TK04 Application Note

Labormessungen an Bodenproben und Sand

© 2024 TeKa, Berlin, Germany

Allgemein

Die Wärmeleitfähigkeit von Sandmaterialien und Bodenproben wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst, die auch für die Interpretation der Messergebnisse relevant sind und im folgenden besprochen werden.

Außerdem werden Hinweise zur Sondenwahl, Probenpräparation und Durchführung der Messungen gegeben, da Sande und Bodenproben i. a. zu den anspruchsvolleren Messaufgaben gehören.

Materialzusammensetzung

Sand- und andere Böden bestehen aus einem festen Kornanteil (Matrix) und einem mehr oder weniger großen Porenraum. Ein grundlegender Einflußfaktor ist daher die Matrix-Wärmeleitfähigkeit des Grundmaterials. Die höchste Matrix-Wärmeleitfähigkeit natürlicher Materialien erreicht reiner Quarzsand mit 6.5-12.5 $Wm^{-1}K^{-1}$.

Feuchtegehalt

Die Gesamt-Wärmeleitfähigkeit eines porösen Materials setzt sich zusammen aus der Wärmeleitfähigkeit der Matrix und der der Porenfüllung. Letztere besteht i. a. bei einem trockenen Material aus Luft (Wärmeleitfähigkeit ca. 0.03 $Wm^{-1}K^{-1}$), bei einem voll gesättigten aus Wasser (Wärmeleitfähigkeit ca 0.6 $Wm^{-1}K^{-1}$).

Mit steigendem Feuchtegehalt wird die Luft als Porenfüllung zunehmend durch Wasser ersetzt. Da Luft ein wesentlich schlechterer Wärmeleiter ist als Wasser, erhöht sich dadurch die Gesamt-Wärmeleitfähigkeit der Probe. Der Minimalwert wird im ausgetrockneten Zustand, der Maximalwert bei voller Wassersättigung erreicht. Die Wärmeleitfähigkeit poröser Böden hängt damit stark vom Feuchtegehalt der Probe ab, der Maximalwert kann das fünf- bis sechsfache des Minimalwertes betragen. Die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Feuchtegehalt ist nicht linear, eine von uns gemessene Beispielkurve befindet sich am Ende dieses Dokuments.

Daraus ergibt sich, daß zur richtigen Interpretation der Ergebnisse der Feuchtegehalt der Probe bei der Messung bekannt sein bzw. ein definierter Feuchtegehalt hergestellt werden muss (dies gilt auch für in situ entnommene Proben). Bei der Planung der Messungen muß zudem berücksichtigt werden, ob die Fragestellung die vollständige Erfassung der Feuchte-Abhängigkeit erfordert (ca. 7 bis 10 Feuchtestufen) oder ob z. B. die Bestimmung des Minimalwertes im vollständig trockenen Zustand und / oder des Maximalwertes im gesättigten Zustand ausreicht.

Dichte bzw. Verdichtung

Aus dem vorigen Abschnitt ergibt sich, daß auch der Anteil des Porenvolumens am Gesamtvolumen einen Einfluß auf die Wärmeleitfähigkeit haben muß. Da die Matrix-Wärmeleitfähigkeiten von (Quarz-)Sanden i. a. über der Wärmeleitfähigkeit von Wasser und deutlich über der Wärmeleitfähigkeit von Luft liegen, ist die Wärmeleitfähigkeit umso höher, je geringer der Porenanteil in einem Material ist. Dies bedeutet, daß die Wärmeleitfähigkeit eines Materials umso höher wird, je besser es verdichtet ist bzw. je höher seine Dichte ist.

Letzteres gilt streng natürlich nur für Materialien gleicher Zusammensetzung; so kann zwar die Dichte eines natürlichen Sandmaterials durch die Zugabe von Zement künstlich erhöht werden, dies führt jedoch nicht unbedingt zu einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit. Der Grund liegt darin, daß Zement mit ca. 1.0 $Wm^{-1}K^{-1}$ eine im Vergleich zu Sanden relativ niedrige Matrix-Wärmeleitfähigkeit aufweist.

Unverdichtete, nur geschüttete Quarzsande erreichen im ausgetrockneten Zustand trotz der hohen Matrix-Wärmeleitfähigkeit des Quarzes nur Werte von ca. 0.3-0.6 $Wm^{-1}K^{-1}$. Erfahrungsgemäß läßt sich jedoch durch Verdichten die Wärmeleitfähigkeit mindestens um den Faktor 1,5 erhöhen.

Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, muß daher bei der Probenentnahme im Gelände darauf geachtet werden, die Struktur der Proben nicht zu verändern. Bei der Herstellung von Proben im Labor muß ein definierter Verdichtungsgrad eingehalten werden, der der späteren Verwendung entspricht. Ggf. müssen verschiedene Verdichtungsgrade untersucht werden, um den Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit eines konkreten Materials zu erfassen.

