



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Fakultät Bauingenieurwesen Institut für Geotechnik Professur für Bodenmechanik und Grundbau

Kurzfassung Projektarbeit

**Untersuchung des thermischen Verhaltens
von Böden**

eingereicht von: Jörg Männer

Abgabe: Januar 2012

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. habil. Ivo Herle
 Dipl.-Ing. Erik Nacke

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	3
2 Wahl einer geeigneten Bestimmungsmethode der Wärmeleitfähigkeit	3
3 Aufbau des Versuchsstands	4
4 Versuchsdurchführung.....	6
5 Auswertung der Versuche	7
6 Zusammenfassung.....	10

1 Einleitung

Für die Geotechnik bekommt das thermische Verhalten vom Untergrund eine immer größere Bedeutung. Der technologische Fortschritt benötigt präzise Kenntnisse über die Wärmeausbreitung im Untergrund, um die aktuellen Anwendungen zu optimieren und um neue Möglichkeiten für die Zukunft zu öffnen. Bislang sind die Hauptanwendungsgebiete in der Geothermie und der Bodenvereisung zu finden. Mit Deponien, wie Atom-Endlager, kommen neue Probleme auf, die nach neuen Lösungen suchen. Ein weiteres Anwendungsgebiet wurde mit der Überwachung von Erddämmen gefunden. Eine örtliche Veränderung der Temperaturen kann dabei auf ein Leck im Damm hinweisen.

Physikalisch gesehen ist die Wärme eine Energie. Durch einen Temperaturunterschied zwischen zwei Orten kommt es zu einem Energieausgleich vom Ort des höheren zum Ort des niedrigeren thermischen Potentials. Eine wichtige Kenngröße zur Beschreibung der Wärmeausbreitung im Boden ist die Wärmeleitfähigkeit. Die Wärmeleitfähigkeit λ ist die Fähigkeit eines Stoffes Wärmeenergie zu übertragen und wird mit folgender Formel bestimmt.

$$\lambda = \frac{Q}{A \cdot t} \cdot \frac{z}{\Delta T} \quad \text{in W/(mK)}$$

Um die Wärmeleitfähigkeit in Böden zu bestimmen, wurde zunächst ein einfacher Versuchsstand aufgebaut, mit dem später verschiedene Einflüsse auf die Wärmeleitfähigkeit im Boden untersucht wurden.

Ziel der Untersuchung ist es, die Einflüsse verschiedener Faktoren, wie Bodenart, Porosität, Sättigungsgrad und Temperatur zu ermitteln.

2 Wahl einer geeigneten Bestimmungsmethode der Wärmeleitfähigkeit

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Wärmeleitfähigkeit im Boden zu bestimmen (siehe nachstehende Abbildung 1).

