

WÄRMELEITFÄHIGKEITSMESSUNGEN UNTER EINAXIALEM DRUCK

ECKART HURTIG und HARTMUT BRUGGER

Sektion Physik, Fachbereich Geophysikalische Erkundung und Geologie,
Karl-Marx-Universität, Leipzig (D.D.R.)

(Eingegangen den 15. April, 1970)

SUMMARY

Heat conductivity measurements under uniaxial pressure

The relations between heat conductivity and uniaxial pressure are studied. The heat conductivity is strongly dependent on pressure for the studied samples of anhydrite, dolomite, and sandstone, but there is only a small increase in limestones, conglomerates, and porphyries.

The increase of the heat conductivity under uniaxial pressure seems to be determined by the crack porosity. The data are important for heat flow determinations.

ZUSAMMENFASSUNG

Bei einaxialer Druckbeanspruchung werden die Beziehungen zwischen Druck und Wärmeleitfähigkeit untersucht. Für Anhydrite, Dolomite und Sandsteine ist die Wärmeleitfähigkeit stark vom Druck abhängig. In Kalksteinen, Konglomeraten und Porphyrproben erhöht sich die Wärmeleitfähigkeit nur leicht bei ansteigendem Druck. Die Zunahme der Wärmeleitfähigkeit bei Druckanstieg wird auf die Schliessung feinster Haarrisse ("Rissporosität") zurückgeführt. Bei der Berechnung des terrestrischen Wärme-flusses ist der Anstieg der Wärmeleitfähigkeit bei zunehmendem Druck zu berücksichtigen.

EINLEITUNG

Wärmeflussbestimmungen auf dem festen Land können besonders durch folgende Faktoren mit erheblichen Fehlern behaftet sein:

(1) Die Bestimmung der mittleren Wärmeleitfähigkeit für ein bestimmtes Teufenintervall ist durch die erheblichen Änderungen in der Gesteinsausbildung in einem gegebenen Vertikalprofil stets unsicher.

(2) Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit erfolgt in der Regel unter normalen p-t-Bedingungen.

Über die Beziehungen zwischen Temperatur und Wärmeleitfähigkeit von Gesteinen wurde eine Anzahl von Untersuchungen durchgeführt (s. Birch und Clarke, 1940; Moiseenko, 1968).

Dagegen gibt es nur wenige Werte über das Verhalten der Wärmeleit-

fähigkeit der verschiedenen Gesteinstypen bei Druckanstieg. (s. Dvorak, 1962; Somerton et al., 1963; Walsh und Decker, 1966).

UNTERSUCHUNGSMETHODIK

Die Wärmeleitfähigkeitsmessungen wurden unter einaxialen Druck durchgeführt. Die Wärmeleitfähigkeitsmesszelle entspricht weitgehend dem divided-bar-apparatus, den Beck (1965) beschrieben hat. Die Thermospannungen der Thermoelemente wurden auf einem Punktschreiber kontinuierlich registriert. Die Ablesegenauigkeit ergibt sich zu $\pm 0,005$ mV.

Die gesamte Messanordnung wurde zwischen die Platten einer 100 MP - Druckpresse gebracht.

Der Wärmeübergangswiderstand zwischen der Gesteinsprobe und den Messzylindern der Apparatur kann bei Untersuchungen unter Druck eine beträchtliche Druckabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vortäuschen.

Die Verbesserung des Wärmeüberganges erfolgt unmittelbar bei Aufgabe des Druckes. Daher wurde die "Nullmessung" stets bei einem Druck von $0,4 \text{ kg/cm}^2$ durchgeführt. Oberhalb dieses Druckes ändert sich der Wärmeübergang nur geringfügig. Für eine Glaseichplatte ergaben sich folgende Werte:

$0,4 \text{ kg/cm}^2 : 2,15 \text{ mcal./cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$

$410 \text{ kg/cm}^2 : 2,30 \text{ mcal./cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$

Führt man diesen gesamten Anstieg auf die Verbesserung des Wärmeüberganges zurück und nimmt man für die untersuchten Gesteinsproben etwa den gleichen Absolutbetrag an, so ergibt sich ein Anstieg der Wärmeleitfähigkeit durch Verbesserung des Wärmeübergangswiderstandes von 2 bis 4%.

