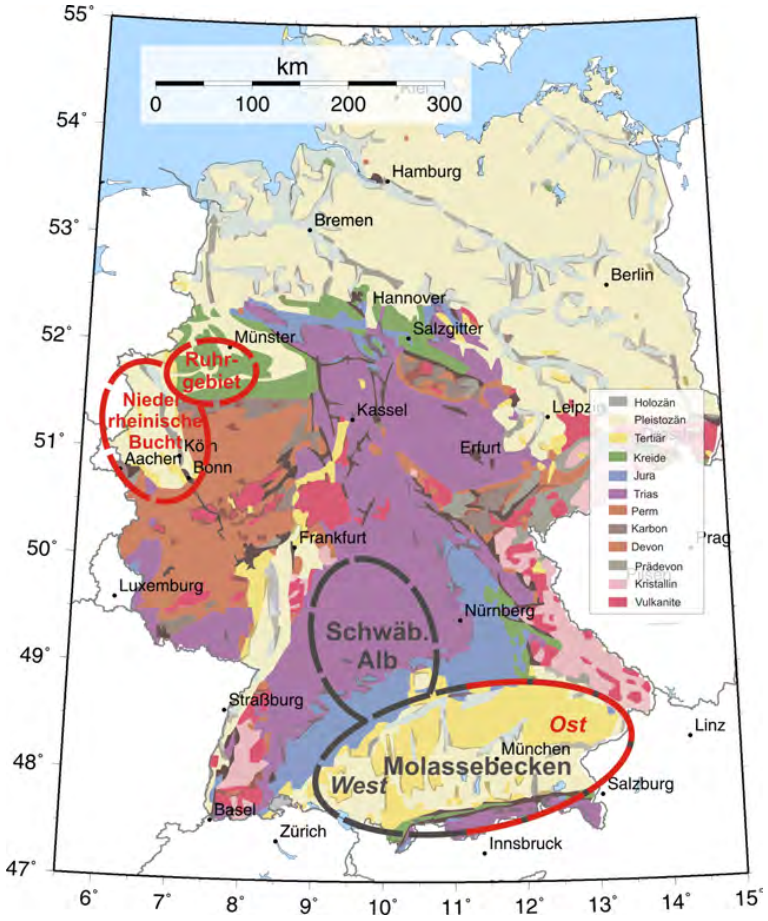
Erstellung statistisch abgesicherter thermischer und hydraulischer Gesteinseigenschaften für den flachen und tiefen Untergrund in Deutschland

Phase 2 – Westliches Nordrhein-Westfalen und bayerisches Molassebecken



BMU-Projekt FKZ 0327563
Abschlussbericht 01.09.2006 - 31.05.2009

RWTH AACHEN UNIVERSITY

E.ON Energy Research Center

APPLIED GEOPHYSICS AND GEOTHERMAL ENERGY

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit unter dem Förderkennzeichen 0327563 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Projektleiter:	Prof. Dr. C. Clauser (RWTH Aachen University)
Berichterstatter:	Dr. A. Koch (RWTH Aachen University)
Beiträge:	Dr. R. Jorand, Dipl.-Phys. Christian Vogt (RWTH Aachen University) Dr. J. Arnold, Dr. D. Mottaghy, Dr. R. Pechnig (Geophysica Beratungsgesellschaft mbH)

Koch, A., Jorand, R., Arnold, J., Pechnig, R., Mottaghy, D., Vogt, C., Clauser, C., Erstellung statistisch abgesicherter thermischer und hydraulischer Gesteinseigenschaften für den flachen und tiefen Untergrund in Deutschland (Phase 2 – Westliches Nordrhein-Westfalen und bayerisches Molassebecken), *Schlussbericht zum BMU-Projekt FKZ 0327563*, Lehrstuhl Applied Geophysics and Geothermal Energy, E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen University, Aachen 2009.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**
- 1.1 Hintergrund und Aufgabenstellung . . . 1
- 1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde . . . 2
- 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens . . . 3
- 1.4 Stand der Wissenschaft und Technik . . . 5
- 1.5 Zusammenarbeit mit Dritten . . . 6

2 Untersuchungsmethoden **8**
- 2.1 Labormessverfahren . . . 8
  - 2.1.1 Wärmeleitfähigkeit . . . 8
  - 2.1.2 Wärmeleitfähigkeit, Druck und Temperatur . . . 10
  - 2.1.3 Dichte und Porosität . . . 13
  - 2.1.4 Core-Logger . . . 14
  - 2.1.5 Wärmekapazität . . . 15
  - 2.1.6 Permeabilität . . . 16
  - 2.1.7 Halbach NMR-Messung . . . 17
- 2.2 Bohrlochgeophysikalische Methoden und Interpretationsverfahren . . . 22
  - 2.2.1 Vorgehensweise . . . 22
  - 2.2.2 Qualitätskontrolle bohrlochgeophysikalischer Messdaten . . . 22
  - 2.2.3 Faziesanalyse der Bohrlochmessdaten . . . 23
  - 2.2.4 Theorie zur lithologischen Interpretation . . . 24
  - 2.2.5 Unsicherheit in der Methodik . . . 26

3 Tertiär der Niederrheinischen Bucht **28**
- 3.1 Geologische Übersicht des Tertiärs der Niederrheinischen Bucht . . . 28
- 3.2 Probenahmeprogramm . . . 31
- 3.3 Gesteinsphysikalische Labormessungen . . . 32
- 3.4 Datenkompilation bohrlochgeophysikalischer Messungen . . . 39
- 3.5 Ableitung von thermophysikalischen Kennwerten aus Logging-Daten . . . 41
  - 3.5.1 Loginterpretation in der Referenzbohrung HU-873 . . . 41
  - 3.5.2 Porositäten und Wassersättigung in den Tertiärbohrungen . . . 42
  - 3.5.3 Logs und Wärmeleitfähigkeiten . . . 46

4 Das Paläozoikum des westlichen NRW **53**
- 4.1 Geologische Übersicht des Paläozoikums im westlichen NRW . . . 53
- 4.2 Probenahmeprogramm . . . 56

4.3 Gesteinsphysikalische Eigenschaften des Standardmessprogramms 60
4.3.1 Übersicht zu den gesteinsphysikalischen Eigenschaften der Hauptgesteinsarten 61
4.3.2 Überführung der Ergebnisse in Gesteinsmodelle 65
4.3.3 Gesteinsphysikalische Eigenschaften der Siliziklastika 69
4.3.4 Gesteinsphysikalische Eigenschaften der Karbonate 73
4.4 Spezifische Wärmekapazität 77
4.5 Druck- und temperaturabhängige Messungen 81
4.5.1 Ergebnisse 81
4.5.2 Übertragung auf Hauptgesteinsarten 89
4.5.3 Vergleich der Messergebnisse für die Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität 91
4.6 Permeabilität unter Normalbedingungen und druckabhängige Permeabilität 93
4.7 Ableitung der Permeabilität aus NMR-Messungen 96
4.8 Recherche und Kompilation von Bohrlochmessdaten 99
4.9 Ableitung von Wärmeleitfähigkeiten aus Logging-Daten 100
4.9.1 Loginterpretation in der Referenzbohrung B-17 100
4.9.2 Porositäten und Wassersättigung in den Karbonbohrungen 101
4.9.3 Logs und Wärmeleitfähigkeiten 103
4.9.4 Loginterpretation in der Referenzbohrung B-10 107
4.9.5 Porositäten und Wassersättigung in der Bohrung B-10 112
4.9.6 Logs und Wärmeleitfähigkeiten 112

5 Arbeitsgebiet „bayerisches Molassebecken“ 116
5.1 Geologische Übersicht des östlichen Molassebeckens 116
5.2 Probenahmeprogramm 120
5.3 Auswertung bohrlochgeophysikalischer Messungen 121
5.3.1 Recherche, Datenkompilation und Qualitätskontrolle 122
5.3.2 Faziesanalyse der Bohrlochmessdaten 125
5.4 Sedimentgesteine der Kreide 126
5.4.1 Gesteinsphysikalische Eigenschaften der Kreidesedimente 126
5.4.2 Auswertungen der bohrlochgeophysikalischen Messungen 129
5.5 Karbonatgesteine des Oberjura im Vergleich zur Westmolasse 139
5.5.1 Gesteinsphysikalische Eigenschaften der Malm-Karbonate 139
5.5.2 Auswertung der bohrlochgeophysikalischen Messungen 142
5.5.3 Ableitung von Wärmeleitfähigkeiten aus Logging-Daten 144

6 Statistische Modellierung geothermischer Reservoire 148
6.1 Sequentielle Gaußsche Simulation 148
6.2 Methodentest und einschränkendes Verfahren 149
6.2.1 Modellrekonstruktion mit einer variablen Anzahl von Bohrungen 150
6.2.2 Eingrenzen der Ensembles 151
6.3 Feldstudie für ein geothermisches Reservoir 153
6.3.1 Quantifizierung und Eingrenzung der Vorhersageunsicherheit 154
6.3.2 Selektionsverfahren 156
6.4 Stochastische Simulation der Wärmestromdichte 157

7 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse 160
7.1 Erzielte Ergebnisse 160

7.2 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse 165
7.3 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 165
7.4 Erfolgte Veröffentlichungen im Rahmen des Projektes 165

Literatur **167**

Anhang **174**

A Druck- und Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit und Wärmekapazität **175**

Abbildungsverzeichnis

1.1 Geologische Übersicht Deutschlands mit dem Umriss der Arbeitsgebiete. 2

2.1 Messanordnung des Thermal Conductivity Scanners 8
2.2 Beispiel von Standmessungen an einem Kernstück aus dem Unteren Keuper. 9
2.3 Schematischer Aufbau einer Halbraumlinienquelle (HLQ). 10
2.4 Schema der Apparatur zur druck- und temperaturabhängigen Messung der Wärmeleitfähigkeit. 11
2.5 Apparatur zur druck- und temperaturabhängigen Messung von Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit und volumetrische Wärmekapazität. 12
2.6 Anordnung der Dichte- und Porositätsmessung 13
2.7 Schematischer Aufbau des Core-Loggers. 15
2.8 Messanordnung und Messprinzip des Wärmestromdifferenz-Kalorimeters 16
2.9 Beispielmessungen der Wärmekapazität c_p. 17
2.10 Aufbau des Halbach-Magnetscanners. 18
2.11 T_2-Verteilung in einem wassergesättigten Sandstein. 19
2.12 Vergleich zwischen T_2- Verteilungen mittels NMR und Porenradienverteilungen aus der Quecksilberporosimetrie. 20
2.13 Korrelationen der verschiedenartig bestimmten Permeabilitäten. 21
2.14 Synthetisches Litho-Log und Log-Antworten 25

3.1 Tektonische Übersichtskarte der Niederrheinischen Bucht 28
3.2 Geologisches Profil der Niederrheinischen Bucht 29
3.3 Lithologie und stratigraphische Gliederung des Tertiärs der Niederrheinischen Bucht 30
3.4 Sedimentkerne aus der Erkundungsbohrung HU-873. 31
3.5 Übersicht zu den gesteinsphysikalischen Laboruntersuchungen. 34
3.6 Häufigkeitsverteilung und statistische Kennwerte tertiärer Lockersedimente der Bohrung HU-873. 36
3.7 Unterschiede in den Laborergebnissen zwischen den Laboratorien der RWTH Aachen und der RWE Power AG. 37
3.8 Quantitative Mineralzusammensetzung von Proben der Bohrung HU-873. 38
3.9 Südliche Niederrheinische Bucht mit der Lage von zehn Forschungsbohrungen eines Tiefenbohrprogramms. 40
3.10 Compositeplot der Bohrung HU-873. 43
3.11 Streudiagramm der im Bohrloch gemessenen Dichte gegen die Gammastrahlung. . . 44
3.12 Ergebnis der petrophysikalischen Auswertung. 45

3.13 Vergleich der Kernporositäten mit den aus dem Dichtelog berechneten effektiven Porositäten und der totalen Porosität. 47
3.14 Lithologische Abfolge und ausgewählte Logging- und Kerndaten der Bohrung HU-873. 48
3.15 Streudiagramm Gamma-Ray Log versus wassergesättigte Wärmeleitfähigkeit. 49
3.16 Streudiagramm Gamma-Ray Log versus wassergesättigte Wärmeleitfähigkeit - bereinigt. 49
3.17 Vergleich der im Labor gemessenen Wärmeleitfähigkeiten mit den aus den Logs abgeleiteten Werten. 50
3.18 Stratigraphische Abfolgen des Tertiärs in ausgewählten Explorationsbohrungen. . . . 51
3.19 Berechnete Wärmeleitfähigkeitsprofile für fünf Tertiärbohrungen. 52

4.1 Abgedeckte Geologische Karte der zentralen Niederrheinischen Bucht. 54
4.2 Querschnitte durch den paläozoischen Untergrund der zentralen Niederrheinischen Bucht. 55
4.3 Geologisches Profil durch das Rheinisch-Westfälische Steinkohlenrevier. 56
4.4 Übersicht der Bohrlochlokationen im westlichen Nordrhein-Westfalen. 59
4.5 Darstellung der statistischen Maßzahlen petrophysikalischer Eigenschaften für fünf Hauptgesteinstypen paläozoischer Gesteinsserien aus dem westlichen Nordrhein-Westfalen. 62
4.6 Verteilung der quantitativen mineralogischen Zusammensetzung der fünf Hauptgesteinstypen. 64
4.7 Gesättigte Wärmeleitfähigkeit untersuchter Kernproben in Abhängigkeit des Quarzgehaltes. 65
4.8 Änderung der Wärmeleitfähigkeit mit der Porosität, berechnet nach dem arithmetischen, harmonischen und geometrischen Mittel. 66
4.9 Gemessene trockene Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Porosität im Vergleich mit unterschiedlichen Gesteinsmodellen. 68
4.10 Häufigkeitsverteilung petrophysikalischer Eigenschaften von Tonstein. 70
4.11 Häufigkeitsverteilung petrophysikalischer Eigenschaften von Siltstein. 70
4.12 Häufigkeitsverteilung petrophysikalischer Eigenschaften von Sandstein. 71
4.13 Häufigkeitsverteilung petrophysikalischer Eigenschaften von Konglomeraten. 71
4.14 Charakteristische Beispielproben klastischer Gesteine aus der Condroz-Fazies. . . . 73
4.15 Darstellung der statistischen Maßzahlen petrophysikalischer Eigenschaften für drei modifizierte Gesteinsgruppen. 74
4.16 Verteilung der quantitativen mineralogischen Zusammensetzung der drei modifizierten Gesteinsgruppen. 76
4.17 Korrelation zwischen saturierter Wärmeleitfähigkeit und Matrixdichte von Karbonatgesteinen aus dieser Studie. 77
4.18 Häufigkeitsverteilung der spezifischen und volumetrischen Wärmekapazität. 78
4.19 Spezifische Wärmekapazität versus Quarzgehalt. 80
4.20 Zusammenhang zwischen Druck und Temperatur bei den Messungen. 81
4.21 Mineralogische Zusammensetzung der verschiedenen Gesteinstypen bei den druck- und temperaturabhängigen Messungen. 83
4.22 Ergebnisse der druck- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeitsmessungen für alle Proben. 83
4.23 Ergebnisse der druck-/temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeitsmessungen für die Sandsteine, normiert auf die Messung bei Normalbedingungen. 84

4.24 Ergebnisse der druck-/temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeitsmessungen für die Kalk- und Tonsteine, normiert auf die Messung bei Normalbedingungen. 85
4.25 Ergebnisse der druck- und temperaturabhängigen Temperaturleitfähigkeitsmessungen für alle Proben. 85
4.26 Ergebnisse der druck- und temperaturabhängigen Temperaturleitfähigkeitsmessungen für die Sandsteine. 86
4.27 Ergebnisse der druck- und temperaturabhängigen Temperaturleitfähigkeitsmessungen für die Kalk- und Tonsteine. 86
4.28 Ergebnisse der druck- und temperaturabhängigen Messungen der volumetrischen Wärmekapazität für alle Proben. 87
4.29 Ergebnisse der druck- und temperaturabhängigen Messungen der volumetrischen Wärmekapazität für die Kalk- und Tonsteine. 87
4.30 Ergebnisse der druck- und temperaturabhängigen Messungen der volumetrischen Wärmekapazität für die Sandsteine. 88
4.31 Mittlere Druck- und Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit λ nach Gleichung 4.11 für die Hauptgesteinsarten. 89
4.32 Mittlere Druck- und Temperaturabhängigkeit der Temperaturleitfähigkeit κ nach Gleichung 4.11 für die Hauptgesteinsarten. 90
4.33 Mittlere Druck- und Temperaturabhängigkeit der volumetrische Wärmekapazität $\rho\ c_P$ nach Gleichung 4.11 für die Hauptgesteinsarten. 90
4.34 Vergleich des gemessenen Temperaturverlaufs der volumetrischen Wärmekapazitäten im RSGPU in Moskau und Aachen. 91
4.35 Vergleich der gemessenen volumetrischen Wärmekapazität im RSGPU in Moskau und in Aachen bei 100 °C. 92
4.36 Darstellung der statistischen Maßzahlen der Permeabilität k in Form von Box-Whisker-Diagrammen. 94
4.37 Permeabilität in Abhängigkeit der Porosität für verschiedene Gesteinstypen paläozoischer Gesteinsserien. 95
4.38 Permeabilität ausgewählter Proben versus effektiven Druck und Permeabilitätsabnahme versus Tiefe. 96
4.39 Benutzeroberfläche des MATLAB-Programms zur Auswertung von 1D- und 2D-NMR-Relaxometriedaten. 97
4.40 Ergebnisse aus den NMR-Messungen am Beispiel der T_1-Relaxationszeiten der untersuchten Sandsteine und Tonsteine. 98
4.41 Compositeplot der Bohrung B-17 102
4.42 Streudiagramm der Dichte gegen die Gammastrahlung 103
4.43 Lithologische Gliederung der Bohrung B-17 104
4.44 Ergebnis der petrophysikalischen Auswertung. 105
4.45 Vergleich der berechneten und am Kern gemessenen Porositätswerte. 106
4.46 Streudiagramm der Matrixwärmeleitfähigkeit gegen den Quarzgehalt für Gestein des Oberkarbons. 107
4.47 Berechnung der Wärmeleitfähigkeit 108
4.49 Compositeplot der Bohrung B-10 110
4.50 Lithologische Gliederung der Bohrung B-10 111
4.51 Ergebnis der petrophysikalischen Auswertung 113
4.52 Vergleich der berechneten und gemessenen Porositätswerte 114
4.53 Berechnung der Wärmeleitfähigkeit 115

5.1 Tektonische Übersicht im ostbayrischen Molassebecken. 117
5.2 Schematische Profilschnitte durch das bayerische Molassebecken. 118
5.3 Übersicht der Bohrlochlokationen zu den Kernproben und Logdaten. 120
5.4 Lithologie und stratigraphische Gliederung der Kreide im Untergrund des bayerischen Molassebeckens. 127
5.5 Häufigkeitsverteilung petrophysikalischer Eigenschaften des Gault-Sandsteins (Unterkreide). 128
5.6 Gemessene wassergesättigte Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Porosität für den Gault-Sandstein (Unterkreide). 129
5.7 Bohrlochmessungen im Bereich der Kreide mit Übergang in das Tertiär der Bohrung K-01 131
5.8 Streudiagramm des im Bohrloch gemessenen Widerstands (DRes) gegen die Gamma-Strahlung (GR) 132
5.9 Übersichtsprofile der bearbeiten Bohrungen. 133
5.10 Vergleichende Darstellung der statistischen Maßzahlen petrophysikalischer Eigenschaften für Malmkarbonate aus dem Untergrund des Süddeutschen Molassebeckens. 140
5.11 Bohrlochmessungen im Bereich des Oberjura der Bohrung L-01 143
5.12 Gammalogs (GR) der Ostmolasse im Vergleich zur Westmolasse 145
5.13 Berechnete Wärmeleitfähigkeitsprofile für den Oberjura 146

6.1 1D-Beispiel für geostatistische Parameterschätzung 150
6.2 *Sgsim* Referenzmodell 150
6.3 Temperaturunterschied ΔT zwischen Referenzmodell und drei simulierten Realisationen 1 151
6.4 Temperaturunterschied ΔT zwischen Referenzmodell und drei simulierten Realisationen 2 152
6.5 Temperaturunterschied ΔT zwischen Referenzmodell und drei simulierten Realisationen 3 153
6.6 Regionales 3D-Temperaturmodell für Den Haag mit Darstellung der einzelnen Schichten und der berechneten Temperaturwerte (Geophysica Beratungsgesellschaft, 2008). Im vorliegenden Modell ist jede geologische Modelleinheit durch einen konstanten Wert für die Wärmeleitfähigkeit charakterisiert. 154
6.7 Temperaturvorhersage an den Lokationen der BHT 1 155
6.8 Eine beispielhafte Realisation der Wärmeleitfähigkeiten im Modell. 156
6.9 Temperaturvorhersage an der geplanten Ziellokation 1 157
6.10 Temperaturvorhersage an den Lokationen der BHT 2 158
6.11 Temperaturvorhersage an der geplanten Ziellokation 2 158
6.12 Temperaturvorhersage an der geplanten Ziellokation 3 159

7.1 Wärmeleitfähigkeit (wassergesättigt) der in beiden Projektphasen untersuchten Sandsteine und ihre mittlere Gesteinszusammensetzung. 161

Tabellenverzeichnis

1 Zusammenfassende Übersicht zu den thermischen und hydraulischen Gesteinseigenschaften. . . . xiii

2.1 Spezifikationen des Messgeräts zur Bestimmung von Wärmeleitfähigkeit unter erhöhtem Druck und Temperatur. . . . 12
2.2 Zusammenstellung von Log-Antworten für wichtige gesteinsbildende Minerale. . . . 24
2.3 Fehlerquellen für die Loginterpretation. . . . 26

3.1 Gliederung der känozoischen Lockergesteinsschichten der Niederrheinischen Bucht. 33
3.2 Übersicht und statistische Kennwerte zu den petrophysikalischen Eigenschaften aus Labormessungen. . . . 35
3.3 Übersicht zur temperaturabhängigen spezifischen und volumetrischen Wärmekapazität von Tonen und Sanden aus der Bohrung HU-873. . . . 39
3.4 Übersicht zu den verfügbaren Logs der betrachteten Bohrungen. . . . 40
3.5 Übersicht zu den verwendeten Parametern. . . . 41
3.6 Durchschnittswerte und Standardabweichungen der Logdaten für die in der Bohrung HU-873 abgegrenzten Hauptgesteinstypen des Tertiärs. . . . 42

4.1 Übersicht zu den Kernproben aus dem westlichen NRW. . . . 58
4.2 Stratigraphische Zuordnung der paläozoischen Kernproben aus den 18 Bohrungen des westlichen NRW. . . . 60
4.3 Übersicht zu den petrophysikalischen Eigenschaften für fünf Hauptgesteinstypen paläozoischer Gesteinsserien aus dem westlichen Nordrhein-Westfalen. . . . 63
4.4 Wärmeleitfähigkeit der gesteinsbildenden Minerale zur Berechnung der Matrix-Wärmeleitfähigkeit mit dem geometrischen Mittel. . . . 66
4.5 Ergebnisse der Monte Carlo-Untersuchung von Matrix-Wärmeleitfähigkeit und f-Faktor der Hauptgesteinsarten nach dem Asaad-Modell. . . . 68
4.6 Porosität der Sandsteine des Westfals und des restlichen Paläozoikums. . . . 72
4.7 Übersicht zu den petrophysikalischen Eigenschaften für drei modifizierte Gesteinsgruppen. . . . 75
4.8 Übersicht zu den petrophysikalischen Eigenschaftendes Kohlenkalks (Unterkarbon). 76
4.9 Übersicht zur temperaturabhängigen spezifischen und volumetrischen Wärmekapazität. 79
4.10 Statistik der temperatur- und druckabhängigen Messungen bei Normalbedingungen. . 83
4.11 Statistik der temperatur- und druckabhängigen Messungen bei T=180 °C, P = 160 MPa. 84
4.12 Statistik der temperatur- und druckabhängigen Messungen: prozentuale Veränderungen durch Druck- und Temperaturerhöhung. . . . 84
4.13 Gemittelte Koeffizienten a, k und b für die Ton- und Kalksteine. . . . 89

4.14 Übersicht zu den statistischen Kennwerten der Permeabilität k. 93
4.15 Kalibrierte Modellparameter zur Ableitung von NMR-Permeabilitäten. 99
4.16 Übersicht zu den bearbeiteten Bohrungen und der Verfügbarkeit von Bohrlochmessdaten. 100
4.17 Durchschnittswerte (AVG) und Standardabweichungen (STD) der Logdaten 101
4.18 Statistik der berechneten Wärmeleitfähigkeiten 107

5.1 Übersicht zu den entnommenen Kernproben. 121
5.2 Messgeräte und (Tools) und (Logs) und ihre Abkürzungen 123
5.3 Logs und ihre Abkürzungen (BLM). 123
5.4 Übersicht zu den bearbeiteten Bohrungen und der Verfügbarkeit von Bohrlochmessdaten 124
5.5 Übersicht zu den petrophysikalischen Eigenschaften des Gault-Sandsteins (Unterkreide). 127
5.6 Petrophysikalische Eigenschaften des Turon-Kalkmergels (Oberkreide) und des Purbecks (Unterkreide). 130
5.7 Durchschnittswerte und Standardabweichungen der Logdaten 130
5.8 Übersicht zu den petrophysikalischen Eigenschaften von Karbonatgesteinen des Oberjura (Malm) aus dem Untergrund des Süddeutschen Molassebeckens. 141
5.9 Durchschnittswerte und Standardabweichungen der Logdaten für die in der Bohrung L-01 abgegrenzten Gesteinstypen im Oberjura. 144

A.1 Druck- und temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeiten, Temperaturleitfähigkeiten und volumetrischen Wärmekapazitäten der Proben aus dem Paläozoikum. 176
A.2 Koeffizienten der Regression für die Druck- und temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeiten. 180
A.3 Koeffizienten der Regression für die Druck- und temperaturabhängige Temperaturleitfähigkeiten. 181
A.4 Koeffizienten der Regression für die Druck- und temperaturabhängige volumetrische Wärmekapazitäten. 182

Kurzfassung

Informationen zu den thermophysikalischen Eigenschaften der Gesteine im Untergrund Deutschlands sind insgesamt nur spärlich vorhanden. Fehlende Basisdaten zu den lithostratigraphischen Einheiten in Deutschland, die den Transport von Wärme und Fluiden im tiefen Untergrund bestimmen, erschwerten bislang die Abschätzung der zu erwartenden Entzugsleistung bei der Planung geothermischer Installationen. Demgegenüber existiert umfangreiches Proben- und Datenmaterial in den Bohrkern- und Aktenarchiven der geologischen Landesämter und der Industrie, welches in Hinblick auf eine Ableitung thermischer und hydraulischer Eigenschaften ein großes, bislang weitgehend ungenutztes Potenzial aufweist.

In der vorausgegangenen Projektphase 1 wurde eine statistisch repräsentative Datenbasis thermischer und hydraulischer Eigenschaften der lithostratigraphischen Einheiten im Westteil des Süddeutschen Molasseebeckens und des nördlich angrenzenden Süddeutschen Schichtstufenlandes erstellt (Clauser et al., 2007). Die hier berichtete abgeschlossene zweite Projektphase konzentrierte sich auf die geologischen Einheiten im westlichen Nordrhein-Westfalen (Niederrheinische Bucht, Ruhrgebiet und Teile des Rheinischen Schiefergebirges).

Die zweite Projektphase verfolgte mehrere Ziele. Hauptziel war die Ableitung thermischer und hydraulischer Gesteinseigenschaften aus direkten Messungen an Bohrkernen sowie aus der Analyse bohrlochgeophysikalischer Messungen. Dies beinhaltet auch die Verknüpfung mit geologischen und lithologischen Informationen, insbesondere die Zuordnung zum Hauptgesteinstyp und die mineralogische Zusammensetzung, sowie die Berücksichtigung von lateralen Fazieswechseln und der Einfluss der Versenkungstiefe unter erhöhtem Druck und Temperatur. Dem gingen die Sichtung und Auswahl der relevanten Gesteinsserien in den jeweiligen Arbeitsgebieten sowie deren repräsentative Beprobung voraus. Parallel zu diesen Arbeiten sollten zur Unterstützung der Projektaufgaben verschiedene Auswerte- und Analyseverfahren weiterentwickelt werden. Diese methodischen Weiterentwicklungen beziehen sich auf die schnelle und kostengünstige Ableitung von Permeabilitäten aus NMR-Messungen sowie auf eine Unsicherheitsquantifizierung von Gesteinseigenschaften und Zustandsvariablen in geothermischen Reservoiren.

Die Probennahme umfasst im Arbeitsgebiet westliches Nordrhein-Westfalen 93 Lockergesteinsproben aus einer repräsentativen Kernbohrung durch den tertiären Untergrund der Niederrheinischen Bucht, die mit Logs aus zehn weiteren Bohrungen aus diesem Gebiet in Verbindung gesetzt werden kann. Weiter wurden 231 Kernproben aus 18 Bohrungen aus dem paläozoischen Untergrund des westlichen Nordrhein-Westfalens nach den Kriterien Verfügbarkeit, räumliche Abdeckung und hinreichende Repräsentanz entnommen. Hier konnten aus 28 Bohrungen flächendeckend Bohrlochdaten berücksichtigt werden. In der bayerischen Molasse wurden 74 Kernproben aus 13 Bohrungen entnommen, die vorwiegend aus dem Oberjura und der Kreide stammten. Logdaten standen hier aus 26 Bohrungen in unterschiedlicher Qualität zur Verfügung.

An allen formkonsistenten Proben wurden in der Regel Dichte, Porosität, Wärmeleitfähigkeit und Komressionswellengeschwindigkeit gemessen; an ausgewählten Proben darüber hinaus die spezifische Wärmekapazität, die druck- und temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit, die (druckabhängige) Permeabilität, der quantitative Mineralbestand sowie longitudinale (T_1-) und transversale (T_2-) NMR-Relaxationszeitverteilungen zur Ableitung von Permeabilitäten. Für die zu erstellende Datenbasis wurden die thermischen Parameter Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität sowie die hydraulischen Kennwerte Porosität und Permeabilität herangezogen. Darüber hinaus ermittelte Kennwerte dienen zur Entwicklung von Gesteinsmodellen, mit deren Hilfe sich die thermischen und

hydraulischen Eigenschaften aus Sekundärdaten ableiten lassen.

Eine Gesamtübersicht über alle Kennwerte der Datenbasis ist in Tabelle 1 gegeben. Die wassergesättigte Wärmeleitfähigkeit der klastischen Gesteine (Tonstein bis Konglomerat) schwankt im Durchschnitt der Hauptgesteinsgruppen relativ stark zwischen 3,3 W m^{-1} K^{-1} und 5,2 W m^{-1} K^{-1}, die Lockersedimente der Niederrheinischen Bucht hingegen nur zwischen 1,9 W m^{-1} K^{-1} und 2,8 W m^{-1} K^{-1}. Die Untersuchungen zeigen, dass die Wärmeleitfähigkeit im Wesentlichen von der Porosität und vom Quarzgehalt gesteuert wird. Die Wärmeleitfähigkeit des Gesamtgesteins wird in den meisten Fällen sehr gut durch das geometrische Mittel der Wärmeleitfähigkeiten der enthaltenen Komponenten (Mineralmatrix, Wasser) beschrieben. Lediglich die paläozoischen Sandsteine mit einer Porosität von mehr als 8 % werden mit einem modifizierten Modell nach Asaad (1955) besser charakterisiert. Da Quarz eine deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit besitzt als die der meisten anderen gesteinsbildenden Minerale klastischer Gesteine, nimmt die Wärmeleitfähigkeit des Gesamtgesteins mit zunehmenden Quarzgehalt zu. Die Werte der Lockersedimente des Niederrheins liegen aufgrund der hohen Porosität niedriger und steigen von Ton bis Sand mit zunehmendem Quarzgehalt an. Die Wärmeleitfähigkeit der Karbonatgesteine schwankt zwischen 2,6 W m^{-1} K^{-1} für die Kalksteine des Molassebeckens und 4,1 W m^{-1} K^{-1} für reine Dolomite. Die Werte für die Einzelproben hängen vom Grad der Dolomitisierung und im Fall des Kohlenkalks auch von der Silifizierung ab. Je höher der Anteil von Dolomit oder Quarz, desto höher die Wärmeleitfähigkeit des Gesamtgesteins.

Die Wärmekapazität, in Tabelle 1 gegeben als volumetrische Wärmekapazität bei 20 °C, schwankt über die verschiedenen Hauptgesteinstypen hinweg nur in einem sehr engen Bereich. Bei den klastischen Gesteinen reicht die volumetrische Wärmekapazität im Mittel von 1,98 MJ m^{-3} K^{-1} für den quarzreichen Gault-Sandstein bis 2,18 MJ m^{-3} K^{-1} für die paläozoischen Tonsteine Nordrhein-Westfalens. Die Wärmekapazität verhält sich konträr zur Wärmeleitfähigkeit und steigt mit abnehmendem Quarzgehalt. Dem gleichen Trend folgen die Karbonatgesteine, die naturgemäß einen geringen Quarzanteil besitzen und entsprechend zwischen 2,23 MJ m^{-3} K^{-1} für Kalkstein und 2,40 MJ m^{-3} K^{-1} für Dolomit rangieren. Die volumetrischen Wärmekapazitäten der tertiären Lockergesteine (Ton und Sand) entsprechen denen ihrer Pendants bei den Festgesteinen (Tonstein und quarzreicher Sandstein wie z.B. Gault-Sandstein).

Die Porosität der dichten paläozoischen Festgesteine Nordrhein-Westfalens ist mit Durchschnittswerten unter 3,2 % sehr klein und nur bei den Sandsteinen des Westfals mit 8,7 % etwas höher. Die Karbonatgesteine aus allen Untersuchungsgebieten sind mit Durchschnittsporositäten von maximal 4,3 % als dicht zu bezeichnen. Die höchste mittlere Porosität weist die Gruppe der Gault-Sandsteine im bayerischen Molassebecken mit 12,2 % auf.

Die Permeabilitäten werden neben der Porengrößenverteilung und der Porenraumgeometrie maßgeblich von der Porosität kontrolliert. Dementsprechend erreichen die tonreichen Sandsteine des nordrhein-westfälischen Paläozoikums nur Permeabilitäten von durchschnittlich 10^{-18} m^2. Die höher porösen Sandsteine des Westfals hingegen zeigen mit mittleren Werten um $1{,}43 \cdot 10^{-15}$ m^2 eine über tausendfach höhere Durchlässigkeit. Die Permeabilität der Tonsteine ist naturgemäß sehr gering, jedoch gegenüber Literaturwerten als hoch einzustufen, was damit zusammenhängt, dass nur Proben mit hinreichend großer Durchlässigkeit ausgewählt wurden und der Wert hier nicht repräsentativ für die Gesamtheit der Tonsteine ist.

Tabelle 1: *Zusammenfassende Übersicht zu den thermischen und hydraulischen Eigenschaften der wichtigsten Lithologien in den Untersuchungsgebieten: Wärmeleitfähigkeit λ_s des wassergesättigten Gesteins, volumetrische Wärmekapazität $\rho_m c_P$, Porosität ϕ und hydraulische Permeabilität k.* [(1)] *Bei den Lockersedimenten des Niederrheins handelt es sich um die Wärmeleitfähigkeit bergfeuchter Proben λ_f, die annähernd der wassergesättigten entsprechen sollte. Bei den Gesteinen des Molassebeckens wurden auch Werte aus der ersten Projektphase berücksichtigt.*

Arbeits-gebiet	Lithologie	Thermische Parameter								Hydraulische Parameter					
		λ_s [(1)] (W m^{-1}K^{-1})				ρ_m c_p (20 °C) (MJ m^{-3} K^{-1})				Φ (-)				k (m^2)	
		n (Proben)	Min.	Mittel-wert	Max.	n (Proben)	Min.	Mittel-wert	Max.	n (Proben)	Min.	Mittel-wert	Max.	n (Proben)	Mittel-wert
Niederrhein	Ton	72	1,28	**1,88**	2,96	6	2,02	**2,17**	2,30	49	0,219	**0,337**	0,430	n.b.	n.b.
	Schluff	15	1,86	**2,25**	2,61	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	19	0,270	**0,331**	0,430	n.b.	n.b.
	Sand	123	1,82	**2,76**	3,50	8	1,90	**1,98**	2,07	136	0,250	**0,403**	0,467	n.b.	n.b.
Paläozoikum westl. NRW	Tonstein	42	2,62	**3,31**	3,83	16	2,10	**2,18**	2,25	42	0,006	**0,028**	0,076	9	**6,32E-19**
	Siltstein	13	3,07	**3,52**	4,38	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	13	0,001	**0,030**	0,046	n.b.	n.b.
	Sandstein	59	2,89	**4,38**	6,02	35	1,99	**2,07**	2,23	--	--	--	--	--	--
	Sandstein (ohne Westfal)	--	--	--	--	--	--	--	--	28	0,000	**0,032**	0,163	12	**1,02E-18**
	Sandstein (Westfal)	--	--	--	--	--	--	--	--	29	0,017	**0,087**	0,165	21	**1,43E-15**
	Konglomerat	9	3,73	**4,46**	6,34	4	1,99	**2,11**	2,21	9	0,002	**0,018**	0,031	n.b.	n.b.
	Karbonat	21	2,76	**3,35**	5,36	9	2,09	**2,23**	2,35	21	0,004	**0,014**	0,077	n.b.	n.b.
Molassebecken	Gault-Sandstein	12	3,90	**5,23**	7,07	5	1,92	**1,98**	2,06	12	0,017	**0,122**	0,205	n.b.	n.b.
	Kalksteine (Molassebecken)	57	2,12	**2,55**	2,93	14	2,03	**2,23**	2,56	58	0,004	**0,043**	0,171	n.b.	n.b.
	Reine Dolomite (Molassebecken)	10	3,43	**4,07**	4,51	3	2,38	**2,40**	2,41	9	0,015	**0,037**	0,067	n.b.	n.b.

Die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Versenkungstiefe wird von zwei sich überlagernden Effekten kontrolliert: Mit wachsendem Umschließungsdruck steigt die Wärmeleitfähigkeit an, sinkt jedoch mit zunehmender Temperatur. Da der Einfluss der Temperatur größer ist, wird der Druckeffekt überlagert und die Wärmeleitfähigkeit sinkt insgesamt bei steigender Versenkungstiefe. Am stärksten ist dieser Effekt bei Tonsteinen ausgeprägt, die bei einer Versenkungstiefe von etwa 6000 m (T = 180 °C; P = 160 MPa) gegenüber Normalbedingungen eine um 37 % reduzierte Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Sandsteine verlieren bei gleicher Versenkungstiefe durchschnittlich 30 % an Wert; Kalksteine am wenigsten mit durchschnittlich 15 %.

Auch bei der Permeabilität ist die Druckabhängigkeit bei Tonsteinen am größten. Sie verlieren bei einem Umschließungsdruck von 35 MPa bis zu über einer Größenordnung an Permeabilität, wogegen die Sandsteine deutlich weniger drucksensitiv sind. Die Beziehung Permeabilität versus Druck ist generell nichtlinear. Bei den meisten Proben sinkt die Permeabilität nur bis zu einem Umschließungsdruck von 10 MPa stärker ab.

Eine Ableitung thermischer und hydraulischer Kennwerte aus Bohrlochmessungen erfolgte getrennt für die stratigraphischen Einheiten Tertiär, Karbon und Devon in Nordrhein-Westfalen sowie den Einheiten des Juras und der Kreide in der Ostmolasse. Als generelle Vorgehensweise wurde zunächst anhand des Gamma-Ray-Logs der Tongehalt berechnet und über porositätssensitive Logs wie das Dichte- und das Sonic-Log die Porosität ermittelt. In einfachen Drei-Komponenten Systemen wurde dann die siliziklastische bzw. karbonatische Matrix als Differenz errechnet. Die Abgrenzung von Kohlenflözen im Tertiär und Karbon konnte eindeutig anhand der Logs vorgenommen und eine volumetrische Bestimmung des Kohle- und Tongehaltes in den Flözen durchgeführt werden. Aus den quantifizierten Anteilen der Gesteinskomponenten und des wasser- bzw. lufterfüllten Porenraums wurden über die Anwendung des geometrischen Mittels und den im Labor ermittelten Matrixwerten Profile der effektiven Wärmeleitfähigkeit berechnet. Diese hochauflösenden Profile ermöglichen eine Erfassung der lateralen und vertikalen Variation geothermisch relevanter Parameter und erlauben die Berechnung statistischer Kennwerte für die stratigraphischen Einheiten.

Im Bereich der methodischen Arbeiten wurden nach dem Bau des Halbach-Magneten in Phase 1 und seiner Erweiterung in der letzten Projektphase die Verfahren zur Ableitung von Permeabilitäten aus NMR-Relaxationszeitverteilungen fortgesetzt und vertieft. Die NMR-Porositäten stimmen auch bei niedrigen Werten gut mit den Porositäten aus dem Archimedes-Verfahren überein. Es wurden verschiedene Modellbeziehungen verwendet, um aus NMR-Relaxationszeiten Permeabilitäten abzuleiten. Der Vergleich mit Gaspermeabilitäten zeigt auch bei relativ dichten Sandsteinen und Tonsteinen eine gute Übereinstimmung mit den Permeabilitäten aus NMR-Messungen. Das Verfahren stößt jedoch bei Permeabilitäten $> 10^{-19}$ m^2 allerdings an seine Grenzen.

Auf dem Gebiet der stochastischen Modellierung geothermischer Reservoire wurde ein kombinierter Ansatz aus Sequentieller Gaußscher Simulation und einer einschränkenden Selektion gewählt, um die Unsicherheit der Gesteinseigenschaften und Zustandsvariablen in einem Reservoir zu charakterisieren. Dieser Ansatz hat sich als präziser herausgestellt als eine einfache Minimum-Maximum-Abschätzung der zu Grunde liegenden Parameter. Die zusätzliche stochastische Simulation von Randbedingungen erlaubt eine umfassendere Unsicherheitscharakterisierung.

Zum Testen dieses Ansatzes konnte kein realer Datensatz in der erforderlichen Datendichte aus einem der beiden Arbeitsgebiete gewonnen werden, weil geeignete Datensätze von den Eignern nicht zur Verfügung gestellt wurden. Da die methodische Weiterentwicklung im Vordergrund stand, wurde auf eine Feldstudie in Den Haag, Niederlande, zurückgegriffen. Dort konnte die Temperaturunsicherheit auf Basis der stochastischen Simulation der Wärmeleitfähigkeit, welche auf Messungen beruhte,

signifikant reduziert werden. Hierbei wurden auch die Wärmestromdichte stochastisch variiert und unzureichende Modelle anhand eines einschränkenden Verfahrens mit Hilfe von Temperaturmessungen ausselektiert.

Mit diesem Projekt wurden die statistischen Variationen geothermisch relevanter Eigenschaften aus Kernmessungen und Bohrlochdaten abgeleitet und so die Voraussetzung geschaffen, die Vorhersagegenauigkeit von numerischen Modellen zur Temperaturprognose und zur Reservoircharakterisierung in den untersuchten Gebieten zu verbessern. Mit zuverlässigeren Eingangsdaten wird anhand der im Projekt entwickelten stochastischen Methode die Unsicherheit der Modellvorhersagen quantifiziert und minimiert, was letztlich die Aufsuchung und Gewinnung für die geothermische Energiegewinnung optimiert und somit die förderpolitischen Bestrebungen eines Ausbaus regenerativer Energien in Deutschland unterstützt.

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Hintergrund und Aufgabenstellung

Das Fehlen belastbarer gesteinsphysikalischer Basisdaten des tiefen Untergrunds in Deutschland erschwert bislang die Abschätzung der zu erwartenden Energieausbeute bei der Planung geothermischer Installationen.

Der vorliegende Bericht beschreibt die Ergebnisse der abgeschlossenen zweiten Phase eines Projekts mit dem Ziel, die für eine zuverlässige Aufsuchung und Nutzung geothermischer Energie als Wärme und Strom erforderlichen gesteinsphysikalischen Grunddaten in Form einer statistisch repräsentativen Datenbasis bereit zu stellen. Die Datenbasis enthält Informationen zu jenen Gesteinseigenschaften, die den Transport von Wärme und Fluiden im Untergrund bestimmen. Sie soll dazu beitragen, dass geologische Fündigkeitsrisiko für geothermische Projekte zu vermindern. Planern solcher Anlagen wird ein Hilfsmittel zur optimalen Auslegung des Projektes an die Hand gegeben.

Das Untersuchungsgebiet umfasst den östlichen Teil des Süddeutschen Molassebeckens und das westliche Nordrhein-Westfalen (Niederrheinische Bucht, Großraum Ruhrgebiet und Teile des Rheinischen Schiefergebirges; Abbildung 1.1). In der vorangegangenen ersten Projektphase wurde das westliche Molassegebiet in Baden-Würtemberg und das nördlich angrenzende Süddeutsche Schichtstufenland bearbeitet.

Die angestrebten wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele der hier beschriebenen zweiten Phase umfassen unterschiedliche Fachdisziplinen der Geologie, Petrophysik und numerischen Methodenentwicklung. Die Aufgaben des Vorhabens waren im Einzelnen:

1. Ableitung thermophysikalischer und hydraulischer Daten aus existierenden Daten, eigenen Laboruntersuchungen und der Analyse bohrlochgeophysikalischer Messungen;
2. Verknüpfung der petrophysikalischen Daten mit lithologischen Informationen mit dem Ziel einer einheitlichen Klassifizierung und dem Aufbau einer statistisch repräsentativen Datenbasis;
3. Exemplarische Untersuchungen zur Abhängigkeit der thermophysikalischen und hydraulischen Eigenschaften von lateralen Fazieswechseln, Kompaktion, Zementation, Diagenese sowie Druck und Temperatur;
4. Extrapolation thermophysikalischer und hydraulischer Kennwerte auf tiefer liegende Krustenbereiche.

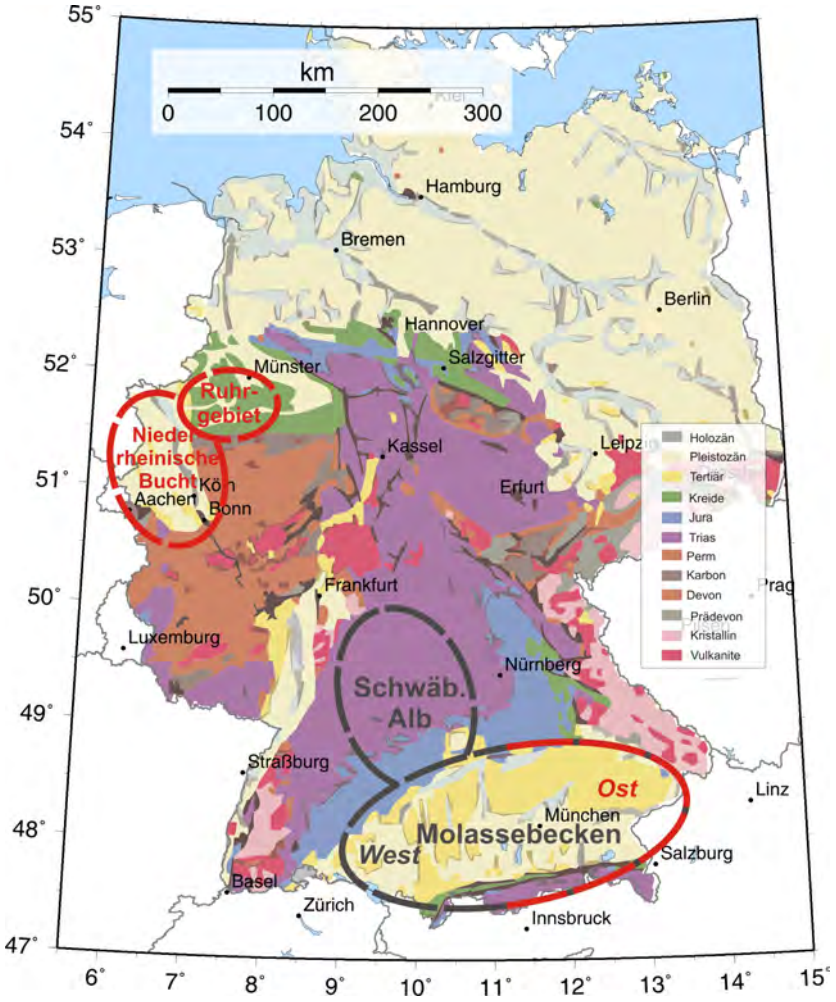


Abbildung 1.1: *Geologische Übersicht Deutschlands mit den Arbeitsgebieten der ersten Projektphase (grau), welches das westliche Süddeutsche Molassebecken und das nördlich angrenzende Süddeutsche Schichtstufenland umfassen, und der abgeschlossenen zweiten Projektphase (rot).*

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Eine Grundidee dieses Projektes war die Aufbereitung und Nutzung bereits vorhandener Datenquellen, die gegenüber einer explorativen Erkundung mit relativ geringem Aufwand durchgeführt werden kann. Die Qualität und Vollständigkeit der gewonnenen Daten hängt generell sehr stark von der räumlichen Verteilung, Auswahl, Zugänglichkeit und Qualität der insgesamt existierenden Laborproben und Bohrlochmessungen ab. Es kann daher nicht das Ziel sein, einen vollständigen und flächendeckenden Katalog thermischer und hydraulischer Gesteinseigenschaften oder eine Art Geothermieatlas zu erarbeiten. Dieser Bericht soll vielmehr dazu beitragen, eine große Lücke im Informationsbedarf zum tiefen Untergrund in Deutschland zu schließen und die bestehenden Datenquellen aus der Rohstoffexploration und der Forschung synergetisch zu nutzen.

Als mögliche Zielgebiete für die zweite Phase waren mehrere Optionen bewertet worden. Ausschlaggebend für die endgültige Wahl war im Fall von Nordrhein-Westfalen, dass sich die Region aufgrund der hohen Bevölkerungsdichte durch ein hohes Nachfragepotenzial auszeichnet. Diesem hohen Ab-

nahmepotenzial stehen auf der anderen Seite nur wenige geothermische Basisdaten gegenüber, die eine Nutzung dieses Potenzials ermöglichen würden. Beim Geologischen Landesdienst liegt ein Strukturmodell des Untergrundes im Ruhrgebiet vor, das eine Prognose der Temperatur für geothermische Zwecke bis in große Tiefen erlauben soll. Es mangelt bislang jedoch an thermischen Gesteinseigenschaften, so dass unsere Arbeiten hier eine sinnvolle Ergänzung zu bestehenden Modellen bieten. Zudem stellten vor allem im westlichen Nordrhein-Westfalen die Explorations- und Forschungstätigkeit der Braunkohle- und Steinkohleindustrie günstige Bedingungen dar. Die Gesteinsserien des Karbon und des Devon, die im Arbeitsgebiet „westliches Nordrhein-Westfalen“ vorherrschen, werden außerdem die überregionale Datenbasis und das Verständnis der Petrophysik dieser Gesteine vervollständigen.

Die östliche Molasse in Bayern ist im Moment das Ziel geothermischer Exploration und eine Verbesserung der Datenlage war auch hier angezeigt. Da die Gesteinsserien denen der westlichen Molasse ähnlich sind, ließ sich eine Übertragung der Ergebnisse der ersten Phase mit relativ geringem Aufwand betreiben. Geplant war hier eine Auswertung von Logdaten mit nur punktuell ergänzender Probenahme.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der generelle Ablauf des Gesamtprojektes kann in die zeitlich aufeinander folgenden Abschnitte Probenahme - Labormessungen - Auswertung - Erstellung einer Datenbasis unterteilt werden. Parallel dazu erfolgte über eine Auftragsvergabe an die Geophysica Beratungsgesellschaft mbH die Akquisition und Aufbereitung von bohrlochgeophysikalischen Messungen. Die methodischen Entwicklungen zur Charakterisierung des Porenraums und zur Unsicherheitscharakterisierung von Gesteinseigenschaften und Zustandsvariablen (siehe unten Punkt 1) dauerten über die gesamte Laufzeit der hier berichteten zweiten Projektphase an.

Der Bewilligungszeitraum umfasste ursprünglich die Periode vom 01.09.2006 bis 31.08.2008. Der Projektstart verzögerte sich durch die Bindung des Projekt bearbeitenden Personals an die vorherige Projektphase (Ende: 31.10.2006) um zwei Monate. Weiter erforderten die Untersuchungen an tertiären und quartären Lockersedimenten aus der Niederrheinischen Bucht die Entwicklung neuer Standardprozeduren bei der Untersuchung von gesteinsphysikalischen Eigenschaften im Labor sowie ergänzende Untersuchungen zur Entwicklung von Gesteinsmodellen. Dieser Mehraufwand war im Vorfeld nicht abzusehen und führte zu entsprechenden Verzögerungen. Die Vakanz der Wissenschaftlerstelle mit der Fachrichtung Statistik (01.11.2007 bis 29.02.2008) brachte eine weitere Verzögerung im entsprechenden Aufgabenbereich mit sich. Der Zuwendungsgeber trug diesem Sachverhalt Rechnung und bewilligte eine kostenneutrale Verlängerung, sodass die Laufzeit des Projektes bis zum 31.05.2009 verlängert wurde.

Das Vorgehen in diesem Projekt kann wie folgt näher beschrieben werden:

1. **Methodische Weiterentwicklungen zur Unterstützung der Projektaufgaben.** Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden verschiedene Analyse- und Auswerteverfahren weiterentwickelt, indem bestehende Methoden ergänzt und speziell für die Bedürfnisse des Projektes optimiert wurden:

    - *NMR-Methode:* Der mobile NMR-Scanner aus der ersten Projektphase wurde in der abgeschlossenen zweiten Projektphase um einen speziell konstruierten Vorverstärker und ein

darauf abgestimmtes Akquisitionssystem erweitert, welches die Messung noch geringerer Porositäten erlaubt. Mit dem verbesserten System wurden die methodischen Arbeiten zur Ableitung von Permeabilitäten aus NMR-Messungen fortgesetzt mit dem Ziel, schnellere und kostengünstigere Messungen der Permeabilität zu ermöglichen.

- *Unsicherheitsquantifizierung:* Auf dem Gebiet der stochastischen Modellierung geothermischer Reservoire soll eine räumliche Charakterisierung der Unsicherheit in Bezug auf die Schätzung thermischer Eigenschaften mit ihren Auswirkungen auf die Prognose des Temperaturfeldes ermöglicht werden. Dazu wurden in bestehende Programme zur Modellierung gekoppelter thermischer und hydraulischer Prozesse Methoden zur stochastischen Simulation petrophysikalischer Eigenschaften implementiert. Diese liefern zusammen mit deterministischen inversen Methoden ergänzende Informationen zur Bewertung geothermischer Reservoire.

2. **Sichtung und Auswahl der relevanten Gesteinsserien im Untergrund des jeweils betrachteten Gebietes und deren repräsentative Beprobung sowie lithologische Klassifizierung.** In Zusammenarbeit mit geologischen Diensten und der Industrie, die über Bohrkerne und Gesteinsproben verfügen, wurden das westliche Nordrhein-Westfalen und ergänzend das bayerische Molassebecken systematisch beprobt, so dass die unterschiedlichen faziellen Ausprägungen jeder Gesteinsart hinreichend repräsentiert sind. Die Probenahme konzentrierte sich in Nordrhein-Westfalen auf die stratigraphischen Haupteinheiten des Paläozoikums (Devon und Karbon) sowie auf das Tertiär der Niederrheinischen Bucht. Im bayerischen Molassebecken wurden vornehmlich jene Gesteinsfolgen ergänzend beprobt, die durch die Vorarbeiten der Phase 1 im westlichen Molassebecken noch nicht erfasst worden waren (Kreide) oder die in ihrer Fazies vom westlichen Molassegebiet abwichen (vornehmlich Oberjura). Exemplarisch für jede Gesteinsart wurde eine repräsentative Probenzahl von über 100 Proben für quantitative mineralogische Analysen ausgewählt.

3. **Messung gesteinsphysikalischer Eigenschaften an Proben im Labor.** An den selektierten Gesteinsproben wurden die Eigenschaften Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, Dichte, Porosität und Permeabilität im Labor bestimmt. Auf dieser Datengrundlage ist es möglich, statistisch abgesicherte Mittelwerte und Standardabweichungen für die in Frage stehenden thermischen Gesteinseigenschaften anzugeben. An ausgewählten Proben wurde die Druckabhängigkeit der Permeabilität sowie die Temperatur- und Druckabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit analysiert.

4. **Kompilation, Qualitätskontrolle und faziesbezogene Auswertung bohrlochgeophysikalischer Messdaten.** Parallel zum Laborprogramm wurden bohrlochgeophysikalische Messdaten gesichtet, aufbereitet und ausgewertet, um hieraus die thermophysikalischen Eigenschaften abzuleiten. Hierzu wurden Messdaten aus Bohrungen der Rohstoffindustrie und aus Forschungsbohrungen der Geologischen Dienste genutzt.

5. **Erstellung statistisch abgesicherter thermischer und hydraulischer Kenngrößen aus Labordaten und bohrlochgeophysikalischen Messungen** Eine Auswertung der gesammelten Daten lieferte zum einen statistische Maßzahlen für repräsentative Gesteinstypen, wobei im Gegensatz zu bislang üblichen Tabellenwerken neben qualitativen Gesteinsbeschreibungen auch quantitative Informationen zum Mineralbestand berücksichtigt wurden. Zum anderen erfolgte eine Auswertung nach stratigraphischen Einheiten unter Berücksichtigung von Faziesverände-

rungen und Diagenese, sodass die lokal gewonnenen Daten in einen räumlichen Zusammenhang gestellt werden konnten.

6. **Exemplarische Untersuchungen zur Abhängigkeit gesteinsphysikalischer Eigenschaften von Genese, Druck und Temperatur.** An exemplarisch ausgewählten Proben wurden Laboruntersuchungen durchgeführt, um damit den geothermisch interessanten Tiefenbereich bis 7 km zu erschließen. Es wurden in erster Linie Daten zur Wärmeleitfähigkeit und zur Permeabilität erzeugt, wobei Proben aus Bohrungen verwendet wurden. Für die einzelnen Gesteinstypen sind Modelle der Druck- und Temperaturabhängigkeit aufgestellt worden, die eine Vorhersage der thermischen und hydraulischen Eigenschaften für verschiedene Tiefenniveaus ermöglichten und die im Labor gewonnenen Daten mit in-situ-Messungen in Tiefbohrungen in Beziehung setzten.

1.4 Stand der Wissenschaft und Technik

Informationen zu den thermophysikalischen Eigenschaften der Gesteine im Untergrund Deutschlands waren zu Beginn des Projektes insgesamt nur spärlich vorhanden. Es existierten Tabellenwerke (Cermak und Rybach, 1982; Clauser und Huenges, 1995; Clauser, 2006; Haenel et al., 1988) und Literaturquellen, die sich jedoch entweder auf einzelne Lokationen beschränkten oder Mittelwerte für gängige Gesteinstypen lieferten, die aus überregionalen, z. T. weltweiten Einzeldaten kompiliert wurden. Die Übertragbarkeit auf einzelne Regionen Deutschlands war hieraus nicht möglich.

Neben den thermischen Eigenschaften der Gesteine war für die Berechnung des Energiepotenzials die Kenntnis der Porosität und Permeabilität von grundlegender Bedeutung. In Abhängigkeit von der großräumigen geologischen Gliederung und der Rohstoffverteilung in Deutschland lagen Porositäts- und Permeabilitätsdaten in sehr unterschiedlicher Qualität und Quantität vor. Die beste Datenlage war hier für die großen Sedimentbecken gegeben, die im Zuge der Erdöl- und Erdgasexploration in den letzten Dekaden durch Bohrungen erschlossen wurden. Hier allerdings konzentrierten sich die Untersuchungen vorwiegend auf potentielle Speichergesteine für Kohlenwasserstoffe. Direkt verwertbare Daten für die gesamte erbohrte Abfolge lagen nicht vor.

Insgesamt war für hydraulischen Parameter der Informationsstand besser zu bewerten, was auf eine Vielzahl von Untersuchungen zur Rohstoffexploration und Grundwassererkundung zurück zu führen war. Allerdings konzentrierten sich die Informationen entweder auf einzelne Rohstoffregionen Deutschlands bzw. nur auf den flachen, wasserwirtschaftlich interessanten Untergrund. Auch war aufgrund der Datenstruktur (Skaleneffekte, Einzeldaten an Laborproben oder Mittelwerte über hydraulische Einheiten) eine direkte Zuordnung zu thermophysikalischen Datensätzen nicht möglich. Es kann somit zusammengefasst werden, dass zu Projektbeginn für den Untergrund Deutschlands keine statistisch belastbaren Informationen existierten, die ausgereicht hätten, das thermische Potenzial im lokalen bzw. regionalen Maßstab zu beschreiben.

Demgegenüber existierte umfangreiches Proben- und Datenmaterial, welches in Hinblick auf eine Ableitung thermischer und hydraulischer Eigenschaften noch ein großes, bislang weitgehend ungenutztes Potenzial aufwies. Zu nennen sind hier vor allem petrophysikalische Bohrlochmessdaten sowie Probenmaterial aus Bohrungen und Aufschlüssen, welches in Landesämtern und Bohrkernarchiven der Erdölindustrie gelagert ist. Während an Probenmaterial Untersuchungen zu den thermisch-hydraulischen Eigenschaften direkt durchgeführt werden konnten, lieferten Bohrlochmessdaten die Möglichkeit, die gewünschten Informationen aus ihnen abzuleiten.

1.5 Zusammenarbeit mit Dritten

Die durchgeführten Arbeiten in dieser Projektphase sind in Zusammenarbeit mit Ingenieursgesellschaften, Geologischen Landesbehörden, Forschungseinrichtungen und Industrieunternehmen realisiert worden. Die einzelnen Kooperationspartner trugen entweder mit ihrer Expertise in verschiedenen geowissenschaftlichen Teildisziplinen zur Bearbeitung der Projektaufgaben bei oder stellten Bohrkerne oder geophysikalische Bohrlochdaten zur Verfügung. Neben dem Lehrstuhl für Applied Geophysics and Geothermal Energy am E.ON Energy Research Center der RWTH Aachen als Projektdurchführender sind nachfolgend alle Institutionen mit ihrem jeweiligen Aufgabenfeld genannt, die entweder als direkter Kooperationspartner oder als Projektbeteiligte zum Gesamtergebnis beigetragen haben:

Geophysica Beratungsgesellschaft mbH, Aachen; verantwortlich für die Auswertung bohrlochgeophysikalischer Messungen; Planung und Auswertung druckabhängiger Messungen in Kooperation mit dem Steinmann-Institut für Geologie, Mineralogie und Paläontologie der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn, und der Moscow State Geological Prospecting Academy; Integrierte Auswertung von Labormessungen und bohrlochgeophysikalischen Daten zur Untersuchung der thermischen Eigenschaften in Abhängigkeit vom Gesteinstyp, der Fazies, der Versenkungstiefe und der Temperatur.

Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Steinmann-Institut für Geologie, Mineralogie und Paläontologie (Dr. G. Nover); Durchführung druckabhängiger Permeabilitätsmessungen in Kooperation mit der Geophysica Beratungsgesellschaft mbH, Aachen.

Moscow State Geological Prospecting Academy (Prof. Dr. Y. Popov); Durchführung druck- und temperaturabhängiger Wärmeleitfähigkeitsmessungen in Kooperation mit der Geophysica Beratungsgesellschaft mbH, Aachen.

RMC Rock and Mineral Consulting GbR, Herzogenrath; Durchführung und Auswertung der quantitativen Mineralanalyse.

ACT GmbH, Aachen; Bau eines Spektrographen und eines Leistungsverstärkers für den Halbach-Magneten.

GeoFrames GmbH, Potsdam; Durchführung und Auswertung von Quecksilberporosimetriemessungen zur Bestimmung der Porenradienverteilung.

Geologischer Dienst NRW, Krefeld; Bereitstellung von Bohrakten, analogen Bohrlochdaten und Kernmaterial aus nordrhein-westfälischen Forschungsbohrungen und Erkundungsbohrungen der Steinkohleindustrie.

Bayerisches Landesamt für Umwelt, München; Bereitstellung von Bohrakten, Bohrlochdaten und Kernmaterial aus Tiefenbohrungen der bayerischen Molasse.

Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover; Bearbeitung von Anfragen zur Existenz von Bohrkernen und Bohrlochdaten der Kohlenwasserstoffindustrie in Abstimmung mit dem Wirtschaftsverband Erdöl- und Erdgasgewinnung e.V..

Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik, Hannover; Einbindung von thermischen und hydraulischen Daten aus dem Projekt in das Geothermische Informationssystem (GeotIS-Projekt; FKZ 0327542) und anderer geeigneter Fachinformationssysteme.

RWE Power AG, Köln; Bereitstellung von digitalen Bohrlochdaten, Kernmaterial und Labordaten aus Tiefenbohrungen der Niederrheinischen Bucht.

ExxonMobil Production Deutschland GmbH, Hannover; Bereitstellung von Bohrlochdaten und Kernmaterial aus Tiefenbohrungen der bayerischen Molasse.

Deutsche Steinkohle AG, Herne; Freigabe zur Nutzung von Kernmaterial und Bohrlochdaten aus Steinkohleexplorationsbohrungen des Ruhrgebiets.

Geothermie Unterhaching GmbH & Co KG, Unterhaching; Freigabe von Bohrakten und digitalen Bohrlochdaten.

Geothermie Neubrandenburg GmbH, Neubrandenburg; Übersendung von Bohrakten und digitalen Bohrlochdaten.

Kapitel 2

Daten und Methoden

Im folgenden Kapitel werden die Methoden zusammengefasst, welche zur Untersuchung des Untergrundes der Arbeitsgebiete (vgl. Abbildung 1.1 beigetragen haben. Die Ergebnisse der Anwendung der Methoden werden in den entsprechenden Kapiteln 3 bis 5 beschrieben bzw. im Anhang zusammengestellt.

2.1 Labormessverfahren

2.1.1 Wärmeleitfähigkeit

Der Thermal Conductivity Scanner (TCS) der Firma Lippmann & Rauen GbR arbeitet nach dem von Popov (1997); Popov et al. (1999) beschriebenen Prinzip der berührungslosen Messung der Wärmeleitfähigkeit. Außerdem können Angaben über die Homogenität und Anisotropie der Wärmeleitfähigkeit gemacht werden. Abbildung 2.1 zeigt die komplette Messanordnung. Das Verfahren basiert auf dem thermischen Abtasten der Probenoberfläche mit einer fokussierten Wärmequelle, die sichtbares Licht und Wärmestrahlung (Infrarotstrahlung) emittiert. Vor und hinter der Wärmequelle erfolgt eine „kalte“ und eine „heiße“ Temperaturmessung mittels Infrarot-Thermosensoren. Aus der Temperatur-

Abbildung 2.1: *Messanordnung des Thermal Conductivity Scanners (aus Clauser et al., 2007). Von links nach rechts sind der Auswertungsrechner, die Steuereinheit und das eigentliche Messgerät zu sehen. Der kleine Ausschnitt lässt die beiden beweglichen Sensoren („kalt“ und „heiß“) mit der dazwischen liegendenden Wärmequelle erkennen.*

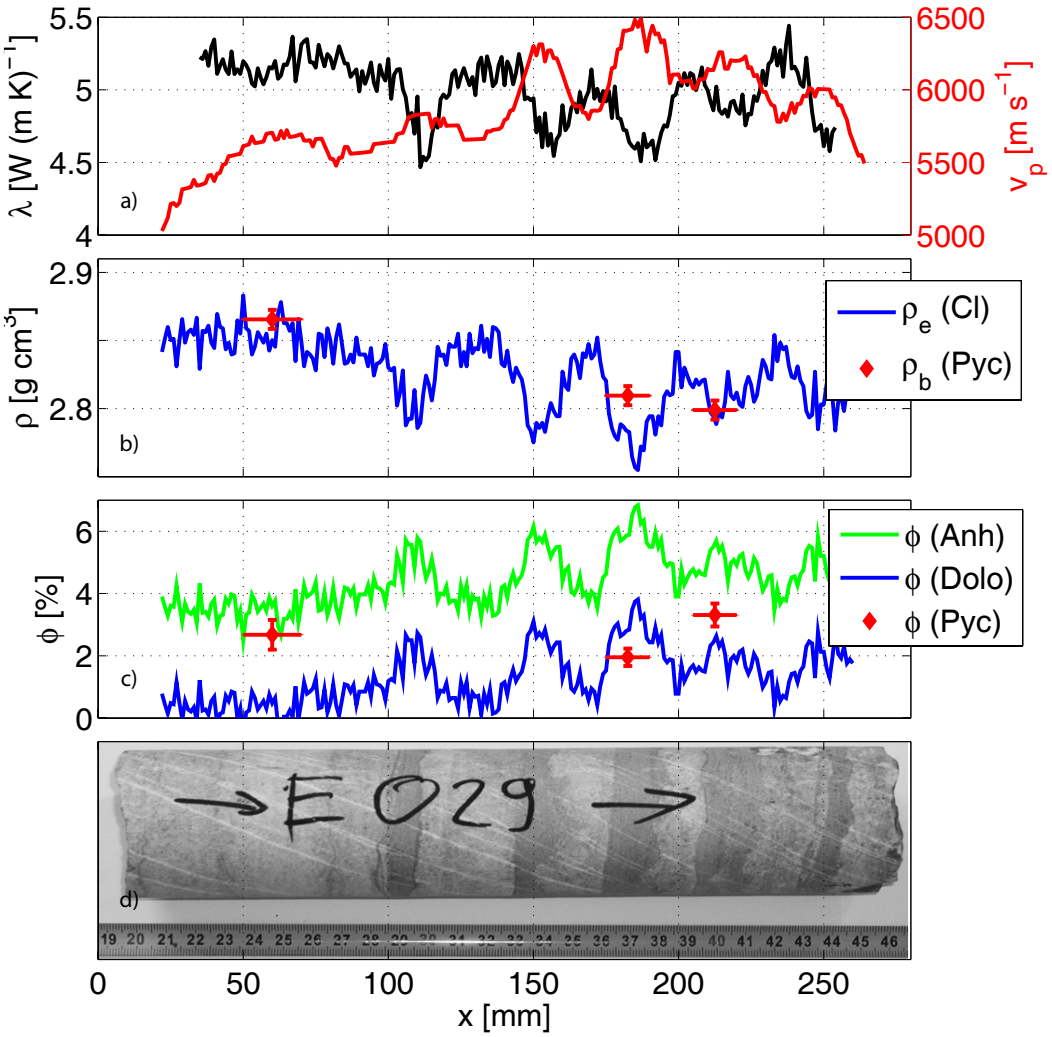


Abbildung 2.2: *Beispiel von Standmessungen an einem Kernstück aus dem Unteren Keuper (aus Hartmann et al., 2007).* a) *Messungen der Wärmeleitfähigkeit (λ) mit dem TCS-Gerät (schwarz) und der p-Wellengeschwindigkeit (V_p) mit dem Corelogger.* b) *Scannende Dichtemessung des Coreloggers (ρ_e) im Vergleich zu Punktmessungen mit dem Feststoff-Pyknometer (ρ_b).* c) *Berechnete Porosität (ϕ) aus der kontinuierlichen Messung, berechnet für unterschiedliche Matrixdichten von Dolomit und Anhydrit (ϕ(Anh) und ϕ(Dolo)). Diese werden mit Punktmessungen der Porosität, abgeleitet aus Pyknometermessungen verglichen.* d) *Kernfoto mit Maßstab. Es handelt sich um eine Wechselfolge von Anhydrit (hell) und Dolomit (dunkel).*

differenz der beiden Sensoren lässt sich die Wärmeleitfähigkeit der Probe berechnen.

Durch das optische Abtasten der Probenoberfläche ist Aufwand der Probenvorbereitung sehr gering. Vor dem Abfahren der gewünschten Flächen wird ein tiefschwarzer Acryl-Lackanstrich aufgetragen, um eine einheitliche Reflektivität zu erhalten. Die Auswertesoftware liefert als Messergebnis ein Profil der Wärmeleitfähigkeit der Probe. Zusätzlich werden Mittelwert, Minimum und Maximum der Wärmeleitfähigkeit, die prozentuale Standardabweichung und ein Inhomogenitätskoeffizient angegeben. Ein Beispiel dieser Messung ist in Abbildung 2.2a zusammen mit anderen scannenden Standardmessungen zu sehen.

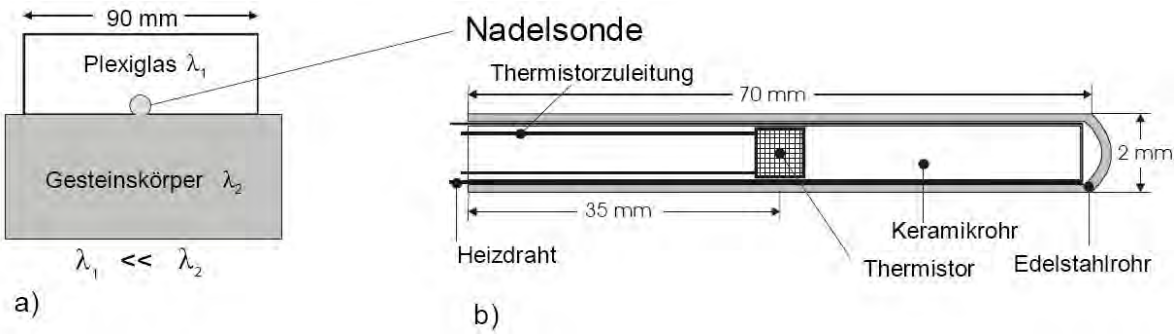


Abbildung 2.3: *Schematischer Aufbau einer Halbraumlinienquelle (HLQ) und ein Querschnitt durch die in die Oberfläche des Sondenhalbraums eingelassene Nadelsonde (aus Erbas, 2001).*

Wenn Bohrkerne im schlechten Erhaltungszustand waren und sich somit für die Messung mit dem TC-Scanner nicht eigneten, was häufig bei tonigen Proben der Fall war, wurden die Probe zermahlen und die Matrix-Wärmeleitfähigkeit mit der TK04-Apparatur am Mahlgut bestimmt. Die TK04 hat den Vorteil, die Wärmeleitfähigkeit von Bohrklein oder Mahlgut, dessen Dimension direkte Messungen nicht zulässt, bestimmen zu können. Hierzu wird das Mahlgut mit Wasser gemischt. Die Messung im TK04 erfolgt mit einer Halbraumlinienquelle (HLQ; siehe Abbildung 2.3a) an einem Zwei-Phasen-System aus Gesteinsmatrix (Mahlgut) und Saturand (Wasser). Volumenanteile von Wasser und Gesteinspulver werden bestimmt und hieraus die Wärmeleitfähigkeit der Matrix mit dem geometrischen Mittel berechnet. Die Wärmeleitfähigkeit kann bei Lockersedimenten mit Hilfe einer Vollraumlinienquelle (VLQ) auch direkt gemessen werden. Es handelt sich hierbei um eine einfache Nadelsonde ähnlich wie in Abbildung 2.3b, die bei ausreichendem Kontakt direkt in das Sediment gesteckt werden kann. Die Details des Messprinzips sind in Erbas (2001) beschrieben.

2.1.2 Druck- und temperaturabhängige Messungen von Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit und Wärmekapazität

An ausgewählten Gesteinsproben wurden druck- und temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeitsmessungen, sowie Temperaturleitfähigkeits- und Wärmekapazitätsmessungen in Kooperation mit dem Institute of Geological-Economic Problems of Russian Academy of Natural Sciences (RSGPU) unter Leitung von Prof. Dr. Yuri Popov durchgeführt. Hier wurden 40 Gesteinsproben aus dem Untersuchungsgebiet auf ihre thermischen Eigenschaften bei erhöhtem Druck und erhöhter Temperatur hin untersucht. Bei der beprobten paläozoischen Schichtenfolge handelt es sich um Kalksteine, Dolomite, verschiedene Sand- und Tonsteine. Zur Beurteilung des Mineralbestandes wurden an einigen Proben ergänzende röntgendiffrakrometrische Analysen sowie Dünnschliffuntersuchungen durchgeführt.

Basierend auf der Methode der Linienquelle zur Erfassung thermischer Eigenschaften wurde von der Moscow State Geological Prospecting University (MSGPU) ein Gerät bzw. ein Verfahren zur Messung der Wärmeleitfähigkeit von Gesteinen bei erhöhtem Druck und Temperatur entwickelt (Abbildung 2.4. Die Einbringung von Proben in eine Druckkammer erlaubt Messungen der Wärmeleitfähigkeit unter gleichzeitiger Veränderung der Temperatur, des Umschließungsdruckes und des Porendruckes. Ein Erweiterung des Gerätes ermöglicht neben der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit gleichzeitig auch die Bestimmung der Temperaturleitfähgkeit und der volumetrischen Wärmeka-

pazität. Der Zusammenhang zwischen diesen verschiedenen Größen ist durch

$$\kappa = \frac{\lambda}{\rho \, c_p} \tag{2.1}$$

gegeben. Hierbei ist κ die Temperaturleitfähigkeit und $\rho \, c_p$ die volumetrische Wärmekapazität.

Abbildung 2.5 zeigt das Gerät im Labor der RSGPU.

Zur Untersuchung werden zylindrische Proben präpariert (Durchmesser 50 mm, Länge 50 mm), die in zwei planparelle Hälften zersägt werden. Zwischen beiden Hälften wird eine linienförmige Wärmequelle installiert, die zusätzlich als Temperaturfühler dient.

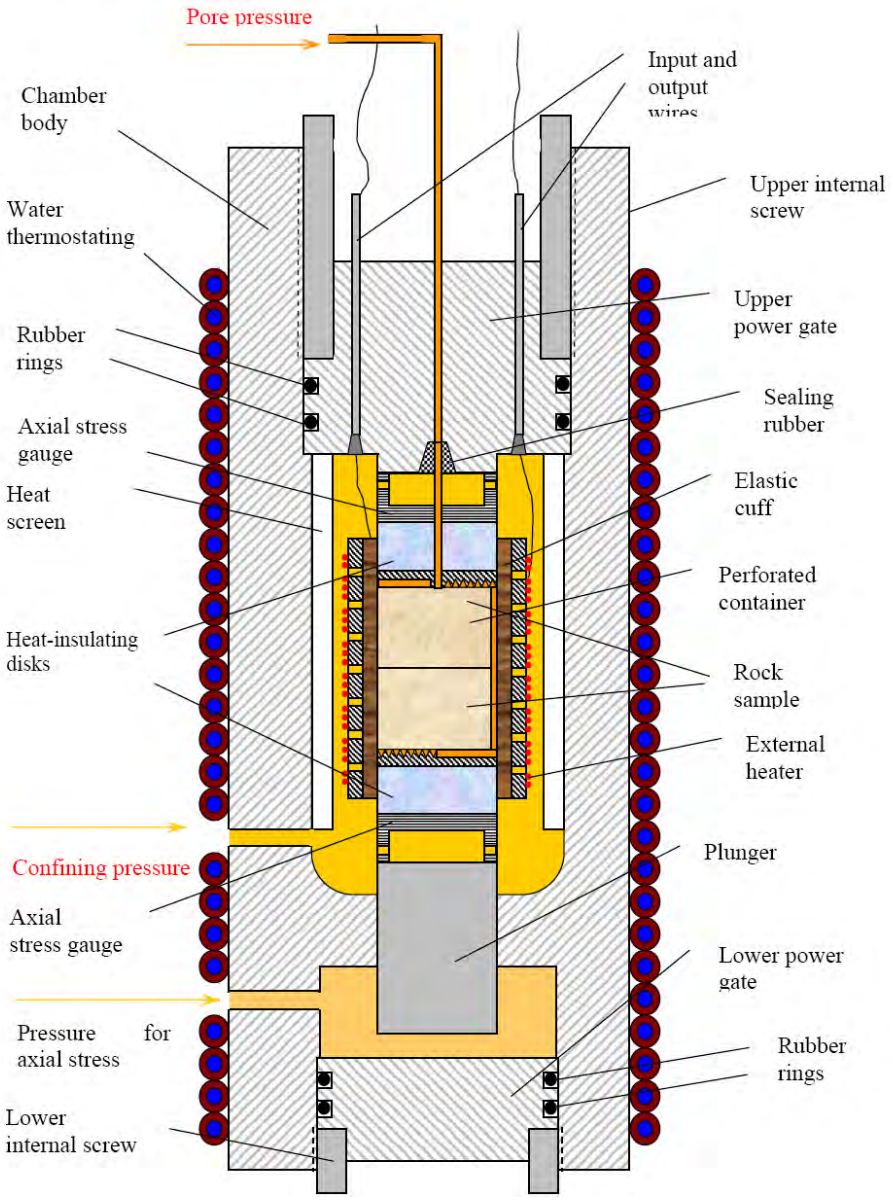


Abbildung 2.4: *Schema der Apparatur zur druck- und temperaturabhängigen Messung der Wärmeleitfähigkeit (aus Clauser et al., 2007).*

Tabelle 2.1: *Spezifikationen des Messgeräts zur Bestimmung von Wärmeleitfähigkeit unter erhöhtem Druck und Temperatur.*

Wärmeleitfähigkeit (W m^{-1} K^{-1})	0.2...10
Temperatur, (°C)	20...200
Druck (MPa)	
Axial	0.1...250
Azimuthal	0.1...250
Porendruck	0.1...200
Probenzustand	Trocken, gesättigt
Präzision und Genauigkeit (%)	3...5

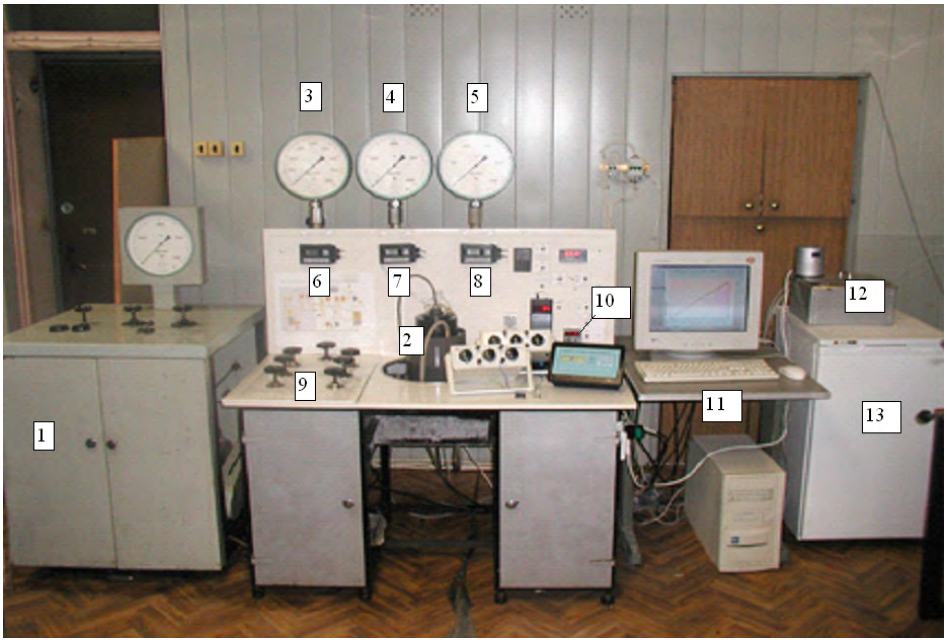


Abbildung 2.5: *Apparatur zur druck- und temperaturabhängigen Messung von Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit und volumetrische Wärmekapazität. 1: Ölkompressor; 2: Druck- und Temperaturkammer; Manometer und entsprechende Steuerungen zur Kontrolle der verschiedenen Drücke: 3,6: aäußerer azimuthaler Druck, 4,7: äußerer axialer Druck, 5,8,9: Ventile zur Druckeinstellung, 11: PC, 12: Thermostat und 13: Kühlschrank für Messungen bei niedrigen Temperaturen.*

Die allgemeinen Spezifikationen sind in Tabelle 2.1 aufgeführt. Dieses Messverfahren hat entscheidende Vorteile gegenüber konventionellen Messungen (Birch, 1948; Moiseenko et al., 1967; Seipold und Engler, 1981; Seipold, 1990; Petrunin und Yurchak, 1973), die die Druck- bzw. Temperaturabhängigkeit separat erfassen . Im Gegensatz zu dem gewählten Verfahren können hierbei Fehlmessungen auftreten, die durch irreversible Veränderung der Probe auftreten können. Zu nennen ist hier zum Beispiel das Auftreten von thermischen Rissen, bei Temperaturen > 100 °C (Pribnow und Sass, 1995) oder die Entstehung neuer Risse durch hohe Axialdrücke. Das eingesetzte Verfahren hat zudem den entscheidenden Vorteil, dass der Porendruck kontrolliert eingestellt werden kann. Das ist notwendig ist, um bei den untersuchten Sedimentgesteinen eine bestmögliche Anpassung an die in-situ Verhältnisse zu bekommen.

Die Durchführung der Arbeiten erfolgte nach folgendem Schema:

1. Wassersättigung der Proben im Vakuum
2. Abschätzung der Wärmeleitfähigkeit der Matrix
3. Messung der jeweiligen Wärmeleitfähigkeit bei Umschließungsdrücken von 0,1,30,65,90, 115 und 150 MPa bei einem Verhältnis von jeweiligem Umschließungsdruck zum Porendruck von 2,5. Simultan zur Erhöhung des Umschließungsdruckes wurde die Temperatur auf folgende Werte erhöht : 25 °C bei 0,1 MPa ; 55 °C bei 30 MPa ;90 °C bei 65 MPa ; 140 °C bei 115 MPa ; 180 °C bei 160 MPa. Zur Erhöhung der Genauigkeit wurden bei jedem Messpunkt mindestens 15 Messwerte aufgenommen.
4. Interpretation der experimentell gewonnen Daten

Erzeugte Daten
Für jede gemessene Probe wurden folgende Daten ermittelt:

1. Druck in MPa (Umschließungsdruck)
2. Porendruck in MPa
3. Temperatur in °C
4. Wärmeleitfähigkeit λ in W m^{-1} K^{-1} (TC) bei entsprechenden Drücken
5. Temperaturleitfähigkeit κ in 10^{-6} m^2 s^{-1}
6. Volumetrische Wärmekapazität $\rho\ c_p$ in J m^{-3} K^{-1}
7. Standardabweichung (STD)
8. relativer Fehler (Berechnet als (STD 100) / λ
9. Porosität ϕ in $\%$

2.1.3 Dichte und Porosität

Dichte und Porosität werden generell mittels Auftriebswägung nach dem Archimedes-Prinzip bestimmt. Es wird das Trockengewicht m_t nach Trocknung der Probe bei 60 °C bis zur Gewichtskonstanz sowie das Sättigungsgewicht m_s und das Probenvolumen aus der Verdrängung im Wasser V_{gesamt} nach Sättigung der trockenen Probe unter Vakuum ermittelt. Daraus ergibt sich die Porosität ϕ und die Matrixdichte ρ_m über die Beziehungen

$$\phi = \frac{(m_s - m_t)}{\rho_w V_{gesamt}} \tag{2.2}$$

und

$$\rho_m = \frac{m_t}{V_{gesamt}(1-\phi)} \tag{2.3}$$

Bei tonigen Proben kann das Gefüge durch den Trocknungs- und Sättigungszyklus beeinträchtigt werden. Diese Fälle sind in der Regel bereits bei der Probenauswahl zu erkennen und werden mit einer

Abbildung 2.6: *Anordnung der Dichte- und Porositätsmessung (aus Clauser et al., 2007).* Links: *Helium-Pyknometer zur Bestimmung der Reindichte der Probe.* Rechts: *Feststoff-Pyknometer zur Bestimmung der Rohdichte der Probe.*

modifizierten Prozedur bearbeitet. Hierbei werden die zu ermittelnden Kennwerte durch zwei Dichtemessungen an der trockenen Probe bestimmt. Die Rohdichte ρ_b ist das Trockengewicht der Probe dividiert durch das Gesamtvolumen. Die Reindichte oder Matrixdichte ρ_m ist das Trockengewicht der Probe dividiert durch das Volumen des Gesteinsanteils der Probe. Die drei Größen Porosität ϕ, Reindichte ρ_m und Rohdichte ρ_b stehen über die Beziehung

$$\phi = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_m} \tag{2.4}$$

im Zusammenhang. Um ρ_b und ρ_m zu bestimmen, sind zwei Dichtemessungen nötig. Das *Feststoffpyknometer* dient zur Messung der Rohdichte. Dazu wird das Volumen einer definierten Menge eines Pulvers und der Probe bestimmt. Da das Pulver nicht in die Probe eindringt, wird das von der Probe umschlossene Volumen gemessen. Zusammen mit der Masse der Probe ergibt sich die Rohdichte. Im *Gaspyknometer* befindet sich die Probe in einer abgeschlossenen Kammer bekannten Volumens, die unter Druck (150 kPa-170 kPa) mit Heliumgas gefüllt wird. Dabei werden Temperatur und Druck kontinuierlich gemessen. Ist die Probe vollständig mit Helium gesättigt, bleibt der Druck konstant. Dann wird eine zweite Kammer geöffnet. Die Differenz der Drücke vor und nach dem Verbinden der Kammern ist ein Maß für das Volumen des Heliums. Da das Helium in die Poren des Gesteins eindringt, wird mit dieser Messung nur das Volumen der Gesteinsmatrix bestimmt. Über die Masse der Probe erhält man schließlich die Reindichte. Der Wert der Rohdichte wird mit Gleichung 2.4 in eine Porosität umgerechnet. In Abbildung 2.2 b) und c) ist ein Messbeispiel im Vergleich zur Dichtemessung des Core-Loggers dargestellt.

2.1.4 Kompressionswellengeschwindigkeit V_p, γ-Dichte, spektrale natürliche Radioaktivität

Beim Core-Logger der Firma Geotek Ltd. handelt es sich um eine Messstrecke, auf der Kerne in einem Trägerschlitten horizontal durch mehrere Messstationen geführt werden. Dabei werden die petrophysikalischen Eigenschaften zerstörungsfrei kontinuierlich aufgezeichnet (Abbildung 2.7). Neben der Geometrie (Länge und Durchmesser) jeder Kernprobe können folgende Eigenschaften gemessen werden:

- Kompressionswellengeschwindigkeit V_p,

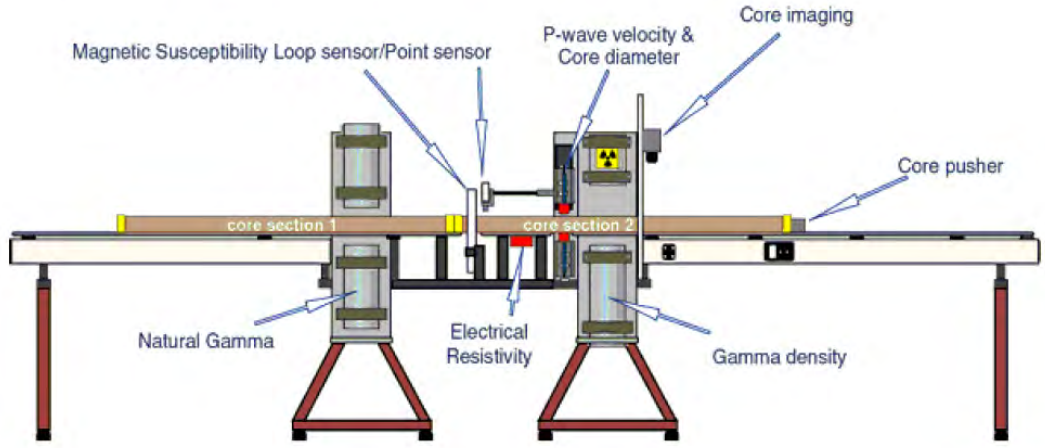


Abbildung 2.7: *Schematischer Aufbau des Core-Loggers (Geotek Ltd.).*

- γ-Dichte ρ_e,
- spektrale, natürliche Radioaktivität in Form der Konzentrationen von Uran, Thorium und Kalium (c_u, c_T und c_K).

