

Analyse der Wärmeleitfähigkeit von Gesteinen unter in-situ T-M Bedingungen: experimentelle und numerische Untersuchungen

Frank Wuttke, Amir S. Sattari, Hem Motra, Frederik Sittig

Keywords: Wärmeleitfähigkeit, Fels, Überlagerungsdruck, Lattice-Element-Methode

Zusammenfassung

Die thermischen Eigenschaften, wie Wärmeleitfähigkeit λ von Gesteinen sind im Hinblick auf die Nutzung geothermische Prozesse in der Lithosphäre der Erde von grundlegendem Interesse. Aufgrund des lithostatischen Drucks und der Wärmegradienten in der Erde ändern sich die Parameter in Abhängigkeit von den Randbedingungen. In dieser Arbeit wurden neue Analysen zur in-situ Druck- und Temperaturabhängigkeit hinsichtlich der Wärmeleitfähigkeit λ an unterschiedlichen Gesteinsproben und Referenzmaterialien durchgeführt. Neben der direkten Messung der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Druck erfolgte eine Durchschallung, um ein Materialmonitoring durchzuführen und Korrekturen zu seismischen Geschwindigkeiten zu erhalten. Bei kristallinen Gesteinen bewirkt die abgebrachte Probenbelastung eine Zunahme von Wärmeleitfähigkeit und Wellengeschwindigkeit, während eine Temperaturzunahme eine Abnahme dieser Parameter ergibt. Es zeigt sich, dass die Temperaturbelastung im Vergleich zum Belastungsdruck einen größeren Einfluss auf die physikalischen Prozesse innerhalb der Probe hat. Für die Interpretation der Messungen wurden numerischen Simulationen genutzt, um Phänomene zu erklären. Für die numerische Modellierung der Proben wurde die Lattice-Elemente Methode genutzt, um die gekoppelten thermo-mechanischen Probleme und Berücksichtigung einer Materialschädigung durch die aufgebrachte Belastung in Form einer Rißinitiierung und –ausbreitung zu berücksichtigen.

1. Einleitung

Das Verständnis der Wärmeleitfähigkeiten von Gesteinen spielt eine Schlüsselrolle in modernen technischen Belangen, insbesondere in den Geowissenschaften. Da die physikalischen Eigenschaften der Erdmaterialien druck- und temperaturabhängig sind, sollte es von großem Interesse sein, diese Abhängigkeiten auch unter realen Druckbelastungen zu untersuchen und zu quantifizieren. Viele Arbeiten konzentrierten sich auf das Verhalten von VP und VS von Gesteinen unter dem Einfluss von ausschließlich Druck oder nur Temperatur. Die Anzahl der Studien zum kombinierten Einfluss ist sehr gering. Für die Abhängigkeiten der Wellengeschwindigkeiten ist der Schlüsselmechanismus für die Druckabhängigkeit, das Schließen der Risse. Die Messungen werden an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel mit Hilfe einer 3-axialen Würfelpresse, welche neben dem Druck, Temperatur als auch Ultraschall nutzen kann. Mit zunehmender Temperatur zeigte sich in (Scheu et al. 2006) ein Anstieg der Wellengeschwindigkeit, der als entgegengesetztes Verhalten für die meisten Gesteine angesehen wird. Zusätzlich nimmt mit zunehmendem Druck bzw. steigender Temperatur die Anisotropie der seismischen Geschwindigkeiten nimmt stetig. In anderen Studien wird die Abnahme der akustischen Geschwindigkeiten mit zunehmender Temperatur durch die Wärmeausdehnung der Mineralien erklärt, die dazu führt, dass sich die Korngrenzen erweitern und neue Risse öffnen.

Es ist notwendig, die Wärmeleitfähigkeit von Gesteinen sowie ihre Abhängigkeit von Druck und Temperatur zu kennen, um entstehende Wärmeflüsse und geothermische Gradienten ermitteln zu können (Clauser und Huenges, 1995). In den letzten 50 Jahren wurde eine Vielzahl verschiedener

Messmethoden entwickelt, um die Wärmeleitfähigkeiten von Gesteinen zu bestimmen. Die meisten Messverfahren unterscheiden sich hinsichtlich der Probengeometrie, des zeitlichen Regimes und der räumlichen Verteilung des Temperatur- und Druckfeldes, die auch bei der Lösung der Wärmeleitungsgleichung berücksichtigt werden müssen. Zahlreiche Messungen der thermischen Eigenschaften werden bei hohem Druck, jedoch bei Raumtemperatur oder bei hoher Temperatur und niedrigem Druck oder bei Raumtemperatur und atmosphärischem Druck durchgeführt. Für die Messung der Wärmeleitfähigkeit stehen stationäre und transiente Linienquellentechniken zur Verfügung. Am bekanntesten sind die ‚Divided Bar Methode‘ (Birch, 1950 und Sass et al., 1984) und die Nadelsondenmethode (Sass et al., 1984 und van Mier et al., 2002). Diese Methoden wurden in mehreren Büchern und Publikationen ausführlich diskutiert (Beck, 1957 und Hailemariam und Wuttke 2018). Die Anwendung von In-situ-Spannungen ist in den aktuellen technischen Lösungen jedoch nicht vorgesehen (Bode, 1987). (Popov et al., 1999) entwickelten weiter Methoden zur Messung der Wärmeleitfähigkeit, den "optischen Wärmeleitfähigkeitsscanner" und die "Laserblitzmethode". Beide Methoden liefern zusätzliche Informationen zur Abhängigkeit der Mineralogie-Heterogenität von der Wärmeleitfähigkeit. Beides gilt jedoch nicht für Proben unter hohem Überdruck. Die Wärmeübertragung in Festkörpern mit einer geordneten Kristallstruktur ist wellenförmig, wie von (Eucken, 1911 und Debye, 1912) beschrieben. Parameter wie Textur, Schüttdichte und Wassergehalt des Bodens sind die Schlüsselfaktoren, die die Wärmeleitfähigkeit beeinflussen (Bertermann et al., 2015). Trotz der Notwendigkeit gibt es kein Verfahren zur Messung der Wärmeleitfähigkeit bei hohem Druck und hoher Temperatur für Gesteinsmaterial unter in-situ Bedingungen.

