

Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich

Amt für Landschaft und Natur

Volkswirtschaftsdirektion

# Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit

## $k_{\text{sat}}$

Fachbericht September 1998

Projektleitung:

Samuel Isler

Fachstelle Bodenschutz

8090 Zürich

Projektausführung und Bericht:

Bernhard Buchter

Ambio GmbH

Luzius Matile

Fachstelle Bodenschutz

Wildbachstr. 46  
8008 Zürich

8090 Zürich

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
1 Auftrag	3
2 Einleitung	3
3 Theorie	4
3.1 Feldmethoden	4
3.2 Labormethoden	5
3.3 Fehlerrechnung	6
3.4 "Leitfähigkeit" des Permeameters	8
3.5 Einfluss der Dichte und der Viskosität des Wassers	8
3.6 Aenderung der Leitfähigkeit bei mehrmaligem Messen	9
4 Besuchte Labors	11
5 Bewertung der einzelnen Methoden	12
6 Empfehlung	15
Verdankung	16
Literatur	16
Anhang	

## Zusammenfassung

Die Fähigkeit des Bodens, Wasser und Luft zu leiten, ist für das Pflanzenwachstum von eminenter Bedeutung. Die Leitfähigkeit ist u. a. von der Textur und der Struktur des Bodens abhängig und kann bei unsachgemässer Nutzung des Bodens beeinträchtigt werden.

Die Wasserleitfähigkeit schwankt von Boden zu Boden sehr stark. In einem gut durchlässigen Boden beträgt die Leitfähigkeit im gesättigten Zustand 1 mm/s und mehr, in einem schlecht durchlässigen Bruchteile von 1  $\mu\text{m/s}$ . Zudem schwankt die Leitfähigkeit am gleichen Standort in erheblichen Masse. Je schwerer durchlässig ein Boden ist, desto wichtiger werden Makroporen, desto schwieriger wird aber auch die Bestimmung eines repräsentativen Wertes für die Leitfähigkeit.

Leitfähigkeiten können im Feld und im Labor bestimmt werden. Im Feld sind die Randbedingungen problematisch, dafür wird der Boden in natürlicher Lagerung ohne Störung untersucht. Im Labor sind zwar die Randbedingungen eindeutig, dafür stellen sich u. a. die Probleme, ob Proben ungestört entnommen werden können, wie sich die Länge der Probe auf den Messwert auswirkt (Einfluss der Makroporen) und ob der Wasserfluss zwischen Probe und Zylinder unterbunden werden kann.

Im Labor werden zwei Methoden angewandt, **konstante** und **fallende** Druckhöhe. Bei der Methode der **konstanten** Druckhöhe bleibt die Druckhöhe und damit der Druckgradient in der Probe konstant, indem die Höhe des Wasserspiegels auf der zufließenden Seite konstant (Boyle-Mariottesche Flasche) oder fast konstant (grosser Querschnitt) gehalten wird. Gemessen wird die Menge des ausgeflossenen Wassers. Die Methode ist optimal bei Proben mit grosser Leitfähigkeit, weil mit kleinem Gradienten gemessen werden kann und bei vernünftigem Zeitaufwand genügend grosse Wassermengen die Probe durchfliessen. Bei der Methode der **fallenden** Druckhöhe senkt sich der Wasserspiegel auf der zufließenden Seite während der Messung, die Druckhöhe und damit auch der Gradient nehmen ab. Gemessen wird die Druckhöhe vor und nach der Messung und damit auch die Menge des zugeflossenen Wassers. Diese Methode wird wegen der einfachen Messung kleiner Wassermengen und des üblicherweise grösseren Gradienten häufig bei Proben mit geringer Leitfähigkeit angewandt. Beide Methoden können indes mit entsprechendem Aufwand für alle auftretenden Leitfähigkeiten angepasst werden.

Für die Methode der **konstanten** Druckhöhe ist von **Eijkelkamp** ein Gerät erhältlich, mit dem 5, 10 oder auch mehr Proben auf einmal gemessen werden können. Die Apparatur kann an die Zylinder der Fachstelle Bodenschutz angepasst werden, da der Durchmesser der Zylinder etwa der mittleren Grösse der Eijkelkamp-Zylinder entspricht. Der Aufwand dazu ist aber nicht klar.

Ebenfalls nach der Methode der **konstanten** Druckhöhe arbeiten die eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten. Für jede gleichzeitig zu messende Probe ist eine separate Apparatur nötig. Dieses Permeameter muss hergestellt werden. Es kann auf jede Probengrösse angepasst werden.

Für die Methode der **fallenden** Druckhöhe kann die Methode des **ItOe** (Institutes für terrestrische Oekologie, Vorbild: Soilmoisture-Apparatur) übernommen werden. Für jede gleichzeitig zu messende Probe ist eine separate Apparatur nötig. Da es sich um eine Einzelanfertigung handelt, kann sie auf jede Probengrösse angepasst werden.

Die ItOe-Apparatur hat den Vorteil, dass der Wasserfluss zwischen Probe und Zylinder (Randeffekte) immer oder im Zweifelsfall wirksam unterbunden werden kann. Diese Möglichkeit ist zwar nicht auf diese Methode beschränkt, ist aber bei der Eijkelkamp-Apparatur mit vernünftigem Aufwand nicht möglich. Zudem ist mit dieser Apparatur auch die Messung nach der Methode der konstanten Druckhöhe möglich.

Für die Fachstelle Bodenschutz empfehlen wir daher, die Methode der fallenden Druckhöhe des ItOe zu übernehmen.

## 1 Auftrag

Bei der Beurteilung von Verdichtungsschäden sowie der Belastbarkeit der Böden spielt die Durchlässigkeit für Wasser und Luft eine zentrale Rolle. Um den Anforderungen des neuen Umweltschutzgesetzes gerecht zu werden, will die Fachstelle Bodenschutz des Kantons Zürich eine Methode zur Messung der gesättigten Leitfähigkeit ( $k_{\text{sat}}$ ) im Labor einführen.