Die Kompressionswellengeschwindigkeit wird aus einer Laufzeitmessung und der Dicke des Kernes bestimmt. Für die Messung der γ-Dichte wird die Absorption der radioaktiven γ-Strahlung einer Cäsiumquelle durch die Probe gemessen. Zusammen mit der Dickemessung ergibt sich hieraus die Dichte der Probe inklusive Porenfüllung. Die Absorption beruht hauptsächlich auf der Comptonstreuung der γ-Quanten. Diese ist proportional zur Anzahl der Elektronen in der Atomschale. Daher misst diese Anordnung die Elektronendichte ρ_e, die aber für die meisten gesteinsbildenden Minerale etwa gleich der Rohdichte (bulk density) ρ_b ist. Messbeispiele für V_p und ρ_e sind in der Abbildung 2.2 dargestellt. Die Messungen korrelieren deutlich mit der Geologie, insbesondere ist auch eine gute übereinstimmung der verschiedenen Methoden der Dichtemessung zu sehen. Die γ-Dichte hat den Vorteil der kontinuierlichen Messung. Allerdings ist bei der Porositätsbestimmung die Annahme einer Matrixdichte notwendig, um mit Gleichung 2.4 die Porosität zu berechnen. Dies ist in dem Beispiel für eine Anhydrit- und eine Dolomitmatrix dargestellt.

Die Messung von V_p und ρ_b erfolgt gleichzeitig. Für die Messung der radioaktiven Elementkonzentrationen ist ein größerer Zeitaufwand erforderlich. Daher erfolgt sie nicht parallel zu den anderen Messungen und wird üblicherweise auch nicht kontinuierlich, sondern an ausgewählten Kernproben durchgeführt.

2.1.5 Wärmekapazität

Zur Messung der spezifischen Wärmekapazität c_p dient das dynamisches Wärmestrom-Differenz-Kalorimeter C80 der Firma SETARAM, welches im dynamischen Betrieb als Zwillings-Kalorimeter arbeitet. Für die Messung können sowohl zylindrisch ausgebohrte Gesteinsproben als auch Bohrklein oder zermahlenes Kernmaterial verwendet werden. Je nach Probenzustand werden die Proben ausgebohrt oder zermahlen vermessen.

Das Kalorimeter besitzt einen Probenbehälter und einen Referenzbehälter. Während der Messung wird

Abbildung 2.8: *Messanordnung und Messprinzip des Wärmestromdifferenz-Kalorimeters (aus Clauser et al., 2007). Die Messapparatur besteht aus vier Komponenten: Rechner, Kalorimeter sowie dem Controller auf dem Netzteil (von links nach rechts).*

die Temperatur in beiden Behältern gleichmäßig erhöht und die Steigung des Temperaturverlaufs dT/dt registriert. Außerdem werden die Wärmeströme q_r und q_p aufgezeichnet, die in dem leeren Referenzbehälter und dem mit der Probenmasse gefüllten Probenbehälter fließen. Die Differenz beider Wärmeströme ist proportional zur spezifischen Wärmekapazität c_p des Probenmaterials

$$c_p(T) = \frac{q_p - q_r}{S(T) \cdot m \cdot \frac{dT}{dt}}. \tag{2.5}$$

Hier ist $S(T)$ eine geräteabhängige Kalibrationsfunktion. Nach der Auswertung der Messung erhält man eine Kurve der Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität. Abbildung 2.9 zeigt als Beispiel das Resultat der temperaturabhängigen c_p-Messungen an drei verschiedenen Materialien. Nach einer Anlaufzeit beginnt der stabile Bereich bei konstanter Heizrate von 0,1 K min^{-1} bei 38 °C (durchgezogene Linien). An die Daten wird ein Polynom vierten Grades angepasst, mit dem die Wärmekapazität beschrieben werden kann (in Anlehnung an Kelley, 1960):

$$c_p(T) = A_0 + A_1T + A_2T^2 + A_3T^3 + A_4T^4 \ (T\ in\ °C). \tag{2.6}$$

2.1.6 Permeabilität

In Zusammenarbeit mit der Geophysica Beratungsgesellschaft mbH und dem Mineralogisch-Petrologischen Institut der Universität Bonn wurde die Luftpermeabilität an einer Auswahl der Proben sowohl unter Atmosphärendruck als auch druckabhängig gemessen. Insgesamt wurden an 73 ausgewählten Proben 125 Permeabilitäten erfasst. Die repräsentative Auswahl umfasst 17 verschiedene Lokationen, davon zwölf Bohrungen und fünf Oberflächenaufschlüsse. Die Messungen wurden an Probenzylindern von 30 mm Durchmesser und 30 mm bis 50 mm Länge ausgeführt.

In Anhängigkeit von der Permeabilität der jeweiligen Probe wurden unterschiedliche Verfahren angewandt. Proben mit relativ hoher Durchlässigkeit wurden mit dem Durchflussverfahren gemessen, das auf der Berechnung des Gesetzes von Darcy basiert:

$$k = \frac{\eta \cdot Q \cdot l}{A \cdot \Delta P} \tag{2.7}$$

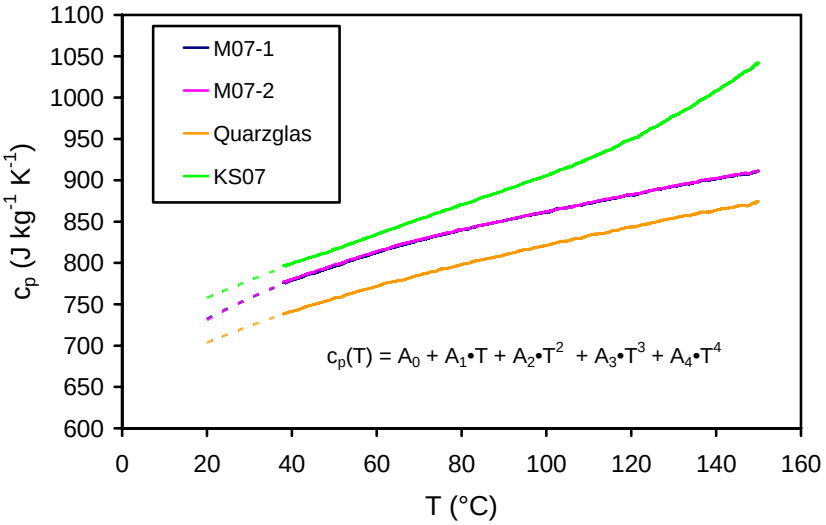


Abbildung 2.9: *Gemessene (durchgezogene Linien) und extrapolierte spezifische Wärmekapazitäten (gestrichelte Linien) für den Temperaturbereich zwischen 20 °C und 150 °C am Beispiel drei verschiedener Materialien (M07: Industriemarmor; KS07: künstlicher Kalksandstein). Bei den beiden c_P-Kurven der Probe M07 handelt es sich um eine Wiederholungsmessung am selben Material. Der Bereich ab 38 °C bis zur Maximaltemperatur wird zur Bestimmung der Koeffizienten A_0 bis A_4 herangezogen. Die berechneten Anpassungspolynome vierter Ordnung sind deckungsgleich mit den Messkurven und werden für die Extrapolation von c_P(<38 °C) verwendet.*

In der Apparatur wird ein Druckgefälle ΔP in der Probe aufgebaut. Die Durchlässigkeit des Gesteins (Permeabilität k) wird durch das Volumen eines flüssigen oder gasförmigen Mediums mit der dynamischen Viskosität η bestimmt, das pro Zeiteinheit (Durchflussrate Q) durch eine (zylindrische) Gesteinsprobe mit der Länge l und dem Querschnitt A bei einer gegebenen Druckdifferenz ΔP zwischen Eintritts- und Austrittsstelle fließt. Als durchströmendes Medium wurde das Edelgas Argon verwendet, um chemische Reaktionen im Porenraum zu vermeiden.

Proben mit relativ geringer Durchlässigkeit sowie Proben, deren Permeabilität druckabhängig mit unterschiedlichem Manteldruck erfasst wurde, werden mit dem Gradientenverfahren vermessen. Hierbei wird bei abgedichteter Mantelfläche auf der einen Seite ein konstanter Druck angelegt und auf der anderen Seite der Druckanstieg in einem kleinen Volumen hinter der Stirnfläche der Probe erfasst. Die Permeabilität errechnet sich aus der zeitlichen Änderung des Drucks mit Hilfe eines nichtlinearen Gleichungssystems.

2.1.7 Halbach NMR-Messung

Auf dem Gebiet der gerätetechnischen Neuentwicklung wurde im Rahmen des Vorgängerprojektes (Phase 1, FKZ 0329985; vgl. Clauser et al., 2007) in Zusammenarbeit mit dem Institut für Technische Chemie und Makromolekulare Chemie der RWTH Aachen ein mobiles NMR-(„Nuclear Magnetic Resonance“)-Instrument zur Bestimmung von Porosität und Porengrößen an intakten Bohrkernen entwickelt. Dieser so genannte Halbach-Magnet (Abbildung 2.10) basiert auf der Entwicklung von einer speziellen kreisförmigen Anordnung von Permanentmagneten (Halbach, 1985). Eine genaue Beschreibung dieses Messinstruments findet sich in Anferova et al. (2004). Die Vorteil dieses Gerätes gegenüber anderen Methoden sind die kleine Größe, das geringe Gewicht und die Möglich-

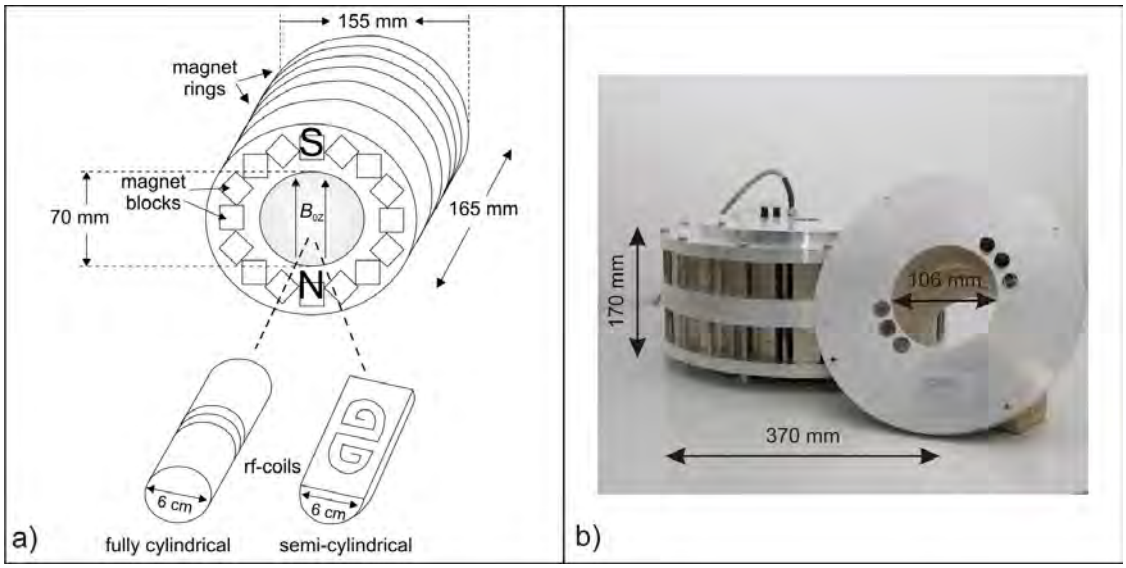


Abbildung 2.10: *a) Schematischer Aufbau des Prototypen des Halbach-Magnet Scanners mit zwei verschiedenen Spulen zur Untersuchung von zylindrischen bzw. halbierten Bohrkernen mit einem Durchmesser bis 60 mm (aus Arnold et al., 2006); b) Abbildung des im Rahmen des Projektes entwickelten und verwendeten Halbach-Magneten.*

keit, das Instrument mobil einzusetzen. Dadurch können beispielsweise bergfeuchte Bohrkerne vor Ort bzw. im Labor ohne weitere Präparationsmaßnahmen untersucht werden. Mit anderen, üblicherweise verwendeten Geräte sind nur Messungen an Bohrklein bzw. aus Kernen herausgebohrten Plugs möglich (Mirotchnik et al., 2004).

Abbildung 2.10a zeigt den prinzipiellen Aufbau des Halbach-Magneten. Die angegebenen Maße entsprechen denen eines Prototypen. Abbildung 2.10b stellt den neu gebauten Halbach-Magneten aus der ersten Projektphase dar. Der Magnet hat im Gegensatz zu früheren Prototypen einen größeren nutzbaren Durchmesser von 106 mm und ist damit im Prinzip vielfältiger einsetzbar.

Der Bohrkern wird von drei Magnetringen umgeben. Jeder Ring besteht aus 16 rechteckigen Stabmagneten aus FeNdB. Der Innendurchmesser beträgt 170 mm, der Außendurchmesser 370 mm. Aufgrund des großen Volumens stellt der Magnet besondere Anforderungen an die Leistungselektronik, die Leistungen im Bereich von einigen KW im Radiofrequenzbereich als sehr kurzen Puls mit wenigen Mikrosekunden Dauer abgeben muss. Um die Möglichkeiten des Magneten voll ausnutzen zu können, wurde in der abgeschlossenen zweiten Projektphase ein speziell konstruierter Vorverstärker und ein darauf abgestimmtes Akquisitionssystem aufgebaut, dass es erlaubt, auch kürzere Messzeiten und damit geringere Porositäten zu realisieren.

Der Halbach-Magnet kann für verschiedene Probengrößen konfiguriert werden. Hierfür ist es möglich, die Spulen zur Erzeugung der Radiofrequenzen (r_f, vgl. Abbildung 2.10a) auszutauschen. Die auf die Probengeometrien des Projektes ausgelegte flexibel einsetzbare r_f-Spule ermöglicht die Messung an Proben mit Durchmessern zwischen 20 mm und 80 mm. Der Magnet erzeugt ein Magnetfeld B_0 von 0,1 T entsprechend einer Resonanzfrequenz von 3,9 Hz. Innerhalb des sensitiven Volumens von 20 mm (Durchmesser) x 10 mm (Länge) ist der Gradient des Magnetfeldes 0,05 T m^{-1}.

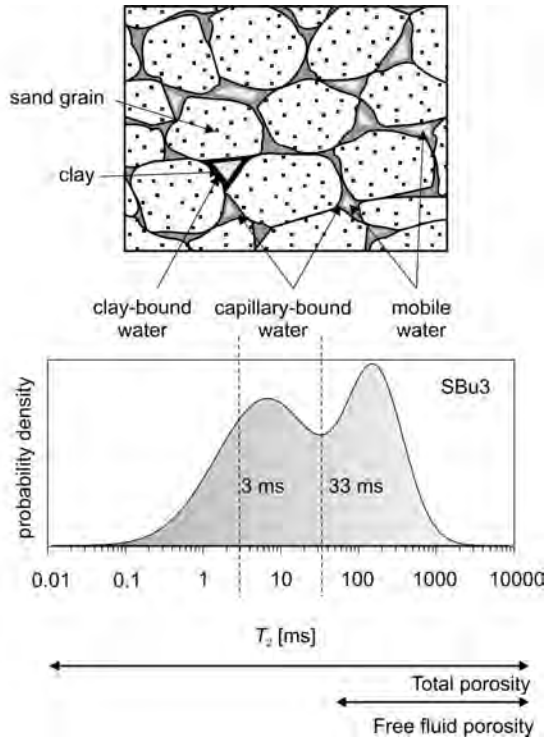


Abbildung 2.11: *T_2-Verteilung in einem wassergesättigten Sandstein zur Identifizierung von Fluidkomponenten (aus Arnold, 2007). Mobiles Wasser (hellgrau) verursacht größere T_2-Werte, während die kleinere T_2-Werte kapillar- und tongebundenes Wasser anzeigen (nach Allen et al., 2000).*

Messprinzip

Im Folgenden wird kurz auf die Prinzipien der NMR-Messung eingegangen. Für eine genaue Beschreibung sei auf Arnold et al. (2006) verwiesen.

Die bei der NMR gemessenen transversen Relaxationszeiten T_i (i = 1;2) können direkt mit der Porosität in Zusammenhang gebracht werden. Bei Sandsteinen wird üblicherweise die gesamte NMR-Porosität in drei Komponenten aufgeteilt: (1) Die „free-fluid“ Porosität mit langen T_2-Zeiten ($T_2 >$ 33 ms), (2) in Kapillaren gebundenes Fluid (3 ms $< T_2 <$ 33 ms) und (3) das schnell relaxierende, tongebundene Fluid mit Werten unter 3 ms (Allen et al., 2000). Abbildung 2.11 zeigt als Beispiel eine T_2-Messung für eine Sandsteinprobe. Die bimodale Verteilung von T_2 kann in kapillar- und tongebundenes (kleine Poren) auf der einen Seite und in eine bewegliche Komponente auf der anderen Seite (größere Poren) aufgeteilt werden.

Bestimmung der Porenradienverteilung

Niederfeld-NMR kann wesentliche Informationen zur Größenverteilung von fluidgefüllten Poren in Gesteinskörpern liefern. T_i- Messungen werden über die Porengröße hinaus auch durch die Inhomogenität des stationären Magnetfeldes und dem internen Gradienten beeinflusst, welche eine Reduzierung der Relaxationszeit hervorrufen. Diese internen Gradienten entstehen durch die Differenz zwischen der magnetischen Suszeptibilität der Mineraloberfläche und des Porenfluids eines Gesteins. Da der interne Feldgradient proportional zu der angelegten Feldstärke ist, werden kleine magnetische Fel-

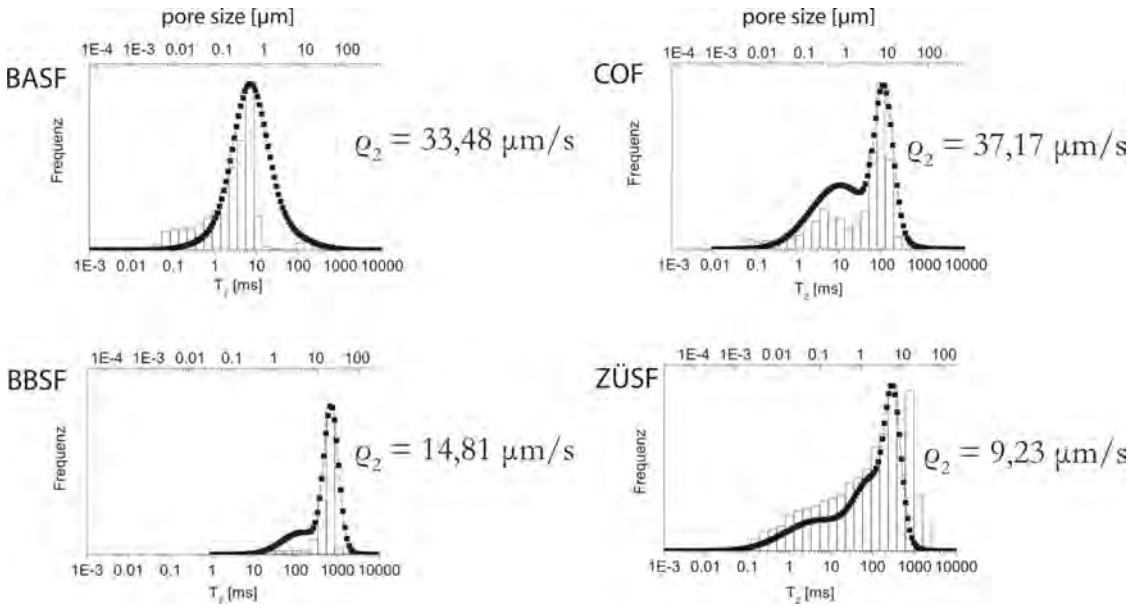


Abbildung 2.12: *Vergleich zwischen T_2- Verteilungen mittels NMR (Punkte) und Porenradienverteilungen aus der Quecksilberporosimetrie (Balken) am Beispiel von vier Sandsteinen (aus Fehr, 2007). Für die Berechnung der Oberflächenrelaxivität ρ_2 werden die Maxima beider Verteilungen in Einklang gebracht.*

der bevorzugt für Gesteinsuntersuchungen verwendet. In vorangegangenen Untersuchungen mit dem Halbach-Magneten wurde von Anferova et al. (2004) gezeigt, dass T_i-Relaxationmessungen kaum durch vom äußeren, stationären Magnetfeld hervorgerufene Diffusionsprozesse beeinflusst werden.

Abbildung 2.12 zeigt, dass die mit dem Halbach-Magneten erfasste T_2- Verteilung (Punkte) der mittels Quecksilberporosimetrie ermittelten Porengrößenverteilung als unabhängige Vergleichsmessung (Balken) gleicht. Die Verteilung der Relaxationszeit hängt von der Porengrößenverteilung ab. Das liegt darin begründet, dass die Relaxationszeit durch den Parameter der Oberflächenrelaxivität ρ_i proportional zur Porengröße ist:

$$\frac{1}{T_i} = \frac{1}{T_B} + \rho_i \frac{S}{V}. \tag{2.8}$$

ρ_i stellt die Stärke der Relaxation auf der Porenwand dar und hat die Dimension m s^{-1}. S/V gibt das Verhältnis der Oberfläche zum Volumen wieder und entspricht *a/r*. *a* kennzeichnet die Porengeometrie und hat den Wert 3 bei kugelförmigen Proben und 2 bei zylindrischen Poren. Entsprechend kann mit der Korrelation zwischen der T_i-Verteilung mit der Porenradienverteilung die Oberflächenrelaxivität bestimmt werden:

$$\rho_{Ti} = \frac{r_{gm}}{a} \frac{T_{igm} T_B}{T_B - T_{igm}}, \tag{2.9}$$

mit i = 1;2. Um die Oberflächenrelaxivität zu berechnen, werden die Ergebnisse aus Quecksilberporosimetrie und NMR miteinander verglichen, indem die Maxima aus beiden Verteilungen miteinander in Einklang gebracht werden (Abbildung 2.12).

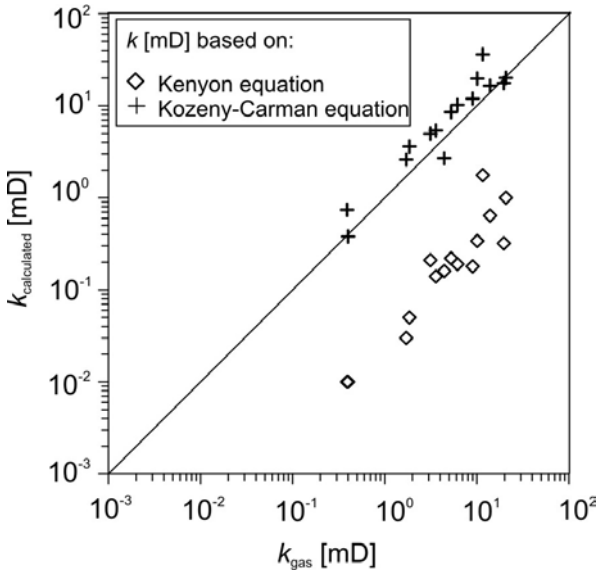


Abbildung 2.13: *Korrelationen der verschiedenartig bestimmten Permeabilitäten an einer gering porösen Sandstein-Probe (aus Arnold, 2007), (1) nach der Standardmethode (Kenyon et al., 1988) und (2) nach Kozeny-Carman (Carman, 1956), mit korrigierten T_{2gm}-Werten.*

Bestimmung der Permeabilität

Für typische Reservoir-Gesteine mit höheren Porositäten kann die Permeabilität k_{NMR} nach Seevers (1966) berechnet werden:

$$k_{NMR} = bT_{2gm}^{n}\phi^{m}, \tag{2.10}$$

berechnet werden. Dabei ist T_{igm} das geometrische Mittel der T_i-Verteilung. Die Konstante b hängt von der Oberflächenrelaxivität ab und wird empirisch bestimmt. Geläufige Werte für Sandsteine sind z.B. $a = 4, m = 2, n = 4$ (Kenyon et al., 1988).

Bei kleineren Porositäten und kleineren Porenradien nehmen Diffusionseffekte aufgrund von internen Gradienten des Magnetfeldes zu, so dass die Permeabilitäten nach Gleichung 2.10 unterschätzt werden. Hierfür müssen die T_{igm}-Werte korrigiert werden, um dann die Permeabilität nach Kozeny-Carman (Carman, 1956)zu bestimmen (vgl. Abbildung 2.13):

$$k = \frac{1}{8} \cdot \left(\frac{0.7\Phi}{0.6}\right)^{2,3} \cdot \left(a \cdot \varrho_i \cdot T_{igm}\right)^{2} . \tag{2.11}$$

Diese Vorgehensweise wurde aus Arnold (2007) übernommen und für dieses Projekt modifiziert.

2.2 Bohrlochgeophysikalische Methoden und Interpretationsverfahren

2.2.1 Vorgehensweise

Der Teilbereich zur Auswertung bohrlochgeophysikalischer Messungen gliedert sich in folgende Arbeitsschritte:

- Recherche und Zusammenstellung der vorhandenen Daten
  - Sichtung des Datenbestandes (Log- und Kerndaten) aus verschiedenen Bohrungen.
  - Auswahl der Bohrungen in Absprache mit dem Auftraggeber.
- Datenkompilation und Qualitätskontrolle
  - Einscannen und Digitalisierung (LAS-Format) von analog vorliegenden Daten.
  - Überführung der digitalen Datensätze in Auswerteprogramme zur Interpretation von Bohrlochmessdaten
  - Qualitätskontrolle der Bohrlochmessdaten mit Teufenkontrolle/Teufenkorrektur zwischen den einzelnen geloggten Abschnitten sowie den jeweiligen Messdurchgängen.
  - Überprüfung der Messungen auf fehlerhafte Daten und Artefakte (z.B. durch Bohrlocherweiterungen) und Bereinigung des Datensatzes.
  - Zusammenführung der einzelnen Messserien zu Composite-Logs (spleißen).
- Faziesanalyse der Bohrlochmessdaten.
  - Petrophysikalische Charakterisierung der auftretenden Hauptgesteinstypen
  - Klassifizierung der auftretenden lithologischen Einheiten in ausgewählten Eichstrecken durch Zuordnung von spezifischen Merkmalskombinationen der Log-Antwortsignale
  - Rekonstruktion der erbohrten Lithologie anhand der Logging-Daten.
  - Geologische Bewertung der Ergebnisse, Korrelationen zwischen Bohrprofilen und Abgrenzung lithostratigraphischer Einheiten.

2.2.2 Qualitätskontrolle bohrlochgeophysikalischer Messdaten

Bei der Zusammenstellung der Messdaten wurde nach folgendem Schema vorgegangen:

Von allen relevanten Bohrungen werden vorhandenen Papierakten mit einem Endlosscanner eingelesen. Hierzu zählen sowohl Bohrlochmessungen als auch Bohrakten mit Kernansprachen und geologischen Profilen. Die Bohrakten werden als pdf-Datei abgelegt. Die digitalisierten Messdaten werden auf ihre Relevanz geprüft und zur weiteren Verarbeitung markiert. Die relevanten Bilddateien werden mit der NeuraLog-Software in ASCII-Dateien überführt. Die Ergebnisse werden nochmals überprüft, um Flüchtigkeitsfehler zu eliminieren.

Die digitalisierten Bohrlochmessdaten werden in ein Logauswertesystem (Geoframe, Geobase, Interactive Petrophysics) importiert und dort zu einem Composite-Log zusammengestellt. Dabei findet eine allgemeine Qualitätskontrolle der Logs sowie eine Überprüfung der Messdaten auf Teufenversätze zwischen einzelnen Messfahrten statt.

Einige Bohrlochmessungen werden durch den Einfluss der Bohrlochumgebung (Temperatur, Bohrlochdurchmesser, Dichte und Typ der Spülung) beeinflusst, wobei in der Regel die bohrungsbedingten Korrekturen direkt nach der Messung von der Servicefirma vorgenommen werden. Die im Rahmen der Beauftragung vorgenommene Qualitätskontrolle konzentriert sich auf das Auffinden und Eliminieren von fehlerhaften Messwerten, wie sie zum Beispiel durch elektronische Störungen und Bohrlochrandausbrüche auftreten können. Weiterhin werden die Logging-Daten auf systematische Abweichungen im Messbereich zwischen einzelnen Messfahrten hin kontrolliert. Solche Abweichungen können z.B. auftreten, wenn die Korrektur auf den Bohrlochdurchmesser nicht korrekt durchgeführt wurde oder Logs aus verrohrten Bohrabschnitten vorliegen. Zudem werden die Daten auf Teufenversätze kontrolliert, die zwischen einzelnen Messeinfahrten auftreten können. Zur weiteren Bearbeitung werden alle Kurven auf eine gemeinsame Bezugskurve korrigiert.

Die Explorationsbohrungen in der westlichen und östlichen Molasse wurden in der Regel in mehreren Bohrabschnitten niedergebracht. Nach jeder Bohrphase wurde standardmäßig ein Bohrlochmessprogramm in der offenen Bohrung durchgeführt, bevor die Verrohrung für diesen Abschnitt eingebracht und mit einem kleineren Bohrdurchmesser weiter gebohrt wurde. In der westlichen und östlichen Molasse liegen die Bohrabschnitte meist an der Basis der Oberen Süßwassermolasse und an der Tertiärbasis. Um ein durchgängiges Messprofil zu erhalten, werden die Logs aus den verschiedenen Bohrabschnitten am Schluss zusammengeführt (gespleißt). Die Daten liegen dann als Composite-Log vor und können weiter ausgewertet und interpretiert werden.

2.2.3 Faziesanalyse der Bohrlochmessdaten

Ziel der Untersuchungen war die lithologische Differenzierung der ausgewählten Bohrprofile in Hinblick auf die auftretenden Hauptgesteinstypen sowie die Abgrenzung und Korrelation stratigraphischer Einheiten zwischen den Bohrungen. Hierzu wurde nach folgendem Schema verfahren:

Zusammenstellung geologischer Informationen
Zunächst wurden die Bohrberichte recherchiert und alle verfügbaren Informationen zu den auftretenden Gesteinstypen und der stratigraphischen Abfolge zusammengetragen. Hier ist zu erwähnen, dass die Bohransprache im Wesentlichen auf Bohrkleinuntersuchungen beruht, da in den Bohrungen nur vereinzelt Kerne gezogen wurden. In Abhängigkeit von Alter und Bearbeiter wurden die Gesteinsbeschreibungen und stratigraphischen Abgrenzungen unterschiedlich detailliert vorgenommen. In den meisten Bohrungen wurde das Bohrprofil nur gemäß der stratigraphischen Haupteinheiten (Serien) untergliedert. In einigen Bohrungen erfolgte zudem eine Differenzierung nach stratigraphischen Stufen und Unterstufen.

Lithologische Klassifizierung der Logs
Im zweiten Schritt wurden die geologischen Informationen mit den bohrlochgeophysikalischen Messungen verknüpft. Die stratigraphische Untergliederung wurde vereinheitlicht, die stratigraphischen Grenzen den Logs zugeordnet und als Datensatz in die Logauswerteprogramme eingespeichert. Die geologischen Bohrberichte wurden mit den Bohrlochmessdaten korreliert. Anhand von Cross-Plots und statistischen Analysen erfolgte eine Klassifizierung der auftretenden Hauptgesteinstypen.

Lithologierekonstruktionen und stratigraphische Korrelation
Aufbauend auf der vorgenommenen Klassifizierung wurden für die betrachteten Bohrungen die Gesteinstypen abgegrenzt und eine Rekonstruktion der Bohrprofile vorgenommen. Die verschiedenen

Bohrprofile wurden miteinander verglichen und eine detaillierte Korrelation zwischen den Bohrungen im Hinblick auf stratigraphische Stufen und Unterstufen vorgenommen. Dies bildet die Basis für die Erfassung fazieller Veränderungen innerhalb der stratigraphischen Einheiten.

2.2.4 Theorie zur lithologischen Interpretation

Tabelle 2.2: *Zusammenstellung von Log-Antworten für wichtige gesteinsbildende Minerale.*

Mineral	**RHOB** (kg m^{-3})	**DT** (μs m^{-1})	**U** (-)	**NPHI** (-)	**GR** (gAPI)
Albit	2600	161	5,60	-0,010	8
Anhydrit	2980	164	14,95	-0,020	5
Biotit	3040	197	21,60	0,134	127
Calcit	2710	157	14,10	0,000	11
Dolomit	2847	143	91,00	0,018	8
Chlorit	2810	262	21,70	0,583	74
Halit	2040	220	9,70	-0,030	0
Gips	2350	171	9,46	0,540	0
Glaukonit	2650	295	16,50	0,410	150
Illit	2610	295	9,90	0,352	150
Kaolinit	2550	262	5,10	0,507	150
Orthoklas	2570	197	8,70	-0,010	170
Muskovit	2850	174	11,50	0,240	130
Montmorillonit	2020	394	4,40	0,650	97
Quarz	2650	182	5,00	-0,060	30
Pyrit	4990	128	82,06	0,080	0
Siderit	3880	44	71,60	0,184	0

Mit Hilfe der Interpretation geophysikalischer Bohrlochmessungen ist es möglich, verschiedene Gesteine durch ihre unterschiedlichen Log-Antworten zu charakterisieren. Dies kann qualitativ geschehen, indem Änderungen in der Log-Antwort als lithologische bzw. stratigraphische Wechsel aufgefasst werden. Darüber hinaus ist aber auch eine quantitative Analyse möglich. Zum Beispiel lassen sich durch eine statistische Analyse verschiedene Fazies unterscheiden, und man erhält ein Elektrofazies-Log (Serra, 1986). Da die Korrelation zwischen Fazies und physikalischen Gesteinseigenschaften nicht eindeutig ist, wurde hier die lithologische Interpretation von Logging-Daten benutzt. Diese beruht darauf, dass jeder Gesteinstyp und jedes Porenfluid einen charakteristischen Antwortwert im Log besitzt. Man nimmt an, dass jedes Gestein aus N Komponenten (Gesteine oder Fluide) mit Volumenanteil V_i *(i=1,..,N)* besteht. Jeder Gesteins- oder Fluidtyp i besitzt für die Messung j eine charakteristische Antwort R_i^j. Diese verschiedenen Antworten lassen sich zum Beispiel durch Labormessungen bestimmen oder der Literatur entnehmen. Eine Zusammenstellung der Log-Antworten für einige Messungen und Minerale ist in Tabelle 2.2 gegeben. Ein Messwert im Bohrloch resultiert dann aus der linearen Superposition dieser Log-Antworten, gewichtet mit ihrem jeweiligen Volumenanteil. Es ergibt sich für die Messung R^j

$$R^j = \sum_i V_i R_i^j \qquad 1 = \sum_i^N V_i; \tag{2.12}$$

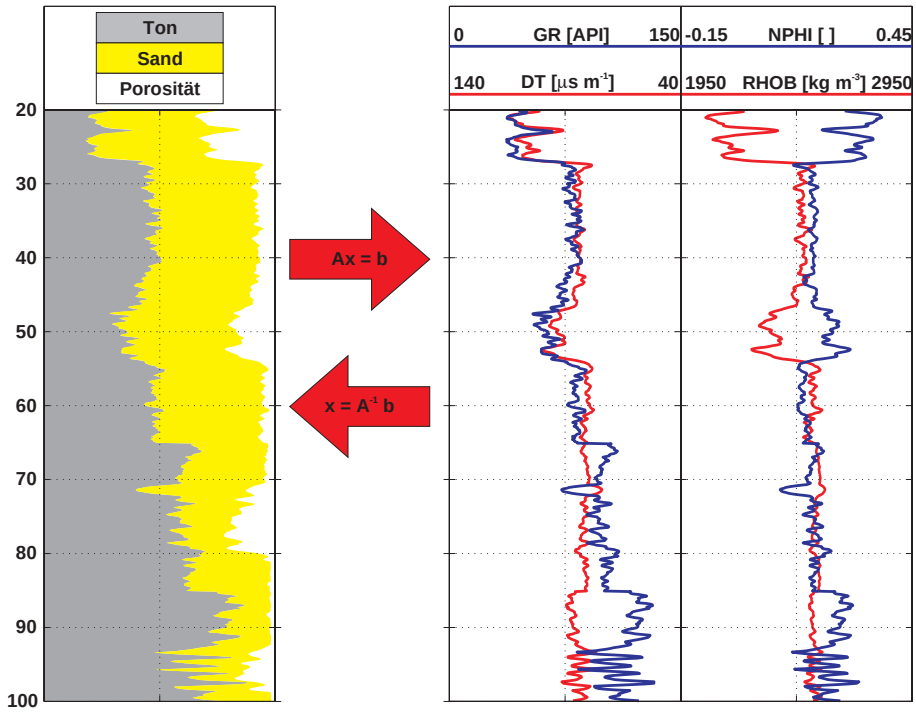


Abbildung 2.14: *Synthetisches Litho-Log und Log-Antworten für Messungen der akustischen Wellenlaufzeit DT, natürlichen Gammastrahlung GR, Neutronenporosität NPHI und gesättigten Gesamtdichte RHOB (aus Clauser et al., 2007). Die Lösung des Vorwärtsproblems erfolgt durch Matrix-Multiplikation der Antwortfunktion* $\mathbf{A}$ *mit den relativen Volumenanteilen, der Umkehraufgabe durch Multiplikation von Gleichung 2.13 mit der Inversion der Antwort-Matrix* $\mathbf{A}$*.*

in Matrix-Schreibweise:

$$\mathbf{R} = \mathbf{AV}; \tag{2.13}$$

mit

$$\mathbf{V} = [V_1, \ldots, V_n]^T \qquad \mathbf{R} = [R^1, \ldots, R^J]^T \qquad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} R_1^1 & \cdots & R_I^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_1^J & \cdots & R_I^J \end{bmatrix}. \tag{2.14}$$

Für jeden Tiefenpunkt lässt sich eine Log-Antwort aus Gleichung 2.13 berechnen. Umgekehrt kann man aber auch die Volumenanteile berechnen, indem man diese Gleichung invertiert. Sind mehr Logs als Komponenten vorhanden, ist das Problem überbestimmt und kann nur im Sinne der Methode der kleinsten Quadrate gelöst werden. Abbildung 2.14 zeigt ein synthetisches Beispiel eines Tiefenprofils. Rechts sind vier Messungen dargestellt. Auf der linken Seite ist das darauf basierende lithologische Modell dargestellt. In diesem Fall wurden die drei Komponenten Sand, Ton und wassergefüllter Porenraum benutzt. Da die Summe der relativen Volumenanteile immer eins ergeben muss, ist die Anzahl der unabhängigen Komponenten in diesem Fall jedoch nur gleich zwei. Das Beispiel zeigt, dass DT und GR tendenziell eher die Sand/Ton-Variationen widerspiegeln, NPHI und RHOB dafür empfindlicher auf die Porosität reagieren. In der Praxis hängen Log-Antworten tatsächlich auch noch von anderen Parametern ab, zum Beispiel der Temperatur oder dem Spülungswiderstand. Außerdem sind Log-Antworten in der Realität nicht immer linear.

Tabelle 2.3: *Fehlerquellen für die Loginterpretation.*

Fehler	Typ	Ursache
Sondenmessfehler	statistisch	Messungenauigkeit der verwendeten Sonden.
Umgebungskorrektur	systematisch	Unvollständige Korrektur der Umgebungsbedingungen, z.B. Bohrlochdurchmesser, Temperatur, Salinität, Einfluss der gespülten Zone.
Schultereffekt	systematisch	Die Sonde integriert über einen gewissen Teufenbereich. Messwerte sind über diesen Bereich verschmiert.
Fehler im Sondenmodell	systematisch	Das Modell, mit dem die Log-Antwort einer Sonde aus den effektiven Gesteinseigenschaften berechnet wird, spiegelt die Wirklichkeit nicht genau wider.
Fehler im Mischungsmodell	systematisch	Das Modell, mit dem die effektiven Gesteinseigenschaften aus der Gesteinszusammensetzung berechnet werden, spiegelt die Realität nicht genau wider.
Fehler in der Matrix-Wärmleitfähigkeit	systematisch	Die Matrix-Werte mit der die effektiven Gesteinseigenschaften aus der Gesteinszusammensetzung berechnet werden, spiegeln die Realität nicht genau wider.

2.2.5 Unsicherheit in der Methodik

Im Folgenden werden mögliche Fehlerquellen diskutiert, die bei der Berechnung thermischer Eigenschaften aus Logging-Daten auftreten können: Sie können zunächst bei der Berechnung der mineralogischen Zusammensetzung des Gesteins aus Logging-Daten entstehen, aber auch bei der darauf folgenden Berechnung der Wärmeleitfähigkeit aus der lithologischen Zusammensetzung. Tabelle 2.3 fasst die unterschiedlichen Fehlerquellen und -typen zusammen.

Messfehler der Sonden. Angaben zu Messfehlern von Loggingsonden sind in der Literatur nur schwer zu finden. Außerdem hängt die tatsächliche Genauigkeit auch immer von Parametern wie Bohrlochumgebung und Logginggeschwindigkeit ab. Für Temperaturlogs werden bei einem Vergleichsexperiment verschiedener Sonden (Wisian et al., 1998) absolute Fehler von 0.4 K in der Temperatur und 1 K km^{-1}–10K km^{-1} für den Temperaturgradienten berichtet. Vergleiche mit Kerndichten ergeben für Dichtetools durchschnittliche Abweichungen von 30 kg m^{-3} (Pickell und Heacock, 1960). Genaue Angaben sind also schwierig, aber es ist anzunehmen, dass Einzelwerte von Loggingsonden mit Messfehlern von 5 % bis 10 % behaftet sind.

Umgebungskorrektur. Werte für die Umgebungskorrektur können Tabellenwerken der Sondenhersteller entnommen werden (z. B. Anonym, 1989). Hauptsächlich relevant sind in unserem Fall die Korrektur des Bohrlochdurchmessers für Gamma-Ray- und Dichte-Sonden. Der häufigste Fall ist ein tatsächlich zu großer Durchmesser der Bohrung. Dies führt zu einer Absenkung der real gemessenen Werte. Für die Gamma-Ray-Sonde waren Korrekturen von maximal 15 gAPI nötig, für die Dichte-Sonde maximal 30 kg m^{-3}. Unter der Annahme, dass 30 % dieser Korrektur fehlerhaft angebracht worden sind, bleibt maximal ein systematischer Fehler von 10 gAPI bzw. 10 kg m^{-3}.

Schultereffekt. Dieser Effekt erzeugt eine systematische Variation der Loggingwerte beim Durchfahren einer Schichtgrenze. Bei dünnen Schichten führt dieser Effekt dazu, dass die tatsächliche Log-Antwort der Schicht nicht erreicht wird. Bei der Korrelation von Kern- mit Logmessungen muss diese

unterschiedliche räumliche Auflösung betrachtet werden. Da in dieser Studie jedoch Integrale über größere Tiefenintervalle gebildet werden, kann diese Fehlerquelle vernachlässigt werden.

Fehler des Mischungsmodells. Für manche Sonden, zum Beispiel bei der Dichtesonde, ist die Antwort einer Mischung aus Mineralen über ein Mischungsmodell exakt zu berechnen. Insbesondere für die spezifische akustische Laufzeit und die Wärmeleitfähigkeit existieren nur empirische Gleichungen. Eine genaue Abschätzung dieses Fehlers ist nicht möglich, da man das in Wirklichkeit zutreffende Mischungsgesetz nicht kennt. Normalerweise stellt das benutzte Modell bereits die beste, die Messdaten optimal anpassende Approximation der Wirklichkeit dar. Es gibt zwar theoretische obere und untere Grenzen (Hashin und Shtrikman, 1962), diese sind aber in der Praxis meist nicht genau genug um als Schätzung der effektiven Eigenschaften zu dienen. Für die Wärmeleitfähigkeit wird das geometrische Mischungsgesetz verwendet. Dieses hat sich als tauglich für die Berechnung effektiver Wärmeleitfähigkeiten an gesättigten Gesteinen erwiesen (z. B. Hartmann et al., 2005).

Matrixwärmeleitfähigkeit Die exakte Matrixwärmeleitfähigkeit ist auch mit Unsicherheit behaftet. Zum einen müssen die Werte auf 0 % Porosität extrapoliert werden, zum anderen besteht kein Gestein zu 100 % aus einem Mineral, dessen Wärmeleitfähigkeit bekannt ist. Auch wenn dies annähernd der Fall ist, hat die unterschiedliche Kornverteilung einen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit.

Kapitel 3

Tertiär der Niederrheinischen Bucht

3.1 Geologische Übersicht des Tertiärs der Niederrheinischen Bucht

In tektonischer Hinsicht zeichnet sich das Senkungsfeld der Niederrheinischen Bucht durch eine intensive tertiäre und bis heute aktive Schollentektonik aus. Hauptsächlich NW-SE streichende Störungszonen gliedern es in langgestreckte Horste und Gräben (Abbildungen 3.1 und 3.2). Das Fundament der Niederrheinischen Bucht bilden variszisch geprägte Gesteine des Devons und des Karbons.

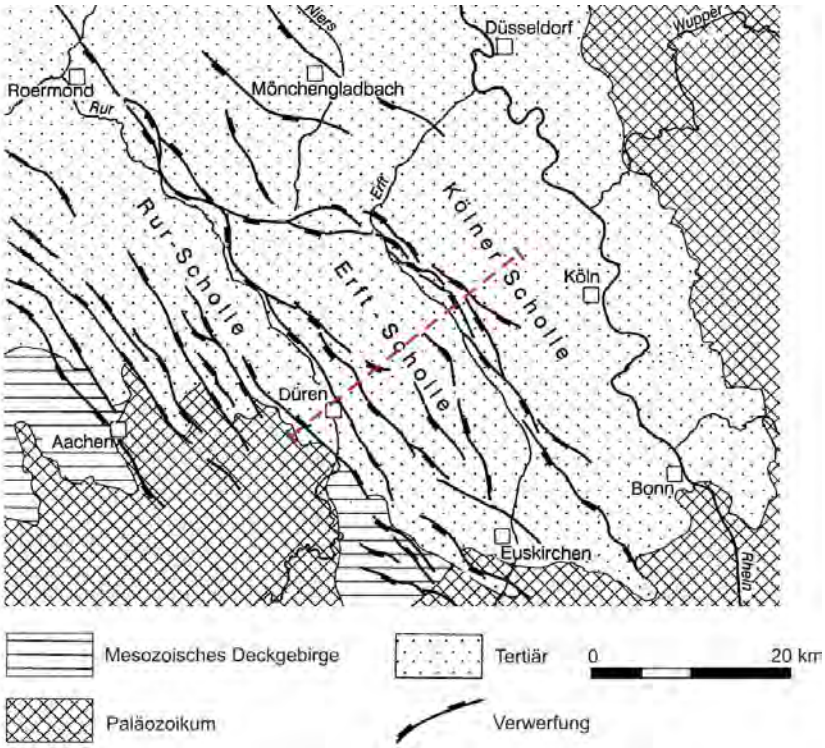


Abbildung 3.1: *Tektonische Übersichtskarte der Niederrheinischen Bucht ohne Quartärbedeckung; aus Walter (1995), modifiziert nach Anonym (1988). Die rote Linie stellt die Profillinie des geologischen Profils in Abbildung 3.2 dar.*

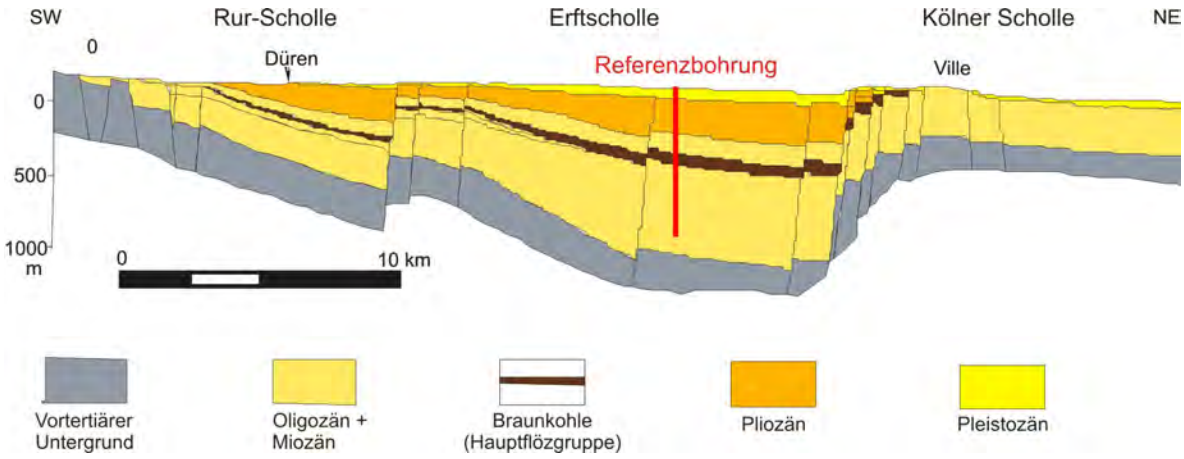


Abbildung 3.2: *Geologisches Profil durch die Niederrheinische Bucht (vgl. Abbildung 3.1); aus Walter (1995), modifiziert nach Anonym (1988).*

Die Abfolge der tertiär- und quartärzeitlichen (känozoischen) Lockergesteinsschichten in der Niederrheinischen Bucht (Abbildung 3.3) sind von einem stetigen Wechsel kontinental geprägter klastischer Sedimente mit eingelagerten Braunkohleflözen und marinen Ablagerungen in flachen Meeresbereichen gekennzeichnet (Becker und Asmus, 2005). Die marinen Sedimente bestehen überwiegend aus Fein- bis Mittelsanden. Die terrestrischen Sedimente bilden ein breites Korngrößenspektrum von Tonen über Schluffe und Sande bis hin zu grobklastischen Rimmen-Ablagerungen und Flusskiesen.

Die känozoische Sedimentation in der Niederrheinischen Bucht wird durch weit gespannte Absenkungsvorgänge gesteuert, die sich aus dem Bereich des Nordseebeckens kommend nach Südosten bis in das südliche Niederrheingebiet ausdehnten. Auch durch Schwankungen in den Meeresspiegelhöhen der von Nordwesten mehrfach vordringenden und sich wieder zurückziehenden Nordsee hatten sich die Küstenlinie und damit das Ablagerungsmilieu mit Meer, Fluss- und Seenlandschaften wiederholt verändert. Die sedimentierten Lockergesteine bestehen überwiegend aus Verwitterungsprodukten des Rheinischen Schiefergebirges (Becker und Asmus, 2005).

Zu Beginn des Tertiärs blieb das Gebiet der Niederheinischen Bucht weitestgehend sedimentfrei (Walter, 1995). Ab dem **mittleren Oligozän** begann das Gebiet zwischen Eifel und Rechtsrheinischem Schiefergebirge einzusinken, und das Meer drang aus nordwestlicher Richtung bis in den Bonner Raum vor (**oberes Oligozän**). Zwischen Bonn und Köln lagerten sich erste Braunkohlesande ab (Kölner Schichten, Unterflözgruppe).

Im **Miozän** setzte die Regression der tertiären Nordsee aus der Niederrheinischen Bucht ein. Limnisch-fluviatile Sande, Kiese und Tone aus südlichen Liefergebieten bestimmten das weitere sedimentäre Geschehen. Wo sich weder marine klastische noch kontinentale Sedimente ausbreiteten, akkumulierten im subtropisch-warmen Klima des Miozäns und Pliozäns mehrere hundert Meter mächtige Torfschichten. Diese bilden heute die Grundlage ausgedehnter Braunkohle-Tagebaue.

Die tertiären Deckschichten der Braunkohle-Formation der Niederrheinischen Bucht umfassen Ablagerungen des höheren Miozäns und des Pliozäns. Sie bestehen aus einer Wechselfolge von Sanden und Kiesen mit Ton und auch mit Braunkohle (Oberflözgruppe) und spiegeln generell das Milieu eines marinen Deltas wider.

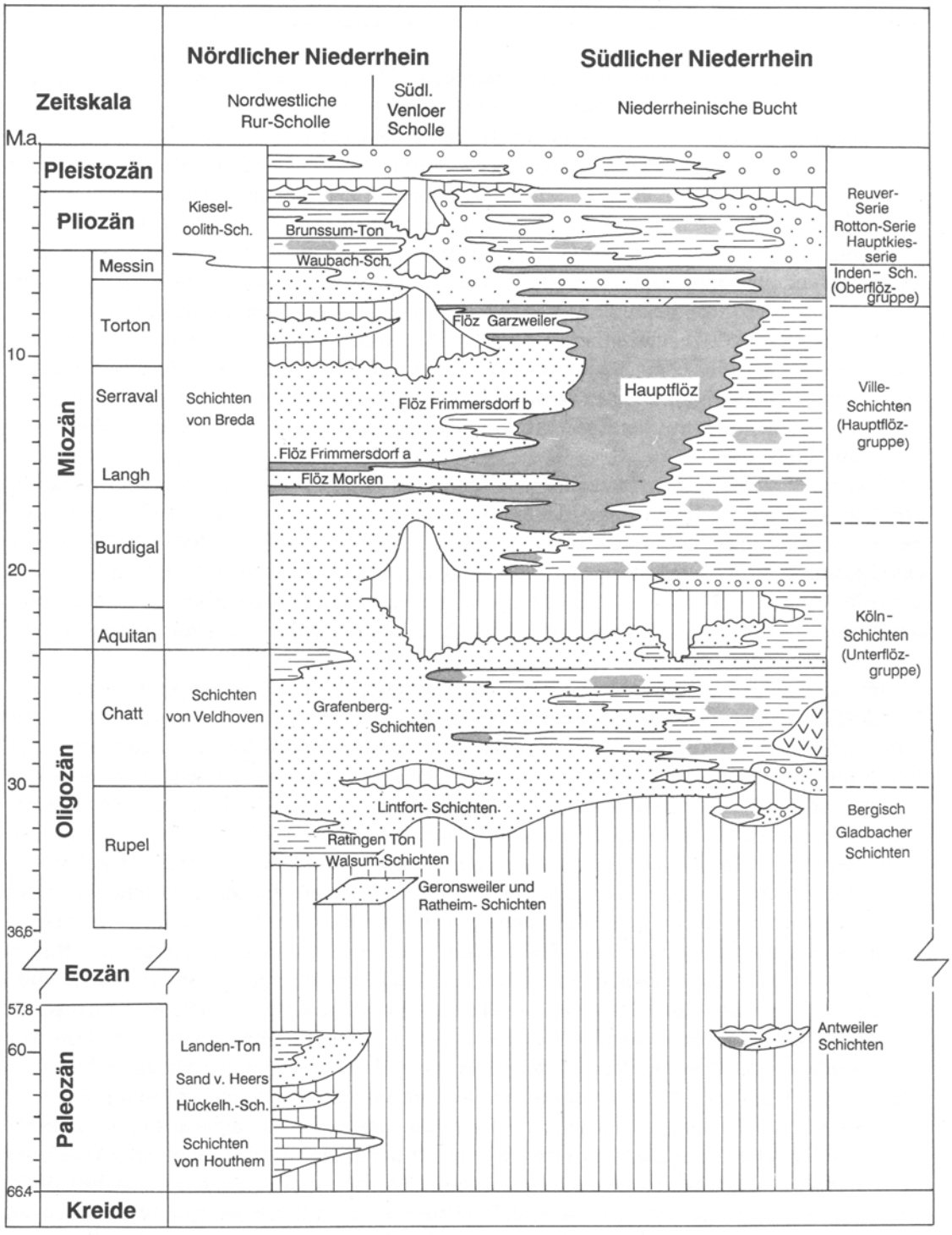


Abbildung 3.3: *Lithologie und stratigraphische Gliederung des Tertiärs der Niederrheinischen Bucht (nach Anonym, 1988).*

Das **Quartär** ist im Süden der Niederrheinischen Bucht überwiegend mit fluviatilen Sedimenten des

Abbildung 3.4: *Sedimentkerne (hier überwiegend Sand) aus der Erkundungsbohrung HU-873 in Plastik-Linern. Im Durchschnitt wurde etwa aus jedem achten Kernmeter ein Teilstück entnommen.*

Rhein-Maas-Flusssystems vertreten. Im Norden kommen die vom saalezeitlichen Inlandeis aufgepressten Stauchmoränen und dessen Schmelzwasserablagerungen hinzu. In weiten Teilen des Niederrheingebietes werden diese Schichten von äolischen Sedimenten überdeckt (Walter, 1995).

3.2 Probenahmeprogramm

Beginnend im März 2007 brachte die RWE Power AG am Rande des Tagebaus Hambach eine Erkundungsbohrung (HU-873) durch die tertiären Sequenzen der Erftscholle nieder. Mit einer Tiefe von 741 m reicht die Bohrung fast bis auf den paläozoischen Untergrund hinab und umfasst eine große Bandbreite der Schollensedimente in der Niederrheinischen Bucht. Das schwach verfestigte Gefüge der in den Archiven verfügbaren Bohrkerne aus dieser Epoche ist in der Regel durch den Feuchteverlust bei längerer Lagerung stark verändert und somit nicht mehr repräsentativ. Die Beprobung der frischen Bohrkerne mit Unterstützung der RWE Power AG stellte daher eine seltene Gelegenheit dar, quasi ungestörte und bergfeuchte Sedimente des Tertiärs untersuchen zu können.

Im Vergleich zu Proben aus dem Festgestein musste die Standard-Messprozedur (vgl. Abschnitt 2.1) modifiziert werden. Da die Proben meist Ton enthielten und beim Trocknungsvorgang verändert oder zerstört werden können, wurde die Wärmeleitfähigkeit im bergfeuchten Zustand gemessen. Das Messprogramm sah demnach wie folgt aus:

1. Längenmessung der Proben und Bezug zur Teufe im Bohrloch; fotografische Dokumentation.

2. Messung der Wärmeleitfähigkeit bei ausreichend bindigen Proben mit dem TC-Scanner, bei schwach bindigen Proben (Abbildung 3.4) mit der Vollraumlinienquelle (VLQ) des TeKa-Messgerätes (vgl. Abschnitt 2.1.1.

3. Entnahme einer möglichst wenig gestörten Probe mit Hilfe eines Ausstechzylinders (Innendurchmesser: 56 mm; Höhe: 40,6 mm; Ausstechvolumen V_{Zyl}: 100 cm^3) auf Höhe der Scanlinie des TC-Scanners bzw. aus dem Bereich der VLQ-Messung.

4. Bestimmung des Feuchtgewichts m_w der Probenmasse im Stechzylinder.

5. Trocknung des Probenmaterials im Stechzylinder ohne Ton bei 105 °C und bei Proben mit Ton bei 60 °C (zur Vermeidung der Ausscheidung von Kristallwasser und der Zerstörung der Kristallstruktur) bis zur Gewichtskonstanz.

6. Bestimmung des Trockengewichts m_d im Stechzylinder.

7. Bestimmung der Reindichte ρ_m mit dem Helium-Pyknometer

8. Ggf. Bestimmung der Trockenrohdichte ρ_d mit dem Feststoff-Pyknometer.

3.3 Gesteinsphysikalische Labormessungen

Für die Labormessungen wurden insgesamt 93 Kernproben sowie nicht bindige Teilstücke aus Kernmetern untersucht, an denen 210 Messungen der Wärmeleitfähigkeit sowie 145 Porositätsbestimmungen und 152 Pyknometermessungen zur Bestimmung der Matrixdichte ρ_m durchgeführt wurden. Weiter wurde an 14 Proben exemplarisch die spezifische Wärmekapazität erfasst. Aus den unter Abschnitt 3.2 erfassten Messgrößen berechnet sich die Trockenrohdichte ρ_d und die Porosität ϕ wie folgt:

$$\rho_d = \frac{m_d}{V_{Zyl}} \tag{3.1}$$

$$\phi = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_m} \tag{3.2}$$

Darüber hinaus lassen sich noch der Wassergehalt w und die Sättigungszahl S_r bestimmen:

$$w = \frac{m_w}{m_d} \tag{3.3}$$

$$S_r = \frac{\rho_d \cdot w}{\rho_w \cdot \phi} \tag{3.4}$$

Die Sättigungszahl gibt an, welcher Anteil des effektiven Porenraums mit Wasser gefüllt ist. An zwölf Proben eine quantitative Mineralbestimmung sowie eine Bestimmung der Anteile der Haupt- und Spurenelemente mittels Röntgendiffrakometrie (RDA), Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) und ergänzender Rietveldanalyse durchgeführt.

Zusätzlich zu den eigenen Messergebnissen stellte der Bohr- und Wasserbetrieb der RWE Power AG freundlicherweise die Kennwerte von 60 weiteren Bohrkernen zwischen einer Tiefe von 42 m und 562 m bereit, die in die Auswertung mit einbezogen wurden. Darüber hinaus standen uns die Informationen der makroskopischen Bemusterung der Bohrkerne nach DIN 4022 (1982) zur Verfügung, aus denen dm- und teilweise cm-genau die lithologische Beschreibung der einzelnen Kernabschnitte zu entnehmen ist.

Lithologisch bestehen die tertiären und quartären Lockersedimente der Niederrheinischen Bucht aus einer Wechselfolge von wasserdurchlässigen Schichten aus Sand und Kies sowie aus Wasser stauenden Schichten aus Ton, Schluff und Braunkohle. Die stratigraphische Gliederung der Lockergesteinsschichten erfolgt unter Verwendung von Kurzzeichen aus Zahlen und Zahlen-Buchstaben-Kombinationen (Tabelle 3.1) in Anlehnung an Schneider und Thiele (1965). Diese Einteilung erfolgte

Tabelle 3.1: *Gliederung der känozoischen Lockergesteinsschichten der Niederrheinischen Bucht, dargestellt als geohydrologisches Normalprofil (aus Becker und Asmus, 2005). Die rechte Spalte gibt die Kurzzeichen nach Schneider und Thiele (1965) wieder.*

Kanäozoikum	Quartär	Holozän			19A, 20
		Pleistozän			12-19
	Tertiär	Pliozän	Reuver-Serie	Reuverton C Reuverton B Reuverton A	11 10
			Rotton-Serie	Oberer Rotton Unterer Rotton	 9
			Hauptkies-Serie		8
		Miozän	Inden-Schichten (Oberflözgruppe)	Flöz Schophoven Flöz Kirchberg Flöz Friesheim	7
			Ville-Schichten (Hauptflözgruppe)	Flöz Garzweiler Flöz Frimmersdorf B Flöz Frimmersdorf A Flöz Morken I	6
			Köln-Schichten	Flöz Morken II Flöz Kerpen	5 A-D
		Miozän/Oligozän (Unterflöz-Gruppe)		Unterflöz I Unterflöz II Unterflöz III Unterflöz IV Unterflöz V	4 3 2 1 09 08 07 06B 06A 05B 05A
			Grafenberg-Schichten	Grafenberg-Schichten Lintfort-Schichten Ratingen-Schichten Walsum--Schichten Ratheim-Schichten	04B 04A 03 02 01
		Oligozän			
		Paläozän	Antweiler-Hückelhoven-Schichten		
Prätertiär					

zunächst für die Erftscholle und wurde später auf die gesamte Niederrheinische Bucht ausgedehnt. Die Einteilung basiert auf hydrogeologischen Gesichtspunkten (Grundwasserstauer/Grundwasserleiter) und erweist sich daher als Unterscheidungsmerkmal für petrophysikalische Eigenschaften als nicht zweckmäßig, ebenso wenig wie eine stratigraphische Einteilung nach geologischen Serien oder Stufen (Tabelle 3.1). Die Zuordnung der Lockersedimente erfolgte daher ausschließlich nach der Lithologie (Ton/Schluff, Sand und Braunkohle). Ton und Schluff wurden nach Augenschein nach dem mutmaßlichen Vorherrschen der größten Korngrößenfraktion unterteilt und sind ohne genaue Korngrößenanalyse nicht immer eindeutig zuzuordnen, weswegen sie zu einer Gruppe zusammengefasst wurden. Reine Braunkohleproben aus dem Hauptflöz konnten leider nicht in großem Umfang zur Verfügung gestellt werden, sodass die Messungen sich hier nur auf drei Einzelproben beziehen. Zudem war bei den Braunkohleproben die Handhabung schwierig (Wärmeleitfähigkeit an der Grenze des Messbereichs, Schrumpfung beim Trocknen), was unter anderem die Bestimmung der Porosität unmöglich machte.

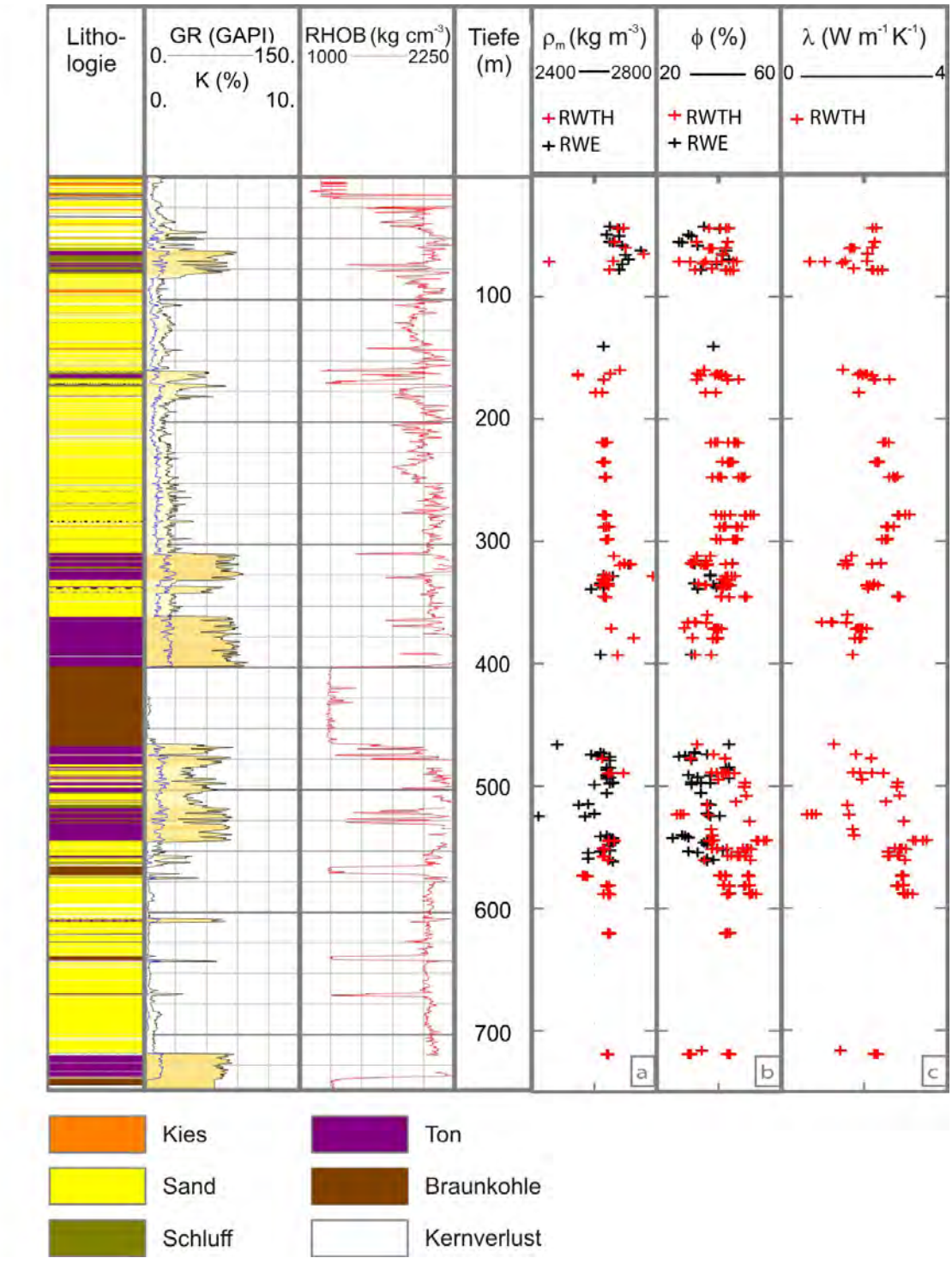


Abbildung 3.5: *Lithologisches Profil, bohrlochphysikalische Messungen (GR: Gamma-Ray; RHOB: Dichte) und gesteinsphysikalische Laboruntersuchungen (ρ_m: Reindichte; ϕ: Porosität, λ_f: Wärmeleitfähigkeit im bergfeuchten Zustand). Reindichte und Porosität wurden mittels Stechzylinder bzw. einer Ausstechform in Anlehnung an DIN 18125-1 (1997) jeweils in den Laboren der RWTH Aachen (rot) und der RWE Power AG (schwarz) ermittelt.*

Tabelle 3.2: *Zusammenfassende Übersicht und statistische Kennwerte zu den petrophysikalischen Eigenschaften aus Labormessungen an tertiären Lockersedimenten aus der Bohrung HU-873: Wärmeleitfähigkeit λ_f im bergfeuchten Zustand (entspricht annähernd wassergesättigtem Zustand; vgl. Text), Matrixdichte ρ_m und Porosität ϕ. Die Ergebnisse stammen aus eigenen Labormessungen (RWTH) sowie aus Labormessungen der RWE Power AG. Signifikante Unterschiede zwischen den beiden Laboratorien sind extra aufgeführt (vgl. Abbildung 3.7 und Text). n.b.: nicht bestimmbar.*

		N	Mittel-wert	Stabw.	Min.	25%-Quart.	Median	75%-Quart.	Max.
λ_f (W m^{-1} K^{-1})	Ton	72	1,88	0,33	1,28	1,64	1,81	2,06	2,96
	Schluff	15	2,25	0,20	1,86	2,19	2,24	2,41	2,61
	Sand	Gesamt: 123	2,76	0,33	1,82	2,53	2,86	2,99	3,50
		<245 m: 27	2,39	0,24	1,82	2,30	2,36	2,52	2,82
		>245 m: 96	2,86	0,27	2,07	2,80	2,90	3,02	3,50
	Braunkohle	3	0,70	0,05	0,66				0,75
ρ_m (kg m^{-3})	Ton	RWTH: 25	2668	122	2360	2642	2655	2682	3092
		RWE: 28	2613	61	2420	2590	2620	2640	2750
		Gesamt: 53	2639	98	2360	2610	2640	2663	3092
	Schluff	19	2666	49	2547	2645	2680	2697	2759
	Ton/Schluff	72	2646	88	2360	2620	2645	2682	3092
	Sand	139	2640	29	2368	2634	2645	2650	2694
	Braunkohle	4	1428	16	1412				1451
Φ (-)	Ton	49	0,337	0,054	0,219	0,300	0,330	0,378	0,430
	Schluff	19	0,331	0,048	0,270	0,300	0,316	0,353	0,430
	Ton/Schluff	68	0,335	0,052	0,219	0,300	0,322	0,372	0,430
	Sand	RWTH: 117	0,409	0,027	0,285	0,393	0,412	0,425	0,467
		RWE: 19	0,361	0,049	0,250	0,340	0,360	0,395	0,430
		Gesamt: 136	0,403	0,035	0,250	0,390	0,406	0,425	0,467
	Braunkohle	n.b.							

Eine Übersicht zu den Ergebnissen der Laboruntersuchungen gibt Abbildung 3.5. Es zeigt die Messwerte zur Reindichte, Porosität und Wärmeleitfähigkeit (rechte Seite) und deren Zuordnung zur Tiefe und dem dm-genauen lithologischen Profil aus der makroskopischen Bemusterung (links), welches dem Gamma-Ray-Log und dem Dichtelog gegenübergestellt ist. Mehr als die Hälfte der Gesteinsabfolge besteht aus Sand als Hauptkomponente, gefolgt von Ton- und untergeordnet Schluffhorizonten sowie mehreren Braunkohleflözen, von denen das mit Abstand größte Volumen das 60 m mächtige Hauptflöz im 400 m Tiefe einnimmt.

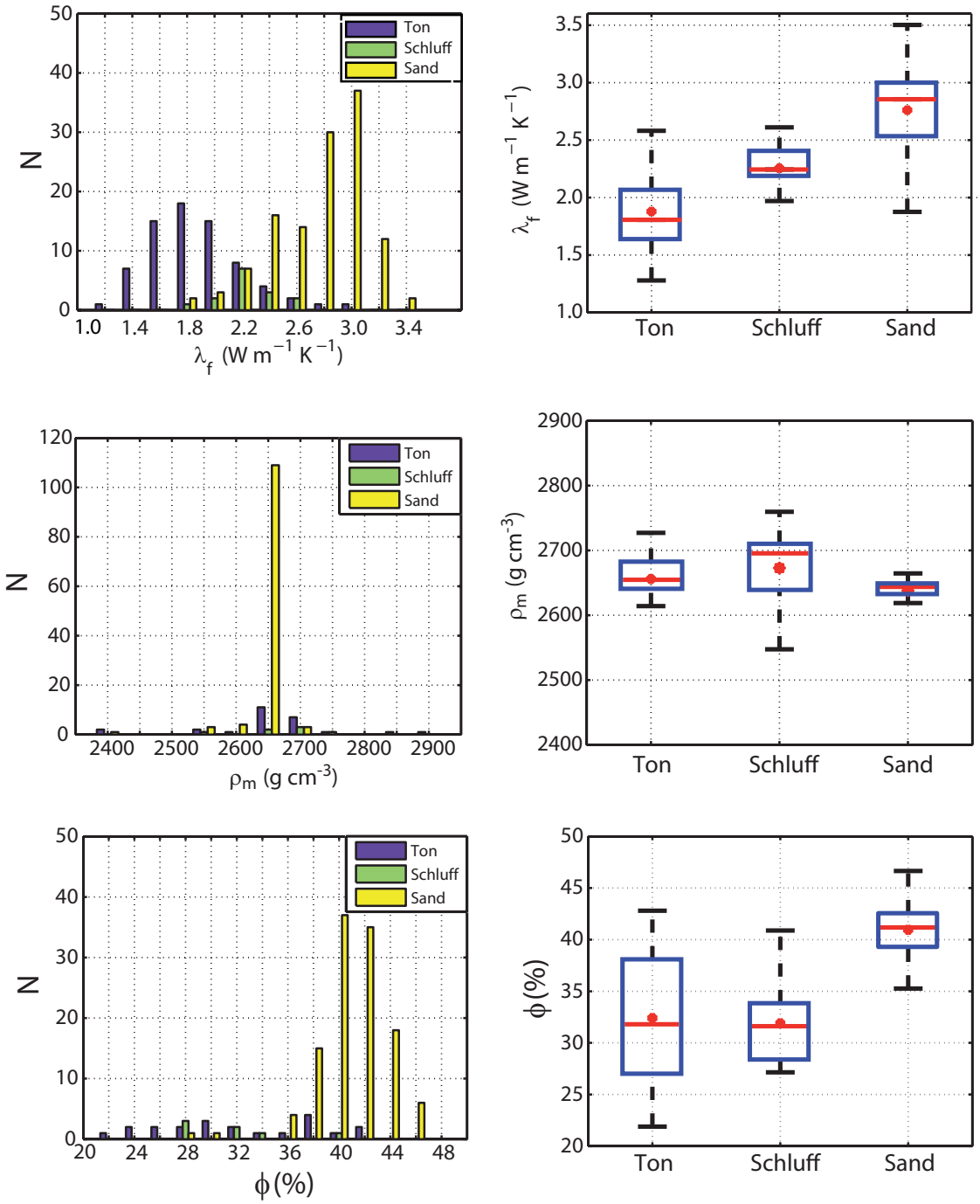


Abbildung 3.6: *Häufigkeitsverteilung petrophysikalischer Eigenschaften für vier Hauptgesteinstypen und die dazugehörigen statistischen Maßzahlen in Form von Box-Whisker-Diagrammen (blaue Mittellinie: Medianwert; roter Stern: Mittelwert; blaue Box: 25%- und 75%-Quartil; schwarze Begrenzungsstriche: 5%- und 95%-Perzentil; die Anzahl N der jeweils zugrunde liegenden Messungen ist Tabelle 3.2 zu entnehmen): Wärmeleitfähigkeit bergfeuchter Proben λ_f, Reindichte ρ_m und Porosität ϕ.*

Die wichtigsten petrophysikalischen Eigenschaften sind in Tabelle 3.2 und der Abbildung 3.6 zusammengefasst. Sofern sich die eigenen Laborergebnisse von denen der RWE Power AG signifikant un-

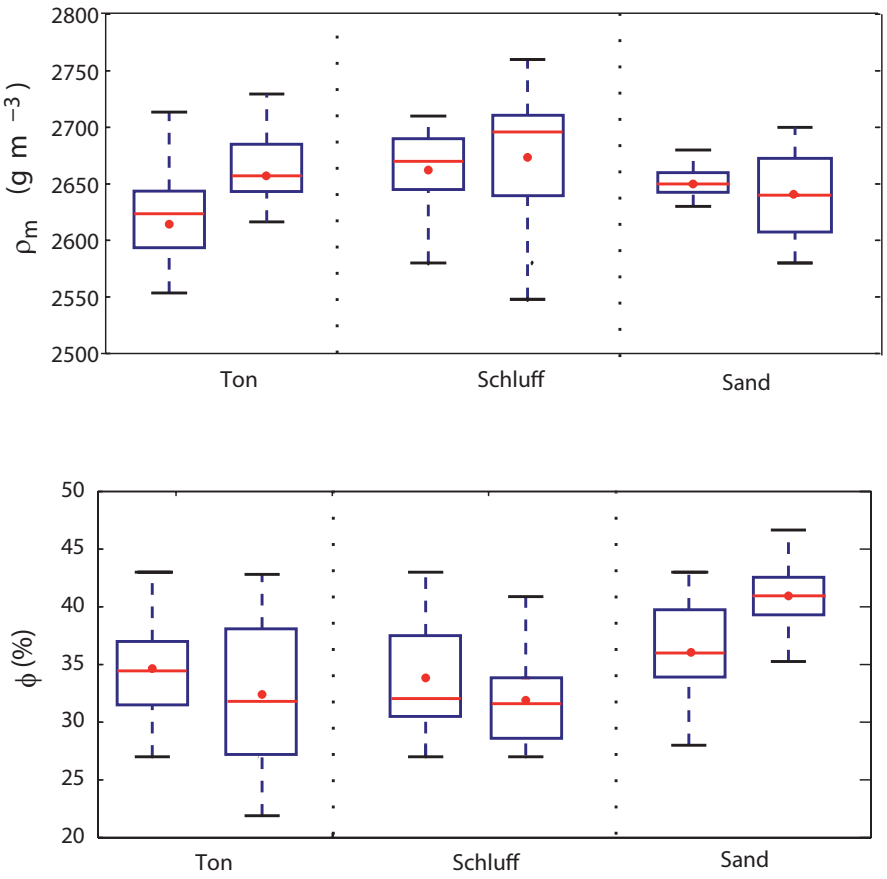


Abbildung 3.7: *Unterschiede in den Laborergebnissen zwischen den Laboratorien der RWTH Aachen (jeweils links) und der RWE Power AG (jeweils rechts) in Form von Box-Whisker-Diagrammen (blaue Mittellinie: Medianwert; roter Stern: Mittelwert; blaue Box: 25%- und 75%-Quartil; schwarze Begrenzungsstriche: 5%- und 95%-Perzentil; die Anzahl N der jeweils zugrunde liegenden Messungen ist Tabelle 3.2 zu entnehmen): Reindichte ρ_m und Porosität ϕ.*

terschieden haben, sind diese in Tabelle 3.2 jeweils gesondert aufgeführt. Die Unterschiede zwischen den beiden Laboratorien sind darüber hinaus in Abbildung 3.7 visualisiert.

Die Reindichte ρ_m resultiert aus der mineralogischen Zusammensetzung der Sedimente und liegt bei den Sanden naturgemäß im Bereich des Hauptbestandteils Quarz um 2645 kg m^{-3}, was sich beispielsweise zwischen 200 m und 300 m gut erkennen lässt (Abbildung 3.5) und auch in der geringen Variationsbreite in Abbildung 3.6 zum Ausdruck kommt. Die mineralogische Analyse zeigt, dass der Quarzgehalt der Sande deutlich über 90 % liegt (vgl. Abbildung 3.8). In Abhängigkeit des Tongehalts und der Zusammensetzung der Tone schwankt die Reindichte in den tonigen bzw. schluffigen Lagen mit Werten von 2620 kg m^{-3} bis 2682 kg m^{-3} (25 %- und 75 %-Quartile) wesentlich stärker. Ausreißer nach unten resultieren aus dem vereinzelt hohen Anteil von organischem Material im Sediment, Ausreißer nach oben aus dem vereinzelten Auftreten von Toneisenstein (Siderit, vgl. Abbildung 3.8).

Wegen der geringen Auflast sind die Sedimente kaum verfestigt. Die Porosität ϕ ist daher generell sehr hoch und liegt nach Druckentlastung unter Atmosphärenbedingungen überwiegend im Bereich zwischen etwa 30 % und 40 %. Die tonigen/schluffigen Horizonte nehmen hierbei eine größere Schwankungsbreite ein als die sandigen Schichtpakete und erscheinen diesbezüglich inhomogener. Gegenüber

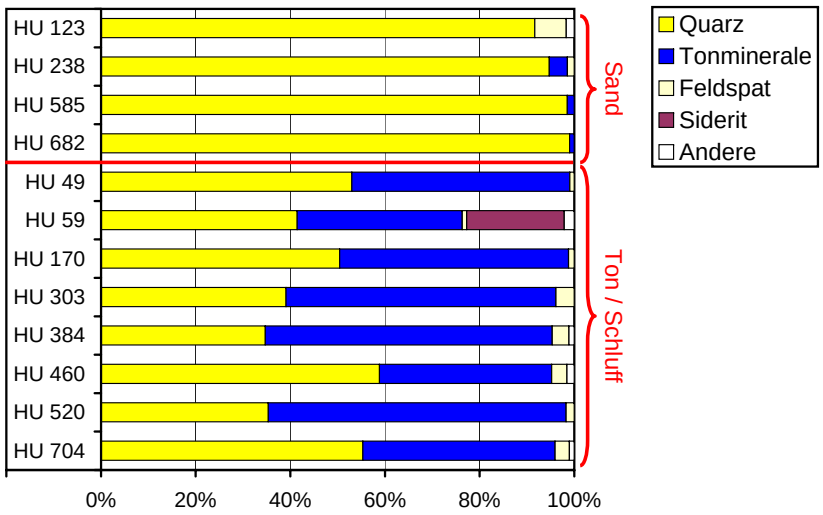


Abbildung 3.8: *Quantitative Mineralzusammensetzung von vier Sand- und acht Ton- und Schluffproben der Bohrung HU-873 aus unterschiedlichen Tiefen.*

anderen Sedimentbecken ist allerdings kein Trend feststellbar, der auf eine Abnahme der Porosität durch zunehmende Kompaktion mit der Tiefe hindeutet.

Bei der Interpretation der Wärmeleitfähigkeit ist zu berücksichtigen, dass die Proben wegen ihrer Forminstabilität bergfeucht und nicht im klar definierten wassergesättigten Zustand gemessen wurden. Allerdings führte das Eindringen von Spülflüssigkeit in die Bohrung zu einem quasi wassergesättigten Zustand, der auch durch die hohen Sättigungswerte der RWE Power AG bestätigt wird. Dies gilt insbesondere für Proben aus Tiefen über dem Grundwasserspiegel bei 245 m, bei denen in-situ nur von einer partiellen Wassersättigung ausgegangen werden kann (vgl. Abschnitt 3.2), die aber nach der Probenahme als wassergesättigt angenommen werden können.

Abbildung 3.6 zeigt, dass die Wärmeleitfähigkeit mit der Korngröße und letztlich mit der damit einhergehenden mineralogischen Zusammensetzung der dominierenden Korngrößenfraktion korreliert. Sand, dessen Hauptkomponente Quarz eine Wärmeleitfähigkeit von 7,7 W m^{-1} K^{-1} (Cermak und Rybach, 1982) aufweist, hat eine mittlere Wärmeleitfähigkeit von 2,76 W m^{-1} K^{-1}. Der Durchschnittswert von Ton hingegen liegt deutlich niedriger bei 1,88 W m^{-1} K^{-1}, was auf die niedrige Wärmeleitfähigkeiten der Tonhauptbestandteile Illit, Kaolinit und Montmorillonit (1,9 W m^{-1} K^{-1} - 2,6 W m^{-1} K^{-1}; Brigaud et al., 1990) zurückzuführen ist. Die Unterschiede in der quantitativen Mineralzusammensetzung werden aus Abbildung 3.8 deutlich. Während der Quarzgehalt in den Sanden mindestens 90 % beträgt, ist er in Schluffen und Tonen überwiegend von Tonmineralen substituiert und rangiert zwischen 35 % und 63 %.

Innerhalb der Sande ist ein signifikanter Unterschied in der Wärmeleitfähigkeit zwischen den Bereichen oberhalb (2,39 W m^{-1} K^{-1}) und unterhalb des Grundwasserspiegels bei 245 m (2,86 W m^{-1} K^{-1}) festzustellen (vgl. Tabelle 3.2). Die Unterschiede sind nicht auf die Porosität oder dem Sättigungsgrad zurückzuführen, sondern liegen vermutlich in der Ankopplung oder Bindigkeit der Mineralkörner begründet. Die Sande waren vor allem im oberen Bereich sehr schwach verfestigt bis breiig, was sich auch bei der Befüllung des Stechzylinders zur Bestimmung der Porosität als schwierig erwies und ein generelles Problem bei der Handhabung von nicht bindigen Proben darstellte. Aus dem gleichen Grund liegt vermutlich auch die vom RWTH-Labor ermittelte Durchschnittsporosität bei Sanden knapp 5 Prozentpunkte über der von der RWE Power AG (vgl. Abbildung 3.7). Deren Labor

Tabelle 3.3: *Übersicht zur temperaturabhängigen spezifischen (c_p) und volumetrischen ($\rho_m \cdot c_p$) Wärmekapazität von Tonen und Sanden aus der Bohrung HU-873.*

			N	Mittel-wert	Stabw.	Min.	25%-Quart.	Median	75%-Quart.	Max.
c_p (J kg^{-1} K^{-1})	T = 20 °C	Ton	6	860	3	856	858	860	861	864
		Sand	8	747	18	720	738	742	756	777
	T = 100 °C	Ton	6	1011	12	998	1002	1010	1019	1029
		Sand	8	874	21	859	861	865	876	914
$c_p \cdot \rho_m$ (MJ K^{-1} m^{-3})	T = 20 °C	Ton	6	2,17	0,12	2,02	2,07	2,18	2,27	2,30
		Sand	8	1,98	0,05	1,90	1,96	1,96	2,00	2,07
	T = 100 °C	Ton	6	2,55	0,13	2,36	2,47	2,59	2,65	2,68
		Sand	8	2,32	0,06	2,27	2,28	2,29	2,32	2,44

beschränkte sich bei der Auswahl der Proben zudem auf bindige Proben bis Güteklasse 2 (DIN 4021, 1990), die auch für die Durchführung mechanischer Untersuchungen geeignet waren.

Die Wärmekapazität der tertiären Lockersedimente wurde an sechs Tonproben und an acht Sandsteinproben temperaturabhängig bestimmt. Die Ergebnisse sind als spezifische Wärmekapazität und als volumetrische Wärmekapazität für die Temperaturen 20 °C und 100 °C in Tabelle 3.3 aufgeführt. Bezüglich der allgemeinen Bedeutung dieser Größen sei auf die ausführliche Einleitung in Abschnitt 4.4 verwiesen.

Die gemessene (spezifische) Wärmekapazität für Ton liegt deutlich über dem Wert beim Festgesteins-Äquivalent Tonstein (vgl. Tabelle 4.3). Normiert auf die Dichte entspricht die volumetrische Wärmekapazität der Tone allerdings sehr gut jener von Tonstein. Die Wärmekapazitäten für Sand sind durchweg etwas niedriger als beim Festgesteins-Pendant aus NRW, was damit zusammenhängt, dass die tertiären Sande nahezu reine Quarzsande darstellen (vgl. Abbildung 3.8), während die liegenden paläozoischen Sandsteine einen höheren Anteil an Tonmineralen aufweisen (vgl. Abbildung 4.6).

3.4 Datenkompilation bohrlochgeophysikalischer Messungen

Die Niederrheinische Bucht ist Zielgebiet umfangreicher Explorationstätigkeit für den Abbau von Braunkohle. Als Datenquelle stellte die RWE Power AG freundlicherweise die Bohrlochmessdaten aus Bohrungen im Gebiet des Rheinischen Braunkohlereviers zur Verfügung, die zur Erkundung des prätertiären Untergrundes im Rahmen eines umfangreichen Bohrprogramms der damaligen Rheinbraun AG (heute RWE Power AG) in Zusammenarbeit mit dem Geologischen Dienst NRW abgeteuft wurden (Cuvelier, 2005). In den Jahren 1999 und 2000 wurden insgesamt zehn Tiefbohrungen niedergebracht (Abbildung 3.9). Sie durchteufen jeweils das gesamte Tertiär und reichen etwa 50 m tief ins paläozoische Festgestein hinein. Die bis zu über 1000 m tiefen Bohrungen umfassen eine Gesamtteufe von 7416 m.

In den untersuchten Bohrungen kamen standardmäßig Gamma-Logs und moderne elektrische Wider-

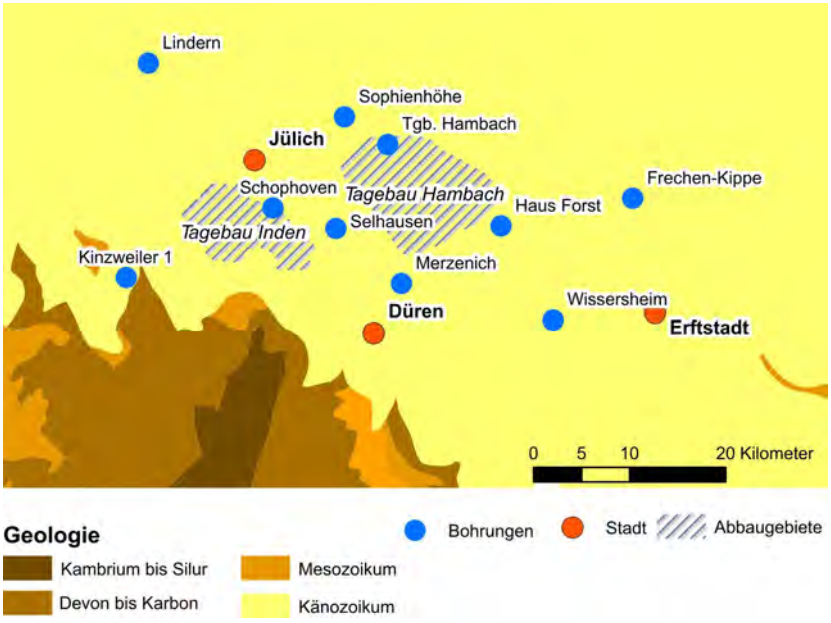


Abbildung 3.9: *Südliche Niederrheinische Bucht mit der Lage von zehn Forschungsbohrungen, die im Rahmen eines Tiefenbohrprogramms in den Jahren 1999/2000 von der Rheinbraun AG (heute RWE Power AG) zur Erkundung des paläozoischen Untergrunds niedergebracht wurden.*

Tabelle 3.4: *Übersicht zu den verfügbaren Logs der betrachteten Bohrungen.*

Bohrung	Intervall (m)	GR	Res.	Sonic	Dichte	Porosität	SP	K,Th,U	Cal	Temp	Sal
Hambach-HU_873	0 – 745	x	x		x		x	x			
Hambach-Languth	0 - 1230	x	(x)	x	(x)		(x)	x	x	(x)	
B-03	0 - 835	x	x		x		x	x	x		
B-22	0 -776	x	x		x		x	x	x		
B-01	4 - 67	x	x		x		x	x	x		
B-21	0 - 825	x	x		x		x	x	x		
B-04	0 - 818	x	(x)		x		(x)	x	x		
B-05	0 - 1050	x	x		x		x	x	x		
B-20	72 - 844	x	x		x		x	x	x		
B-24	0 - 1000	x	x		(x)		x	x	x		
B-19	74 - 463	x	x		x		x	x	x		

standslogs zum Einsatz. Für einige Bohrungen stehen weiterhin Messungen folgender Parameter zur Verfügung: Laufzeit, Eigenpotential, Gamma-Dichte, Neutronenporosität, Temperatur und Salinität (vgl. Abschnitt 2.2).

