



TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG
Institut für Geoökologie, Abt. Bodenkunde und Bodenphysik

Bodenhydrologische Versuche im Praktikum Hydrologie I

für Studierende der Geoökologie
6. Semester

W. Durner

Braunschweig, April 2003

Durner, W. (2003): Bodenhydrologische Versuche im Praktikum Hydrologie I. Skript. Institut für Geoökologie, Abteilung Bodenkunde und Bodenphysik, TU Braunschweig, 32 Seiten.

Vorwort

Die Darstellung der Arbeiten in diesem Skript erfolgt in zwei Teilen. Im ersten Teil „Ziel und Ablauf“ finden sich organisatorische Angaben im Zusammenhang mit dem geplanten Ablauf des Praktikums. Der zweite Teil „Versuchsbeschreibungen“ dokumentiert zu jedem Versuch kurz die methodischen Grundlagen, die Versuchsdurchführung, und gibt Hinweise zur Auswertung. Bei Fragen zu Auswertungen können und sollten stets die Versuchsbetreuer – auch außerhalb der Praktikumszeiten – konsultiert werden.

Die Versuchsbeschreibungen dieses Skripts basieren auf den entsprechenden Kapiteln des Skripts „*Geoökologisches Freilandpraktikum – Physikalische Methoden*“ (Durner et al., 2000), dem wiederum in einzelnen Teilen die „*Methoden der Bodenphysik*“ (Huwe et al., 1999), das „*Kulturtechnisch-bodenkundliches Praktikum*“ (Kretzschmar, 1996) sowie die Monographie „*Methods of Soil Analysis – Physical Methods*“ (Klute, 1986) als Vorlagen dienten.

Da das Skript als „Schnellschuss“ erstellt wurde, sind Fehler aller Art unvermeidlich. Ich bitte die Studierenden um Nachsicht und konstruktive Mithilfe für die nächste Fassung.

Braunschweig, im April 2003,
W. Durner

Inhaltsverzeichnis

Ziel und Ablauf	1
Ziel des Praktikums	1
Zeitlicher Umfang.....	1
Besondere Hinweise	2
Versuchsbeschreibungen	5
1 Ringinfiltration	6
1.1 Grundlagen	6
1.2 Durchführung der Messung.....	11
1.3 Auswertung	12
1.4 Materialien und Geräte.....	12
1.5 Literatur	13
2 Guelph-Permeameter	15
2.1 Prinzip	15
2.2 Durchführung der Messung.....	15
2.3 Auswertung	16
2.4 Geräte und Materialien.....	18
2.5 Literatur	18
3 Tensionsinfiltrrometer	19
3.1 Prinzip	19
3.2 Durchführung der Messung.....	19
3.3 Auswertung	21
3.4 Material	21
3.5 Literatur	22
4 Bohrlochmethode	23
4.1 Prinzip	23
4.2 Durchführung	24
4.3 Auswertung	25
4.4 Mögliche Fehler und Abweichungen	25
4.5 Materialien	26
4.6 Literatur	26

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Schematische Darstellung eines Infiltrationsverlaufs in einem trockenen und einen feuchten Boden.....	6
Abb. 1.2: Prinzip des Doppelring-Infiltrometers.	7
Abb. 1.3: Durchschnittliche kumulative Infiltration in gepackte Proben von Leighton Buzzard Sand in Abhängigkeit von der Ringgröße (aus Youngs, 1987). Die Zahlen bei den Kurven zeigen den Radius des Infiltrometers in mm.	8
Abb. 1.4: Variabilität der Infiltration in einen Lehm (silty loam) in Abhängigkeit vom Radius des Infiltrometers (aus Youngs, 1987).....	9
Abb. 2.1: Aufbau des Guelph-Permeameters. Im Bohrloch wird nach dem Prinzip der Mariotte'schen Flasche ein konstanter Überstau eingestellt und die resultierende Infiltrationsrate gemessen.	16
Abb. 2.2: Formfaktor C als Funktion von H/r (aus: Benutzeranl. der Fa „Soil Moisture“).	17
Abb. 3.1: Aufbau eines Tensionsinfiltrometers (aus Perroux und White, 1988).	20

Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1: Werte für den Korrekturfaktor f (Gl. 3.28) nach Wu et al., 1997. Die Werte gelten für 5 cm Einbautiefe, 5 cm Überstauhöhe, und ein Anfangs-Matrixpotential des Bodens von pF 3.....	11
Tab. 2.1: Literaturwerte für α^* (Elrick and Reynolds (1992))	18

Ziel und Ablauf

Ziel des Praktikums

Ziel des Praktikums ist, mehrere Feld-Messverfahren für die hydraulische Leitfähigkeit kennen zu lernen und an mehreren Punkten des Praktikumsgebietes (in diesem Jahr: FAL) anzuwenden

Die Tätigkeiten umfassen

1. Doppelring-Infiltrationsversuch
2. Infiltration mit dem Guelph-Permeameter
3. Tensionsinfiltration
4. Bohrlochversuch

Sie werden als Praktikumssteilnehmer anhand dieser Bestimmungen „zeitlose“, auch heute noch übliche Methoden aus dem bodenkundlich/bodenphysikalischen Bereich zur Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit im Feld kennen lernen. Durch eine für jede Methodik strikt durchzuführende Fehlerabschätzung sowie den Vergleich Ihrer Ergebnisse mit den parallelen Messungen ihrer Kommilitonen sollen Sie ein Gefühl für die Genauigkeit der Messmethoden sowie für räumliche Variabilität erhalten. Durch die Anfertigung eines Protokolls werden Sie grundlegende Techniken zur Abfassung wissenschaftlicher Arbeiten anwenden, und quasi als „Beiprodukt“ gezwungen sein, sich mit computergestützter Textverarbeitung zu beschäftigen. Und schließlich – last but not least – sollen Sie lernen, ihre Ergebnisse vor einer Audienz kurz und prägnant, dabei aber vollständig und präzise zu präsentieren.

Zeitlicher Umfang

Der bodenhydrologische Anteil am Praktikum gliedert sich in

- Einführung in die Versuchsdurchführung

- Probenstag im Feld mit 4 Einzelversuchseinheiten
- Hinweise zur Versuchsauswertung
- Auswertung
- Präsentation der Ergebnisse
-

Anwesenheit ist zu allen Terminen Pflicht.

Die Teilnehmerinnen teilen sich in insgesamt 4 Gruppen auf. Diese Gruppen übernehmen die Durchführung der einzelnen Versuche und die Anfertigung eines Protokolls über jeweils einen Versuchstyp. Am Abschluss Symposium werden alle Ergebnisse eines Versuchstyps durch jeweils eine Gruppe zusammengefasst und präsentiert. Es ist deshalb eine sehr disziplinierter Datenaustausch notwendig.

Die Einteilung der Gruppen und der Versuchsabfolge erfolgt zur Vorbesprechung.

Termin	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4
12. April, 13:30 – 15:00 Uhr	Einführung in die Versuchsdurchführung			
9. Mai, ganztägig	V1, V2, V3, V4	V2, V1, V3, V4	V3, V4, V1, V2	V4, V3, V2, V1
13. Mai, 13:30 – 15:00 Uhr	Nachbesprechung der Versuche			
27. Mai 2003 ???	Präsentationen			
	V1: Ringinf.	V2: Guelph-Inf.	V3: Tensionsinf.	V4: Bohrlochv.
16. Mai, ganztägig	Ausweichtermin für Freilandversuche			
???	Ausweichtermin für Präsentationen			

* "V1" usw. = "Versuch 1"

Besondere Hinweise

Protokolle

Die Protokolle sind mit einer Textverarbeitung (LaTeX, Word, StarOffice) anzufertigen und sowohl in Papierform als auch als File bis zum 06. Juni 2003, 18:00 Uhr abzugeben. Ein Protokoll enthält

1. Die Namen der Beteiligten und die Gruppennummer

2. Datum, die Nummer und Bezeichnung der Aufgabe
3. Die Darstellungen aller Messergebnisse für „ihre“ Aufgabe

Die Darstellung „ihrer“ Aufgabe sollte wie folgt gegliedert sein (Punkten 1 und 2 knapp halten!):

1. Einleitung und Fragestellung (Was ist Sinn und Ziel der Aufgabe ?)
2. Methode (wie wurde die Untersuchung durchgeführt, einschließlich Berechnungen)
3. Ergebnisse (Rohdaten, einschließlich graphischer Darstellungen)
4. Auswertungen mit Fehlerrechnungen und Ergebniszusammenstellungen
5. Interpretation der Ergebnisse und Wertung der Methodik

Bei der Abfassung der Protokolle sind die Standards zur Abfassung wissenschaftlicher Arbeiten einzuhalten¹ (Durner, 2002). Bei Verwendung eines Textverarbeitungssystems (am Computer Pool des Instituts für Geoökologie sind MS-Office und Star-Office installiert!) sollte mit Druckformatvorlagen gearbeitet werden.²

Kleidung

Zum Praktikum wird schmutzunempfindliche Schutzkleidung und festes Schuhwerk angeraten. Da wir ganztätig im Gelände sein werden, sollten Sie an Verpflegung und (evtl. warme) Getränke zu denken! Achten Sie am Vortag auf den Wetterbericht, und decken Sie sich im Zweifelsfall mit genügend warmer Kleidung ein.

