nordöstlicher Richtung vordringende deltaisiche Ablagerungen eingeschaltet sind. Anhand von Lithofaziesanalysen, Interpretationen von Bohrlochmesskurven und Anwendung der Sequenzstratigrafie kann für das höhere Unter-Toarc und das höhere Ober-Toarc je ein flussdominiertes Delta-System rekonstruiert werden, das sich über weite Teile Vorpommerns bis nach Süd-Brandenburg erstreckt (ZIMMERMANN et al. 2018). Die Kenntnis über die Verbreitung und Mächtigkeit der dabei abgelagerten Sandsteine ist maßgeblich für die Erkundung von geothermisch nutzbaren Aquiferen.

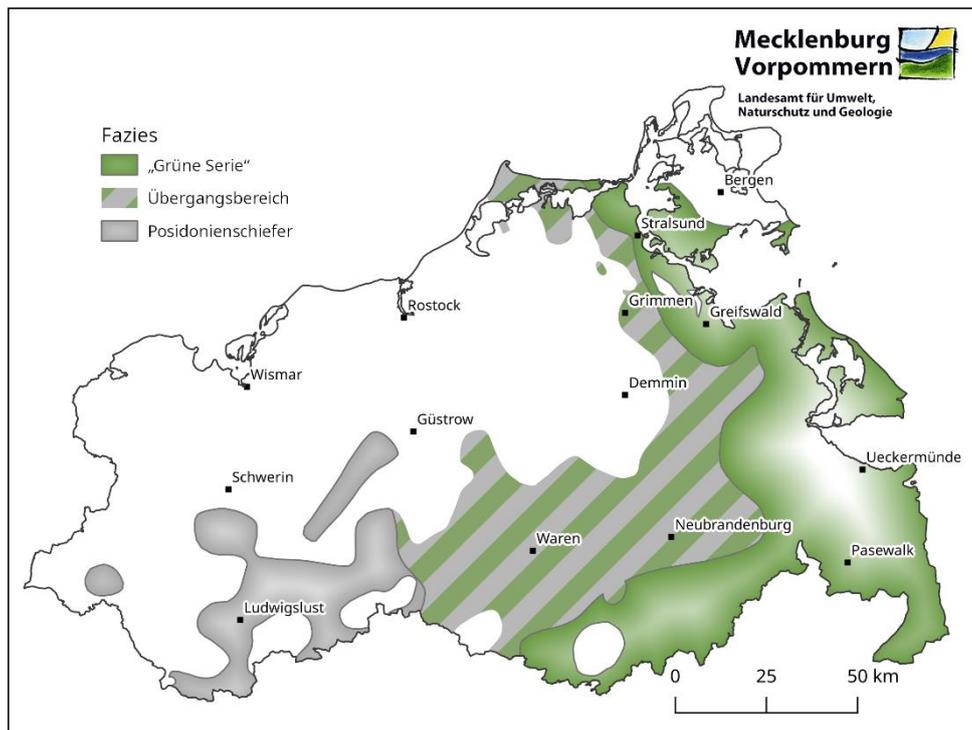


Abb. 7: Rezente Verbreitung der Toarc-Faziesbereiche in Mecklenburg-Vorpommern.

Die von ZIMMERMANN et al. (2018) zusammengestellten Lithofazieskarten, die jeweils die Verbreitung und Mächtigkeit des Unter- und Ober-Toarc-Deltas in NE-Deutschland darstellen, basieren auf der Auswertung von insgesamt 127 Bohrungen. Damit wurden nur ca. ein Drittel der insgesamt verfügbaren 351 Tiefbohrungen mit Toarc berücksichtigt. Im Rahmen der Projekts wurden aus diesem Grund unter Nutzung aller verfügbaren Daten überarbeitete Lithofazieskarten für das Unter-Toarc (Abb. 8) und das Ober-Toarc (Abb. 9) erstellt. Zum bisherigen Kenntnisstand (vgl. ZIMMERMANN et al. 2018) ergeben sich folgende Änderungen:

- Die Deltafront-Sande können nun sowohl in Ausdehnung als auch hinsichtlich der Mächtigkeit von Mündungsbarren und distalen Rinnenabschnitten besser unterschieden werden.
- Die Mächtigkeitslinien (Isopachen) von Rinnensandsteinen, Mündungsbarren (im proximalen Deltafront-Bereich) und Schichtsandsteinen der Deltaebene wurden an die neuen Daten angepasst. Hierbei hat sich gezeigt, dass die früher publizierten Werte stellenweise zu optimistisch waren.
- Die bisher zwischen Stralsund und Ueckermünde generalisiert dargestellte Flussmorphologie konnte nun anhand von Stützbohrungen spezifiziert werden (Abb. 9). Die Rekonstruktion zeigt, dass sich der Bereich aus mehreren Rinnensträngen zusammensetzt, die sich aufteilen und flussabwärts wieder vereinen (sog. verflochtenes Flusssystem, engl. *braided river system*).
- Im Detail konnten zuvor isoliert dargestellte Verteilerrinnen-Segmente durch die verdichtete Datengrundlage am Haupt-Verteilersystem angeschlossen werden (Bereich Süd-Rügen und Usedom) (Abb. 9). Das rekonstruierte Verteilungsmuster gewinnt daher an Plausibilität.

Da diese Karten die Grundlage für die Potenzialbewertung von Toarc-Sandsteinen in Mecklenburg-Vorpommern darstellen, erlaubt die überarbeitete Version einen detaillierteren Blick auf die Paläo-Flussmorphologie, deren Verständnis die Chancen erhöht, bei der Erkundung geothermisch nutzbare Aquifere anzutreffen.

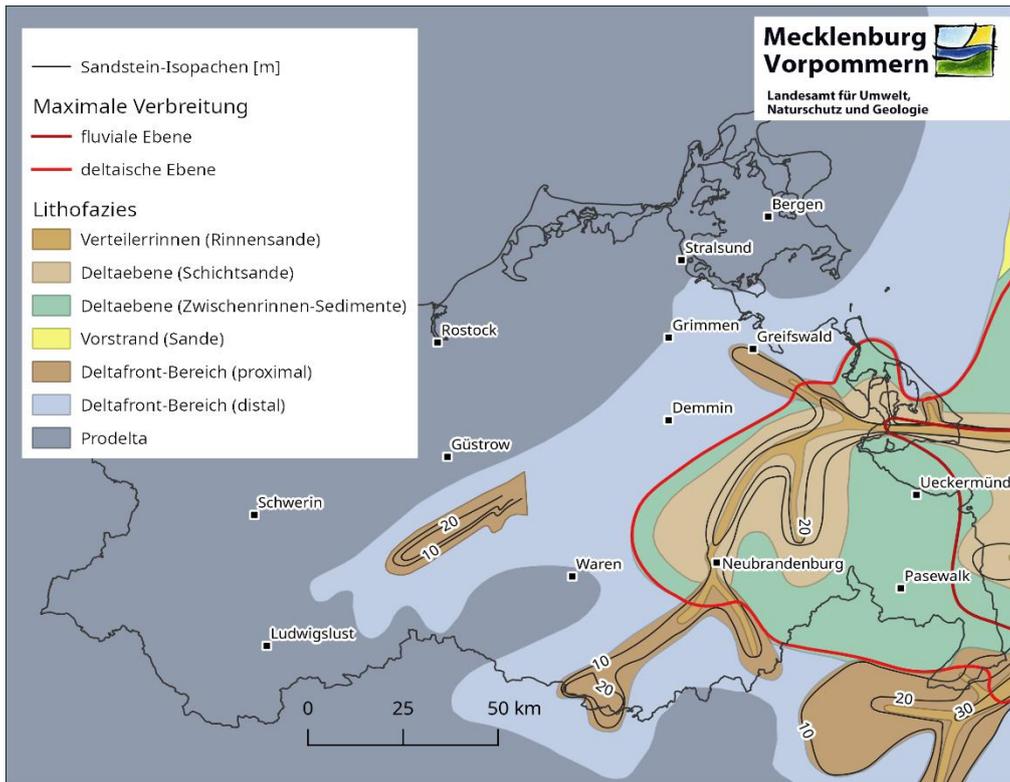


Abb. 8: Lithofazies im Unter-Toarc, (Bifrons-Ammonitenzone (nach ZIMMERMANN et al. 2018, verändert).

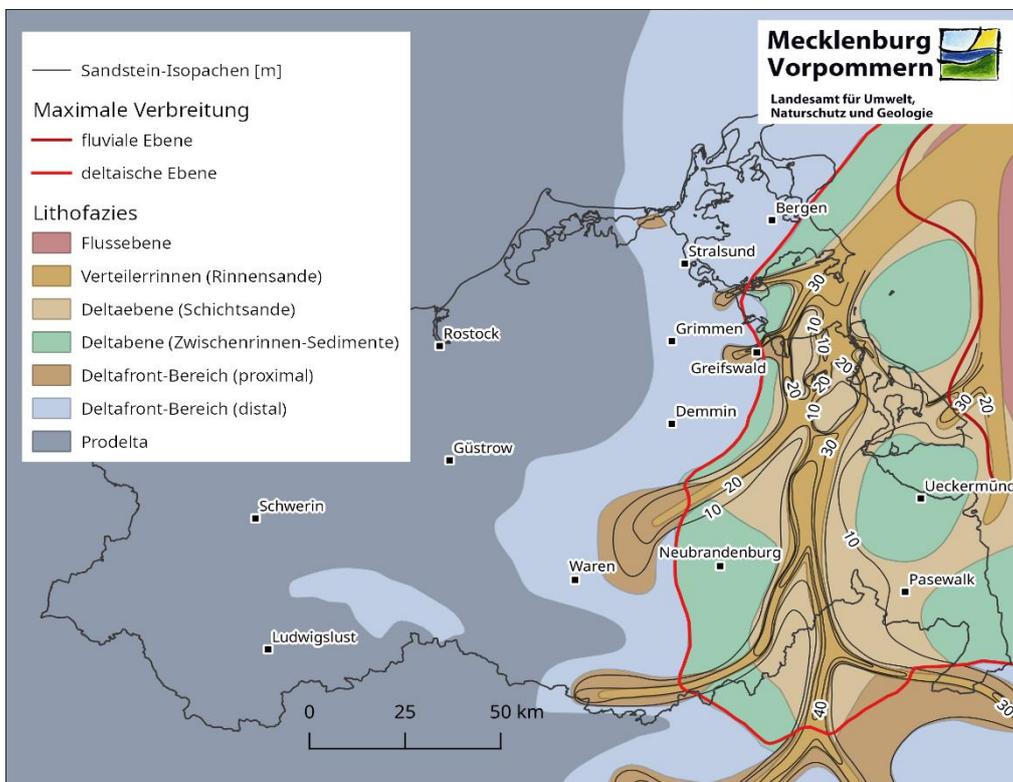


Abb. 9: Lithofazies im Ober-Toarc, Thouarsense-Ammonitenzone (nach ZIMMERMANN et al. 2018, verändert).

2.3.3 Potenzialbewertung

Sandsteinhorizonte mit Mindestmächtigkeiten von 20 m wurden anhand der Schichtbeschreibungen und Auswertung von Bohrlochmesskurven in 17 Bohrungen nachgewiesen (Abb. 10).

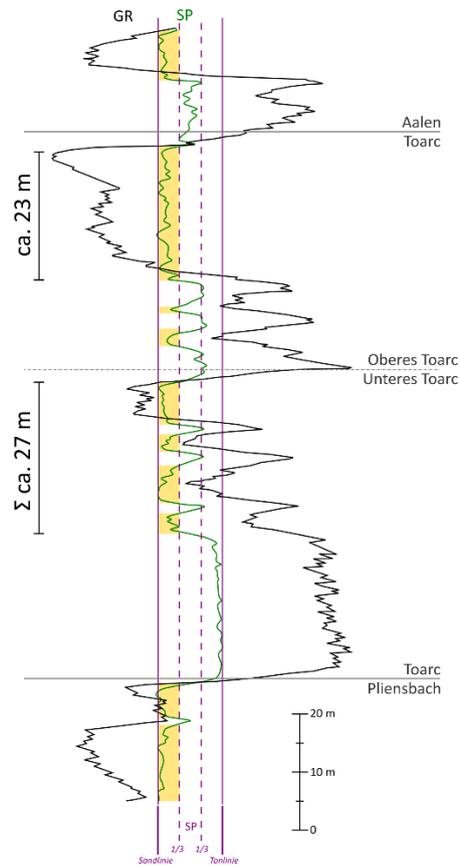


Abb. 10: Beispiel für Ausweisung von sandigen (gelb) Speicher- und tonigen Barrierehorizonten. GR = Gamma-Ray-Messkurve, SP = Eigenpotenzial-Messkurve.

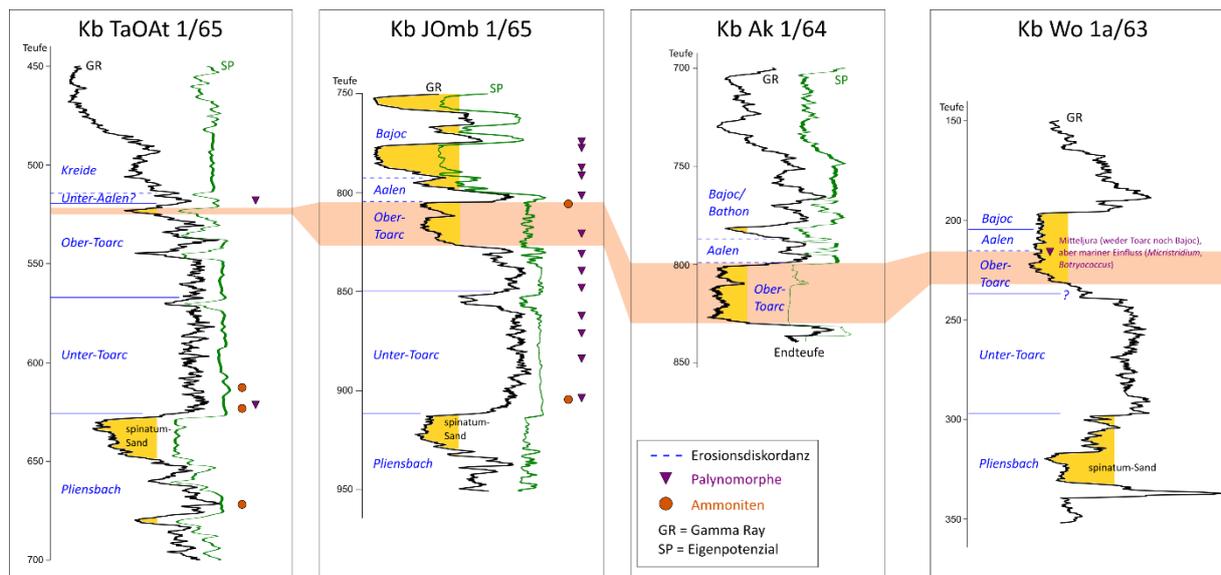


Abb. 11: Die Sandsteinhorizonte des Toarc sind als Ablagerungen in einem Deltasystem nur lokal mit höheren Mächtigkeiten nachgewiesen und verzahnen lateral mit feinklastischen Ablagerungen.

Es liegen aus Bohrungen mit Toarc-Abfolgen 142 Daten zur Porosität vor. Der Mittelwert beträgt für Sandsteine des Unter- und Ober-Toarc 27–28 % (Tab. 2). 19 Daten zur Permeabilität zeigen Unterschiede auf, wonach die Sandsteine des Unter-Toarc im Mittel fast 600 mD aufweisen, während die Sandsteine des Ober-Toarc eine durchschnittliche Permeabilität von 1.275 mD besitzen. Die Messwerte belegen hervorragende hydraulische Eigenschaften der Toarc-Sandsteine, die weit über den erforderlichen Mindestkriterien (20 % Porosität und 500 mD Permeabilität) für den Betrieb einer geothermischen Anlage liegen.

Tab. 2: Porosität und Permeabilität der Toarc-Sandsteine. mD = Millidarcy

Parameter	Unter-Toarc	Ober-Toarc	Toarc (gesamt)
Porosität	Mittelwert 28,3 % 49 Messwerte 15 Bohrungen	Mittelwert 27,2 % 93 Messwerte 26 Bohrungen	Mittelwert 27,6 % 142 Messwerte 30 Bohrungen
Permeabilität	Mittelwert 593 mD 9 Messwerte 4 Bohrungen	Mittelwert 1.275 mD 11 Messwerte 4 Bohrungen	Mittelwert 968 mD 20 Messwerte 6 Bohrungen

Die Perspektivitätsabschätzung für die vorhandenen Bohrlokationen wird aus Fazies, Mächtigkeit, Tiefenlage, Temperatur und geohydraulischen Messwerten abgeleitet (vgl. Tab. 1). Demnach lassen sich ein Standort (Unter-Toarc) bzw. zwei Standorte (Ober-Toarc) als sehr gut bis gut geeignet (Kategorie I und II) klassifizieren (Tab. 3). Diese Standorte liegen im Süden von Mecklenburg-Vorpommern an der Grenze zu Brandenburg (Abb. 12). Aufgrund der Tiefenlage werden Temperaturen von 40–50°C bzw. 60–70°C am Top des Toarc erwartet. Ab Temperaturen >50°C wäre sogar eine hydrogeothermische Nutzung mittels Doublette denkbar – allerdings sind die Toarc-Sandsteine sehr feinkörnig, so dass es bei der Reinjektion zu Problemen kommen kann. An 13 Standorten (Unter-Toarc) bzw. 34 Standorten (Ober-Toarc), ist eine geringe bzw. bedingte Eignung (Kategorie III und IV) festzustellen, d.h. es käme der Einsatz mitteltiefer Erdwärmesonden zur Wärmeversorgung in Betracht und auch balneologische Nutzungen sind bei vergleichsweise geringen Bohrtiefen möglich. Eine Vielzahl der untersuchten Bohrlokationen weisen mangels geeigneter Reservoirgesteine keine Perspektivität auf.

