

Messungen der thermischen Transportparameter an Amphiboliten bei hohen Drücken und hohen Temperaturen

U. Seipold
GeoForschungsZentrum Potsdam

Aufgabenstellung

Die Wärmeleitmessungen an den Gesteinsproben der KTB werden in relativ großem Umfang im Feldlabor bei Normalbedingungen durchgeführt. Dadurch entsteht die Aufgabe, durch zusätzliche Messungen zu untersuchen, mit welchen Änderungen bei großen Teufen zu rechnen ist, d.h. wie sich insbesondere Druck und Temperatur auswirken.

Bei der Wahl der Amphibolite als Untersuchungsgegenstand ist auch berücksichtigt worden, daß bisher kaum Untersuchungen der thermischen Transportparameter bei hohen Drücken und hohen Temperaturen in der Literatur zu finden sind, obwohl dieser Gesteinstyp eine hohe Bedeutung als ein Kandidat für den Aufbau der unteren Kruste hat.

Darstellung der Meßmethodik

Für die Untersuchungen wurde ein eigenes transientes Meßverfahren benutzt, das die gleichzeitige Bestimmung von Wärme- und Temperaturleitfähigkeit gestattet. Es arbeitet mit einzelnen Wärmeimpulsen endlicher Impulsdauer, die in der Achse der zylindrischen Gesteinsproben (27 mm Durchmesser, 43 mm Länge) durch einen Heizdraht erzeugt werden. Die Impulse breiten sich in radialer Richtung aus und werden in einem bekannten Abstand vom Heizer mit Hilfe eines Thermoelements registriert. Aus den so erhaltenen Temperatur-Zeit-Kurven werden als Meßgrößen die Impulshöhe und die Halbwertszeit entnommen. Außerdem wird durch das Abscannen von Heizstrom und -spannung und anschließende zeitliche Integration die Impulsenergie bestimmt. Aus den Meßgrößen werden unter Nutzung numerisch abgeleiteter Zusammenhänge Wärme- und Temperaturleitfähigkeit berechnet. Die Messungen bei hohen Drücken erfolgen bei hydrostatischen Bedingungen in einer Piston-Zylinder-Kammer. Zur Bestimmung des Temperatureinflusses werden die Messungen in einem Drei-Zonen-Rohrchen vorgenommen. Die Untersuchungen erfolgen routinemäßig bis 800 °C bzw. 500 MPa.

Dataprocessing

Die Menge der erzielten Meßergebnisse schließt aus, die Meßwertetabellen oder grafischen Darstellungen für die einzelnen Proben anzugeben. Zur komprimierten Darstellung der Ergebnisse wurden die Meßwerte durch Fitprogramme an Funktionen angepaßt, die sich aus der Annahme spezieller Wärmeleitungsmechanismen ergeben. Die Berücksichtigung von Drei-Phononen-Umklappprozessen und der Streuung an Gitterimperfectionen im allgemeinsten Sinne führt in der Hochtemperaturnäherung zur Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit λ in der Form

$$\lambda = 1 / (A + B \cdot T) \quad (1)$$

Als Test auf Beiträge des radiativen Wärmetransports wurde (1) um einen T^3 -abhängigen Summanden erweitert:

$$\lambda = 1 / (A + B \cdot T) + C \cdot T^3 \quad (2a)$$

$$K = 1 / (D + E \cdot T) + F \cdot T^3 \quad (2b)$$

Für die Temperaturleitfähigkeit K wurden die gleichen Funktionen wie für die Wärmeleitfähigkeit benutzt. Alternativ erfolgte eine Anpassung an eine Potenzfunktion:

$$\lambda = A_0 / T^n \quad (3a)$$

$$K = B_0 / T^m \quad (3b)$$

Bei der Auswertung der Druckabhängigkeit wird für Drücke über 1 kbar eine lineare Zunahme der thermischen Transportparameter mit steigendem Druck vorausgesetzt:

$$\lambda = \lambda(0) (1 + \alpha \cdot p) \quad (4a)$$

$$K = K(0) (1 + \beta \cdot p) \quad (4b)$$

Temperaturabhängigkeit

Die Untersuchungen an den KTB-Kernen wurden durch völlig analoge Messungen an Amphiboliten aus dem Sächsischen Granulitgebirge ergänzt. Trotz der generell großen chemischen Variabilität der Amphibolite variiert das thermische Transportverhalten im wesentlichen innerhalb relativ enger Grenzen.