Der Fehler für die Wärmeleitfähigkeitswerte wird innerhalb eines Messzyklus (Druckaufgabe und Druckentlastung) allein durch die Fehler in der Ablesung der registrierten Thermospannungen bestimmt.

Nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz ergeben sich folgende Fehler:

für ein angenommenes λ von $4 \text{ mcal./cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$: $\pm 1,12\%$

für ein angenommenes λ von $12 \text{ mcal./cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$: $\pm 0,62\%$

Die für die Messung verwendeten Gesteinsproben haben einen Durchmesser von 40 mm und Plattendicke zwischen 7 und 10 mm.

Die Proben wurden mit Wasser getränkt.

Probenbeschreibung:

Probe 16: Anhydrit, hell, kompakt, ungeschichtet, schwach vergipst.

Probe 19: Kalkstein, grau, hart, ungeschichtet, leicht geklüftet, dolomitisch.

Probe 54: Kalkstein, dunkel, fast dicht, leicht dolomitisch.

Probe 85: Anhydrit, hell, ungeschichtet, schwach vergipst.

Probe 98: Anhydrit, hell, ungeschichtet, dolomitisch, schwach vergipst.

Probe 100: Anhydrit, grau, ungeschichtet, kompakt.

Probe 102: Kalkstein, dunkelgrau, hart, kompakt, ungeschichtet, anhydritisch.

Probe 103: Dolomit, gelblich, hart, undeutlich geschichtet, schwach porös.

Probe 172: Feinsandstein, schluffig.

Probe 224: Sandstein, violett, feinkörnig, porös, Schichtung undeutlich, schluffig.

Probe 234: Sandstein, braun, fein-bis mittelkörnig, porös, Schichtung undeutlich, eisenschüssig.

Probe 244: Porphyr, hellrosa, feinkörnig, hypokristallin, splittrig.

Probe 245: Porphyr, hellrosa, feinkörnig, hypokristallin, splittrig.
 Probe 259: Anhydrit, hell, splittrig, ungeschichtet, kompakt, leicht dolomitisch, schwach vergipst.
 Probe 260: Kalkstein, rötlichgrau, fest, Schichtung undeutlich, schwach geklüftet, leicht oolithisch.
 Probe 270: Kalkstein, dunkel, fest, dicht, Schichtung undeutlich, schwach tonig.
 Probe 286: Sandstein, mittelkörnig, rot, Schichtung undeutlich, stark porös.
 Probe 313: Fein- bis Mittelsandstein, hellviolett, fest, quarzitisch, schwach porös.
 Probe 343: Fein- bis Mittelsandstein, violett, quarzitisch.
 Probe 365: Dolomit, gelblich, hart, geschichtet, schwach porös.
 Probe 366: Anhydrit, hell, splittrig, ungeschichtet, kompakt, dolomitisch.
 Probe 378: Konglomerat, rötlich, Gerölle 1–5 mm, vorwiegend Porphyr, verfestigt, toniges Bindemittel, schwach kalkig.
 Probe 448: Grauwackensandstein, dunkel, dicht, feldspathaltig, feinkörnig.
 Probe 452: Grauwackensandstein, dunkel, dicht, feinkörnig, kompakt, schwach kalkig.

MESSERGEBNISSE

Die Proben wurden unter einaxialem Druck bis 410 kg/cm^2 belastet. Höhere Drücke wurden nicht aufgegeben, um nicht in den Bereich der Druckfestigkeit der Proben zu kommen. In den folgenden Tabellen (I–VII) sind die Messergebnisse, geordnet nach Gesteinstypen, dargestellt.