Kornverteilung

Für den Einsatz als Bettungs- oder Hinterfüllungsmaterial kommt es meist darauf an, eine möglichst hohe Wärmeleitfähigkeit zu erzielen. Hierzu wird ein Grundmaterial gewählt, das eine hohe Matrixwärmeleitfähigkeit besitzt, und dieses dann beim Einbau verdichtet. Ein Material lässt sich jedoch nur dann gut verdichten, wenn die Kornverteilung möglichst weit gestuft ist, d. h. einen möglichst hohen Ungleichförmigkeitsgrad aufweist. Konkrete Aussagen, welche Kornverteilung besser geeignet ist, sind jeweils nur für den konkreten Einzelfall möglich. Generell muß das Material jedoch einen Mindest-Feinanteil enthalten, der bei Bedarf auch durch Mischen mehrerer Sandsorten erreicht werden kann.

Inhomogenität natürlicher Materialien

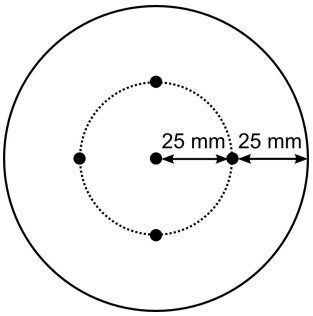
Wegen der Inhomogenität natürlicher Materialien sollten immer mehrere Proben entnommen bzw. hergestellt werden, und es sollte an mehreren Messpositionen je Probe gemessen werden. Wiederholungsmessungen an derselben Probe (z. B. bei verschiedenen Feuchtegehalten) sollten in jedem Durchgang an denselben Positionen erfolgen.

Sondenwahl

Bei bei feuchten Proben kann das enthaltene Wasser durch den Heizvorgang mobilisiert werden, der dadurch verursachte konvektive Wärmetransport macht i. d. R. die Messung unbrauchbar. Da bei Sonden für plane Oberflächen (Standard-HLQ) die Temperaturverteilung stabiler ist (die Heizquelle befindet sich an der Probenoberseite), tritt Konvektion seltener auf als bei Nadelsonden (Standard-VLQ), allerdings besteht die Gefahr, dass das Probenmaterial durch den Anpressdruck der Sonde verdichtet wird. Hierdurch würde sich die Wärmeleitfähigkeit erhöhen (s. o.). Wir empfehlen daher i. a. die Verwendung der Standard-VLQ mit einer möglichst niedrigen Heizleistung. Die Standard-HLQ kann nur bei ausreichend festen bzw. stark verdichteten Proben zum Einsatz kommen, die durch den Druck nicht weiter komprimiert werden können, wie z. B. Sedimentgesteinen.

Probengröße und Messpositionen

Für Nadelsonden-Messungen an Bodenproben soll gemäß ASTM D5334 eine Probe mit mindestens 51 mm (2 inch) Durchmesser und einer Länge von 200±30 mm verwendet werden. Die Nadelsonde ist dann entlang der Mittelachse zu positionieren. Bei üblichen Stechzylinder-Proben mit 100 mm Durchmesser empfehlen wir 5 Messpositionen vorzusehen (siehe Abb.), von denen mindestens 3 gemessen werden sollten, weil natürliche Materialien immer mehr oder weniger inhomogen sind und weil meist nicht an jeder Messposition ein ausreichender Kontakt zwischen Probe und Sonde besteht.



