

# scriptum

Geowissenschaftliche

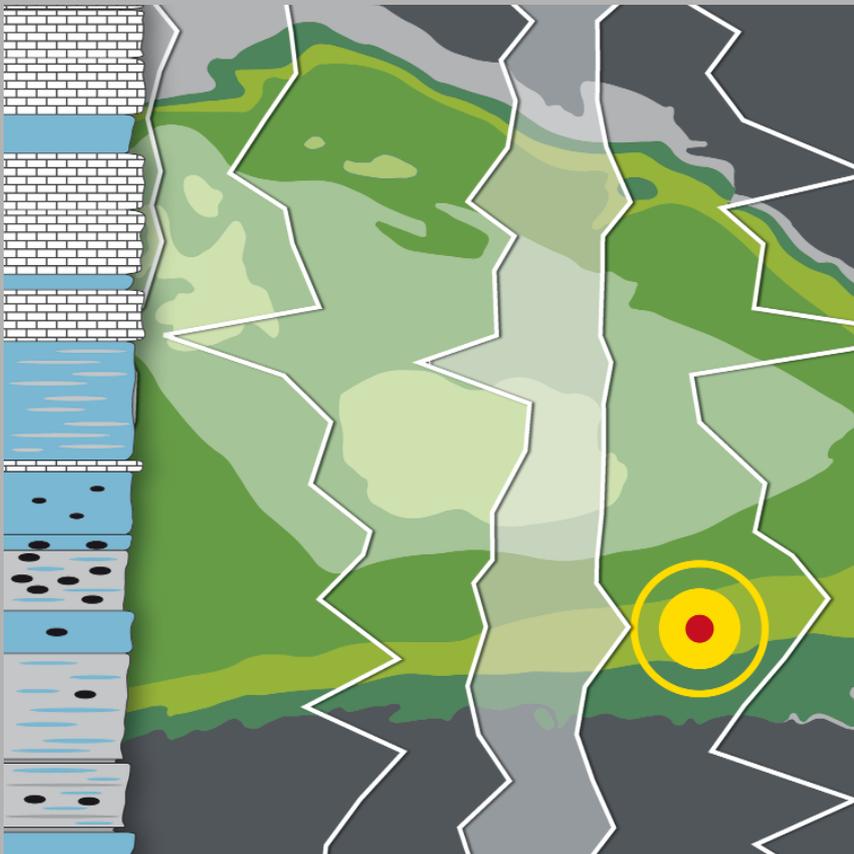
Arbeitsergebnisse  
aus Nordrhein-Westfalen

# online

# 5

## **Wärmeleitfähigkeit oberkreidezeitlicher Karbonatgesteine des südöstlichen Münsterlandes (NW-Deutschland) in Abhängigkeit von Karbonat- gehalt, Dichte und Porosität**

Christian Dieck, Bettina Dölling, Frank Otto und Markus Wilmsen



# **Wärmeleitfähigkeit oberkreidezeitlicher Karbonatgesteine des südöstlichen Münsterlandes (NW-Deutschland) in Abhängigkeit von Karbonat- gehalt, Dichte und Porosität**

Christian Dieck<sup>1</sup>, Bettina Dölling<sup>1</sup>, Frank Otto<sup>2</sup> und Markus Wilmsen<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen  
– Landesbetrieb – , De-Greiff-Str. 195,  
D-47803 Krefeld

<sup>2</sup> Technische Hochschule Georg Agricola,  
Herner Straße 45, D-44787 Bochum

<sup>3</sup> Senckenberg Naturhistorische  
Sammlungen Dresden,  
Museum für Mineralogie und Geologie,  
Königsbrücker Landstr. 159,  
D-01109 Dresden

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>5</b>
<b>1.1</b>	Geologie .....	<b>5</b>
<b>1.2</b>	Geothermie .....	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Material und Methodik</b> .....	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>8</b>
<b>3.1</b>	Schichtenfolge .....	<b>8</b>
<b>3.2</b>	Karbonatgehalte .....	<b>10</b>
<b>3.3</b>	Wärmeleitfähigkeiten .....	<b>11</b>
<b>3.3.1</b>	Wärmeleitfähigkeiten der getrockneten Gesteinsproben .....	<b>11</b>
<b>3.3.2</b>	Wärmeleitfähigkeiten der wassergesättigten Gesteinsproben .....	<b>12</b>
<b>3.4</b>	Rohdichte, Reindichte und Porosität .....	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>Diskussion</b> .....	<b>13</b>
<b>4.1</b>	Wärmeleitfähigkeiten der getrockneten Proben in Abhängigkeit von Karbonatgehalt (Lithologie), Dichte und Porosität .....	<b>13</b>
<b>4.2</b>	Wärmeleitfähigkeiten der wassergesättigten Proben in Abhängigkeit von der Porosität .....	<b>16</b>
<b>5</b>	<b>Schlussfolgerung</b> .....	<b>17</b>
<b>6</b>	<b>Danksagung</b> .....	<b>17</b>
<b>7</b>	<b>Literatur</b> .....	<b>18</b>
	<b>Anhang: Analyse-Ergebnisse</b> .....	<b>19</b>

## Impressum

Alle Rechte vorbehalten

**scriptum** *online*

Geowissenschaftliche Arbeitsergebnisse aus Nordrhein-Westfalen

© 2018 Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen – Landesbetrieb –  
De-Greif-Strasse 195 · 47803 Krefeld · Postfach 10 07 63 · 47707 Krefeld  
Fon 0 21 51 897-0 · poststelle@gd.nrw.de  
[www.gd.nrw.de](http://www.gd.nrw.de)

**Satz und Gestaltung:**

Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen

Für den Inhalt des Beitrags sind die Autoren allein verantwortlich.

**scriptum** *online* erscheint in unregelmäßigen Abständen.  
Kostenloser Download über [www.gd.nrw.de](http://www.gd.nrw.de)

**ISSN 2510-1331**

## Kurzfassung

Das 124 m mächtige kreidezeitliche Profil der Kernbohrung Anröchte-Klieve 4415/1002 ist repräsentativ für die Schichtenfolge im südöstlichen Münsterländer Kreide-Becken und umfasst die lithostratigraphischen Einheiten Essen-Grünsand-Formation, Baddeckenstedt-Formation, Brochterbeck-Formation, Hesseltal-Formation, Büren-Formation und Oerlinghausen-Formation des Cenomaniums bis unteren Oberturoniums. Die Schichtenfolge wurde makroskopisch aufgenommen und anhand von 64 Proben hinsichtlich Karbonatgehalt, Roh- und Reindichte (Porosität, errechnet) sowie Wärmeleitfähigkeiten analysiert.

Die Wärmeleitfähigkeiten der unterschiedlichen Karbonatgesteine (Ton- bis Kalkmergelsteine, Mergelkalk- und Kalksteine) wurden in Abhängigkeit von den Parametern Karbonatgehalt, Rohdichte, Reindichte und Porosität betrachtet. Hierbei zeigen die verschiedenen Gesteinsproben bei Abnahme von Porosität und Reindichte eine Zunahme der Wärmeleitfähigkeit. Gleichzeitig besteht eine direkte Abhängigkeit der Dichte und der Porosität vom jeweiligen Karbonatgehalt der untersuchten Gesteinsproben. Ein steigender Karbonatgehalt führt zu einem Anstieg der Rohdichte und zu einem Absinken von Reindichte und Porosität. Indirekt bewirkt daher ein steigender Karbonatgehalt eine geringfügige Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit. Da die erbohrte Schichtenfolge der Kernbohrung Anröchte-Klieve repräsentativ für den Untergrund des südöstlichen Münsterländer Kreide-Beckens ist, sind die hier vorgestellten Untersuchungsergebnisse übertragbar auf die in dieser Region vorkommenden wichtigsten lithostratigraphischen Einheiten der oberkreidezeitlichen Schichtenfolge (Mächtigkeit > 10 m). Demnach ergeben sich im Einzelnen folgende durchschnittliche Wärmeleitfähigkeiten: Baddeckenstedt-Formation = ca. 2,5 W/mK, Brochterbeck-Formation = ca. 2,3 W/mK, Büren-Formation = ca. 2,1 W/mK und Oerlinghausen-Formation = ca. 2,3 W/mK.

## Abstract

The 124-metre-thick Cretaceous sequence of the drill core Anröchte-Klieve 4415/1002 is representative for the stratigraphic succession of the south-eastern Münsterland Cretaceous Basin. The Cenomanian to upper Turonian strata comprise the lithostratigraphical units of the Essen Grünsand, Baddeckenstedt, Brochterbeck, Hesseltal, Büren and Oerlinghausen formations. The core section was examined macroscopically and, subsequently, carbonate content, true and bulk density (porosity) as well as thermal conductivity were analyzed based on 64 samples.

The thermal conductivity of the different carbonate rocks (argillaceous marlstone to calcareous marlstone, marly limestone and limestone) was regarded in relation to the parameters carbonate content, true and bulk density as well as porosity. The results show that decreasing porosity and true density correlate with increasing thermal conductivity. At the same time, density and porosity depend on the carbonate content of the samples. An increasing carbonate content leads to a rise in bulk density and to a decrease of true density and porosity. Thus, an increasing carbonate content indirectly leads to a minor rise of thermal conductivity. As the sequence of the Anröchte-Klieve core represents the subsurface conditions of the south-eastern Münsterland Cretaceous Basin, the results presented herein can be easily transferred to the major (> 10 m) upper Cretaceous lithostratigraphical units in this area. Consequently, the following mean thermal conductivity values are assigned to the different units: approx. 2,5 W/mK for the Baddeckenstedt-Formation, approx. 2,3 W/mK for the Brochterbeck Formation, approx. 2,1 W/mK for the Büren-Formation and approx. 2,3 W/mK for the Oerlinghausen Formation.