Die Abb. 1–6 zeigen einige typische Beispiele. Bereits bei 400 kg/cm^2 wird annähernd der Grenzwert für die Leitfähigkeitserhöhung erreicht. Eine Ausnahme bildet lediglich die dargestellte Sandsteinprobe.

Der Leitfähigkeitsanstieg im Druckbereich zwischen $0,4$ und 410 kg/cm^2 beträgt je nach Gesteinsart 5–50%, wobei der Schwerpunkt zwischen 10 und 25% liegt. Dieser Anstieg der Wärmeleitfähigkeit ist signifikant grösser als derjenige, der durch die Verbesserung des Wärmeüberganges bei steigendem Druck hervorgerufen wird.

DISKUSSION DER MESSERGEBNISSE

Die Messergebnisse zeigen insgesamt eine deutliche Druckabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit. Die mittlere Änderung für die verschiedenen Gesteinstypen ist in Abb. 7 dargestellt. Die Druckabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit kann im wesentlichen durch zwei Faktoren bestimmt werden: (1) durch die Kompressibilität der Einzelminerale, (2) durch die Kompressibilität des Gesamtgesteinsvolumens (einschliesslich Porenraum).

Die Kompressibilität der Einzelminerale kann bei den verwendeten relativ geringen Drücken vernachlässigt werden (mit gewissen Einschränkungen bei den untersuchten Anhydritproben). Von Bedeutung ist also lediglich die Kompressibilität des Gesamtgesteinsvolumens und damit der Porenraum und das Porengefüge. Modelluntersuchungen (siehe Hurtig, 1965, 1968; Walsh und Decker, 1966) zeigen, dass für die Änderung der Gesamtwärmeleitfähigkeit

TABELLE I

Druckabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Anhydritproben
(mcal./cm . sec . °C)

Druck (kg/cm ²)	Probe 16	Probe 85	Probe 98	Probe 100	Probe 259 a	Probe 259 b	Probe 366
0,4	8,56	8,72	9,42	7,51	8,11	8,45	8,18
10	—	9,33	—	8,11	—	9,12	8,38
20	10,01	9,86	10,55	8,80	9,65	9,62	8,84
41	10,21	10,23	10,86	9,35	10,00	9,92	9,21
82	10,38	10,32	11,28	9,65	10,26	10,18	9,53
123	10,50	10,55	11,51	—	10,30	—	9,61
164	10,65	10,52	11,56	10,02	10,40	10,40	9,68
205	—	—	11,60	—	—	—	—
248	10,69	10,57	—	10,30	10,70	10,70	9,74
287	—	—	11,68	—	—	—	—
328	10,80	10,65	—	10,38	10,78	10,60	9,80
410	10,82	10,64	—	10,52	10,81	10,70	9,88
308	—	—	—	—	—	—	9,76
246	—	10,58	—	10,41	10,82	—	—
205	—	—	—	—	—	—	9,71
164	10,68	—	—	—	—	10,53	—
102	—	—	—	—	—	—	9,45
82	—	10,35	—	10,23	10,50	—	—
41	10,46	10,26	—	10,13	10,30	—	—
20	10,31	10,06	—	9,82	—	10,23	9,13
10	10,10	9,93	—	—	—	—	8,95
0,4	10,00	9,73	—	9,31	—	9,63	8,32
0,0	9,80	9,67	—	—	7,84	—	—

TABELLE II

Druckabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Sandsteinproben
(mcal./cm . sec . °C)

Druck (kg/cm ²)	Probe 172	Probe 224	Probe 234	Probe 286	Probe 313	Probe 343
0,4	6,84	5,51	6,69	7,50	9,44	8,51
20	7,42	5,86	7,03	8,12	10,43	9,45
41	7,36	5,95	7,19	8,47	10,51	9,72
82	7,47	5,99	7,36	8,63	10,78	—
164	7,56	6,21	7,50	8,92	11,26	—
246	7,65	6,41	7,60	9,00	—	10,47
328	7,67	6,38	7,68	9,17	—	—
410	7,75	6,53	7,85	9,22	11,58	10,71
328	—	6,50	—	—	—	—
287	—	—	7,78	—	11,53	—
246	—	6,48	—	9,00	—	—
205	7,70	—	—	—	—	10,47
82	7,61	6,38	7,47	9,02	10,91	—
41	7,50	6,27	7,43	8,76	10,80	—
20	7,54	6,08	7,36	8,59	10,47	9,61
0,4	7,35	—	6,22	7,73	9,92	8,60