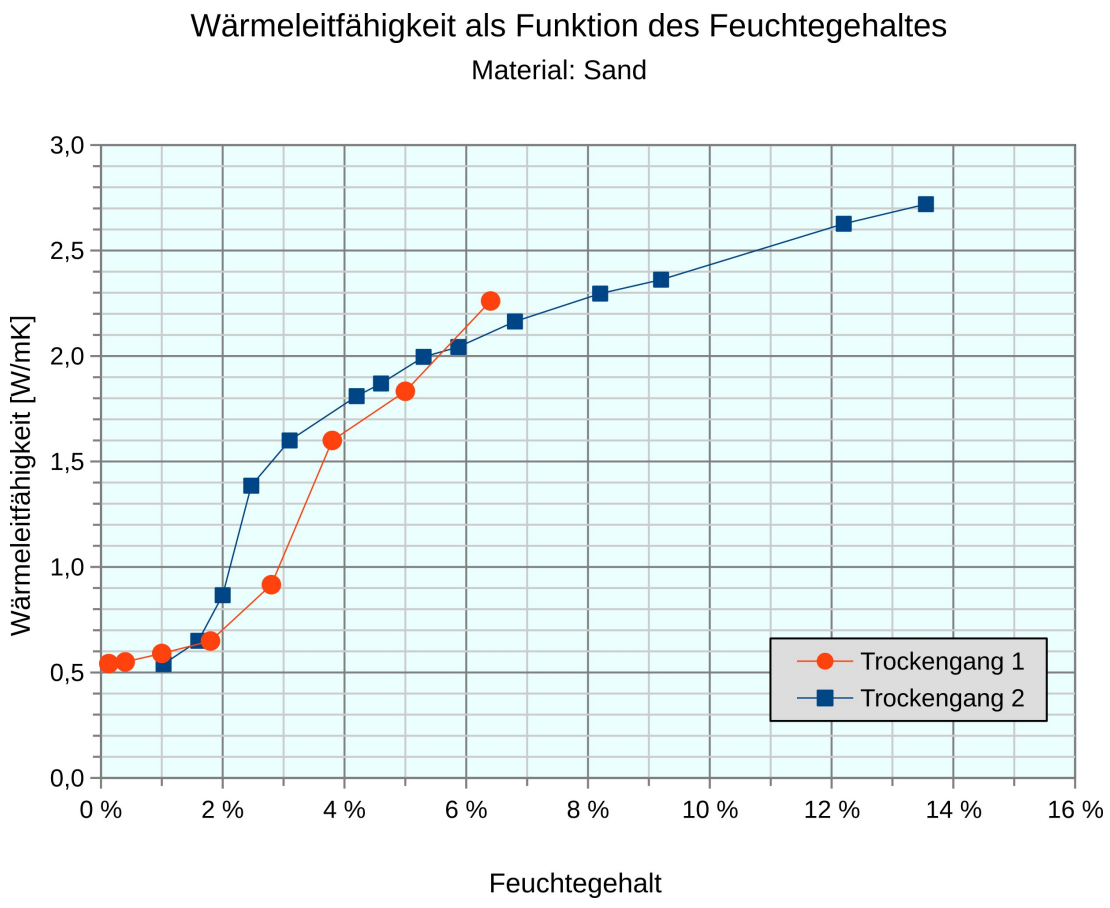
Probenpräparation

Bei Bodenproben und Sandmaterialien empfehlen wir für Nadel-Sonden die Verwendung von Führungsröhrchen. Dabei handelt es sich um unten geschlossene Stahlröhrchen mit Spitze, deren Innendurchmesser genau auf die Abmessungen der Standard-VLQ-Sonde abgestimmt ist (als Zubehör zu TK04 erhältlich). Die Röhrchen werden an den vorgesehenen Messpositionen in die Probe eingeschlagen, die Sonde wird mit dem mitgelieferten Kontaktmittel versehen und in das Führungsröhrchen gesteckt. Damit ist einerseits sichergestellt, daß Wiederholungsmessungen an identischen Messpositionen erfolgen, andererseits lässt sich so vermeiden, daß bei wiederholten Messungen an denselben Positionen die Löcher sich durch das Ein- und Ausstecken der Sonde aufweiten, so daß kein ausreichender Kontakt zwischen Sonde und Probe mehr gegeben ist. Zusätzlich ist die Sonde vor Beschädigungen geschützt (z. B. bei Materialien, die sehr grobe und scharfkantige Bestandteile enthalten, oder bei Proben mit bindigen Anteilen, die im getrockneten Zustand sehr hart werden können).

Kommt die Standard-HLQ-Sonde für plane Oberflächen zum Einsatz, ist bei feuchten Proben kein Kontaktmittel erforderlich, bei trockenen Proben kann die mitgelieferte Silikon-Paste verwendet werden (dünnflüssige Kontaktmittel würden in die Poren der Probe eindringen und den Messwert verfälschen). Die Probenoberfläche muß eben sein und sollte keine grobkörnigen und scharfkantigen Bestandteile enthalten, um eine Beschädigung der Sonde zu vermeiden.

Um bei gesättigten Proben ein Absetzen oder Auslaufen des enthaltenen Wassers zu vermeiden, kann es erforderlich sein, die Proben während der Messung in ein Wasserbad zu stellen. Hierbei ist zu beachten, daß die Anschlüsse der Sonden spritzwassergeschützt, aber nicht wasserdicht sind und daher nicht untergetaucht werden dürfen.

Beispiel für die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Feuchtegehalt

Dargestellt ist die Wärmeleitfähigkeit über dem Feuchtegehalt (Gewichtsprozent bezogen auf die feuchte Substanz) für einen Quarzsand. Die Probe wurde zunächst ausgehend vom Lieferzustand sukzessive getrocknet und bei verschiedenen Wassergehalten die Wärmeleitfähigkeit bestimmt. Dann wurde die Probe vollständig gesättigt und ein weiterer Trockengang mit Wärmeleitfähigkeitsmessungen in jeder Trockenstufe durchgeführt. Die Abweichungen zwischen den beiden Durchgängen beruhen darauf, daß es sich um in situ entnommene Proben handelte. Beim ersten Trockengang ist daher, bedingt durch Transport und Lagerung, von einer inhomogenen Feuchtigkeitsverteilung im Probeninneren auszugehen.

Die Kurve weist einen sehr steilen Anstieg zwischen ca. 1.5 und 3% Wassergehalt auf. Dieser Verlauf ist für Sandproben typisch, Lage, Steigung und absolute Meßwerte können jedoch stark variieren.