

Weiterentwicklung eines für Festgesteine etablierten Messverfahrens zur kontaktlosen Bestimmung der spezifischen Wärmeleitfähigkeit von Lockergesteinen

Alexander Engeler, Dipl. Geol.; Martin Duddek, Dipl.-Ing. (FH)

Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG)

Abstract

Am Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie wurde ein primär für Festgesteine etabliertes Messverfahren mit Hilfe des Thermal Conductivity Scanners (TCS) so weiterentwickelt, dass nun die kontaktlose Bestimmung der spezifischen Wärmeleitfähigkeit von Lockergesteinsproben nach der Optical-Scanning-Messmethode möglich ist.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit der weiterentwickelten Messmethode im Vergleich zu etablierten Messmethoden (z.B. Nadelsondenmessungen) ein bedeutend höherer Probendurchsatz bei übereinstimmenden Messergebnissen erreicht werden kann. Die hierbei erreichte Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit entspricht derer von Nadelsondenmessungen bei Korngrößen bis einschließlich Mittelsand.

1. Einleitung/Veranlassung

Das Potential oberflächennaher geothermischer Quellenanlagen, d.h. der im Untergrund für die Aufnahme der Erdwärme einbauten Anlagen, wird maßgeblich durch die spezifische Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes beeinflusst. Im Rahmen der rechnerischen Dimensionierung der Quelle kommen häufig, speziell im Bereich der Lockergesteine, sehr heterogene Literaturdaten zum Einsatz. Die Spanne der potentiellen spezifischen Wärmeleitfähigkeit einzelner Lockergesteine ist hierbei z.T. größer als $\pm 1 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Für die Planung von geothermischen Anlagen ist eine bedarfsorientierte Quellendimensionierung ohne die genaue Kenntnis der im Untergrund vorliegenden Wärmeleitfähigkeit nur bedingt möglich, da sich in bisher veröffentlichten Literaturwerten lithologische Unterschiede der einzelnen Gesteine kaum widerspiegeln. Daher sind valide Wärmeleitfähigkeits-Messwerte für die Dimensionierung von geothermischen Anlagen von großer Bedeutung (Stober & Bucher, 2012).

Auch für die Bestimmung der Belastbarkeit von Böden durch Erwärmung und Austrocknung bedarf es der Kenntnis der Wärmeleitfähigkeit (Brakelmann & Jarass, 2019). Um Überhitzungen an erdverlegten Gleichstromleitungen zu verhindern, wird die Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Bodenmaterials benötigt, da ggf. Einbettungsmaterial zur besseren Wärmeableitung eingebracht werden muss.

Zur Ermittlung der spezifischen Wärmeleitfähigkeit von Lockergesteinen kommen häufig Nadelsonden zum Einsatz. Hierbei wird eine nadelförmige Sonde in einen Probekörper gestochen und die Wärmeleitfähigkeit am Einstichpunkt in mehreren Durchgängen ermittelt.

Durch den meist heterogenen Aufbau des Probenkörpers ist hierbei ein ermittelter Einzelmesswert in Bezug auf die Gesamtprobe nicht zwingend repräsentativ. Zudem ist durch das händische Einführen der Nadelsonde der durchgehende Kontakt des Probenmaterials an der Messnadel nicht immer zu gewährleisten, wodurch die Genauigkeit der Messung leidet. Aus diesem Grund besteht die Erfordernis zur Wiederholung des oben beschriebenen Verfahrens an weiteren Messpunkten des Probekörpers.

Der Zeitaufwand zur Durchführung einer Messung an einem Messpunkt kann erfahrungsgemäß zwischen 2 Minuten und bis zu 45 Minuten betragen. Faktoren, wie die thermische Anbindung der Nadelsonde an die Probe oder auch die zeitliche Änderung der Temperatur innerhalb des Probekörpers beeinflussen die Messzeit hierbei maßgeblich. Auf dieser Basis kann die Ermittlung eines belastbaren

Wärmeleitfähigkeitswertes für einen Bohrkern von einem Meter Länge einen ganzen Arbeitstag erfordern. Die flächendeckende Ermittlung spezifischer Wärmeleitfähigkeiten typischer niedersächsischer Lockergesteine für geothermische Anwendungen aber auch für den Bau von erdverlegten Stromkabeln stellt sich unter Berücksichtigung großer Probenmengen sowie lithologisch heterogener Proben als sehr aufwändig dar.

