

Ben Lotz

NEUBEWERTUNG DES REZENTEN  
WÄRMESTROMS IM  
NORDOSTDEUTSCHEN BECKEN



Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades  
doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.)  
im Fachbereich Geowissenschaften am  
Institut für Geologische Wissenschaften,  
Freie Universität Berlin

Erster Gutachter: Univ.-Prof. Dr. Hans Jürgen Götze

Zweiter Gutachter: Univ.-Prof. Dr. Rainer Kind

Eingereicht am: 08.01.2004

Tag der Disputation: 09.02.2004

*Meiner Familie*

# Danksagung

Das Projekt „Neubewertung des rezenten Wärmestroms im Nordostdeutschen Becken“, dessen Ergebnisse in der vorliegenden Arbeit dargestellt werden, wurde durch das GFZ Potsdam finanziert.

Herrn Prof. Dr. H.J. Götze bin ich für die konstruktive Kritik, wissenschaftliche Begleitung und die Begutachtung der Arbeit dankbar. Für die Übernahme des Zweitgutachtens danke ich Herrn Prof. Dr. R. Kind. Frau Dr. habil. A. Förster bin ich für ihre Unterstützung und die wissenschaftliche Betreuung während der Erstellung dieser Arbeit dankbar. Nicht zuletzt ihre stete Diskussionsbereitschaft und Anteilnahme hat zu vielen Anregungen geführt, die Eingang in diese Arbeit gefunden haben.

Bei der Recherche und Auswahl von Bohrkernen haben mich die beteiligten Landesämter unterstützt. Namentlich Herr Dr. J. Kopp und Herr D. Zorn vom Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg, Herr G. Behrens, Frau R. Demel und vor allem Herr J. Iffland vom Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern sowie die Herren Dr. B.-C. Ehling und F. Kersten vom Geologisches Landesamt Sachsen-Anhalt haben diese Arbeit durch ihre Kooperation mit ermöglicht. Sehr hilfsbereit waren auch die Mitarbeiter der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Außenstelle Berlin, Herr Dr. P. Krull, Herr Dr. N. Hoffmann und Herr Dr. P. Hoth.

Für die gute Zusammenarbeit danke ich der EEG Erdgas Erdöl GmbH Berlin, insbesondere Herrn Dr. S. Schretzenmayr und Frau S. Baltrusch, der EWE AG Oldenburg, dort Herrn Dr. M. Hemmerich, und Herrn S. Fricke von der Gesellschaft für Bohrlochmessung mbH in Gommern.

Herr R. Schellschmidt ermöglichte mir die Durchführung von Wärmeleitfähigkeitsmessungen am Institut für geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (GGA) in Hannover. Für die Diskussionen und Anregungen, die ich im Rahmen eines Aufenthaltes an der Universität Aarhus in Dänemark von Prof. Dr. N. Balling und Dr. S.B. Nielsen erhalten habe, möchte ich mich ebenso bedanken wie für die freundliche Aufnahme am dortigen geophysikalischen Institut.

Am GFZ Potsdam unterstützten mich laborativ die Herren R. Naumann (Sektion 4.2, RFA Analytik), Dr. P. Dulski (Sektion 4.3, ICP-MS Analytik), Dr. D. Freund (Sektion 3.2, He-Pyknometer) und G. Berger (Sektion 4.2, Dünnschliffherstellung) sowie die Mitarbeiter der Sektion 5.2 Geothermie. Herr Dr. D. Stromeyer (Sektion 5.3) hat die Implementierung des thermischen Krustenmodells in die Matlab Umgebung ermöglicht.

Allen, die mich während der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben, gilt mein Dank.