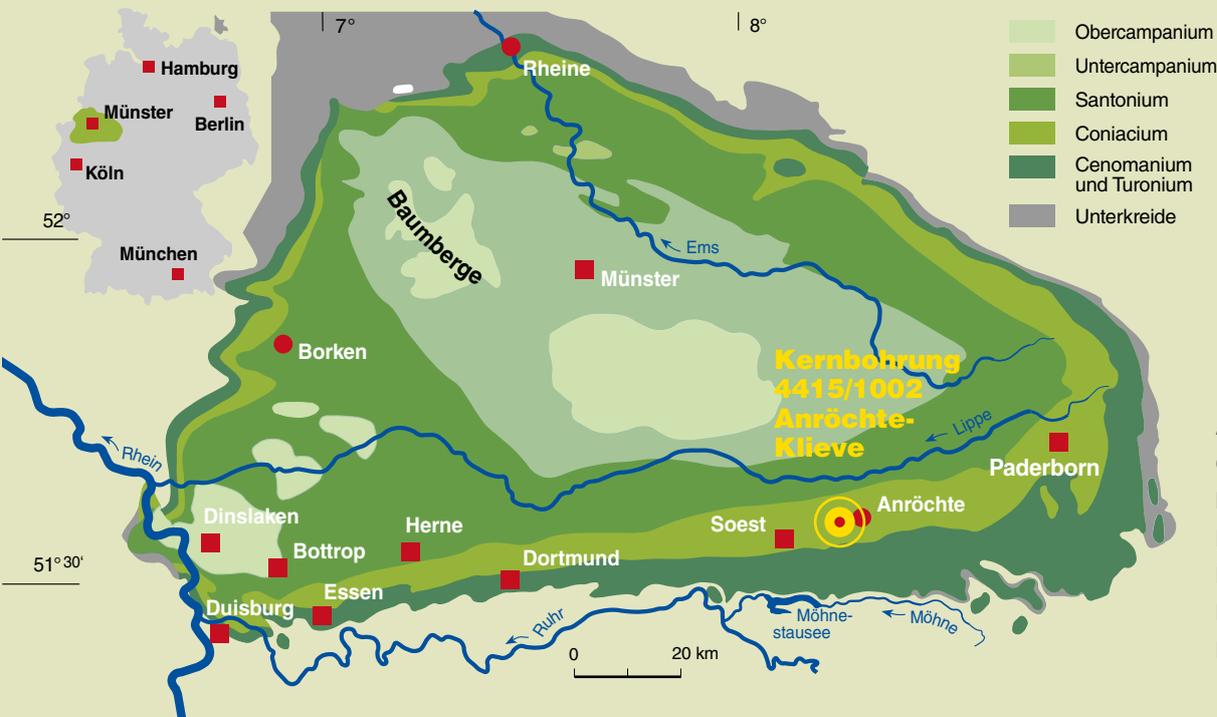


Abb. 1:  
Geologische Karte des  
Münsterländer Kreide-  
Beckens mit Lage der  
Kernbohrung Anröchte-  
Klieve; verändert nach  
HISS & MUTTERLOSE (2010)

# 1 Einleitung

## 1.1 Geologie

Die Kernbohrung Anröchte-Klieve 4415/1002 befindet sich am südöstlichen Rand des Münsterländer Kreide-Beckens (Abb. 1), welches teilweise bis über 2 000 m mächtige, flachmarine Ablagerungen des Mittelalbiums bis Obercampaniums erschließt (Hiss 1995). Die hier flach lagernden, überwiegend karbonatischen Sedimentgesteine werden nur von gering mächtigen Lockergesteinen des Quartärs überlagert (meist Löss oder Grundmoräne). In Anröchte-Klieve wird ein grüner (glaukonitreicher), sandiger Kalkstein des Oberturoniums (Soest-Grünsand-Member der Duisburg-Formation, vgl. DÖLLING et al. 2018) als Werkstein in Steinbrüchen abgebaut. Um die Schichtenfolge im Liegenden der Werksteine zu erkunden, wurde im Jahr 2013 die 200 m tiefe Kernbohrung 4415/1002 (E 32 451564, N 5714053, ETRS89) in einem Steinbruch in Anröchte-Klieve niedergebracht.

Das paläozoische Grundgebirge steht südlich des Münsterlandes, im Rheinischen Schiefergebirge, an und setzt sich unterhalb des Münsterländer Kreide-Beckens im tiefen Untergrund nach Norden fort. Die paläozoischen Gesteine wurden während der variszischen Orogenese, am Ende des Oberkarbons, gefaltet und anschließend gehoben und erodiert (DROZDZEWSKI & WREDE 1994). Vom Perm bis zur späten Unterkreide stellte dieser paläozoische Block ein Festlandsgebiet dar: die Rheinische Masse (ROSENFELD 1978; ZIEGLER 1982). Beginnend mit dem Mittelalbium wurde der nördliche Teil der Rheinischen Masse sukzessive von Norden her überflutet und das heutige Münsterland entwickelte sich zu einem epikontinentalen Flachmeer, in dem küstennahe und hemipelagische Ablagerungsbedingungen vorherrschten (Hiss 1995). Der Standort der Kernbohrung Anröchte-Klieve wurde mit dem Beginn des Cenomaniums komplett überflutet. Beginnend im Turonium, verstärkt jedoch ab dem Coniacium, begann die Heraushebung (Inversion) des nördlich gelegenen Niedersächsischen Beckens. Im Zuge dessen wurde das Münsterländer Kreide-Becken stark trogför-

mig abgesenkt (VOIGT 1963). Unter weiterhin flachmarinen Bedingungen lagerten sich karbonathaltige Schlämme am Meeresboden ab, die heute lokal bis zu 1 500 m Mächtigkeit haben (Mergelsteine der Emscher-Formation). Am Ende der Kreide zog sich das Meer aus dem Münsterland zurück und die Ablagerungen wurden teilweise erodiert, sodass am Standort der Kernbohrung Anröchte-Klieve heute Kalkmergelsteine der Erwitte-Formation (Unterconiacium) an der Geländeoberfläche anstehen (vgl. Geologischer Dienst NRW 2016).

## 1.2 Geothermie

Der Begriff „Geothermische Energie“ beschreibt die in Form von Wärme gespeicherte Energie unterhalb der Oberfläche der festen Erde (VDI 4640). Die Erde besitzt einen konduktiven Wärmestrom, der vom Äußeren Erdkern bis hin zur Grenze von Oberem Mantel und Erdkruste zirkuliert. Hierdurch verliert die Erde an Wärmeenergie. Dieser Verlust wird jedoch durch den Wärmeeintrag durch Sonnenenergie kompensiert, sodass der Wärmehaushalt der Erde nahezu ausgeglichen ist (STOBER & BUCHER 2012). In den oberen Metern der Erdoberfläche haben auch klimatische Bedingungen einen Einfluss auf die Temperatur des Untergrundes (z. B. Permafrost). Die durch den konduktiven Wärmestrom zur Erdoberfläche transportierte Wärmeenergie wird zusammen mit der durch den Zerfall radioaktiver Elemente frei werdenden Wärme als Wärmestromdichte (auch terrestrischer Wärmestrom) zusammengefasst und beträgt im Mittel  $63 \text{ mW/m}^2$ , wobei dieser Wert je nach Örtlichkeit stark abweichen kann. In der Geothermie ist der terrestrische Wärmestrom eine entscheidende Kennzahl für den Wärmenachschub. Die Temperaturzunahme (Geothermischer Gradient) beträgt dabei im Durchschnitt etwa  $3 \text{ }^\circ\text{C}$  pro 100 m Tiefe (Bundesverband Geothermie 2018). Neben wichtigen Faktoren wie dem Grundwasser hängt der Wärmetransport in Richtung Erdoberfläche auch von der Wärmeleitfähigkeit der lokal vorliegenden Gesteinsschichten ab. Diese wird beeinflusst durch die Beschaffenheit der Gesteine (z. B. Porosität und Dichte) und durch das hydrogeologische Umfeld (Poren-, Kluft- oder Karst-Grundwasserleiter; KALTSCHMITT & HUENGES & WOLFF 1999). Weitere Einflussgrößen sind unter anderem die Fließgeschwindigkeit des Grundwassers innerhalb der Gesteinsschichten und örtlich aufsteigende Thermalwässer (Konvektion) (Bundesverband Geothermie 2018). Demzufolge sind die Nutzungsmöglichkeiten für Geothermie stark von den lokalen geologischen und hydrogeologischen Bedingungen beeinflusst.

# 2 Material und Methodik

Die Schichtenfolge des knapp 124 m mächtigen kreidezeitlichen Bohrkernabschnitts der Bohrung Anröchte-Klieve wurde makroskopisch untersucht und der Karbonatgehalt hierbei zunächst grob abgeschätzt. Anschließend wurden 64 Proben entnommen und an diesen der Karbonatgehalt, die Wärmeleitfähigkeit sowie die Roh- und Reindichte gemessen (s. Tab. i. Anh.). Die Benennung der Tonmergelsteine, Kalkmergelsteine, Mergelkalksteine und Kalksteine erfolgte nach DIN 22 015 (1993).

