

TECHNISCHER BERICHT 82-06

WÄRMELEITFÄHIGKEIT VON BENTONIT MX80 UND VON MONTIGEL NACH DER HEIZDRAHTMETHODE

G. KAHR
M. MÜLLER-VON MOOS

INSTITUT FÜR GRUNDBAU UND BODENMECHANIK
ETH ZÜRICH, DEZEMBER 1982

TECHNISCHER BERICHT 82-06

WÄRMELEITFÄHIGKEIT VON BENTONIT MX80 UND VON MONTIGEL NACH DER HEIZDRAHTMETHODE

G. KAHR
M. MÜLLER-VON MOOS

INSTITUT FÜR GRUNDBAU UND BODENMECHANIK
ETH ZÜRICH, DEZEMBER 1982

ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Eine im Auftrag der Nagra durchgeführte Projektstudie für die Endlagerung hochaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen sowie Literaturstudien haben gezeigt, dass sich Bentonit für das von der Nagra vorgesehene Endlagerkonzept für hochaktive Abfälle und schweizerische Verhältnisse als Verfüll- und Versiegelungsmaterial eignen könnte.

In der Folge wurde das Institut für Grundbau und Bodenmechanik an der ETH-Zürich (IGB) mit der Untersuchung von verschiedenen Bentoniten durch die Nagra beauftragt.

Die Untersuchungen konzentrieren sich auf den durch die Schweden vorgesehenen Na-Bentonit MX-80 aus Wyoming und den geographisch günstiger gelegenen Ca-Bentonit Montigel aus Bayern. Beim Montigel werden sowohl das Pulver wie auch das Granulat, welches in der Verarbeitung gewisse Vorteile zeigt, untersucht.

Im Rahmen der vorgesehenen Arbeiten war die Wärmeleitfähigkeit von verdichtetem Bentonit zu untersuchen. Sie wurde nach der Heizdrahtmethode bestimmt. Die Wärmeleitfähigkeit von MX-80 und Montigel war ähnlich. Sie betrug bei Raumtemperatur $0,451 \text{ W/}^\circ\text{C m}$ bei einem Wassergehalt von 0% und einer Dichte von $1,7 \text{ Mg/m}^3$ bis $1,336 \text{ W/}^\circ\text{C m}$ bei einem Wassergehalt von 14% und einer Dichte von $2,21 \text{ Mg/m}^3$. Bei erhöhten Temperaturen wurde die Wärmeleitfähigkeit nur an trockenen Proben untersucht. Sie betrug bei 40°C und einer Dichte von $1,63 \text{ Mg/m}^3$ $0,457 \text{ W/}^\circ\text{C m}$ und bei 120° und einer Dichte von $2,09 \text{ Mg/m}^3$ $0,778 \text{ W/}^\circ\text{C m}$. Die Wärmeleitfähigkeit der verdichteten Bentonite liess sich in Abhängigkeit vom Wassergehalt, von der Dichte und Temperatur nach folgender Näherungsformel berechnen:

$$K = - 0,60 + 0,60 \cdot D + 0,004 \cdot W \cdot D^3 + 0,01 \cdot T^{1/2} \quad (4)$$

K Wärmeleitfähigkeit ($\text{W/}^\circ\text{C m}$)
 D Raumgewicht feucht (Mg/m^3)
 W Wassergehalt (%)
 T Temperatur ($^\circ\text{C}$)

INHALTSVERZEICHNIS

1.	<u>EINLEITUNG</u>	Seite 1
2.	<u>MATERIAL</u>	Seite 3
3.	<u>METHODE</u>	Seite 4
4.	<u>ERGEBNISSE</u>	Seite 8
5.	<u>DISKUSSION</u>	Seite 16
6.	<u>LITERATURVERZEICHNIS</u>	Seite 19

VERZEICHNIS DER FIGUREN UND TABELLEN IM TEXT

- Figur 1 : QTM-Sonde PD 1
- Figur 1A: Heizdraht-Methode
- Figur 2 : Wärmeleitfähigkeit K (EMPA) nach dem Einplattenverfahren und K (QTM) nach der Heizdrahtmethode von 8 Granitproben
- Figur 3 : Einplattenverfahren
- Figur 4 : Radial-Methode
- Figur 5 : Wärmeleitfähigkeit von MX-80, Montigel und Montigel K bei Raumtemperatur in Abhängigkeit von der Dichte beim Wassergehalt 0,7 und 14%
- Figur 6 : Wärmeleitfähigkeit von MX-80 bei 105°C Ofentemperatur mit zunehmender Versuchsdauer. Anfangswassergehalt 14%, Anfangsdichte 2,13 Mg/m³, Sondentemperatur 120°C
- Figur 7 : Wärmeleitfähigkeit trockener Proben von MX-80 steigender Dichte bei 40, 80 und 120°C
- Figur 8 : Vergleich berechnete Wärmeleitfähigkeiten (Formel 4) und gemessene Wärmeleitfähigkeiten
- Tabelle 1 : Wie Figur 5. Mittelwert von 6 - 12 Messungen
- Tabelle 2 : Wie Figur 6
- Tabelle 3 : Wärmeleitfähigkeit trockener Proben von MX-80 steigender Dichte bei 40, 80 und 120°C

1. EINLEITUNG

Das schwedische Konzept zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle sieht die Verwendung von Bentonit bzw. Bentonit-Quarzsandmischungen als Verfüll- und Versiegelungsmaterial vor.

Eine im Auftrag der Nagra durchgeführte Projektstudie für die Endlagerung hochaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen sowie Literaturstudien haben gezeigt, dass sich Bentonit auch für das von der Nagra vorgesehene Endlagerkonzept und schweizerische Verhältnisse als Verfüll- und Versiegelungsmaterial eignen könnte.

In der Folge wurde im März 1981 das Institut für Grundbau und Bodenmechanik an der ETH-Zürich (IGB) mit der Untersuchung von verschiedenen Bentoniten durch die Nagra beauftragt.

Die Untersuchungen sehen vor, die insbesondere in Schweden erarbeiteten, konzeptbeeinflussenden Resultate bzw. Parameter durch eigene Methoden bzw. Versuche unter Berücksichtigung der in der Schweiz zu erwartenden Endlagerbedingungen zu verifizieren. Entscheidungsunterlagen für die Wahl der weiter zu verwendenden Bentonitart sollen bereitgestellt und für diese die noch ausstehenden ingenieurtechnischen und nuklearspezifischen Parameter bestimmt werden.

