

## Gesättigte Wasserleitfähigkeit

Die  $k_{\text{sat}}$ -Werte werden vorzugsweise als  $pk_{\text{sat}}$ -Werte ( $= -\log_{10} k_{\text{sat}}$ ) mit einer Stelle nach dem Komma angegeben. Dabei muss für  $pk_{\text{sat}}$ -Werte zwingend m/s als Einheit verwendet werden. Gesättigte Leitfähigkeiten verschiedener Proben sind häufig lognormal verteilt. Der Mittelwert verschiedener Proben wird mit dem Median der  $pk_{\text{sat}}$ -Werte geschätzt oder mit dem gewichteten arithmetischen Mittelwert der  $pk_{\text{sat}}$ -Werte (gewichtet mit den Variationskoeffizienten der Einzelmessungen an einer Probe).



### Feldmethode: Bohrlochmethode

#### Vorgehen:

Der Boden wird vor Messbeginn mit Wasser gesättigt. Mit dem Rahmenbohrer werden drei gleich grosse Löcher (z.B. 7 cm Durchmesser und 30 cm Tiefe) ausgehoben. Bohrlochwand und -boden dürfen dabei nicht verschmiert werden. Der Abstand zwischen den einzelnen Bohrlöchern sollte mindestens 1 m betragen. Die Löcher werden mit Wasser gefüllt, der Wasserspiegel konstant gehalten und der dazu nötige Wasserbedarf bestimmt. Aus Wassermenge, Zeit und Bohrlochfläche wird mit Hilfe des Gesetzes von Darcy die gesättigte Wasserleitfähigkeit  $k_{\text{sat}}$  unter Feldbedingungen berechnet.

Am gleichen Loch sollten während einer Infiltration mehrere Volumen- und Zeitwerte bestimmt werden, um einen allfälligen Trend zu erkennen. Die gesättigte Wasserleitfähigkeit ergibt sich aus dem während der gesamten Messzeit infiltrierten Volumen. Der Messwert und der Fehler hängen somit von der Anfangs- und der Schlussmessung ab, während die Information der übrigen Messungen verloren geht. Es empfiehlt sich daher, die gesättigte Wasserleitfähigkeit aus den mit der Messdauer gemittelten Werten zu berechnen. Alternativ kann eine lineare Regression angepasst werden.

#### Kommentare:

Diese Methode wurde zuerst in gesättigten Böden verwendet, wo das Bodenwasser ins ausgepumpte Bohrloch fließt. Für den gesättigten wie ungesättigten Fall gibt es verschiedene Varianten dieser Methode. Zu letzteren gehören die Porchet-Methode (Wasserfluss durch Seiten- und Grundfläche des Bohrlochs) und die Guelph-Methode (Wasserfluss durch die Grundfläche des Bohrlochs und durch die Seitenfläche bis zu einer wählbaren Höhe über der Grundfläche). Beide Methoden ergeben einen Wert für die gesättigte Wasserleitfähigkeit des eingestauten Bereichs des Bohrlochs. Die Berechnung bei konstantem Fluss geschieht entweder unter der Annahme eines eindimensionalen Flusses (Porchet-Methode,  $pk_{\text{sat}}$ -Fehler  $\pm 0.3$  bis  $\pm 1$ ) oder eines dreidimensionalen Flusses (Guelph-Methode). Möglich ist auch die Messung bei fallendem Wasserspiegel. Die Anwendung der nur für dreidimensionalen Fluss existierenden Lösung zur Berechnung der gesättigten Leitfähigkeit erfolgt in diesem Falle mittels (numerischer) Integration.

## Labormethode fallende Druckhöhe

### Methode:

*Die Methode wird ausführlich beschrieben, da die in den Referenzmethoden beschriebene Methode ungenügend ist.*

Weniger durchlässige Proben sollten mit einem ausreichend stabilen Paraffinmantel versehen werden. Auf diese Weise wird vermieden, dass Wasser zwischen der Probe und der Zylinderwand fließen kann. Die Probenlänge sollte 10 cm betragen. Sofern die Probe zu lang oder das untere Ende der Probe nicht eben ist, wird dies durch Brechen, nicht Schneiden der Probe korrigiert, damit die Oberfläche der Probe nicht verschmiert wird. Während ein Verschmieren bei der Grobporenbestimmung nur die Reaktionszeit der Probe verlängert, erniedrigt es bei der Leitfähigkeitbestimmung den Messwert selber.

Die Sättigung der Proben erfolgt im Wasserbad mit Leitungswasser, allenfalls in zwei Schritten (zur Hälfte bis Dreiviertel, dann vollständig). Eine gut gesättigte Probe ist am oberen Ende feucht und glänzt daher.

Zur Leitfähigkeitsbestimmung einer Bodenprobe gehört auch die Bestimmung der Wasserleitfähigkeit des leeren Permeameters. Sofern die Apparatur nicht verändert wird, genügt die gelegentliche Nachmessung. Ist die Leitfähigkeit von Apparatur und Probe zusammen kleiner als ein Zehntel der Wasserleitfähigkeit der Apparatur allein, kann der Einfluss der Apparatur ignoriert werden. Ist sie grösser, muss der Messwert korrigiert werden, indem der Fließwiderstand der Probe aus der Differenz zwischen gesamtem Fließwiderstand und Fließwiderstand der Apparatur allein ermittelt wird.