Tab. 3: Anzahl der Standorte, an denen Bohrungen einem möglichen Nutzhorizont angetroffen haben, und ihr Nutzungspotenzial. Zur Kategorisierung vgl. Tab. 1. (nur Temperatur am Top Toarc berücksichtigt)

Kategorie	Unter-Toarc	Ober-Toarc
I (sehr gut geeignet)	–	1 (0,5 %)
II (gut geeignet)	1 (0,5 %)	1 (0,5 %)
III (geeignet)	1 (0,5 %)	9 (4,7 %)
IV (bedingt geeignet)	12 (6,0 %)	25 (13,2 %)
V (ungeeignet)	185 (93,0 %)	154 (81,1 %)
Summe	199	190

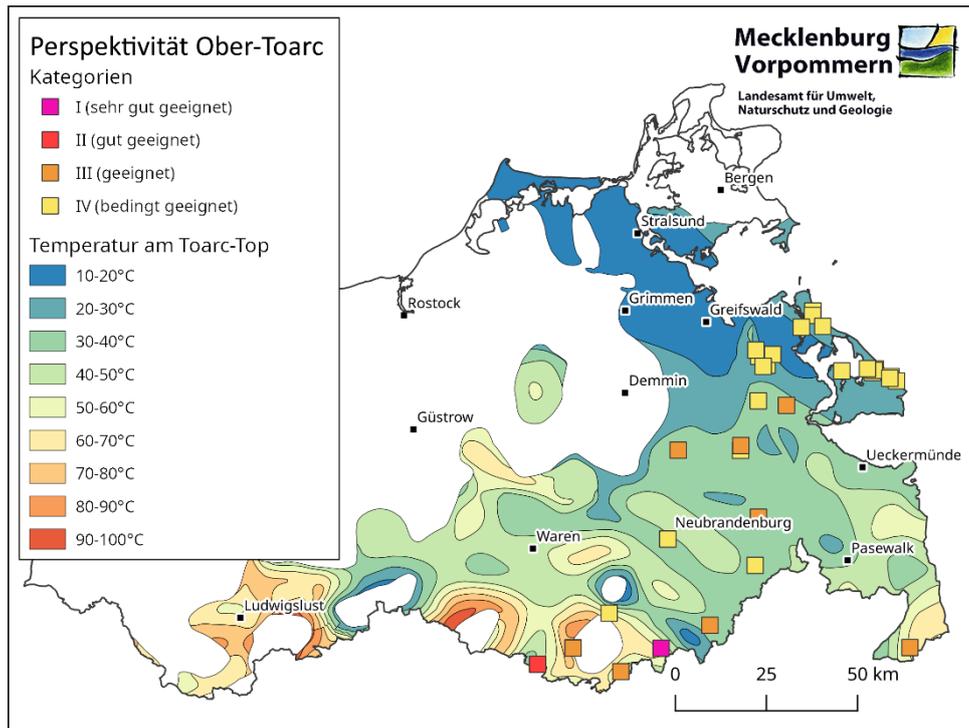


Abb. 12: Klassifikation des Nutzungspotenzials für die untersuchten Bohrlokationen. Günstige Bedingungen für geothermische Projekte sind aufgrund der Verteilung von Rinnensandsteinen und Mindesttemperaturen von 40°C im Südosten von Mecklenburg-Vorpommern zu erwarten.

2.3.4 3D-Modellhorizonte

Es wurden folgende Horizonte des Toarc mit SKUA-GOCAD auf Basis vorliegender Isolinienpläne und neu stratifizierter Bohrungen modelliert:

- Basis des Toarc (= Basis Unter-Toarc)
- Top des Unter-Toarc
- Basis des Ober-Toarc
- Top des Toarc (= Top Ober-Toarc)

Das Top des Unter-Toarc ist nur bei ungestörter Normalabfolge mit der Basis des Ober-Toarc gleichzusetzen. Da in weiten Teilen des Landes Mecklenburg-Vorpommern die Toarc-Abfolgen erodiert bzw. mit reduzierter Mächtigkeit vorliegen, war die Modellierung eines separaten Ober-Toarc-Basishorizonts erforderlich (Abb. 13).

Infolge der Neustratifizierung von Bohrungen hat sich in vielen Fällen eine zum bisher vorliegenden Schichtenverzeichnis abweichende Abgrenzung des Toarc ergeben. Diese wirkt sich auch auf hangende und liegende Einheiten aus, z.B. Top Pliensbach und Basis Aalen. Obwohl die Teufenkorrekturen in den meisten Fällen <20 m Versatz bedeuten, sollten die bereits im GeotIS verwendeten Modellhorizonte (Top Pliensbach, Basis Aalen) korrigiert werden (Abb. 14).

Störungen, die diese Horizonte betreffen, wurden zunächst senkrecht modelliert. Bei der Neubearbeitung von Bohrungen und seismischen Profilen hat sich ergeben, dass zahlreiche Störungsflächen hinsichtlich ihrer Raumlage angepasst werden müssen. Dies soll im Rahmen des TUNB-Projektes erfolgen (vgl. OBST et al. 2018, 2019).

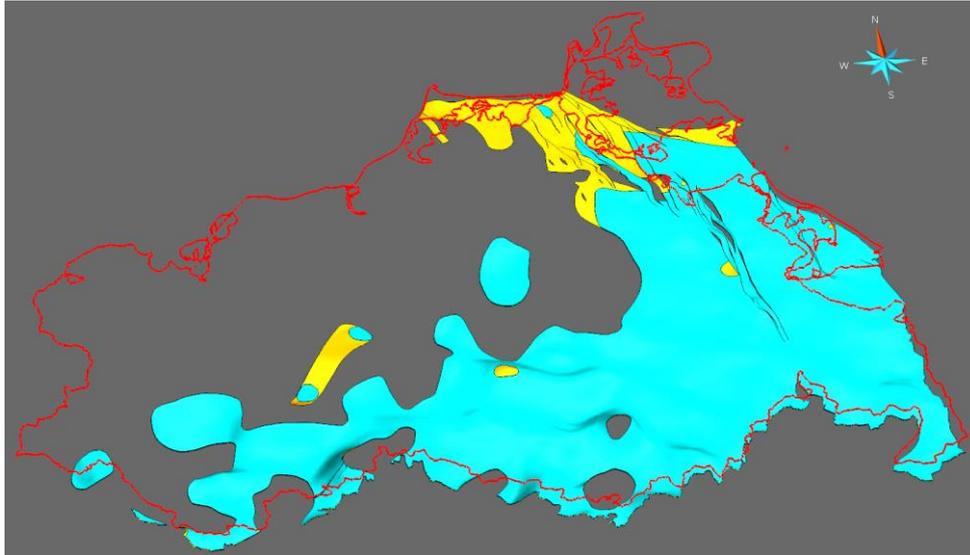


Abb. 13: Modellierte Flächen Top Unter-Toarc (gelb) und Top Ober-Toarc (blau). Die Unterschiede in der Verbreitung ergeben sich aufgrund unterschiedlicher Tiefenreichweite jüngerer Erosionsprozesse.

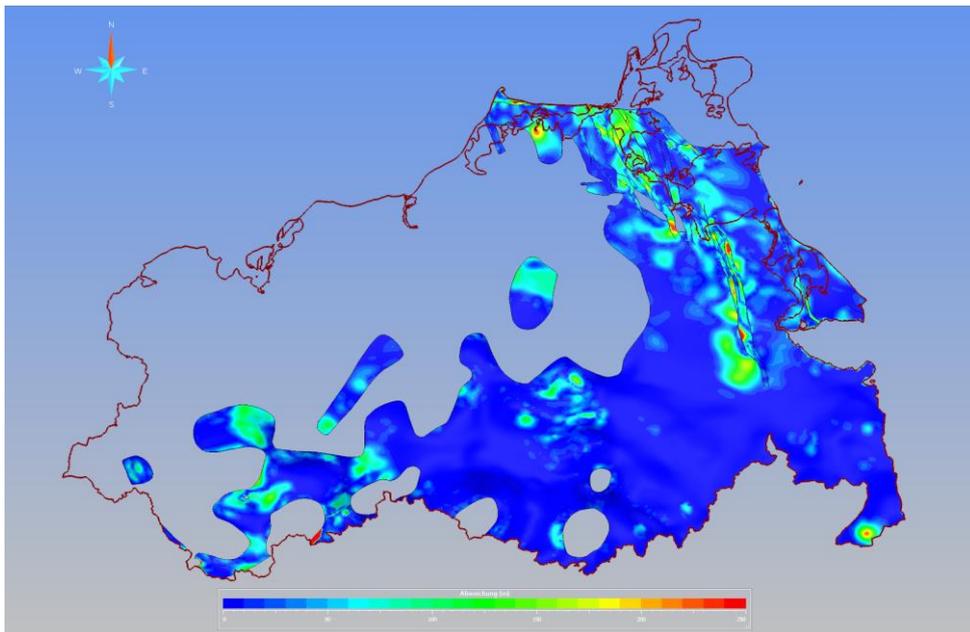


Abb. 14: Abweichung der Tiefenlage der neu modellierten Fläche Basis Toarc und der bereits im GeotIS vorhandenen Fläche Top Pliensbach. Die Unterschiede betragen überwiegend einige Dezimeter (blau) bis 150 m (grün). Nur im Randbereich von Salzstrukturen und innerhalb des VPSS (Störungsspuren = schwarze Linien) sind größere Differenzen bis 250 m (rot) vorhanden.

Ausgehend von den verbesserten Faziesmodellen (s.o.) konnten die Deltasysteme, räumlich modelliert werden. Ein Verschneiden der Mächtigkeiten der Rinnengürtel bzw. Verteilerrinnen mit Störungsflächen oder den Umrissdaten von Salzstrukturen erlauben realistischere Prognosen des Reservoir-Potenzials an konkreten Standorten. Erste Testergebnisse konnten auf Tagungen vorgestellt und diskutiert werden (Abb. 15, Abb. 16; WOJATSCHKE et al. 2018)

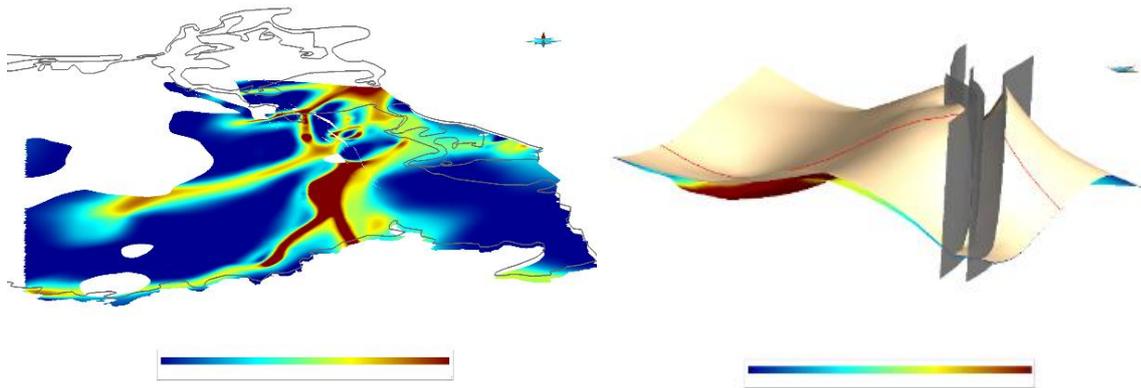


Abb. 15: Modellierte Sandsteinmächtigkeit im Ober-Toarc: Primäre Verteilung der Rinnensande (links) im Vergleich mit der heutigen, durch Salzaufwölbung und Störungen stark modifizierten Lagerung (rechts). Ein schematischer Schnitt entlang der roten Linie wird in Abb. 16 gezeigt.

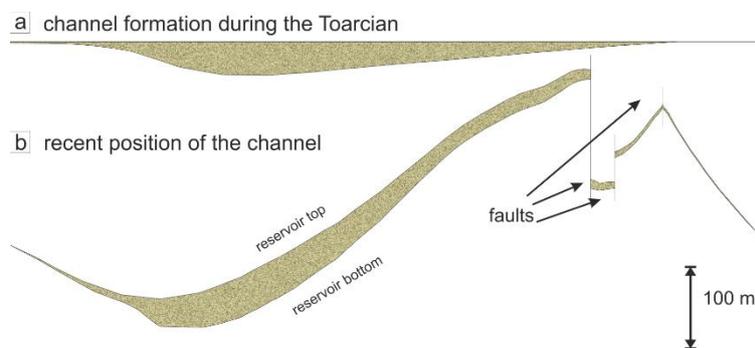


Abb. 16: Modellierte Sandsteinrinne mit (a) ursprünglicher Lagerung zum Zeitpunkt ihrer Entstehung im Ober-Toarc und (b) die aktuellen strukturellen Verhältnisse.

3. Sandsteine des Unteren und Mittleren Buntsandstein: Fazies und Potenzialbewertung

3.1 Geologischer Rahmen

Das Norddeutsche Becken (NDB) liegt während des Buntsandsteins (Untere Trias) auf ca. 25° nördlicher Breite, also im Bereich der tropischen Trockengürtel (PAUL 1999). Im Beckenzentrum erstreckt sich ein ausgedehnter, flacher Playa-See, der leicht übersalzen war und gelegentlich trockenfiel (USDOWSKI 1962; DIEDRICH 1966; PAUL 1982; AIGNER & BACHMANN 1992; Abb. 17). Im Randbereich dieses Beckens fand fluviatiler Transport durch ephemere Flüsse statt, die nur zeitweilig Wasser führten. Klastisches Material wurde über die Beckenränder hauptsächlich aus südlicher Richtung antransportiert (PAUL 1982; FAUPL 2003).

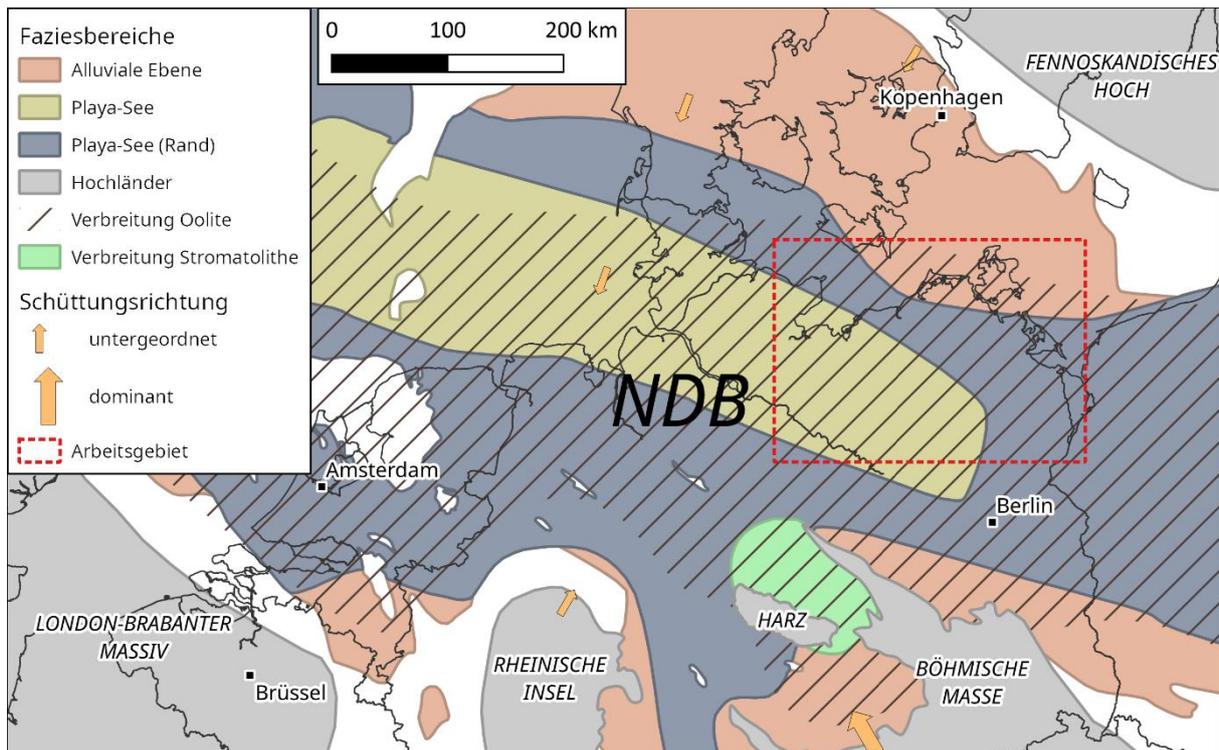


Abb. 17: Fazies des Unteren Buntsandstein im nördlichen Mitteleuropa. Nach PAUL (1982) und BACHMANN et al. (2010).

Der Untere Buntsandstein wird in zwei Formationen unterteilt, die Calvörde-Formation im Liegenden und die Bernburg-Formation im Hangenden. Die Basis der Calvörde-Formation bildet nach BEUTLER (2004) der fein- bis mittelkörnige Malchin-Sandstein, der durchschnittlich 10 m mächtig wird. In der darüber liegenden feinklastischen Wechselfolge sind zwei Karbonathorizonte eingeschaltet. Der basale ist ein 5 m mächtiger Kalksandstein, während der obere als eine 25 m mächtige Kalksandstein-Tonstein-Wechselagerung ausgebildet ist, die auch Anhydrit enthält. In der Bernburg-Formation treten Kalksandstein-Bänke und fünf Oolithhorizonte (Rogensteine) auf.

Im Mittleren Buntsandstein Mecklenburg-Vorpommerns wird klastisches Material hauptsächlich fluvial transportiert. Als Liefergebiet wird insbesondere das Fennoskandische Hoch angesehen. Rügen stellt im Mittleren Buntsandstein eine Schwelle dar, auf der keine oder nur wenige Sedimente abgelagert worden sind (SCHÜLER 1976).

Der Mittlere Buntsandstein des NDB wird in vier Formationen untergliedert, die auch in Mecklenburg-Vorpommern verbreitet sind und nur am nordöstlichen Beckenrand, z.B. auf Nord-Rügen lückenhaft auftreten (RADZINSKI 1976). Diese sind vom Liegenden zum Hangenden die Volpriehausen-, Detfurth-, Hardeggen- und Solling-Formation. Die Unterteilung entspricht einer Folge von Sohlbank-Zyklen. Diese Zyklen sind nahezu im gesamten Beckenraum korrelierbar. Der Randbereich ist faziell grobklastisch ausgebildet. Als Steuerungsmechanismus dieser Zyklen werden tektonische Impulse angegeben, welche das Absinken der Beckenablagerungen und das Herausheben der Beckenränder ausgleichen. So wird langfristig der Reliefgradient aufrechterhalten (BACHMANN et al. 1999). Die jeweiligen Formationen beginnen an der Basis mit vergleichsweise grobklastischen Sandsteinen (Basissandsteinen) oder Konglomeraten, welche dann in feinere Sedimente (Wechselfolgen) übergehen. Die Wechselfolgen bestehen aus einer Wechselagerung von Ton- und Schluffsteinen mit Sandsteinbänken.