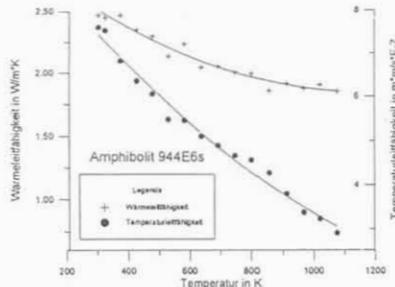


Abb.1 Temperaturabhängigkeit der thermischen Transportparameter

Grundsätzlich ist die Temperaturabhängigkeit der Temperaturleitfähigkeit wesentlich höher als für die Wärmeleitfähigkeit (siehe als Beispiel Abb. 1). Man sieht dies deutlich beim Vergleich der Exponenten n und m (siehe Tabellen 1 und 2) bei der Auswertung entsprechender Gleichungen (3a) und (3b). Dieser Unterschied ist durch die Zunahme der spezifischen Wärme mit steigender Temperatur bedingt.

Tab. 1: Konstanten zur Temperaturabhängigkeit entsprechend Gleichungen (2a) und (4a)

Probe	A_0	n	A	$B \cdot 10^4$	$C \cdot 10^9$
274 D1MK	6,76	0,181	0,329	2,70	0,3
315 C1K	6,15	0,175	0,385	1,95	0,1
886 B2FK	9,98	0,234	0,371	0,80	-0,4
920 C2D	7,59	0,215	0,404	1,71	-0,1
944 E6S	10,4	0,248	0,321	2,57	0,1
26 H1B	89,7	0,629	0,087	10,3	0,4
59 A2B	8,83	0,237	0,306	4,26	0,6
296 G1WK	18,6	0,362	0,240	5,92	0,5
GR 85/23	8,51	0,208	0,328	2,01	0,1
Biensd.	4,44	0,123	0,492	1,10	-1,3
GR 85/36	10,1	0,237	0,406	0,12	-0,5
GR 84/43	5,34	0,151	0,346	3,01	0,4

Tab. 2: Konstanten zur Temperaturabhängigkeit entsprechend Gleichungen (2b) und (4b)

Probe	B_0	m	$D \cdot 10^7$	$E \cdot 10^4$	$F \cdot 10^9$
274 D1MK	204	0,586	8,51	1,93	0,1
315 C1CK	232	0,623	8,13	2,39	0,1
886 B2FK	113	0,465	7,54	1,72	0,5
886 B2FK2	265	0,596	6,45	1,68	-0,6
920 C2D	132	0,528	9,17	2,14	0,1
944 E6S	295	0,635	8,32	1,65	-0,7
26 H1B	1739	0,905	-2,02	3,97	1,5
59 A2B2	130	0,521	3,92	3,55	2,3
296 G1WK	205	0,578	5,79	2,46	0,7
GR 85/23	87,3	0,434	8,78	1,64	0,43
Thierbach	134	0,496	6,40	2,42	1,7
Biensdorf	43,2	0,335	12,2	1,20	-0,2
GR 85/36	75,9	0,399	10,6	0,91	-0,3
GR 85/43	95,4	0,435	6,94	1,83	1,1

Die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit ist wesentlich geringer als bei Proportionalität zu $1/T$ zu erwarten ist. Die Gültigkeit der $1/T$ -Regel war zunächst auch für Gesteine vermutet worden. Die wesentlich geringere Temperaturabhängigkeit ist durch einen zusätzlichen temperaturabhängigen Term zu erklären, der durch die Wirkung von Korngrenzen, intragranularen Kristallbaufehlern und chemischen Störstellen beim spezifischen Wärmewiderstand auftritt.