Der Karbonatgehalt wurde nach Trocknung und Feinmahlen eines kleinen Probenstücks im Volumetrischen Verfahren (Coulometrische Titration) nach DIN EN ISO 10693 (2014) bestimmt. Die Wärmeleitfähigkeiten der Gesteinsproben wurden an 10 – 20 cm langen Bohrkernabschnitten trocken gemessen. Ausgewählte Proben wurden auch in wassergesättigtem Zustand analysiert, was den natürlichen Gesteinsverband widerspiegelt. Die Bohrkernabschnitte wurden an der zu messenden Seite mit schwarzem Acryllack bestrichen und zusammen mit Standards (Kalibrierung) mit einem Thermal Conductivity Scanner (TCS) der Firma Lippmann & Rauen GbR mit einer fokussierten Wärmequelle thermisch gescannt. Aus der Differenz der Temperaturmessung vor und hinter der Wärmequelle wurde die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  [W/mK] berechnet. Es gilt:

$$\lambda = \frac{Q \times d}{A \times t \times \Delta T} \text{ [W/mK]}$$

$\lambda$  = Wärmeleitfähigkeit [W/mK]  
 $Q$  = Wärmemenge [Ws]  
 $d$  = Schichtdicke [m]  
 $A$  = Fläche [m<sup>2</sup>]  
 $t$  = Zeit [s]  
 $\Delta T$  = Temperaturunterschied [K]

Die Reindichte wurde mit einem Micromeritics (AccuPyc II 1340) Gaspyknometer mit dem Prüfgas Helium gemessen, das auch kleinste Poren füllt. Aus der Differenz des Prüfvolumens des Messzylinders und des tatsächlich verpressbaren Gasvolumens im Verhältnis zum Gewicht der Probe wurde die Reindichte  $\rho_o$  [g/cm<sup>3</sup>] berechnet:

$$\rho_o = \frac{m}{V} \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

$\rho_o$  = Reindichte  
 $m$  = Masse [g]  
 $V$  = Volumen [cm<sup>3</sup>]

Die Rohdichte wurde im Micromeritics (GeoPyc 1360) Gaspyknometer mit Graphit-Mikrokugeln ( $\leq 100 \mu\text{m}$ ) und einer Druckkraft von 145 N gemessen. Aus der Differenz des Prüfvolumens des Messzylinders und des tatsächlich verpressbaren Volumens an Graphit-Mikrokugeln im Verhältnis zum Gewicht der Probe wurde die Rohdichte  $\rho$  [g/cm<sup>3</sup>] analog zur Reindichte berechnet. Die Rohdichte ist definiert als Masse eines porösen Materials dividiert durch sein Volumen, wobei das Volumen im Gegensatz zur Reindichte Hohlräume (Poren) enthält. Roh- und Reindichte wurden an derselben Probe gemessen. Dadurch lässt sich die Porosität der Probe berechnen:

$$\varnothing = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_o}\right) \times 100 \text{ [%]}$$

$\varnothing$  = Porosität [%]  
 $\rho$  = Rohdichte [g/cm<sup>3</sup>]  
 $\rho_o$  = Reindichte [g/cm<sup>3</sup>]

# 3 Ergebnisse

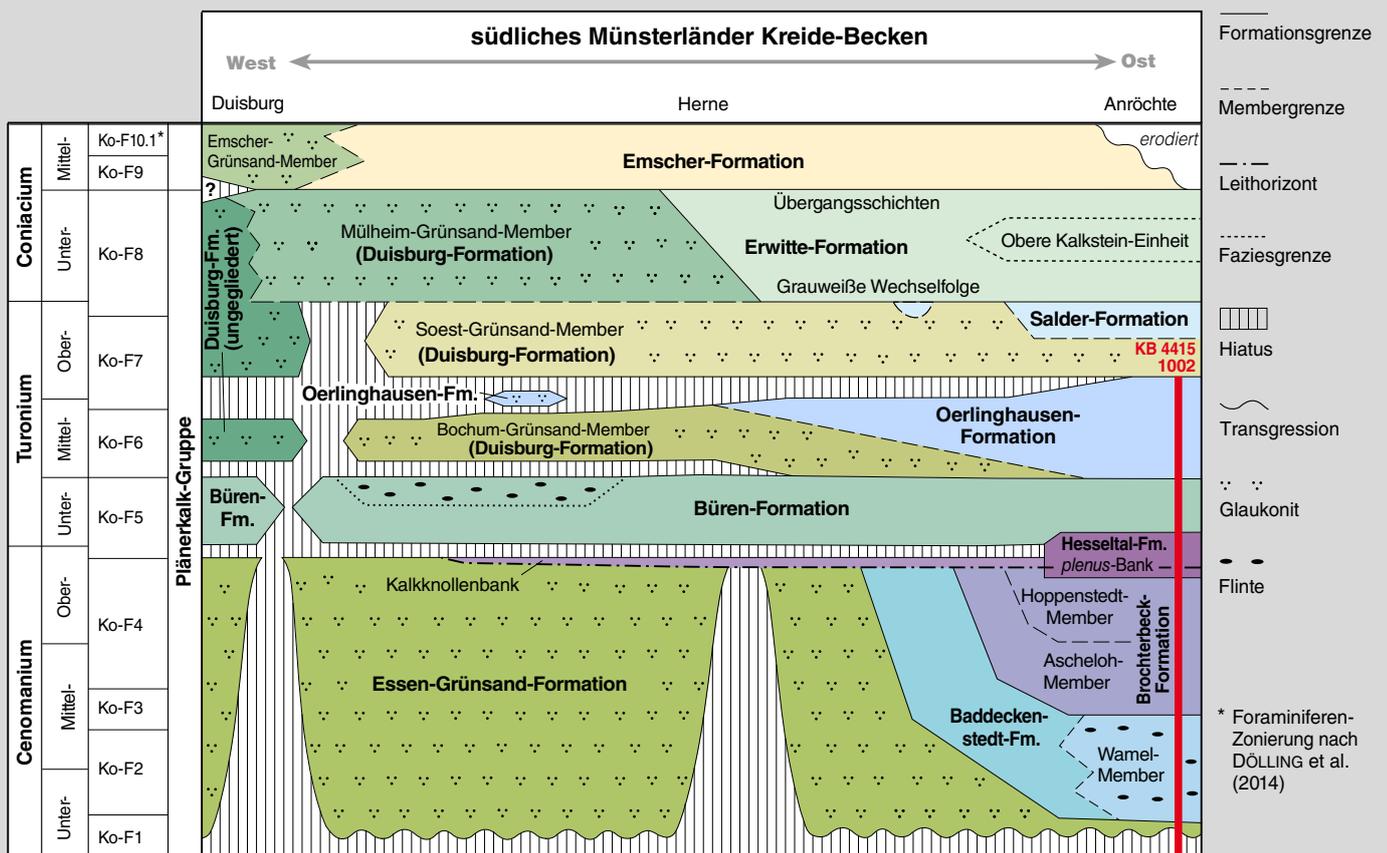
## 3.1 Schichtenfolge

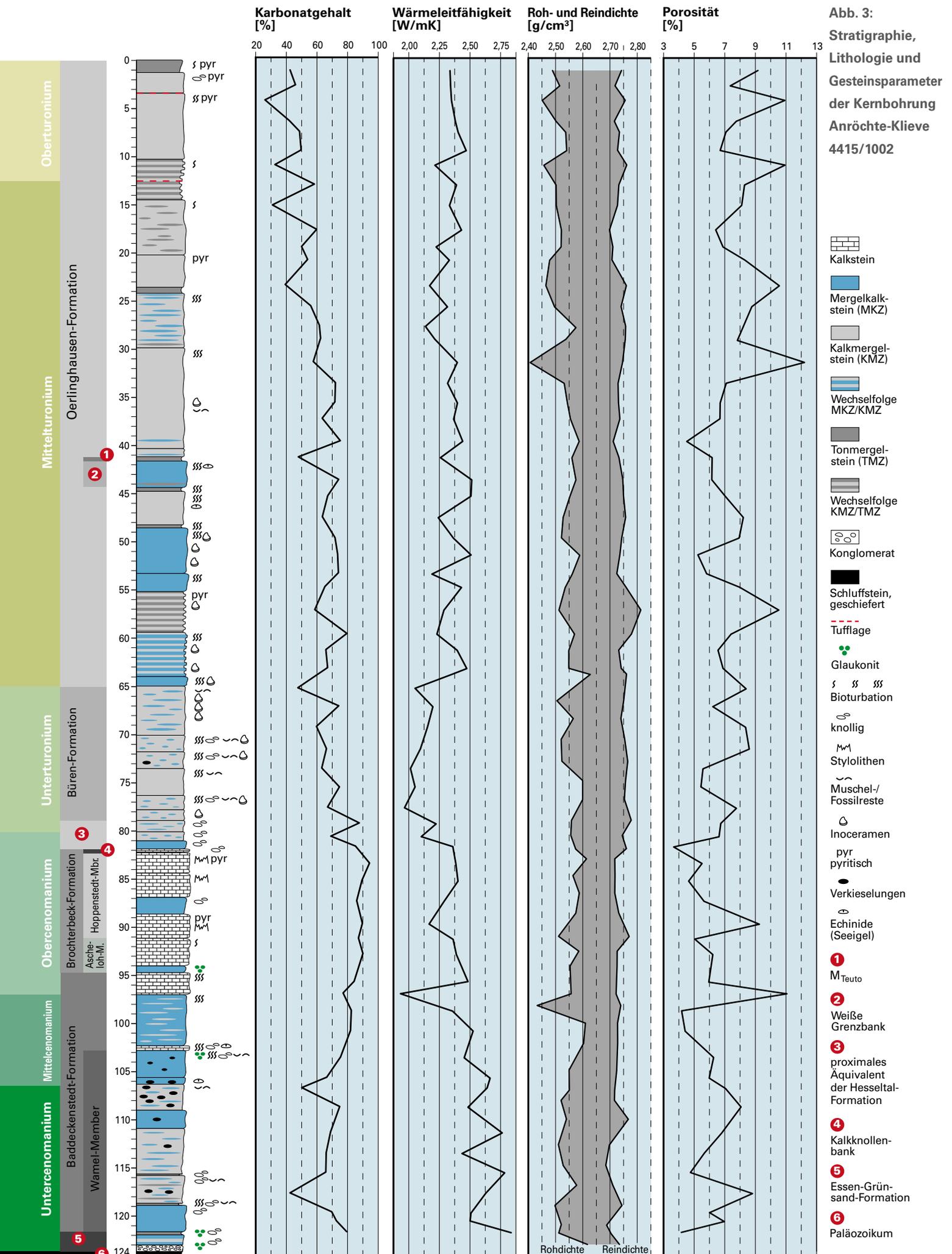
Die oberkreidezeitliche Schichtenfolge der Kernbohrung Anröchte-Klieve 4415/1002 umfasst den Zeitabschnitt Cenomanium bis frühes Oberturonium mit folgenden lithostratigraphischen Einheiten: Essen-Grünsand-Formation, Baddeckenstedt-Formation (überwiegend in Lithofazies des Wamel-Members), Brochterbeck-Formation mit Ascheloh- und Hoppenstedt-Member, Hesseltal-Formation, Büren-Formation und Oerlinghausen-Formation (s. Abb. 2 u. 3).