Im östlichen Teil des NDB wird die Basis des Mittleren Buntsandsteins lithostratigrafisch durch das Auftreten der ersten groben Sandstein-Schüttungen definiert. Dies ist der Volpriehausen-Basissandstein, der nach SCHÜLER (1976) eine bemerkenswert konstante Mächtigkeit von 4–6 m aufweist. Im Westen von Mecklenburg-Vorpommern tritt außerdem der Volpriehausen-Vorläufer-Sandstein (= Quickborn-Sandstein nach RÖHLING 1998) auf, der den Volpriehausen-Basissandstein unterlagert. Die stratigrafische Einstufung des Sandsteinhorizonts im Grenzbereich zwischen Unterem und Mittlerem Buntsandstein war umstritten, aber laut STD 2016 wird er als Quickborn-Subformation der Volpriehausen-Formation und damit dem Mittleren Buntsandstein zugeordnet. Für geothermische Potenzialbewertungen können beide Sandsteinhorizonte als Einheit betrachtet werden.

3.2 Datengrundlage und Methodik

Als Datengrundlage für die lithofaziellen Untersuchungen des Unteren und Mittleren Buntsandstein dienten vorrangig Archivdokumente des LUNG (Schichtenverzeichnisse relevanter Bohrungen, geophysikalische Bohrlochmesskurven, seismische Profile etc.). Insgesamt standen Informationen aus 288 Bohrungen zur Verfügung, die in Mecklenburg-Vorpommern Abfolgen des Unteren Buntsandstein angetroffen haben. Davon haben ihn 5 Bohrungen nicht durchteuft. 296 Bohrungen haben den Mittleren Buntsandstein angetroffen, von denen ihn 14 nicht durchteuft haben (Abb. 18). Für Vergleichszwecke wurden auch veröffentlichte Karten zur Verbreitung, Tiefenlage und Mächtigkeit verschiedener Formationen des Buntsandsteins verwendet (z.B. SCHÜLER 1976).

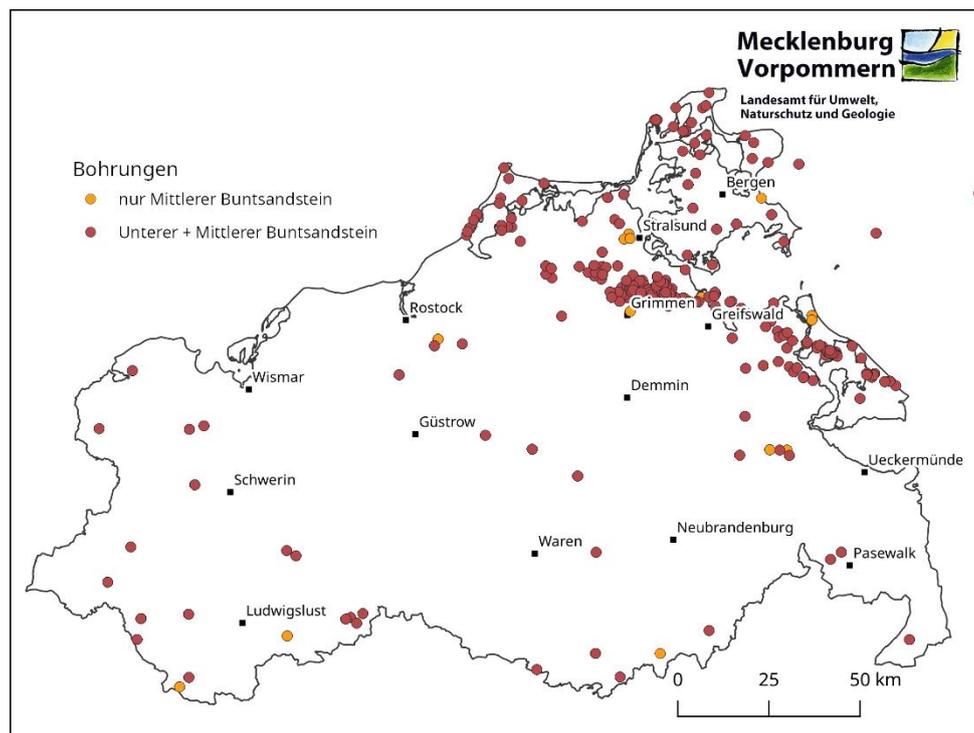


Abb. 18: Übersichtskarte von Mecklenburg-Vorpommern mit Bohrungen, in denen Schichten des Unteren und Mittleren Buntsandstein nachgewiesen sind.

3.2.1 Stratifizierung von Bohrungen und Faziesanalysen

Für den Unteren Buntsandstein wurde die Verbreitung und Mächtigkeit des Malchin-Sandsteins aus verfügbaren Schichtenverzeichnissen und geophysikalischen Bohrlochmesskurven ermittelt und in einem GIS dargestellt (Abb. 20). Hierfür gingen Daten aus 49 Bohrungen ein.

Auf gleiche Weise wurde die Verbreitung und Mächtigkeit des Volpriehausen-Basissandstein rekonstruiert (Abb. 24). Hierfür wurden Schichtinformationen aus 244 Tiefbohrungen verwendet. Die Abgrenzung des Volpriehausen-Basissandsteins erfolgte nach geophysikalischer Bohrlochmesskurve (Gamma-Ray-Log). Dabei konnten zahlreiche Fehler in den Schichtenverzeichnissen korrigiert werden, da gelegentlich der Volpriehausen-Vorläufer-Sandstein (= Quickborn-Sandstein) dem Volpriehausen-Basissandstein zugeordnet war. Die Rekonstruktion der Verbreitung und Mächtigkeit des Volpriehausen-Vorläufer-Sandsteins erfolgte separat und wurde anschließend mit Karten des Quickborn-Sandsteins von RÖHLING (1998) verglichen (Abb. 22).

Für Detailuntersuchungen der Abfolgen des Mittleren Buntsandstein wurden die jeweilige Formationsbasis an die Untergrenze des Basissandsteins gelegt. In einigen Fällen weicht sie von den lithostratigraphischen Zuordnungen nach Schichtenverzeichnis ab, demnach die Formationsbasis teilweise einige Meter unterhalb des Basissandsteins liegt.

Zusätzlich wurden Kerne des Unteren und Mittleren Buntsandsteins aus 11 Tiefbohrungen eingesehen, und teilweise neu dokumentiert (Abb. 19, Abb. 23, Tab. 4).



Abb. 19: Typische Gesteine des Unteren Buntsandstein: Mehr oder weniger karbonatisch zementierte, rotbraune Ton-Schluff-Steine, die mit mm- bis mehrere cm-großen Anhydritknollen durchsetzt sind. Kerne des Unteren Buntsandstein, unmittelbar unter der Basis des Mittleren Buntsandstein, Bohrung E Rügen 105/1965 im Bohrkern-Archiv des LUNG.

Tab. 4: Bohrungen mit Kernmaterial im Unteren Buntsandstein oder im Grenzbereich zum Mittlerem Buntsandstein. BLM = Bohrlochmesskurve, su = Unterer Buntsandstein

Bohrungsname	untersuchter Bereich	Bemerkungen
E Malchin 5/5h/1965	Malchin-Sandstein, Volpriehausen-Sandstein	
E Rügen 1/1963	Übergang Unterer/Mittlerer Buntsandstein	Grenze nur nach BLM, Kernproben im Grenzbereich nicht mehr vorhanden; teilweise initiale Sandsteinbänckchen
E Rügen 105/1965	Übergang Unterer/Mittlerer Buntsandstein	oberer Teil des su bereits deutlich san- dig, aber noch anhydritführend
E Richtenberg 1/1964	Übergang Unterer/Mittlerer Buntsandstein	s. Abb. 23
E Richtenberg 9/1966	Übergang Unterer/Mittlerer Buntsandstein	
E Samtens 101/1962	Übergang Unterer/Mittlerer Buntsandstein	
E Grimmen 21/1964	Übergang Unterer/Mittlerer Buntsandstein	
E Hiddensee 3/1967	Unterer Buntsandstein	
E Reinkenhagen 102/1962	Übergang Unterer/Mittlerer Buntsandstein	Grenze nur nach BLM, Kernproben im Grenzbereich nicht mehr vorhanden
E Stralsund 1/1964	Unterer Buntsandstein	zyklische Anhydritverknollung unter- schiedlicher Intensität
E Wiek 101/1962	Unterer Buntsandstein	
E Wolgast 1/1965	Übergang Unterer/Mittlerer Buntsandstein	bereits im höheren su sind schluffige, anhydritführende Sandsteine vorhanden

3.2.3 3D-Modellierung

Grundlage für die 3D-Modellierung der Basis des Mittleren Buntsandstein (= Basis Volpriehausen-Sandstein inkl. Vorläufer-Sandstein) sind Isolinienpläne der Basis des Detfurth-Sandsteins aus dem Speicherkataster-Projekt (BRANDES & OBST 2011). Für die Anpassung und Feinabstimmung der Flächen wurden die Bohrungsmarker nach Schichtenverzeichnis verwendet und besonders im Bereich der Störungen wurden seismische Profile genutzt. Es wurde ein vertikaler Störungsverlauf angenommen.

3.3 Ergebnisse

3.3.1 Der Malchin-Sandstein

Die Mächtigkeit des Malchin-Sandsteins beträgt nach Auswertung der Bohrungsdaten in Mecklenburg-Vorpommern maximal 35 m. Wie die Karte in Abb. 20 zeigt, erreicht der Malchin-Sandstein seine höchste Mächtigkeit in einem N-S streichenden Gürtel, welches von der Halbinsel Darß bis nach Waren verläuft. Nach W nimmt die Mächtigkeit schnell ab, nach Osten sind über 20 m noch bis Demmin und Grimmen zu erwarten.

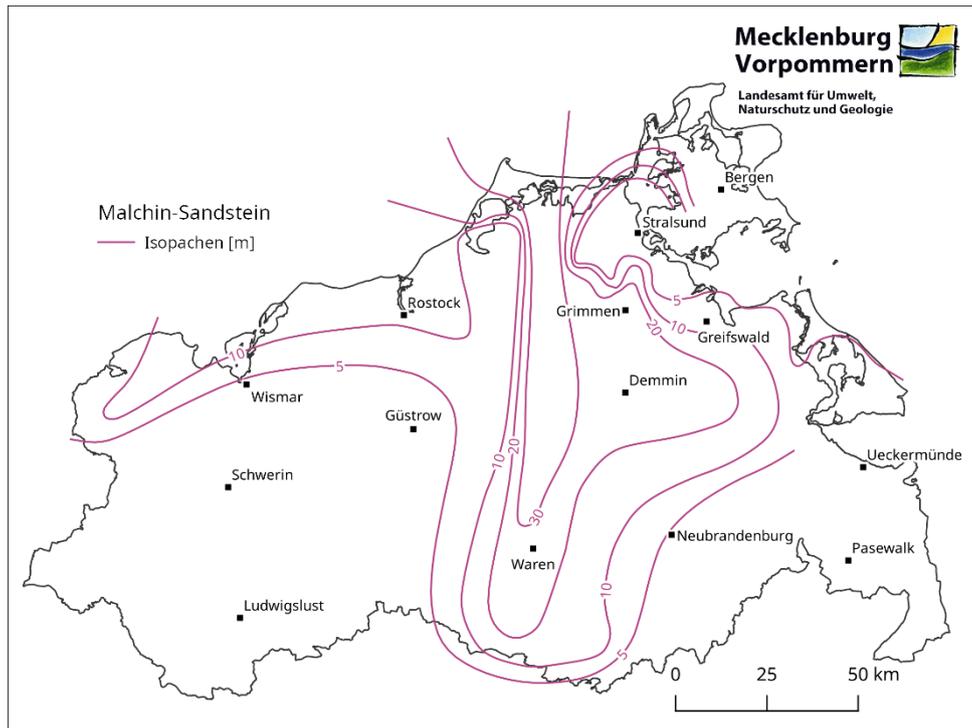


Abb. 20: Verbreitung und Mächtigkeit des Malchin-Sandsteins.

Anhand der Beschreibungen in den Schichtenverzeichnissen handelt es sich um einen schluffigen Fein- bis Mittelsandstein. LIEWERT (2000) beschreibt den Basis-Sandstein als teilweise kieselig, quarzitischanhydritisch, visuell dicht und fest. Moderne lithofazielle Untersuchungsergebnisse liegen nicht vor.

Das einzige verfügbare Bohrkernmaterial des Malchin-Sandsteins stammt aus der namensgebenden Bohrung E Malchin 5/5h/1965. Eigene Untersuchungen am Bohrkern bestätigen, dass es sich um einen Feinsandstein handelt, der überdurchschnittlich tonig (Tonlagen im Zentimeter-Abstand) und intensiv mit Anhydrit durchsetzt ist. Letzterer kann in Nestern konzentriert sein und als Drusenfüllung sogar in Form idiomorpher Kristalle auftreten.

Geohydraulische Messwerte belegen ebenfalls keine günstigen Bedingungen für eine geothermische Nutzung:

- Porosität: 4,8 % (n = 16)
- Permeabilität: 4,4 mD (n = 10)

3.3.2 Volpriehausen-Vorläufer-Sandstein (= Quickborn-Sandstein)

Im westlichen und zentralen Teil des Norddeutschen Beckens tritt im höheren Teil des Unteren Buntsandsteins, unmittelbar unter dem Basissandstein der Volpriehausen-Formation, ein lokal mächtiger Sandstein-Horizont auf, der auch als Quickborn-Sandstein bezeichnet werden kann. Es handelt sich nach RÖHLING (1998) um eine „unabhängige Sandsteineinheit unmittelbar unter dem Volpriehausen-Basissandstein, weder zur Bernburg-Formation noch zur Volpriehausen-Formation zugehörig“. In Mecklenburg ist dieser Volpriehausen-Vorläufer-Sandstein ebenfalls ausgebildet. Die Verbreitung und Mächtigkeit wurde anhand von Schichtenverzeichnissen aus 15 Bohrungen rekonstruiert (Abb. 21).

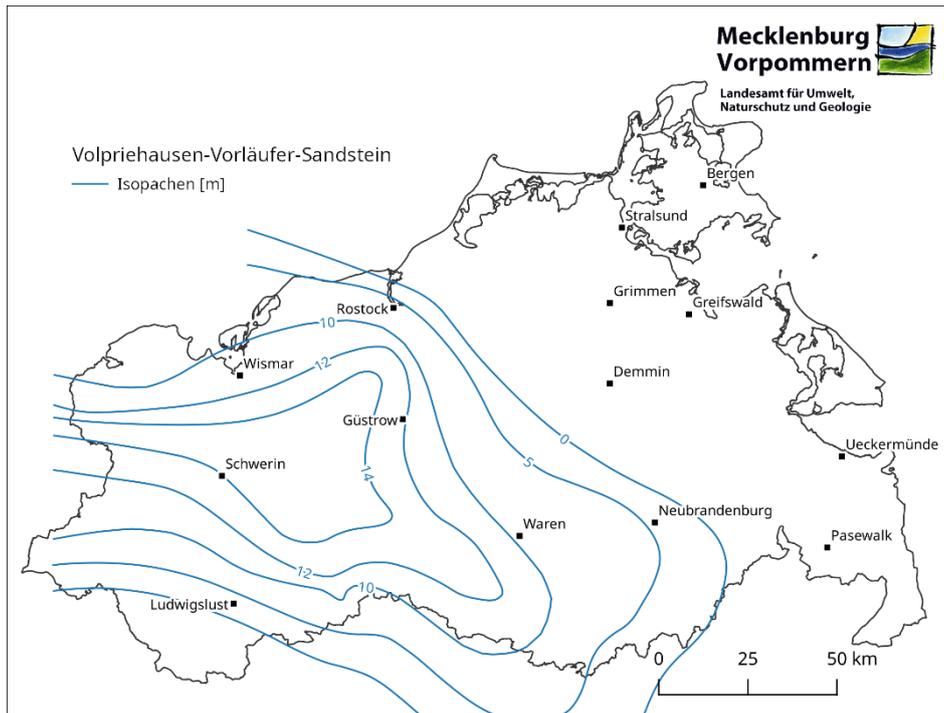


Abb. 21: Verbreitung und Mächtigkeit des Volpriehausen-Vorläufer-Sandsteins.

Die Auswertung der Bohrungsdaten zeigt, dass der Volpriehausen-Vorläufer-Sandstein im Bereich von Schwerin seine höchste Mächtigkeit (etwa 14 m) erreicht. Die Verbreitung endet etwa nordöstlich der Linie Rostock–Neubrandenburg, im Westen reicht sie bis Ludwigslust (Abb. 21). Beim Vergleich mit der Kartendarstellung des Quickborn-Sandsteines von RÖHLING (1998) zeichnet sich eine ähnliche Verbreitung ab, jedoch bestehen erhebliche Abweichungen hinsichtlich der Mächtigkeiten. Insbesondere die für den Raum Schwerin prognostizierten Maximalmächtigkeiten bis 40 m sind nicht belegt (Abb. 22).

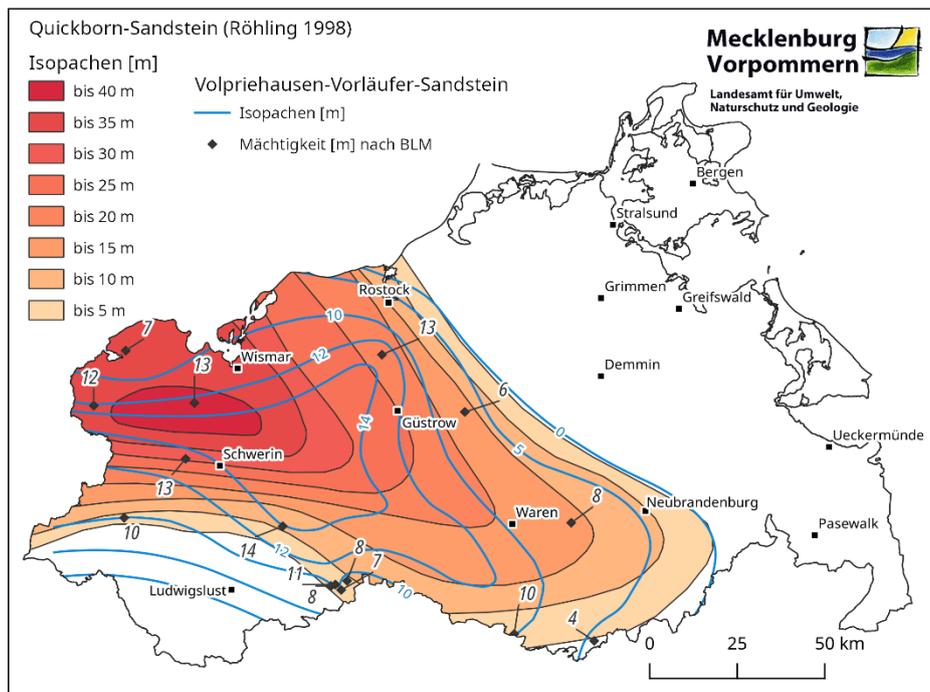


Abb. 22: Verbreitung und Mächtigkeit des Volpriehausen-Vorläufer-Sandsteins im Vergleich mit der von RÖHLING (1998) gezeigten Verbreitung und Mächtigkeit des Sandsteins der Quickborn-Subformation.

