

Kritische Bemerkungen zur Bestimmung der Wasserspannung im Boden mit der Blockmethode

F. Kastanek

Some critical comments on the determination of soil water tension applying blocks

1. Einleitung

Die Menge und die Verfügbarkeit des Bodenwassers sind fundamentale Meßgrößen bei der Erfassung des Bodenwasserhaushaltes im Feld. Der Bodenwassergehalt ist ein Maß für die Menge gespeicherten Bodenwassers. Die gleiche Priorität genießt die Kenntnis über das Vermögen des Bodens, Wasser festzuhalten. Dieses Festhaltevermögen kann ebenfalls im Feld gemessen werden und ist für die Bewirtschaftung des Bodenwassers, besonders bei Bewässerungen, ein wichtiges Steuermaß. Es wird damit die relative Verfügbarkeit des Bodenwassers angegeben bzw. jener Wassergehalt, bei dem das Wasser im Boden so fest gebunden ist, daß es von der Pflanze nicht mehr oder in zu geringer Intensität aufgenommen werden kann. Die Messung des Festhalte-

vermögens gestattet somit die Festlegung des Beginns einer Bewässerungsgabe, während aus der Messung des Bodenwassergehaltes auf die aufzubringende Wassermenge geschlossen werden kann (TAYLOR, 1955).

Das Wasser im Boden ist verschiedenen Kräften ausgesetzt, unter anderem auch Kräften, welche aus den Wechselbeziehungen des Bodenwassers mit den festen Bestandteilen des Bodens herrühren (Grenzflächenkräfte). Die (vektoriellen) Kräfte werden durch ihre (skalaren) potentiellen Energien, ihre Potentiale, ersetzt (bei Vernachlässigung der kinetischen Energie). Der Energiezustand des Bodenwassers ist somit seinem Potential gleichzusetzen. Unterschiede im Energieinhalt führen zu Bewegungerscheinungen von Stellen hohen Inhalts zu geringeren. Ein kleineres Potential bedeutet somit geringerer Energieinhalt

Summary

Tensiometers and blocks are in common use to measure soil water suction. The working range of tensiometers is only 0.7 to 0.8 bar. To measure higher values of soil water tensions psychrometric methods are applicable, but for tensions more than 0.7 to 0.8 bar only block methods may be used. Some sources of errors may restrict the accuracy to measure soil water tension or soil water content. Under favorable conditions a range of the measured parameters can be given. At no account the block method should be accepted uncritically.

Keywords: block method, soil water suction, energy of soil water, soil water retention, soil water content.

Zusammenfassung

Die zur Zeit gebräuchlichsten Geräte zur Messung der Energie, mit der das Bodenwasser festgehalten wird, der Wasserspannung, sind Tensiometer und Blöcke. Tensiometer haben den Nachteil, nur bis zu einem Bereich von 0,7 bis 0,8 bar Wasserspannung funktionstüchtig zu bleiben. Sieht man von ganz extremen Werten der Wasserspannung ab, bei denen auch die psychrometrische Methode angewendet werden kann, steht für große Werte nur die Blockmethode zur Verfügung. Es gibt jedoch eine Reihe von Fehlerquellen, welche die Verwendung von Blöcken sowohl zur Wasserspannungsmessung als auch zur Wassergehaltsbestimmung als unbefriedigend erscheinen lassen. Es kann gezeigt werden, daß bestenfalls ein Bereich der Wasserspannung bzw. des Wassergehaltes angegeben werden kann. Auf keinen Fall aber sollten die mit Blöcken gemessenen Werte kritiklos übernommen werden.

Schlagworte: Blockmethode, Wasserspannung im Boden, Energieinhalt des Bodenwassers, Wasserfesthaltevermögen, Bodenwassergehalt.

und geringere Verfügbarkeit (GROENEVELT and KIJNE, 1979). Jenes Potential, welches im Zusammenhang mit den Grenzflächenkräften steht, wird Matrixpotential genannt (ISSS, 1976; SSSA, 1987; KASTANEK et al., 1980). Potentiale können auf verschiedene Einheiten bezogen werden. Wird die Energie auf die Volumeneinheit bezogen ($J \cdot m^{-3} = Pa$), so ergibt sich für das Potential die Dimension Druck. Somit ist es möglich, das Potential des Bodenwassers in Druck-Äquivalenten auszudrücken bzw. wenn man berücksichtigt, daß der Druck als Druckhöhe (nicht SI-Einheiten konform in m WS) angegeben werden kann, auch als äquivalente Druckhöhe. Sinnverwandte Bezeichnungen für das Matrixpotential sind demnach der Wasserdruck, die Wasserspannung (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1984) bzw. die Saugspannung (als negativer Druck) und die Druckhöhe, deren negativer Wert vielfach als Saugspannungshöhe (in cm WS) bezeichnet wird.

2. Meßprinzip

Das bekannteste Gerät zur Messung der Wasserspannung ist das Tensiometer (CASSEL and KLUTE, 1986), ein für negative Werte der Wasserspannung adaptiertes Piezometer. Tensiometer haben allerdings den Nachteil, nur bis ca. 0,7 bis 0,8 bar Wasserspannung funktionstüchtig zu sein. BOUYOCOS and MICK (1940) waren die ersten, die erkannten, daß die Messung des elektrischen Widerstandes zwischen zwei in einem porösen Block (Gipsblock) eingegossenen Elektroden Rückschlüsse auf Änderungen des Bodenwassergehaltes gestattet.

Vielfach werden Blöcke als Geräte zur Bestimmung des Wassergehaltes eines Bodens angesehen. Dies ist jedoch nur in Ausnahmefällen richtig. Betrachten wir vorerst das Meßprinzip eines Blocks. Diesem liegt zugrunde, daß die elektrische Leitfähigkeit zwischen zwei Elektroden eine Funktion des Wassergehaltes des dazwischen befindlichen Materials ist. Theoretisch wäre eine Vorrichtung zur Messung des Bodenwassergehaltes denkbar, bei der nur die elektrische Leitfähigkeit zwischen zwei im Boden vergrabenen Elektroden gemessen wird. Abgesehen vom Einfluß des Salzgehaltes des Bodenwassers, darf der Boden im Bereich zwischen den Elektroden nicht gestört werden. Dies wirft neben der Frage der korrekten Einbringung auch das Problem der Eichung auf, welche dann ja an Ort und Stelle erfolgen muß. Derartige Versuche sind fehlgeschlagen. Um dem störenden Einfluß der Salzkonzentration aus dem Wege zu gehen, wurden Elektroden in einem Gipsblock

