

## Wärmeleitfähigkeit in grobkörnigen Böden

David Gruber

### Einleitung

In technischen Anwendungen wie der Bodenvereisung, bei Erdwärmespeichern oder der Stromgewinnung mit geothermischen Tiefenwasser fließt Wärme im umliegenden Boden. Genaue Kenntnis darüber zu haben, wann der Untergrund eine höhere oder niedrigere Wärmeübertragungsfähigkeit hat, ist deswegen wichtig, um die technischen Anwendungen mit höchst möglicher Effizienz und Sicherheit zu gestalten. Der Einfluss des Bodenzustandes, welcher diese Übertragung bestimmt, ist Forschungsziel dieser Diplomarbeit. Um diese Wärmeübertragung zu messen, gibt es eine Vielzahl von Verfahren, wie zum Beispiel die Messung mittels Nadelsonde, mittels eines Wärmestrommessgerätes, oder mittels eines Wärmeflussensors. Am Institut wurde sich für das Verfahren zur Messung der Wärmeleitfähigkeit nach der Vergleichsmethode entschieden.

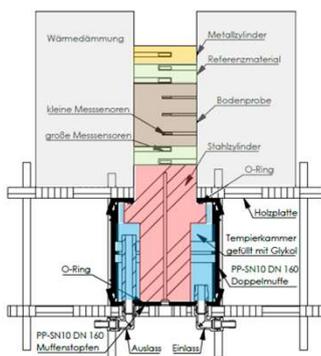


Abb. 1: Entwickelter Versuchsaufbau.

### Versuchsaufbau

Kernpunkt dieser Arbeit lag in der Einarbeitung eines neuen Temperiergerätes in den Versuchstand. Der Huber Ministat 230 kann Temperaturen zwischen -20 und +200°C erzeugen. Um diese Temperaturen an den Probenaufbau zu übertragen, wurde ein Kanalgrundrohr-System aus PP mit Öffnungen versehen. In diese Öffnungen kann, wie in Abb. 1 zu sehen, einseitig Thermofluid eingepumpt und abgesaugt werden, ein Prozessthermometer zur Temperatursteuerung kann über die Kammer eingebracht werden und es kann entlüftet werden. Auf der gegenüberliegenden Seite ragt ein Stahlzylinder aus der Kammer heraus. Dieser Stahlzylinder fungiert als thermisches Bindeglied zwischen der Kammer und dem Probenaufbau. Die Bodenprobe selbst befindet sich zwischen zwei Referenzmaterialien mit bekannter Wärmeleitfähigkeit. Die Temperatursensoren in den beiden Referenzmaterialien und der Probe dienen zum Ermitteln des Temperaturgradienten. Über die beiden Referenzmaterialien kann der Wärmestrom mit dem Fourier'schen Gesetz bestimmt werden. Der gemittelte Wärmestrom aus beiden Materialien entspricht dem Wärmestrom in der Bodenprobe und somit kann die Wärmeleitfähigkeit der Probe berechnet werden.



Abb. 2: Kalibrierung der Temperatursensoren

### Kalibrierung der Messensoren

Da die verwendeten Temperatursensoren eine temperaturabhängige Stromspannung messen, mussten die Sensoren über ein hochauflösendes Widerstandsthermometer kalibriert werden. Dafür wurden die Sensoren mit einer Wärmedämmung in das Wasserbad des Temperiergerätes gehangen (Abb. 2). Die Spannungen der Sensoren und die Referenztemperatur wurden über mindestens 20 Minuten für mehrere konstante Temperaturstufen gemittelt. So konnte eine Kalibrierfunktion für jeden Sensor erstellt werden.

### Bestimmung der Versuchslaufzeit

Um die nötige Versuchslaufzeit zu ermitteln, wurden Wärmeleitfähigkeiten aus gemittelten Temperaturen über die Versuchslaufzeit berechnet. Bei erstmaliger Erwärmung der Probe näherte sich die Wärmeleitfähigkeit über die Zeit zunächst von oben an die Wärmeleitfähigkeit im Endzustand an. Anschließend konvergierte der Graph der Wärmeleitfähigkeit in Form einer gedämpften Schwingung. Die nachfolgenden Temperaturstufen, bei denen die Temperatur um 10K erhöht wurde, konvergierten deutlich früher. Ab etwa 7 Stunden weichen die Wärmeleitfähigkeiten nur noch um etwa 0,003 W/(m·K) ab. Diese Untersuchung wurde an einer trockenen und locker gelagerten Sandprobe untersucht. Da Proben mit höherem Sättigungsgrad, oder höherer Dichte eine höhere Wärmeleitfähigkeit besitzen, ist davon auszugehen, dass dort schon früher der stationäre Zustand ermittelt werden kann. Eine Analyse der einzelnen Temperaturen der einzelnen Messensensoren zeigte, dass der oberste Sensor im oberen Referenzmaterial, stark von der schwankenden Raumluft abhängt. Die Abweichungen können darauf zurückgeführt werden.