Standortschonung

Bitte seien Sie sich der Problematik der Standortschädigung bewusst, und nehmen Sie gerade als GeoökologInnen die Standortschonung nicht auf die leichte Schulter! Es sollte ihr Ehrgeiz sein, „ihren“ Standort so minimal wie möglich zu stören. Die Standortschonung ist zum einen aus ästhetischen Gesichtspunkten, zum anderen aus ökologischen Gesichtspunkten zu sehen. Der Idealfall ist erreicht, wenn der Standort nach der Probenahme genau so aussieht wie vorher, und wenn das Pflanzenwachstum durch die Probenahme unbeeinflusst bleibt. Probleme sind (1) Verdichtungen durch Betreten, und (2) Massenverlust durch Materialentnahmen und (3) Umlagerungen und Aufhäufungen von Bodenmassen an Stellen, wo sie

¹ Durner W. (2002): Anleitung zur Abfassung wissenschaftlicher Arbeiten. Institut für Geoökologie, Abteilung Bodenkunde und Bodenphysik, TU Braunschweig. Download unter URL http://www.soil.tu-bs.de/lehre/Boku_I-Praktikum/SS2002/WissenschaftlichesSchreiben.pdf, 01.03.2002.

² Eine Vorlage für das Protokoll mit sinnvoll definierten Druckvorlagen-Elementen können Sie unter URL http://www.soil.tu-bs.de/lehre/Boku_I-Praktikum/SS2002/Protokollvorlage.doc (01.03.2002) übers Netz herunterladen.

nicht hingehören. Der beste Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen liegt demgemäss darin, die Probenahmefläche so wenig wie möglich zu betreten, entnommene Massen zu ersetzen, und notwendige Umlagerungen unmittelbar nach der Probenahme soweit möglich zu revidieren.

Bitte denken Sie stets daran, dass wir auf dem Gelände der FAL Gäste sind, und die Beprobungsflächen für eine reguläre landwirtschaftliche Produktion verwendet werden.

Versuchsbeschreibungen

Zur Berechnung der feldgesättigten (\neq gesättigten !) hydraulischen Leitfähigkeit (im deutschsprachigen Raum oft mit dem Symbol K_f bezeichnet) gibt es eine Reihe von Feldmethoden, die sich in Genauigkeit, Zeitbedarf und Wasserverbrauch unterscheiden. Beispiele sind die Doppelrohrmethode, das Ringinfiltrometer, das „air entry“-Permeameter, das Guelph-Permeameter oder das „Guelph pressure“-Permeameter. Die Methoden sind zum Teil zeitaufwendig und erfordern eine beträchtliche Wasserversorgung. So benötigt zum Beispiel die „double tube“-Methode für eine Messung 200 – 500 Liter Wasser.

Die feldgesättigte Leitfähigkeit K_f unterscheidet sich von dem entsprechenden Laborwert primär dadurch, dass im Feld die völlige Aufsättigung des Porenraumes oberhalb des Grundwasserspiegels aufgrund von Lufteinschlüssen praktisch nie erreicht wird. Eine entscheidende Rolle für den Wert der gesättigten Leitfähigkeit spielen die sogenannten *Sekundärporen*, die ein Ausdruck der Bodenstruktur sind (z.B. Schrumpfrisse in tonhaltigen Böden, Aggregatzwischenräume, verwitterte Wurzelgänge, Regenwurmgänge). Der Anteil von gut vernetzten Sekundärporen äußert sich in einem sehr hohen Wert der gesättigten Leitfähigkeit und einem schnellen Abfall bei bereits geringen Tensionen. Um Kenntnis der Leitfähigkeitscharakteristik in diesem wichtigen Feuchtebereich zu erlangen, ist es möglich, die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit im Bereich nahe Sättigung mit Hilfe der sogenannten Tensionsinfiltration abzuschätzen.

Im Rahmen dieses Praktikums werden die Ringinfiltration und das Guelph-Permeameter zur Bestimmung von K_f oberhalb des Grundwasserspiegels, sowie die Bohrlochmethode zur Bestimmung von K_f knapp unterhalb des Grundwasserspiegels verwendet. Ergänzt werden die Methoden durch die Tensionsinfiltration zur Bestimmung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit $K(\psi)$. Wir werden entsprechend der internationalen Konvention auch für die feldgesättigte Leitfähigkeit stets das Symbol K_s verwenden.

1 Ringinfiltration

1.1 Grundlagen

Unter Infiltration versteht man das Eindringen von Wasser in den Boden bei Wasserzufuhr. Das Infiltrationsverhalten eines Bodens wird bestimmt durch die Art des Wasserangebots, den Austrocknungszustand zu Beginn der Infiltration, sowie durch die hydraulische Leitfähigkeit $K(\theta)$ des durchfeuchteten Bodens. Zudem spielt der Zustand der Bodenoberfläche (Verschlammung) sowie das Auftreten von Stauschichten und Makroporen eine maßgebliche Rolle. Unter *Infiltrationskapazität* verstehen wir die Infiltrationsrate, die sich einstellt, wenn eine große Fläche Land unter Wasser gesetzt wird. Diese Größe ist von besonderem Interesse, da hierdurch als korrespondierende Größe der Oberflächenabfluss festgelegt wird.

Zur Messung des maximalen Infiltrationsvermögens von Böden ist die Verwendung von Ringinfiltrometern gut etabliert. In einem typischen Ringinfiltrationsversuch geht nach anfänglich höherer Infiltrationsrate diese bei einem homogenen Boden schließlich asymptotisch gegen die gesättigte Leitfähigkeit (Abb. 1.1). Die anfängliche Infiltrationsrate kann je nach Bodenart und Austrocknungszustand 2-fach (Sand, feucht) bis ca. 100-fach (Ton, trocken) über der Endinfiltrationsrate liegen.

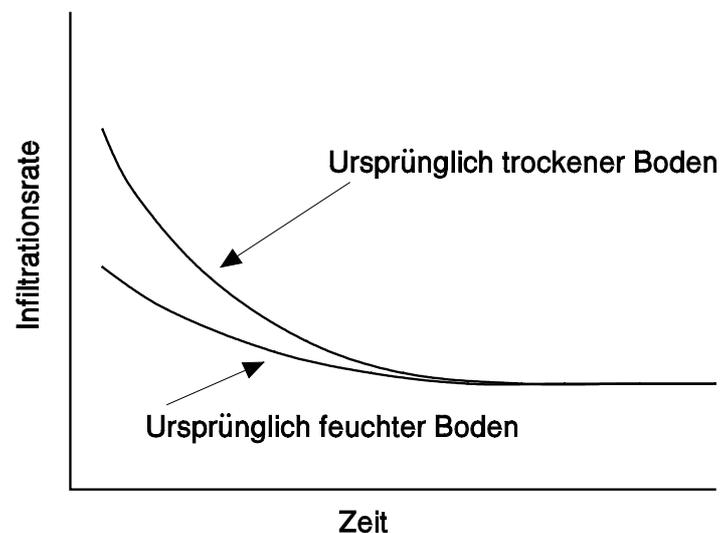


Abb. 1.1: Schematische Darstellung eines Infiltrationsverlaufs in einem trockenen und einem feuchten Boden.