Die durchschnittliche Mächtigkeit des Volpriehausen-Vorläufer-Sandsteins erfüllt nicht die Mindestanforderung von 20 m für eine geothermische Nutzung. Ein anderes Bild ergibt sich, wenn die Mächtigkeit des direkt darüber liegenden Volpriehausen-Basissandsteins summiert wird.

3.3.3 Volpriehausen-Sandstein

Der Volpriehausen-Sandstein wurde in Mecklenburg-Vorpommern in 244 Bohrungen angetroffen. Er ist mit Ausnahme von Nord-Rügen und im Bereich einiger Salzdiapire flächendeckend im Land vorhanden. Das Einsetzen des Basissandsteins ist sowohl in den Bohrlochmesskurven (insbesondere Gamma-Ray-Log) als auch im Kernbefund durch einen deutlichen petrografischen Wechsel (Lithologie, Farbe) feststellbar (Abb. 23).

In Mecklenburg lagert der Volpriehausen-Sandstein nur durch eine geringmächtige Tonzwischenlage getrennt über dem Vorläufer-Sandstein (= Quickborn-Sandstein). Teilweise ist eine eindeutige Grenzziehung zwischen beiden Horizonten nicht möglich (z.B. Bohrung E Klinken 1 /1971).

Die Auswertung aller vorhandenen Mächtigkeitsdaten ergibt, dass im Westen des Landes mit 6–12 m höhere Mächtigkeiten als im Osten erreicht werden, wo die Werte 6 m kaum übertreffen (Abb. 24). Nur lokal, wie z.B. auf der Halbinsel Darß, werden auch dort Mächtigkeiten von 10–14 Meter erreicht und auch auf Usedom sind vereinzelt Werte bis 12 m dokumentiert.

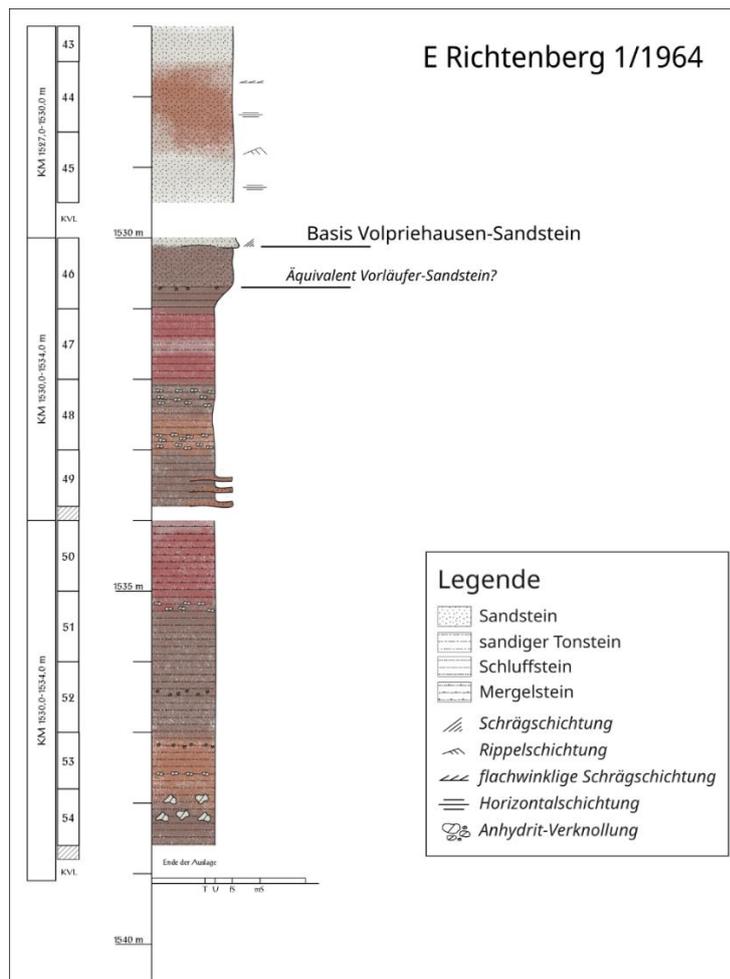


Abb. 23: Kerndokumentation des Übergangs Unterer/Mittlerer Buntsandstein in der Bohrung E Richtenberg 1/1964.

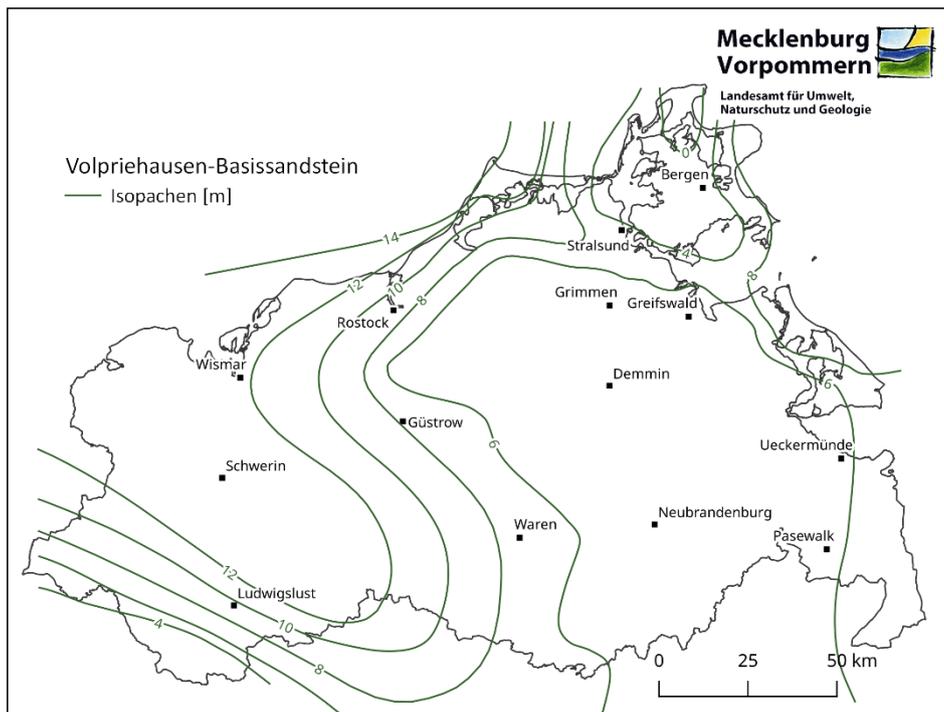


Abb. 24: Verbreitung und Mächtigkeit des Volpriehausen-Sandsteins.

Für die Ermittlung der nutzbaren Porosität im Volpriehausen-Sandstein wurden 76 Einzelmessungen aus 35 Bohrungen ausgewertet. Diese ergaben im Mittel einen Wert von 14,3 % (Abb. 25).

Einzelne Permeabilitätswerte sind nicht verfügbar. Nach REINSCH (1972) schwankt die Permeabilität stark und kann Werte >400 mD erreichen. Besonders hohe Werte stammen demzufolge u.a. aus den Gebieten Marnitz–Schlieven und Camin, besonders niedrige Werte sind aus der Bohrung E Malchin 5/5h/1965 dokumentiert.

Betrachtet man die kumulativen Sandstein-Mächtigkeiten des Volpriehausen-Sandstein und des Vorläufer-Sandsteins, wird für West-Mecklenburg zumindest die Mindestmächtigkeit von 20 m für eine geothermische Nutzung erfüllt (Abb. 26).

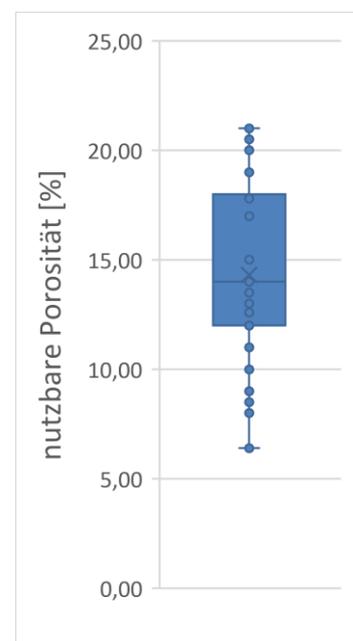


Abb. 25: Statistische Verteilung der Nutzporosität des Volpriehausen-Basissandsteins auf der Basis von 76 Messwerten aus 35 Bohrungen.

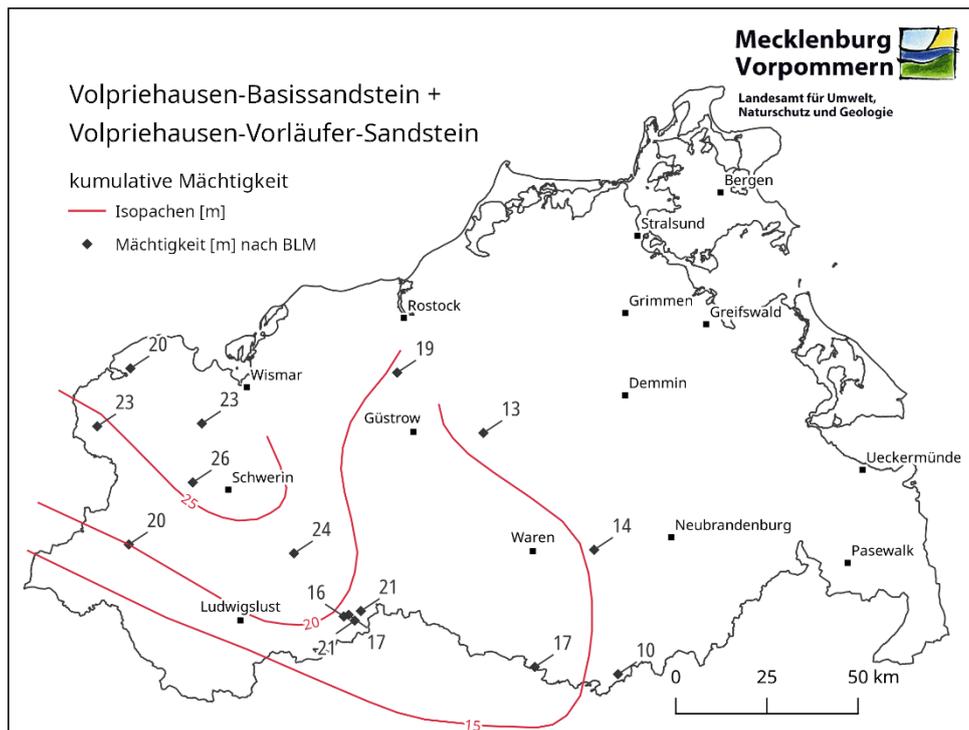


Abb. 26: Kumulative Sandsteinmächtigkeit des Volpriehausen-Basissandsteins und des unterlagernden Vorläufer-Sandsteins.

3.3.4 3D-Modellhorizonte

Auf Grundlage der im LUNG verfügbaren Isolinien-Pläne für die Basis der Detfurth-Formation, die im Rahmen des ersten GeotIS-Projektes (2006-2009) digitalisiert wurden, und den 276 Bohrungen, die die Basis der Volpriehausen-Formation inklusive des Vorläufer-Sandsteins durchteuft haben, wurde die Basis des Mittleren Buntsandsteins modelliert (Abb. 27). Abgesehen von lokalen Variationen liegt dieser Modellhorizont ca. 200 m unterhalb des im GeotIS bisher modellierten Basishorizontes für den Aquiferkomplex Mittlerer Buntsandstein, der die Abfolge zwischen der Detfurth-Formation und der Solling-Formation umfasst.

Die Tiefenlage der Basis variiert zwischen etwa 800 m auf Rügen am nordöstlichen Rand des NDB und ca. 4.500 m in der Randsenke des Salzstocks Wredenhagen im Beckenzentrum. Demzufolge nimmt auch die Temperatur an der Basis der Volpriehausen-Formation von 30°C auf 155°C zu. Im Bereich des Verbreitungsgebietes des geothermisch potenziell nutzbaren Volpriehausen-Sandsteins inklusive Vorläufersandstein (vgl. Abb. 26) und unter der Annahme einer kumulativen Mindestmächtigkeit von 20 m kann je nach Tiefenlage zwischen 2.500 und 4.300 m eine Temperatur von 100°C bis 150° (nach Temperaturmodell im GeotIS; AGEMAR et al. 2012) erwartet werden.

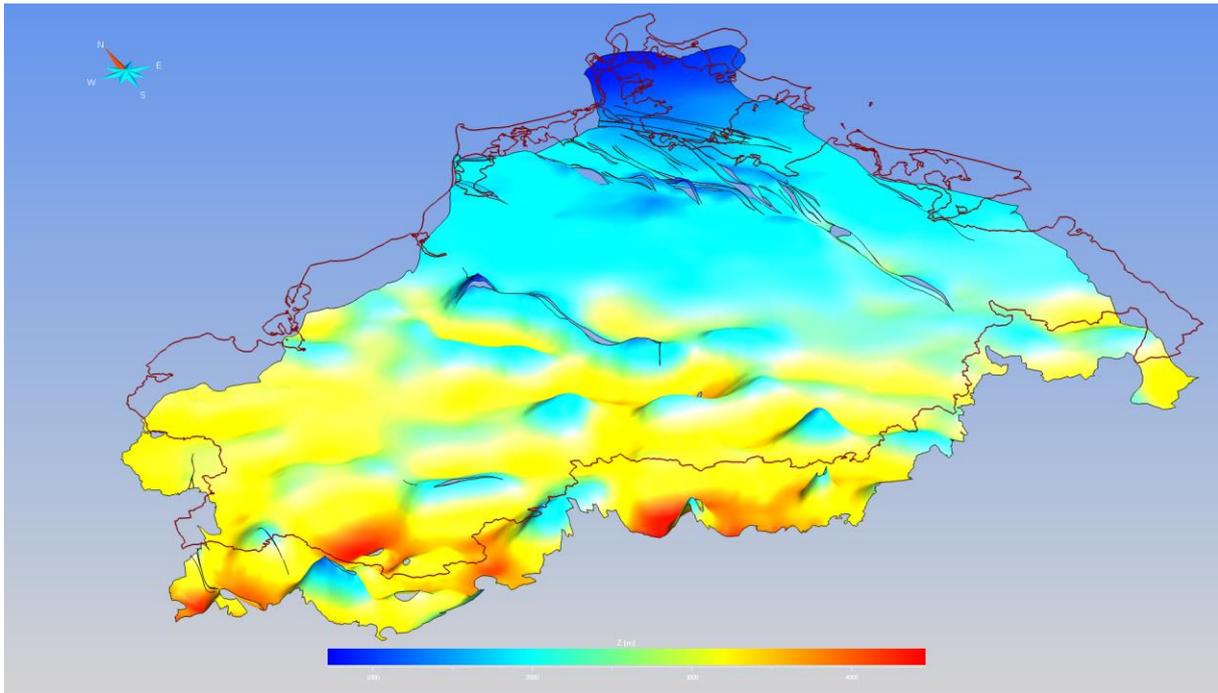


Abb. 27: Modellierte Fläche der Basis des Mittleren Buntsandstein (= Basis Volpriehausen-Formation). Die Tiefenlage nimmt von etwa 800 m auf Rügen am nordöstlichen Rand des NDB bis auf über 4.000 m in den Randsenken der Salzstöcke Kraak, Nostorf und Wredenhagen im Beckenzentrum zu.

4. Standortanalysen zur Bewertung des geothermischen Potenzials

Ein dritter Schwerpunkt des Projektes GeoFaces lag in der Standortanalyse potenzieller geothermischer Nutzhorizonte und der Modellierung ihrer geohydraulischen Parameter für ausgewählte Regionen. In großen Teilen Mecklenburg-Vorpommerns sind insbesondere die Sandsteinreservoirs des Rhät/Lias-Aquiferkomplexes für eine geothermische Nutzung geeignet (vgl. FRANZ et al. 2015). Am nordöstlichen Beckenrand befinden sich jedoch die geeigneten Rinnensandsteine in vergleichsweise geringen Tiefen mit für hydrogeothermale Nutzungen zu niedrigen Reservoir-Temperaturen. In diesem Bereich des NDB sind jedoch für den Mittleren Buntsandstein geothermisch nutzbare Sandsteinhorizonte mit großer Mächtigkeit und günstigen Reservoirparametern bekannt (vgl. OBST & BRANDES 2011).

Für die Standorte Stralsund und Karlshagen lagen bereits in den 1980er Jahren konkrete Planungen für Geothermische Heizzentralen vor und es wurden 5 Tiefbohrungen zur Erschließung geothermisch nutzbarer Reservoirs im Mittleren Buntsandstein abgeteuft und ausgebaut. Trotz guter Reservoirigenschaften und positiver hydraulischer Testergebnisse wurden die Projekte aufgrund ungünstiger finanzieller und politischer Rahmenbedingungen nicht realisiert. Inzwischen sind die drei Bohrungen in Stralsund verfüllt und rückgebaut und auch eine Nutzung der beiden Bohrungen in Karlshagen für eine hydrothermale Doublette ist ungewiss.

Die hier vorliegenden Untersuchungen konzentrierten sich daher auf die benachbarten Kleinstädte und Ostseebäder in den Regionen Darß und Usedom.

4.1 Datengrundlage und Methodik

Die große Anzahl von Bohrungen mit ausführlichen Schichtinformationen der Abfolgen des Mittleren Buntsandstein mit detaillierten Kernaufnahmen und die zahlreichen Messungen geohydraulischer

Kennwerte sind eine gute Datengrundlage für Potenzialstudien und Reservoirmodellierungen im östlichen Teil von Mecklenburg-Vorpommern mit vielen kleineren Städten (Anklam, Barth, Greifswald, Ribnitz-Damgarten, Wolgast) und bedeutenden Erholungszentren an der Ostsee (z.B. Kaiserbäder auf Usedom oder die Ostseebäder Prerow und Zingst).