Die Untersuchungen konzentrieren sich auf den durch die Schweden vorgesehenen Na-Bentonit MX-80 aus Wyoming und den geographisch günstiger gelegenen Ca-Bentonit Montigel aus Bayern. Beim Montigel werden sowohl das Pulver als auch das Granulat, welches in der Verarbeitung gewisse Vorteile zeigt, untersucht.

Bei der Untersuchung von Bentonit als Verfüll- und Versiegelungsmaterial zur Lagerung hochaktiver Abfälle ist die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von grosser Bedeutung. In den verglasten, hochaktiven Abfällen wird durch Kernspaltung und Strahlung Wärme erzeugt. Diese Wärme muss möglichst gleichmässig vom Verfüllmaterial abgeführt werden. Andernfalls könnte das Glas in den Behältern kristallisieren und rissig werden. Steigt die Temperatur über 200°C , so ist nicht auszuschliessen, dass beim Hauptmineral des Bentonits - dem Montmorillonit - irreversible Strukturveränderungen stattfinden können.

Zur Durchführung des Versuches wurden folgende Bedingungen angenommen. Als Verfüllmaterial soll hoch verdichteter Na- bzw. Ca-Bentonit verwendet werden, und die Temperatur an der Oberfläche der Behälter soll höchstens $100\text{-}120^{\circ}\text{C}$ be-

tragen.

Die Wärmeleitfähigkeit von Tonen wurde bisher wenig untersucht, und die Arbeiten enthalten kaum exakte Angaben, die für unsere Untersuchungen von Nutzen sein konnten. Dagegen gibt es zahlreiche Arbeiten über die Wärmeleitfähigkeit von Giesserei-Formsanden. Die Formsande bestehen aber vorwiegend aus Quarz und enthalten nur bis zu 10% Bentonit.

Bei all diesen Untersuchungen wurde die Wärmeleitfähigkeit nach der Radialmethode gemessen. Auch Knutsson (1977) bestimmte die Wärmeleitfähigkeit von verdichtetem Na-Bentonit nach dieser Methode. Die Radialmethode ist aber ziemlich zeitaufwendig. Zudem waren wir bemüht, zur Vermeidung methodisch bedingter Fehler eine andere Methode anzuwenden. Deshalb wurde die Wärmeleitfähigkeit nach der wesentlich schnelleren Heizdrahtmethode bestimmt.

2. MATERIAL

Für die Untersuchung wurden folgende Materialien verwendet:

MX-80

Na-Bentonit, Wyoming (USA), Granulat

Montigel

Ca-Bentonit, Bayern (BRD), Pulver

Montigel K

Ca-Bentonit, Bayern (BRD), Granulat

Die Bereitstellung der Bentonite für die Laboruntersuchungen ist in NTB 82-04 dargelegt.

Die Herstellung der hochverdichteten Bentonitproben ist in NTB 82-05 beschrieben.

3. METHODE

Die Wärmeleitfähigkeit der verdichteten Bentonite wurde nach der Heizdrahtmethode mit dem Quick Thermal Conductivity Meter HFM 1 und der QTM-Sonde PD 1 der Firma Showa Denko K.K. (Japan) gemessen.

Die QTM-Sonde enthält einen Heizdraht und ein Thermoelement, die auf der Unterseite der Fussplatte aufgespannt sind (Fig. 1). Das Thermoelement liegt im Zentrum der Fussplatte im direkten Kontakt mit dem Heizdraht. Die Fussplatte besteht aus einem Material bekannter Wärmeleitfähigkeit K_0 . Sie ist mit dem Kabelanschluss in einem Metallgehäuse aufgehängt und wird durch zwei Federn leicht nach aussen gedrückt, so dass beim Anpressen der Sonde an die Probenoberfläche ein guter Kontakt zwischen Probe und Fussplatte gewährleistet ist.

Zur Messung der Wärmeleitfähigkeit wurde die Sonde an die Probe gedrückt, und es wurde während eines bestimmten Zeitintervalls $t_2 - t_1$ ein Strom I konstanter Leistung durch den Heizdraht geschickt. Dabei wurde die Oberflächentemperatur des Heizdrahtes mit dem Thermoelement gemessen. Die Wärmeleitfähigkeit K der Probe liess sich dann nach folgender Formel berechnen:

$$K = M \cdot I^2 \frac{\ln(t_2/t_1)}{v_2 - v_1} - H \quad (1)$$

M und H sind Konstanten der Sonde. v_1 und v_2 sind die Ausgangsspannungen des Thermoelementes zur Zeit t_1 und t_2 .

Die Bentonite wurden bei bekanntem Wassergehalt in einer hydraulischen Pressmulde zu zylindrischen Proben von 5,6 cm Durchmesser und 2,5 cm Höhe verdichtet. Zur Angabe der Dichte wurde das Volumen nach Messung von Probendurchmesser und Höhe mit einer Schublehre berechnet. Danach beziehen sich alle Angaben der Dichte auf das Raumgewicht feucht (Mg/m^3). Die Wärmeleitfähigkeit wurde im Institut für Geophysik bei Raumtemperatur und bei erhöhter Temperatur im Trockenschrank bestimmt. Dabei wurde jede Probe 6 bis 12 mal gemessen und zwar meist auf beiden Seiten der Probe. Aus den Resultaten bestimmte man dann den Mittelwert und die Standardabweichung.