Aus diesem Sachverhalt heraus ergab sich die Fragestellung, ob ein bestehendes Verfahren zur schnellen und gleichzeitig genauen Ermittlung der spezifischen Wärmeleitfähigkeit von Festgesteinen auch für die Messung von Lockergesteinen geeignet sei, was nachfolgend betrachtet wurde.

2. Material und Methoden

Am Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie wurde ein primär für Festgesteine etabliertes Messverfahren mit Hilfe des Thermal Conductivity Scanners (TCS) so weiterentwickelt, dass nun die kontaktlose Bestimmung der spezifischen Wärmeleitfähigkeit von Lockergesteinsproben nach der Optical-Scanning-Messmethode, entwickelt von Prof. Y. Popov (Popov, 1983; Popov et al., 1983; Popov et al., 1985; Popov, 1997; Popov et al., 1999), mittels von oben über die Probenkörper fahrender Zwei-Kanal-Infrarot-Temperatursensoren möglich ist. Der Fokus lag dabei auf der Generierung repräsentativer Mittelwerte größerer Probenkörper und der Minimierung der Messzeit gegenüber anderen, am Markt verfügbaren, Messverfahren, bei gleichzeitiger Wahrung einer hohen Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.

Die Wärmeleitfähigkeit kann hierbei sowohl bei Fest- als auch bei Lockergesteinen gemessen werden. Der Messbereich liegt dabei zwischen 0,2 W/(m*K) und 25 W/(m*K) bei einer Messgenauigkeit von 3 %. Die maximale Probenlänge beträgt 1 m, so dass Bohrkern im geöffneten Kunststoffliner gemessen werden können. Dabei ist eine Auflösung von einem Messwert pro mm möglich.

Für die Messung von Festgesteinsproben ist eine Standardkonfiguration vorgesehen. Hierbei werden die zu messende Gesteinsprobe und zwei Referenzkörper, mit bekannter Wärmeleitfähigkeit, von oben auf die Messschiene aufgelegt und von der Sensoreinheit von unten abgefahren. Diese Sensoreinheit ist mit zwei Zwei-Kanal-Infrarot-Temperatursensoren bestückt, in deren Mitte eine Heizlampe angeordnet ist. Der vorlaufende Temperatursensor misst zunächst die unbeeinflusste Probentemperatur. Nachdem dies erfolgt ist, erfolgt der Eintrag einer definierten Wärmemenge in die Probe durch Bestrahlung dieser mittels einer Heizlampe mit definierter Leistung. Der nachlaufende Temperatursensor misst anschließend die resultierende Probentemperatur nach der Erwärmung. Die Referenzkörper dienen hierbei zur Kalibration des Messgerätes und zur Interpretation der gemessenen Temperaturwerte. Wenn Referenzkörper (R) mit bekannter Wärmeleitfähigkeit λ_R und Probekörper (P) mit unbekannter Wärmeleitfähigkeit λ_P in einer Linie liegend, nacheinander gescannt werden, so kann die Wärmeleitfähigkeit λ_P nach folgenden Gleichungen bestimmt werden (Popov et al. 1999):

$$\Theta = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot \chi \cdot \lambda} \quad (1)$$

$$\lambda_P = \lambda_R \cdot \left(\frac{\Theta_R}{\Theta_P} \right) \quad (2)$$

Θ : Temperaturdifferenz [°C bzw. K]

χ : Entfernung zwischen Wärmequelle und Temperatursensor [m]

λ : Wärmeleitfähigkeit [W * m⁻¹ * K⁻¹]

R : Referenzkörper

P : Probekörper

Q : Heizleistung der Wärmequelle [W * m⁻¹]

Zur Bestimmung der spezifischen Wärmeleitfähigkeit von Lockersedimenten wurde der Betrieb des TCS, unter Berücksichtigung einiger baulicher Änderungen an dem Messgerät, im „Überkopfmodus“ getestet. Diese Maßnahme war erforderlich, da im Rahmen der Messung von Lockergesteinsproben bei Betrieb in der Standardkonfiguration die Bestandteile des Sediments in die Sensoreinheit fallen würden. Basierend auf dieser Modifikation wurde die Möglichkeit eröffnet, einen Wärmeleitfähigkeitsscanner auch zur Messung von Lockersedimenten zu verwenden (s. Abb. 1-3).