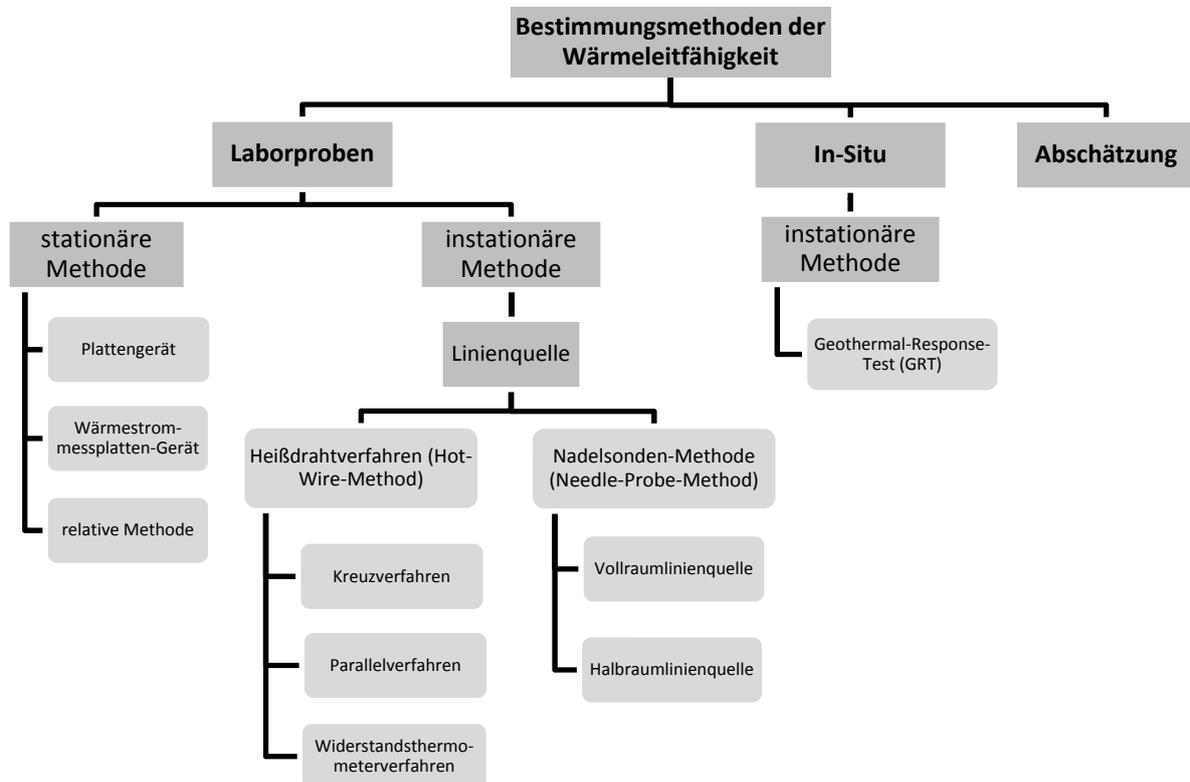


Abbildung 1: Übersicht der Bestimmungsmethoden der Wärmeleitfähigkeit von Böden

Für labortechnische Untersuchungen sind sowohl instationäre, als auch stationäre Messmethoden möglich.

Bei der instationären Methode wird durch eine konstante Energiezufuhr eine Temperaturänderung in der Probe erzeugt. Die Temperaturänderung in Abhängigkeit von der Zeit gibt Aufschluss über die Wärmeleitfähigkeit.

Um eine Messung nach der stationären Methode durchzuführen, wird in der Probe ein Temperaturgefälle hergestellt, indem an dem einen Probenende Wärme zugeführt (Warmseite) und an dem anderen Probenende Wärme abgeführt (Kaltseite) wird. Die Temperatur der Warm- und Kaltseite muss konstant gehalten werden, damit sich ein stationärer Zustand einstellen kann, bei dem die zugeführte Wärmeenergie der abgeführten entspricht. Das bedeutet, dass der Wärmestrom an jeder Stelle gleich groß ist. Das Temperaturgefälle sollte innerhalb des gleichen Materials linear verlaufen. Die Temperaturen bleiben dabei an jedem Punkt konstant.

Mit den herkömmlichen instationären Messmethoden ist es nicht möglich den Einfluss des Sättigungsgrades zu bestimmen, da während der Messung hohe Temperaturen erzeugt werden und dabei das Wasser aus den Poren des Bodens verdampfen kann. Bei stationären Messmethoden hingegen kann bereits bei einer geringen Temperaturdifferenz ab 10K zwischen Warm- und Kaltseite über die gesamte Probe die Wärmeleitfähigkeit gemessen werden. Deshalb fiel die Wahl auf eine stationäre Messmethode.

Die Messung nach der stationären Methode kann auf verschiedene Weise erfolgen, bei denen die Bedingungen des stationären Zustands verwendet werden. Daher kann entweder die dem System zugeführte bzw. abgeführte konstante Energie (Plattengerät) oder der konstante Wärmestrom (Wärmestrommessplatten-Gerät) gemessen werden. Eine weitere Möglichkeit ist das Vergleichsverfahren (relative Methode). Hier wird über ein Standardmaterial, dessen Wärmeleitfähigkeit bekannt ist, der Wärmestrom ermittelt und mit dem der Probe gleichgesetzt, womit die Wärmeleitfähigkeit der Probe dann bestimmt werden kann. Dieses Verfahren war am besten für einen einfachen Versuch geeignet, da die konstanten Temperaturen der Warm- und Kaltseite beliebig mit einfachen Mitteln hergestellt werden können.