Numerische Studien der Wärmausbreitung erfolgte durch eine Vielzahl von unterschiedlichen Methoden, wie FEM, FD oder BEM. Diesen Kontinuumsmethoden gemein ist die Modellierung eines zusammenhängenden Kontinuums ohne Berücksichtigung von Materialheterogenitäten und auftretenden Schädigungen und Änderungen infolge Rissbildungen. Erst in jüngeren Jahren sind durch neue Entwicklungen, wie die XFEM oder die Phasenfeldmethode derartige Abbildungen möglich. Allerdings sind mehrdimensionale und sich aus den Randbedingungen ohne vordefinierte Risspfade auch derzeit nicht möglich und nur schwer zu mit diesen Methoden zu simulieren. Mit neue Diskontinuumsmethoden, wie die Lattice-Element Methode oder die Distinct Element Methode kann eine derartige Schädigung simuliert werden. Um die vorhandenen gekoppelten thermo-hydro-mechanischen Vorgänge unter Berücksichtigung von Rissinitiierung und –ausbreitung zu simulieren, wird in der Arbeitsgruppe Geomechanik der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel seit vielen Jahren gekoppelte Diskontinuumsmethoden, wie die LEM und die DEM-LEM, entwickelt und validiert. (Sattari et al. 2017) simulierten den Wärmetransport in heterogenen zementierten Geomaterialien mit der Lattice-Element-Methode (LEM). Unterschiede zwischen LEM und FEM sind vernachlässigbar gering, solange die Heterogenität des Materials begrenzt ist. (Jorand et al. 2013) hat die Wärmeleitfähigkeit heterogener Sedimentgesteine Mithilfe optischen Abtasttechnik bestimmt und erfolgreich gegenüber numerisch modellierten Wärmeleitfähigkeiten verglichen.

Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss von Druck und Temperatur auf die Wärmeleitfähigkeit von Gesteinen experimentell und numerisch zu untersuchen. Als Validierung der experimentellen Entwicklungen wurden verschiedene synthetische Materialien, wie Stahl, herangezogen, um die Messungen Wärmeleitfähigkeits- und Wellengeschwindigkeitsmessung zu vergleichen. Diese Versuche unten in-situ Bedingungen sollen genutzt werden, um Daten zu diesen physikalischen Prozessen bereitzustellen und zuverlässiger interpretieren bzw. modellieren zu können. Eine Korrelation wie zwischen Wellengeschwindigkeiten und Wärmeleitfähigkeit unter Berücksichtigung von in-situ Drücken ist daher von großem Interesse, um zuverlässigere Ableitungen eines Parameters zum anderen zu ermöglichen.

2. Experimentelles Setup und genutzte Materialien

Für die Untersuchungen der thermischen Leitfähigkeiten unter in-situ Umgebungsspannung wurde eine dreidimensional belastende Würfelpresse an der CAU Kiel genutzt. Das Gerät hat einen Spannungsbereich zwischen 1 bis 600 MPa und eine Temperaturlast bis zu 1023 K in alle drei Richtungen unabhängig (siehe Abb. 1). In dieser Studie liegt der Druck zwischen 12 und 400 MPa und die Temperatur zwischen 300 und 673 K.

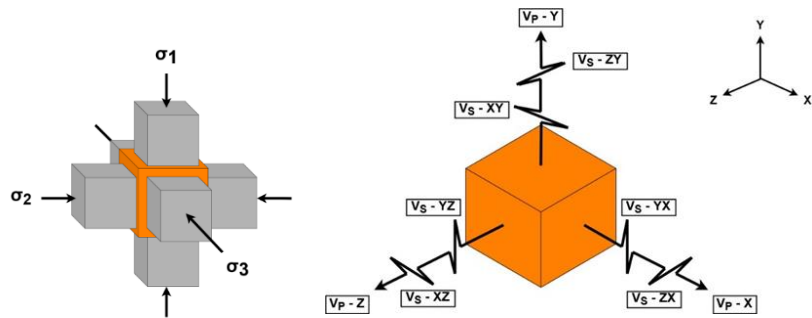


Abb. 1: Links: Die an der CAU Kiel genutzte Würfelpresse. Mitte: Eine schematische Darstellung der Probe (orange) und der sechs Druckstempel (grau) unter 3D Spannungsbelastung. Rechts: Schematische Darstellung der Durchschallung mit P- und S-Wellen des Probewürfels.

Für die Bestimmung der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit wurde die Würfelpresse entsprechend der stationären ‚Divided Bar Methode‘ erweitert. Das dazu genutzte Referenz-material ist eine synthetisierte Keramikplatte aus Y-PSZ ZrO_2 mit einer bekannten Wärmeleitfähigkeit λ_R von $2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, welche an der Oberseite des Probewürfels positioniert wird. Über die Kontrolle der Temperatur T_1 (Unterseite) und der Temperatur T_3 (Oberseite) wird ein Wärmefluss zwischen T_1 und T_2 entsprechend dem Fourier'schen Gesetz erzwungen:

$$q = -\lambda * \frac{\delta T}{\delta x}, \quad [1]$$

mit q als der Wärmefluss in $[\text{W m}^{-2}]$ und $\delta T / \delta x$ als der Temperaturgradient $[\text{K m}^{-1}]$ zwischen T_1 und T_2 . Die Seitenflächen der Keramikplatte sind mit keramischer Isolierwolle bedecken, um den Wärmeverlust im Referenzmaterial zu verringern. Im Idealfall ist der Stapel aus Referenzmaterial und Probekörper ummantelt und isoliert sein, so dass der axiale Wärmefluss nicht verringert wird (Bording et al., 2016). Durch die lateralen hohen mechanischen Spannungen im vorhandenen Versuchsaufbau konnte dies derzeit noch nicht durchgeführt werden. Die Wärmeleitfähigkeit λ der Materialprobe mit folgender Gleichung bestimmt werden,

$$\lambda = \frac{\lambda_R * S_P}{\left(\frac{T_3 - T_1}{T_2 - T_1}\right) S_{23} - S_R} \quad [2]$$

Die genutzten Terme der obigen Gleichung sind in Abb. 2 nochmals schematisch dargestellt. Die spezifischen Längen des Probenaufbaues betragen $S_P = 0,043 \text{ m}$, $S_S = 0,020 \text{ m}$, $S_{12} = 0,053 \text{ m}$ und $S_{23} = 0,010 \text{ m}$. Zur Bestimmung der Druck- und Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit wurde λ bei konstanter Temperatur, jedoch bei unterschiedlichen Spannungsniveaus bestimmt.

Beginnend bei Raumtemperatur wurde λ für die fixierte Temperatur in einem Spannungsbereich von 12 MPa bis zum jeweiligen Spannungsmaximum jeder Probe gemessen (siehe Tabelle 1). Anschließend wurde die Temperatur stufenweise erhöht und für jeden Temperaturschritt die Wärmeleitfähigkeit λ im aufgebrachtten Druckbereich gemessen.