Eine Übersicht zu den verfügbaren Logs in den jeweiligen Bohrungen findet sich in Tabelle 3.4. Die im nachfolgenden Text und in den Tabellen verwendeten Messgrößen sind in Tabelle 3.5 erläutert. Konform zu der in der Bohrlochgeophysik gebräuchlichen Schreibweise, werden die Einheiten wie folgt angegeben: Dichte in g cm^{-3}, Geschwindigkeit der akustischen Welle in km s^{-1} und Laufzeit der akustischen Welle μs m^{-1}.

Tabelle 3.5: *Übersicht zu den verwendeten Parametern.*

Sonde	Eingangslogs	Messgröße	
	GR	(API)	Gamma-Ray
Natural-	SGR	(API)	Summen-Gamma-Ray /Spectral Gamma-Ray
Gamma-	K	(%)	Kalium
Spectrometry-	TH	(ppm)	Thorium
	U	(ppm)	Uran
Litho-	RHOB	(g/cm³)	Dichte (bulk density)
Density-	PEF	(barns/el)	Photoelektrischer Effekt
	DRHO	(g/cm³)	Differenzdichte
Neutron-	NPHI	(%), (p.u.)	Neutronenporosität
Resistivity/	RES	(ohmm)	Widerstandslog unspezifiziert
Induction	MRes10/MRes20	(ohmm)	Widerstandslog mit geringer Eindringtiefe
Logs	MRes30/MRes60	(ohmm)	Widerstandslog mit mittlerer Eindringtiefe
	MRes90	(ohmm)	Widerstandslog mit großer Eindringtiefe
Borehole-	BS	(mm)	Meißeldurchmesser (bitsize)
Geometry-	CAL	(mm)	Bohrlochdurchmesser
Self Potential	SP	(mV)	Eigenpotential
Temperature	TEMP	(°C)	Temperatur
	Berechnete Logs		
	Vp	(km/s)	Geschwindigkeit der Kompressionswelle
	Rt	(ohmm)	elektr. Widerstand der ungestörten Formation ~ MRes90
	Rxo	(ohmm)	elektr. Widerstand der gefluteten Formation ~ MRes10
	PHI	(dec), (%)	Porosität, unspezifiziert
	PHIT	(dec), (%)	Gesamtporosität (PHI total)
	PHIE	(dec), (%)	Effektive Porosität (PHI effective)
	SW	(dec), (%)	Wassersättigung (water saturation)
	BVW	(dec), (%)	Gesamtwasser (bulk volume water)
	Vclay	(dec), (%)	Tongehalt (volume clay)
	Vsilt	(dec), (%)	Siltgehalt (volume silt)
	Vsand	(dec), (%)	Sandgehalt (volume sand)
	Vcoal	(dec), (%)	Kohlegehalt (volume coal)
	LOG_TCeff	W/m/K	effektive Wärmeleitfähigkeit berechnet aus Logs
	CORE:TC	W/m/K	Wärmeleitfähigkeit gemessen (bergfeucht bzw. saturiert)

3.5 Ableitung von thermophysikalischen Kennwerten aus Logging-Daten

3.5.1 Loginterpretation in der Referenzbohrung HU-873

Zur Logauswertung für eine tertiäre Abfolge im Bereich der Niederrheinischen Bucht wurde die Bohrung HU-873 als Referenzbohrung herangezogen. Die Bohrung wurde in unmittelbarer Umgebung eines Braunkohletagebaus niedergebracht und erreicht eine Endteufe von 745 m. Die Bohrung wurde von Schlumberger vermessen. In dem von der RWE Power AG gewählten Messprogramm werden in Explorationsbohrungen standardmäßig folgende Parameter gemessen: Kaliber, spektrales Gamma-Ray, elektrischer Widerstand in verschiedenen Eindringtiefen, Gammadichte und Photoelektrischer Effekt. Sonicmessungen werden nicht durchgeführt. Seitens der Servicefirma wurden die elektrischen Widerstandsmessungen auf den Spülungswiderstand und den Bohrlochdurchmesser korrigiert und die Widerstandsprofile Rt und Rxo erzeugt. Rt ist der Widerstand in größerer Distanz zur Bohrung, in der

Tabelle 3.6: *Durchschnittswerte und Standardabweichungen der Logdaten für die in der Bohrung HU-873 abgegrenzten Hauptgesteinstypen des Tertiärs.*

	GR (API)		RES30 (Ohm m)		RHOB (g cm^{-3})	
	AVG	STD	AVG	STD	AVG	STD
Sandstein	13,241	4,895	117,248	103,529	1,835	0,391
Tonstein	74,259	12,991	9,591	4,301	2,122	0,184
Braunkohle	7,849	15,890	14,701	4,073	1,302	0,164

davon auszugehen ist, dass die Formation hier weitgehend unbeeinflusst von der Bohrung ist. Rxo ist der Widerstand im Nahbereich der Bohrung für jene Zone, in der die Formation vollständig von der Bohrspülung infiltriert ist.

Die Bohrlochmessungen lassen sich gut mit der im Bohrbericht dargestellten Lithologie in Verbindung bringen. Entsprechend der Gesteinsbeschreibung wurden drei Hauptgesteinstypen mit den Logs identifiziert (Abbildung 3.10): Sandstein, Tonstein und Braunkohle. Innerhalb der Abfolge wechseln Sandsteinschichten mit Tonlagen. Die Sandsteine weisen im Mittel Dichten von 1,8 g cm^{-3} auf und sind durch niedrige Werte im Gamma-Ray gekennzeichnet (meist $<$ 30 API). Die Tone sind durch die höchsten Gamma-Ray Werte gekennzeichnet, wodurch sie sich von den Sandsteinen abgrenzen lassen. Charakteristisch sind Gamma-Ray Werte von $>$ 80 API und hohe Dichten von $>$ 2,2 g cm^{-3}. Antikorrelierend zum Gamma-Ray steigen mit abnehmendem Tongehalt die Werte im elektrischen Widerstand und im Dichtelog (Tabelle 3.6, Abbildung 3.11). In der tertiären Abfolge wurden das über 60 m mächtige Braunkohleflöz sowie geringmächtigere Braunkohlelagen anhand der Logs durch extrem niedrige Werte der Dichte ($<$ 1,4 g cm^{-3}) und des Gamma-Rays ($<$ 10 API) identifiziert.

Auffällig sind auftretende Differenzen zwischen den flach und tief eindringenden Widerstandskurven in den sandigen Bereichen oberhalb von 360 m und unterhalb von 580 m. Besonders stark ist dieser Effekt oberhalb von 254 m. In porösen Medien ist eine solche Separation der Widerstände ein Indikator für permeable Zonen (sandige Horizonte) und wird durch die Infiltration von Bohrspülung in die Formation verursacht. In dem Bereich zwischen 360 m und 580 m befindet sich das mehrere 10er Meter mächtige Braunkohleflöz, welches von impermeablen Tonschichten über- und unterlagert wird. Hier laufen die unterschiedlich tief eindringenden Widerstandskurven zusammen. Die starke Trennung der Widertandskurven im oberen Teil der Bohrung ist auf die Sümpfungsmaßnahmen im Umfeld des Braunkohletagebaus zurückzuführen. Der Grundwasserspiegel liegt in der Bohrung bei 245 m unter Geländeoberkante. Im direkten Umgebungsbereich der mit Wasser gespülten Bohrung ist die Formation gesättigt und die Widerstände entsprechend niedrig. In größerer Distanz zur Bohrung hingegen wird von der Sonde die trockene, weitgehend entwässerte Formation gemessen, die entsprechend hohe Widerstandswerte aufweist. Es ist davon auszugehen, dass die Gammadichte, die eine Messung im direkten Nahbereich der Bohrlochwand durchführt, weitgehend wassergesättigte Gesteinsschichten misst. Betrachtet man die Kurve, zeigt sich jedoch, dass unterhalb von 245 m die Dichtewerte tendenziell höher sind als im oberen Bereich, was für eine partielle Sättigung in dieser Zone spricht. Diese partielle Sättigung des Gebirges im Umgebungsbereich der Bohrung ist bei der Auswertung der Daten zu berücksichtigen.

3.5.2 Porositäten und Wassersättigung in den Tertiärbohrungen

In einer weiterführenden Auswertung wurden die Logdaten petrophysikalisch ausgewertet mit dem Ziel, Porositäten und Wassersättigungen aus den Logs abzuleiten. Die Porositäten können im vorlie-

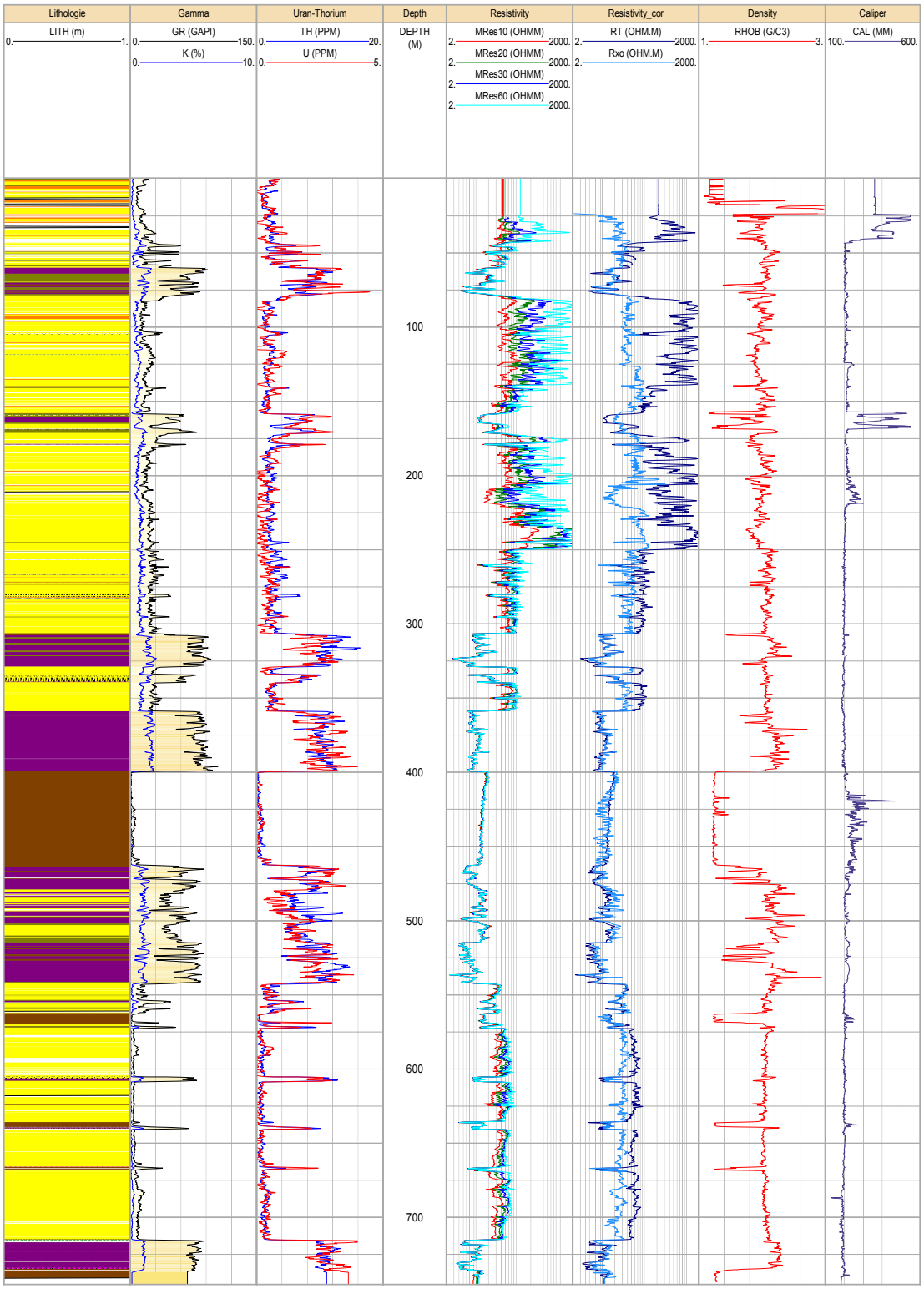


Abbildung 3.10: *Compositeplot der Bohrung HU-873. Die lithologischen Abfolgen sind farblich voneinander abgegrenzt: Sandsteine (gelb), Tonsteine (violett) und Braunkohle (braun).*

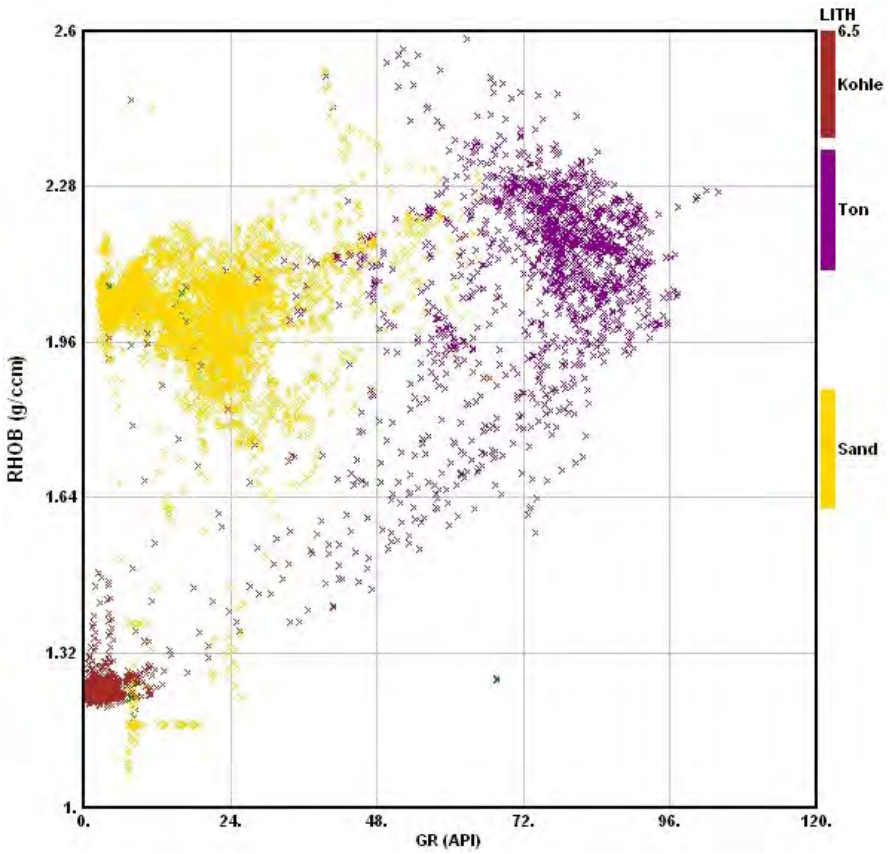


Abbildung 3.11: *Streudiagramm der im Bohrloch gemessenen Dichte (RHOB) gegen die Gammastrahlung (GR). Die Messwerte für die einzelnen lithologischen Abfolgen sind farblich voneinander abgegrenzt: Sandsteine (gelb), Tonsteine (violett) und Braunkohle (braun), wobei zwischen Tonen und Kohle Übergänge von tonigen Kohlen bzw. Tonen mit Kohleneinschaltungen bestehen.*

genden Fall aus der Gammadichte bestimmt werden. Die hierzu benötigten Matrixdichten sind aus den Laboruntersuchungen am Kernmaterial bekannt (vgl. Abschnitt 3.3). Die Matrixdichte der Sande und Schluffe beträgt 2,655 g cm^{-3}, die der Tone 2,63 g cm^{-3}

Das Ergebnis der Berechnungen sind kontinuierliche Profile zur Porosität, Wassersättigung sowie zu den Volumenanteilen der erbohrten Gesteinskomponenten. Der Tonanteil wurde aus dem Gamma-Ray bestimmt. Die Braunkohlelagen wurden anhand ihrer sehr geringen Dichte identifiziert und über einen Cut-Off abgegrenzt und ausgewiesen. Die Wassersättigung wurde anhand der Widerstandslogs berechnet, wobei die Archie-Formel $Sw = \sqrt{\frac{R_t}{R_o}}$ mit R_t dem elektrischen Widerstand der ungestörten Formation un R_o dem elektrischen Widerstand der Formation unter Annahme der 100% Sättigung mit Formationswasser benutzt wurde. Abbildung 3.12 zeigt das Ergebnis der Berechnungen. Der berechnete Wassergehalt (BVW) zeichnet die Entwässerung in den oberen 245 m deutlich nach. Hier ist anzumerken, dass die Wassersättigungswerte mit einigen Unsicherheiten behaftet sind, da bezüglich der Leitfähigkeit des Formationswassers und des Spülungsfiltrats Annahmen getroffen wurden. Die berechneten Porositätswerte zeigen in den Sanden eine sehr gute Übereinstimmung mit den Kerndaten (vgl. Abschnitt 3.3). In den Tonen treten Abweichungen zwischen Kern- und Logdaten auf, da in Abbildung 3.12 die effektive Porosität dargestellt ist.

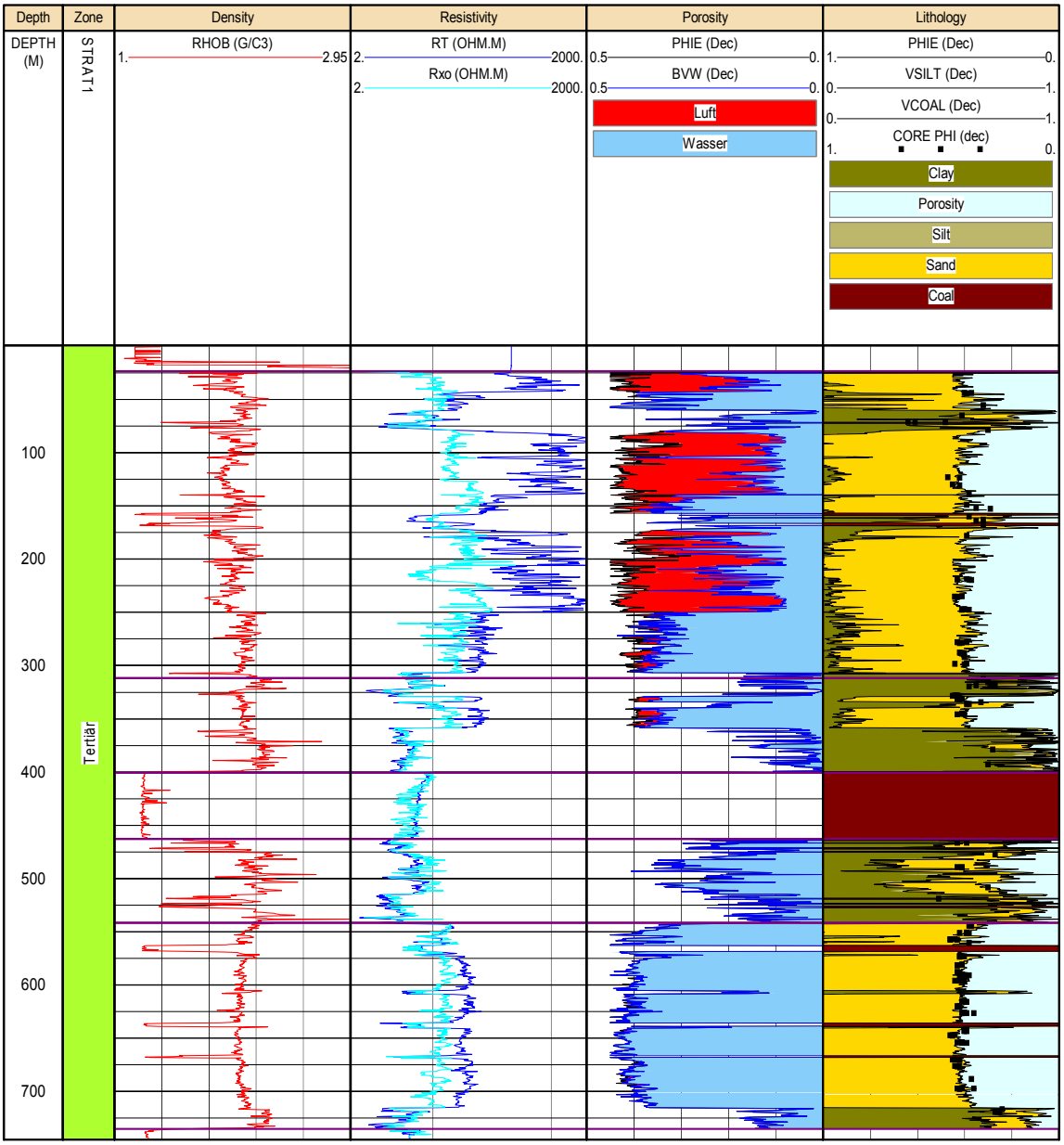


Abbildung 3.12: *Ergebnis der petrophysikalischen Auswertung mit Vergleich der berechneten und gemessenen Wärmeleitfähigkeiten für die Bohrung HU-873. Dargestellt sind außerdem die berechneten volumetrischen Anteile von Sand, Ton und Kohle sowie die Porosität.*

In Abbildung 3.13 sind im Vergleich die Kernporositäten zusammen mit den effektiven und totalen Porositäten dargestellt. Die Tone zeigen hier eine gute Übereinstimmung mit den totalen Porositäten. Die in der Bohrung HU-873 erzielten Ergebnisse konnten auf sechs weitere Bohrungen aus der Niederrheinischen Bucht übertragen werden. Dies sind die Bohrungen B03, B05, B19, B21 und B22. Zu den genannten Bohrungen sind ausreichende Loggingdaten vorhanden, um sowohl die volumetrischen Anteile von Sand, Ton und Braunkohle in der Formation zu rekonstruieren als auch Porositäten und Wassersättigungen abzuleiten. Die resultierenden Daten wurden später zur Berechnung der Wärme-

leitfähigkeit genutzt (vgl. Abschnitt 3.5.3).

3.5.3 Logs und Wärmeleitfähigkeiten

An Probenmaterial aus der Bohrung HU-873 wurde ein umfangreiches petrophysikalisches Messprogramm durchgeführt. Hierbei wurde seitens des Institute for Applied Geophysics and Geothermal Energy die Wärmeleitfähigkeit an Kernmaterial gemessen. In Abhängigkeit vom Gesteinstyp wurden Wärmeleitfähigkeiten teils mit dem TCS, teils mit der TK04 erfasst (vgl. Abschnitt 2.1.1). Bei einem Vergleich mit den Laborergebnissen stellt sich generell die Frage, unter welchen Bedingungen die Laborergebnisse erzielt wurden und in welchem Zustand sich das Probenmaterial befindet. Dies gilt speziell für die Proben aus dem oberen, trockengelegten Bereich der Bohrung. In ihrem in-situ Zustand sollten die Sande nahezu wasserfrei sein. Da aber die Bohrung mit einer Wasserspülung niedergebracht wurde, ist davon auszugehen, dass die entnommenen Kerne eine Wassersättigung zeigen. Dies wurde durch die Laborergebnisse des Gesteinslabors der RWE Power AG bestätigt, die Wassersättigungen von über 90 % erbrachten. Auch die Widerstandslogs zeigen, wie oben beschrieben, ein Eindringen des Bohrwassers in die Formation.

Es kann somit davon ausgegangen werden, dass die gemessenen Wärmeleitfähigkeiten weitgehend gesättigte Proben widerspiegeln und ein Vergleich mit den Logmessungen prinzipiell möglich ist. Abbildung 3.14 zeigt die im Labor ermittelten Wärmeleitfähigkeiten im Vergleich zur Gamma-Ray Messung. Die beiden Messungen zeigen eine gute Korrelation. Wie zu erwarten, sind Tone durch relativ niedrige und Sande durch hohe Wärmeleitfähigkeiten gekennzeichnet.

Abbildung 3.15 zeigt ein Streudiagramm der beiden Messverfahren. Die markierten Bereiche, in denen keine gute Korrelation vorliegt, entstammen Zonen, in denen kleinskalige Lithologiewechsel stattfinden und es zu Teufenversätzen zwischen Log- und Labordaten kommt. Bereinigt man den Datensatz um diese Zonen (Abbildung 3.16), ergibt sich ein relativ hoher Korrelationskoeffizient von R^2 = 0,7 bei verschiedenen Regressionsmethoden. Die Wärmeleitfähigkeit ist eindeutig an das Gamma-Ray und somit an den Sandgehalt der Formation gekoppelt und sollte sich somit auch anhand der Logs (siehe Lithologievolumina und Porositäten, berechnet in Abschnitt 3.5.2) ermitteln lassen. Entsprechend der Vorgehensweise, die in der vorangegangen Projektphase erarbeitet wurde (Hartmann et al., 2005), wurden auch für die tertiären Abfolgen Gesteinsmodelle entwickelt und verschiedene Methoden zur Ableitung von Wärmeleitfähigkeiten getestet.

Für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit wurde ein Dreikomponentensystem (Sandstein, Ton und Wasser) gewählt. Abbildung 3.17 zeigt das berechnete Log der Wärmeleitfähigkeit für die Bohrung HU-873. Das künstliche Log wurde aus den Komponenten Sand, Ton und Wasser über das geometrische Mittel berechnet. In Anpassung an die Labordaten wurden für die einzelnen Komponenten folgende Matrixwärmeleitfähigkeiten genutzt: Sand: 7,5 W m^{-1} K^{-1}, Ton: 1,7 W m^{-1} K^{-1} und Wasser: 0,6 W m^{-1} K^{-1}. Für die zuvor abgegrenzten Kohleabschnitte wurde ein Fixwert von 0,21 W m^{-1} K^{-1} (Schön, 1996) für die Wärmeleitfähigkeit eingesetzt. Die Werte des Wärmeleitfähigkeitslog variieren somit in der gesamten Bohrung zwischen 0,21 W m^{-1} K^{-1} und 3,5 W m^{-1} K^{-1}. Aufgrund der Kohlesequenzen ergibt sich ein geringer Durchschnittswert von 2,13 W m^{-1} K^{-1}. Zum Vergleich wurden die Ergebnisse aus den Kernmessungen in das berechnete Log der Wärmeleitfähigkeit eingehängt. Während im oberen Teil der Bohrung die Daten sehr gut übereinstimmen, liegen die Werte der Kernmessungen im untersten Teil der Formation, welcher durch niedrigere Porositäten gekennzeichnet ist, über den gerechneten Wärmeleitfähigkeiten.

Analog zur HU-873 wurden die Bohrungen B03, B05, B19, B21 und B22 untersucht. Abbildung 3.18

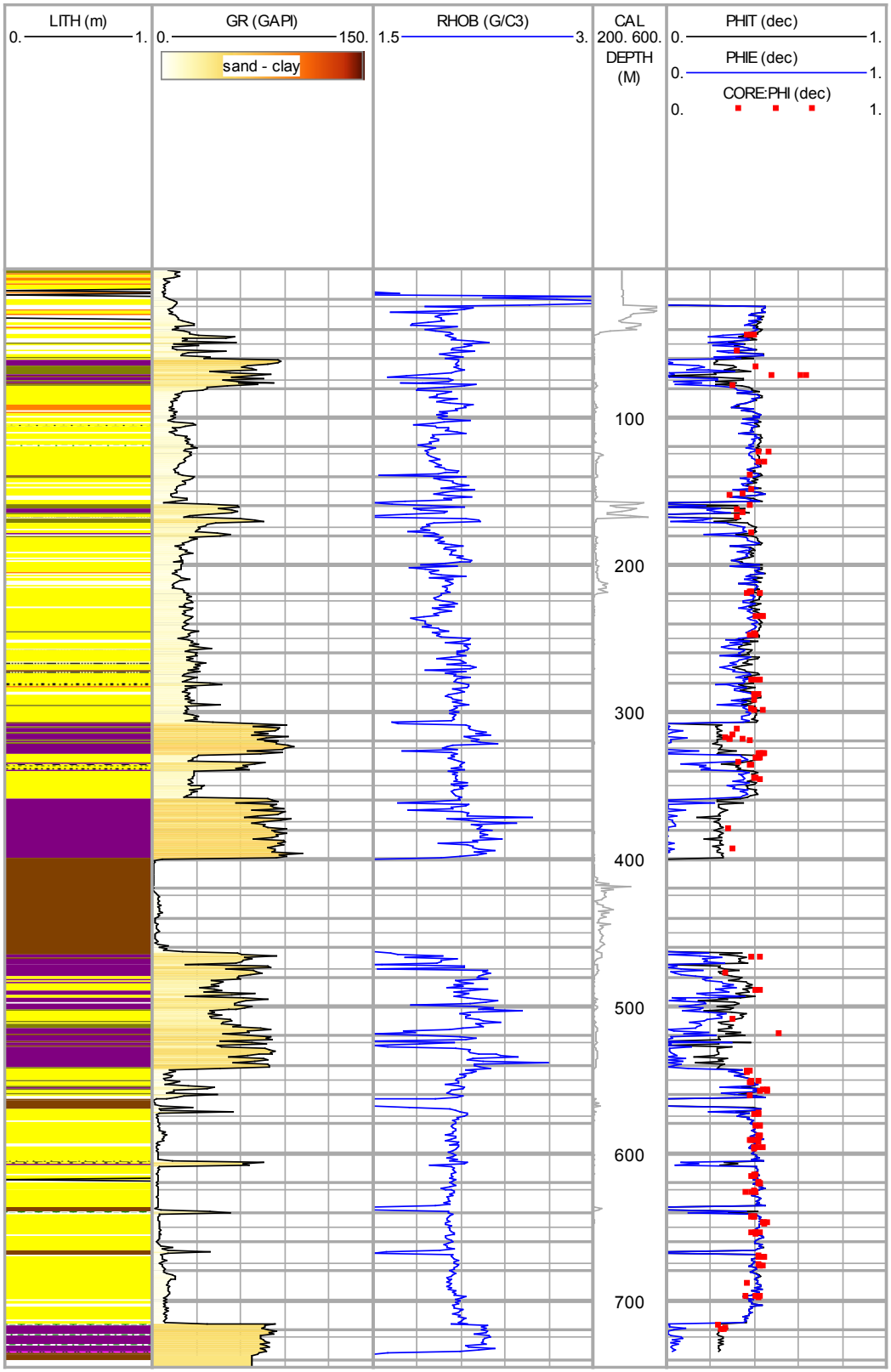


Abbildung 3.13: *Vergleich der Kernporositäten mit den aus dem Dichtelog berechneten effektiven Porositäten (PHIE) und der totalen Porosität (PHIT).*

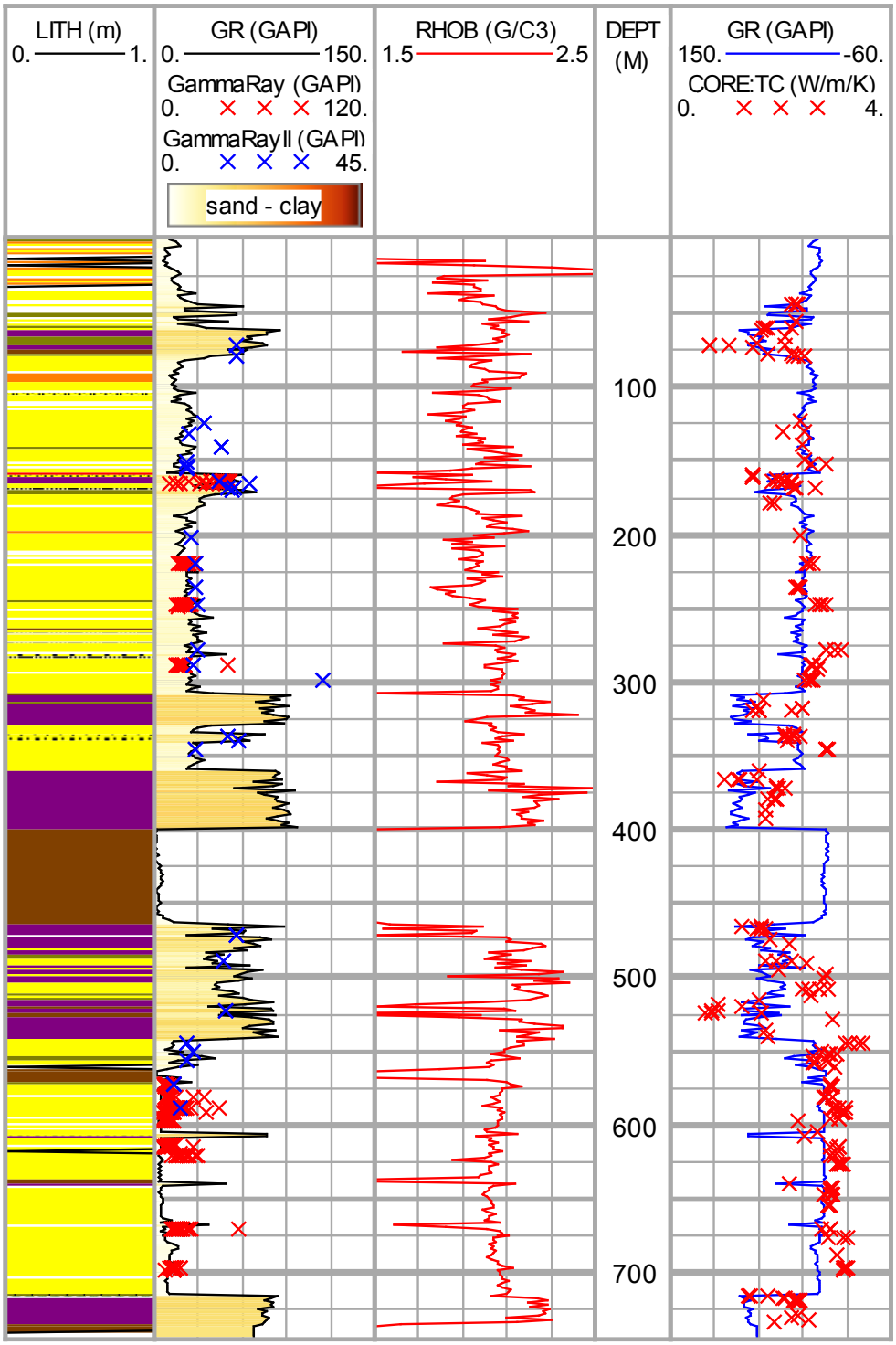


Abbildung 3.14: *Lithologische Abfolge (gelb: Sandstein, violett: Tonstein, braun: Braunkohle) und ausgewählte Logging- und Kerndaten der Bohrung HU-873. Dargestellt sind die Logs der Gammastrahlung (GR) und der Dichte (RHOB) sowie die Kernmessungen der gesamten Gammastrahlung (Gamma-Ray), der spektralen Analyse (Gamma-Ray II) und der Wärmeleitfähigkeit (CORE TC). Die Wärmeleitfähigkeiten der gesättigten Proben zeigen eine gute Übereinstimmung mit dem Gamma-Ray.*

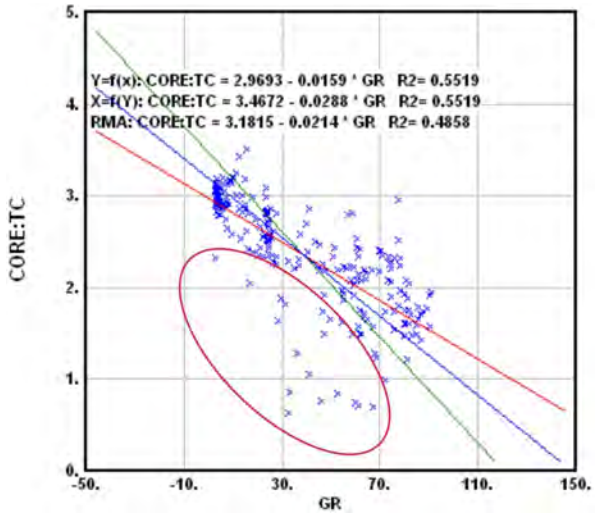


Abbildung 3.15: *Streudiagramm des Gamma-Ray Logs (GR) mit den im Labor ermittelten Wärmeleitfähigkeiten der gesättigten Proben (CORE:TC). Die Daten zeigen eine mäßig gute Korrelation. Die rote Ellipse markiert Proben aus Zonen mit kleinräumigen Lithologiewechseln. Hier kommt es zu Teufendifferenzen zwischen Log- und Labordaten.*

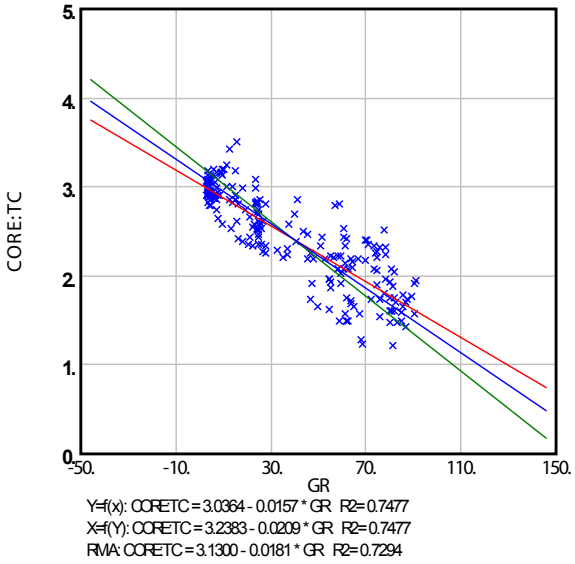


Abbildung 3.16: *Streudiagramm des Gamma-Ray Logs (GR) mit den im Labor ermittelten Wärmeleitfähigkeiten der gesättigten Proben (CORE:TC). Datensatz bereinigt um die Zonen mit kleinskaligen Lithologiewechseln.*

zeigt die stratigraphische Abfolge des Tertiärs in Kombination mit dem Gammalog für die einzelnen Bohrungen. Die wechselnden Schichtenfolgen von Sand und Ton können nur bedingt zwischen den Bohrungen korreliert werden. Da insgesamt keine systematischen Veränderungen der Fazies festgestellt werden können, zeigen die berechneten Wärmeleitfähigkeiten für das Tertiär nur relativ geringe Unterschiede. Die aus den Logs berechneten Wärmeleitfähigkeiten für die ausgewählten Explorationsbohrungen sind in Abbildung 3.19 dargestellt.

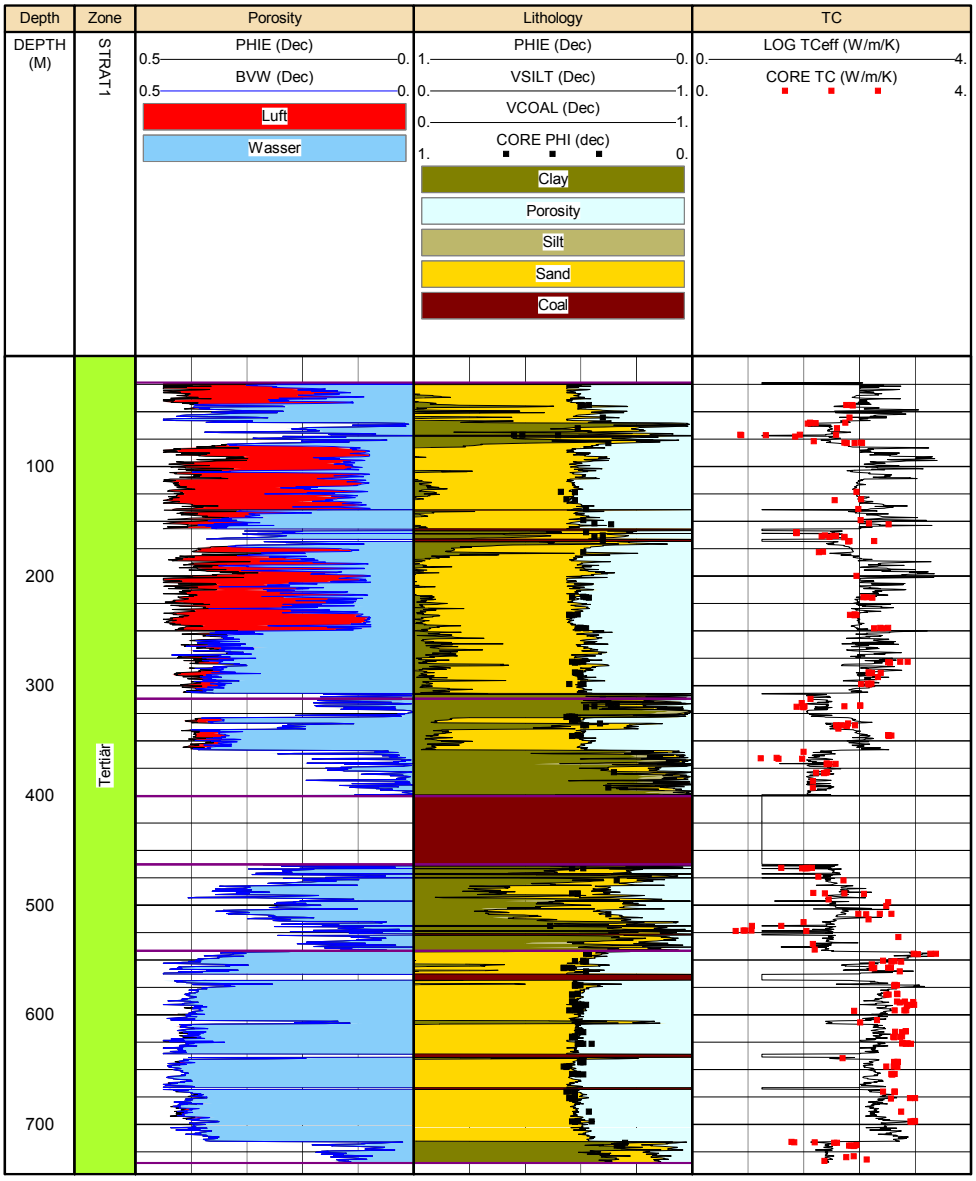


Abbildung 3.17: *Vergleich der im Labor gemessenen Wärmeleitfähigkeiten (CORE TC) mit den aus den Logs (LOG TCeff) abgeleiteten Werten.*

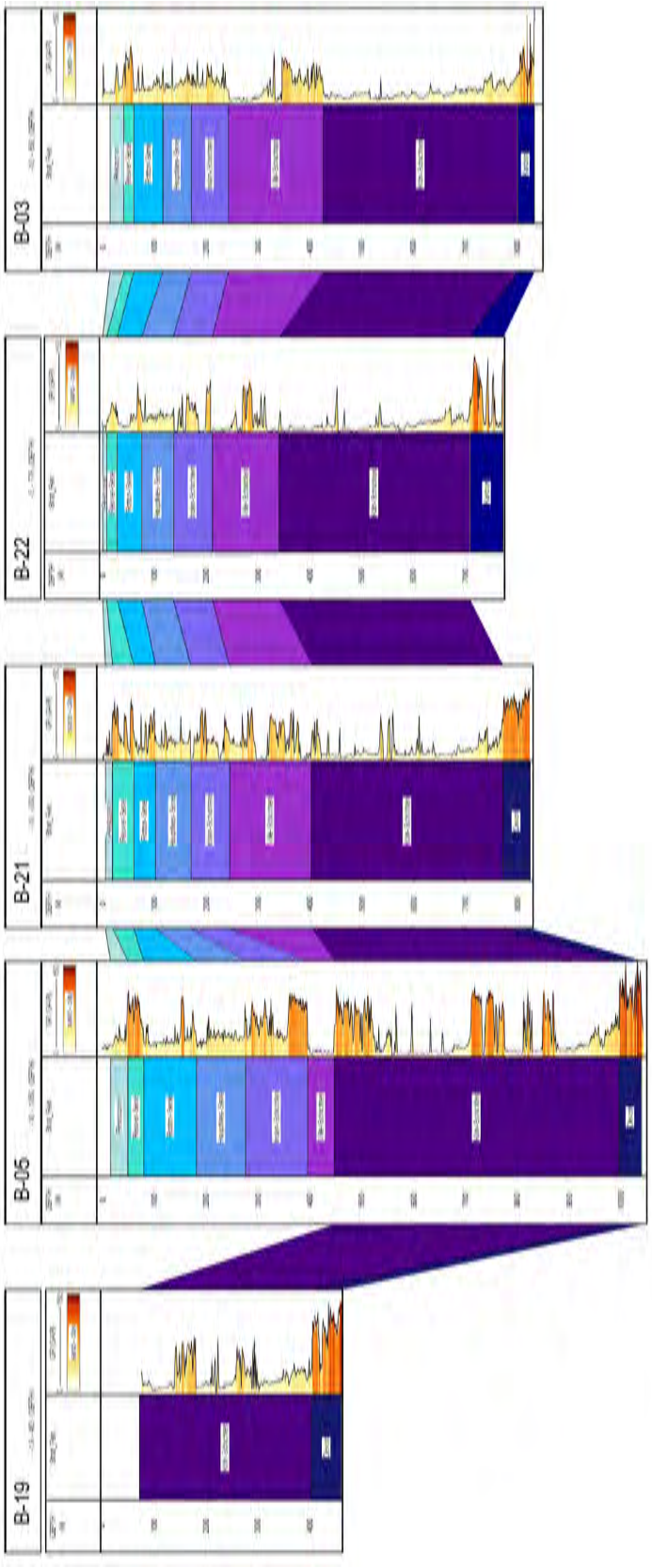


Abbildung 3.18: *Stratigraphische Abfolgen des Tertiärs und des Basement in ausgewählten Explorationsbohrungen der Niederrheinischen Bucht. Die Lage der Bohrungen ist in Abbildung 3.9 dargestellt. GR: Gammaktivität.*

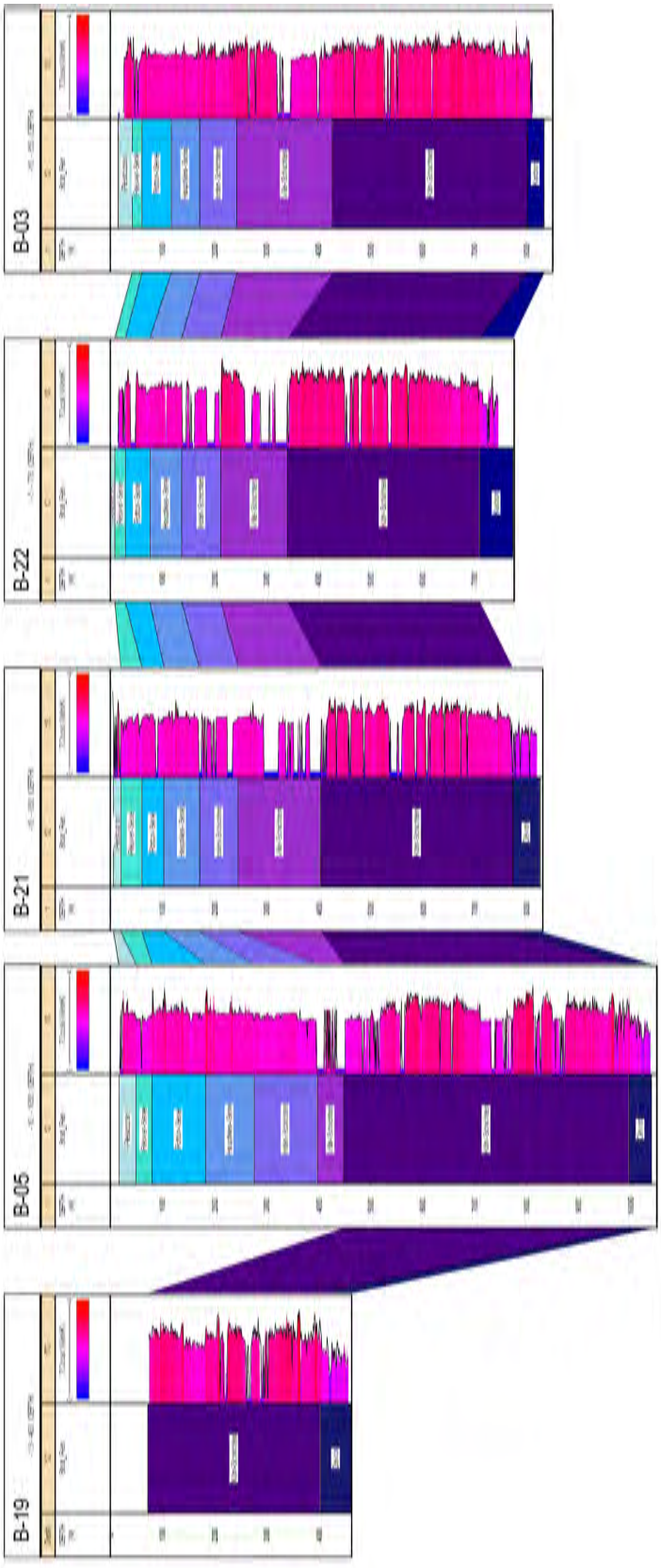


Abbildung 3.19: *Berechnete Wärmeleitfähigkeitsprofile für die Bohrungen B-03, B-05, B-19, B-21 und B-22. Die Lage der Bohrungen ist in Abbildung 3.9 dargestellt.*

Kapitel 4

Das Paläozoikum des westlichen NRW

4.1 Geologische Übersicht des Paläozoikums im westlichen NRW

Das Arbeitsgebiet umfasst den Untergrund der Niederrheinischen Bucht sowie das Ruhrgebiet und dessen Randbereiche. Das Fundament der Niederrheinischen Bucht bilden variszisch gefaltete Gesteine des Devons und des Karbons. Ihre Ausbildung entspricht derjenigen der Nordeifel und ihres nördlichen Vorlandes bzw. des Bergischen Landes und des westlichen Ruhrgebietes. Abbildung 4.1 zeigt eine abgedeckte Karte der zentralen Niederheinischen Bucht. Der Ausschnitt ist deckungsgleich mit Abbildung 3.1, welche im dazugehörigen Profilschnitt in Abbildung 3.2 die tertiäre Bedeckung veranschaulicht. Abbildung 4.1 hingegen enthüllt die darunter liegende Oberfläche des Paläozoikums. Die Profillinien geben die Lage der Profilschnitte in Abbildung 4.2 wieder, die einen Überblick über die Struktur und die Lagerungsverhältnisse der paläozoischen Einheiten im tiefen Untergrund der Niederrheinischen Bucht ermöglichen.

Das Ruhrgebiet liegt eingebettet zwischen dem Rheinischen Schiefergebirge im Süden, der Westfälischen Bucht im Norden und der Niederrheinische Bucht im Westen. Diese Region stellt eine der wichtigsten Steinkohlelagerstätten Europas dar. Die Kohle führende Serie bildete sich hauptsächlich aus Moorablagerungen des Karbons und wird im Ruhrrevier um 3.000 m mächtig. Ein Querschnitt durch das Ruhrgebiet aus variszisch gefalteten Schichten des Oberkarbons sowie partiell auflagernden geringmächtigen Kreidesedimenten ist in Abbildung 4.3 ersichtlich.

Die geologische Entwicklung und der tektonische Bau der beiden Gebiete kann nach Walter (1995) wie folgt zusammengefasst werden:

Vordevonische Gesteine sind im Bereich des Rechtsrheinischen Schiefergebirges in den Kernzonen der Sättel (Remscheid-Altenaer Sattel, Ebbe-Sattel) aufgeschlossen, die südlich außerhalb des Arbeitsgebietes an das Ruhrgebiet angrenzen. Die vorwiegend marinen Schichtenfolgen des Ordoviziums und Silurs sind lückenhaft ausgebildet. Erst ab dem Unterdevon findet sich eine vollständige Schichtenfolge, die durch die Heraushebung und Abtragung des Old-Red-Kontinentes geprägt ist.

Während zu Beginn des **Devons** noch flachmarine Verhältnisse die Sedimentation bestimmen, prägen zum Ende des Unterdevons terrestrische Serien das Bild im nördlichen und zentralen Teil des Rheinischen Schiefergebirges. Im Übergang zum Mitteldevon, nach erneuter Transgression, gliedert sich der Sedimentationsraums des Rheinischen Schiefergebirges in ein nordwestliches Schelfgebiet und ein südöstliches Becken. Im Nordwesten bildeten sich im Mittel- und Oberdevon Massenkalke, während im Südosten pelagische Sedimente dominieren. Im oberen Frasne (unteres Overdevon) folgte nach

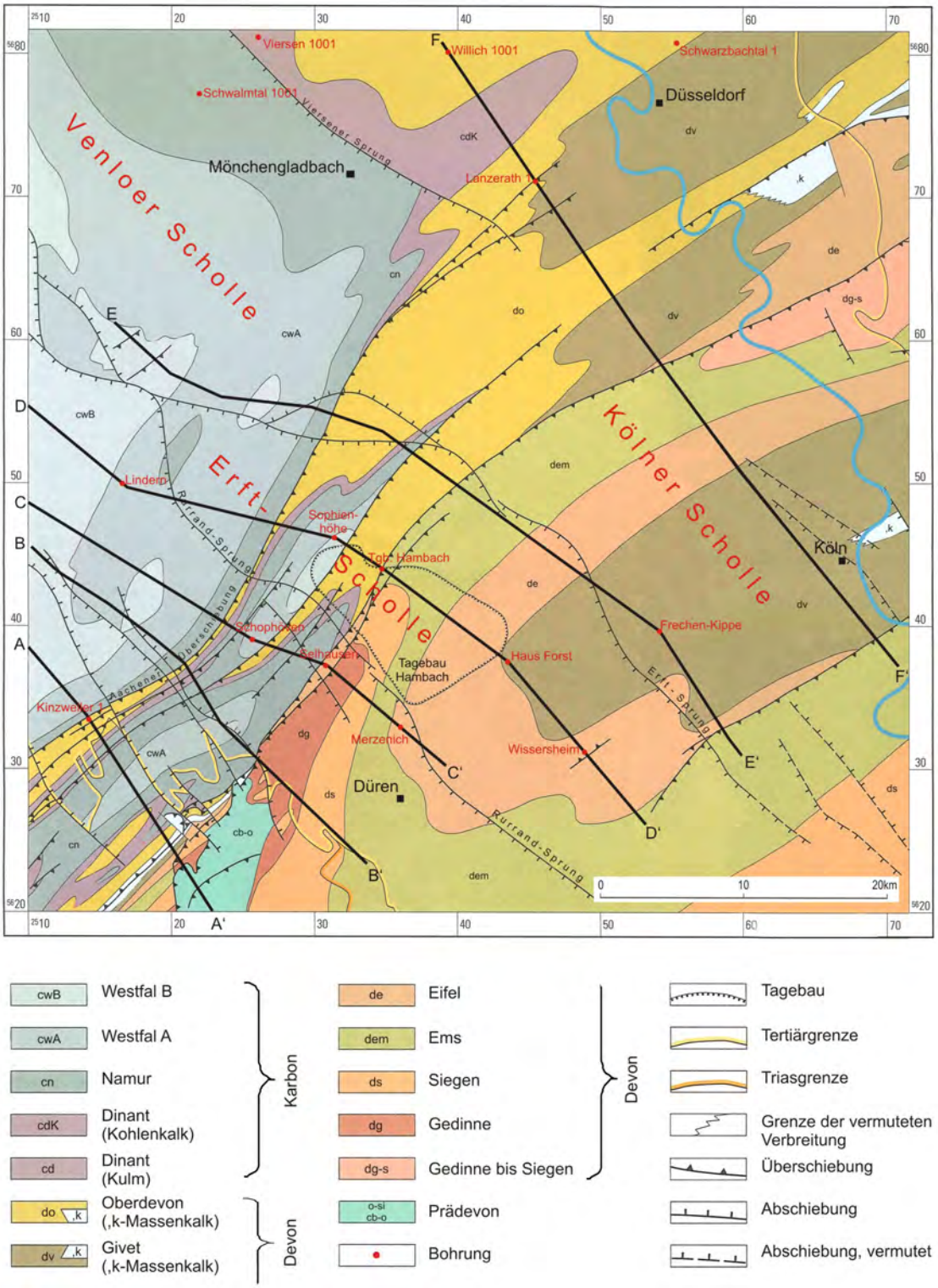


Abbildung 4.1: *Abgedeckte Geologische Karte der zentralen Niederrheinischen Bucht (aus GD NRW, 2005). Aufgeführt sind nur jene Bohrungen, aus denen Bohrkerne oder Bohrlochdaten für diese Studie zur Verfügung gestellt wurden. Die Schnittlinien beziehen sich auf die Querschnitte in Abbildung 4.2.*

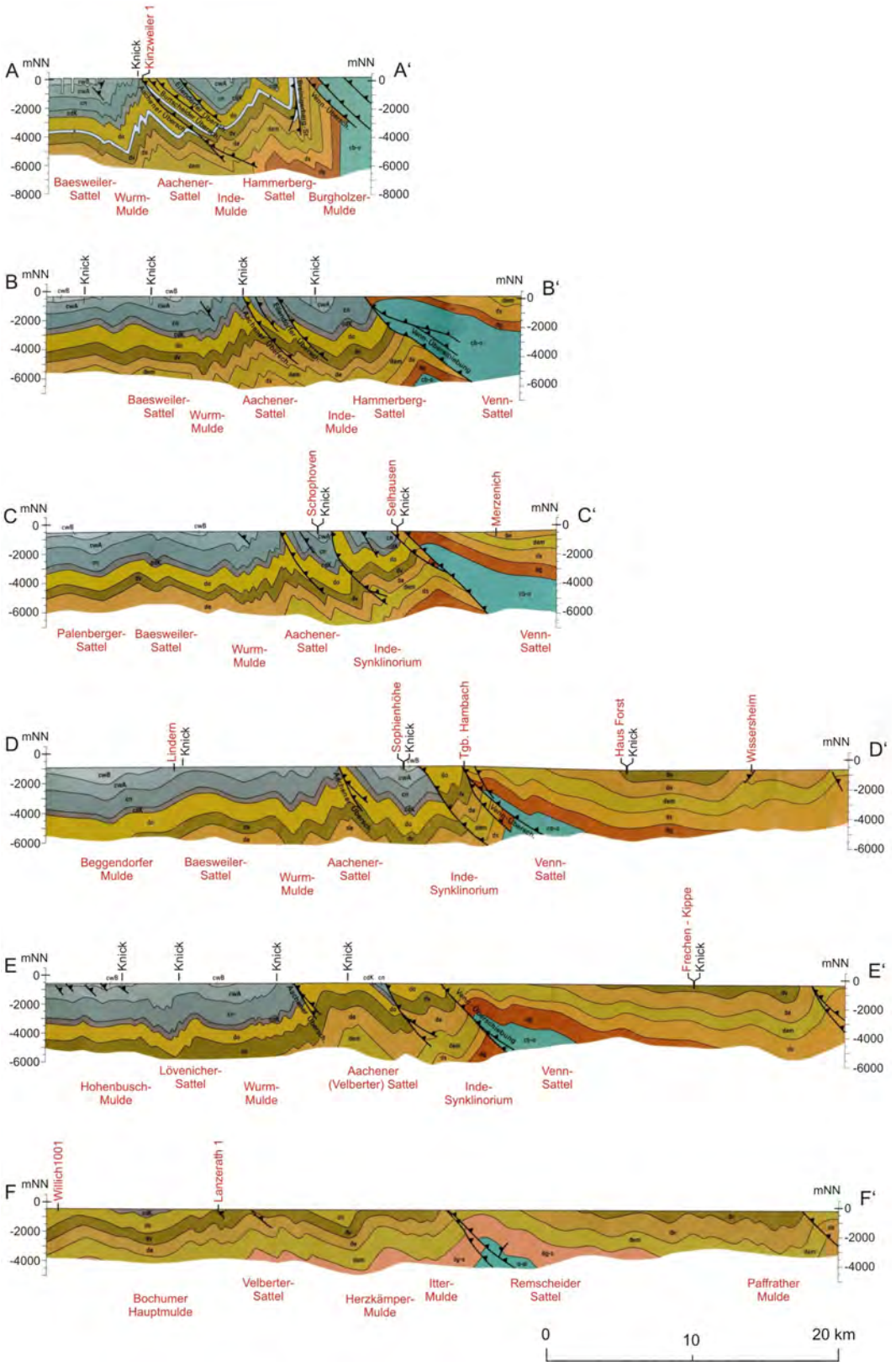


Abbildung 4.2: *Profilschnitte zu den Schnittlinien in Abbildung 4.1 durch den paläozoischen Untergrund der zentralen Niederrheinischen Bucht (aus GD NRW, 2005).*

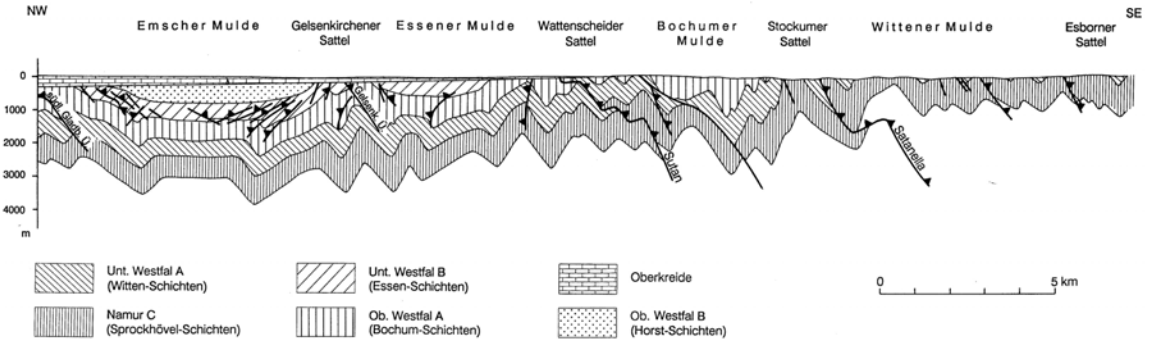


Abbildung 4.3: *Geologisches Profil durch das Rheinisch-Westfälische Steinkohlenrevier (nach Drozdzewski et al., 1980).*

Absterben aller Riffe im gesamten Gebiet eine Phase einheitlicher Faziesausbildung mit dunklen Tonen und Einschaltungen turbiditischer Sandsteine und Knollen- und Crinoidenkalken auf Tiefschwellen.

Ähnlich wie im Mitteldevon war auch der Faziesraum im **Unterkarbon** in ein nordwestliches Flachschelf (Kohlenkalkfazies) und ein südöstliches Becken (Kulmfazies) gegliedert. Das Verbreitungsgebiet der Kohlenkalkfazies reichte im Rechtsrheinischen Schiefergebirge bis an den Velberter Sattel. Im Linksrheinischen Schiefergebirge sind Gesteine des Kulms nur vom Südrand bekannt. Das Untersuchungsgebiet liegt somit vollständig im Bereich des Kohlenkalkfaziesraums.

An der Wende zum **Oberkarbon** (Namur) sank die Kohlenkalk-Plattform am Nordrand des Rechtsrheinischen Schiefergebirges ein. Nördlich des spätunterkarbonischen Flyschbeckens entwickelte sich ein Molassebecken, das im Ruhrgebiet zunächst mehr als 3.000 m flözleere Tonsteine und Sandsteine sowie Konglomerate des Namur A und B aufnahm. Erst im Namur C verflachte sich das Sedimentationsgebiet und es entwickelten sich die ersten Kohleflöze.

Die folgende paralische Sedimentation im Vorland des Rechtsrheinischen Schiefergebirges dauerte bis in das Westfal C an. Eine mehr als 5.000 m umfassende klastische Folge mit über 100 m Kohlenflözen kam in einem bis in das Namur-Becken, die Campine und in die südliche Nordsee reichenden Senkungsgebiete zur Ablagerung. Kohlengerölle aus bereits wieder der Abtragung unterliegenden älteren Kohlenflözen und ein hoher Reifegrad der Sandsteine besonders im höheren Westfal sind Anzeichen für eine auch während des Oberkarbons in nordwestlicher Richtung fortschreitende allmähliche Heraushebung des variszischen Faltungsgebietes.

Nur in seinem südlichen Teil ist das Ruhrgebiet deckgebirgsfrei. Nach Norden wird es von zunehmend mächtigen **Oberkreideschichten** der Münsterländer Oberkreidemulde überlagert. Im Westen schiebt sich älteres Deckgebirge (**Zechstein**, **Buntsandstein** und **Jura**) dazwischen.

4.2 Probenahmeprogramm

Die Probenahme von Kernmaterial aus dem tiefen Untergrund der Niederrheinischen Bucht und des Rhein-Ruhrgebietes umfasst 231 Kernproben aus 18 verschiedenen Bohrungen (vgl. Tabelle 4.1 und Abbildung 4.4). Sie stellen eine repräsentative Auswahl der paläozoischen Gesteinsserien des Untergrundes im westlichen Nordrhein-Westfalen dar. Die Bohrlochlokationen, aus denen die Kernproben

stammen, lassen sich drei Teilgebieten zuordnen: (1) Der südliche Niederrhein von der Bohrung B-01 im Westen bis zur Bohrung B-05 im Osten; (2) der nördliche Niederrhein mit den Bohrungen B-06 bis B-11, sowie (3) der Großraum Ruhrgebiet von Bohrung B-12 bis B-18.

Die Proben umfassen fast ausschließlich paläozoische Gesteinsserien vom Mitteldevon bis Oberkarbon aus Sandstein, Kalksandstein, Siltstein, Tonstein bzw. Tonschiefer, Mergel, Kalkstein, Dolomit und Konglomerat. Die stratigraphische Zugehörigkeit der Kernproben richtet sich nach dem variszischen Faltenbau und dessen großräumige Verwerfungen (vgl. Abbildung 4.1). Während die Bohrungen B-01 bis B-03 im Südwesten des Niederrheins unter der tertiären Beckenfüllung noch die vergleichsweise jüngeren Sedimente des Karbons umfassen, liegen östlich der Venn-Überschiebung überwiegend die älteren Sedimente des Mitteldevons zuoberst (Tabelle 4.2). Im nördlichen Niederrhein dominieren in den erbohrten Einheiten das Mittel- und Oberdevon mit Ausnahme der Bohrung B-06, die westlich des Viersener Sprungs liegt und daher jüngere Einheiten der Serien Vise und Namur durchteuft. Im Paläozoikum des Ruhrgebietes überwiegt in den Kernbohrungen das Westfal (Oberkarbon). Lediglich die Bohrung B-12 umfasst auch Einheiten aus der Trias und der Unterkreide.

Im Bemühen um eine möglichst große Repräsentativität wurden die Proben nach den Kriterien Verfügbarkeit, räumliche Abdeckung und hinreichende Repräsentanz der einzelnen Gesteinsserien ausgewählt. Hierzu wurde bereits vor der eigentlichen Beprobung auf Basis der Lagerliste zum Bestand von Kernmaterial im Bohrkernarchiv des GD NRW und der Informationen aus den Bohrakten eine Vorauswahl getroffen. In Abhängigkeit der jeweiligen Probengröße der durchschnittlich 15 cm bis 20 cm langen Kernproben und ihrer Beschaffenheit (Anteil quellfähiger Tone; Klüftigkeit) wurde das Messprogramm festgelegt. Generell durchliefen die Proben das folgende Arbeitsprogramm:

Vorarbeit

- Vorauswahl der Proben auf Basis der Bohrakten, soweit möglich (Regal, Fach, Kernmarsch, Kistennummer, Teufe, Lithologie);
- Probenahme mit erster lithologischer Zuordnung und fotografischer Erfassung der Probe in der Kernkiste;
- Im Labor: Detailfotos der Probe, Festlegung des Messprogramms in Abhängigkeit von der Größe und vom Zustand der Probe, Teufenrekonstruktion sowie lithologische Zuordnung mit detaillierter Gesteinsbeschreibung;
- Probenpräparation: Anschneiden der Mantelfläche zur Herstellung einer ebenen Fläche für die berührungslose Abtastung der Wärmeleitfähigkeit (TCS); Entnahme zylindrischer Proben (Plugs), Trocknung der Proben im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz bei 100 °C; Wassersättigung der trockenen Probe unter Vakuum.

Messprogramm (Standard)

- Bestimmung von Porosität, Rohdichte und Reindichte mittels Archimedes-Wägung und Pyknometer-Messungen;
- berührungslose Abtastung der Wärmeleitfähigkeit mit dem TCS-Gerät im trockenen (λ_d) und wassergesättigten Zustand (λ_s);
- alternativ wurde bei schlechter Probenqualität (z. B. bei Tonschiefern) die Matrix-Wärmeleitfähigkeit λ_m mittels einer Halbraumlinienquelle an einem Gemisch aus Gesteinsmehl und Wasser als Saturanden bestimmt;

Tabelle 4.1: *Übersicht zu den entnommenen Kernproben vom Kernarchiv des Geologischen Dienstes (GD) NRW aus dem tiefen Untergrundes des westlichen NRW (vgl. Abbildung 4.4). Die insgesamt 231 Proben stammen aus Forschungs- und Explorationsbohrungen des GD NRW, der Deutschen Steinkohle AG und der RWE Power AG.*

	Kürzel	Endteufe	Teufe Kernproben		Anzahl Proben
		(m)	von... (m)	bis... (m)	
Südl. Niederrhein	B-01	67,5	53,9	61,7	3
	B-02	434,2	163,9	417,9	14
	B-03	853,5	825,4	848,6	3
	B-04	818,0	783,3	817,3	5
	B-05	1.052,0	1.014,0	1.047,6	3
Nördl. Niederrhein	B-06	1.770,7	771,7	1.759,6	39
	B-07	1.573,0	246,6	1.498,9	33
	B-08	629,7	375,7	607,4	9
	B-09	499,1	343,0	493,0	10
	B-10	630,0	19,4	598,8	15
	B-11	151,0	14,5	131,6	5
Ruhrgebiet	B-12	1.372,6	312,7	547,9	12
	B-13	1.721,0	878,1	1.586,3	28
	B-14	1.378,2	914,2	1.364,5	8
	B-15	1.572,0	1.034,0	1.043,1	3
	B-16	733,9	559,5	709,6	11
	B-17	1.221,7	506,6	1.200,3	21
	B-18	1.508,9	497,8	1.358,4	9

- berührungslose Abtastung der Kompressionswellengeschwindigkeit V_p sowie der Gamma-Absorptionsdichte (Gesamtdichte) mit dem Corelogger im trockenen und wassergesättigten Zustand.

Messprogramm an ausgewählten Proben

- Messung der temperaturabhängigen spezifischen Wärmekapazität c_p mittels eines Dynamischen Wärmestrom-Differenz-Kalorimeters;
- Ableitung von Porosität, Porenradienverteilung und Permeabilität aus Messungen der T_1- und T_2-NMR-Abklingkurven und Vergleich der Ergebnisse mit unabhängigen Verfahren (Quecksilberporosimetrie und Messung der Gaspermeabilität);

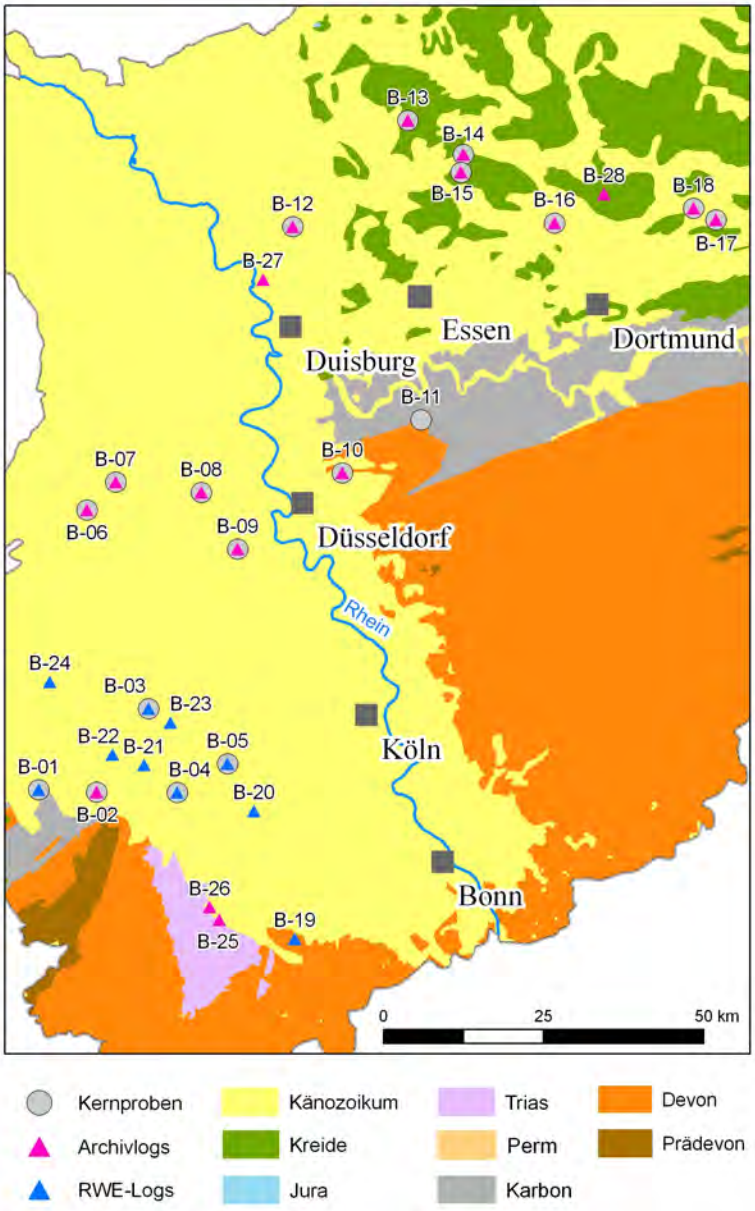


Abbildung 4.4: *Übersicht der Bohrlochlokationen im westlichen Nordrhein-Westfalen, aus denen Kernproben und Bohrlochdaten zur Verfügung gestellt wurden.*

- druck- und temperaturabhängige Messungen der Wärmeleitfähigkeit;

- quantitative Bestimmung des Mineralgehalts mittels RDA- und ggf. auch RFA- sowie Rietveld-Analyse;

Tabelle 4.2: *Stratigraphische Zuordnung der paläozoischen Kernproben aus den 18 Bohrungen des westlichen NRW. Nicht dargestellt sind zwölf mesozoische Einzelproben der Bohrung B-12 aus dem Muschelkalk, dem Keuper und der Unterkreide.*

				Südl. Niederrhein					Nördl. Niederrhein						Ruhrgebiet							
Serie	**Stufe**	**Unterstufe**	**Formation**	**B-01**	**B-02**	**B-03**	**B-04**	**B-05**	**B-06**	**B-07**	**B-08**	**B-09**	**B-10**	**B-11**	**B-12**	**B-13**	**B-14**	**B-15**	**B-16**	**B-17**	**B-18**	**Gesamt**
		Stefan C		<West				Ost>	<West					Ost>	<West						Ost>	
	Stefan	Stefan B																				0
		Stefan A																				
	Westfal	Westfal D																				
		Westfal C	Lembeck-Fm.													7						
			Obere Dorsten-Fm.		3											20	7					
			Untere Dorsten-Fm.																			
Oberkarbon		Westfal B	Horst-Fm.		1	3																85
			Essen-Fm.		1												1	3			8	
		Westfal A	Obere Bochum-Fm.																	21	1	
			Untere Bochum-Fm.		9																	
			Obere Witten-Fm.																			
			Untere Witten-Fm.																			
	Namur	Namur C	Sprockelhövel-Fm.																11			
		Namur B							28													39
		Namur A																				
Unterkarbon	Vise			3					11					2								16
	Tournai																					
Oberdevon	Famenne	Dasberg																				34
		Hemberg									9			3								
		Nehden								7												
	Frasne	Adorf								6		9										
Mitteldevon	Givet							3		20		1	15									44
	Eifel						5															

4.3 Gesteinsphysikalische Eigenschaften des Standardmessprogramms

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden an insgesamt 231 Proben aus dem westlichen Nordrhein-Westfalen petrophysikalische Messungen durchgeführt. Es wurden folgende Gesteinseigenschaften bestimmt: Wärmeleitfähigkeit λ_d (trocken) und λ_s (wassergesättigt), Reindichte (Dichte der Gesteinsmatix) ρ_m, Rohdichte (Dichte der Probe mit Porenraum) ρ_b, Porosität ϕ und Geschwindigkeit der Kompressionswelle V_p. In Ergänzung wurde an ausgewählten Proben weitere Gesteinseigenschaften bestimmt, die in den nachfolgenden Abschnitten 4.4 bis 4.7 aufgeführt sind.

Ausgewählte Proben wurden chemisch und mineralogisch analysiert. Insgesamt wurde an 100 Proben mittels Röntgendiffraktometrie (RDA) und Rietveld-Analyse der Mineralgehalt quantifiziert. Die mineralogische Gesteinszusammensetzung ist wie im Abschnitt 2.2 aufgeführt eng mit den petrophysikalischen Eigenschaften verknüpft. Die Eigenschaften des Gesamtgesteins $P_{Gestein}$ resultieren aus den Volumenanteilen V_i der Gesteinskomponenten i und den physikalischen Eigenschaften der Einzelkomponenten $P_{Komp,i}$. Im einfachsten Fall wie beispielsweise der Gesamtdichte lässt sich $P_{Gestein}$ nach der Koppschen Regel als gewichtetes Mittel berechnen:

$$P_{Gestein} = \sum_{i=1}^{n} P_{Komp_i} V_i \tag{4.1}$$

Insofern liefern die erhobenen Daten im Hinblick auf die Interpretation thermischer und hydrauli-

scher Kennwerte wertvolle ergänzende Informationen zu den Gesteinsarten und den stratigraphischen Einheiten mit ihren jeweils unterschiedlichen faziellen Ausprägungen.

Der erzeugte petrophysikalische Datensatz wurde einer Qualitätskontrolle unterzogen und mit den lithologischen und geologischen Informationen zu den Proben verknüpft. Dies ermöglicht eine statistische Analyse des erzeugten Datensatzes im Hinblick auf die vorhanden Gesteinstypen, ihre stratigraphische Zuordnung und ihre mineralogische Zusammensetzung.

4.3.1 Übersicht zu den gesteinsphysikalischen Eigenschaften der Hauptgesteinsarten

Die Proben aus dem tiefen Untergrund des Arbeitsgebietes „westliches Nordrhein-Westfalen“ (Niederrheinische Bucht und Großraum Ruhrgebiet) können insgesamt fünf Hauptgesteinstypen zugeordnet werden. Abbildung 4.5 und Tabelle 4.3 zeigen die Verteilung und die statistischen Kennwerte der wassergesättigten Wärmeleitfähigkeit, der Reindichte, der Porosität und der Kompressionswellengeschwindigkeit für die fünf Hauptgesteinstypen Tonstein, Siltstein, Sandstein, Konglomerat und Karbonat. Die lithologische Zuordnung der klastischen Gesteine erfolgte durch die eigene makroskopische Gesteinsbeschreibung im Abgleich mit den Schichtenverzeichnissen. Korngrößenanalysen wurden nicht durchgeführt. Da bei den klastischen Hauptgesteinsarten streng genommen die dominierende Korngrößenfraktion den Gesteinstyp klassifiziert, war eine treffsichere Zuordnung insbesondere bei tonig-sandigen Übergangstypen nicht immer gewährleistet, was aber im Hinblick auf die untersuchte Probenmenge statistisch kaum Einfluss haben dürfte.

Die Wärmeleitfähigkeiten der klastischen Gesteine sind mit zunehmender Korngröße (Tonstein bis Konglomerat) durch eine steigende Variationsbreite und einem Anstieg des Mittelwertes gekennzeichnet (Abbildung 4.5). Für die Zunahme der Wärmeleitfähigkeit ist in erster Linie der Anstieg des Quarzgehaltes verantwortlich, bedingt durch die höhere Wärmeleitfähigkeit gegenüber den anderen gesteinsbildenden Mineralen (Tonminerale, Feldspat und Glimmer), welche in den feinkörnigen Siliziklastika naturgemäß einen höheren Anteil haben (vgl. Abbildung 4.6). Dieser Zusammenhang ist sehr gut in Abbildung 4.7 ersichtlich. Ton- und Siltsteine sind mit einem Quarzanteil von unter 55 % und Wärmeleitfähigkeiten von unter 4 W m^{-1} K^{-1} gekennzeichnet, wogegen die meisten Sandsteine jeweils über diesen Schwellenwerten liegen. Die beiden Ausreißer bei den Sandsteinen lassen sich durch einen Anteil von Pyrit zwischen 3 % und 6 % erklären, der durch die sehr hohe Wärmeleitfähigkeit von mindestens 19,2 W m^{-1} K^{-1} (Clauser, 2006) bereits bei niedrigen Gehalten einen Einfluss auf die thermischen Eigenschaften des Gesamtgesteins ausübt.

Die höhere Variationsbreite der Wärmeleitfähigkeit von Sandstein und Konglomerat gegenüber den feineren Siliziklastika liegt in der ausgeprägteren Inhomogenität der Korngröße begründet. Die Ablagerung der Sandsteine erfolgte im Schelfbereich oder als Beckensedimente. Die Konglomerate gelangten in küstennahen Abschnitten zur Ablagerung. Dadurch bedingt führten wechselnde Strömungsgeschwindigkeiten oder Einschaltungen von Turbiditen zu einer oftmals sehr engständigen Wechsellagerung von feineren und gröberen Klastika. Typisch ist die Sandstein-Tonstein-Wechsellagerung im Mittel- und Oberdevon sowie im Westfal des Oberkarbons. Aufgrund des hohen Tonanteils weisen die Sandsteine teilweise einen sehr niedrigen Quarzgehalt auf, was in Abbildung 4.6 ersichtlich ist. Die Variation der Sandstein-Wärmeleitfähigkeiten wird darüber hinaus von der relativ hohen Porosität der überwiegend unterkarbonischen Sandsteine gegenüber den insgesamt sonst dichten paläozoischen Sandsteinen beeinflusst (vgl. Abschnitt 4.3.3). Je höher der Porenraum, desto niedriger die wassergesättigte Wärmeleitfähigkeit.

Bei den Karbonatgesteinen handelt es sich überwiegend um Riffkalke oder Massenkalke des Oberde-

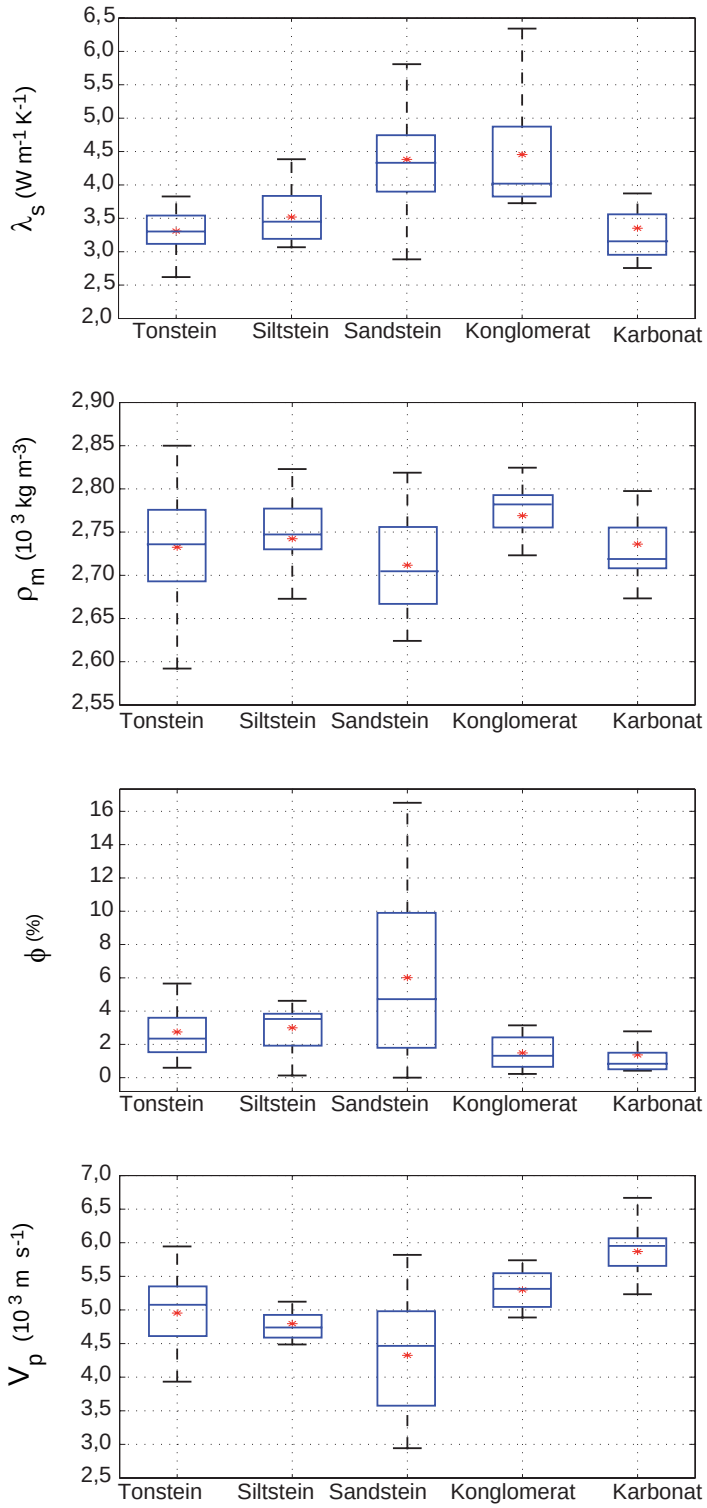


Abbildung 4.5: *Darstellung der statistischen Maßzahlen petrophysikalischer Eigenschaften für fünf Hauptgesteinstypen paläozoischer Gesteinsserien aus dem westlichen Nordrhein-Westfalen in Form von Box-Whisker-Diagrammen (blaue Mittellinie: Medianwert; roter Stern: Mittelwert; blaue Box: 25 %- und 75 %-Quartil; schwarze Begrenzungsstriche: 5 %- und 95 %-Perzentil): a) Wärmeleitfähigkeit gesättigter Proben λ_s, b) Reindichte ρ_m, c) Porosität ϕ und d) Kompressionswellengeschwindigkeit V_p. Die dargestellten Werte korrespondieren mit Tabelle 4.3.*

Tabelle 4.3: *Übersicht zu den petrophysikalischen Eigenschaften für fünf Hauptgesteinstypen paläozoischer Gesteinsserien aus dem westlichen Nordrhein-Westfalen (vgl. Abbildung 4.5): λ_s: wassergesättigte Wärmeleitfähigkeit, ρ_m: Reindichte, ϕ: Porosität, V_p: Kompressionswellengeschwindigkeit.*

		N	Mittel-wert	Stabw.	Min.	25%-Quart.	Median	75%-Quart.	Max.
λ_s (W m^{-1} K^{-1})	Tonstein	42	3,31	0,29	2,62	3,13	3,22	3,56	3,83
	Siltstein	13	3,52	0,40	3,07	3,18	3,44	3,85	4,38
	Sandstein	59	4,38	0,68	2,89	3,83	4,34	4,86	6,02
	Konglomerat	9	4,46	0,94	3,73	3,83	4,03	4,86	6,34
	Karbonat	21	3,35	0,66	2,76	2,94	3,15	3,53	5,36
ρ_m (kg m^{-3})	Tonstein	95	2732	54	2559	2693	2736	2775	2850
	Siltstein	23	2742	50	2632	2730	2747	2776	2823
	Sandstein	58	2712	63	2624	2666	2705	2755	2947
	Konglomerat	9	2769	48	2665	2756	2782	2792	2825
	Karbonat	22	2736	46	2673	2708	2718	2755	2856
Φ (-)	Tonstein	42	0,028	0,023	0,006	0,012	0,016	0,036	0,076
	Siltstein	13	0,030	0,014	0,001	0,020	0,035	0,038	0,046
	Sandstein	57	0,060	0,049	0,000	0,018	0,047	0,099	0,165
	Konglomerat	9	0,018	0,010	0,002	0,007	0,014	0,024	0,031
	Karbonat	21	0,014	0,016	0,004	0,006	0,008	0,015	0,077
V_p (m s^{-1})	Tonstein	37	4954	575	3164	4610	5083	5343	5945
	Siltstein	11	4796	540	3818	4580	4752	4931	6077
	Sandstein	55	4325	828	2943	3571	4474	4965	5820
	Konglomerat	9	5298	314	4888	5060	5304	5536	5739
	Karbonat	20	5869	379	4999	5661	5951	6074	6668

vons oder um Riff-, Schutt- oder bituminöse Kalke der Kohlenkalkfazies des Unterkarbons. Darunter befinden sich nur zwei reine Dolomite, aber mehrere dolomitische Kalksteine. Dadurch variieren die petrophysikalischen Eigenschaften der sehr dichten Karbonatgesteine mit einer mittleren Porosität von 1,4 % (vgl. Tabelle 4.3) zwischen den jeweiligen Kennwerten der Endglieder Calcit und Dolomit.