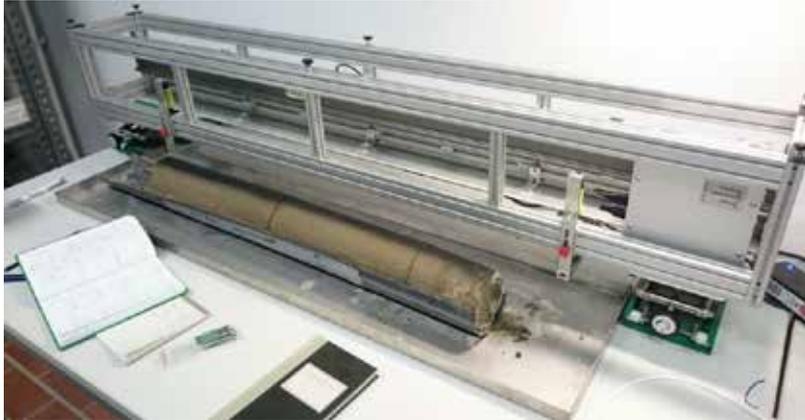


Abb. 1: TCS Überkopfkonfiguration für die Messung eines Lockersedimentbohrkerns



Abb. 2: Sensoreinheit, Temperatursensoren vorn (1) und hinten (2), Heizlampe (3) in der Mitte



Abb. 3: Befestigungsklammer für Referenzkörper

Die spezifische Wärmeleitfähigkeit von Lockergesteinen wird bisher üblicherweise mit berührenden Messmethoden, wie Nadelsonden, ermittelt.

Das Wärmeleitfähigkeitsmessgerät TK 04 nähert sich im Messverfahren an die idealisiert unendlich lange Heizquelle mittels einer Nadelsonde von 5 bis 7 cm Länge an. Diese wird in die Probe gesteckt und mit konstanter Leistung erhitzt. Ein Thermoelement, das in der Sonde eingebracht ist, registriert die relative Veränderung der Temperatur zum Startwert in der Wärmequelle mit einer Genauigkeit von bis zu $1 \cdot 10^{-3}$ K und zeichnet sie auf. Die Aufheizzeit der Sonde wird bei üblichen Messungen auf 80 s festgelegt. Die Auswertung der Aufheizkurve beginnt nach ca. 20 s. Die Heizleistung kann an die erwartete Wärmeleitfähigkeit des Materials angepasst werden (Stegner, 2016).

Das Wärmeleitfähigkeitsmessgerät KD2Pro verfügt über eine 2-Nadelsonde. Hierbei wird über einen definierten Zeitraum Wärme über eine Nadel in die Probe eingebracht. Die zweite Nadel ist 6 mm von der ersten Nadel angeordnet und zeichnet die thermische Reaktion der Probe auf die Wärmezufuhr sowie die Abkühlphase auf. Anhand der aufgezeichneten Daten wird nachfolgend, unter Berücksichtigung der Umgebungstemperatur, die spezifische Wärmeleitfähigkeit des Probenkörpers ermittelt (KD2Pro: Decagon Devices, 2011).

3. Ergebnisse und Diskussion

Zur Validierung des Messverfahrens mit dem TCS wurden unterschiedliche Referenzkörper, jeweils zwei Körper pro Wärmeleitfähigkeits-Messbereich (a und b), eines zweiten TCS des LIAG sowie ein Keramik-Körper und ein Kalibrierungsprobenkörper mehrfach gemessen, die Ergebnisse ausgewertet und die Abweichungen dargestellt. Die spezifische Wärmeleitfähigkeit aller gemessenen Körper war hierbei bekannt. Dabei wurden die verwendeten Körper 25-mal in der Überkopfkongfiguration und 15-mal in der Normalkongfiguration gemessen und davon der Mittelwert ermittelt. Anschließend wurden die ermittelten Messwerte der Normalkongfiguration denen der Überkopfkongfiguration gegenübergestellt und der prozentuale Fehler im Vergleich zu der am Referenzkörper angegebenen Wärmeleitfähigkeit dargestellt.