Aus Vergleichsmessungen mit der QTM-Sonde des Instituts für Geophysik und dem Einplattenverfahren der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Versuchsanstalt (EMPA) ergab sich bei der Untersuchung von 8 Granitproben eine sehr gute Übereinstimmung zwischen beiden Methoden (Fig. 2). Die Korrelation der Regressionsgeraden betrug

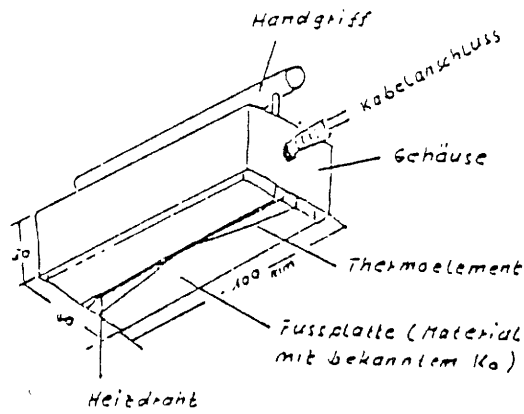
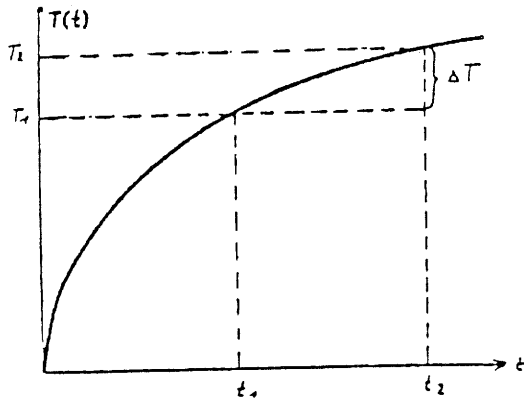
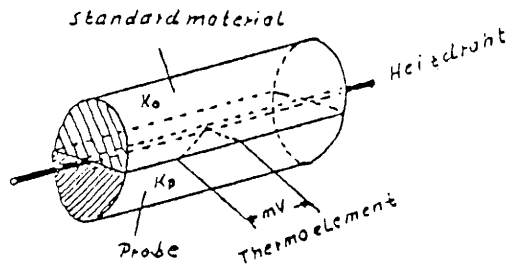


Fig. 1: QTM-Sonde PD 1



HEIZDRAHT - METHODE



- K Wärmeleitfähigkeit ($W/^\circ C m$)
- I Heizstrom (A)
- M, H Konstanten der Sonde
- U_1, U_2 Ausgangsspannungen des Thermoelementes zur Zeit t_1 und t_2 (V)

Wärmeleitfähigkeit K

$$K = M \cdot I^2 \frac{\ln(t_2/t_1)}{U_2 - U_1} - H$$

$U_2 - U_1$ ist proportional ΔT , d.h. der Differenz $T_2 - T_1$ der Sondentemperatur zur Zeit t_2 und t_1 .

$$(U_2 - U_1) = \eta \Delta T$$

$$\eta = \text{thermoelektrische Kraft (mV/}^\circ C)$$

Fig. 1A: Heizdraht-Methode

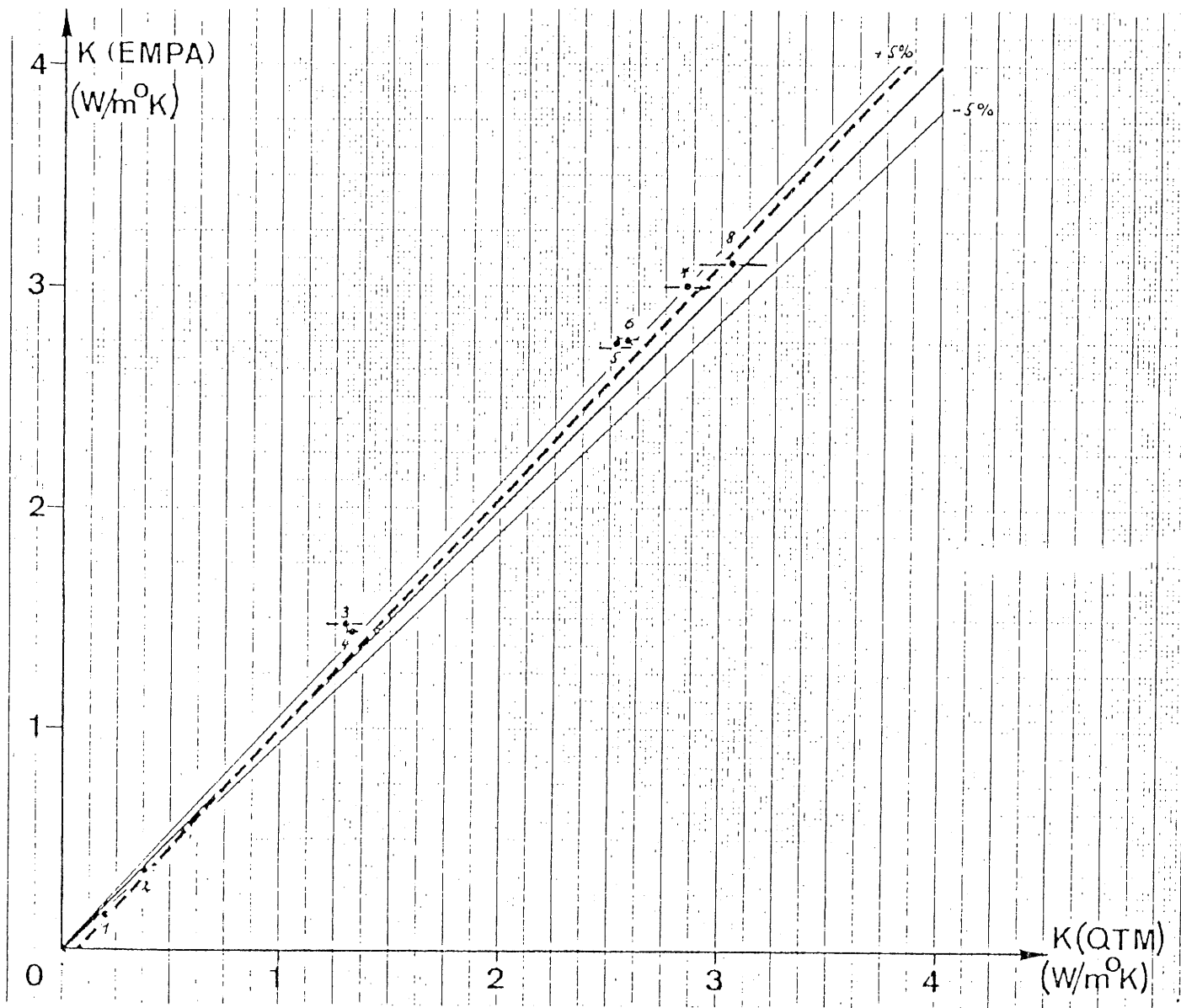
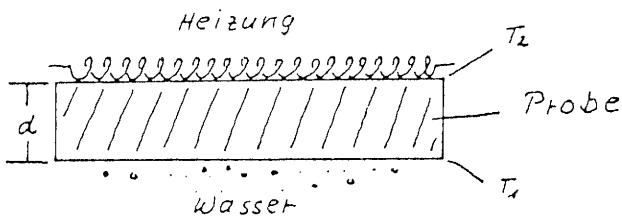


Fig. 2 Wärmeleitfähigkeit K (EMPA) nach dem Einplattenverfahren und K (QTM) nach der Heizdrahtmethode von 8 Granitproben.