Die sich im Versuchsverlauf asymptotisch einstellende Infiltrationsrate hängt eng mit der hydraulischen Leitfähigkeit bei Feldsättigung zusammen. Infiltrationsversuche dienen somit zur Abschätzung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit. Für ein idealisiertes Infiltrometer mit unendlich großem Radius (d.h. eindimensionaler vertikaler Wasserbewegung) und mit vernachlässigbarem Wasserüberstau gilt bei völliger Sättigung in der Durchfeuchtungszone für den Gradienten des Matrixpotentials

$$d\psi/dz = 0 \quad (1.1)$$

Einsetzen des Gradienten in das Darcy-Gesetz ergibt unmittelbar ($d\psi_z/dz = -1$)

$$q = -K \cdot \left(\frac{d\psi}{dz} - 1 \right) = -K(0 - 1) = K \quad (1.2)$$

Hauptproblem bei der Interpretation der Ergebnisse von Ringinfiltrationsmessungen ist die laterale Komponente des Wasserflusses, die die Analyse des Fließproblems stark kompliziert. Der laterale Fluss bewirkt, dass die stationäre Infiltrationsrate, die asymptotisch erreicht wird, stets höher liegt als die Infiltrationskapazität oder die hydraulische Leitfähigkeit eines Bodens. Stauschichten innerhalb der Durchfeuchtungszone (die unter einem Infiltrometer starke Lateralkomponenten des Wasserflusses hervorrufen) führen ebenfalls zu einer Überschätzung der Infiltrationskapazität.

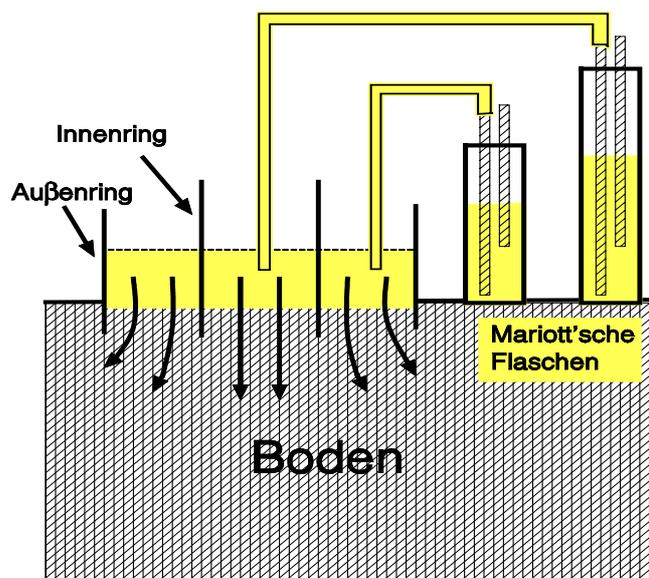


Abb. 1.2: Prinzip des Doppelring-Infiltrometers.

Um den lateralen Einfluss auf das Meßergebnis zu eliminieren, werden gern sogenannte Doppelringinfiltrometer benutzt (Abb. 1.2). Der Zweck dieser Anordnung besteht darin, unterhalb des inneren Ringes eine möglichst eindimensional-vertikale Strömung zu gewährleisten. Der äußere Ring sollte daher im Vergleich zum inneren möglichst groß sein. Die Wirksamkeit dieser Maßnahme kann in Hinsicht auf das erwünschte Ergebnis jedoch nur schlecht bewertet werden, insbesondere wenn unterschiedlich hohe Überstauhöhen in Innen- und Außenring auftreten, die das Ergebnis weiter verfälschen. Vorzuziehen sind deshalb Auswertemethoden, die bei der Interpretation der gemessenen Infiltrationsraten die Ringgröße mitberücksichtigen. Generell ist es erstrebenswert, möglichst große Radien zu verwenden. Neben dem Effekt, dass die Infiltrationsrate wegen dem verbesserten Verhältnis zwischen Fläche und Umfang näher an der gesuchten Infiltrationskapazität liegt, wird dadurch außerdem das Problem der räumlichen Variabilität gemindert (vgl. Abb. 1.3).

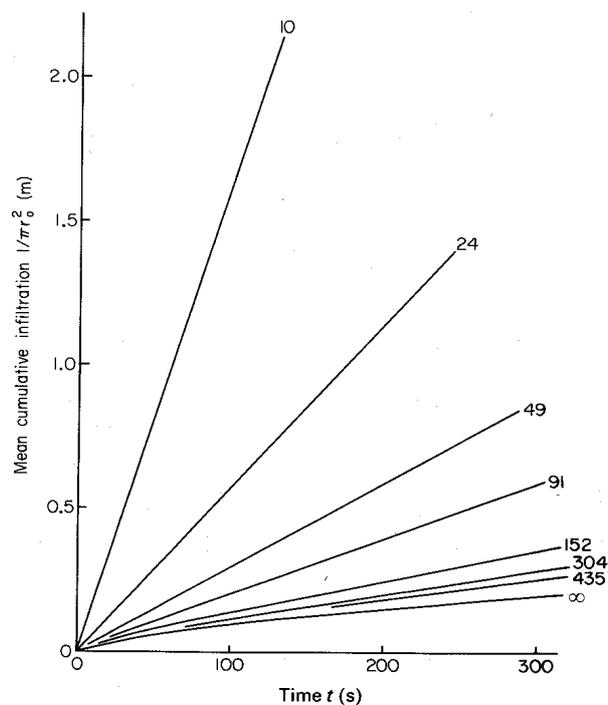


Abb. 1.3: Durchschnittliche kumulative Infiltration in gepackte Proben von Leighton Buzzard Sand in Abhängigkeit von der Ringgröße (aus Youngs, 1987). Die Zahlen bei den Kurven zeigen den Radius des Infiltrometers in mm.

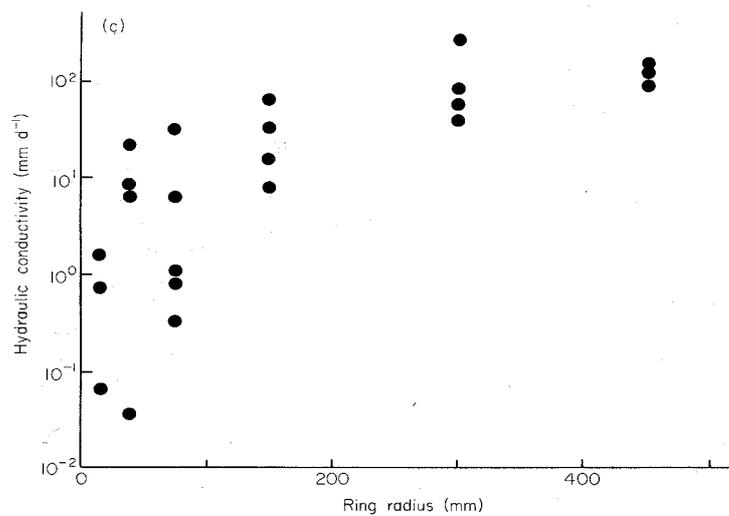


Abb. 1.4: Variabilität der Infiltration in einen Lehm (silty loam) in Abhängigkeit vom Radius des Infiltrometers (aus Youngs, 1987).

Das primäre Interesse von Infiltrationsexperimenten gilt meist der möglichst guten Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit K_s . Für natürliche Infiltration (= Infiltrometer mit unendlich großem Radius) wird der Infiltrationsverlauf gegen die Zeit mit der 2-Parameter-Gleichung nach Philip (1957a,b) beschrieben

$$\begin{aligned} I(t) &= S \cdot t^{1/2} + A \cdot t + C \\ i(t) &= 0.5 \cdot S \cdot t^{-1/2} + A \end{aligned} \quad (1.3)$$

Die Konstante C bestimmt sich aus den Anfangsbedingungen zu $C=0$. Die Infiltrationsrate i geht für $t \rightarrow \infty$ gegen A . Die Konstante A (cm/d) ist somit bei kleiner Überstauhöhe $A \approx K_s$. Die Größe S (cm / \sqrt{d}) wird *Sorptivität* genannt. Die zwei Terme in der Infiltrationsgleichung repräsentieren somit den Einfluss des Matrixpotentials (S) und des Gravitationspotentials (A). Beide Parameter werden durch Anpassung der Infiltrationsfunktion (3.28) an Messdaten über nichtlineare Regression, oder nach entsprechender Variablentransformation durch lineare Regression bestimmt.

