https://doi.org/10.5281/zenodo.18312519

Beitrag “Der Geothermiekongress DGK 2025”, 18.-20. November 2025

Wärmeleitfähigkeit im Lockergestein – alles andere als eine Konstante

Markus Uhlig
Technische Universität Dresden, Institut für Geotechnik

Keywords: Boden, Wasser, Laborversuche, Nadelsonde, Wassergehalt, Sättigungsgrad

Abstrakt

Die Wärmeleitfähigkeit eines Lockergesteins (Ton bis Kies) bildet für die Bemessung einer Geothermieanlage eine wesentliche Grundlage. Dabei ist bekannt, dass dieser Kennwert nicht als Paramater (Konstante) verwendet werden sollte. Er ist vielmehr als Zustandsvariable anzusehen.

Dieser Beitrag zeigt einige experimentell bestimmte Einflüsse auf die Wärmeleitfähigkeit auf. Es wird vor allem auf die Rolle des Porenwassers (und der Luft) eingegangen. Dazu wurden im Labor die Wärmeleitfähigkeiten mit zwei verschiedenen Methoden bestimmt und verglichen. Zum Einsatz kamen die Nadelsonde (Standardgerät) und ein Eigenbau, unter Nutzung der Vergleichsmethode (Divided-Bar-Methode), dessen Aufbau und technische Entwicklung aufgezeigt wird. Als Versuchsmaterial wurde ein Sand mit verschiedenen Wassergehalten verwendet. Darüber hinaus wurden die experimentellen Daten verwendet, um eine ausführliche Kalibrierung einer Korrelation aus der Literatur (Côté & Konrad 2005) auszuführen.

Aus den Versuchen der Vergleichsmethode konnten beim Anlegen eines Temperaturgradienten deutliche Wassertransporte in den feuchten Bodenproben nachgewiesen werden. Die Auswertung der Wasserbewegungen ergab, dass es wiederum vom Zustand des Sandes (Wassergehalt oder Wassersättigungsgrad) abhängt, ob ein Wassertransport stattfindet.

1. Einleitung

Die Wärmeleitfähigkeit λ ist ein Materialkennwert, welcher über das Fouriersche Gesetz mit der Wärmestromdichte $\dot{q}$ und dem Temperaturgradienten $grad\ T$ beschrieben werden kann. Über eine Fläche A aufintegriert, wird der Wärmestrom $\dot{Q}$ erhalten:

$$\dot{Q} = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{z}. \tag{1}$$

Dabei ergibt sich der Temperaturgradient aus der Temperaturdifferenz ΔT und der durchströmten Länge z. Es werden die Definitionen der Bodenmechanik verwendet, d. h. der Wassergehalt ist gravimetrisch über die Massen des Wassers m_w und des Trockenfeststoffs m_d definiert:

$$w = \frac{\mathrm{m}_w}{m_d}. \tag{2}$$

Der Sättigungsgrad S_r bildet das Verhältnis des Wasservolumens V_w zum Volumen des Gesamtporenraums V_P ab:

$$S_r = \frac{V_w}{V_P}. \tag{3}$$

1.1 Wärmetransport in einem Mehrphasengemischen

Wird, wie in Abb. 2-li, ein Bodenelement betrachtet, besteht dies neben dem Feststoff (Körnern) auch aus Porenraum, der üblicherweise mit Luft und/oder Wasser gefüllt ist. Dabei wird die Wärme auf

unterschiedlichen Wegen übertragen. Die Übertragungsmöglichkeiten in einem teilgesättigten Boden ($0 < S_r < 1$) sollen nachfolgend kurz erläutert werden. Innerhalb der Körner wird Wärme über Konduktion übertragen (in Abb. 2-li braune gerade Pfeile). Zwischen den Phasen Luft, Wasser und Feststoff finden ebenfalls Wärmeleitungen statt (gerade Pfeile). Innerhalb eines Fluides (Luft oder Wasser) kann Konvektion die Wärme und das Fluid transportieren, siehe geschwungene Pfeile. In allen Fällen kommt die Wärmestrahlung (schwarzer Pfeil) hinzu, welche im Boden aber eine untergeordnete Rolle spielt.

1.2 Wärmeleitfähigkeiten einzelner Stoffe

Die Abb. 1 zeigt die Wärmeleitfähigkeiten von trockener Luft (gelb), welche von 0,0223 W/(mK) (- 20 °C) auf 0,030 W/(mK) (100 °C) ansteigt (Laube & Höller 1988). Wasser hat im gefrorenen Zustand bei -20 °C eine Wärmeleitfähigkeit von 2,4 W/(mK) (Clauser 2006). Sie fällt bei 0 °C beim Phasenübergang von fest (2,14 W/(mk)) auf flüssig (0,57 W/(mK)) ab. Mit zunehmender Temperatur nimmt der Wert auf 0,68 W/(mk) bei 100 °C zu (Gmehling, 2014). Beim Phasenübergang bei 100 °C liegt die Wärmeleitfähigkeit von Wasserdampf bei 0,025 W/(mK) (Clauser 2006). Quarz ist ein Mineral mit einer sehr hohen Wärmeleitfähigkeit. Die Werte bei 0 °C schwanken von 11,43 W/(mK) (parallel zum Mineral) bzw. 6,82 W/(mK) (lotrecht zum Mineral) und fallen bis 100 °C auf 7,95 W/(mK) (parallel) bzw. 4,94 W/(mK) (lotrecht) ab (Clauser 2006). Mineralien der Feldspatgruppe haben im Vergleich Wärmeleitfähigkeiten von 2,2 W/(mK) (Albit) und 2,4 W/(mK) (Orthoklas) (Clauser 2006). Die Glimmergruppe kann mit einer Wärmeleitfähigkeit von 2,1 W/(mK) (Biotit) bis 3,8 W/(mK) (Muskovit) angegeben werden (Clauser 2006). Alle angegebenen Werte der Mineralien beziehen sich auf Raumtemperatur.