0,99. Mit der QTM-Sonde wurde jede Probe 10 mal, mit dem Einplattenverfahren wurde jede Probe nur einmal gemessen. Beim Einplattenverfahren wird die Probe auf der einen Seite elektrisch geheizt und auf der anderen Seite gekühlt (Fig. 3). Dabei wird die Wärme vollständig durch die Probe geleitet. Die Wärmeleitfähigkeit wird bestimmt, wenn sich ein konstanter Wärmefluss eingestellt hat.

Die bei den schwedischen Untersuchungen angewandte Radialmethode arbeitet nach dem selben Prinzip wie das Einplattenverfahren, wobei hier die Wärme von einem inneren Heizstab radial nach aussen fließt (Fig. 4).

$$K = \frac{0.239 I^2 R \cdot d}{F(T_2 - T_1)}$$



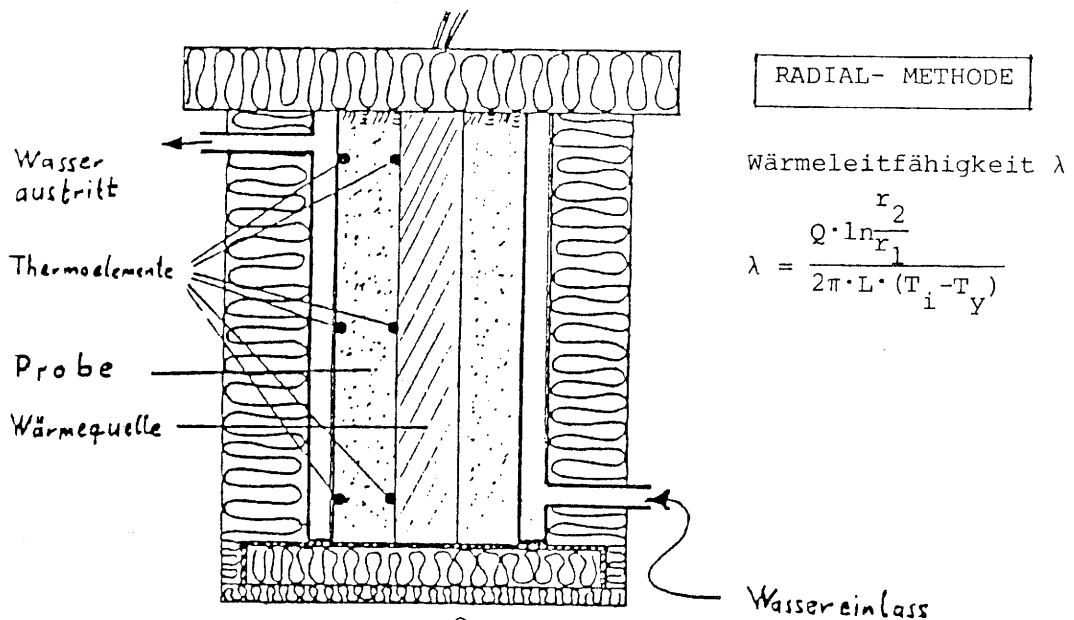
F = Querschnittsfläche des Zylinders [cm²]

I = Heizstrom [A]

R = Widerstand der Heizspule [Ω]

Messdauer ca. 1 Tag

Fig. 3: Einplattenverfahren



- λ Wärmeleitfähigkeit (W/°C m)
- Q Wärmeleistung in der Mittelsektion (W)
- r₂, r₁ äußerer und innerer Zylinderradius (m)
- L Länge der Mittelsektion (m)
- T_i, T_y Innen- und Aussentemperatur (°C)

Fig. 4: Radial-Methode

6. ERGEBNISSE

Die Ergebnisse der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit bei Raumtemperatur wurden in Tabelle 1 zusammengestellt. Die Sondentemperatur gibt die Oberflächentemperatur des Heizdrahtes an. In Figur 5 wurde die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Dichte beim Wassergehalt 0,7 und 14 % dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass die Bentonite MX-80 und Montigel ähnliche Wärmeleitfähigkeit haben. Grössere Abweichungen zeigen die Werte bei Wassergehalten um 0 %. Das ist bedingt durch die Handhabung der Bentonite nach der Ofentrocknung, wobei eine geringe Wasseraufnahme beim Pressen und während der Lagerung der Proben bis zur Messung nicht zu vermeiden war.

Das grobe sekundäre Granulat des Montigel K zeigte als Presskörper insbesondere bei kleinen Dichten noch eine granulierten Struktur, was die etwas abweichenden Resultate erklären könnte. Da die Wärmeleitfähigkeit von Montigel derjenigen von MX-80 vergleichbar war, wurde für den Bentonit Montigel nicht mehr das ganze Messprogramm durchgeführt.

Die Wärmeleitfähigkeit K lässt sich bei Raumtemperatur in den gemessenen Bereichen gut nach folgender Näherungsformel berechnen:

