

Wärmeleitfähigkeit in feuchten Sanden

Thermal conductivity in wet sands

Klara Vetterlein

Einleitung

Im Rahmen der Diskussion um zu Neige gehende Rohstoffreserven und die Nutzung erneuerbarer Energien, spielt die Erdkruste als Energiequelle eine wichtige Rolle. Über Oberflächennahe Geothermie und Tiefengeothermie stellt er Wärme zur Verfügung. Auch für die Verlegung von Starkstromkabeln im Boden spielt die Wärmeableitung eine entscheidende Rolle. Deshalb ist die Kenntnis über Wärmeleitung im Boden relevant. Sie wird über den Wärmestrom und die Wärmeleitfähigkeit beschrieben. Die Wärmeleitfähigkeit ist ein Materialkennwert, abhängig von der mittleren Bodentemperatur, der Trockendichte und des Sättigungsgrades. Am Institut kann sie in einem Versuch nach der Vergleichsmethode bestimmt werden. Im Rahmen der Arbeit wird untersucht, ob das Aufbringen eines Temperaturgradienten im Versuchsstand eine Veränderung der Wärmeleitfähigkeit nach sich zieht. Dazu werden Proben mit verschiedenen Sättigungsgraden hergestellt. Es wird sowohl der Wassergehalt, als auch die Wärmeleitfähigkeit über die Probenhöhe bestimmt.

Wärmeleitfähigkeitsversuch

Der Versuchsstand besteht aus einem Temperiergerät, welches eine Temperierflüssigkeit über Schläuche in die Temperierkammer leitet. In dieser Kammer steht ein Metallzylinder, welcher erhitzt wird und die Wärme im Anschluss gleichmäßig auf die darüberliegende Probe überträgt. Die Bodenprobe in Abbildung 1 ist zwischen zwei Referenzstandards mit bekannter Wärmeleitfähigkeit eingebaut und wird durch eine Latexmembran vor Austrocknung geschützt. Sowohl innerhalb der Standards, als auch in der Sandprobe sind Temperatursensoren vorhanden. Im Vergleich zu vorangegangenen Versuchen wurden im Rahmen dieser Arbeit fünf statt nur drei Temperatursensoren in die Probe eingebaut, um eine bessere Aussagekraft bezüglich der Wärmeleitfähigkeitsveränderung über die Probenhöhe zu erzielen. Der Leitfähigkeitsversuch läuft 24 h. Im stationären Zustand wird für jeden Sensor der Temperaturmittelwert gebildet. Daraus werden anschließend die Temperaturgradienten in der Probe bestimmt. Über den Wärmestrom innerhalb der Referenzstandards wird die Wärmeleitfähigkeit über die eindimensionale Fourier-Gleichung ermittelt.

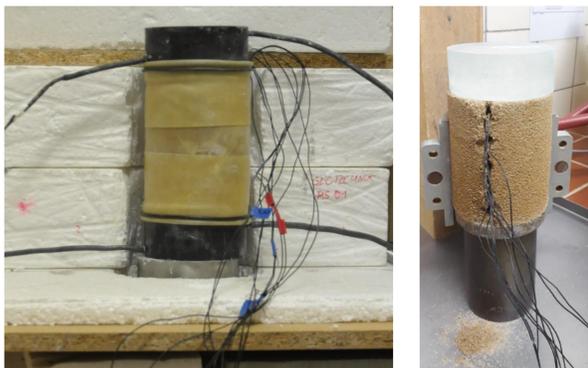


Abb. 1: Bodenprobe links mit Temperatursensoren, rechts eingebaut zwischen Referenzstandards.

Versuchsauswertung

Dabei werden für den Verlauf des Wärmestroms innerhalb der Probe verschiedene Annahmen getroffen, um den tatsächlichen Wärmestrom möglichst genau anzunähern. Einerseits wird der Wärmestrom als konstant über die Probenhöhe angenommen. Er ergibt sich aus dem Mittelwert der Wärmeströme der Referenzstandards (Methode λ_1). In der Theorie wäre ein konstanter Wärmestrom zu erwarten. Im Laborversuch sind jedoch stets Wärmeverluste zu erwarten. Deshalb wird andererseits eine Auswertung mit linear abfallendem Wärmestrom durchgeführt.