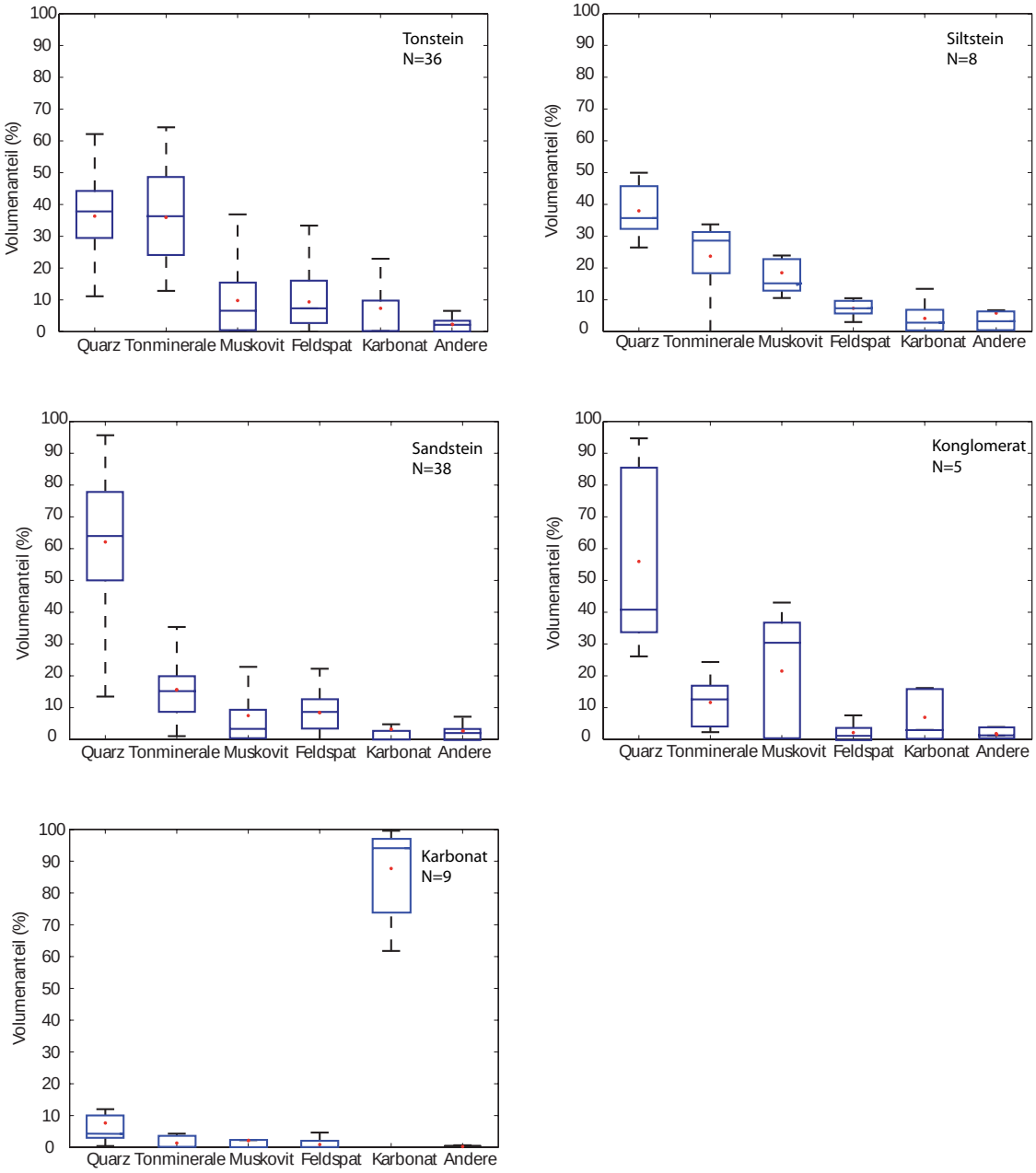


Abbildung 4.6: *Verteilung der quantitativen mineralogischen Zusammensetzung der fünf Hauptgesteinstypen in Form von Box-Whisker-Diagrammen (blaue Mittellinie: Medianwert; roter Stern: Mittelwert; blaue Box: 25 %- und 75 %-Quartil; schwarze Begrenzungsstriche: 5 %- und 95 %-Perzentil.*

Die Reindichte variiert bei den Ton- und Siltsteinen relativ stark, verursacht durch die großen Wertebereiche der gesteinsbildenden Minerale (vornehmlich Tonminerale und Glimmer). Die Reindichten der Sandsteine fallen sowohl durch ihre hohe Variationsbreite als auch durch ihren hohen Mittelwert von 2712 kg m^{-3} auf, welcher deutlich über der Reindichte des Hauptbestandteils Quarz von 2648 kg m^{-3} (Schön, 1996) liegt. Ursächlich hierfür ist zum einen der oben erwähnte, für Sandsteine ungewöhnlich niedrige Quarzanteil bzw. der entsprechend höhere Anteil toniger Bestandteile mit den damit verbundenen höheren Mineraldichten, zum anderen der hohe Dolomit- oder Muskovitanteil ei-

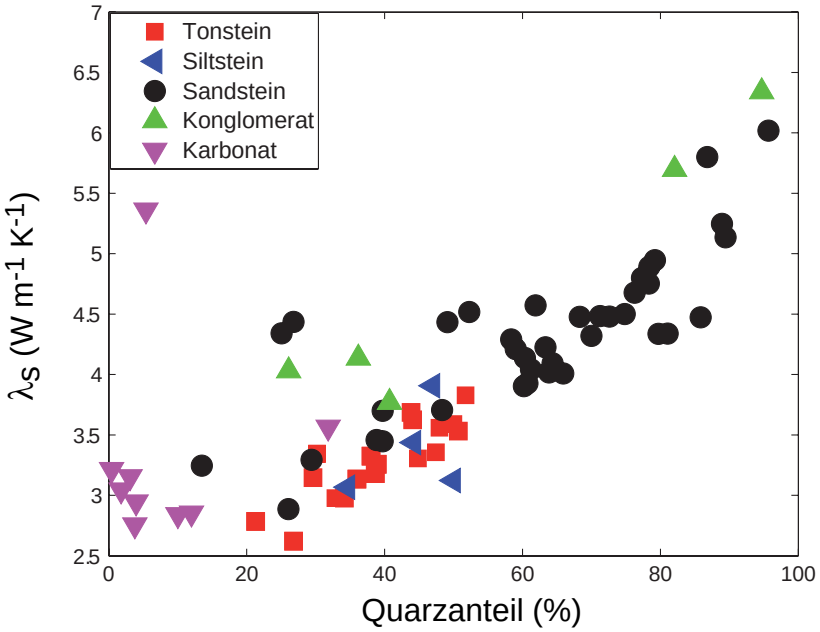


Abbildung 4.7: *Gesättigte Wärmeleitfähigkeit untersuchter Kernproben in Abhängigkeit des Quarzgehaltes.*

niger Sandsteine ($\rho_{Dolomit}$ = 2866 kg m^{-3}, $\rho_{Muskovit}$ = 2831 kg m^{-3}) (Schön, 1996). Die Dichte der Konglomerate rangiert im Durchschnitt ebenfalls sehr hoch und ist auch hier mit einem oftmals hohen Muskovitanteil von über 30 % verknüpft (vgl. Abschnitt 4.3.3).

Durch den hohen Grad der diagenetischen Verfestigung erweisen sich alle paläozoischen Gesteine als sehr dicht mit einer Porosität von meist unter 4 %. Lediglich die Gruppe der Sandsteine zeigt zum Teil höhere Porositäten von bis zu 16 %, was vornehmlich auf oberkarbonische Sandsteine zurückzuführen ist (vgl. Abschnitt 4.3.3).

4.3.2 Überführung der Ergebnisse in Gesteinsmodelle

Um die einzelnen Messergebnisse an der Proben in ein allgemeingültigeres Gesteinsmodell zu überführen und sie somit generell für geologische Schichten zu verwerten, wird auf die in dieser Studie einmalige Datenbasis zurückgegriffen. Es existieren für 74 Proben sowohl Messungen der Wärmeleitfähigkeit als auch die quantitative mineralogische Zusammensetzung aus der Röntgendiffraktometrie (RDA) und der Rietveld-Analyse. Daher ist es möglich, die gemessenen Werte mit theoretischen Modellen zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeiten zu vergleichen. Hierfür wurden Literaturdaten (Clauser, 2006) zu den jeweiligen Mineralen verwendet (Tabelle 4.4) und deren Volumenanteile aus der quantitativen Mineralanalyse (vgl. Abbildung 4.6) entnommen.

Abbildung 4.8 zeigt zunächst allgemeine Lage der aus den unterschiedlichen Mischungsgesetzen resultierenden Kurven. Während das arithmetische und harmonische Mittel die obere bzw. untere Grenze bilden, liegt das geometrische Mittel in der Mitte. Die verschiedenen Mittel werden nach folgenden Formeln berechnet:

$$\lambda_{arith}(\phi) = (1-\phi)\lambda_m + \phi\lambda_{a,w} \tag{4.2}$$

Tabelle 4.4: *Wärmeleitfähigkeit λ der gesteinsbildenden Minerale zur Berechnung der Matrix-Wärmeleitfähigkeit mit dem geometrischen Mittel.*

Mineral	λ (W m^{-1} K^{-1})	Quelle
Quarz	7,6	Clauser (2006)
Feldspat	2,0	Clauser (2006)
Tonminerale	1,9	Schön (1996)
Muskovit	2,3	Clauser (2006)
Calcit	3,3	Clauser (2006)
Dolomit	5,9	Clauser (2006)
Siderit	3,0	Clauser (2006)
Pyrit	19,2	Clauser (2006)

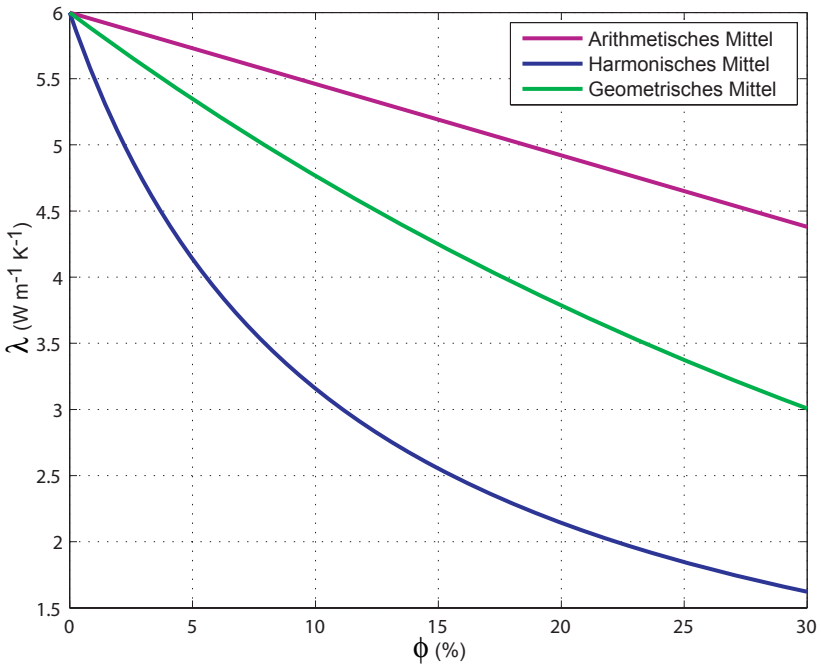


Abbildung 4.8: *Änderung der Wärmeleitfähigkeit λ (gesättigt) mit der Porosität ϕ, berechnet nach dem arithmetischen, harmonischen und geometrischen Mittel. Das geometrische Mittel liegt zwischen den Extremen des arithmetischen und harmonischen Mittels. Für die Matrixwärmeleitfähigkeit wurde exemplarisch 6 W m^{-1}K^{-1} angenommen.*

$$\lambda_{geo}(\phi) = \lambda_m^{(1-\phi)} \cdot \lambda_{a,w}^{\phi} \tag{4.3}$$

$$\lambda_{har}(\phi) = 1/\left\{(1-\phi)/\lambda_m + \phi/\lambda_{a,w}\right\} \tag{4.4}$$

Dabei ist λ_m die Wärmeleitfähigkeit der Matrix und λ_w diejenige des luftgefüllten (Index a) bzw. wassergesättigten (Index w) Porenraums.

Das geometrische Mittel, auch Lichtenecker Modell genannt (Lichtenecker und Rother, 1931), beschreibt die Messwerte am besten. Dies trifft in vielen Fällen zu (Clauser, 2006), daher wird dieses Modell am häufigsten verwendet (z.B. Pribnow und Sass, 1995; Schön, 1996). Abbildung 4.9a bestätigt dies. Dort werden die farblich codierten, aus den Mineralfraktionen berechneten Matrix-Wärmeleitfähigkeiten für die gegebenen Messpunkte jeweils mit der nächstliegenden theoretischen Kurve verglichen, die die porositätsabhängige trockene Wärmeleitfähigkeit (berechnet nach dem geometrischen Mittel) bei gegebener Matrix-Wärmeleitfähigkeit darstellt. Die gute Deckung der Punktfarben mit den Farben der Linien belegt die gute Übereinstimmung der Messdaten mit dem Lichtenecker Modell.

Um den unterschiedlichen Porengeometrien Rechnung zu tragen, gibt Asaad (1955) eine Modifikation des Lichtenecker Modells (Gleichung 4.3) an:

$$\lambda(\phi) = \lambda_m^{(1-f\phi)} \cdot \lambda_a^{f\phi} \tag{4.5}$$

Hier ist f ein Korrelationsfaktor, welcher den Grad der Lithifikation des Sedimentgesteins beschreibt für die jeweilige Porenstruktur des Gesteins charakteristisch ist. Um diesen Faktor zu bestimmen, muss die Beziehung (Gleichung4.5) gleichzeitig hinsichtlich der Unbekannten λ_m und f ausgewertet werden. Es wird die trocken gemessene Wärmeleitfähigkeit betrachtet. Zur Anpassung der beiden unbekannten Parametern an die gemessen Werte λ_d und ϕ wird eine Monte Carlo-Simulation eingesetzt. Dabei werden zunächst sowohl der f-Faktor als auch die Matrixwärmeleitfähigkeit λ_m per Zufall aus einem vorgegebenen Intervall ausgewählt. Die aus dieser Parameterkombination p resultierende Wärmeleitfähigkeit wird nun mit den Daten d verglichen und die Abweichung S berechnet (Mosegaard und Tarantola, 1995):

$$S(\mathbf{p}) = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N}(\lambda(p_i) - \lambda(d_i))^2, \tag{4.6}$$

wobei der Index über die Anzahl der Messungen läuft. Danach werden wiederum zufällig die unbekannten Parameter bestimmt und wieder die Abweichung S berechnet. Wenn die neue Abweichung S_{neu} kleiner als die vorherige Abweichung S_{alt} ist, dann werden die Parameter in die a posteriori-Verteilung mit aufgenommen. Wenn jedoch die neue Abweichung größer ist, wird die neue Parameterkombination mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit ebenfalls akzeptiert. Insgesamt folgt daher für die Wahrscheinlichkeit, dass eine bestimmte Kombination angenommen wird zu

$$P_{akz} = \begin{cases} 1 & wenn \quad S(\mathbf{p}_{neu}) \leq S(\mathbf{p}_{alt}) \\ exp(-\frac{S(\mathbf{p}_{neu})-S(\mathbf{p}_{alt})}{s^2}) & wenn \quad S(\mathbf{p}_{neu}) > S(\mathbf{p}_{alt}) \end{cases}, \tag{4.7}$$

wobei s die Standardabweichung in den Daten ist, entsprechend der Messgenauigkeit der TCS-Messaparatur von 5 %. (siehe Abschnitt 2.1.1).

Als Ergebnis liefert die Monte-Carlo Simulation nach Auswertung über einer Million Zufallskombinationen eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Matrix-Wärmeleitfähigkeiten λ_m und die f-Faktoren, aus denen als Ergebnis die Mittelwerte und Standardabweichungen zusammengestellt werden. Diese Vorgehensweise wurde sowohl für das Lichtenecker Modell (nur λ_m) als auch für das Asaad-Modell (λ_m und f-Faktoren) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.5 dargestellt.

Für die Auswertung wurden nur die Gesteinsgruppe der Ton- und Sandsteine sowie ergänzend die Gesteine der Condroz-Fazies (vgl. Abschnitt 4.3.3) herangezogen. Alle anderen Gesteinstypen des

Tabelle 4.5: *Ergebnisse der Monte Carlo-Untersuchung von Matrix-Wärmeleitfähigkeit und f-Faktor (Mittel und Standardabweichung) der Hauptgesteinsarten nach dem Asaad-Modell (Gleichung 4.5).*

Gestein	Matrix-Wärmeleitfähigkeit (geom.) [W m^{-1} K^{-1}]	Matrix-Wärmeleitfähigkeit (Asaad) [W m^{-1} K^{-1}]	f-Faktor
Tonstein	3,48 $\pm$ 0,05	3,43 $\pm$ 0,10	0,88 $\pm$0,20
Sandstein	4,92 $\pm$ 0,14	4,43$\pm$ 0,15	0,56$\pm$ 0,10
Condroz-Fazies	3,64$\pm$0,09	3,54$\pm$0,14	0,79$\pm$0,24

nordrhein-westfälischen Paläozoikums waren zu dicht. Die Überführung in Gesteinsmodelle setzt jedoch Porositäten voraus, die sich über ein gewisses Spektrum erstrecken, um sinnvoll einen Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit und Porosität herstellen zu können. Insgesamt gingen 54 Proben in die Auswertung ein, an denen sowohl die Wärmeleitfähigkeit gemessen als auch der quantitative Mineralbestand erfasst wurde. Da der Kontrast zwischen der Wärmeleitfähigkeit der Luft (λ_a = 0,026 W m^{-1} K^{-1} bei T = 25 °C) und Mineralmatrix größer ist als derjenige im gesättigten Zustand (λ_w = 0,6 W m^{-1} K^{-1}), wurde für einen möglichst hohen Einfluss der Porosität die trockene Wärmeleitfähigkeit herangezogen.

Die Ergebnisse aus Tabelle 4.5 sind in Abbildung 4.9b für beide Gesteinsmodelle dargestellt. Die gestrichelten Linien zeigen das geometrische Modell und können für jede Gesteinsart jeweils mit dem Asaad-Modell (durchgezogenene Linien der gleichen Farbe) verglichen werden. Während sich die Kurvenverläufe für Tonstein und die tonreiche Condroz-Fazies kaum unterscheiden, ist der Unterschied beim Sandstein wegen des niedrigen f-Faktors deutlich ausgeprägt. Insbesondere im Bereich höherer Porositäten ab 10 % trifft der Verlauf der Kurve nach dem Asaad-Modell die Messwerte besser.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass das Lichtenecker-Modell eine schnelle und robuste Abschätzung der Wärmeleitfähigkeit liefert. Dies gilt hier insbesondere für Tonstein und die tonreichen Steine der Condroz-Fazies, welche sich innerhalb des Arbeitsgebietes unabhängig von stratigraphischem Alter, Fazieszugehörigkeit und Genese zeigen. Eine Modifizierung nach Asaad (1955) erlaubt eine Kalibrierung des theoretischen Modells an die Daten. Dies geschieht über gesteinsspezifische Parameter, welche die Beziehung zwischen Matrix, porenspezifischer Strukur und Wärmeleitfähigkeit der Hauptgesteinsarten beschreibt.

4.3.3 Gesteinsphysikalische Eigenschaften der Siliziklastika

Im diesem und im nachfolgenden Abschnitt werden die gesteinsphysikalischen Eigenschaften der Hauptgesteinstypen aus Abschnitt 4.3.1 genauer betrachtet, um die Wechselbeziehungen zwischen Petrogenese, mineralogische Zusammensetzung, Gesteinsgefüge und ihren Einfluss auf die petrophysikalischen Kennwerte aufzuzeigen. Die nachfolgenden Abbildungen 4.10 bis 4.13 zeigen jeweils ergänzend die Häufigkeitsverteilungen zu den vier siliziklastischen Hauptgesteinstypen. Für die Wärmeleitfähigkeit λ_s und die Kompressionswellengeschwindigkeit V_p sind nicht nur die Verteilungen der Eigenschaften aus den Einzelproben dargestellt, sondern auch sämtliche Einzelwerte aus den Corelogger-Messungen (vgl. Abschnitt 2.1.1 und Abschnitt 2.1.4), d. h. ein Messwert pro 4 mm (λ_s) bzw. pro 10 mm Probenlänge (V_p). Der Unterschied der ermittelten Kennwerte in dieser Darstellungsweise stellt keine nennenswerte Änderung gegenüber den statistischen Kennwerte in Tabelle 4.3 dar; die größere Datenmenge liefert aber vor allem bei Gesteinstypen mit nur geringer Probenzahl genauere Informationen.

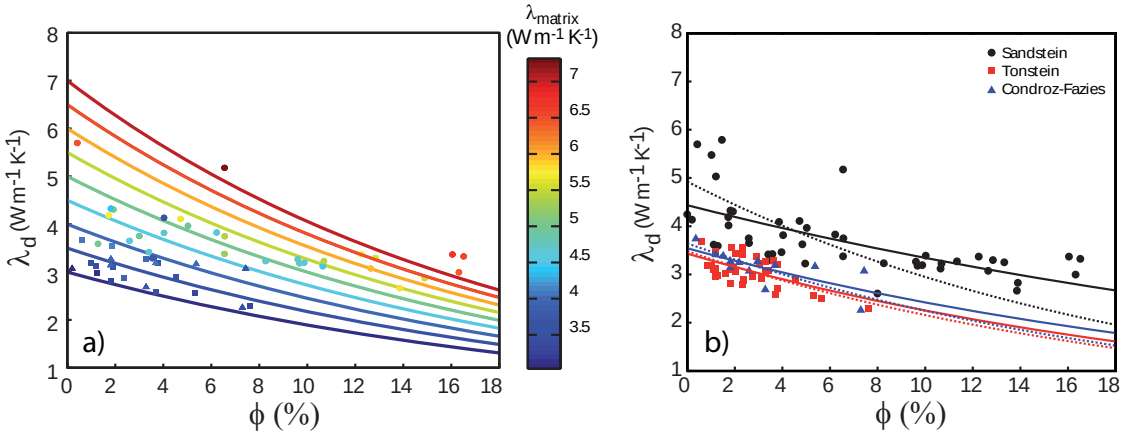


Abbildung 4.9: *Gemessene trockene Wärmeleitfähigkeit λ_d in Abhängigkeit der Porosität ϕ für drei Gesteinsgruppen (vgl. Text).* ***a)*** *Die Linien zeigen den theoretischen Verlauf an, berechnet mit dem geometrischen Mittel (Lichtenecker-Modell, Gleichung 4.3) für unterschiedliche Matrix-Wärmeleitfähigkeiten. Diese sind sowohl auf der Ordinate bei ϕ = 0 % abzulesen als auch durch die Farben codiert. Die Matrix-Wärmeleitfähigkeit der Datenpunkte wurde ebenfalls mit dem geometrischen Mittel aus den Volumenanteilen der gesteinsbildenden Minerale und deren zugehörige Wärmeleitfähigkeiten aus Tabelle 4.4 berechnet. Die farbliche Übereinstimmung zwischen Linien und Datenpunkten belegt den Einklang der Messdaten mit dem Lichtenecker Modell.* ***b)*** *Trockene Wärmeleitfähigkeiten λ_d für drei Gesteinsgruppen nach dem Lichtenecker-Modell (nach Gleichung 4.3; gestrichelte Linien) und der Modifikation nach Asaad (nach Gleichung 4.5, durchgezogene Linien). Die Kurven basieren auf den Ergebnissen in Tabelle 4.5.*

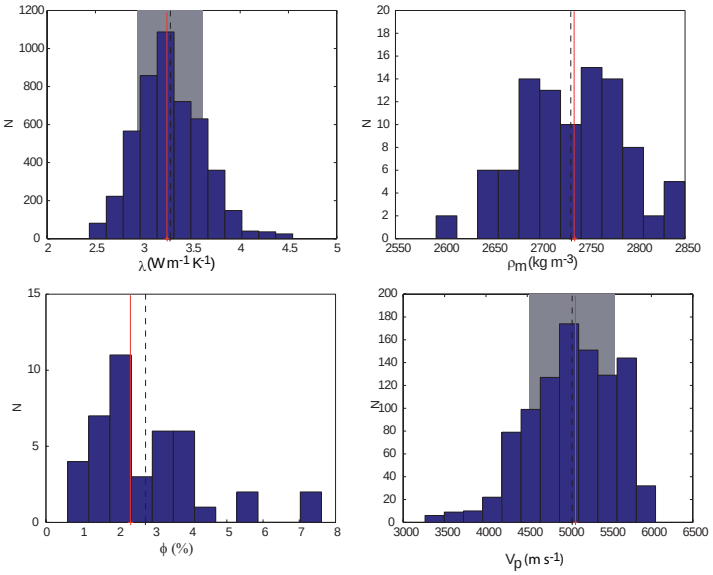


Abbildung 4.10: *Häufigkeitsverteilung petrophysikalischer Eigenschaften von Tonstein aus dem Paläozoikum des westlichen Nordrhein-Westfalens (schwarze gestrichelte Linie: Mittelwert; rote durchgezogene Linie: Median; graues Feld: Standardabweichung):λ_s: Wärmeleitfähigkeit gesättigter Proben (alle Einzelwerte aus den Scanlinien; vgl. Text); ρ_m: Reindichte (eine Einzelmessung je Probe; vgl. Text); ϕ: Porosität (eine Einzelmessung je Probe; vgl. Text); V_p: Kompressionswellengeschwindigkeit gesättigter Proben (alle Einzelwerte aus den Scanlinien; vgl. Text).*

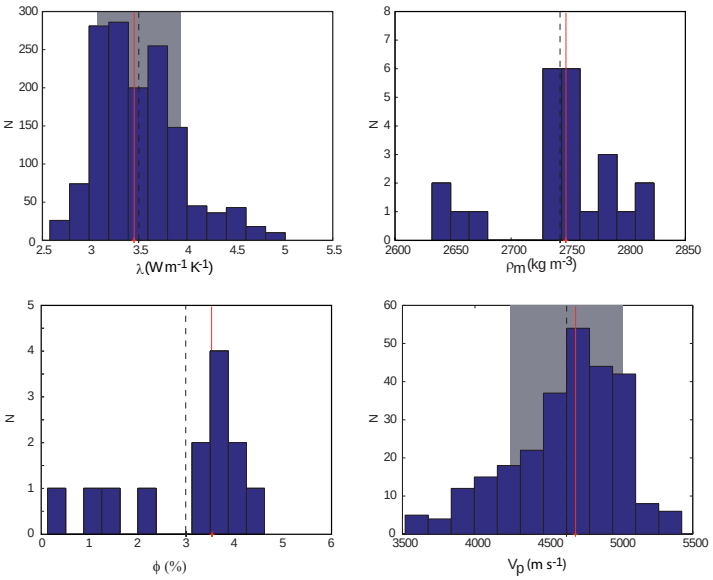


Abbildung 4.11: *Häufigkeitsverteilung petrophysikalischer Eigenschaften von Siltstein aus dem Paläozoikum des westlichen Nordrhein-Westfalens (nähere Erläuterungen siehe Abbildungsbeschriftung zu Abbildung 4.10).*

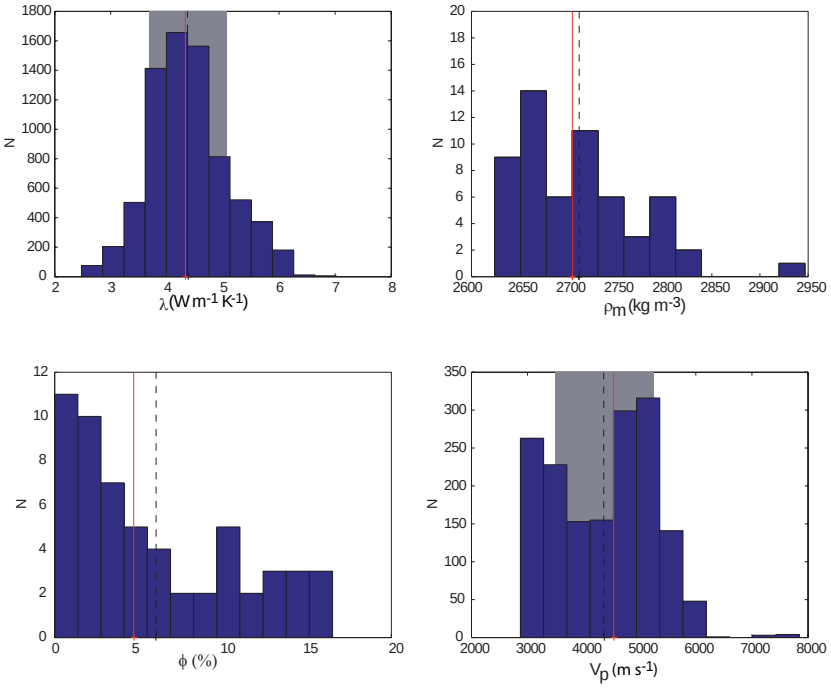


Abbildung 4.12: *Häufigkeitsverteilung petrophysikalischer Eigenschaften von Sandstein aus dem Paläozoikum des westlichen Nordrhein-Westfalens (nähere Erläuterungen siehe Abbildungsbeschriftung zu Abbildung 4.10).*

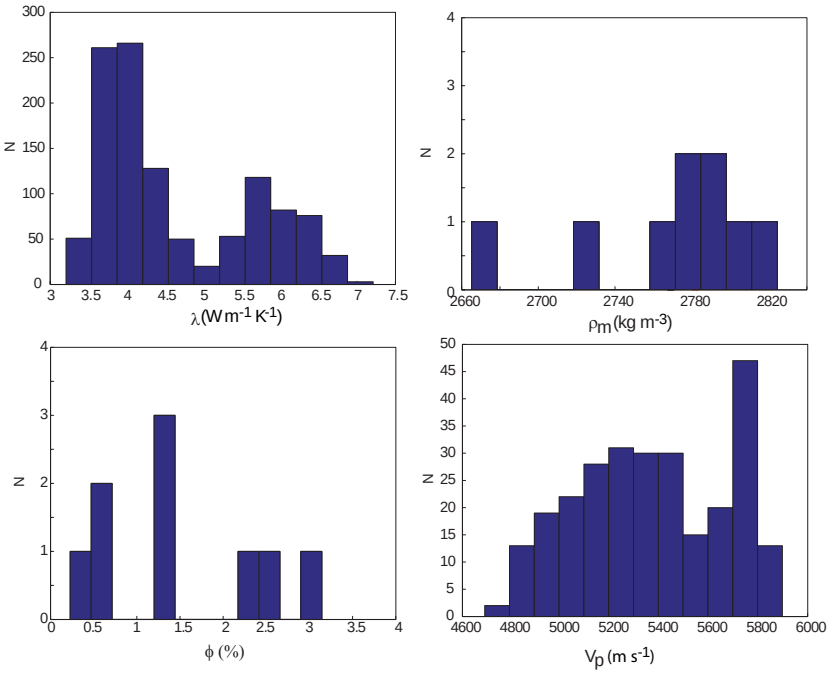


Abbildung 4.13: *Häufigkeitsverteilung petrophysikalischer Eigenschaften von Konglomeraten aus dem Paläozoikum des westlichen Nordrhein-Westfalens (nähere Erläuterungen siehe Abbildungsbeschriftung zu Abbildung 4.10).*

Tabelle 4.6: *Statistische Kennwerte der Porosität ϕ devonischer und karbonischer Sandsteine aus dem westlichen Nordrhein-Westfalen, differenziert in die Gruppen „Westfal" (Oberkarbon) und „restliches Paläozoikum".*

		N	Mittel-wert	Stabw.	Min.	25%-Quart.	Median	75%-Quart.	Max.
Φ (-)	Sandstein (Westfal)	29	0,087	0,044	0,017	0,050	0,096	0,122	0,165
	Sandstein (ohne Westfal)	28	0,032	0,039	0,000	0,010	0,018	0,040	0,163

Die Matrixdichteverteilung der Tonsteine lässt zwei Submaxima erkennen (Abbildung 4.10). Es zeigt sich, dass der Großteil der Werte über dem Mittelwert ($> 2732\,\mathrm{kg\ m^{-3}}$) von Proben des Mittel- und Oberdevons her stammen, deren höherer Muskovitanteil zwischen etwa 10 % und 30 % ($\rho_{Muskovit}$ = $2831\,\mathrm{kg\ m^{-3}}$) (Schön, 1996) zu einer relativ hohen Gesamtgesteinsdichte beiträgt. Das linke Submaximum mit der kleineren Rohdichte setzt sich hingegen überwiegend aus glimmerarmen Proben des Westfals (Oberkarbon) zusammen, die selten einen Muskovitanteil von über 10 % erreichen. Ähnliches gilt für die Siltsteine (Abbildung 4.11), wobei die Probenanzahl hier zu gering ist, um signifikante Zusammenhänge nachzuweisen.

Die Porositäten bewegen sich in nahezu allen Gesteinstypen in einem niedrigen Bereich von kleiner als 5 %. Aus diesem Grund sind die meisten Gesteinsproben als nahezu dicht zu betrachten, sodass der Einfluss der Porosität auf die physikalischen Gesteinseigenschaften wie z. B. die Wärmeleitfähigkeit unter Wassersättigung sehr gering ist. Einzige Ausnahme bilden die oberkarbonischen **Sandsteine des Westfals**, deren Porosität im Durchschnitt über 5 % höher liegt als in allen anderen Sandsteinen. Aus diesem Grund ist sie in Tabelle 4.6 für diese beiden Gruppen gesondert aufgeführt.

Innerhalb der Gesteinsgruppe der Konglomerate stammen sieben der nur insgesamt neun Proben aus der Bohrung B-07 alias Viersen 1001. Hierbei handelt es sich um lokal begrenzte Phyllitkonglomerate eines ehemals subaquatischen Küstenstreifens. Das weite Spektrum der Geröllgrößen, die deutliche Beschränkung auf Phyllitgerölle, die Abwesenheit von Quarzsand sowie das Nebeneinander unterschiedlicher Rundungsgrade deuten nach Neumann-Mahlkau und Ribbert (1998) auf ein nahes, einheitlich aufgebautes und ständig Schutt lieferndes Abtragungsgebiet. Als Erosions- und Sedimentationsgebiet wird eine tektonisch bedingte Küstenlinie angenommen, die durch vorvariszische, synsedimentäre Schollenbewegungen während der Givet-Zeit bedingt ist. Quantitative Mineralanalysen an den Phyllit-Konglomeraten zeigen Quarzanteile von maximal 40 % und hohe Muskovitanteile zwischen 30 % und 43 %. In Verbindung mit den physikalischen Mineraleigenschaften von Muskovit führt dies gegenüber den beiden anderen Konglomeratproben, die einen relativ hohen Quarzanteil von > 80 % aufweisen, zu bimodalen Häufigkeitsverteilungen von λ_s und ρ_m (Abbildung 4.13).

In der Gruppe der Sandsteine heben sich die gesteinsphysikalischen Eigenschaften von acht Proben deutlich vom Rest der über 50 Sandsteinproben ab. Sie zeichnen sich durch niedrige Quarzgehalte von meist unter 40 %, Tonmineralgehalte zwischen 10 % und 30 %, einen teilsweise hohen Dolomitanteil bis 27 % und einen Feldspatgehalt zwischen 8 % und 22 % aus (vgl. Abbildung 4.16). Es handelt sich hierbei um Sandsteine der **Condroz-Fazies** - einem sandsteindominanten Schelfbereich aus karbonat- und glimmerhaltigen Sandsteinen, wechsellagernd mit Ton- und Schluffsteinen (Abbildung 4.14). Ihr Verbreitungsgebiet liegt entlang des Nordwestrand des Venn-Sattels (vgl. Abbildung 4.2) und erstreckt sich von Krefeld und Düsseldorf im Nordosten bis südwestlich von Aachen. Die Schichtenfolge wurde durch die Forschungsbohrungen Viersen 1001 und Willich 1001 (B-07 und B-08, vgl. Abbildung 4.4) erschlossen (Ribbert, 1998).

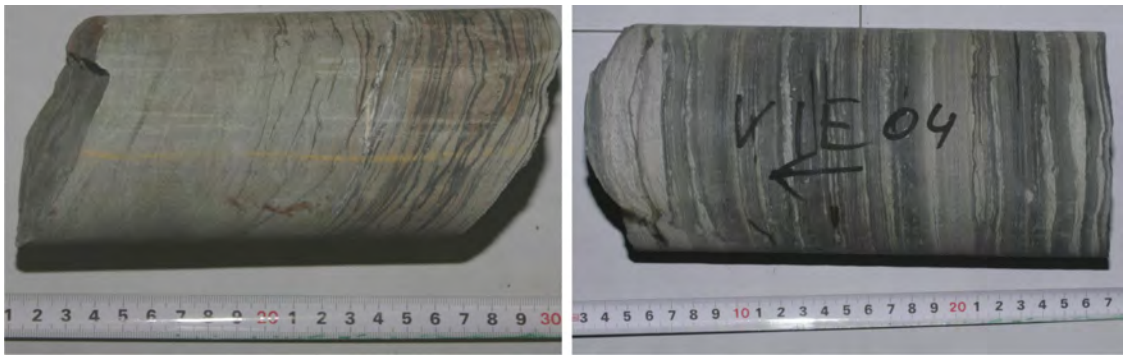


Abbildung 4.14: *Charakteristische Beispielproben klastischer Gesteine aus der Condroz-Fazies. Links: Feinsandstein aus Bohrung B-08 (Willich 1001) mit engständiger flaseriger Wechsellagerung mit dunkelgrauem Tonstein im rechten Bereich; rechts: Tonstein-Sandstein-Wechsellagerung aus hellgrauen Feinsandsteinlagen und dunkelgrauen Tonsteinlagen (Bohrung B-07, Viersen 1001).*

Unter den insgesamt 16 Proben der Condroz-Fazies sind über die acht Sandsteinproben hinaus weiterhin sieben Tonsteinproben und eine Siltsteinprobe. Sie wurden in Abbildung 4.15 und Tabelle 4.7 zu einer eigenen Gruppe zusammengefasst und mit den um diese Proben reduzierten Hauptgesteinsgruppen verglichen. Der quantitative Mineralbestand der Condroz-Fazies und den um Proben aus dieser Gruppe reduzierten Hauptgesteinstypen Tonstein und Sandstein geht aus Abbildung 4.16 hervor. Die gesteinsphysikalischen Eigenschaften der Condroz-Gruppe sind denen der Tonsteine ähnlich, insbesondere λ_s und V_p. Die Ton- und Siltsteine der Condroz-Fazies enthalten zudem einen Hellglimmer-Anteil von etwa gemessenen 15 % bis 25 %. Dies führt in Verbindung mit den Mineraleigenschaften von Muskovit ($\rho_{Muskovit}$ = 2831 kg m^{-3}), $V_{p\ Muskovit}$ = 5810 m s^{-1}) (Schön, 1996) zu einer leicht höheren Reindichte und Kompressionswellengeschwindigkeit gegenüber Tonsteinen (vgl. Tabelle 4.7).

4.3.4 Gesteinsphysikalische Eigenschaften der Karbonate

Die paläozoischen Karbonatgesteinsproben im Untergrund der Niederrheinischen Bucht beschränken sich auf Riff- und Massenkalke des Oberdevons (Bohrungen B-07 und B-11) und auf Kalksteine der Kohlenkalkfazies aus den Bohrungen B-01, B-06 und B-11; vgl. Abbildung 4.4 und Tabelle 4.2). Aus Bohrkernen des Ruhrgebietes sind keine paläozoischen Karbonatgesteine zu erwarten. Unter den insgesamt 22 Karbonatgesteinsproben befinden sich 19 Kalksteine und 3 Dolomite. Davon sind 12 Kalksteine und 2 Dolomite der Kohlenkalkfazies zuzuordnen. Trotz der relativ niedrigen Probenzahl ist ein signifikanter Unterschied zwischen den Kohlenkalken und den Karbonaten des restlichen Paläozoikums festzustellen.

Der Großteil (neun) der 14 Kohlenkalkproben stammen aus der Bohrung Schwalmtal 1001 (B-06), deren Schichtenfolge detailliert in Mathes-Schmidt und Elfers (1998) beschrieben ist. Demnach sind die Proben verschiedenen Lithofaziestypen zuzuordnen, die sich unter anderem im Grad der Silifizierung und Dolimitisierung unterscheiden.

Abbildung 4.17 zeigt die saturierte Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Matrixdichte, welche wiederum von der mineralogischen Zusammensetzung kontrolliert wird. Zur Orientierung sind farbig die Literaturwerte der Hauptmineralkomponenten Calcit, Dolomit und Quarz dargestellt, wobei der Quarzpunkt außerhalb der Darstellung bei ρ_{Quarz} = 2648 kg m^{-3} (Schön, 1996) und λ_{Quarz}

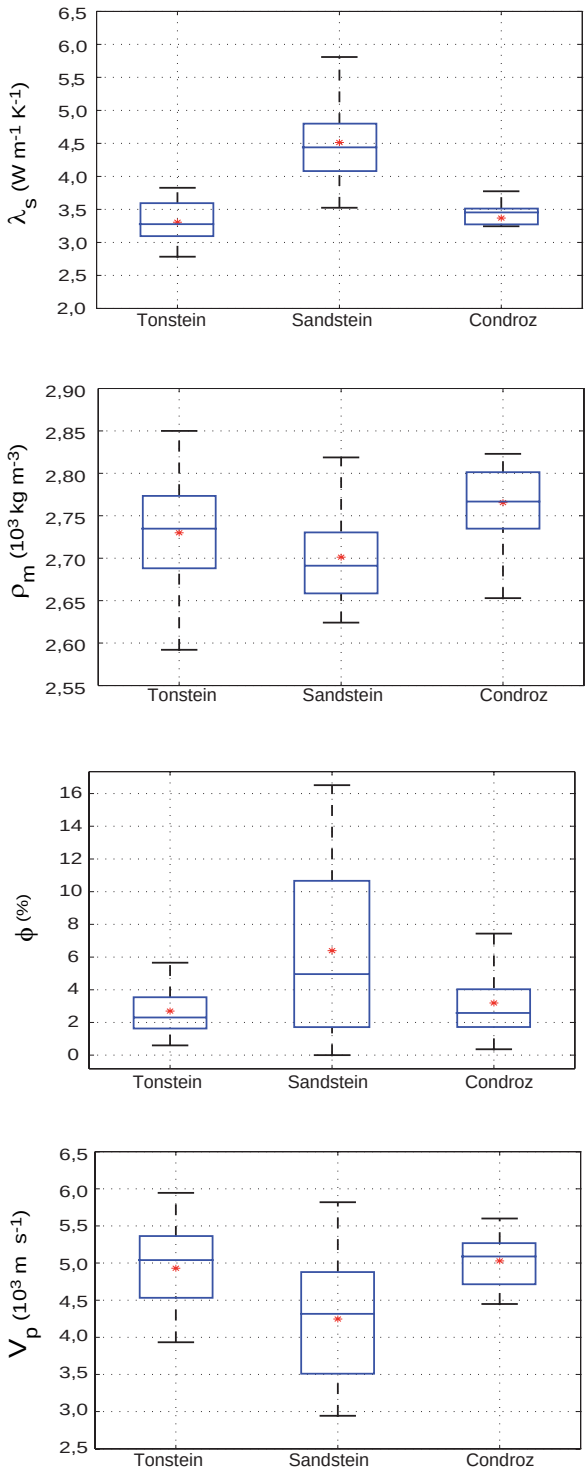


Abbildung 4.15: *Darstellung der statistischen Maßzahlen petrophysikalischer Eigenschaften für drei modifizierte Gesteinsgruppen aus dem Paläozoikum des westlichen Nordrhein-Westfalens in Form von Box-Whisker-Diagrammen (blaue Mittellinie: Medianwert; roter Stern: Mittelwert; blaue Box: 25%- und 75%-Quartil; schwarze Begrenzungsstriche: 5%- und 95%-Perzentil): a) Wärmeleitfähigkeit gesättigter Proben λ_s, b) Reindichte ρ_m, c) Porosität ϕ und d) Kompressionswellengeschwindigkeit V_p. Die dargestellten Werte korrespondieren mit Tabelle 4.7.*

Tabelle 4.7: *Übersicht zu den petrophysikalischen Eigenschaften für drei modifizierte Gesteinsgruppen aus dem Paläozoikum des westlichen Nordrhein-Westfalens (vgl. Abbildung 4.15): λ_s: wassergesättigte Wärmeleitfähigkeit, ρ_m: Reindichte, ϕ: Porosität, V_p: Kompressionswellengeschwindigkeit.*

		N	Mittel-wert	Stabw.	Min.	25%-Quart.	Median	75%-Quart.	Max.
λ_s (W m^{-1} K^{-1})	Tonstein (ohne C.-F.)	36	3,31	0,29	2,48	3,10	3,28	3,60	3,88
	Sandstein (ohne C.-F.)	52	4,51	0,61	3,52	4,08	4,45	4,79	6,02
	Condroz-Fazies	13	3,37	0,32	2,62	3,28	3,45	3,52	3,77
ρ_m (kg m^{-3})	Tonstein (ohne C.-F.)	88	2730	55	2592	2688	2734	2774	2850
	Sandstein (ohne C.-F.)	55	2701	60	2624	2658	2691	2731	2947
	Condroz-Fazies	16	2765	44	2653	2736	2767	2801	2823
Φ (-)	Tonstein (ohne C.-F.)	36	0,027	0,006	0,006	0,017	0,023	0,035	0,076
	Sandstein (ohne C.-F.)	50	0,064	0,051	0,000	0,017	0,049	0,106	0,165
	Condroz-Fazies	13	0,032	0,022	0,004	0,017	0,026	0,041	0,074
V_p (m s^{-1})	Tonstein (ohne C.-F.)	32	4930	604	3164	4553	5045	5352	5945
	Sandstein (ohne C.-F.)	49	4244	835	2943	3490	4308	4884	5820
	Condroz-Fazies	11	5029	366	4490	4786	5084	5268	5601

= 7,6 W m^{-1} K^{-1} (Popov et al., 1999) liegt. Diese Werte sind nicht als absolut zu betrachten. Zum einen schwanken auch die Kennwerte für gesteinsbildende Minerale in der Literatur recht stark. Zum anderen hat sich bereits während der Arbeiten zum Vorgängerprojekt (Phase 1) am Beispiel reiner Kalksteine aus dem Oberjura gezeigt, dass die Matrix-Wärmeleitfähigkeit eines Minerals im Gesteinsverbund deutlich vom Literaturwert abweichen kann. Sie lag für Calcit aus dichten Malmkalken der Westmolasse mit 2,8 W m^{-1} K^{-1} deutlich unter dem Literaturwert von 3,3 W m^{-1} K^{-1} (Clauser et al., 2007).

Reine bis leicht silifizierte Kalksteine des Kohlenkalks weisen eine gute negative Korrelation (R^2 = 0,89) zwischen Matrixdichte und saturierter Wärmeleitfähigkeit auf (Abbildung 4.17). Die beiden Kennwerte bewegen sich je nach Quarzgehalt zwischen den Mineraleigenschaften von Calcit für reine Kalksteine und der Richtung des Endpunktes für Quarz. Die Korrelation ist auch deswegen so gut, weil die Porosität der dargestellten dichten Karbonatproben mit meist unter 3 % sehr gering ist. Sie ist daher praktisch zu vernachlässigen, da die gemessene Wärmeleitfähigkeit annähernd der Matrix-Wärmeleitfähigkeit entspricht. Die Werte der dolomitischen Kalke und des Dolomits liegen entsprechend ihrer partiellen oder vollkommenen Dolomitisierung mehr in Richtung der Endglieder Dolomit und Quarz.

In Tabelle 4.8 sind die statistischen Kennwerte für die Kalksteine des Kohlenkalks und des restlichen Paläozoikums noch einmal separat dargestellt. Der Mittelwert der saturierten Wärmeleitfähigkeit unterscheidet sich um über 0,4 W m^{-1} K^{-1}, wobei diese Werte aufgrund ihrer geringen Probenzahl

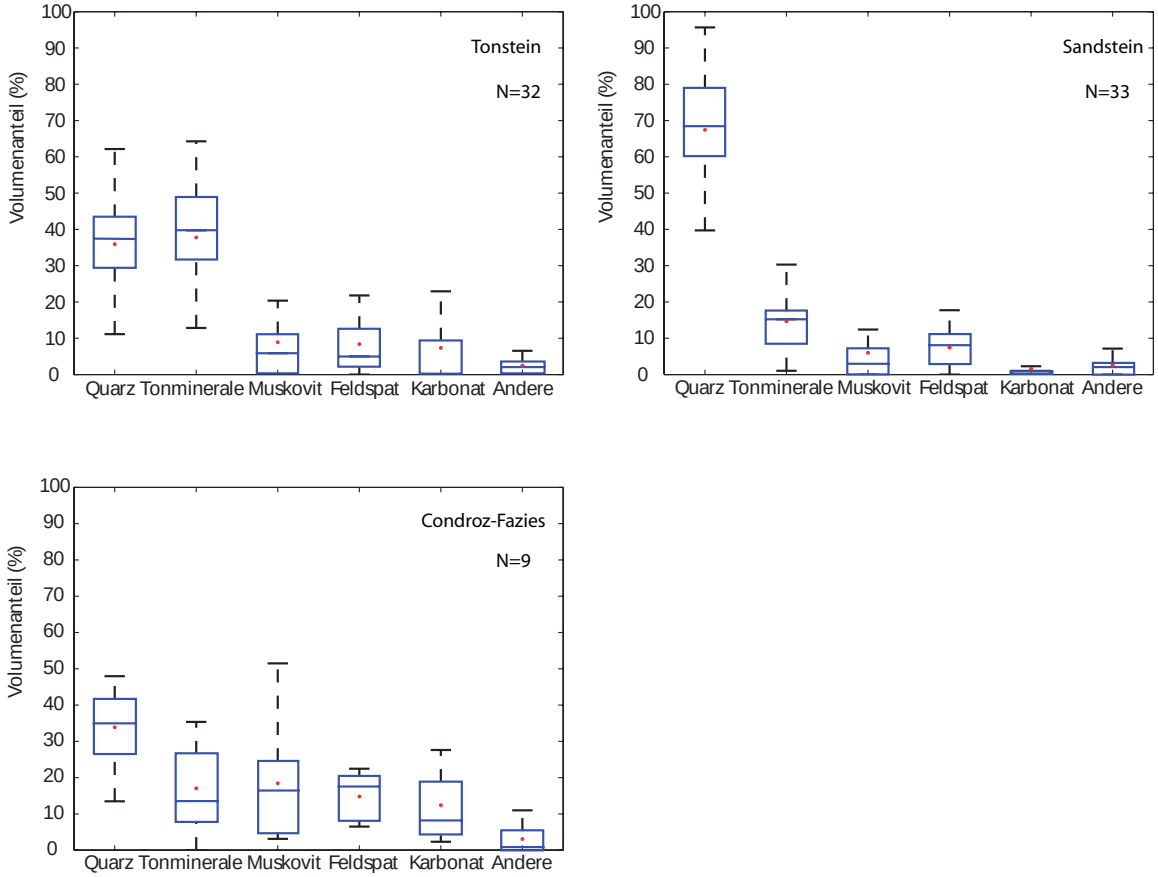


Abbildung 4.16: *Verteilung der quantitativen mineralogischen Zusammensetzung der drei modifizierten Gesteinsgruppen in Form von Box-Whisker-Diagrammen (blaue Mittellinie: Medianwert; roter Stern: Mittelwert; blaue Box: 25%- und 75%-Quartil; schwarze Begrenzungsstriche: 5%- und 95%-Perzentil.*

statistisch noch nicht signifikant sind.

4.4 Spezifische Wärmekapazität

In der instationären Wärmetransportgleichung (ohne Wärmeproduktion)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \nabla^2 T \tag{4.8}$$

bestimmt die Temperaturleitfähigkeit κ das thermische Verhalten des Untergrundes. Sie ist wiederum eine Funktion der Wärmeleitfähigkeit λ, Dichte ρ_m und der spezifischen Wärmekapazität c_P:

$$\kappa = \frac{\lambda}{\rho_m c_P}. \tag{4.9}$$

Für die vollständige Parametrisierung des Wärmetransports mit zeitlich veränderlichen Randbedingungen ist daher die Kenntnis der Wärmekapazität erforderlich. Da die Messprozedur (siehe Abschnitt 2.1.5) zeitaufwändiger ist als jene zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit, wurde sie nur an

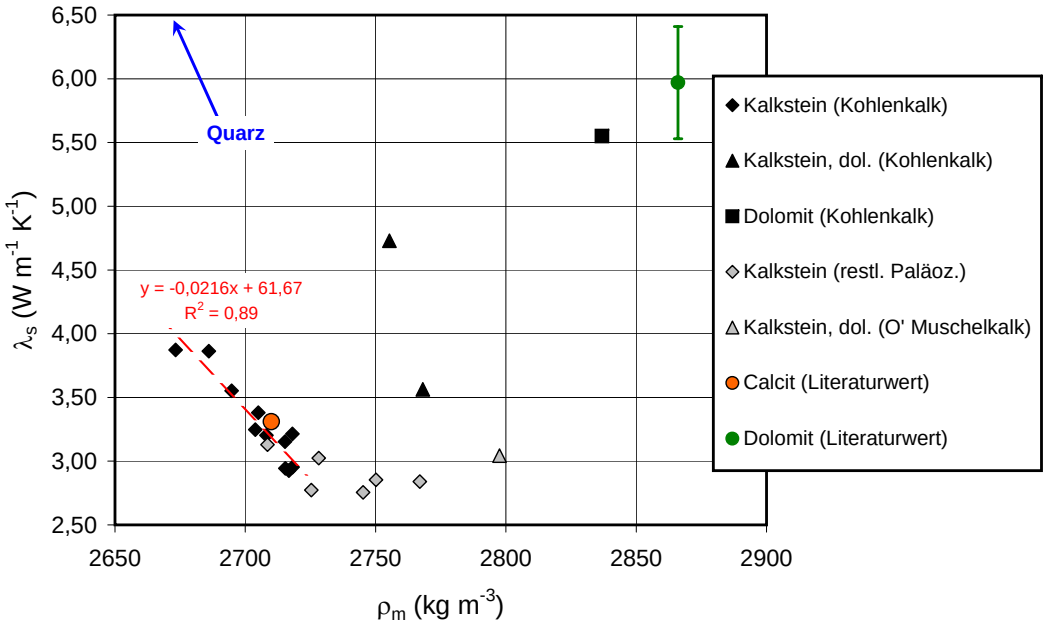


Abbildung 4.17: *Korrelation zwischen saturierter Wärmeleitfähigkeit und Matrixdichte von Karbonatgesteinen aus dieser Studie. λ_s: Wärmeleitfähigkeit wassergesättigter Proben; ρ_m: Reindichte. Die Literaturwerte für die gesteinsbildenden Minerale Calcit und Dolomit stammen aus Popov et al. (1987) (λ_{Calcit}, $\lambda_{Dolomit}$) und Schön (1996) (ρ_{Calcit} und $\rho_{Dolomit}$). Der Quarzpunkt liegt außerhalb des Wertebereichs bei ρ_{Quarz} = 2648 kg m^{-3} (Schön, 1996) und λ_{Quarz} = 7,6 W m^{-1} K^{-1} (Popov et al., 1999). Die gestrichelte rote Linie ist die Regressionsgerade für nicht dolomitisierte Kalksteine der Kohlenkalk-Fazies (vgl. Text).*

einer Auswahl von insgesamt 64 Proben bestimmt. Im Gegensatz zur Wärmeleitfähigkeit steigt die spezifische Wärmekapazität mit der Temperatur an. Dieses Verhalten ist konträr zur Wärmeleitfähigkeit (vgl. Abschnitt 4.5). Da sich die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität im Temperaturbereich bis 100 °C in Gleichung 4.9 stärker auswirkt als die der Wärmeleitfähigkeit, sinkt die Temperaturleitfähigkeit bei steigender Temperatur.

Meist wird das Produkt $\rho_m c_P$ betrachtet, die so genannte volumetrische Wärmekapazität oder thermische Kapazität. Abbildung 4.18 zeigt die Verteilung sowohl der spezifischen als auch der volumetrischen Wärmekapazität für vier Hauptgesteinstypen Tonstein, Sandstein, Karbonat und Konglomerat. Die korrespondierenden Werte sind in Tabelle 4.9 gegeben. Für die Konglomerate sind lediglich Einzelwerte dargestellt, die in Abhängigkeit der vorherrschenden Mineralkomponenten (vgl. Abschnitt 4.3.3) in phyllitreiche und quarzreiche Konglomerate unterschieden wurden.

Nach Beck (1988) variiert die volumetrische Wärmekapazität bei Zimmertemperatur für die meisten Gesteine um 2,3 MJ m^{-3} K^{-1} im Bereich zwischen 1,84 MJ m^{-3} K^{-1} und 2,76 MJ m^{-3} K^{-1} ($\pm$20 %). Die hier gewonnenen Daten bestätigen diese Aussage. Deutlich sind die höheren Werte bei 100 °C zu erkennen, die gegenüber einer Temperatur von 20 °C durchschnittlich zwischen 12,6 % (Karbonate) und 16,4 % (Sandsteine) ansteigen.

Die Wärmekapazität der Sandsteine ist zusammen mit jener der beiden quarzreichen Konglomerate am niedrigsten. Die beiden Gesteinsgruppen unterscheiden sich von den anderen untersuchten Gesteinen durch den höheren Quarzgehalt (vgl. Abbildung 4.6). Die mineralogische Analyse an 56 von

Tabelle 4.8: *Übersicht zu den petrophysikalischen Eigenschaftendes Kohlenkalks (Unterkarbon) im Untergrund des westlichen Nordrhein-Westfalens: λ_s: wassergesättigte Wärmeleitfähigkeit, ρ_m: Reindichte, ϕ: Porosität, V_p: Kompressionswellengeschwindigkeit.*

		N	Mittelwert	Stabw.	Min.	25%-Quart.	Median	75%-Quart.	Max.
λ_s (W m^{-1} K^{-1})	Kalkstein (Kohlenkalk-Fazies)	12	3,32	0,33	2,93	3,10	3,23	3,56	3,87
	Kalkstein (restl. Paläoz.)	6	2,90	0,15	2,76	2,79	2,85	2,98	3,13
ρ_m (kg m^{-3})	Kalkstein (Kohlenkalk-Fazies)	11	2705	15	2673	2697	2708	2717	2718
	Kalkstein (restl. Paläoz.)	6	2737	21	2709	2725	2737	2750	2767
Φ (-)	Kalkstein (Kohlenkalk-Fazies)	11	0,009	0,005	0,004	0,006	0,008	0,012	0,019
	Kalkstein (restl. Paläoz.)	6	0,013	0,010	0,004	0,008	0,011	0,015	0,028
V_p (m s^{-1})	Kalkstein (Kohlenkalk-Fazies)	11	5998	337	5410	5746	5989	6200	6668
	Kalkstein (restl. Paläoz.)	6	5597	436	4999	5235	5597	6076	6078

64 Proben in Abbildung 4.19 zeigt, dass die spezifische Wärmekapazität negativ mit dem Quarzgehalt korreliert. Quarz als wichtigster Hauptbestandteil klastischer Sedimentgesteine hat eine niedrigere spezifische Wärmekapazität als die meisten anderen gesteinsbildenden Minerale. Die Gruppe der Karbonatgesteine (überwiegend Kalkstein) fügt sich in diesen Trend ein, da der c_p-Wert für Calcit zwischen 800 J kg^{-1} K^{-1} und 830 J kg^{-1} K^{-1} (Schön, 1996) in Fortsetzung der Regressionsgeraden am oberen quarzarmen Ende liegt. Die drei Ausreißer in der Gruppe der Karbonatgesteine mit c_p-Werten über 820 J kg^{-1} K^{-1} resultieren aus einem hohen Anteil von Dolomit (bis 56,5 %), welcher entsprechend der gegenüber Calcit höheren spezifischen Wärmekapazität von 860 J kg^{-1} K^{-1} bis 880 J kg^{-1} K^{-1} (Schön, 1996) den Gesamtgesteinswert nach oben abweichen lässt.

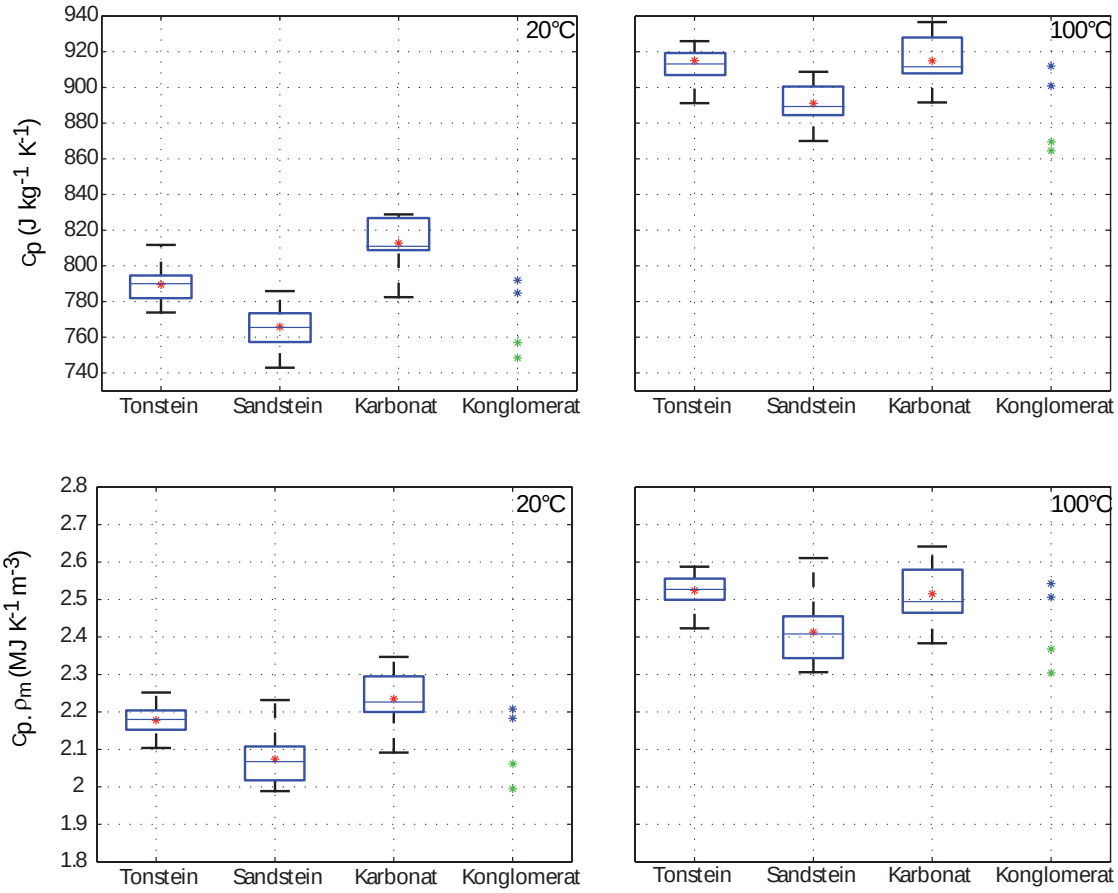


Abbildung 4.18: *Häufigkeitsverteilung der spezifischen (c_p; oben) und volumetrischen Wärmekapazität ($\rho_m \cdot c_p$; unten) bei 20 °C (links) und bei 100 °C (rechts) für vier Hauptgesteinstypen und die dazugehörigen statistischen Maßzahlen in Form von Box-Whisker-Diagrammen (blaue Mittellinie: Medianwert; roter Stern: Mittelwert; blaue Box: 25%- und 75%-Quartil; schwarze Begrenzungsstriche: 5%- und 95 %-Perzentil). Bei den Konglomeraten sind jeweils zwei Einzelergebnisse phyllitreicher (blaue Sternchen) und quarzreicher Konglomerate (grüne Sternchen) markiert (vgl. Text). Die dargestellten Werte korrespondieren mit Tabelle 4.9.*

Tabelle 4.9: *Übersicht zur temperaturabhängigen spezifischen (c_p) und volumetrischen ($\rho_m \cdot c_p$) Wärmekapazität von vier Hauptgesteinstypen (vgl. Abbildung 4.18).*

		N	Mittel-wert	Stabw.	Min.	25%-Quart.	Median	75%-Quart.	Max.
c_p (J kg^{-1} K^{-1}) T = 20 °C	Tonstein	16	789	9	774	782	790	794	812
	Sandstein	35	766	12	743	758	765	772	803
	Karbonat	9	813	14	782	809	811	826	829
	Konglomerat (phyllitreich)	2	788		785				792
	Konglomerat (quarzreich)	2	750		748				751
c_p (J kg^{-1} K^{-1}) T = 100 °C	Tonstein	16	915	15	891	908	913	919	962
	Sandstein	35	891	13	870	884	890	900	935
	Karbonat	9	915	14	891	907	911	927	937
	Konglomerat (phyllitreich)	2	906		901				912
	Konglomerat (quarzreich)	2	867		864				869
$c_p \cdot \rho_m$ (MJ K^{-1} m^{-3}) T = 20 °C	Tonstein	16	2,18	0,04	2,10	2,15	2,18	2,20	2,25
	Sandstein	35	2,07	0,07	1,99	2,02	2,07	2,10	2,23
	Karbonat	9	2,23	0,08	2,09	2,20	2,23	2,29	2,35
	Konglomerat (phyllitreich)	2	2,20		2,18				2,21
	Konglomerat (quarzreich)	2	2,02		1,99				2,05
$c_p \cdot \rho_m$ (MJ K^{-1} m^{-3}) T = 100 °C	Tonstein	16	2,52	0,04	2,42	2,50	2,53	2,56	2,59
	Sandstein	35	2,41	0,08	2,31	2,35	2,41	2,46	2,61
	Karbonat	9	2,51	0,08	2,38	2,47	2,49	2,57	2,64
	Konglomerat (phyllitreich)	2	2,52		2,51				2,54
	Konglomerat (quarzreich)	2	2,34		2,30				2,37

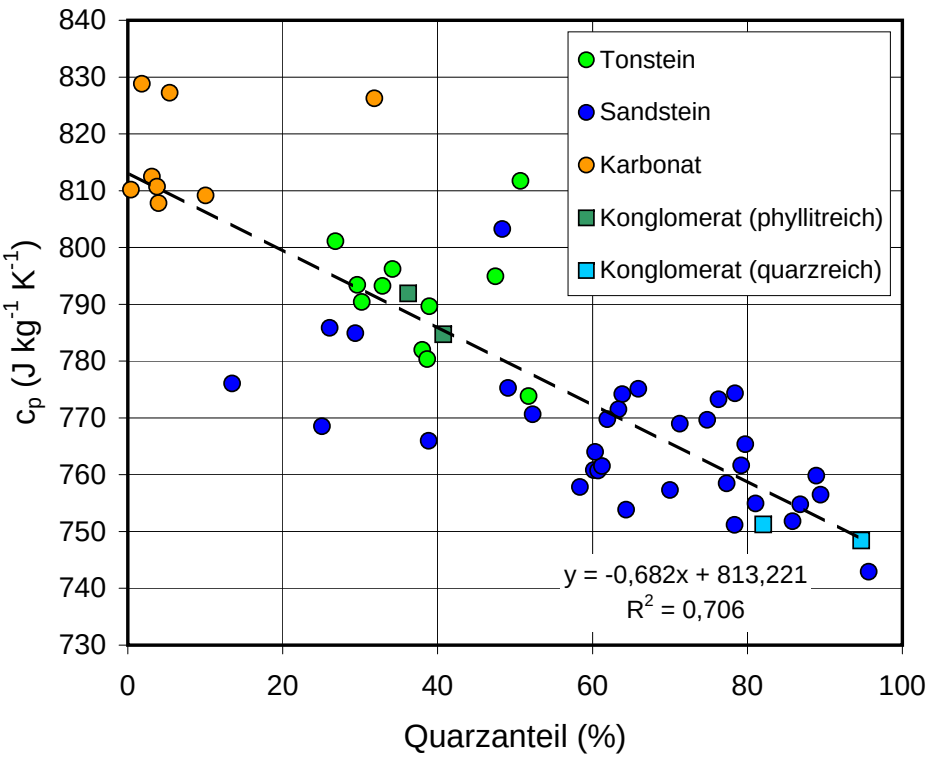


Abbildung 4.19: *Spezifische Wärmekapazität von 56 Proben bei 20 °C, an denen gleichzeitig der Mineralgehalt quantitativ bestimmt wurde, als Funktion des Quarzgehaltes. Die gestrichelte Linie stellt die Regressionsgerade mit dazugehöriger Geradengleichung dar.*

4.5 Druck- und temperaturabhängige Messungen von Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit und Wärmekapazität

Für 40 ausgewählte Proben aus dem Paläozoikum wurden druck- und temperaturabhängige Messungen der Wärmeleitfähigkeit, der Temperaturleitfähigkeit und der volumetrischen Wärmekapazität durchgeführt (siehe Abschnitt 2.1.2). Der Messbereich erstreckt sich dabei bis zu einer Temperatur von 180 °C und einem Umschließungsdruck von 160 MPa. Die Abbildung 4.20 zeigt den Zusammenhang zwischen Druck und Temperatur für alle Messungen. Diese lineare Beziehung lässt sich durch

$$T(^{\circ}C) = 0,96 * P(MPa) + 34,1 \tag{4.10}$$

beschreiben. Wird ein lithostatischer Druckgradient angenommen entspricht dies bei einer Gesteinsdichte von 2700 kg m^{-3} einem geothermischen Gradienten von etwa 34 K km^{-1}.

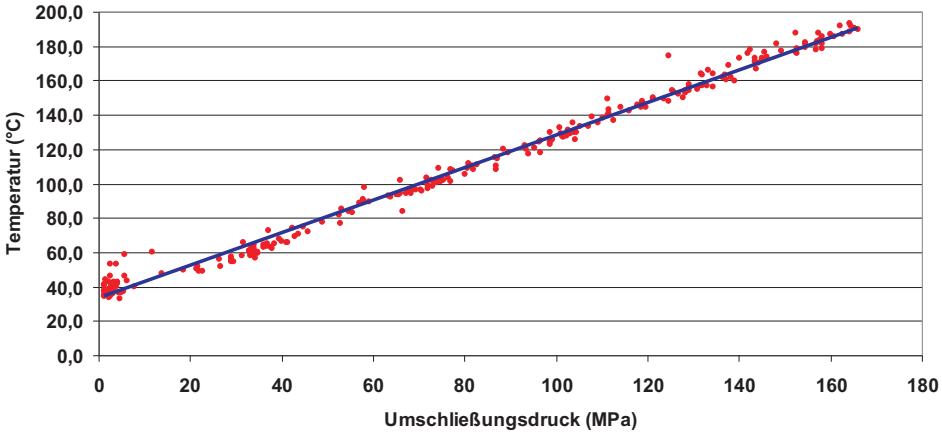


Abbildung 4.20: *Zusammenhang zwischen Druck und Temperatur bei den Messungen.*

4.5.1 Ergebnisse

Die Messergebnisse sind in tabellarischer Form aufgeführt und dem Anhang (Tabellen A.1–A.4) zu entnehmen.

Die Abbildung 4.21 zeigt das Ergebnis der mineralogischen Zusammensetzung der für die Messungen ausgewählten Proben. Entsprechend dieser Zusammensetzung wurden die untersuchten 40 Gesteinsproben in vier Gruppen eingeteilt: Sandsteine, Kalksteine, Tonsteine und Konglomerate.

Die Ergebnisse der druck- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeitsmessungen für alle Proben sind in der Abbildung 4.22 dargestellt.

Insgesamt sinkt die Wärmeleitfähigkeit bei allen Proben mit der Zunahme von Temperatur und Druck. Dies ist zu erwarten, da zwar die Wärmeleitfähigkeit mit dem Druck steigt, der Abfall mit steigender Temperatur jedoch dominiert (z. B. Clauser, 2006). Die größten Variationen zeigen die Sandsteine, was auf ihr breites Porositätsspektrum und auf ihre stark variierende Matrixzusammensetzung zurückzuführen ist.

Zur Verdeutlichung dieses Effektes sind in den Abbildungen 4.23 und 4.24 die Wärmeleitfähigkeits-

messungen jeweils für die Sandsteine bzw. Kalk- und Tonsteine dargestellt, normiert auf Normalbedingungen.

Ebenso sinkt die Temperaturleitfähigkeit mit der Temperatur; im Vergleich zur Wärmeleitfähigkeit in größerem Maße, da die volumetrische Wärmekapazität mit Druck und Temperatur steigt (siehe Gleichung 2.1). Die Ergebnisse für die Temperaturleitfähigkeit sind in den Abbildungen 4.25-4.26 und diejenigen für die volumetrische Wärmekapazität in den Abbildungen 4.28-4.30 dargestellt.

Tabelle 4.10 bis 4.12 geben einige statistische Werte zu den Ergebnissen der Labormessungen an.

Insgesamt können die Ergebnisse der experimentellen Daten wie folgt zusammengefasst werden.

- Insbesondere die Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit und die volumetrische Wärmekapazität der gesättigten Sandsteinproben zeigen bei erhöhtem Druck und erhöhter Temperatur ein uneinheitliches Bild. Die Wärmeleitfähigkeit sinkt generell, kann aber auch konstant bleiben oder sogar in einigen Druck- und Temperaturbereichen steigen. Die Erfahrung der Gruppe um Prof. Popov am RSGPU in Moskau zeigt, dass dieses Verhalten durch eine Kombination verschiedener Faktoren verursacht ist. Diese sind (1) Beziehung der Matrixwärmeleitfähigkeit und der Poren- und Rissgeometrien zur Porosität. (2) Die Porosität selbst (3) Verhältnis von Matrix- und Fluidwärmeleitfähigkeit.
- Der Verlauf der Wärmeleitfähigkeit, der volumetrische Wärmekapazität und der Temperaturleitfähigkeit mit der Temperatur und dem Druck wird am besten durch ein Polynom 2.Ordnung beschrieben.
- Die Unterschiede der Mittelwerte von Wärmeleitfähigkeit bzw. Temperaturleitfähigkeit der verschiedenen Gesteinstypen sinken bei maximalem Druck und Temperatur im Vergleich zu den Werten bei Normalbedingungen um 20% bzw. 7%.
- Der Grad der Variation der verschiedenen gemessenen Parametern korreliert nicht mit der Porosität.

Der quadratischer Zusammenhang zwischen der Wärme- und Temperaturleitfähigkeit und der Druck- und Temperaturerhöhung für fast alle Proben kann mit

$$\lambda(Wm^{-1}K^{-1}) = a \cdot T^2(C)k \cdot T(C) + b \tag{4.11}$$

beschrieben werden kann. Eine Übertragung auf den entsprechenden Druck geschieht unter Verwendung von Gleichung (4.10) Eine Übersicht zu den Koeffiezienten a, k und b findet sich in der Tablle A.2 im Anhang.

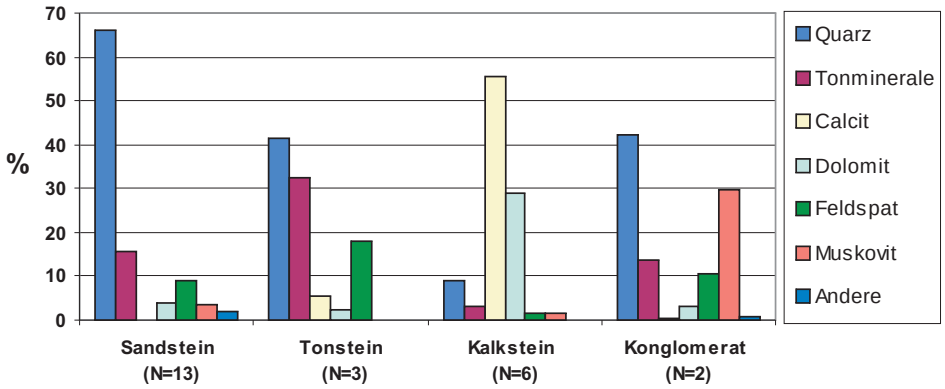


Abbildung 4.21: *Mineralogische Zusammensetzung der für die druck- und temperaturabhängigen Messungen ausgewählten Proben nach RDA-Analysen.*

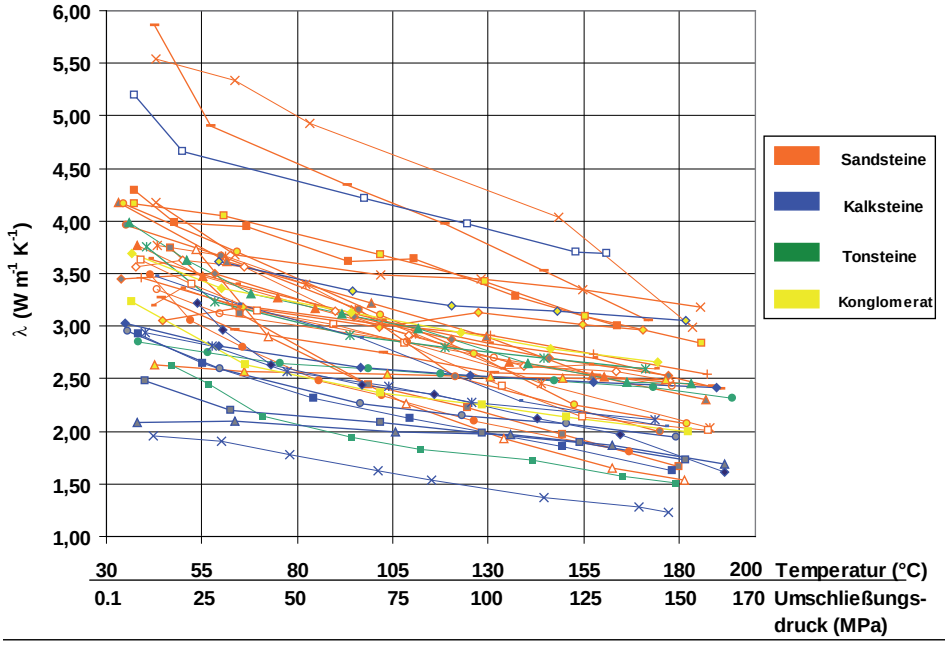


Abbildung 4.22: *Ergebnisse der druck- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeitsmessungen (λ) für alle Proben.*

Tabelle 4.10: *Statistik (Mittelwert und min-max Werte) der temperatur- und druckabhängigen Messungen: gemessene Werte der verschiedenen Parameter bei Normalbedingungen.*

Lithologie	Normalbedingungen λ (W m^{-1} K^{-1})	κ (10^{-6} m^2 s^{-1})	$\rho_m\, c_p$ (10^6 J m^{-3} K^{-1})
Sandstein	4,0	2,1	1,9
	2,7 - 6,3	1,4 - 2,8	1,6 - 2,3
Kalkstein	3,3	1,6	2,0
	2,1 - 5,4	1,3 - 2,2	1,6 - 2,4
Tonstein	3,2	1,7	1,9
	2,1 - 3,9	1,3 - 2,1	1,6 - 2,7

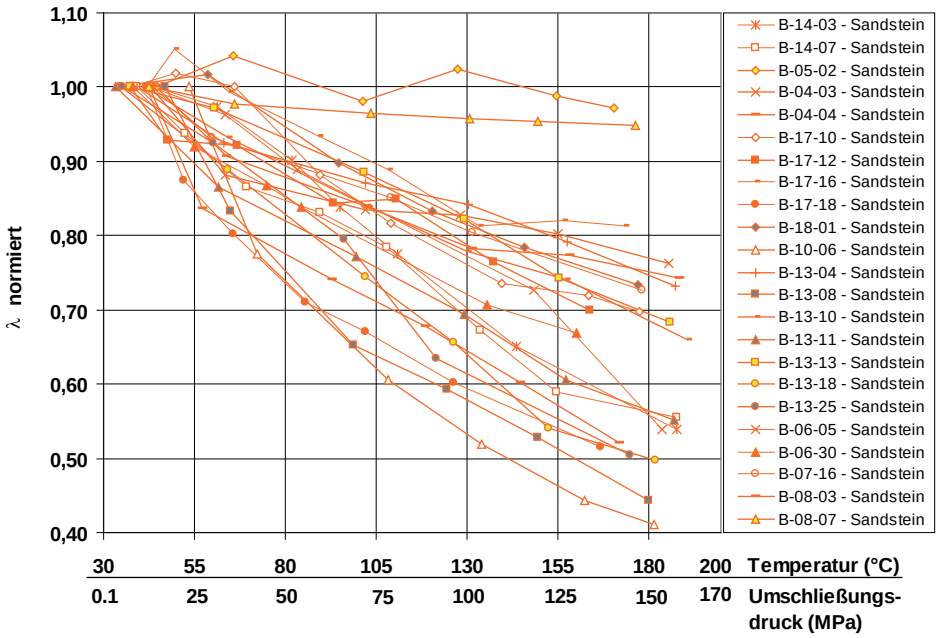


Abbildung 4.23: *Ergebnisse der druck- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeitsmessungen für die Sandsteine, normiert auf die Messung bei Normalbedingungen (Probenkürzel siehe Tabelle A.1). $\lambda_{normiert}$: Verhältnis der druck-/temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit zur Wärmeleitfähigkeit unter Normalbedingungen.*

Tabelle 4.11: *Statistik (Mittelwert und min-max Werte) der temperatur- und druckabhängigen Messungen: gemessene Werte der verschiedenen Parameter bei T=180 °C, P = 160 MPa.*

Lithologie	T=180 °C P = 160 MPa λ (W m^{-1} K^{-1})	(Tiefe ca. 6000 m) κ, (10^{-6} m^2 s^{-1})	$\rho_m\ c_p$, (10^6 (J m^{-3} K^{-1})
Sandstein	2,4	0,9	2,6
	1,6 - 3,2	0,7 - 1,2	2,1 - 2,8
Kalkstein	2,2	0,9	2,4
	1,2 - 3,6	0,6 - 1,4	2,1 - 2,7
Tonstein	2,0	0,8	2,4
	1,2 - 2,5	0,6 - 1,0	2,1 - 2,7

Tabelle 4.12: *Statistik (Mittelwert und min-max Werte) der temperatur- und druckabhängigen Messungen: prozentuale Veränderungen durch Temperaturerhöhung auf 180 °C und Druckerhöhung auf 160 MPa.*

Lithologie	T=180 °C P = 160 MPa $\delta\lambda$ (W m^{-1} K^{-1})	(Tiefe ca. 6000 m) $\delta\kappa$, (10^{-6} m^2 s^{-1})	$\delta\rho_m\ c_p$, (10^6 (J m^{-3} K^{-1})
Sandstein	38,3	54,0	-40,3
	3,4 - 67,3	25,1 - 69,9	-(68,2 - 1,7)
Kalkstein	33,3	44,3	-23,2
	14,4 - 47,9	30,7 - 57,7	-(58,2 - 2,5)
Tonstein	37,6	49,2	-31,3
	28,0 - 48,6	29,9 - 55,3	-(57,7 - 3,0)

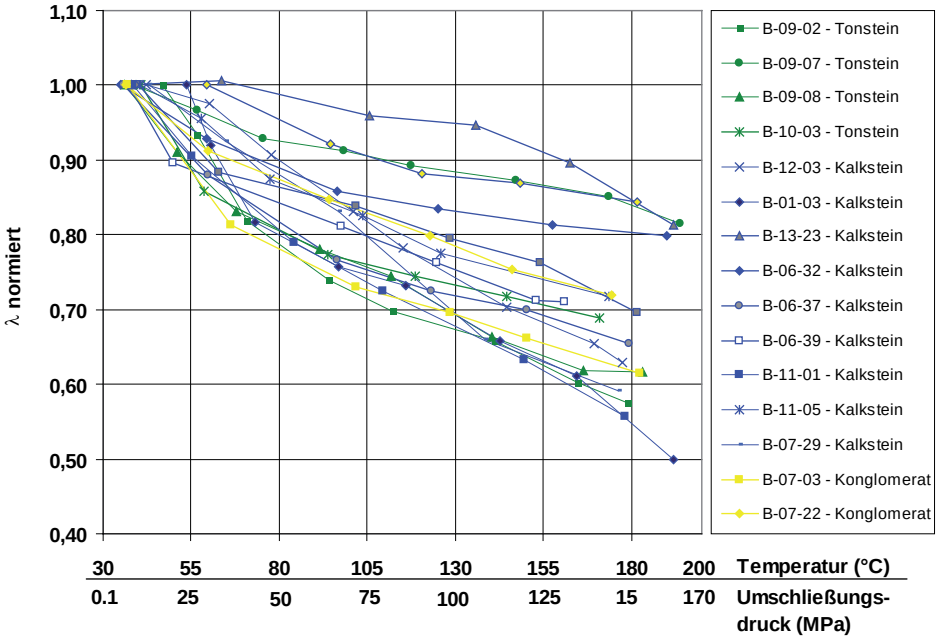


Abbildung 4.24: *Ergebnisse der druck- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeitsmessungen für die Kalk- und Tonsteine, normiert auf die Messung bei Normalbedingungen (Probenkürzel siehe Tabelle A.1).* $\lambda_{normiert}$*: Verhältnis der druck-/temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit zur Wärmeleitfähigkeit unter Normalbedingungen.*

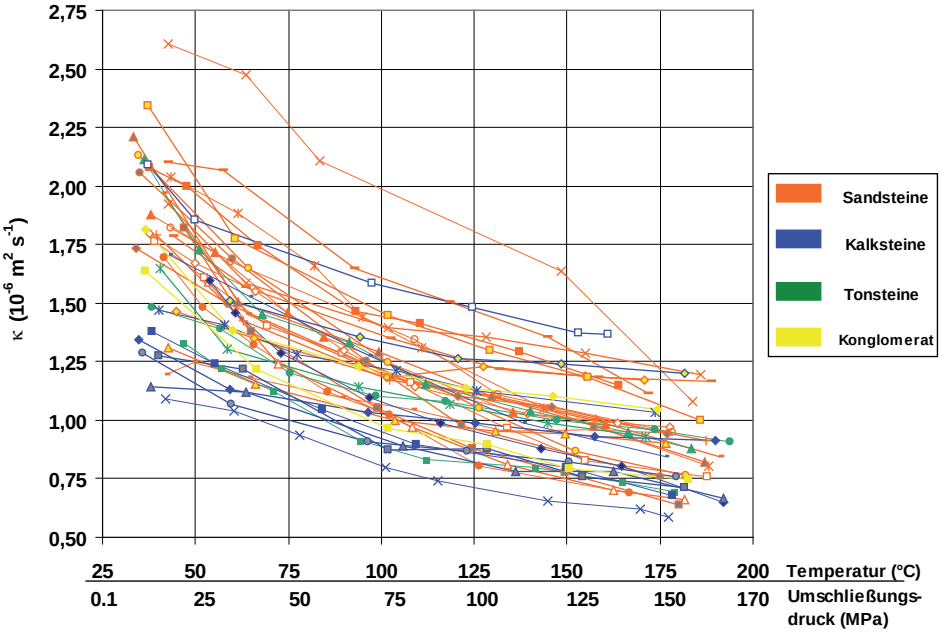


Abbildung 4.25: *Ergebnisse der druck- und temperaturabhängigen Temperaturleitfähigkeitsmessungen (*κ*) für alle Proben.*

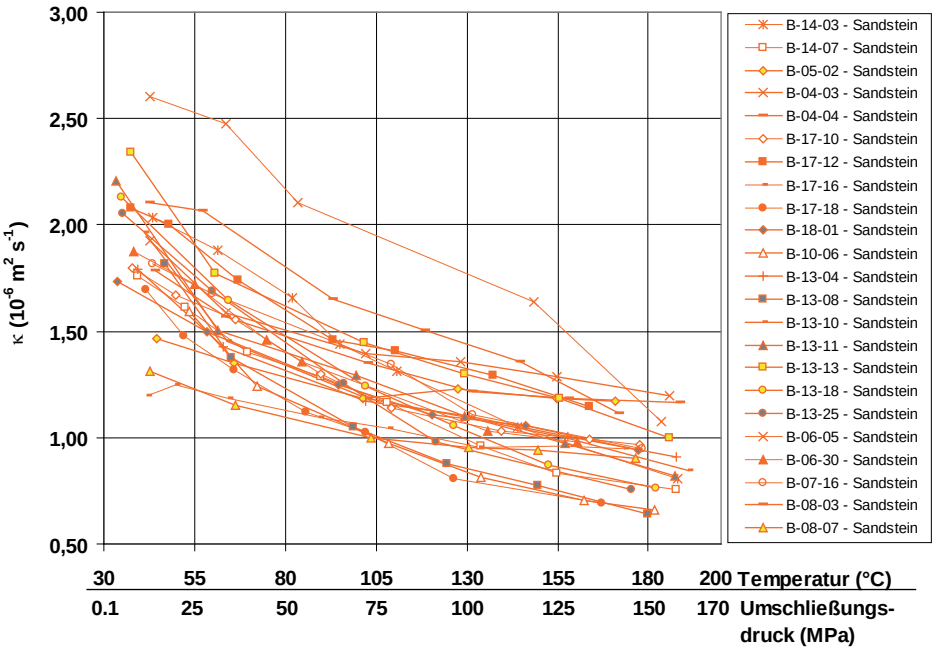


Abbildung 4.26: *Ergebnisse der druck- und temperaturabhängigen Temperaturleitfähigkeitsmessungen (κ) für die Sandsteine.*

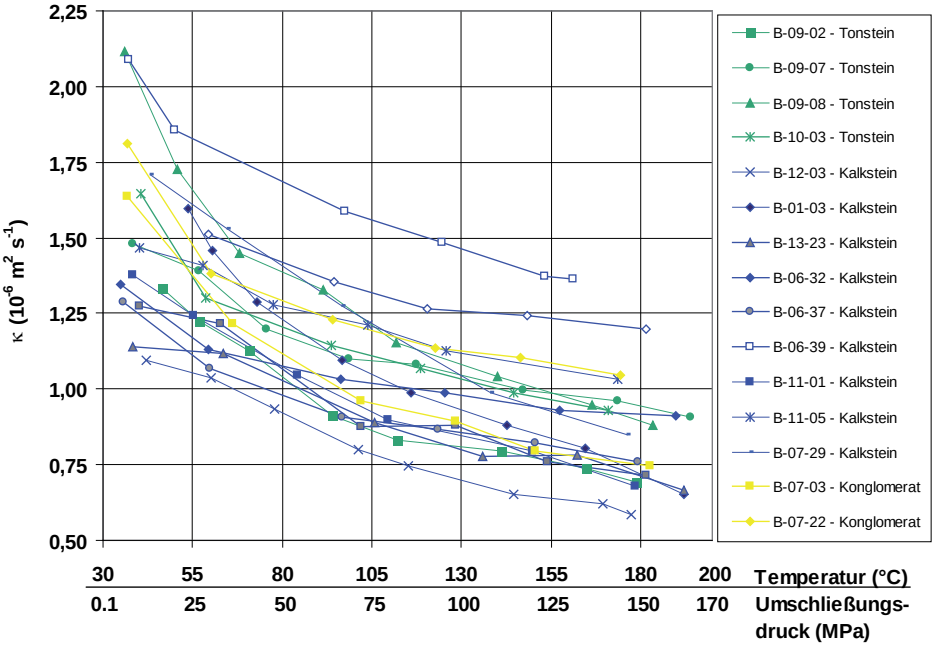


Abbildung 4.27: *Ergebnisse der druck- und temperaturabhängigen Temperaturleitfähigkeitsmessungen (κ) für die Kalk- und Tonsteine.*

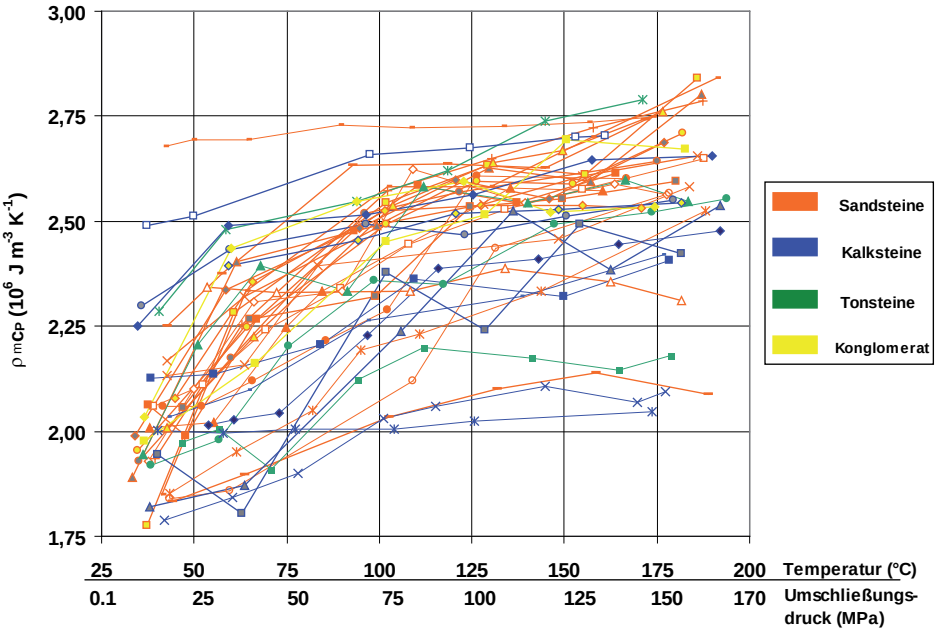


Abbildung 4.28: *Ergebnisse der druck- und temperaturabhängigen Messungen der volumetrischen Wärmekapazität ($\rho_m c_p$) für alle Proben.*

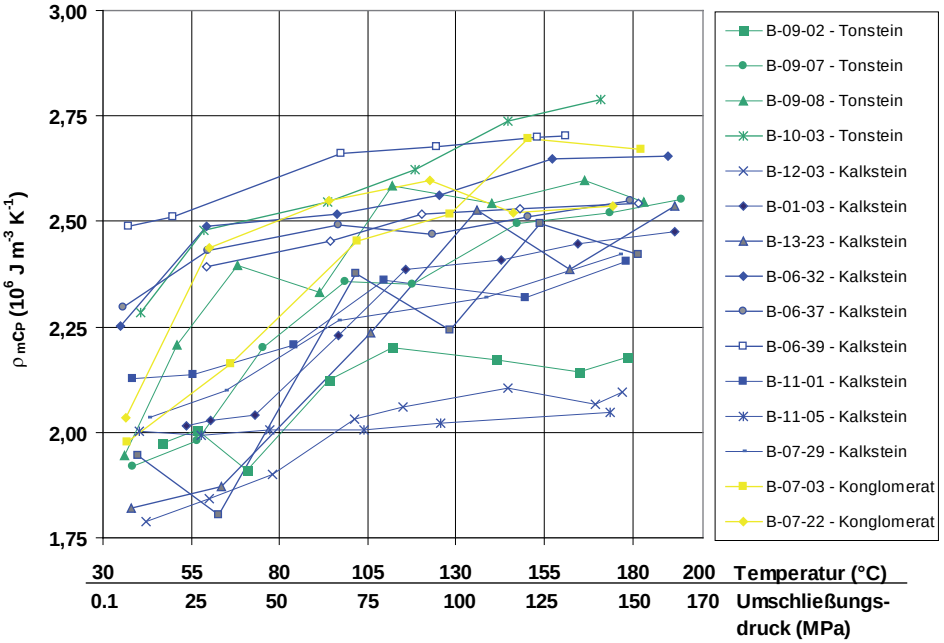


Abbildung 4.29: *Ergebnisse der druck- und temperaturabhängigen Messungen der volumetrischen Wärmekapazität ($\rho_m c_p$) für die Kalk- und Tonsteine.*

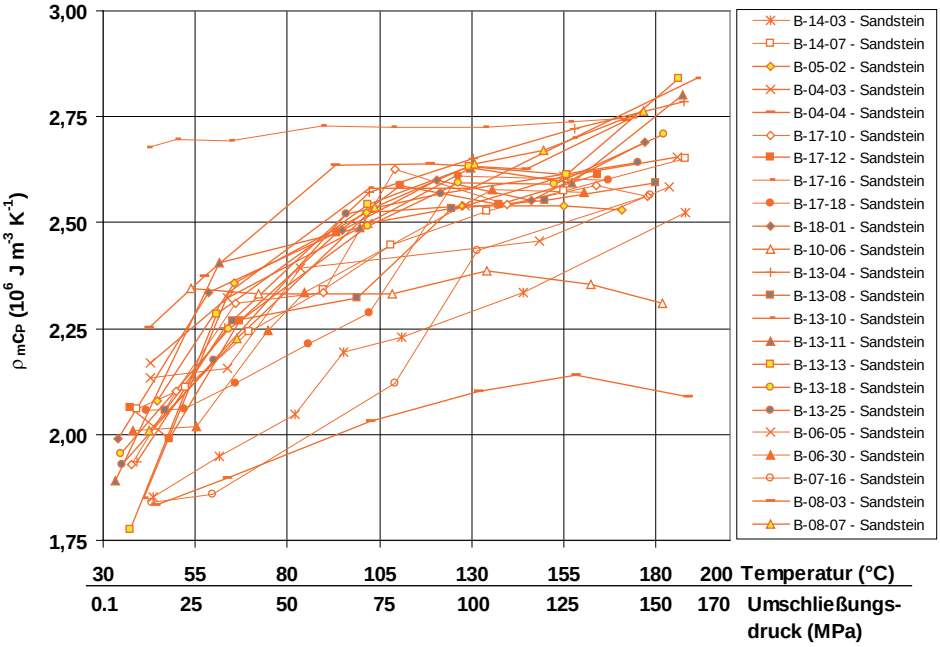


Abbildung 4.30: *Ergebnisse der druck- und temperaturabhängigen Messungen der volumetrischen Wärmekapazität ($\rho_m c_p$) für die Sandsteine.*

4.5.2 Übertragung auf Hauptgesteinsarten

Bestimmt man die Koeffizienten a k und b aus Gleichung 4.11 für die im vorherigen Abschnitt eingeführten Hauptgesteinsarten, so ergeben sich die in Tabelle 4.13 dargestellten Werte. Da die gemessenen Werte der Sandsteine starke Variationen zeigen, können für diese keine Mittelwerte der Koeffizienten angegeben werden. Abbildung 4.31 zeigt die resultierenden Abhängigkeiten von Druck- und Temperatur für die Wärmeleitfähigkeit, Abbildung 4.32 für die Temperaturleitfähigkeit und Abbildung 4.33 für die volumetrische Wärmekapazität

Tabelle 4.13: *Gemittelte Koeffizienten a, k und b der Gleichung 4.11 für die Ton- und Kalksteine (siehe auch Abbildung 4.31-4.33).*

Gestein	a	k	b
Wärmeleitfähigkeit			
Tonstein	4,68E-05	-1,76E-02	3,88
Kalkstein	2,42E-05	-1,22E-02	3,52
Temperaturleitfähigkeit			
Tonstein	4,00E-05	-1,42E-02	2,10
Kalkstein	2,06E-05	-9,02E-03	1,78
Volumetrische Wärmekapazität			
Tonstein	-2,25E-05	8,85E-03	1,73
Kalkstein	-1,60E-05	5,99E-03	1,86

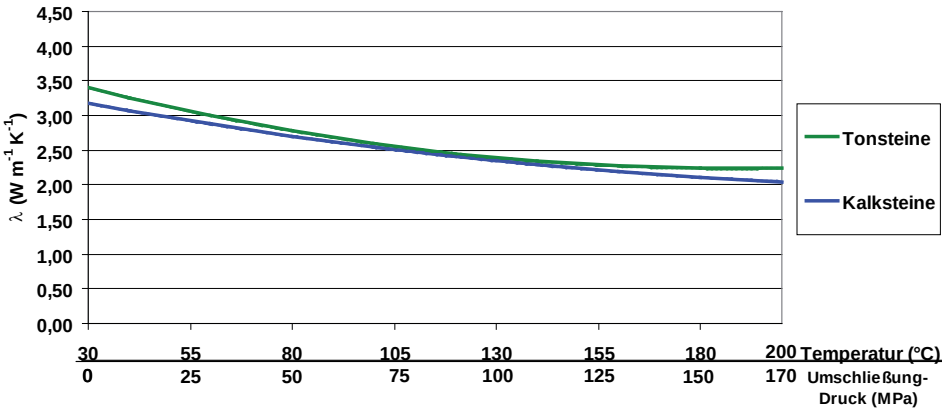


Abbildung 4.31: *Mittlere Druck- und Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit nach Gleichung 4.11 für die Hauptgesteinsarten.*

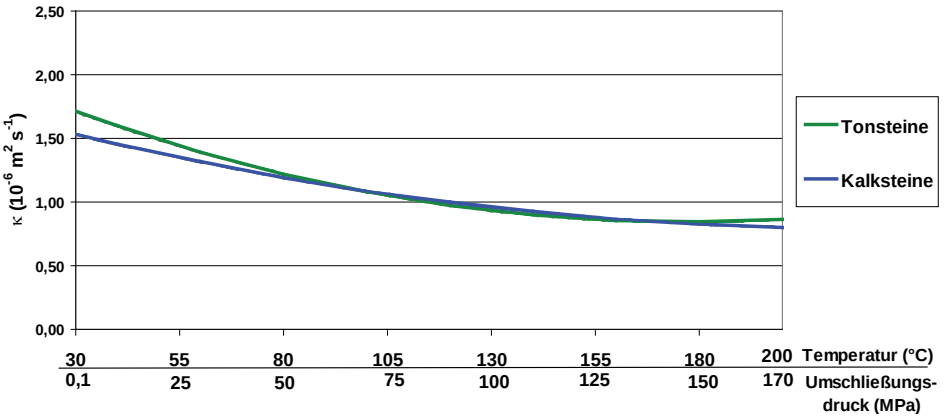


Abbildung 4.32: *Mittlere Druck- und Temperaturabhängigkeit der Temperaturleitfähigkeit nach Gleichung 4.11 für die Hauptgesteinsarten.*

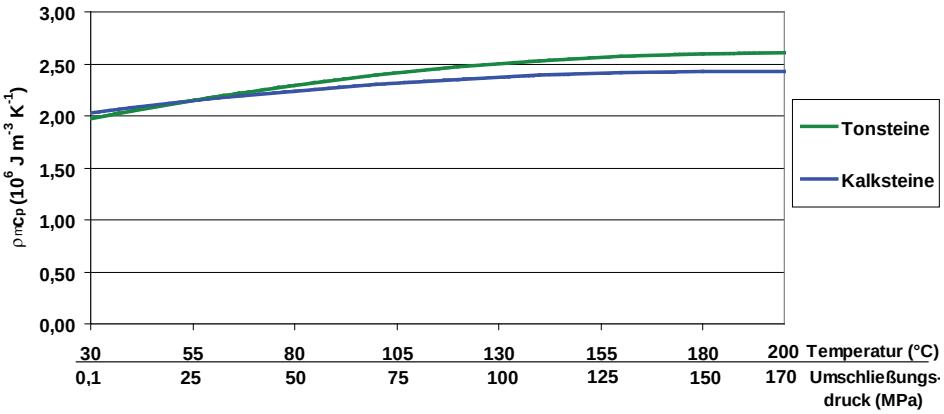


Abbildung 4.33: *Mittlere Druck- und Temperaturabhängigkeit der volumetrische Wärmekapazität nach Gleichung 4.11 für die Hauptgesteinsarten.*

4.5.3 Vergleich der Messergebnisse für die Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität

An fast allen Proben, welche im RSGPU (siehe Abschnitt 2.1.2)in Moskau auf Druck- und Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität untersucht wurden, wurden auch im Labor des Lehrstuhls für für Angewandte Geophysik und Geothermische Energie am E.ON Energy Research Center der RWTH Aachen durchgeführt. Allerdings ist ein direkter Vergleich nicht möglich, da nicht die identischen Proben, sondern nur Plugs aus dem gleichen Kernstück für die Messungen herangezogen wurden. Trotzdem lassen sich über die Interpolation bestimmt Verläufe zumindest für die volumetrische Wärmekapazität vergleichen, da die spezifische Wärmekapazizät im Labor des Lehrstuhls für Angewandte Geophysik und Geothermische Energie in Aachen im Kalorimeter auch auf ihre Temperaturabhängigkeit untersucht wurde. Da die Proben in Moskau im gesättigten Zustand gemessen wurden, musste die Dichte der gesättigten Proben mit der jeweiligen spezifischen Wärmekapazität kombiniert werden, um die volumetrische Wärmekapazität der wassergesättigten Proben zu erhalten.