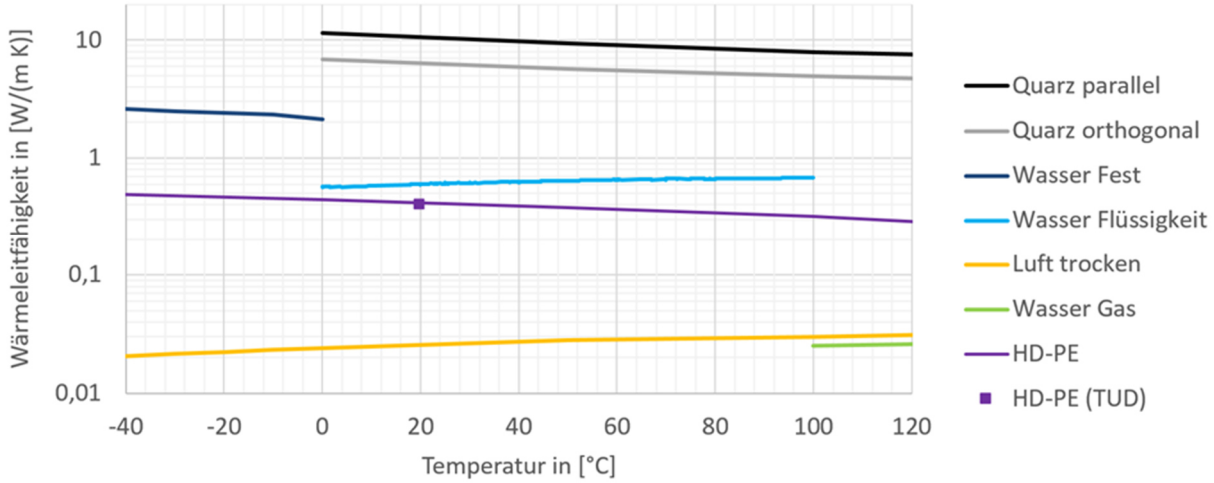


Abb. 1: Wärmeleitfähigkeiten von Quarz, Wasser, Niederdruckpolyethylen (HD-PE) und Luft bei Normaldruck (ca. 1 bar); Quellen siehe Text.

2. Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit im Labor

Die Wärmeleitfähigkeit kann im Labor mit unterschiedlichen Methoden bestimmt werden. Eine Übersicht der Methoden gibt Schwiteilo et al. (2014). An der Technischen Universität Dresden steht ein Gerät der stationären (Vergleichsmethode) und ein Gerät der instationären (Nadelsonde) Methode zur Verfügung. Beide werden nachfolgend vorgestellt.

2.1 Versuchsstand stationäre Methode

2.1.1 Gerät

Im Jahr 2012 wurde am Institut für Geotechnik mit dem Bau eines Versuchstandes zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit über die Vergleichsmethode begonnen (Männer 2012). Der Stand orientiert sich dabei an der ASTM E1225 (Guarded Comparative Longitudinal Heat Flow Technique oder Divided-bar Methode). Der damalige Aufbau bestand aus einem offenen Temperierbad, in den ein Stahlzylinder gestellt wurde. Auf den Zylinder wurden die untere Standardplatte (Abb. 2-re grün), dann die Probe (braun), sowie eine obere Standardplatte (grün) aufgebracht. Der Temperaturgradient ergibt sich aus den thermischen Gleichgewichtsbedingungen der Standardplatten und der Bodenprobe sowie den gesteuerten Temperaturen des aufgewärmten Stahlzylinders und der Raumluft (Schwiteilo et. al 2014).

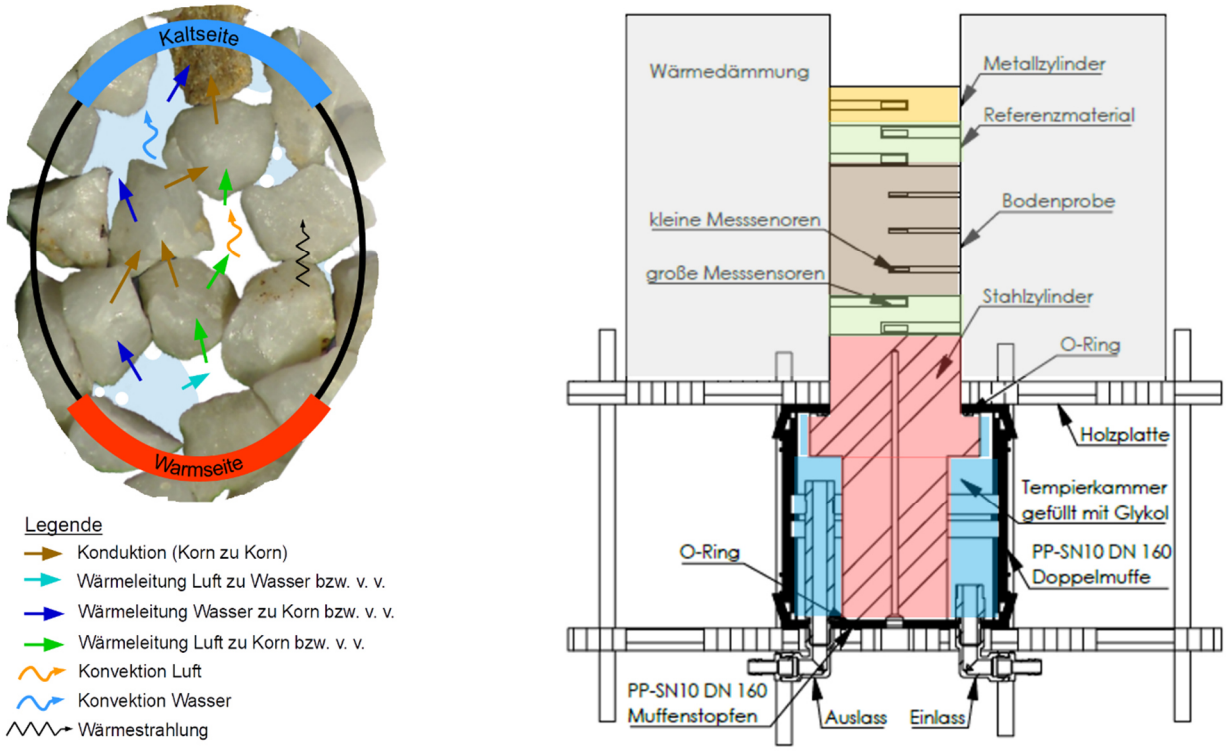


Abb. 2: links: Wärmestrom in einem teilgesättigten Boden; rechts: Schema des neuen Versuchstandes (aus Gruber 2021)

Das offene Temperierbad wurde später durch ein Wärme-Kalte-Thermostat mit Umwälzpumpe ausgetauscht (Gruber 2021), damit lassen sich die Temperaturen an der Unterseite genauer steuern (Abweichungen < 0,05 K). Durch Kühlung sind auch eine Umkehr des Wärmestromes und Temperaturen unter 0 °C möglich. Als neues Thermofluid (Abb. 2-re blau) wurde eine Mischung aus Wasser und Glysor L (Propylenglykol) im Mischungsverhältnis 60:40 (W/G) für Temperaturen von -22 bis 70 °C (Maximaltemperatur der Messumformer) verwendet. Der Tausch des geschlossenen Systems mit Temperierkammer (Abb. 2-re, schwarz) brachte eine weitere Verbesserung, denn der aufsteigende Wasserdampf im offenen Temperierbad durchfeuchtete die darüber liegende Dämmung, welche somit ihre Wirkung verlor. Die neue Kammer besteht aus einem KG-Rohr DN 160 aus PP (Temperturbeständigkeit -25 bis 90 °C) mit beidseitigen Muffenstopfen (Gruber 2021). Durch den oberen Muffenstopfen wurde ein Stahlzylinder (Abb. 2-re rot) gesteckt. Der Zylinder dient als Energietransporteur zur Probe. Der untere Muffenstopfen wurde mit Durchlässen für die direkte Temperaturmessung in der Kammer und für den Zu- und Ablauf zum Thermostat umgebaut. Diese Verbindung wird durch Silikonschläuche realisiert. Sie sind mit einer PE-Rohrisolation (Thermaflex

ThermoGo) gedämmt, um bei niedrigen Temperaturen (< 0 °C) die Schläuche vor Eisbildung durch Kondenswasser zu schützen. Als Wärme-Kälte-Thermostat wird ein LAUDA ECO RE 1050 G eingesetzt, siehe Abb. 3-li. Es besitzt eine Umwälzpumpe, welche das Thermofluid durch die Schläuche in die Kammer zirkulieren lässt. Die Temperatursteuerung erfolgt über einen externen Temperaturfühler, der in der Kammer angebracht wird. Mit dem Gerät ist ein automatisches Abfahren von vorgegebenen Temperaturlaststufen möglich.