Die Schichtenfolge beginnt in 123,7 m Tiefe mit einem 60 cm mächtigen, grau-grünen, überwiegend komponentengestützten, schwach glaukonitischen Basiskonglomerat der Essen-Grünsand-Formation, das diskordant und mit deutlich erosiver Basis auf schwach grünlichen, fossilereen paläozoischen Schluffsteinen unbekanntes Alters liegt. Die Korngröße der Gerölle nimmt von ca. 20 – 30 mm an der Basis auf ca. 2 – 10 mm zum Hangenden hin ab. Die zumeist kantengerundeten Gerölle bestehen aus bräunlich grauem Kalkmergelstein, weißem Mergelkalkstein, hellgrünem und ockergelbem Schluffstein, Quarz, Milchquarz und vereinzelt rotem Kalkstein. Die Matrix besteht aus einem dunkelgrün-grauen, glaukonitischen, stark feinsandigen Kalkmergelstein bis schluffig-tonigem Sandmergelstein.

Das Basiskonglomerat wird überlagert von einer 1,5 m mächtigen Wechselfolge aus dunkelgrauem, schwach glaukonitischem, flaserig-mergeligem Ton- bis Kalkmergelstein und hellgrauem Mergelkalkstein, die noch der Essen-Grünsand-Formation zugerechnet wird.

Abb. 2:  
Lithostratigraphie  
der tieferen  
Oberkreide und  
erbohrte Schichten-  
folge (roter Balken)  
in der Kernbohrung  
Anröchte-Klieve  
4415/1002; verändert  
nach DÖLLING et al.  
(2014, 2018)





Bei 121,6 m setzen hellgraue, gebankte, flaserige Mergelkalksteine und Kalkmergelsteine der Baddeckenstedt-Formation ein, die stellenweise schwach arenitisch sind. Dazwischen treten häufig millimeterdünne, dunkelgraue bis graue Ton- bis Kalkmergelsteinlagen auf. Zwischen 103,5 und 121,6 m Bohrtiefe kommen vereinzelt unregelmäßige, knollige Verkieselungen vor, die charakteristisch für das Wamel-Member der Baddeckenstedt-Formation sind.

Bei 94,7 m beginnen – mit erosiver Basis – weißgraue, gebankte, flaserige Kalksteine der Brochterbeck-Formation (Ascheloh-Member). Die Kalksteine weisen dünne, dunkelgraue Tonmergelsteinlagen auf und es sind kleine, mit Pyrit verfüllte Grabgänge erkennbar. Bei 91,10 m setzen grauweiße, stylolithische Kalksteine ein, die für das Hoppenstedt-Member typisch sind. Eine dunkelgraue Tonmergelsteinbank bei 82,18 – 82,25 m markiert den sogenannten Fazieswechsel am Top der Kalksteinserie. Die bis 81,85 m reichende Kalkknollenbank – weißgraue, knollig-wellige Kalksteine mit hellgrauen Kalkmergelstein-Zwischenlagen – ist das letzte Schichtglied der Brochterbeck-Formation und ein proximales Äquivalent der sogenannten *plenus*-Bank (HISS 1989: 50; WILMSEN & NIEBUHR & HISS 2005).

Es folgt eine 2,4 m mächtige Wechselfolge aus grauen, knolligen Mergelkalksteinen und grünlich grauen, leicht flaserigen Kalkmergelsteinen, die bei 79,45 m mit einer deutlichen Mergelkalksteinbank endet. Dieser Schichtenabschnitt kann als proximales Äquivalent der Schwarzschieferfazies der Hesseltal-Formation angesehen werden.

Darüber stehen bis 64,95 m Tiefe graue, stellenweise schwach grünliche, bioturbate Kalkmergelsteine der Büren-Formation an. Sie sind z. T. flaserig und reich an Resten von *Mytiloides M. labiatus*, einer inoceramiden Muschelart, die das Unterturonium charakterisiert.

Hellgraue, gebankte Mergelkalksteine der Oerlinghausen-Formation bilden den Abschluss des Profils. Zwei lithologische Markerhorizonte, die Weiße Grenzbank, ein grauweißer Mergelkalksteinhorizont zwischen 41,55 und 44,3 m, sowie die darüberliegende dunkelgraue Tonmergellage  $M_{\text{Teuto}}$  bei 41,1 – 41,55 m lassen sich in weiten Teilen des südöstlichen Münsterländer Kreidebeckens nachweisen (vgl. RICHARDT & WILMSEN 2012; B. DÖLLING & M. DÖLLING & HISS 2014; WILMSEN et al. eingereicht). Die Oerlinghausen-Formation reicht bis in das untere Oberturonium, an die Basis des Soest-Grünsand-Members der Duisburg-Formation, hinauf.

## 3.2 Karbonatgehalte

Die Karbonatgehalte ( $\text{CaCO}_3$ ) des Gesamtprofils schwanken zwischen 27,4 % bei 4,39 – 4,40 m und 94,5 % bei 83,69 – 83,70 m (s. Tab. i. Anh.). Innerhalb der Oerlinghausen-Formation steigen die Karbonatgehalte zur Basis hin an (s. Abb. 3): Bis ca. 25 m Tiefe sind Tonmergelsteine vorherrschend, darunter überwiegen Kalkmergelsteine. Für die Weiße Grenzbank wurde bei 43,84 – 43,85 m ein Karbonatgehalt von 75,60 % gemessen. Die Tonmergelsteinlage  $M_{\text{Teuto}}$  weist bei 41,51 – 41,52 m einen Karbonatgehalt von 49,30 % auf und liegt somit bereits im Grenzbereich zu Kalkmergelstein. Innerhalb der Büren-Formation sind bei Karbonatgehalten zwischen 59,9 und 74,9 % Kalkmergelsteine vorherrschend. Lediglich eine Probe bei 65,51 – 65,52 m liegt mit 47,7 %  $\text{CaCO}_3$  im Grenzbereich von Ton-

zu Kalkmergelstein. Für die Kalkbank am oberen Ende der Hesseltal-Formation wurde bei 79,55 – 79,56 m ein Karbonatgehalt von 87,9 % (Mergelkalkstein) gemessen. Mit Werten zwischen 85,4 und 94,5 % (Mergelkalkstein bis Kalkstein) weist die Brochterbeck-Formation die höchsten Karbonatgehalte der gesamten Schichtenfolge auf. Bei den Gesteinen der Baddeckenstedt-Formation schwanken die Karbonatgehalte zwischen 42,7 und 84,5 %. Im höheren Teil der Formation liegen die Werte stets über 75 % CaCO<sub>3</sub>, während die Werte ab ca. 106 m Tiefe unter 75 % sinken. In diesem Schichtenabschnitt kommen lokal Verkieselungen vor; auch deshalb sind die Karbonatgehalte hier niedriger.

## 3.3 Wärmeleitfähigkeiten

### 3.3.1 Wärmeleitfähigkeiten der getrockneten Gesteinsproben

Die Werte für die Wärmeleitfähigkeiten der getrockneten Gesteinsproben schwanken im gesamten Bohrprofil zwischen 1,935 und 2,836 W/mK (s. Abb. 3 u. Tab. i. Anh.). Insgesamt schwanken die Wärmeleitfähigkeiten innerhalb der von gebankten Kalkmergelsteinen dominierten Oerlinghausen-Formation zwischen 2,189 und 2,571 W/mK und liegen durchschnittlich bei 2,347 W/mK (s. Tab. 1). Für die Weiße Grenzbank wurde mit 2,571 W/mK die höchste Wärmeleitfähigkeit innerhalb der Oerlinghausen-Formation gemessen. Die Tonmergelsteinlage M<sub>teuto</sub> weist eine Wärmeleitfähigkeit von 2,259 W/mK auf. In der Büren-Formation, in der feingeschichtete Kalkmergelsteine vorherrschen, liegen die Werte für die Wärmeleitfähigkeiten mit 1,965 – 2,198 W/mK und einem Durchschnittswert von 2,076 W/mK etwas niedriger als in den gebankten Kalkmergelsteinen der Oerlinghausen-Formation. Die Kalkbank am oberen Ende der Hesseltal-Formation besitzt dagegen mit 2,224 W/mK eine etwas höhere Wärmeleitfähigkeit. Die aus Kalksteinen und Mergelkalksteinen bestehende Brochterbeck-Formation weist mit Werten zwischen 2,162 und 2,402 W/mK und einem Durchschnitt von 2,336 W/mK erneut etwas höhere Wärmeleitfähigkeiten auf. Mit die höchsten Wärmeleitfähigkeiten wurden in der von Mergelkalksteinen dominierten Baddeckenstedt-Formation gemessen. Bis auf eine Ausnahme (1,935 W/mK bei 97,17 – 97,26 m) schwanken die Werte hier zwischen 2,363 und 2,784 W/mK und liegen im Durchschnitt bei 2,513 W/mK. Die glaukonitischen Mergelkalksteine der Essen-Grünsand-Formation (eine untersuchte Probe) erreichen schließlich 2,836 W/mK.