Am 27. April 1998 wurde Herr Bernhard Buchter, Ambio Zürich, von der Fachstelle Bodenschutz beauftragt, die in Zukunft anzuwendende Methode zu evaluieren und einen Bericht mit Empfehlung zu verfassen. Die Arbeit wurde in Zusammenarbeit mit Luzius Matile von der Fachstelle Bodenschutz ausgeführt.

## 2 Einleitung

Über dem Grundwasserspiegel ist der Porenraum nicht wassergesättigt. In diesem Bereich kommt neben der festen (Bodenmaterie) und flüssigen (Bodenwasser) auch die gasförmige (Bodenluft) Phase vor. Die meisten Pflanzen und Lebewesen sind auf die Bodenluft angewiesen, weil nur dann Atmung möglich ist. Die Verteilung der flüssigen und gasförmigen Phase wird von der Porenstruktur des Bodens beeinflusst. Die primären Poren (Packungshohlräume) hängen von der Textur, d. h. vom Sand-, Schluff- und Tongehalt ab, sekundäre Poren werden durch Aggregation, Bioturbation, Wurzelwachstum und Schrumpfprozesse (Austrocknung) gebildet. Sekundäre Poren sind grösser, länger und weniger gewunden als Primärporen. Sie sind für den Wasser- und Lufttransport besonders wichtig, aber auch weniger stabil als Primärporen. Durch die landwirtschaftliche Bearbeitung können sie gefördert, aber auch reduziert werden. Sekundäre Poren sind vor allem in schluffigen und tonigen, also feinkörnigen Böden wichtig, weil in diesen Böden die primären Poren klein sind. Werden die grossen Poren zerstört, wird die Fähigkeit des Bodens, Wasser zu leiten, vermindert, und der Sättigungsgrad nimmt auf Grund unseres humiden Klimas zu. Die damit einhergehende Abnahme des Luftgehaltes kann das Pflanzenwachstum beeinträchtigen.

Um Einwirkungen der Bodenbearbeitung zu erfassen oder allgemein die Struktur des Porenraumes zu beschreiben, kann die Wasserleitfähigkeit des Bodens mit einem Permeameter gemessen und interpretiert werden.

### 3 Theorie

Nach dem Gesetz von Darcy (1856) ist die Flusssichte  $q$ , auch Filtergeschwindigkeit genannt, dem hydraulischen Gradienten  $i$  des totalen Wasserpotentials proportional:

$$q = -k i$$

Das Negativzeichen bedeutet, dass der Wasserfluss entgegengesetzt zum Gradienten stattfindet (wird im folgenden weggelassen). Der Proportionalitätsfaktor  $k$  heisst Wasserleitfähigkeit und wird für den gesättigten Fall mit  $k_{\text{sat}}$  bezeichnet. Der Gradient berechnet sich aus der Änderung des totalen Wasserpotentials  $H$  über die betrachtete Strecke  $dz$ :

$$i = \frac{dH}{dz}$$

Im Gleichgewicht über einem Wasserspiegel beträgt er unter natürlichen Bedingungen in senkrechter Richtung +1 (sofern die  $z$ -Achse nach oben abgetragen wird, sonst -1) und weicht in den meisten Fällen nicht stark davon ab. Die gesättigte Wasserleitfähigkeit schwankt von Boden zu Boden sehr stark. In einem gut durchlässigen Boden beträgt die Leitfähigkeit im gesättigten Zustand 1 mm/s und mehr, in einem schlecht durchlässigen Bruchteile von 1  $\mu\text{m/s}$ . Zudem schwankt die Leitfähigkeit am gleichen Standort in erheblichen Masse. Je schwerer durchlässig ein Boden ist, desto wichtiger werden Grob- und Makroporen, also die Sekundärstruktur, desto schwieriger wird aber auch die Bestimmung eines repräsentativen Wertes für die Leitfähigkeit.

#### 3.1 Feldmethoden

Leitfähigkeiten können im Feld und im Labor bestimmt werden. Der grosse Vorteil der Bestimmung im Feld liegt darin, dass der Boden in natürlicher Lagerung ohne Störung untersucht wird. Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten: entweder wird die Leitfähigkeit mittels Infiltration bestimmt oder nach der Aufsättigung mittels Analyse des anschliessenden Drainierens.

Bei der Infiltrationsmethode im Feld wird ein Metallrohr definierten Innendurchmessers in den Boden gedrückt oder geschlagen und mit Wasser gefüllt. Anschliessend wird die in den Boden infiltrierende Wassermenge pro Zeit gemessen. Ueblicherweise wird der Wasserstand konstant gehalten, möglich ist aber auch ein fallender Wasserspiegel (wie bei der weiter unten erläuterten Labormethode). Dieses auch als Einfachringinfiltrometer bezeichnete Gerät wird u. a. von der Bodenschutzfachstelle des Kantons Bern verwendet (BSF, 1996). Problematisch sind bei dieser Methode die Randbedingungen, da nicht klar ist, wie gross der Fliessquerschnitt ist, und wie gross der Anteil des Wassers ist, der zur Aufsättigung des

Bodens verbraucht wird. Daher wird häufig ein zweites, grösseres konzentrisches Metallrohr verwendet und der Zwischenraum ebenfalls mit Wasser gefüllt. Damit wird ein grösseres Volumen bewässert, und der Fluss durch den bereits gesättigten Boden (zentrales Rohr) ist von der Infiltration in den noch nicht gesättigten Boden (äusseres Rohr) besser zu trennen.