TABELLE III

Druckabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit
von Grauwackenartigen Sandsteinproben
(mcal./cm . sec . °C)

Druck ₂ (kg/cm ²)	Probe 448	Probe 452
0,4	5,08	5,64
10	5,26	—
20	5,28	5,96
41	5,39	6,03
82	5,45	6,16
123	—	6,22
205	—	6,19
246	5,53	—
410	5,56	6,23
82	5,50	6,12
20	—	6,08
10	5,42	—
0,4	—	5,89
0,0	5,30	—

TABELLE IV

Druckabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit
bei Konglomeratproben (mcal./cm . sec . °C)

Druck ₂ (kg/cm ²)	Probe 378
0,4	4,14
20	4,35
41	4,42
82	4,46
164	4,47
287	4,52
410	4,52
123	4,51
41	4,46
20	4,42
0,4	4,43

eines Gesteins bei Druckanstieg praktisch nur der Teil des Porenraumes von Bedeutung ist, der in Form schmaler Spalte, Risse o.ä. auftritt, während sich die Volumenporosität im betrachteten Druckbereich nur wenig ändert und daher die Wärmeleitfähigkeit nicht beeinflusst.

Bei solchen Spalten und Rissen ("Rissporosität", crack porosity) handelt es sich durchaus nicht nur um echte Klüfte, sondern in der Regel um feine und feinste Risse in den Einzelkörnern (intragranulare Risse) und zwischen den Körnern (intergranulare Risse).

TABELLE V

Druckabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von
Dolomitproben (mcal./cm . sec . °C)

Druck ² (kg/cm ²)	Probe 103	Probe 365
0,4	7,62	6,18
20	—	6,61
41	9,25	6,81
82	9,32	6,92
123	9,48	7,02
184	9,55	7,12
246	9,75	7,20
328	9,85	7,30
410	9,80	7,36
287	9,66	—
246	—	7,55
123	9,53	7,35
61	9,32	—
41	—	7,05
20	9,07	—
10	8,94	—
0,4	8,39	—
0,0	—	5,97

TABELLE VI

Druckabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Kalksteinproben
(mcal./cm . sec . °C)

Druck ² (kg/cm ²)	Probe 19	Probe 34	Probe 102	Probe 260	Probe 270
0,4	5,06	4,22	7,67	4,32	3,53
20	5,49	4,21	8,16	—	3,74
41	—	—	8,20	4,80	3,88
82	5,64	4,32	8,22	4,81	3,95
123	—	—	8,22	4,82	—
164	5,70	4,33	—	—	3,95
246	5,81	4,47	—	—	3,96
287	—	—	8,33	—	—
328	5,82	4,51	—	4,85	—
410	5,79	4,49	8,49	4,86	3,90
205	5,80	4,39	—	4,89	—
125	—	—	—	—	3,96
82	5,64	4,38	8,29	4,92	—
41	—	—	—	4,82	—
20	5,57	4,28	8,11	4,77	3,76
0,4	5,28	4,21	7,35	4,72	3,41

TABELLE VII

Druckabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von
Porphyrproben (mcal./cm . sec . °C)

Druck (kg/cm ²)	Probe 244	Probe 245
0,4	4,72	4,19
20	4,80	4,27
41	4,92	4,53
82	—	4,65
164	—	4,74
246	4,91	4,79
328	—	4,86
410	5,01	4,81
164	4,88	4,75
82	—	4,67
61	4,76	—
20	4,76	4,20
0,4	4,61	3,59

