

Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich
Amt für Landschaft und Natur
Direktion der Volkswirtschaft

Grobporenbestimmung – Verfahrens- optimierung für den Vollzug

Bericht und Laboranleitung
Dezember 2001

Projektleitung:

Samuel Isler
Fachstelle Bodenschutz
8090 Zürich

Projektausführung und Bericht:

Luzius Matile
Geologie und Umwelt
Berneggweg 3
8055 Zürich

Bernhard Buchter
Alberta GmbH
Bertastr. 18a
8003 Zürich

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | Auftrag | 1 |
| 2 | Einleitung | 1 |
| 3 | Optimierte Methode | 1 |
| 3.1 | Theorie | 1 |
| 3.2 | Beschreibung der üblichen Methoden | 2 |
| 3.3 | Beschreibung der neuen Methode | 3 |
| 3.4 | Durchgeführte Messungen | 5 |
| 4 | Ergebnisse | 6 |
| 4.1 | Vergleich zwischen Sandbox-Methode und neuer VHW-Methode | 6 |
| 4.2 | Vergleich zwischen Drucktopf und Sandbox | 8 |
| 4.3 | Vergleich aller 3 Methoden | 9 |
| 4.4 | Messfehler | 9 |
| 5 | Schlussfolgerungen und Empfehlungen | 11 |
| 6 | Literatur | 12 |
| | Anhang | |

Zusammenfassung

An der Fachstelle Bodenschutz des Kantons Zürich werden Desorptionskurven mittels Sandbox- und Drucktopfmethode bestimmt. Bei beiden Methoden ist der Startwert der Porenvolumenbestimmung nicht eindeutig definiert. Einerseits weisen die Bodenproben bereits bei Sättigung an der Oberkante eine Saugspannung von mindestens 4 hPa (cm WS) auf, andererseits können die Proben vor Beginn antrocknen. Die Bestimmung der Desorptionskurve wurde für ganz andere Zwecke eingeführt (Bewässerungslandwirtschaft im Südwesten der USA) als sie im physikalischen Bodenschutz heute gebraucht werden soll (Anteil der grossen Poren als Mass einer allfälligen Verdichtung).

Verglichen wurden die neu vorgestellte VHW-Methode (volumetrische Methode mit hängender Wassersäule) und die Sandboxmethode an Proben aus 2 Horizonten von 2 Standorten und zusätzlich die Drucktopfmethode an Proben von einem dieser Standorte. Mit der neuen Methode werden im Gegensatz zu den andern Methoden auch die grössten Poren (Makroporen) erfasst, da die Probe nach der vollständigen Sättigung nicht zur Wägung weggenommen wird und daher auch nicht unbeabsichtigt drainieren kann. Das desorbierte Wasservolumen wird direkt in einer Bürette gemessen.

Die VHW-Methode ergibt bei allen Messserien immer die grössten Porenvolumen bis zur Druckstufe pF1.5 und pF2, wobei bei der VHW-Methode die Makroporen erfasst werden, bei den zwei andern Standardmethoden hingegen nicht. Die Unterschiede zwischen VHW- und Sandboxmethode sind bei 3 von 5 Messserien signifikant.

Verglichen mit der VHW-Methode ergibt die Drucktopfmethode ebenfalls jeweils kleinere Porenvolumen, der Unterschied ist aber nur in einem Horizont bis zur Druckstufe pF1.5 signifikant. Die Drucktopfmethode wurde nur an Proben des Standorts Schönenberg angewandt.

Die theoretisch nicht erklärbaren Unterschiede zwischen Sandbox und Drucktopf zeigen, dass auch die Standardmethoden nicht vorbehaltlos zur Bestimmung des Makroporenanteils verwendet werden können. Die tendenziell kleinen Werte bei der Sandboxmethode könnten auf ungenügender Saugspannung an der Sandoberfläche beruhen.

Aus den Messungen ergibt sich die Empfehlung, die Desorptionskurve nur mit dem Drucktopf zu messen. Zusätzlich sollte, sofern der Makroporenanteil wichtig ist, die neue VHW-Methode angewandt werden. Damit stehen zwei unabhängige Messungen mit zwei physikalisch verschiedenen Methoden zur Verfügung.

1 Auftrag

Im Labor der Fachstelle Bodenschutz wird das Volumen von verschiedenen Porenklassen durch Desorption routinemässig bestimmt. Der Ausgangspunkt der Messung, also der Wassergehalt bei Sättigung, entspricht dem Wassergehalt bei einer Saugspannung von 1 hPa. Die grössten Poren sind bereits mit Luft gefüllt. Grosse Poren sind jedoch für den Bodenschutz besonders wichtig, sie können aber nur indirekt aus der Differenz zwischen dem gesamten Porenvolumen (berechnet aus gemessener Lagerungsdichte und geschätzter reeller Dichte) und der Summe aller gemessenen Porenklassen bestimmt werden.

Daher erteilte die Fachstelle Bodenschutz Luzius Matile und Bernhard Buchter, Ambio GmbH (jetzt Alberta GmbH) am 13.6.2000 den Auftrag, die Desorptionsmethoden zu optimieren.

2 Einleitung

Der Bodenschutz in der Schweiz war bis vor kurzem wie in den meisten Ländern hauptsächlich auf den Schutz vor stofflicher (chemischer) Belastung ausgerichtet. Der Schutz vor physikalischer Belastung ist gesetzlich erst mit dem Inkrafttreten der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo, 1998) geregelt worden.

Physikalischer Bodenschutz umfasst den Schutz des Bodens vor Verdichtung, Erosion, Schäden bei Umlagerung und vor Veränderungen durch Nutzung als (Wasser-)Filter (innere Erosion).

Ziel des physikalischen Bodenschutzes ist die langfristige Erhaltung einer möglichst grossen Bodenfruchtbarkeit. Bodenschutz muss dabei in erster Linie mit der Bodennutzung umgesetzt werden, das bedeutet, mit einer angepassten land- und forstwirtschaftlichen Nutzung. Bodenschonend sind aber auch alle Arbeiten auszuführen, bei denen der Boden umgelagert oder für eine begrenzte Zeit im Rahmen von Bauvorhaben belastet wird.

Die Empfindlichkeit des Bodens gegenüber mechanischer Belastung wird durch den Aufbau seiner festen Substanz und seinen Feuchtigkeitszustand bestimmt. Die Empfindlichkeit ist also einerseits standorts- und andererseits zustandsbedingt. Die Regenerationsfähigkeit hängt u. a. von Klima und Bodeneigenschaften ab und nimmt üblicherweise mit zunehmender Bodentiefe ab. Die natürliche Regeneration ist also bis zur nächsten nutzungsbedingten Belastung eventuell noch nicht abgeschlossen.