Ringinfiltration ist jedoch ein dreidimensionaler Vorgang. Da es sich um ein nichtstationäres gesättigt/ungesättigtes Fließproblem handelt, ist eine Auswertung in analytischer Form nur approximativ und unter vereinfachenden Annahmen möglich. Der konkrete Infiltrationsverlauf in einen homogenen Boden ist von den Anfangsbedingungen (Austrocknungsgrad des Bodens), den Randbedingungen (Überstauhöhe), dem Radius und der Einbautiefe des Infiltrometers, sowie der gesättigt/ungesättigten Leitfähigkeitsfunktion abhängig. Verschiedene Autoren haben aber gezeigt, dass sich der Infiltrationsverlauf mit Hilfe geeigneter Skalierungstechniken auf eine einzelne einfache Funktion reduzieren lässt,

die für alle Bodentypen, Anfangsbedingungen, und Infiltrationsmeter-Parameter. *Tricker* (1978) zeigte, dass sich die finale Infiltrationsrate, $i_f = i(t), t \rightarrow \infty$, aus einem eindimensionalen Anteil und einem lateralen Anteil besteht: $i_f = i_{1D} + i_{lat}$. *Reynolds und Elrick* (1990) leiteten eine analytische Lösung für die finale Infiltrationsrate her³. *Wu und Pan* (1997) verallgemeinerten die Lösung für Böden, deren hydraulische Eigenschaften mit dem weit verbreiteten Modell von *van Genuchten* (1980) beschrieben werden. *Elrick et al.* (1995) untersuchten den Einfluss der abfallenden Überstauhöhe auf den Infiltrationsprozess. Mit Hilfe numerischer Simulationen des Infiltrationsvorgangs verglichen *Wu et al.* (1997) eindimensionale Infiltration, Ringinfiltration mit einem Einzelring, und Doppelringinfiltration für verschiedene Böden. Die Ergebnisse zeigten, dass die Infiltrationsrate im Einzelring stets am höchsten, die eindimensionale Infiltration stets am niedrigsten war. Die Zeit für die Einstellung stationären Flusses in trockenen Boden lag bei 4 Minuten für Feinsand, ca. 2 Stunden für einen Lehm, und ca. 24 Stunden für einen tonigen Boden. Die Verminderung der Überstauhöhe von 5 cm auf 1 cm erbrachte eine Reduktion der Infiltrationsrate um 15 bis 30%. Für die finale Infiltrationsrate aus Einzelringinfiltrationsmetern können *Wu und Pan* (1997) und *Wu et al.* (1997) in Übereinstimmung mit vorherigen Analysen (z.B. *Elrick et al.*, 1995) folgende generelle Beziehung zwischen i_f und K_s aufstellen:

$$i_f = f \cdot K_s \quad (1.4)$$

mit

$$f = \frac{H + \phi_m / K_s}{z + r/2} + 1 \quad (1.5)$$

wobei r der Infiltrationsmeterradius, z die Einbautiefe des Infiltrationsmeters, und H die Überstauhöhe sind. ϕ_m ist das sogenannte Matrixflux-Potential (siehe Gl. 3.31), das den Einfluss der Wasserabsorption durch den ungesättigten Boden beschreibt. Die Struktur von Gleichung 1.4 mit 1.5 zeigt, wie die finale Infiltrationsrate durch drei bestimmende Flusskomponenten zusammengesetzt wird: primäre Einflussgröße ist die gesättigte Leitfähigkeit K_s . Dazu kommt ein Anteil, der linear von der Überstauhöhe H abhängt, und schließlich ein Anteil, der durch die laterale Wasserabfuhr in die ungesättigte Bodenzone hervorgerufen wird. Der relative Einfluss der Überstauhöhe und der lateralen Komponente hängt invers mit dem Infiltrationsmeter-Radius und der Einbautiefe zusammen. Der Wert des Matrix-Flux-Potentials ϕ_m hängt von der Bodenart und dem Austrocknungsgrad des Bodens ab. Tabelle 1.1 listet einige Faustwerte für f .

³ Die Lösung ist für Böden gültig, deren ungesättigter Leitfähigkeitsverlauf mit einer abfallenden Exponentialfunktion beschrieben werden kann ($K(\psi) = K_s \cdot \exp(-\alpha\psi)$); diese Form erlaubt eine quasi-analytische Lösung der ungesättigten Wasserflussgleichung

Tab. 1.1: Werte für den Korrekturfaktor f (Gl. 3.28) nach Wu et al., 1997. Die Werte gelten für 5 cm Einbautiefe, 5 cm Überstauhöhe, und ein Anfangs-Matrixpotential des Bodens von pF 3.

Boden	ER*, $r=10\text{cm}$	DR, $r_a=15\text{ cm}$	DR, $r_a=25\text{ cm}$	DR, $r_a=60\text{ cm}$
Feinsand	2.6	2.0	1.8	1.2
Lehm	1.9 – 2.1	1.6 – 1.7	1.5 – 1.6	1.2
Ton	3.2	2.5	2.2	1.3

r_a : Außenradius; ER: Einzelringinfiltrrometer, DR: Doppelringinfiltrrometer.

Wu und Pan (1997) zeigten, dass sich der Infiltrationsverlauf allgemein nach

$$i^* = 0.91 + 0.168/\sqrt{t^*} \quad (1.6)$$

skalieren lässt, wobei $i = f \cdot i^*$ und $t = T_c \cdot t^*$. Die beiden empirischen Koeffizienten wurden durch Anpassung an numerisch simulierte Infiltration bestimmt. Die sogenannte charakteristische Zeitskala (T_c) lässt sich aus der gesättigten Leitfähigkeit K_s , einem Leitfähigkeitsparameter α , sowie der Differenz zwischen Wassergehalt vor und nach der Infiltrationsfront über eine einfache Beziehung berechnen (siehe Gl. 3 aus Wu und Pan, 1997). Für natürliche Böden wird das Problem allerdings durch kleinräumige Variabilität, uneinheitliche Störungen der Bodenoberfläche, und Horizontierungen verkompliziert.

1.2 Durchführung der Messung

Die Messung der Infiltrationsrate wird mit einem Einfach- oder Doppelring-Infiltrrometer durchgeführt (siehe Abb. 1.2). Der Wasserspiegel im Innenring wird mit Hilfe eines automatisch geregelten Zuflusses konstant gehalten. Die Wasserspiegellhöhe sollte ca. 5 cm betragen.

1. Einbau des inneren, und dann des äußeren Rings mittels Eindrückens/Einrammens in eine präzise vorgestochene Furche (Einbautiefe: 5cm; Furche mit Messer vorstechen).
2. Messung der Ringdurchmesser.
3. Installation der Wasserzufuhr und der Wasserspiegel-Regelung
4. Einlegen einer Plastikfolie zur Verhinderung der Infiltration vor dem eigentlichen Meßvorgang

5. Schätzung des Anfangswassergehaltes durch mehrfache TDR-Messung unmittelbar um das Infiltrometer herum (NICHT im Infiltrometer; nicht unter verdichtetem Boden!).
6. Schätzung des Bodenfeuchtestatus durch Tensiometermessungen im oberflächennahen Boden und
7. Beginn der Messung durch Entfernen der Plastikfolie; Registrierung der infiltrierten Wassermenge als Funktion der Zeit erfolgt durch Druckaufnahme des Wasservorrats und Speicherung im Datalogger. Die Messung endet, wenn die Infiltration stationär ist, oder (bei schweren Böden) $I > 15$ cm erreicht ist. Für sandige Böden sollte nach wenigen Minuten Stationarität erreicht sein, bei schweren Böden kann dies Stunden bis Tage dauern. Wenn der Wasservorrat im Vorratsgefäß nicht ausreicht, so ist er während der Messung nachzufüllen (größeren Vorrat bereithalten!). Der Wasserspiegel im äußeren Ring sollte durch manuellen Nachgießen aus Eimern in etwa auf dem level des Innenspiegels gehalten werden.
8. Nach Beendigung der Messung: Schätzung des Endwassergehaltes durch mehrfache TDR-Messung im Infiltrometerbereich unmittelbar im Anschluss an die Messung.