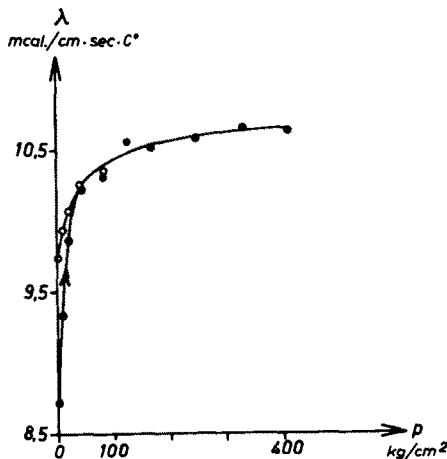


Abb.1. Druckabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit: Anhydrit, Probe 85.

Fig.1. Heat conductivity vs. uniaxial pressure: anhydrite, sample 85.

Diese Risse werden durch den aufgebrachten Druck völlig oder teilweise geschlossen, die Wärmeleitfähigkeit steigt damit rasch an, während der Anteil der Volumenporosität etwa konstant bleibt.

Der Anstieg der Wärmeleitfähigkeit schon bei geringen einaxialen Drücken muss daher im wesentlichen auf die Schliessung bzw. Reduktion dieser "Rissporosität" zurückgeführt werden. Bei den feinen inter-

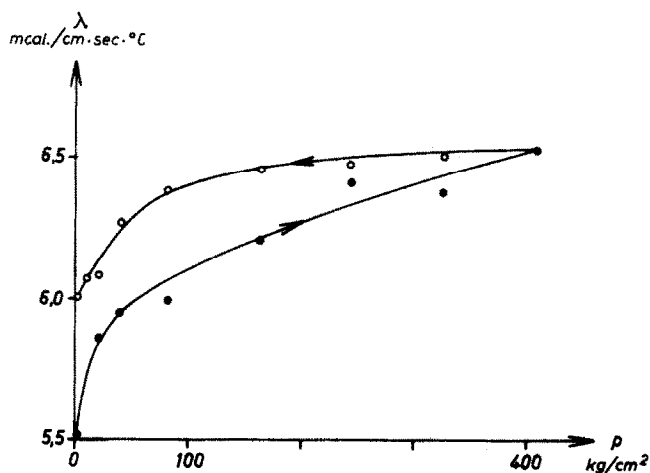


Abb.2. Druckabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit: Sandstein, Probe 224.

Fig.2. Heat conductivity vs. uniaxial pressure: sandstone, sample 224.

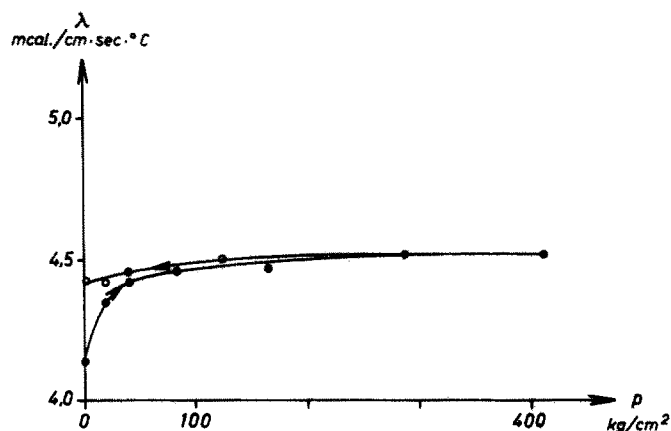


Abb.3. Druckabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit: Konglomerat, Probe 378.