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XIII
Symbole und Abkürzungen	XIV
Einleitung	1
<b>1 Grundlagen zur Berechnung der terrestrischen Wärmestromdichte</b>	<b>4</b>
1.1 Einführung . . . . .	4
1.2 Temperatur . . . . .	6
1.3 Wärmeleitfähigkeit . . . . .	8
1.3.1 Bestimmung aus Labormessungen . . . . .	9
1.3.2 Korrektur zu in-situ Bedingungen . . . . .	12
1.3.3 Bestimmung aus Bohrlochmessungen . . . . .	15
1.4 Radiogene Wärmeproduktion . . . . .	18
1.4.1 Bestimmung aus Labormessungen . . . . .	19
1.4.2 Bestimmung aus Bohrlochmessungen . . . . .	23
1.5 Berechnung der terrestrischen Wärmestromdichte . . . . .	25
1.5.1 Intervallmethode . . . . .	25
1.5.2 Bullard-Methode . . . . .	28
1.5.3 Störungen und ihre Korrektur . . . . .	29
1.5.4 Konsequenzen durch die Qualität der Eingangsparameter . . . . .	33
<b>2 Geologie des Nordostdeutschen Beckens (NEDB)</b>	<b>35</b>
2.1 Strukturgeologischer Überblick . . . . .	35
2.2 Tektonische Entwicklung . . . . .	41
2.3 Stratigraphie, Fazies und Lithologie . . . . .	43
2.3.1 Prädevon . . . . .	43
2.3.2 Devon . . . . .	44
2.3.3 Karbon . . . . .	44
2.3.4 Permokarbonische Vulkanite . . . . .	46
2.3.5 Perm (Sedimentäres Rotliegend) . . . . .	49

2.3.6	Perm (Zechstein) . . . . .	56
2.3.7	Postperm . . . . .	57
<b>3</b>	<b>Bestimmung der Wärmestromdichte im NEDB</b>	<b>59</b>
3.1	Datenlage im NEDB und Auswahl der Lokationen zur Bestimmung der Wärmestromdichte . . . . .	59
3.1.1	Temperaturmessungen . . . . .	59
3.1.2	Thermische Gesteinsparameter . . . . .	60
3.1.3	Bohrkerne und Bohrungsunterlagen . . . . .	61
3.1.4	Weitere relevante Daten . . . . .	63
3.2	Neudaten thermischer Gesteinsparameter . . . . .	63
3.2.1	Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit (und Porosität) . . . . .	63
3.2.1.1	Anisotropie, Porosität und Mineralogie . . . . .	64
3.2.1.2	Formationswärmeleitfähigkeiten (Präzechstein) . . . . .	71
3.2.2	Bestimmung der radiogenen Wärmeproduktion . . . . .	74
3.2.2.1	Wärmeproduktion aus U-, Th- und K-Gehalten . . . . .	75
3.2.2.2	Wärmeproduktion aus der Bohrlochgeophysik . . . . .	76
3.2.3	Diskussion zu Wärmeleitfähigkeit und Wärmeproduktion . . . . .	83
3.3	Bewertung paläoklimatischer Effekte im NEDB . . . . .	86
3.4	Untersuchung des Einflusses von Salzstrukturen auf das Temperaturfeld . . . . .	88
3.4.1	Eindimensionale Modellierungen . . . . .	90
3.4.2	Zweidimensionale Modellierungen . . . . .	93
3.4.3	Dreidimensionale Modellierungen . . . . .	99
3.4.4	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	104
3.5	Berechnung der Wärmestromdichte an ausgewählten Bohrungen im NEDB . . . . .	106
3.5.1	Bohrungen mit vom Bohrvorgang ungestörten Temperaturprofilen . . . . .	106
3.5.1.1	<i>GrSk 3/90</i> . . . . .	106
3.5.1.2	<i>Gs 2/67</i> . . . . .	111
3.5.1.3	<i>RmwL 11A/69</i> . . . . .	115
3.5.1.4	<i>Sam 101/62</i> . . . . .	120
3.5.2	Bohrungen mit vom Bohrvorgang gering gestörten Temperaturprofilen . . . . .	124
3.5.2.1	<i>Barth 1/63</i> . . . . .	125
3.5.2.2	<i>Chi 1/71</i> . . . . .	131
3.5.2.3	<i>Pw 2/76</i> . . . . .	134
3.5.2.4	<i>Sw 2/64</i> . . . . .	137
3.5.3	Bohrungen mit vom Bohrvorgang stark gestörten Temperaturprofilen . . . . .	140
3.5.3.1	<i>Binz 1/73</i> . . . . .	140
3.5.3.2	<i>Gap 1/86</i> . . . . .	143
3.5.3.3	<i>FdlN 2/70</i> . . . . .	146
3.5.3.4	<i>Pnl 1/75</i> . . . . .	149
3.5.3.5	<i>Gv 1/78</i> . . . . .	152