vergossen, so daß das im Gipsblock enthaltene Wasser stets mit Gips gesättigt angenommen wird. Diese Gipsblöcke werden dann im Boden vergraben. Zwischen den Elektroden wird die Leitfähigkeit der im Gipsblock enthaltenen Gipslösung gemessen und daraus auf den Wassergehalt des Gipsblocks geschlossen. Dieser ist aber keinesfalls gleich dem Wassergehalt des angrenzenden Bodens. Gleichheit besteht zwischen der Energie, mit der das Wasser im Boden und der Energie, mit der das Wasser im Block festgehalten wird. Es herrscht also Gleichheit der Wasserspannungen vor, und da in der Regel der Gipsblock eine andere kapillare Zusammensetzung hat als der Boden, werden bei gleicher Wasserspannung verschiedene Mengen Wasser im Boden und im Gipsblock festgehalten. Wenn man also in dem Feld die elektrische Leitfähigkeit eines Gipsblockes mißt, kann man, zumindest theoretisch, auf die im Gipsblock vorhandene Wasserspannung rückschließen, welche im Gleichgewicht mit der Wasserspannung des Bodens steht. Ein Gipsblock ist also gedacht als ein Gerät zur Messung der Wasserspannung im Boden. Leider haben Gipsblöcke (zumindest älterer Bauart) den Nachteil, sich im Bodenwasser aufzulösen. Um auch langfristige Messungen durchführen zu können, kam man vom Gipsblock ab und vergoß die beiden Elektroden in porösen Kunststoffen, Fiberglas, Nylon oder Keramikmaterial (BOUYOCOS, 1949; COLMAN and HENDRIX, 1949). Damit rückt aber das Problem wechselnder Salzgehalte des Bodenwassers wieder in den Vordergrund. Andere Methoden zur Messung des Wassergehaltes poröser Körper ohne Elektroden und ohne Messung der elektrischen Leitfähigkeit können dabei Abhilfe schaffen. (PHENE et al., 1971a; PHENE et al., 1971b).

3. Fehlerquellen

Es gibt eine Reihe von Punkten, auf die bei der Verwendung von Blöcken zur Wasserspannungsmessung zu achten ist:

- korrekte Eichung,
- Kontakt mit dem umgebenden Boden,
- Temperatur,
- Reaktionszeit (Trägheit der Meßanzeige),
- Salzgehalt des Bodens,
- Feldverlauf zwischen den Elektroden (Bauart der Blöcke)
- Langzeitverhalten,
- Meßbereich,
- Streuung der Eichkurven einer bestimmten Bauart,
- Hysteresis zwischen Wasserspannung und gemessene elektrischer Leitfähigkeit (Wassergehalt) des Blockes,

- Hysterisis der Wasserspannungs-Wassergehaltsbeziehung des Bodens,
- Inhomogenitäten des Bodens.

3.1 Korrekte Eichung

Die Eichung der Blöcke erfolgt im Labor in Druckplattenapparaten. Die Blöcke werden verschiedenen Wasserspannungen ausgesetzt und die dabei sich einstellenden elektrischen Leitfähigkeiten gemessen.

Bei der Eichung der Blöcke im Druckplattenapparat ist darauf zu achten, daß ein guter Kontakt zwischen der porösen Keramikplatte des Druckplattenapparates und dem darauf befindlichen Block gewährleistet ist. Zu diesem Zweck wird zwischen dem Block und der Keramikplatte ein Kontaktmedium – zumeist ein sehr feinkörniger Boden – verwendet. Soll der Block zur Messung der Wasserspannung Verwendung finden, ist es falsch, den Block komplett mit dem Kontaktmedium zu umhüllen. Wegen des feinkapillaren Aufbaus des umhüllenden Kontaktmediums ist dieses über einen weiten Wasserspannungsbereich mit Wasser gesättigt und verhindert Luftaus- oder -zutritt aus dem oder in den Block.

Es ist aber auch eine direkte Eichung eines Blocks zur Messung des Wassergehalts des Bodens möglich. Zu diesem Zweck wird der zu eichende Boden in ein Gefäß gegeben, mit Wasser gesättigt und in den Boden ein Block eingebracht. Die Verdunstung verursacht eine Abnahme des Wassergehalts im Boden. Durch gleichzeitige Wägung des Gefäßes mit dem Boden und der Messung der elektrischen Leitfähigkeit des Blocks kann eine direkte Eichbeziehung zwischen der elektrischen Leitfähigkeit des Blocks und dem Wassergehalt des Bodens gewonnen werden. Abgesehen davon, daß der Boden im Gefäß gestört ist, beinhaltet diese Art der Eichung offenbar Probleme mit der Meßgenauigkeit, wie aus den großen Streuungen der Meßergebnisse in Abbildung 1 ersichtlich ist (WEICHSEL-BAUMER, 1992).

3.2 Kontakt mit dem umgebenden Boden

Ähnlich wie bei der Eichung des Blocks im Druckplattenapparat ist auf guten Kontakt des im Boden vergrabenen Blocks mit dem umgebenden Boden zu achten. Zumeist wird der Block mit feinerem Bodenmaterial umhüllt. Dies beinhaltet jedoch die Gefahr der "Luftblockade" des Blocks, sodaß das im Block enthaltene Wasser wohl jede Spannung

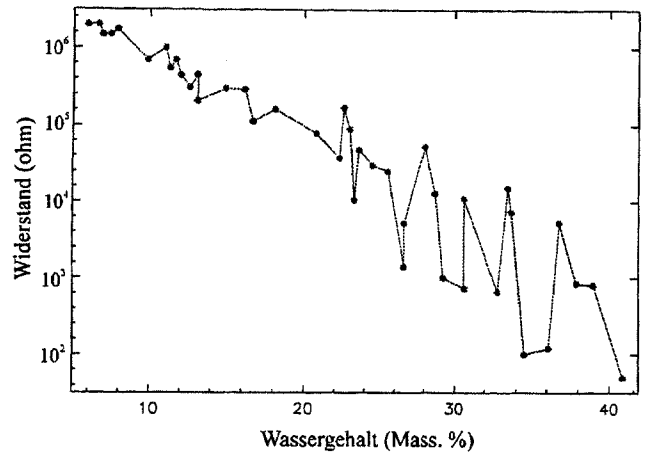


Abbildung 1: Eichung eines Colman-Blocks in einem mit Boden gefüllten Gefäß (WEICHSEL-BAUMER, 1992, persönliche Mitteilung)

Figure 1: Calibration of a Colman-block within a pot filled with soil (WEICHSEL-BAUMER, 1992, personal communication)

des umgebenden Bodens annehmen kann, nicht aber in der Lage ist, entsprechend dieser Wasserspannung Wasser abzugeben beziehungsweise aufzunehmen. Vorteilhafter ist es, als Kontaktmedium ein Material (Boden) zu verwenden, dessen Lufttrittspunkt kleiner als der des Blockes ist.

3.3 Temperatur

Als Beispiel für die Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit bei vorgegebenen Wassergehalten werden Messungen mit Colman-Sensoren gezeigt (COLMAN and HENDRIX, 1949). Es ist demnach notwendig, zusätzlich zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit des Blocks auch die Temperatur im Bereich des eingebauten Blocks oder im Block zu messen (Abb. 2).