Alle Temperaturmessfühler sind PT1000-Sensoren (Hereaus: l = 20 mm, d = 6 mm und Sensorox: l = 12 mm, d = 3 mm). Aktuell werden 10 Sensoren verwendet: 3 in der Probe, je 2 in den Standardplatten, 2 für die Luftmessung und 1 in der Messingronde. Die Sensoren werden an einen Messumformer (Arbeitsbereich: -30 bis 70 °C) angeschlossen. Der analoge Output wird über einen Datenwandler MC USB-1608G in ein digitales Format überführt. Ein Labview-Programm rechnet über die Kalibrierfaktoren die elektrischen Spannungen in die Temperaturen um, zeigt die Daten während des Versuchs grafisch an und speichert die Daten.

In den Anfängen wurde Styroportapete straff um die Probe gewickelt. Jedoch entstehen dabei (in den Überschneidungen) kaminartige Räume, in denen die warme Luft über Konvektion nach oben steigt und damit die radialen Verluste deutlich erhöht. Fink (2017) nutzte erstmals Styroporplatten (EPS) mit einer Stärke von 80 mm, welche mittig mit einem Halbkreis (d = 100 mm) versehen werden (Abb. 2-re hellgrau). Die 4 Platten (2 übereinander) werden mit zusätzlichen Lasteinleitungsplatten gegeneinander verspannt. Hat die Probe einen geringfügig kleineren Durchmesser als die 100 mm, wird diese mit einer Lage Styroportapete umwickelt und diese dann über die Styroporplatten fest verspannt. Die Styroporplatten werden mit Massestücken belastet (siehe Abb. 3-li), sodass kein horizontaler Schlitz zwischen der oberen und unteren Lage entsteht.

Als Standardplatten werden 2 Ronden aus Niederdruckpolyethylen HD-PE (hohe Dichte, ca. 0,964 g/cm³) verwendet. Die Wärmeleitfähigkeit des Materials ist in Abhängigkeit der Temperatur in Abb. 1 (violett) ergänzt. Nach VDI (2013) ergibt sich für den Bereich von 0 °C bis 100 °C eine Wärmeleitfähigkeit von 0,44 bis 0,32 W/(mK). Messungen am Institut für Bauklimatik der TU Dresden mit einem ISOMET 2104 (instationäre Methode über Halbraumlinienquelle) ergaben aus 12 Messungen für verschiedene Standardplatten Wärmeleitfähigkeiten von 0,375 W/(mK) bis 0,414 W/(mK). Im Mittel ergaben sich 0,392 W/(mK) bei einer Standardabweichung von 0,011 W/(mK) (Männer 2012 und Fink 2017), siehe violettes Quadrat in Abb. 1.

2.1.2 Versuchsablauf

Im Versuchsstand können sowohl nicht standfeste (nur trocken, mit einer dünnen aufgerollten Plexiglasfolie als Stützung) als auch standfeste Proben eingebaut werden. Alle Proben werden mit drei Messfühlern bestückt. Dabei wird das Loch für den obersten bzw. untersten Messfühler je ca. 1 cm von den Standardplatten entfernt, vorgestochen und die Fühler eingesteckt. Zudem wird zusätzlich in der Mitte der Probe noch ein Kontrollfühler installiert. Die bestückten standfesten Proben werden mit einer Membran überzogen, wobei die Messkabel nach unten oder oben aus der Probe geführt werden. Die fertigen Proben werden dann auf die untere Standardplatte gesetzt. Die untere Standardplatte wird mit Wärmeleitpaste auf den Stahlzylinder gebracht. Auf die Probe erfolgt das Aufsetzen der oberen Standardplatte. In jeder Standardplatte sind je 2 Messfühler mit Wärmeleitpaste eingebracht. Auf den oberen Standard wird wieder über eine Schicht Wärmeleitpaste eine Messingronde aufgelegt. Gummi-O-Ringe dichten die Membran gegen die Standardplatten ab. Diese dient zum Beschweren der oberen Standardplatte und Probe, um einen guten Materialkontakt zu gewährleisten. Zudem wird sie als schneller Wärmeabtransporteur an die Raumluft benötigt. Es folgt der bereits beschriebene Anbau der Styroporplatten. Letztlich wird das Thermostat gestartet. Die Temperaturstufen sind auswertbar, wenn sich ein Gleichgewicht im Wärmestrom (konstante

Temperaturen aller Messfühler) eingestellt hat. Dazu wird die Temperatur in der Kammer ca. 24 bis 36 h konstant gehalten. Gruber (2021) leitete aus Versuchen an Dresdner Sand ab, dass über eine Approximation mit einer exponentiellen Gleichung auch der Versuch nach 5 bis 7 h abgebrochen und der weitere Verlauf extrapoliert werden kann, ohne damit einhergehende signifikante Genauigkeitsverluste (in der zweiten Nachkommastelle der Wärmeleitfähigkeit) zu haben. Die Validierung für andere Böden steht noch aus. Es werden i.d.R. mehrere Temperaturstufen nacheinander abgefahren.

Beim Probenausbau müssen die Positionen der Messfühler möglichst genau bestimmt werden. Daher wird die Probe von oben vorsichtig abgetragen. Es werden mit einem Höhenmessgerät die Höhen der Messfühler und der Probenober- und unterkante bestimmt. Mit dem Versuchsgerät sind Probendurchmesser von 100 mm bei einer Probenhöhe von 50 bis 200 mm möglich. Damit lassen sich größere Korngrößen im Fein- bis Mittelkiesbereich testen.