1.3 Auswertung

Gemessen wird die kumulative Infiltration I (flächenspezifisch in cm oder als Volumen in cm^3) als Funktion der Zeit. Die Infiltrationsrate i (cm/d) ergibt sich hieraus gemäß

$$i = \frac{dI}{dt} \approx \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (1.7)$$

Zur Auswertung werden kumulative Infiltration und Infiltrationsrate grafisch dargestellt und mit der 2-parametrischen Philip-Gleichung gefittet (in grafische Darstellung einzeichnen). Aus dem Fit ergibt sich eine Schätzung der Sorptivität S und der finalen Infiltrationsrate i_f . Die gesättigte Leitfähigkeit K_s wird dann mit Hilfe des Korrekturfaktors f aus Gleichung 3.28 und Tabelle 1.1 geschätzt.

1.4 Materialien und Geräte

- Doppelring
- Dünner Spaten; großes Messer

- Holzbalken, großer Hammer zum Eintreiben der infiltraometer
- kleinerer Hammer zum Eintreiben der Häringe
- ca. 6 Eimer, je 12 l
- Wasser-Vorratsgefäß (35 l) mit Schlauchleitung zur Regeleinrichtung, Stativ und Abspannung, sowie mit Druckaufnehmer zur Registrierung des Wasserstandes
- Wasser-Regeleinrichtung mit Wasserspiegel-Sensor und Magnetventilregelung
- Feld-Datenlogger zur quasi-kontinuierlichen Registrierung des Wasservorrats
- Notebook mit entsprechender Schnittstelle zum Auslesen der Werte des Datenloggers.
- TDR-Gerät
- Tensiometer mit Ablesegerät

1.5 Literatur

- Haverkamp R., M. Vauclin, J. Touma, P.J. Wierenga, and G. Vachaud, 1977. A comparison of numerical simulation models for one-dimensional infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41, 285-294.
- Hendricks J.M.H., 1990. Determination of hydraulic soil properties. *In* M.G. Anderson and T.P. Burt: *Process Studies in Hillslope Hydrology*. John Wiley & Sons, Chichester, New York, usw.
- Klute A. (ed.), 1986. *Methods of Soil Analysis*. Agron. Monograph No. 9(1), Am. Soc. Agron., Madison, Wisconsin (USA).
- Amoozegar A. und Warrick A.W. (1986): Hydraulic conductivity of saturated soils: Field Methods. *In*: Klute A.: *Methods of Soil Analysis, Part 1*. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin USA; 735–770.
- Bouwer H. (1961): A double tube methode for measuring hydraulic conductivity of soil in sites above a water table. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*; 25; 334-342.
- Bouwer H. (1962): Field determination of the hydraulic conductivity above a water table with the double tube method. *Soil Sci. Soc. Am. J.*; 26; 330-335.
- Bouwer H. und Jackson R.D.(1974):Determining soil properties. *In* J. van Schilfgaarde (ed.): *Drainage for agriculture*. *Agronomy* 17; 611-672.
- Philip J.R., 1957a. The theory of infiltration 1. *Soil Sci.* 83, 345-357.
- Philip J.R., 1957b. The theory of infiltration 2. *Soil Sci.* 83, 435-448.
- Philip J.R. und J.H. Knight, 1968: On solving the unsaturated flow equation: 3. New quasi-analytic technique. *Soil Science*, 117, 1-13.
- Reynolds W.D. und D.E. Elrick, 1990. Poned infiltration from a single ring. 1. Analysis of steady state flow. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54, 1233–1241.
- Tricker A.S. 1978. The infiltration cylinder: Some comments on it's use. *J. Hydrol.* 36, 383–391.
- Youngs E.G., 1987. Estimating hydraulic conductivity values from ring infiltrometer measurements. *J. Soil Sci.* 38, 623-632.

- Wu L. und L. Pan, 1997. A generalized solution to infiltration of single-ring infiltrometers. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 1318–1322.
- Wu L., L. Pan, M.J. Robertson und P.J. Shouse, 1997. Numerical evaluation of ring-infiltrimeters under various soil conditions.

2 Guelph-Permeameter

2.1 Prinzip

Eine neuere Entwicklung zur Bestimmung der oberflächennahen gesättigten Leitfähigkeit stellt das Guelph-Permeameter dar. Es handelt sich bei dieser Methode um ein „constant head well“-Permeameter, also ein Meßgerät, das in einem „Brunnen“ (Bohrloch) einen konstanten Überstau einstellt und die dazugehörige Infiltrationsrate misst. Das Guelph-Permeameter kommt mit einer Wassermenge von etwa 2 Liter pro Messung aus. Der Zeitbedarf pro Messung beträgt je nach Leitfähigkeit zwischen 5 und 30 Minuten pro Messung. Durch mehrere Infiltrationsversuche in verschiedenen Tiefen (siehe Abb. 2.1) erfolgt eine tiefendifferenzierte in situ-Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit. Bekannte Probleme des Permeameters bestehen bei Böden, in denen die Wandungen durch des Bohrlochs durch den Bohrvorgang verschmiert werden. In solchen Fällen wird K_s durch die Guelph-Permeameter-Messung unterschätzt. Eine Überschätzung von K_s erfolgt zum Beispiel bei plattigem Gefüge, wobei hier die Annahmen für die Anwendbarkeit (hier insbesondere die Isotropie) verletzt sind.

2.2 Durchführung der Messung

1. Erstellung des Bohrlochs mit dem zugehörigen Bohrgerät (erforderlichenfalls Aufrauhnen der Wände mit passender Bürste)
2. Aufbau und Befüllung des Permeameters nach Anleitung
3. Einstellung der Wasserspiegelhöhe über das Lufteinlassrohr
4. Start der Messung durch Öffnen des Lufteinlassventils (=Kugel mit Schnurzug)

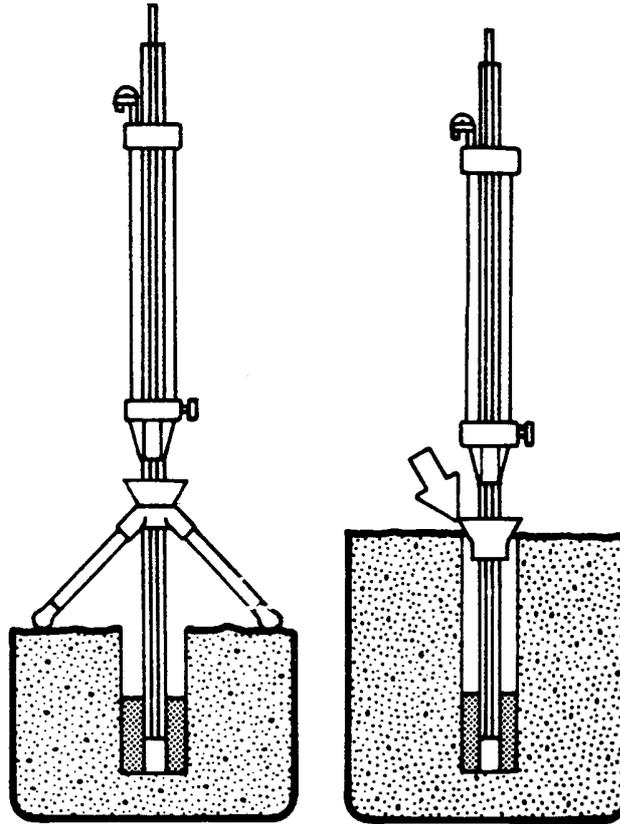


Abb. 2.1: Aufbau des Guelph-Permeameters. Im Bohrloch wird nach dem Prinzip der Mariotte'schen Flasche ein konstanter Überstau eingestellt und die resultierende Infiltrationsrate gemessen.