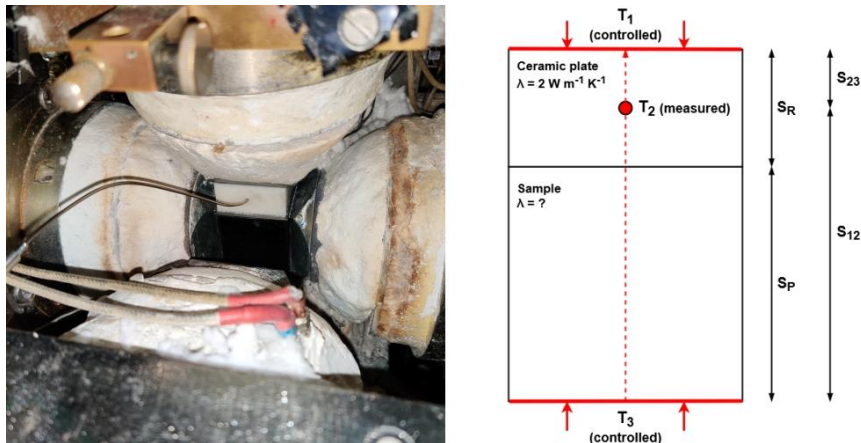


Abb. 2: Links: Die Platte, bestehend aus der weißen Keramikplatte (roter Kreis - Referenzmaterial in der ‚Divided Bar Methode‘) liegt auf der Probe. Der Probenwürfel ist aufgrund des genutzten Graphitsprays vollständig schwarz. Das Thermoelement in der Keramikplatte liefert T_2 . Rechts: Schematische Darstellung der stationären ‚Divided Bar Methode‘ und der einzelnen Terme der obigen Gleichung. Der rot gestrichelte Pfeil zeigt die thermische Belastung mit einem Wärmefluss von T_3 (höherer Temperatur) zu T_1 (niedrigere Temperatur) an.

Die Laststempel als Temperaturquelle liefern die konstanten Werte T_3 und T_1 . Eine Kühlung der Laststempel ist nicht möglich, so dass die Raumtemperatur die untere Grenze der thermischen Belastung bildet. Der Raum selber wird durch ein Klimagerät bei konstanter Temperatur gehalten.

Die gemessenen Werte der Wärmeleitfähigkeit beziehen sich in den Analysen auf T_3 . Die umgebenden lateralen Laststempel wurden mit einer Temperatur von 10°C niedriger als der Wert von T_3 thermisch belastet, so dass keine kalten Flächen auf den Probekörper wirkten. Die Messung erfolgte nach Einstellen des thermischen Gleichgewichtes, so dass ein stationärer Wärmefluss sichergestellt war. Zur Prüfung der angewandten Methode und Validierung des Messverfahrens, wurde die Wärmeleitfähigkeitsmessung an Standardmaterialien durchgeführt und verglichen. Die Unsicherheiten der Wärmeleitfähigkeitsmessung bei diesen Validierungen betrug weniger als 1%. Um die Reproduzierbarkeit zu überprüfen, wurden die Messungen zu jedem Druck- und Temperaturlevel wiederholt. Neben den Validierungen und den Vergleichen an Referenzmaterial zu veröffentlichte Messdaten, zeigt sich die Zuverlässigkeit der vorliegenden Messmethodik an Gesteinen.

Die in der Studie untersuchten Materialien betreffen fünf monomineralischen Proben: Anhydrit (ANH), Gips (GYP), Marmor (MAR), Perlit (PER) und Quarzit (QUA). Die kristalline Anhydritprobe hat eine Dichte von 2930 kg m^{-3} und eine Porosität von weniger als 1%. Es gibt mineralische Einschlüsse von Orthopyroxen von weniger als 5 Vol.-% (siehe Abb. 3). Die einzelnen Anhydritkristalle decken einen weiten Bereich von Korngrößen ab, von klein bis sehr feinkörnig. Der Volumenanteil der feinkörnigen Kristalle ist etwas größer als der der feinkörnigen Kristalle und die Form der Kristalle ist äquigranular. Die Gipsprobe ist fast rein mit einem Gipsgehalt von mehr als 98% in einem kristallinen Gewebe. Die Erzmineralisierung von weniger als 1% ist vernachlässigbar und die Dichte beträgt 2265 kg m^{-3} und Porosität von weniger als 1% führt. Die mittelkörnigen, länglichen Kristalle können eine Länge von bis zu mehreren Millimetern erreichen. Die Monomineralprobe aus Marmor enthält mehr als 90% Calcit mit einem niedrigen Quarz- und Plagioklasgehalt von weniger als 5 Vol.-%. Die Verteilung der

Korngrößen ist in einem Bereich von mittel- bis feinkörnigen Kristallen in einem kristallinen Gewebe gleichmäßig. Die Dichte beträgt 2708 kg m^{-3} . Die Porosität ist mit weniger als 5% gering. Die Perlitprobe hat ein meist amorphes Gewebe (farblose Bereiche zwischen den braunen Aggregaten) und enthält mehr als 90 Vol.-% Obsidian und ungefähr weniger als 10% Denitrifikationsaggregate (braune Blasen). Diese Aggregate können einen Durchmesser von bis zu $1500 \mu\text{m}$ erreichen und sind unregelmäßig verteilt. Die Dichte der Perlitprobe beträgt 2406 kg m^{-3} . Die Porosität, die ausschließlich aus den Denitrifikationsblasen stammt, beträgt weniger als 3%. Die kristalline Quarzitprobe enthält mehr als 99% Quarz. Die extrem geringe Menge anderer Einschlüsse ist mit weniger als 1% vernachlässigbar. Die Dichte der Probe beträgt 2645 kg m^{-3} . Die homogen angeordneten Körner sind miteinander verflochten, was sich in einer sehr geringen Porosität von weniger als 1% niederschlägt.

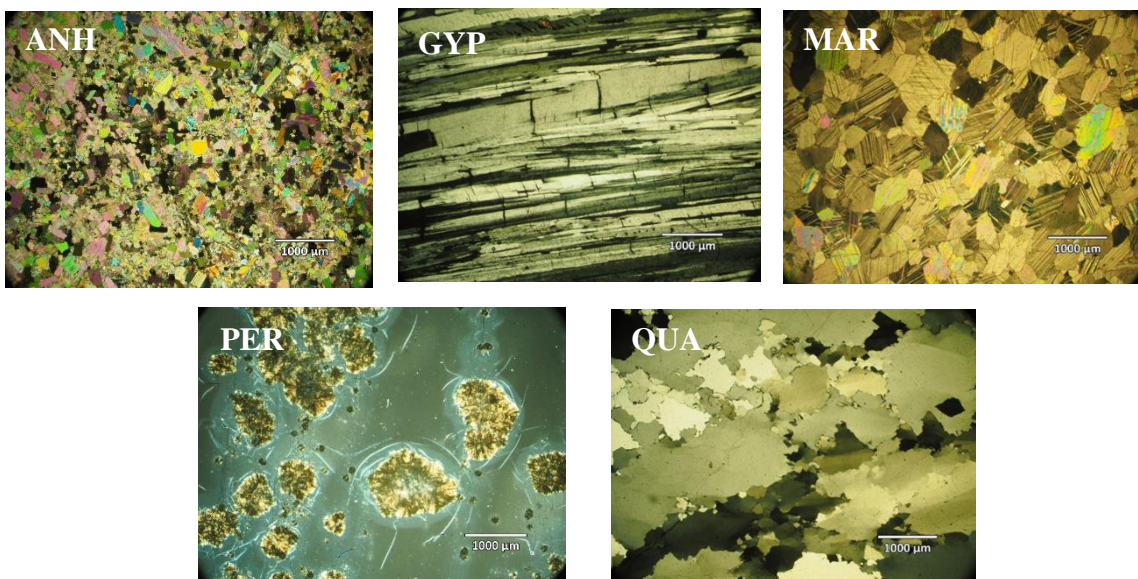


Abb. 3: Mikroskopbilder der analysierten Proben Anhydrit (ANH), Gips (GYP), Marmor (MAR), Perlite (PER) und Quarzit (QUA).