Zu diesem Zweck wird der Wärmestrom der Probe, zwischen den Wärmeströmen der Referenzstandards in Abhängigkeit der Probenhöhe linear interpoliert (Methode λ_3). Bei beiden Methoden werden der Temperaturgradient und der Sensorabstand als Differenz der übereinanderliegenden Sensoren gebildet, sodass am Ende vier Wärmeleitfähigkeiten über die Probenhöhe vorliegen. Die Methode λ_3 ist rechts in Abbildung 2 dargestellt. Weiterhin wird die Auswertung für eine einzelne Wärmeleitfähigkeit in der Probenmitte beibehalten. Diese ist relevant für den Vergleich mit Literaturwerten und Werten vorangegangener Versuche am Institut. Die sogenannte Methode λ_{1A} ist links in Abbildung 2 zu sehen.

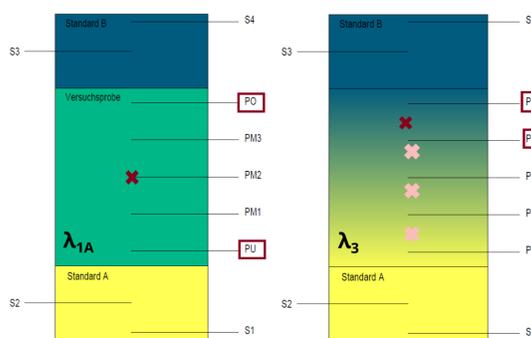


Abb. 2: Auswertungsarten der Wärmeleitfähigkeit über die Probenhöhe. Die horizontalen Linien stellen die Position der Temperatursensoren dar.

Die Vergleichsprobe

Neben dem Versuchsstand wird eine analog der Versuchsprobe hergestellte Vergleichsprobe aufgestellt. Diese wird nicht durch einen Temperaturgradienten belastet. Das in der Probe befindliche Porenwasser steht dementsprechend nur unter dem Einfluss der Erdanziehung. Durch Vergleich der beiden Probe wird auf den Einfluss des Versuchsstandes geschlossen.

Versuchsergebnisse

Die Wärmeleitfähigkeit feuchter Sande steigt mit dem Sättigungsgrad an. Dies ist im oberen Teil von Abbildung 4 zu erkennen. Innerhalb der Probe unterliegt die Wärmeleitfähigkeit starken Schwankungen. Dies wird im linken Graphen in Abbildung 3 sichtbar. Tendenziell steigt die Wärmeleitfähigkeit nach oben an. Auf Grund der Wasserdampfdiffusion innerhalb eines geschlossenen Systems ist der Wassergehalt in gering gesättigten Proben unten minimal und steigt über die Probenhöhe an. Bei der Wasserdampfdiffusion handelt es sich um den Transportprozess von Wasserdampf, der bei Kontakt von Wasser und Luft entsteht. Auf Grund seiner geringen Dichte steigt Wasserdampf in den Kapillarporen auf. Durch einen Temperaturgradienten wird der Effekt verstärkt. Die Wasserdampfdiffusion tritt in allen untersuchten Sandproben auf, wird bei einem großen Sättigungsgrad jedoch von den Einflüssen der Erdanziehung überlagert. Wie in Abbildung 3 sichtbar wird, fällt in der Probe die Wärmeleitfähigkeit nicht analog dem Wassergehalt ab. Die erhöhte Wärmeleitfähigkeit kann mit einer erhöhten Dichte, der mit einem Proctorhammer hergestellten Proben, begründet werden.

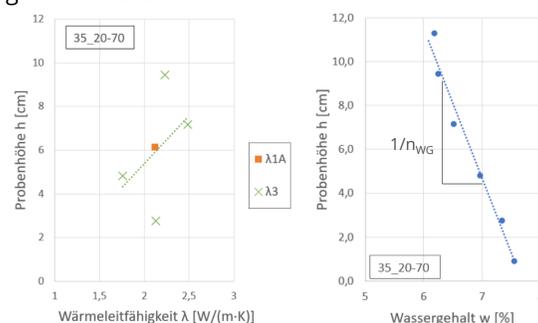


Abb. 3: Wärmeleitfähigkeit über die Probenhöhe nach λ_{1A} und λ_3 (links) und Wassergehalt über die Probenhöhe (rechts) einer Sandprobe mit einem Sättigungsgrad von 35 %.