Fig.3. Heat conductivity vs. uniaxial pressure: conglomerate, sample 378.

granularen Rissen wird es sich in der Regel nicht um primär (d.h. unter in-situ-Bedingungen) vorhandene Risse handeln. Sie dürften vielmehr bei der Druckentlastung beim Herausbohren aus dem Gesteinsverband und beim Ziehen der Kerne sowie beim Bearbeiten der Proben entstanden sein. Zwischen den Kurven für die Druckaufgabe und die Druckentlastung ergeben sich bis auf

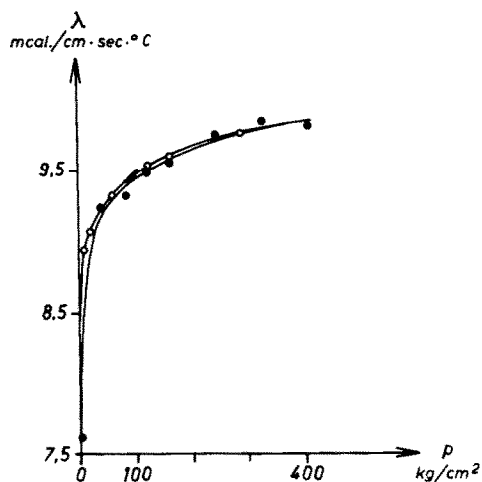


Abb.4. Druckabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit: Dolomit, Probe 103.

Fig.4. Heat conductivity vs. uniaxial pressure: dolomite, sample 103.

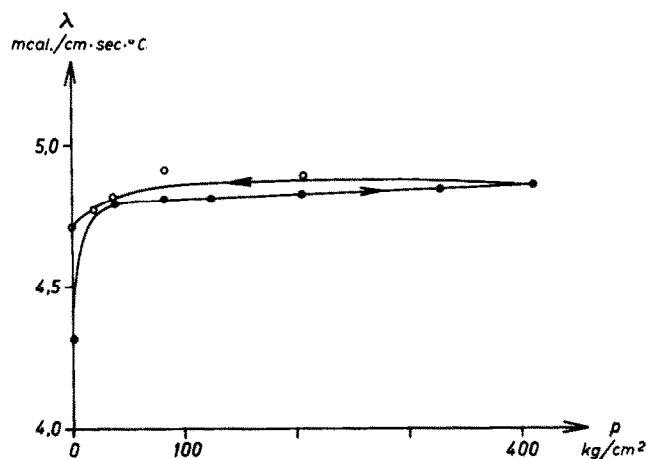


Abb.5. Druckabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit: Kalkstein, Probe 260.

Fig.5. Heat conductivity vs. uniaxial pressure: limestone, sample 260.

wenige Ausnahmen für die untersuchten Gesteinsproben signifikante Unterschiede. In der Regel liegt die Rückkurve über der Hinkurve. Für die Hysterese (dargestellt durch die Fläche zwischen Hin- und Rückkurve in mm^2) ergeben sich folgende Werte (siehe Tabelle VIII).

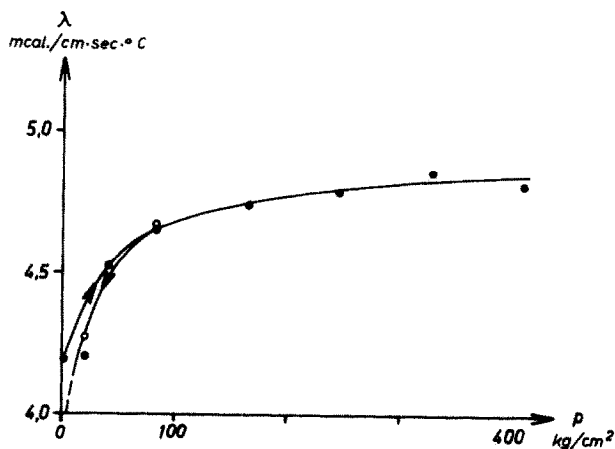


Abb.6. Druckabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit: Porphyr, Probe 245.

Fig.6. Heat conductivity vs. uniaxial pressure: porphyry, sample 245.

