

Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich
Amt für Landschaft und Natur
Volkswirtschaftsdirektion

Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit k_{sat} im Labor

Laboranleitung

Juli 2000

Projektleitung:

Samuel Isler
Fachstelle Bodenschutz
8090 Zürich

Projektausführung und Bericht:

Luzi Matile
Geologie und Umwelt
Berneggweg 3
8055 Zürich

Bernhard Buchter
Ambio GmbH
Wildbachstrasse 46
8008 Zürich

Inhaltsverzeichnis

1 Laboranleitung	1
1.1 Einleitung.....	1
1.2 Probenahme	1
1.2.1 Probetypen	2
1.2.2 Handbetrieb.....	2
1.2.3 Geländefahrzeug	2
1.3 Durchführung der Messung	2
1.3.1 Paraffinmantel und Präparation	2
1.3.2 Vorsättigung der Proben	3
1.3.3 Einbau der Probe in das Permeameter	4
1.3.4 Messung	4
1.4 Auswertung der Messwerte.....	6
1.5 Eigenschaften des Permeameters.....	6
1.6 Herstellung verschiedener Komponenten	6
1.6.1 Permeameter.....	6
1.6.2 Dichtungsschlauch	7
1.6.3 Transportzylinder	7
2 Laborprotokolle	13
2.1 Feld- und Laborprotokoll „Probenahme und Vorbereitung,“.....	14
2.2 Messprotokoll „Eingabe der Messwerte,“	15
2.3 Berechnungstabelle „Auswertung,“.....	16
3 Theorie zur Messung der gesättigten Leitfähigkeit.....	17
3.1 Fehlerrechnung	17
3.2 "Leitfähigkeit" des Permeameters.....	18
3.3 Einfluss der Dichte und der Viskosität des Wassers.....	18
4 Erläuterungen zum Excel-Dokument.....	20
5 Literatur	23

1 Laboranleitung

1.1 Einleitung

Das Prinzip der Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit k_{sat} und die Eigenschaften der hier verwendeten Methode (fallende Druckhöhe) sind im internen Bericht „Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit (k_{sat}) an ‚ungestörten‘ Bodenproben,, (FaBo, 1998) beschrieben. Es wird hier das praktische Vorgehen bei der Probenahme und der Durchführung der Messung erläutert. Zudem wird auf mögliche Fehlerquellen aufmerksam gemacht. Die wichtigsten Punkte sind dabei:

- Beim Ausstossen der Probe aus dem Stahlzylinder für die Messung mit Paraffinmantel besteht bei der Anwendung zu grosser Kraft die Gefahr der Verdichtung (u.a. Zerstörung der Porenstruktur).
- Verschmierte Bereiche an den Probenenden bedeuten, dass potentiell wasserleitende Poren verschlossen sind, was zu einer Verringerung der Leitfähigkeit führt.
- Im Porenraum eingeschlossene Luftblasen führen zu einem Verschluss der betroffenen Poren für das durchfliessende Wasser und zu einer Verkleinerung der Leitfähigkeit, weil nicht mehr die gesättigte Leitfähigkeit gemessen wird.
- Der Druckgradient sollte möglichst klein gehalten werden, um die Zerstörung der Bodenstruktur zu verhindern (z.B. Verschlammung). Dabei ist gleichzeitig darauf zu achten, dass der Messfehler möglichst klein bleibt und der zeitliche Aufwand nicht unnötig zunimmt. Bei der Messung sollte also mit kleinen Druckhöhen begonnen und diese erst erhöht werden, falls die Filtergeschwindigkeit zu klein ist, um in vernünftiger Zeit die Messung durchführen zu können.
- Die Dauer der Messung ist eine Frage des Messfehlers, des zeitlichen Aufwands und auch der eben beschriebenen Problematik des Druckgradienten. Bei sehr lang dauernden Messungen ist die Verdunstung aus der Bürette zu unterbinden.
- Die Temperatur des Wassers muss gemessen oder auf 5°C genau geschätzt werden, damit die Temperaturabhängigkeit der Viskosität des Wassers in die Berechnung einbezogen werden kann.

1.2 Probenahme

Die Proben sollten möglichst feldfrisch, d.h. annähernd bei Feldkapazität entnommen werden (falls nötig bewässern).

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

Bei der Beprobung an einer bestehenden Profilgrube besteht vor allem im oberen Bereich des Profils die Gefahr, dass sich während der Probenahme vertikale Entlastungsrisse bilden. Solche Proben müssen unbedingt verworfen werden, da sie eine durch die Probenahme erhöhte Leitfähigkeit aufweisen werden. Die Tendenz zur Bildung von Entlastungsrissen kann

verkleinert werden, wenn die Proben in grösserer Entfernung zur Profilwand oder im Bereich der Ecken der Profilgrube entnommen werden.