**Tabelle 1:**

**Durchschnittliche Wärmeleitfähigkeit [W/mK] der wesentlichen lithostratigraphischen Einheiten (erbohrte Mächtigkeit > 10 m)**

Lithostratigraphische Einheit	Ø Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
Oerlinghausen-Formation	2,347
Büren-Formation	2,076
Brochterbeck-Formation	2,336
Baddeckenstedt-Formation	2,513

### 3.3.2 Wärmeleitfähigkeiten der wassergesättigten Gesteinsproben

An 15 ausgewählten Gesteinsproben wurde die Wärmeleitfähigkeit auch im wassergesättigten Zustand ermittelt, um den natürlichen, grundwassererfüllten Raum zu simulieren. Die Werte schwanken hier zwischen 2,351 und 2,666 W/mK. Im direkten Vergleich liegen die Werte bei identischen Gesteinsproben im wassergesättigten Zustand um 0,081 – 0,491 W/mK höher als im getrockneten Zustand. Die gebankten Kalkmergelsteine der Oerlinghausen-Formation besitzen im wassergesättigten Zustand Wärmeleitfähigkeiten zwischen 2,514 und 2,680 W/mK. Die Werte liegen innerhalb eines sehr geringen Intervalls von nur 0,166 W/mK und der Durchschnittswert beträgt 2,590 W/mK. Lediglich die Tonmergelsteinlage  $M_{\text{Teuto}}$  weist mit 2,351 eine geringere Wärmeleitfähigkeit auf. Die beiden Proben aus der Büren-Formation spiegeln mit 2,317 und 2,358 W/mK eine ähnliche Größenordnung wider. Zwei Proben aus der Brochterbeck-Formation besitzen demgegenüber erneut höhere Wärmeleitfähigkeiten von 2,696 W/mK (Kalknollenbank) und 2,475 W/mK. Die höchsten Wärmeleitfähigkeiten wurden mit bis zu 2,754 W/mK an den Kalkmergelsteinproben der Baddeckenstedt-Formation gemessen. Hier liegt der Durchschnittswert bei 2,721 W/mK.

## 3.4 Rohdichte, Reindichte und Porosität

Im gesamten Profil liegen die Messwerte für die Rohdichte zwischen 2,4064 und 2,6172 g/cm<sup>3</sup> (s. Abb. 3). Die Reindichte schwankt im Gesamtprofil zwischen 2,6845 und 2,8132 g/cm<sup>3</sup>. Die ermittelten Porositäten schwanken zwischen 4,30 und 12,37 %. Hohe Porositätswerte (> 10 %) wurden überwiegend an Ton- und Kalkmergelsteinproben der Oerlinghausen-Formation ermittelt (5 Proben). Geringe Porositätswerte sind dagegen in den Mergelkalksteinen der Baddeckenstedt-Formation und der Essen-Grünsand-Formation häufig (vgl. Abb. 3 u. Tab. i. Anh.). Die Durchschnittswerte der wichtigsten erbohrten lithostratigraphischen Einheiten (> 10 m Mächtigkeit) sind in Tabelle 2 dargestellt.

**Tabelle 2:**

**Durchschnittliche Werte für Rohdichte, Reindichte und Porosität der wichtigsten lithostratigraphischen Einheiten (erbohrte Mächtigkeit > 10 m)**

Lithostratigraphische Einheit	Ø Rohdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Ø Reindichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Ø Porosität [%]
Oerlinghausen-Formation	2,52	2,74	7,86
Büren-Formation	2,55	2,76	7,34
Brochterbeck-Formation	2,57	2,73	5,87
Baddeckenstedt-Formation	2,54	2,72	6,72

# 4 Diskussion

## 4.1 Wärmeleitfähigkeiten der getrockneten Proben in Abhängigkeit von Karbonatgehalt (Lithologie), Dichte und Porosität

In der untersuchten Gesteinsabfolge nehmen die Wärmeleitfähigkeiten mit zunehmendem Karbonatgehalt der Gesteine leicht zu (s. Tab. 3). So liegt die Wärmeleitfähigkeit der gemessenen Tonmergelsteine im arithmetischen Mittel bei 2,308 W/mK, während sie bei Kalksteinen durchschnittlich 2,390 W/mK beträgt. Der Karbonatgehalt nimmt auch Einfluss auf die Rohdichte: Sie steigt von durchschnittlich 2,4953 g/cm<sup>3</sup> bei Tonmergelsteinen auf 2,5676 g/cm<sup>3</sup> bei Mergelkalksteinen an. Die gemessenen reinen Kalksteine besitzen mit 2,5578 g/cm<sup>3</sup> wiederum eine minimal geringere durchschnittliche Rohdichte. Die durchschnittliche Rohdichte von Gesteinen mit einem Karbonatgehalt größer 75 % nimmt daher bei weiter steigendem Karbonatgehalt nicht mehr zu, sondern bleibt gleich oder nimmt erneut geringfügig ab. Bei der mittleren Reindichte ist eine umgekehrte Abhängigkeit zu beobachten. Sie nimmt bei steigendem Karbonatgehalt zwar leicht, jedoch stetig ab. Beträgt die durchschnittliche Reindichte bei den untersuchten Tonmergelsteinen noch 2,7411 g/cm<sup>3</sup>, liegt sie bei Kalksteinen schließlich bei 2,7219 g/cm<sup>3</sup> (s. Tab. 3). Die aus den gemessenen Roh- und Reindichten berechneten Porositäten zeigen wiederum eine deutliche Abnahme der Porosität bei steigendem Karbonatgehalt. Beträgt die durchschnittliche Porosität noch 8,96 % bei den untersuchten Tonmergelsteinen, so sinkt sie auf einen Durchschnittswert von 6,03 % für die untersuchten Kalksteine (s. Tab. 3).

**Tabelle 3:**

**Durchschnittliche Wärmeleitfähigkeiten, Karbonatgehalte, Roh-, Reindichten und Porositäten bezogen auf die verschiedenen Gesteinstypen in der Bohrung Anröchte-Klieve 4415/1002**

Gesteinstyp DIN 22 015 (1993)	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	CaCO <sub>3</sub> [%]	Rohdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Reindichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Porosität [%]
Mergelstein	2,353	65,6	2,5374	2,7371	7,29
Tonmergelstein	2,308	40,9	2,4953	2,7411	8,96
Kalkmergelstein	2,353	64,4	2,5338	2,7363	7,39
Mergelkalkstein	2,380	81,5	2,5676	2,7364	6,16
Kalkstein	2,390	92,4	2,5578	2,7219	6,03

**Tabelle 4:**

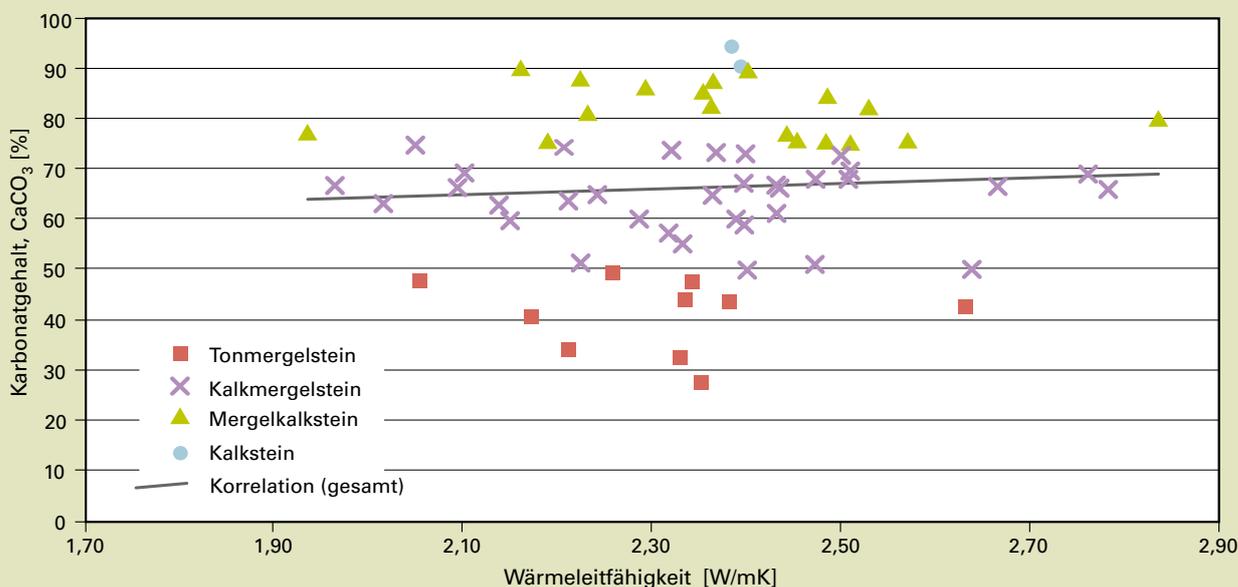
**Wärmeleitfähigkeiten und Reindichten nach VDI 4640 (2010)**

Gesteinstyp	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]		Reindichte [g/cm <sup>3</sup> ]
	Spektrum	empfohlener Rechenwert	Spektrum
Mergelstein	1,8 – 2,9	2,3	2,3 – 2,6
Kalkstein	2,0 – 3,9	2,7	2,4 – 2,7

Verglichen mit den Angaben in der VDI 4640 (s. Tab. 4) liegt der Mittelwert für die Wärmeleitfähigkeit der Mergelsteine in der untersuchten Bohrung mit 2,353 W/mK über dem empfohlenen Rechenwert und im mittleren Bereich des angegebenen Spektrums. Der Mittelwert von 2,390 W/mK für die untersuchten Kalksteine befindet sich ebenso innerhalb des Spektrums, jedoch unter dem empfohlenen Rechenwert.