2.1.3 Auswertung

Für die konstanten Temperaturbereiche wird (meist über ca. 1 bis 2 h) der Mittelwert der Temperaturen T für alle 10 Sensoren berechnet. Letztlich ergibt sich die gesuchte Wärmeleitfähigkeit der Bodenprobe (Index BP) aus dem Mittel des Wärmestroms der unteren (US) und oberen (OS) Standardplatte zu

$$\lambda_{BP} = \left[\frac{\lambda_{US}\cdot(T_{USo}-T_{USu})\cdot {d_{US}}^2}{z_{US}} + \frac{\lambda_{OS}\cdot(T_{OSo}-T_{OSu})\cdot {d_{OS}}^2}{z_{OS}}\right] \cdot \frac{z_{BP}}{2\cdot(T_{BPu}-T_{BPo})\cdot {d_{BP}}^2}. \quad (4)$$

Es werden zudem die Durchmesser d und die Abstände z zwischen den Messfühlern oben (Index o) und unten (u) innerhalb der Standardplatten und des Bodens benötigt.



Abb. 3: Versuchsstände: links: Vergleichsmethode mit Kälte-Wärme-Thermostat (weiß) und Versuchsstand: Die Kammer befindet sich im unteren grünen Styrodur. Die Probe ist im weißen Styropor eingebettet, welches mit einem Brett verspannt ist. (aus Simmank 2024); rechts: Nadelsonde auf Waage.

2.2 Versuchsstand stationäre Methode

Als Standardmethode wird bei vielen Bauvorhaben die Nadelsonde bevorzugt. Im Labor steht eine Nadelsonde der Firma Meter-Group (Typ Varios) zur Verfügung, siehe Abb. 3-re. Es wird ein Probenring mit einem Durchmesser von 80 mm bei einer Höhe von 50 mm (Volumen 250 cm³) von unten mit einer Kappe verschlossen. Der Ring wird mit einem nassen Boden verdichtet eingebaut. Auf halber Höhe des Ringes wird eine Nadel eingeschoben. Der Ring mit Nadel wird auf eine Waage

platziert, wo der Boden von oben her über eine längere Zeit (ca. 10 bis 20 Tage) austrocknet. Mit dieser Methode sollten nur Korngrößen bis maximal 2 mm getestet werden.

Während des Austrocknens des Bodens wird in regelmäßigen Abständen (hier 1 h) ein sich in der Nadel befindlicher Heizdraht mit einer konstanten Heizleistung (5 W/m) für eine kurze Zeit (z. B. 60 s) beaufschlagt. Die Erwärmung beträgt dabei zwischen 1 °C und 3,5 °C. Dabei wird der Temperaturanstieg an der Spitze der Nadel gemessen. Die Übertragung der Wärme vom Heizdraht zum Temperatursensor erfolgt über den umliegenden Boden. Aus einem Fit des nichtlinearen Verlaufs der Heizkurve kann schlussendlich die Wärmeleitfähigkeit abgeleitet werden.

3. Versuchsboden

Als Versuchsboden wurde das am Institut für Geotechnik als „Dresdner Sand“ bezeichnete Material verwendet. Das Material stammt aus einer Sandgrube in Dresden Hellerau und wurde 1998 ans Institut angeliefert (Lauer 2000). Der Sand kann nach DIN 18196 als enggestufter Sand klassifiziert werden. Das Körnungsband des fein-, grobsandigen Mittelsandes kann der Abb. 4-re entnommen werden. Die subangularen (Kanten gerundet) Körner des trockenen Materials können nach der Munsell-Farbskala als light yellowish brown (10YR, 6/4), vereinzelte Körner auch als light gray (10YR, 7/1) und gray (Gley 1, 5/N) beschrieben werden, siehe Abb. 4-li.

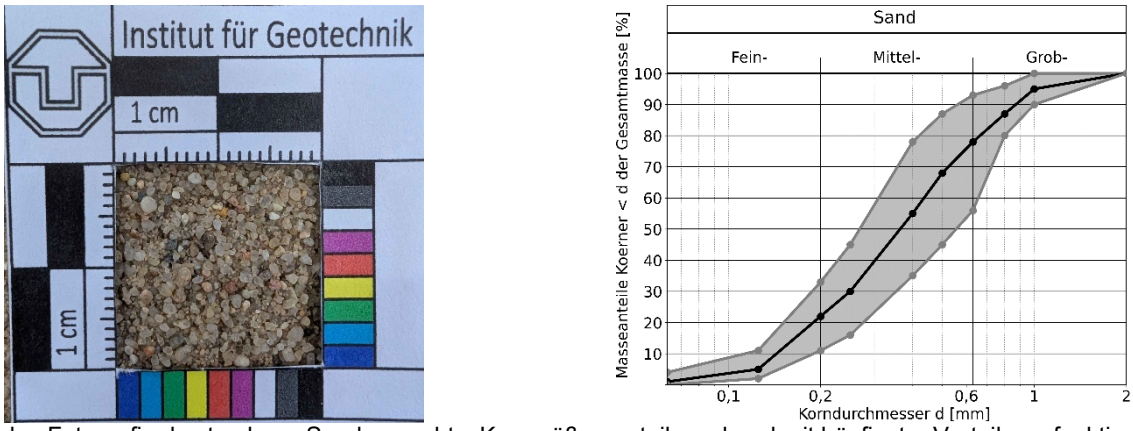


Abb. 4: links: Fotografie des trocknen Sandes; rechts: Korngrößenverteilungsband mit häufigster Verteilungsfunktion in schwarz, Daten aus Referenzdatenbank IGT

Eine Röntgenphasenanalyse und visuelle Begutachtung durch ein Mikroskop ergaben die in Tab. 1 angegebenen Mineralien. Die Anteile sind dabei nur qualitativ geschätzt. Ähnliche Ergebnisse ergab eine Analyse in Lauer (2000). Die Korndichte zeigt einen typischen Quarzsand. Es sind keine organischen Anteile oder Kalk im Sand vorhanden. In Tab. 2 sind typische Referenzdichten angegeben. Die Proctorversuche wurden in Töpfen mit 100 bzw. 150 mm Durchmesser ausgeführt.

Tab. 1: Eigenschaften und mineralische Anteile des Dresdner Sandes, Daten aus Referenzdatenbank IGT.

Korndichte [g/cm³]	Glühverlust [%]	Kalkgehalt [%]	Quarz [%]	Orthoglas [%]	Albit [%]	Muskovit [%]	Biotit [%]
2,650	0,263	0,005	80	8	4	4	4

Tab. 2: Referenzdichten des Dresdner Sandes nach DIN 18126 (Lagerungsdichten) und DIN 18127 (Proctorversuch), Daten aus Referenzdatenbank IGT.

min. Lagerungsdichte	max. Lagerungsdichte		Proctordichte	optimaler Wassergehalt
	Schlaggabel	Rütteltisch		
[g/cm³]	[g/cm³]	[g/cm³]	[g/cm³]	[%]
1,488	1,803	1,820	1,721	8,2

4. Ergebnisse der Messungen der Wärmeleitfähigkeit

Die Ergebnisse der Vergleichsmethode stammen aus studentischen Abschlussarbeiten der TU Dresden (De Brito Lima Araújo 2017, Fink 2017, Gruber 2021, Männer 2012, Schmid 2018, Vetterlein 2022). Die Daten umfassen alle Porositäten von n = 0,42 (I_D = 0,14) bis n = 0,32 (I_D = 0,98) und alle mittleren Temperaturen in Probenmitte von 0 °C bis 50 °C. Die Versuche wurden mit unterschiedlichen Entwicklungsständen des Gerätes, vgl. Abschnitt 2.1.1 durchgeführt und sind in Abb. 5-ob als schwarze Punkte dargestellt.