Den Vergleich für den Temperaturbereich von 20 °C bis 100 °C zeigt die Abbildung 4.34. Zur Verdeutlichung sind in Abbildungen 4.35 die Ergebnisse der verschiedenen Labore bei 100 °C im Balkendiagramm dargestellt. Bei den meisten Proben bleiben die Abweichungen um oder unter 10%, nur bei den Proben B-12-03, B-09-02 und B-08-03 erreichen sie Werte über 20%. Dies ist auch in der Abbildung 4.34 an den oberen Ausreißerkurven zu erkennen. Die Diskrepanz in den Temperaturverläufen der volumetrischen Wärmekapazizät ist zum einen in den verschiedenen Messmethoden begründet (siehe Abschnitt 2.1.2 und 2.1.5) und zum anderen darin, dass im Kalorimeter kein erhöhter Druck auf die Proben aufgebracht werden kann. Des weiteren können dieselbe Bohrkerne an unterschiedlichen Positionen stark wechselnde Lithologien aufweisen, was die starken Abweichungen bei den genannten Proben erklären kann.

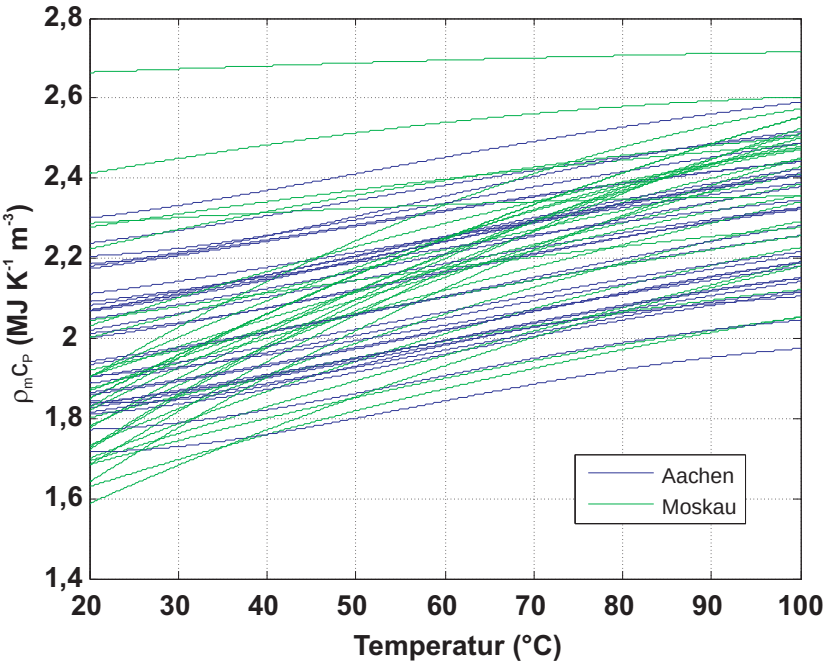


Abbildung 4.34: *Vergleich des gemessenen Temperaturverlaufs der volumetrischen Wärmekapazitäten im RSGPU in Moskau und in Aachen.*

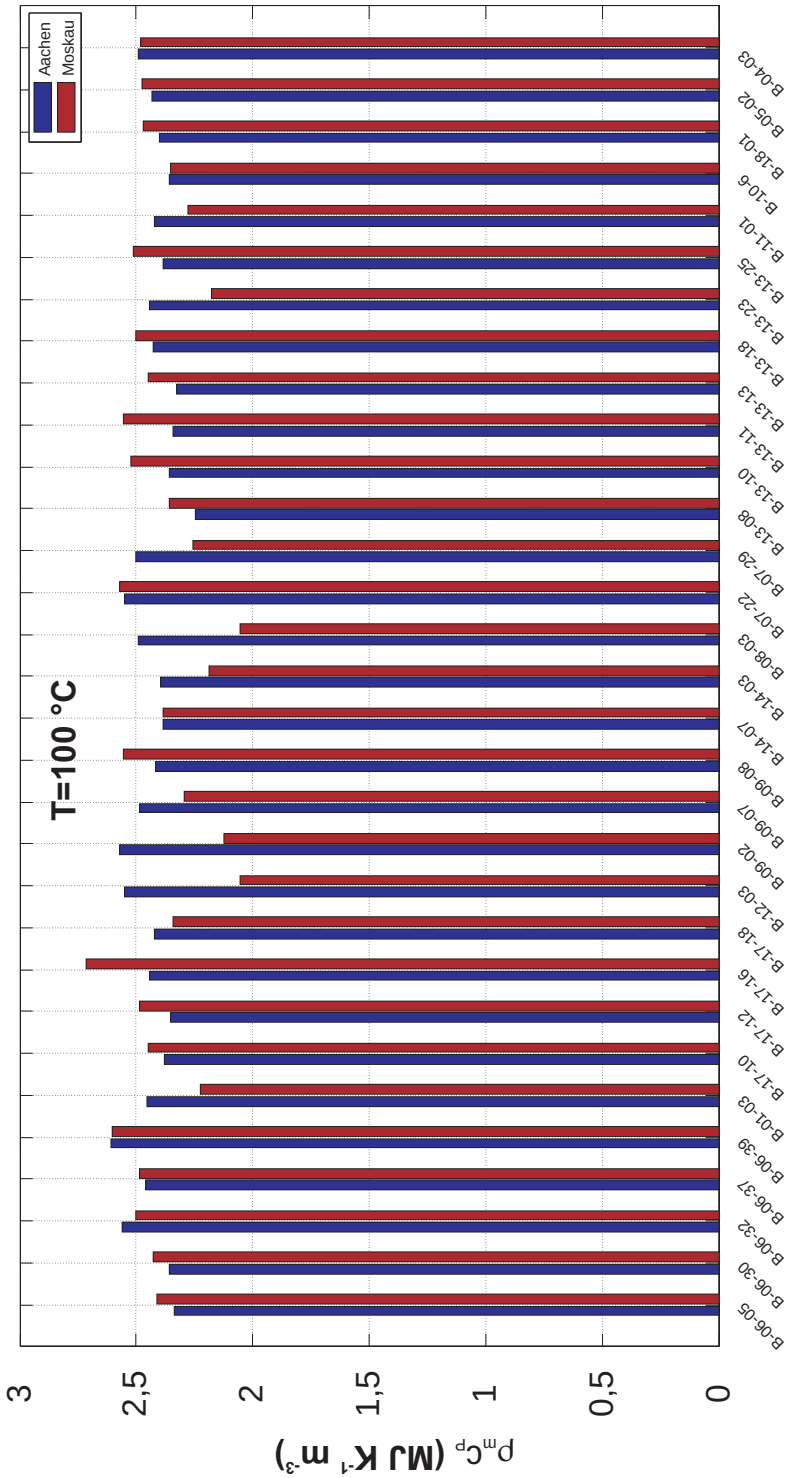


Abbildung 4.35: *Vergleich der gemessen volumetrischen Wärmekapazität im RSGPU on Moskau und Aachen bei 100 °C.*

Tabelle 4.14: *Übersicht zu den statistischen Kennwerten der Permeabilität k für verschiedene Gesteinstypen paläozoischer Gesteinsserien aus dem westlichen Nordrhein-Westfalen (vgl. Abbildung 4.36).*

	log (k) (m^2)							
	N	Mittel-wert	Stabw.	Min.	25%-Quart.	Median	75%-Quart.	Max.
Tonstein	9	-18,20	1,07	-20,23	-18,70	-18,09	-17,62	-16,78
Sandstein (ohne Westfal)	12	-17,99	1,64	-21,00	-18,92	-17,94	-16,53	-16,22
Sandstein (Westfal)	21	-14,84	1,43	-17,42	-16,34	-14,43	-13,84	-12,77

4.6 Permeabilität unter Normalbedingungen und druckabhängige Permeabilität

Die Messung von Permeabilitäten an Plugs aus Kernproben wurde nach Maßgabe des Instituts für Applied Geophysics and Geothermal Energy von der Geophysica Beratungsgesellschaft mbH in Auftrag gegeben und am Steinmann-Institut für Geologie, Mineralogie und Paläontologie der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn durchgeführt. An 52 ausgewählten Proben wurde die Permeabilität unter Normalbedingungen erfasst. An 21 von ihnen wurde die druckabhängige Permeabilität gemessen mit effektiven Drücken von meist bis zu 35 MPa, bei einigen Proben bis zu 60 MPa, was einer Tiefe von etwa 1,2 km bzw. 2 km entspricht. Insgesamt wurden 240 Einzelmessungen durchgeführt.

Auf die ursprünglich geplante höhere Probenzahl wurde verzichtet, weil sich die Messung an quasi dichten Tonsteinen oder tonigen Sandsteinen als nicht sinnvoll herausstellte. Neben der generellen Ermittlung der statistischen Kennwerte zur Permeabilität paläozoischer Gesteinsserien aus dem tiefen Untergrund Nordrhein-Westfalens dienen die Ergebnisse darüber hinaus als Vergleichswerte bei der Ableitung von Permeabilitäten aus NMR-Messungen (vgl. Abschnitt 4.7).

Abbildung 4.36 und Tabelle 4.14 zeigen die statistischen Kennwerte bzw. bei Gesteinsgruppen mit geringer Probenzahl die Einzelwerte aus den Messungen unter Normalbedingungen. Die Werte sind mit dem Durchfluss- oder mit dem Gradientenverfahren (vgl. Abschnitt 2.1.6) als Gaspermeabilität erfasst und bereits in absolute Permeabilitäten umgerechnet worden. Die durchgeführte Klinkenberg-Korrektur ist in Zisser und Nover (2009) erläutert. Im Vergleich mit Wertebereichen aus anderen Datensammlungen (z. B. Schön, 1996) rangieren die Sandsteine des Westfals im normalen Spektrum. Die übrigen Sandsteine liegen vergleichsweise niedrig, was mit der für Sandsteine sehr niedrigen Porosität und dem teilweise hohen Gehalt an tonigem Bindemittel erklärt werden kann. Die Tonsteine hingegen rangieren gegenüber anderen Tabellenwerken eher hoch. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Probenauswahl dieser Gesteinsgruppe für Permeabilitätsmessungen nicht repräsentativ war, da wie oben erwähnt Messungen an sehr dichten Tonsteinen aus drei Gründen als wenig sinnvoll erachtet wurden. Zum einen liegt die Auflösungsgrenze des Gradientenverfahrens bei etwa 10^{-21} m^2, zum anderen ziehen sich Messungen nahe der Auflösungsgrenze teilweise über Tage hin, und drittens spielt die genaue Permeabilität bei solch dichten Gesteinen für geothermische Fragestellungen keine wesentliche Rolle, sodass letztendlich nur relativ gut durchlässige Tongesteine ausgewählt wurden.

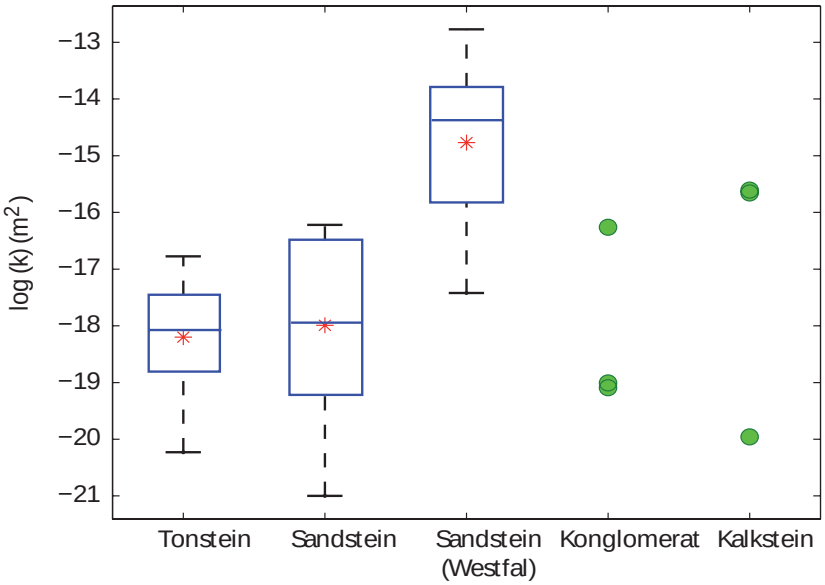
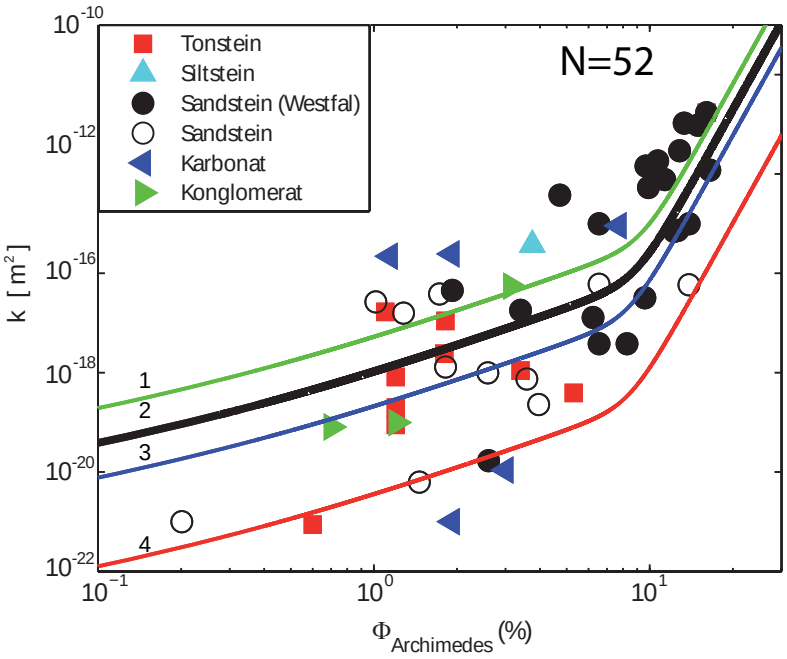


Abbildung 4.36: *Darstellung der statistischen Maßzahlen der Permeabilität k für verschiedene Gesteinstypen paläozoischer Gesteinsserien aus dem westlichen Nordrhein-Westfalen in Form von Box-Whisker-Diagrammen (blaue Mittellinie: Medianwert; roter Stern: Mittelwert; blaue Box: 25%- und 75%-Quartil; schwarze Begrenzungsstriche: 5%- und 95%-Perzentil). Grüne Punkte stellen Einzelwerte dar. Die Maßzahlen sind als logarithmische Werte berechnet und dargestellt. Sie korrespondieren mit Tabelle 4.14.*

Die Permeabilität eines Gesteins hängt neben der Porosität im Wesentlichen von der Porenraumgeometrie, das heißt von der Korngrößenverteilung und die daraus resultierende Größe und Form der Porenräume zwischen den Körnern ab. Entsprechend unterscheiden sich diese Eigenschaften zwischen verschiedenen Gesteinstypen. Abbildung 4.37 stellt die Beziehung zwischen Porosität und Permeabilität an der untersuchten Probenauswahl für unterschiedliche Lithologien dar und vergleicht diese mit empirischen k-ϕ-Beziehungen anderer klastischer Gesteinsgruppen auf Basis eines fraktalen Porenraummodells nach Pape et al. (1999). Die Sandsteine stimmen insgesamt gut mit den Näherungskurven überein. Insbesondere die Sandsteine des Westfals sind überwiegend gut mit anderen Gruppen reiner Sandsteine in Übereinstimmung zu bringen. Im Bereich niedriger Porositäten fallen vor allem die Tonsteine auf, die deutlich über der Vergleichskurve liegen. Ursächlich hierfür dürfte sein, dass viele der Tonproben keine reinen Tonschiefer sind, sondern eine teilweise sehr engständige Wechsellagerung zwischen Ton- und Sandstein darstellen (vgl. Abbildung 4.14). Aus demselben Grund liegen vor allem niedrigporöse Sandsteine mit hohem Tongehalt näher an der Vergleichskurve für tonige Sandsteine oder für Tonsteine.

An einer Auswahl von 21 Proben wurden insgesamt 209 druckabhängige Messungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.38a-c für unterschiedliche Gesteinstypen zusammengestellt. Eine Erhöhung des effektiven Drucks führt allgemein zu einer Reduzierung des Porenraums durch eine Veränderung des Querschnitts der Porenkanäle und ihrer Geometrie und schließlich zu reduzierter Permeabilität (Schön, 1996). Die Beziehung Permeabilität versus Druck ist dabei nichtlinear. Bei den meisten Proben sinkt die Permeabilität bei steigendem Druck zunächst stärker, um dann ab etwa 10 MPa nur noch sehr langsam zu fallen oder gleich zu bleiben. Dieser Effekt ist bei den hier untersuchten Tonproben tendenziell stärker ausgeprägt. Bei den Sandsteinen ist bei einer Probe eine Reduktion der Permeabilität über den gesamten Druckbereich hinweg zu beobachten. Die druckabhängige



1 $k = 155\,\phi + 37315\,\phi^2 + 630\,(10\,\phi)^{10}$ Rotliegend-Sandstein (Norddeutschland)
2 $k = 31\,\phi + 7463\,\phi^2 + 191\,(10\,\phi)^{10}$ Durchschnittlicher Sandsteintyp
3 $k = 6{,}2\,\phi + 1493\,\phi^2 + 630\,(10\,\phi)^{10}$ Toniger Sandstein
4 $k = 0{,}1\,\phi + 26\,\phi^2 + (10\,\phi)^{10}$ Tonstein
(k in $10^{-9}\,m^2$)

Abbildung 4.37: *Permeabilität k (in logarithmischer Skala) in Abhängigkeit der Porosität ϕ für verschiedene Gesteinstypen paläozoischer Gesteinsserien aus dem westlichen Nordrhein-Westfalen. Zum Vergleich sind Näherungsgleichungen für verschiedene Typen klastischer Gesteine aus Pape et al. (1999) angegeben (durchgezogene Linien).*

Abnahme der Permeabilität ist zur besseren Visualisierung in Abbildung 4.38d als Differenz der logarithmischen Permeabilität zwischen einer niedrigen und einer hohen Druckstufe, die bei fast allen Proben gemessen wurde, berechnet worden und gegen die Ursprungstiefe der jeweiligen Kernproben aufgetragen. Es zeigt sich, dass die Permeabilität bei allen Tonproben mindestens um eine halbe und bis zu zwei Größenordnungen abnimmt, wohingegen die Abnahme bei der Mehrheit der Sandsteine kleiner als eine halbe Größenordnung ist und nur bei drei Proben darüber liegt. Eine Abhängigkeit von der Tiefe innerhalb einer Lithologie ist dabei nicht festzustellen.

Die überwiegend exponentielle Abnahme ist mit einem elastischen Verhalten der Gesteinsmatrix zu erklären, welches vor allem im Niederdruckbereich zu einer Verkleinerung des Porenraums führt. Bei Tonsteinen ist durch den hohen Anteil von Schichtsilikaten die Bildung von Mikrokluftsystemen begünstigt, die allgemein eine stärkere Druckabhängigkeit zur Folge hat (Tiab und Donaldson, 1996). Bei den Sandsteinproben mit hoher Drucksensitivität ist zu vermuten, dass bereits Entlastungsrisse vorhanden gewesen sein müssen, die über das elastische Verhalten der Gesteinsmatrix hinaus verstärkt mit einer Schließung dieser Wegsamkeiten bis zur ursprünglichen in-situ-Spannung zu einer Verkleinerung der Permeabilität beigetragen haben.

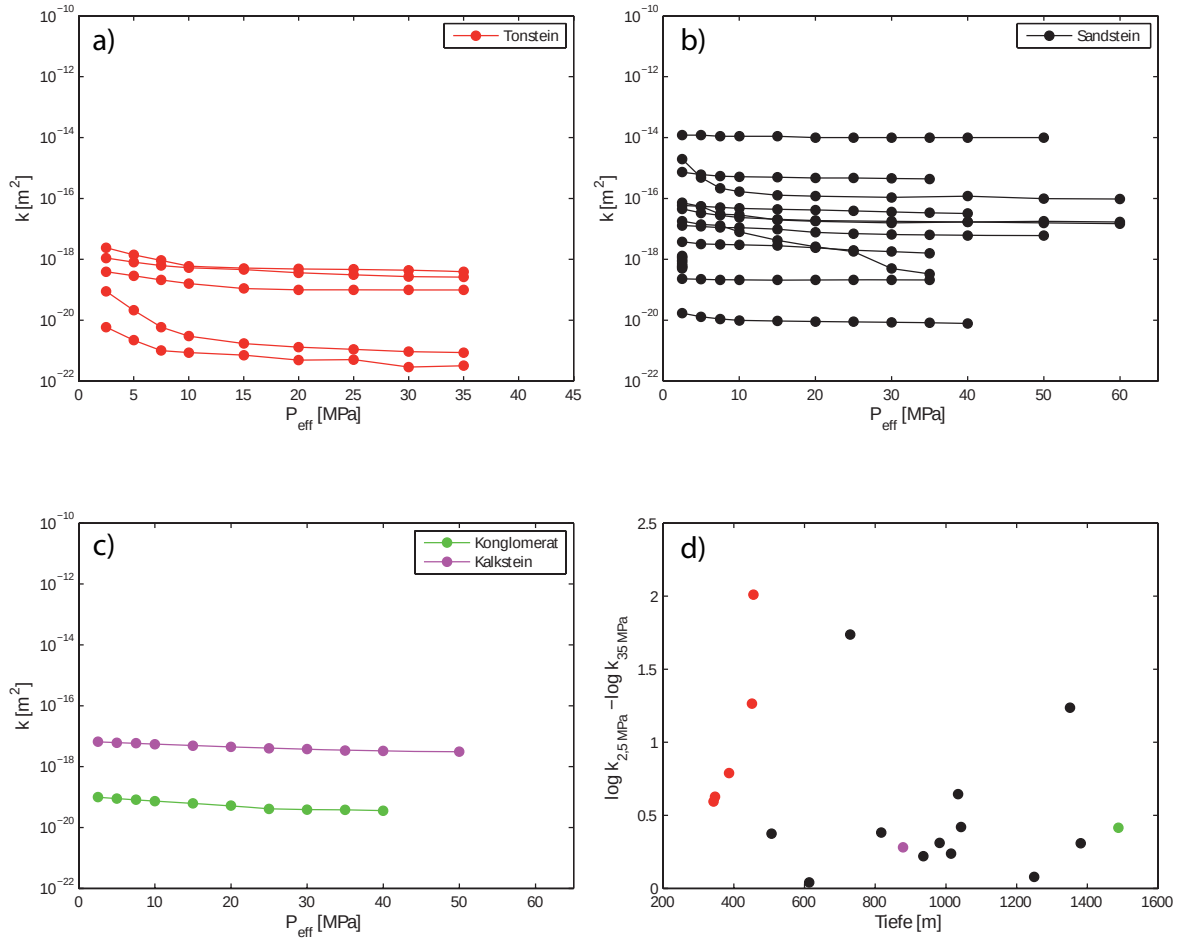


Abbildung 4.38: *Permeabilität k ausgewählter Proben in Abhängigkeit des effektiven Drucks P_{eff} für verschiedene Gesteinstypen paläozoischer Gesteinsserien aus dem westlichen Nordrhein-Westfalen (a-c). d) Relative Abnahme der Permeabilität k (logarithmisch) als Differenz zwischen der logarithmischen Permeabilität bei P_{eff}=2,5 MPa und P_{eff}=35 MPa in Abhängigkeit der Tiefe, aus der die jeweiligen Proben ursprünglich stammen.*

4.7 Ableitung der Permeabilität aus NMR-Messungen

In der ersten Projektphase Clauser et al. (2007) wurde ein Halbachmagnet für NMR Messungen neu aufgebaut (vgl. Abschnitt 2.1.7). Der Magnet hat im Gegensatz zu früheren Prototypen einen größeren nutzbaren Durchmesser von 106 mm und ist damit im Prinzip vielfältiger einsetzbar. Um die Möglichkeiten des Magneten voll ausnutzen zu können, wurde in der abgeschlossenen zweiten Projektphase ein speziell konstruierter Vorverstärker und ein darauf abgestimmtes Akquisitionssystem aufgebaut, dass es erlaubt, kürzere Messzeiten und damit die Messung geringerer Porositäten zu realisieren. Mit dem verbesserten System wurden die methodischen Arbeiten zur Ableitung von Permeabilitäten aus diesen Messungen fortgesetzt, mit dem Ziel, schnellere und kostengünstigere Messungen der Permeabilität zu ermöglichen.

Zur Ableitung von Permeabilitäten und Porositäten wurde an einer Auswahl von insgesamt 71 Proben T_1- und T_2-NMR-Relaxometriemessungen durchgeführt. Davon liegen von 52 Proben Permeabilitäten vor, die als Gaspermeabilitäten gemessen wurden und eine Klinkenberg-Korrektur durchlaufen haben

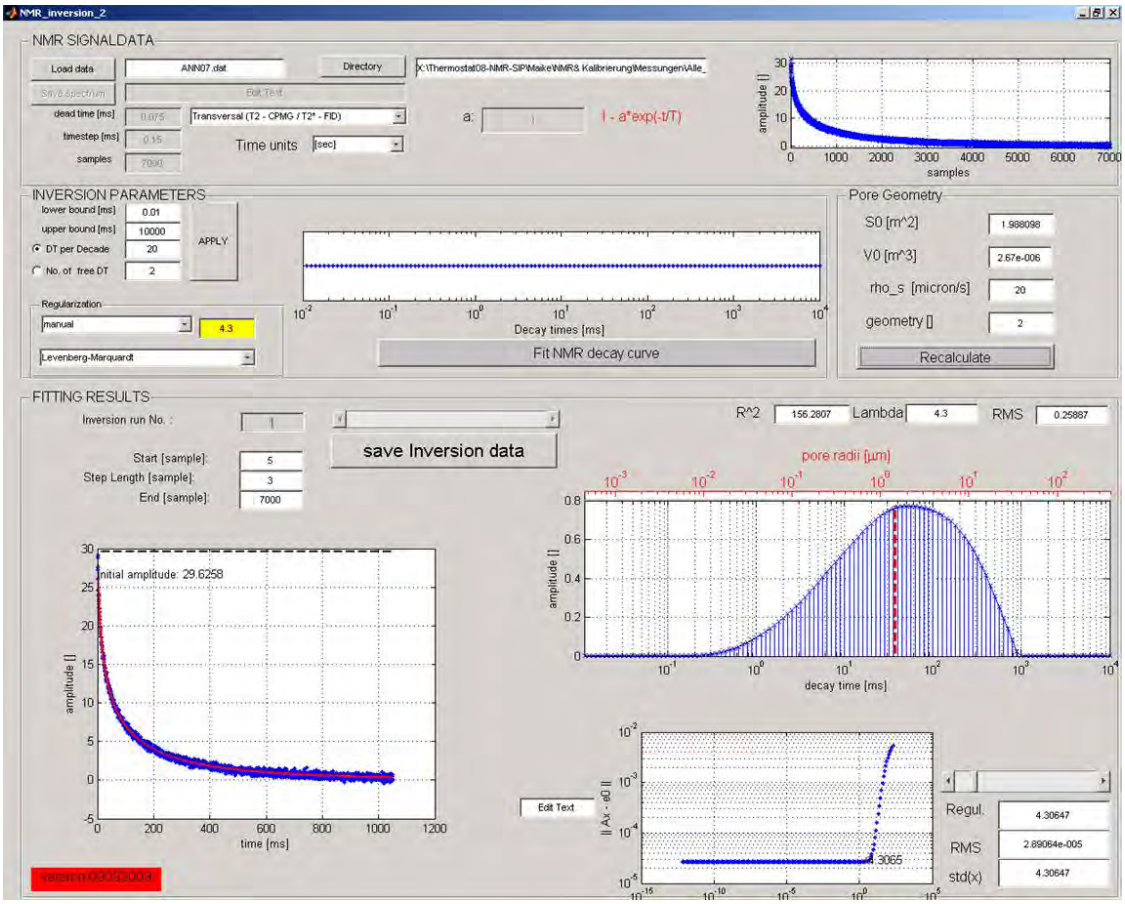


Abbildung 4.39: *Benutzeroberfläche des MATLAB-Programms zur Auswertung von 1D- und 2D-NMR-Relaxometriedaten.*

(vgl. Abschnitt 4.6). Als unabhängige Vergleichsmessung wurden ergänzend zu den NMR-Messungen Porenradienverteilungen an 36 Proben (überwiegend Sandsteine) mittels Quecksilberporosimetrie erfasst. Die Anpassung der Abklingkurven erfolgte mit einem am Institut für Applied Geophysics and Geothermal Energy entwickelten MATLAB-Programmpaket (Abbildung 4.39) zur Auswertung von 1D- und 2D-NMR-Relaxometriedaten. NMR-Porositäten wurden dabei jeweils mittels Kalibration an einer Referenzprobe (freies Wasser) bestimmt und zeigen auch bei den gering porösen Proben eine gute Korrelation (R^2 = 0,87) zu den Ergebnissen der archimedischen Messungen (Abbildung 4.40a).

Die lineare Korrelation nach Gleichung 2.8 zwischen NMR-Relaxationszeiten und Porenradien ist in Abbildung 4.40b wiedergegeben. Die Abweichung zwischen Porenradien von Tonsteinen, die mittels NMR und Quecksilberporosimetrie bestimmt wurden, ist dabei auf Artefakte in den Quecksilberporosimetrieverteilungen zurückzuführen.

Die NMR-Permeabilitäten k_{NMR} wurden aus den Ergebnissen von NMR-Porositäten und dem geometrischen Mittel der Relaxationszeitverteilungen die drei Realisierungen der in Abschnitt 2.1.7 beschriebenen Modellbeziehungen berechnet (Abbildung 4.40c und 4.40d). Kalibrierung und Vergleich mit den Messungen von Gaspermeabilitäten erfolgte dabei jeweils gesteinsspezifisch für Ton- und Sandsteine an einer kleinen Auswahl (28 Proben). Weiter wurden NMR-Permeabilitäten unter Verwendung der von Sen et al. (1990) abgeleiteten Parameter des allgemeinen Kenyon-Modells für

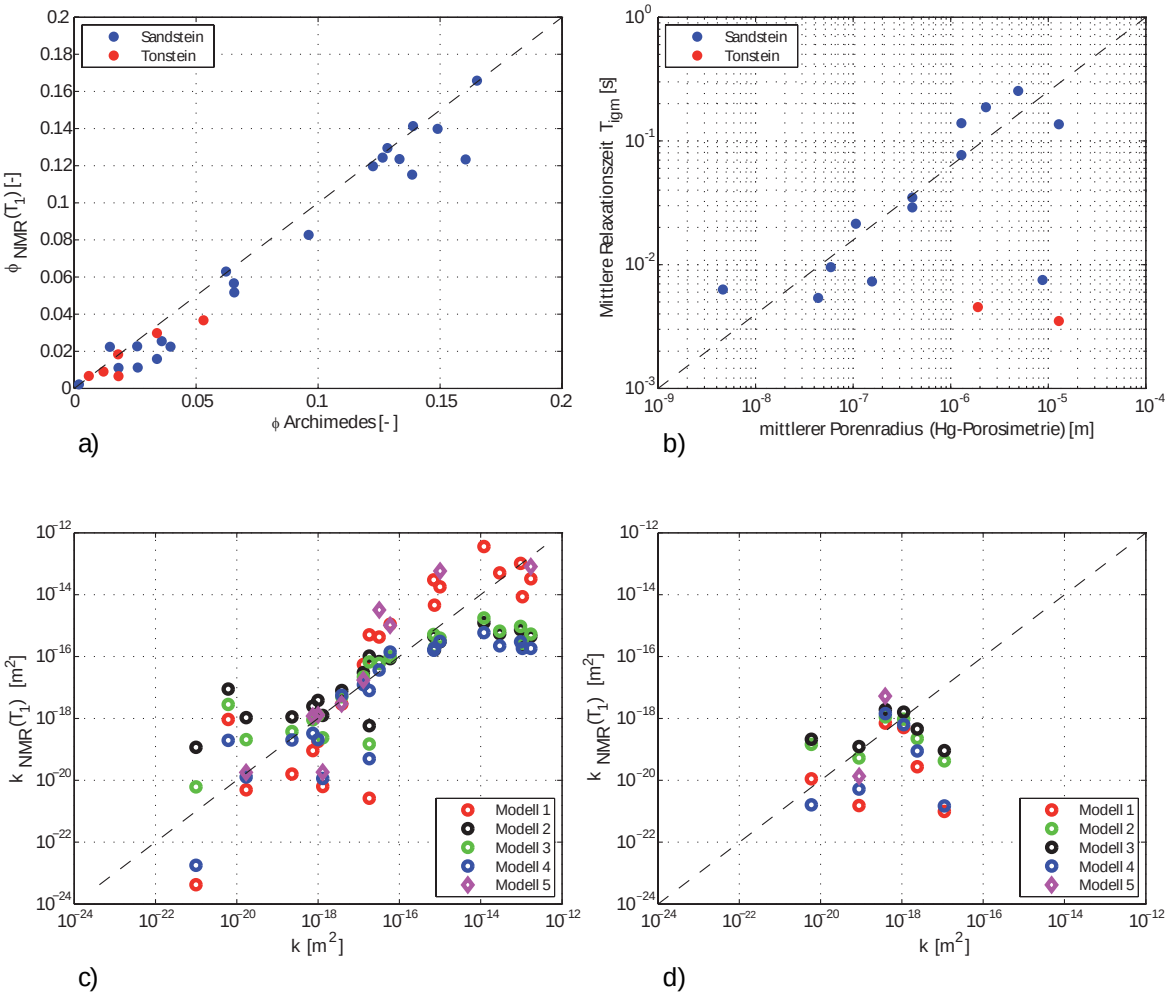


Abbildung 4.40: *Ergebnisse aus den NMR-Messungen am Beispiel der T_1-Relaxationszeiten der untersuchten Sandsteine und Tonsteine: a) Korrelation der Porositäten, die mittels NMR (ϕ_{NMR}) und dem Archimedes-Verfahren ($\phi_{Archimedes}$) erfasst wurden; b) Korrelation zwischen Relaxationszeit aus NMR-Messungen und dem mittleren Porenradius aus der Quecksilberporosimetrie; c) und d) Korrelation zwischen NMR-Permeabilitäten k_{NMR} (berechnet mittels fünf verschiedener Modelle aus Tabelle 4.15) und Gaspermeabilitäten k für Sandsteine (c) und Tonsteine (d).*

Sandsteine berechnet (Tabelle 4.15). Der Parameter m ergibt sich dabei aus dem Formationfaktor $F = 1/\phi^m$, welcher sich aus geoelektrischen Messungen bestimmen lässt. Hier wurde ein für Sandsteine gemittelter Wert $m = 2$ verwendet.

Ein alternatives, semi-empirisches Modell (Modell 5) zur Abschätzung von Permeabilitäten durch NMR-Messungen basiert auf der Kozeny-Carman-Gleichung (Gleichung 2.11). Hierbei ist die Annahme einer linearen Korrelation zwischen effektivem Porenradius und Relaxationszeit Grundlage des Modells (vgl. Abbildung 4.40b).Im Gegensatz zu den Modellen 1 bis 4 ist hier für m keine unmittelbare Kalibration beispielsweise durch Gaspermeabilitäten erforderlich. Allerdings werden zur Berechnung der Oberflächenrelaxivität ρ in den Gleichungen 2.8 und 2.9 aus der NMR-Relaxationsverteilung die integralen innere Oberflächen S_{por} und die Volumina V_{por} benötigt. S_{por} wird in diesem Zusam-

Tabelle 4.15: *Kalibrierte Modellparameter zur Ableitung von NMR-Permeabilitäten nach Gleichung 2.10 (Modelle 1 bis 4) und Gleichung 2.11 (Modell 5).*

Modell	m	n	a	R^2
Modell 1: Kenyon et al. (1988)	4	2	7,54E-09	0,88
Modell 2: allg. Kenyon	1,26	1,04	5,10E-14	0,87
Modell 3: Seevers (1966)	2	1	2,55E-13	0,89
Modell 4: Sen et al. (1980)	2	2,15	7,84E-13	0,87
Modell 5: Cozeny-Karman (Carman, 1956)	--	--	--	0,85

menhang üblicherweise über BET-Messungen bestimmt. Hier wurden innere Oberflächen- und Porenvolumina den Porenradienverteilungen aus der Quecksilberporosimetrie entnommen.

Vergleicht man Gas- und NMR-Permeabilitäten der Sandsteine, findet sich für alle Modelle eine generell gute Korrelation ($R^2 > 0{,}86$) für $k > 10^{-19}$ [m^2] (Abbildung 4.40c). Zu kleineren Werten hin stoßen beide Methoden an ihre Auflösungsgrenzen.

Die Permeabilitätsabschätzung der Tonsteine (Abbildung 4.40d) korreliert nur moderat mit den Gaspermeabilitäten. Dies ist zum einen auf das begrenzte Auflösungsvermögen insbesondere der Quecksilberporosimetrie begründet. Bei dichten Gesteinen mit niedrigen Porositäten von unter zwei Prozent, wie es hier der Fall ist, verzerren häufig Artefakte die Porenradienverteilung. Zum anderen sind die verwendeten Modelle explizit für Sandsteine abgeleitet worden und nur bedingt auf andere Gesteinsarten mit einer abweichenden Porenarchitektur übertragbar.

4.8 Recherche und Kompilation von Bohrlochmessdaten

Die Untersuchungsgebiete waren Zielgebiete umfangreicher Explorationstätigkeit für den Abbau von Steinkohleflözen (Ruhrgebiet) und Braunkohlelagerstätten (Niederrheinische Bucht). Für die beiden Zielgebiete liegen analoge Datensätze für Explorations- und Forschungsbohrungen vor, die im Archiv des Geologischen Dienstes NRW gesichtet wurden. Einige ausgewählte Bohrungen wurden gescannt und digitalisiert. Die Verfügbarkeit und Qualität der Bohrlochmessdaten ist den ausgewählten Bohrungen sehr unterschiedlich. In sämtlichen untersuchten Bohrungen kamen standardmäßig Gamma-Logs und moderne elektrische Widerstandslogs zum Einsatz. Für einige Bohrungen stehen weiterhin Messungen folgender Parameter zur Verfügung: Laufzeit, Eigenpotential, Gamma-Dichte, Neutronenporosität, Temperatur und Salinität. Die Bohrlochmessungen wurden überwiegend von den Servicefirmen Schlumberger und Baker Atlas durchgeführt. Die Bohrungen wurden so ausgewählt, dass für die stratigraphischen Einheiten eine möglichst gute Abdeckung in den Untersuchungsgebieten gewährleistet ist. Insgesamt wurden 17 Bohrungen für eine detaillierte Bearbeitung ausgewählt. Die ausgewählten Bohrungen und die in den Bohrungen gemessenen Parameter sind in Tabelle 4.16 aufgelistet.

Tabelle 4.16: *Übersicht zu den bearbeiteten Bohrungen und der Verfügbarkeit von Bohrlochmessdaten; x = Log vorhanden; (x) = Log nicht über gesamte Teufe vorhanden.*

Bohrung	Intervall (m)	GR	Res.	Sonic	Dichte	Porosität
B-26	0 - 51	x	x			
B-14	180-1383	x	x	x	(x)	
B-27	0 - 1244	x		(x)	x	
B-02	0 – 434	x	(x)			
B-15-05	0 - 1572	x	(x)	(x)	(x)	
B-15-05A	0 - 1168	x	(x)	(x)	(x)	
B-12	1372.6	x	(x)	x	x	
B-09	0 - 482	x	(x)	x		
B-17	0 -1222	x	x	x	(x)	
B-18-01	0 - 1510	x	(x)	x	(x)	
B-18-02	297 -1213	x	x	x	x	
B-13-01	172 - 1715	x	(x)	x	(x)	
B-06	0 - 1710	x	(x)	(x)	(x)	
B-10	0 - 630	x	(x)	(x)	(x)	(x)
B-07	0 - 1444	x	(x)	x	(x)	
B-16	535 - 733	x	x	x		
B-08	0 - 372	x	x			

4.9 Ableitung von Wärmeleitfähigkeiten aus Logging-Daten

4.9.1 Loginterpretation in der Referenzbohrung B-17

Zur Logauswertung für eine paläozoische Abfolge im nördlichen Bereich des Rhein-Ruhr-Gebietes wurde die Bohrung B-17 als Referenzbohrung herangezogen. Die Bohrung wurde im Steinkohlerevier niedergebracht und erreicht eine Endteufe von 1221 m. Die Bohrung wurde von Schlumberger vermessen. In dem von RWE Power gewählten Messprogramm werden in Explorationsbohrungen standardmäßig folgende Parameter gemessen: Kaliber, Gamma-Ray, elektrischer Widerstand und Gammadichte. In der Bohrung B-17 wurden zusätzlich Sonic- und Eigenpotentialmessungen durchgeführt. Eine Übersichtsdarstellung aller gemessenen Parameter innerhalb der karbonischen Abfolge findet sich in Abbildung 4.41.
Die Bohrlochmessungen lassen sich gut mit der im Bohrbericht dargestellten Lithologie in Verbindung bringen. Entsprechend der Gesteinsbeschreibung wurden 3 Hauptgesteinstypen mit den Logs identifiziert (Abbildung 4.41): Sandstein, Tonschiefer und Steinkohle. Innerhalb der Abfolge wechseln Tonschieferschichten mit Steinkohlelagen. Nur im Teufenbereich zwischen 580 m und 630 m treten 10er m mächtige Sandsteinschichten auf, die immer wieder durch Schiefertone unterbrochen werden. Die Sandsteine weisen im Mittel Dichten von 2,53 g/cm^3 auf und sind durch niedrige Werte im Gamma-Ray gekennzeichnet (Mittelwert: 31 API, Tabelle **??**. Die Tonschiefer sind durch die höchsten Gamma-Ray-Werte (Max: 73 API) gekennzeichnet, wodurch sie sich von den Sandsteinen abgrenzen lassen. Im Mittel betragen die Gamma-Ray-Werte 42 API und die Werte der Dichte 2,61 g/cm^3. In der karbonischen Abfolge wurden geringmächtigere Steinkohlelagen anhand der Logs durch extrem niedrige Werte der Dichte ($<$ 2,1 g/cm^3) und des Gamma-Rays (Mittelwert: 25 API) identifiziert. Im

Tabelle 4.17: *Durchschnittswerte (AVG) und Standardabweichungen (STD) der Logdaten für die in der Bohrung B-17 abgegrenzten Hauptgesteinstypen des Karbons. GR: Gammaaktivität; DT: Laufzeit der Longitudinalwelle; RHOB: Gesamtdichte und RES: elektrischer Widerstand.*

	GR (API)		DT ($\mu s/m$)		RHOB (g/cm^3)		RES (m)	
	AVG	STD	AVG	STD	AVG	STD	AVG	STD
SANDSTEIN	31,29	6,36	234,01	9,19	2,53	0,03	10,83	3,01
TONSCHIEFER	41,79	11,27	237,52	34,76	2,61	0,14	19,13	19,95
STEINKOHLE	25,21	10,55	384,31	44,58	1,75	0,17	49,03	91,15

Teufeninterval 544 m bis 652 m wurde zusätzlich zur Hauptlithologie eine feinere Untergliederung anhand von Kernbeschreibungen vorgenommen. Hierbei werden folgende Gesteinstypen unterschieden: Sandstein (grobkörnig), Sandstein (feinkörnig), Tonschiefer (sandig), Tonschiefer (sandstreifig) und Tonschiefer. Da die einzelnen Lithotypen unterschiedlich hohe Anteile an Tonmineralen enthalten, lassen sie sich anhand des Gamma-Ray-Logs verifizieren (Abbildung 4.42). In einer weiteren Darstellung wurden den Lithotypen folgende Gamma-Ray-Werte zugeordnet: Sandstein, grobkörnig (0-30 GAPI); Sandstein, feinkörnig (30-40 GAPI); Tonschiefer, sandig (40-50 GAPI) und Tonschiefer (50-80 GAPI). Die so entstandene Lithosäule ist in Abbildung 4.43 im Vergleich zu den Kernbeschreibungen dargestellt (Teufenintervall: 560-610 m). Beim Vergleich der beiden Datensätze lassen sich einzelne Abschnitte mit dem gleichen Gesteinstyp (z.B. grobkörniger Sandstein) miteinander verbinden.

4.9.2 Porositäten und Wassersättigung in den Karbonbohrungen

In einer weiterführenden Auswertung wurden die Logdaten petrophysikalisch ausgewertet mit dem Ziel Porositäten und Wassersättigungen aus den Logs abzuleiten. Die Porositäten können im vorliegenden Fall aus der Gammadichte bestimmt werden. Die hierzu benötigten Matrixdichten sind aus den Laboruntersuchungen am Kernmaterial bekannt. An 11 Proben der Bohrung B-17 wurden Messungen der Dichte und Porosität durchgeführt. Die Matrixdichte der Tonschiefer und Sandsteine beträgt 2,7 g/cm^3.
Das Ergebnis der Berechnungen sind kontinuierliche Profile zur Porosität, Wassersättigung sowie zu den Volumenanteilen der erbohrten Gesteinskomponenten (vergl. Abbildung 4.44). Die Logdaten zeigen für die karbonische Abfolge bereichsweise hohe Porositäten von bis zu 12 %. Diese für karbonische Sandsteine hohe Werte werden durch Porosiätsmessungen an Kernen bestätigt (vergl. Abbildung 4.44). Der Tonanteil wurde aus dem Gamma-Ray bestimmt. Dies ist möglich, da natürlicherweise radioaktive Isotope wie z.B. K40 und die Produkte der radioaktiven Zerfallsreihen von Thorium und Uran hauptsächlich an Tonminerale gebunden sind. Daher konnte der Anteil an Ton relativ zur siliziklastischen Matrix bestimmt werden. Die Steinkohlelagen wurden anhand ihrer sehr geringen Dichte identifiziert und über einen Cutoff abgegrenzt, um sie anschießend auszuweisen. Die Wassersättigung wurde anhand des Widerstandlogs berechnet, wobei die Archie-Formeln mit den Standardkoeffizienten a=1, m=2 und n=2 benutzt wurde. Wie erwartet beträgt die Wassersättigung in der gesamten karbonischen Abfolge 100 %. Abbildung 4.44 zeigt das Ergebnis der Berechnungen. Sowohl die Logs der Dichte und der P-Wellengeschwindigkeit, als auch die berechneten Porositätswerte zeigen in der gesamten Formation eine sehr gute Übereinstimmung mit den Kerndaten (Abbildung 4.45). Die in der Bohrung B-17 erzielten Ergebnisse können nun in den weiterführen-

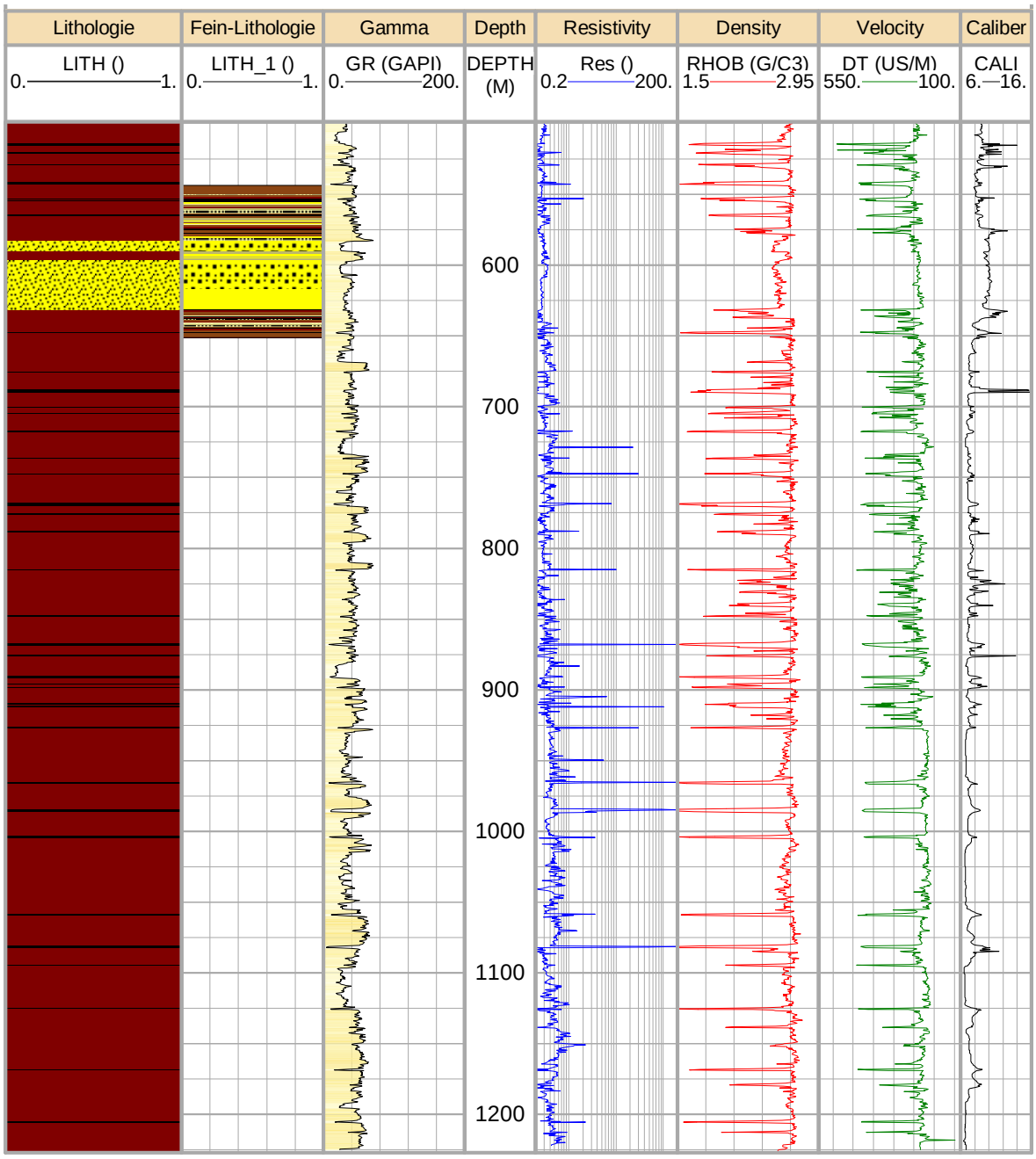


Abbildung 4.41: *Compositeplot der Bohrung B-17 im Teufenbereich 500 m bis 1227 m. Die lithologische Gliederung des Karbons resultiert aus Kernbeschreibungen. Neben einer groben Unterteilung über die gesamte Teufe, erfolgte im Intervall 540-650 m zusätzlich eine feinlithologische Gliederung (Sandsteine: gelb, Tonschiefer: braun und Steinkohle: schwarz.)*

den Arbeitsschritten auf die übrigen Bohrungen im nördlichen Ruhrgebiet übertragen werden und zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit genutzt werden.

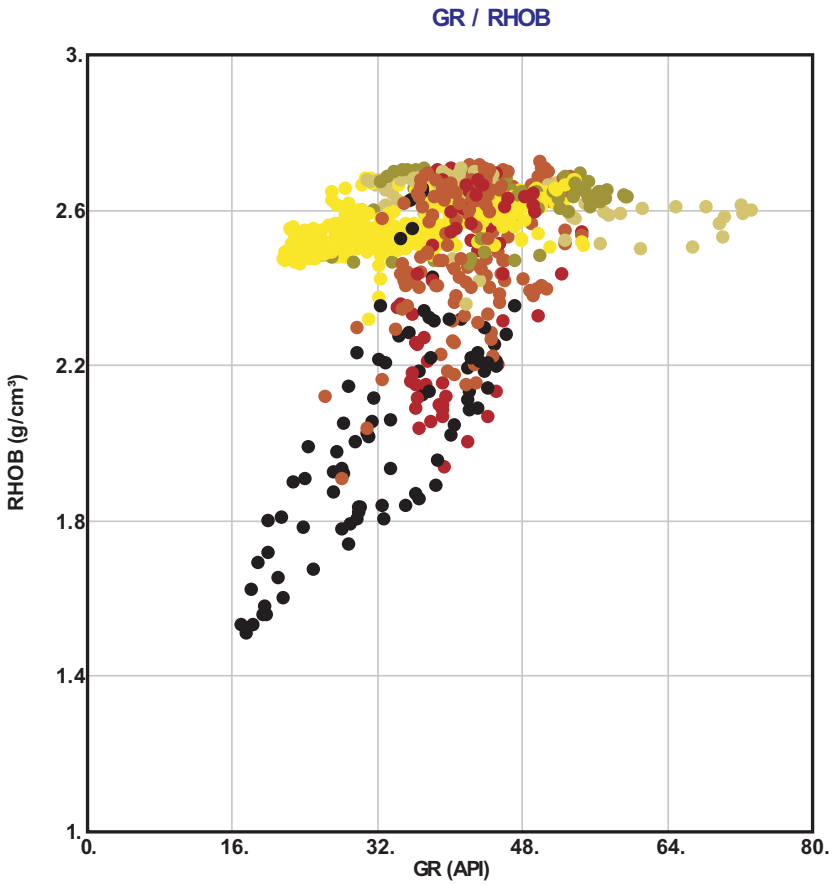


Abbildung 4.42: *Streudiagramm der im Bohrloch B-17 gemessenen Dichte (RHOB) gegen die Gammastrahlung (GR) für das Teufenintervall 544 m bis 652 m. Die Messwerte für die einzelnen lithologischen Abfolgen sind farblich voneinander abgegrenzt: Sandsteine (gelb), Tonschiefer (sandig: hellgrün, feinsandig: grün, sandstreifig: braun) und Steinkohle (schwarz), wobei zwischen Tonen und Kohle Übergänge von tonigen Kohlen bzw. Tonen mit Kohleneinschaltungen bestehen. Korrelierend zum Gamma-Ray steigen mit zunehmendem Tongehalt die Werte im Dichtelog an.*

4.9.3 Logs und Wärmeleitfähigkeiten

Im nächsten Schritt konnte aus dem in Abbildung 4.45 dargestellten Vierkomponentensystem Porosität, Sandstein, Tonstein und Kohle ein künstliches Log der Wärmeleitfähigkeit als geometrisches Mittel erzeugt werden. Aus der Bohrung B-17 wurden an 13 Kernen Wärmeleitfähigkeitsmessungen mit der TCS-Apparatur durchgeführt. Die für die Berechnung des künstlichen Wärmeleitfähigkeitlogs benötigten Matrixwerte wurden mit Hilfe dieser Kernmessungen angepasst. Für die einzelnen Gesteinskomponenten wurden folgende Werte bestimmt: Ton: 2,43 $Wm^{-1}K^{-1}$, Sand: 4,5 $Wm^{-1}K^{-1}$; Steinkohle: 0,7 $Wm^{-1}K^{-1}$. Diese ergeben sich aus der Analyse der Kerndaten. Der Vergleich des Quarzgehaltes mit der im Labor bestimmten Matrixwärmeleitfähigkeit (siehe Abbildung 4.46) ergibt eine deutliche Trennung der Sand- und der Tonsteine. Die Tonsteine bewegen sich in einem engen Wertebereich zwischen 2 $Wm^{-1}K^{-1}$ und 3 $Wm^{-1}K^{-1}$, mit einem Mittelwert von 2,43 während die Sandsteine aufgrund ihres variierenden Quarzgehaltes einen größeren Wertebereich zwischen 4 $Wm^{-1}K^{-1}$ und 6 $Wm^{-1}K^{-1}$ aufweisen. Hier ist anzumerken, dass die für den Ton bestimmte Matrixwärmeleitfähigkeit kleiner ist als die in Kapitel 4.3.2 für die Tonsteine des gesamten Paläozoikums

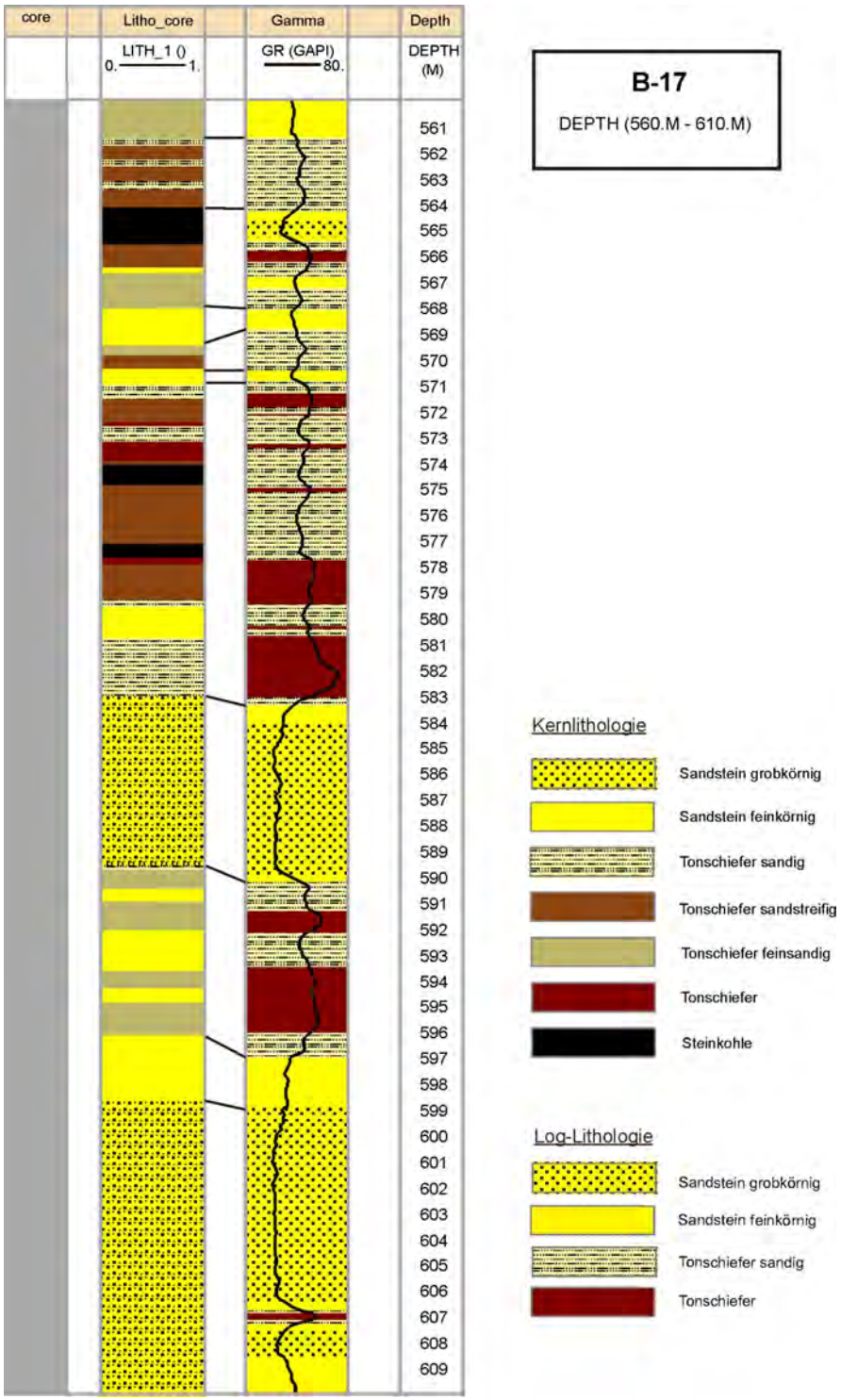


Abbildung 4.43: *Lithologische Gliederung der Bohrung B-17 im Teufeninterval: 560 m bis 610 m. Bedeutung der Spalten von links nach rechts: 1. Kerngewinn; 2. lithologische Unterteilung nach Kernbeschreibung; 3. Interpretation aus dem Gamma-Ray-Log, 4. Teufe. Zwischen den beiden Lithologiesäulen können einzelne Intervalle mit dem gleichen Gesteinstyp zur Deckung gebracht werden.*

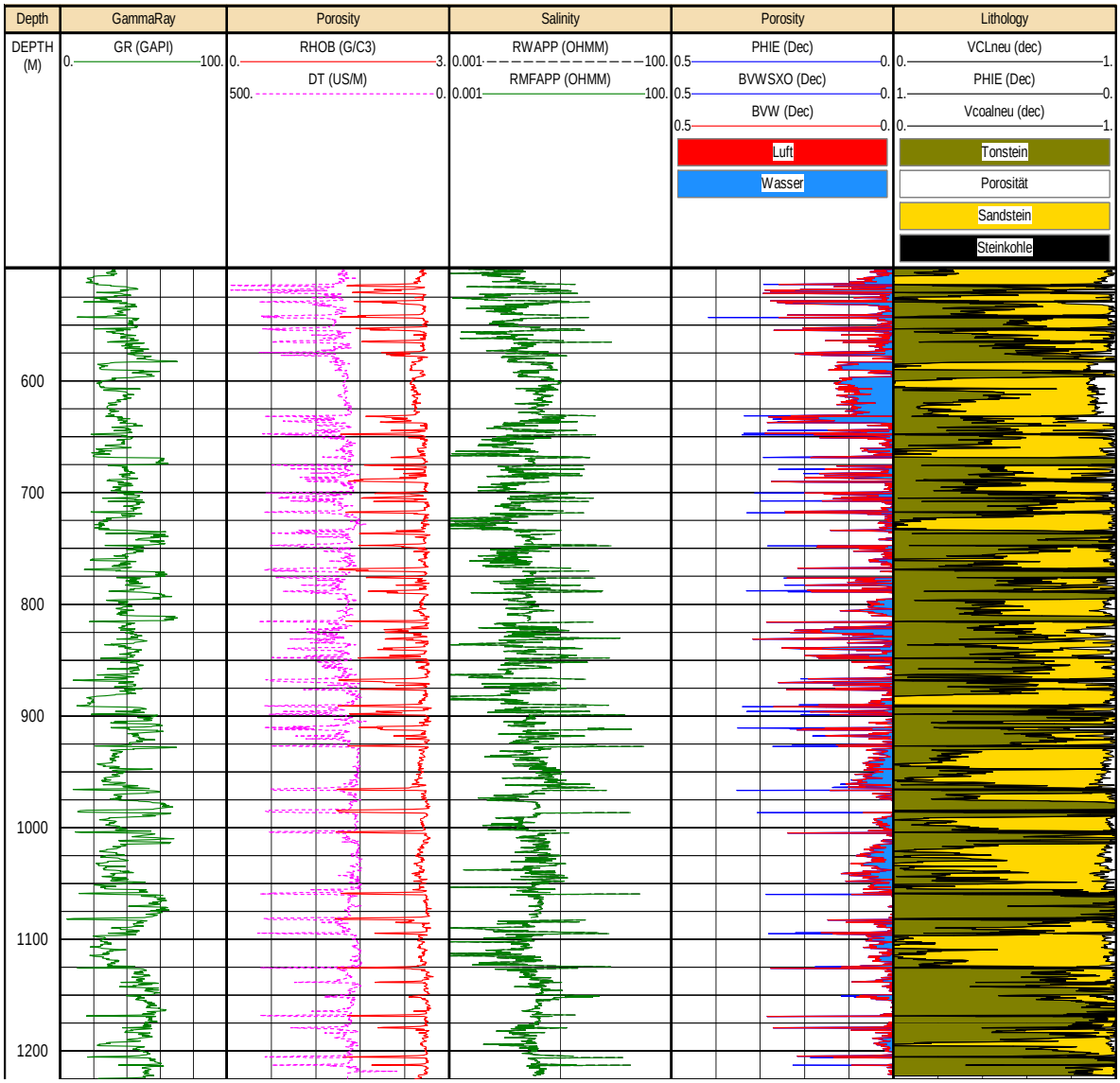


Abbildung 4.44: *Ergebnis der petrophysikalischen Auswertung für die Bohrung B-17. GR: Gammaaktivität; RHOB: Gesamtdichte; DT: Laufzeit der Longitudinalwelle; RWAPP: scheinbarer Widerstand des Formationswassers; RMFAPP: scheinbarer Widerstand des Mud-Filtrats; PHIE: effektive Porosiät; BVW: Gesamtwasservolumen; BVWSXO: Gesamtwasservolumen der saturierten Formation; VCLneu: Tonvolumen, berechnet aus GR; Vcoalneu: ausgewiesen durch Dichte-Cuttoff.*

genannten Werte. Der in der Tabelle 4.5 ermittelte Wert basiert auf Porositäts-Wärmeleitfähigkeits-Beziehungen. Hier konnten nur Proben berücksichtigt werden, die mit dem TCS gemessen wurden. Dies war bei vielen Tonsteinen aufgrund ihrer brüchigen Struktur nicht möglich, so dass für die reinen Tonsteine keine Porositätswerte vorliegen.

Abbildung 4.47 zeigt das Log der berechneten Wärmeleitfähigkeit für die Bohrung B-17. Die durchschnittlichen Wärmeleitfähigkeiten liegen bei λ von 3,05 $Wm^{-1}K^{-1}$ mit einer Variationsbreite von 0,4 $Wm^{-1}K^{-1}$ und 4,91 $Wm^{-1}K^{-1}$. Die niedrigsten Werte der Wärmeleitfähigkeit treten in den Steinkohlesequenzen auf, während die höchsten Werte auf Bereiche mit hohem Sandanteil zurück-

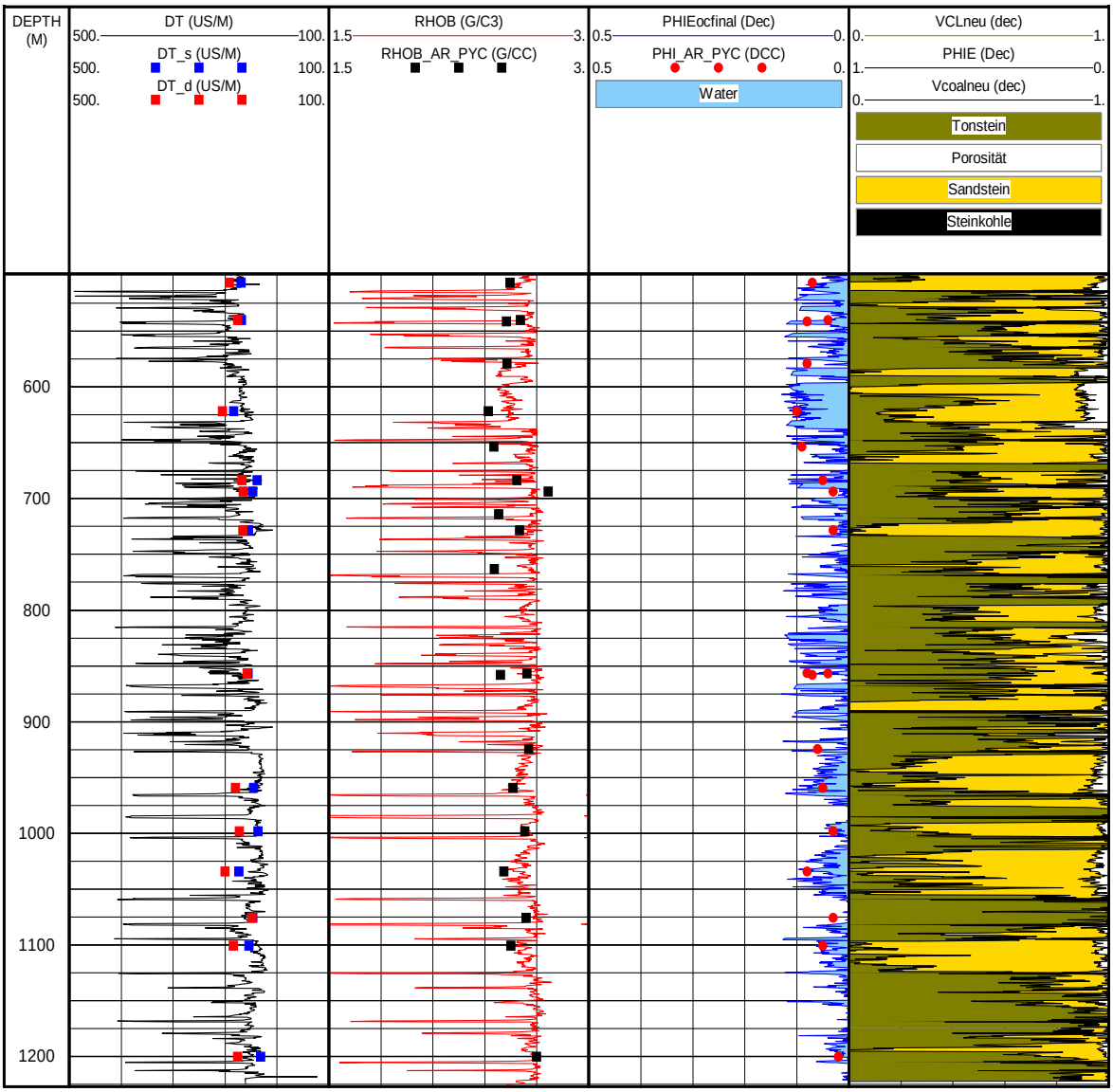


Abbildung 4.45: *Vergleich der berechneten und am Kern gemessenen Porositätswerte für die Bohrung B-17 (PHIEocfinal, PHI_AR_PYC). Für die Berechnung der Porosität wurden Zonen, in denen Steinkohle auftritt, nicht berücksichtigt. Zusätzlich dargestellt sind die Logs der Dichte (RHOB) und P-Wellengeschwindigkeit (VP) mit den entsprechenden Kernmessungen: RHOB_AR_PYC, DT_s (saturiert), DT_d (trocken).*

zuführen sind. Da keine Kerne aus Steinkohlesequenzen zur Verfügung standen, existieren für diese Bereiche auch keine Kernmessungen. Um die Kernmessungen besser mit den berechneten Wärmeleitfähigkeitswerten vergleichen zu können, wurde ein weiteres Log erzeugt, in dem Kohleintervalle nicht berücksichtigt werden. Die gerechneten und die im Labor bestimmten Werte zeigen eine gute Übereinstimmung. Da im nördlichen Rhein-Ruhr-Gebiet auch für die Bohrungen B-18 und B-14 elektrische Widerstandslogs zur Verfügung stehen, konnten hier Porositäten und Wärmeleitfähigkeiten auf gleiche Weise wie in der Bohrung B-17 berechnet werden (s. Abbildung 4.48). Die berechneten Wärmeleitfähigkeiten zeigen in den drei Bohrungen B-18, B-17 und B-14 nur geringe Unterschiede

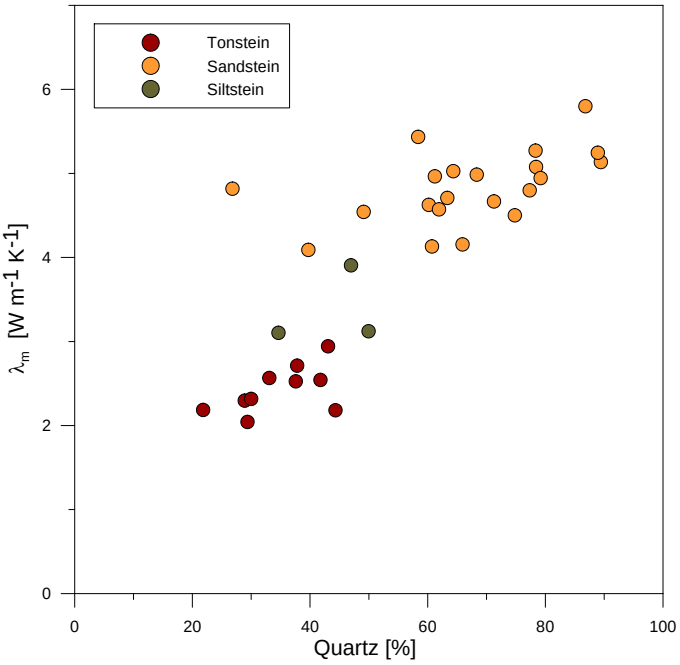


Abbildung 4.46: *Streudiagramm der Matrixwärmeleitfähigkeit gegen den Quarzgehalt für Gestein des Oberkarbons.*

Tabelle 4.18: *Statistik der aus den Logs berechneten Wärmeleitfähigkeiten im Karbon.*

	B-18	B-17	B-14
TOP (m)	490	500	900
BOTTOM (m)	1511	1227	1383
NET (m)	1021	727	483
MIN $(Wm^{-1}K^{-1})$	0,69	0,43	0,29
MAX $(Wm^{-1}K^{-1})$	4,29	4,9	4,50
MEAN $(Wm^{-1}K^{-1})$	2,61	3,05	2,85
STD DEV $(Wm^{-1}K^{-1})$	0,39	0,76	0,67

(vergl. Tabelle **??**).

4.9.4 Loginterpretation in der Referenzbohrung B-10

Zur Logauswertung für eine devonische Abfolge im mittleren Bereich des Rhein-Ruhr-Gebietes, wurde die Bohrung SBT als Referenzbohrung herangezogen. Die Bohrung erreicht eine Endteufe von 635 m. Folgende Parameter wurden gemessen: Kaliber, Gamma-Ray, elektrischer Widerstand, Gammadichte, Laufzeit und Porosität. Eine Übersichtsdarstellung aller gemessenen Parameter findet sich in Abbildung 4.49.

In der Gesteinsbeschreibung werden zunächst zwei Hauptgesteinstypen voneinander unterschieden, wobei im oberen Teil der Bohrung bis ca. 185 m Sandstein ansteht, der bis zur Endteufe von Tonschie-

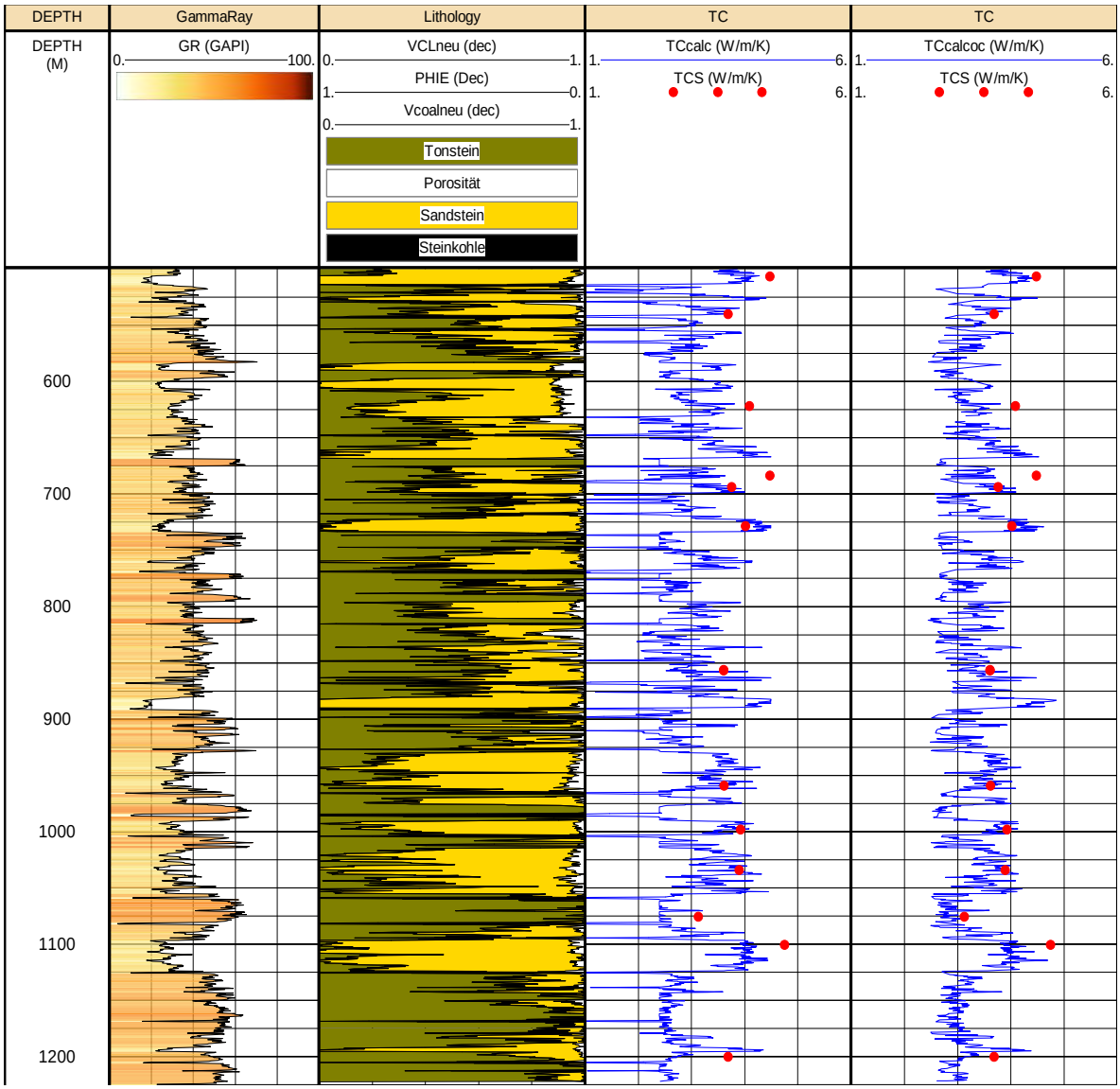


Abbildung 4.47: *Berechnung der Wärmeleitfähigkeit (TCcalc) aus dem Vierkomponentensystem Porosität, Tonstein, Sandstein und Kohle. Zusätzlich dargestellt sind die Kernmessungen der Wärmeleitfähigkeit (TCS). DEPTH: Bohrlochtiefe; PHIE: Porosität, berechnet aus Widerstand, VCl neu: Tonvolumen, berechnet aus Gamma-log, Vcoalneu: Kohleanteil, anhand von Cutoff ausgewiesen.*

fern unterlagert wird. Während das Porosiäts-Log über die gesamte Länge der Bohrung aufgezeichnet wurde, decken die Standardlogs Gamma-Ray, Laufzeit, Dichte und Widerstand ausschließlich den Teufenbereich 180 m bis 630 m ab. Die Tonschiefer zeichnen sich durch eine mittlere Dichte von 2,69 g cm^{-3} aus und sind durch hohe Werte im Gamma-Ray gekennzeichnet (Mittelwert: 95 API). Die Laufzeit und der Widerstand betragen im Mittel 231,36 μs/m bzw. 26,59 Ohmm. Die hohen Porositätswerte im Bereich der Tonschiefer (Mittelwert: 28 %) spiegeln lediglich eine scheinbare Porosität wieder, da im Neutron-Log auch das tongebundene Wasser registriert wird. Die berechnete effektive Porosität wird in Kapitel 4.9.5 dargestellt und mit entsprechenden Kernmessungen verglichen.

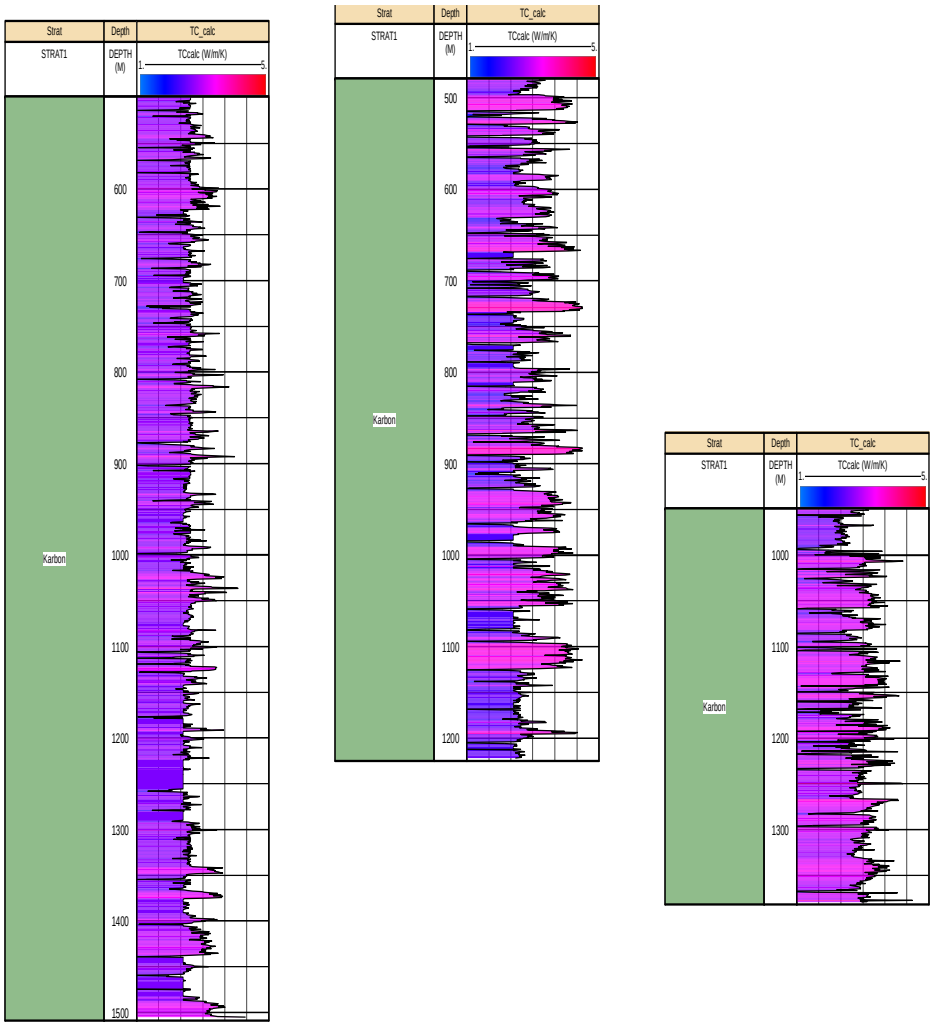


Abbildung 4.48: *Berechnete Wärmeleitfähigkeitsprofile für das Karbon in den Bohrungen B-18, B-17 und B-14 (von links nach rechts).*

Im Teufeninterval von 180 m bis 230 m wurde zusätzlich zur Hauptlithologie eine feinere Untergliederung anhand von Kernbeschreibungen vorgenommen. Hierbei werden folgende Gesteinstypen unterschieden: Konglomerat, Sandstein (grobkörnig), Sandstein (feinkörnig), Siltstein, Siltstein (tonig), Tonschiefer (sandig), Tonschiefer. Da die einzelnen Lithotypen unterschiedlich hohe Anteile an Tonmineralen enthalten, lassen sie sich anhand des Gamma-Ray Logs verifizieren. Die Gamma-Ray-Messungen wurden daher wie folgt interpretiert: Grobsand (0-65 GAPI); Feinsand (65-105 GAPI); Tonschiefer, sandig (105-120 GAPI) und Tonschiefer (120-150 GAPI). Die so entstandene Lithosäule ist in Abbildung 4.50 zu den Kernbeschreibungen dargestellt. Beide Datensätze harmonieren sehr gut miteinander. So können z.B. einzelnen Tonschiefersequenzen aus den Kernbeschreibungen auch in der lithologischen Abfolge, die anhand der Gamma-Ray Messungen interpretiert wurde, identifiziert werden. Teufenversätze zwischen Kern- und Loggingdaten ergeben sich dadurch, dass die Kerne nicht durchgängig in der Bohrung gezogen werden, so dass immer wieder Lücken entstehen, welche die exakte Zuordung der einzelnen Kerne zu einer bestimmten Teufe erschweren.