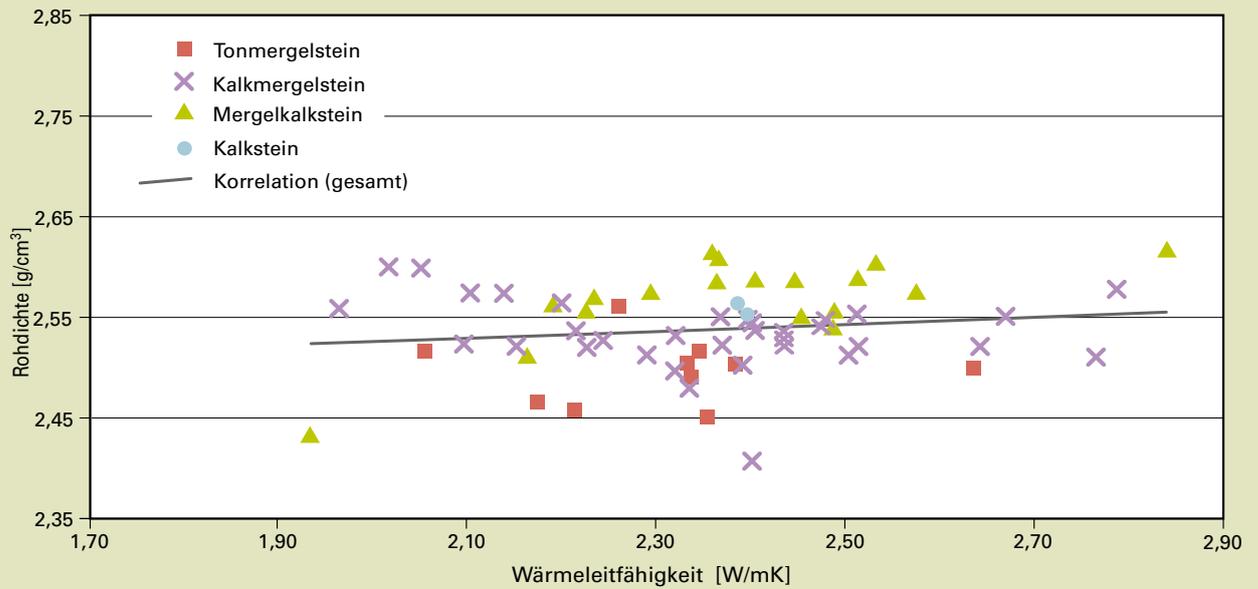
Die Reindichten der Mergelsteinproben liegen mit durchschnittlich 2,737 g/cm<sup>3</sup> oberhalb der Angaben in der VDI 4640. Die gemessenen Kalkstein-Reindichten liegen im Mittel bei 2,722 g/cm<sup>3</sup> und somit ebenfalls leicht oberhalb der VDI-Angaben (vgl. Tab. 3 u. 4).

Stellt man der an den Gesteinsproben gemessenen Wärmeleitfähigkeit den Karbonatgehalt gegenüber, so zeigt sich eine sehr starke Streuung der Wertepaare, d. h. die Wärmeleitfähigkeit ist nur in sehr geringem Maß vom Karbonatgehalt eines Gesteins abhängig (s. Abb. 4).



**Abb. 4:**  
Korrelation von Wärmeleitfähigkeit und Karbonatgehalt für alle Proben

Abb. 5:  
Korrelation  
von Wärme-  
leitfähigkeit  
und Roh-  
dichte für  
alle Proben



Insgesamt zeigt sich – wenngleich sehr undeutlich – bei einer Zunahme des Karbonatgehalts ein geringer Anstieg der Wärmeleitfähigkeit. Diese Beobachtung deckt sich mit den Werten aus Tabelle 3.

Die Wärmeleitfähigkeit zeigt in Abhängigkeit von der Rohdichte ein sehr unterschiedliches Bild. Während Tonmergelstein und Kalkstein keine Tendenz erkennen lassen, zeigen Kalkmergelstein und Mergelkalkstein entgegengesetzte Korrelationen in Bezug auf die Rohdichte (s. Abb. 5).

Bei Betrachtung der Wärmeleitfähigkeit in Bezug auf die Reindichte zeigt sich, dass die Wärmeleitfähigkeit bei sinkender Reindichte leicht ansteigt (s. Abb. 6). Sinkt die Reindichte um etwa  $0,06 \text{ g/cm}^3$ , so steigt die Wärmeleitfähigkeit um  $1 \text{ W/mK}$ .

Abb. 6:  
Korrelation  
von Wärme-  
leitfähigkeit  
und Rein-  
dichte für  
alle Proben

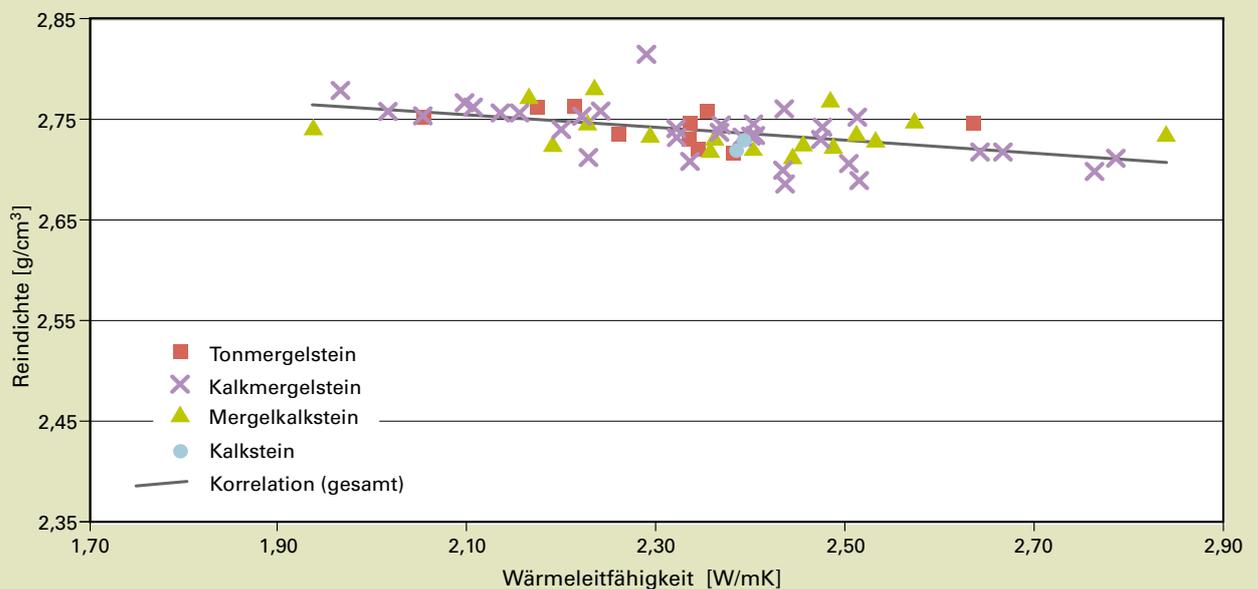
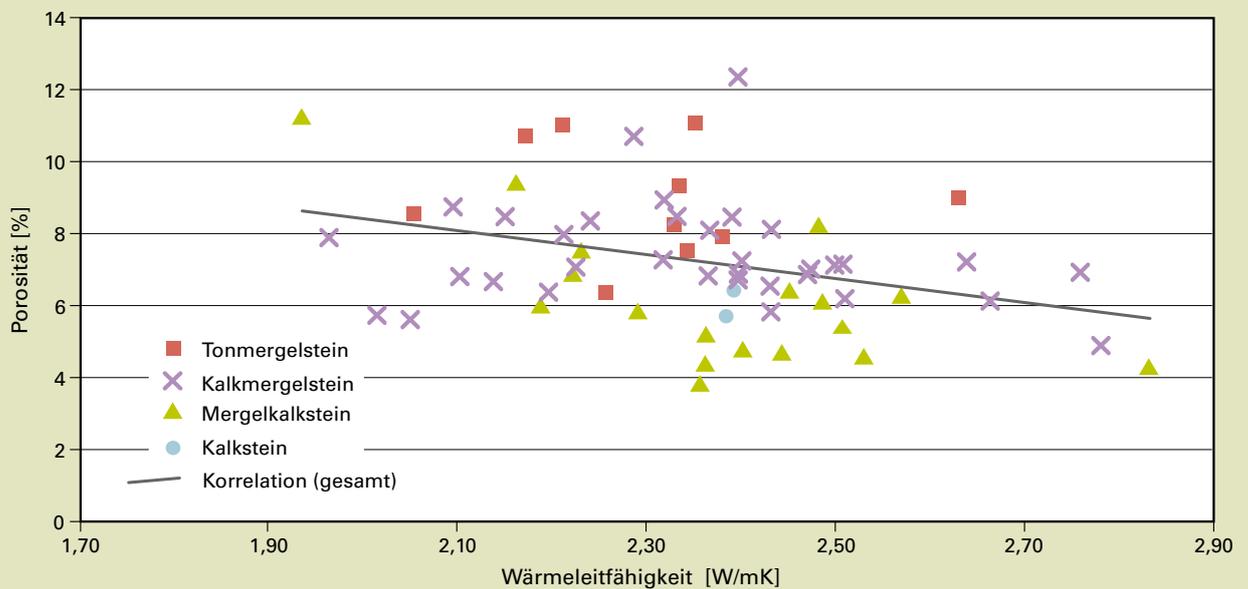


Abb. 7:  
Korrelation  
von Wärme-  
leitfähigkeit  
und Porosität  
für alle  
Proben



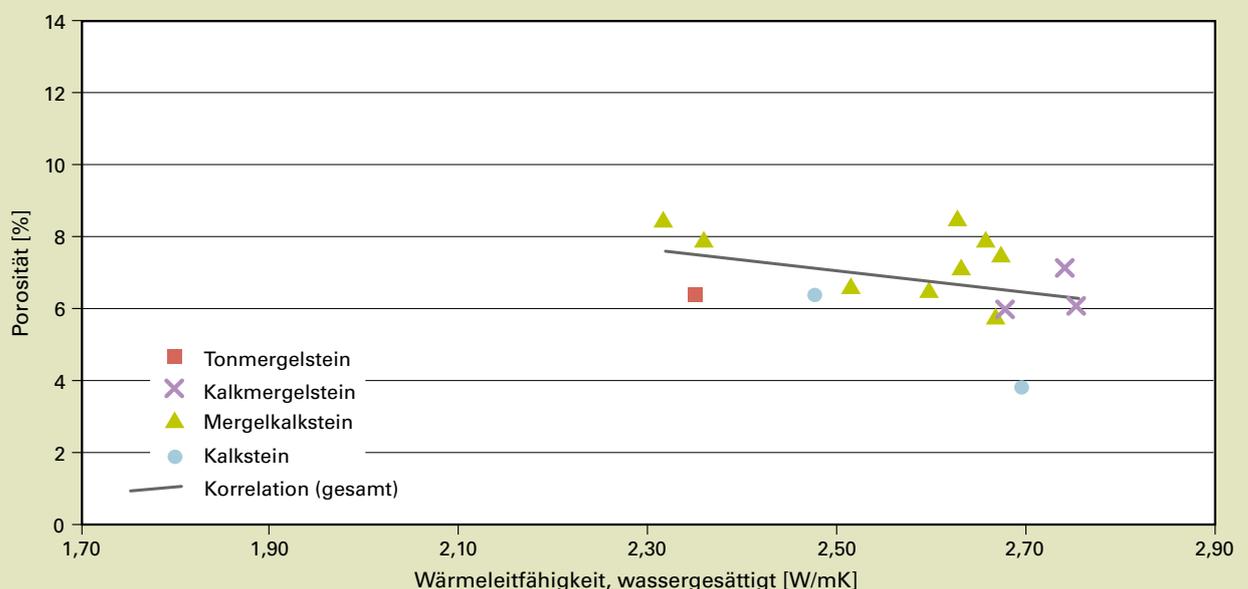
Die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Porosität zeigt insgesamt stark streuende Werte (s. Abb. 7).