Zur Sicherung und allenfalls Wiederherstellung der Bodenfruchtbarkeit müssen Richtwerte für die Bodenverdichtung hergeleitet werden. Von der bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz wurden vier Bodeneigenschaften als Kandidaten für mögliche Richtwerte vorgeschlagen: Grobporenvolumen, Leitfähigkeit für Wasser und Luft, Infiltrationsrate, Durchwurzelungstiefe (Physikalischer Bodenschutz, 1999). Die Anwendbarkeit der Leitfähigkeit für Wasser wurde von der Fachstelle Bodenschutz bereits untersucht (FaBo, 1998, 1999, 2000a, 2000b). Im vorliegenden Bericht werden die labortechnischen Probleme bei der Bestimmung des Makroporenvolumens aufgeführt und eine neue Methode zu dessen Messung propagiert.

3 Optimierte Methode

3.1 Theorie

Der Boden besteht aus 3 Phasen, nämlich fest (Bodenmatrix), flüssig (Bodenwasser) und gasförmig (Bodenluft). Die Beschreibung der Poren kann auf dem Niveau der Anteile erfolgen –

Wieviel Porenvolumen hat es? – oder auf dem Niveau der Verteilung – Wie setzt sich das Porenvolumen aus unterschiedlich grossen Poren zusammen? Die Verteilung der Poren nach der Grösse wird mit Hilfe der Desorptionskurve beschrieben.

Wasser wird in den Boden hineingesaugt wie von einem Schwamm. Je feiner die Poren sind, desto stärker wird Wasser festgehalten. Der Durchmesser der Poren und die Saugspannung sind also umgekehrt proportional zueinander. Wird eine Bodenprobe zuerst mit Wasser gesättigt, dann mit ständig steigendem Unterdruck entwässert und die Menge des ausgeflossenen Wassers gegen den Unterdruck aufgezeichnet, ergibt sich eine sogenannte Desorptionskurve.

Je mehr feine Poren ein Boden enthält (toniger Boden), desto grösser ist der benötigte Unterdruck zur Entwässerung des Bodens. Je mehr grobe Poren ein Boden enthält (sandiger Boden), bei desto kleinerem Unterdruck entwässert er. Wird ein Boden verdichtet, nimmt der Anteil der groben Poren ab. Das Wasser wird stärker zurückgehalten.

Diese Rückhaltekraft wird mit Saugspannung bezeichnet. Es ist diejenige Kraft, die die Pflanze (genau gesprochen die Atmosphäre) aufbringen muss, um dem Boden Wasser zu entziehen. Als Einheit dient das Pascal (N/m^2). Um die mit älteren Einheiten gebräuchlichen Zahlenwerte nicht verändern zu müssen, wird in der Literatur häufig hPa (1 Hektopascal \approx 1 cm Wassersäule) verwendet. Eingebürgert hat sich auch der pF-Wert ($\log_{10}(\text{Saugspannung in hPa})$)

Um die Desorptionskurve zu bestimmen, wird die Bodenprobe zuerst in einer Sandbox und dann auf einer porösen Platte im Drucktopf entwässert, wobei sich die Details je nach Labor unterscheiden (vgl. z. B. Schweizerische Referenzmethoden, 1996; Methode PYZYL-P). Allen Methoden ist gemeinsam, dass die Bodenproben nicht am gleichen Ort gesättigt und entwässert werden. Bei der Überführung vom Ort der Sättigung zur porösen Platte oder Sandbox kann die Probe abtropfen, also Wasser verlieren. Dieses Wasser stammt aus den grössten Poren. Der Ausgangspunkt der Desorption ist somit nicht eindeutig. Dieser Wasserverlust hängt von der Bodenart, der Grösse der Probe, der Temperatur und der Feuchtigkeit im Labor, der Transportdauer und von der Sorgfalt der Messperson ab.

Der allfällige Wasserverlust spielt dann eine Rolle, wenn der Anteil der grössten Poren (Makroporen) bestimmt werden soll. Dies ist der Fall im physikalischen Bodenschutz. Eine genaue Erfassung dieses Anteils und des allfälligen Fehlers sind daher für die Anwendbarkeit der Methode ausschlaggebend.

3.2 Beschreibung der üblichen Methoden

Grundsätzlich muss die Saugspannung und der Wassergehalt einer Probe zur gleichen Zeit bekannt sein. Die Desorptionskurve lässt sich im Feld wie im Labor bestimmen. Da die Feldmethode sehr aufwendig ist, wird vor allem die Labormethode angewandt. Im folgenden werden die zwei an der Fachstelle Bodenschutz des Kantons Zürich verwendeten Labormethoden Sandbox und Drucktopf beschrieben.

In der Sandbox werden die Bodenproben auf einem Sanduntergrund dräniert, indem die Saugspannung im Sand mit einer hängenden Wassersäule auf die gewünschten Werte eingestellt wird (z.B. Eijkelkamp Sandbox Nr. 0801). Die grösste messbare Saugspannung beträgt theoretisch 1000 hPa.

Bei der Überdruckmethode werden die Bodenproben auf einer porösen Platte (Keramik, Metallsinter, Kunststoffolie) dräniert, indem der Druck über der Platte erhöht wird, während auf der Unterseite der Platte der Druck unverändert bleibt, also dem Luftdruck entspricht. Die Bestimmung der Desorptionskurve mit Überdruck geht auf Richards (1941) zurück.

Bis zu einer Saugspannung von 1000 hPa (1 bar) ist Desorption mittels Unterdruck möglich. Zur Bestimmung grösserer Saugspannungen muss die Probe mittels Überdruck entwässert werden. Häufig wird bereits für Saugspannungen ab 100 hPa oder von Beginn weg Überdruck verwendet. Die beiden Methoden gelten als gleichwertig.

Die Bestimmung des Desorptionsverhaltens ist in diversen Anleitungen beschrieben. Im landwirtschaftlichen Bereich gelten in der Schweiz die FAL-Methoden (Schweizerische Referenzmethoden, 1996), im wissenschaftlichen Bereich die Methoden gemäss *Methods of Soil Analysis* (Klute, 1986).