3 Aufbau des Versuchsstands

Die Abbildung 2 zeigt den Aufbau eines stationären Versuchs nach dem Vergleichsverfahren (relative Methode). Die Bodenprobe wird symmetrisch zwischen zwei Standardmaterialien angeordnet. Das hat den Vorteil, dass eine mittlere Temperatur (Prüftemperatur) über die Warm- und Kaltseite gewählt werden kann. Desweiteren werden durch Bilden eines Mittelwertes aus der Temperaturdifferenz im oberen und unteren Standard die radialen Wärmeverluste bei der Berechnung kompensiert. Um den Wassergehalt in der Bodenprobe während der Messung möglichst konstant zu halten, wurde diese in einer Schutzmembran eingebracht. Zur Herstellung der Warmseite wurde ein temperierbares Wasserbad gewählt. Dies nutzt die speicherwirksame Leistung des Wassers, um eine konstante Temperatur zu halten. Über einen Metallzylinder wird die Wärme in die Versuchsmaterialien eingeleitet. Aufgrund der sehr hohen Wärmeleitfähigkeit des Metalls funktioniert der Metallzylinder wie eine Heizplatte. Die Kaltseite wurde über die Raumtemperatur eines klimatisierten Raumes hergestellt. Durch eine radiale Wärmedämmung erfolgt der Wärmestrom vertikal durch die Versuchsmaterialien. Die radiale Dämmung wurde an der Oberseite um ca. 6 cm höher gezogen, um zu vermeiden, dass Luftströmungen an der Oberseite die Oberflächentemperatur im oberen Standard beeinflussen.

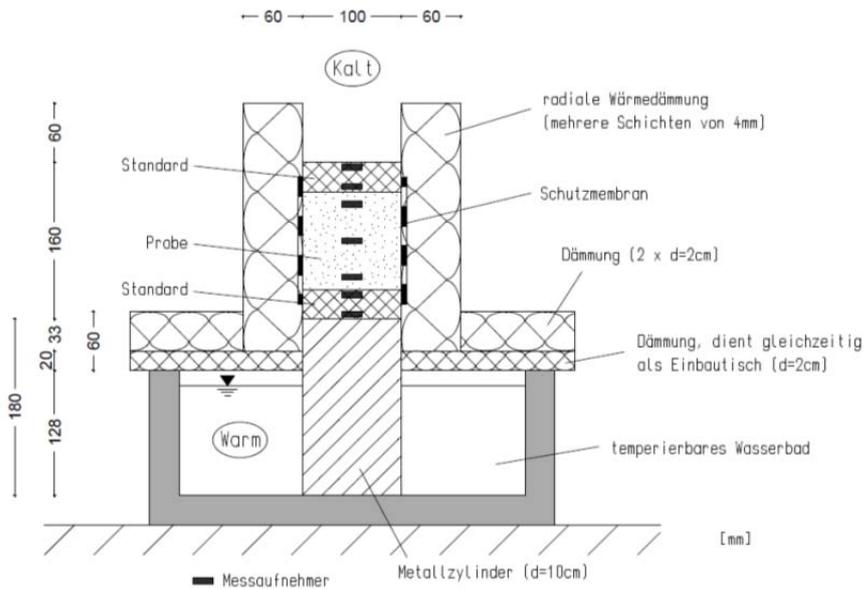


Abbildung 2 (links): Versuchsaufbau
Abbildung 3 (rechts): Beispiel einer Sandprobe

Zur Messung der Temperaturdifferenzen in den Standardmaterialien und der Probe wurden in den Standardmaterialien jeweils zwei und in der Probe drei Messaufnehmer eingebaut. Der dritte Messaufnehmer in der Probe dient zur Kontrolle und um den Temperaturverlauf innerhalb der Probe zu erfassen. Als Messaufnehmer wurden Pt-1000 eingesetzt. Mit einem Datenerfassungssystem (Abbildung 4) konnten die Temperaturen an den jeweiligen Messaufnehmern aufgezeichnet werden.