Wobei die Proben vor dem Einbau gedreht wurden, weshalb die Seite mit der erhöhten Dichte oben zu finden ist. Dass der Einfluss der Dichte auf die Wärmeleitfähigkeit eines Sandes größer ist, als der Wassergehalt, liegt an der hohen Wärmeleitfähigkeit von Quarz im Vergleich zur Wärmeleitfähigkeit von Wasser.

In Abbildung 4 ist jedoch zu erkennen, dass der Zusammenhang von Sättigung und Wärmeleitfähigkeit dennoch existiert. Die Kurven der Wärmeleitfähigkeit und des Anstiegs des Wassergehaltes innerhalb der Probe verhalten sich ähnlich, wenn sie in Abhängigkeit des mittleren globalen Sättigungsgrades der Probe gebracht werden. Während die Wärmeleitfähigkeit bei geringer Sättigung stark ansteigt, nimmt der Anstieg des Wassergehaltes schnell ab. Ab einer Sättigung von etwa 32 % wird der Anstieg beider Kurven minimal. Das Verhalten der Wärmeleitfähigkeit eines Sandes kann also theoretisch durch die Verteilung des Wassergehaltes vorausgesagt werden.

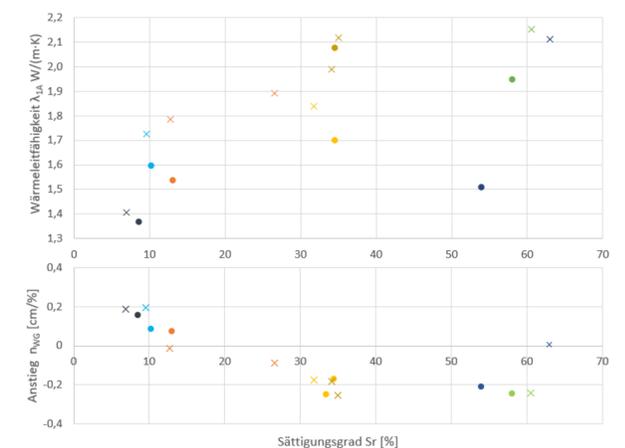


Abb. 4: Wärmeleitfähigkeit und Anstieg des Wassergehaltes der Versuchsproben in Abhängigkeit des Sättigungsgrades.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Wärmeleitfähigkeit eines feuchten Sandes ist abhängig von seinem Sättigungsgrad. Dieser verändert sich jedoch auf Grund der Einflüsse aus Wasserdampfdiffusion und Erdanziehung. Das und die Einflüsse aus dem Einbau führen zu einer Anisotropie der fertigen Probe. Als wesentlicher Einflussfaktor ist die (lokale) Trockendichte der Probe zu sehen, ihr Einfluss ist als höher als der des Wassergehaltes zu bewerten. Die Probe sollte weder für den Wassergehalt, noch für die Trockendichte als homogen angesehen werden. Auf Grund der starken Fehlereinflüsse, die zu extremen Schwankungen der Wärmeleitfähigkeit über die Probenhöhe führen, sollte die Auswertung, wie bisher unter der Annahme eines konstanten Wärmestroms (λ_{1A}) durchgeführt werden.

Es sollte angestrebt werden den Versuchsstand dahingehend anzupassen, dass größere Proben eingebaut werden können. Außerdem sollte die Änderung der Wärmeleitfähigkeit über die Probenhöhe in Abhängigkeit der Dichte, sowohl für trockene als auch für feuchte Sande, genauer untersucht werden.

Projekt
Projektarbeit

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

Wissenschaftliche Betreuung
Dr.-Ing. Markus Uhlig, TU Dresden

Abgabe
Februar 2022