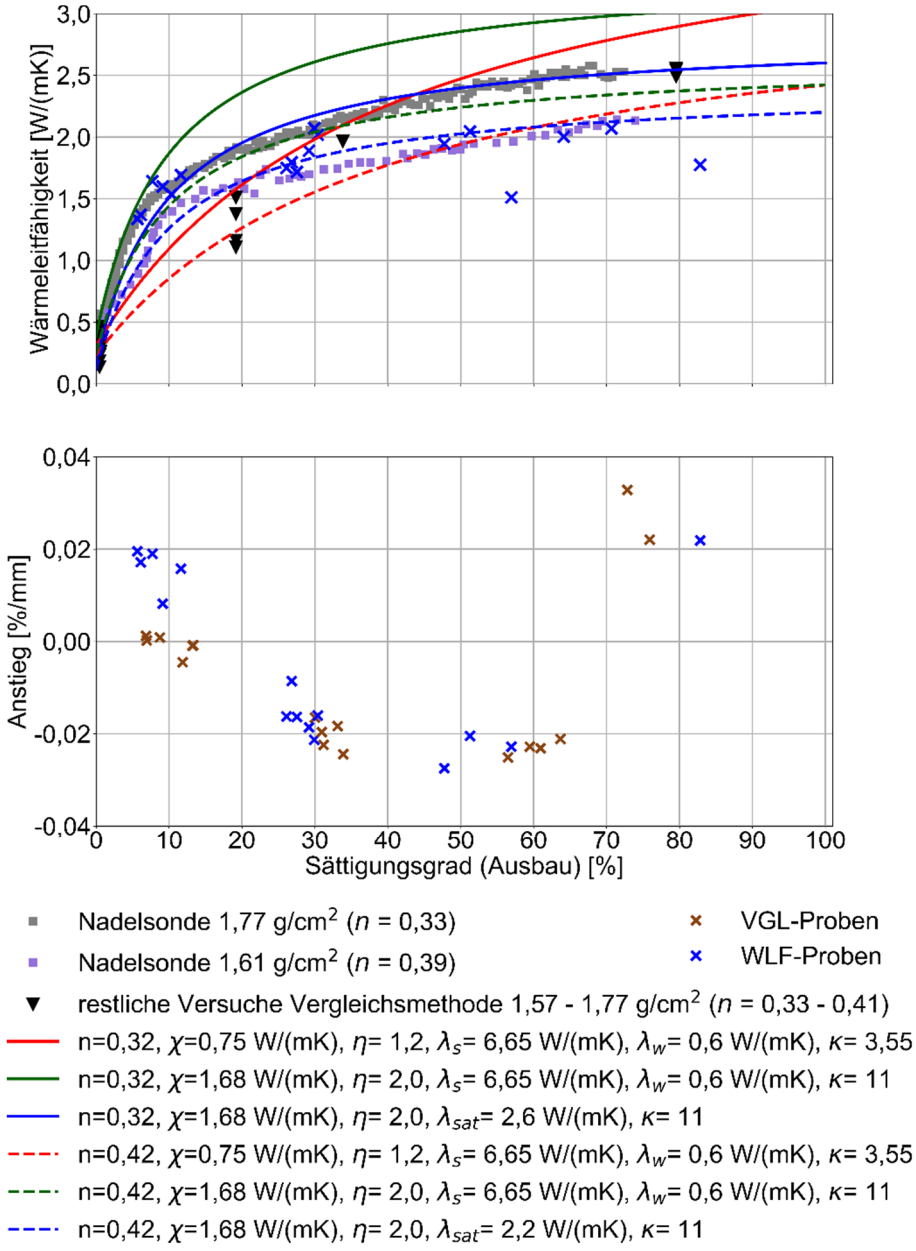


Abb. 5: oben: Wärmeleitfähigkeit der Versuche Nadelsonde (Quadrate), der Vergleichsmethode (blaue Kreuze aus Vetterlein (2022) bzw. Untersuchung nach Abschnitt 6 und schwarze Dreiecke: restliche Abschlussarbeiten, siehe Quellenangaben). (Für die Dreiecke werden die Einbausättigungsgrade für die Abzsisse verwendet.) und Prognosemodelle für dichte (volle Linie) und lockere (strichliert) Lagerung; unten: Anstiege des Wassergehaltes in Abhängigkeit der Höhe, siehe Abschnitt 6.

Zudem sind exemplarisch 2 Ergebnisse der Nadelsonde (Quadrate) ergänzt (mittlere Temperatur ca. 20 °C). Die Ergebnisse zeigen für die beiden Methoden vergleichbare Ergebnisse. Die Verläufe zeigen eine klare Zunahme der Wärmeleitfähigkeit des Bodens mit zunehmendem Wassergehalt oder Sättigungsgrad. Aus den Ergebnissen der Nadelsondenversuche ist die Dichteabhängigkeit ersichtlich.

5. Kalibrierung des Prognosemodells nach Cote und Konrad

Die Ergebnisse der Versuche aus der Vergleichsmethode werden dem Prognosemodell für die Wärmeleitfähigkeit nach Côtè & Konrad (2005) gegenübergestellt. Das Modell berücksichtigt die Porosität, den Sättigungsgrad (Wassergehalt), den Mineralienanteil und indirekt über Korrekturfaktoren die Korngrößenverteilung und die Kornform. Zudem kann der gefrorene und ungefrorene Zustand berücksichtigt werden. Die Wärmeleitfähigkeit des Bodens

$$\lambda_{BP} = \lambda_{dry} + (\lambda_{sat} - \lambda_{dry}) \cdot \lambda_r, \tag{5}$$

setzt sich aus den Wärmeleitfähigkeiten im trockenen λ_{dry} und gesättigten λ_{sat} Zustand sowie in einer normierten Darstellung über den Sättigungsgrad λ_r zusammen. Für den trockenen Zustand wird in Côtè & Konrad (2005) die empirische Gleichung

$$\lambda_{dry} = \chi \cdot 10^{-\eta \cdot n} \tag{6}$$

in Abhängigkeit des Porenraums n postuliert. Für mineralische Böden wird für η 1,2 und für χ ein Wert von 0,75 W/(mK) empfohlen (siehe Abb. 6-li rote Kurve). Für die Versuchsergebnisse des trockenen Dresdner Sandes ergibt die Regressionsfunktion der Wärmeleitfähigkeit (Abb. 6-li blau) η zu 2,00 und χ zu 1,68 W/(mK). Die Wärmeleitfähigkeit im vollgesättigten (ungefrorenen) Zustand ergibt sich zu