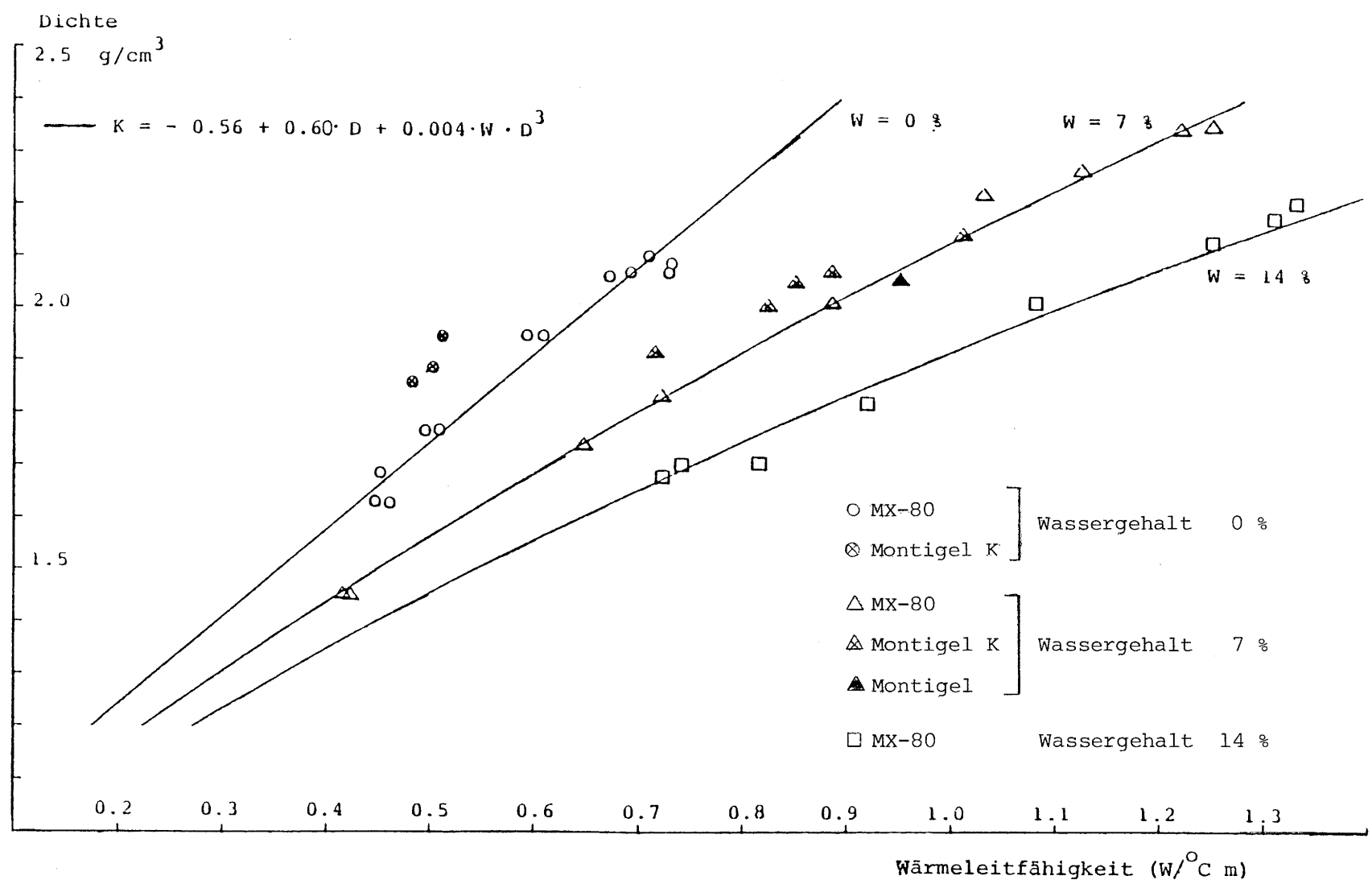
$$K = -0,56 + 0,60 \cdot D + 0,004 \cdot W \cdot D^3 \quad (2)$$

K Wärmeleitfähigkeit ($\text{W}/^\circ\text{C} \cdot \text{m}$)
D Raumgewicht feucht (Mg/m^3)
W Wassergehalt (%)

Tab. 1: Wärmeleitfähigkeit von MX-80, Montigel und Montigel K bei Raumtemperatur
in Abhängigkeit von der Dichte beim Wassergehalt 0,7 und 14%.
Mittelwert von 6 - 12 Messungen.

Probe	Wassergehalt %	Dichte Mg/m ³	Sondentemperatur °C	Wärmeleitfähigkeit W/°C m	Standardabweichung ±
MX-80	0	1,688	32	0,451	0,011
		1,897	41	0,555	0,012
		2,058	39	0,671	0,009
	7	1,45	35	0,420	0,011
		1,45	36	0,413	0,008
		1,74	40	0,648	0,013
		1,83	37	0,719	0,025
		2,008	34	0,885	0,007
		2,202	32	1,033	0,023
		2,278	32	1,126	0,023
		2,355	42	1,218	0,022
		2,358	40	1,253	0,015
	14	1,68	35	0,721	0,009
		1,702	37	0,742	0,011
		1,705	35	0,816	0,012
		1,806	35	0,918	0,010
		2,015	30	1,081	0,014
		2,13	30	1,252	0,023
2,18		30	1,312	0,022	
2,21		39	1,336	0,017	
Montigel	6	2,008	35	0,821	0,007
Montigel K	0	1,86	30	0,478	0,016
		1,89	30	0,500	0,021
		1,96	30	0,518	0,018
	6	2,049	34	0,847	0,019
		2,060	34	0,951	0,012
	7	1,92	30	0,714	0,025
2,07		35	0,885	0,015	
2,14		30	1,013	0,018	

Fig. 5.: Wärmeleitfähigkeit von MX-80, Montigel und Montigel K bei Raumtemperatur in Abhängigkeit von der Dichte beim Wassergehalt 0,7 und 14%.