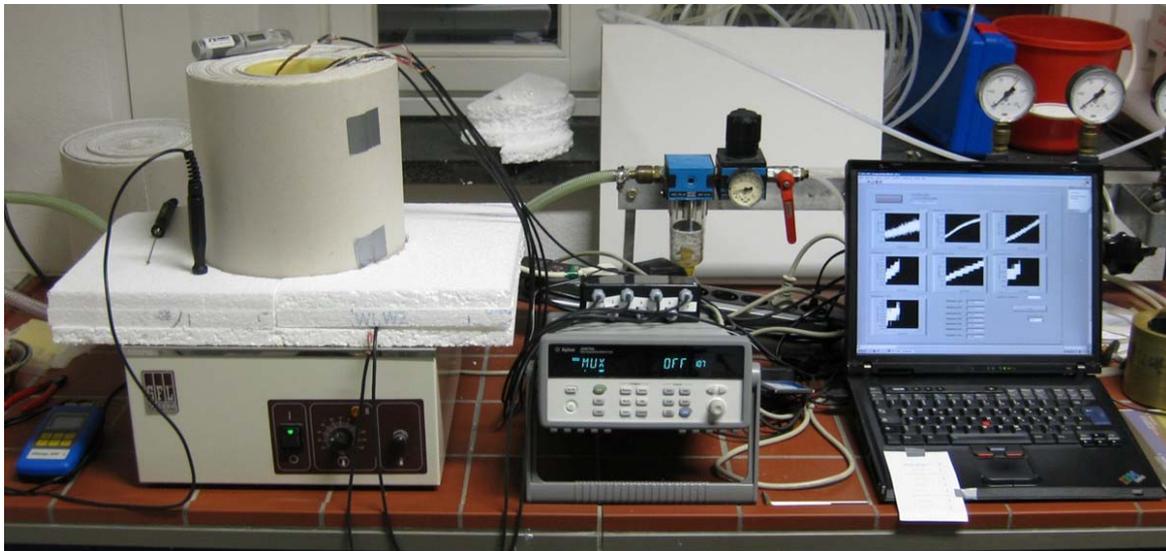


Abbildung 4: Versuchsstand mit Datenerfassungssystem

4 Versuchsdurchführung

Für die Untersuchung wurde ein enggestufter Sand (SE) mit einer Korndichte ρ_s von $2,64 \text{ g/cm}^3$ und ein Ton/Schluff Boden (UM) mit einer Korndichte ρ_s von $2,67 \text{ g/cm}^3$ verwendet. Der Ton/Schluff Boden wurde zunächst aufbereitet ($d \leq 2 \text{ mm}$) und vorkonsolidiert um eine standfeste, homogene, vollgesättigte Probe zu erhalten. Um die Einflüsse der einzelnen Parameter zu untersuchen, wurde immer ein Zustand verändert. In der nachfolgenden Tabelle 1 sind die Versuche aufgelistet, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden. Die blau gekennzeichneten Versuche wurden im Anschluss zusätzlich durchgeführt.

Versuch	Probe	Zustand	Untersuchter Einfluss
I	Sand	trocken ($S_r=0$), dicht	Temperatur
II		trocken ($S_r=0$), dicht	Wiederholbarkeit
III		trocken ($S_r=0$), locker	Porosität
IV		feucht ($S_r \neq 0$), dicht	Sättigungsgrad
V	Ton/Schluff	vollgesättigt ($S_r=1$), bei 200 kN/m^2 vorkonsolidiert	Kornmaterial
VI		vollgesättigt ($S_r=1$), bei 1000 kN/m^2 vorkonsolidiert	Porosität
VII		trocken ($S_r=0$), bei 200 kN/m^2 vorkonsolidiert	Sättigungsgrad
Z1	Sand	trocken ($S_r=0$), locker	
Z2	Ton/Schluff	trocken ($S_r=0$), bei 1000 kN/m^2 vorkonsolidiert	

Tabelle 1: Übersicht der Untersuchungsschritte

Nach dem Einbau der Proben in den Versuchsstand wurde die Temperatur der Warm- und Kaltseite eingestellt und die Temperaturen in den Messpunkten kontinuierlich aufgezeichnet. In Abbildung 5 kann man erkennen, wie nach dem Einstellen der konstanten Warm- und Kaltseitentemperatur ein Temperaturausgleich innerhalb der Versuchsmaterialien erfolgt. Dabei wird im Bereich der Warmseite (blau) wesentlich schneller eine konstante Temperatur erreicht als z.B. im Bereich der Kaltseite (grün). Das liegt daran, dass die Wärme eine gewisse Zeit benötigt, um sich im Boden auszubreiten. Nachdem an allen Messpunkten keine Temperaturänderung mehr zu erkennen ist, hat sich der stationäre Zustand eingestellt.