<b>4</b>	<b>Interpretation der Wärmestromdichte im NEDB</b>	<b>155</b>
4.1	Oberflächenwärmestromdichte und radiogene Wärmeproduktion . . . . .	155
4.2	2D Krustenmodellierung . . . . .	158
4.2.1	Modellaufbau . . . . .	158
4.2.2	Modellierte Temperaturen und Verteilung der Wärmestromdichte . . . .	164
4.2.3	Lage der thermischen Lithosphären-Asthenosphären-Grenze . . . . .	170
4.2.4	Zusammenfassung . . . . .	174
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>175</b>
5.1	Oberflächen- und Mantelwärmestrom ( $q_s$ und $q_m$ ) . . . . .	175
5.2	Temperaturverteilung . . . . .	179
5.3	Schlussfolgerungen . . . . .	180
	<b>Zusammenfassung</b>	<b>182</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>186</b>
	<b>Anhang</b>	<b>204</b>
A.1	Ergänzungen . . . . .	204
A.1.1	Bohrlochmessungen: GR-Korrekturdiagramme . . . . .	204
A.1.2	Vulkanitgliederungen . . . . .	206
A.1.3	Paläoklima . . . . .	209
A.1.4	1D Modellierung . . . . .	209
A.2	Messwerte . . . . .	211
A.3	Wärmeproduktion aus Bohrlochmessungen . . . . .	216
A.3.1	Benutzte Bohrungen mit GR-Logs . . . . .	216
A.4	Auswertungen der GR-Logs . . . . .	217
A.5	Formationswärmeleitfähigkeiten . . . . .	223
A.6	Modalbestandsanalysen . . . . .	227

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Aufbau der TCS-Apparatur . . . . .	11
1.2	Beispiel eines Messergebnisses mit der TCS-Apparatur . . . . .	11
1.3	Mittlere Kurven der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit nach Gesteinsklassen nach Seipold (2001). . . . .	15
1.4	Aufbau eines wellenlängendispersiven Röntgenfluoreszenzspektrometers . . . . .	19
1.5	Prinzipieller Aufbau eines Massenspektrometers . . . . .	20
1.6	Prinzipielle Anordnung des Gammaskpektrometers . . . . .	22
1.7	Bausteine der Impulsverarbeitung . . . . .	22
1.8	API-Sonden Kalibrierungseinrichtung in Houston . . . . .	23
1.9	Beispiel zur Intervallmethode . . . . .	27
1.10	Beispiel zur Bullard-Methode . . . . .	28
2.1	Das südliche Permbecken . . . . .	36
2.2	Modellvorstellung zum Übergangsbereich Varisziden - Baltika (nach Bayer et al., 2002). . . . .	38
2.3	Profilschnitt durch Nordostdeutschland nach Franke et al. (1996). . . . .	39
2.4	Tektonische Übersichtskarte des NEDB . . . . .	40
2.5	Stratigraphie des Präperm . . . . .	45
2.6	Verbreitung permokarbonischer Vulkanitassoziationen/-serien im NEDB . . . . .	47
2.7	Zusammensetzung permokarbonischer Vulkanite im NEDB zusammengestellt nach Benek et al. (1995, 1996) . . . . .	48
2.8	Rotliegend-Stratigraphie . . . . .	50
2.9	Stark vereinfachte Faziesverteilung nach dem NW-European Gas Atlas . . . . .	54
2.10	Fazies und Zementarten . . . . .	56
3.1	Karte der verwendeten Bohrungen . . . . .	62
3.2	Orientierungen der Wärmeleitfähigkeitsmessungen . . . . .	63
3.3	Häufigkeitsverteilung der Anisotropiewerte . . . . .	67
3.4	Einfluss der Tiefe auf Porosität und Wärmeleitfähigkeit . . . . .	68
3.5	Einfluss der Porenfüllung auf die Wärmeleitfähigkeit . . . . .	70
3.6	Abweichungen gemessener und kalkulierter Wärmeleitfähigkeit . . . . .	71
3.7	Akustische Laufzeit und Wärmeleitfähigkeit . . . . .	72