3. Numerische Modellierung

Zur gekoppelten THM Mikro- und Mesoskaligen Analyse der vorliegenden heterogenen Materialien unter Berücksichtigung von Bruchmechanischen Vorgängen wurde die Lattice-Elemente-Analyse genutzt (Sattari et al. 2017, Wuttke et al. 2017, Rizvi et al. 2018). Für einfache thermische Simulationen in homogenen Kontinua kann auch die FEM herangezogen werden. Die in den Simulationen genutzten Parameter sind: Dichte [kgm^{-3}], Elastizitätsmodul [Pa], Poisson-Verhältnis [-], Wärmeleitfähigkeit [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$] und die spezifische Wärmekapazität [$\text{JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$] und Bruchzähigkeit [$\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$]. Die Proben wurden als homogene und heterogene Materialien betrachtet. Die heterogenen Mineralien können dabei als stochastisch verteilte Korngrößen oder als Image des Dünnschliffes in die Modellierungen übernommen werden. Die Rand- und Initialbedingungen sind den experimentellen Berandungen und thermo-mechanischen Lasten angepasst.

	Gewicht	Dichte	Young's Modul	Poisson Verhältnis	Thermische Leitfähigkeit	Wärme Kapazität
	kg	kg m ⁻³	GPa	-	W m ⁻¹ K ⁻¹	J kg ⁻¹ K ⁻¹
STE	0.625	7870	200	0.29	15.25	500
ANH	0.233	2930	60	0.29	4.90	700
GYP	0.180	2270	30	0.30	1.10	1100
MAR	0.215	2710	50	0.32	2.54	900
PER	0.191	2410	70	0.21	0.70	400
QUA	0.210	2650	70	0.11	5.90	700

Tabelle 1: Eingangsparameter in der numerischen Simulation

Die mechanischen und thermischen Randbedingungen folgen den experimentell genutzten Belastungen. Die vertikalen Laststempel haben die thermische Last T_1 und T_3 zur Erzeugung des vertikalen thermischen Gradienten für die numerische Analyse der ‚Divided Bar Methode‘, die seitlichen Laststempel hatten die Thermische Last ($T_3 - 15^\circ\text{C}$), so dass die Probe keine starken lateralen thermischen Gradienten erfährt.

Da die Wärmeleitfähigkeit nicht direkt ermittelt werden kann, wird λ über den Wärmefluss q [Wm^{-2}] berechnet. Zu diesem Zweck wird über den Probenwürfel verteilt ein Elementsatz generiert. Durch Hinzufügen einer neuen Verlaufsaußgabe kann der Wärmefluss für dieses einzelne Element modelliert werden. Die modellierte Wärmeleitfähigkeit λ_n wird aus der Fourier Gleichung mittels des bekannten Wärmefluss q und des thermischen Gradienten berechnet:

$$\lambda_n = \frac{q}{\frac{\delta T}{\delta x}} \quad [3]$$

Die aufgebrachten thermischen und mechanischen Belastungen während der Simulation können Abbildung 4 entnommen werden. Aus der Abbildung 4 wird ersichtlich, dass die thermischen Einflüsse durch die lateralen Bedingungen recht klein über den Querschnitt (ganz rechtes Bild) verteilt sind, welches den einaxialen thermischen Verteilungen nahekommt. Aus unterschiedlichen numerischen Studien wurde der optimale Einsatz der lateralen Belastungen ermittelt, um die vertikale Temperaturverteilung in der Probe möglichst nahe einer eindimensionalen Verteilung zu halten, trotz der geringen Breite des Probenkörpers. Werden die thermischen seitlichen Lasten weggelassen, so ist der deutlich größerer Einfluss und thermische Änderungen über den Querschnitt vorhanden, siehe Abbildung 5.

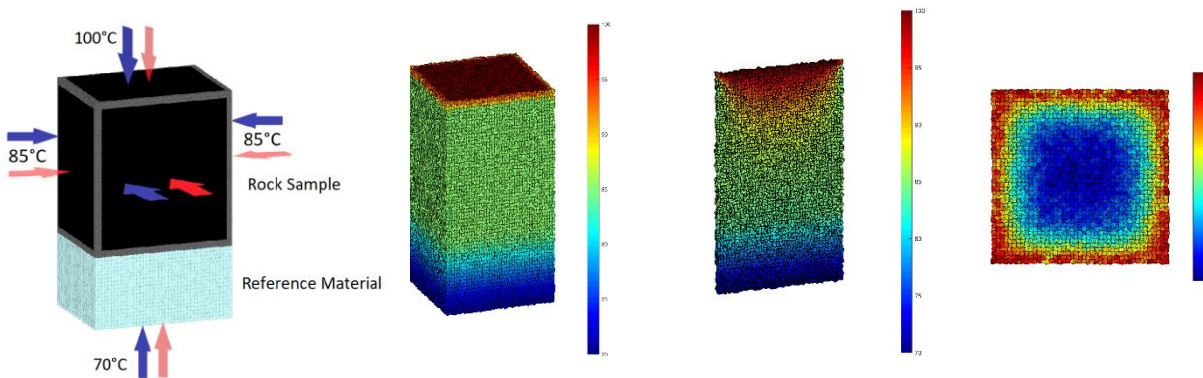


Abb. 4: Links: Schematische Darstellung des numerischen Modells mit beispielhaften mechanischen und thermischen Lasten an allen Lastflächen, Mitte und Rechts: Verteilung der Temperatur über und in dem Probekörper und dem Referenzmaterial als Längs- und Querschnitt

4. Experimentelle Ergebnisse

Die experimentellen Versuchsserien, welche zur Analyse der Wärmeleitfähigkeit unter in-situ Bedingungen analysiert wurden, sind in der nachfolgenden Tabelle 1 aufgelistet. Der druckabhängige Zuwachs der Wärmeleitfähigkeit für die meisten Gesteinsproben liegt unter $1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, nur Quarzit zeigt einen Anstieg zwischen 1 und $2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Die Stahlprobe zeigt unter Spannungsänderung den größten Anstieg der Wärmeleitfähigkeit zwischen 6 bis $9 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Unter Zunahme der Temperatur zeigen bis auf Perlit die anderen Gesteine eine Abnahme der Wärmeleitfähigkeit um größer $1\text{-}2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Perlit zeigt eine deutliche Zunahme der Wärmeleitfähigkeit mit Zunahme der Temperatur. Die Stahlprobe zeigt ebenfalls eine Zunahme der Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Temperatur analog der Größenordnung zur Spannungsabhängigkeit.