1.2.1 Probetypen

Das Permeameter ist ausgelegt auf Zylinderproben mit maximal 5.75 cm Durchmesser und 3.9 cm oder 10 cm Länge. Wenn möglich sollten 10 cm lange Proben verwendet werden (FaBo, 1998). Das Permeameter könnte mit geringem Aufwand auch an grössere Probenlängen angepasst werden. Falls die Messung von 10 cm langen Proben im Paraffinmantel (Unterbindung von Randeffecten) geplant ist, sollten PVC-Transportzylinder (siehe Kap. 1.3) anstelle der Stahlzylinder verwendet werden.

Es besteht die Gefahr, dass die Bodenprobe bei der Entnahme wegen zu grosser Reibung zwischen Zylinder und Probe gestaucht wird. Die Stauchung kann durch den Vergleich der Eindringtiefe der Probenahmesonde und der Länge der Bodenprobe ermittelt werden. Gestauchte Proben lassen sich später meist auch sehr schlecht aus dem Zylinder austossen. Das Problem tritt vor allem bei 10 cm langen Stahlzylindern ($\varnothing_{\text{innen}} = 57.6 \text{ mm}$) und tonreichen Böden auf. Um trotzdem Proben von diesen tonreichen Böden entnehmen zu können, empfiehlt es sich, einerseits PVC-Zylinder und andererseits Kronen mit kleinerem Durchmesser zu verwenden. Es stehen gehärtete Kronen mit den folgenden Durchmessern (in mm) zur Verfügung: 57.8 (normal), 56.8 (-I), 55.8 (-II), 54.8 (-III) und 53.8 (-III).

Neben der geringeren Stauchungsgefahr wegen einem grösseren Innendurchmesser als die verwendeten Stahlzylinder haben PVC-Zylinder die Vorteile, dass man die Bodenprobe sieht und dass man die Probe notfalls durch Aufschneiden des Zylinders entfernen kann. Falls die PVC-Zylinder von Hand hergestellt werden (siehe Kap. 1.6.3), besteht die Gefahr, dass die Leimstelle ein wenig vorsteht und der Zylinder daher bei der Probenahme zerdrückt wird.

1.2.2 Handbetrieb

Das Probenahmegerät, das den Probezylinder enthält, wird mit einem Kunststoffhammer in den Boden geschlagen oder bei lockeren Böden hineingedrückt. Das Probenahmegerät kann auch mit einem am Gerät angebrachten schweren Metallring in den Boden geschlagen werden. Bei skelettarmen Böden ist das Hineindrücken der Probenahmesonde wahrscheinlich die schnellste und zerstörungsärmste Methode. Das Hineinschlagen mit dem Hammer ist, obwohl die Gefahr von Rissbildung besteht, häufig die einzige Methode ein Probe zu nehmen.

1.2.3 Geländefahrzeug

Mit der hydraulisch betriebenen Sondiervorrichtung am Geländefahrzeug können in weniger als 5 Minuten Proben aus einer Tiefe von bis zu 1 m gestochen werden. Die Sondierstange zum Ziehen von Bohrkernen wird bis zur gewünschten Tiefe (Oberkante der Probe) in den Boden getrieben. In einem zweiten Schritt kann nun die Probe mit der Probenahmesonde an der Unterkante des Bohrlochs gestochen werden. Ohne das Geländefahrzeug zu verschieben können bis zu 4 verschiedene Bohrlöcher (Abstand ca. 20 cm) gemacht werden.

1.3 Durchführung der Messung

1.1.1 Paraffinmantel und Präparation

Bei Bedarf (bei schwer durchlässigen Proben zwingend sonst empfehlenswert) kann die Probe aus dem Stahlzylinder (resp. PVC-Transportzylinder) in einen der Länge nach halbierten Zylinder (aus Plexiglas, Alu, etc.) ausgestossen und mit einem Paraffinmantel versehen werden. Auf diese Weise wird vermieden, dass Wasser zwischen der Probe und der

Zylinderwand fließen kann, was zu falschen Messresultaten (zu grosse Werte) führen würde. Damit die Probe genügend stabil ist, sollte die Dicke des Paraffinmantels ca. 2 mm betragen.

Beim Ausstossen der Probe aus dem Stahlzylinder besteht die Gefahr, dass die Bodenprobe verdichtet wird, was je nach Bodentyp die Durchlässigkeit des Bodens stark herabsetzen kann. Die beim Ausstossen der Probe angesetzte Kraft muss folglich möglichst gering gehalten werden. Die PVC-Transportzylinder haben hier den Vorteil, dass sie bei satt sitzenden oder delikaten Proben aufgeschnitten werden können.