Es existiert jedoch ein schwacher Trend hin zu steigender Wärmeleitfähigkeit bei abnehmender Porosität: Bei einer Abnahme der Porosität um ca. 3 % steigt die Wärmeleitfähigkeit um ca. 1 W/mK. Dieser Trend ist bei allen Gesteinstypen erkennbar – am deutlichsten jedoch bei den Mergelkalksteinen. Für die wenigen untersuchten Kalksteine ist keine Tendenz erkennbar. Dies ist vermutlich auf die zu geringe Anzahl an Messwerten zurückzuführen.

## 4.2 Wärmeleitfähigkeiten der wassergesättigten Proben in Abhängigkeit von der Porosität

Die Wärmeleitfähigkeiten der wassergesättigten Proben sind stets höher als die der getrockneten Proben (vgl. Kap. 3.3.2 u. Tab. i. Anh.), da Wasser einen besseren Leiter für den Wärmetransport darstellt als Luft, die in den getrockneten Proben den Porenraum füllt. Auch bei sinkender Porosität zeigen die wenigen Messwerte an wassergesättigten Proben eine Zunahme der Wärmeleitfähigkeit (s. Abb. 8).

Abb. 8:  
Korrelation  
von Wärme-  
leitfähigkeit  
(wasser-  
gesättigt)  
und Porosität  
für alle  
Proben



# 5 Schlussfolgerung

Die kreidezeitliche Schichtenfolge der Kernbohrung Anröchte-Klieve 4415/1002 ist charakteristisch für die Schichtenfolge im südöstlichen Münsterländer Kreide-Becken. Die ermittelten Durchschnittswerte für die Wärmeleitfähigkeiten der wichtigsten lithostratigraphischen Einheiten (Baddeckenstedt-Formation: 2,5 W/mK, Brochterbeck-Formation: 2,3 W/mK, Büren-Formation: 2,1 W/mK, Oerlinghausen-Formation: 2,3 W/mK) sind somit repräsentativ für diese Region. Da die Gesteine im Gesamtdurchschnitt Wärmeleitfähigkeiten deutlich größer 2 W/mK aufweisen, sind sie für eine oberflächennahe geothermische Energienutzung gut geeignet.

In Abhängigkeit von den Parametern Karbonatgehalt, Dichte und Porosität ergeben sich folgende Gesetzmäßigkeiten für die untersuchte Schichtenfolge:

1. Es besteht eine Abhängigkeit der Gesteinsparameter Dichte und Porosität vom Karbonatgehalt:
  - a. Je karbonatreicher ein Gestein ist, desto größer ist seine Rohdichte. Der Grenzwert liegt hier bei ca. 75 %  $\text{CaCO}_3$ . Höhere Karbonatwerte erhöhen die Rohdichte nicht weiter. Möglicherweise bewirken Karbonatgehalte größer 90 % sogar ein geringfügiges Absinken der Rohdichte.
  - b. Bei zunehmendem Karbonatgehalt sinkt die Reindichte geringfügig.
  - c. Bei steigendem Karbonatgehalt sinkt die Porosität des Gesteins.
  
2. Die Wärmeleitfähigkeit steigt, wenn
  - a. der Karbonatgehalt steigt.
  - b. die Reindichte abnimmt.
  - c. die Porosität abnimmt.
  
3. Zwischen Wärmeleitfähigkeit und Rohdichte besteht kein direkter Zusammenhang.

# 6 Danksagung

Unser Dank gilt Herrn Wilhelm Rinsche jun. (Natursteinwerk Rinsche GmbH) für die Erlaubnis zu dieser Bohrung innerhalb des firmeneigenen Steinbruchgeländes, Heiko Westermann für die Betreuung der Bohrarbeiten und den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Labore, insbesondere Angelika Olders und Gabriele Arnold, für die Durchführung der Analysen und Messungen. Wir danken Ingo Schäfer für anregende Diskussionen und Manfred Dölling für die kritische Durchsicht des Manuskripts. Alle genannten Personen sind, falls nicht anders angegeben, Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Geologischen Dienstes Nordrhein-Westfalen.

# 7 Literatur

- Bundesverband Geothermie (2018): <http://www.geothermie.de/wissenswelt/geothermie/einstieg-in-die-geothermie.html>  
– Abfragedatum: 26.01.2018.
- DIN EN ISO 10693 (2014): Bodenbeschaffenheit – Bestimmung des Carbonatgehaltes – Volumetrisches Verfahren (ISO 10693: 1995); Berlin (Beuth). – [Deutsche Fassung]
- DIN 22015 (1993): Rohstoffuntersuchungen im Steinkohlenbergbau; Makroskopische Ansprache und Aufnahme der Gesteine des Deckgebirges. – Punkt 4.2.2.1: Mischgesteine aus Sand, Ton/Schluff und Kalk; Berlin (Beuth).
- DÖLLING, B.; DÖLLING, M.; HISS, M. (2014): The Upper Cretaceous sedimentary rocks of the southern Münsterland (Northwest Germany) revisited – new correlations of borehole lithostratigraphical, biostratigraphical and natural gamma radiation (GR) log data. – Z. dt. geol. Ges. **165** (4): 521 – 545; Stuttgart.
- DÖLLING, B.; DÖLLING, M.; HISS, M.; BERENSMEIER, M.; PÜTTMANN, T. (2018): Upper Cretaceous shallow-marine deposits of the southwestern Münsterland (northwest Germany) influenced by synsedimentary tectonics. – Cret. Res., **87**: 261 – 276; Amsterdam. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2017.05.002>.
- DROZDZEWSKI, G.; WREDE, V. (1994): Faltung und Bruchtektonik – Analyse der Tektonik im Subvariszikum. – Fortschr. Geol. Rheinld. u. Westf., **38**: 7 – 187; Krefeld.
- Geologischer Dienst NRW [Hrsg.] (2016): Geologie und Boden in Nordrhein-Westfalen: 157 S., zahlr. Abb. u. Tab.; Krefeld.
- HISS, M. (1989), mit Beitr. von ERKWOH, F.-D.; JÄGER, B.; MICHEL, G.; VIETH-REDEMANN, A.: Erläuterungen zu Blatt **4417** Büren. – Geol. Kt. Nordrh.-Westf. <1 : 25 000>, Erl., 4417: 152 S., 15 Abb., 11 Tab., 1 Taf.; Krefeld.
- HISS, M. (1995): Kreide. – In: Geologie im Münsterland: 41 – 65, 11 Abb.; Krefeld (Geol. L.- Amt Nordrh.-Westf.).
- HISS, M.; MUTTERLOSE, J. (2010): Field trip E6: Cretaceous geosites of the eastern Ruhr Area and the southern Münsterland. – In: MÜGGE-BARTOLOVIĆ, V.; RÖHLING, H.-G.; WREDE, V. [Hrsg.]: Geotop 2010 – Geosites for the Public Paleontology and Conservation of Geosites. 14. Internationale Jahrestagung der Fachsektion GeoTop der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften and 6th International Symposium on Conservation of Geological Heritage, 29.05.2010 – 02.06.2010 in Hagen (Westf.), Germany. – Schr.-R. Dt. Ges. Geowiss., **66**: 168 – 183; Stuttgart.
- KALTSCHMITT, M.; HUENGES, E.; WOLFF, H. (1999): Energie aus Erdwärme: 265 S.; Stuttgart (Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie).
- RICHARDT, N.; WILMSEN, M. (2012): Lower Upper Cretaceous standard section of the southern Münsterland (NW Germany): carbon stable-isotopes and sequence stratigraphy. – Newsletter on Stratigraphy, **45** (1): 1 – 24; Stuttgart.
- ROSENFELD, U. (1978): Beitrag zur Paläogeographie des Mesozoikums in Westfalen. – N. Jb. Geol. u. Paläont., Abh., **156**: 132 – 155, 9 Abb.; Stuttgart.
- STOBER, I.; BUCHER, K. (2012): Geothermie: 287 S.; Berlin, Heidelberg (Springer).
- VDI-Richtlinie 4640 Blatt 1 (2010): Thermische Nutzung des Untergrunds; Berlin (Beuth).
- VOIGT, E. (1963): Über Randtröge von Schollenrändern und ihre Bedeutung im Gebiet der Mitteleuropäischen Senke und angrenzender Gebiete. – Z. dt. geol. Ges., **114**: 378 – 418, 15 Abb.; Hannover.
- WILMSEN, M.; NIEBUHR, B.; HISS, M. (2005): The Cenomanian of northern Germany: facies analysis of a transgressive biosedimentary system. – Facies, **51** (1 – 4): 242 – 263; Erlangen.
- WILMSEN, M.; DÖLLING, B.; HISS, M.; NIEBUHR, B. (2015): The Cenomanian – Lower Coniacian section at Klieve, southern Münsterland Cretaceous Basin, Germany: lithological succession, integrated stratigraphy and inter-basinal correlation. – Abstract Book of 31st IAS Meeting of Sedimentology, 22 – 25 June 2015: S. 583; Kraków. – [IAS Meeting of Sedimentology, 22 – 25 June 2015.]
- WILMSEN, M.; DÖLLING, B.; HISS, M.; NIEBUHR, B. (eingereicht): The lower Upper Cretaceous of the southeastern Münsterland Cretaceous Basin, Germany: facies, integrated stratigraphy and inter-basinal correlation. – Facies; Erlangen.
- ZIEGLER, P. A. (1982): Geological Atlas of Western and Central Europe, 1. Aufl. – Text-Bd.: 130 S., 29 Abb.; Taf.-Bd.: 40 Taf.; Amsterdam (Elsevier).