Die Laborvorschriften der FaBo Zürich basieren auf den FAL-Methoden. Daher wird die Desorption bei den Saugspannungen 31.6 hPa (pF1.5) und 100 hPa (pF2) an hohen Proben (3.9 cm) in einer Sandbox gemessen, bei der Saugspannung 1000 hPa (pF3) an denselben Proben auf einer porösen Keramikplatte, die für einen verbesserten Kontakt mit einer Kaolinschicht versehen ist. Bei der Saugspannung 15'000 hPa (pF4.2) schliesslich erfolgt die Entwässerung auf einer Membranfolie (Eijkelkamp, Giesbeek) an kleinen Proben (Höhe 1.1 cm). Die verwendeten Drucktöpfe entsprechen der Standardausrüstung von Soil Moisture Corp., Santa Barbara USA (vgl. Klute, 1986), die Sandbox stammt von Eijkelkamp, Giesbeek NL. Der Sättigungswassergehalt wird in der Sandbox bei einer Saugspannung von 1 hPa gemessen. Bis anhin wurden an der FaBo die Druckstufen pF1.5 und pF2 nicht mit dem Drucktopf gemessen. Der Sättigungswassergehalt wurde für den Vergleich der Methoden ebenfalls in der Sandbox bei einer Saugspannung von 1 hPa eingestellt.

3.3 Beschreibung der neuen Methode

Wie bereits erwähnt, sind am Anfang der üblichen Desorptionsmessung die grössten Poren schon entwässert. Sollen diese Makroporen erfasst werden, führen alle üblicherweise angewandten Methoden zu Fehlern, deren Ausmass unklar ist.

Die im folgenden vorgestellte neue Methode ist so neu gar nicht, es handelt sich sogar um die wohl ursprünglichste (Haines, 1930, vgl. auch die entsprechende Abbildung in Klute, 1986), bevor in den 40er Jahren mit Richards (1941) die Überdruckmethode ins Spiel kam. Die wichtigste Überlegung ist die, dass die Probe am gleichen Ort gesättigt und desorbiert wird. Dabei wird das Volumen des desorbierten Wassers nicht anhand der Differenz des Probegewichts, sondern direkt mit einer Bürette bestimmt. Dieses Verfahren zur Desorptionsmessung nennen wir VHW-Methode (volumetrische Methode mit **h**ängender **W**assersäule).

Die neue Apparatur besteht aus einer Keramikplatte gleichen Durchmessers wie die Bodenprobe und einer Halterung aus Plexiglas (Abb. 1). Anstelle einer Keramikplatte wäre auch eine Metallsinterplatte möglich. Der Zwischenraum zwischen Bodenprobe und Halterung wird mit einem O-Ring abgedichtet. Um Verdunstung zu verhindern, wird ein Glasgefäss auf die Apparatur gestellt. Unten sind zwei Ausgänge vorhanden, einer für Sättigung und Desorption – vorzugsweise in der Mitte – und ein weiterer seitlich für die Entlüftung.

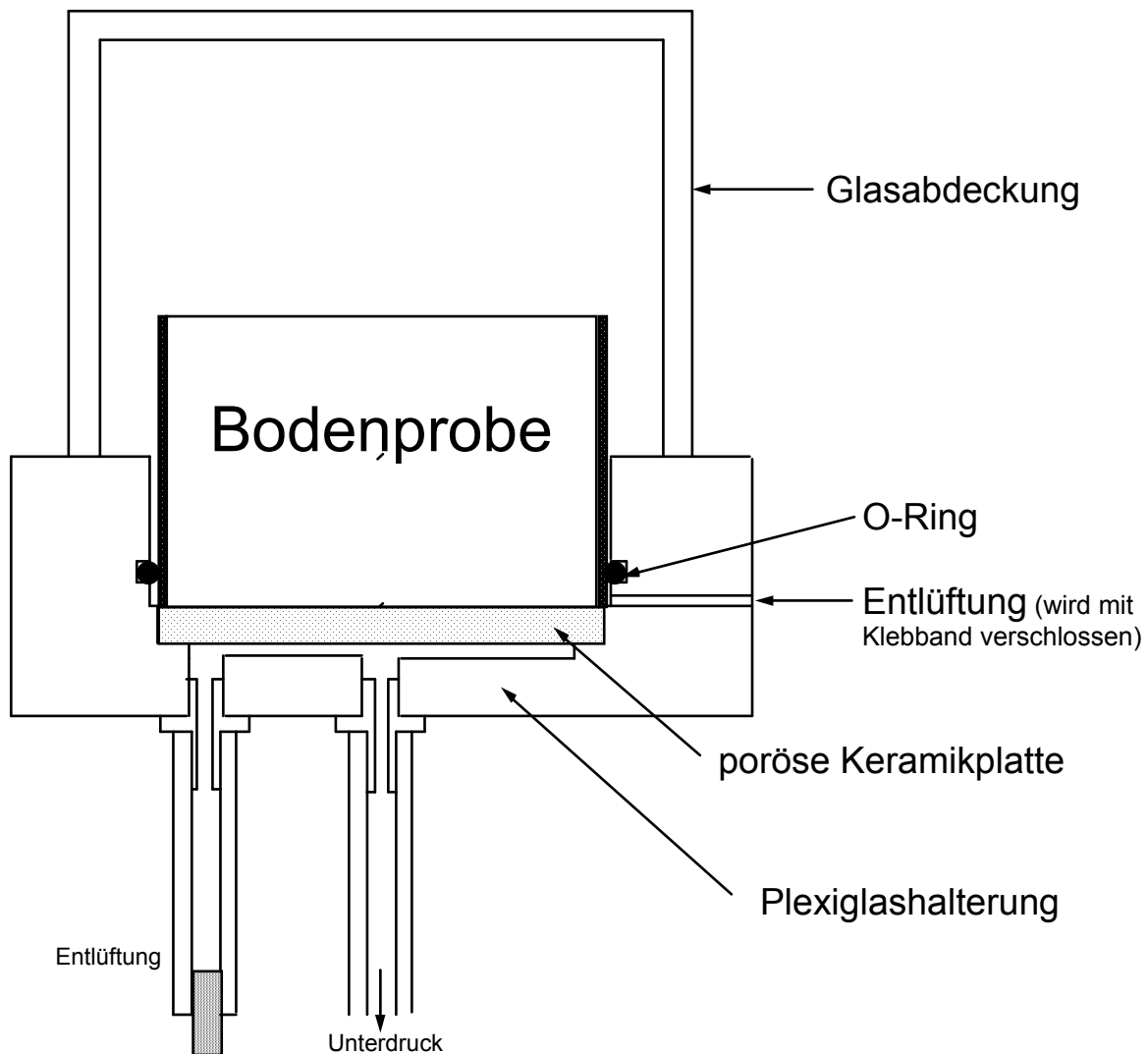


Abb. 1 Skizze der neuen Messvorrichtung (VHW-Methode)

Die Unterseite der Bodenprobe wird – sofern nötig – mit einem Messer eben geschnitten, worauf die Zylinderprobe auf die Keramikplatte gesetzt wird. Die Sättigung geschieht, indem der Wasserstand in der Bürette, die via Schlauch mit dem zentralen Ausgang verbunden ist, auf die Höhe der Oberkante gebracht wird, wozu u. U. mehrere Schritte nötig sind (Abb. 2). Falls Luft unter der Platte vorhanden ist, wird sie durch Öffnen des Entlüftungsschlauchs entfernt. Da die Apparatur aus Plexiglas besteht, sind allfällige Lufteinschlüsse gut sichtbar. Ebenfalls gut sichtbar ist, ob der O-Ring den Raum zwischen Apparatur und Probe dichtet. Der Gleichgewichtswassergehalt W_1 entspricht dem totalen Porenvolumen: Alle Poren, auch die grössten, sind wassergefüllt.