Weiters geht auch aus den Messungen von COLMAN und HENDRIX (1949) hervor, daß der elektrische Widerstand eines Blockes deutlich zunimmt, wenn bei tiefen Temperaturen das Wasser zu frieren beginnt. Diese Zunahme ist umso ausgeprägter, je mehr Wasser im Boden enthalten ist. Obendrein konnten zwischen Auftauen und Gefrieren des Bodenwassers Hysteresiserscheinungen bei der Messung der elektrischen Leitfähigkeit beobachtet werden. Dennoch eignet sich die Blockmethode sehr gut, die Temperatur, bei der ein Übergang vom festen in den flüssigen Aggregatzustand des Wassers im Boden und umgekehrt eintritt, festzustellen.

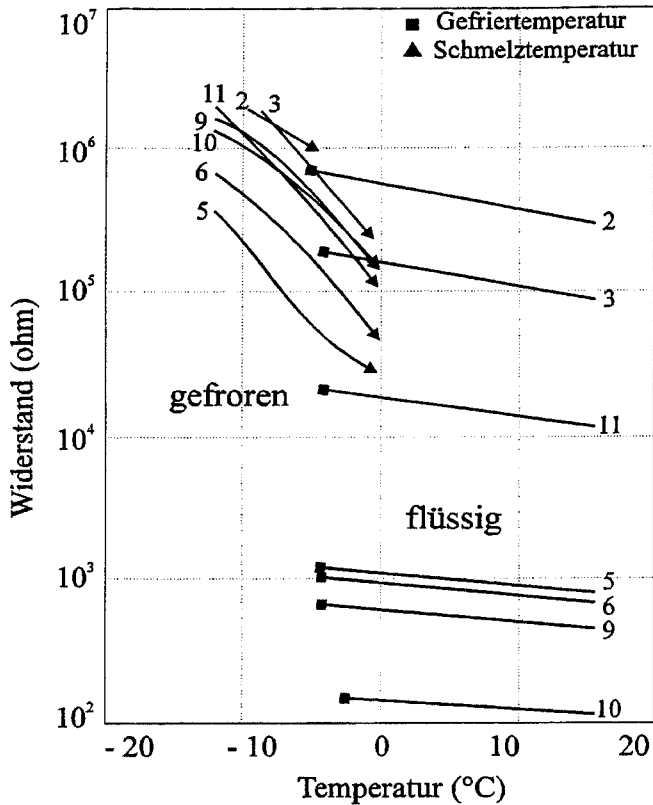


Abbildung 2: Temperaturabhängigkeit des Widerstandes für Colman-Sensoren (COLMAN and HENDRIX, 1949):

- 10 ... Boden gesättigt
- 5 ... ca. Feldkapazität
- 3 ... ca. Welkepunkt

Figure 2: Temperature-dependence of the electrical resistance of a Colman-sensor (COLMAN and HENDRIX, 1949):

- 10 ... saturated soil
- 5 ... about field capacity
- 3 ... about wilting point

3.4 Reaktionszeit

Jedes Tensiometer weist eine Trägheit der Meßanzeige auf, da eine bestimmte Wassermenge vom Boden in das Tensiometersystem bzw. umgekehrt bewegt werden muß. Die Empfindlichkeit und die Wasserleitfähigkeit der porösen Tensiometerkerze und die Durchlässigkeit des umgebenden Bodens sind für die Trägheit der Meßanzeige verantwortlich (KLUTE and GARDNER, 1962; TOWNER, 1980). RICHARDS (1949) definierte die Reaktionszeit mit $T_r = 1/(C \cdot S)$ wobei C das Wasserdurchtrittsvermögen und S die Empfindlichkeit bedeuten. Das Wasserdurchtrittsvermögen C ist definiert als jenes Flüssigkeitsvolumen, welches pro Zeiteinheit und pro Einheit des Druckunterschiedes (Wasserspannungsdifferenz) in das bzw. aus dem Meßsystem ein- bzw. austritt. Die Empfindlichkeit S des Tensiometers ist definiert als Druckänderung (Wasserspannungsänderung) pro Volumeneinheit der aufgenommenen bzw. abgegebenen Flüssigkeit. Mit Pressure-Transducern ausgestattete Tensiometer haben eine Reaktionszeit von ca. 0,1 s, herkömmliche Tensiometer mit 1,5 mm Durchmesser des Standrohres ca. 10 s (nach CASSEL and KLUTE, 1987).

Für Blöcke ist die Reaktionszeit nicht so einfach anzugeben wie bei den Tensiometern, da weder das Wasserdurchtrittsvermögen C noch die Empfindlichkeit S konstant sind. Für Gipsblöcke bestimmten HAISE and KELLEY (1946) den zeitlichen Verlauf des elektrischen Widerstandes bei verschiedenen Wasserspannungen im Drucktopf während des Eichvorganges (Abb. 3). Die Ergebnisse dieser Untersuchungen lassen erwarten, daß Blöcke beträchtliche

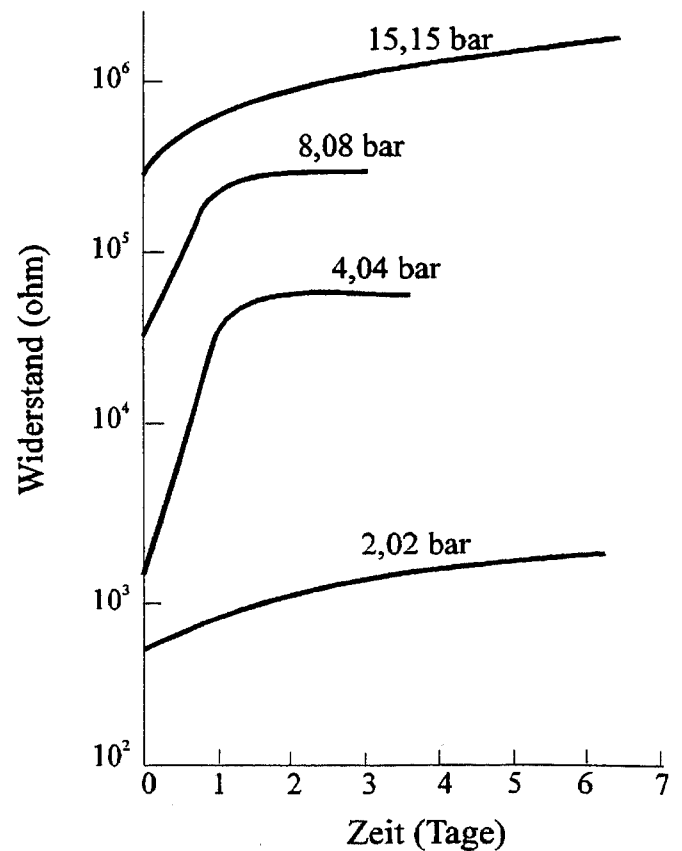


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf der in einem Gipsblock gemessenen Wasserspannung während des Eichvorganges (HAISE and KELLEY, 1946)

Figure 3: Water tension within a block in the course of time during calibration procedure (HAISE and KELLEY, 1946)

Reaktionszeiten haben. Sie sind somit nicht in der Lage, sich schnell ändernden Wasserspannungen korrekt anzupassen.