Das Paraffin mit Schmelzpunkt 60°C wird idealerweise im Wasserbad erhitzt, es ist aber auch möglich einen normalen Wasserkocher mit Thermostat zu verwenden und wenig Wasser ins Paraffinbad zu geben (Sicherung vor Überhitzung des Paraffins). Es empfiehlt sich dann auch einen Gittereinsatz ins Paraffinbad zu stellen, damit die für die Paraffinierung verwendeten Pinsel nicht im Wasser stehen. Gebrauchtes, mit Boden verunreinigtes Paraffin kann durch Aufkochen mit viel Wasser gereinigt und dadurch wiederverwendet werden.

Das geschmolzene Paraffin wird mit einem Pinsel schichtweise auf die Bodenprobe aufgetragen, bis ein ca. 2 mm dicker Paraffinmantel die Probe umgibt. Damit der Dichtungsschlauch¹ die Probe gegenüber dem Permeameter gut abdichtet, ist es wichtig, dass die Oberfläche des Paraffinmantels möglichst glatt ist.

Bei skelettreichen Böden weisen die Proben häufig seitliche Hohlräume auf. Da Steine verglichen mit dem Boden undurchlässig sind, entspricht es am ehesten natürlichen Verhältnissen, wenn diese seitlichen Hohlräume mit Paraffin gefüllt werden.

Die Probe wird vorsichtig auf die Länge des Probezylinders verkürzt. Dabei soll unbedingt vermieden werden, dass die Oberfläche der Probe verschmiert wird (d.h. Brechen ist besser als Schneiden). Falls sich an den Probenenden verschmierte Flächen befinden, sollten diese vorsichtig durch Abbrechen von kleinen Bodenkrümeln mit dem Skalpell wegpräpariert werden. Das untere Ende der Probe sollte möglichst eben sein, da beim Einbau ins Permeameter an unebenen Stellen oft Luftblasen hängen bleiben. Die Probelängen können etwas kürzer als der jeweilige Permeameter Einsatz sein, sollten aber mindestens 60 % seiner Länge aufweisen.

1.1.2 Vorsättigung der Proben

Im Wasserbad die Proben während rund 6 Stunden mit Leitungswasser² sättigen. Die Proben stehen dabei ungefähr zur Hälfte im Wasser. Bei den 10 cm langen Proben ist es sinnvoll, in zwei Schritten zu sättigen – zuerst bei einem Wasserstand, der 1/4 der Probhöhe entspricht und dann den Rest der Zeit bei einem Wasserstand, der 3/4 der Probhöhe entspricht. Es ist darauf zu achten, dass beim Hineinstellen keine Luftblasen eingeschlossen werden. Die Vorsättigung dauert je nach Bodentyp 6 – 24 Stunden. Eine gut vorgesättigte Probe ist am oberen Ende feucht und glänzt daher.

Verboten ist es die Sättigung zu beschleunigen, indem auch Wasser von oben zugegeben wird, weil dadurch einerseits Luftblasen im Boden eingeschlossen werden und andererseits nicht mehr erkannt werden kann, wann die Probe wassergesättigt ist.

¹ Der Dichtungsschlauch wird mit Überdruck an den Paraffinmantel der Probe gedrückt und verhindert so den Wasserfluss zwischen Bodenprobe und Permeameter (siehe auch Abb. 1 und 2).

² Leitungswasser ist deionisiertem Wasser vorzuziehen, da es eher dem Bodenwasser entspricht. Bei deionisiertem Wasser besteht die Gefahr der Desaggregation von Bodenpartikeln, was einen Einfluss auf die Leitfähigkeit haben kann.

1.1.3 Einbau der Probe in das Permeameter

Das Permeameter wird gemäss Abb. 1 und 2 in den folgenden Schritten zusammgebaut und die Probe eingebaut:

1. Filter (Lochplatte aus Plexiglas), O-Ring (Abstandhalter unter Filterplatte) und Dichtungsring von der Bodenplatte entfernen und alles mit einem feuchten Schwamm reinigen. Teile wieder einsetzen und die Bodenplatte mit Wasser füllen und Luftblasen entfernen.
2. Den geeigneten Plexiglaszylinder wählen und den Dichtungsschlauch überstülpen (siehe Abb. 2). Es ist darauf zu achten, dass der Dichtungsschlauch keine Falten bildet und dass er nicht allzu straff über den Zylinder gespannt wird.
3. Den Plexiglaszylinder an der Vakuumpumpe anschliessen, damit der Dichtungsschlauch möglichst dicht an der Zylinderinnenwand anliegt. Die gesättigte Probe vorsichtig in den Zylinder stellen und danach den Unterdruck abstellen. (Der nötige Unterdruck kann auch durch Saugen mit dem Mund erzeugt werden.)
4. Den Zylinder mit der Probe vorsichtig mit einer kippenden Bewegung auf die Bodenplatte des Permeameters stellen und mit einem Spiegel kontrollieren, ob zwischen der Probe und der Bodenplatte keine Luftblasen eingeschlossen wurden. Bei einer sehr unebenen Unterseite der Probe sollte dieser Vorgang unter Wasser ausgeführt werden, da sich Luftblasen so besser vermeiden lassen. Da die Bodenprobe im Wasser leicht zerfallen kann, muss der Einbau unter Wasser sorgfältig geschehen.
5. Der Dichtungsring und die Deckplatte des Permeameters aufsetzen und mit Rändelmuttern festschrauben.
6. Anschliessen des Überdruckes (0.17 bar) am Permeameter. Der Überdruck wird durch eine 1.7 m hohe Wassersäule konstant gehalten (Abb. 1)³. Achtung: falls der Überdruck nicht angelegt wird, hat dies die falsche Messung einer sehr hohen Leitfähigkeit zur Folge, weil der Dichtungsschlauch nicht genügend stark an die paraffinierte Probe gedrückt wird, um den randlichen Wasserfluss zu unterbinden.

1.1.4 Messung

Vor der eigentlichen Messung muss die Probe bei kleinen Druckhöhen fertig gesättigt werden und die Deckplatte des Permeameters bis zum Auslauf mit Wasser gefüllt werden. Es ist erlaubt und als Zeitersparnis bei schwerdurchlässigen Proben empfehlenswert, wenn der Wasserspiegel deutlich über der Probe steht, das restliche Volumen von oben über den Auslauf zu füllen.

Wenn das Permeameter vollständig mit Wasser gefüllt ist, erfolgt die Messung wie folgt:

1. Erfassen der Messparameter: Querschnittsfläche der Probe A [cm²], Länge der Probe L [cm], Querschnittsfläche der Bürette a [cm²], Temperatur des Wassers [°C] Höhe des Ausflusses des Permeameters über der Referenzhöhe H_A [cm] (z.B. Tischplatte).
2. Auffüllen der Bürette mit Leitungswasser bis zu einer Höhe, die einem hydraulischen Gradienten von ca. 1–3 entspricht (10–30 cm über Auslauf bei 10 cm langen Proben und

³ Die Höhe der Wassersäule ist ein Erfahrungswert des ITOe der ETHZ und genügt den verschiedenen Anforderungen (optimale Abdichtung bei möglichst hohem Druck und Schonung der Probe bei möglichst kleinem Druck). Sie hängt aber z.B. von der Beschaffenheit des Dichtungsschlauches ab (Elastizität).

4–12 cm bei 4 cm langen Proben). Bei Bedarf kann der Gradient bei Wiederholungsmessungen erhöht werden. Wegen der Gefahr der Auswaschung oder Verschlammung des Bodens bei grossen hydraulischen Gradienten ist es ratsam, zuerst bei kleinen und danach bei grossen Gradienten zu messen⁴.

3. Öffnen des Zulaufhahns und warten bis der Wasserspiegel in der Bürette kontinuierlich sinkt⁵. Gleichzeitig die Druckhöhe H_1 ablesen und die Stoppuhr starten.
4. Ablesen der Druckhöhe H_2 und Messung der Zeit t . Wenn möglich sollte die Differenz zwischen den beiden Druckhöhen grösser als 2 cm und die Messzeit grösser als 20 s sein (Messfehler).
5. Eingabe der Messwerte in die Excel-Eingabetabelle und in der verknüpften Auswertungstabelle kontrollieren, ob der Messfehler vernünftig klein ist. Grosse Messfehler entstehen meist wegen zu kurzen Messzeiten und zu kleinen Differenzen zwischen H_1 und H_2 .
6. Messung der Probe mehrmals eventuell unter optimierten Bedingungen wiederholen (mindestens dreimal), um die Streuung der Messwerte und allenfalls eine Drift (Verschlammung/Auswaschung) erfassen zu können.

Bei sehr hohen Leitfähigkeiten kann die Methode der konstanten Druckhöhe (Boil-Mariott'sche-Flasche anstelle der Bürette) mit kleiner Druckhöhe angewandt werden (FaBo, 1998). Es ist jedoch möglich, mindestens bis zu einer Leitfähigkeit von 10^{-4} m/s mit der Methode der fallenden Druckhöhe zu messen. Tab. 1 zeigt die Messfehler Δk_{sat} bei zwei verschiedenen maximal erreichten hydraulischen Gradienten i_{max} für Proben (4 cm und 10 cm) mit einer Leitfähigkeit von $k_{sat} = 10^{-4}$ m/s. Je grösser der maximale hydraulische Gradient (d.h. die Anfangshöhe) ist, umso kleiner wird der berechnete Messfehler, weil die Messzeit zunimmt und folglich der limitierende relative Fehler der Zeitmessung abnimmt. Mit zunehmender Anfangshöhe steigt aber auch die Gefahr der Zerstörung der Bodenstruktur.