2.3 Auswertung

Die Auswertung basiert auf dem Verfahren von Elrick and Reynolds (1992), in dem sowohl gesättigter als auch ungesättigter Fluss berücksichtigt wird:

$$\begin{aligned}
 Q &= \left[\left(\frac{2\pi H^2}{C} \right) + \pi r^2 \right] \cdot K_s + \left(\frac{2\pi H}{C} \right) \cdot \Phi_m \\
 &= A \cdot K_s + B \cdot \Phi_m
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

- mit K_s : = Ges. Leitfähigkeit (cm/min)
 H : = Höhe des Wasserspiegels im Bohrloch (cm)
 r : = Radius des Bohrlochs (cm)
 C : = dimensionsloser Formfaktor (= $f(H/r)$)
 Q : = Wasseraufnahme des Bodens (cm³/min)
 Φ_m : = Matrix-Fluss-Potential (cm²/min)

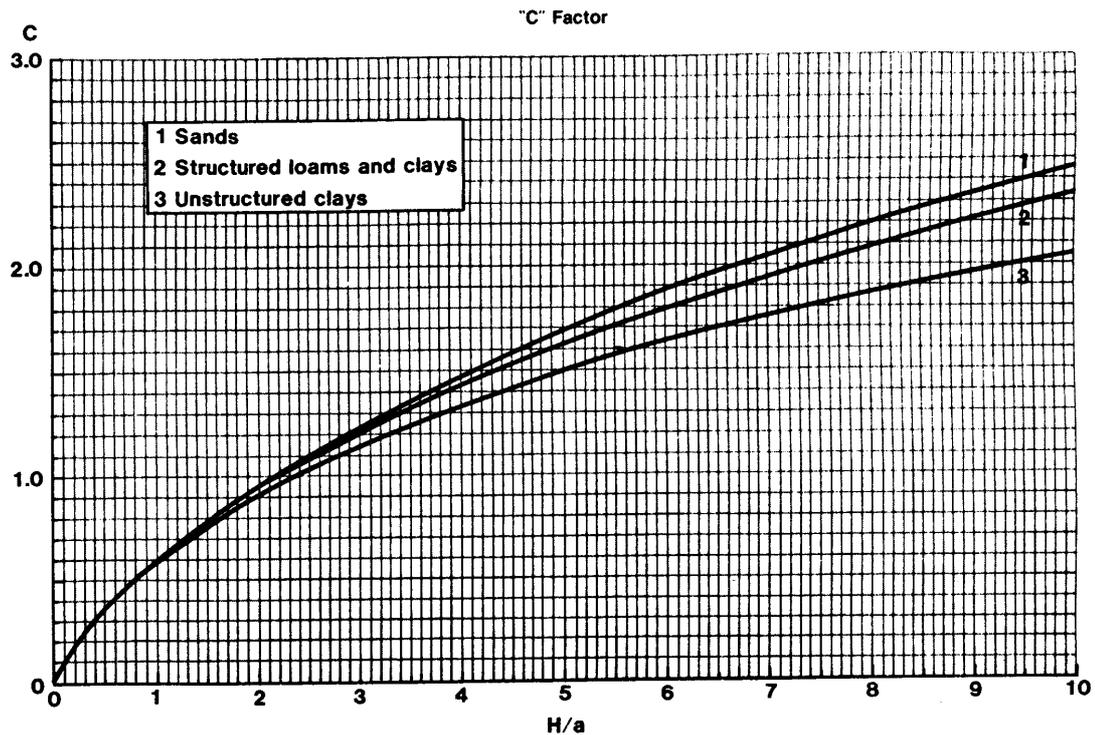


Abb. 2.2: Formfaktor C als Funktion von H/r (aus: Benutzeranl. der Fa „Soil Moisture“).

Der Formfaktor C hängt nur in geringem Umfang von der Textur ab. Die Werte in Abhängigkeit von H/r können Abb. 2.2 entnommen werden.

Das „matrix flux potential“ Φ_m ist definiert durch

$$\Phi_m = \int_{-\infty}^{\psi} K(\psi) d\psi \quad (2.2)$$

hierbei ist $K(\psi)$ die hydraulische Leitfähigkeit als Funktion des Matrixpotentials ψ .

Gleichung (2.1) enthält zwei Unbekannte. Zur Lösung gibt es verschiedene Strategien:

1. Durchführung von zwei Messungen pro Messtiefe
 \Rightarrow Zwei Gleichungen mit zwei Unbekannten
2. Durchführung von mehr als zwei Messungen pro Messtiefe
 \Rightarrow lineare Regression
3. Annahmen über das Verhältnis $\alpha^* = K_g / \Phi_m$
 \Rightarrow Elimination der Unbekannten Φ_m

Für α^* werden in Abhängigkeit von den Bodeneigenschaften verschiedene Werte angegeben (Tab. 2.1).

Im Praktikum werden Strategie 1 und Strategie 3 verwendet und miteinander verglichen.

Tab. 2.1: Literaturwerte für α^* (Elrick and Reynolds, 1992).

Bodeneigenschaften	Wert für α^* (cm ⁻¹)
Grobsand, stark strukturierte Böden	.36
Mittel- und Feinsand, „normal“ strukturierte Böden	.12
Unstrukturierte, feintexturierte Böden	.04
Kompakter Ton	.01

2.4 Geräte und Materialien

- Bohrzeug (Ø 6 bis 10 cm)
- Guelph-Permeameter
- Wasservorrat (20 l Kanister)
- Uhr (Stoppuhr)

2.5 Literatur

Elrick D.E. and W.D. Reynolds, 1992. Methods for analyzing constant head well permeamter data. Soil Sci. Soc. Am. J. 56, 320-323.

Elrick D.E., G.W. Parkin, W.D. Reynolds, und D. J. Fallow, 1995. Analysis of early-time and steady state single-ring infiltration under falling head conditions. Water Resour. Res. 31, 1883–1893.

3 Tensionsinfiltrrometer

3.1 Prinzip

Das Tensionsinfiltrrometer (Abb. 3.1) dient zur Bestimmung der *ungesättigten* Leitfähigkeit. Im Unterschied zum Ringinfiltrrometer stellt dieses Gerät dem Boden Wasser zur Verfügung, welches einen geringeren Druck als der Luftdruck der Atmosphäre aufweist. Die genaue Funktionsweise des Gerätes sowie detaillierte Beschreibungen des Aufbaus, der Wartung und Pflege und der Meßvorbereitungen sind im Anhang dargestellt.

3.2 Durchführung der Messung

1. Das Befestigen der Versorgungsmembran incl. des Drahtgitters [J] und des Vlieselines [K] mit Hilfe des Gummibandes [G] und des Rohrbinders [H] erfolgt einen Tag vor Versuchsdurchführung durch die Betreuer. Die Membranen müssen vorher, zur Vermeidung von Lufteinschlüssen, 24 Stunden gewässert werden.
2. Zusammenbau und Befüllung des Tensioninfiltrrometers:
 - Einstellen in Wanne
 - Einfüllen von Wasser in Vorratsrohr, bis zu einer Höhe von ca. 5 cm.
 - Verschließen der Auslauföffnung
 - Füllen des Vorratsrohrs bis ca. 50 cm Höhe
 - Einstellen der Kapillare im Unterdruckrohr bis zur gewünschten Unterdrucktiefe
 - Abziehen von Luft über Port A, bis Luft durch das Unterdruckrohr nachgezogen wird.
3. Vorbereiten einer absolut planen, genügend großen Versuchsfläche. Hierzu setzen wir einen neu entwickelten „Bodenschäler“ ein!
4. Entnahme von drei Stechzylindern im Umkreis des Tensionsinfiltrrometers zur Bestimmung von Anfangswassergehalt und Lagerungsdichte (Stechzylinder vorher wiegen).
6. Bereitlegung von Stoppuhr und Schreibgerät.
7. Aufsetzen des befüllten Tensionsinfiltrrometers und sofortiger Start der Infiltrations-