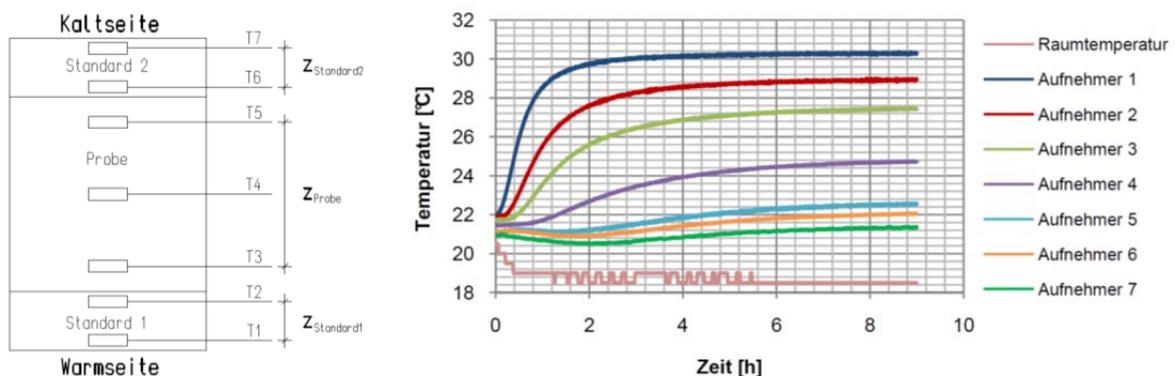


Abbildung 5: Einstellung des stationären Zustands

5 Auswertung der Versuche

Mit den gemessenen Temperaturen im stationären Zustand konnte nun der Temperaturverlauf innerhalb der Versuchsmaterialien dargestellt werden. Das linke Diagramm 1 zeigt eine Bodenprobe mit einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit (trockener Sand, $\lambda=0,3 \text{ W/mK}$) und das rechte Diagramm 2 eine Bodenprobe mit einer hohen Wärmeleitfähigkeit (vollgesättigter Ton/Schluff, $\lambda=1,72 \text{ W/mK}$).