Dann wird der Wasserstand in der Bürette auf die Höhe der Unterkante der Probe verschoben. Sofern Luft unter der Platte erscheint, müssen die undichten Stellen zuerst repariert und der Vorgang nochmals von vorne begonnen werden. Dies gilt auch für die folgenden Schritte. Durch das Absenken des Wasserspiegels von der Oberkante der Probe (Druck am oberen Rand: 0 hPa, Druck am unteren Rand: 4 hPa) auf die Höhe der Unterkante der Probe (Druck am oberen Rand: -4 hPa, Druck am unteren Rand: 0 hPa) fliesst das Bodenwasser aus den grössten Poren der Probe. Dieser zweite Gleichgewichtswassergehalt W_2 ist grösser als der Anfangswassergehalt bei den Standardmethoden, wo die Proben in der Sandbox bei einer Saugspannung von 1 hPa konditioniert werden.

Danach wird die Probe weiter entwässert. Für diesen Bericht wurden die Druckstufen 31.6 und 100 cm gemessen, entsprechend pF1.5 und pF2. Referenzhöhe für die Druckstufen ist die Oberkante der Plexiglashalterung; die Mitte der Probenhöhe befindet sich -0.25 cm darunter.

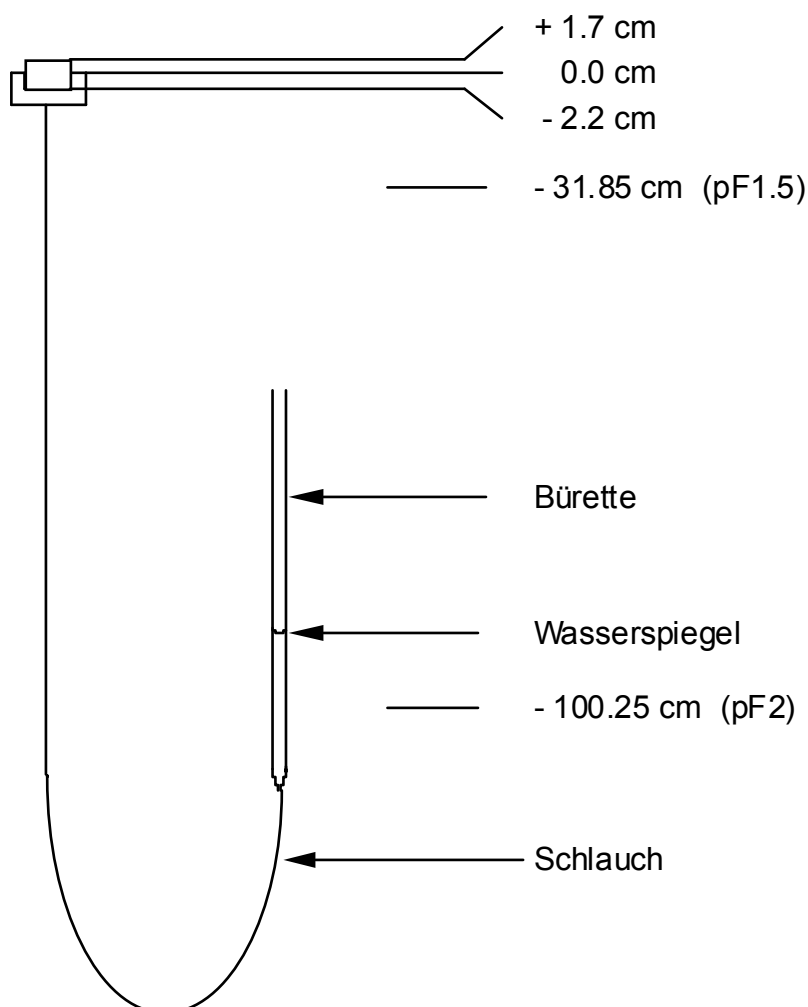


Abb. 2 Skizze der neuen Versuchsanlage. 0 cm bezieht sich auf die Oberkante der Plexiglashalterung. Die Mitte der Probenhöhe (3.9 cm) befindet sich 0.25 cm darunter. Die Saugspannungen pF1.5 und pF2 beziehen sich auf die Oberkante der Plexiglashalterung (31.6+0.25 bzw. 100+0.25).

3.4 Durchgeführte Messungen

Um die neue Methode mit den bisher verwendeten Methoden zu vergleichen, wurden Bodenproben aus 2 Horizonten von 2 Standorten mit der neuen VHW-Methode in der Sandbox und im Drucktopf untersucht (Tab. 1).

Für den ersten Testlauf wurden am Standort Rümlang aus 2 Horizonten je 5 Proben mit der VHW-Methode und in der Sandbox gemessen. Anschliessend wurden 10 Bodenproben aus einem Horizont vom Standort Schönenberg mit den gleichen 2 Methoden analysiert. Schliesslich wurden aus 2 Horizonten des Standortes Schönenberg 11 – 20 Proben mit den erwähnten Methoden und im Drucktopf desorbiert. Zum Vergleich der Methoden stehen 5 Messserien zur Verfügung (Tab. 1).

Tab. 1 Untersuchte Böden, verwendete Methoden zur Desorptionsbestimmung und Anzahl der untersuchten Bodenproben

| Probe- serie | Standort | Horizont | Methode VHW | Methode Sandbox | Methode Drucktopf |
|-----------------|-------------|----------|----------------|--------------------|----------------------|
| | | | Anzahl | Anzahl | Anzahl |
| 1 | Rümlang | Ah,p | 5 | 5 | – |
| 2 | Rümlang | B1 | 20 | 17 | – |
| 3 | Schönenberg | Ah | 10 | 10 | – |
| 4 | Schönenberg | Ah | 11 | 18 | 11 |
| 5 | Schönenberg | AB | 20 | 18 | 20 |

4 Ergebnisse

4.1 Vergleich zwischen Sandbox-Methode und neuer VHW-Methode

Bei der Sandboxmethode ist der Anfangswassergehalt der Desorptionskurve durch den Wassergehalt definiert, den die Bodenprobe nach der Konditionierung in der Sandbox bei einer Saugspannung von 1 hPa erreicht. Die grössten Poren sind somit bereits dräniert. An der Oberkante herrscht eine Saugspannung von 5 hPa, an der Unterkante von 1 hPa. Durch Erhöhen der Saugspannung auf 31.6 hPa werden die nächst kleineren Poren entwässert (Porenanteil pF1.5) und durch Erhöhen auf 100 cm der Porenanteil pF2.