$$\lambda_{sat} = {\lambda_s}^{1-n} \cdot {\lambda_w}^{n} = \left(\prod_j^{j=N} {\lambda_{mj}}^{x_j}\right)^{1-n} \cdot {\lambda_w}^{n}, \tag{7}$$

wobei die Wärmeleitfähigkeit der Körner λ_s und des Wassers λ_w (bei 20 °C: 0,6 W/(mK)) benötigt wird. Die Wärmeleitfähigkeit kann aus dem Produkt aller Wärmeleitfähigkeiten der N Mineralien λ_{mj} und des Anteils x_j als Exponent berechnet werden. Aus den im Abschnitt 1.2 angegebenen Wärmeleitfähigkeiten der Mineralien und den Anteilen aus Tab. 1 ergibt sich ein λ_s von 6,65 W/(mK). Dafür wurde für Quarz ein Mittel (parallel und lotrecht) der Wärmleitfähigkeit bei 20 °C von 8,48 W/(mK) angenommen. Es fehlt die normierte Wärmeleitfähigkeit

$$\lambda_r = \frac{\kappa \cdot S_r}{1+(\kappa-1)\cdot S_r} = \frac{\lambda_B - \lambda_{dry}}{\lambda_{sat} - \lambda_{dry}}, \tag{8}$$

welche den empirischen Parameter κ und den Sättigungsgrad S_r berücksichtigt. In einer Parameterstudie wird für λ_{sat} die Grenze des höchsten Laborwertes (für n = 0,32: 2,6 W/mK und für n = 0,42: 2,2 W/mK) angenommen. Damit kann die normierte Wärmeleitfähigkeit λ_r nach Gl. 8, wie in Abb. 6-re dargestellt, berechnet werden. Es sind zudem 4 Kurven mit verschiedenen κ –Werten eingefügt. Der Paramater κ wird für Kiese und Grobsand zu 4,6 (Abb. 6-re, blaue Kurve) und für Mittel- und Feinsande zu 3,55 (grün) angegeben (Côtè & Konrad 2005). Es sind noch ein κ von 11 (violett, für Abb. 5 gewählt) und 15 (gelb) ergänzt.

Die Abb. 5 zeigt die Versuchsdaten und die Kurven des Prognosemodells jeweils für die dichte (n = 0,32, volle Linien) und lockere Lagerung (n = 0,42, strichliert). Dabei werden die Kurven mit den empfohlenen Parametern aus Côtè & Konrad (2005) in rot und den Anpassungen bei der Wärmeleitfähigkeit im trockenen Boden sowie der Anpassung von κ in grün dargestellt. Es zeigt sich, dass eine weitere Anpassung der Wärmeleitfähigkeit im vollgesättigten Zustand (hier als Annahme, dass der Maximalwert aus den Versuchen diesen entspricht) eine weitere Verbesserung (blau) ergibt.

Das Modell kann die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Sättigungsgrades (oder Wassergehaltes) und des Porenanteils gut abbilden. Eine Parameterkalibrierung erhöht dabei die Prognosegenauigkeit.

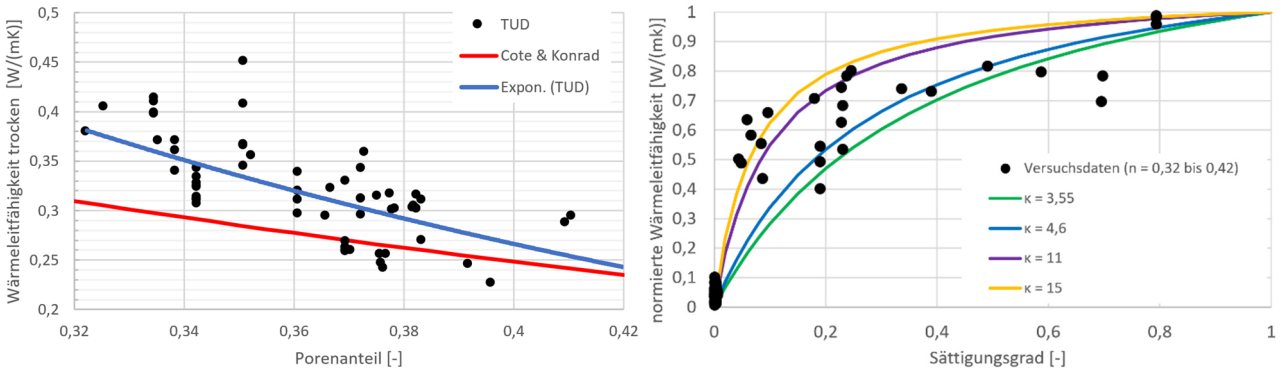


Abb. 6: links: Wärmeleitfähigkeit des lufttrockenen Bodens (w < 0,2%): rote Kurve: Gl. 6 mit Paramater nach Côtè & Konrad (2005), blaue Kurve: Regression der 65 Versuchsergebnisse; rechts: Normierte Wärmeleitfähigkeit nach Gl. 8 und Kurven mit unterschiedlichen κ–Werten.

6 Wasserbewegungen als Resultat eines angelegten Temperaturgradienten

Bei den Versuchen mit der Vergleichsmethode wurden beim Ausbau mehrfach Wassergehaltsschwankungen über die Höhe vermutet. In einer Untersuchung wurden diese Schwankungen näher untersucht (Vetterlein 2022). Nachfolgend werden einige Ergebnisse und Erkenntnisse daraus vorgestellt. Weitere Informationen sind in Uhlig (2025) zu finden.

6.1 Vorgehensweise

Das Ziel war einen Wassertransport zu messen, welcher durch das Anlegen eines Temperaturgradienten erzeugt wird. Da der Wassergehalt einer Probe nur durch Zerstörung dieser (Trocknung im Ofen) zuverlässig gemessen werden kann, war es nicht möglich den Einbau- und Ausbauwassergehalt an ein und derselben Probe zu bestimmen. Daher wurden neben der Versuchsprobe für die Wärmeleitfähigkeit, kurz WLF-Probe, immer eine zweite Probe unter identischen Bedingungen (Wassergehalt und Einbauprozedur), die sogenannte Vergleichsprobe (VGL-Probe) hergestellt. Beide Proben wurden, wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben, hergestellt. D. h. es wurde Material mit einen vorgegebenen Wassergehalt angemischt und das Material danach auf beide Proben geteilt. Während die WLF-Probe in den Versuchsstand eingebaut wurde, wurde die VGL-Probe mit zwei Kunststoffplatten oben und unten abgedichtet und neben den Versuchsstand platziert. Nach ca. 24 h wurden beide Proben abgebaut. Dabei wurde die Probe in Schichten abgetragen, um den Wassergehalt in verschiedenen Höhen zu bestimmen. Es erfolgte eine weitere Aufteilung in dem das Zentrum und der Ringraum für jede Schicht nochmals getrennt wurden.