3.5 Salzgehalt des Bodens

Der Salzgehalt des Bodenwassers hat deutlichen Einfluß auf die gemessene elektrische Leitfähigkeit zwischen den Elektroden. Besonders bei Fiberglas-, Kunststoff- und Keramikblöcken wirkt sich der Salzgehalt störend aus. Um den Einfluß des Salzgehaltes so gering wie möglich zu halten, sollten entweder Gipsblöcke verwendet oder Blöcke gemeinsam mit dem zu untersuchenden Boden geeicht werden. COLMAN und HENDRIX (1949) verglichen die Eichkurven von Colman-Blöcken in zwei verschiedenen Böden und stellten beträchtliche Unterschiede fest (Abb. 4). CAMPBELL und GEE (1987) zeigten den Einfluß unterschiedlichen Salzgehaltes auf den Widerstand eines Fiberglasblockes für einen Boden (Abb. 5).

3.6 Feldverlauf zwischen den Elektroden

Das elektrische Feld zwischen zwei Elektroden in einem quaderförmigen Block verläuft zum Teil außerhalb des Blocks, sodaß die gemessene Leitfähigkeit zwischen den Elektroden dann auch von der elektrischen Leitfähigkeit des umgebenden Bodenmaterials abhängt. Das Ziel verschiede-

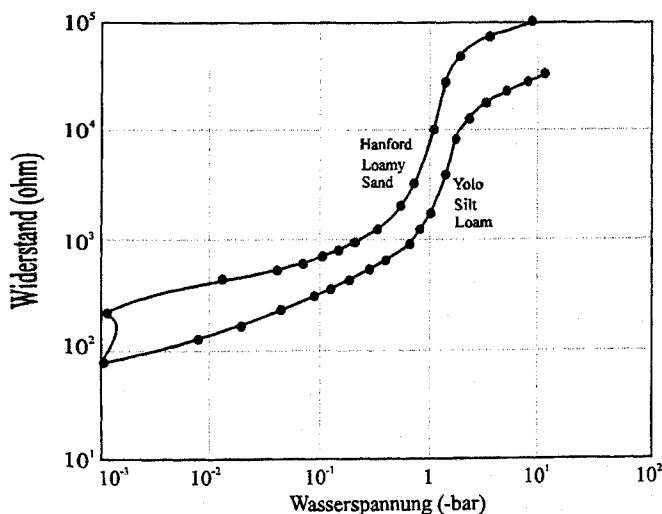


Abbildung 4: Eichkurven eines Colman-Blocks in verschiedenen Böden (COLMAN and HENDRIX, 1949)
 Figure 4: Calibration curves of a Colman-block for some soils (COLMAN and HENDRIX, 1949)

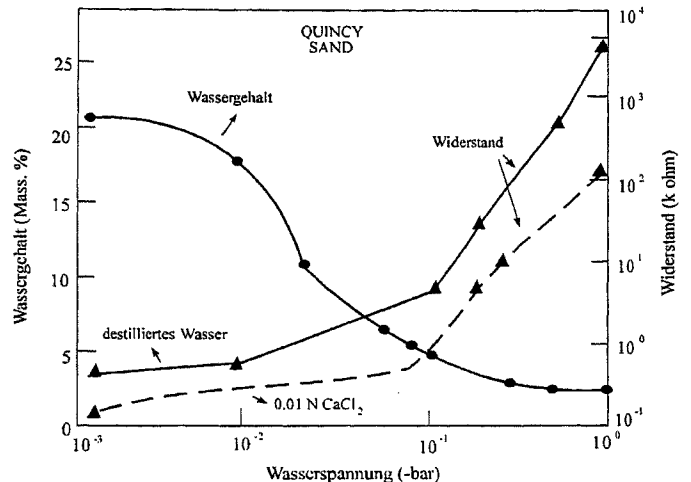


Abbildung 5: Eichkurven eines Fiberglasblockes in Quincysand, ursprünglich gesättigt mit
 a) destilliertem Wasser
 b) 0,01 CaCl₂ Lösung (CAMPBELL and GEE, 1987)
 Figure 5: Calibration curves of a fiber-glass block in Quincysand
 a) saturated with distilled water
 b) saturated with 0.01 CaCl₂ solution (CAMPBELL and GEE, 1987)

ner Bauarten von Blöcken ist es, den Feldverlauf unabhängig vom umgebenden Boden zu gestalten, damit der elektrische Widerstand des Blocks ausschließlich von der Leitfähigkeit des Blockmaterials zwischen den beiden Elektroden abhängt. Besonders die Anordnung einer zentralen Elektrode mit einer äußeren Gitterelektrode verhindert das Auswandern des Feldes aus dem Block.

Neben der Möglichkeit, den Wassergehalt des Blocks mit Hilfe der elektrischen Leitfähigkeit zwischen zwei Elektroden zu messen, gibt es auch die Möglichkeit, den Wassergehalt aufgrund von thermischen Eigenschaften des Blockes indirekt zu messen. PHENE et al. (1971a) beschreiben einen derartigen Block. Mit Hilfe einer kleinen Wärmequelle und eines Temperaturfühlers wird der thermische Diffusionskoeffizient bestimmt. Die Eichung im Labor erfolgt durch die Gegenüberstellung der Wasserspannung und des thermischen Diffusionskoeffizienten.

3.7 Messung der elektrischen Leitfähigkeit

Die Blockmethode ist ein indirektes Verfahren, das heißt es wird die elektrische Leitfähigkeit zwischen zwei Elektroden gemessen und daraus auf die Wasserspannung des Gipsblockes geschlossen. Zur Messung der elektrischen Leit-

fähigkeit wird ein elektrisches Wechselfeld mit vorgegebener, gerätespezifischer Frequenz angelegt. Bei fast allen in der vorliegenden Arbeit angeführten Publikationen wird aber nicht erwähnt, mit welcher Frequenz die Messung der elektrischen Leitfähigkeit erfolgte. Bei der Eichung eines Blockes mit verschiedenen Geräten zur Messung des elektrischen Widerstandes sind die gemessenen Widerstandswerte bei konstantem Wassergehalt des Blockes verschieden groß. Dies bedeutet aber, daß eine Eichkurve immer nur für ein System Block-Meßgerät gültig ist und daß im Felde die elektrische Leitfähigkeit mit demselben Gerät gemessen werden muß, mit dem der Block im Labor geeicht wurde.

3.8 Langzeitverhalten

Besonders in Böden mit hohem Wassergehalt neigen Gipsblöcke dazu, sich schnell aufzulösen. Schon nach einer Meßsaison können diese Blöcke funktionsuntüchtig werden. Unter trockenen Bedingungen jedoch können Gipsblöcke auch 10 Jahre ihren Dienst versehen. BOUYOUCOS (1953) schlug vor, Gipsblöcke mit einer dünnen Schutzschicht aus Kunstharz zu überziehen. Nichtsdestoweniger neigen auch diese Blöcke dazu, sich in nassen Böden zu zersetzen, so daß bei längeren Messungen die alten Blöcke von Zeit zu Zeit durch neue ersetzt werden müssen.