Bei der anderen Feldmethode wird der Boden zuerst mit Wasser gesättigt und anschliessend während der Drainage die im Boden über einem bestimmten Niveau vorhandene Wassermenge mit einem geeigneten Gerät (Tensiometer und Desorptionskurve, Neutronensonde, TDR) und mit Tensiometern der hydraulische Gradient des totalen Wasserpotentials auf der Höhe dieses Niveaus zu verschiedenen Zeitpunkten bestimmt (Instantaneous profile method, Rose et al., 1965). Die Bodenoberfläche wird mit Folien gegen Verdunstung geschützt. Da alles Wasser somit nach unten wegfliesst und dessen Menge gemessen wird, kann mittels des ebenfalls gemessenen Gradienten und des Darcy-Gesetzes die Leitfähigkeit bestimmt werden. Werden Wassergehalte und Gradienten in verschiedenen Tiefen gemessen, können die Leitfähigkeiten verschiedener Bodenhorizonte berechnet werden. Diese Methode liefert die Leitfähigkeiten des ungestörten Bodens im gesättigten (am Anfang) und des ungesättigten Bodens, sie ist indes ausserordentlich aufwendig.

### 3.2 Labormethoden

Damit die gesättigte Leitfähigkeit im Labor bestimmt werden kann, müssen Bodenproben im Feld entnommen, präpariert und ins Labor transportiert werden. Labormethoden brauchen weniger Zeit und können unabhängig von der Witterung ausgeführt werden. Zudem sind die Randbedingungen eindeutig, ausser dass ein Wasserfluss zwischen Probe und Zylinderwand auftreten kann, der jedoch mit geeigneten Methoden unterbunden werden kann. Da die Proben nicht mehr in der ursprünglichen Umgebung eingebunden sind, kann sich die Länge der Probe auf den Messwert auswirken, wenn grobe Poren länger als die Proben sind. Solche Poren führen bei Labormessungen zu hohen, unnatürlichen Durchlässigkeiten.

Leitfähigkeiten werden im Labor mit Permeametern entweder nach der Methode der **konstanten** Druckhöhe oder der Methode der **fallenden** Druckhöhe bestimmt. Bei der Methode der **konstanten** Druckhöhe bleibt die Druckhöhe und damit der Druckgradient in der Probe konstant, indem die Höhe des Wasserspiegels auf der zufließenden Seite konstant (Boyle-Mariottesche Flasche) oder fast konstant (grosser Querschnitt) gehalten wird. Die Menge des ausgeflossenen Wassers  $V$  wird während der Zeit  $t$  gemessen, und die Leitfähigkeit  $k_{sat}$  mittels des Darcy-Gesetzes wie folgt berechnet:

$$k_{sat} = \frac{VL}{At(H_2 - H_1)} \quad (1)$$

wobei  $A$  die Fläche und  $L$  die Länge der Probe bedeuten und  $H_2 - H_1$  die Druckdifferenz zwischen Zu- und Abfluss. Die Methode ist optimal bei Proben mit grosser Leitfähigkeit, weil



mit kleinem Gradienten gemessen werden kann, um Verschlammung zu vermeiden, und bei den üblicherweise verwendeten Vorratsgefässen grosse Wassermengen einfach messbar sind.

Bei der Methode der **fallenden** Druckhöhe senkt sich der Wasserspiegel auf der zufließenden Seite während der Messung, die Druckhöhe und damit auch der Gradient nehmen ab. Gemessen wird die Druckhöhe zu Beginn und am Ende der Messung und damit auch die Menge des zugeflossenen Wassers. Berechnet wird die Leitfähigkeit, indem

$$\frac{dV}{dt} = \frac{k_{sat} H A}{L} \quad (2)$$

über die Zeit und die Druckhöhe integriert wird. Dabei wird  $dV$  durch  $a dH$  ersetzt, wobei  $a$  den Querschnitt des Wasservorratsgefässes (üblicherweise eine Burette) bezeichnet. Daraus folgt:

$$k_{sat} = \frac{a L}{A t} \ln \frac{H_1}{H_2} \quad (3)$$

Dabei bedeutet  $H_1$  die Druckhöhe zu Beginn und  $H_2$  am Ende der Messung. Diese Methode wird wegen der einfachen Messung kleiner Wassermengen mit der Burette und des üblicherweise grösseren Gradienten häufig bei Proben mit geringer Leitfähigkeit angewandt.

### 3.3 Fehlerrechnung

Die Genauigkeit der Ergebnisse der einzelnen Methoden hängen logischerweise von der Genauigkeit der verwendeten Messgrössen ab. Sie wirken sich jedoch unterschiedlich aus. Um abschätzen zu können, welche Messgrössen mit welcher Genauigkeit erhoben werden müssen, damit die Genauigkeit der berechneten Durchlässigkeit erreicht wird, ist eine Fehlerrechnung nötig. Dazu wird die entsprechende Gleichung nach der Messgrösse abgeleitet, mit dem vermuteten oder bekannten Fehler dieser Messgrösse multipliziert und dann quadriert. Anschliessend werden die Terme summiert und die Wurzel daraus berechnet.

Die Grösse des Fehlers für die Methode der **konstanten** Druckhöhe berechnet sich somit wie folgt :

$$Fehler = \left( \left( \frac{L}{A t (H_2 - H_1)} \Delta V \right)^2 + \left( \frac{V}{A t (H_2 - H_1)} \Delta L \right)^2 + \left( \frac{-V L}{A^2 t (H_2 - H_1)} \Delta A \right)^2 + \right. \\ \left. \left( \frac{-V L}{A t^2 (H_2 - H_1)} \Delta t \right)^2 + \left( \frac{-V L}{A t (H_2 - H_1)^2} \Delta H_2 \right)^2 + \left( \frac{-V L}{A t (H_2 - H_1)^2} \Delta H_1 \right)^2 \right)^{0.5} \quad (4)$$

Für die Masse der von der Fachstelle Bodenschutz verwendeten 100-ml-Zylinderproben ergeben sich für verschiedene Leitfähigkeiten die in der Tabelle 1 zusammengestellten Fehler.