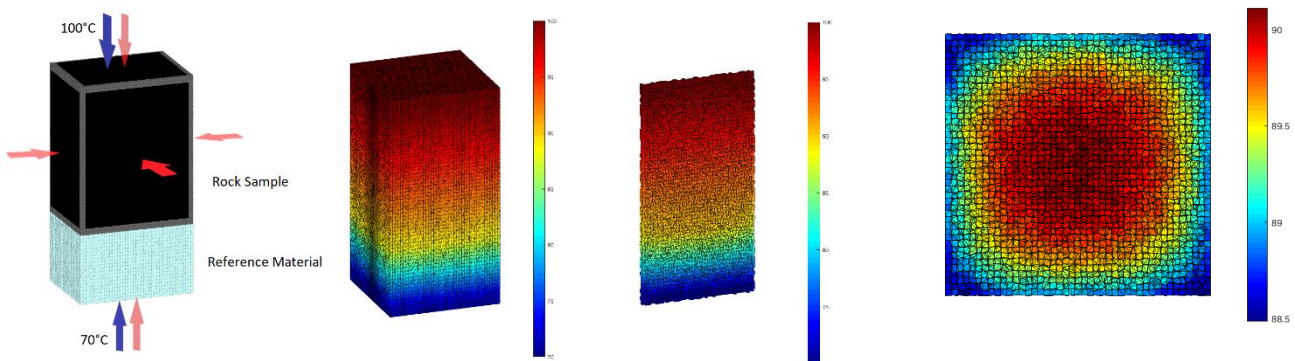


Abb. 5: Links: Schematische Darstellung des numerischen Modells mit beispielhaften mechanischen und thermischen Lasten nur an der Lastfläche oben und unten, Mitte und Rechts: Verteilung der Temperatur über und in dem Probekörper und dem Referenzmaterial als Längs- und Querschnitt

Im Allgemeinen spiegelt sich der Spannungseinfluß in einem Anstieg der Wärmeleitfähigkeit λ wider. Dies gilt für alle getesteten Materialien. Bei den meisten Materialien erfolgt ein stärkerer Anstieg zu Beginn der Spannungszuwachs und konvergiert mit zunehmender Spannung gegen einen Wert. Aufgrund der geringen Eigenstabilität von Gips konnte der Spannungsbereich nicht so hoch ausgelegt werden, wie bei den anderen Materialien.

Im Gegensatz zu den kristallinen Proben zeigen der amorphe Perlit und der hochlegierte Stahl eine umgekehrte Reihenfolge, in der die Wärmeleitfähigkeiten mit zunehmender Temperatur einem zunehmenden Trend folgen. Man kann sehen, dass der Trend der Wärmeleitfähigkeit für amorphe und kristalline Materialien entgegengesetzt ist. Quarzit dient als Vertreter für die kristallinen Proben, bei denen die Wärmeleitfähigkeiten ausnahmslos abnehmen. Die Abnahme von Gips ist nahezu linear und der Verlust der Wärmeleitfähigkeit beträgt etwa ein Drittel im Vergleich zu seinem Anfangswert. Die Temperaturabhängigkeit für Marmor ist ähnlich wie bei Quarzit.

5. Ergebnisse der numerischen Modellierung

Das thermo-mechanische Lattice-Modell wurde entwickelt und implementiert, um die Änderung der Wärmeleitfähigkeit unter mechanischen und thermischen Belastungen zu bestimmen und entstehende Wärmeprofil in heterogenen Materialien unter Berücksichtigung von intergranularen Rissentwicklungen abbilden zu können. Zur Berechnung der effektiven Wärmeleitfähigkeiten wird ein analoger Ansatz und Ablauf, wie bei der experimentellen Methode nach Gl. 2 verfolgt. Der Einfluss einer mechanischen Belastung auf die Änderungen der Wärmeleitfähigkeit wird mit Hilfe des Hertzschen Kontaktmodells in das thermische Modell übertragen. Die Erhöhung der Kontaktkräfte aufgrund der aufgebracht mechanischen Belastungen führt zu größeren und mehr Kontaktflächen.

Der Einfluss der thermischen Belastungen auf die Expansion und des thermischen Versagens im dem mechanischen Modell wird mit Hilfe der linearen thermischen Dehnung bzw. eingetragener Energie implementiert. Die lineare thermische Dehnung hängt vom thermischen Ausdehnungskoeffizienten ab, der in den vorliegenden Untersuchungen bei verschiedenen Temperaturen als konstant betrachtet wurde. Bild 7 zeigt das Wärmeprofil in einer Gesteinsprobe unter den gekoppelten thermo-mechanischen Belastungen. Die angesetzte mechanische hydrostatische Belastung wird in diesem Beispiel konstant bei 5 MPa gehalten. Die oberen und unteren Temperaturen sind auf 35°C und 25°C durch den oberen und unteren Druckstempel festgelegt. Die thermische Belastung der Seitenflächen wurde zu 30 °C gesetzt, um die thermische Randbedingung der lateralen Druckstempel zu simulieren. Die mineralische Struktur der Gesteinsproben wurde durch eine stochastische Anordnung der Mineralkörner im Modell abgebildet. Im Unterschied dazu würde die Übertragung einer Mikroskopischen Abbildung als 2D Visualisierung ebenfalls möglich sein. Die in Abbildung 7 vorhandenen Unterschiede zwischen dem Temperaturprofil der Quarzit- und Perlitgesteinsproben ist auf ihre initial angesetzte Wärmeleitfähigkeit zurückzuführen. Der Quarzit hat eine höhere Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zum Referenzmaterial. Im Gegensatz dazu hat Perlit eine geringere Wärmeleitfähigkeit.