Aber auch Fiberglasblöcke weisen eine Änderung der Eichkurve mit der Zeit auf. ENGLAND (1965) schrieb die Verminderung der gemessenen Widerstände in einem COLMAN-Block der Einspülung von feinem Material zwischen die Fiberglассschichten zu. Während der ersten fünf Jahre nach dem Eingraben der Blöcke nahm der Widerstand besonders bei geringem Wassergehalt kontinuierlich ab. Durch Ausspülen der Einschlammungen konnten die Widerstände wieder deutlich vergrößert werden. Er vermutete eine maximale Funktionsdauer von Blöcken von weniger als fünfzehn Jahren in Abhängigkeit von Boden und Klima.

3.9 Meßbereich

Blöcke verschiedener Bauart haben unterschiedliche Meßbereiche. Als Beispiel seien zwei beim U.S. Global Change Research Program (YECK et al., 1995) verwendete Blöcke gezeigt (Abb. 6): der Keramikblock WATERMARK und der Fiberglasblock COLMAN, wobei die Eichung für abnehmende Wassergehalte vorgenommen wurde (WEICHSELBAUMER, 1992). Kleine Änderungen der Wasserspannung bei großen

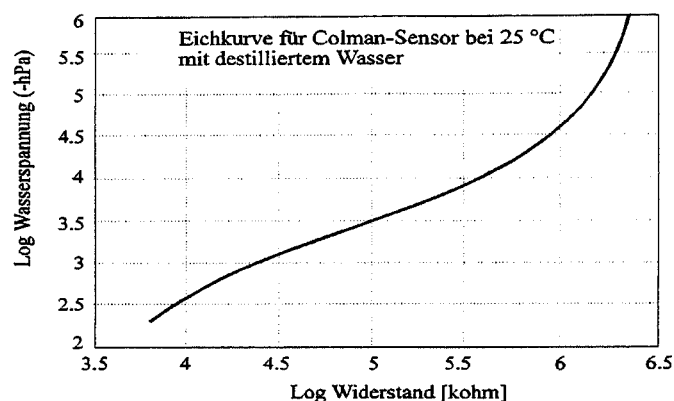
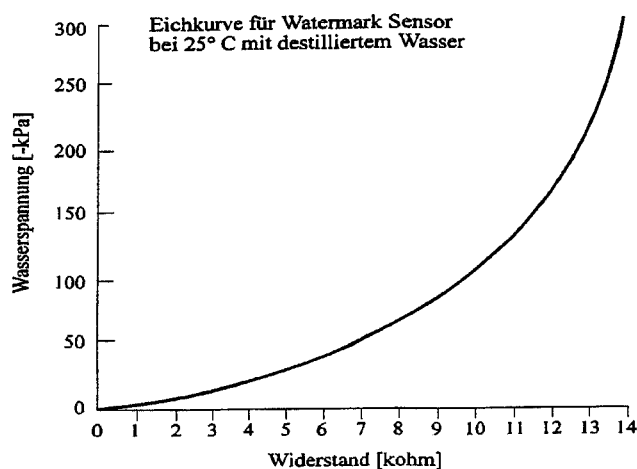


Abbildung 6: Eichkurven diverser Blöcke (WEICHSEL-BAUMER, 1992, persönliche Mitteilung)

Figure 6: Calibration curves of several blocks (WEICHSEL-BAUMER, 1992, personal communication)

Änderungen des Widerstandes bedeuten eine hohe Meßempfindlichkeit. Aus den Eichbeziehungen ist ersichtlich, daß der Watermark-Block vorwiegend für geringe Wasserspannungen (ca. 1 bar = 100 kPa) geeignet ist, der Colman-Block jedoch für größere Wasserspannungen. Um alle zu erwartenden Meßbereiche der Wasserspannung erfassen zu können, ist es erforderlich, verschiedene, den Meßbereichen angepaßte Blöcke, nebeneinander einzubauen.

3.10 Hysteresis zwischen Wasserspannung und gemessener elektrischer Leitfähigkeit

Wie bereits erwähnt, wird die elektrische Leitfähigkeit des Blockes gemessen, welche einerseits eine Funktion des Was-

sergehalts des Blockes ist, die uns aber nicht interessiert, aber andererseits gegen die zu diesem Wassergehalt gehörende Wasserspannung geeicht wird.

BOURGET et al. (1958) veröffentlichten für verschiedene Bauarten jeweils zwei Eichkurven (Abb. 7). Die untere

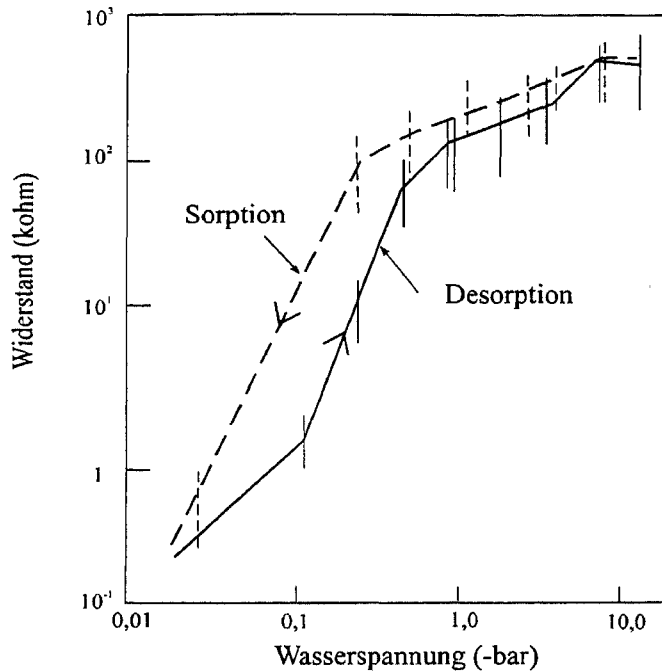


Abbildung 7: Eichkurven für Nylonblöcke (BOURGET et al., 1958)
 Figure 7: Electrical resistance of nylon blocks vs. water tension (BOURGET et al., 1958)

Kurve ist für die Entwässerung eines ursprünglich gesättigten Blocks (Desorptionskurve) zutreffend, die obere für die schrittweise Wasserzugabe zu einem ursprünglich trockenen Block (Sorptionskurve). Innerhalb dieser beiden einhüllenden Kurven ist bei Teilsättigung noch jeder Übergang möglich. Tatsächlich gibt es unendlich viele Eichkurven zwischen diesen beiden Einhüllenden. Im Block treten zwischen der elektrischen Leitfähigkeit des Blockes (stellvertretend für den Wassergehalt des Blockes) und der dazugehörigen Wasserspannung Hysterisiseffekte auf. Diese sind nicht auszuschalten.

Die Beziehung zwischen der elektrischen Leitfähigkeit des Blocks und der dazugehörigen Wasserspannung ist somit nicht eindeutig. Aus diesem Grund kann die Messung der Wasserspannung mit Hilfe von Blöcken fehlerhaft sein. Der mögliche Meßbereich der Wasserspannung bei einem gemessenen elektrischen Widerstand eines Blockes ergibt sich zwischen der oberen Desorptionskurve und der untere

ren Sorptionskurve (HD-HS, Abb. 8). Da bei Feldmessungen nicht bekannt ist, auf welcher Hysterisiskurve man sich befindet, verhindert die Hysterisis der Wasserspannungs-Widerstandsbeziehung eine eindeutige Zuordnung eines gemessenen Widerstands zu einer Wasserspannung.