Tab. 1 Fehler der mit der konstanten Druckhöhe bestimmten Werte in Abhängigkeit von der Durchlässigkeit. Höhe der Probe  $L = 3.9$  cm, Querschnittsfläche der Probe  $A = 26$  cm<sup>2</sup>, durchgeflossenes Wasservolumen  $V = 100$  ml, Druckdifferenz  $H_2 - H_1 = 10$  cm. Angenommene Fehler:  $\Delta V = 0.5$  ml,  $\Delta L = 0.1$  cm,  $\Delta A = 1$  cm<sup>2</sup>,  $\Delta t = 2$  s,  $\Delta H_1 = \Delta H_2 = 0.1$  cm.

$k_{\text{sat}}$	Messdauer	Fehler	
[m/s]	[s]	[m/s]	[%]
$10^{-3}$	15	$1.4 \cdot 10^{-4}$	14
$10^{-4}$	150	$5.6 \cdot 10^{-6}$	6
$10^{-5}$	1500	$5.4 \cdot 10^{-7}$	5
$10^{-6}$	15000	$5.4 \cdot 10^{-8}$	5
$10^{-7}$	150000	$5.4 \cdot 10^{-9}$	5

Die Grösse des Fehlers für die Methode der **fallenden** Druckhöhe berechnet sich wie folgt :

$$\begin{aligned}
 \text{Fehler} = & \left( \left( \frac{L}{At} \ln \frac{H_1}{H_2} \Delta a \right)^2 + \left( \frac{a}{At} \ln \frac{H_1}{H_2} \Delta L \right)^2 + \left( \frac{-aL}{A^2 t} \ln \frac{H_1}{H_2} \Delta A \right)^2 + \right. \\
 & \left. \left( \frac{-aL}{At^2} \ln \frac{H_1}{H_2} \Delta t \right)^2 + \left( \frac{aL}{AtH_1} \Delta H_1 \right)^2 + \left( \frac{-aL}{AtH_2} \Delta H_2 \right)^2 \right)^{0.5}
 \end{aligned} \tag{5}$$

Für die Masse der von der Fachstelle Bodenschutz verwendeten 100-ml-Zylinderproben ergeben sich für verschiedene Leitfähigkeiten die in der Tabelle 2 zusammengestellten Fehler.

Die einzelnen Terme in den Gleichungen (4) und (5) hängen von der Genauigkeit der einzelnen Eingabegrössen ab und sind daher für eine Verbesserung der Genauigkeit unterschiedlich wichtig. Details dazu sind ebenfalls im Anhang zu finden.

Da bei einer Leitfähigkeit von  $10^{-3}$  m/s die Messdauer gleich lang ist wie der angenommene Messfehler der Zeit, ergibt sich ein Fehler der daraus berechneten Leitfähigkeit von 95 % (Tab. 2). In diesem Falle wäre es am einfachsten, die Querschnittsfläche der Burette zu vergrössern.

Tab. 2 Fehler der mit der fallenden Druckhöhe bestimmten Werte in Abhängigkeit von der Durchlässigkeit. Höhe der Probe  $L = 3.9$  cm, Querschnittsfläche der Probe  $A = 26$  cm<sup>2</sup>, Fläche der Burette  $a = 0.8$  cm<sup>2</sup>, Anfangsdruckhöhe  $H_1 = 6$  cm, Schlussdruckhöhe  $H_2 = 1$  cm. Angenommene Fehler:  $\Delta a = 0.01$  cm<sup>2</sup>,  $\Delta L = 0.1$  cm,  $\Delta A = 1$  cm<sup>2</sup>,  $\Delta t = 2$  s,  $\Delta H_1 = \Delta H_2 = 0.1$  cm.

$k_{\text{sat}}$	Messdauer	Fehler	
		[m/s]	[%]
[m/s]	[s]	[m/s]	[%]
$10^{-3}$	2	$9.5 \cdot 10^{-4}$	95
$10^{-4}$	21	$1.3 \cdot 10^{-5}$	13
$10^{-5}$	211	$8.7 \cdot 10^{-7}$	9
$10^{-6}$	2114	$8.6 \cdot 10^{-8}$	9
$10^{-7}$	21135	$8.6 \cdot 10^{-9}$	9

### 3.4 "Leitfähigkeit" des Permeameters

Mit einem Permeameter kann eine bestimmte, maximale Leitfähigkeit gemessen werden, da es auch ohne Probe dem Wasserfluss Widerstand bietet. Dieser Widerstand hängt ab von den Durchmessern der zuführenden und wegführenden Schläuche und Schlauchverbindungen, von der Grösse des Vorratsgefässes (sofern es klein ist wie im Falle einer Burette) und von der Platte, auf der die Probe ruht und von welcher sie abgedeckt ist. Der Widerstand des Permeameters kann unberücksichtigt bleiben, sofern der Druckabfall über die Probe selber bestimmt wird, indem der Druck am oberen und unteren Rand der Probe gemessen wird. Die andere Möglichkeit besteht darin, die "Leitfähigkeit" des Permeameters alleine zu messen und die Messergebnisse inklusive Probe zu korrigieren, wie von Klute and Dirksen (1986) dargestellt. Dort wird indes der Widerstand der Schläuche vernachlässigt. Am einfachsten ist es, gemessene Leitfähigkeiten von Proben, die nicht mindestens 10-mal kleiner als diejenige des Permeameters ohne Probe sind, nicht zu berücksichtigen, sofern nicht die Leitfähigkeit des Permeameters vergrössert werden kann.