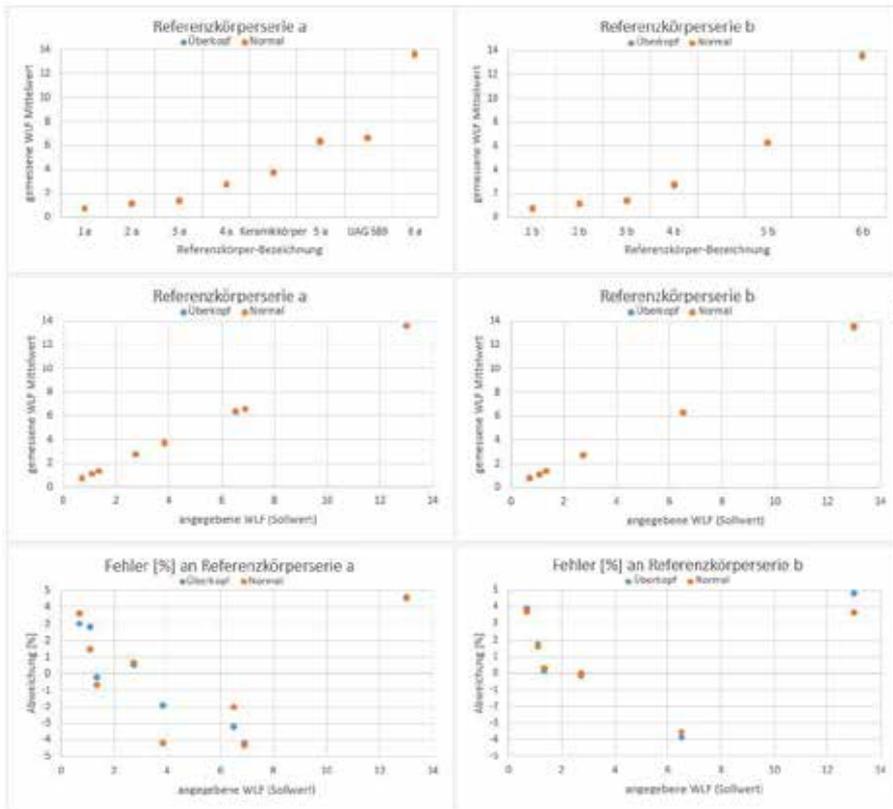


Abb. 4: Vergleich der Messergebnisse in der Normal- und Überkopfkongfiguration, Prozentuale Abweichung vom Sollwert

Die gemessene Abweichung gegenüber der angegebenen Wärmeleitfähigkeit der Referenzkörper (= Sollwert) liegt bei maximal $\pm 5\%$, was unter Berücksichtigung einer Toleranz der Referenzkörper von $\pm 2\%$ innerhalb der Messtoleranz des Gerätes liegt. Die Abweichung ist bei der WLF von $1,35 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ und $2,76 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ am geringsten (s. Abb. 4) und steigt mit zunehmender WLF an. Es zeigt sich, dass die Ergebnisse der Überkopfmessung über das gesamte Spektrum nur in geringem Maß von denen der Standardkonfiguration abweichen.

Im direkten Vergleich mit den Messwerten der Nadelsonde des KD2Pro konnte eine grundsätzliche Übereinstimmung verifiziert werden, was aus Abb. 5 und 6 ersichtlich wird. Abweichungen der Messwerte beider Verfahren können bspw. aus einer schlechten thermischen Probenanbindung der Nadelsonde (z.B. durch Lufteinschlüsse oder kleinere Gerölle innerhalb des Probenkörpers) und der unterschiedlichen Eindringtiefe resultieren. Die Ergebnisse zeigen, dass mit der weiterentwickelten TCS-Messmethode im direkten Vergleich mit etablierten Nadelsondenmessungen, bei übereinstimmenden Messergebnissen, ein bedeutend höherer Probendurchsatz erreicht werden kann. Dies resultiert zum einen aus der Messgeschwindigkeit eines TCS aber auch aus der Tatsache heraus, dass im Rahmen eines Messdurchgangs auf einem Meter Probenlänge bis zu 1000 Messpunkte generiert werden können. Der Messfortschritt von ca. 1 m Messstrecke je Stunde (bei einer Abtastrate von 2 mm und 10 Messungen je Kern) ermöglicht die hochauflösende Abbildung einer Bohrung mit 30 m Teufe in weniger als drei Tagen.