Das Wärmeprofil in einer Quarzitprobe unter der mechanischen Einschlussbelastung von 12 MPa ist in Abbildung 8 dargestellt. Die Ergebnisse sind unterschiedlichen Zeitintervallen zuzuordnen, innerhalb welcher die Temperaturlast an der oberen und unteren Probenseite konstant gehalten wird. Die Konvergenz des transienten Lattice-Modells hängt von der Probengröße, der Zellgröße, der anfänglichen Wärmeleitfähigkeit und den genutzten Zeitschritten zwischen den Iterationsschritten ab. Die Wärmeleitfähigkeit wurde ermittelt, nachdem ein thermisch stationärer Zustand erreicht war. Die Abbildung 8 zeigt die Evolution zum thermisch stationären Zustand und der ermittelten Wärmeleitfähigkeit am numerischen Modell während der einwirkenden thermo-mechanischen Einflüsse.

		Spannung [MPa]						
		12	50	100	150	200	250	300
Stahl								
Temperatur [K]	313	15,25	16,32	17,51	18,50	19,40	19,97	20,78
	373	16,61	17,03	17,82	18,10	18,38	18,57	18,77
	473	18,28	20,58	22,31	23,12	24,29	25,23	25,56
	573	19,38	21,30	23,55	25,23	25,56	26,07	26,59
	673	22,31	23,12	24,29	25,23	27,13	28,08	28,68
Anhydrit								
Temperatur [K]	313	4,42	4,77	5,08	5,17	5,23		
	348	5,05	5,10	5,15	5,19	5,20		
	373	4,83	4,91	4,97	5,01	5,02		
	423	4,09	4,16	4,23	4,27	4,31		
	473	4,02	4,16	4,40	4,45	4,48		
Gips								
T. [K]	313	1,36	1,46	1,62				
	348	1,14	1,17	1,19				
	373	0,92	0,97	0,98				
Marmor								
Temperatur [K]	313	2,54	2,87	3,04	3,13	3,19	3,23	3,24
	373	2,21	2,25	2,28	2,29	2,30	2,32	2,34
	473	2,08	2,11	2,12	2,12	2,14	2,16	2,21
	573	1,84	1,92	1,99	2,02	2,03	2,05	2,06
	673	1,62	1,78	1,82	1,84	1,86	1,86	1,87
Perlit								
Temp. [K]	313	0,70	0,82	0,86	0,89	0,93	0,95	0,96
	373	1,64	1,74	1,81	1,84	1,85	1,87	1,88
	473	2,32	2,40	2,46	2,52	2,53	2,54	2,56
	573	2,78	2,97	3,03	3,07	3,08	3,11	3,12
Quarzit								
Temperatur [K]	313	5,90	6,65	7,28	7,50	7,64	7,84	7,89
	373	4,69	5,02	5,41	5,61	5,77	5,83	5,89
	473	4,60	5,08	5,44	5,53	5,62	5,72	5,82
	573	4,13	4,36	4,62	4,84	4,97	5,01	5,08
	673	3,03	3,45	3,79	3,93	3,99	4,13	4,17

Tabelle 2: Die Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeiten [$Wm^{-1}K^{-1}$] von Stahl, Anhydrit, Gips, Marmor, Perlit und Quarzit und ihr Verhalten mit zunehmendem Druck und steigender Temperatur aus den experimentellen Analysen.

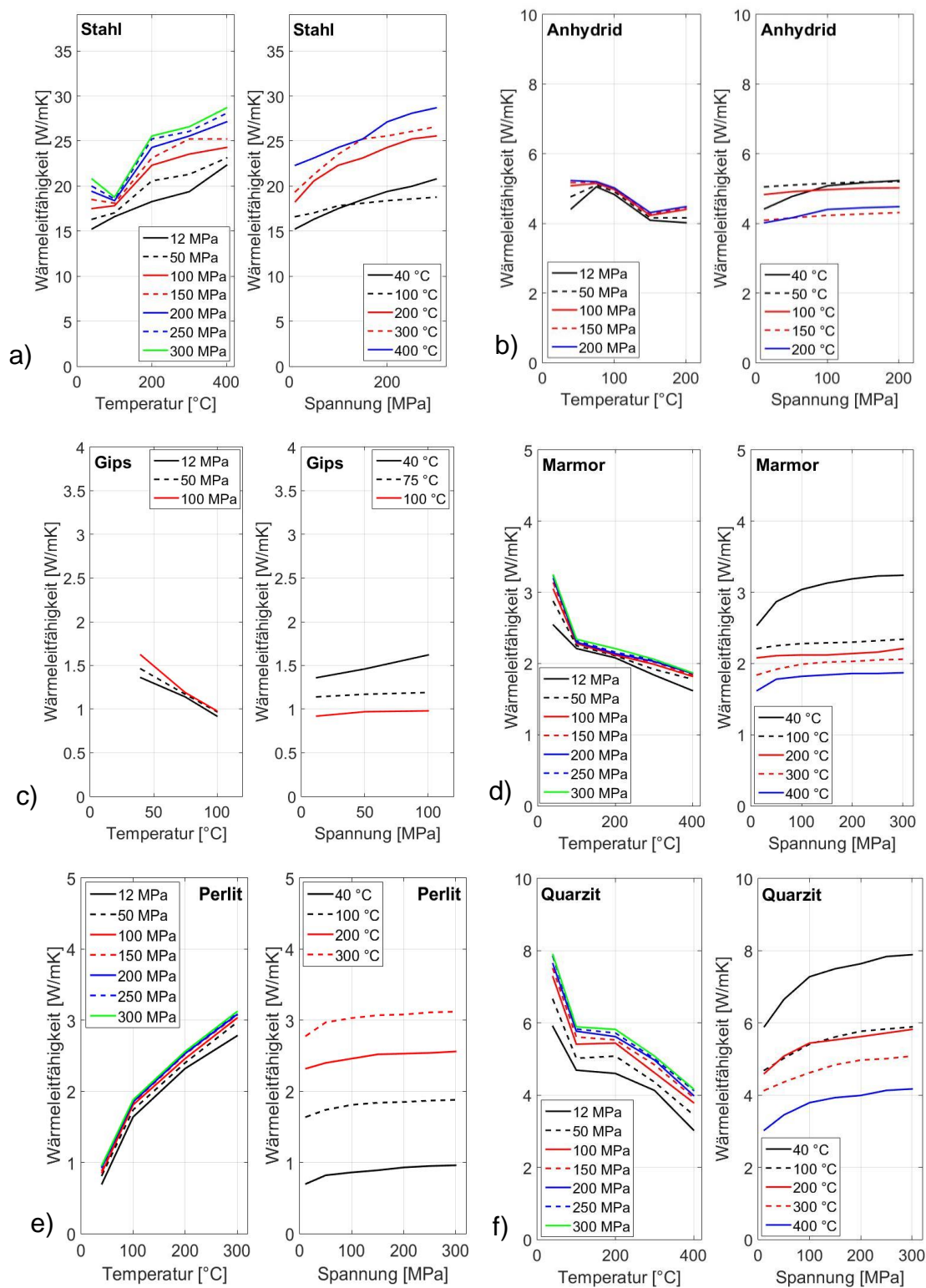


Abb. 6: Die experimentell bestimmten Wärmeleitfähigkeiten von a) Stahl, b) Anhydrid, c) Gips, d) Marmor, e) Anhydrid und f) Quarzit zu unterschiedlichen isothermen und mechanischen Belastungen.