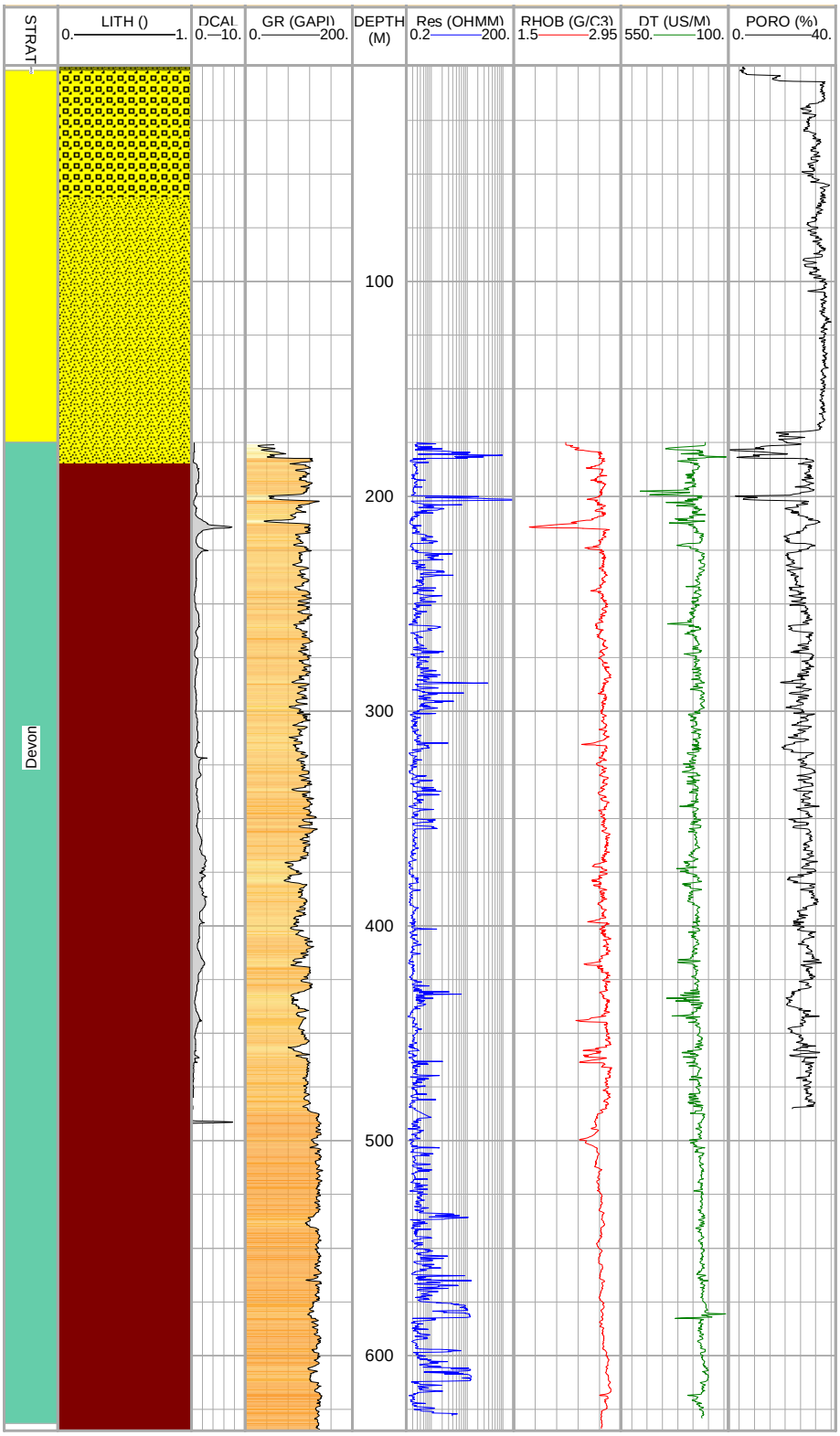


Abbildung 4.49: *Compositeplot der Bohrung B-10. STRAT1: Stratigraphie; LITH: Lithologie nach Cuttings/Kernen; GR: Gammaaktivität; DCAL: Differenzkaliber; DEPTH: Tiefe; Res: elektrischer Widerstand; RHOB: Gesamtdichte, DT: Laufzeit der Longitudinalwelle; PORO: Neutronenporosität.*

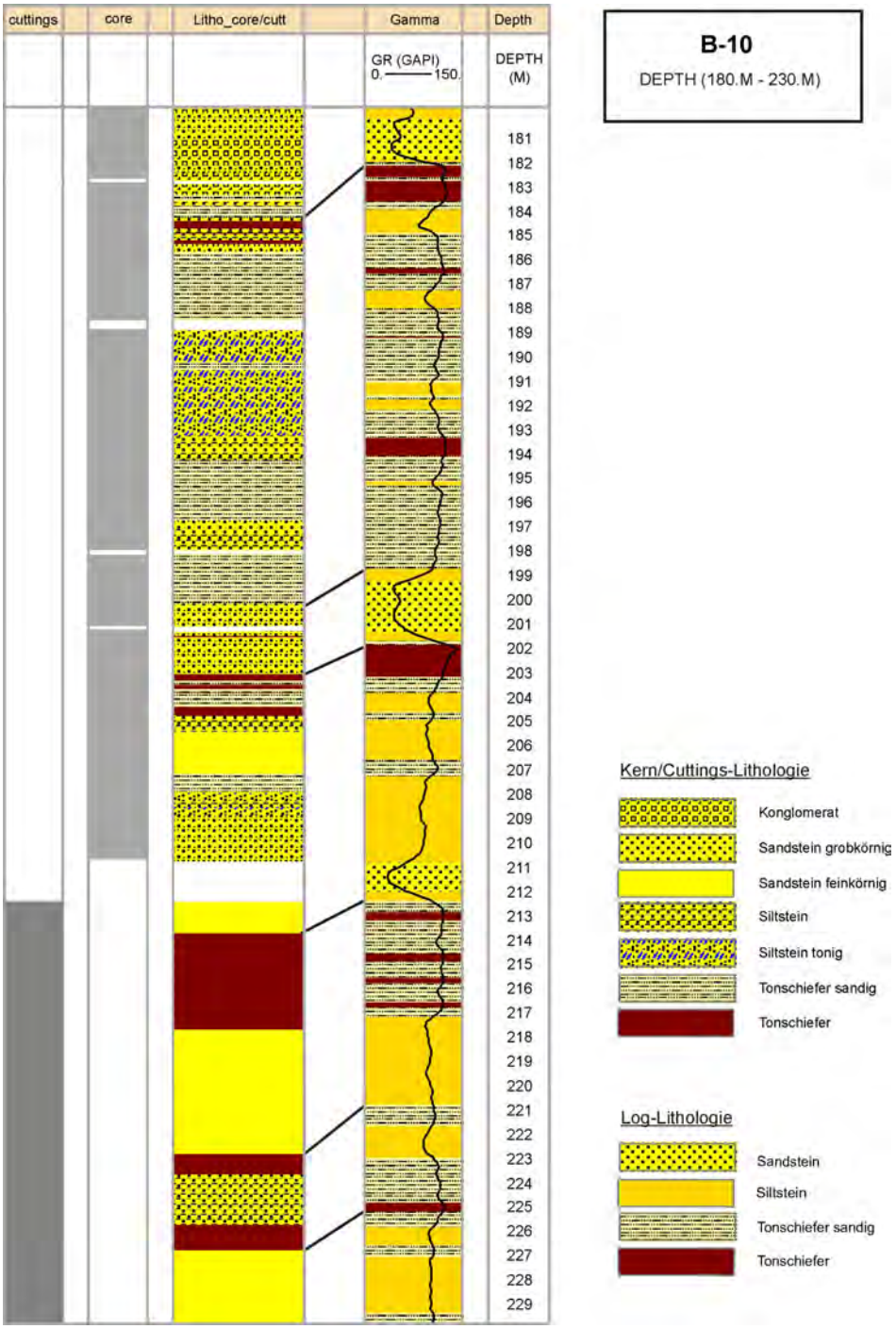


Abbildung 4.50: *Lithologische Gliederung der Bohrung B-10 im Teufeninterval: 180 m bis 230 m. Bedeutung der Spalten von links nach rechts: 1. Bohrkleingewinn; 2. Kerngewinn; 3. lithologische Unterteilung nach Kernbeschreibung und Bohrkleinanalyse; 3. Interpretation aus dem Gamma-Ray-Log, 4. Teufe. Insbesondere einzelne Sequenzen von Grobsand und Tonschiefer lassen sich zwischen den beiden Lithosäulen in Verbindung bringen.*

4.9.5 Porositäten und Wassersättigung in der Bohrung B-10

In einer weiterführenden Auswertung wurden die Logdaten petrophysikalisch ausgewertet mit dem Ziel Porositäten und Wassersättigungen aus den Logs abzuleiten. Die Porositäten können im vorliegenden Fall aus der Gammadichte bestimmt werden. Die hierzu benötigten Matrixdichten sind aus den Laboruntersuchungen am Kernmaterial bekannt. An 15 Proben der Bohrung B-10 wurde die Dichte gemessen und Porositätsbestimmungen durchgeführt. Die Matrixdichte der Tonschiefer und Sandsteine beträgt 2,79 g cm^{-3}.
Das Ergebnis der Berechnungen sind kontinuierliche Profile zur Porosität, Wassersättigung sowie zu den Volumenanteilen der erbohrten Gesteinskomponenten (vergl. Abbildung 4.50). Der Tonanteil wurde aus dem Gamma-Ray bestimmt. Die Wassersättigung wurde anhand des Widerstandlogs berechnet, wobei die Archie-Formeln mit den Standardkoeffizienten a=1, m=2 und n=2 benutzt wurde. Die Wassersättigung beträgt in der gesamten devonischen Abfolge 100 %. Abbildung 4.51 zeigt das Ergebnis der Berechnungen. Die berechneten Porositätswerte zeigen in der gesamten Formation eine sehr gute Übereinstimmung mit den Kerndaten (vergl. Abbildung 4.52). Die in der Bohrung B-10 erzielten Ergebnisse können nun in den weiterführenden Arbeitsschritten auf die übrigen Bohrungen im mittleren Rhein-Ruhrgebiet übertragen werden und zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit genutzt werden.

4.9.6 Logs und Wärmeleitfähigkeiten

Aus dem in Abbildung 4.51 dargestellten Vierkomponentensystem Porosität, Sandstein, Siltstein und Tonstein konnte im nächsten Schritt ein künstliches Log der Wärmeleitfähigkeit erzeugt werden. In Anlehnung an die Bohrung B-17 wurden für die Komponenten Ton und Sand die Matrixwärmeleitfähigkeiten von 3,1 $Wm^{-1}K^{-1}$ bzw. 4,5 $Wm^{-1}K^{-1}$ gewählt. Für Silt wurde ein Wert von 4,3 $Wm^{-1}K^{-1}$ festgelegt. Zur weiteren Kalibrierung der gerechneten Wärmeleitfähigkeiten wurden 9 Kernmessungen herangezogen, die mit der TCS-Apparatur seitens der Angewandten Geophysik durchgeführt wurden. Abbildung 4.53 zeigt das Log der berechneten Wärmeleitfähigkeit für die Bohrung B-10. Dieses wurde als geometrisches Mittel bestimmt. Die durchschnittlichen Wärmeleitfähigkeiten liegen bei 3,33 $Wm^{-1}K^{-1}$, wobei die einzelnen Werte zwischen 2,67 $Wm^{-1}K^{-1}$ und 3,89 $Wm^{-1}K^{-1}$liegen. Insgesamt sind die Wärmeleitfähigkeitswerte im unteren Bereich der Formation (ab 480 m) niedriger, da hier Tonschiefer dominieren. Im Bereich oberhalb von 480 m beinhaltet das Gebirge auch siltige und sandige Komponenten, weshalb die Wärmeleitfähigkeiten höhere Werte annehmen. Die Labordaten stimmen nicht exakt mit dem künstlich erzeugten Wärmeleitfähigkeitslog überein. Dennoch weisen sie eine ähnliche Variationsbreite auf. Da die Bohrlochmessungen in den anderen zur Verfügung stehenden Bohrungen unvollständig sind, können für den mittleren Bereich im Ruhrgebiet keine weiteren Wärmeleitfähigkeiten berechnet werden.

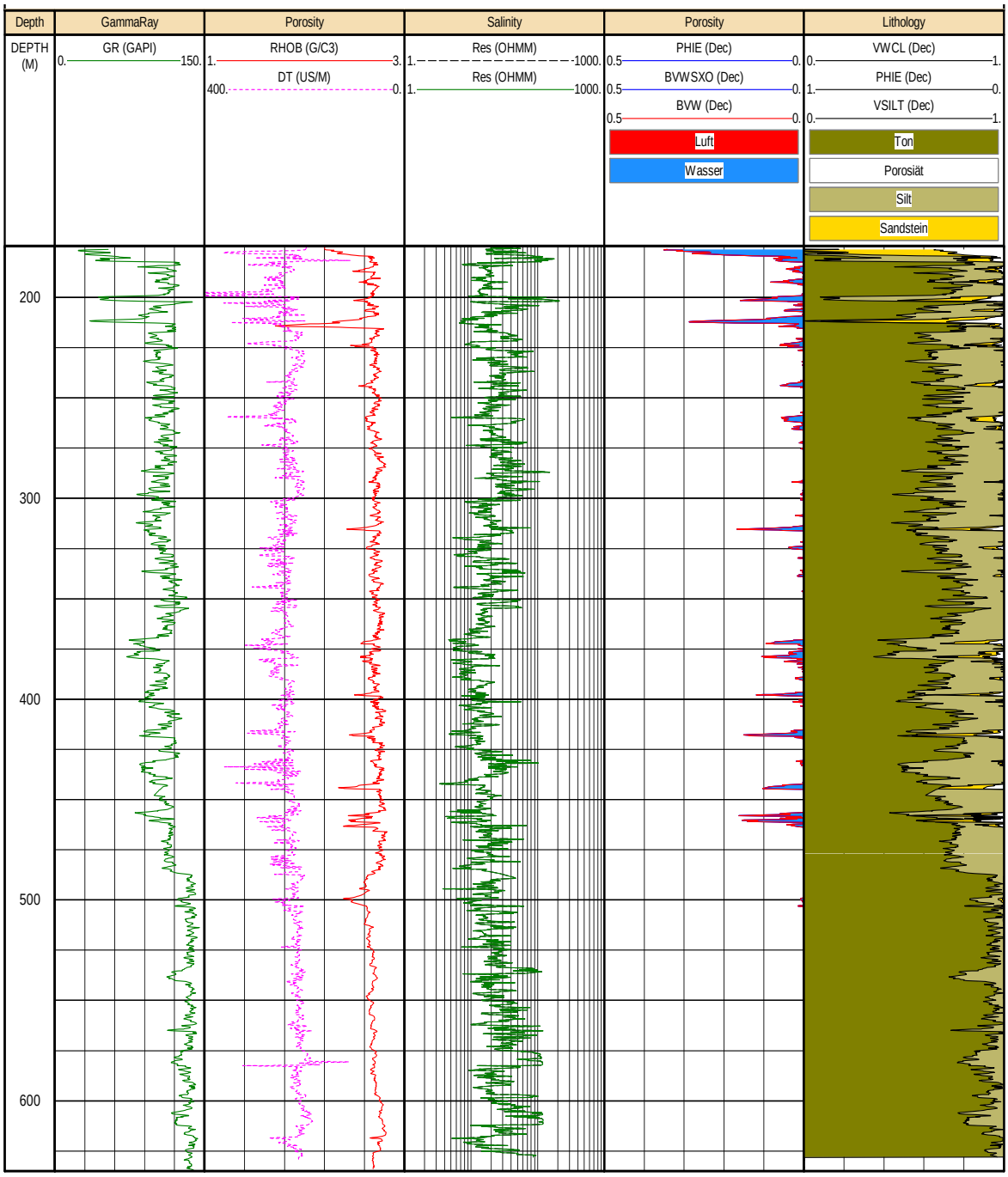


Abbildung 4.51: *Ergebnis der petrophysikalischen Auswertung für die Bohrung B-10. GR: Gammaaktivität; RHOB: Gesamtdichte; DT: Laufzeit der Longitudinalwelle, RWAPP: scheinbarer Widerstand des Formationswassers, RMFAPP: scheinbarer Widerstand des Mud-Filtrats; PHIE: effektive Porosiät; BVW: Gesamtwasservolumen; BVWSXO: Gesamtwasservolumen der saturierten Formation; VCLneu: Tonvolumen, berechnet aus GR; VSilt: Sitlvolumen, berechnet aus GR.*

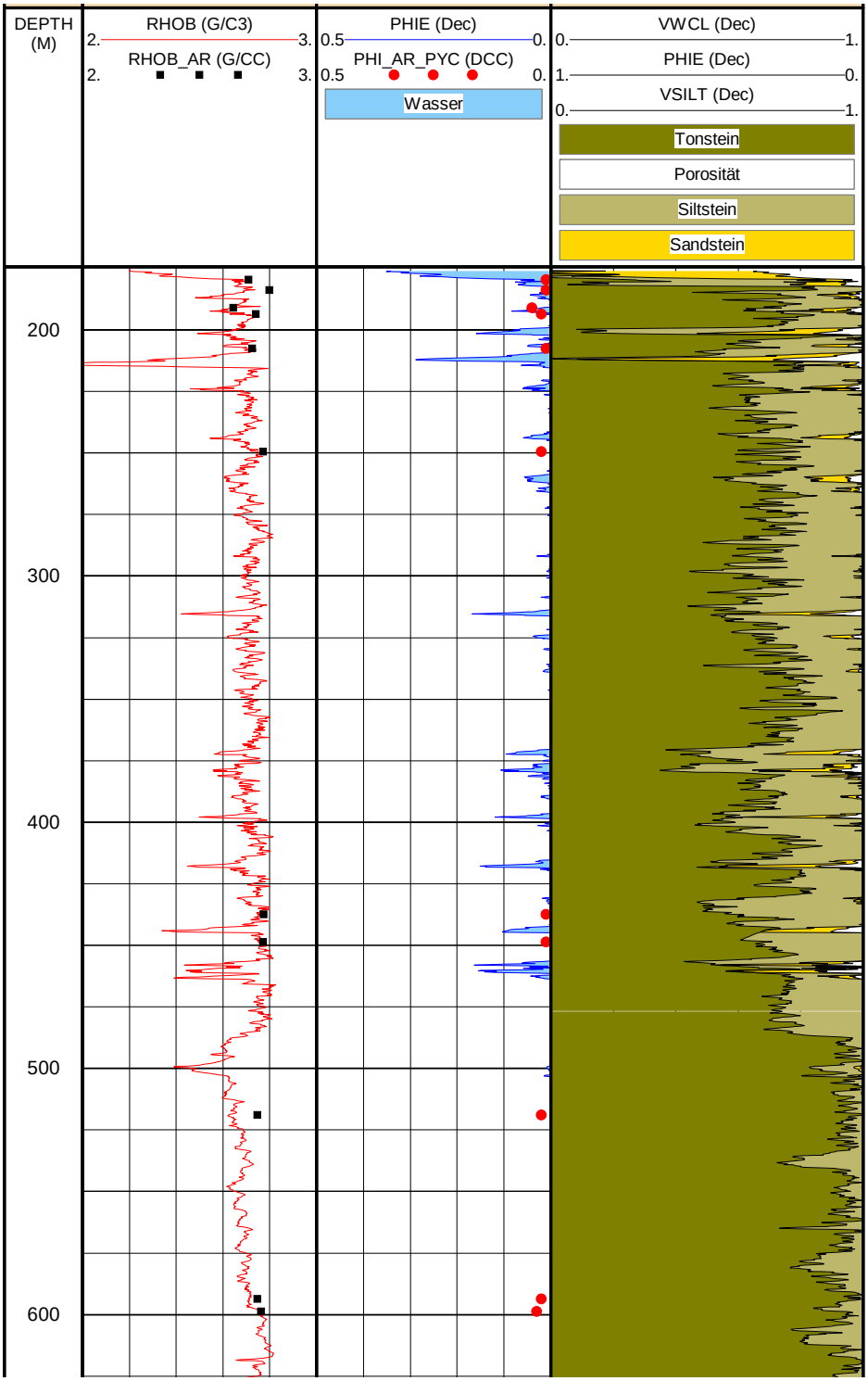


Abbildung 4.52: *Vergleich der berechneten und am Kern gemessenen Porositätswerte (PHIE und $PHI_{AR,PYC}$). Zusätzlich dargestellt sind das Dichtelog (ρ_b) und die entsprechenden Kernmessungen($RHOB_{AR}$).*

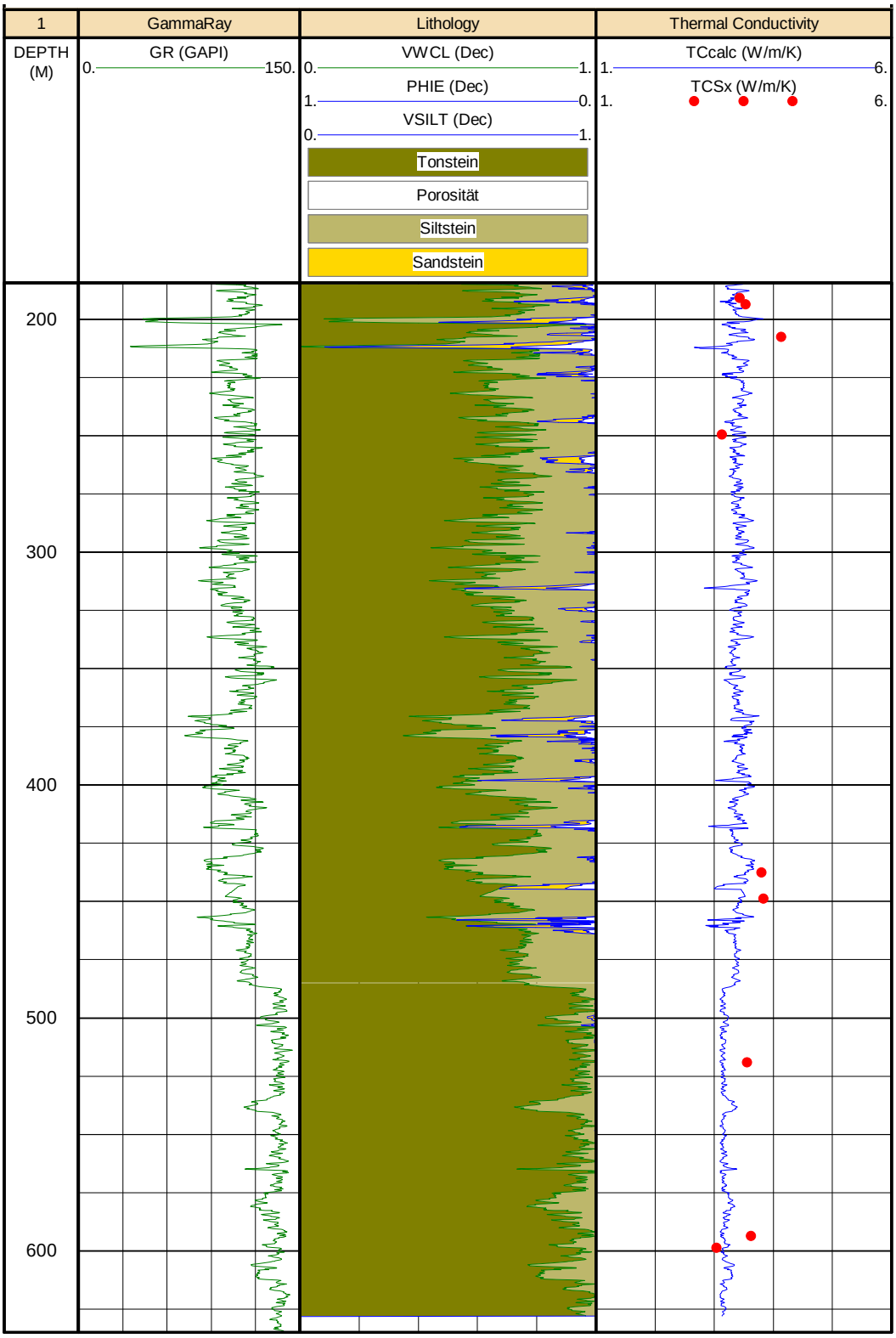


Abbildung 4.53: *Berechnung der Wärmeleitfähigkeit (TCcalc) aus dem Dreikomponentensystem Porosität, Tonstein und Sandstein für die Bohrung B-10. Zusätzlich dargestellt sind die Kernmessungen der Wärmeleitfähigkeit (TCS). DEPTH: Bohrlochtiefe; PHIE: Porosität, berechnet aus Widerstand, VWCl: Tonvolumen, berechnet aus Gammalog.*

Kapitel 5

Arbeitsgebiet „bayerisches Molassebecken“

5.1 Geologische Übersicht des östlichen Molassebeckens

Das Untersuchungsgebiet im Ostteil des Süddeutschen Molassebeckens erstreckt sich etwa von der Donau im Norden bis zu einer Linie Chiemsee-Starnberger See im Süden. Die westliche und östliche Grenze wird jeweils von den Landesgrenzen Bayerns markiert. Das Gebiet ist landschaftlich geprägt von den känozoischen Sedimentfüllungen des Molassebeckens. Die Untergrundstrukturen sind durch zahlreiche Explorationsbohrungen (überwiegend Erdgas) und geophysikalische Erkundung gut erschlossen (Abbildung 5.1).

Das Grundgebirgsstockwerk der Süddeutschen Scholle gehört der Saxothuringischen und der Moldanubischen Zone der mitteleuropäischen Varisziden an. Jenseits der östlichen Randstörungen ist das Grundgebirgsstockwerk im Thüringer Wald und Frankenwald, im Fichtelgebirge und im Oberpfälzer und Bayrischen Wald seit Ende des Juras herausgehoben. Die Tiefenlage des Grundgebirges ist unterschiedlich. In nördlichen Bereich des Untersuchungsgebietes werden im Bereich der Rotliegend-Senken Mächtigkeiten von bis zu 1500 m erreicht. Nach Süden steigt die Grundgebirgsoberfläche in Richtung Donau auf gebietsweise nur 300 m unter Geländeoberkante an. Südlich der Donau sinkt sie zum Molassebecken stetig ab und erreicht am Alpenrand Tiefenlagen von mehr als 5 km (Abbildung 5.2).

Die postvariszische geologische Entwicklung des Gebietes kann nach Geyer und Gwinner (1991) und Walter (1995) wie folgt zusammengefasst werden:

Nach der Bildung des variszischen Grundgebirges bildete das Gebiet der Süddeutschen Scholle einen großen Festlandsbereich mit weitflächiger Erosion. Im **Oberkarbon/Rotliegend** kam es entlang der heutigen Fränkischen Linie zur Einsenkung kleinerer intramontaner Becken (u. a. im Naab-Trog), die dem variszischem Gebirgsstreichen folgten und mit dem Abtragungsschutt der aufsteigenden Schwellenzonen gefüllt wurden. Im Stefan und Rotliegend wurden grobschuttreiche Fanglomerate mit Sandsteinen und sandigen Schiefertonen sedimentiert, die in den Senkungszonen mehrere 100 m Mächtigkeit erreichen.

Im **Zechstein** erfolgte ein erster Meeresvorstoß aus dem Norden. In weiten Teilen der Süddeutschen Scholle wurden Karbonate gebildet, die meerwärts zunehmend Einschaltungen von Tonen und Mergeln aufweisen. Die marinen Zechsteinabfolgen erreichen Mächtigkeiten bis zu 200 m. Die südliche

Begrenzung des Zechsteinmeeres bildet die Linie Ettlingen-Nürnberg, die die Faziesgrenze zu den kontinentalen klastischen Bildungen des Zechsteins im Süden darstellt.

Im **Buntsandstein** bestand das flache, wieder festländische Sedimentbecken Süddeutschlands zunächst fort. Dabei dehnte sich der Ablagerungsraum immer weiter nach Südosten aus. Es wurden vorwiegend fluviatile klastische Sedimente abgelagert mit Konglomeraten, Sandsteinabfolgen und tonigen Einschaltungen im Unteren und Oberen Buntsandstein. Im Oberen Bundsandstein treten Sedimentationsunterbrechungen auf, die durch Bodenbildungen (Dolomitkrusten) angezeigt werden.

Das Meer des **Muschelkalks** war ein flaches Randmeer der Tethys mit nur eingeschränkter Verbindung zum offenen Ozean. Im Osten bog die Küstenlinie vor dem Böhmischen Massiv, welches auch klastische Sedimente lieferte, nach Norden. Im Südosten lag im Bereich des heutigen außeralpinen Molasse-Beckens ein ebenfalls kristallines Hebungsgebiet, das Vindelizische Land. Aride Klimaverhältnisse führen zur Übersalzung des Randmeeres und der Bildung von Evaporitabfolgen. Im Mittleren Muschelkalk war die Verbindung zum offenen Meer am weitesten eingeschränkt, was durch die Bildung salinarer Abfolgen dokumentiert ist. Im Unteren und Oberen Muschelkalk hingegen wurden im Untersuchungsgebiet vorwiegend Wechselfolgen von Kalksteinen und Mergelsteinen abgelagert.

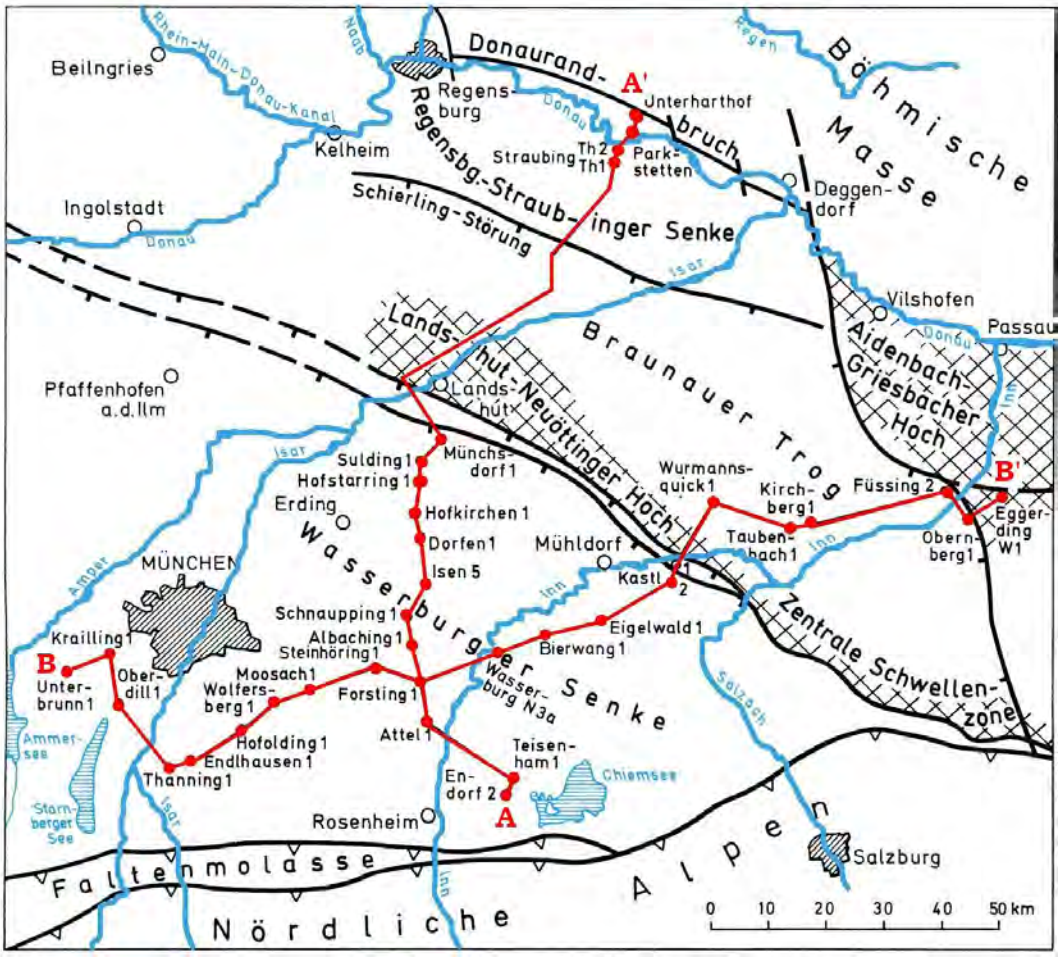


Abbildung 5.1: *Tektonische Übersicht im ostbayerischen Molassebecken mit Lage der Profilschnitte A-A' und B-B' in Abbildung 5.2 (nach Freudenberger und Schwerd, 1996).*

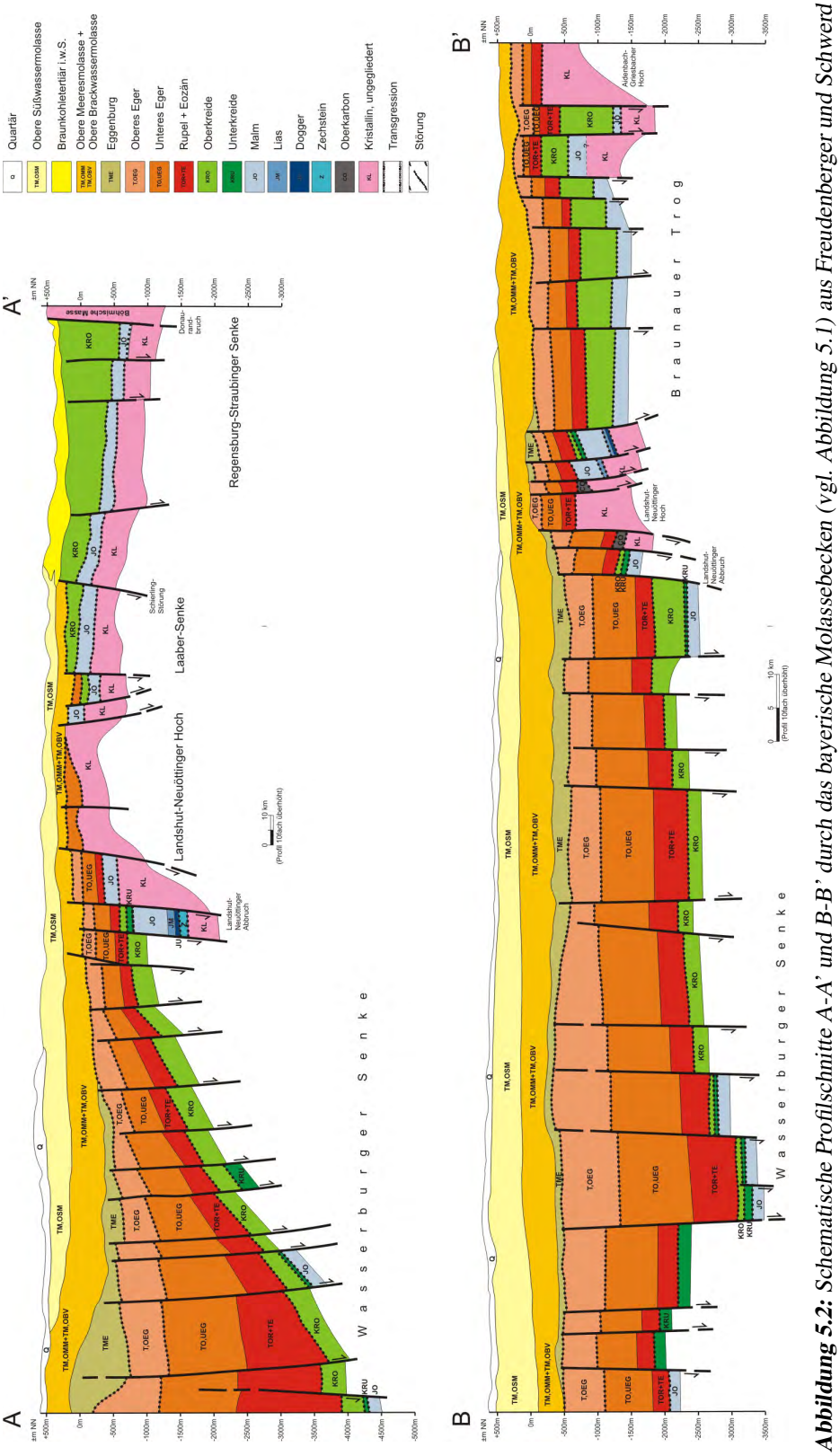


Abbildung 5.2: *Schematische Profilschnitte A-A' und B-B' durch das bayerische Molassebecken (vgl. Abbildung 5.1) aus Freudenberger und Schwerd (1996).*

Im **Keuper** machte sich das Vindelizischen Land als Sedimentlieferant stärker bemerkbar. Der Untere Keuper ist mit Tonsteinfolgen und Dolomitenbänken noch vorwiegend marin ausgebildet. Der Mittlere Keuper zeigt eine heterogene Fazies, bedingt durch die Untergliederung des Beckens in ein Binnenmeer mit angrenzenden Lagunen. Gips, bunte Tone, Mergel und die darüber sedimentierten Sandsteinfolgen (Schilfsandstein, Stubensandstein) prägen das Bild. Der Mittlere Keuper wird durch die roten Knollenmergel (Feuerletten) abgeschlossen. Am Ostrand der Süddeutschen Großscholle ist der Obere Keuper (Rhät) zunächst noch in festländisch sandiger Ausbildung vertreten.

Die im Keuper eingeleitete marine Ingression von Norden setzt sich im **Lias** (Unterjura, Schwarzer Jura) fort, in der eine offene Meersverbindung des Süddeutschen Beckens zum Norddeutschen Raum bestand. Das flache Unterjura-Meer stieß weit über das Böhmische Massiv vor. Vorwiegende dunkle Tone und Tonmergel kamen im Unterjura zur Ablagerung, teilweise mit feinschichtigen bituminösen Einschaltungen.

Im Laufe des **Dogger** (Mitteljura, Brauner Jura) wurde die Meeresverbindung nach Norden unterbrochen und die Vindelizische Schwelle langsam überflutet. Die Schichtfolge beginnt mit dem mächtigen Opalinuston, der von Braunjura-Sandsteinen mit Eisenoolith-Flözen überlagert wird. Darauf liegen Wechselfolgen aus Tonsteinen und Tonmergelfolgen.

Im **Malm** (Oberjura, Weißer Jura) war die Vindelizische Schwelle komplett überflutet und im flachen Randmeer der Tethys bildeten sich zunächst vorwiegend gebankte Kalk- und Mergelsteine. Das Riffwachstum begann im Mittleren Malm und zeigte im Oberen Malm eine weite Verbreitung. Die Abfolgen des Oberjura sind gekennzeichnet durch entsprechende Massenkalkriffe mit dazwischen liegenden Wannen gebankter Kalkmergelabfolgen. Zum Ende der Jurazeit fielen weite Teile Süddeutschlands trocken, und die Verkarstung der Weißjurakalke setzte ein.

In der **Oberkreide** begann der tektonische Ausbau des Nordostrandes der Süddeutschen Scholle, wobei die östlich angrenzende Scholle des Böhmischen Massivs um 1500 m gehoben wurde. Auch ihr westliches Vorland war durch NW-SE streichende Störungen in Blöcke zerteilt (Abbildung 5.2). Anschließend überlagerten hier Sedimente der Oberkreide ein Schollenmosaik aus metamorphem Gundgebirge. Im Obercenoman stieß das Oberkreide-Meer der südlichen Molassesenke in die sich senkende Fränkische Alb vor. Während im Süden marine Sedimente (glaukonitischer Regensburger Grünsand) abgelagert wurden, hielt im Norden die fluviatil-limnische Sedimentation an. Im Verlauf des Turons überdeckte das Meer die gesamte Frankenalb bis weit nach Nordwesten und hinterließ marine Sande, Tone, Mergel und Kreidekalk. Im Coniac und Santon führte dann die Hebung der Fränkischen Alb wieder zur limisch-fluviatilen Ablagerung in diesem Raum.

Im **Tertiär** kam es durch die alpine Gebirgsbildung wieder zu deutlichen morphologischen Kontrasten und der Entwicklung mächtiger Sedimentabfolgen. In der alpidischen Vortiefe des Molassebeckens wurden bis zu 5 km mächtige, meist grobklastische Folgen abgelagert, während tertiäre Verwitterungsbildungen die Hochflächen im Norden prägten. Verstärkte tektonische Ereignisse sind auch die Ursache des tertiären Vulkanismus im Uracher Vulkangebiet und im Hegau.

Eine allgemeine klimatische Abkühlung während des jüngeren Tertiärs führte schließlich zu den Kaltzeiten im **Quartär** mit den wiederholten Vergletscherungen der Alpen und der Ablagerung Äolischer Lössbildungen.

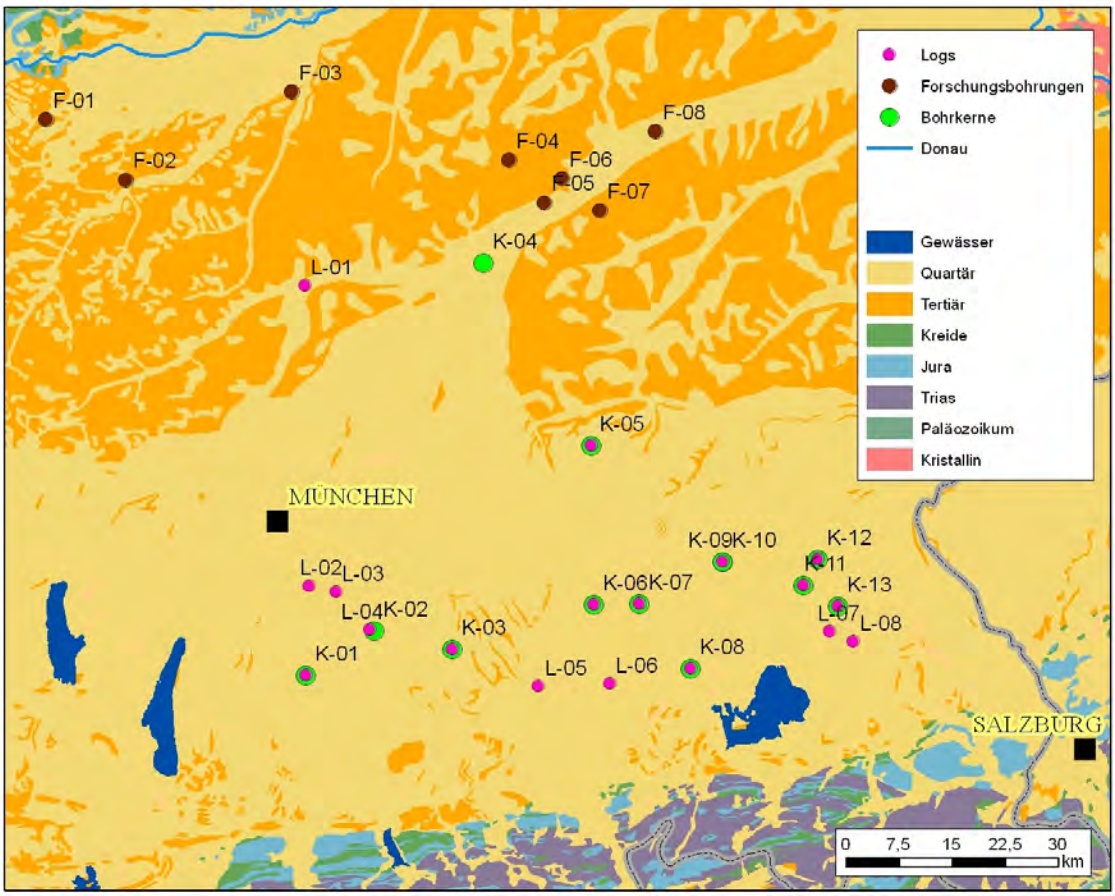


Abbildung 5.3: *Übersicht der Bohrlochlokationen in der Ostmolasse, aus denen Kernproben (grüne Punkte; vgl. Tabelle 5.1) oder Logdaten (vgl. Tabelle 5.4) aus Forschungsbohrungen (braune Punkte) und Explorationsbohrungen der KW-Industrie (rosafarbene Punkte) dem Forschungsprojekt zur Verfügung gestellt wurden.*

5.2 Probenahmeprogramm

Die Probennahme aus dem tiefen Untergrund des bayerischen Molassebeckens umfasst 74 Kernproben aus insgesamt 13 Bohrungen. Eine Übersicht zu den entnommenen Proben und den Bohrlochlokationen ist in Abbildung 5.3 und Tabelle 5.1 dargestellt. Allein 26 Proben stammen aus der Forschungsbohrung Moosburg SC4 (K-04), die mit freundlicher Unterstützung des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU) aus deren Kernarchiv bei München entnommen werden konnten. Diese Bohrung stellt das einzige durchgehende Kernprofil durch den Malm dar. Die weiteren 48 Kernproben sind mit freundlicher Genehmigung der ExxonMobil Production Deutschland GmbH in deren Kernarchiv bei Celle entnommen worden.

Ziel der Probenahmekampagne war es, vor allem jene Gesteinsfolgen ergänzend zu beproben, die durch die Vorarbeiten im westlichen Molassebecken (Clauser et al., 2007) noch nicht erfasst worden sind oder die in ihrer Fazies von der westlichen Molasse abweichen. Oberste Priorität lag daher auf den Sedimentsgesteinen der Kreide, die im Untergrund der Westmolasse nicht vorkommen. Während der Kreidezeit herrschten im südwestdeutschen Raum festländische Verhältnisse, so dass dort die Sedimentation erst wieder durch tertiäre Süßwasser- und Meeresbildungen einsetzte (Geyer und Gwinner,

Tabelle 5.1: *Übersicht zu den entnommenen Kernproben aus dem tiefen Untergrundes des bayerischen Molassebeckens (vgl. Abbildung 5.3). Die insgesamt 74 Proben stammen aus Forschungs- und Explorationsbohrungen des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (K-04) und der ExxonMobil Production Deutschland GmbH. Die Indizes „a“ und „b“ kennzeichnen jeweils zwei verschiedene Bohrungen einer Bohrlochlokation.*

Bohrung	Endteufe	Teufe Kernproben		Anzahl Proben	Logs
	(m)	von... (m)	bis... (m)		
K-01	3.950,0	3.796,0	3.801,6	3	x
K-02	3.389,0	3.338,4	3.375,9	6	
K-03a	3.885,0	3.638,1	3.644,5	3	
K-03b	4.209,0	--	--	--	x
K-04	1.585,2	990,7	1.570,4	26	
K-05	2.925,0	2.193,0	2.568,0	5	x
K-06	3.535,0	1.722,6	3.171,8	5	x
K-07a	2.093,9	1.802,6	1.808,4	2	
K-07b	2.360,0	--	--	--	x
K-08	2.447,3	1.891,3	1.933,4	4	x
K-09	4.030,0	3.344,5	3.357,7	3	
K-10	2.993,0	2.736,6	2.748,6	3	x
K-11	2.750,0	2.538,2	2.544,3	3	x
K-12	4.133,0	4.103,7	4.112,5	3	x
K-13	2.352,5	1.391,5	1.967,5	8	x

1991). Im Rahmen der Vorauswahl zeigte sich jedoch, dass trotz Mächtigkeiten von mehreren hundert Metern in den Kernarchiven nur sehr wenige Bohrkerne aus der Kreide zur Verfügung stehen. Wegen seiner Relevanz für die KW-Industrie konnte lediglich der Gault-Sandstein in ausreichender Stückzahl beprobt werden (vgl. Abschnitt 5.4.1).

Neben der Kreide lag das Augenmerk auf der Beprobung der Karbonate des Oberjura aufgrund ihrer Bedeutung für die Geothermie als Kluft-Aquifer. Hierbei waren die faziellen Unterschiede zur Westmolasse und ihre Auswirkungen auf die petrophysikalischen Eigenschaften von Interesse. Die Molassesedimente aus dem Tertiär wurden nur partiell und in geringer Stückzahl beprobt. Zum einen ist ein Teil der Gesteinsfolgen schon durch die Vorstudie im westlichen Molassebecken abgedeckt (Rath und Clauser, 2004). Zu anderen standen sie in den Kernarchiven wiederum zum Teil nur sehr limitiert zur Verfügung oder waren in einem schlechten Erhaltungszustand, so dass auf eine umfangreiche Beprobung verzichtet wurde. An allen 74 Proben wurde das Standardmessprogramm wie in Abschnitt 4.2 beschrieben durchgeführt.

5.3 Auswertung bohrlochgeophysikalischer Messungen

Der Teilbereich zur Auswertung bohrlochgeophysikalischer Messungen gliedert sich in folgende Arbeitsschritte:

- Recherche und Zusammenstellung der vorhandenen Daten
  - Sichtung des Datenbestandes (Log- und Kerndaten) aus verschiedenen Bohrungen.
  - Auswahl der Bohrungen in Absprache mit dem Auftraggeber.
- Datenkompilation und Qualitätskontrolle
  - Einscannen und Digitalisierung (LAS-Format) von analog vorliegenden Daten.
  - Überführung der digitalen Datensätze in Auswerteprogramme zur Bohrlochmessdaten.
  - Qualitätskontrolle der Bohrlochmessdaten mit Teufenkontrolle/Teufenkorrektur zwischen den einzelnen geloggten Abschnitten sowie den jeweiligen Messdurchgängen.
  - Überprüfung der Messungen auf fehlerhafte Daten und Artefakte (z.B. durch Bohrlocherweiterungen) und Bereinigung des Datensatzes.
  - Zusammenführung der einzelnen Messserien zu Compositelogs (splicen).
- Faziesanalyse der Bohrlochmessdaten.
  - Petrophysikalische Charakterisierung der auftretenden Hauptgesteinstypen.
  - Klassifizierung der auftretenden lithologischen Einheiten in ausgewählten Eichstrecken durch Zuordnung von spezifischen Merkmalskombinationen der Logantwortsignale.
  - Rekonstruktion der erbohrten Lithologie anhand der Logdaten.
  - Geologische Bewertung der Ergebnisse, Korrelationen zwischen Bohrprofilen und Abgrenzung lithostratigraphischer Einheiten.

5.3.1 Recherche, Datenkompilation und Qualitätskontrolle

Das Untersuchungsgebiet war Zielgebiet umfangreicher Explorationstätigkeit für die Aufsuchung von Kohlenwasserstoffen. Die in den Explorationsbohrungen gewonnenen Daten wurden seitens der beteiligten Erdölfirmen für dieses Forschungsvorhaben frei gegeben. Für den Bereich der Südostdeutschen Molasse liegen Datensätze aus 26 Bohrungen vor. Die Bohrungen sind in Tabelle 5.4 aufgelistet. 16 Bohrungen wurden von Exxon Mobile in den 1980er bis 1990er Jahren durchgeführt, während die restlichen 10 Bohrungen im Auftrag des bayerischen Landesamtes zwischen den Jahren 1999 und 2002 abgeteuft wurden. Die Bohrungen wurden zum jeweiligen Stand der Technik bohrlochgeophysikalisch vermessen. Entsprechend unterschiedlich ist die Verfügbarkeit und Qualität der Bohrlochmessdaten. In den ausgewählten Bohrungen kamen standardmäßig Gamma-Logs und moderne elektrische Widerstandslogs (außer in der Bohrung Isen-Dogger) zum Einsatz. Für einige Bohrungen stehen weiterhin folgende Logs zur Verfügung: Eigenpotential, Gamma-Dichte, akustische Laufzeit, Neutronenporosität, spektrale Gamma-Strahlung und Temperatur. Die Bohrlochmessungen wurden überwiegend von den Servicefirmen Schlumberger und BLM (Gesellschaft für Bohrlochmessungen München) durchgeführt. In den Tabellen 5.2 und 5.3 finden sich Übersichten zu den Bohrlochmessverfahren und den gebräuchlichsten Abkürzungen für die verschiedenen Messungen. Beschreibungen bohrlochgeophysikalischer Messgeräte und ihrer Funktionsweise finden sich in Serra (1984, 1986); Ellis (1987); Rider (1996); Luthi (2001).

Bei der Zusammenstellung der Messdaten wurde nach folgendem Schema vorgegangen:
Ein großer Teil der Messdaten wurde seitens der Firam Exxon bzw. des Bayerischen Landesamtes in digitaler Form zur Verfügung gestellt. Allerdings wurden die Daten nicht in Form von Compositelogs

Tabelle 5.2: *Messgeräte und (Tools) und (Logs) und ihre Abkürzungen (Schlumberger 1986).*

Sonde		Log	Messgröße	
Natural - Gamma - Spectrometry - Tool	NGT	SGR	(API)	Summen-Gamma-Ray
		POTA	(%)	Kalium
		THOR	(ppm)	Thorium
		URAN	(ppm)	Uran
Litho - Density - Tool	LDT	RHOB	(g/cm³)	Gesamtdichte (bulk density)
		PEF	(barns/el)	Photoelektrischer Effekt
		DRHO	(g/cm³)	Differenzdichte
Compensated - Neutron - Tool	CNT	NPHI	(%), (p.u.)	Neutronenporosität
Sonic-	SDT / DSI	DTCO	(µs/m)	Laufzeit der Kompressionswelle
		DTSM	(µs/m)	Laufzeit der Scherwelle
Dual –Latero Log- Inductionlog	DLL	LLD	(Ωm)	elektr. Widerstand Laterolog Deep
		LLS	(Ωm)	Laterolog Shallow
	IL	ILD	(Ωm)	Inductionlog Deep
		ILM	(Ωm)	Inductionlog Medium
Spontaneous Potential	SP	SP	(mV)	Eigenpotential
Borehole- Geometry- Tool	BGT	CALI	(mm)	Bohrlochdurchmesser

Tabelle 5.3: *Logs und ihre Abkürzungen (BLM).*

Log	Messgröße	
GR	(API)	Gamma_Log
DLL	(Ωm)	Dual_Lateral_Log
CAL	(mm)	Bohrlochdurchmesser
SP	(mV)	Eigenpotential-Messung
HT	(°C)	Hochtemperaturmessung
Sonic	(µs/m)	Schallgeschwindigkeits-Log

übergeben, sondern getrennt für die jeweilig durchgeführten Messoperation. Für einige der Bohrungen waren Daten nur in Form analoger Papierausdrucke vorhanden. Diese Papierakten wurden mit einem Endlosscanner eingelesen. Hierzu zählen sowohl Bohrlochmessungen als auch Bohrakten mit Kernansprachen und geologischen Profilen. Die Bohrakten wurden als pdf-Datei abgelegt. Die digitalisierten Messdaten wurden auf ihre Relevanz geprüft und zur weiteren Verarbeitung markiert. Die relevanten Bilddateien wurden mit der NeuraLog-Software in ASCII-Dateien überführt. Die Ergeb-

Tabelle 5.4: *Übersicht zu den bearbeiteten Bohrungen und der Verfügbarkeit von Bohrlochmessdaten; x = Log vorhanden, (x) Log nicht über gesamte Teufe vorhanden.*

Bohrung	Endteufe (m)	Gamma-Ray	Widerstand	Porosität	Dichte	V_p	SP	K,Th,U	Temperatur	Kaliber
K-01	3950,0	(x)	x	(x)	x	x	x			x
K-03b	4209,0	(x)	(x)			(x)	(x)			(x)
K-05	2925,0	(x)				x	(x)			(x)
K-06	3535,0	(x)	x	(x)	(x)	x	x			(x)
K-07b	2360,0	x	(x)	(x)	(x)	x	(x)			(x)
K-08	2447,3	(x)	(x)	(x)	x	x	(x)	(x)		(x)
K-10	2993,0	x	(x)	(x)	(x)	(x)	x			x
K-11	2750,0	x	x	(x)	x	x	x	(x)		x
K-12	4133,0	x	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)			(x)
K-13	2352,5	(x)	x	(x)	x	(x)	x	(x)		x
F-01	218,0	x	x				x			x
F-02	650,0	x	(x)						(x)	(x)
F-03	745,0	x	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)			x
F-04	551,5	x	(x)				(x)		x	(x)
F-05	572,5	x	(x)		(x)				x	(x)
F-06	796,0	x	(x)		(x)		(x)		x	x
F-07	748,0	(x)	(x)				(x)			(x)
F-08	537,0	x	(x)				(x)			x
L-01	1584,0	x	x	(x)	(x)	x	x	(x)		(x)
L-02	3025,0	x	(x)			(x)				(x)
L-03	3863,7	(x)	(x)			(x)	(x)		(x)	(x)
L-04	3380,0	(x)	x	(x)	(x)	x	x	(x)		x
L-05	1020,8	(x)	x	(x)			x			x
L-06	2485,0	(x)	x	(x)	(x)	x	x	(x)		x
L-07	2285,6	(x)	(x)	(x)	x)	(x)	(x)			x
L-08	2400,0	(x)	x	(x)	x	x	x			x

nisse wurden nochmals überprüft, um Flüchtigkeitsfehler zu eliminieren.
Die digitalisierten Bohrlochmessdaten wurden in ein Logauswertesystem (Geoframe, Geobase, IP) importiert und dort zu einem Composite-Log zusammengestellt. Dabei findet eine allgemeine Qualitätskontrolle der Logs sowie eine Überprüfung der Messdaten auf Teufenversätze zwischen einzelnen Runs statt.
Einige Bohrlochmessungen werden durch den Einfluss der Bohrlochumgebung (Temperatur, Bohrlochdurchmesser, Dichte und Typ der Spülung) beeinflusst, wobei in der Regel die bohrungsbedingte Korrekturen direkt nach der Messung von der Servicefirma vorgenommen werden. Die im Rahmen der Beauftragung vorgenommene Qualitätskontrolle konzentrierte sich auf das Auffinden und Eliminieren

von fehlerhaften Messwerten, wie sie zum Beispiel durch elektronische Störungen und Bohrlochrandausbrüche auftreten können. Weiterhin wurden die Logdaten auf systematische Ab-weichungen im Messbereich zwischen einzelnen Messfahrten hin kontrolliert. Solche Abweichungen können z.B. auftreten wenn die Korrektur auf den Bohrlochdurchmesser nicht korrekt durchge-führt wurde, oder Logs aus verrohrten Bohrabschnitten vorliegen. Zudem wurden die Daten auf Teufenversätze kontrolliert, die zwischen einzelnen Messeinfahrten auftreten können. Zur weiteren Bearbeitung wurden alle Kurven auf eine gemeinsame Bezugskurve korrigiert.
Die Explorationsbohrungen in der östlichen Molasse wurden in der Regel in mehreren Bohrabschnitten niedergebracht. Nach jeder Bohrphase, wird in ein Bohrlochmessprogramm in der offenen Bohrung durchgeführt, bevor die Verrohrung für diesen Abschnitt eingebracht wird und mit einem kleineren Bohrdurchmesser weiter gebohrt wird. In der östlichen Molasse liegen die Bohrabschnitte in der Regel an der Basis der Oberen Süßwassermolasse und an der Tertiärbasis. Um ein durchgängiges Messprofil zu erhalten, werden die Logs aus den verschiedenen Bohrabschnitten am Schluss zusammen geschnitten (splicen). Die Daten liegen dann als Composite-Log vor und können so ausgewertet und interpretiert werden.

5.3.2 Faziesanalyse der Bohrlochmessdaten

Ziel der Untersuchungen ist die lithologische Differenzierung der ausgewählten Bohrprofile in Hinblick auf die auftretenden Hauptgesteinstypen sowie die Abgrenzung und Korrelation stratigraphischer Einheiten zwischen den Bohrungen. Hierzu wurde nach folgendem Schema verfahren:

Zusammenstellung geologischer Informationen
Zunächst wurden die Bohrberichte recherchiert und alle verfügbaren Informationen zu den auftretenden Gesteinstypen und der stratigraphischen Abfolge zusammengetragen. Hier ist zu erwähnen, dass die Bohransprache im Wesentlichen auf Bohrkleinuntersuchungen beruht, da in den Bohrungen nur vereinzelt Kerne gezogen wurden. In Abhängigkeit von Alter und Bearbeiter wurden die Gesteinsbeschreibungen und stratigraphischen Abgrenzungen unterschiedlich detailliert vorgenommen. In den meisten Bohrungen wurde das Bohrprofil nur gemäß der stratigraphischen Haupteinheiten (Serien) untergliedert. In einigen Bohrungen wurde zudem eine Differenzierung nach stratigraphischen Stufen und Unterstufen durchgeführt.

Lithologische Klassifizierung der Logs
Im zweiten Schritt wurden die stratigrapischen Grenzen den Logs zugeordnet und als Datensatz in die Logauswerteprogramme eingespeichert. Für die Bohrung K-01 wurden die geologischen Informationen aus dem Bohrbericht mit den bohrlochgeophysikalischen Messungen verknüpft. Anhand von Cross-Plots und statistischen Analysen konnte eine Klassifizierung der auftretenden Hauptgesteinstypen durchgeführt werden.

Lithologierekonstruktionen und stratigraphische Korrelation
Aufbauend auf der vorgenommenen Klassifizierung wurden für die betrachtete Bohrung die Gesteinstypen abgegrenzt und so eine Rekonstruktion des Bohrprofils vorgenommen. Im folgenden Projektverlauf werden sämtliche Bohrprofile miteinander verglichen, um eine detaillierte Korrelation zwischen den Bohrungen im Hinblick auf stratigraphische Stufen und Unterstufen vorzunehmen. Somit wird eine Basis geschaffen, um fazielle Veränderungen innerhalb der stratigraphischen Einheiten zu erfassen.

Eine Übersicht zu den Bohrungen und den abgegrenzten Hauptserien finden sich in den Abbildungen 5.9.

5.4 Sedimentgesteine der Kreide

Im östlichen Molassebecken unterscheidet man zwei Becken mit Kreideablagerungen: Die Wasserburger Senke südwestlich des Landshut-Neuöttinger-Hochs mit bis zu 500 m mächtigen Sedimenten der Unter- und Oberkreide und den Braunauer Trog nordöstlich und nördlich des Landshut-Neuöttinger-Hochs mit maximal 1000 m Oberkreideablagerungen direkt am Donaurandbruch (vgl. Abbildung 5.1 und 5.4). Der Großteil des späteren Molassebeckens war zu Beginn der Kreide trockenes Festland. Erste Transgressionen reichten zunächst von Süden herkommend nur bis in die Wasserburger Senke, später dann auch bis in den Braunauer Trog (Lange, 1981). In der Wasserburger Senke lagerte sich ab dem Oberapt küstennaher Grünsand (Gault-Sandstein) ab, während im Braunauer Trog ab dem oberen Cenoman der Regenburger Grünsandstein (Cenoman-Sandstein) sedimentierte. Beide Sandsteine sind sich lithologisch ähnlich und führen Glaukonit. Die Gesamtmächtigkeiten des Cenoman-Sandsteins schwanken im Braunauer Trog zwischen 8 m und 28 m, die des Gault-Sandsteins in der Wasserburger-Senke zwischen 6 m und 66 m. Der Gault-Sandstein ist durch die meist tonreichen Unterkreidesedimente hydraulisch von dem folgenden Malmaquifer getrennt. Im Braunauer Trog stehen die Cenoman-Sandsteine im Norden in hydrdaulischem Kontakt zum Malmaquifer (Andres und Frisch, 1981).

5.4.1 Gesteinsphysikalische Eigenschaften der Kreidesedimente

Trotz der großen Mächtigkeiten der Kreidesedimente im Untergrund des bayerischen Molassebeckens von mehreren hundert Metern (vgl. Profilschnitte in Abbildung 5.2) ist in den Archiven der Industrie und der Landesämter so gut wie kein Kernmaterial aus der Oberkreide verfügbar, vermutlich aufgrund der geringen wirtschaftlichen Bedeutung als Erdgasspeichergestein. Eine repräsentative Beprobung der verschiedenen Untereinheiten der Kreide war daher nicht möglich. Es konnten in dieser Studie lediglich die Gault-Sandsteine der Unterkreide in nennenswerter Anzahl beprobt werden. Aus weiteren stratigraphischen Untereinheiten wurden zwei Proben aus den Turon-Kalkmergeln als einzige Vertreter der Oberkreide und fünf Karbonatgesteine aus den Purbeck-Kalken entnommen. Eine Übersicht zu den Untereinheiten der Kreide ist in Abbildung 5.4 gegeben.

Abbildung 5.5 zeigt Histogramme zu den petrophysikalischen Eigenschaften der zwölf Proben des Gault-Sandstein. Die korrespondierenden Kennwerte sind in Tabelle 5.5 aufgeführt. Für die Wärmeleitfähigkeit λ_s und die Kompressionswellengeschwindigkeit V_p sind aufgrund der geringen Probenzahl nicht nur die Eigenschaften aus den Einzelproben, sondern sämtliche Einzelwerte aus den Corelogger-Messungen (vgl. Abschnitt 2.1.1 und Abschnitt 2.1.4) in die Auswertung eingezogen, d. h. ein Messwert pro 4 mm (λ_s) bzw. pro 10 mm Probenlänge (V_p).

Die wassergesättigte Wärmeleitfähigkeit der Gault-Sandsteine weist mit durchschnittlich 5,23 W m^{-1} K^{-1} einen hohen Wert auf. Er rangiert damit im Vergleich zu anderen Sandsteinen im oberen Bereich des Spektrums, das sich in bisherigen Datensammlungen für Sandsteine allgemein etwa zwischen 2 W m^{-1} K^{-1} und 6 W m^{-1} K^{-1} bewegt (z. B. Cermak und Rybach, 1982). Der Wert liegt auch deutlich höher als beispielsweise bei den in dieser Studie untersuchten Sandsteinen aus Nordrhein-Westfalen (λ_s = 4,38 W m^{-1} K^{-1}) oder den Sandsteinen der Westmolasse (Buntsandstein: λ_s = 4,32 W m^{-1} K^{-1}; Stubensandstein Keuper: λ_s = 3,34 W m^{-1} K^{-1}) (Clauser et al., 2007). Die Ursache

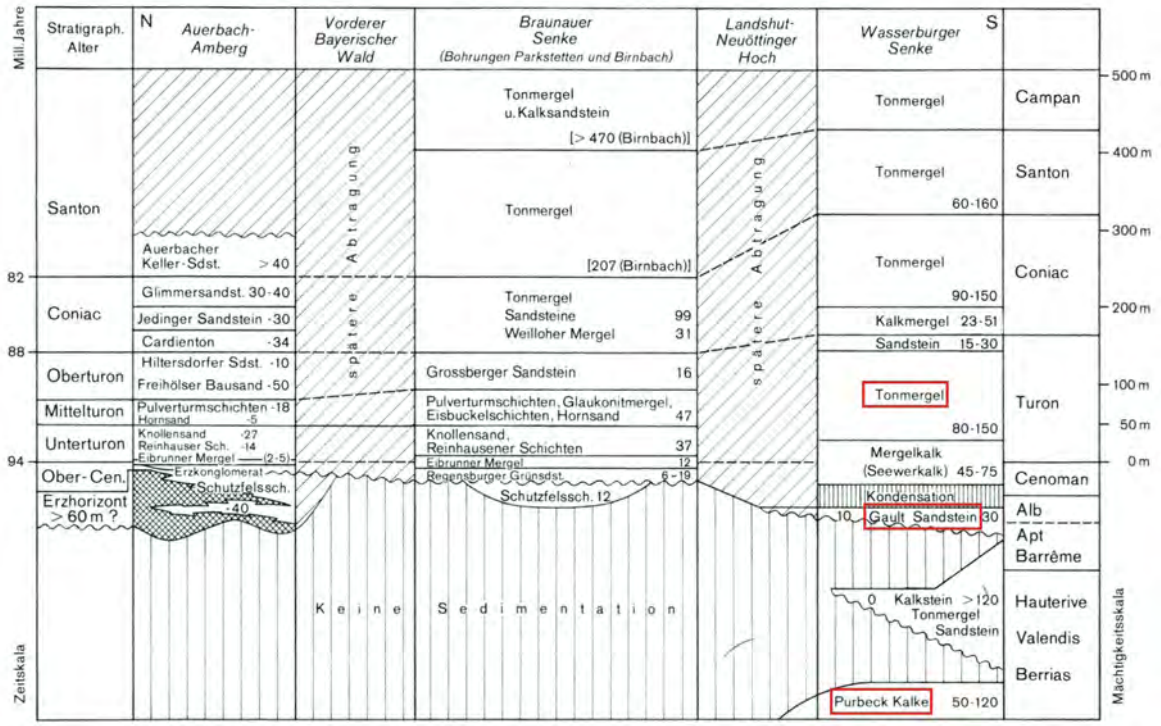


Abbildung 5.4: *Lithologie und stratigraphische Gliederung der ostbayerischen und oberbayerischen Kreide im Untergrund des bayerischen Molassebeckens (aus Freudenberger und Schwerd, 1996). Die im Rahmen dieser Studie beprobten Einheiten sind rot umrandet.*

Tabelle 5.5: *Übersicht zu den petrophysikalischen Eigenschaften des Gault-Sandsteins (Unterkreide) im Untergrund des bayerischen Molassebeckens (vgl. Abbildung 5.5): λ_s: wassergesättigte Wärmeleitfähigkeit; ρ_m: Reindichte; ϕ: Porosität; V_p: Kompressionswellengeschwindigkeit.*

	N (Proben)	N (Einzelwerte)	Mittelwert	Stabw.	Min.	25%-Quart.	Median	75%-Quart.	Max.
λ_s (W m^{-1} K^{-1})	12	1427	5,23	0,66	3,90	4,69	5,24	5,76	7,07
ρ_m (kg m^{-3})	12	-	2647	40	2580	2611	2654	2681	2699
Φ (-)	12	-	0,122	0,063	0,017	0,076	0,132	0,170	0,205
V_p (m s^{-1})	11	346	3253	533	1936	2830	3397	3590	4769

liegt im hohen Quarzanteil (vgl. auch die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Quarzgehalt klastischer Gesteine aus Nordrhein-Westfalen in Abbildung 4.7). Quantitative Mineralanalysen wurden an sieben der zwölf Proben durchgeführt. Bei fünf der Proben handelt es sich um Quarzsandsteine mit Quarzgehalten > 90 %. Mit 2647 kg m^{-3} liegt die mittlere Matrixdichte ρ_m der Gault-Sandsteine daher sehr nah am Dichtewert für das Mineral Quarz bei 2648 kg m^{-3} (Schön, 1996). Bei zwei Proben ist der Quarzgehalt durch das Auftreten von Calcit (bis 29 %) reduziert. Dieser stammt vermutlich aus einzelnen Schilllagen in dem küstennah abgelagerten Flachwassersediment.

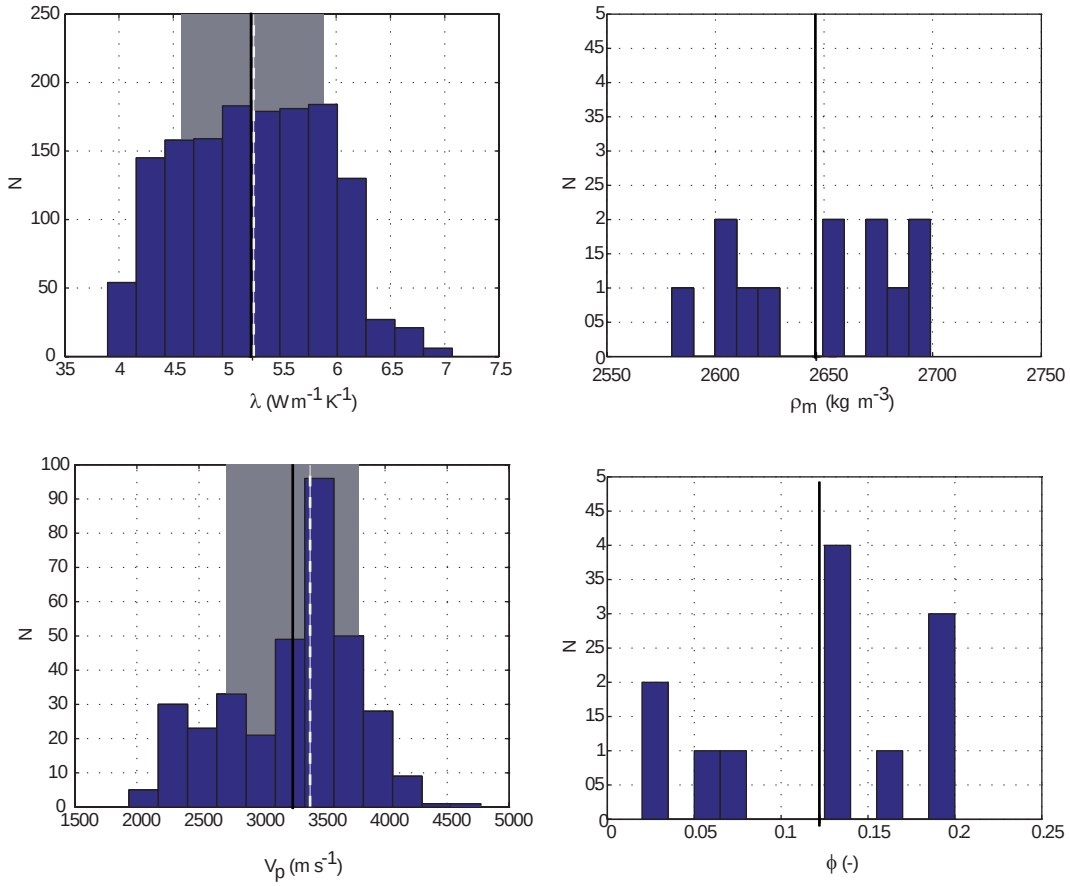


Abbildung 5.5: *Häufigkeitsverteilung petrophysikalischer Eigenschaften des Gault-Sandsteins (Unterkreide) aus dem tiefen Untergrund des bayerischen Molassebeckens (schwarze Linie: Mittelwert; weiße Linie: Median; graues Feld: Standardabweichung): λ_s: Wärmeleitfähigkeit gesättigter Proben; ρ_m: Reindichte; ϕ: Porosität; V_p: Kompressionswellengeschwindigkeit gesättigter Proben. Die dargestellten Werte korrespondieren mit Tabelle 5.5. Aufgrund der geringen Probenzahl wurden für λ_s und V_p nicht nur die Verteilungen der Eigenschaften aus den Einzelproben dargestellt, sondern auch sämtliche Einzelwerte aus den Corelogger-Messungen (vgl. Abschnitt 2.1.1 und Abschnitt 2.1.4).*

Die breite Streuung der Wärmeleitfähigkeiten resultiert aus der großen Variationsbreite der Porosität ϕ, die zwischen 2 % und 20 % variiert. Die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Porosität ist in Abbildung 5.6 illustriert. Einer der beiden Kalksandsteine stellt den größten Ausreißer nach unten dar. Sie wurden wegen ihrer abweichenden Mineralogie nicht in die Berechnung der Korrelationen einbezogen. Die reinen Quarzsandsteine korrelieren sehr gut mit dem Asaad-Modell, welches hier vor allem im Bereich niedriger Porositäten die Messpunkte besser trifft. Das geometrische Mittel nach dem Lichtenecker Modell erweist sich für eine schnelle Schätzung der Wärmeleitfähigkeit ebenfalls als brauchbar (vgl. Abschnitt 4.3.2).

Die Messergebnisse aus den petrophysikalischen Untersuchungen zu den übrigen Gesteinsfolgen der Kreidesedimente sind in Tabelle 5.6 zusammengestellt. Die Karbonatgesteine des Purbecks unterscheiden sich nicht wesentlich vom den liegenden Kalksteinen und Dolomiten des Oberjura und weisen somit vergleichbare Eigenschaften auf (vgl. Abschnitt 5.5.1). Die beiden Proben aus der Formation der Turon-Kalkmergel haben nur einen geringen Tongehalt von etwa 13 % und sind hinsichtlich ihrer petrophysikalischen Kennwerte reinen Kalksteinen ebenfalls sehr ähnlich.

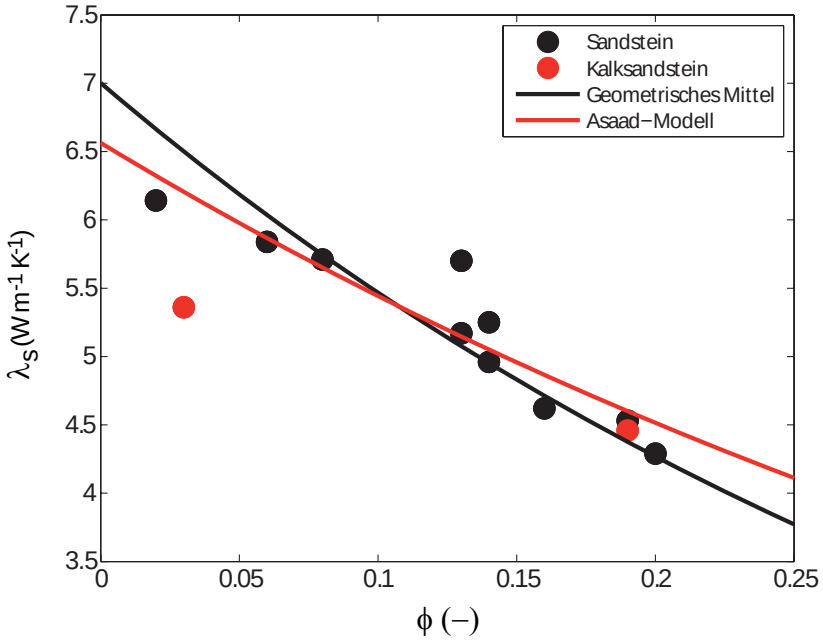


Abbildung 5.6: *Gemessene wassergesättigte Wärmeleitfähigkeit λ_s in Abhängigkeit der Porosität ϕ für den Gault-Sandstein (Unterkreide) nach dem Lichtenecker-Modell (Gleichung 4.3; schwarze Linie) und der Modifikation nach Asaad (Gleichung 4.5, rote Linie). Die zugrunde liegenden berechneten Werte für die Matrix-Wärmeleitfähigkeit λ_s betragen 7,00 W m^{-1} K^{-1} für das Lichtenecker Modell (geometrisches Mittel) und 6,56 W m^{-1} K^{-1} für das Asaad-Modell mit einem f-Faktor von 0,77.*

5.4.2 Auswertungen der bohrlochgeophysikalischen Messungen

In der Kreide wurde die Bohrung K-01 als Referenzbohrung herangezogen. Sie liegt im Bereich der Wasserburger Senke und schließt im Bohrlochtiefsten Kreidesedimente auf. Die Logdaten lassen sich sehr gut mit der im Bohrbericht dargestellten Lithostratigraphie in Verbindung bringen. Entsprechend der Gesteinsbeschreibung wurden 5 Hauptgesteinstypen mit den Logs identifiziert (Abbildung 5.7): Sandsteine, Kalksteine, Kalkmergelsteine, Mergelsteine und Tonmergelsteine.
Die Unterkreide beginnt an der Basis mit Kalksteinen und schließt mit dem Gault-Sandstein ab. Dieser leitet schließlich in das Turon der Oberkreide über, in der Kalkmergelsteine, Mergelsteine und Tonmergelsteine aufeinander folgen. Die Basis des darauf auflagernden Lithomanienkalks in einer Tiefe von 3722 m stellt einen hervorragenden Marker dar, um die Grenze zum Tertiär nachzuvollziehen. Nach Auswertung des Widerstandes und der Laufzeit (Abbildung 5.8) kann man die fünf verschiedenen Hauptgesteinstypen gut auseinanderhalten. In den Bohrlochmessungen sind z.B. die Kalksteine durch niedrige Werte in der Laufzeit (Mittelwert: 168,38 μs m^{-1}) sowie durch hohe Werte im Widerstand (Mittelwert: 2367,45 $Ohmm$) gekennzeichnet. Die Sandsteine lassen sich dagegen vor allem anhand der niedrigen Dichtewerte (Mittelwert: 2,57 g/cm^3) und der relativ hohen Werte in der Gamma-Strahlung (Mittelwert: 57,08 $gAPI$) erkennen (s. Tabelle 5.7). Der Anstieg der Gamma-Strahlung im Bereich des Gaultsandsteins lässt sich durch eingelagerte Tonflasern und einen erhöhten Glaukonitgehalt erklären. Der Einbruch des Widerstandes in diesem Abschnitt (vergl. Abbildung 5.7, Teufenbereich 3803 m bis 3820 m) ist dagegen auf eine hohe Wassersättigung zurückzuführen. Im Turon kann man in der Abfolge der Tonmergelsteine über die Mergelsteine bis hin zu den Kalkmergelsteinen den zunehmenden Tongehalt im Anstieg des Gamma-Ray Logs nachvollziehen (vergl. Abbildung 5.7, Teufenbereich 3794 m bis 3721 m). Gegenüber den Mergelsteinen und Tonmergelstei-

Tabelle 5.6: *Petrophysikalische Eigenschaften des Turon-Kalkmergels (Oberkreide) und des Purbecks (Unterkreide) aus dem Untergrund des bayerischen Molassebeckens: λ_s: wassergesättigte Wärmeleitfähigkeit, ρ_m: Reindichte, ϕ: Porosität, V_p: Kompressionswellengeschwindigkeit. Aufgrund der geringen Probenzahl wurden für λ_s und V_p nicht nur die Verteilungen der Eigenschaften aus den Einzelproben dargestellt, sondern auch sämtliche Einzelwerte aus den Corelogger-Messungen (vgl. Abschnitt 2.1.1 und Abschnitt 2.1.4).*

				λ_s (W m^{-1} K^{-1})				ρ_m (kg m^{-3})				
Stufe/ Unterstufe	Lithologie	N (Proben)	N (Einzel-werte)	Mittel-wert	Stabw.	Min.	Max.	N	Mittel-wert	Stabw.	Min.	Max.
Turon-Kalkmergel	Mergelkalk	2	206	2,86	0,09	2,72	3,12	2	2698	-	-	-
Purbeck	Kalkstein	4	852	2,75	0,20	2,29	3,29	4	2732	28	2695	2797
Purbeck	Dolomit	1	125	4,26	0,16	3,95	4,93	1	2797	-	-	-
				V_p (m s^{-1})					ϕ (-)			
Turon-Kalkmergel	Mergelkalk	2	43	5563	217	5162	5933	2	0,013	-	-	-
Purbeck	Kalkstein	4	222	4827	784	3253	6099	4	0,073	0,016	0,026	0,162
Purbeck	Dolomit	1	35	6611	90	6428	6733	1	0,019	-	-	-

Tabelle 5.7: *Durchschnittswerte und Standardabweichungen der Logdaten für die in der Bohrung K-01 abgegrenzten Gesteinstypen der Kreide und des Lithomanienkalks aus dem Obereozän.*

	GR (GAPI)		DRes (Ohmm)		DT (ms/m)		RHOB (g/cm³)	
	AVG	STD	AVG	STD	AVG	STD	AVG	STD
Sandstein	57,08	15,74	199,36	171,9	203,74	12,54	2,57	0,07
Kalkstein	32,68	13,44	2367,45	6109,15	168,38	8,82	2,71	0,05
Kalk-mergel-stein	26,45	8,6	172,7	156,7	180,07	9,41	2,73	0,02
Mergel-stein	46,35	6,8	20,29	4,49	211,88	8,11	2,71	0,02
Ton-mergel-stein	61,44	15,06	62,85	101,65	234,55	34,01	2,58	0,13

nen, erreichen die Kalkmergelsteine höchste Werte im Widerstand (Mittelwert: 172,7 $Ohmm$) und in der Dichte (Mittelwert: 2,73 g/cm^3), während sie bei der Laufzeit die niedrigsten Werte (Mittelwert: 180,07 μs m^{-1}) annehmen.