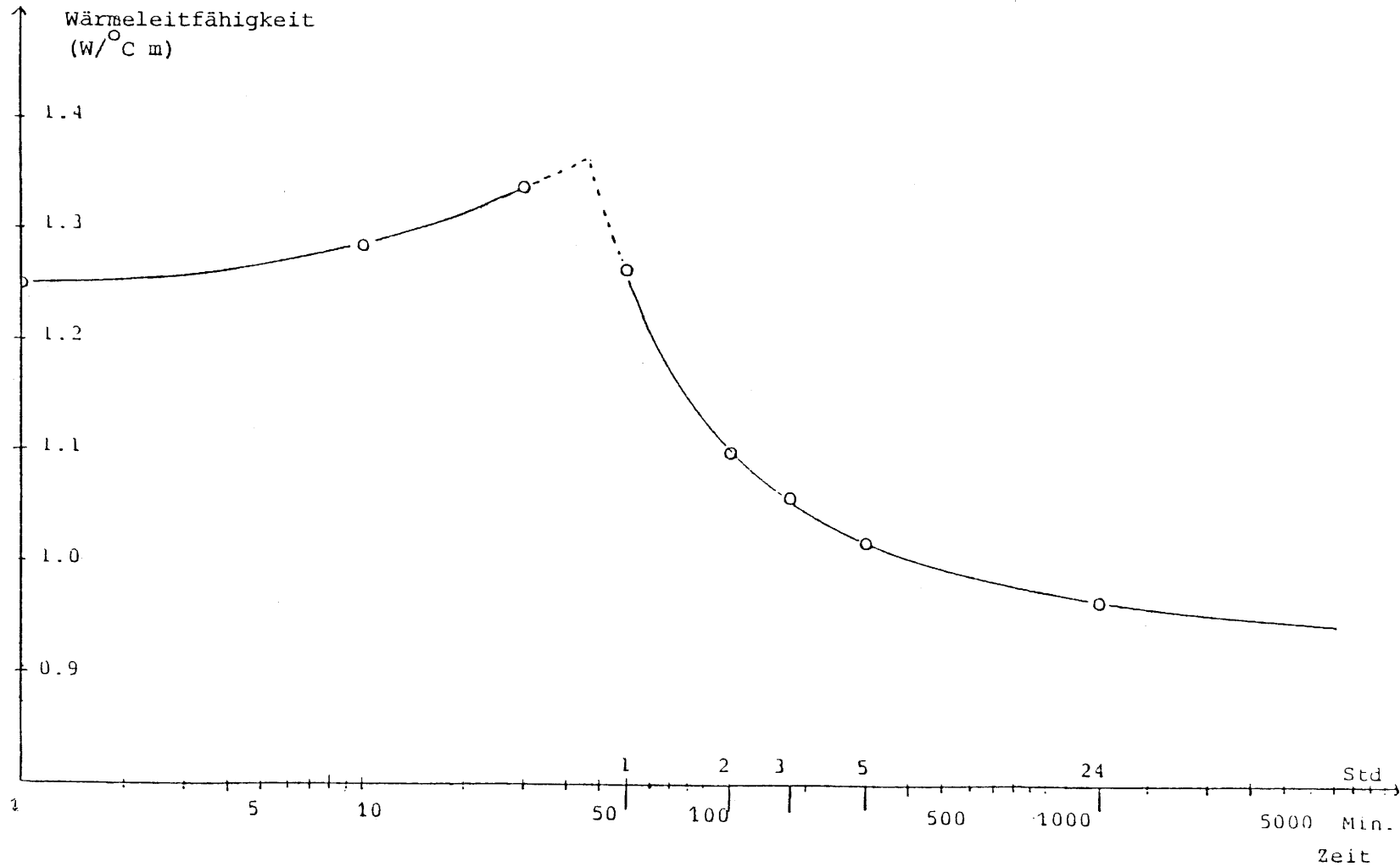


Die Wärmeleitfähigkeit bei erhöhten Temperaturen wurde nur an trockenen Proben untersucht. Wasserhaltige Proben verloren Wasser, bis sie im Trockenschrank auf die gewünschte Temperatur gebracht wurden, und es war schwierig, den für die Messung massgebenden Wassergehalt an der Probenoberfläche anzugeben. Wie stark die Wärmeleitfähigkeit wasserhaltiger Proben bei erhöhter Temperatur mit fortschreitender Versuchsdauer abnimmt, ist in Tabelle 2 und Figur 6 dargestellt. Dabei nimmt zuerst die Wärmeleitfähigkeit mit der Temperatur zu, um bei der beginnenden Austrocknung wieder abzunehmen.

Tab.2: Wärmeleitfähigkeit von MX-80 bei 105°C Ofentemperatur mit zunehmender Versuchsdauer. Anfangswassergehalt 14%, Anfangsdichte 2,13 Mg/m³, Sondentemperatur 120°C.

Zeit	Wärmeleitfähigkeit	Standardabweichung
2-20 Min	1,286	0,107
30-45 Min	1,338	0,040
1 Std	1,265	0,036
2 Std	1,101	0,055
3 Std	1,058	0,042
5 Std	1,018	0,049
24 Std	0,966	0,024

Fig. 6: Wärmeleitfähigkeit von MX-80 bei 105°C Ofentemperatur und zunehmender Versuchsdauer.
Anfangswassergehalt 14%, Anfangsdichte 2,13 Mg/m³, Sondentemperatur 120°C.



Zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der trockenen Proben von MX-80 wurden die Proben in den Trockenschrank gelegt, und die Temperatur des Trockenschrankes wurde so geregelt, dass an der Sonde 40, dann 80, 120 und schliesslich noch einmal 40^o gemessen wurden. Die Ergebnisse dieser Messungen wurden in der Tabelle 3 und in Figur 5 dargestellt.

Tabelle 3: Wärmeleitfähigkeit trockener Proben von MX-80 steigender Dichte bei 40, 80 und 120^oC