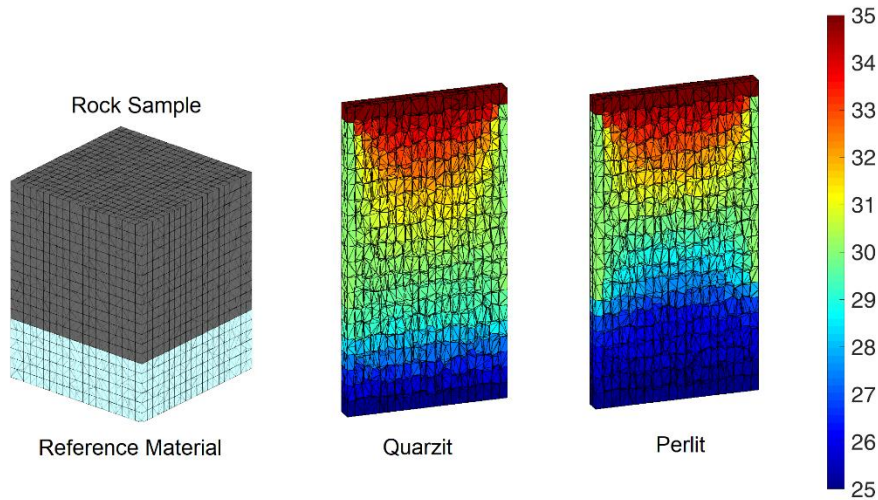


Abb. 7: Das Wärmeprofil ($T_3 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$) in einem vertikalen Querschnitt von (a) Quarzit und (b) Perlit. Das Referenzmaterial hat eine Wärmeleitfähigkeit von 2 W/mK , wobei Quarzit eine höhere Wärmeleitfähigkeit ($5,9 \text{ W/mK}$) und Perlit eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit ($0,7 \text{ W/mK}$) besitzt.

Die Änderung der Wärmeleitfähigkeit einer Quarzitprobe unter dem Anstieg einer mechanischen Belastung ist in Abbildung 9a dargestellt. Die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit unter dem Anstieg der mechanischen Belastung ist auf die Entwicklung besserer Kontakteigenschaften zwischen den Partikeln zurückzuführen. Dem gegenüber ist, wie in Abbildung 9b gezeigt, eine Abnahme der Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Temperatur in Quarzit aufgrund von thermischen Spannungen und thermischen Rissen zu verzeichnen. Die Bruchempfindlichkeit der Gesteinsprobe, die Porosität, der Wassergehalt und die Mineralogie wirken sich alle auf eine Zunahme oder Abnahme der Wärmeleitfähigkeit unter thermischer Belastungen aus.

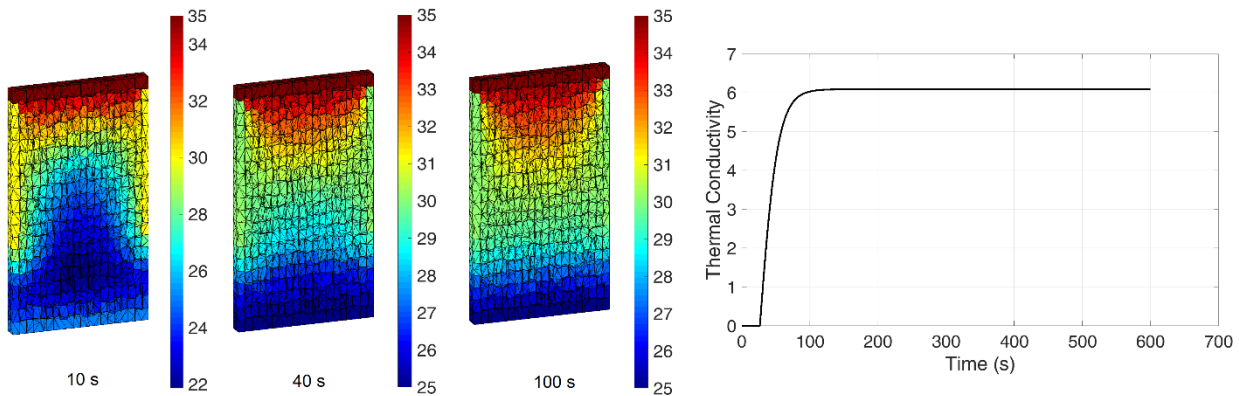
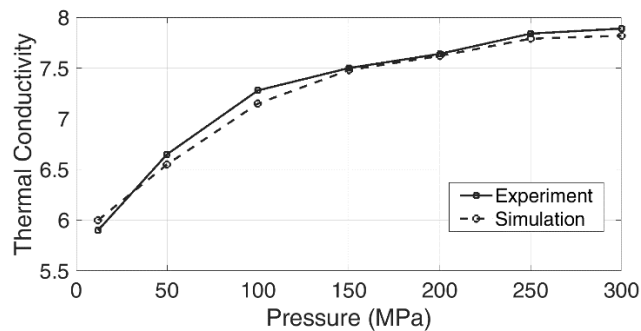
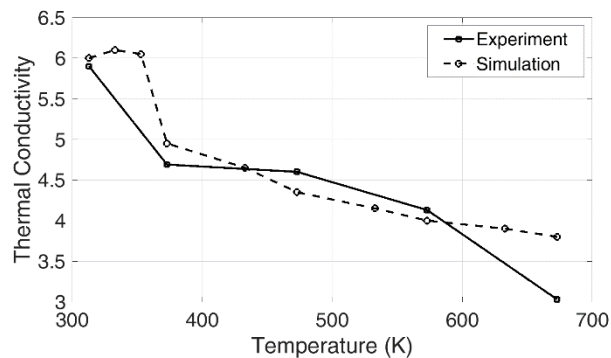


Abb. 8: Der Wärmetransport in einer Quarzitprobe zu drei unterschiedlichen Zeitschritten (vertikaler Querschnitt). Rechts: die Evolution des thermisch stationären Zustands und die ermittelten Wärmeleitfähigkeiten.



(a)



(b)

Abb. 9: Die Änderung der Wärmeleitfähigkeit bei (a) unterschiedlichem mechanischen Druck und konstanter Raumtemperatur, (b) unterschiedlicher thermischer Belastung und konstantem Einschließungsdruck.