Weiter muss das Permeameter auf Dichtigkeit geprüft werden. Sofern mit paraffinierten Proben gearbeitet wird, kann ein Paraffinprobenkörper verwendet werden. Die damit gemessene Wasserleitfähigkeit darf höchstens einen Zehntel der kleinsten mit einer Probe gemessenen Leitfähigkeiten betragen.

Wegen der Gefahr der Auswaschung oder Verschlammung des Bodens sollte die Messung zuerst mit einem Gradienten von etwa eins erfolgen. Bei Bedarf kann der Gradient anschliessend erhöht werden. Wenn möglich sollte die Differenz zwischen den beiden Druckhöhen grösser als 2 cm und die

Messzeit grösser als 20 s sein, um den Messfehler gering zu halten. Die Messung an einer Probe sollte dreimal wiederholt werden, um eine allfällige Drift (Verschlammung/Auswaschung) erfassen zu können. Beim Fehlen einer Drift wird das arithmetische Mittel der  $k_{\text{sat}}$ -Werte der Probe berechnet.

Es ist für die Interpretation der gemessenen Werte wichtig, dass der Zustand der Probe nach der Messung beurteilt wird. Von besonderer Bedeutung sind der Zustand des Paraffinmantels (Deformation, Risse) oder bei der Messung ohne Paraffinmantel der Zustand der Querschnittsflächen der Probe nach der Entnahme aus dem Stahlzylinder (Löcher, Steine).

### Probleme:

Diese Messmethode der gesättigten Wasserleitfähigkeit ist ausführlich beschrieben, da die Probleme bei der Durchführung meist völlig unterschätzt werden. Die Messung ist fehleranfällig. Auch sind ihre Resultate wegen der ungeheuren Bandbreite der möglichen Wasserleitfähigkeiten (1 zu 100 000) nicht leicht interpretierbar.

Bei der Probenahme und bei der weiteren Behandlung können leicht Risse in der Bodenprobe entstehen. Sofern sie in Längsrichtung auftreten, zum Beispiel Entlastungsrisse im Profil, führen sie zu einer unnatürlich hohen Leitfähigkeit. Solche Proben müssen unbedingt verworfen werden. Querrisse hingegen, zum Beispiel Entlastungsrisse hinter der Schneide, sichtbar bei der Verwendung von Kunststoffzylindern, spielen selten eine Rolle, da sie die Leitfähigkeit nicht vergrössern. Längsrisse können vermieden werden, wenn nicht entlang einer Profilseite, sondern in den Ecken der Profilgrube beprobt wird.

Obwohl vor allem die Leitfähigkeit der Bodenmatrix interessiert, sollten Proben mit sichtbaren Makroporen nicht verworfen werden. Die Prognose der Wasserleitfähigkeit aufgrund des Aussehens der Probe hat sich meist als unzuverlässig erwiesen. Nach der Messung sind die Werte von Proben mit durchgängigen Makroporen bei der statistischen Auswertung leicht erkennbar und können, sofern gewünscht, verworfen werden.

Die Entnahme und Vorbereitung von so genannten ungestörten Proben erfordert bei der Bestimmung der ge-

sättigten Wasserleitfähigkeit ausserordentliche Sorgfalt. Verschmierte Bereiche an den Probenenden bewirken, dass potentiell wasserleitende Poren verschlossen sind, was zu einer Verringerung der Leitfähigkeit führt. Der Einfluss ist gravierend und führt zu völlig falschen Werten. Im Porenraum eingeschlossene Luftblasen führen ebenfalls zu einer Verkleinerung der Leitfähigkeit, weil nicht mehr die gesättigte Wasserleitfähigkeit gemessen wird.

Die Genauigkeit der Ergebnisse der einzelnen Methoden hängt verständlicherweise von der Genauigkeit der verwendeten Messgrössen ab. Diese wirken sich jedoch unterschiedlich aus. Um abschätzen zu können, mit welcher Genauigkeit die verwendeten Messgrössen erhoben werden müssen, damit die Durchlässigkeit mit der gewünschten Genauigkeit berechnet werden kann, ist eine Fehlerrechnung zwingend nötig.

## Literatur

Amoozegar A. & Warrick A. W., 1986. Hydraulic conductivity of saturated soils: field methods. In: Klute A. (ed.). Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2nd edition. ASA, Madison, USA. S. 735–770.

Klute A. & Dirksen C., 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. In: A. Klute (ed.). Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2nd edition. ASA, Madison, USA. S. 687–734.

Tokunaga T. K., 1988. Laboratory permeability errors from annular wall flow. Soil Sci. Soc. Am. J. 52: S. 24–27.

Schweizerische Referenzmethoden der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten (FAL), 1996. Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Bodenproben mit ungestörtem Gefüge. Methode PYZYL-WD (Zylinderproben). Band 2. Zürich-Reckenholz.

Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich, 2000. Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit  $k_{\text{sat}}$  im Labor – Laboranleitung. Amt für Landschaft und Natur, Zürich.