4.1.1 Mächtigkeitsverteilung und lithofazielle Analyse

Für Standortanalysen wurden zunächst in zwei Untersuchungsgebieten diese Bohrungsdaten detailliert ausgewertet. Neben lithostratigrafischen Informationen wurden auch geohydraulische Daten (z.B. PoroPerm-Werte) berücksichtigt. In der Region Usedom (mit den Standorten Greifswald, Anklam, Wolgast und den Kaiserbädern) wurden Daten aus 109 Bohrungen ausgewertet. Im Untersuchungsgebiet Darß (mit den Standorten Barth und Ribnitz-Damgarten) standen 27 Bohrungen zur Verfügung.

Es wurden jeweils Mächtigkeitskarten für den Detfurth- und Hardeggen-Sandstein generiert. Die Isopachen-Berechnung erfolgte auf Grundlage einer Kriging- und Natural-Neighbour-Interpolation der Daten mit anschließender manueller Korrektur sowie unter Berücksichtigung bereits veröffentlichter Karten von SCHÜLER (1976, 1977). Anhand der Interpretation von Bohrlochmesskurven wurde der prozentuale Sandanteil in Relation zur jeweiligen Formationsmächtigkeit abgeschätzt.

4.1.2 Potenzialanalysen und Perspektivitätsbewertungen

Neben den Mächtigkeiten der Detfurth- und Hardeggen-Sandsteine wurden in den Untersuchungsgebieten Darß und Usedom für die Bewertung des geothermischen Potenzials auch Reservoirtemperaturen abgeschätzt sowie Porositäts- und Permeabilitätswerte aus dem Mittleren Buntsandstein ausgewertet. Die Werte wurden folgenden Unterlagen entnommen:

- Aufschlussakten verschiedener Bohrungen (LUNG-Archiv)
- WOLFGRAMM et al. (2008): Tab. 2
- Geothermischen Ressourcenkartenwerk (GRK) 1:200.000, Blätter Neubrandenburg/Torgelow (WORMBS et al. 1989) und Rostock/Stralsund (WORMBS et al. 1992)

4.2 Ergebnisse

4.2.1 Mächtigkeit und Lithologie der Detfurth- und Hardeggen-Formation

Zur Erstellung von Verbreitungs- und Mächtigkeitskarten wurden in der Region Usedom 109 Bohrungen und in der Region Darß 27 Bohrungen ausgewertet. Die Isopachen zeigen die Mächtigkeit der Detfurth- und Hardeggen-Formation sowie deren Basissandsteine und den prozentualen Sandanteilen in Relation zur Formationsmächtigkeit, da aufgrund der Nähe zum Rand des NDB auch im Bereich der jeweiligen Wechselfolge vermehrt Sandsteineinschaltungen zu verzeichnen sind.

Die Detfurth-Formation erreicht in beiden Untersuchungsgebieten Mächtigkeiten zwischen 50 und 100 m (Abb. 28). Dabei liegen Maximalwerte von 80–100 m in der Region Darß zwischen den Städten Barth und Ribnitz-Damgarten und in der Region Usedom zwischen Greifswald und Wolgast.

Die Mächtigkeit des Detfurth-Sandsteins variiert zwischen 20 und 60 m (Abb. 29). Die höchsten Mächtigkeiten scheinen an NE–SW streichende Rinnen gebunden; sie nehmen nach SW ab. Der Sandanteil der Detfurth-Formation erreicht Werte zwischen 30 % in Richtung Beckenzentrum und über 90 % am Beckenrand (Abb. 30). Die höchsten Werte werden in der Region Usedom erreicht. Die Sandanteile und Mächtigkeiten bestätigen eine Schüttungsrichtung aus nordöstlicher bis östlicher Richtung.

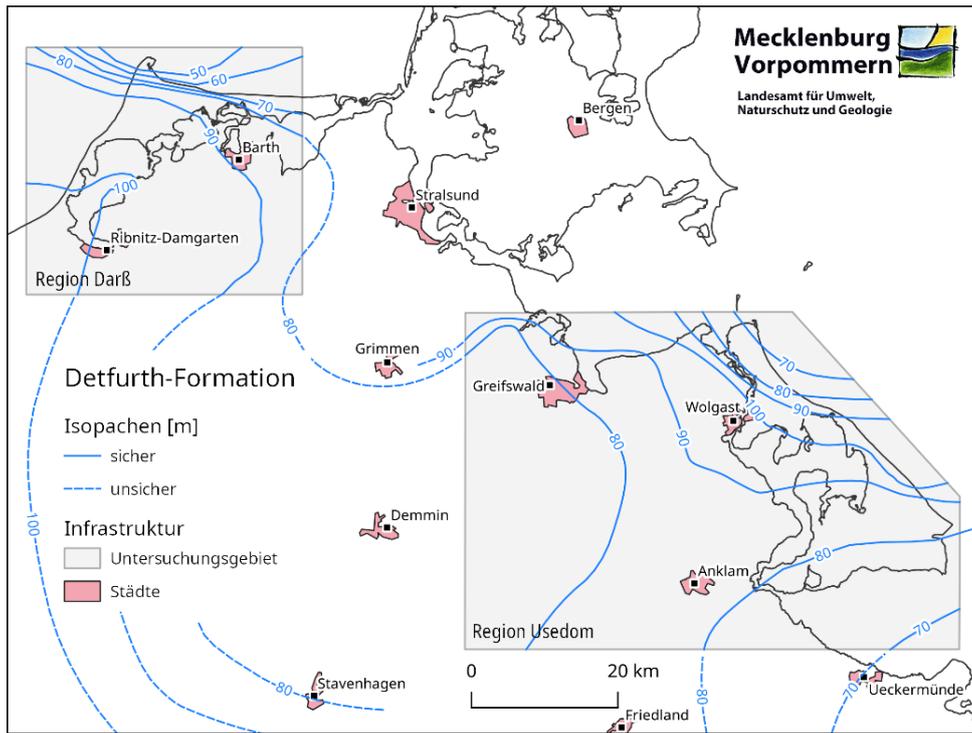


Abb. 28: Verbreitung und Mächtigkeit der Detfurth-Formation.

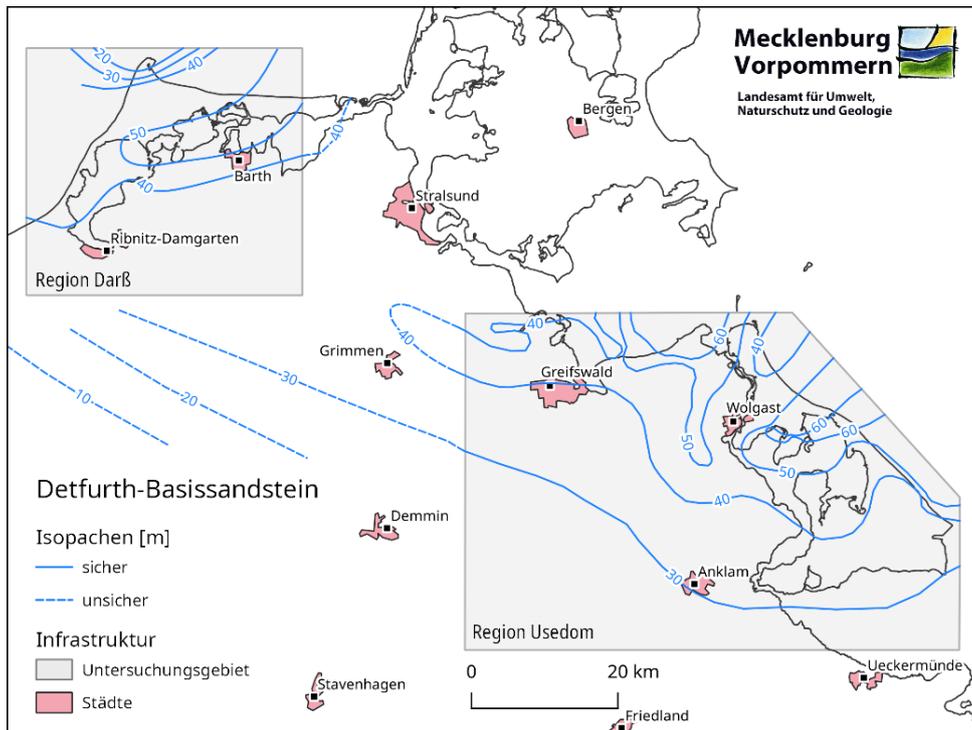


Abb. 29: Verbreitung und Mächtigkeit des Detfurth-Sandsteins.

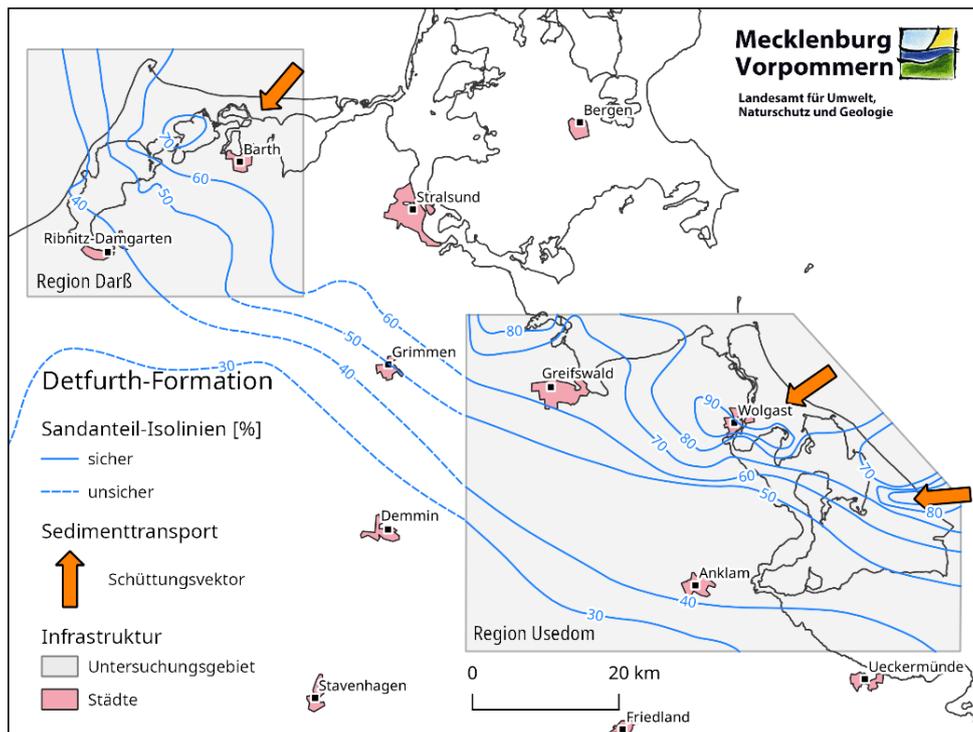


Abb. 30: Prozentualer Sandanteil der Detfurth-Formation.

In den untersuchten Gebieten ist die Hardegsen-Formation flächendeckend mit Mächtigkeiten zwischen 40 m und 100 m ausgebildet (Abb. 31). An wenigen Stellen im Arbeitsgebiet sind Teile des Mittleren Buntsandsteins durch Halotektonik heute nicht mehr erhalten (z.B. im Bereich der Moeckow-Dargibell-Störungszone). Die Verteilung der Isopachen zeigt eine abnehmende Mächtigkeit in Richtung SW. Maximale Mächtigkeiten werden östlich Wolgast erreicht, wobei sich die Bereiche erhöhter Mächtigkeiten bis nach Anklam und Greifswald fortsetzen. In der Region Darß sind die maximalen Mächtigkeiten mit 80 m etwas geringer. Aus dem Verlauf der Isopachen kann die Schüttungsrichtung abgeschätzt werden. In der Region Darß ist diese NE–SW orientiert während in der Region Usedom, Vorpommern die Schüttungen eher aus östlicher Richtung erfolgen. Diese Schüttungsrichtungen deuten ein Umfließen der Schwelle im Bereich von Nord-Rügen an, das als Arkona-Hoch in der gesamten Trias Einfluss auf Paläogeografie und Faziesverteilung hat.

Der Basissandstein der Hardegsen-Formation erreicht in den Untersuchungsgebieten Mächtigkeiten zwischen 10 und 40 m (Abb. 32). Die Mächtigkeitsverteilung nimmt relativ gleichmäßig von NE nach SW ab. Nur zwischen Greifswald und Wolgast scheinen lokal höhere Mächtigkeiten eine NE–SW orientierte Rinne anzudeuten.

Die Hardegsen-Formation wird generell von Sandsteinen dominiert, die am nordöstlichen Beckenrand >90 % der gesamten Formationsmächtigkeit einnehmen (Abb. 33). Der Sandanteil nimmt nach SW Richtung Beckenzentrum bis auf 20 % ab. Lokal erhöhte Mächtigkeiten nordwestlich von Barth und südwestlich von Wolgast zeigen Schüttungen aus nördlicher bzw. nordöstlicher Richtung an, die eine Änderung der Rinnenkonfiguration im Vergleich zur Detfurth-Formation andeuten (Abb. 31). Eine Überlagerung von hohen Sandanteilen und hoher Mächtigkeit kann ebenfalls als Indiz für die Lage von Hauptverteilerinnen gedeutet werden. Gleichzeitig liegt in diesen Bereichen das höchste geothermische Potential.

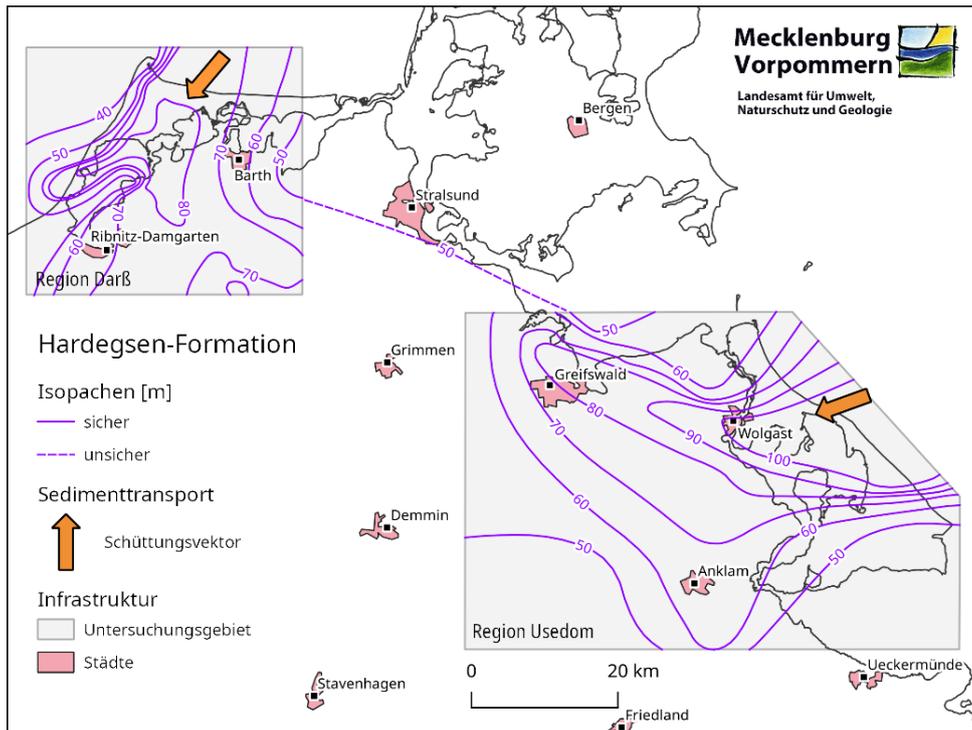


Abb. 31: Verbreitung und Mächtigkeit der Hardegsen-Formation.

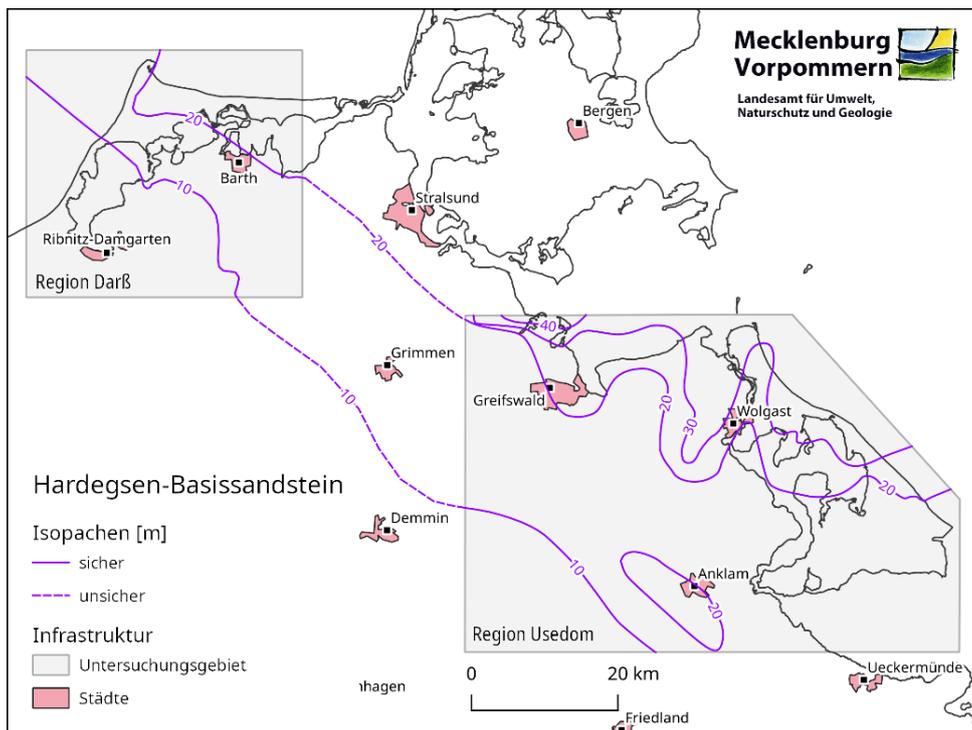


Abb. 32: Verbreitung und Mächtigkeit des Hardegsen-Sandsteins.