Bei der VHW-Methode kann die Bodenprobe bis zur Oberkante gesättigt und am Ort belassen werden. Alle Poren sind dann mit Wasser gefüllt, ausser es ist noch eingeschlossene Luft vorhanden, was in geringem Masse möglich ist. Durch Absenken des Wasserspiegels auf die Höhe der Unterkante werden die grössten Poren entwässert. Dieser Porenanteil wird im folgenden Makroporen genannt (Differenz zwischen den Wassergehalten W1 und W2). Dieser Messwert steht bei der Sandboxmethode nicht zur Verfügung. Anschliessend werden die zwei Porenanteile pF1.5 und pF2 bestimmt. Da die Probe nicht bewegt wird, kann im Gegensatz zur Sandboxmethode die Probe nicht antrocknen und der Kontakt zur Unterlage bleibt gewährleistet.

Die beiden Methoden sollten sich im Porenanteil (Wasserverlust) unterscheiden, der bis zur Saugspannung pF1.5 gemessen wird (Abb. 3 links oben): bei der neuen VHW-Methode entspricht er dem Porenanteil pF1.5 inklusive der Makroporen, bei der Sandboxmethode nur dem Porenanteil pF1.5 ab einer Saugspannung von 1 hPa. In allen 5 Messserien sind die mit der neuen VHW-Methode bestimmten Wassergehalte denn auch grösser als die in der Sandbox gemessenen, in 4 Serien signifikant (95 %). Die Differenzen sind unterschiedlich; sie reichen von 1 % bis zu mehr als 6 %. Im Ah-Horizont am Standort Schönenberg sind die Porenanteile der zwei Messserien, bestimmt mit der gleichen Methode (Abb. 3, 3V und 4V bzw. 3S und 4S), nicht signifikant verschieden, sie zeigen aber doch die beträchtliche Variabilität an einem Standort.

Die mit der neuen VHW-Methode bestimmten Porenanteile der Saugspannungsklasse pF1.5 allein (Abb. 3 rechts oben) sind bei 2 Messserien grösser, bei 2 weiteren gleich und bei einer Messserie kleiner als die mit der Sandboxmethode bestimmten. Die mit der VHW-Methode bestimmten Porenanteile sollten minimal grösser sein (kleinere Anfangssaugspannung, keine Ver-

dunstung). Obwohl der Unterschied einmal zugunsten der VHW-Methode beträchtlich ist (2.5 %), ist keine der Differenzen signifikant.

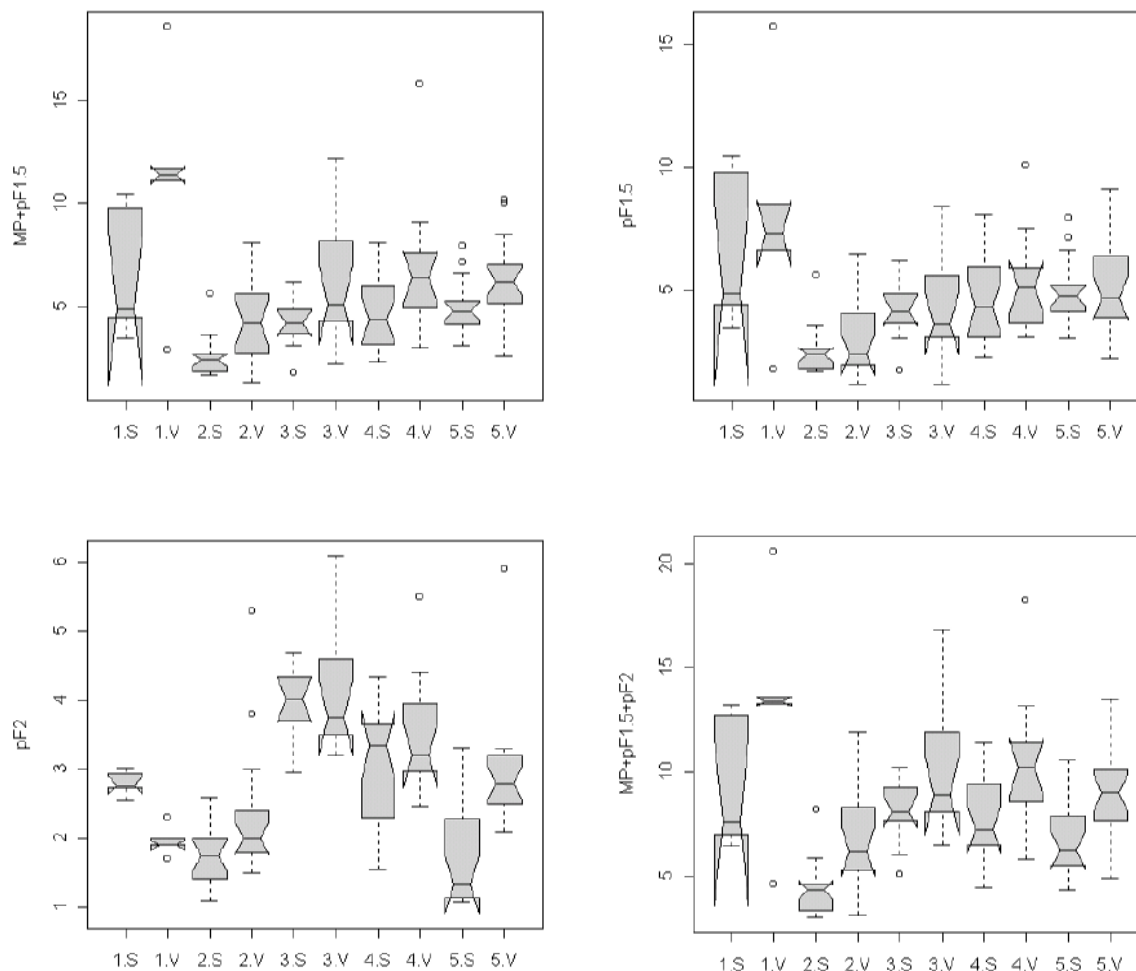


Abb. 3 Porenvolumen aller 5 Probeserien bestimmt mit der neuen VHW-Methode (V) und Sandbox (S). Links oben: Porenklasse pF1.5, bei VHW-Methode inkl. Makroporen. Rechts oben: Porenklasse pF1.5, bei beiden Methoden exkl. Makroporen. Links unten: Porenklasse pF2. Rechts unten: Porenklassen pF1.5 + pF2, bei VHW-Methode inkl. Makroporen (Details: siehe Text).