### 3.5 Einfluss der Dichte und der Viskosität des Wassers

Die Leitfähigkeit hängt einerseits vom durchflossenen Medium und andererseits von der Flüssigkeit ab. Die von der Flüssigkeit unabhängige Leitfähigkeit wird intrinsische Leitfähigkeit  $K$  genannt. Die gesättigte Leitfähigkeit berechnet sich aus letzterer wie folgt:

$$k_{\text{sat}} = \frac{K \rho_w g}{\eta_w} \quad (6)$$

wobei  $\eta_w$  die dynamische Viskosität,  $\rho_w$  die Dichte des Wassers und  $g$  die Erdbeschleunigung bezeichnet. Die mit Wasser gemessene Leitfähigkeit hängt somit von der Dichte als auch der dynamischen Viskosität ab. Erstere variiert wenig und nimmt von 0°C auf 30°C von 999.9 kg/m<sup>3</sup> auf 995.6 kg/m<sup>3</sup> ab. Diese Änderung ist vernachlässigbar, nicht hingegen diejenige der Viskosität. Sie beträgt 1.79 mPas bei 0°C, 1.31 mPas bei 10°C, 1.00 mPas bei 20°C und 0.80 mPas bei 30°C. Die Abnahme der dynamischen Viskosität beträgt allein zwischen 10°C und 20°C rund 25 %, entsprechend nimmt die gemessene gesättigte Leitfähigkeit bei konstanter intrinsischer Leitfähigkeit zu (siehe auch Anhang). Daraus folgt, dass die Temperatur des verwendeten Wassers gemessen und die Messergebnisse korrigiert werden sollten, sofern die Temperatur um mehr als  $\pm 5^\circ\text{C}$  von einer vorgegebenen Temperatur (z. B. 20°C) abweicht.

### 3.6 Änderung der Leitfähigkeit bei mehrmaligem Messen

Wird die gleiche Probe mehrmals gemessen, besteht die Gefahr, dass sie verschlammte und daher die gemessene Leitfähigkeit abnimmt. Um die Leitfähigkeiten zu bestimmen, messen Studenten am Institut für terrestrische Ökologie bei ihren Übungen mehrmals die Zeiten, die es braucht, bis eine bestimmte Menge Wasser die Probe durchflossen hat. Die Ergebnisse zeigen im Normalfall keine Änderung der Durchflusszeit (Abb. 1). Die meisten Zeiten bleiben konstant, einige nehmen zu, andere ab. Daraus folgt, dass an den gleichen Proben zuerst die Leitfähigkeit und dann die Desorptionskurve bestimmt werden kann. Nur wenn sich bei aufeinanderfolgenden Messungen an der gleichen Probe die Durchflusszeiten stark ändern oder das ausfließende Wasser getrübt ist, sollte die Probe nicht mehr weiter verwendet werden. Die umgekehrte Reihenfolge (zuerst Desorptionskurve, dann Leitfähigkeit) ist vermutlich weniger geeignet, da bei der Bestimmung der Desorptionskurve bei hohen Saugspannungen die Porenstruktur verändert werden kann.