Tab. 1: Hydraulischer Gradient und Messfehler bei der Messung einer Leitfähigkeit von $k_{sat} = 10^{-4}$ m/s unter optimierten Messbedingungen

i_{max}	Δk_{sat} (10 cm lange Probe)	Δk_{sat} (4 cm lange Probe)
1	7 %	10 %
3	5 %	7 %

Für die Interpretation der gemessenen Werte ist es wichtig, den Zustand der Probe nach der Messung zu beurteilen. Von besonderer Bedeutung ist der Zustand des Paraffinmantels (Deformation, Risse), oder, bei der Messung ohne Paraffinmantel, der Zustand der Querschnittsflächen der Probe nach der Entnahme aus dem Stahlzylinder (Löcher, Steine).

⁴ Der Gradient, bei dem Verschlammung oder Auswaschung eintritt, lässt sich schwer vorhersagen und hängt stark vom Bodentyp ab.

⁵ Ein kurzes und schnelles Absinken des Wasserspiegels in der Bürette, was beim Öffnen des Zulaufhahns eintreten kann, hat nichts mit der Leitfähigkeit der Probe zu tun, sondern ist eine Folge des Druckausgleichs mit der Wassersäule, die den Überdruck auf den Abdichtungsschlauch erzeugt.

1.2 Auswertung der Messwerte

Zur Auswertung der Messwerte wurde eine Excel-Mappe entwickelt (Anhang B.5), welche die folgenden drei miteinander verknüpften Tabellen enthält: 1) Tabelle zur Eingabe von Probenahme und Probenvorbereitungsdaten, 2) Tabelle zur Eingabe der Messwerte (Laborblatt) und 3) Tabelle mit Messresultaten, Messfehlern, statistischen Streumassen und der Einteilung in die Durchlässigkeitsklassen (FAL, 1996).

Die Formeln zur Berechnung der gesättigten Leitfähigkeit (Methode fallende Duckhöhe) und des Messfehlers (Fehlerfortpflanzung) sind in Anhang B.4 zusammengestellt und erläutert.

Die statistische Auswertung basiert auf drei Wiederholungsmessungen pro Probe. Der Mittelwert x_w und der Variationskoeffizient CV_w werden mit dem reziproken Messfehler Δk_{sat} gewichtet.

Um eine allfällige Drift der Messungen (Verschlammung oder Erosion) zu visualisieren, empfiehlt sich die logarithmische Darstellung der Messwerte jeder Probe in der Reihenfolge ihrer Messung. Bei der Behandlung der Messwerte von verschiedenen Proben eines Standortes kann von einer lognormalen Verteilung ausgegangen werden.

1.3 Eigenschaften des Permeameters

Die Wasserleitfähigkeit des leeren Permeameters beträgt $1.8 \cdot 10^{-3}$ m/s für $L = 10$ cm und $7.0 \cdot 10^{-3}$ m/s für $L = 4$ cm. Werden mit Probe ähnliche Werte gemessen, sollte überprüft werden, ob der Überdruck angeschlossen ist. Die Leitfähigkeit des leeren Permeameters ist je nach Bauart verschieden und muss grundsätzlich für jedes neue Permeameter bestimmt werden.⁶ Bei der Messung von Werten, die höchstens ein Zehntel der Leitfähigkeit des Permeameters betragen, kann ihr Einfluss ignoriert werden. Werte, die nur wenig kleiner als die Leitfähigkeit des Permeameters sind, können korrigiert werden (Klute and Dirksen, 1986).

Das Permeameter ist geeignet zur Messung der gesättigten Leitfähigkeit von zylindrischen Bodenproben mit einem Durchmesser von 50 – 60 mm und einer Länge von 35 – 100 mm. Anpassungen an andere Probengrösse sind mit relativ geringem Aufwand möglich.