Die Porenanteile pF2 (Abb. 3 links unten), bestimmt mit den zwei Methoden, sind unterschiedlich, im 2 Fällen signifikant. Einmal sind die Sandboxwerte grösser, einmal die VHW-Methodenwerte. Grundsätzlich sollten sich die Methoden in dieser Saugspannungsklasse nicht unterscheiden. Die unterschiedlichen Werte bei der Probeserie 1 (Rümlang, Ah,p) könnten mit der grossen Heterogenität erklärt werden; der Oberboden ist sehr locker und wird jedes Jahr gepflügt. Die Unterschiede bei der Probeserie 5 in (Schönenberg, AB) sind jedoch nicht plausibel. Die Unterschiede könnten mit ungenügendem Kontakt oder einer falschen (zu niedrigen) Saugspannung in der Sandbox erklärt werden. Ungenügender Kontakt sollte jedoch nur bei einzelnen Proben auftreten, nicht bei der Mehrzahl der Proben. Bei der Sandboxmethode wird nicht überprüft, ob die angelegte Saugspannung auch wirklich an der Sandoberfläche wirkt, was mit Tensiometern möglich wäre. Zu niedrige Saugspannung auf einem Teil der Sandoberfläche, der Kon-

taktfläche für die Proben, sind daher möglich und der wahrscheinliche Grund für die beobachtete Diskrepanz.

Werden alle Porenanteile pF1.5 und pF2 zusammengefasst (Abb. 3 rechts unten), bleibt das Muster von Saugspannungsklasse pF1.5 inklusive Makroporen (Abb. 3 links oben) erhalten: jeweils grösserer Wassergehalt mit der VHW-Methode, in vier von fünf Messserien signifikant.

4.2 Vergleich zwischen Drucktopf und Sandbox

Für den Standort Schönenberg wurden die Porenklassen zusätzlich mit der Drucktopfmethode bestimmt (Abb. 4). Die Porenvolumen der Klassen pF1.5 und pF2 sollten sich bei keiner der drei angewandten Methoden unterscheiden.

Die mit den zwei Standardmethoden der Fachstelle Bodenschutz, Drucktopf und Sandbox, erhaltenen Porenvolumen – beide methodenbedingt ohne Makroporenanteil – unterscheiden sich jedoch: einmal signifikant (Abb. 4, pF2, Probeserie 5) und einmal wegen der grossen Streuung (Kerbenlänge der Box) zwar nicht signifikant, aber doch recht stark (pF1.5, Probeserie 4). Es fällt auf, dass die Sandboxwerte in diesen zwei Fällen kleiner sind. Die Werte der Probeserie 5 bei pF2 wurden bereits beim Vergleich mit der neuen VHW-Methode als vermutlich fehlerbehaftet beurteilt. Als möglicher Grund wurde ungenügende Saugspannung vermutet. Die Werte für pF1.5 der Probeserie 4 können aus dem gleichen Grunde zu klein sein.

Die beiden Methoden gelten heute als gleichwertig. Das war nicht immer so, denn sie unterscheiden sich in einem wichtigen Punkt: in der Sandbox wird mit Unterdruck, im Drucktopf mit Überdruck gearbeitet. Im Drucktopf wird in der Bodenprobe eingeschlossene Luft komprimiert, damit hat mehr Wasser in der Probe Platz (Klute, 1986). Beim Herausnehmen der Probe aus dem Drucktopf dehnt sich die Luft wieder aus, das zusätzliche Wasser bleibt in der Probe. In der Sandbox hingegen wird die Luft herausgesogen und Bodenwasser fliesst nach. Der mit der Sandboxmethode erhaltene Wassergehalt sollte also eher kleiner sein, das damit bestimmte Porenvolumen also grösser. Das Gegenteil wurde jedoch beobachtet.

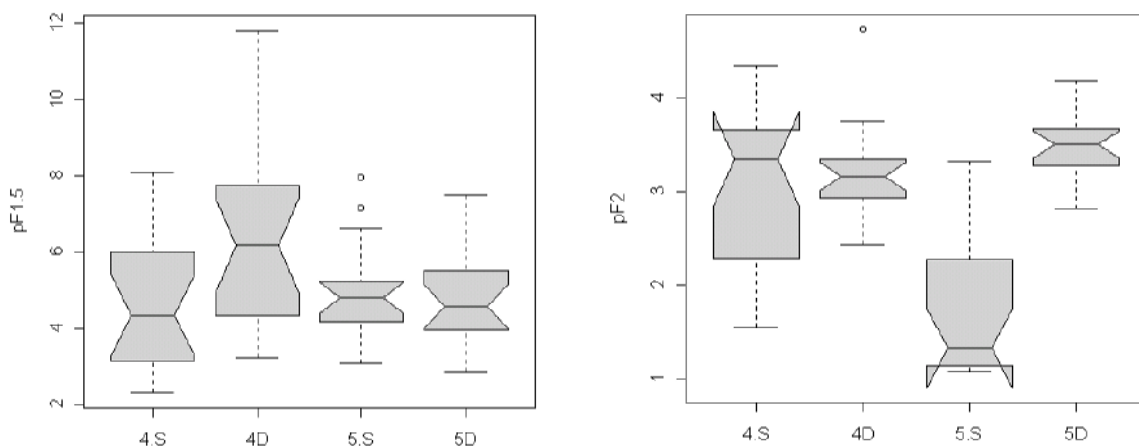


Abb. 4 Porenvolumen bestimmt mittels Drucktopfmethode (D) und Sandbox (S). Links: Porenklasse pF1.5. Rechts: Porenklasse pF2

4.3 Vergleich aller 3 Methoden

Für den Standort Schönenberg wurden alle drei Methoden verwendet. Jede Bodenprobe wurde – in dieser Reihenfolge – mit der neuen VHW-Methode, dann mit der Standardmethode Sandbox und schliesslich mit der Drucktopfmethode analysiert. Die bereits in Abb. 3 und 4 gezeigten Ergebnisse sind in der Abb. 5 zusammengefasst.