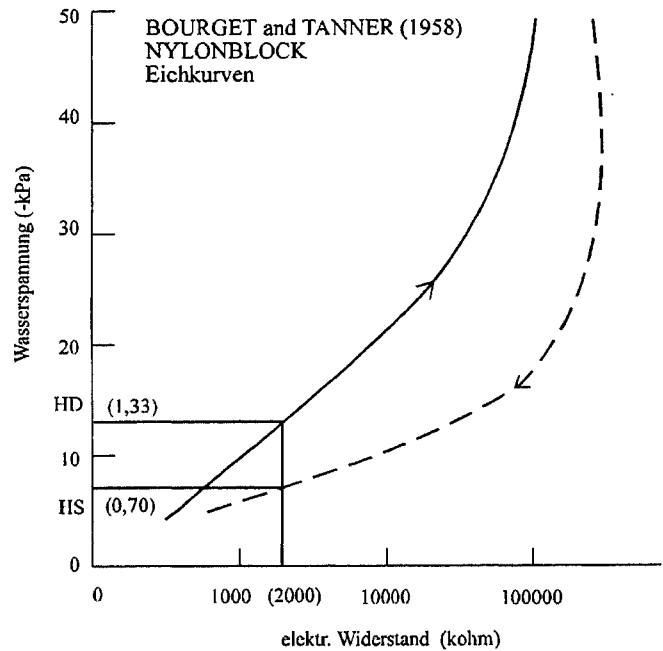


Abbildung 8: Hysterisis der Eichkurve eines Nylonblocks und möglicher Bereich der Wasserspannung (HD-HS), wenn ein bestimmter elektrischer Widerstand im Block gemessen würde
 Figure 8: Hysterisis of the calibration curves and possible range of water tension (HD-HS) within a nylon block for a given electrical resistance measured within the block

3.11 Hysterisis der Wasserspannungs-Wassergehaltsbeziehung des Bodens

Blöcke haben den Ruf, nicht nur für die Messung der Wasserspannung geeignet zu sein, sondern auch für die Messung des Bodenwassergehalts. Den Brückenschlag gestattet die Wasserspannungs-Wassergehaltsbeziehung, welche für jeden Boden verschieden ist. Mit dieser Beziehung, die grafisch zumeist in Form der pF-Kurve dargestellt wird, erfolgt eine Zuordnung von Wassergehalten zu Wasserspannungen (Abb. 9). Die Wasserspannungs-Wassergehaltsbeziehungen von Böden weisen, wie die Eichbeziehungen der Blöcke, Hysterisiseerscheinungen auf. Zumeist wird nur jener Ast der Wasserspannungs-Wassergehaltsbeziehung dargestellt, welcher bei sukzessiver Abnahme des Wassergehaltes (Ent-

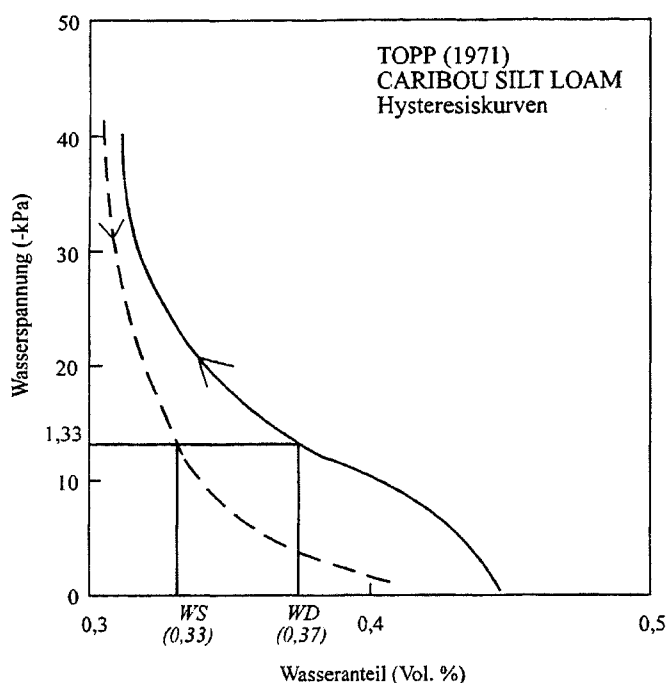


Abbildung 9: Hysteresis der Wasserspannungs-Wassergehaltsbeziehung eines schluffigen Lehms und möglicher Bereich des Wassergehaltes (WD-WS), wenn eine bestimmte Wasserspannung ($-1,33$ kPa) vorgegeben ist

Figure 9: Hysteresis of the soil water characteristics for a silty loam and possible range of the soil water content for a given soil water tension ($-1,33$ kPa)

wässerung eines Bodens, Desorption) gemessen wurde. Bei Wasserzugabe zu einem trockenen Boden verläuft diese Beziehung vollkommen anders (Bewässerung eines Bodens, Sorption), wobei noch jeglicher Übergang zwischen diesen beiden Kurven möglich ist. Leider ist also die Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt eines Bodens nicht eindeutig, sie hängt von der Richtung der Wassergehaltsänderung ab, d. h. ob einem Boden Wasser zugeführt oder daraus Wasser entnommen wird, und von der Vorgeschichte, d. h. ob bereits einmal oder auch mehrmals eine Umkehrung der Wassergehaltsänderung eingetreten ist. Unter natürlichen Verhältnissen ändert sich der Wassergehalt im ungesättigten Bereich kontinuierlich, wobei der Boden eher selten gesättigt bzw. vollkommen ausgetrocknet ist. Es kann durchaus vorkommen, daß ein Boden Wasser nur teilweise abgibt, um dann wieder Wasser aufzunehmen in Abhängigkeit von Wasserangebot und Zehrung. Innerhalb der von der Entwässerungs- und Bewässerungskurve eingeschlossenen Fläche ist jeder Übergang möglich. Da bei Feldmessungen nicht bekannt ist, auf welcher Kurve man sich befindet, verhindert die Hysteresis der Wasserspan-

nungs-Wassergehaltsbeziehung eine eindeutige Zuordnung eines Wassergehaltes zu einer vorgegebenen Wasserspannung, selbst wenn diese eindeutig anzugeben wäre.

Bei der Wassergehaltsbestimmung eines Bodens über die Wasserspannungs-Wassergehaltslinie mit Hilfe von Blöcken werden somit zwei Hysteresiserscheinungen wirksam: die Hysteresis zwischen Wasserspannung und Wassergehalt des Bodens und die Hysteresis zwischen Wasserspannung und elektrischem Widerstand des Blocks. Wie gezeigt werden kann (Abb. 10), kompensieren sich die durch die Hysteresis verursachten Fehler teilweise bei der Wassergehaltsbestimmung, wenn sowohl bei der Eichbeziehung des Blocks wie auch bei der Wasserspannungs-Wassergehaltsbeziehung des Bodens die beiden einhüllenden Hysteresiskurven berücksichtigt werden. Wird die Wasserspannung als Bereich angegeben, so kann man auch den dazugehörigen Bereich des Wassergehaltes angeben, welcher jedoch eher klein ist. Unter diesen Voraussetzungen können Blöcke als gut zur Wassergehaltsbestimmung geeignet bezeichnet werden.