Die hierbei erreichte Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit der Messergebnisse entsprechen mindestens denen der Nadelsondenmessungen bei Korngrößen bis einschließlich Mittelsand (Abb. 5 u. Abb. 6).

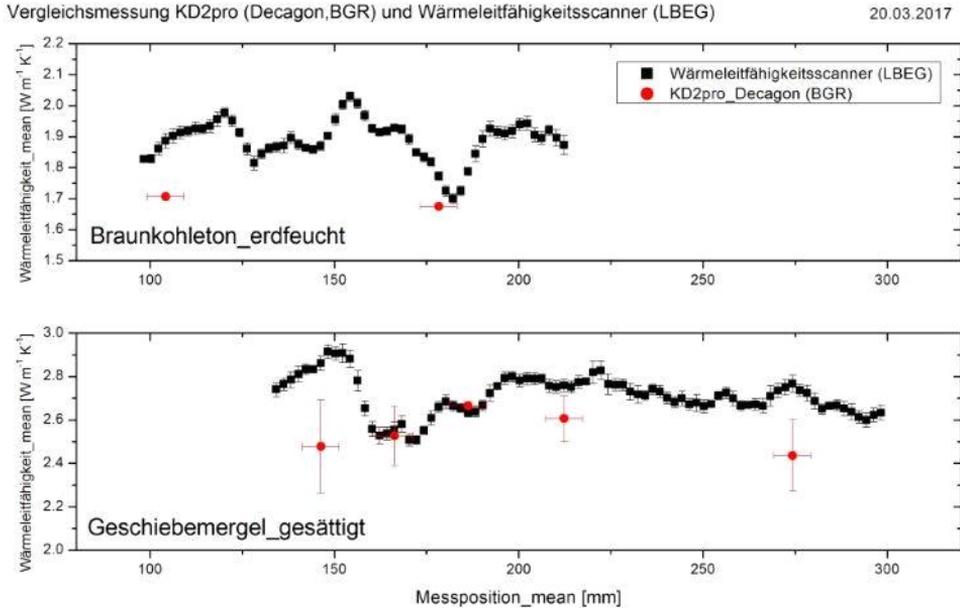


Abb. 5: Vergleichsmessungen KD2Pro mit TCS (Kurve)

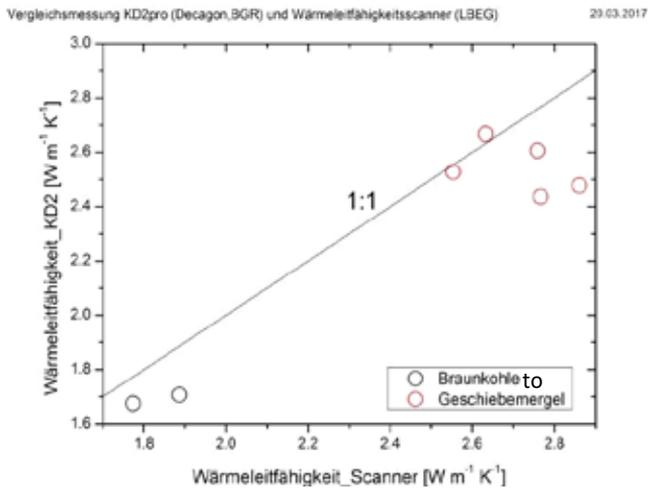


Abb. 6: Vergleichsmessungen KD2Pro mit TCS (Gegenüberstellung)