6.2 Auswertung

Als Kontrolle wurde die Differenz der Ausbauwassergehalte (gemittelt über die Höhen) zwischen der WLF- und der VGL-Probe berechnet. Mit einer Ausnahme (Differenz von 2 %) lagen alle anderen Differenzen unter 0,7 %. Der Mittelwert aller Beträge der Differenzen der 18 Probenpaare ergibt 0,4 %. Die Probenpaare werden damit als vergleichbar eingestuft.

Für diesen Beitrag hier wurden die Wassergehalte aus den jeweiligen Schichten aus dem Ringraum und dem Zentrum gemittelt. Die Abb. 7-li zeigt diese Ausbau-Wassergehalte (Abszisse) über die

Höhe (Ordinate) dargestellt. Jedes Kreuz steht für eine Schicht (Höhenabschnitt mit ca. 20 mm). Die WLF-Probe wird in blau und die VGL-Probe in braun dargestellt.

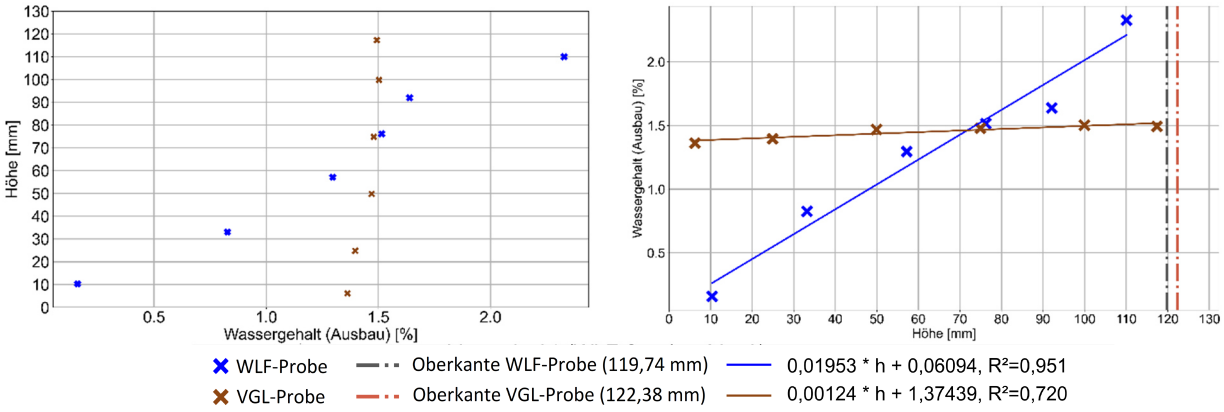


Abb.7: Ergebnisse des Probenpaares 31: links: Wassergehaltsverteilung über die Höhe; rechts: Höhe über den Wassergehalt und zugehörige Regressionsgeraden (gedrehte Darstellung).

In einem gedrehten Diagramm mit dem Wassergehalt auf der Ordinate, kann eine Funktion zwischen dem Wassergehalt in Abhängigkeit der Höhe aufgestellt werden, vgl. Abb. 7-re. Damit konnte eine lineare Regressionsfunktionen aufgestellt werden. Diese lineare Funktion war für die meisten Proben, wie z.B. für das Probenpaar 31 (siehe Abb. 7), zutreffend und wurde als Vereinfachung letztlich für alle Proben (auch mit nichtlinearen Verläufen) verwendet. Die Regressionsgerade kann allgemein über den Anstieg *m* in %/mm und den Ordinatenabschnitt *b* in % beschrieben werden. Ist der Anstieg Null, so ist der Wassergehalt über die Höhe konstant. Bei einem positiven Anstieg (m > 0) ist die Probe im oberen Bereich feuchter als unten.

In Abb. 5-un werden die Ergebnisse der Anstiege aller WLF-Proben in blau und aller VGL-Proben in braun über den Sättigungsgrad dargestellt. Zwei Paare wurden aussortiert, weil das Bestimmtheitsmaß kleiner als 0,7 und gleichzeitig der Anstieg über 0,001 liegt (Bei niedrigen Anstiegen ist die Berechnung des Bestimmtheitsmaßes nicht mehr zuverlässig.). Es werden nur Anstiege aufgezeigt, wenn die Bestimmtheitsmaße der linearen Regression und des quadratischen Fits einen maximalen Unterschied von 0,05 aufweisen.

6.3 Interpretation

Aus Abb. 5-un lässt sich ableiten, dass die meisten Proben mit geringem oder hohem Sättigungsgrad oben feuchter sind als unten (*m* > 0). In Proben mit einem mittleren Sättigungsgrad sammelt sich das Wasser unten (*m* < 0). Dieses Prinzip zeigt sich unabhängig von den VGL- oder WLF-Proben. Über den Vergleich der braunen und blauen Kreuze kann aus Abb. 5-un auch eine Wasserbewegung abgeleitet werden. Bei niedrigen Sättigungsgraden ist im oberen Probenbereich für die WLF-Proben ein höherer Wassergehalt zu finden (*m* > 0), dies lässt sich bei den VGL-Proben so nicht feststellen, die eine homogene Verteilung des Wassergehaltes (*m* = 0) aufweisen, vgl. dazu auch Abb. 7. Bei allen anderen Sättigungsgraden lässt sich kein Unterschied im Anstieg und damit in der Wassergehaltsverteilung über die Höhe der WLF-und VGL-Proben finden.

Die Anstiege der WLF-Versuche lassen sich in 3 Bereiche einteilen. Bei niedrigem Sättigungsgrad liegt nur wenig Wasser vor und die Luft hat genügend Porenraum Konvektion zu betreiben. Die warme Luft im WLF-Versuch steigt nach oben und nimmt dabei das Wasser mit, wo es sich, da es nicht weiter aufsteigen kann, wieder absetzt. Da bei der Vergleichsprobe der Temperaturgradient fehlt, erfolgt dort kaum Konvektion und damit kein Wassertransport. Bei den mittleren Sättigungsgraden

kann aufgrund der teils schon durchgehenden Wassermenisken, die Luft wie auch das Wasser keine Konvektion ausführen. Ein Anlegen eines Temperaturgradienten erzielt daher nur geringe Wassertransporte. Die Schwerkraft zieht das Wasser in den WLF- und VGL-Proben nach unten. Im nahezu oder voll gesättigten Zustand kann Konvektion im Wasser stattfinden und der Wärmestrom kann das warme Wasser nach oben transportieren. Allerdings kann hier kein Unterschied zwischen den WLF- und Vergleichsproben beobachtet werden. Vermutlich ist hier die Messmethode zu ungenau. Es sollte hier angemerkt werden, dass sich vor allem bei den nassen Proben im Vergleich der Einbau- und Ausbau-Wassergehalte hohe Unterscheide von bis 4 bis 5 % ergaben. Dies bedeutet, dass die Latexmembran, die O-Ringe und die Platten kein vollständig dichtes System ergaben. Diese Vermutung wird durch die auftretenden nichtlinearen Verläufe der Wassergehalte über die Höhen bestätigt. Damit kann auch der positive Anstieg erklärt werden, der Wassergehalt ist aufgrund der Undichtigkeit unten kleiner.