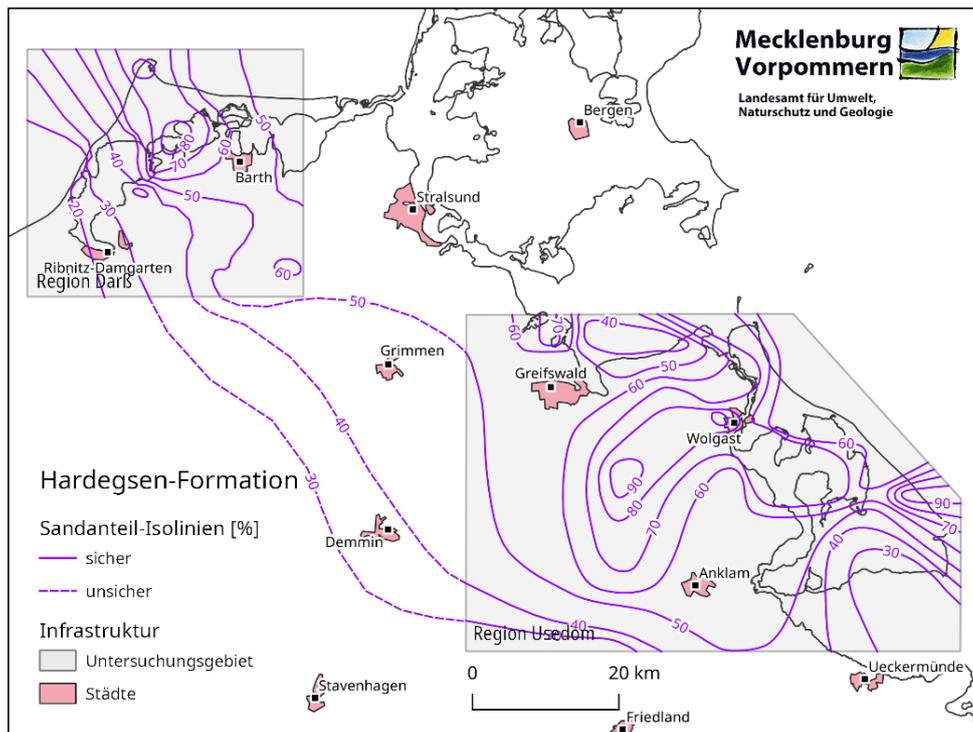


Abb. 33: Prozentualer Sandanteil der Hardegsen-Formation.

4.2.2 Geothermisches Potenzial

Insgesamt zeigen beide Formationen des Mittleren Buntsandstein in den beiden Untersuchungsgebieten Darß und Usedom aufgrund hoher Sandsteinmächtigkeiten bzw. Sandanteile im Verhältnis zur Formationsmächtigkeit günstige Bedingungen für eine geothermische Nutzung an. Die Detfurth-Formation erreicht zumeist größere Mächtigkeiten des Basissandsteins und insgesamt höhere Sandanteile. Auch sind aufgrund der größeren Tiefenlage etwas höhere Temperaturen zu erwarten. Welche der beiden Formationen jeweils bevorzugt genutzt wird, kann durch die Einbeziehung weiterer relevanter Parameter (u.a. Porosität, Permeabilität, Temperatur) bewertet werden.

Region Darß

Im südlichen Teil dieses Untersuchungsgebietes befinden sich die beiden Städte Ribnitz-Damgarten und Barth. Aufgrund der geringen Mächtigkeit des Hardegsen-Sandsteins <20 m (Abb. 32) wird eingeschätzt, dass nur für den Detfurth-Sandstein eine geothermische Nutzung wirtschaftlich ist. Er erreicht in Ribnitz-Damgarten Mächtigkeiten von 30–40 m (Tab. 5). Seine Basis liegt in ca. 1.600 m Tiefe. Demnach können Temperaturen bis 65 °C erwartet werden. In Barth hat er eine höhere Mächtigkeit von 40–50 m. Aufgrund einer geringeren Tiefe von 1.500 m sind Temperaturen bis 60°C wahrscheinlich.

Im Untergrund der beiden Ostseebäder Prerow und Zingst besitzt der Detfurth-Basissandstein ebenfalls eine hohe Mächtigkeit von 40–50 m, aber auch der Hardegsen-Sandstein ist >20 m mächtig. Die Tiefenlage der Detfurth-Basis liegt zwischen 1.450 m und 1.500 m. Temperaturen von ca. 60°C sind wahrscheinlich. Aufgrund der Prerow-Störungszone sind lokal gestörte Lagerungsverhältnisse zu erwarten, die bei der Planung konkreter Vorhaben berücksichtigt werden müssen.

Tab. 5: Geothermisches Nutzungspotenzial des Mittleren Buntsandstein für die Regionen Darß und Usedom (GRK = Geothermisches Ressourcenkartenwerk)

	Region Darß			Region Usedom			
	Ribnitz-Damgarten	Barth	Prerow und Zingst	Greifswald	Anklam	Wolgast	Kaiserbäder Usedom
Einwohner Stand 2018	15.000	9.000	4.500	59.000	12.000	12.000	>9.000
Hardeggen-Formation							
Mächtigkeit Basissandst.	<10 m	10–20 m	>20 m	ca. 20 m	ca. 20 m	20–30 m	ca. 20 m
Formations-Mächtigkeit	60–70 m	60–70 m	70–80 m	70–80 m	60–70 m	80–100 m	60–100 m
Sandanteil	20–30 %	50–60 %	50–70 %	50–60 %	50–60 %	70–90 %	70–90 %
Tiefenlage Basissandst.	ca. 1.500 m	1.400 m	ca. 1.400 m	1.400–1.700 m	ca. 2.250–2.400 m	ca. 1.500 m	ca. 1.750 m
Temperatur	ca. 60°C	ca. 55°C	ca. 55°C	50–60°C	ca. 85°C	55°C	ca. 55°C
Detfurth-Formation							
Mächtigkeit Basissandst.	30–40 m	40–50 m	40–50 m	ca. 40 m	ca. 30 m	40–50 m	30–50 m
Formations-Mächtigkeit	90–100 m	80–90 m	ca. 80 m	ca. 80 m	80 m	90–100 m	80–100 m
Sandanteil	30–40 %	60–70 %	60–70 %	60–70 %	40–50 %	80–90 %	80–90 %
Tiefenlage Basissandst.	1.600 m	1.500 m	ca. 1.450–1.500 m	1.500–1.800 m	2.350–2.500 m	1.600 m	ca. 1.850 m
Temperatur (nach GRK)	ca. 65°C	ca. 60°C	ca. 60°C	55–65°C	ca. 90°C	ca. 60°C	ca. 60°C

Im Umkreis von 10 km um Ribnitz-Damgarten standen nur Porositätswerte aus einer Bohrung zur Verfügung. Für die Detfurth-Formation wurde ein Mittelwert von 18 % (n=17) aus Werten zwischen 11 % und 27 % berechnet. In der Hardeggen-Formation beträgt die mittlere Porosität 21 % (n=6), bei Werten zwischen 18 % und 25,5 %.

In der Nähe der Stadt Barth sowie der Ostseebäder Prerow und Zingst konnten Porositätsdaten aus vier Bohrungen ausgewertet werden. Dabei ergab sich für die Detfurth-Formation ein Mittelwert von 21 % (n = 75), bei Werten zwischen 11 % und 29 %. Die Permeabilität der Formation liegt im Mittel bei 432 mD (n = 19 aus einer Bohrung). Die Werte variieren zwischen 35 mD und 906 mD. Die Porositäten der Hardeggen-Formation erreichen im Mittel 21 % (n = 51), bei Einzelwerten zwischen 13 % und 30 %. Daten zur Permeabilität lagen nicht vor.

Unter Berücksichtigung der begrenzten Datenlage wird abgeschätzt, dass die Bedingungen für eine geothermische Nutzung der Sandsteinreservoirs des Mittleren Buntsandstein für alle untersuchten Standorte der Region Darß günstig sind, wobei für Ribnitz-Damgarten aufgrund der Nähe zum Beckenzentrum, die hydraulischen Eigenschaften etwas kritischer bewertet werden müssen.

Region Usedom

In der Region Usedom wurde die Perspektivität der Städte Greifswald, Wolgast, Anklam sowie der „Kaiserbäder“ auf Usedom eingeschätzt. Dabei zeigen Wolgast sowie die Kaiserbäder auf Usedom die besten Werte für die analysierten Parameter.

Im Gebiet von Greifswald wird für den Detfurth-Basissandstein eine Mächtigkeit von etwa 40 m erwartet. Aufgrund von Störungen variiert die Tiefenlage der Detfurth-Basis zwischen 1.500 m und 1.800 m. Dementsprechend schwanken die prognostizierten Temperaturen zwischen 55 und 65°C.

Die Stadt Anklam liegt bereits im Bereich geringerer Sandanteile sowohl bei der Detfurth- als auch bei der Hardeggen-Formation. Der Detfurth-Basissandstein erreicht immerhin eine Mächtigkeit von ca. 30 m. Durch die Lage über dem Salzkissen Dargibell und gestörter Lagerungsverhältnisse befindet sich die Detfurth-Basis in Tiefen zwischen 2.350 m und 2.500 m. Die Temperatur an der Basis wird mit durchschnittlich ca. 90°C abgeschätzt.

Der Bereich um Wolgast ist durch hohe Mächtigkeiten der Basissandsteine und des Sandanteils der beiden untersuchten Formation charakterisiert. Für die Detfurth-Formation beträgt die Sandsteinmächtigkeit 40–50 m und der Sandanteil wird mit 80–90 % abgeschätzt. Der Basissandstein der Hardeggen-Formation ist 20–30 m mächtig und der Sandanteil beträgt 70–90 %. Die Detfurth-Basis liegt etwa bei 1.600 m. Demnach können im Stadtgebiet Temperaturen von ca. 60°C an der Basis der Detfurth-Formation erwartet werden.

Die Porositätsdaten der Bohrungen im Umkreis von 10 km um Wolgast wurden ausgewertet (Abb. 34). Für die Detfurth-Formation wurde aus 203 Werten (Maximum = 30,7 %) von 7 Bohrungen ein Mittelwert von 22,8 % ermittelt. Die Hardeggen-Formation zeigt einen Mittelwert der Nutzporosität von 21 %. Zur Berechnung standen 85 Werte (Maximum = 25,5 %) aus 6 Bohrungen zur Verfügung.

Zur Einordnung der Permeabilität wurden Daten aus den beiden Geothermiebohrungen bei Karlshagen (Gt Khn 1/1988 und Gt Khn 2/1987) verwendet. Für die Detfurth-Formation wurde ein Mittelwert von 647 mD (maximal 2.000 mD) berechnet (n=46). Für die Hardeggen-Formation liegen nur 4 Messwerte im Bereich von 180–1.150 mD vor.

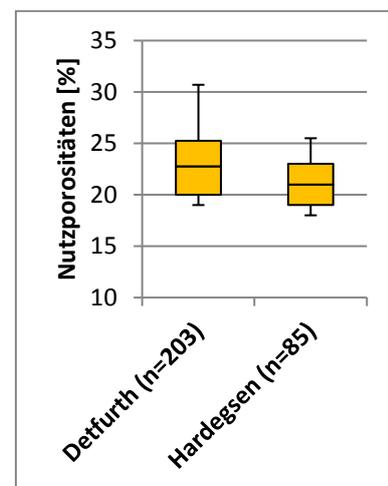


Abb. 34: Statistische Auswertung der Nutzporositäten des Mittleren Buntsandstein im Bereich der Stadt Wolgast.

Auch für die Kaiserbäder Bansin, Heringsdorf, Ahlbeck werden sowohl für die Detfurth- als auch für die Hardegsen-Formation hohe Sandanteile (80–90 % bzw. 70–90 %) bezogen auf die Formationsmächtigkeit prognostiziert. Die Mächtigkeit des Detfurth-Sandsteins beträgt 30–50 m und ist eine gute Basis für geothermische Nutzungen. Dagegen erreicht der Hardegsen-Sandstein nur eine Mächtigkeit von ca. 20 m.

Die Basis der Detfurth-Formation liegt bei etwa 1.850 m. Reservoirtemperaturen von ca. 60°C sind wahrscheinlich. Für die Sandsteine der Detfurth- und der Hardegsen-Folge sind im Untersuchungsgebiet aufgrund von geophysikalischen Bohrlochmessungen und Laboruntersuchungen von 8 Bohrungen Porositäten zwischen 12,5 und 26 % (im Durchschnitt ca. 20 %, n = 32) zu erwarten. Genaue Angaben zur Permeabilität liegen mit Ausnahme der Geothermiebohrungen Karlshagen (s.o.) nicht vor.

Aufgrund der großen Anzahl von Bohrungen im Gebiet der Kaiserbäder und der großen Zahl potentieller Abnehmer von Wärmeenergie wurden für dieses Areal ein 3D-Modell konstruiert und hinsichtlich der Parameter Fazies und Porosität analysiert, um das geothermische Potenzial zu quantifizieren und zu visualisieren.

5. Potenzialanalyse für die Kaiserbäder auf Usedom auf Basis von 3D-Modellierungen

5.1 Datengrundlagen und Methodik

Das Modellgebiet „Kaiserbäder Usedom“ hat eine Grundfläche von ca. 13 × 6 km und umschließt die Ostseebäder Bansin, Heringsdorf und Ahlbeck. 13 Bohrungen, die den Buntsandstein vollständig durchteuft haben sowie 44 seismische Profile geben Auskunft zur Tiefenlage und Mächtigkeit der potentiell nutzbaren Sandsteinhorizonte des Mittleren Buntsandstein (Abb. 34).

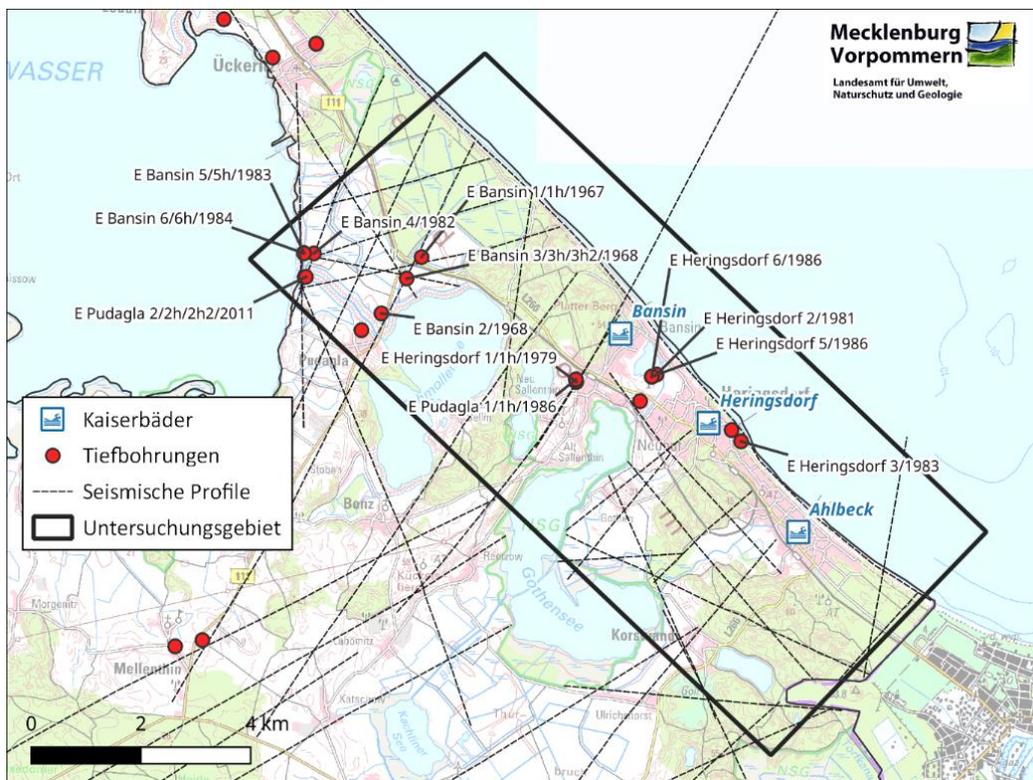


Abb. 34: Modellgebiet „Kaiserbäder Usedom“ mit Datengrundlagen.

Auf Grundlage der Bohrungen wurden detaillierte Karten zur Verbreitung und Mächtigkeit der Detfurth- und Hardegsen-Basissandsteine sowie der Detfurth- und Hardegsen-Formation mit Angabe des prozentualen Sandanteils in Bezug auf die Formationsmächtigkeit erarbeitet (Abb. 35). Die Schichtfolgen der Bohrungen wurden miteinander korreliert, um laterale Variationen zu erkennen, die für die 3D-Modellierung lithofazieller und geohydraulischer Eigenschaften relevant sind (Abb. 36).

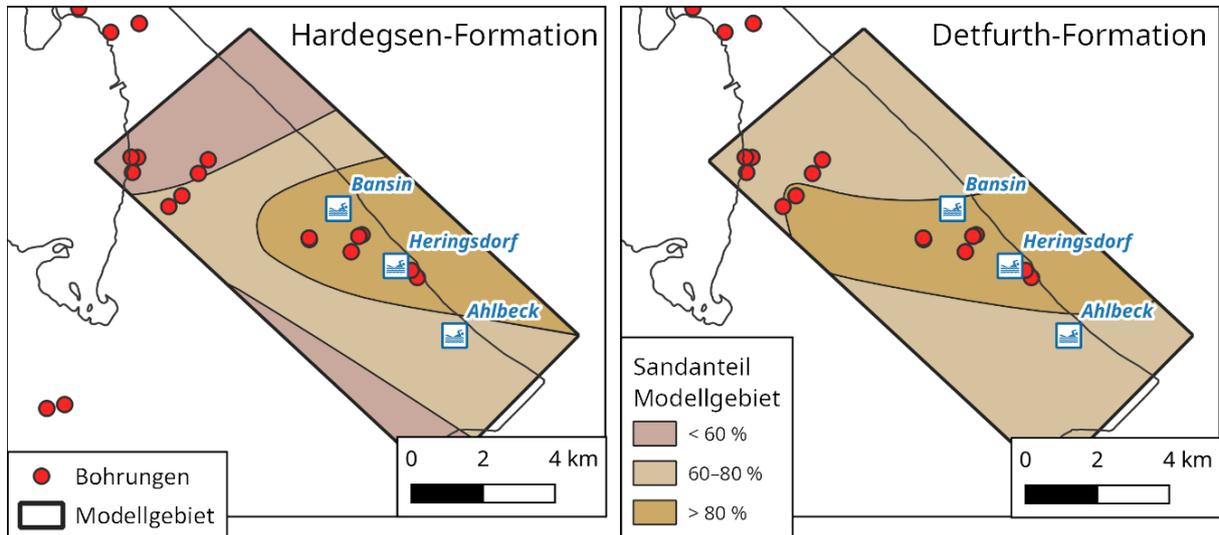


Abb. 35: Sandanteil [in %] der Hardegsen- und Detfurth-Formation im Kaiserbäder-Modellgebiet.