3.12 Streuung der Eichkurven einer bestimmten Bauart

BOURGET et al. (1958) veröffentlichten Eichkurven von Blöcken verschiedener Bauart. Als Beispiel wurden in Abb. 7 die Eichkurven eines Nylonblocks gezeigt. Die dargestellten Kurven sind Mittelwerte aus fünf Messungen mit verschiedenen Blöcken gleicher Bauart. Die in der Abbildung 7 eingezeichneten vertikalen Balken stellen die Standardabweichung verschiedener Blöcke derselben Bauart dar. Die Eichwerte weichen beträchtlich voneinander ab, d. h. es muß jeder Block getrennt geeicht werden. Ganz im Gegensatz zu den Feststellungen der Produzenten gibt es keine Typeneichung.

3.13 Inhomogenität des Bodens

Fehler wegen der räumlichen oder zeitlichen Variabilität der Bodeneigenschaften sind nicht spezifisch für die Blockmethode, jedoch wirkt sich diese Variabilität bei der Bestimmung des Wassergehaltes, wie sie mit der Blockmethode erfolgt, besonders negativ aus. Die Wasserspannungs-Wassergehaltsbeziehung wird an kleinen, wenig repräsentativen Bodenproben gemessen. Die Entnahmestellen dieser Bodenproben sind zumeist nicht ident mit den Stellen, wo die Blöcke vergraben sind. Selbst kleinräumige Inhomoge-

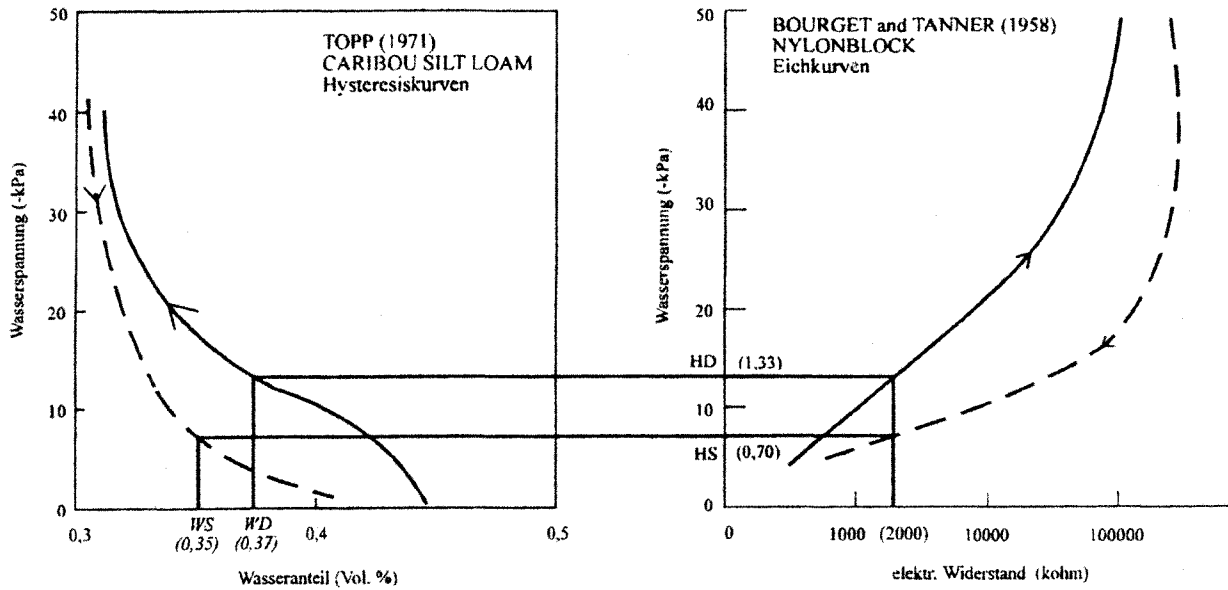


Abbildung 10: Bestimmung des Wassergehaltes eines Bodens mit Hilfe des in einem Gipsblock gemessenen Widerstandes unter Einbeziehung der Hysterisisbeziehungen sowohl der Eichkurve des Blocks wie auch der Wasserspannungs-Wassergehaltsbeziehung des Bodens
 Figure 10: Estimating the soil water content by means of the electrical resistance measured within a block taking care of the hysteresis of the calibration relationships within the block and the hysteresis of the soil water characteristics

nitäten verursachen Fehler, da die Wassergehaltsbeziehung einer kleinen, an einer anderen Stelle entnommenen Bodenprobe nicht repräsentativ für den Bereich um den Block sein kann. Die Messung von Wassergehalten in Böden mit der Time Domain Reflectometry-Methode hat den Vorteil, daß größere Bereiche erfaßt werden. Als Beispiel ist eine Gegenüberstellung zwischen den mit der Time Domain Reflectometry-Methode gewonnenen Wassergehalten mit jenen mit Hilfe der Blockmethode gewonnenen gezeigt (Abb. 11). Obwohl die Time Domain Reflectometry-Methode auch nicht frei von Fehlern ist, kann deren Genauigkeit wesentlich höher als jene der Blockmethode eingestuft werden. Die aus Abbildung 11 ersichtlichen beträchtlichen Streuungen der Meßwerte sind Ausdruck der Unsicherheit bei der Bestimmung des Wassergehaltes im Boden.

4. **Schlußfolgerung**

Neben den genannten Nachteilen haben Blöcke aber auch Vorteile. Sie sind robust, billig, einfach in der Handhabung, und sie erlauben kontinuierliche Aufzeichnungen. Für qualitative Aussagen über das Festhaltevermögen sind sie zu meist ausreichend. Messungen mit Blöcken gestatten zumindest einen Trend zu erkennen. Wenn ein Boden Was-

ser abgibt, wird auch der elektrische Widerstand eines darin vergrabenen Blocks größer werden, nur quantitative Rückschlüsse darf man nicht ziehen. Für den Feldeinsatz zur