1.4 Herstellung verschiedener Komponenten

1.1.1 Permeameter

Die Plexiglasteile des Permeameters wurden nach den in Abb. 3 und 4 dargestellten Konstruktionsskizzen hergestellt (Perplex, 8006 Zürich). Weil die Durchmesser der Proben je nach Dicke und Oberfläche der Paraffinschicht variieren, wurden verschiedene Zylinder mit $\varnothing_{\text{innen}} = 64$ mm und $\varnothing_{\text{innen}} = 70$ mm realisiert. Wie in Abb. 1 und 2 dargestellt, werden die Plexiglasteile durch drei ca. 25 cm lange Gewindestangen M6 x 1 aus Chromstahl und Rändelmuttern (Brütsch/Rüegger, 8402 Urdorf; M6 $\varnothing = 30$ mm, Art.-Nr. 98870) zusammengehalten. Das Permeameter wird mit PVC-Schläuchen ($\varnothing_{\text{innen}} = 6$ mm) mit der Überdruckanlage und der Bürette (50 ml) verbunden. Als Verbindung zwischen PVC-Schläuchen und Plexiglasteilen wurden Schlauchtüllen mit Gewinde M10 x 1 verwendet (Brütsch Rüegger, 8902 Urdorf). Als Auslauf dient eine abgewinkelte Schlauchtülle M10 x 1.

⁶ Die Leitfähigkeit des Permeameters könnte durch eine Vergrößerung der Fliessquerschnitte (Bürette, Schlauch, Schlauchtüllen) vergrößert werden (der minimale Durchmesser in der vorliegenden Ausführung beträgt 6 mm), da die Leitfähigkeit durch den Fliesswiderstand (Gesetz von Hagen-Poiseuille) bestimmt wird.

Der Zulauf wird durch einen Kugelventil-Hahnen ($\varnothing_{\text{innen}} = 6 \text{ mm}$) reguliert (Hausammann, Rautistr. 19, 8047 Zürich).

1.1.2 Dichtungsschlauch

Der Dichtungsschlauch wird aus 0.5 mm dickem Silikon (z.B. Maag Technik, 8600 Dübendorf) hergestellt. Ein $18 \times 19.5 \text{ cm}^7$ grosses Stück Silikon wird an den Schmalseiten keilförmig angeschliffen. Die angeschliffenen Enden (gereinigt und entfettet) werden darauf mit Silikonkleber (Dow Corning) zu einem Schlauch zusammen geklebt (Überlappung von 1.5 cm). Nach dem Trocknen kann die Nahtstelle, auf der für die Abdichtung wichtigen Stelle, mit Silikonkleber und einem Spachtel geglättet werden. Unebene Stellen können nachträglich auch mit feinem Sandpapier glattgeschliffen werden.

Als Qualitätstest des neu hergestellten Dichtungsschlauches wird die „Leitfähigkeit“, eines Paraffin-Vollzylinders gemessen, dessen Oberfläche durch das Auftragen von geschmolzenem Paraffin mit dem Pinsel uneben präpariert wurde. Prinzipiell müsste dieser Qualitätstest mit beiden Plexiglasrohren (64 und 70 mm Durchmesser) durchgeführt werden. Da aber die Abdichtung im grossen Rohr weniger gewährleistet ist, genügt die Messung mit diesem. Das Resultat des Qualitätstests ist im Idealfall eine Leitfähigkeit von $k_{\text{sat}} = 0.0 \text{ m/s}$. Werte von $k_{\text{sat}} < 10^{-8} \text{ m/s}$ können toleriert werden, da dies immer noch ca. 10x kleiner als die kleinsten Werte natürlich gelagerter Böden ist. Gründe für ein negatives Resultat des Qualitätstests sind meistens unebene Stellen am Dichtungsschlauch (glatt schleifen) oder das zu straffe Überziehen des Dichtungsschlauches über den Plexiglaszylinder (Qualitätstest erneut durchführen).

Das ITÖ der ETHZ hat für eine vergleichbare Apparatur einen Kautschukschlauch herstellen lassen (Lonstroff AG; 5000 Aarau). Dichtigkeitstests haben gezeigt, dass Kautschukschläuche sich etwas weniger gut einer unebenen Oberfläche anpassen, aber in den Eigenschaften durchaus vergleichbar mit den Silikonschläuchen sind.

1.1.3 Transportzylinder

Damit die Proben unbeschädigt aus dem Zylinder entfernt werden können, wird ein PVC-Transportzylinder empfohlen, dessen Innendurchmesser etwas grösser als der Durchmesser der Probe ist und der bei delikaten Proben auch problemlos aufgeschnitten werden kann. Für das Probenahmegerät der FaBo sind passende PVC-Zylinder ($\varnothing = 60 \text{ mm}$, $L = 14 \text{ cm}$, inkl. Deckel) im Handel erhältlich (Staeger & Co AG, 5612 Villmergen). Diese Transportzylinder können notfalls folgendermassen auch selbst hergestellt werden. Ein $205 \times 139 \text{ mm}$ grosses Stück 0.25 mm dicke PVC-Folie wird um einen Zylinder (z.B. Papierrolle) mit einem Durchmesser von 59.3 mm zusammengeklebt (PVC-Kleber). Durch dieses Vorgehen erhält man einen Transportzylinder der exakt in das Probenahmegerät passt und verglichen mit der Probe einen ca. 2.5 mm grösseren Innendurchmesser hat. Falls keine passenden Deckel für diesen Transportzylinder vorhanden sind, kann er auch durch ein Stück Plastik und ein Gummiband abgeschlossen werden.