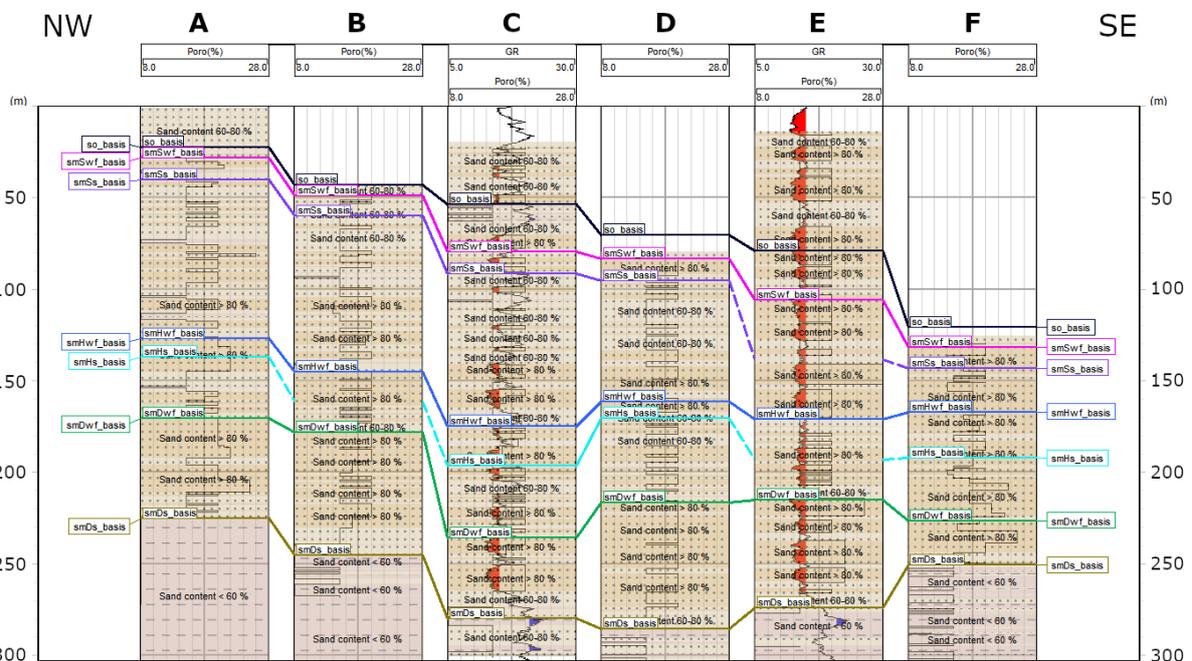


Abb. 36: Korrelation der Schichtgrenzen, Fazies und Porosität für einige der im Modellgebiet untersuchten Bohrungen.

Mit SKUA-GOCAD wurde zunächst ein Strukturmodell entwickelt, auf dem die Volumenmodelle aufbauen. Dafür wurden 44 interpretierte seismische Profile in SKUA-GOCAD importiert. Diese wurden

mit den Daten der 13 Bohrungen korreliert, wobei von einer (E Bansin 6/1984) keine Bohrlochmesskurven vorlagen. Bei der Integration der Bohrungsdaten wurden die Koordinaten des Bohrlochs, die Ansatzhöhe und die Bohrlochabweichung sowie die lithostratigrafischen Markerhorizonte verwendet. Zusätzlich wurden auch die Isolinien relevanter lithostratigrafischer Grenzflächen des Buntsandstein eingeladen (Abb. 37).

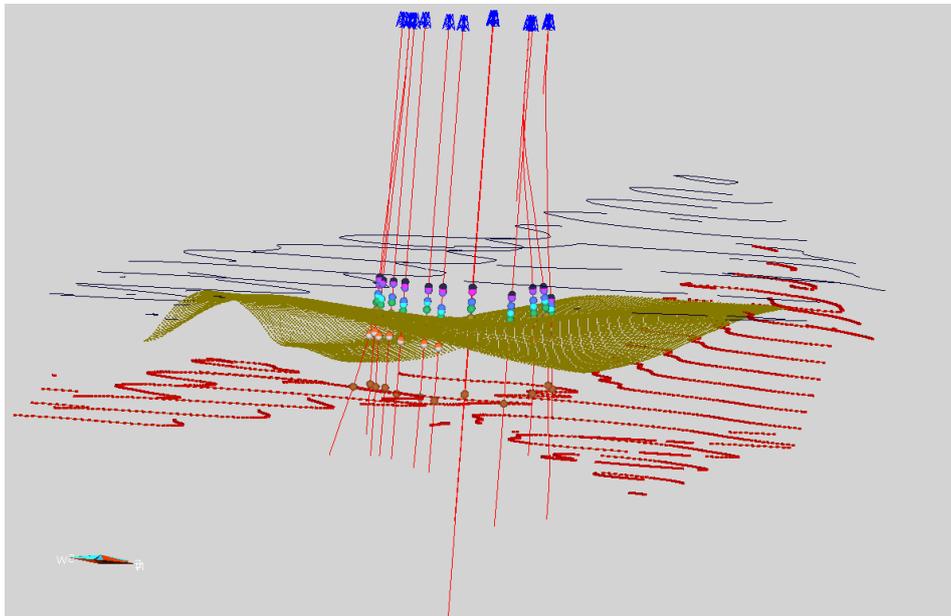


Abb. 37: Ausschnitt aus dem SKUA-GOCAD Modell „Kaiserbäder Usedom“: Isolinien der Basis des Unteren Buntsandstein (rot) und des Oberen Buntsandstein (blau). Dazwischen liegt die modellierte Basisfläche der Detfurth-Formation im Mittleren Buntsandstein (oliv). Die Bohrungen mit Abweichdaten (hellrot) und lithostratigrafischen Markern (well marker). 10x überhöht

Das Strukturmodell wurde mit dem SKUA-GOCAD-Workflow *Structure and Stratigraphy (SnS)* erstellt. Mithilfe der vorhandenen Isolinien der Basis des Unteren Buntsandstein (su), der Detfurth-Basis (smD) und der Basis des Oberen Buntsandstein (so) sowie Bohrungsmarkern wurden die Horizonte Basis Detfurth-Formation, Basis Hardegsen-Formation und Basis Solling-Formation erzeugt.

Die Volumenmodelle basieren auf dem Strukturmodell. Es wurde je ein Volumenmodell für die Detfurth- und die Hardegsen-Formation erstellt. Die Größe der Zellen beträgt $X/Y = 50$ m und $Z = 1$ m. Die Volumenmodelle wurden mit Hilfe der SKUA-GOCAD-Workflows *Data Trend Analysis (DTA)* und *Reservoir Properties (RP)* parametrisiert, um Fazies und Porositätsverteilung zu modellieren. Beim DTA-Workflow wurden Fazies und Porositätsverteilung berechnet. Fehlende Datenwerte wurden statistisch ergänzt. Die interpretierte Fazies nach Bohrlochmesskurven wurde in einer *Vertical Proportion Curve (VPC)*, zusammengeführt. Die VPC zeigt die durchschnittlichen prozentualen Sandanteile jeder Bohrung in 1-m-Intervallen (Abb. 38).

Der RP-Workflow interpoliert auf Grundlage der VPC und der Sandanteile der jeweiligen Formation (s. Abb. 35) die Verteilung von Fazies und Porosität im Volumenmodell. Als Interpolationsmethode wurde *Simple Kriging* verwendet. In Bohrprofilabschnitten ohne Porositätsdaten wurden Werte auf Basis der lithologischen Zusammensetzung vergeben: 20 % für einen Sandanteil >80 %, 15 % für einen Sandanteil von 60–80 % und 8 % für einen Sandanteil <60 %.

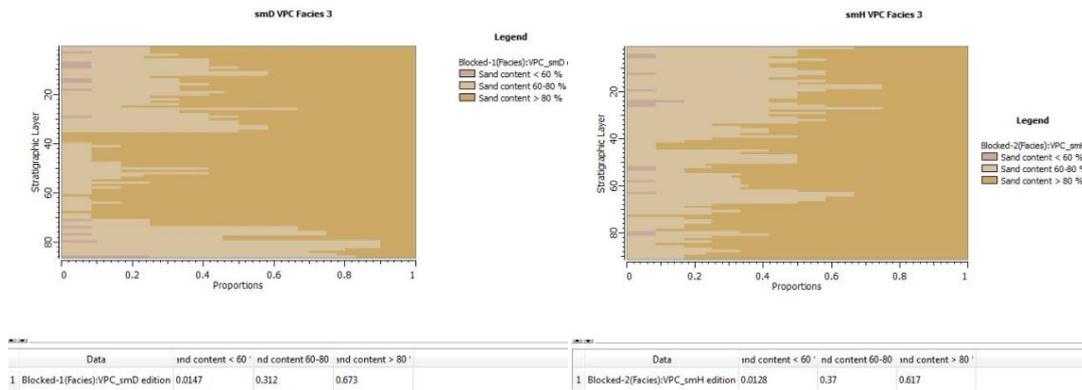


Abb. 38: Vertical Proportion Curve (VPC) für die Detfurth-Formation (smD) und Hardegsen-Formation (smH).

5.2 Volumenmodelle – Ergebnisse und Unsicherheiten

Das Faziesmodell (Abb. 39), das auf den Daten der Sandanteil-Modellierung für die Detfurth- und Hardegsen-Formationen basiert, zeigt im nordöstlichen Teil des Modellgebiets die höchsten Sandanteile an. Diese nehmen nach SW in Richtung Beckenzentrum ab. In der vertikalen Faziesverteilung sind hohe Sandanteile deutlich von Ton-Schluff-Wechselfolgen unterscheidbar.

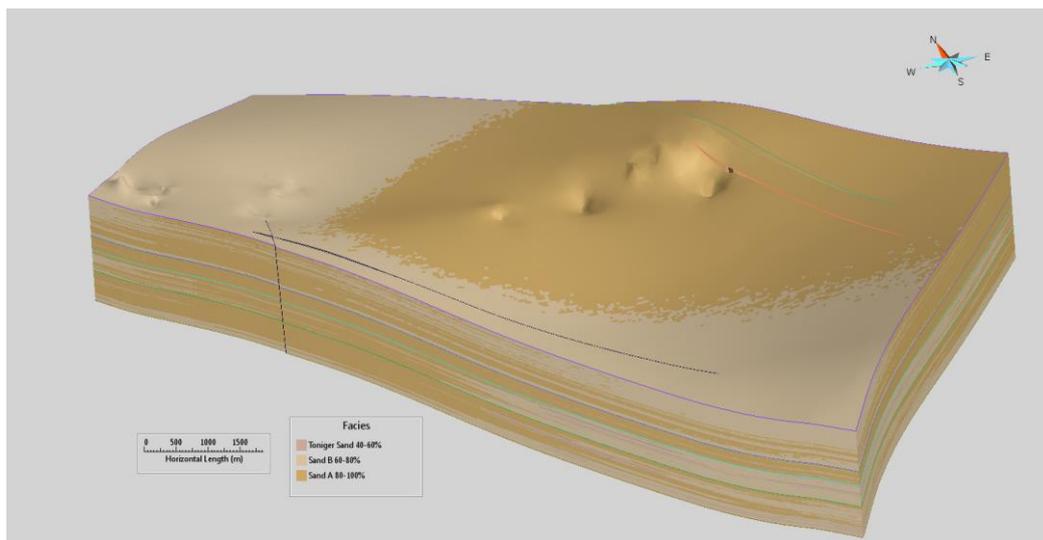


Abb. 39: Faziesmodell für die Detfurth- und Hardegsen-Formationen.

Das Porositätsmodell zeigt eine positive Korrelation zwischen Sandgehalt und Porosität (Abb. 40). Höhere Porositäten werden im zentralen Teil des Modellgebietes sichtbar. Etwa 3 km nordwestlich von Heringsdorf befinden sich Sandsteinpakete mit Porositäten von mehr als 20 % in einer Tiefe zwischen 1.680 m und 1.830 m (Abb. 41). Diese sind in der Detfurth-Formation bis 30 m und in der Hardegsen-Formation bis 35 m mächtig.

Als limitierende Faktoren der Volumenmodelle ist die heterogene Verteilung der Stützstellen (Bohrungen) anzusehen. Die daraus abgeleiteten Isopachen sind dementsprechend als „sicher“ oder „unsicher“ kategorisiert. Kritisch muss auch betrachtet werden, dass die Verbreitungs- und Isopachen-Karten ein Konsens aus den Ergebnissen der vorliegenden Studie sowie der Rekonstruktionen aus SCHÜLER (1976) und GIS-gestützter Interpolation (Kriging und Natural Neighbour). Die interpolierten Ergebnisse wurden kritisch auf ihre Plausibilität geprüft und gegebenenfalls korrigiert.

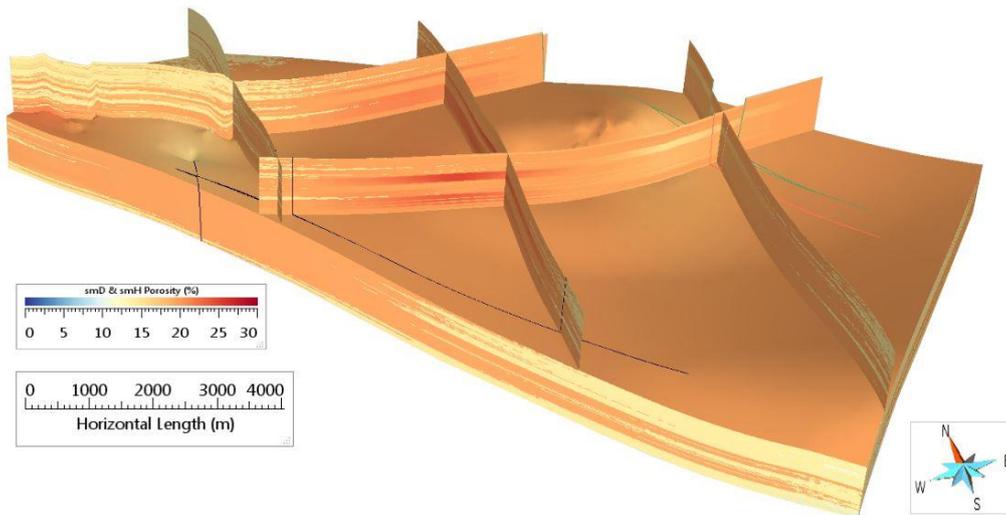


Abb. 40: Porositätsverteilung der Detfurth-Formation smD (unterer, geschlossener Block) und Hardegsen-Formation smH (obere Hälfte, Querschnittsflächen).

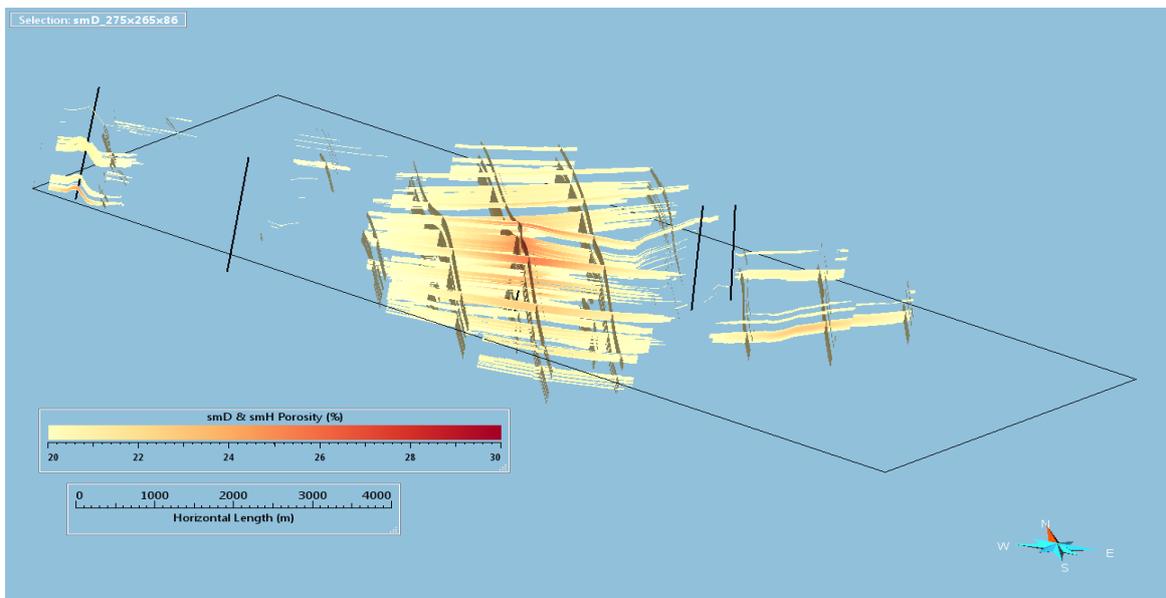


Abb. 41: Datenreduzierte Darstellung von Abb. 40, bei der nur diejenigen Bereiche gezeigt werden, in denen nach der Modellierung eine Porosität über 20 % angenommen werden kann.

Die Bewertung der (kumulativen) Mächtigkeit der Basissandsteine hängt auch von der Mächtigkeit von Zwischenmitteln (Tonsteine oder Schluffsteine) ab, d.h. ob zwei Sandsteinpakete erst ab 2 m oder 5 m Zwischenmittel als getrennt erfasst werden. Bei der Interpretation von Bohrlochmesskurven für eine lithofazielle Aussage wurde die Planimetrierungsmethode nach WECK (1970) angewendet. Diese basiert auf der Auswertung der Eigenpotenzial-Kurve. Wenn diese nicht verfügbar war, wurde die Methode geringfügig auf Gamma-Ray-Messkurven angepasst.

Im Mittleren Buntsandstein folgt in jeder untersuchten Formation auf den Basissandstein eine Wechselfolge (z.B. Detfurth-Sandstein und Detfurth-Wechselfolge). Der Detfurth-Basissandstein ist in den meisten Bohrlochmesskurven eindeutig zu identifizieren. Darüber liegende Einheiten sind jedoch aufgrund lithofazieller Gleichheit nicht immer stratigrafisch eindeutig zu trennen.