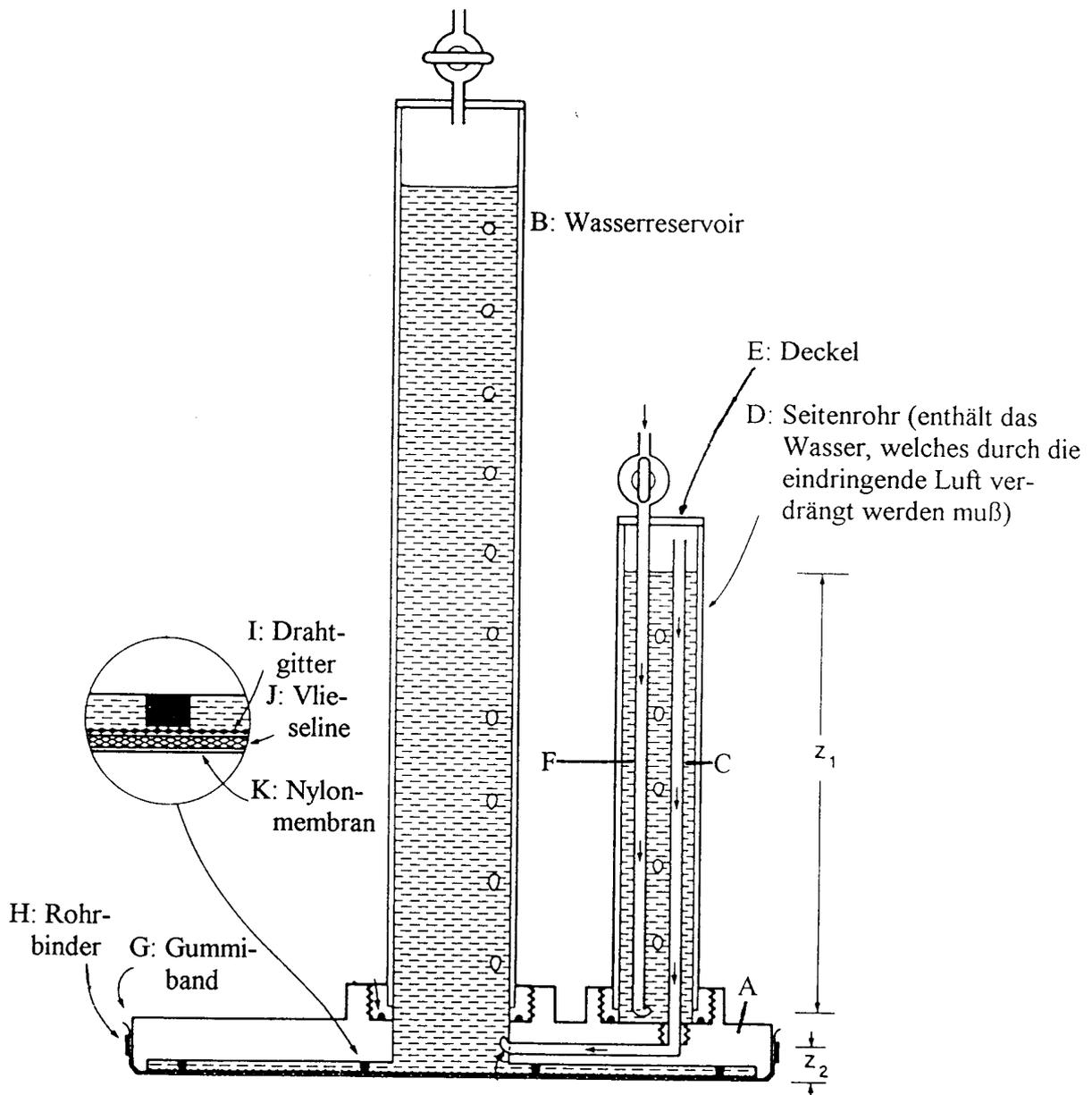


Abb. 3.1: Aufbau eines Tensionsinfiltrometers (aus Perroux und White, 1988).

messung durch Öffnen des Verschlusses am Auslauf

8. Ablesen der Wasserestände in der Anfangsphase (Sorptionsphase) alle 15 Sekunden (2-3 Personen), später in 1 - 5 Minuten Abständen, bis eine konstante Infiltrationsrate erreicht ist (90 min - 3 h).
9. Entnahme des Gerätes, sofortiges Säubern (Abpülen) der Membran, Rückstellen in wassergefüllte Wanne.
10. Unmittelbar nach Wegnahme des Infiltrometers Beprobung der oberen 2-3 mm des

Boden (ca. 5-10g, Wägeschälchen) zur Bestimmung des Endwassergehaltes.

11. Entnahme der drei Stechzylinder.

12. Wägung der Stechzylinder und Bodenprobe vor und nach Trocknung (105°C)

3.3 Auswertung

Die Auswertung dieses Versuches basiert generell auf dem Verfahren von Wooding (1968), welches die 3D Infiltration (gesättigt/ungesättigt) aus einer kreisrunden Fläche beschreibt. Weitere Annahmen gemäß White & Sully (1987) sowie Philip & Knight (1974) führen zu folgender Formel:

$$K(\theta_e) = \frac{q_\infty}{\pi r^2} - \frac{4bS^2}{\pi r(\theta_e - \theta_i)} \quad (3.1)$$

mit:	$K(\theta_e)$	=	ungesättigte Leitfähigkeit beim Endwassergehalt θ_e (cm/d)
	q_∞	=	Endinfiltrationsrate (cm ³ /d)
	r	=	Radius der Kontaktfläche Membran-Boden (cm)
	b	=	empirischer Faktor (b=0.55 hat sich bewährt) (-)
	S	=	Sorptivität (cm/d ^{-1/2})
	θ_e	=	Endwassergehalt des Bodens (-)
	θ_i	=	Anfangswassergehalt des Bodens (-)

Zur Bestimmung der Infiltrationsraten müssen die Wasserreservoirs (Rohre) des Tensionsinfiltrimeters exakt vermessen werden (Füllhöhe bei definierter Volumenzugabe messen). Die Sorptivität ergibt sich aus den Messdaten der Anfangsphase des Versuches. Zur Ermittlung der Sorptivität wird die flächenbezogene kumulative Infiltration [cm] über die Wurzel der Zeit aufgetragen. Sie ergibt sich aus der Ableitung dieser Kurve zum Zeitpunkt $t=0$ und kann durch die Steigung einer Regressiongeraden für die ersten 4-5 Meßpunkte approximiert werden.

3.4 Material

- Wasserwaage
- Bearbeitungswerkzeug zur Präparation einer ebenen Bodenoberfläche von ca. 50x50cm („Bodenschälmaschine“).

- Feinsand zur Ausgleiung von evtl. Unebenheiten
- Stoppuhr
- Schreibgerät
- 1 Eimer mit sauberem Wasser
- Kanister (25 l) mit sauberem Wasser
- 3 Wägeschälchen.
- 3 Stechzylinder mit Deckeln und Transportbehältnis; Beschriftungsmaterial etc.

3.5 Literatur

Perroux K.M. und I. White, 1988: Designs for disc permeameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52, 1205-1215.

Philip J.R. und J.H. Knight, 1968: On solving the unsaturated flow equation: 3. New quasi-analytic technique. *Soil Science*, 117, 1-13.

White I. und M.J. Sully, 1987: Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration. *Water Resour. Res.*, 23(8), 1514-1522.

Wooding R.A., 1968. Steady infiltration from a shallow circular pond. *Water Resour. Res.* 4(7), 1259-1273.

4 Bohrlochmethode

Feldmessungen der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit werden vorzugsweise unterhalb des Grundwasserspiegels durchgeführt. Man unterscheidet Bohrlochmethoden (Bouwer und Jackson, 1974) und Piezometermethoden (Johnson et al., 1952). Techniken, die sich über dem Grundwasserspiegel anwenden lassen, werden z.B bei Bouwer (1961,1962) beschrieben.

In situ-Messungen der hydraulischen Leitfähigkeit spielen im Grundwasserbereich eine herausragende Rolle, da dort, im Gegensatz zum oberflächennahen Boden, eine Probenahme mit anschließender Laboruntersuchung schwierig oder gar nicht möglich ist. Zudem werden durch Probenahmen natürliche Verhältnisse oft nicht einwandfrei erfasst. Die im Labor ermittelten Werte spiegeln darüber hinaus nur punktuelle Verhältnisse wieder.

4.1 Prinzip

Das Grundprinzip der Bohrlochmethode besteht darin, den Wiederanstieg des GW-Spiegels in einem abgepumpten Bohrloch bei definierten Bedingungen zu messen. Dazu wird unter minimaler Störung ein Bohrloch in den Boden niedergebracht, das bis unter den Grundwasserspiegel reichen muß. Nach Einstellung des Ruhewasserspiegels muß die Höhe der Wassersäule im Brunnen H , der Radius r des Bohrlochs und die Strecke s zwischen der Bohrlochsohle und der undurchlässigen Schicht bestimmt werden (siehe Abb. 4.1).

Anschließend wird Wasser aus dem Bohrloch abgepumpt und die Rate des Anstiegs des Wasserspiegels im Bohrloch mit Hilfe eines Schwimmers gemessen (Rate $\Delta h/\Delta t$). Daraus kann die gesättigte Leitfähigkeit des umgebenden Bodens berechnet werden.