3.8	Korrelierung von GR-Logs in GE- und API-Einheiten . . . . .	78
3.9	Gammalog der Bohrung <i>Pa 1/68</i> im Teufenbereich 4693–7030 m . . . . .	81
3.10	Paläoklima und Temperaturfeld . . . . .	87
3.11	Wärmestromdichte Ostdeutschlands . . . . .	89
3.12	Einfluss von Salz im 1D Fall . . . . .	91
3.13	Einfluss von Salz im 1D Fall, Bohrung <i>Pa 1/68</i> . . . . .	92
3.14	Modellaufbau (Zonen 1-5, s. Tab. 3.9) für unterschiedliche Salzmächtigkeiten zur Modellierung mit Shemat . . . . .	93
3.15	Ergebnisse der 2D Modellierung . . . . .	95
3.16	Modellierung an der Struktur Parchim . . . . .	96
3.17	Vergleich der Modellergebnisse Struktur Parchim . . . . .	97
3.18	Modellierung an den Salzstrukturen Gransee . . . . .	98
3.19	Ergebnisse der 2D Modellierung an den Salzstrukturen Gransee . . . . .	98
3.20	Aufsicht auf das 3D Strukturmodell Gransee . . . . .	100
3.21	Tiefenschnitte der 3D Modellierung Gransee . . . . .	101
3.22	3D Modellierung Gransee . . . . .	102
3.23	Beobachtungsprofile der 3D Strukturmodellierung Gransee . . . . .	103
3.24	Temperaturprofil der Bohrung <i>GrSk 3/90</i> . . . . .	108
3.25	Temperatur- und -gradientenprofil der Bohrung <i>GrSk 3/90</i> . . . . .	109
3.26	Bullardplot über die Staßfurtfolge der Bohrung <i>GrSk 3/90</i> . . . . .	111
3.27	Temperatur- und -gradientenprofil der Bohrung <i>Gs 2/67</i> . . . . .	113
3.28	Temperatur- und -gradientenprofil der Bohrung <i>RmwL 11A/69</i> . . . . .	117
3.29	Bullardplot über die Salzabfolge der Bohrung <i>RmwL 11A/69</i> . . . . .	119
3.30	Bestimmung der Wärmestromdichte (Intervallmethode) an der Bohrung <i>RmwL 11A/69</i> innerhalb der Zechsteinabfolge . . . . .	119
3.31	Temperatur- und Gradientenprofil der Bohrung <i>Sam 101/62</i> . . . . .	122
3.32	Kernkisten (Vulkanite) der Bohrung <i>Sam 101/62</i> . . . . .	123
3.33	Temperatur- und Temperaturgradientenprofil der Bohrung <i>Barth 1/63</i> . . . . .	126
3.34	Temperatur-, Temperaturgradienten- und Gammaprofil der Vulkanite (Bohrung <i>Barth 1/63</i> ) . . . . .	128
3.35	Bullardplot Staßfurtsteinsalz der Bohrung <i>Barth 1/63</i> . . . . .	129
3.36	Temperatur- und -gradientenprofil der Bohrung <i>Chi 1/71</i> . . . . .	132
3.37	Bullardplot Staßfurtsteinsalz (Bohrung <i>Chi 1/71</i> ) . . . . .	134
3.38	Temperatur- und -gradientenprofil der Bohrung <i>Pw 2/76</i> . . . . .	136
3.39	Temperatur- und -gradientenprofil der Bohrung <i>Sw 2/64</i> . . . . .	138
3.40	Temperatur- und -gradientenprofil der Bohrung <i>Binz 1/73</i> . . . . .	142
3.41	Temperatur- und -gradientenprofil der Bohrung <i>Gap 1/86</i> . . . . .	145
3.42	Temperatur- und -gradientenprofil der Bohrung <i>FdlN 2/70</i> . . . . .	148
3.43	Temperatur- und -gradientenprofil der Bohrung <i>Pnl 1/75</i> . . . . .	151
3.44	Temperatur- und -gradientenprofil der Bohrung <i>Gv 1/78</i> . . . . .	153