Da innerhalb eines zu messenden Probenstücks petrografische Eigenschaften wie z. B. Mineralbestand, Kohlenstoffgehalt oder die Porosität und des damit einhergehenden Porenwassergehaltes sehr

heterogen verteilt sein kann, schwankt auch damit die Wärmeleitfähigkeit gleichermaßen, da sich beispielsweise mit variierendem Wassergehalt die Wärmeleitfähigkeit grundsätzlich ändert (Bachmann, 2005). Ein millimetergenauer NMR-Scan (Nuclear Magnetic Resonance) eines Bohrkerns zeigt die starke Wassergehaltsschwankung innerhalb eines Meters. Ein TCS hat eine ebenso hohe Auflösung für die Wärmeleitfähigkeit. Dies wird bei direktem Vergleich der Graphen des Porenwassergehaltes und der Wärmeleitfähigkeit (s. Abb. 7) ersichtlich. Er besitzt das Potenzial, eine Auflösung von bis zu 1.000 Messpunkten je Meter Messstrecke abzubilden und auf diese Weise eine repräsentative Aussage über die Wärmeleitfähigkeit zu geben. Mit Nadelsonden wäre dies nur bedingt und mit großem Zeit- und Arbeitsaufwand möglich, hier einen ähnlich hochauflösenden Vergleich zu ziehen, da für einen direkten Vergleich 500 bis 1000 Einstiche an einem Bohrkern von 1 m Länge vorgenommen werden müssten.

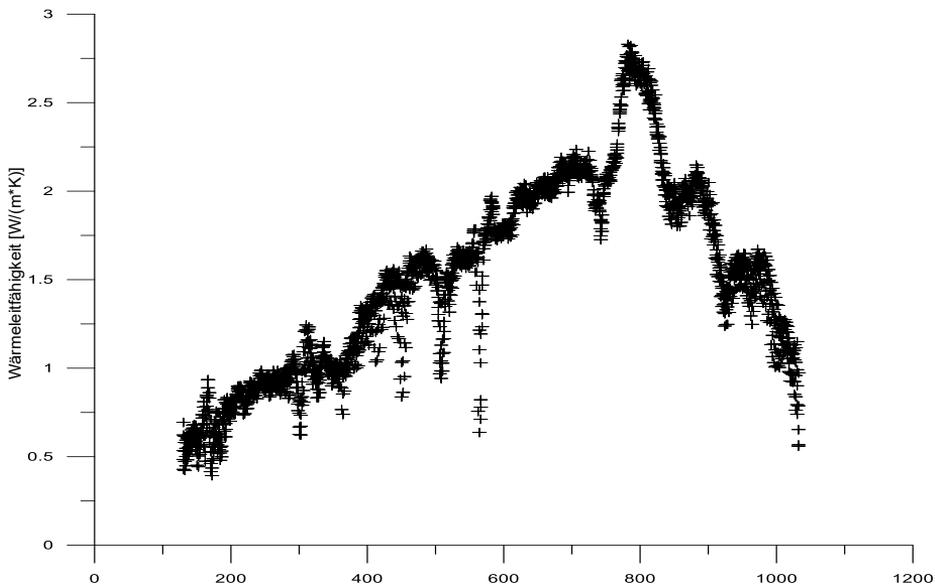


Abb. 7: Vergleich von Wärmeleitfähigkeit (TCS) zu Wassergehalt (ermittelt durch NMR)

4. Schlussfolgerungen

Es wurde nachgewiesen, dass die Messwerte der Überkopfkonfiguration mit denen der Standardkonfiguration korrelieren. Das modifizierte Verfahren funktioniert für die Messung von Lockergesteinen unter Wahrung einer vergleichbaren Messgenauigkeit wie sie von etablierten Nadelsondenmessungen bekannt ist.

Im Rahmen der Verfahrensvalidierung hat sich gezeigt, dass die Durchführung von Wärmeleitfähigkeitsmessungen mit dem neuen Verfahren bedeutend schneller möglich ist, als mit Nadelsonden unter Berücksichtigung einer mindestens vergleichbar hohen Genauigkeit. Zudem bildet die kontinuierliche Messung mit bis zu 1.000 Messungen je Meter die natürliche Heterogenität der Lockergesteinsproben besser ab, als dies mit Einzelmessungen möglich ist (s. Abb. 8). Durch die hohe Messgeschwindigkeit und die hervorragende Reproduzierbarkeit der Messergebnisse können auch Messkampagnen größeren Umfangs innerhalb relativ kurzer Zeit realisiert werden. Gerade für die Gewinnung landesweiter Daten der geologischen Dienste, aber auch für den Bereich großer oberflächennaher Erdwärmeanlagen oder

für Spezialanwendungen wie den Gleichstromtrassenbau und die damit verbundenen Fragestellungen bezüglich der thermischen Einträge ins Erdreich ist das Verfahren daher von großem Wert.