Mathematisch handelt es sich hierbei um ein Anfangs-Randwertproblem, das von Boast und Kirkham (1971) analytisch (unter Verwendung von Besselfunktionen) und von Kretzschmar et al. (1989) numerisch (mit einem Relaxationsverfahren) auf der Basis der Laplacegleichung in Zylinderkoordinaten gelöst wurde.

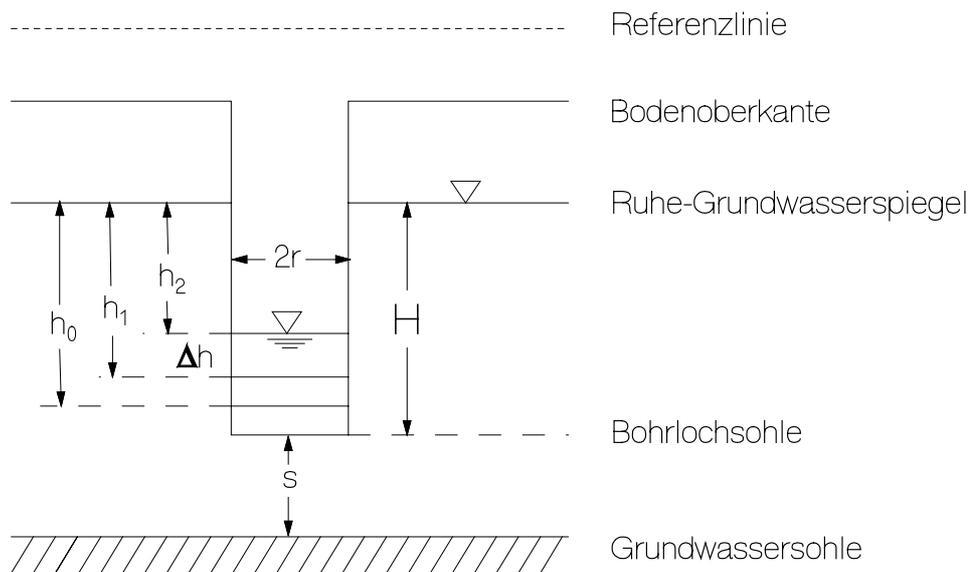


Abb. 4.1: Bohrlochmethode. H : Tiefe des Bohrlochs unter Grundwasserruhepegel; h_0 : Tiefe der maximalen Wasserabsenkung; h_1, h_2 : Tiefen zu zwei Zeitpunkten während des Wiederanstiegs; s : Abstand zwischen Bohrlochsohle und Stauer.

4.2 Durchführung

Bei der Durchführung der Bohrlochmethode müssen folgende Punkte beachtet werden:

- Die Werte für H , h_0 und r sollten im folgenden Bereich liegen:
 $H > 40\text{cm}$; $20\text{cm} < h_0 < 40\text{cm}$; $3\text{cm} < r < 7\text{cm}$.
- Die Bohrlöcher sollten mindestens einen Tag vor der Messung niedergebracht werden, damit die Einstellung des Ruhewasserspiegels gewährleistet ist. Erfahrungen bestätigen, daß nach 24 Stunden der Bohrlochwasserspiegel nicht weiter steigt und daß sich während des Bohrens zugestrichene Bodenporen freigespült haben.
- Das Wasser muß für die Entstehung des Absenktrichters so schnell wie möglich aus dem Bohrloch gepumpt werden. Wasserstandsmeßgeräte und Stoppuhr sollten in Bereitschaft liegen.
- Der Zufluss des Wassers in das Bohrloch ist letztendlich kein zeitlich konstanter sondern ein instationärer Prozeß, da der antreibende Gradient (= Unterschied zwischen Ruhewasserspiegel und abgesenktem Wasserspiegel im Bohrloch) abnimmt. Messungen sollten nur in dem anfänglich nahezu linearen zeitlichen Anstieg der Wassersäule bis ca.

$0.25h_0$ erfolgen (Anfangs-Randwertproblem!).

- Bis zum Erreichen der Wasserstandshöhe von $h=0.25h_0$ sollten ca. 3-6 Einzelmessungen von Δh und Δt durchgeführt werden.

4.3 Auswertung

Um die hydraulische Leitfähigkeit trotzdem über Zuflussraten zu einem Bohrloch berechnet zu können, entwickelte Ernst (zitiert in Bouwer und Jackson, 1974; Boast und Kirkham, 1971) eine empirische Näherungslösung, die auf einer 3-dimensionalen numerischen Lösung basiert. Dabei unterscheidet man zwischen 2 Fällen (Kretschmar, 1986) (siehe Abb. 4.1):

a) $s > 0.5H$

In diesem Fall berechnet sich K_s nach:

$$K_s = \frac{4.63r^2}{\frac{h_1+h_2}{2}(H+20r)\left(2-\frac{h_1+h_2}{2H}\right)} \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (4.1)$$

b) $s < 0.5H$

In diesem Fall muß folgende Formel für K_s angewendet werden:

$$K_s = \frac{4.17r^2}{\frac{h_1+h_2}{2}(H+10r)\left(2-\frac{h_1+h_2}{2H}\right)} \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (4.2)$$

Diese Gleichungen geben nur einen mittleren K -Wert für den Bereich um das Bohrloch an. Anisotropien lassen sich nicht erfassen. Systematische Vergleiche zwischen der exakten Lösung und der Näherungslösung von Ernst sind zu finden in van der Ploeg und Huwe (1988).

4.4 Mögliche Fehler und Abweichungen

Neben der Tatsache, daß die Berechnungsgleichungen semi-empirisch sind, kann man folgende Abweichungen und Fehler feststellen (Kretschmar, 1986):

- Fehlansatz von r um 0.5cm ergibt ca 20% K -Wert Abweichung;
- Fehlermessung von H um 1cm ergibt ca. 2% K -Wert Abweichung;
- Abweichungen zwischen verschiedenen Meßbrunnen um 100% gelten als normal;
- Betrachtet man den großen Wertebereich für mögliche K -Werte, so ist die Angabe der Größenordnung für K in den meisten Fällen zufriedenstellend.

4.5 Materialien

- Edelman-Bohrerset
- Verrohrungsmaterial mit Verlängerungsstücken
- perforierte Verrohrung für den Grundwasserbereich
- Pumpe mit Schlauch (oder Rohr) zum Abziehen von Wasser oder Wasserschöpfer
- „Diver“ – Datenlogger zur Aufzeichnung des Wasserstandes + Zubehör

4.6 Literatur

- Amoozegar A. und Warrick A.W. (1986): Hydraulic conductivity of saturated soils: Field Methods. *In*: Klute A.: Methods of Soil Analysis, Part 1. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin USA; 735–770.
- Boast C. W. und Kirkham D. (1971): Auger hole seepage theory. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*; 35; 365-373.
- Bouwer H. (1961): A double tube methode for measuring hydraulic conductivity of soil in sites above a water table. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*; 25; 334-342.
- Bouwer H. (1962): Field determination of the hydraulic conductivity above a water table with the double tube method. *Soil Sci. Soc. Am. J.*; 26; 330-335.
- Bouwer H. und Jackson R.D.(1974):Determining soil properties. In J. van Schilfgaarde (ed.): Drainage for agriculture. *Agronomy* 17; 611-672.
- Johnson H.P., Frevert R.K. und Evans D.D. (1952): Simplified procedure for the measurement and computation of soil permeability below the water table. *Agr. Eng.*; 33; 283-289.
- Kretschmar, R. 1996. *Kulturtechnisch-bodenkundliches Praktikum*. Ausgewählte Labor- und Feldmethoden. Inst. für Wasserwirtschaft und Landschaftsökologie, Christian-Albrechts-Universität Kiel.
- Kretschmar, R., B. Huwe und R.R. van der Ploeg (1989): Entwicklung eines Computerverfahrens zur Berechnung der hydraulischen Leitfähigkeiten mit der Bohrlochmethode. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 152, 17-20.
- Van der Ploeg, R.R. und B. Huwe (1988): Einige Bemerkungen zur Bestimmung der Wasserleitfähigkeit mit der Bohrlochmethode. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 151, 251-253.