### Versuchsergebnisse

In dieser Arbeit wurden zunächst von zwei trocken und locker gelagerten Sanden die Wärmeleitfähigkeit bestimmt. Dies wurde einmal im Versuchsaufbau vergangener Arbeiten und im neuen Versuchsaufbau vollzogen, um einen Vergleich beider herstellen zu können. Da der prinzipielle Aufbau identisch ist, ergaben sich gleiche Wärmeleitfähigkeiten. Die Vorteile des neuen Aufbaus liegen in der besseren Temperaturkonstanz und einer exakteren Temperatureinstellung. Der größte Vorteil liegt in der Möglichkeit zu kühlen und somit den Wärmefluss umzudrehen. Des Weiteren kann der Aufbau in beliebige Richtungen gedreht werden.

### Einfluss der Wärmeflussrichtung

Der Einfluss der Wärmeflussrichtung vertikal nach oben und unten konnte somit leicht verglichen werden. Dazu wurden drei teilgesättigte Sande in dichter Lagerung getestet. Bei diesen wurde die Kammertemperatur auf -10, 0, 45 und 69°C eingestellt. In Abb. 3 ist eines der Ergebnisse zu sehen. Die Trendlinien der beiden

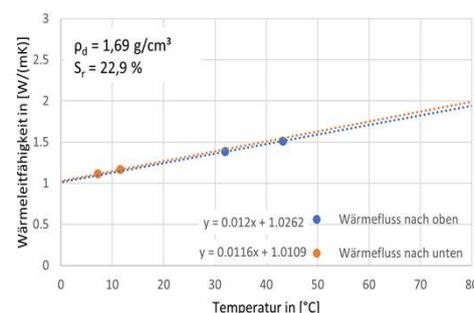


Abb. 3: Einfluss der Wärmeflussrichtung für Dresdner Sand.

Wärmeflussrichtungen weichen nur marginal voneinander ab. Somit fließt die Wärme in der Bodenprobe unter Beachtung der Temperatur gleich nach oben, wie nach unten in der Bodenprobe.

### Vergleich mit Literaturwerten

Zum Vergleich mit der Literatur wurde eine Datenbank aus 14 Quellen hergestellt. Diese Daten wurden mit den gesamten Ergebnissen des Institutes verglichen. Eine der Darstellungen ist in Abb. 4 zu sehen. Hier wurde die Wärmeleitfähigkeit über der Porosität dargestellt. Die Daten streuen mit sinkender Porosität stark. Diese Streuung ist zum Großteil auf die unterschiedlichen Wassersättigungen zurückzuführen. Wird die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Sättigungsgrades dargestellt, so streuen die Daten ebenso bei hoher Sättigung, wie in Abb. 5 zu sehen. Anhand der Streuungen der Ergebnisse dieser Arbeit ist ebenfalls der Einfluss der Temperatur zu erkennen.

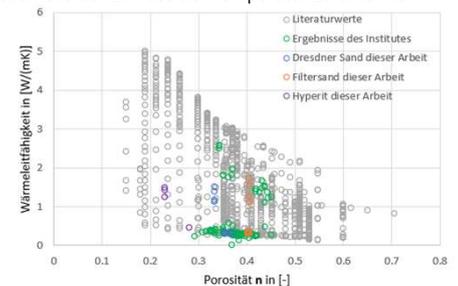


Abb. 4: Einfluss der Porosität.

### Fazit

Allgemein ist die Wassersättigung das wichtigste Kriterium für die Wärmeleitfähigkeit in Böden. Sie bestimmt die Übertragung von Partikel zu Partikel, da ihre Wärmeleitfähigkeit deutlich höher ist, als die von Luft. Andere Einflüsse, wie die Mineralien, die Strömung, oder die Wasserdampfdiffusion, sind nicht zu vernachlässigen.

In dieser Arbeit wurde ein neues Temperiergerät in den Versuchsaufbau integriert. Die Versuchslaufzeit für eine Temperaturstufe konnte durch eine Analyse von 24 auf 8 Stunden verkürzt werden. Ebenfalls konnte anhand von Versuchsergebnissen gezeigt werden, dass die vertikale Wärmeflussrichtung in diesem Versuch keinen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit hat.

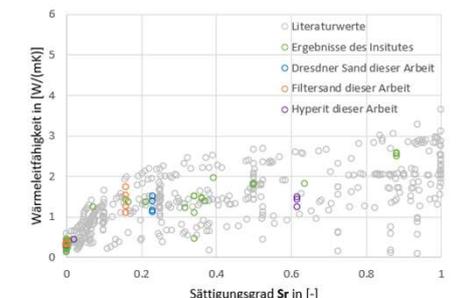


Abb. 5: Einfluss des Sättigungsgrades.

### Projekt

Diplomarbeit

### Hochschullehrer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Ivo Herle, TU Dresden

### Wissenschaftliche Betreuung

Dr.-Ing. Markus Uhlig, TU Dresden

### Abgabe

07 2021