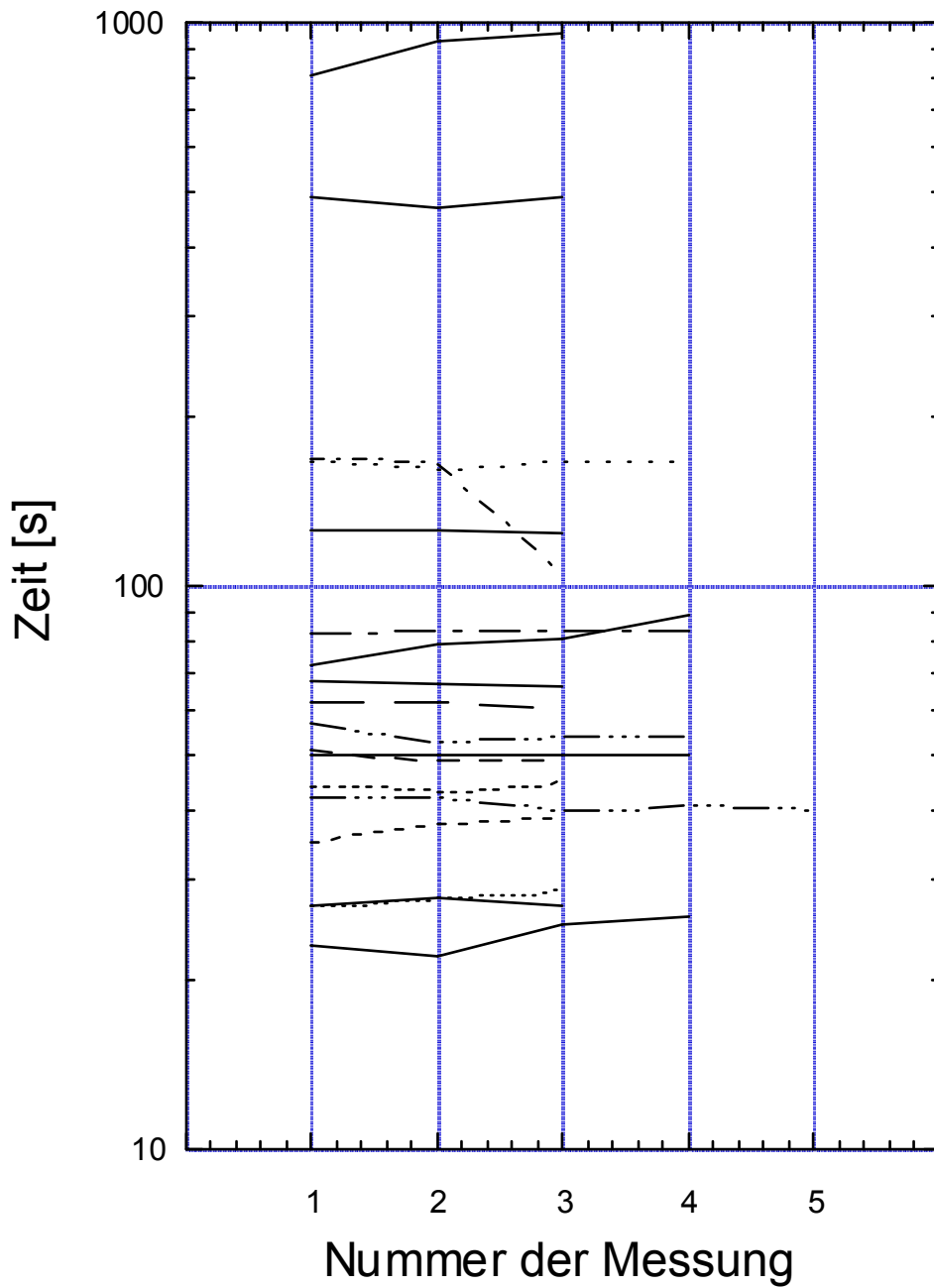


Abb. 1 Aufeinanderfolgende Messungen der Durchflusszeit, gemessen von Studenten im Rahmen des bodenphysikalischen Praktikums des ItOe im WS 92/93. Standort: Hönningerberg, Braunerde. Messung in 10 cm Tiefe ( $A_H$ -Horizont) und 35 cm Tiefe ( $B_t$ -Horizont).

## 4 Besuchte Labors

Zur Besichtigung verschiedenener Apparaturen wurden die Labors der Firma BABU in Zürich, der eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau Reckenholz (FAL) und des Institutes für terrestrische Oekologie (ItOe) der ETH Zürich besucht.

Die Firma BABU verwendet die bei **Eijkelkamp**, Wageningen, käufliche Apparatur. Nach der Methode der **konstanten** Druckhöhe können 25 Proben auf einmal gemessen werden. Die Proben haben eine Höhe von 5.1 cm und einen Durchmesser von 5.0 cm. Bei Eijkelkamp sind Geräte für 5, 10 und mehr Proben für drei verschiedene Zylindergrößen erhältlich. Die Apparatur müsste an die Zylinder der Fachstelle Bodenschutz angepasst werden.

Die eidgenössische Forschungsanstalt **Reckenholz** verwendet ebenfalls die Methode der **konstanten** Druckhöhe. Diese Methode ist in den Referenzmethoden der eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten beschrieben. Die Proben haben eine Höhe von 4.2 cm und einen Durchmesser von 5.5 cm. Diese Methode ist nicht käuflich, sondern muss von einer Werkstatt hergestellt werden. Die Apparatur könnte daher ohne weiteres an die von der Fachstelle Bodenschutz verwendeten Probenzylinder angepasst werden.

Das **ItOe** (Institut für terrestrische Oekologie) verwendet die Methode der **fallenden** Druckhöhe. Die Proben sind 10 cm lang und haben einen Durchmesser von 5.5 cm. Um den möglichen Wasserfluss zwischen Probe und Zylinderwand (Randeffekt) zu verhindern, werden die Proben im Labor aus dem Transportzylinder genommen und die Aussenseiten mit Paraffin bestrichen. In der Messapparatur wird ein Gummischlauch mittels leichtem Ueberdruck gegen die paraffinierte Probe gedrückt, so dass Wasserfluss ausserhalb der Probe unmöglich ist. Die Apparatur ist aus Plexiglas, das Vorbild von der Firma Soilmoisture (USA) ist aus Metall gefertigt. Da Durchmesser und Länge der ItOe- (und damit der Soilmoisture-) und FaBo-Proben nicht übereinstimmen, ist es sinnvoll, die Apparatur ebenfalls selber herstellen zu lassen. Die ItOe-Apparatur hat zudem den Vorteil, dass sie auch nach der Methode der konstanten Druckhöhe betrieben werden könnte.

## 5 Bewertung der einzelnen Methoden

Es stehen also einerseits **Feld-** und andererseits **Labormethoden** zur Verfügung, um die Wasserleitfähigkeit des Bodens zu charakterisieren. Bereits im vorangehenden Kapitel wurden Nachteile und Vorteile der einzelnen Methoden aufgezählt.

Bei **Feldmethoden** wird die Leitfähigkeit des Bodens in natürlicher Lagerung erfasst. Es werden keine neuen Risse oder Poren gebildet und vorhandene grosse Poren werden nicht zerstört. Die beste Methode ist sicher die oben erwähnte Drainage-Methode (Instantaneous profile method, Rose, 1965). Der Aufwand ist aber enorm. Sie fällt für die routinemässige Messung von Böden ausser Betracht. Die Infiltrometer-Methode mit einem Ring, wie sie z. B. von der Bodenschutzfachstelle des Kantons Bern verwendet wird, ist eine schnelle und einfache Methode zur Charakterisierung der Leitfähigkeit der Böden. Problematisch an dieser Methode ist, dass die Randbedingungen nicht eindeutig sind, da Infiltration und gesättigter Wasserfluss schwierig zu unterscheiden sind. Routinemessungen sind möglich. Sofern die Methode standardisiert ist, sind Vergleiche zwischen den Messungen möglich, jedoch nur unter Vorbehalt mit Messungen anderer Verfahren. Werden Doppelringinfiltrometer verwendet, steigt der Aufwand bereits beträchtlich, andererseits sind dann Infiltration und gesättigter Wasserfluss besser trennbar.