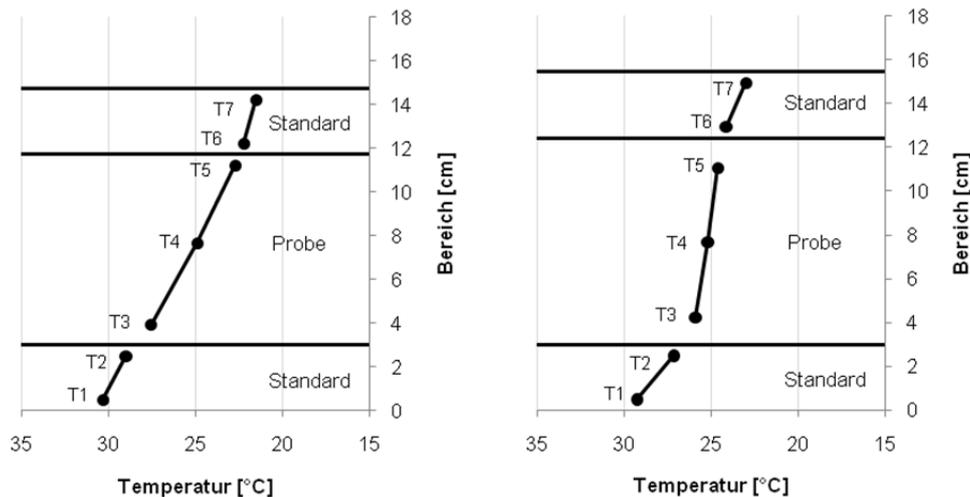


Diagramm 1 (links): trockener Sand, $\lambda=0,3 \text{ W/mK}$

Diagramm 2 (rechts): vollgesättigter Ton/Schluff, $\lambda=1,72 \text{ W/mK}$

Wie man gut erkennen kann, ist die Temperaturabnahme je Höheneinheit in der Probe mit der niedrigen Wärmeleitfähigkeit wesentlich größer, als der in der Probe mit der hohen Wärmeleitfähigkeit. Das liegt daran, dass die Wärme bei hoher Wärmeleitfähigkeit schneller abgeleitet wird und der Temperaturunterschied geringer ausfällt. Im Diagramm 1 ist der Temperaturabfall pro Höheneinheit in der Probe größer als im Standard. Das liegt daran, dass die Wärmeleitfähigkeit vom Standard mit $0,39 \text{ W/mK}$ größer ist als in der trockenen Sandprobe. Bei der vollgesättigten Ton/Schluff Probe (Diagramm 2) ist es genau umgekehrt. Auch kann man gut erkennen, dass die Temperaturdifferenz im unteren Standard größer ist als im oberen Standard. Im Idealfall sollten die Temperaturdifferenzen gleich groß sein. Durch die radialen Wärmeverluste, die sich nicht komplett vermeiden lassen, werden die Temperaturdifferenzen über die Höhe des Versuchsaufbaus immer kleiner.

Aufgrund der Wärmeverluste werden auch zwei Standards in einem symmetrischen Aufbau verwendet. Die im Vergleich zum Idealfall unten höher gemessene Temperaturdifferenz wird mit der oben niedriger gemessenen Temperaturdifferenz in der Berechnung durch das Bilden eines Mittelwertes ausgeglichen.

Als erstes wurde der Temperatureinfluss untersucht. Dazu wurde zunächst bei einem gleich bleibenden Temperaturgradienten von 10K die Wärmeleitfähigkeit bei einer Prüftemperatur von 25°C und dann bei 30°C ermittelt. Das Ergebnis ist in dem Diagramm 3 dargestellt. Wie man sieht, belaufen sich die Änderungen der Wärmeleitfähigkeit bei einer Änderung der Prüftemperatur um 5°C in der zweiten Nachkommastelle und sind damit sehr gering. Das gegensätzliche Verhalten der beiden kristallinen Böden könnte damit auf Messungenauigkeiten zurückgeführt werden. Bis auf wenige Ausnahmen sollte bei kristallinen Materialien eine Abnahme der Wärmeleitfähigkeit mit steigender Temperatur zu erwarten sein. Als nächstes wurde bei einer gleichbleibenden Prüftemperatur von 30°C der Temperaturgradient von 10 auf 20K erhöht (Diagramm 4). Mit dem Versuch wurde die Vermutung der Messungenauigkeiten bestätigt, da dies sonst bedeuten würde, dass mit höher werdenden Temperaturgradienten bei der Ton/Schluff Probe (rot dargestellt) die Wärmeleitfähigkeit abnehmen

würde. Damit konnten bei den geringen Temperaturänderungen keine Einflüsse auf die Wärmeleitfähigkeit bestimmt werden.

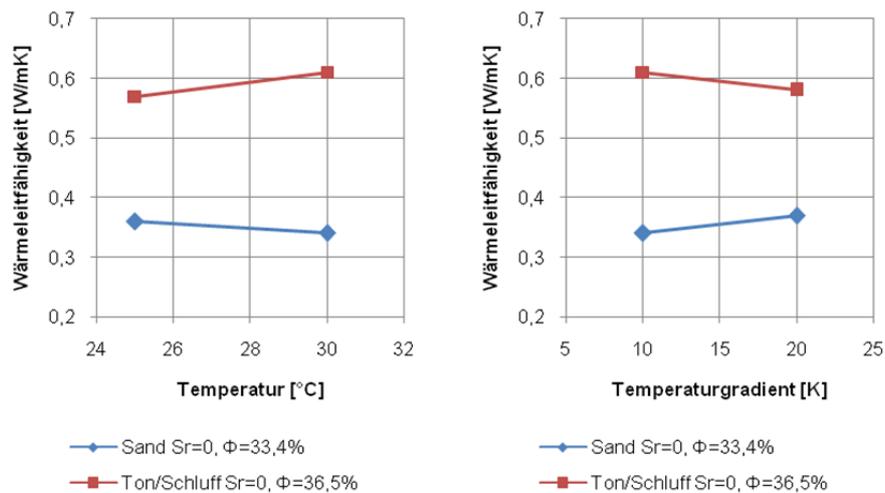


Diagramm 3 (links): Wärmeleitfähigkeit bei unterschiedlicher Prüftemperatur (Temperaturgradient 10K)