## Analyse-Ergebnisse

Probe	Gestein	Entnahmetiefe [m]		WLF trocken [W/mK]	WLF gesättigt [W/mK]	Rohdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Reindichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Porosität [%]	Entnahmetiefe [m]		Gehalt CO <sub>3</sub> [%]	Gehalt CaCO <sub>3</sub> [%]	Formation
		von	bis						von	bis			
1	TMZ	1,30	1,40	2,336		2,4888	2,7442	9,31	1,30	1,31	26,3	43,9	Oerlinghausen-Formation
2	TMZ	2,87	3,00	2,343	2,672	2,5145	2,7185	7,50	2,86	2,87	28,4	47,4	
3	TMZ	4,40	4,61	2,353		2,4509	2,7561	11,07	4,39	4,40	16,4	27,4	
4	TMZ	6,58	6,66	2,382	2,657	2,5016	2,7160	7,89	6,57	6,58	26,0	43,4	
5	KMZ	7,71	7,81	2,403		2,5370	2,7348	7,23	7,70	7,71	30,0	50,0	
6	KMZ	9,44	9,61	2,472		2,5410	2,7280	6,85	9,61	9,62	30,6	51,1	
7	TMZ	11,13	11,23	2,213		2,4568	2,7620	11,05	11,12	11,13	20,4	34,0	
8	KMZ	13,19	13,34	2,391		2,5021	2,7326	8,44	13,18	13,19	35,9	59,8	
9	TMZ	15,38	15,47	2,331		2,5029	2,7277	8,24	15,37	15,38	19,3	32,3	
10	KMZ	17,85	18,00	2,433	2,593	2,5220	2,6984	6,54	17,86	17,87	36,8	61,3	
11	KMZ	19,63	19,76	2,225		2,5203	2,7105	7,02	19,63	19,64	30,8	51,3	
12	KMZ	21,01	21,11	2,333	2,627	2,4781	2,7072	8,46	21,00	21,01	33,2	55,3	
13	TMZ	23,64	23,79	2,173		2,4646	2,7599	10,70	23,64	23,65	24,4	40,6	
14	KMZ	25,84	25,98	2,319		2,4964	2,7404	8,90	25,83	25,84	34,4	57,4	
15	KMZ	27,74	27,88	2,138	2,514	2,5742	2,7577	6,65	27,88	27,89	37,7	63,0	
16	KMZ	29,22	29,32	2,213		2,5373	2,7569	7,97	29,21	29,22	38,2	63,8	
17	KMZ	31,64	31,76	2,399		2,4064	2,7462	12,37	31,63	31,64	35,4	59,0	
18	KMZ	33,80	34,00	2,319		2,5316	2,7296	7,25	33,80	33,81	44,1	73,5	
19	KMZ	35,85	36,00	2,399		2,5439	2,7312	6,86	35,84	35,85	43,8	73,1	
20	KMZ	37,40	37,52	2,366		2,5501	2,7365	6,81	37,51	37,52	38,9	64,8	
21	MKZ	39,85	40,00	2,444		2,5864	2,7129	4,66	39,85	39,86	46,0	76,7	
22	TMZ	41,43	41,51	2,259	2,351	2,5599	2,7329	6,33	41,51	41,52	29,6	49,3	
23	MKZ	43,85	43,97	2,571		2,5746	2,7475	6,29	43,84	43,85	45,3	75,6	
24	KMZ	45,37	45,52	2,510	2,629	2,5529	2,7500	7,17	45,52	45,53	41,1	68,5	
25	KMZ	47,73	47,88	2,242		2,5273	2,7576	8,35	47,73	47,74	38,9	64,9	
26	KMZ	49,89	50,00	2,368		2,5215	2,7431	8,08	49,88	49,89	43,9	73,2	
27	MKZ	51,52	51,62	2,510		2,5884	2,7361	5,40	51,62	51,63	44,9	75,0	
28	MKZ	53,60	53,73	2,189	2,680	2,5617	2,7243	5,97	53,60	53,61	45,2	75,4	
29	KMZ	55,00	55,12	2,434		2,5356	2,7593	8,11	55,00	55,01	39,9	66,6	
30	KMZ	57,34	57,45	2,288		2,5127	2,8132	10,68	57,34	57,35	36,1	60,1	
31	MKZ	59,87	60,00	2,232		2,5696	2,7791	7,54	59,86	59,87	48,6	81,0	
32	KMZ	61,43	61,53	2,398		2,5488	2,7321	6,71	61,52	61,53	40,3	67,2	
33	KMZ	63,28	63,42	2,475		2,5486	2,7412	7,03	63,41	63,42	41,0	68,4	

## Anhang (Fortsetzung)

Probe	Gestein	Entnahmetiefe [m]		WLF trocken [W/mK]	WLF gesättigt [W/mK]	Rohdichte [g/cm³]	Reindichte [g/cm³]	Porosität [%]	Entnahmetiefe [m]		Gehalt CO <sub>3</sub> [%]	Gehalt CaCO <sub>3</sub> [%]	Formation
		von	bis						von	bis			
34	TMZ	65,52	65,63	2,055	2,317	2,5152	2,7497	8,53	65,51	65,52	28,6	47,7	Büren-Formation
35	KMZ	67,41	67,53	2,198		2,5651	2,7398	6,38	67,40	67,41	44,6	74,5	
36	KMZ	69,44	69,53	2,151		2,5205	2,7544	8,49	69,52	69,53	35,9	59,9	
37	KMZ	71,82	71,91	2,096		2,5237	2,7654	8,74	71,81	71,82	39,8	66,4	
38	KMZ	73,88	73,96	2,016		2,5995	2,7572	5,72	73,84	73,85	37,9	63,3	
39	KMZ	75,68	75,76	2,051		2,5994	2,7534	5,59	75,75	75,76	44,9	74,9	
40	KMZ	77,80	77,92	1,965	2,358	2,5587	2,7781	7,90	77,92	77,93	40,3	67,1	
41	MKZ	79,41	79,56	2,224		2,5562	2,7453	6,89	79,55	79,56	52,7	87,9	
42	KMZ	80,79	80,91	2,103		2,5737	2,7612	6,79	80,91	80,92	41,6	69,4	
43	MKZ	81,92	81,99	2,357	2,696	2,6135	2,7172	3,82	81,92	81,93	51,2	85,4	
44	KZ	83,57	83,70	2,385		2,5634	2,7181	5,69	83,69	83,70	56,7	94,5	
45	MKZ	85,50	85,66	2,402		2,5872	2,7177	4,80	85,49	85,50	53,8	89,7	
46	MKZ	87,44	87,61	2,293		2,5742	2,7327	5,80	87,61	87,62	51,7	86,3	
47	MKZ	89,80	89,97	2,162		2,5102	2,7705	9,40	89,97	89,98	53,9	89,9	
48	MKZ	91,53	91,71	2,362		2,5846	2,7261	5,19	91,52	91,53	52,3	87,3	
49	KZ	93,10	93,24	2,394	2,475	2,5521	2,7257	6,37	93,10	93,11	54,2	90,4	
50	MKZ	95,85	96,00	2,486		2,5562	2,7224	6,10	95,99	96,00	50,7	84,5	
51	MKZ	97,17	97,26	1,935		2,4331	2,7401	11,20	97,17	97,18	46,3	77,3	
52	MKZ	99,00	99,11	2,363		2,6095	2,7274	4,32	99,00	99,01	49,6	82,7	
53	MKZ	101,11	101,25	2,530		2,6036	2,7283	4,57	101,10	101,11	49,2	82,1	
54	MKZ	103,88	104,00	2,453		2,5497	2,7245	6,42	103,87	103,88	45,3	75,6	
55	KMZ	105,89	106,00	2,666	2,754	2,5507	2,7170	6,12	105,99	106,00	39,9	66,6	
56	KMZ	107,05	107,18	2,640		2,5206	2,7162	7,20	107,04	107,05	30,1	50,2	
57	MKZ	109,00	109,15	2,484		2,5404	2,7675	8,21	109,00	109,01	45,1	75,2	
58	KMZ	111,47	111,65	2,762		2,5104	2,6976	6,94	111,65	111,66	41,4	69,1	
59	KMZ	113,64	113,78	2,434	2,667	2,5282	2,6845	5,82	113,78	113,79	39,8	66,3	
60	KMZ	115,83	116,00	2,784		2,5776	2,7100	4,89	115,82	115,83	39,6	66,0	
61	TMZ	117,76	117,95	2,633		2,4980	2,7441	8,97	117,94	117,95	25,6	42,7	
62	KMZ	119,82	119,96	2,512		2,5211	2,6874	6,19	119,96	119,97	42,0	70,0	
63	KMZ	120,85	121,00	2,502	2,741	2,5120	2,7046	7,12	120,85	120,86	43,7	72,9	
64	MKZ	122,00	122,18	2,836		2,6172	2,7347	4,30	122,00	122,01	47,9	79,8	

Bedeutung der Ziffern in der rechten Spalte (Formation):

- 1 M<sub>Teuto</sub>
- 2 Weiße Grenzbank
- 3 proximales Äquivalent der Hesseltal-Formation
- 4 Kalkknollenbank
- 5 Essen-Grünsand-Formation