Ob die Verteilung des Wassergehaltes mit den 3 Bereichen in der Literatur (Lu & Dong 2015: pendular, funicular und capillary) in Zusammenhang gebracht werden kann, sollen weitere Versuche mit nassen Sand aufzeigen. Auch ein Zusammenhang des Anstiegs zur Saugspannung, wie es auch zur Wärmeleitfähigkeit gefunden wurde (Fu 2024), ist nochmals detailliert zu prüfen.

7. Zusammenfassung

Der Beitrag beschreibt 2 Methoden (stationär: Vergleichsmethode und instationär: Nadelsonde), mit welchen die Wärmeleitfähigkeit in Böden bestimmt werden kann. Zunächst wird der Aufbau und die Entwicklung der Versuchsanlage im Eigenbau (Vergleichsmethode) vorgestellt. Es folgen Versuchsergebnisse an einem eingestuften Sand („Dresdner Sand“). Dabei zeigten beide Methoden vergleichbare Ergebnisse.

Mit den Ergebnissen kann auch der Einfluss des Wassers und der Dichte auf die Wärmeleitfähigkeit verdeutlicht werden. Diese Abhängigkeiten werden auch vom Prognosemodell nach Côtè & Konrad (2005) berücksichtigt. Der Beitrag zeigt auf, dass eine Kalibrierung des Modells die Vorhersage der Ergebnisse deutlich verbessert. Weitere Einflussfaktoren, wie die der mittleren Temperatur und die des Minerals können aus Abb. 1 abgeleitet werden und werden aktuell experimentell untersucht.

Im Versuchsstand Vergleichsmethode konnten aufgrund eines angelegten thermischen Gradienten Wasserbewegungen im Sand mit niedrigen Sättigungsgraden (< 15 %) nachgewiesen werden. Bei mittleren Sättigungsgraden lassen sich diese Bewegungen nicht nachweisen. Bei hohen Sättigungsgraden (> 70 %) wird diese Bewegung vermutet, hier stehen noch weitere Versuche aus. Dies bedeutet, dass neben der Wärme in einigen Fällen auch Wasser transportiert wird, was wiederum zu einer lokalen Veränderung des Wassergehaltes und damit zur Veränderung der lokalen Wärmeleitfähigkeit führt.

7. Danksagung

Die Inhalte dieser Veröffentlichung entstammen 8 Abschlussarbeiten (Projekt- oder Diplomarbeiten), siehe Quellenangaben. Jede dieser Arbeiten hat ein Puzzlestück zum heutigen Stand der Versuchsanlage „Vergleichsmethode“ beigetragen. Neben den Studierenden sind die Betreuer der Arbeiten Dr. Erik Schwiteilo und Dr. Kornelia Nitzsche zu nennen. Der Konstrukteur für den Eigenbau ist Jens Drechsel. Silvio Gesellmann entwickelte die Labview-Routine. Initiator, Ideen- und Ratgeber ist Prof. Ivo Herle. Prof. Heiner Siedel erstellte die Analyse der Mineralien. Allen erwähnten sei herzlich gedankt. Die Anschaffung der Nadelsonde und die zugehörigen Experimente erfolgten im Rahmen des Projektes DFG 453596084 - SFB/TRR 339.

Quellenangaben

ASTM (Hrsg.): ASTM E1225-20 - Standard test method for thermal conductivity of solids using the guarded-comparative-longitudinal heat flow technique, *Norm,* (2020)

Clauser, C.: The earth's thermal regime: Datasheet from Landolt-Börnstein - Group VIII Advanced Materials and Technologies, (2006), https://materials.springer. com/lb/docs/ sm_lbs_978-3-540-45662-9_17.

Côté, J. & Konrad, J.-M.: A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials, *Canadien Geotechnical Journal,* 42, (2005), 443 – 458.

De Brito Lima Araújo, C.S.: Heat Transfer in Soil, *Masterarbeit*, (2017), TU Dresden, Neue Universität Lissabon

Fu, Y. & Ghanbarian, B. & Horton, R., & Heitman, J.: New insights into correlation between soil thermal conductivity and water retention in unsaturated soils. *Vadose Zone Journal*, (2024);23:e20297

Fink, M.: Untersuchung der Wärmeleitfähigkeit, *Projektarbeit*, (2017), TU Dresden

Fink, M.: Verformungen infolge zyklischer Bodenerwärmung und -abkühlung am Beispiel eines Erdbeckens zur Wärmespeicherung, *Diplomarbeit*, (2017), TU Dresden

Gmehling, J. (ed.): SpringerMaterials, Water Thermal Conductivity, (2014), https://materials.springer.com/thermophysical/docs/tcn_c174

Gruber, D.: Wärmeleitfähigkeit in grobkörnigen Böden, *Diplomarbeit*, (2021), TU Dresden

Laube, M. und Höller, H.: Physical and Chemical Properties of the Air · 5.1 Clouds; Landolt-Börnstein - Group V Geophysics 4B, (1988), https://materials.springer.com/lb/docs/sm_lbs_978-3-540-31373-1_1

Lauer, C.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Konzept der Referenzzustände für nichtbindige und gemischtkörnige Böden, Diplomarbeit, (2000), TU Dresden

Lu, N. & Dong, Y.: Closed-from equation for thermal conductivity of unsaturated soils at room temperature, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, (2015)

Männer, J.: Untersuchung des thermischen Verhaltens von Böden, *Projektarbeit*, (2012), TU Dresden

Röder, J.: Untersuchungen von Störgrößen sowie methodischen Einflüssen bei der Messung der thermischen Leitfähigkeit wiederhergestellter Bodenproben, *Bachelorarbeit*, (2024), HTWK Leipzig

Schmid, N.: Ermittlung der Wärmeverluste bei einer Versuchsanlage, *Projektarbeit*, (2018), TU Dresden

Schwiteilo, E & Männer, J. & Herle I.: Experimentelle Bestimmung der thermischen Leitfähigkeit von Böden*, Geotechnik* 37, Heft 1, (2014), 32-39

Simmank, A.: Einfluss der Korngröße auf die Wärmeleitfähigkeit,*, Diplomarbeit*, (2024), TU Dresden

Uhlig, M.: Der Einfluss des Wassers auf die Wärmeleitfähigkeit in Böden*, Konferenzbeitrag*, *Fachsektionstage Geotechnik, 5. Bodenmechanik-Tagung*, (2025), Würzburg

VDI (Hrsg.): VDI-Wärmeatlas, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2013)

Vetterlein, K.: Wärmeleitfähigkeit in feuchten Sanden*, Projektarbeit,* (2022). TU Dresden

Technische Universität Dresden, Institut für Geotechnik, Markus Uhlig, 01062 Dresden
markus.uhlig@tu-dresden.de