Diagramm 4 (rechts): Wärmeleitfähigkeit bei unterschiedlichem Temperaturgradienten (Prüftemperatur 30°C)

Im weiteren Schritt wurde die Wiederholbarkeit der Versuche überprüft. Mit dem Wiederholungsversuch wurde eine Wärmeleitfähigkeit von 0,37 W/mK ermittelt. Dies liegt damit sehr nah an dem Ergebnis des ersten Versuches, das 0,36 W/mK ergab. Eine Wiederholbarkeit der Versuche ist damit gegeben.

Als nächstes wurde der Einfluss der Porosität (Porenzahl) untersucht. Wie man im Diagramm 5 erkennen kann, erhöht sich beim trockenen Sand (blau) und auch beim trockenen Ton/Schluff (rot) die Wärmeleitfähigkeit bei einer höher eingebauten Trockendichte. Da die Porosität aus der Trockendichte und der Korndichte bestimmt wird, kann äquivalent dazu die Wärmeleitfähigkeit zur Porosität dargestellt werden (Diagramm 6). Auch hier ist deutlich mit einer Abnahme der Porosität ein Anstieg der Wärmeleitfähigkeit zu erkennen. Das gleiche Verhalten kann man bei einer vollgesättigten Ton/Schluff Probe (grün) erkennen, nur dass hier die Wärmeleitfähigkeit deutlich höher liegt, als bei den trockenen Bodenproben. Auch bei einer feuchten Sandprobe (gelb) liegt diese deutlich höher.

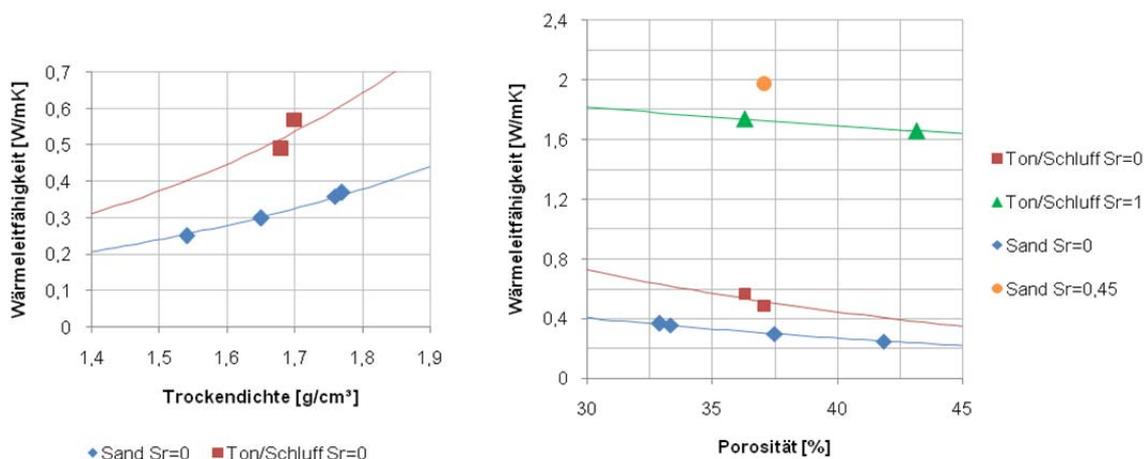


Diagramm 5 (links): Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Trockendichte

Diagramm 6 (rechts): Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Porosität

Dieses Verhalten wurde als nächstes mit dem Einfluss des Sättigungsgrads untersucht. Wie man in dem Diagramm 7 entnehmen kann hat der Sättigungsgrad einen sehr hohen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit, da der Ton/Schluff (rot) bei voller Sättigung eine wesentlich höhere Wärmeleitfähigkeit aufweist als im ungesättigten Zustand. Der Einfluss des Sättigungsgrads ist beim Sand noch stärker. Mit dem Versuchsstand konnte zwar keine vollgesättigte Sandprobe getestet werden, da das Wasser trotz Schutzmembran aus dem Versuchsstand herauslief, aber bei einem Sättigungsgrad von 45% war die Wärmeleitfähigkeit bereits größer, als die des vollgesättigten Ton/Schluff Bodens. Bei beiden Böden ist damit ein deutlicher Anstieg der Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Sättigung zu erkennen.