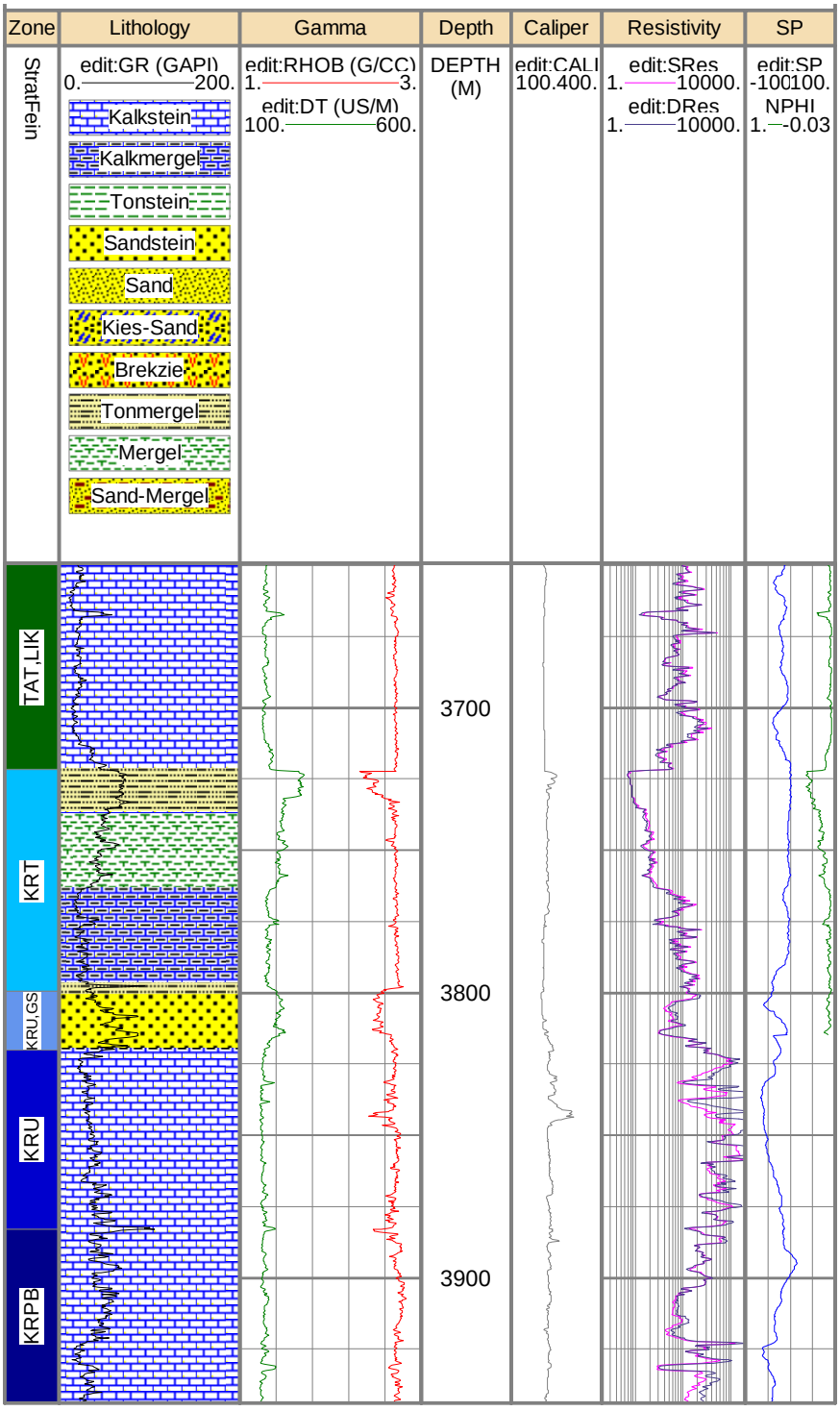


Abbildung 5.7: *Bohrlochmessungen im Bereich der Kreide mit Übergang in das Tertiär der Bohrung K-01. Dargestellt sind die abgegrenzten stratigraphischen Stufen und die Hauptgesteinstypen (KRPB: Purbeck ; KRU: Untere Kreide ; KRU,GS: Gault-Sandstein; KRT: Turon; TAT, LIK: Lithomanienkalk)*

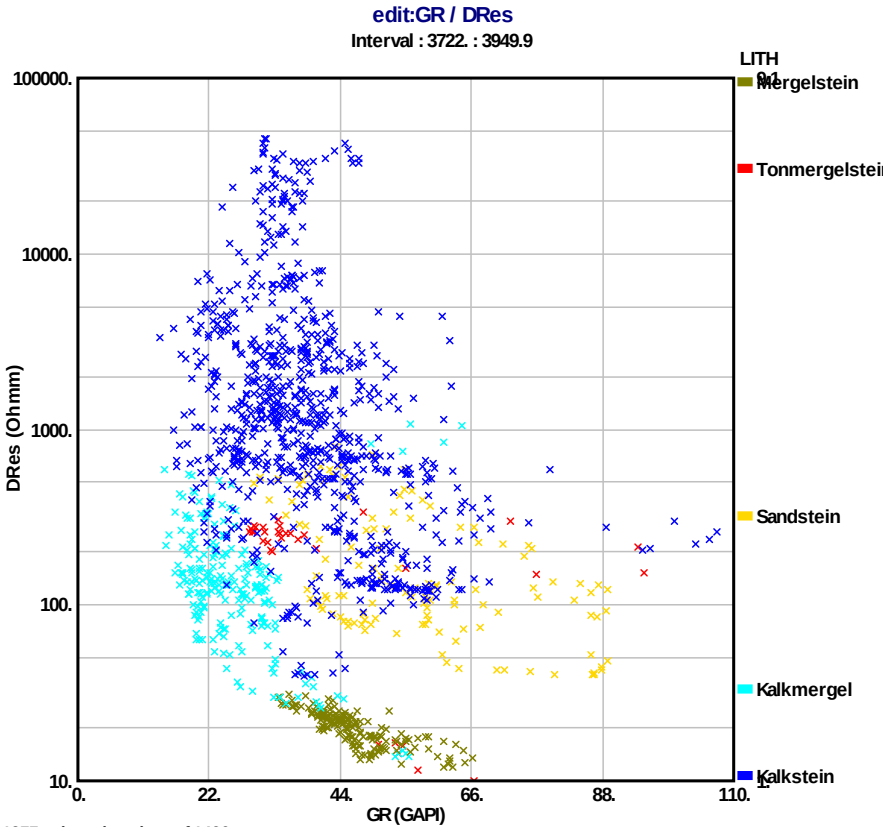


Abbildung 5.8: *Streudiagramm des im Bohrloch gemessenen Widerstands (DRes) gegen die Gamma-Strahlung (GR). Dargestellt sind die Abfolgen des Kalksteins und des Gault-Sandsteins der Unterkreide sowie Schichten des Kalkmergelsteins, Mergelsteins und Tonmergelsteins aus dem Turon.*

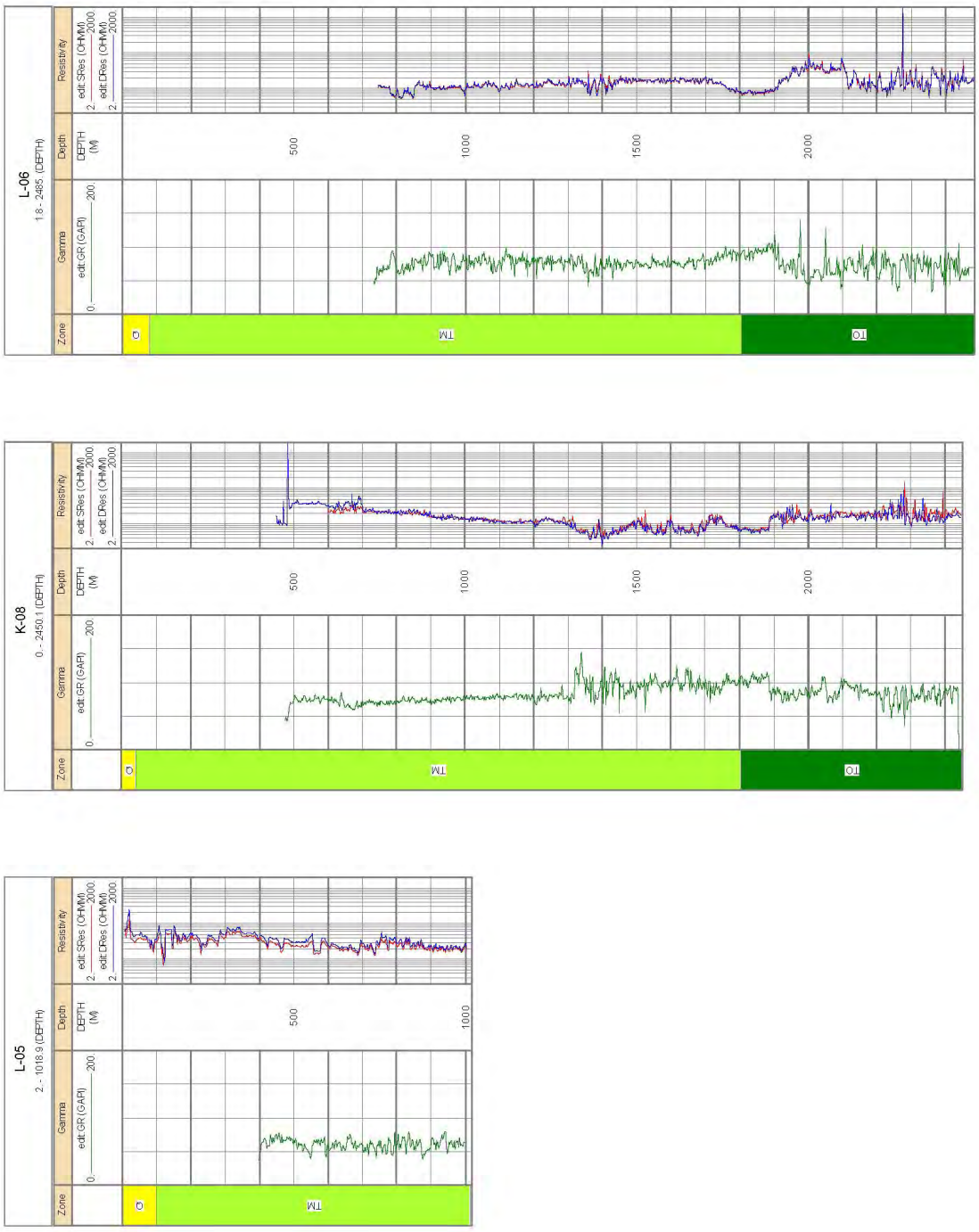
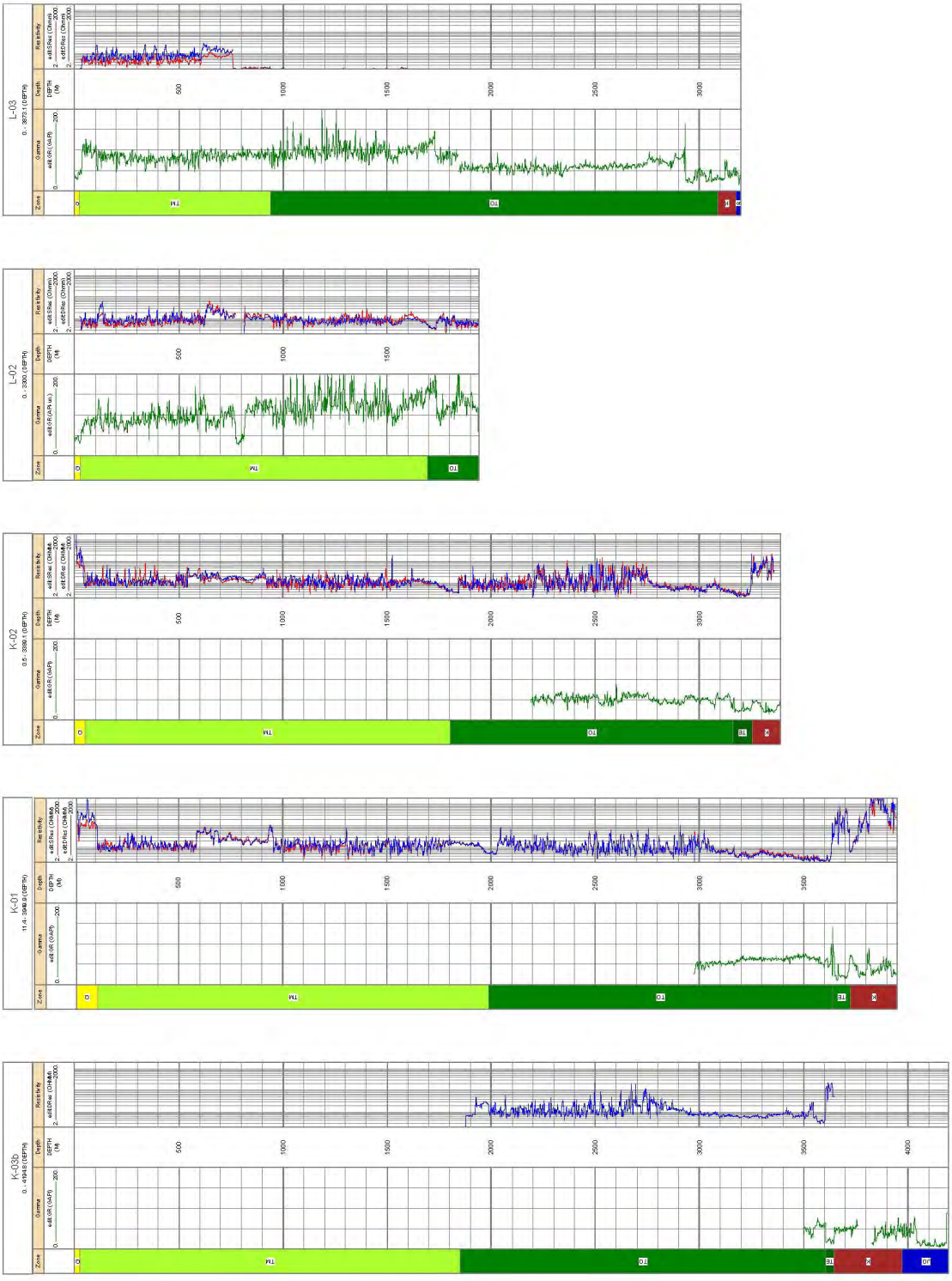
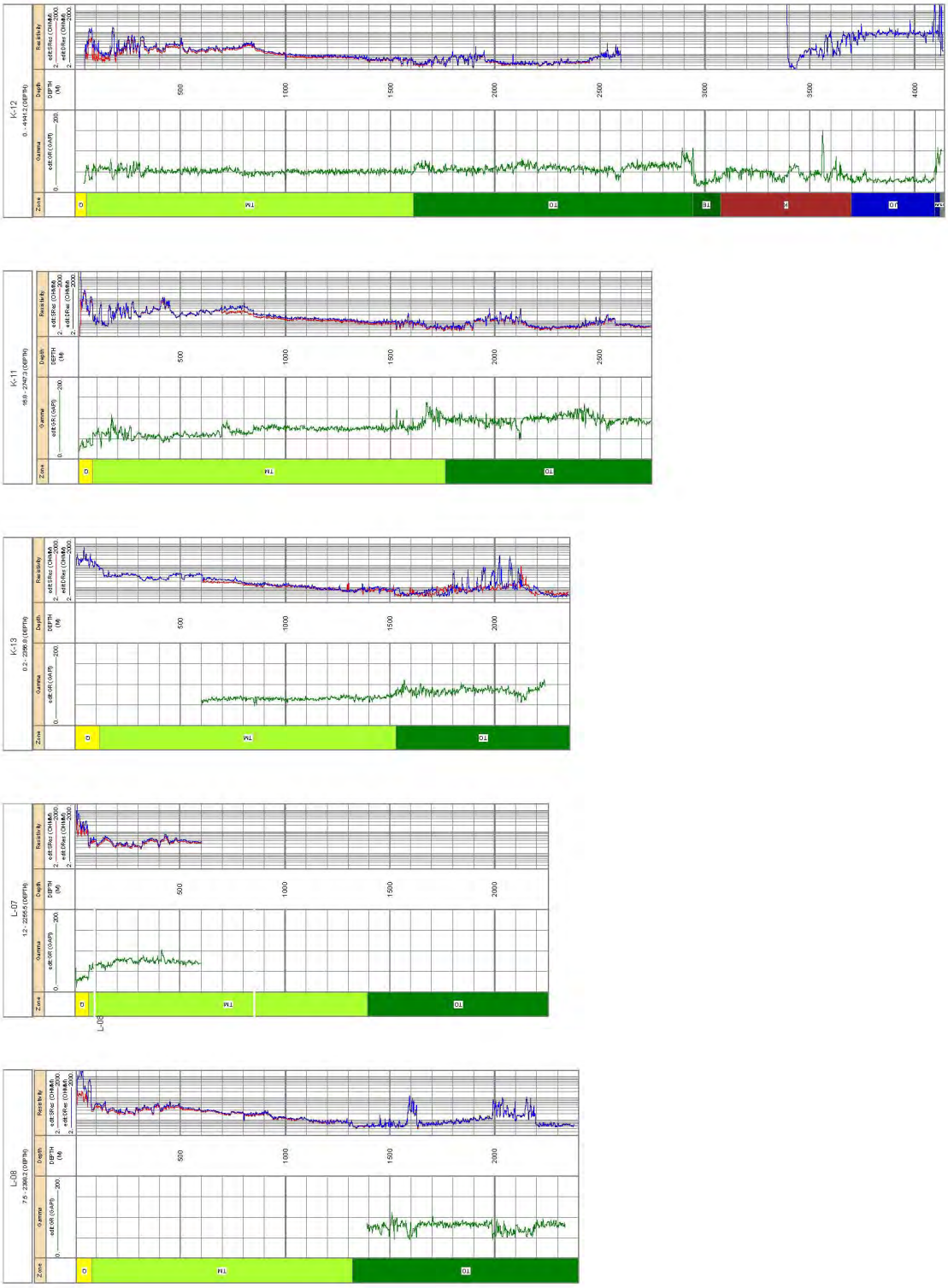


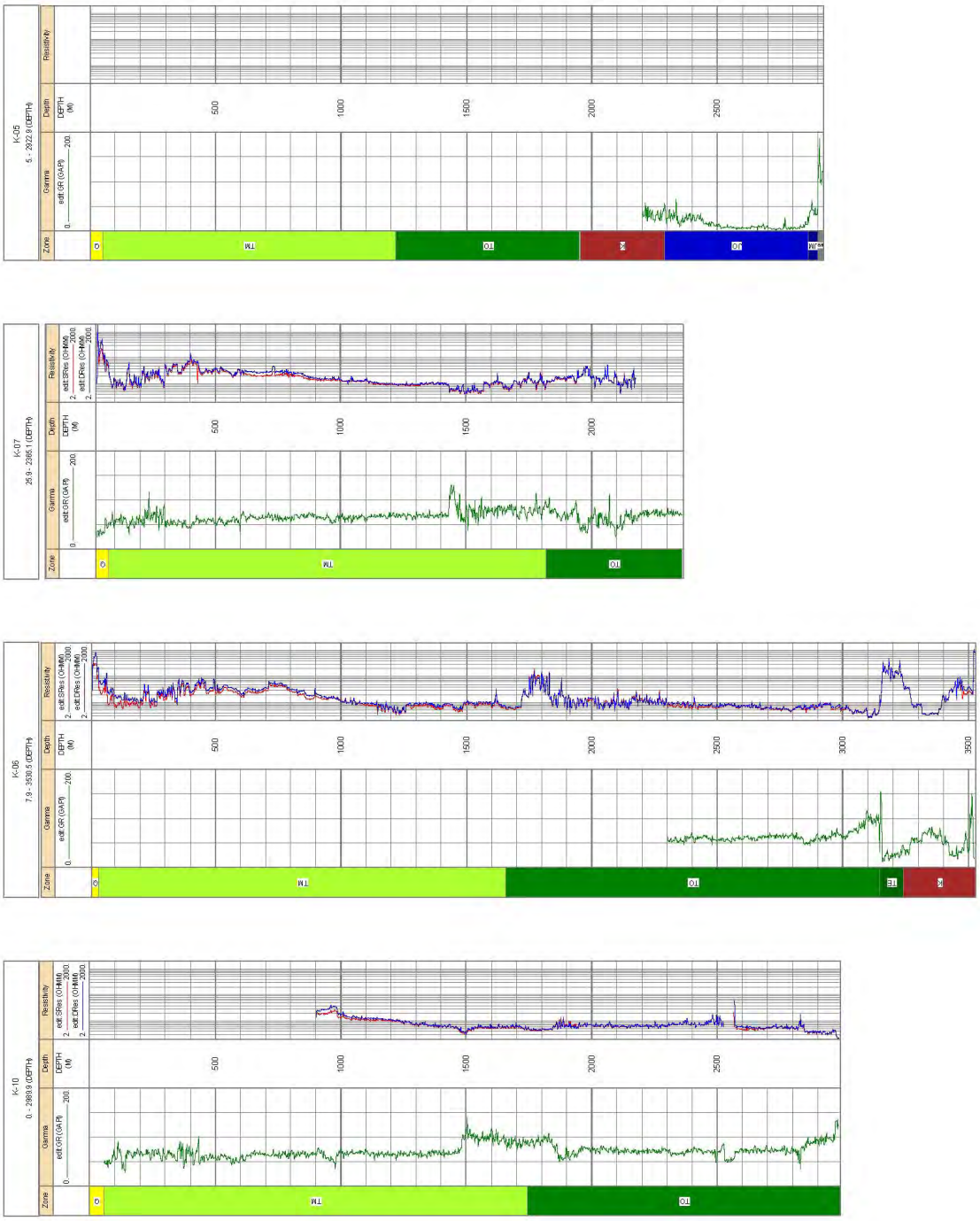
Abbildung 5.9: *Übersichtsprofile der bearbeiten Bohrungen.*



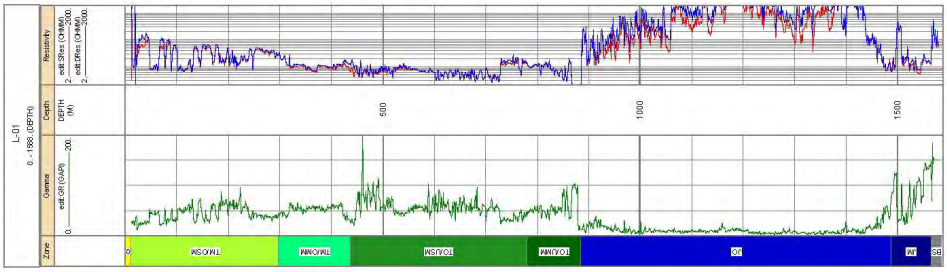
Übersichtsprofile der bearbeiten Bohrungen (fortgesetzt).

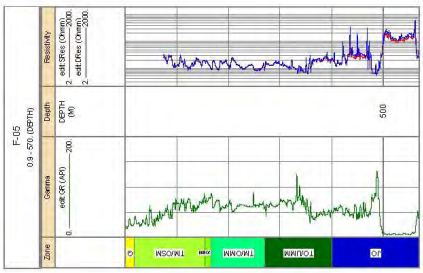


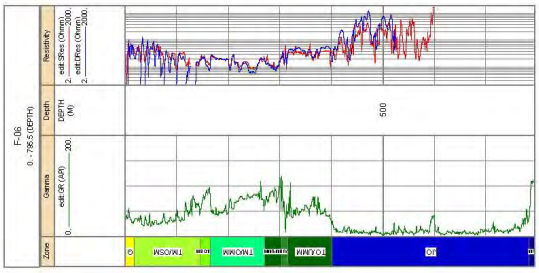
Übersichtsprofile der bearbeiten Bohrungen (fortgesetzt).

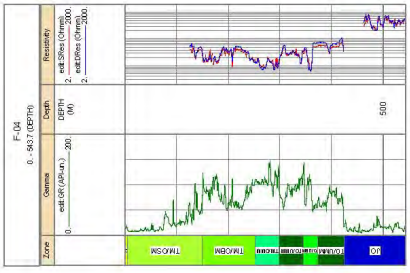


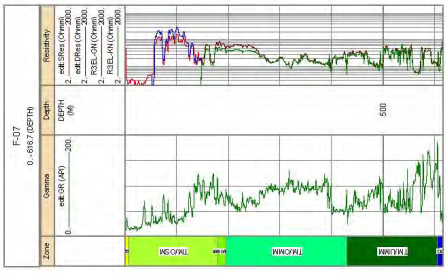
Übersichtsprofile der bearbeiten Bohrungen (fortgesetzt).



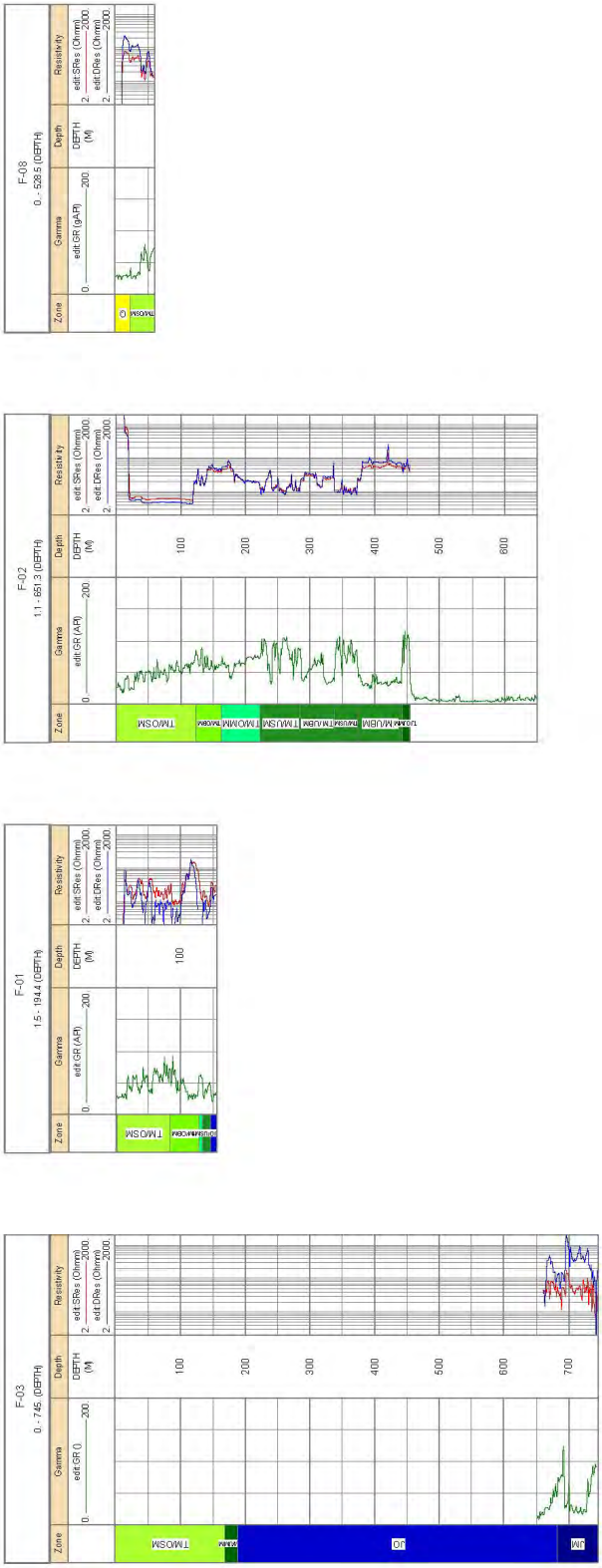








Übersichtsprofile der bearbeiten Bohrungen (fortgesetzt).



Übersichtsprofile der bearbeiten Bohrungen (fortgesetzt).

5.5 Karbonatgesteine des Oberjura im Vergleich zur Westmolasse

Im Oberjura (Malm) war das gesamte Gebiet des heutigen Molassebeckens von Meer überflutet (Walter, 1995). Nach Osten hin westlich der Isar verzahnen sich die Schwamm- und Algenriffe zunehmend mit zwischengeschalteten Bankkalken und Mergeln der Schwäbischen Fazies. Der Tonanteil der Mergel stammt von der Mitteldeutschen Schwelle und wurde als bodennaher Trübestrom aus Norden antransportiert (Freudenberger und Schwerd, 1996). Zum Teil sind große Bereiche der Kalksteine spätdiagenetisch dolomitisiert worden, so dass sich die Malmkarbonate lithologisch vor allem aus teilweise dolomitisierten Kalksteinen, Dolomiten und untergeordnet Mergel zusammensetzen. Mergelsteine treten in der Westmolasse hingegen häufiger auf. Die meist mehrere hundert Meter mächtige Malmkarbonate sind im Untergrund des bayerischen Molassebeckens in unterschiedlichen Tiefen anzutreffen. Während sie in der Wasserburger Senke meist unter 3000 m liegen, erreichen sie im Braunauer Trog selten mehr als 2000 m Tiefe (vgl. Abbildung 5.2).

Die Malmkarbonate wurden bereits umfassend im Rahmen der ersten Projektphase beprobt und ihre thermischen Eigenschaften mittels integrierter Logdatenanalyse ausgewertet (Clauser et al., 2007). Weiter wurden in der Westmolasse die stratigraphischen Abfolgen und Faziesausprägungen anhand mehrerer Bohrprofile untersucht. Da zu erwarten ist, dass sich die Hauptgesteinsparameter der Malmkarbonate im Arbeitsgebiet trotz fazieller Unterschiede nicht wesentlich von denen der Westmolasse unterscheiden, wurden hier nur ergänzende Untersuchungen in geringem Umfang durchgeführt und vergleichend mit den Ergebnissen aus der Westmolasse dargestellt.

5.5.1 Gesteinsphysikalische Eigenschaften der Malm-Karbonate

Um der Bedeutung des Oberjura als wichtiger Kluftaquifer für die hydrogeothermale Nutzung gerecht zu werden, wurde für die Probennahme ein repräsentativer Querschnitt von Proben angestrebt. Durch freundliche Unterstützung des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU) in München konnten 21 repräsentative Kernproben aus der ersten und bislang einzigen vollständig gekernten Malmbohrung Moosburg 4 alias K-04 (vgl. Abbildung 5.3) gewonnen werden (Meyer, 1994). Die Proben wurden in regelmäßigen Abständen einer Kernstrecke von 453,4 m entnommen, die aus einer Tiefe zwischen 1115,8 m bis 1569,2 m stammt. Es handelt sich dabei um zwölf teilweise dolomitisierte Kalksteine und neun reine Dolomite.

Die gesteinsphysikalischen Kennwerte der oberjurassischen Karbonatgesteine des gesamten Molassebeckens inklusive der Kennwerte aus Phase 1 sind in Abbildung 5.10 und in Tabelle 5.8 dargestellt. Die Wärmeleitfähigkeit der Kalksteine bewegt sich naturgemäß aufgrund der relativ einheitlichen mineralogischen Zusammensetzung gegenüber anderen Gesteinsarten wie zum Beispiel Sandstein in einem engen Bereich. Zwischen den Kalksteinen der West- und der Ostmolasse ist nur ein marginaler Unterschied von 0,2 W m^{-1} K^{-1} festzustellen. Mineralogische Analysen an sechs der 45 Kalksteinproben aus der Westmolasse zeigen, dass es sich um reine Kalksteine mit Calcitgehalten von mindestens 96 % handelt. Dass dies auch für die Gesamtheit dieser Auswahl zutrifft, legt die mittlere Matrixdichte von 2703 kg m^{-3} nahe, die sich sehr eng um die Matrixdichte für Calcit von 2710 kg m^{-3} (Schön, 1996) bewegt. Die mineralogische Zusammensetzung der Kalksteine aus der Ostmolasse, die an acht von zwölf Proben untersucht wurde, offenbart hingegen an vier Proben einen Dolomitanteil zwischen 26 % und 62 %, der sich auch in einer leicht erhöhten mittleren Matrixdichte widerspiegelt. Kalksteine aus beiden Bereichen des Molassebeckens sind als sehr dicht zu bezeichnen und unterscheiden sich kaum in der Porosität, so dass die etwas höhere Wärmeleitfähigkeit der Ostmolasse-Kalke aus dem Auftreten von dolomitischen Kalksteinen resultiert.

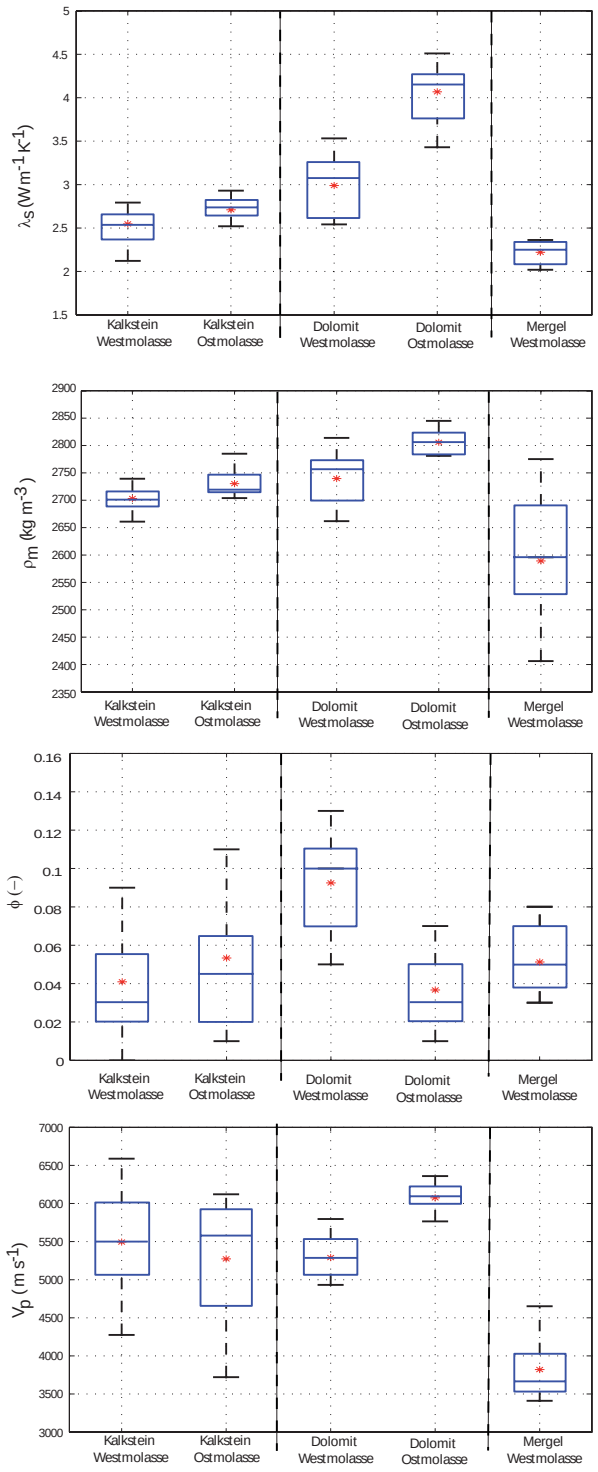


Abbildung 5.10: *Vergleichende Darstellung der statistischen Maßzahlen petrophysikalischer Eigenschaften für Malmkarbonate aus dem Untergrund des Süddeutschen Molassebeckens in Form von Box-Whisker-Diagrammen (blaue Mittellinie: Medianwert; roter Stern: Mittelwert; blaue Box: 25%- und 75%-Quartil; schwarze Begrenzungsstriche: 5%- und 95%-Perzentil): λ_s: wassergesättigte Wärmeleitfähigkeit; ρ_m: Reindichte; ϕ: Porosität; V_p: Kompressionswellengeschwindigkeit. Die dargestellten Werte korrespondieren mit Tabelle 5.8.*

Tabelle 5.8: *Übersicht zu den petrophysikalischen Eigenschaften von Karbonatgesteinen des Oberjura (Malm) aus dem Untergrund des Süddeutschen Molassebeckens (vgl. Abbildung 5.10): λ_s: wassergesättigte Wärmeleitfähigkeit; ρ_m: Reindichte; ϕ: Porosität; V_p: Kompressionswellengeschwindigkeit.*

		N	Mittelwert	Stabw.	Min.	25%-Quart.	Median	75%-Quart.	Max.
λ_s (W m^{-1} K^{-1})	Kalkstein (Westmolasse)	45	2,51	0,16	2,12	2,38	2,52	2,65	2,79
	Kalkstein (Ostmolasse)	12	2,71	0,17	2,34	2,66	2,73	2,82	2,93
	Dolomit (Westmolasse)	20	2,99	0,35	2,54	2,61	3,07	3,26	3,53
	Dolomit (Ostmolasse)	10	4,07	0,36	3,43	3,84	4,15	4,27	4,51
	Mergel (Westmolasse)	6	2,22	0,14	2,02	2,13	2,25	2,32	2,36
ρ_m (kg m^{-3})	Kalkstein (Westmolasse)	44	2703	41	2582	2691	2701	2714	2805
	Kalkstein (Ostmolasse)	12	2731	25	2704	2714	2719	2741	2785
	Dolomit (Westmolasse)	20	2740	46	2662	2699	2756	2772	2814
	Dolomit (Ostmolasse)	9	2806	22	2781	2782	2806	2822	2845
	Mergel (Westmolasse)	10	2589	117	2406	2535	2596	2673	2775
Φ (-)	Kalkstein (Westmolasse)	44	0,041	0,030	0,004	0,016	0,033	0,054	0,126
	Kalkstein (Ostmolasse)	14	0,050	0,044	0,007	0,020	0,038	0,057	0,171
	Dolomit (Westmolasse)	20	0,092	0,023	0,048	0,073	0,098	0,111	0,126
	Dolomit (Ostmolasse)	9	0,037	0,018	0,015	0,020	0,032	0,047	0,067
	Mergel (Westmolasse)	9	0,051	0,017	0,031	0,036	0,049	0,066	0,079
V_p (m s^{-1})	Kalkstein (Westmolasse)	41	5494	659	4275	5061	5493	6006	6588
	Kalkstein (Ostmolasse)	12	5273	791	3721	4647	5586	5924	6120
	Dolomit (Westmolasse)	20	5290	256	4932	5081	5282	5520	5796
	Dolomit (Ostmolasse)	10	6113	169	5765	6045	6107	6240	6359
	Mergel (Westmolasse)	5	3821	487	3411	3561	3667	3814	4651

Die Dolomite weisen einen großen Unterschied in der wassergesättigten Wärmeleitfähigkeit auf. Der Durchschnittswert der Malmdolomite aus der Ostmolasse ist um über 1 W m^{-1} K^{-1} höher gegenüber den Malmdolomiten der Westmolasse. Hierbei ist zu bemerken, dass letztere allesamt nicht mehr aus dem Untergrund des Molassebeckens selber stammen, sondern aus einem Steinbruch im Bereich der Schwäbischen Alb, wo der Oberjura von Süden her ansteigend an der Oberfläche ausstreicht. Es handelt sich um 20 Proben aus der Liegenden Bankkalkformation und den Oberen Felsenkalken (Malm ϵ bis ζ), die im Laufe spätdiagenetischer Vorgänge eine Dolomitisierung erfahren haben. Obwohl hier

keine Mineralanalysen vorliegen, lässt sich aufgrund der mittleren Matrixdichte um 2740 kg m^{-3} und der hohen Streuung sagen, dass es sich überwiegend nicht um reine Dolomite, sondern um dolomitische Kalksteine handeln dürfte. Die höhere Wärmeleitfähigkeit der bayerischen Malmdolomite aus der Bohrung Moosburg 4 (K-04) resultiert somit zum einen aus dem höheren Dolomitanteil und aus der um über 5 % niedrigeren Porosität.

Die geometrisch gemittelten Durchschnittswerte der Wärmeleitfähigkeiten für reine Kalksteine und für reine Dolomite aus der Bohrung Moosburg 4 liegen bei 2,8 W m^{-1} K^{-1} bzw. 4,4 W m^{-1} K^{-1}, was jeweils deutlich unter dem entsprechenden Literaturwert (Clauser, 2006) für die Minerale Calcit (λ_{Calcit} = 3,31 W m^{-1} K^{-1}) und Dolomit ($\lambda_{Dolomit}$ = 5,97 W m^{-1} K^{-1}) liegt.

Mergelsteine aus der Westmolasse unterscheiden sich von den Kalksteinen lediglich durch einen geringen Tonmineralanteil von etwas über 10 % (Illit und Kaolinit), wodurch die Kennwerte Wärmeleitfähigkeit, Matrixdichte und Kompressionswellengeschwindigkeit entsprechend reduziert sind.

5.5.2 Auswertung der bohrlochgeophysikalischen Messungen

Zur Logauswertung wurde im Oberjura die Bohrung L-01 als Referenzbohrung herangezogen. Die Logging-Daten lassen sich sehr gut mit der im Bohrbericht dargestellten Lithologie in Verbindung bringen. Entsprechend der Gesteinsbeschreibung wurden fünf Hauptgesteinstypen mit den Logs identifiziert (Abbildung 5.11): Kalksteine, Dolomite (dolomitische Kalksteine), Mergel und Tonsteine (z.T. mergelhaltig). Dieselben Hauptgesteinstypen wurden auch für das Oberjura im Bereich der Westmolasse (BMU Bericht PhaseI) unterschieden, wobei in der Westmolasse die mergelhaltigen Tonsteine zusätzlich zu den reinen Tonsteinen identifiziert wurden.

Der Oberjura beginnt laut Bohrbericht an der Basis mit Tonsteinen (z.T. mergelhaltig), die innerhalb des Oberjuras durch die höchsten GR-Werte gekennzeichnet sind. Charakteristisch sind GR-Werte von über 40 API, geringe Dichten (Mittelwert: 2,50 g/cm^3) und geringe Werte in der Laufzeit (Mittelwerte: 281 $\mu s/m$). Tonsteine mit hohen Mergelanteilen treten noch zweimal am Top des Oberjuras zwischen 903 m - 911 m und zwischen 891 m - 897 m auf, wo sie zu den Tonsteinen des Mitteljuras überleiten. Die Tonsteine an der Basis des Oberjuras werden durch Abfolgen von Kalksteinen, Dolomit und Mergel überlagert. Die Abnahme des Tongehalts im Gestein spiegelt sich im GR-Log wider, das in den tonfreien massiven Kalksteinen und den Dolomiten die niedrigsten Werte mit $<$ 15 API einnimmt. Antikorrelierend zum Gammalog steigen mit abnehmendem Tongehalt die Werte im elektrischen Widerstand und im Dichte-Log, während die Laufzeit zunimmt (vergl. Tabelle 5.9). Dolomite wurden in den Bohrkleinproben im Bereich zwischen 958 m und 1377 m angetroffen. Hierbei handelt es sich um den sogenannten Frankendolomit. Er kann anhand der Logs durch seine niedrigen Werte in der Laufzeit ($<$ 466 μs/m) und seine hohen Werte in der Dichte ($>$ 2,7 g/cm^3) von den Kalksteinen abgegrenzt werden. Auch in den Widerständen ist ein starker Anstieg der Werte zu erkennen (Mittelwert: 4879 Ohmm).

Auffällig sind auftretende Differenzen zwischen der flach und tief eindringenden Widerstandskurve in einer Sequenz zwischen 958 m und 1377 m, in der die Formation größtenteils dolomitisiert ist. Diese Seperation findet sich ebenfalls in nahezu allen in der Westmolasse untersuchten Bohrungen in der gleichen stratigraphischen Position (Vergleiche BMU-Bericht Phase 1) vor. Die Differenzen in den beiden Widerstandskurven indizieren permeable Zonen und werden durch die Infiltration von Bohrspülung in die Formation verursacht. Auch die Auslenkung des Eigenpotenzials (SP-Kurve) kann als Hinweis auf eine erhöhte Permeablität gedeutet werden. Das negative Eigenpotential und der niedrige Widerstand im Nahbereich der Bohrung weisen auf ein Formationsfluid hin, das geringere Salzkon-

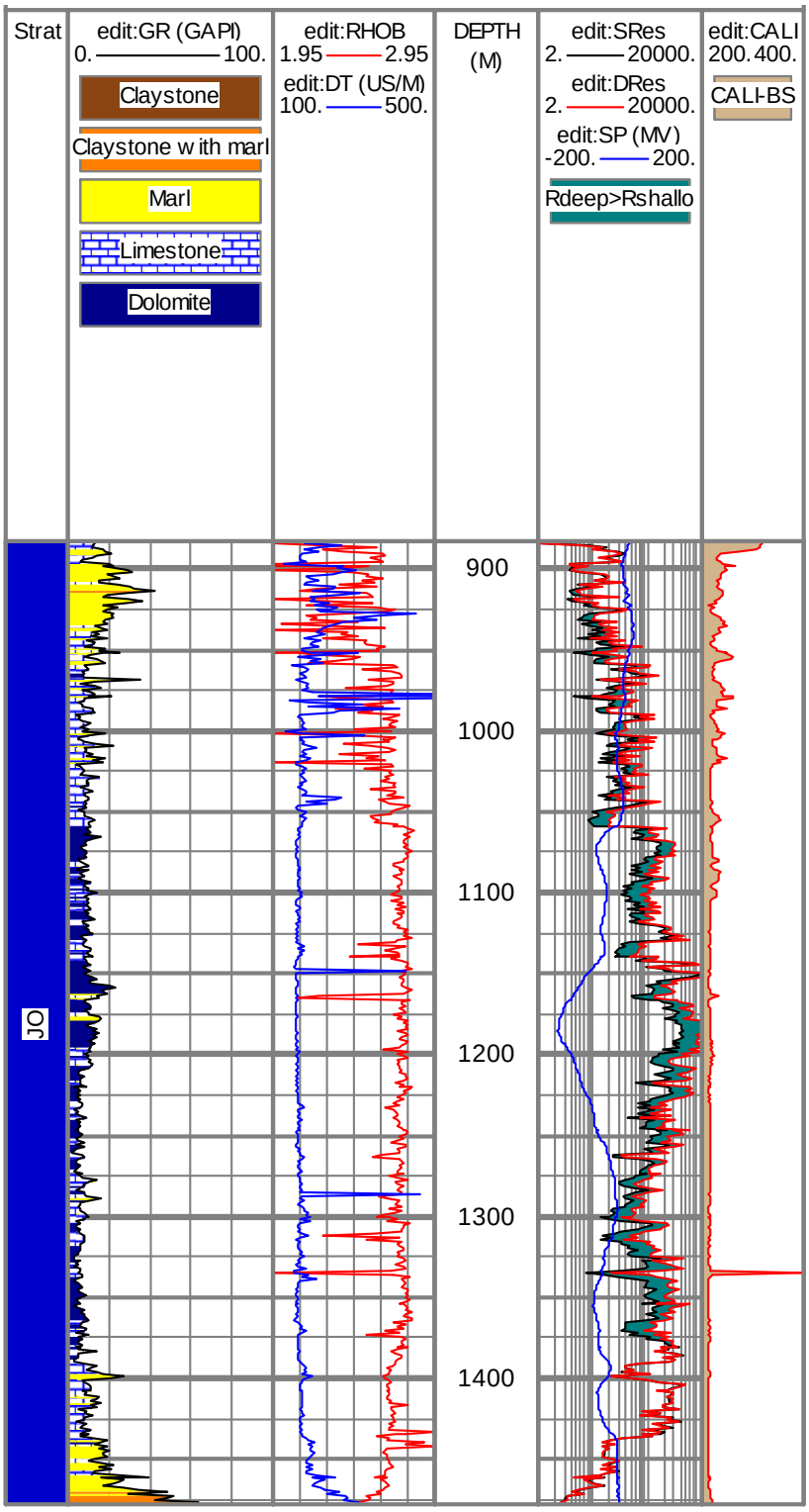


Abbildung 5.11: *Bohrlochmessungen im Bereich des Oberjura der Bohrung L-01. Dargestellt sind die abgegrenzten stratigraphischen Stufen und die Hauptgesteinstypen (JO,A-B: Malm α -β ; JO,G-Z: Malm γ-ζ)*

Tabelle 5.9: *Durchschnittswerte und Standardabweichungen der Logdaten für die in der Bohrung L-01 abgegrenzten Gesteinstypen im Oberjura (Malm)*

	GR [API]		DT [µs/m]		RHOB [g/cm³]	
	AVG	STD	AVG	STD	AVG	STD
Kalkstein	9,13	2,91	184,5	63,78	2,61	0,17
Dolomit	7,59	2,78	163,6	18,51	2,76	0,02
Mergel	39,81	5,55	220,56	86,23	2,49	0,27
Tonstein	51,10	8,48	280,82	29,02	2,5	0,12

zentrationen aufweist als die Bohrspülung. Wie auch in der Westmolasse sprechen hohe Werte in der Dichte und niedrige Laufzeiten gegen erhöhte Porosiätswerte in der Formation. Die Porositäten liegen hier laut Bohrbericht unterhalb von 5 Prozent. Allerdings sind die dolomitisierten Massenkalke durch einzelne Kluftpartien gekennzeichet, die Wegsamkeiten für die Formationsfluide bilden. Die Klüftung spiegelt sich auch im Kaliberlog als Bohrlochunregelmäßigkeiten wider.

Stratigraphische Korrelationen

Im Vergleich zu Bohrungen aus der Westmolasse und dem im BMU-Bericht PhaseI dargestellten Standardprofil des Oberjura zeigt sich, dass die stratigraphische Abfolge auch im östlichen Teil des Molassebeckens größtenteils übereinstimmt (Abbildung 5.12. Anhand des Gammalogs können die Untereinheiten des Oberjura alpha bis delta abgegrenzt werden. Auch die liegenden Impressamergel und die zwischengeschaltete Lacunosamergelformation lassen sich korrelieren. Ausnahme bildet die Bohrung L-01, die sich am östlichen Ende des Profils befindet. Hier wird die Unterscheidung einzelner Untereinheiten schwieriger, da die Formation mit dem Einsetzen der Massenkalke im Kimmeridge keine großen Variationen in ihrer Faziesausprägung aufweist.

5.5.3 Ableitung von Wärmeleitfähigkeiten aus Logging-Daten

Da aus der Bohrung L-01 keine Kerne zur Verfügung stehen, wurden zum Vergleich Labormessungen an Kernmaterial aus der nahegelegenen Bohrung K-04 herangezogen. Hier wurden Wärmeleitfähigkeiten an Kalksteinen und Dolomiten gemessen. Der Mittelwert aller Messungen beträgt für die Matrixwärmeleitfähigkeit 3,56 $W\ m^{-1}\ K^{-1}$. Die hohen Werte der Wärmeleitfähigkeit lassen auf einen geringen Ton/Mergelanteil in den Kalksteinen schließen und sind insbesondere für die Dolomite typisch. Für die Bohrung L-01 wurde aus den Bohrlochmessungen die Wärmeleitfähigkeit abgeleitet. Dafür wurden aus dem Gamma-Log (Ton/Mergel-Indikator) zunächst die Volumenanteile der drei Komponenten Ton/Mergel, Karbonat und Wasser (freie Porosiät) berechnet. Über ein Mischungsgesetzt konnte dann die Wärmeleitfähigkeit bestimmt werden. Da in der Bohrung L-01 Dolomit und Kalkstein in Übergangsformen auftreten und eine zweifelsfreie Trennung der Komponenten mit den verfügbaren Logs nich immer gegeben ist, wurde für die Karbonate ein gemeinsamer Matrixwert von 3,1 $W\ m^{-1}\ K^{-1}$. In Abbildung 5.13 ist das Ergebnis dieser Berechnung für den Malm am Ostrand des Untersuchungsgebietes dargestellt. Die berechnete Wärmeleitfähigkeit variiert zwischen 1,06 $W\ m^{-1}\ K^{-1}$ und 3,11 $W\ m^{-1}\ K^{-1}$. Die niedrigen Werte treten in Kluftzonen auf, wie sie z.B. im oberen Bereich des Malm zwischen 900 m und 1000 m vorkommen. Abbildung 5.13 zeigt die berechneten Wärmeleitfähigkeitsprofile für den Oberjura einiger ausgewählter Bohrungen auf einem

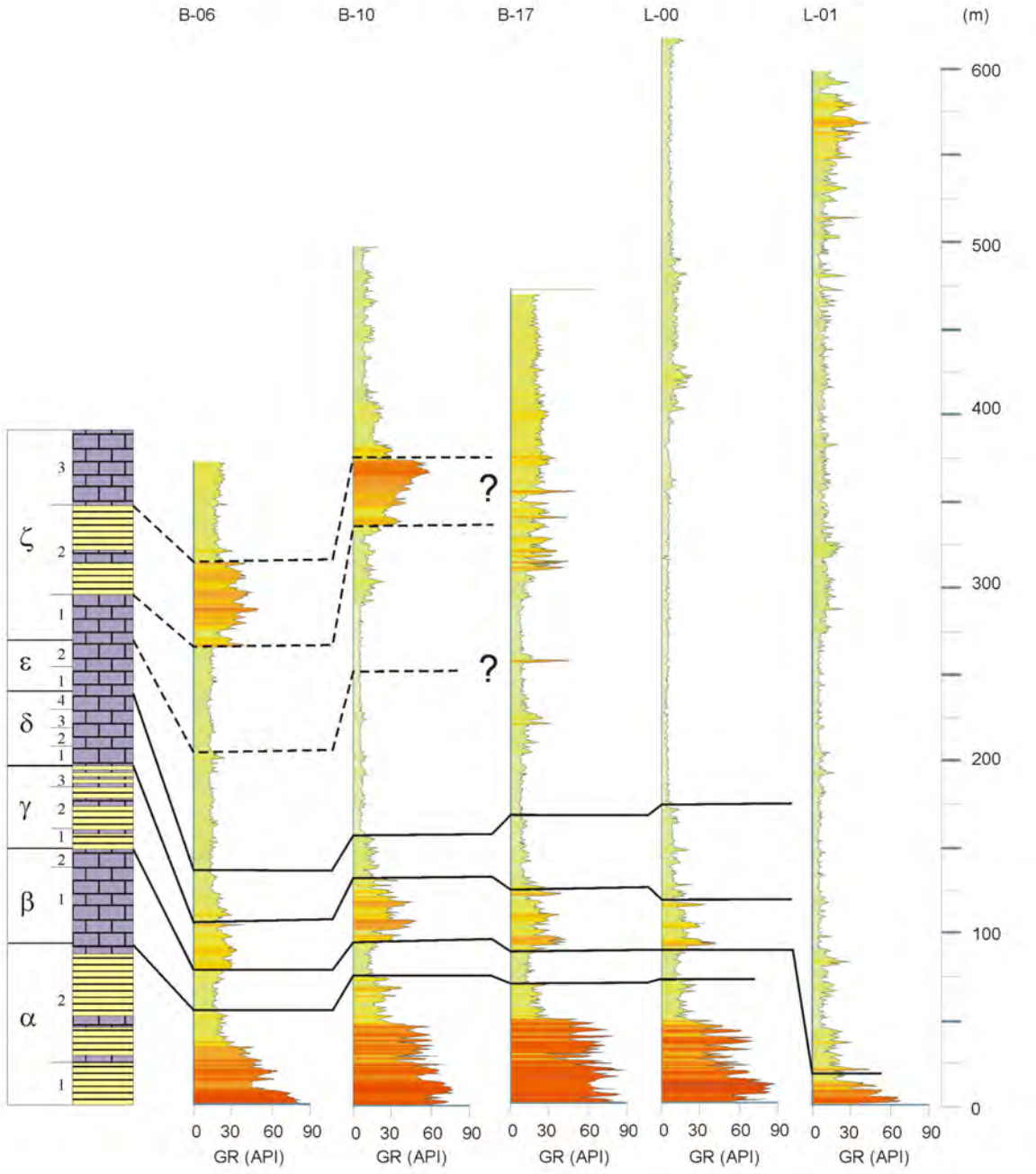


Abbildung 5.12: *Gammalogs (GR) aus Explorationsbohrungen der Ostmolasse im Vergleich zur Westmolasse und zum Standardprofil des Oberjuras. Die Bohrungen sind auf einer West-Ost Profillinie angeordnet.*

West-Ost-Profil. Die Werte zeigen nur geringe Variationen, was auf relativ gleich bleibende lithologische Verhältnisse zurückzuführen ist. Die durchschnittliche Wärmeleitfähigkeit für die gesamte Formation beträgt 2,8 W m^{-1} K^{-1}. Die Formationen Malm α bis γ lassen sich in den betrachteten Bohrungen gut korrelieren und zeigen eine ähnliche Ausprägung. Lediglich in der Bohrung L-01, welche im östlichsten Teil des Untersuchungsgebietes liegt, lässt sich der Oberjura ab dem

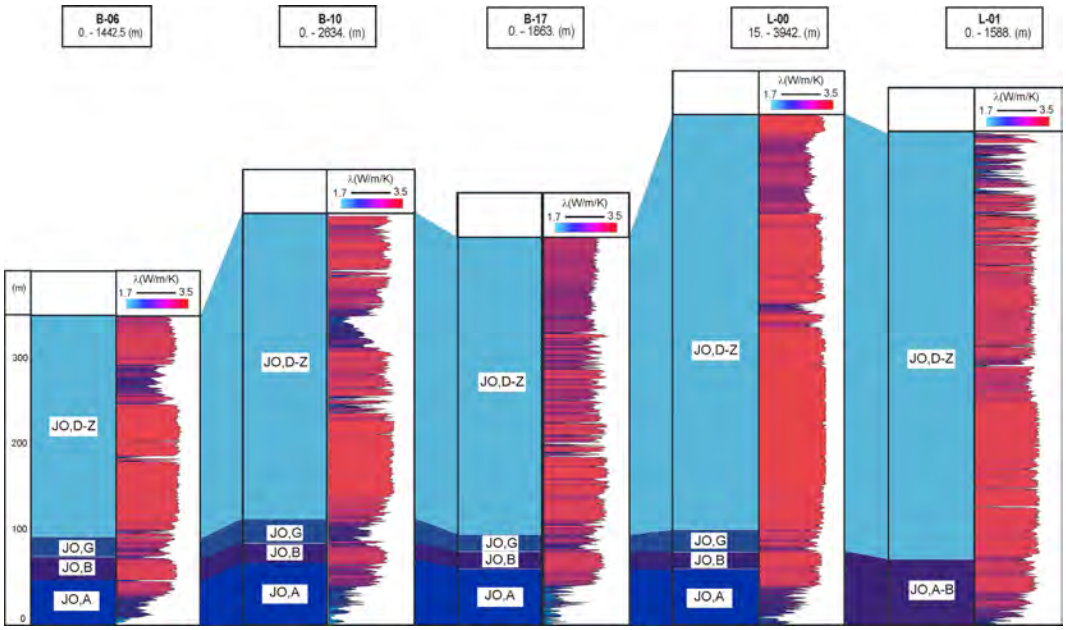


Abbildung 5.13: *Berechnete Wärmeleitfähigkeitsprofile für den Oberjura. Die dargestellten Bohrungen liegen auf einem West-Ost-Profil. Die Abkürzung für die stratigraphischen Einheiten sind wie folgt: JO,A: Malm alpha; JO,B: Malm beta; JO,G: Malm gamma; JO,D-Z: Malm delta-zeta. λ: Wärmeleitfähigkeit.*

Malm γ nicht weiter differenzieren, da hier die Formation insgesamt kalkiger und homogener ausgeprägt ist. In dieser Region wurde die von Nordwesten bodennah anströmende tonige Trübe durch das Ries-Wiesent-Riff, welches im Malm Gamma bis Delta als Schranke fungierte, zurückgehalten. Das Riff trennte somit die mergelreiche Fazies des fränkisch-schwäbischen Beckens im Westen, von der kalkreichen Fazies östlich davon (Meyer, 1996). Für den oberen Malm γ bis ζ konnte in sämtlichen Bohrungen anhand der Logs keine eindeutige Unterteilung vorgenommen werden. Hier treten im Gebiet Fazieswechsel zwischen Plattenkalken und Riffkalken auf, die aber nur geringen Einfluss auf die durchschnittlichen Wärmeleitfähigkeiten haben (siehe Tabelle 5.10). Einen größeren Einfluss hat das Auftreten von Kluftzonen, die in den Profilen durch geringere Wärmeleitfähigkeiten auffallen. Hier ist zu bemerken, dass die berechneten Wärmeleitfähigkeiten für den rein konduktiven Fall gelten. Die Gesamtwärmeleitfähigkeit wird durch den Gesamtwassergehalt in den Kluftzonen erniedrigt. Für die Betrachtung im Sinne der geothermischen Nutzung ist davon auszugehen, daß der effektiv mögliche Wärmeentzug in geklüfteten, wasserführenden Zonen deutlich größer ist. Der Oberjura der Schwäbischen und Fränkische Alb ist durch erhebliche Verkarstungserscheinungen geprägt. In den betrachteten Bohrungen, die den Oberjura im Untergrund des Molassebeckens erschließen, wird keine ausgeprägte Verkarstung indiziert. Auftretende Kluftzonen sind meist kleinräumig begrenzt. Die mittleren Porositäten (aus Bohrberichten) liegen unter 5 Prozent. Der Malm δ bis ζ kann im betrachteten Untersuchungsgebiet als mäßig durchlässiger regionaler Aquifer betrachtet werden mit lokal stark variierenden Durchlässigkeiten.

Tabelle 5.10: *Statistik der aus den Logs berechneten Wärmeleitfähigkeiten*

Well	Top (m)	Bottom (m)	Net (m)	Min ($Wm^{-1}K^{-1}$)	Max ($Wm^{-1}K^{-1}$)	Mean ($Wm^{-1}K^{-1}$)	Std Dev ($Wm^{-1}K^{-1}$)
B-06	484	847,4	361,713	1,584	3,109	2,836	0,244
B-10	1806	2300	494,121	1,12	3,109	2,719	0,343
B-17	1245	1712,5	467,619	1,122	3,102	2,711	0,312
L-00	3226	3842	616,097	1,702	3,109	2,921	0,22
L-01	884,072	1478,128	594,221	1,057	3,109	2,805	0,329

Kapitel 6

Statistische Modellierung geothermischer Reservoire

Die Anwendung geostatistischer Algorithmen, z.B. aufgeführt in Caers (2005), zur Unterstützung der numerischen Modellierung geothermischer Reservoire ermöglicht eine realistische räumliche Quantifizierung von Unsicherheiten in einem Zielgebiet. Als Basisdaten für diese Methode können Bohrlochinformationen dienen, wie sie im Rahmen dieses Projekts erhoben worden sind. Diese Quantifizierung von Unsicherheiten von Gesteinseigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit oder Permeabilität und von Zustandsvariablen wie Temperatur und Druck in einem geothermischen Reservoir erlaubt eine genauere Prognose der Kosten und des Fündigkeitsrisikos und dient somit der Planung geothermischer Anlagen.

Die stochastischen Algorithmen wurden im Rahmen der hier durchgeführten Arbeiten speziell zur Vorhersage der räumlichen Verteilung von thermischen Gesteinseigenschaften wie der Wärmeleitfähigkeit angewandt. Hierzu wurde ein Ensemble von Realisationen eines Reservoirmodells erzeugt. Jede Realisierung war gleichwahrscheinlich im Hinblick auf die zur Verfügung stehenden gemessenen Daten. Durch die numerische Simulation von Wärmetransport und Fluidfluss für jede Realisation wurden die Zustandsvariablen im Reservoir vorhergesagt. Da große Ensembles betrachtet wurden, konnten nicht nur Mittelwert und Fehler eines Zielparameters vorhergesagt werden, sondern dessen lokale Häufigkeitsverteilung.

Ein weiterer methodischer Fortschritt bestand in der zusätzlichen Konditionierung des Ensembles, erstellt mit Hilfe von Gesteinsparametermessungen, auf gemessene Zustandsvariablen in einem einschränkenden Verfahren. Realisierungen, welche nicht zu gemessenen Temperaturen oder Marker-Konzentrationen passten, wurden verworfen. Dadurch wurden zusätztliche Informationen zur Reservoircharakterisierung genutzt, was vor allem in Hinblick auf die oftmals geringere Bohrlochdichte in der geothermischen Exploration im Vergleich zur Kohlenwasserstoffexploration von Vorteil ist.

6.1 Sequentielle Gaußsche Simulation

Der stochastische Algorithmus der Sequentiellen Gaußschen Simulation *Sgsim* aus der Geostatistischen Software Bibliothek GSLIB (Deutsch und Journel, 1998) wurde im Rahmen dieses Projekts als Modul *Shemat_sm* in die hauseigene Wärme- und Transport-Software *Shemat_suite* (Rath et al., 2006), Nachfolger des Programms *Shemat* (Clauser, C. (ed), 2003, Simulator for HEat and MAss

Transport), implementiert. Der Algorithmus dient der stochastischen Schätzung von räumlich korrelierten Parametern. Mit Hilfe des Moduls ist es möglich, einen oder mehrere Gesteinsparameter und sogar Randwerte schätzen zu lassen. Zudem erlaubt das Modul parallele Berechnung verschiedener Realisationen auf mehreren Prozessorkernen, die Anpassung verschiedener Gittergeometrien für die Transportrechnung und die stochastische Simulation sowie die Berechnung im linearen und logarithmischen Modus. Für jede einzelne geologische Einheit eines Modells ist es nun möglich, ein Ensemble von Realisationen eines Gesteinsparameters zu generieren:

1. Ein geometrisches Modell eines geothermischen Reservoirs wird entworfen und eine Diskretisierung festgelegt.

2. Alle Daten werden in eine gaußsche Form transformiert mit einem Mittelwert von eins und einer Standardabweichung von null.

3. Der Algorithmus schreitet das Modell in einem Zufallspfad ab.

4. Für jede Gitterzelle werden nahe Messdaten und bereits simulierte Daten für das Interpolationsverfahren Kriging (Deutsch und Journel, 1998) benutzt. Kriging liefert einen Kriging-Mittelwert und Kriging-Fehler an der simulierten Position.

5. Der Zelle wird ein zufällig gezogener Wert aus der Kriging-Verteilung zugewiesen.

6. Dies berücksichtigt (a) die angenommene Parameterhäufigkeitsverteilung; (b) die Korrelationslänge; (c) Primärdaten (wie Bohrlochdaten); (d) Sekundärdaten (wie seismische Messungen).

7. Eine Realisation ist vollständig erstellt, wenn alle Gitterzellen bearbeitet worden sind.

8. Das Modell wird von einer gaußschen Form in die ursprüngliche Form zurücktransformiert.

9. Für jede weitere Realisation wird der Zufallspfad neu abgeschritten. Jede Realisation ist gleichwahrscheinlich im Hinblick auf die gemessenen Daten (siehe Abbildung 6.1).

Innerhalb des Moduls *Shemat_sm* wird für jede Realisation direkt nach der stochastischen Zuweisung der Gesteinseigenschaften der Wärmetransport und Fluidfluss berechnet. Dies erspart aufwändige Konvertierungsarbeit. Schließlich wird dadurch ein Ensemble der Zustandsvariablenfelder erzeugt.

6.2 Methodentest und einschränkendes Verfahren

Im Rahmen des Projekts wurde der Algorithmus zunächst mit Hilfe der Stanford Geostatistical Modeling Software *SGeMS* (Remy, 2004) im Hinblick einer Reproduktion der vorgegebenen Histogramme, Korrelationslängen und Daten getestet. Da diese Tests zufriedenstellend verliefen, wurde das Modul *Shemat_sm* implementiert.

Als darauf folgender Test des stochastischen Ansatzes zur Reservoircharakterisierung wurden die Auswirkungen einer variablen Anzahl von Bohrungen auf die Qualität der Reproduktion eines synthetischen Reservoirs mit geostatistischen Methoden untersucht. Hierbei bestand das synthetische Reservoir, das Referenzmodell (siehe Abbildung 6.2), aus $12 \times 12 \times 12$ Zellen – was $1{,}2\,\mathrm{km} \times 1{,}2\,\mathrm{km}$

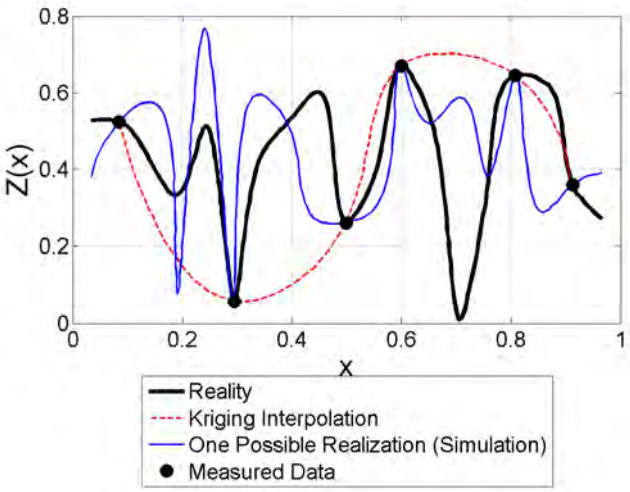


Abbildung 6.1: *1D-Beispiel für geostatistische Parameterschätzung. Dargestellt ist das Interpolationsverfahren Kriging und eine Realisation generiert mit* Sgsim *(nach Schafmeister (1999)).*

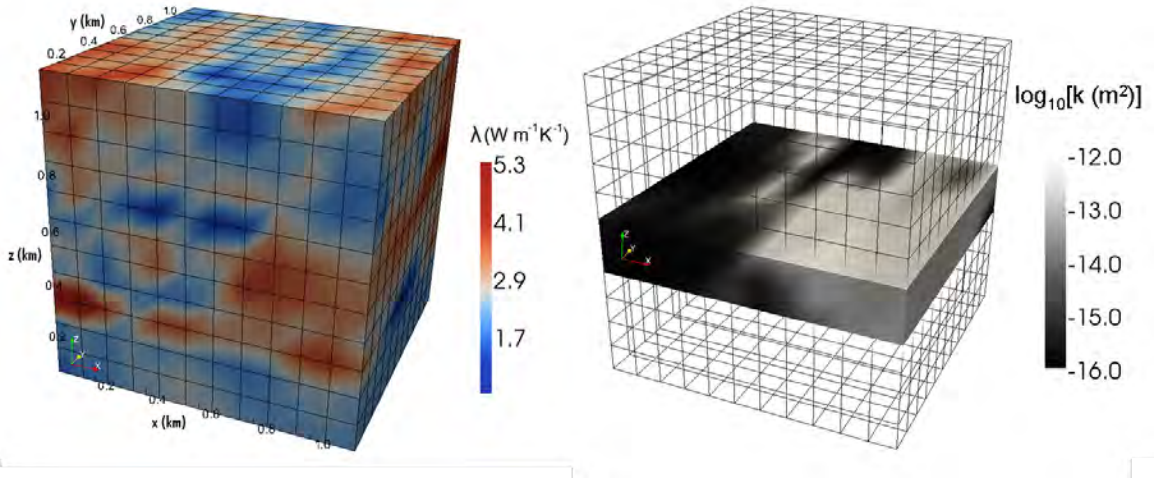
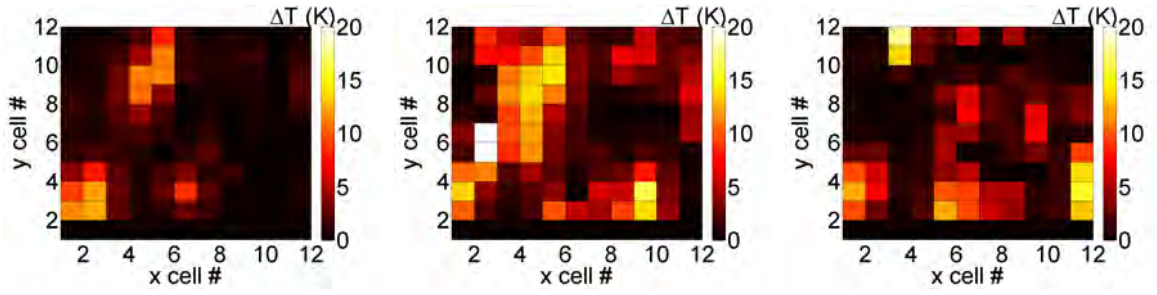


Abbildung 6.2: *Referenzmodell: Einzelne Realisation der Wärmeleitfähigkeit λ (links) und der Permeabilität k (rechts) erzeugt mit dem* Sgsim*-Algorihmus. Die transparente Darstellung dient der besseren Visualisierung der zentralen permeablen Schicht.*

$\times$ 1,2 km entsprach und vier geologischen Schichten. In jeder Schicht wurden unterschiedliche Gaußsche Verteilungen der Wärmeleitfähigkeit λ mit Hilfe von *Sgsim* generiert. Zudem wurde eine bimodale Permeabilitätsverteilung k mit Werten zwischen $10^{-16}\,\mathrm{m}^2$ und $10^{-12}\,\mathrm{m}^2$ erzeugt. Das Modell wurde durchströmt und eine Zeit von 50 Jahren wurde simuliert.

Bei einer geringen Bohrlochdichte im Reservoir hat sich ein zusätzlicher Abgleich mit der Zielgröße der Transportsimulation, z.B. Temperatur, mit vorhandenen Messdaten in einem einschränkenden Verfahren bewährt. Realisationen, welche die Messwerte nicht in hinreichender Genauigkeit reproduzierten, wurden dadurch verworfen und die Breite der Temperaturverteilung (und damit die Unsicherheit) somit weiter begrenzt.



(a) (b) (c)

Abbildung 6.3: *Temperaturunterschied ΔT zwischen Referenzmodell und drei simulierten Realisationen jeweils konditioniert auf drei Bohrungen. Die absolute Temperatur in dieser Tiefe betrug 30 °C.*

6.2.1 Modellrekonstruktion mit einer variablen Anzahl von Bohrungen

Randwerte, Häufigkeitsverteilungen und Korrellationslängen als bekannt annehmend wurde ein Ensemble von Realisationen mit Hilfe von *Sgsim* generiert, welches das Referenzmodell reproduzieren sollte. Hierbei wurde die stochastische Simulation auf die Reproduktion von Wärmeleitfähigkeiten und Permeabilitäten konditioniert, welche in synthetischen Bohrlöchern im Referenzmodell gemessen wurden. Zwischen den einzelnen Simulationsläufen wurde die Anzahl der vorhandenen Bohrlöcher gesteigert. Die Position der Bohrungen wurde zufällig gewählt. Zielparameter war zusätzlich zu den genannten Gesteinseigenschaften die Temperatur, welche durch die Transportsimulation bestimmt wurde. Mit der Temperatur wurde eine entscheidende Größe bei der Planung geothermischer Projekte als Zielparameter gewählt.

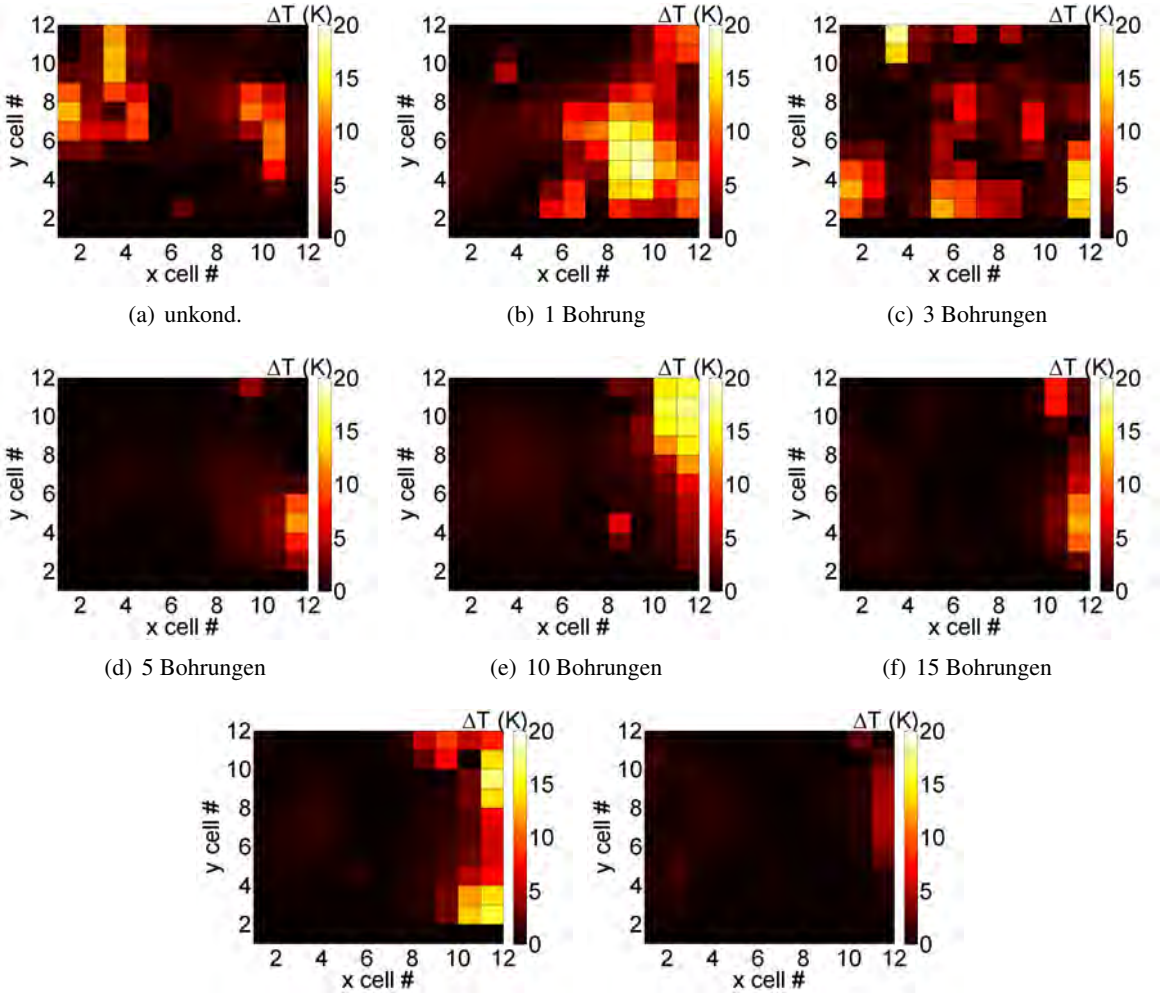
Abbildung 6.3 illustriert den Unterschied in den Temperaturfeldern ΔT zwischen Referenzmodell und drei simulierten Realisationen. Daten aus je drei Bohrungen wurden zur Konditionierung herangezogen. Ein horizontaler Schnitt durch die Mitte des Modells wird dargestellt. Offensichtlich stimmen einige Realisationen (hier: (a)) mit dem Referenzmodell besser überein als andere.

Im Gegensatz dazu ist in Abbildung 6.4 je eine typische Realisation für eine variierende Bohrlochzahl dargestellt. Wie erwartet steigt die Güte der Reproduktion mit der Anzahl der verwendeten Bohrungen. Für geringe Bohrlochzahlen (Realisationen (b) und (c)) liefert eine konditionierte Simulation keine besseren Ergebnisse als eine unkonditionierte (Realisation (a)). Nichtsdestotrotz finden sich auch bei unkonditionierten Simulationen oder Simulationen mit geringer Bohrlochdichte gute Übereinstimmungen mit dem Referenzmodell (Realisation (d)).

Eine gute Übereinstimmung der Temperatur geht meist mit einer guten Übereinstimmung der Permeabilität einher. Dies zeigt, dass der Fluidtransport und damit verknüpft die hydraulischen Gesteinseigenschaften wie die Permeabilität einen signifikanteren Einfluss auf das Temperaturfeld ausüben, sofern Fließgeschwindigkeiten in der Größenordnung wie hier vorliegend vorkommen. In diesem Fall führt dies zu großen Temperaturunterschieden ΔT bis hin zu 20 K bei einer absoluten Temperatur von 30 °C.

6.2.2 Eingrenzen der Ensembles

Um die bei geothermischen Reservoiren im Gegensatz zu Kohlenwasserstoffexploration häufig vorliegende geringe Bohrlochdichte auszugleichen, wurde ein einfaches einschränkendes Verfahren zur



(a) unkond. (b) 1 Bohrung (c) 3 Bohrungen

(d) 5 Bohrungen (e) 10 Bohrungen (f) 15 Bohrungen

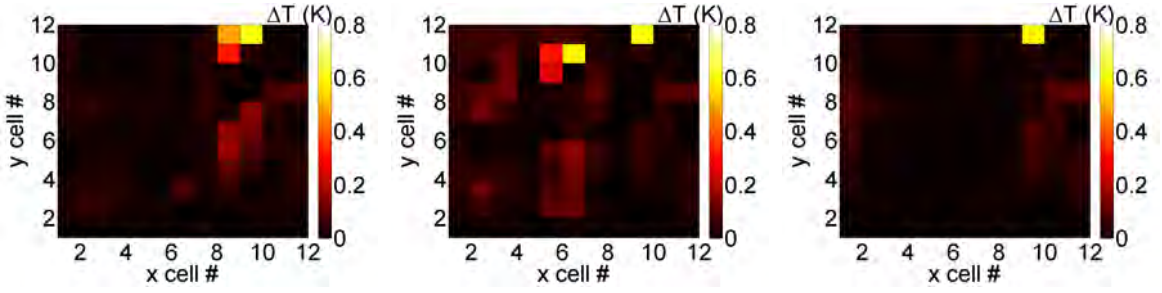
(g) 20 Bohrungen (h) 25 Bohrungen

Abbildung 6.4: *Temperaturunterschied ΔT zwischen Referenzmodell und simulierten Realisationen (a) unkonditioniert und (b) bis (h) konditioniert auf eine steigende Anzahl Bohrungen.*

Selektion angewandt, um eine zusätzliche Konditionierung gemäß gemessenen Zustandsvariablen zu erreichen und so die Vorhersagegenauigkeit zu erhöhen bzw. die Unsicherheitsbreite zu verringern. In diesem Fall wird wiederum die Zustandsgröße Temperatur betrachtet. Es wurden je ein einzelner Temperaturmesswert T^i_{ref} pro Bohrung in der permeablen Schicht unter Annahme von drei synthetischen Bohrungen $i = 1, 2, 3$ im Reservoir verwendet und mit der dazugehörigen simulierten Temperatur T^i_{sim} verglichen. Diese Auswahl spiegelte die eventuelle Verfügbarkeit von sogenannten Bottom-Hole Temperatures (BHT), Temperaturmessungen am Grund eines Bohrlochs, wieder. Hierfür wurde ein großes Ensemble von 50 unkonditionierten Realisationen generiert. Wenn einer der drei Vergleichsparameter c_i (Gleichung 6.1) einen bestimmten Wert überstieg, wurde die Realisation aus dem Ensemble entfernt.

$$c_i = \frac{|T^i_{sim} - T^i_{ref}|}{T^i_{ref}} \tag{6.1}$$

Abbildung 6.5 zeigt die drei besten Realisationen. Ein Vergleich mit Abbildung 6.3 verdeutlicht, dass



(a) (b) (c)

Abbildung 6.5: *Temperaturunterschied ΔT zwischen Referenzmodell und simulierten Realisationen nach Anwendung des Monte-Carlo-Verfahrens.*

die Anwendung der Selektion den maximalen Temperaturuntschied von 20 K auf 0,8 K senken konnte, obwohl *Sgsim* nur unkonditioniert verwendet wurde. Dies beweist die Effektivität des einschränkenden Verfahrens, zumindest bei Reservoiren, deren Temperatur im Wesentlichen von einem Fluidfluss bestimmt wird.

6.3 Feldstudie für ein geothermisches Reservoir

Es konnte ein realer Datensatz zum Test des entwickelten Geostatistik-Moduls *Shemat_sm* gewonnen werden. Es wäre hierbei wünschenswert gewesen, einen geeigneten Datensatz aus einem der beiden Arbeitsgebiete zu erhalten; dies ist jedoch nicht gelungen, da Bohrlochlokationen mit brauchbaren Daten nicht wie erforderlich in der nötigen Dichte zur Verfügung gestellt werden konnten. Mögliche Datensätze im östlichen Molassebecken wurden beispielsweise von den Eignern nicht freigegeben, weil hier noch aktiv Kohlenwasserstoffe erkundet werden. Da die methodische Weiterentwicklung im Vordergrund steht, wurde auf einen Datensatz aus dem Westniederländischen Becken zurückgegriffen, der für ein Geothermieprojekt in Den Haag, Niederlande, (Anonymous, 2006) genutzt wurde. Im Rahmen der Planungsarbeiten für eine tiefe geothermische Dublette in Den Haag wurde die Geophysica Beratungsgesellschaft mbH beauftragt, ein regionales Temperaturmodell, sowie ein Reservoirmodell für den Zielhorizont in 2500 m Tiefe zu erstellen (Pechnig et al., 2008). Der Standort der geplanten Dublette befindet sich in einer Region, die durch die Kohlenwasserstoffindustrie intensiv in den letzten Jahrzehnten untersucht wurde. Entsprechend dicht ist das Netz seismischer Profile und Explorations- sowie Produktionsbohrungen. Die zum Aufbau der Modelle notwendigen Informationen zum geologischen Untergrund sowie geophysikalische Bohrlochdaten aus den umliegenden Bohrungen wurden freundlicherweise vom TNO Built Environment and Geosciences (Delft, Niederlande) zur Verfügung gestellt. Das zu Grunde liegende geothermische System weist aufgrund der bekannten geologischen Verhältnisse in diesem Gebiet (Simmelink und Vandeweijer, 2008) keinen signifikanten Fluidstrom auf. Daher wird das Temperaturfeld von den thermischen Gesteinseigenschaften bestimmt. Es genügt also, eine stationäre Simulation derselben zur Charakterisierung der Reservoirtemperatur. Aus einer Kombination von Labormessungen an Bohrkleinproben und bohrlochgeophysikalischen Messdaten wurden seitens der Geophysica Beratungsgesellschaft mbH die für das Temperaturmodell notwendigen Eingangsparameter (Wärmeleitfähigkeit, radiogene Wärmeproduktion, Porosität) ermittelt und ein regionales Temperaturmodell mit einer Kantenlänge von ca. 25 km $\times$ 25 km und einer Tiefe von 5 km erstellt (Abbildung 6.6). Freundlicherweise wurde dieses Modell und die darin implementier-

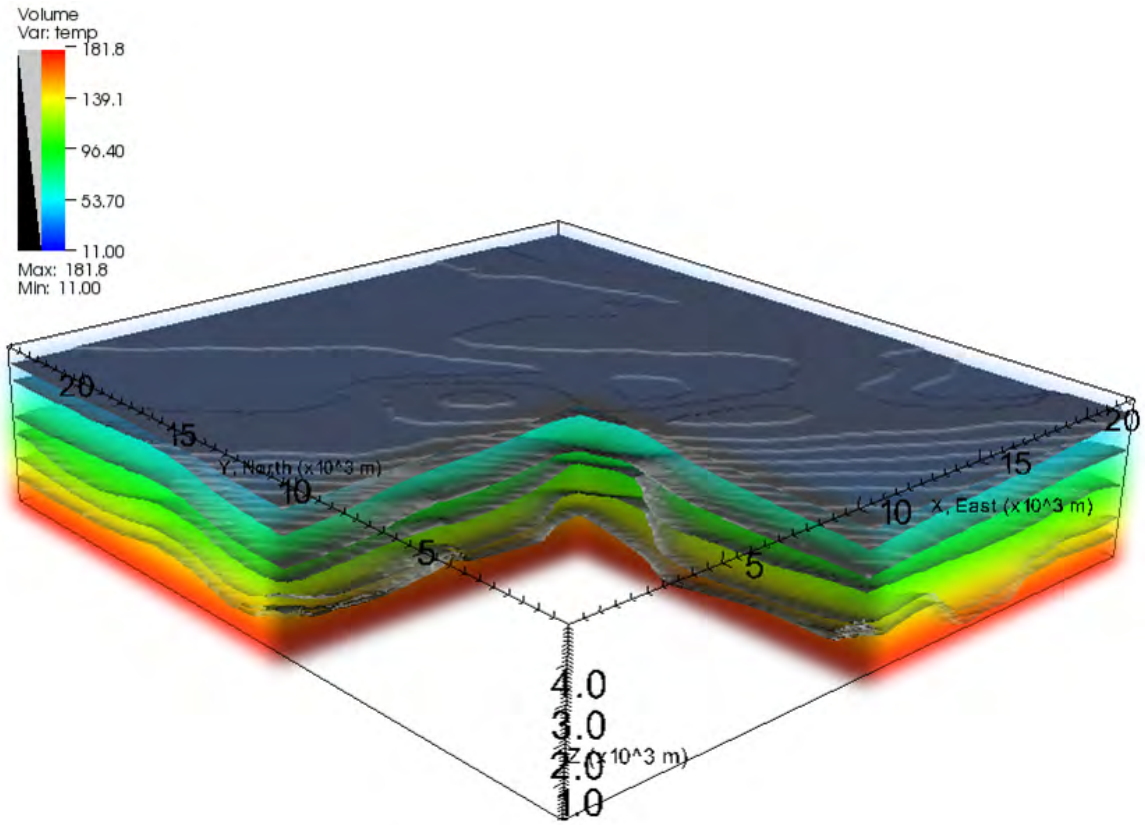


Abbildung 6.6: *Regionales 3D-Temperaturmodell für Den Haag mit Darstellung der einzelnen Schichten und der berechneten Temperaturwerte (Geophysica Beratungsgesellschaft, 2008). Im vorliegenden Modell ist jede geologische Modelleinheit durch einen konstanten Wert für die Wärmeleitfähigkeit charakterisiert.*

ten Datensätze vom Auftraggeber IF Technology (Arnheim, Niederlande) für weitere Forschungen freigegeben.

Die Unsicherheit der Temperaturvorhersage ergab sich in einer ersten Annahme aus einer Zuweisung eines Minimalwerts (Mittelwert abzüglich Standardabweichung) und eines Maximalwerts (Mittelwert zuzüglich Standardabweichung) für jede einzelne geologische Einheit.

Abbildung 6.7 zeigt die Temperaturvorhersage des Modells im Vergleich zu zehn gemessenen und korrigierten BHT im Zielgebiet. Wie in der Abbildung offensichtlich zu erkennen ist, werden die BHT vom Modell erfolgreich reproduziert, allerdings wird die Unsicherheit stark überschätzt. Informationen zu BHT-Fehlern und deren Korrekturen findet sich in Förster (2001), Hermanrud et al. (1990) und Deming (1989).

6.3.1 Quantifizierung und Eingrenzung der Vorhersageunsicherheit

Ziel der geostatistischen Simulationen, die im Rahmen dieses Projektes durchgeführt wurden, war es, die Vorhersageunsicherheit der Temperatur deutlich zu reduzieren. Dazu wurde die Wärmeleitfähigkeit in sechs der neun implementierten geologischen Einheiten stochastisch simuliert. Hierbei wurden die Häufigkeitsverteilungen der Wärmeleitfähigkeiten, welche als Eingangsparameter für das Tempe-

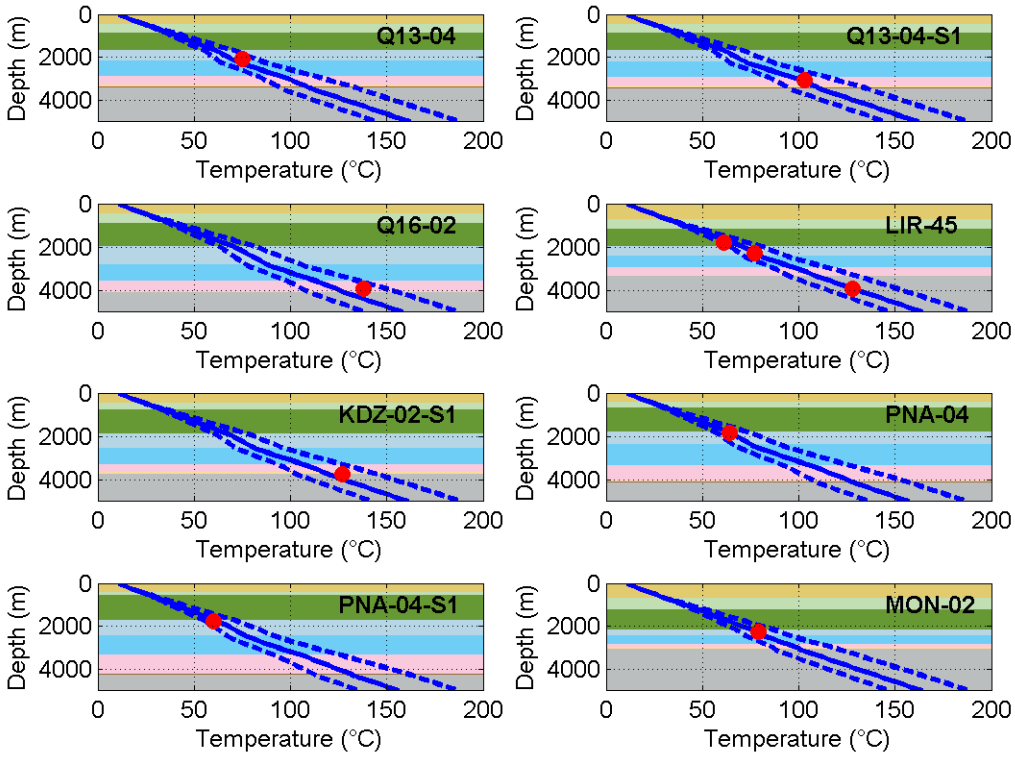


Abbildung 6.7: *Temperaturvorhersage (blaue Linie) an den Positionen der BHT und BHT-Messwerte (rote Punkte) sowie eine Unsicherheitsabschätzung (blaue gestrichelte Linie).*

raturmodell der Geophysica zur Verfügung standen (siehe oben), mit Hilfe des *Sgsim*-Algorithmus den Schichten zugewiesen, nicht mehr nur der Mittelwert. Aufgrund der fehlenden Advektion genügt eine stochastische Simulation dieser thermischen Gesteinseigenschaft zur Reservoircharakterisierung. Allerdings war hierdurch auch die Anwendung eines einschränkenden Verfahrens zur Selektion der erfolgreichsten Realisationen weniger effizient.

Zunächst wurde die Auswirkung der Korrelationslänge der geologischen Strukturen auf die Vorhersage der Temperaturverteilung und deren Mittelwert an bestimmten Ziellokationen untersucht. Dazu wurde jeweils der Mittelwert der Temperatur eines Ensembles aus zehn Realisationen an der Ziellokation betrachtet. Eine breite Streuung von Korrelationslängen von 50 m bis 1500 m in vertikaler Richtung wurde angenommen. Dabei wurde eine Schwankung des Mittelwerts von bis zu 2,5 K festgestellt. Dies diente zunächst als zusätzliche additive Unsicherheitsquelle. Allerdings konnte die Korrelationslänge im Folgenden genauer eingegrenzt werden, so dass diese Unsicherheitsquelle entfiel. Interessanterweise reproduzierten kleine Korrelationslängen eine Temperaturvorhersage, die der Vorhersage ohne stochastische Simulation gleicht. Dies ist auf eine effektive Mittelung bei häufig wechselnden Werten der Gesteinseigenschaften zurückzuführen, welche mit der Wahl kleiner Korrelationslängen einhergeht. Da der konduktive Wärmetransport primär durch die vertikale Richtung bestimmt wird, konnten Korrelationslängen in horizontaler Richung beliebig gewählt werden.

Zur Bestimmung der Korrelationslänge in vertikaler Richtung wurden die aus dem Logging einer

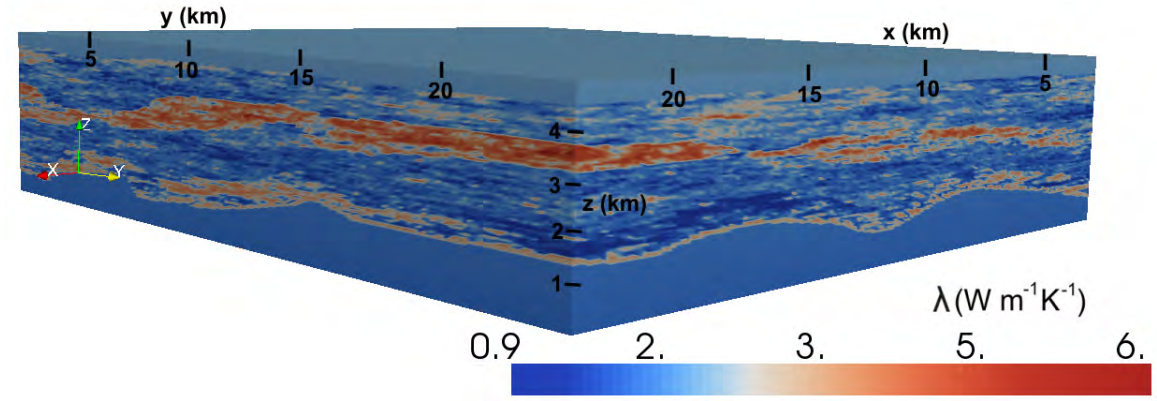


Abbildung 6.8: *Eine beispielhafte Realisation der Wärmeleitfähigkeiten im Modell.*

Kalibrationsbohrung bekannten Positionen der Wärmeleitfähigkeitswerte zur Erstellung eines Semi-Variogramms (Deutsch und Journel, 1998) verwendet, welches ein Maß für die Unähnlichkeit von Wertepaaren in Bezug auf ihren räumliche Abstand darstellt. Hieraus konnten Korrelationslängen von 50 m bis 450 m in vertikaler Richtung erfasst und den geologischen Einheiten im Modell zugewiesen werden.

Es wurde ein Ensemble von 1000 Realisationen der Temperatur ausgehend von 1000 Realisationen der Wärmeleitfähigkeit simuliert. Eine Realisation ist beispielhaft in Abbildung 6.8 dargestellt. Dieses Ensemble wurde mit Hilfe vorhandener Messwerte der Zustandsgröße Temperatur weiter eingeschränkt.

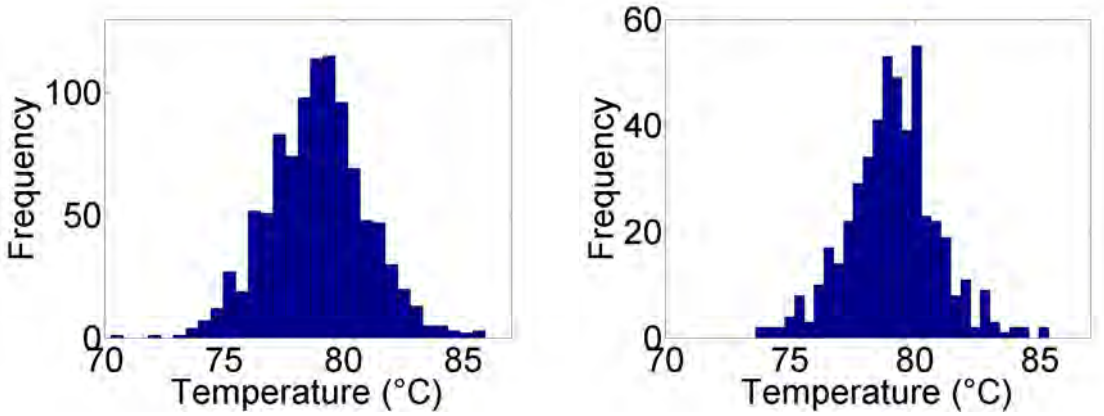
6.3.2 Selektionsverfahren

Wie zuvor (Abschnitt 6.2.2) bereits erwähnt, sind einschränkende Verfahren in der Lage, den Prozess der Unsicherheitsminimierung signifikant zu unterstützen. Daher wurde das Verfahren auch in diesem Fall angewandt, obwohl weniger vielversprechende Ergebnisse erwartet wurden, da die Modellierung keine hydraulischen Eigenschaften beinhaltet. Das Temperaturfeld aller 1000 Realisationen wurde mit den gemessenen BHT verglichen. Laut Hermanrud et al. (1990) sind fortgeschrittene Korrekturverfahren für BHT-Messwerte typischerweise mit einem Fehler von ± 9 K behaftet. Dieser BHT-Fehler wurde für das einschränkende Auswahlverfahren derart genutzt, dass alle Realisationen, deren Temperaturfeld an mindestens einem Ort der BHT-Messung um mehr als ± 9 K vom BHT-Wert abweicht, aus dem Ensemble entfernt wurden.