Druckabhängigkeit

Die Druckabhängigkeit der thermischen Transportparameter ähnelt dem Verhalten der elastischen Geschwindigkeiten, ist jedoch quantitativ weniger stark ausgeprägt. Im Bereich bis etwa 100 MPa erfolgt zunächst ein stärkerer Anstieg der thermischen Leitfähigkeiten mit steigendem Druck, der allmählich in eine flachere lineare Zunahme übergeht (siehe als Beispiel Abb. 2).

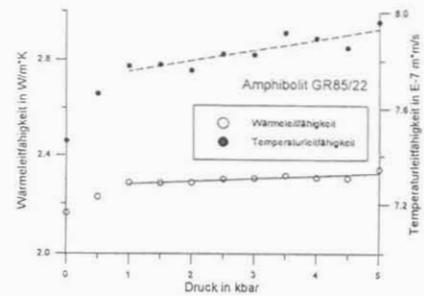


Abb.2 Druckabhängigkeit der thermischen Transportparameter

Die Ausprägung des Anfangsbereichs ist individuell von Probe zu Probe erheblich unterschiedlich. Die Zunahme der Leitfähigkeit ist hier nur teilweise reversibel. Es liegt nahe, wie bei den elastischen Wellengeschwindigkeiten die stärkere Zunahme durch das Schließen von Rissen und Poren zu interpretieren und den linearen Bereich als innere Eigenschaft infolge der Kompression des Kristallgitters der Mineralkörner. Der lineare Anstieg liegt bei den untersuchten Amphiboliten in der gleichen Größenordnung wie bei anderen kristallinen Gesteinen. Wärme- und Temperaturleitfähigkeit werden durch den Druck in unterschiedlicher Weise beeinflusst (siehe die Druckkoeffizienten α und β in Tabelle 3). Bei zwei Proben wurden Anomalien in dem Sinne beobachtet, daß die Temperaturleitfähigkeit mit zunehmendem Druck abnahm, während gleichzeitig die Wärmeleitfähigkeit normal anstieg. Daraus ergibt sich eine starke Druckabhängigkeit der spezifischen Wärme. Die beobachteten Anomalien sind reversibel.

Tab. 3: Konstanten zur Druckabhängigkeit entsprechend Gleichungen (5a) und (5b)

Probe	$\lambda(0)$	α	$K(0)$	β
323B1D	2,51	1,3	7,16	0,3
HO 19A4C	3,06	1,7	6,71	-3,0
Thierb.	2,69	1,4	6,72	1,0
Biensd.	2,66	0,8	5,93	1,5
GR 85/43	2,81	1,5	8,07	-0,1
GR 85/23	2,78	1,0	6,51	0,6

α, β in $10^{-2}/\text{kbar}$

Schlußfolgerungen

Die Variation der thermischen Transportparameter wird in der Erdkruste durch den Temperatureinfluß dominiert. Sie konzentriert sich in der Oberkruste. Bis zu 300 °C entsprechend der KTB-Endteufe ist bei den Amphiboliten mit einer Abnahme der Wärmeleitfähigkeit von im Mittel rund 20 % zu rechnen. Die Temperaturleitfähigkeit nimmt wesentlich stärker ab (52 %). Die druckbedingte Zunahme der Wärmeleitfähigkeit von im Mittel 3,6 % für 10 km Teufe kompensiert die Wirkung der Temperatur nicht.

Es ist anzustreben, die Untersuchungen auf die Paragneise auszudehnen, um Information über das Verhalten eines anisotropen Gesteins bei extremen Bedingungen zu erhalten.