6. Zusammenfassung

Mit einer modifizierten Würfelpresse, welche neben den akustischen Eigenschaften auch die Wärmeleitfähigkeiten unter in-situ Spannungen messen kann, wurden unterschiedliche Gesteinsproben analysiert. In dieser Arbeit wurde die Druck- und Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit λ von fünf monomineralischen Proben (Anhydrit, Gips, Marmor, Perlit und Quarzit) und einer Stahlprobe als Validierung untersucht. Der druckbedingte Anstieg der Wärmeleitfähigkeit wird durch die Verdichtung der Probe verursacht, die zum Schließen von Rissen und zu einem verstärkten thermo-mechanischen Kontakt zwischen den Körnern führt. Die Wirkung der Temperatur auf die Wärmeleitfähigkeit von Proben geringer Porosität ist entgegengesetzt.

Der Einfluss der Temperatur auf die Wärmeleitfähigkeit ist ebenfalls probenspezifisch. Perlit zeigt aufgrund seiner amorphen Struktur während des gesamten Experiments einen nahezu linearen Anstieg. Die kristallinen Gesteinsproben Anhydrit, Gips, Marmor und Quarzit zeigen mit zunehmender Temperatur eher eine Abnahme der Wärmeleitfähigkeit, welche aufgrund der thermischen Rissbildung in diesen Proben reduziert wird. Selbst geschlossene Risse stellen dabei mögliche Streuzentren für die Wärmeübertragung bei einer zunehmenden Temperatur dar. Perlit und Stahl zeigen im Gegensatz zu den kristallinen Gesteinsproben einen temperaturabhängigen Anstieg der Wärmeleitfähigkeit. Das amorphe Perlitgewebe bildet erheblich weniger Risse während der thermischen Belastung, wodurch sich die Wärmeleitfähigkeit von Perlit verbessert. Das Verhalten des Stahlmaterials ist ähnlich. Da es als nicht poröses Metall mit einer hohen Dichte keine Risse bildet,

wird zudem die temperaturinduzierte molekulare Schwingung verbessert, was zu einer verbesserten Fähigkeit zum Wärmetransport führt. Der kombinierte Einfluss von Druck und Temperatur hängt damit von der Struktur der Proben ab. Bei kristallinen Gesteinen wirken sie gegensätzlich, während bei amorphen oder nicht porösen Materialien diese beiden Parameter den Anstieg der Wärmeleitfähigkeit verstärken. Die Wärmeleitfähigkeit der kristallinen Gesteine nimmt unter Druck stetig zu. Die Temperatur ist neben der Spannung ein wesentlicher Einflußparameter, der die die Wärmeleitfähigkeit beeinflusst.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG für die Förderung des Projektes ‚Gekoppelte thermo-akustisch-mechanische Felseigenschaften unter in-situ Bedingungen‘, WU 496/17-1. In welchem eine weitere Entwicklung der experimentellen Methode im Vergleich zu andere Validierungsexperimente und numerischen Interpretationsanalysen erfolgt.

Quellenangaben

- Beck, A.E. A steady-state method for the rapid measurement of the thermal conductivity of rocks, *J. Sci.Instr.*, 43, 186-189, 1957
- Bertermann D, Klug H, Morper-Busch L, A pan-European planning basis for estimating the very shallow geothermal energy potentials. *Renew Energy* 75:335–347, 2015
- Birch, F. Flow of heat in the front range, *Bull, Geol. Soc. Am.*, 61, 567-630, 1950
- Bode. K.-H., Thermal Conductivity Measurement with the plate apparatus: influence of the guarded ring with on the accuracy of measurement, *Jour. Thermal Insulation*, 11, 32-52, 1987
- Bording, T.S., Nielsen S. B., Balling, N. The transient divided bar method for laboratory measurements of thermal properties. *Geophysical Journal International*, 2016, .207 (3), 1446–1455.
- Clauser, C., Huenges, E. Thermal conductivity of rocks and minerals. In: Ahrens, T.J. (Ed.) *Rock physics and phase relations. A handbook of physical constants*. American Geophysical Union, Washington, D.C., 1995, pp. 105–126.
- Debye, P., Zur Theorie der spezifischen Wärmen, *Ann. Phys.* 39, 789, 1912
- Eucken, A., Über die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit fester Nichtmetalle, *Ann. d. Phys.* 34 185, 1911
- Hailemariam, H., F. Wuttke, Temperature dependency of the thermal conductivity of porous heat storage media, *Heat Mass Transfer*, 2018, 54:1031–1051 <https://doi.org/10.1007/s00231-017-2204-3>
- Huenges, E., Factors controlling the variances of seismic velocity, density, thermal conductivity and het production of cores from the KTB pilot hole. *Geophysical Research Letters*, 1997, 24 (3), 341–344.
- Jorand, R., Vogt, C., Marquart, G., Clauser, C.. Effective thermal conductivity of heterogeneous rocks from laboratory experiments and numerical modeling. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118 (10), 5225–5235.
- Klemens, P.G., Neuer, G., Thermal conductivity of pure metals and alloys: Thermal properties of alloys. In: Madelung, O., White, G.-K. (Eds.) *Landolt-Börnstein: Numerical data and functional relationships in science and technology. Group III: Crystal and solid state physics. Thermal conductivity of pure metals and alloys*. Springer, New York, 1991, pp. 126–401.

- Popov, Y.A., Pribnow, D., Sass, J., Williams, C. Burkhardt, H., Characterization of rock thermal conductivity by high-resolution optical scanning, *Geothermics*, 28, 253-276, 1999.
- Rizvi, Z.H., Shrestha, D., Sattari, A.S., Wuttke, F., , "Numerical modelling of effective thermal conductivity for modified geomaterial using Lattice Element Method", *Heat and Mass Transfer*, 2018, 54:2 483-499.
- Sass, J.H., Stone, C., Munroe, R.J., Thermal conductivity determinations of solid rock – a comparison between a steady-state divided bar apparatus and commercial transient line-source devices, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 20, 145-153, 1984
- Sattari, A. S., Rizvi, Z. H., Motra, H. B., Wuttke, F., "Meso-Scale Modeling of Heat Transport in a Heterogeneous Cemented Geomaterial by Lattice Element Method". In: *Granular Matter*, 2017, 19:66 pp 1-12.
- van Mier, J.G.M., van Vliet M.R.A., Wang Tai K., Fracture mechanisms in particle composites: statistical aspects in lattice type analysis. *Mechanics of Materials* 34, 705–724, 2002
- Wuttke, F., Sattari, A.S., Rizvi, Z.H., Dempwolf, N., "Thermo-mechanical fracture simulation of cohesive and bounded solids by Lattice Element Modelling", 13th National Congress on Theoretical and Applied Mechanics, 2017 Sofia, Bulgaria.

Adresse: Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Lehrstuhl für Geomechanik und Geotechnik,
Ludewig-Meyn-Strasse 10, 24118, Kiel
E-Mail-Adresse: frank.wuttke@ifg.uni-kiel.de