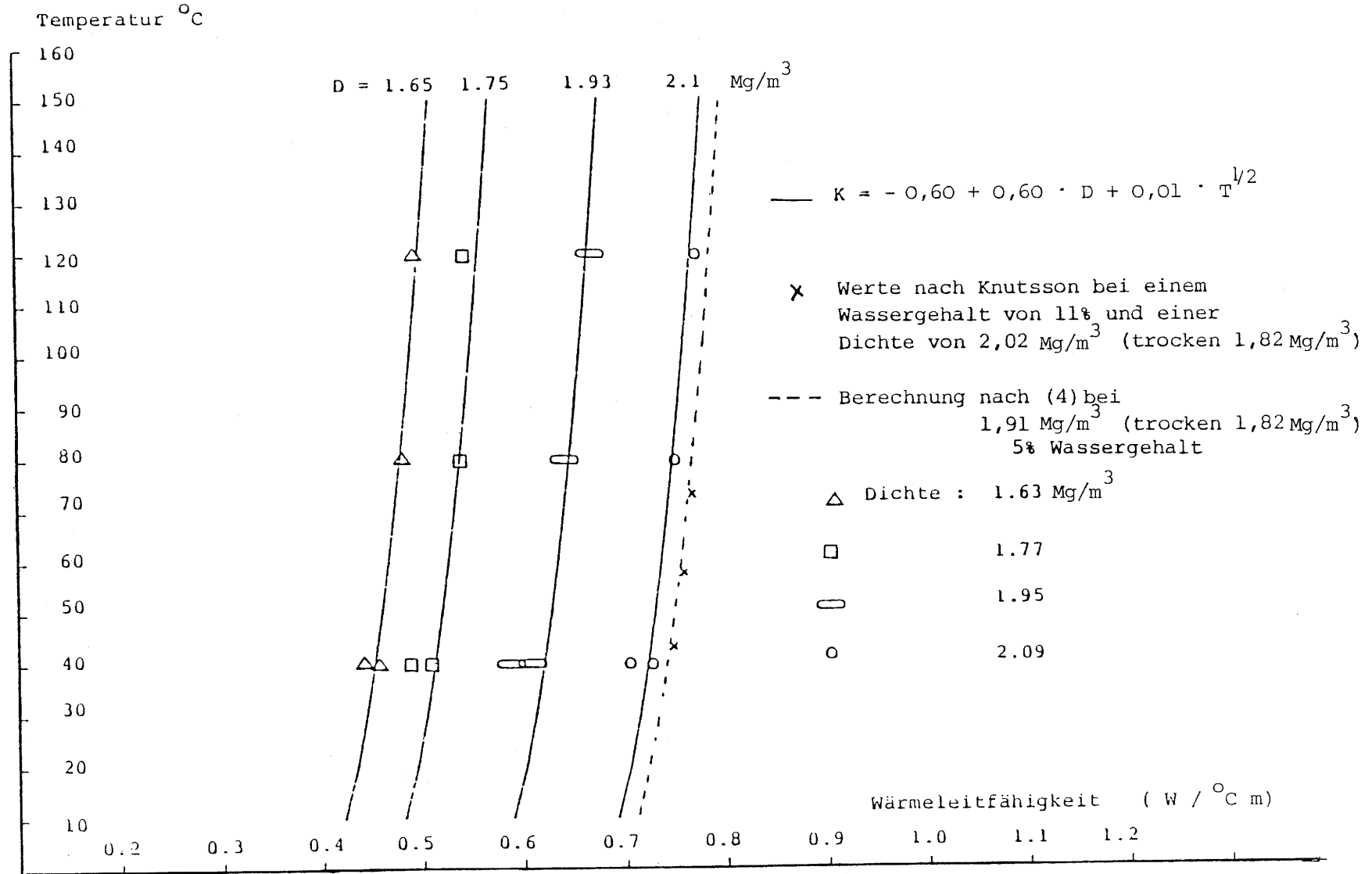
Dichte (Mg/m ³)	Wärmeleitfähigkeit (W/ ^o C m)	Temperatur (^o C)
1,63	0,457	40
	0,484	80
	0,497	120
	0,445	40
1,77	0,511	40
	0,541	80
	0,546	120
	0,490	40
1,95	0,612	40
	0,645	80
	0,675	120
	0,590	40
2,07	0,727	40
	0,757	80
	0,765	120
	0,691	40
2,09	0,731	40
	0,755	80
	0,778	120
	0,707	40

Die Wärmeleitfähigkeit K des trockenen Bentonites MX-80 lässt sich bei erhöhten Temperaturen gut nach folgender Näherungsformel berechnen:

$$K = -0,60 + 0,60 \cdot D + 0,01 \cdot T^{1/2} \quad (3)$$

D Dichte des Presskörpers (Mg/m³)
T Temperatur (^oC)

Fig. 7: Wärmeleitfähigkeit trockener Proben von MX-80 steigender Dichte bei 40, 80 und 120°.



5. DISKUSSION

Die Wärmeleitfähigkeit der verdichteten Bentonite betrug bei Raumtemperatur und bei Wassergehalten von 0 - 14% und Dichten von 1,45 - 2,4 Mg/m³ 0,4 - 1,3 W/°C m. Zum Vergleich wurde in der folgenden Tabelle die Wärmeleitfähigkeit einiger Minerale, von Granit, Wasser und Luft nach dem Handbook of Chemistry and Physics (46. Auflage) zusammengestellt.

Material	Temperatur (°C)	Dichte (Mg/m ³)	Wärmeleitfähigkeit (W/°C m)
Quarz	20	2,65	9,9
Glas	20	2,59	7,2
Calzit	25	2,7	4,1
Granit	20	2,8	2,2
Wasser	20	~ 1	0,613
Luft	20	0,0012	0,024
Quarzsand			
trocken 0%		~ 1,6	0,264
nass 24%			2,6

Die Wärmeleitfähigkeit von Einkristallen ist eine ausgesprochen strukturabhängige und störungsempfindliche Eigenschaft der Minerale. In Richtungen relativ dichter Packung ist die Wärmeleitfähigkeit grösser als in Richtungen mit lockerer Packung. Das ist besonders auffallend bei Mineralen mit Schichtstruktur. So beträgt die Wärmeleitfähigkeit von Glimmer parallel zur Schichtebene 5,1 W/°C m, aber senkrecht dazu nur 0,84 W/°C m (Landolt-Börnstein, 1982). Der Montmorillonit, das Hauptmineral des Bentonits, ist wie der Glimmer ebenfalls ein Schichtsilikat. Aber wegen der geringen Teilchengrösse lässt sich die Wärmeleitfähigkeit von Montmorillonit als Einkristall nicht bestimmen. Der Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit von Einkristallen und von entsprechend polykristallinem Material ist aber sehr komplex. Dabei sind vor allem die Porosität und der Wassergehalt von grösster Bedeutung.

Die Wärmeleitfähigkeit von verdichtetem Bentonit liess sich bei Raumtemperatur in Abhängigkeit der Dichte und des Wassergehaltes wie folgt ausdrücken:

$$K = -0,56 + 0,60 \cdot D + 0,004 \cdot W \cdot D^3 \quad (2)$$

Danach nahm die Wärmeleitfähigkeit mit steigender Dichte und steigendem Wassergehalt etwa linear zu. Die Wärmeleitfähigkeit von trockenem Bentonit liess sich bei Temperaturen bis 120° in Abhängigkeit der Dichte wie folgt ausdrücken:

$$K = -0,60 + 0,60 \cdot D + 0,01 \cdot T^{1/2} \quad (3)$$

Danach nahm die Wärmeleitfähigkeit mit steigender Dichte und Temperatur zu, wobei der Einfluss der Dichte dominierte. Die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von verdichtetem Bentonit von der Dichte, dem Wassergehalt und der Temperatur lässt sich durch folgende Gleichung ausdrücken, die man aus Gleichung (2) und (3) erhält:

$$K = -0,60 + 0,60 \cdot D + 0,004 \cdot W \cdot D^3 + 0,01 \cdot T^{1/2} \quad (4)$$

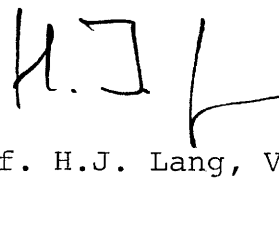
In Figur 8 ist die Korrelation zwischen den nach Formel (4) berechneten Werten (Dichte, Wassergehalt und Temperatur aus Tabelle 1 und 3) und den gemessenen Wärmeleitfähigkeiten (Tabelle 1 und 3) dargestellt.