4.1	Lokationen mit Angabe der Wärmestromdichte und Lage der seismischen Profile	156
4.2	Wärmestromdichte-Bilanzierung an 5 Lokationen . . . . .	157
4.3	Modellvarianten der thermischen 2D Modellierung . . . . .	159
4.4	Thermische Struktur entlang des modellierten Profils . . . . .	165
4.5	Vertikale Verteilung der Wärmeproduktion in den Krustenmodellen . . . . .	167
4.6	Differenzenbetrachtung von Modellvariante A und B . . . . .	169
4.7	Beeinflussung von $q_m$ durch unterschiedliche Lage der Lithosphären-Asthenosphären-Grenze . . . . .	170
4.8	Beeinflussung von $q_s$ durch unterschiedliche Lage der Lithosphären-Asthenosphären-Grenze . . . . .	171
4.9	Modellierte Temperaturen bei unterschiedlichem Verlauf Lithosphären-Asthenosphären-Grenze . . . . .	173
A.1	GR-Absorptionskorrektur für 95 mm Sonden . . . . .	204
A.2	GR-Absorptionskorrektur für 76 mm Sonden . . . . .	205

# Tabellenverzeichnis

1.1	Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit von kristallinen Gesteinstypen nach Seipold (2001). . . . .	14
1.2	Mögliche Genauigkeit der Wärmestromdichteberechnungen in Abhängigkeit von der Bestimmung der Eingangsparameter . . . . .	34
2.1	Faziestypen im Rotliegend Norddeutschlands (aus: Gast et al., 1998, S. 75). . . . .	51
3.1	Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\perp}$ für wassergesättigte Proben . . . . .	65
3.2	Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\parallel}$ für wassergesättigte Proben . . . . .	66
3.3	Anisotropie der wassergesättigten Proben . . . . .	66
3.4	Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Hauptzementart . . . . .	68
3.5	Formationswärmeleitfähigkeiten im NEDB . . . . .	73
3.6	Tiefenintervalle von Bohrungen zur Umrechnung von Gamma-Einheiten nach API-Einheiten . . . . .	78
3.7	Wärmeproduktion von Gesteinen nach Labormessungen und GR-Log Auswertung	79
3.8	Wärmeproduktion von Formationen nach GR-Log Auswertung . . . . .	82
3.9	Eigenschaften der Modell-Zonen . . . . .	94
3.10	Wärmestromdichte der Bohrung <i>GrSk 3/90</i> nach der Intervallmethode . . . . .	111
3.11	Wärmestromdichte der Bohrung <i>Gs 2/67</i> nach der Intervallmethode . . . . .	115
3.12	Wärmestromdichte der Bohrung <i>RmwL 11A/69</i> nach der Intervallmethode . . . . .	120
3.13	Wärmestromdichte der Bohrung <i>Sam 101/62</i> nach der Intervallmethode . . . . .	123
3.14	Wärmestromdichte der Bohrung <i>Barth 1/63</i> nach der Intervallmethode . . . . .	130
3.15	Wärmestromdichte der Bohrung <i>Chi 1/71</i> nach der Intervallmethode . . . . .	134
3.16	Wärmestromdichte der Bohrung <i>Pw 2/76</i> nach der Intervallmethode . . . . .	137
3.17	Wärmestromdichte der Bohrung <i>Sw 2/64</i> nach der Intervallmethode . . . . .	140
3.18	Wärmestromdichte der Bohrung <i>Binz 1/73</i> nach der Intervallmethode . . . . .	143
3.19	Wärmestromdichte der Bohrung <i>Gap 1/86</i> nach der Intervallmethode . . . . .	146
3.20	Wärmestromdichte der Bohrung <i>FdlN 2/70</i> nach der Intervallmethode . . . . .	149
3.21	Wärmestromdichte der Bohrung <i>Pnl 1/75</i> nach der Intervallmethode . . . . .	152
3.22	Wärmestromdichte der Bohrung <i>Gv 1/73</i> nach der Intervallmethode . . . . .	154
4.1	Zusammenfassung der in der 2D Krustenmodellierung benutzten thermischen Parameter . . . . .	163