⁷ Diese Masse sind für 10 cm lange Plexiglaszylinder bestimmt. Für 4 cm lange Zylinder muss die Länge des Dichtungsschlauches entsprechend reduziert werden (d.h. $10 \times 21 \text{ cm}$).

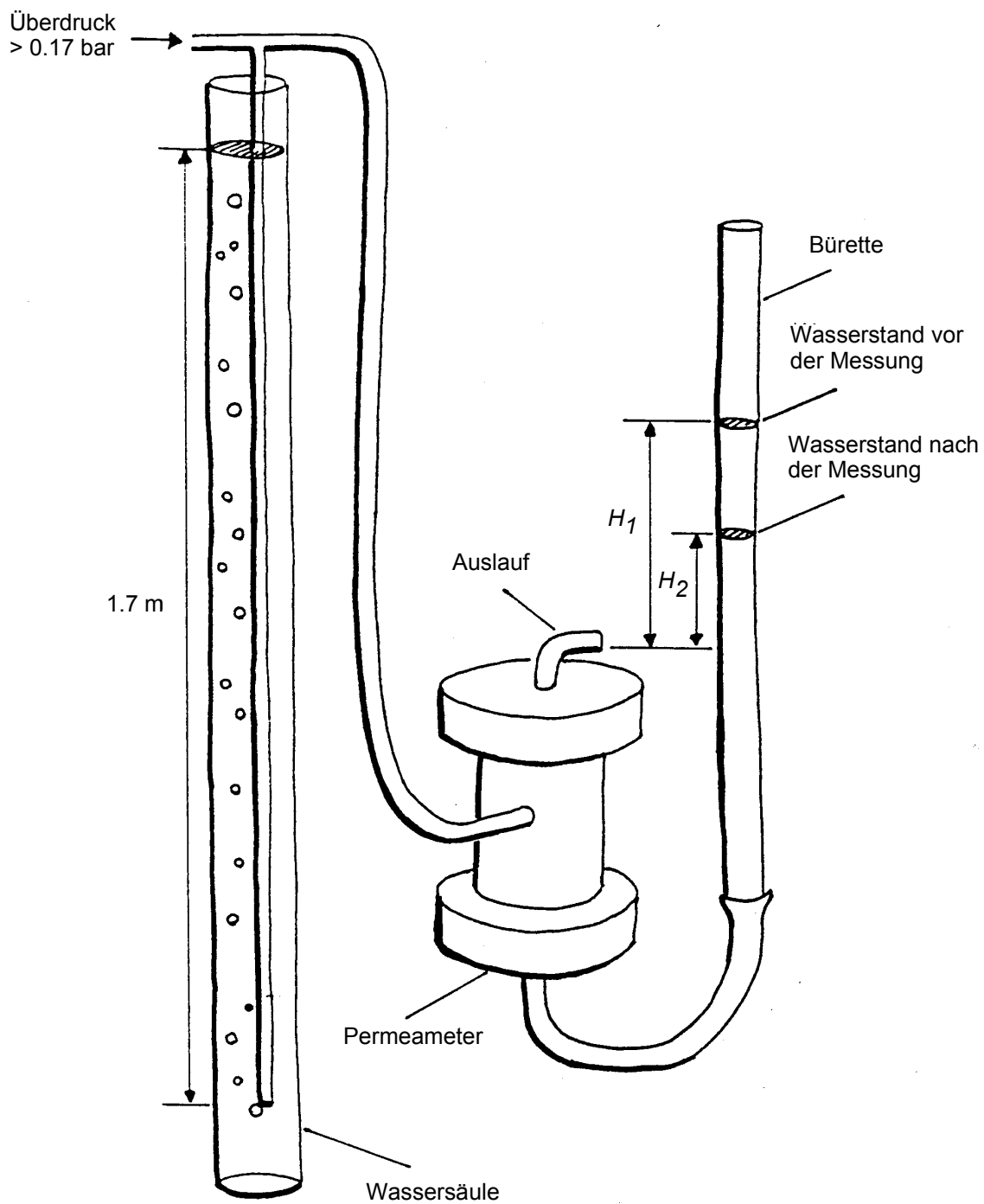


Abb. 1: Skizze des Permeameters und der Druckregulierung. Der Überdruck (0.17 bar), der durch die Wassersäule (1.7 m) konstant gehalten wird, presst den Dichtungsschlauch an die paraffinierte Probe (vgl. Abb. 2). Die Probe wird von unten nach oben durchflossen. Gemessen wird die Zeit, während der sich der Wasserspiegel in der Bürette von H_1 auf H_2 absenkt.