Vergleicht man unsere Resultate mit den drei Messungen von Knutsson (1977), so sind unsere Werte etwas höher. Knutsson bestimmte die Wärmeleitfähigkeit von MX-80 bei einer Dichte von $2,02 \text{ Mg/m}^3$ und einem Wassergehalt von 11% bei $40-70^\circ$ nach der Radialmethode (Figur 4). Wir untersuchten bei erhöhten Temperaturen nur trockenen MX-80. Feuchte Proben verloren bis zur Messung Wasser, und der für die Messung massgebende Wassergehalt an der Probenoberfläche liess sich nicht sicher bestimmen. Setzt man aber in Gleichung (4) den Wassergehalt von 11% und die Dichte von $2,02 \text{ Mg/m}^3$ ein, so erhält man eine Wärmeleitfähigkeit von 1,04 bis $1,06 \text{ W/}^\circ\text{C m}$ für 40 bis 70°C , und die von Knutsson gemessenen Werte würden einem Wassergehalt von 5% und einer Dichte von $1,91 \text{ Mg/m}^3$ (Figur 5) entsprechen.

Eine klärende Diskussion dieser Ergebnisse ist von unserer Seite angeregt worden.

Institut für Grundbau und Bodenmechanik

E T H - Zürich



Prof. H.J. Lang, Vorsteher

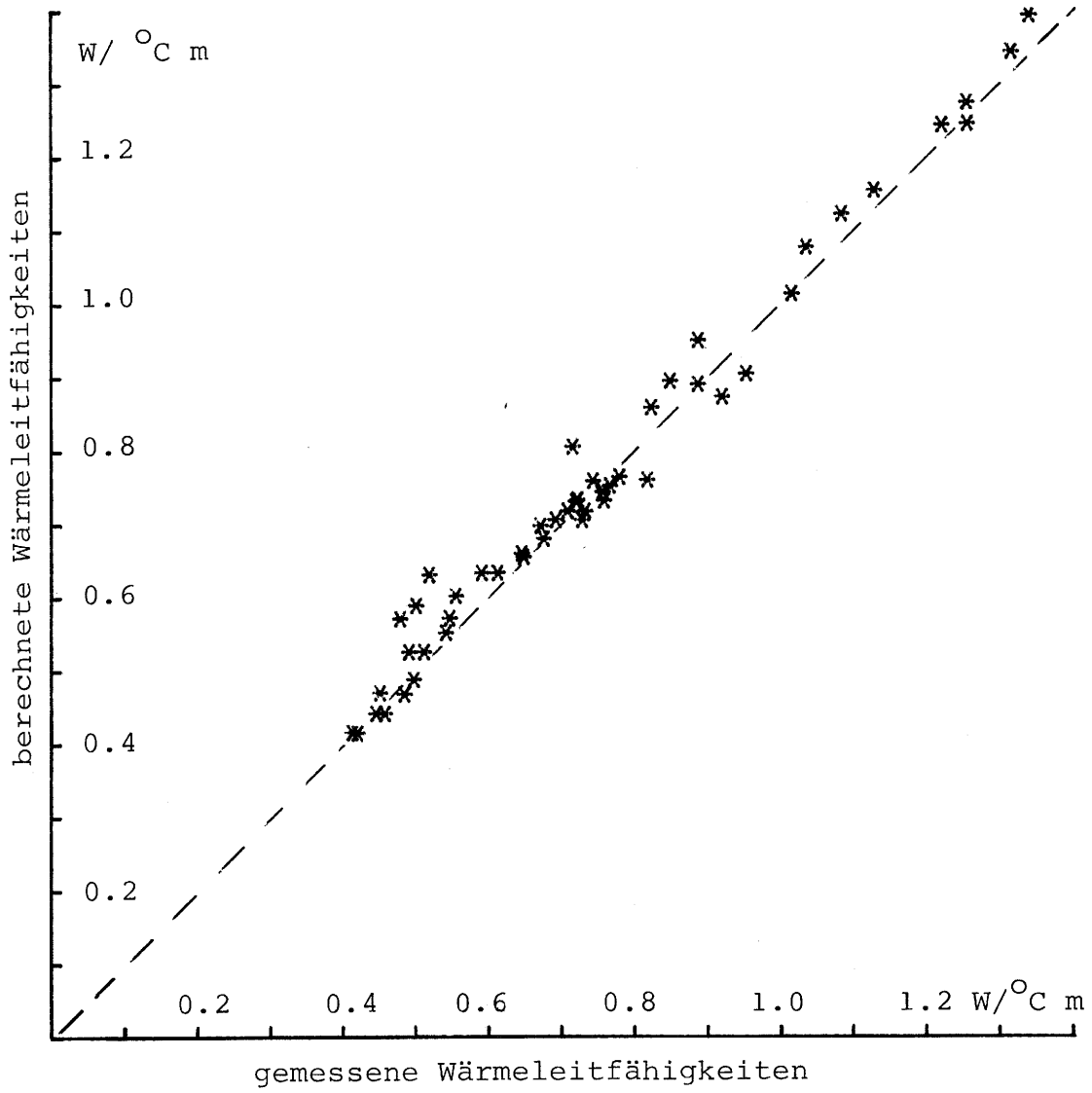


Fig. 8: Vergleich berechnete Wärmeleitfähigkeiten (Formel 4) und gemessene Wärmeleitfähigkeiten.

LITERATURVERZEICHNISPublikationen

- /1/ Knutsson, Sven (1977): Värmeledningsförsök på buffert substans av kompakterad bentonit.
KBS RPT 72
- /2/ Tye, R.P. (1969): Thermal conductivity.
Academic Press, vol. 1 + 2
- /3/ Schärli, U. (1980): Methodische Grundlagen zur Erstellung eines Wärmeleitfähigkeits-Kataloges schweizerischer Gesteine.
Diplomarbeit ETH Zürich