Temperaturdaten liegen nur zur Detfurth-Basis vor. Dementsprechend wurden die Temperaturen der Formationsgrenzen im Hangenden und Liegenden entsprechend der Temperaturzu- oder -abnahme gemäß durchschnittlichen geothermischen Gradienten ($3^{\circ}\text{K je } 100 \text{ m}$) abgeschätzt.

Das Modell weist zum jetzigen Arbeitsstand Einschränkungen hinsichtlich der zur Verfügung stehenden Daten auf. Die Bohrungen sind nicht gleichmäßig verteilt, sondern konzentrieren sich entlang eines W–E orientierten „Korridors“ im Zentrum des Modellgebietes. Im nordwestlichen und südöstlichen Teil fehlen Daten. Dies schränkt eine Interpolation hoher Auflösung ein und die resultierende Korrelation ist in diesen Bereichen ungenügend. Weiterhin ist die Anzahl der zugrundeliegenden, gemessenen Porositätswerte begrenzt.

Aus diesem Grund sind für konkrete Projekte Kernbohrungen einzuplanen, um gesicherte Porositäts- und Permeabilitätsanalysen durchführen zu können. Im Weiteren sind Untersuchungen zu Sedimentstrukturen (= Ablagerungsprozesse), Ichnofazies, Diagenese u. a. an frischem Kernmaterial zu empfehlen. Erst die verbesserte Kenntnis von Sedimentationsprozessen und Ablagerungsräumen des gröberklastischen Materials am nordöstlichen Beckenrand erlaubt eine fundierte Abschätzung der Perspektivität für potenzielle Standorte in den untersuchten Regionen.

6. Zusammenfassung

Die detaillierten lithofaziellen Untersuchungen des Toarc am nordöstlichen Rand des NDB zeigen geothermisch nutzbare Potenziale auf. Die genauen Kenntnisse zur Verbreitung von Rinnengürteln bzw. Verteilerrinnen des sich vom nordöstlich gelegenen Fennoskandischen Hochland nach SW vorbauenden Deltasystems im Unter- sowie im Ober-Toarc gestatten die Ausweisung von Sandsteinhorizonten mit Mächtigkeiten $>20 \text{ m}$ und guten bis sehr guten hydraulischen Eigenschaften im Südosten von Mecklenburg-Vorpommern. Aufgrund der größeren Tiefe und der relativ hohen Temperaturen $>50^{\circ}\text{C}$ an der Grenze zu Brandenburg scheint sogar eine hydrogeothermische Nutzung mittels Doublette möglich. Allerdings kann der hohe Feinsandanteil Probleme bei der technischen Erschließung verursachen. Für mitteltiefe Erdwärmesonden sind die Voraussetzungen südlich der Line Demmin–Anklam als sehr positiv zu bewerten. Temperaturen am Top des Toarc $>30^{\circ}\text{C}$ sind nachgewiesen. Die Porositäten der Sandsteine erreichen im Durchschnitt 27–28 %. Die Permeabilität beträgt für die Sandsteine des Unter-Toarc im Mittel fast 600 mD. Die Sandsteine des Ober-Toarc weisen sogar eine durchschnittliche Permeabilität von 1.275 mD auf.

Die Auswertung von Tiefbohrergebnissen bezüglich der geothermisch nutzbaren Potenziale des Unteren Buntsandstein zeigen, dass der basale Malchin-Sandstein im zentralen Bereich von Mecklenburg-Vorpommern Mächtigkeiten $>20 \text{ m}$ besitzt. Aufgrund der tonig-schluffigen Matrix und einer frühdiagenetisch dispersen Anhydritzementation werden die hydraulischen Parameter als ungünstig eingestuft, wie es auch die wenigen Porositätsmessungen bestätigen, die einen Durchschnittswert $<5 \%$ liefern. Im Grenzbereich zum Mittleren Buntsandstein sind in zahlreichen Bohrungen Mecklenburg-Vorpommerns sogenannte Volpriehausen-Vorläufer-Sandsteine dokumentiert, die nach neuen lithostratigraphischen Erkenntnissen der Quickborn-Subformation zugeordnet werden können. Zusammen mit dem direkt darüber folgenden Volpriehausen-Basissandstein lassen sich in W-Mecklenburg kumulative Sandsteinmächtigkeiten $>20 \text{ m}$ aushalten. Aufgrund der großen Tiefen zwischen 2.500 und 4.300 m sind hohe Temperaturen von 100°C bis 150° zu erwarten. Die mittlere Porosität der Basissandsteine beträgt 14,3 % und die Permeabilität variiert stark und kann Werte $>400 \text{ mD}$ erreichen.

Damit für zukünftige Planungen geothermischer Anlagen die Informationen zu den o.g. nutzbaren Sandsteinhorizonten zur Verfügung stehen, wurden die im Rahmen des Projektes mit SKUA-GOCAD modellierten Horizontflächen Basis und Top Unter-Toarc, Top Ober-Toarc sowie Basis Volpriehausen-Formation an das LIAG zur Einpflege in das GeotIS übergeben.

In einem dritten Projektschwerpunkt wurden Standortanalysen durchgeführt, die geothermische Nutzungspotenziale auch für kleinere Städte und touristische Küstenorte in Mecklenburg-Vorpommern aufzeigen. Im nordöstlichen Randbereich des NDB bieten vor allem die Sandsteine der Detfurth- und Hardeggen-Formation (Mittlerer Buntsandstein) sehr gute Möglichkeiten einer CO₂-armen Energiegewinnung mittels hydrogeothermaler Doubletten. Basissandsteinmächtigkeiten von 30–50 m bzw. >20 m sowie Temperaturen überwiegend zwischen 50 und 65°C zusammen mit durchschnittlichen Porositäten um 20 % und Permeabilitäten von ca. 500 mD liefern dafür günstige Voraussetzungen. Ein parametrisiertes Volumenmodell im Gebiet der Kaiserbäder (Insel Usedom) zeigt beispielhaft die Sandverteilung in den beiden Formationen auf. Die räumliche Darstellung ermöglicht es auch, Bereiche mit Porositäten >20 % auszuweisen, die für Planung konkreter Vorhaben berücksichtigt werden sollten.

Die vorliegenden Projektergebnisse sind ein weiterer Baustein zur Umsetzung der Energiewende. Insbesondere für die Regionen Darß (mit den Städten Ribnitz-Damgarten und Barth sowie den Ostseebädern Prerow und Zingst) und Usedom (mit den Städten Greifswald, Anklam und Wolgast sowie den Kaiserbädern Bansin, Ahlbeck und Heringsdorf) bestehen sehr gute Voraussetzungen für hydrogeothermische Nutzungen zur Wärmeversorgung.

Literatur

- AGEMAR, T., SCHELLSCHMIDT, R., SCHULZ, R. (2012): Subsurface temperature distribution in Germany. – *Geothermics* **44**, 65-77.
- AGEMAR, T., TRIBBENSEE, K., GÖRNE, S. & OBST, K. (2018): 3D-Modell geothermischer Nutzhorizonte Nordostdeutschlands in GeotIS. – *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften* **169** (3): 343-351.
- AIGNER, T. & BACHMANN, G.H. (1992): Sequence-stratigraphic framework of the German Triassic. – *Sedimentary Geology* **80**: 115-135.
- BACHMANN, G.H., BEUTLER G., HAGDORN H. & HAUSCHKE N. (1999): Stratigraphie der Germanischen Trias. – In: HAUSCHKE, N. & WILDE, V. [Hrsg.]: *Trias – Eine ganz andere Welt*. – S. 105-114; München (Pfeil-Verlag).
- BACHMANN, G.H. & KOZUR, H.W. (2004): The Germanic Triassic correlations with the international chronostratigraphic scale, numerical ages and Milankovitch cyclicity. – *Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften* **B 26**: 17-62.
- BACHMANN, G.H., GELUK, M.C., WARRINGTON, G., BECKER-ROMAN, A., BEUTLER, G., HAGDORN, H., HOUNSLOW, M.W., NITSCH, E., RÖHLING, H.-G., SIMON, T. & SZULC, A. (2010): Triassic. – In: DOORNENBAL, J.C. & STEVENSON, A.G. [Eds.]: *Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area*. – 149-173; EAGE Publications b.v. (Houten).
- BARTH, G., PIEŃKOWSKI, G., ZIMMERMANN, J., FRANZ, M. & KUHLMANN, G. (2018): 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., MCKIE, T., MIJNLIEFF, H.F. & VAN OJIK,

- K. [Eds.], Mesozoic Resource Potential in the Southern Permian Basin, Geological Society of London, Special Publications **469**: 341-369.
- BAUSS, R. (1976): Bericht zur Fazies und Paläogeographie des Toarc im Nordteil der DDR. – unveröff. Bericht Nr. 61/76, 83 S.; Berlin (ZGI).
- BEUTLER, G. (2004): Trias. In: KATZUNG [Hrsg.], Geologie von Mecklenburg-Vorpommern. – 140-145; Stuttgart (E. Schweizerbart).
- BRANDES, J. & OBST, K. (2011): Geologische Charakterisierung potenzieller Speicher- und Barrieregesteinskomplexe in Mecklenburg-Vorpommern. – In: MÜLLER, C. & REINHOLD, K. [Hrsg.] Speicher-Kataster Deutschland. – SDGG **74**: 208-228.
- DIEDERICH, G. (1966): Fazies, Paläogeographie und Genese des Unteren Buntsandstein norddeutscher Auffassung im südlichen Beckenbereich. – Notizblatt des Hessischen Landesamtes für Bodenforschung zu Wiesbaden **94**: 132-157.
- ERNST, W. (1991): Der Lias im Ton-Tagebau bei Grimmen (Vorpommern). – Fundgrube **4**: 171-183.
- FAUPL, P. (2003): Historische Geologie. – 2. Auflage, 271 S.; Facultas UTB.
- FELDRAPPE, H., OBST, K. & WOLFGRAMM, M. (2008): Die mesozoischen Sandstein-Aquifere des Norddeutschen Beckens und ihr Potential für die geothermische Nutzung. – Zeitschrift für Geologische Wissenschaften **36** (4-5): 199-222.
- FRANZ, M., WOLFGRAMM, M., BARTH, G., NOWAK, K., ZIMMERMANN, J., BUDACH, I. & THORWART, K. (2015): Abschlussbericht zum Verbundprojekt: Identifikation hydraulisch geeigneter Bereiche innerhalb der mesozoischen Sandsteinaquifere in Norddeutschland. Forschungsvorhaben 0325285B. – 333 S., TU Bergakademie Freiberg; Freiberg.
- FRANZ, M., BARTH, G., ZIMMERMANN, J., BUDACH, I., NOWAK, K. & WOLFGRAMM, M. (2018): 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., MCKIE, T., MIJNLIEFF, H.F. & VAN OIJK, K. [Eds.]: Mesozoic Resource Potential in the Southern Permian Basin. – The Geological Society (London), Special Publications **469**: 193-222.
- HOFFMANN, K. (1966): Die Stratigraphie und Paläogeographie der bituminösen Fazies des nordwestdeutschen Oberlias (Toarcium). – Beihefte zum geologischen Jahrbuch **58**: 443-498.
- LIEWERT, M. (2000): Lithologischer Leitfaden für die Feldgeologie, Teil 1 – Norddeutschland. – GEO-data GmbH.
- LOTT, G.K., WONG, T.E., DUSAR, M., ANDSBJERG, J., MÖNNIG, E., FELDMAN-OLSZEWSKA, A. & VERREUSSEL, R.M. C.H. (2010): Jurassic. – In: DOORNENBAL, J.C. & STEVENSON, AG. [Eds.]: Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area. – 175-193; EAGE Publications b.v. (Houten).
- OBST, K., ANSORGE, J., BUDDENBOHM, A. & KALBE, J. (2015): Exkursion E2: Präquartäre Schollen und Lokalgeschiebe zwischen Malchow, Dobbertin und Sternberg. – 79. Tagung Norddeutscher Geologen, Exkursionsführer, LUNG-Heft **1/2015**: 217-267.
- OBST, K. & BRANDES, J. (2011): Geologische Karte von Mecklenburg-Vorpommern 1:500.000, Nutzhorizonte im Mittleren Buntsandstein; Güstrow (LUNG M-V).

- OBST, K., MATTING, S., DEUTSCHMANN, A. & WOJATSCHKE, J. (2018): Fault database of north-eastern Germany: intention, information sources, content. – 17th Symposium of Tectonics, Structural Geology and Crystalline Geology (TSK) Jena, Abstracts: 91.
- OBST, K., BRANDES, J., MATTING, S., WOJATSCHKE, J. & DEUTSCHMANN, A. (2019): Step by step: The 3D subsurface model of Mecklenburg-Vorpommern is growing. – GeoMünster, Abstracts: 329-330.
- PAUL, J. (1982): Der Untere Buntsandstein des Germanischen Beckens. – Geologische Rundschau **71/3**: 795-811.
- PAUL, J. (1999): Fazies und Sedimentstrukturen des Buntsandsteins. – In: HAUSCHKE, N. & WILDE, V. [Hrsg.]: Trias – Eine ganz andere Welt. – S. 105–114: München (Pfeil-Verlag).
- PETZKA, M., RUSBÜLT, J. & REICH, M. (2004): Jura. – In: KATZUNG, G. [Hrsg.]: Geologie von Mecklenburg-Vorpommern. – 151-163; Stuttgart (E. Schweizerbart).
- RADZINSKI, K.-H. (1976): Lithostratigraphie und Paläogeographie des Unteren und Mittleren Buntsandsteins im Nordteil der DDR. – Jahrbuch für Geologie **7/8**: 63-72.
- REINHARDT, H.-G. (1993): Darstellung struktureller Zusammenhänge beim Anschluss land- und seeseismischer Messergebnisse im regionalen reflexionsseismischen Kartenwerk. – Zeitschrift für Geologische Wissenschaften **21** (3): 319-326.
- REINHARDT, H.-G. & GRUPPE REGIONALES KARTENWERK (1968–1991): Regionales Kartenwerk der Reflexionsseismik; Tiefenlinienpläne und Mächtigkeitskarten 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000. – Leipzig (VEB Geophysik) [unveröff.].
- REINHARDT, H.-G. & KSCHICKUS, G. (1978): Erläuterungen zu den Tiefenkarten des reflexionsseismischen Horizonts L1 (Grenzbereich Dogger-Lias). – Leipzig (VEB Geophysik).
- REINSCH, D. (1972): Hydrogeologische Verhältnisse des Mittleren Buntsandsteins im Nordteil der Deutschen Demokratischen Republik.– unveröff. Ergebnisbericht, 79 S.; Schwerin (Forschungsinstitut für die Erkundung und Förderung von Erdöl und Erdgas Gommern).
- RÖHLING, H.-G. (1998): The Quickborn Sandstone – A new lithostratigraphic unit in the lowermost Middle Buntsandstein (Scythian). – Zentralblatt für Geologie und Paläontologie Teil I, **7-8**: 797-812.
- RÖHLING, H.-G. (2013): Der Buntsandstein im Norddeutschen Becken – regionale Besonderheiten. – In: Deutsche Stratigraphische Kommission [Hrsg.; Koordination und Redaktion J.LEPPER & H.-G RÖHLING für die Subkommission Perm-Trias]: Stratigraphie von Deutschland XI. Buntsandstein. – Schriftreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften **69**: 43-67.
- SCHÜLER, F. (1976): Der Buntsandstein im Nordosten der DDR. – Jahrbuch für Geologie **7**: 81-86.
- SCHÜLER, F. (1977): Stratigraphie, Lithofazies und strukturelle Entwicklung des Buntsandsteins im Nordosten der DDR. – Dissertation, 176 S., Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald; Greifswald.
- SIMMS, M. J. (2004): British Lower Jurassic stratigraphy: an introduction. – In: SIMMS, M.J., CHIDLAW, N., MORTON, N. & PAGE, K. [Eds.]: British Lower Jurassic Stratigraphy, Geological Conservation Review Series **30**: 1-50.

- STD 2016 [Deutsche Stratigraphische Kommission, Hrsg.; Redaktion, Koordination und Gestaltung: MENNING, M. & HENDRICH, A.]: Stratigraphische Tabelle von Deutschland 2016. – Potsdam (GeoForschungsZentrum).
- USDOWSKI, H.-E. (1962): Die Entstehung der kalkoolithischen Fazies des norddeutschen Unteren Buntsandsteins. – Beiträge zur Mineralogie und Petrographie **8**: 141-179.
- WECK, D. (1970): Ausnutzung des geologischen Informationsgehalts von geophysikalischen Bohrlochmessungen, erläutert an Beispielen aus Trias und Perm des Nordostens der DDR. – Dissertation, 76 S., TU Bergakademie Freiberg; Freiberg.
- WOJATSCHKE, J., BARTH, G. & OBST, K. (2018): 3D Modeling of Geothermal Reservoirs in Mesozoic Delta Systems of the North German Basin – First Approaches. – GeoBonn, Abstracts: 281-282.
- WOLFGRAMM, M., RAUPPACH, K. & SEIBT, P. (2008): Reservoir-geological characterization of Mesozoic sandstones in the North German Basin by petrophysical and petrographical data. – Zeitschrift für geologische Wissenschaften **36**: 249-265.
- WORMBS, H., DIENER, I., RUSITZKA, I., PASTERNAK, G., TOLEIKIS, R., TESSIN, R., TROTTNER, D. & WUNDERLICH, H. (1989): Geothermische Ressourcen im Nordteil der DDR (II), 1:200.000, Blatt Neubrandenburg/Torgelow. – 47 S.; Berlin (ZGI).
- WORMBS, J., DIENER, I., PASTERNAK, G., STOLLBERG, K., TESCH, M. & TESSIN, R. (1992): Geologische Grundlagen zur Geothermienutzung in Nordost-Deutschland, 1:200.000, Blatt Rostock / Stralsund. – 55 S.; Berlin (UWG mbH).
- ZIEGLER, P.A. [Ed.] (1990): Geological Atlas of Western and Central Europe. – Schell International Petroleum.
- ZIMMERLE, W., FUCHS, A. & PETZKA, M. (1994): On the lithogenesis of Toarcian sediments in the Dobbertin area (Mecklenburg, N Germany). – Zentralblatt für Geologie und Paläontologie Teil 1, **11-12**: 1403–1423.
- 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 controls. – Sedimentology **65**: 897-930.