A.1	Gliederung der sauren Vulkanite . . . . .	206
A.2	Gliederung der intermediären und basischen Vulkanite . . . . .	207
A.3	Übersicht der bei der Volumenbilanz berücksichtigten regionalen Vulkaniteinheiten nach Benek et al. (1995) . . . . .	208
A.4	Oberflächentemperaturen in der Bundesrepublik Deutschland nach Grubbe (1981), zitiert in Zoth & Haenel (1988) . . . . .	209
A.5	Wärmeproduktion aus Messdaten . . . . .	215
A.6	Übersicht der benutzten GR-Logs . . . . .	216
A.7	Auswertung der Bohrlochmessungen der natürlichen Gammastrahlung zur Bestimmung der radiogenen Wärmeproduktion . . . . .	223
A.8	Ermittelte Formationswärmeleitfähigkeiten . . . . .	224
A.9	Modalbestandsanalysen . . . . .	228

# Symbole und Abkürzungen

## Symbole

$A$	radiogene Wärmeproduktion	$\mu\text{W}/\text{m}^3$
$a$	Temperaturleitfähigkeit	$\text{m}^2/\text{s}$
$\alpha$	gesteinsspezifischer Druckkoeffizient	$\%/ \text{kbar}$
$c_p$	spezifische Wärme	$\text{J}/\text{K}/\text{kg}$
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	$\text{W}/\text{m}/\text{K}$
$p$	lithostatischer Druck	kbar
$\phi$	Porosität	%
$q_s, Q$	Oberflächenwärmestromdichte, Wärmestromdichte	$\text{mW}/\text{m}^2$
$\rho$	Gesteinsdichte	$\text{kg}/\text{m}^3$
$T, \Delta T$	Temperatur, Temperaturdifferenz	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$
$\text{grad}T$	Temperaturgradient	$\text{K}/\text{km}, ^{\circ}\text{C}/\text{km}$
$t_z, t_s$	Zirkulationszeit der Bohrlochspülung, Standzeit der Bohrung	h
$v$	akustische Laufzeit	$\text{km}/\text{s}$
$z$	Tiefe	m, km

## Häufige Abkürzungen

AFS	Altmark-Flechtingen-Subherzyn
BHT	Temperatur an der Bohrlochsohle (Bottom-Hole-Temperature)
EBB	Ostbrandenburg
EL	Elbe Lineament
EOL	Elbe Odra Linie
EFS	Elbe Störungssystem (Elbe-Fault-System)
GR	Gamma Ray (Bohrlochmessung der natürl. Radioaktivität)
KDF	Kaledonische Deformationsfront, entspr. weitestgehend der TS
MVR	Mecklenburg-Vorpommern-Rügen
NEDB	Nordostdeutsches Becken
STZ	Sorgenfrei-Tornquist-Zone
TEF	Trans-European-Fault
TS	Thor Suture, entspr. weitestgehend der KDF
TTZ	Tornquist-Teisseyre-Zone
VDF	Variszische Deformationsfront