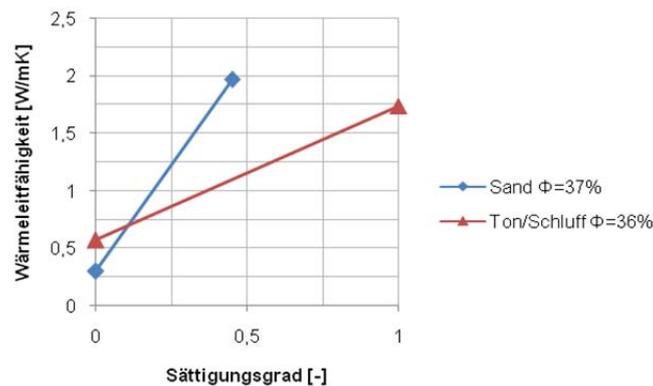


Diagramm 7: Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Sättigungsgrad

Da beide Böden mit einem ähnlichen Porenanteil (Porosität) untersucht wurden, muss das Kornmaterial Einfluss auf die unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit bei den jeweiligen Sättigungsgraden haben. Was deutlich auffällt ist, dass der Sand im trockenen Zustand eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit und mit zunehmendem Sättigungsgrad eine höhere Wärmeleitfähigkeit als der Ton/Schluff Boden aufweist. Eine mögliche Erklärung für dieses Phänomen könnte in der Korngröße liegen. Bei großen Körnern ist die Kontaktfläche bedingt durch die nur sehr wenigen Kontaktpunkte sehr klein. Sind die Körner hingegen kleiner, können bei gleicher Porenzahl (Porosität) wesentlich mehr Kontaktpunkte hergestellt werden, womit die Kontaktfläche größer ist (siehe Abbildung 6). Da im trockenen Zustand die Poren nur mit Luft gefüllt sind und Luft eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit besitzt, wird die Wärmeübertragung besser, je größer die Kontaktfläche ist. Werden die Poren nun mit Wasser gefüllt (Wasser hat eine höhere Wärmeleitfähigkeit als Luft) erfolgt die Wärmeübertragung zunehmend über die Poren und der Einfluss der Kontaktflächen könnte damit geringer ausfallen. Das würde bedeuten, dass mit einem höheren Sättigungsgrad die Kornwärmeleitfähigkeit zunehmend an Einfluss gewinnt. Damit würde auch die Sandprobe durch den höheren Quarzgehalt eine größere Kornwärmeleitfähigkeit besitzen, als der Ton/Schluff Boden.

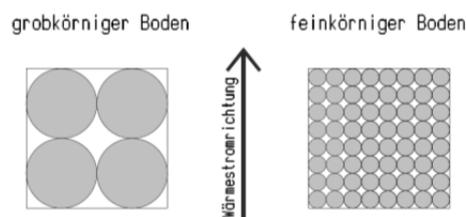


Abbildung 6: Kontaktflächen bei unterschiedlicher Korngröße

6 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit konnten ein einfacher Versuchsstand zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Böden aufgebaut und einige Versuche zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Parameter, wie Porosität, Sättigungsgrad und Kornmaterial durchgeführt werden.

Für die Versuche wurde ein stationäres Verfahren gewählt, bei dem über eine Vergleichsmethode die Wärmeleitfähigkeit bestimmt wird.

Die Vermutung, dass im Boden mit sinkender Porosität die Wärmeleitfähigkeit steigt, wurde mit den Versuchen bestätigt. Genauso steigt mit einem höheren Sättigungsgrad die Wärmeleitfähigkeit im Boden an. Der Einfluss des Sättigungsgrades hat sich sogar als am größten erwiesen. Mit den Versuchen konnte auch gezeigt werden, dass die Bodenart einen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit nimmt. Die Untersuchungen bei unterschiedlichen Temperaturen ergaben, dass der Einfluss der Temperatur bei geringen Temperaturänderungen sehr klein ist.