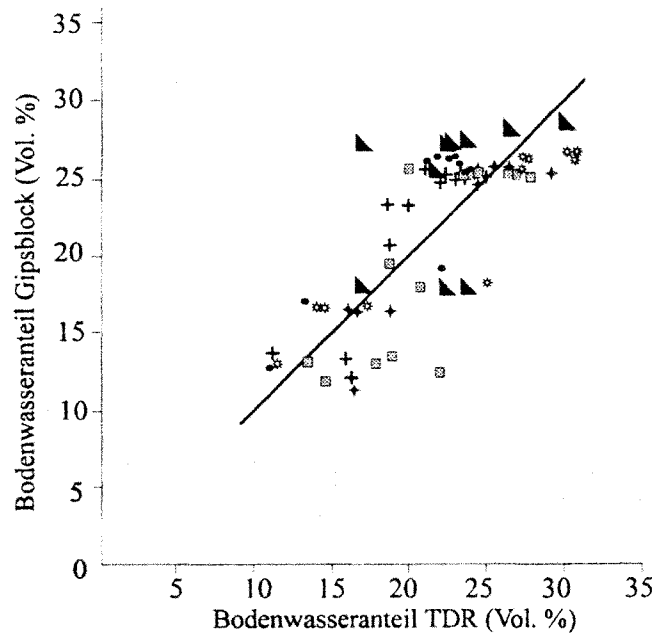


Abbildung 11: Gegenüberstellung der im Feld mit der TDR-Methode und der mit Gipsblöcken gemessenen Bodenwassergehalte (SAYLAN, 1992)
 Figure 11: Comparison of the soil water contents measured with the TDR-method and with gypsum blocks (SAYLAN, 1992)

Steuerung von Bewässerungsanlagen sind sie eingeschränkt geeignet, auf keinen Fall aber für hydrologische Untersuchungen, bei denen es auf die Größe des Potentialgradienten ankommt.

Mit der Entwicklung der Time Domain Reflectometry-Methode (HEIMOVAARA, 1993) sowie neuerer Verfahren auf Grundlage der kapazitiven Messung der Dielektrizitätskonstante (CAMPBELL, 1990) stehen bessere Methoden als die Blockmethode zur Wassergehaltsmessung zur Verfügung. Für die Messung der Wasserspannung gibt es keine gleichwertige Entwicklung. Der wichtigste Beweggrund, Blöcke zur Wasserspannungsmessung einzusetzen, ist im Fehlen eines besseren Verfahrens außerhalb des Meßbereichs für Tensiometer zu suchen.

Obwohl die Bestimmung der Wasserspannung in Böden mit Blöcken sehr ungenau sein kann, wird man daher auf deren Einsatz zur Zeit noch nicht verzichten können.

5. Literatur

- BOURGET, S. J., D. E. ELRICK and C. B. TANNER (1958): Electrical resistance units for moisture measurements: their moisture hysteresis, uniformity and sensitivity. *Soil Sci.* 86, 298–304.
- BOUYOUKOS, G. J. and A. H. MICK (1940): An electrical resistance method for the continuous measurement of soil moisture under field conditions. *Michigan Agric. Exp. Stn. Tech. Bull.* 172, East Lansing.
- BOUYOUKOS, G. J. (1949): Nylon electrical resistance unit for continuous measurement of soil moisture in the field. *Soil Sci.* 67, 319–330.
- BOUYOUKOS, G. J. (1953): More durable plaster of paris moisture blocks. *Soil Sci.* 76, 447–451.
- CAMPBELL, G. S. and G. W. GEE (1987): Water potential: miscellaneous methods. In: A. Klute (Ed.): *Methods in Soil Analysis, Part I.* Am. Soc. of Agr. and Soil Sci. Soc. of Am., Madison, Wisconsin, 619–633.
- CAMPBELL, J. E. (1990): Dielectric properties and influence of conductivity in soils at one to fifty megahertz. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 54, 332–341.
- CASSEL, D. K. and A. KLUTE (1987): Water potential: Tensiometry. In: A. Klute (Ed.): *Methods in Soil Analysis, Part I.* Am. Soc. of Agr. and Soil Sci. Soc. of Am., Madison, Wisconsin, 563–596.
- COLMAN, E. A. and T. M. HENDRIX (1949): The fiberglass electrical soil-moisture instrument. *Soil Sci.* 67, 425–438.
- ENGLAND, C. B. (1965): Changes in fiberglass soil moisture-electrical resistance elements in long-term installations. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 29, 229–231.
- GROENEVELT, P. H. and J. W. KIJNE (1979): Physics of soil moisture. In: *International Institute for Land Reclamation and Improvement (Ed.): Drainage Principles and Application (2nd Edition)*, ILRI, Wageningen, 123–151.
- HAISE, H. R. and O. J. KELLEY (1946): Relation of moisture tension to heat transfer and electrical resistance in plaster of paris blocks. *Soil Sci.* 61, 411–422.
- HEIMOVAARA, T. J. (1993): Time Domain Reflectometry in soil science: Theoretical backgrounds, measurements and models. CIP Data Koninklijke Bibliotheek, Den Haag.
- ISSS (International Society of Soil Science) (1976): Soil physics terminology. *Bulletin of the ISSS* 49, 26–36.
- KASTANEK, F., F. BLÜMEL, E. KLAGHOFER, O. NESTROY, O. PREGL und H. SCHLACHTER (1980): Zur Nomenklatur in der Bodenphysik, Teil 1. In: O. Nestroy (Hrsg.): *Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft* 22, 55–72.
- KLUTE, A. and W. R. GARDNER (1962): Tensiometer response time. *Soil Sci.* 93, 204–207.
- PHENE, C. J., G. J. HOFFMAN and S. L. RAWLINS (1971a): Measuring soil matric potential in situ by sensing heat dissipation within a porous body: I: Theory and sensor construction. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35, 27–32.
- PHENE, C. J., G. J. HOFFMAN and S. L. RAWLINS (1971b): Measuring soil matric potential in situ by sensing heat dissipation within a porous body: II. Experimental results. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35, 225–229.
- RICHARDS, L. A. (1949): Methods of measuring soil moisture tension. *Soil Sci.* 68, 95–112.
- SAYLAN, L. (1992): Der Einfluß atmosphärischer Boden- und Pflanzenparameter auf die Evapotranspiration von Sojabohne, Pferdebohne und Mais. Dissertation, Institut für Meteorologie und Physik, Universität für Bodenkultur, Wien.
- SCHEFFER F. und P. SCHACHTSCHABEL (1984): *Lehrbuch der Bodenkunde*, 11. Aufl., Enke Verlag, Stuttgart.
- SSSA (Soil Science Society of America) (1987): *Glossary of soil science terms*. SSSA, Madison, Wisconsin.
- TAYLOR, S. A. (1955): Field determinations of soil moisture. *Agric. Eng.* 36, 654–659.
- TOWNER, G. D. (1980): Theory of time response of tensiometers. *J. Soil Sci.* 31, 607–621.
- TOPP, G. C. (1971): Soil water hysteresis in silt loam and clay loam soils. *Water Resource Res.* 7, 914–920.

WEICHSEL-BAUMER, O. (1992): Persönliche Mitteilung bzw. unveröffentlichte Daten.

YECK, R. D., R. S. PAETZOLD, G. L. SCHAEFER and H. R. MOUNT (1995): Soil Moisture/Soil Temperature Pilot Project (SM/ST PP). A national near-real time monitoring project. AWRA Symposium Proceedings, 153–159.

Anschrift des Verfassers

o. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. F. Kastanek, Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien, Muthgasse 18, A-1190 Wien.

Eingelangt am 8. Mai 1996

Angenommen am 20. August 1996