Sowohl beim Porenanteil pF1.5 wie auch bis pF2 sind die bestimmten Volumen bei der Sandboxmethode kleiner (Abb. 5, Vergleich S mit V und D). In drei Fällen sind die Unterschiede signifikant (95 %), in einem Fall fast signifikant.

Die Drucktopfmethode ergibt zwar auch Werte, die immer kleiner sind als bei der VHW-Methode, jedoch nur in einem Fall signifikant, nämlich beim Porenanteil pF1.5 der Probeserie 5. Der grosse im Drucktopf gemessene Porenanteil von pF1.5 bis pF2 (vgl. Abb. 4) führt für diesen Horizont dann aber zu einem nicht mehr signifikanten Unterschied bis zur Druckstufe pF2 (Abb. 5 rechts).

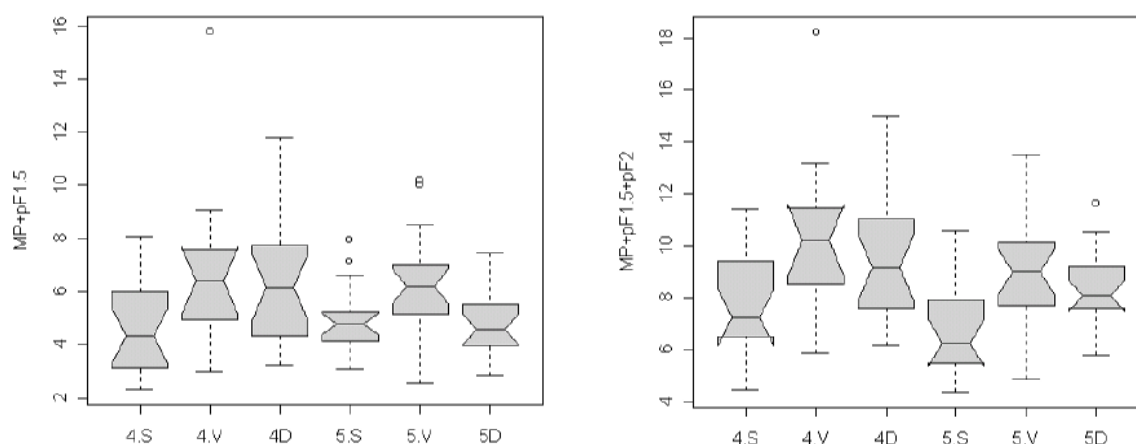


Abb. 5 Porenvolumen bestimmt mittels neuer VHW-Methode (V), Drucktopfmethode (D) und Sandbox (S). Links: Porenklasse pF1.5, inkl. Makroporen für VHW-Methode. Rechts: Porenklassen pF1.5+pF2, inkl. Makroporen für VHW-Methode.

4.4 Messfehler

Die Fehlerrechnung zur Sandbox- und Drucktopfmethode ist im Anhang zusammengestellt. Die beiden Methoden beruhen auf dem Wägen der Wasserverluste.

Bei der neuen VHW-Methode hingegen kann das aus der Probe geflossene resp. gesogene Volumen direkt an der Bürette abgelesen werden. Es ist also keine aufwendige Fehlerrechnung nötig. Der Messfehler des Volumens mit der Bürette beträgt ± 0.1 ml, was bei einem Probevolumen von 100 ml 0.1 % entspricht.

Die Einstellung des Druckes resp. der Saugspannung geschieht über die Höhe der Wassersäule. Diese Höhe kann problemlos mit dem Doppelmeter mit einem Fehler von ± 1 mm bestimmt

werden. Das hat folgende relative Fehler der Druckeinstellung zur Folge: $\pm 5\%$ für Makroporen, $\pm 0.3\%$ für pF1.5 und $\pm 0.1\%$ für pF2.

Die VHW-Methode birgt folgende potentielle Fehlerquellen: ein Leck an der Wassersäule, temperaturbedingte Volumenänderung und Verdunstung. Da die Apparatur aus durchsichtigen Materialien besteht (Plexiglas, PVC-Schlauch, Glas) können durch ein Leck auftretende Luftblasen aber leicht erkannt werden. Die temperaturbedingte Volumenänderung liegt auch bei einem Temperaturunterschied von 18°C (Vergleich zwischen Labor und Kühlraum) innerhalb der Messgenauigkeit. Die Verdunstung stellt ein grösseres Problem dar. Trotz aller Vorkehrungen zum Verdunstungsschutz bleibt eine Restverdunstung von bis zu 0.1 ml pro Tag.

Wie die Abbildung 6 exemplarisch zeigt, wird bei jeder Druckstufe nach 12 bis 48 Stunden ein Maximum des aus der Probe geflossenen Wassers erreicht. Danach nimmt das Volumen stets leicht ab, was besonders an der letzten Druckstufe, wo das Volumen über eine lange Zeit aufgezeichnet wurde, gut zu erkennen ist. Die Abnahme des Volumens ist eine Folge der Verdunstung des Wassers aus der Apparatur. Die für die Desorption relevanten Volumen sind also bei jeder Druckstufe das Anfangs- und das Maximalvolumen. Das Maximum wird bei den ersten beiden Druckstufen nach ca. 12 Std. und bei pF2 nach 24 - 48 Std. erreicht. Der Fehler des Porenvolumens einer Druckstufe setzt sich also aus dem Ablesefehler der Bürette (0.1 ml) und dem Verdunstungsfehler (0.05 bis 0.2 ml) zusammen. Da die Proben ein Volumen von 100 ml besitzen, beträgt der gesamte Fehler höchstens 0.3% .