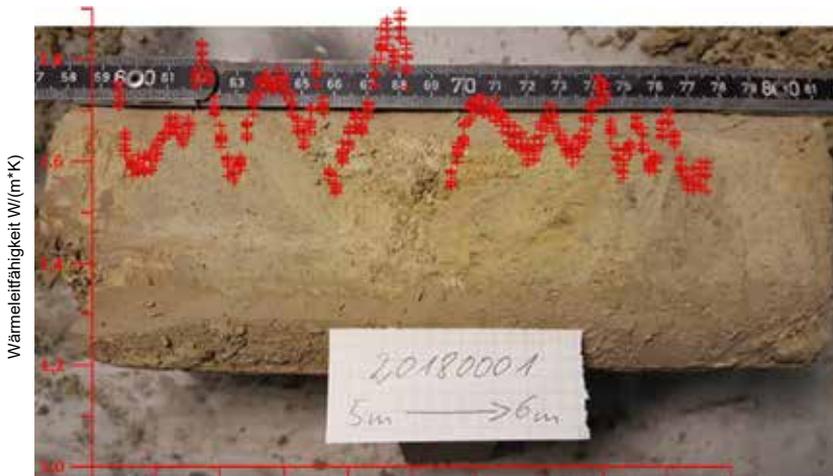


Abb. 8: Wärmeleitfähigkeit bildet die natürliche Heterogenität eines Schluff-Bohrkerns ab

Die Wärmeleitfähigkeitsmessung mit dem überkopparbeitenden TCS hat das Potential, zum Standardlabormessverfahren auch für Lockergesteine in Niedersachsen etabliert zu werden.

5. Danksagung

Die Autoren danken Raphael Dlugosch (Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik – LIAG) für die Bereitstellung der NMR-Daten und Axel Lamparter (Bundesanstalt f. Geowissenschaften und Rohstoffe – BGR) für die Bereitstellung der KD2Pro-Daten.

6. Literatur

Bachmann, J. (2005): Thermisches Verhalten der Böden. – In: BLUME, H.-P. (Hrsg.) (1990): Handbuch des Bodenschutzes. – 22. Erg.-Lfg. 08/05; Ecomed, Landsberg/Lech.

Brakelmann, H., Jarass, L. J. (2019): Erdkabel für den Netzausbau: Höchstspannungskabel, Drehstrom und Gleichstrom, Minimaltrassen, Zuverlässigkeit, Kosten. BoD – Books on Demand

Decagon Devices, 2011: KD2 Pro thermal properties analyzer operator's manual. Decagon Devices Inc., Pullmann.

Lippmann and Rauen GbR: Thermal Conductivity Scanning – <http://www.geophysik-dr-rauen.de/tcscan/vorteile.html> (abgerufen am 18.12.2019)

Popov, Y. A., Pribnow D. F. C., Sass J. H., William C. F. & Burkhardt H. (1999): Charakterization of rock thermal conductivity by high-resolution optical scanning. Geothermics 28, 253-276.

Popov, Y. A (1997): Optical scanning technology for nondestructive contactless measurements of thermal conductivity and diffusivity of solid matters. In: Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. Proceedings of the 4-th World Conference. Brussels, Belgium, 1, 109-117.

Popov, Y. A., Berezin, V. V., Semionov, V. G. & Korosteliov, V. M. (1985): Complex detailed investigations of the thermal properties of rocks on the basis of a moving point source. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 1, 64-70.

Popov, Y. A., Semionov, V. G., Korosteliov, V. M. & Berezin, V. V. (1983): Non-contact evaluation of thermal conductivity of rocks with the aid of a mobile heat source. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 19, 563-567.

Popov, Y. A (1983): Theoretical models of the method of determination of the thermal properties of rocks on the basis of moveable sources. *Geologiya I Razvedka (Geology and Prospecting)*, p(I), 97-103.

Stegner, J (2016): Bestimmung thermischer Materialkennwerte von Erdkabelbettungen (Diss.). TU Darmstadt, 186 S.

Stober, I. & Bucher, K. (2012): *Geothermie*. Springer, Berlin, Heidelberg