Da die Fachstelle Bodenschutz des Kantons Zürich bereits Bodenproben an verschiedenen Standorten genommen hat und auch beabsichtigt, dies weiterhin zu tun, folgt daraus, dass **Labormethoden** angewandt werden sollten. Wie bereits erwähnt, sind Labormethoden grundsätzlich mit folgenden Problemen behaftet: *Erstens* repräsentieren kleine Proben den Standort häufig ungenügend. Die fehlende Repräsentivität kann mit einer entsprechenden Probenanzahl wettgemacht werden. *Zweitens* wirkt sich die Länge der Proben auf das Messergebnis aus; je kürzer die Probe ist, desto wahrscheinlicher wird es, dass eine Makropore durch die ganze Probe verläuft. Im natürlich gelagerten Boden wirkt sich eine nicht mit andern Poren verbundene Makropore von zum Beispiel 7 cm Länge kaum aus; auch nur geringfügig in einer Bodenprobe von 10 cm Länge. In einer Probe von nur 5 cm Länge hingegen führt die gleiche Makropore zu einem völlig unnatürlich hohen Leitfähigkeitswert. Bagarello und Provenzano (1996), massen Leitfähigkeiten an Proben mit Durchmesser 8.5 cm und Länge 11 cm und an Proben mit Durchmesser 5 cm und Länge 5 cm. Die an den kleineren Proben gemessenen Werte waren rund 40-mal grösser. Schäffer (1990) bestimmte Leitfähigkeiten an 12 cm langen Proben (Volumen: 850 cm<sup>3</sup>) und an 4 cm langen Proben (Volumen: 100 cm<sup>3</sup>). Die Leitfähigkeiten der kürzeren Proben waren 10-mal grösser. Auch die von Studenten am Institut für terrestrische Oekologie ausgeführten Messungen zeigen ein ähnliches Bild (Abb. 2). Die mit der Reckenholz-Methode gemessenen Leitfähigkeiten (Länge: 4.2 cm) übertreffen jene mit der ItOe-Methode (Länge: 10 cm) gemessenen um

teilweise mehrere Grössenordnungen. Dabei entsprechen die niedrigsten Werte der ersten Methode etwa den grössten der zweiten. Wichtig bei diesem Vergleich ist es zu berücksichtigen, dass wegen knapp bemessener Durchmesser der wasserleitenden Schläuche und Verbindungen am ItOe keine grossen Leitfähigkeiten messbar sind. Die "Leitfähigkeit" der Apparatur (ohne Probe) beträgt etwa  $10^{-3}$  m/s. Dennoch zeigt der Vergleich, dass Leitfähigkeiten extrem von der Apparatur und vor allem von der Länge abhängen und damit Werte, die mit verschiedenen Apparaturen und verschiedener Länge nicht mit einander vergleichbar sind. Die damit gemessenen Werte charakterisieren den Boden nur innerhalb der gleichen Methode. Sollen Vergleiche mit andern Labors möglich sein, muss die anzuwendende Methode vorgeschrieben und normiert werden.