488 von 1000 Realisationen verblieben nach der Selektion im Ensemble. Die Unsicherheit in Form der vollen Verteilungsbreite konnte durch das einschränkende Verfahren von 16 K auf 12 K gesenkt werden, wie in Abbildung 6.9 gezeigt. Dies belegt den Wegfall von Realisationen mit extremen Abweichungen in der Temperaturvorhersage vom Mittelwert. Der Mittelwert der Verteilung von 79 °C blieb erhalten. Die Standardabweichung wurde von 2.0 K auf 1.8 K gesenkt.

Analog zur Abbildung 6.7 sind die Temperaturvorhersagen an den Positionen der BHT für das Ensemble aus 488 Realisationen in Abbildung 6.10 dargestellt. Die BHT wurden offensichtlich mit einer adäquaten Unsicherheit reproduziert.

Insgesamt konnte die Unsicherheit durch den statistischen Ansatz signifikant von 25 K auf 12 K (volle Verteilungsbreite) gesenkt werden, wie in Abbildung 6.12 zu sehen. Die Unsicherheit kann ebenfalls



(a) 1000 Realisationen (b) 488 Realisationen

Abbildung 6.9: *Temperaturvorhersage an der geplanten Ziellokation (a) für das ursprüngliche Ensemble und (b) nach der Selektion.*

mit einer Standardabweichung von 1,8 K angegeben werden, wenn eine gaußschen Form der Verteilung angenommen wird. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Temperatur an der möglichen Ziellokation die angestrebte Projekt-Temperatur von 75 °C übersteigt, liegt aufgrund dieser Vorhersage bei 97 % (ursprüngliche Schätzung) bzw. 99 % (nach Anwendung des einschränkenden Verfahrens). Dies ist für die Machbarkeit des Geothermieprojekts als sehr positiv zu bewerten.

6.4 Stochastische Simulation der Wärmestromdichte

Die Möglichkeit, im entwickelten Modul von *Shemat_suite* auch Randbedingungen stochastisch simulieren zu können, wurde ausgenutzt, um zusätzlich zur stochastischen Simulation der Gesteinseigenschaften ebenfalls die Wärmestromdichte q an der Basis des Modells zu variieren. Der Mittelwert von $q = 63\,\mathrm{mW\,m^{-2}}$ wurde gaußisch um die Standardabweichung von $\pm 3\,\mathrm{mW\,m^{-2}}$ variiert. Jeder Gitterzelle an der Modellbasis wurde derselbe Randwert zugewiesen. Wiederum wurden 1000 Realisationen erstellt.

Die Abbildungen 6.11 und 6.12(b) zeigen die Ergebnisse des vollständigen stochastischen Ansatzes inklusive der Selektion. Da nun erwartungsgemäß eine wesentlich breitere Verteilung vorliegt (24 K), hat sich eben diese Selektion als wesentlicher Bestandteil der Unsicherheitsreduktion herausgestellt. Nur 245 Realisationen verblieben im Ensemble. Durch das einschränkende Verfahren konnte die Unsicherheit auf 11 K reduziert werden. Dieser Wert ist sogar kleiner als der Wert bei Berücksichtigung einer statischen Wärmestromdichte, was auf die geringere statistische Relevanz der kleineren Menge an verbleibenden Realisationen zurückzuführen ist. Der Mittelwert von 79 °C blieb bei allen Verteilungen wiederum erhalten. Die Standardabweichung jedoch konnte hier in weit größerem Maße als zuvor von 4.3 K auf 2.1 K gesenkt werden.

Insgesamt erlaubt die stochastische Simulation von Randbedingungen einen realistischeren und breiten Blick auf die Unsicherheitsbeurteilung. Hierbei ist eine Eingrenzung der Realisationen von größerer Bedeutung als im Fall von statischen Randbedingungen. Obwohl es sich hier nicht um ein Fluidfluss-dominiertes System handelt, erwies sich eine Selektion als sehr effektive Methode zur Unsicherheitsreduktion. Die Wahrscheinlichkeit eines Erreichens der angestrebten Projekt-Temperatur von 75 °C

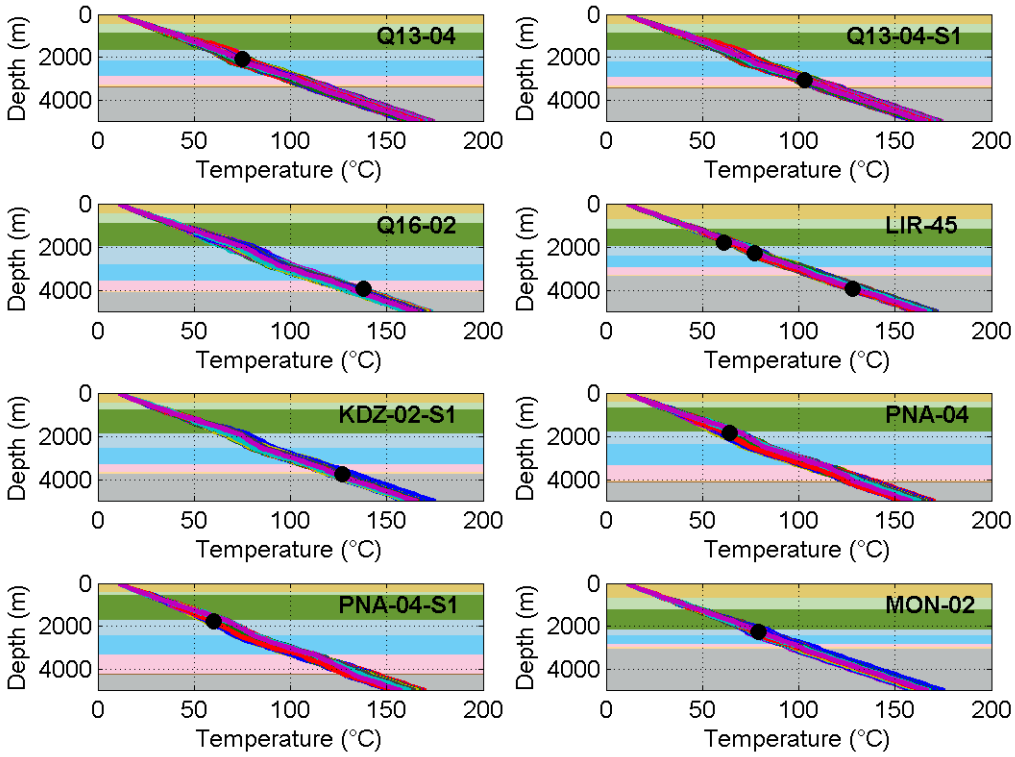
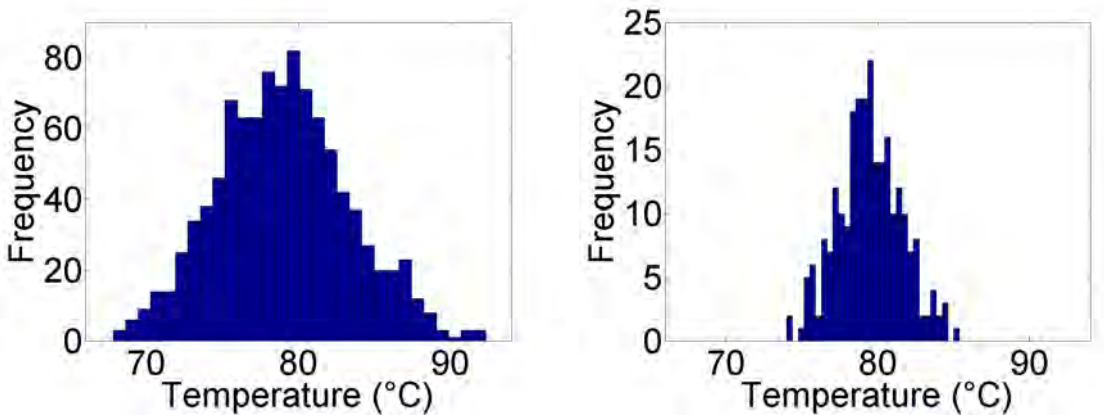


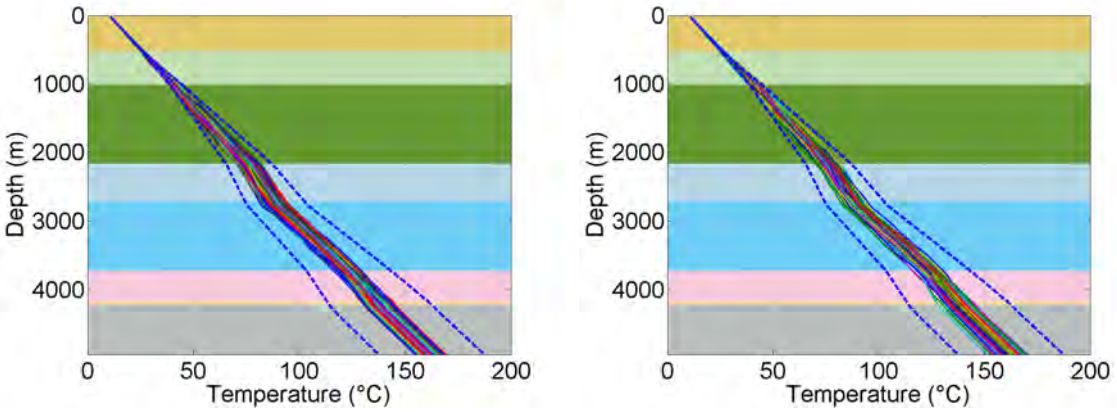
Abbildung 6.10: *Temperaturvorhersage (farbige Linien) an den Positionen der BHT und BHT-Messwerte (schwarze Punkte) nach der Selektion im Vergleich zur ursprünglichen Unsicherheitsabschätzung (blaue gestrichelte Linien).*

konnte in diesem Fall durch Anwendung des Selektionverfahrens von 80 % auf wiederum 99 % angehoben werden.



(a) 1000 Realisationen (b) 138 Realisationen

Abbildung 6.11: *Temperaturvorhersage an der geplanten Ziellokation (a) für das ursprüngliche Ensemble und (b) nach der Selektion. Die Wärmestromdichte wurde hier ebenfalls stochastisch variiert.*



(a) Nur Wärmeleitfähigkeiten (b) Inklusive Wärmestromdichte

Abbildung 6.12: *Temperaturvorhersage (farbige Linien) an der geplanten Ziellokation nach der Selektion im Vergleich zur ursprüngliche Unsicherheitsabschätzung (blaue gestrichelte Linien). Im Fall (b) wurde ebenfalls die Wärmestromdichte stochastisch variiert. Hierbei ist zu beachten, dass die ursprüngliche Unsicherheitsabschätzung auf einem Mittelwert der Wärmestromdichte basiert.*

Kapitel 7

Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

7.1 Erzielte Ergebnisse

Hauptzeil dieser Studie war die Erstellung einer Datenbasis statistisch abgesicherter thermischer und hydraulischer Gesteinseigenschaften für den tiefen Gesteinsuntergrund in Deutschland. Die bereitgestellten Daten wurden durch direkte Labormessungen an Bohrkernen und durch eine indirekte Ableitung aus einer Kombination unabhängiger Bohrlochmessungen bestimmt. Das Vorgängerprojekt (Phase 1) bearbeitete die Gesteinsserien des westlichen Bereichs des Süddeutschen Molassebeckens (Clauser et al., 2007). Im vorliegenden Bericht zur Phase 2 lag der Fokus auf den Gesteinsserien des westlichen Nordrhein-Westfalens und ergänzend auf den lithostratigraphischen Einheiten im Untergrund des östlichen Molassebeckens in Bayern.

Die Übersichten zu den statistischen Kennwerten der Hauptgesteinstypen und stratigraphischen Einheiten sind in den Kapiteln zu den verschiedenen Arbeitsgebieten aufgeführt und erläutert. Eine zusammenfassende Übersicht ist darüber hinaus in der Kurzfassung am Anfang des Berichts gegeben. Kapitel 3 enthält die Tabellen und Diagrammen zu den tertiären Lockersedimenten der Niederrheinischen Bucht, Kapitel 4 zum darunter liegenden paläozoischen Festgesteinsuntergrund, der über den Niederrhein hinaus bis in den Ruhrgebietsraum und in Teilen des rechtsrheinischen Schiefergebirges bearbeitet wurde, und Kapitel 5 zum bayerischen Teil des Süddeutschen Molassebeckens. Letzteres wurde ergänzend zu den Ergebnissen aus dem Westteil des Süddeutschen Molassebeckens und dem nördlich angrenzenden Süddeutschen Schichtstufenland aus der Projektphase 1 untersucht.

Nachfolgend wird zunächst der Mehrwert der Datenbasis am Beispiel der Wärmeleitfähigkeit von Sandsteinen illustriert, die im Rahmen der beiden Projektphasen untersucht wurden. In den darauf folgenden Abschnitten werden die Hauptergebnisse entsprechend den in der Einleitung vorgegebenen Aufgaben (Abschnitt 1.3) zusammengefasst.

Datenbasis am Beispiel von Sandsteinen

Sandsteine unterscheiden sich in Abhängigkeit des Liefergebietes, der Sedimentationsbedingungen, der Kompaktion, Zementation und Diagenese sehr stark in ihrer mineralogischen Zusammensetzung und Struktur. Entsprechend variieren ihre gesteinsphysikalischen Eigenschaften. Im Beispiel von Ab-

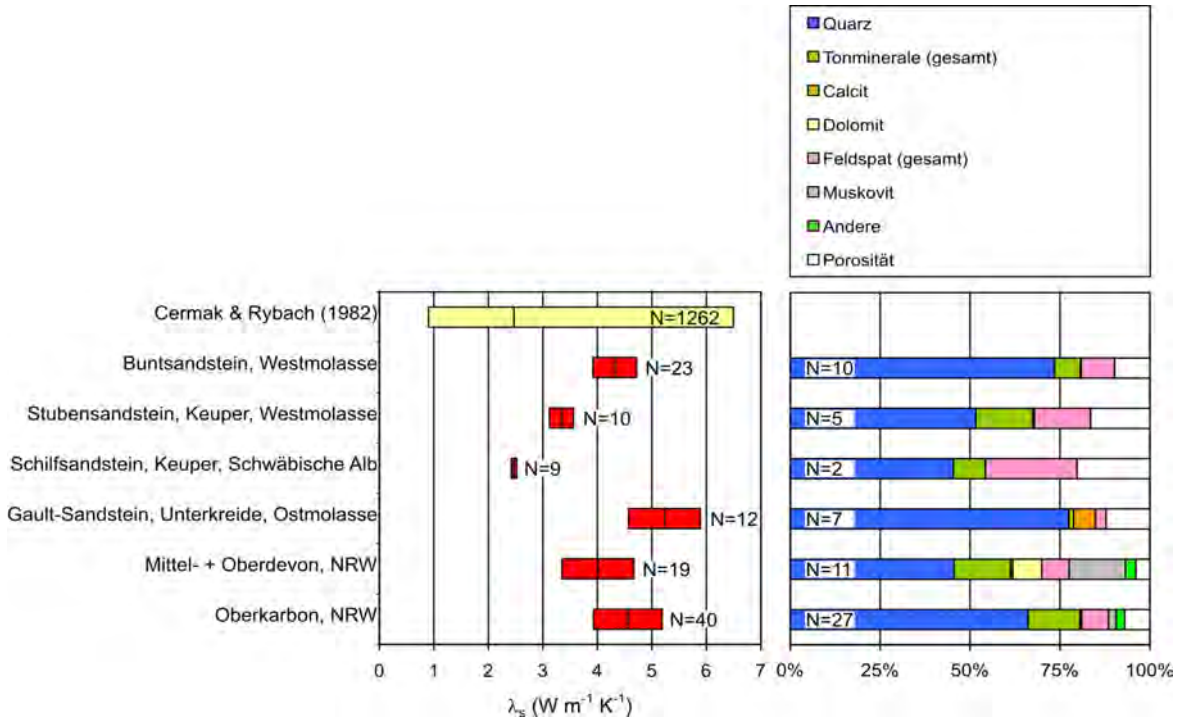


Abbildung 7.1: *Wärmeleitfähigkeit (wassergesättigt) der in beiden Projektphasen untersuchten Sandsteine (links) und ihre mittlere Gesteinszusammensetzung aus quantitativem Mineralbestand und Porosität (rechts). Die roten Boxen geben die Streubreite der untersuchten Kernproben wieder (Mittelwert und Standardabweichung) und sind der Bandbreite der Sandsteine aus Cermak und Rybach (1982) gegenübergestellt (gelbe Box: Minimum - Mittelwert - Maximum).*

bildung 7.1 links wird die Bandbreite der Wärmeleitfähigkeiten von Sandsteinen in der Datensammlung aus Cermak und Rybach (1982) dargestellt (0,9 W m^{-1} K^{-1} bis 6,5 W m^{-1} K^{-1}). Im Vergleich dazu sind die Streubreiten der verschiedenen Sandsteine gegenübergestellt, die im Rahmen der ersten und zweiten Projektphase untersucht wurden. Die mittleren Wärmeleitfähigkeiten reichen von 2,5 W m^{-1} K^{-1} für den Schilfsandstein aus dem Keuper der Schwäbischen Alb bis 5,2 W m^{-1} K^{-1} für den Gault-Sandstein aus der Unterkreide im bayerischen Molassebecken. Die verschiedenen Sandsteingruppen sind jeweils mit der mittleren Mineralzusammensetzung rechts in Abbildung 7.1 verknüpft. Es wird deutlich, dass die Wärmeleitfähigkeit zum einen durch den Quarzgehalt kontrolliert wird, dessen Mineralwert größer als bei anderen gesteinsbildenden Mineralen ist, zum anderen durch den Anteil des wassergefüllten Porenraums, der die Wärmeleitfähigkeit des Gesamtgesteins durch den niedrigen Wert von Wasser reduziert.

Diese Zusammenhänge sind modellhaft in den jeweiligen Abschnitten der Berichte zu dieser Projektphase und zur vorausgegangenen Phase 1 dargestellt. Die Datensammlung liefert somit nicht nur statistische Kennwerte einzelner Gesteinsserien, sondern ermöglicht auch durch die Verknüpfung mit der mineralogisch-geologische Klassifizierung der Daten und dem vertieften Verständnis der petrophysikalischen Zusammenhänge eine überregionale Verwendung der Ergebnisse.

Methodische Arbeiten

In der zweiten Projektphase wurden nach dem Bau des Halbach-Magneten in Phase 1 und seiner

Erweiterung in Phase 2 die methodischen Arbeiten zur Ableitung von Permeabilitäten aus NMR-Messungen fortgesetzt und vertieft. Die NMR-Porositäten stimmen auch bei niedrigen Werten gut mit den Porositäten aus dem Archimedes-Verfahren überein. Es wurden verschiedene Modellbeziehungen verwendet, um aus NMR-Relaxationszeiten Permeabilitäten abzuleiten. Der Vergleich mit Gaspermeabilitäten zeigt auch bei relativ dichten Sandsteinen und Tonsteinen eine gute Übereinstimmung mit den Permeabilitäten aus NMR-Messungen. Das Verfahren stößt jedoch bei Permeabilitäten $< 10^{-19}$ m^2 allerdings an seine Grenzen. Langfristiges Ziel ist es, über die Untersuchungen und methodischen Entwicklungen im Rahmen des Projektes hinaus die Ableitung von Permeabilitäten aus NMR-Messungen weiter zu verbessern und für die Anwendung im Bohrloch zu optimieren.

Auf dem Gebiet der stochastischen Modellierung geothermischer Reservoire wurde ein kombinierter Ansatz aus Sequentieller Gaußscher Simulation und einer einschränkenden Selektion gewählt, um die Unsicherheit der Gesteinseigenschaften und Zustandsvariablen in einem Reservoir zu charakterisieren. Dieser Ansatz hat sich als präziser herausgestellt als eine einfache Minimum-Maximum-Abschätzung der zu Grunde liegenden Parameter. Dadurch können geothermische Projekte effektiver ausgelegt und Kosten gesenkt werden. Die zusätzliche stochastische Simulation von Randbedingungen erlaubt eine umfassendere Unsicherheitscharakterisierung.

Zum Testen dieses Ansatzes konnte kein realer Datensatz in der erforderlichen Datendichte aus einem der beiden Arbeitsgebiete gewonnen werden, weil geeignete Datensätze von den Eignern nicht zur Verfügung gestellt wurden. Da die methodische Weiterentwicklung im Vordergrund stand, wurde auf eine Feldstudie in Den Haag, Niederlande, zurückgegriffen (vgl. Abschnitt 6.3). Dort konnte die Temperaturunsicherheit auf Basis der stochastischen Simulation der Wärmeleitfähigkeit, welche auf Messungen beruhte, signifikant reduziert werden. Hierbei wurden auch die Wärmestromdichte stochastisch variiert und unzureichende Modelle anhand eines einschränkenden Verfahrens mit Hilfe von Temperaturmessungen ausselektiert.

Gewinnung, Qualitätskontrolle und faziesbezogene Auswertung von Logging-Daten und Labormessungen

Aus dem Bereich des westlichen Nordrhein-Westfalens wurden gesteinsphysikalische Messungen an 93 Kernproben aus einer repräsentativen Bohrung durch den tertiären Lockergesteins-Untergrund der Niederrheinischen Bucht durchgeführt (vgl. Abschnitt 3.2) und mit zehn weiteren Bohrungen mit digitalisierten Bohrlochdaten in Beziehung gesetzt (vgl. Abschnitt 3.4). Aus dem überwiegend paläozoischen Gesteinsuntergrund der Niederrheinischen Bucht und des Ruhrgebiets sind 231 Kernproben aus 18 Bohrungen für Laboruntersuchungen entnommen worden (vgl. Abschnitt 4.2). Hier konnten aus insgesamt 17 Bohrungen flächendeckend Bohrlochdaten berücksichtigt werden (vgl. Abschnitt 4.8). In der bayerischen Molasse wurden 74 Kernproben aus 13 Bohrungen entnommen, die vorwiegend aus dem Oberjura und der Kreide stammen (vgl. Abschnitt 5.2). Logdaten standen aus 26 Bohrungen in unterschiedlicher Qualität zur Verfügung (vgl. Abschnitt 5.3).

Wie oben erwähnt wurden im Rahmen der beiden Projektphasen an einer repräsentativen Auswahl der Laborproben neben der Erhebung gesteinsphysikalischer Kennwerte auch eine detaillierte qualitative Gesteinsbeschreibung und eine quantitative Bestimmung der mineralogischen Zusammensetzung durchgeführt. Das ermöglicht die Zuordnung gesteinsphysikalischer Daten zu den jeweiligen Gesteinstypen und deren Komponenten. Die Verbindung von Lithologie und Petrophysik ermöglicht es, die lokal gewonnenen Daten in eine räumliche Dimension zu überführen und eine weitgehende Übertragbarkeit auf andere Gebiete zu gewährleisten.

Es wurden die gesteinsphysikalischen Eigenschaften der Hauptgesteinsarten ermittelt und fazielle Besonderheiten berücksichtigt. Beispielsweise sind Kalksteine trotz unterschiedlichen Alters und Genese durch eine sehr geringe Variationsbreite der petrophysikalischen Eigenschaften gekennzeichnet. Somit liefern die Messdaten hier repräsentative Kennzahlen für die Kalksteine des betrachteten Arbeitsgebietes. Gleichzeitig können fazielle Unterschiede mit ihrem Einfluss auf gesteinsphysikalische Kennwerte festgestellt werden. So werden zum Beispiel die Eigenschaften des unterkarbonischen Kohlenkalks in Nordrhein-Westfalen vom Grad der Silifizierung gesteuert (vgl. Abschnitt 4.3.4). Die Kalksteine des Malms im Bereich der Westmolasse wiederum hängen einerseits vom Grad der Dolomitisierung ab, welche die Wärmeleitfähigkeit erhöht, und vom Mergelanteil, der sie herabsetzt (Clauser et al., 2007). Generell konnte für die thermischen Eigenschaften eine deutliche Abhängigkeit vom Quarzgehalt festgestellt werden, der die Wärmeleitfähigkeit heraufsetzt und die spezifische Wärmekapazität reduziert (vgl. Abbildung 4.7 und 4.19). Bei den klastischen Gesteinen wurden als weiteres Beispiel fazielle Besonderheiten der nordrhein-westfälischen Condroz-Fazies herausgearbeitet, deren Sandsteine durch den hohen Anteil an Schichtsilikaten gesteinsphysikalische Eigenschaften aufweisen, die denen von Tongesteinen ähnlich sind (vgl. Abschnitt 4.3.3).

Modellbasierte Erstellung thermischer und hydraulischer Kenngrößen aus Labordaten und bohrlochgeophysikalischen Messungen

Bestehende Gesteinsmodelle konnten im Falle der paläozoischen Siliziklastika aus Nordrhein-Westfalen und der quarzreichen Kreide-Sandsteine aus der bayerischen Molasse verfeinert werden, indem die jeweils am Gesamtgestein ermittelten Werte mit theoretisch ermittelten Modellen zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit abgeglichen wurden (vgl. Abbildung 4.9 und 5.6). Für die nordrhein-westfälischen Tonsteine liefert das geometrische Modell bereits eine gute Abschätzung der Wärmeleitfähigkeit, die auch durch die gute Übereinstimmung mit den aus der mineralogischen Zusammensetzung berechneten Matrix-Wärmeleitfähigkeiten bestätigt wird. Die Messwerte der Sandsteine sind vor allem im Bereich höherer Porositäten größer als 10 % besser durch ein modifiziertes Modell zu beschreiben, das die Beziehung zwischen Matrix, Porenraumstruktur und Wärmeleitfähigkeit berücksichtigt. Aufbauend auf den hier verwandten Modellen wurde die Vorhersagefähigkeit der thermischen Gesteinseigenschaften für die untersuchten lithostratigraphischen Einheiten verbessert.

Eine Ableitung thermischer und hydraulischer Kennwerte aus Bohrlochmessungen erfolgte getrennt für die stratigraphischen Einheiten Tertiär, Karbon und Devon in NRW sowie den Einheiten des Juras und der Kreide in der Ostmolasse. Als generelle Vorgehensweise wurde zunächst anhand des Gamma Rays der Tongehalt berechnet und über porositätssensitive Logs wie das Dichte- und das Sonic-Log die Porosität ermittelt. In einfachen Drei-Komponenten Systemen kann dann die siliziklastische bzw. karbonatische Matrix als Differenz errechnet werden. Die Abgrenzung von Kohlenflözen im Tertiär und Karbon konnte eindeutig anhand der Logs vorgenommen und eine volumetrische Bestimmung des Kohle- und Tongehaltes in den Flözen durchgeführt werden. In den tertiären Lockergesteinen der Niederrheinischen Bucht wurde zudem über Widerstandsmessungen die Wassersättigung ermittelt, die bedingt durch die großräumigen Sümpfungsmaßnahmen im Umfeld des Braunkohletagebaus stark variieren kann.

Aus den quantifizierten Anteilen der Gesteinskomponenten und des wasser- bzw. lufterfüllten Porenraums wurden über die Anwendung des geometrischen Mittels und den im Labor ermittelten Matrixwerten Profile der effektiven Wärmeleitfähigkeit berechnet. Diese hochauflösenden Profile ermöglichen eine Erfassung der lateralen und vertikalen Variation geothermisch relevanter Parameter und erlauben die Berechnung statistischer Kennwerte für die stratigraphischen Einheiten. Letzteres ist ins-

besondere für die Vorhersagegenauigkeit von numerischen Modellen zur Temperaturprognose und zur Reservoircharakterisierung von Bedeutung, da so zuverlässigere Eingangsparameter für die Modelle zur Verfügung stehen und anhand von stochastischen Methoden (vgl. Abschnitt 6.3 die Unsicherheiten der Modellvorhersagen quantifiziert und minimiert werden können.

Übertragung der Gesteinseigenschaften auf in-situ Bedingungen

An etwa 40 ausgewählten Gesteinsproben wurde die Druck- und Temperaturabhängigkeit von Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit und volumetrischer Wärmekapazität bestimmt. Die Untersuchungen zur Abhängigkeit von thermischen Eigenschaften von Druck und Temperatur ergeben für die Kalk- und Tonsteine des Paläozoikums in Nordrhein-Westfalen einen quadratischen Zusammenhang zwischen den verschiedenen Eigenschaften und der Versenkungstiefe. Dabei sinken Wärme- und Temperaturleitfähigkeit mit der Tiefe, während die Wärmekapazität steigt. Für die Sandsteine ist wegen der großen Varationsbreite kein eindeutiger Zusammenhang feststellbar, obwohl auch hier die Wärme- und Temperaturleitfähigkeit in den meisten Fällen mit der Versenkungstiefe sinkt und die volumetrische Wärmekapazität steigt. Ein wichtiges Ergebnis ist, dass die Abhängigkeit der verschiedenen gemessenen Eigenschaften von der Versenkungstiefe nicht mit der Porosität korreliert.

An 21 ausgewählten Gesteinsproben wurden insgesamt 209 druckabhängige Permeabilitätsmessungen durchgeführt. Die Permeabilität verhält sich bei steigendem Druck nichtlinear und nimmt zunächst stärker ab, um ab einem effektiven Druck von 10 MPa nur noch wenig kleiner zu werden oder gleich zu bleiben. Der Effekt ist bei den untersuchten Tonsteinen tendenziell stärker ausgeprägt als bei Sandsteinen. Er ist mit einem elastischen Verhalten der Gesteinsmatrix zu erklären, was vor allem im Niederdruckbereich zu einer Verkleinerung des Porenraums führt. Der hohe Anteil an Schichtsilikaten bei Tonsteinen begünstigt die Bildung von Mikrokluftsystemen, was bei Tonsteinen eine stärkere Druckabhängigkeit durch das Schließen dieser Mikroklüfte um bis zu zwei Größenordnungen bei einem effektiven Druck von 35 MPa zur Folge hat.

Bewertung der erzielten wissenschaftlichen Ergebnisse

Dieses Projekt wurde mit der Motivation begonnen, die spärliche Datengrundlage thermophysikalischer Gesteinseigenschaften zu erweitern. Mit den hier dargestellten Arbeitsergebnissen wurde erstmalig eine systematische Untersuchung vorgenommen und ein Datensatz von bisher unbekannter Qualität und Quantität erzielt. Die gewonnen Daten können als Eingangsdaten für geothermische Modellierungen in den Arbeitsgebieten benutzt werden und verbessern so die Zuverlässigkeit von Simulationsrechnungen in der Planungsphase geothermischer Installationen. Die Verknüpfung mit einer mineralogisch-geologischen Klassifizierung liefert auch für eine überregionale Verwendung wichtige Informationen, die es erlauben, Kennwerte auf Basis der petrophysikalischen Zusammenhänge auf Gesteinsserien aus anderen Gebieten zu übertragen. Das Beispiel aus dem Westniederländischen Becken in Den Haag in Abschnitt 6.3 zeigt, dass statistisch aufbereitete Eingangsdaten für das Temperaturmodell die Prognosegenauigkeit der Temperatur einer tiefen Erdwärmesonde deutlich verbessern können. Die Anwendung einer im Projekt entwickelten stochastischen Simulation ermöglichte eine signifikante Reduktion der Temperaturunsicherheit im Zielgebiet.

Die Ergebnisse tragen somit wesentlich zu einer Verbesserung der Datenlage geothermisch relevanter Informationen bei und erleichtern eine wirtschaftliche und flächendeckende Aufsuchung und Nutzung geothermischer Energie, entsprechend den förderpolitischen Bestrebungen eines Ausbaus regenerati-

ver Energien in Deutschland.

7.2 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Durch die im Forschungsvorhaben erarbeiteten Resultate ist es möglich, das geothermische Potenzial besser abzuschätzen und somit die Planungssicherheit für geothermische Anlagen zu erhöhen. Zum Beispiel können die ermittelten thermischen und hydraulischen Eigenschaften als Eingangsparameter für Simulationen zur Auslegung und zum Langzeitverhalten von Erdwärmesonden und hydrothermalen Anlagen zur Wärme- und Stromerzeugung genutzt werden. Die im Rahmen des Projekts entwickelte Methode zur stochastischen Modellierung ermöglicht hierbei eine verbesserte Prognose mit einer Quantifizierung der Unsicherheit von Gesteinseigenschaften und Zustandsvariablen (Temperatur).

Die Arbeiten zur Erstellung einer statistisch repräsentativen Datenbasis für die verschiedenen Regionen Deutschlands tragen wesentlich dazu bei, die Aufsuchung und Standortwahl für geothermische Energiegewinnung zu optimieren und stützen somit die förderpolitischen Bestrebungen eines Ausbaus regenerativer Energien in Deutschland. Die Verbesserung der Datenbasis im Bereich der Geothermie sollte positive Impulse auf den Ausbau geothermischer Energiegewinnung in Deutschland und auf die deutsche Bohr- und Maschinenindustrie ausüben.

Neben wirtschaftlichen Aspekten werden durch die kombinierte Auswertung von Labordaten, bohrlochgeophysikalischen Daten und geologischem Umfeld neue Erkenntnisse auf dem Gebiet der Gesteinsphysik erworben. Die Ergebnisse aus den methodischen Arbeiten zur Ableitung von Permeabilitäten aus NMR-Messungen mit dem Halbach-Magneten ermöglichen zukünftig eine schnellere und kostengünstigere Erfassung einer wichtigen hydraulischen Kenngröße.

7.3 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Parallel zum abgeschlossenen Vorhaben soll das BMU-Projekt „Aufbau eines geothermischen Informationssystems (GeotIS) für Deutschland“ unter dem Förderkennzeichen 0327542 unter Beteiligung mehrerer Landesämter die Qualität bei der Projektierung von geothermischen Anlagen verbessern und das Fündigkeitsrisiko minimieren. Das System ist seit Mai 2009 über das Internet frei verfügbar. Es bietet den Nutzern eine Zusammenstellung von Daten und Informationen über tiefe Aquifere in Deutschland, die für eine geothermische Nutzung in Frage kommen. Die Messwerte aus beiden Projektphasen fließen in das Informationssystem ein. Die Basisdaten wurden entsprechend aufbereitet und dem Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik unter Berücksichtigung der Eigentumsrechte zugesandt zur Verfügung gestellt.

7.4 Erfolgte Veröffentlichungen im Rahmen des Projektes

Zeitschriften

- Vogt, C., Mottaghy, D., Wolf, A., Rath, V., Pechnig, R., und Clauser C.: Reducing Temperature Uncertainties by Stochastic Geothermal Reservoir Modeling. Geophysical Journal International, 2009, accepted.

Poster und Vorträge

- Fehr, A., Jorand, R., Koch, A., und Clauser, C., Dependence of Thermal Conductivity on Water Saturation of Sandstones, in *AGU 2008 Fall Meeting*, San Francisco, USA, 2008.

- Fehr, A., Jorand, R., Koch, A., und Clauser, C., Influence of Water Saturation on Thermal Conductivity in Sandstones., in *EGU General Assembly 2009*, Vienna, Austria, http://meeting organizer.copernicus.org/EGU2009/EGU2009-12590.pdf, 2009.

- Jorand, R., Pechnig, R., Mottaghy, D., Koch, A., und Clauser, C., Determination of thermal and hydraulic Properties for different Lithologies of Southern Germany, in *Geophysical Research Abstracts*, Bd. 9, EGU General Assembly 2007, Vienna, http://www.cosis.net/members/meetings/EGU2007/09495/EGU2007-J-09495.pdf, 2007.

- Jorand, R., Koch, A., Fehr, A., und Clauser, C., Experimental study of the correlation between thermal conductivity and saturation of selected sandstones, in *Geophysical Research Abstracts*, Bd. 10, EGU General Assembly 2008, Vienna, Austria, http://www.cosis.net/abstracts/EGU2008/09899/EGU2008-A-09899.pdf., 2008a.

- Jorand, R., Koch, A., Pechnig, R., und Clauser, C., Derivation of thermal conductivity from core and well log data from the Paleozoic subsurface in western North Rhine Westphalia, in *Geo 2008 - Resources and Risks in the Earth System, Proceedings, International Conference and 160th annual meeting of the Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften e. V.*, H. 60, S. 309, Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften e.V., Hannover, Aachen, Germany, abstract Volume, 2008b.

- Jorand, R., Fehr, A., Koch, A., und Clauser, C., Study of the variation of thermal conductivity with water saturation of different German sandstones, in *Proceedings of the Symposium „From Heat Flow to Geothermal Energy“*, IASPEI 2009 General Assembly, Capetown, South Africa, http://www.iaspei.org/downloads/Abstracts_2009/H1.pdf, S. 7, 2009a.

- Jorand, R., Koch, A., und Clauser, C., Implication of rock heterogeneities on the optical scanning of thermal conductivity, in *EGU General Assembly 2009*, Vienna, Austria, http://meeting organizer.copernicus.org/EGU2009/EGU2009-5065.pdf, 2009b.

- Koch, A., Jorand, R., Lokay, P., Pechnig, R., und Clauser, C., Erweiterung der Datenbasis thermischer und hydraulischer Gesteinseigenschaften im tiefen Untergrund der Niederrheinischen Bucht zur optimalen Auslegung geothermischer Anlagen, in *Geothermie für alle Fälle, Tagungsband zum Geothermiekongress 2007*, S. 234–241, Geothermische Vereinigung, Bundesverband Geothermie e.V., Geeste, Bochum, 2007a.

- Koch, A., Jorand, R., Pechnig, R., Mottaghy, D., und Clauser, C., Use of Exploration Wells to Improve Geothermal Reservoir Models, in *Tagungsband der 67. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft*, Aachen, 2007b.

- Koch, A., Jorand, R., Pechnig, R., Mottaghy, D., und Clauser, C., Use of Exploration Wells to Improve Geothermal Reservoir Models, in *Proceedings European Geothermal Congress 2007*, Unterhaching, Germany, 2007c.

- Koch, A., Jorand, R., Pechnig, R., und Clauser, C., Thermal properties of Tertiary sediments of the Lower Rhine Basin (Germany), in *Geophysical Research Abstracts*, Bd. 10, EGU General Assembly 2008, Vienna, Austria, http://www.cosis.net/abstracts/EGU2008/08540/EGU2008-A-08540.pdf, 2008a.

- Koch, A., Jorand, R., Pechnig, R., und Clauser, C., Thermal and hydraulic rock properties of the Palaeozoic subsurface of the Lower Rhine Embayment and the Ruhr area (Germany), in *Geo 2008 - Resources and Risks in the Earth System, Proceedings, International Conference and 160th annual meeting of the Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften e. V.*, H. 60, S. 143, Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften e.V., Abstract Volume, Hannover, Aachen, Germany, 2008b.

- Koch, A., Jorand, R., und Clauser, C., Statistically significant data base of rock properties for geothermal use, in *EGU General Assembly 2009*, Vienna, Austria, http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2009/EGU2009-5055.pdf, 2009a.

- Koch, A., Jorand, R., Pechnig, R., und Clauser, C., Thermal and hydraulic rock properties of the Paleozoic subsurface of western North Rhine-Westphalia (Germany), in *Proceedings of the Symposium From Heat Flow to Geothermal Energy"*, IASPEI 2009 General Assembly, Capetown, South Africa, http://www.iaspei.org/downloads/Abstracts_2009/H1.pdf, S. 11., 2009b.

- Pechnig, R., Mottaghy, D., Koch, A., Jorand, R., und Clauser, C., Prediction of Thermal Properties for Mesozoic Rocks of Southern Germany, in *Tagungsband der 67. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft*, Aachen, 2007a.

- Pechnig, R., Mottaghy, D., Koch, A., Jorand, R., und Clauser, C., Prediction of Thermal Properties for Mesozoic Rocks of Southern Germany, in *Proceedings European Geothermal Congress 2007*, Unterhaching, Germany, 2007b.

- Vogt, C., und Rath, V.: Soultz-sous-Forêts - What can inverse simulations contribute to the knowledge of hydro-geothermal systems at the European EGS demonstration site?, in *Geo 2008 - Resources and Risks in the Earth System, Proceedings, International Conference and 160th annual meeting of the Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften e. V.*, H. 60, Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften e.V., Abstract Volume, Hannover, Aachen, Germany, 2008.

- Vogt, C., Mottaghy D., Rath V., Wolf, A., Pechnig R., und Clauser, C.: Quantifying uncertainties in geothermal energy exploration, in *EGU General Assembly 2009*, Vienna, Austria, http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2009/EGU2009-1434.pdf, 2009a.

- Vogt, C., Koch, A., Mottaghy, D., Jorand, R., und Clauser C.: Reducing the discovery risk of geothermal energy exploration, SET2009, 8th International Conference of Sustainable Energy Technologies, Aachen, Germany, 31. August - 3. September 2009, 2009b.

Abschlussarbeiten

- Laurich, B., *Erfassung und Interpretation von physikalischen Gesteinseigenschaften an Sedimentgesteinen aus dem Devon der nördlichen Niederrheinischen Bucht*, Bachelorarbeit, RWTH Aachen University, Aachen, 2008.

Literaturverzeichnis

Allen, D., Flaum, C., Ramakrishnan, T., Bedford, J., Castelijns, K., Fairhurst, D., Gubelin, G., Heaton, N., Minh, C., Norville, M., Seim, M., Pritchard, T., und Ramamoorthy, R., Trends in NMR Logging, *Oilfield Review*, *12 (3)*, 2–19, 2000.

Andres, G. und Frisch, H., Hydrogeologie und Hydraulik im Malmkarst des Molassebeckens und der angrenzenden Fränkisch-Schwäbischen Alb, in *Die Thermal- und Schwefelwasservorkommen von Bad Gögging*, Andres and Wirth, 1981.

Anferova, S., Anferov, V., Rata, D. G., Blümich, B., Arnold, J., C., C., Blümler, P., und Raich, H., Mobile NMR device for measurements of porosity and pore size distributions of drill core samples, *Concepts in Magnetic Resonance. Part B, Magnetic Resonance Engineering*, *23(B)*, 26–32, 2004.

Anonym, *Geologie am Niederrhein*, Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen, 1988.

Anonym, *Log Interpretation Charts*, Schlumberger, Houston, TX, 1989.

Anonymous, `http://www.denhaag.com/default.asp?id=7096&ep=`, 2006.

Arnold, J., *Mobile NMR for rock porosity and permeability*, Dissertation, RWTH Aachen Universtity, 2007.

Arnold, J., Clauser, C., Pechnig, R., Anferova, S., Anferov, V., und Blümich, B., Porosity and permeability from mobile NMR core-scanning, *Petrophysics*, *47*, 306 314, 2006.

Asaad, Y., *A study of the thermal conductivity of fluid-bearing porous rocks*, Dissertation, University of California – Berkeley, 1955.

Beck, A. E., Methods for determining thermal conductivity and thermal diffusivity, in *Handbook of Terrestial Heat-Flow Density Determination*, herausgegeben von R. Haenel, L. Rybach, und L. Stegena, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1988.

Becker, B. und Asmus, S., Beschreibung und Korrelation der känozoischen Lockergesteinsschichten der Grundgebirgsbohrungen im Umfeld des Tagebaus Hambach, *scriptum*, *13*, 61–74, 2005.

Birch, F., The effects of pleistocene climatic variations upon geothermal gradients, *American Journal of Science*, *246*, 729 760, 1948.

Brigaud, F., Chapman, D. S., und Le Douran, S., Estimating thermal conductivity in sedimentary basins using lithologic data and geophysical well logs, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, *74*, 1459–1477, 1990.

Caers, J., *Petroleum Geostatistics*, Society of Petroleum Engineers, Richardson TX, 2005.

Carman, P., *Flow of Gases Through Porous Media, Chap. 1.*, Butterworths, London, 1956.

Cermak und Rybach, L., Thermal conductivity and specific heat of minerals and rocks, in *Landolt-Börnstein: Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology*, herausgegeben von G. Angenheister, Bd. V/1a, S. 305–343, Springer, Berlin, 1982.

Clauser, C., Geothermal energy, in *Landolt-Börnstein, Group VIII: Advanced Materials and Technologies, Vol. 3: Energy Technologies, Subvol. C: Renewable Energies*, herausgegeben von K. Heinloth, S. 493–604, Springer Verlag, Heidelberg-Berlin, 2006.

Clauser, C. und Huenges, E., Thermal conductivity of rocks and minerals, in *Rock Physics and Phase Relations – a Handbook of Physical Constants, AGU Reference Shelf*, herausgegeben von T. J. Ahrens, Bd. 3, S. 105–126, American Geophysical Union, Washington, 1995.

Clauser, C., Koch, A., Hartmann, A., Jorand, R., Mottaghy, D., Pechnig, R., Rath, V., und Wolf, A., Erstellung statistisch abgesicherter thermischer und hydraulischer Gesteinseigenschaften für den flachen und tiefen Untergrund in Deutschland (Phase 1 - Westliche Molasse und nördlich angrenzendes Süddeutsches Schichtstufenland), Bericht, Applied Geophysics and Geothermal Energy, E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen University, URL `http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb08/559645902.pdf`, 2007.

Clauser, C. (ed), *Numerical Simulation of Reactive Flow in Hot Aquifers. SHEMAT and processing SHEMAT*, Springer, Heidelberg-Berlin, 2003.

Cuvelier, N., Planung und Durchführung eines Bohrprogramms zur Erkundung des tiefen Untergrundes der Niederrheinischen Bucht, *scriptum*, *13*, 7–31, 2005.

Deming, D., Application of Botton-hole temperature corrections in geothermal studies, *Geothermics*, *18*, 775–786, 1989.

Deutsch, C. V. und Journel, A. G., *GSLIB. Geostatistical software library and user's guide*, Oxford University Press, New York, 1998.

DIN 18125-1, *DIN 18125-1: Bestimmung der Dichte des Bodens, Teil 1: Laborversuche*, Beuth, Berlin, 1997.

DIN 4021, *DIN 4021: Aufschluss durch Schürfe und Bohrungen sowie Entnahme von Proben*, Beuth, Berlin, 1990.

DIN 4022, *DIN 4022: Benennen und Beschreiben von Boden und Fels; Schichtenverzeichnis für Bohrungen mit durchgehender Gewinnung von gekernten Proben im Boden (Lockergestein)*, Beuth, Berlin, 1982.

Drozdzewski, D., Bornemann, O., Kunz, E., und Wrede, V., *Beiträge zur Tiefentektonik des Ruhrgebiets*, Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen, Krefeld, 1980.

Ellis, D. V., *Well logging for earth scientists*, Elsevier, Amsterdam, 1987.

Erbas, K., *Eine universelle Methode zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit aus Aufheizkurven konstant geheizter Zylinderquellen*, Dissertation, Dissertation, Technische Universität Berlin, 2001.

Fehr, A., *NMR- und SIP-Messungen an Gesteinsproben*, Dipl.-Arbeit, Angewandte Geophysik und Geothermische Energie RWTH Aachen, 2007.

Förster, A., Analysis of borehole temperature data in the Northeast German Basin: continuous logs versus bottom-hole temperatures, *Petroleum Geoscience*, *7*, 241–254, 2001.

Freudenberger, W. und Schwerd, K., *Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1 : 500 000*, Bayerisches Geologisches Landesamt München, 1996.

GD NRW, Der tiefere Untergrund der niederrheinischen Bucht - Ergebnisse eines Tiefbohrprogramms im rheinischen Braunkohlerevier, *scriptum*, *13*, 2005.

Geyer, O. F. und Gwinner, M. P., *Geologie von Baden-Württemberg*, E. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, Germany, 4th Ausgabe, 1991.

Haenel, R., Rybach, L., und Stegena, L., *Handbook of terrestrial heat-flow density determination*, Kluwer, Dordrecht, Holland, 1988.

Halbach, K., Permanent magnets for production and use of high-energy particle beams, in *Proceedings of the Eighth International Workshop on Rare Earth Cobalt Permanent Magnets and their Applications*, S. 103, Dayton, Ohio, 1985.

Hartmann, A., Rath, V., und Clauser, C., Thermal conductivity from core and well log data, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, *42*, 1042–1055, 2005.

Hartmann, A., Pechnig, R., und Clauser, C., Petrophysical analysis of regional-scale thermal properties for improved simulations of geothermal installations and basin-scale heat and fluid flow, *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundschau)*, *DOI 10.1007/s00531-007-0283-y*, 2007.

Hashin, Z. und Shtrikman, S., A variational approach to the theory of the effective magnetic permeability of multiphase materials, *J. Appl. Phys.*, *33*, 3125–3131, 1962.

Hermanrud, C., Cao, S., und Lerche, I., Estimates of virgin rock temperature derived from BHT measurements: Bias and error, *Geophysics*, *55*, 924–931, 1990.

Kelley, K., *Contributions to the data on theoretical metallurgy: XIII High-Temperature Heat-Content, Heat-Capacity, and Entropy data for the Elements and Inorganic Compounds,*, U.S. Bureau of Mines Bull. 584, U.S. Government Printing Office, Washington D.C., 1960.

Kenyon, W., Day, P., Straley, C., und Willemsen, J., A three-part study of NMR longitudinal relaxation properties of water-saturated sandstones, *Society of Petroleum Engineers SPE Formation Evaluation*, *3*, 622–636, 1988.

Lange, Die Kreide im Untergrund des Molassebeckens (Purbeck bis Campan), in *Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500 000 (3.Aufl.)*, S. 71–74, Bayerisches Geologisches Landesamt, München, 1981.

Lichtenecker, K. und Rother, K., Herleitung des logarithmischen Mischungsgesetzes aus allgemeinen Prinzipien der stationären Strömung, *Phys. Z.*, *32*, 255–260, 1931.

Luthi, S., *Geological well logs*, Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 2001.

Mathes-Schmidt, M. und Elfers, H., Mikrofazielle Untersuchungen im Unterkarbon (Vise) und tieferen Oberkarbon (Namur A) der Bohrung Schwalmtal 1001, in *Der Untergrund der Niederrheinischen Bucht*, Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen, 1998.

Meyer, R.K.F.&Schmidt-Kaler, H., Jura, *BAYERISCHES Geologisches Landesamt [Hrsg.]: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500 000 (4. Aufl.): 90-111, Mnchen*, 1996.

Meyer, R., „Moosburg 4“, die erste Kernbohrung durch den Malm unter der bayerischen Molasse, *Erlanger geologische Abhandlungen*, *123*, 51–81, 1994.

Mirotchnik, K., Kryuchkov, S., und Strack, K., A novel method to determine NMR petrophysical parameters from drill cuttings, paper MM, in *45th Annual Logging Symposium Transactions: Society of Professional Well-Log Analysts.*, 2004.

Moiseenko, U., Sokolova, L., und Kutolin, V., Thermal conductivity of eclogite and dolerite at high temperature, *Doklady AN SSSR*, *173, No. 3*, 669–671, 1967.

Mosegaard, K. und Tarantola, A., Monte Carlo sampling of solutions to inverse problems, *Journal of Geophysical Research*, *100*, 12 431–12 447, 1995.

Neumann-Mahlkau, P. und Ribbert, K.-H., Die Konglomerate der Givet-Stufe östlich des Brabanter Massivs, in *Der Untergrund der Niederrheinischen Bucht*, Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen, 1998.

Pape, H., Clauser, C., und Iffland, J., Permeability prediction based on fractal pore-space geometry, *Geophysics*, *64*, 1447–1461, 1999.

Pechnig, R., Mottaghy, D., Willemsen, G., und Simmelink, H. J., The Den Haag Geothermal District Heating Project – 3-D Models for Temperature Prediction, *Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, *60*, 309, `http://www.dgg.de/pub/schriftenreihe/`, 2008.

Petrunin, G. und Yurchak, R., On rocks thermal diffusivity measurements., *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli*, *11*, 92–95, 1973.

Pickell, J. J. und Heacock, J. G., Density logging, *Geophysics*, *25*, 891–904, 1960.

Popov, Y., Optical scanning technology for non-destructive contactless measurements of thermal conductivity and diffusivity of solid matters, *Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*, *1*, 09–117, proceedings of the 4th World Conference Brussels, Belgium, 1997.

Popov, Y., Berezin, V., Solovyev, G., Romushkevich, R., Korostelev, V., Kostyrin, A., und Kulikov, I., Thermal conductivity of minerals, *Izvestia, Physics of the Solid Earth*, *23(3)*, 245–253, 1987.

Popov, Y., Pribnow, D., Sass, J., Williams, C., und Burkhardt, H., Characterization of rock thermal conductivity by high-resolution optical scanning, *Geothermics*, *28*, 253–276, 1999.

Pribnow, D. und Sass, J., Determination of thermal conductivity from deep boreholes, *J. Geophys. Res.*, *100*, 9981–9994, 1995.

Rath, V. und Clauser, C., Erkennen und Quantifizieren von strömung: Eine geothermische Rasteranalyse zur Klassifizierung des tiefen Untergrundes in Deutschland hinsichtlich seiner Eignung zur Endlagerung radioaktiver Stoffe - Fortsetzung, Endbericht zum auftrag nr. 9x0009-8497-2, 2004, Bundesamt für Strahlenschutz, Bericht, RWTH Aachen, Angewandte Geophysik, 2004.

Rath, V., Wolf, A., und Bücker, M., Joint three-dimensional inversion of coupled groundwater flow and heat transfer based on automatic differentiation: sensitivity calculation, verification, and synthetic examples, *Geophys. J. Int.*, *167*, 453–466, 2006.

Remy, N., *Geostatistical Earth Modeling Software: Users Manual*, URL `http://sgems.sourceforge.net/doc/sgems_manual.pdf`, 2004.

Ribbert, K.-H., Das Famenne im Untergrund der Niederrheinischen Bucht, in *Der Untergrund der Niederrheinischen Bucht*, S. 81–107, Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen, 1998.

Rider, M., *The geological interpretation of well logs*, Whittles Publishing, Caithness, 1996.

Schafmeister, M.-T., *Geostatistik für die hydrogeologische Praxis*, Springer-Verlag, Heidelberg-Berlin, 1999.

Schneider, H. und Thiele, S., *Geohydrologie des Erftgebietes*, Ministrerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Düsseldorf, 1965.

Schön, R., *Physical properties of rocks: Fundamentals and principles of geophysics*, Pergamon, 1996.

Seevers, D., A nuclear magnetic method for determining the permeability of sandstones, *Annual Logging Symposium Transactions: Society of Professional Well Log Analysts*, S. paper L, 1966.

Seipold, U., Pressure and temperature dependence of thermal transport properties of granites, *High Temperatures High Pressures*, *22*, 541–548, 1990.

Seipold, U. und Engler, R., Investigation of the thermal diffusivity of jointed granodiorites under uniaxial load and hydrostatic pressure, *Gerlands Beitr. Geophysik, Leipzig*, *90, 1*, 65–71, 1981.

Sen, P., Straley, C., Kenyon, W., und Whittingham, M., Surface-to-volume ratio, charge density, nuclear magnetic relaxation, and permeability in clay-bearing sandstones, *Geophysics*, *55*, 61–69, 1990.

Serra, O., *Fundamentals of Well-Log Interpretation-1*, Elsevier, 1984.

Serra, O., *Fundamentals of Well-Log Interpretation-2*, Elsevier, New York, 1986.

Simmelink, H. J. und Vandeweijer, V., Geothermie Den Haag Zuid-West, 2e fase geologisch onderzoek, Bericht 034.72157, Netherlands Organisation for Applied Natural Science Research (TNO), Utrecht, 2008.

Tiab, D. und Donaldson, E., *Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties*, Gulf Publishing Co., 1996.

Walter, R., *Geologie von Mitteleuropa*, Schweizerbart, Stuttgart, 1995.

Wisian, K. W., Blackwell, D. D., Bellani, S., Henfling, J. A., Normann, R. A., Lysne, P. C., Förster, A., und Schrötter, J., Field comparison of conventional and new technology temperature logging systems, *Geothermics*, *27*, 131–141, 1998.

Zisser, N. und Nover, G., Anisotropy of permeability and complex resistivity of tight sandstones subjected to hydrostatic pressure, *Journal of Applied Geophysics*, S. in press, 2009.

Anhang A

Druck- und Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit und Wärmekapazität

Tabelle A.1: *Druck- und temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeiten (λ) der Kalk- und Sulfatgesteine (vgl. Abschnitt 4.5.1). ϕ: Porosität.*

Probe	Gesteinstyp	Druck (MPa)	Poren-druck (MPa)	T (°C)	Mittel ë ($W\,m^{-1}\,K^{-1}$)	Mittel ê ($10^{-6}\,m^2\,s^{-1}$)	Mittel ñc ($10^6\,J\,m^3\,K^{-1}$)	Standardabweichung ë ($W\,m^{-1}\,K^{-1}$)	Standardabweichung ê ($10^{-6}\,m^2\,s^{-1}$)	Standardabweichung ñc ($10^6\,J\,m^3\,K^{-1}$)
B-01-03	Kalkstein	3,7	1,3	53,7	3,22	1,60	2,01	0,07	0,04	0,05
		11,5	4,1	60,5	2,96	1,46	2,03	0,03	0,03	0,06
		37,0	11,7	73,0	2,63	1,29	2,04	0,03	0,03	0,02
		58,4	21,6	96,8	2,44	1,10	2,23	0,05	0,03	0,04
		60,5	25,2	115,9	2,36	0,99	2,39	0,04	0,02	0,03
		115,9	42,7	142,8	2,12	0,88	2,41	0,04	0,02	0,06
		129,2	51,5	164,5	1,97	0,80	2,45	0,03	0,02	0,04
		154,9	63,7	192,1	1,61	0,65	2,48	0,03	0,02	0,07
B-17-12	Sandstein	5,1	3,3	37,5	4,29	2,08	2,06	0,05	0,05	0,04
		13,6	6,2	47,8	3,98	2,00	1,99	0,06	0,03	0,04
		39,8	19,8	66,8	3,95	1,74	2,27	0,04	0,04	0,05
		63,2	26,7	93,3	3,62	1,46	2,48	0,04	0,03	0,08
		81,6	30,3	110,5	3,65	1,41	2,59	0,07	0,03	0,06
		112,3	47,4	137,3	3,28	1,29	2,54	0,06	0,03	0,04
		136,8	53,7	163,9	3,00	1,15	2,61	0,04	0,02	0,03
B06-30	Sandstein	2,4	1,9	38,1	3,77	1,88	2,01	0,05	0,03	0,02
		9,4	3,8	55,1	3,47	1,72	2,02	0,04	0,02	0,06
		23,1	9,3	74,8	3,27	1,46	2,25	0,06	0,04	0,06
		54,4	24,9	84,6	3,16	1,36	2,33	0,06	0,03	0,06
		103,5	41,5	135,6	2,66	1,03	2,58	0,05	0,02	0,04
		139,0	55,2	160,3	2,52	0,98	2,57	0,03	0,02	0,02
B06-05	Sandstein	3,2	1,4	42,8	5,54	2,60	2,13	0,09	0,06	0,05
		33,6	11,8	63,6	5,34	2,47	2,16	0,10	0,06	0,06
		55,4	19,3	83,4	4,93	2,11	2,39	0,07	0,05	0,06
		118,7	46,4	148,4	4,03	1,64	2,46	0,09	0,03	0,03
		157,4	61,7	183,6	2,99	1,08	2,58	0,05	0,02	0,04
B-14-03	Sandstein	3,9	2,6	43,5	3,77	2,04	1,85	0,08	0,03	0,02
		32,9	10,8	61,4	3,67	1,88	1,95	0,07	0,04	0,05
		52,5	21,4	82,1	3,40	1,66	2,05	0,05	0,03	0,04
		65,7	23,5	95,1	3,16	1,44	2,19	0,04	0,02	0,02
		86,8	34,7	110,8	2,92	1,31	2,23	0,04	0,03	0,05
		111,3	46,4	143,8	2,45	1,05	2,34	0,04	0,02	0,06
		147,2	60,3	188,0	2,03	0,80	2,52	0,04	0,01	0,06
B-17-18	Sandstein	3,0	0,8	41,7	3,49	1,70	2,06	0,07	0,02	0,06
		26,4	10,7	52,1	3,05	1,48	2,06	0,06	0,03	0,04
		38,4	14,3	65,8	2,80	1,32	2,12	0,05	0,03	0,05
		52,8	24,8	85,6	2,48	1,12	2,21	0,04	0,02	0,04
		72,5	32,1	102,3	2,34	1,02	2,29	0,04	0,02	0,04
		104,1	44,1	126,3	2,10	0,81	2,61	0,03	0,02	0,04
		143,7	59,7	166,9	1,80	0,69	2,60	0,03	0,02	0,02
B-09-02	Tonstein	1,1	0,5	42,0	3,20	1,19	2,68	0,04	0,02	0,00
		22,5	8,7	49,6	3,37	1,25	2,69	0,07	0,01	0,05
		36,4	14,1	64,5	3,18	1,18	2,69	0,03	0,02	0,09
		56,8	20,5	89,3	2,99	1,10	2,73	0,07	0,02	0,03
		76,8	31,3	108,4	2,85	1,05	2,72	0,06	0,02	0,04
		100,6	39,6	133,4	2,60	0,95	2,73	0,04	0,02	0,11
		134,3	50,1	156,5	2,63	0,96	2,74	0,05	0,02	0,01
		144,9	63,8	173,6	2,60	0,95	2,75	0,05	0,02	0,07
B-17-16	Sandstein	2,9	1,3	36,0	3,99	2,12	1,94	0,06	0,04	0,08
		21,2	7,5	50,9	3,63	1,73	2,21	0,06	0,04	0,03
		39,4	14,5	68,0	3,31	1,45	2,39	0,07	0,03	0,12
		57,7	23,8	91,6	3,12	1,33	2,33	0,06	0,02	0,02
		82,5	32,5	111,8	2,97	1,15	2,58	0,05	0,02	0,08
		111,2	47,1	140,2	2,65	1,04	2,54	0,04	0,02	0,08
		133,0	55,9	166,3	2,47	0,95	2,60	0,05	0,02	0,04
		156,9	136,7	183,3	2,46	0,88	2,55	0,04	0,03	0,06
B-09-08	Tonstein	1,5	1,5	37,7	3,56	1,80	1,93	0,11	0,09	0,10
		18,4	7,8	49,9	3,63	1,67	2,10	0,12	0,09	0,13
		31,4	13,6	66,1	3,56	1,55	2,31	0,11	0,08	0,13
		58,9	24,4	89,8	3,14	1,30	2,33	0,11	0,06	0,10
		74,3	33,9	109,2	2,91	1,14	2,62	0,08	0,04	0,11
		107,7	43,7	139,5	2,62	1,03	2,54	0,09	0,05	0,08
		131,7	53,7	163,7	2,56	0,99	2,59	0,06	0,05	0,10
		149,0	64,9	177,6	2,48	0,97	2,56	0,07	0,06	0,10

Tabelle A.1 fortgesetzt.

Probe	Gesteinstyp	Druck (MPa)	Poren-druck (MPa)	T (°C)	Mittel ë (W m^{-1} K^{-1})	Mittel ê (10^{-6} m^2 s^{-1})	Mittel ñc (10^6 J m^3 K^{-1})	Standardabweichung ë (W m^{-1} K^{-1})	Standardabweichung ê (10^{-6} m^2 s^{-1})	Standardabweichung ñc (10^6 J m^3 K^{-1})
B-17-10	Sandstein	2,1	2,8	39,2	3,62	1,76	1,76	0,05	0,13	0,06
		21,5	7,8	52,5	3,40	1,61	2,11	0,06	0,07	0,06
		42,6	18,4	69,5	3,14	1,40	2,24	0,05	0,06	0,05
		57,8	21,5	89,7	3,01	1,29	2,34	0,06	0,05	0,03
		77,4	30,8	108,1	2,84	1,16	2,45	0,06	0,02	0,15
		105,0	37,8	133,9	2,43	0,96	2,53	0,04	0,03	0,12
		125,2	46,0	154,9	2,14	0,83	2,57	0,04	0,04	0,17
		157,2	66,0	187,8	2,01	0,76	2,65	0,04	0,04	0,17
B-14-07	Sandstein	1,8	1,6	38,4	2,85	1,48	1,92	0,06	0,03	0,02
		26,2	1,7	56,7	2,75	1,39	1,98	0,05	0,08	0,08
		44,4	1,3	75,5	2,64	1,20	2,20	0,03	0,03	0,04
		57,9	1,4	98,6	2,60	1,10	2,36	0,02	0,01	0,03
		93,8	1,4	117,5	2,54	1,08	2,35	0,05	0,03	0,02
		119,0	2,2	147,3	2,49	1,00	2,49	0,04	0,09	0,11
		143,2	1,7	173,5	2,42	0,96	2,52	0,05	0,07	0,06
		164,0	1,4	193,9	2,32	0,91	2,55	0,05	0,04	0,04
B-09-07	Tonstein	2,7	2,0	42,1	1,96	1,09	1,79	0,04	0,02	0,02
		34,5	14,7	60,3	1,91	1,04	1,84	0,03	0,04	0,04
		48,7	21,8	77,9	1,78	0,94	1,90	0,04	0,04	0,04
		73,7	29,8	101,1	1,63	0,80	2,03	0,05	0,01	0,01
		87,1	37,0	115,1	1,53	0,74	2,06	0,04	0,01	0,06
		113,9	44,8	144,7	1,37	0,65	2,11	0,02	0,02	0,12
		137,5	53,5	169,6	1,28	0,62	2,07	0,03	0,02	0,10
		145,4	60,5	177,3	1,23	0,59	2,10	0,03	0,04	0,05
B-12-03	Marl	2,3	2,6	46,8	2,63	1,33	1,97	0,03	0,04	0,04
		28,9	11,7	56,8	2,46	1,22	2,00	0,01	0,04	0,06
		43,6	18,6	70,8	2,15	1,13	1,91	0,04	0,03	0,05
		65,2	27,3	94,1	1,94	0,91	2,12	0,02	0,02	0,05
		80,7	30,0	112,1	1,83	0,83	2,20	0,05	0,02	0,10
		111,5	44,6	141,3	1,73	0,80	2,17	0,04	0,03	0,02
		131,5	53,5	164,8	1,58	0,74	2,14	0,04	0,01	0,03
		158,0	65,9	178,8	1,51	0,69	2,18	0,05	0,02	0,01
B-07-16	Tonstein	2,1	1,6	43,4	3,35	1,82	1,84	0,08	0,07	0,07
		33,6	1,1	59,8	3,12	1,68	1,86	0,06	0,03	0,05
		86,8	1,3	109,0	2,85	1,34	2,12	0,09	0,05	0,12
		104,1	1,2	131,5	2,69	1,11	2,43	0,08	0,05	0,10
		142,4	1,2	178,3	2,43	0,95	2,57	0,08	0,05	0,12
B-11-01	Kalkstein	3,1	1,5	38,4	2,93	1,38	2,13	0,04	0,05	0,07
		28,9	12,8	55,4	2,65	1,24	2,14	0,05	0,05	0,05
		66,3	26,8	84,2	2,31	1,05	2,21	0,07	0,04	0,08
		80,4	29,7	109,6	2,12	0,90	2,36	0,05	0,02	0,05
		111,1	42,8	149,7	1,85	0,80	2,32	0,03	0,04	0,03
		156,8	65,6	178,4	1,63	0,68	2,41	0,07	0,03	0,03
B-11-05	Kalkstein	2,7	1,1	40,2	2,94	1,47	2,00	0,06	0,06	0,09
		28,7	1,0	57,7	2,81	1,41	1,99	0,05	0,05	0,07
		52,6	1,0	77,4	2,57	1,28	2,01	0,06	0,04	0,07
		71,5	1,4	103,9	2,43	1,21	2,00	0,06	0,04	0,07
		96,5	1,8	125,8	2,28	1,13	2,02	0,05	0,04	0,04
		139,9	1,7	173,7	2,11	1,03	2,05	0,06	0,05	0,10
B-07-29	Kalkstein	3,1	1,2	43,1	3,47	1,71	2,03	0,08	0,08	0,10
		33,7	12,1	64,7	3,21	1,53	2,10	0,09	0,08	0,09
		69,3	27,9	96,7	2,89	1,28	2,26	0,08	0,05	0,11
		109,9	42,0	138,3	2,29	0,99	2,32	0,07	0,05	0,11
		141,8	55,7	176,4	2,05	0,85	2,42	0,07	0,04	0,12
B-04-04	Konglomerat	3,7	1,5	42,6	5,86	2,10	2,25	0,15	0,01	0,02
		34,2	1,4	57,3	4,90	2,07	2,37	0,12	0,06	0,02
		63,8	1,5	93,0	4,35	1,65	2,63	0,09	0,04	0,01
		96,4	1,5	118,5	3,97	1,51	2,64	0,08	0,05	0,08
		119,6	1,2	144,7	3,53	1,36	2,63	0,13	0,03	0,06
		144,9	1,8	171,9	3,05	1,11	2,74	0,10	0,03	0,00
B-06-32	Kalkstein	2,5	0,6	34,8	3,03	1,35	2,25	0,07	0,03	0,02
		33,5	1,7	59,5	2,81	1,13	2,49	0,06	0,03	0,05
		70,4	1,5	96,5	2,60	1,03	2,52	0,05	0,03	0,04
		98,7	1,8	125,2	2,53	0,99	2,56	0,03	0,03	0,04
		131,8	1,5	157,4	2,46	0,93	2,65	0,04	0,03	0,06
		165,8	1,5	189,9	2,42	0,91	2,65	0,03	0,01	0,00
B-06-39	Kalkstein	4,3	1,6	37,2	5,20	2,09	2,49	0,02	0,02	0,02
		21,6	1,6	49,8	4,66	1,86	2,51	0,12	0,05	0,04
		71,8	1,8	97,6	4,22	1,59	2,66	0,11	0,05	0,06
		98,6	1,3	124,6	3,97	1,48	2,68	0,13	0,05	0,02
		128,2	1,2	153,1	3,70	1,37	2,70	0,11	0,04	0,01
		137,1	1,6	161,1	3,69	1,37	2,70	0,10	0,04	0,01
B-10-06	Sandstein	2,4	5,6	53,7	3,73	1,59	2,34	0,03	0,05	0,07
		45,6	15,9	72,3	2,89	1,24	2,33	0,01	0,01	0,03
		81,7	30,9	108,5	2,26	0,97	2,33	0,06	0,03	0,05
		106,9	41,5	134,0	1,94	0,81	2,39	0,05	0,03	0,07
		138,1	53,2	162,4	1,66	0,70	2,35	0,05	0,03	0,06
		157,9	63,9	181,6	1,53	0,66	2,31	0,11	0,03	0,04

Tabelle A.1 fortgesetzt.

Probe	Gesteinstyp				Mittel			Standardabweichung		
		Druck (MPa)	Poren-druck (MPa)	T (°C)	ë ($W\,m^{-1}\,K^{-1}$)	ê ($10^{-6}\,m^2\,s^{-1}$)	ñc ($10^6\,J\,m^3\,K^{-1}$)	ë ($W\,m^{-1}\,K^{-1}$)	ê ($10^{-6}\,m^2\,s^{-1}$)	ñc ($10^6\,J\,m^3\,K^{-1}$)
B-04-03	Sandstein	4,0	1,2	42,8	4,17	1,93	2,17	0,09	0,05	0,04
		35,9	1,2	63,6	3,68	1,59	2,32	0,10	0,04	0,01
		74,7	1,7	102,0	3,48	1,40	2,50	0,10	0,04	0,04
		101,7	1,5	128,2	3,45	1,36	2,54	0,09	0,03	0,03
		128,0	1,8	155,0	3,35	1,28	2,61	0,09	0,04	0,03
		160,7	1,5	185,8	3,18	1,20	2,66	0,08	0,03	0,02
B-10-03	Siltstone	3,8	1,2	40,6	3,76	1,65	2,28	0,08	0,03	0,00
		31,1	1,5	58,5	3,23	1,30	2,48	0,06	0,02	0,05
		65,4	1,1	93,7	2,91	1,14	2,55	0,08	0,03	0,01
		89,2	1,7	118,6	2,80	1,07	2,62	0,09	0,03	0,03
		118,3	1,6	144,8	2,70	0,99	2,74	0,05	0,03	0,01
		143,2	1,6	171,1	2,59	0,93	2,79	0,02	0,03	0,01
B-06-37	Kalkstein	1,6	1,4	35,7	2,96	1,29	2,30	0,07	0,03	0,04
		34,7	1,7	59,7	2,60	1,07	2,43	0,06	0,04	0,05
		70,3	1,7	96,6	2,27	0,91	2,49	0,04	0,02	0,05
		98,5	1,7	123,3	2,15	0,87	2,47	0,05	0,01	0,02
		127,6	1,5	150,5	2,07	0,82	2,51	0,06	0,01	0,03
		152,4	1,7	179,3	1,94	0,76	2,55	0,06	0,02	0,03
B-07-03	Sandstein	2,4	1,8	36,7	3,23	1,64	1,98	0,09	0,05	0,04
		41,2	19,2	66,3	2,63	1,22	2,16	0,04	0,04	0,06
		73,2	25,7	101,9	2,36	0,96	2,45	0,07	0,02	0,02
		101,2	39,5	128,5	2,25	0,89	2,52	0,06	0,02	0,04
		121,1	48,6	150,5	2,14	0,79	2,70	0,07	0,02	0,03
		154,2	64,9	182,5	1,99	0,75	2,67	0,07	0,02	0,02
B-07-22	Konglomerat	4,6	1,2	36,7	3,69	1,81	2,03	0,02	0,04	0,04
		33,0	0,8	60,0	3,37	1,38	2,44	0,05	0,03	0,04
		64,9	0,9	94,0	3,13	1,23	2,55	0,04	0,03	0,03
		93,0	1,8	122,8	2,94	1,13	2,60	0,04	0,03	0,05
		118,3	1,9	146,3	2,78	1,10	2,52	0,03	0,03	0,06
		145,9	1,8	174,3	2,66	1,05	2,54	0,04	0,02	0,04
B-08-03	Sandstein	6,0	4,7	44,2	3,27	1,79	1,83	0,05	0,05	0,05
		33,3	12,0	63,7	2,97	1,57	1,90	0,03	0,04	0,05
		74,0	26,1	102,7	2,74	1,35	2,03	0,01	0,04	0,05
		102,5	38,9	131,7	2,56	1,22	2,10	0,07	0,02	0,03
		128,9	50,7	158,3	2,53	1,18	2,14	0,08	0,03	0,05
		164,0	67,1	188,8	2,43	1,17	2,09	0,04	0,02	0,02
B-18-01	Sandstein	2,0	0,8	33,9	3,44	1,73	1,99	0,07	0,04	0,06
		33,0	12,8	58,5	3,50	1,50	2,34	0,09	0,04	0,07
		67,1	25,4	94,8	3,09	1,25	2,48	0,04	0,03	0,04
		88,2	35,6	120,4	2,87	1,10	2,60	0,05	0,03	0,02
		117,6	47,2	146,0	2,70	1,06	2,55	0,07	0,03	0,03
		152,3	63,4	177,0	2,53	0,94	2,69	0,02	0,01	0,01
MOS-22	Kalkstein	7,6	2,2	40,1	2,48	1,28	1,95	0,03	0,01	0,01
		33,9	12,5	62,8	2,19	1,22	1,80	0,05	0,02	0,05
		73,7	30,5	101,8	2,08	0,88	2,38	0,02	0,02	0,06
		102,3	40,5	128,4	1,98	0,88	2,24	0,02	0,01	0,02
		125,4	53,2	154,1	1,89	0,76	2,49	0,04	0,01	0,04
		148,0	57,4	181,7	1,73	0,71	2,42	0,05	0,02	0,05
B-13-11	Sandstein	4,3	1,1	33,2	4,17	2,21	1,89	0,07	0,05	0,02
		32,6	13,6	61,5	3,61	1,50	2,40	0,08	0,02	0,06
		71,7	26,5	99,4	3,22	1,29	2,49	0,08	0,04	0,03
		101,0	38,2	129,5	2,89	1,10	2,63	0,06	0,03	0,03
		129,0	50,9	157,1	2,53	0,97	2,60	0,07	0,03	0,03
		162,5	67,2	187,2	2,30	0,82	2,80	0,06	0,02	0,05
B-13-08	Sandstein	5,6	3,3	46,8	3,74	1,82	2,06	0,04	0,03	0,04
		36,0	14,3	65,1	3,12	1,38	2,27	0,03	0,03	0,04
		72,9	28,6	98,8	2,44	1,05	2,32	0,03	0,01	0,01
		96,1	36,0	124,5	2,22	0,88	2,53	0,05	0,03	0,02
		121,1	46,3	149,6	1,97	0,77	2,55	0,04	0,02	0,05
		154,3	61,1	180,0	1,66	0,64	2,59	0,01	0,01	0,02
B-13-25	Sandstein	1,0	1,0	35,2	3,96	2,05	1,93	0,03	0,06	0,03
		33,2	12,2	60,0	3,67	1,69	2,17	0,10	0,05	0,05
		67,2	27,2	96,1	3,15	1,25	2,52	0,09	0,03	0,06
		95,0	38,4	121,6	2,51	0,98	2,57	0,04	0,02	0,04
		124,4	47,4	175,2	2,00	0,76	2,64	0,05	0,02	0,02

Tabelle A.1 fortgesetzt.

Probe	Gesteinstyp	Druck (MPa)	Poren-druck (MPa)	T (°C)	Mittel ë ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$)	Mittel ê ($10^{-6}\ m^2\ s^{-1}$)	Mittel ñc ($10^6\ J\ m^3\ K^{-1}$)	Standardabweichung ë ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$)	Standardabweichung ê ($10^{-6}\ m^2\ s^{-1}$)	Standardabweichung ñc ($10^6\ J\ m^3\ K^{-1}$)
B-13-10	Sandstein	1,1	0,3	41,1	3,64	1,97	1,85	0,03	0,03	0,02
		36,4	14,4	64,1	3,39	1,45	2,33	0,08	0,04	0,04
		75,1	29,2	102,3	3,06	1,18	2,58	0,04	0,02	0,02
		103,7	40,2	130,1	2,83	1,10	2,58	0,05	0,02	0,01
		132,7	51,3	157,4	2,70	1,00	2,70	0,03	0,02	0,03
		165,2	66,1	190,9	2,40	0,85	2,84	0,05	0,01	0,05
B-13-23	Kalkstein	1,1	0,7	38,1	2,08	1,14	1,82	0,03	0,02	0,04
		37,4	16,4	63,6	2,09	1,12	1,87	0,04	0,03	0,04
		79,9	30,9	105,8	1,99	0,89	2,24	0,01	0,01	0,04
		108,9	43,2	136,0	1,97	0,78	2,53	0,04	0,02	0,03
		136,2	53,4	162,4	1,86	0,78	2,39	0,04	0,01	0,06
		164,2	64,1	192,1	1,69	0,67	2,54	0,04	0,01	0,06
B-13-18	Sandstein	1,1	0,6	34,7	4,16	2,13	1,95	0,03	0,06	0,05
		36,6	13,6	64,2	3,70	1,65	2,25	0,08	0,04	0,06
		76,7	29,3	102,0	3,10	1,24	2,49	0,09	0,04	0,01
		99,1	38,3	126,2	2,73	1,05	2,59	0,07	0,03	0,01
		126,4	50,1	152,5	2,25	0,87	2,59	0,02	0,01	0,01
		156,6	63,0	182,0	2,07	0,76	2,71	0,05	0,02	0,06
B-13-04	Sandstein	2,0	0,6	39,3	3,47	1,79	1,94	0,03	0,04	0,04
		37,6	15,2	63,0	3,21	1,42	2,25	0,04	0,04	0,04
		65,9	24,4	102,3	3,02	1,17	2,57	0,07	0,01	0,02
		98,6	40,6	130,5	2,92	1,10	2,65	0,02	0,01	0,01
		131,3	50,8	157,7	2,74	1,01	2,72	0,05	0,03	0,03
		159,9	64,4	187,5	2,54	0,91	2,79	0,06	0,02	0,02
MOS-15	Dolomit	5,5	1,6	59,4	3,62	1,51	2,39	0,06	0,04	0,03
		68,2	26,7	94,5	3,33	1,36	2,45	0,04	0,03	0,06
		93,3	36,8	120,5	3,19	1,27	2,52	0,07	0,03	0,02
		124,6	49,8	148,3	3,14	1,24	2,53	0,05	0,03	0,05
		154,3	61,7	181,7	3,05	1,20	2,54	0,08	0,03	0,02
B-13-13	Sandstein	1,0	0,5	37,3	4,16	2,34	1,78	0,03	0,04	0,04
		33,5	13,9	60,7	4,05	1,77	2,28	0,07	0,04	0,02
		73,6	29,9	101,7	3,68	1,45	2,54	0,04	0,02	0,02
		102,9	41,5	129,3	3,42	1,30	2,63	0,04	0,04	0,03
		130,7	53,1	155,5	3,09	1,18	2,61	0,05	0,02	0,02
		158,0	62,6	185,9	2,84	1,00	2,84	0,05	0,01	0,03
B-08-07	Sandstein	4,1	1,2	42,6	2,63	1,31	2,01	0,03	0,04	0,04
		40,8	16,4	66,2	2,57	1,16	2,23	0,04	0,02	0,04
		76,3	31,8	103,7	2,54	1,00	2,54	0,02	0,02	0,07
		104,3	41,8	130,6	2,52	0,96	2,64	0,04	0,01	0,03
		123,5	49,6	149,5	2,51	0,94	2,67	0,03	0,03	0,02
		152,6	61,8	176,5	2,50	0,90	2,76	0,05	0,02	0,02
B-05-02	Sandstein	1,2	0,6	44,7	3,05	1,47	2,08	0,04	0,04	0,07
		36,8	14,8	65,7	3,18	1,35	2,36	0,06	0,02	0,04
		74,2	29,8	101,5	2,99	1,19	2,52	0,08	0,03	0,04
		101,4	42,0	127,6	3,12	1,23	2,54	0,06	0,03	0,05
		128,9	51,9	154,8	3,01	1,19	2,54	0,05	0,02	0,01
		144,2	57,1	170,7	2,96	1,17	2,53	0,03	0,03	0,02

Tabelle A.2: *Koeffizienten a, k und b der Regression für die Druck- und temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeiten (λ) der einzelnen Proben nach Gleichung 4.11 (vgl. Abschnitt 4.5.1).*

Probe	Gesteinstyp	$\lambda(W\ m^{-1}\ K^{-1}) = a \cdot T^2(C)k \cdot T(C) + b$		
		a	k	b
B-14-03	Sandstein	7,00E-06	-0,0145	4,4626
B-14-07	Sandstein	2,00E-05	-0,0153	4,1776
B-05-02	Sandstein	-2,00E-05	0,0024	3,0069
B-04-03	Sandstein	4,00E-05	-0,0147	4,6149
B-04-04	Sandstein	7,00E-05	-0,0347	6,9734
B-17-10	Sandstein	2,00E-05	-0,013	4,1652
B-17-12	Sandstein	-6,00E-06	-0,008	4,5005
B-17-16	Sandstein	2,00E-05	-0,0111	3,7495
B-17-18	Sandstein	9,00E-05	-0,0304	4,4877
B-18-01	Sandstein	-4,00E-06	-0,0065	3,7518
B-10-06	Sandstein	0,0001	-0,0446	5,6572
B-13-04	Sandstein	4,00E-06	-0,0066	-3,6749
B-13-08	Sandstein	9,00E-05	-0,0344	5,0802
B-13-10	Sandstein	1,00E-05	-0,0107	4,0439
B-13-11	Sandstein	3,00E-05	-0,0175	4,6816
B-13-13	Sandstein	-1,00E-05	-0,006	4,4294
B-13-18	Sandstein	2,00E-05	-0,02	4,8557
B-13-25	Sandstein	2,00E-05	-0,0184	4,647
B-06-05	Sandstein	-6,00E-05	-0,0028	5,7447
B-06-30	Sandstein	4,00E-05	-0,0178	4,3746
B-07-16	Sandstein	1,00E-05	-0,0092	3,6835
B-08-03	Sandstein	4,00E-05	-0,0141	3,7811
B-08-07	Sandstein	7,00E-06	-0,0024	2,7122
B-09-02	Tonstein	6,00E-05	-0,0207	3,423
B-09-07	Tonstein	7,00E-06	-0,0046	2,9906
B-09-08	Tonstein	5,00E-05	-0,0213	4,6222
B-10-03	Tonstein	7,00E-05	-0,0237	4,4961
B-12-03	Kalkstein	6,00E-06	-0,007	2,2712
B-01 03	Kalkstein	3,00E-05	-0,0168	3,8852
mos 15	Kalkstein	3,00E-05	-0,0128	4,2448
mos 22	Kalkstein	1,00E-05	-0,0073	2,6981
B-13-23	Kalkstein	-2,00E-05	0,0021	2,0279
B-06-32	Kalkstein	3,00E-05	-0,01	3,3288
B-06-37	Kalkstein	4,00E-05	-0,0162	3,4461
B-06-39	Kalkstein	6,00E-05	-0,022	5,8072
B-11-01	Kalkstein	3,00E-05	-0,016	3,462
B-11-05	Kalkstein	3,00E-05	-0,0129	3,4192
B-07-29	Kalkstein	2,00E-05	-0,0152	4,1106
B-07-03	Konglomerat	5,00E-05	-0,0196	3,8103
B-07-22	Konglomerat	3,00E-05	-0,0129	4,0943

Tabelle A.3: *Koeffizienten k und b der Regression für die Druck- und temperaturabhängige Temperaturleitfähigkeiten (κ) der einzelnen Proben nach Gleichung 4.11 (vgl. Abschnitt 4.5.1).*

Probe	Gesteinstyp	$\kappa(10^{-6}m^2\ s^{-1}) = a \cdot T^2(C)k \cdot T(C) + b$		
		a	k	b
B-14-03	Sandstein	3,00E-05	-0,0156	2,6905
B-14-07	Sandstein	3,00E-05	-0,0132	2,2244
B-05-02	Sandstein	3,00E-05	-0,0079	1,7566
B-04-03	Sandstein	4,00E-05	-0,0125	2,3271
B-04-04	Sandstein	1,00E-05	-0,0098	2,5343
B-17-10	Sandstein	4,00E-05	-0,0155	2,3396
B-17-12	Sandstein	4,00E-05	-0,0161	2,6349
B-17-16	Sandstein	1,00E-05	-0,0045	1,4128
B-17-18	Sandstein	5,00E-05	-0,019	2,3597
B-18-01	Sandstein	3,00E-05	-0,0114	2,0776
B-10-06	Sandstein	5,00E-05	-0,0196	2,4419
B-13-04	Sandstein	4,00E-05	-0,0138	2,2218
B-13-08	Sandstein	6,00E-05	-0,0223	2,6587
B-13-10	Sandstein	5,00E-05	-0,0174	2,5078
B-13-11	Sandstein	5,00E-05	-0,0196	2,6934
B-13-13	Sandstein	5,00E-05	-0,0191	2,8912
B-13-18	Sandstein	5,00E-05	-0,0195	2,7343
B-13-25	Sandstein	5,00E-05	-0,0207	2,7274
B-06-05	Sandstein	-2,00E-05	-0,007	2,9201
B-06-30	Sandstein	5,00E-05	-0,0177	2,4997
B-07-16	Sandstein	2,00E-05	-0,0113	2,2776
B-08-03	Sandstein	4,00E-05	-0,0127	2,2563
B-08-07	Sandstein	3,00E-05	-0,0084	1,6105
B-09-02	Tonstein	4,00E-05	-0,0135	1,8671
B-09-07	Tonstein	2,00E-05	-0,009	1,7885
B-09-08	Tonstein	6,00E-05	-0,0204	2,6723
B-10-03	Tonstein	4,00E-05	-0,0138	2,0664
B-12-03	Kalkstein	2,00E-05	-0,0076	1,4084
B-01 03	Kalkstein	3,00E-05	-0,0146	2,2233
mos 15	Kalkstein	2,00E-05	-0,0075	1,88
mos 22	Kalkstein	2,00E-05	-0,0087	1,6197
B-13-23	Kalkstein	7,00E-06	-0,0048	1,3446
B-06-32	Kalkstein	2,00E-05	-0,0073	1,5391
B-06-37	Kalkstein	3,00E-05	-0,0087	1,5381
B-06-39	Kalkstein	3,00E-05	-0,0122	2,4455
B-11-01	Kalkstein	2,00E-05	-0,0098	1,712
B-11-05	Kalkstein	1,00E-05	-0,0063	1,7079
B-07-29	Kalkstein	2,00E-05	-0,0117	2,1782
B-07-03	Konglomerat	5,00E-05	-0,016	2,1264
B-07-22	Konglomerat	5,00E-05	-0,0159	2,2543

Tabelle A.4: *Koeffizienten a, k und b der Regression für die Druck- und temperaturabhängige volumetrische Wärmekapazitäten (ρ c_P) der einzelnen Proben nach Gleichung 4.11 (vgl. Abschnitt 4.5.1).*

Probe	Gesteinstyp	$\rho \cdot c_P(10^6 Jm^{-3}\ K^{-1}) = a \cdot T^2(C) + k \cdot T(C) + b$		
		a	k	b
B-14 03	Sandstein	-1,00E-05	0,0074	1,5488
B-14 07	Sandstein	-2,00E-05	0,0084	1,7443
B-05-02	Sandstein	-6,00E-05	0,0153	1,5443
B-04-03	Sandstein	-2,00E-05	0,008	1,8788
B-04-04	Sandstein	-3,00E-05	0,0103	1,8918
B-17-10	Sandstein	-6,00E-05	0,0163	1,4191
B-17-12	Sandstein	-5,00E-05	0,0149	1,4972
B-17-16	Sandstein	-3,00E-06	0,001	2,6456
B-17-18	Sandstein	-8,00E-06	0,0068	1,7409
B-18-01	Sandstein	-4,00E-05	0,0119	1,6813
B-10-06	Sandstein	-8,00E-06	0,0018	2,2547
B-13-04	Sandstein	-4,00E-05	0,0153	1,4297
B-13-08	Sandstein	-3,00E-05	0,0097	1,6864
B-13-10	Sandstein	-4,00E-05	0,0153	1,3934
B-13-11	Sandstein	-3,00E-05	0,0124	1,6128
B-13-13	Sandstein	-5,00E-05	0,0161	1,3383
B-13-18	Sandstein	-3,00E-05	0,0121	1,5897
B-13-25	Sandstein	-5,00E-05	0,0158	1,4312
B-06-05	Sandstein	-1,00E-05	0,0063	1,8793
B-06-30	Sandstein	-3,00E-05	0,0117	1,5581
B-07-16	Sandstein	-3,00E-06	0,0065	1,52
B-08-03	Sandstein	-2,00E-05	0,007	1,5521
B-08-07	Sandstein	-4,00E-05	0,0135	1,499
B-09-02	Tonstein	-2,00E-05	0,0064	1,6813
B-09-07	Tonstein	-3,00E-05	0,0106	1,5323
B-09-08	Tonstein	-3,00E-05	0,0124	1,6128
B-10-03	Tonstein	-1,00E-05	0,006	2,1027
B-12-03	Kalkstein	-2,00E-05	0,0077	1,4838
B-01 03	Kalkstein	-3,00E-05	0,0102	1,5071
mos 15	Kalkstein	-1,00E-05	0,0038	2,2017
mos 22	Kalkstein	-2,00E-05	0,0096	1,4945
B-13-23	Kalkstein	-3,00E-05	0,011	1,3791
B-06-32	Kalkstein	-2,00E-05	0,0059	2,1127
B-06-37	Kalkstein	-1,00E-05	0,0038	2,2054
B-06-39	Kalkstein	-2,00E-05	0,0048	2,3231
B-11-01	Kalkstein	-9,00E-06	0,004	1,9673
B-11-05	Kalkstein	3,00E-06	-0,0003	2,0056
B-07-29	Kalkstein	-1,00E-05	0,0054	1,8162
B-07-03	Konglomerat	-3,00E-05	0,0111	1,5853
B-07-22	Konglomerat	-6,00E-05	0,0156	1,6133