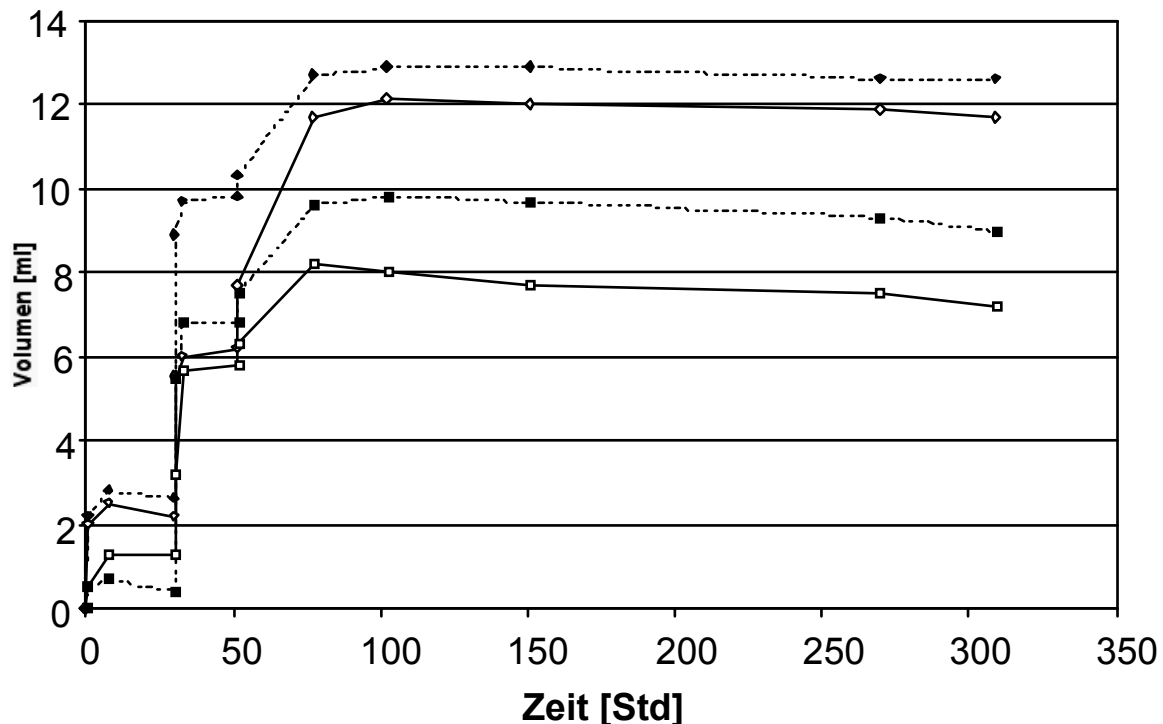


Abb. 6 Desorption von 4 Proben bis pF2 als Funktion der Zeit.

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die folgenden Empfehlungen basieren auf der Desorptionsmessung mit drei verschiedenen Methoden an Proben von 2 Horizonten von 2 Standorten. Verglichen wurden die neu entwickelte VHW-Methode und die Standard-Sandboxmethode an den Proben beider Standorte und zusätzlich die Drucktopfmethode an den Proben eines Standortes.

Die VHW-Methode ergibt bei allen Messserien immer die grössten Porenvolumen bis zur Druckstufe pF1.5 und pF2, wobei bei der VHW-Methode die Makroporen (drainierte Poren bei einer Saugspannung von 0 – 4 hPa) erfasst werden, bei den zwei andern Standardmethoden hingegen nicht. Die Unterschiede sind zum Teil signifikant (95 %). Die Sandboxmethode andererseits ergibt immer die kleinsten Werte. Vermutlich weist die Sandoberfläche nicht immer die gewünschte Saugspannung auf.

Wir empfehlen daher,

- die Bodenproben über den ganzen gewünschten Bereich mit dem Drucktopf zu desorbieren. Die Messung in der Sandbox ist zwar nicht aufwendig, aber auch nicht nötig und zudem auf Grund der vorliegenden Messungen offensichtlich nicht problemlos.
- den Anfangswassergehalt nicht nach dem Konditionieren in der Sandbox bei einer Saugspannung von 1 hPa zu bestimmen, sondern die Desorption mit möglichst gesättigten Bodenproben zu beginnen. Die dazu geeignete Methode liegt noch nicht vor.
- sofern der Anteil der grossen Poren bis pF1.5 oder pF2 wichtig ist, zusätzlich die neue VHW-Methode anzuwenden, um eine zweite unabhängige Messung mit einer andern Methode zu erhalten.

Für den physikalischen Bodenschutz ist anzunehmen, dass die exakte Bestimmung des Makroporenanteils bis zu einer noch zu definierenden Saugspannung immer wichtiger wird. Hingegen ist die Bestimmung des Anteils für die Pflanzen nicht verwertbaren Bodenwassers, also die Messung der aufwendigen wie auch fehleranfälligen Druckstufe pF4.2 (FaBo, 2000), für den Bodenschutz obsolet. Die dadurch frei werdenden Ressourcen könnten nutzbringender für denjenigen Teil der Desorptionskurve verwendet werden, der für den Bodenschutz und die Pflanzenkunde von Interesse ist, nämlich für den Makroporenbereich und für den Porenbereich bis maximal 1'000 hPa (pF3).

Wir empfehlen daher zusätzlich,

- auf die Porenbestimmung der Druckstufe pF4.2 zu verzichten und bis höchstens pF3 zu messen.

In die Berechnung des Gesamtporenvolumens fliesst die reelle Dichte ein. Diese ist in Böden nicht eine Konstante, sondern liegt üblicherweise zwischen 2.4 und 2.7 g/cm³. Mit der Bestimmung der reellen Dichte steht eine unabhängige Methode zur Berechnung des Gesamtporenvolumens zur Verfügung.

Wir empfehlen daher weiter,

- die reelle Dichte zu bestimmen.

6 Literatur

- FaBo, 1998. Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit (k_{sat}) an ‚ungestörten‘ Bodenproben. Bericht, Fachstelle Bodenschutz, Kanton Zürich.
- FaBo, 1999. Durchführung von Testserien mit der neu evaluierten k_{sat} -Methode. Bericht, Fachstelle Bodenschutz, Kanton Zürich.
- FaBo, 2000a. Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit (k_{sat}) im Labor. Laboranleitung. Fachstelle Bodenschutz, Kanton Zürich.
- FaBo, 2000b. Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit (k_{sat}) an ausgewählten Standorten. Fachstelle Bodenschutz, Kanton Zürich.
- FaBo, 2001. Qualitätssicherung KaBo-Desorptionsdaten. Fachstelle Bodenschutz, Kanton Zürich.
- Haines, W. B. 1930. The hysteresis effect in capillary properties and the modes of moisture distribution associated therewith. *J. Agric. Sci.* 20:96-105.
- Klute, A. 1986. Water retention: Laboratory methods. p. 635 – 662. In: A. Klute (ed.). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods.* 2nd edition. ASA, Madison, USA.
- Physikalischer Bodenschutz. 1999. Konzept zur Umsetzung der rechtlichen Vorgaben im Umweltschutzgesetz (USG) und in der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo). BGS-Dokument 9, Zürich.
- Richards, L. A. 1941. A pressure-membrane extraction apparatus for soil solution. *Soil Sci.* 51:377-386.
- Schweizerische Referenzmethoden. 1996. Band 2. Eidg. Forschungsanstalten für Agrarökologie und Landbau, Zürich-Reckenholz.
- VBBo. 1998. Verordnung über Belastungen des Bodens, SR 814.12

Anhang

A1 Messwerte

A2 Fehlerrechnung zur Desorptionsmessung im Drucktopf und in der Sandbox

A3 Laboranleitung

A4 Auswertungstabelle