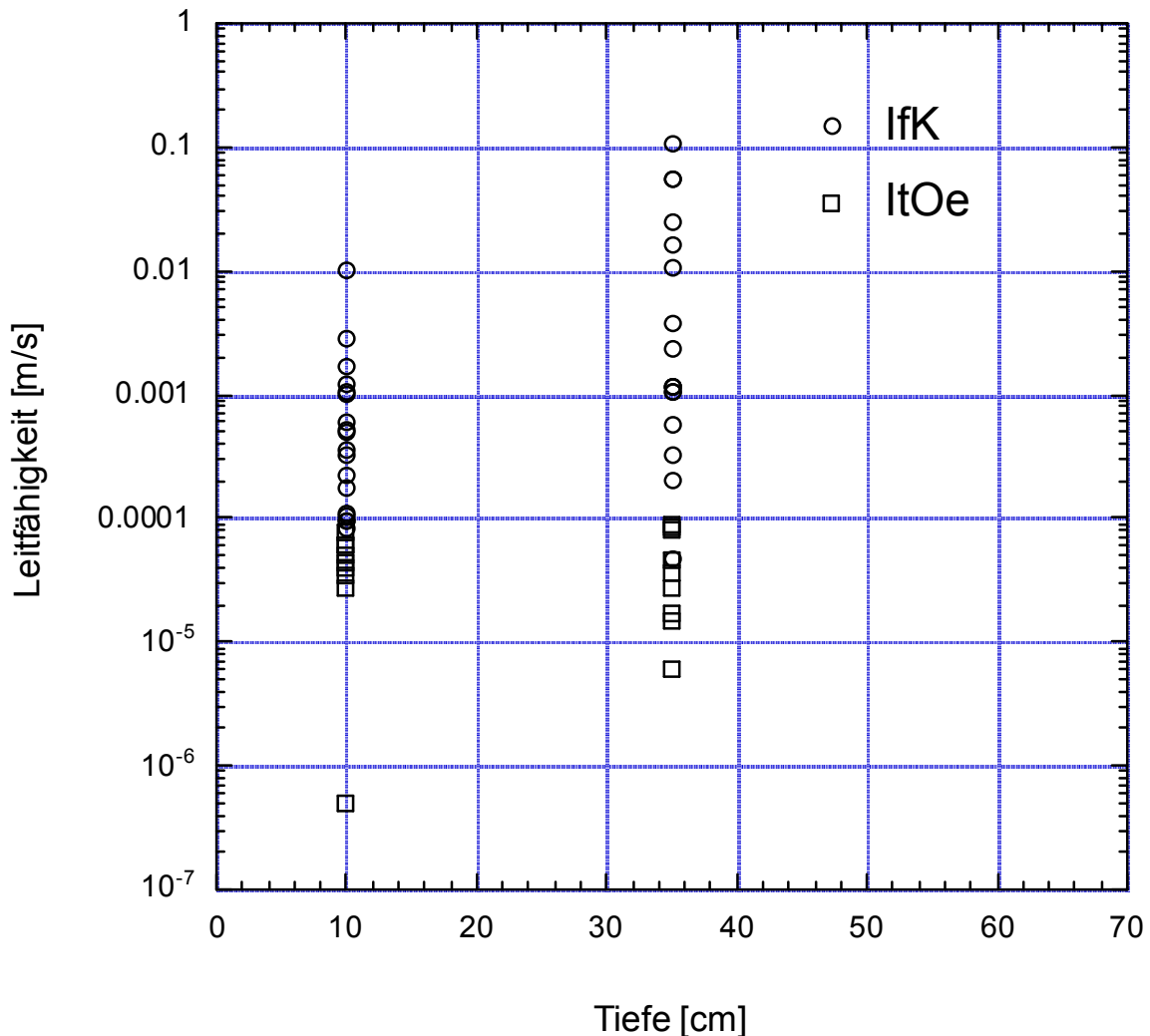


Abb. 2 Mit der Methode des IfK (= Institut für Kulturtechnik, identisch mit Reckenholz-Methode, Probenlänge: 4.2 cm) und des ItOe (Probenlänge: 10 cm) gemessene Leitfähigkeiten. Standort: Hönningerberg, Braunerde. Messung in 10 cm Tiefe ( $A_H$ -Horizont) und 35 cm Tiefe ( $B_t$ -Horizont).

*Drittens* wird die natürliche Lagerung durch die Probenahme gestört (Strukturveränderung). Es kann dabei, auch wenn die Probe als ungestört bezeichnet wird, zur Bildung von Rissen,



Poren und randlichen Verdichtungen kommen. Matthies (1996) hat gezeigt, dass an den Rändern der Probe ein bis zu 5 mm mächtiger Bereich verändert wird (Verdichtung, Risse, Verschmierungen). Je kleiner der Durchmesser der Probe, desto grösser ist somit dieser Anteil. *Viertens* schliesslich kann Wasser zwischen Probe und Zylinderwand fließen. Der Anteil des Wasserflusses zwischen Probe und Zylinderwand wurde von Tokunaga (1998) berechnet. Sofern die Probe schlecht durchlässig ist, kann diese Wassermenge beträchtlich sein und diejenige Wassermenge, die durch die Probe fliesst, sogar übertreffen. Die ItOe-Apparatur trägt diesem Problem bereits Rechnung, indem die paraffinierte Probe mit einem Gummischlauch abgedichtet wird. Die Reckenholz-Apparatur müsste angepasst werden, was möglich ist, da die Apparatur ja ebenfalls hergestellt werden muss.

## 6 Empfehlung

Wir empfehlen, die Methode des Institutes für terrestrische Ökologie zu übernehmen. Dafür sprechen folgende Gründe:

- Die Proben der Fachstelle Bodenschutz haben nicht eine handelsübliche Grösse. Eine käufliche Apparatur wie diejenige von Eijkelkamp müsste angepasst werden. Es ist nicht klar, wie gross der Aufwand ist. Dieses Permeameter wäre dann sinnvoll, wenn auch die Probengrößen von Eijkelkamp übernommen würden.
- Die Apparaturen nach der Methode Reckenholz und ItOe sind beide nicht käuflich und müssen von einer Werkstatt hergestellt werden. Der Aufwand zur Herstellung ist bei beiden ähnlich gross. Die Länge des Zylinders ist bei beiden anpassbar. Die Möglichkeit, den Wasserfluss zwischen Probe und Zylinder zu unterbinden, ist bei der Methode ItOe bereits vorgesehen, bei der Methode Reckenholz hingegen müsste die Apparatur neu konzipiert werden. Die Methode ItOe bietet schliesslich zusätzlich die Möglichkeit, Leitfähigkeiten bei konstantem Druck zu messen.

## Verdankung

Wir bedanken uns bei Thomas Gimmi, Institut für terrestrische Oekologie ETH Zürich, für die Kopien der Semesterarbeiten und der dazugehörigen Rohdaten.

## Literatur

- Bagarello, V., G. Provenzano. 1996. Factors affecting field and laboratory measurement of saturated hydraulic conductivity. *Transactions ASAE* 39(1):153-159.
- BSF. 1996. Kabo Bern. Methoden-Sammlung. Landwirtschaftliche Dauerbeobachtungsstandorte. Bodenschutzfachstelle des Kantons Bern, Rüti, 3052 Zollikofen.
- Klute, A., und C. Dirksen. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods.p. 687 – 734. In: A. Klute (ed.). *Methods of soil analysis. Part1. Physical and mineralogical methods.* 2nd edition. ASA, Madison, USA.
- Matthies, D. 1996. Neuartige Verfahren zur Bestimmung der Gasleitfähigkeit von porösen Materialien, insbesondere von Böden. Schriftenreihe Forstw. Fakultät Universität München und Bay. Landesanstalt Wald und Forstwirtschaft Nr. 157.
- Rose, C.W., W.R. Stern, and J.E. Drummond. 1965. Determination of hydraulic conductivity as a function of depth and water content for soil in situ. *Aust. J. Soil Res.* 3:1-9
- Schäffer, J. 1990. Wirkung der Armierung durch Reisigmatten auf die Bodenverformung beim Befahren. Diplomarbeit Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg im Breisgau.
- Tokunaga, T. K. 1988. Laboratory permeability errors from annular wall flow. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52:24-27.

## Anhang

- A1 Fehlerberechnung für fallende und konstante Druckhöhe
- A2 Skizze der Methode der eidg. landw. Forschungsanstalten (konstante Druckhöhe)
- A3 Skizze der Methode der fallenden Druckhöhe
- A4 Durchlässigkeitsklassen nach Reckenholz
- A5 Temperaturabhängigkeit der  $k_{\text{sat}}$ -Messung