TABELLE VIII

Beziehung zwischen dem Anstieg der Wärmeleitfähigkeit und der Hysterese

Gestein	Leitfähigkeits- erhöhung (%)	Hysteresefläche (mm ²)
Porphyr	9,2	16
Konglomerat	9,2	5
Grauwackensandstein	9,9	14
Kalkstein	10,4	2
Sandstein	19,4	80
Sandstein, quarzitisch	24,2	40
Dolomit	24,1	55
Anhydrit	33,6	20-200

Es lassen sich zwei Gesteinsgruppen durch ihr unterschiedliches Verhalten unterscheiden:

(1) Gesteine mit ca. 10% Anstieg der Wärmeleitfähigkeit und einer kleinen Hysterese: Porphyre, Konglomerate, Grauwackensandsteine und Kalksteine.

(2) Gesteine mit größeren Änderungen der Wärmeleitfähigkeit (15–35%) und einer beträchtlichen Hysterese: Dolomite, Sandsteine und Anhydrite.

Die auftretende Hysterese ist ein Mass für die nichtelastische Deformation.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Bestimmungen der Wärmeleitfähigkeit unter Normalbedingungen erhebliche Fehler aufweisen können. Die aus solchen Werten berechneten Wärmeflusswerte dürften daher in der Regel zu niedrig sein.

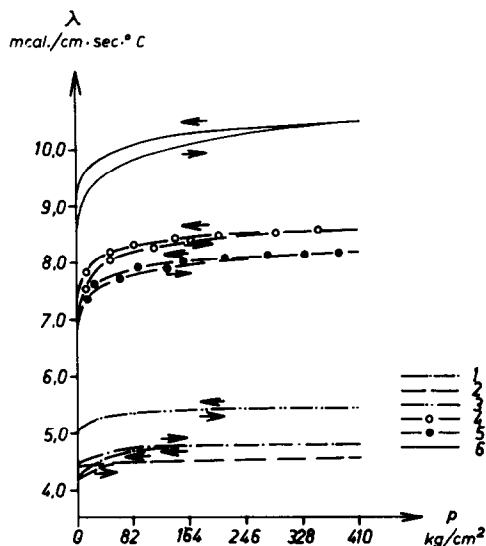


Abb.7. Druckabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit. Mittelwerte für die verschiedenen Gesteinstypen. 1 = Porphyry; 2 = Konglomerat; 3 = Kalkstein; 4 = Dolomit; 5 = Sandstein; 6 = Anhydrit.

Fig.7. Heat conductivity vs. uniaxial pressure. Mean values for different types of rocks. 1 = porphyry; 2 = conglomerate; 3 = limestone; 4 = dolomite; 5 = sandstone; 6 = anhydrite.

LITERATUR

- Beck, A.E., 1965. Techniques of measuring heat flow on land. In: W.H.K. Lee (Editor), *Terrestrial Heat Flow*. Geophys. Monograph, 8: 24-57.
- Birch, F. und Clarke, H., 1940. The thermal conductivity of rocks and its dependence upon temperature and composition. *Am. J. Sci.*, 238: 529 ff. and 623 ff.
- Dvorak, Z., 1962. Über die Veränderung des Temperaturleitfähigkeitskoeffizienten in Gesteinsproben unter Druck. *Freiberger Forschungsh.*, C, 126: 49-51.
- Hurtig, E., 1965. Untersuchung der Wärmeleitfähigkeitsanisotropie von Sandsteinen, Grauwacken und Quarziten. *Pure Appl. Geophys.*, 60 (1): 85-100.
- Hurtig, E., 1968. Zum Problem der Anisotropie petrophysikalischer Parameter in geologischen Körpern. *Geophys. Geol.*, 12: 3-36.
- Moiseenko, U.I., 1968. Wärmeleitfähigkeit der Gesteine bei hohen Temperaturen. *Freiberger Forschungsh.*, C, 238: 89-94.
- Somerton, W.H., Ward, S.H. und King, M.S., 1963. Physical properties of Mohole test site basalt. *J. Geophys. Res.*, 68 (3): 849-856.
- Walsh, J.B. und Decker, E.R., 1966. Effect of pressure and saturating fluid on the thermal conductivity of compact rocks. *J. Geophys. Res.*, 71(12): 3053-3061.