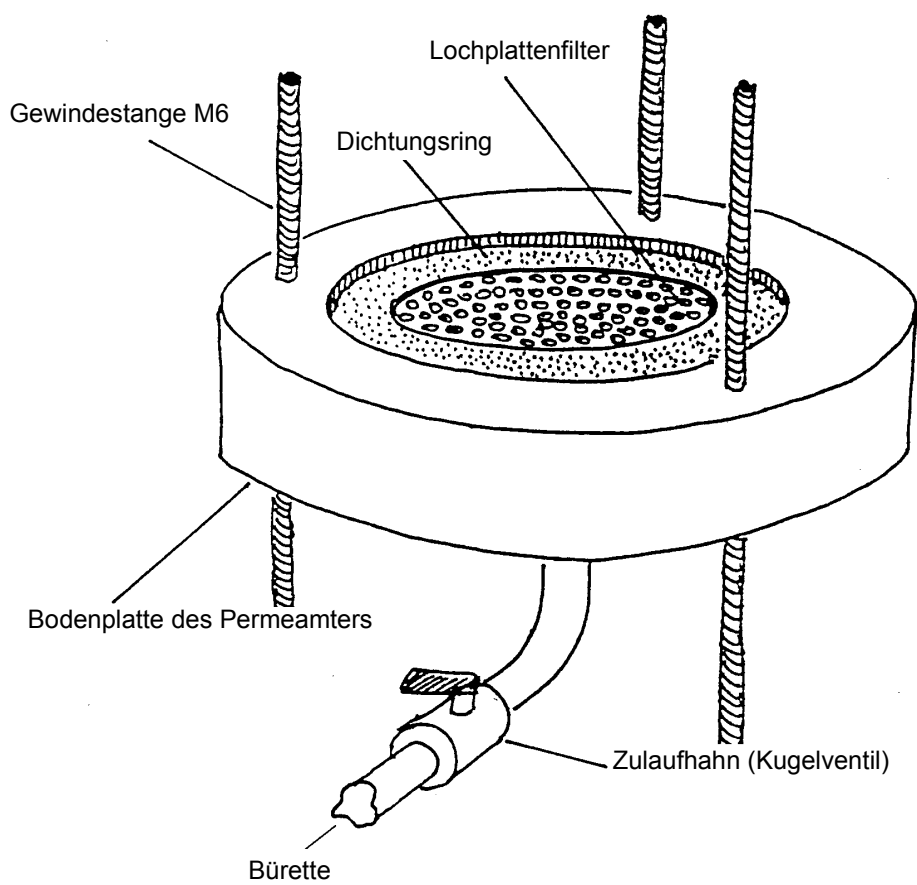
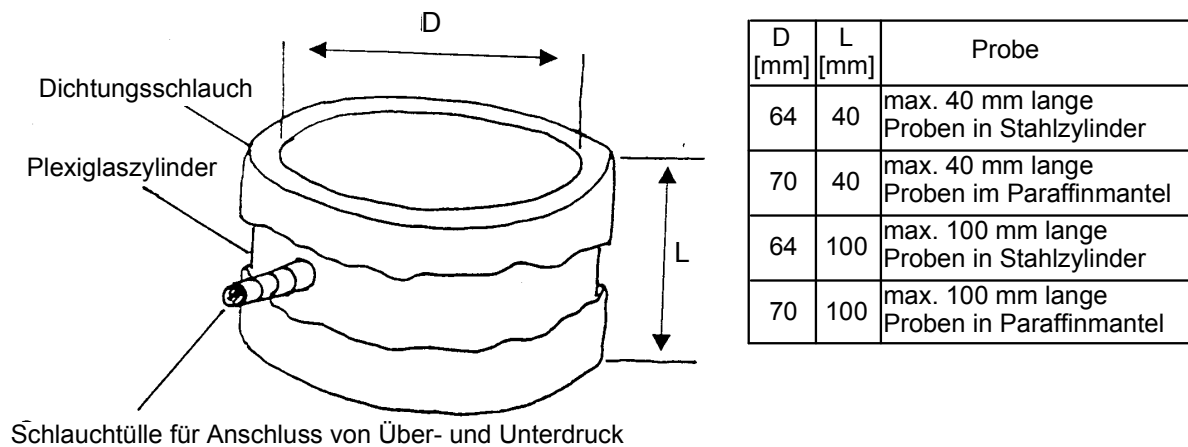


Abb. 2: Detailskizzen zum Permeameter

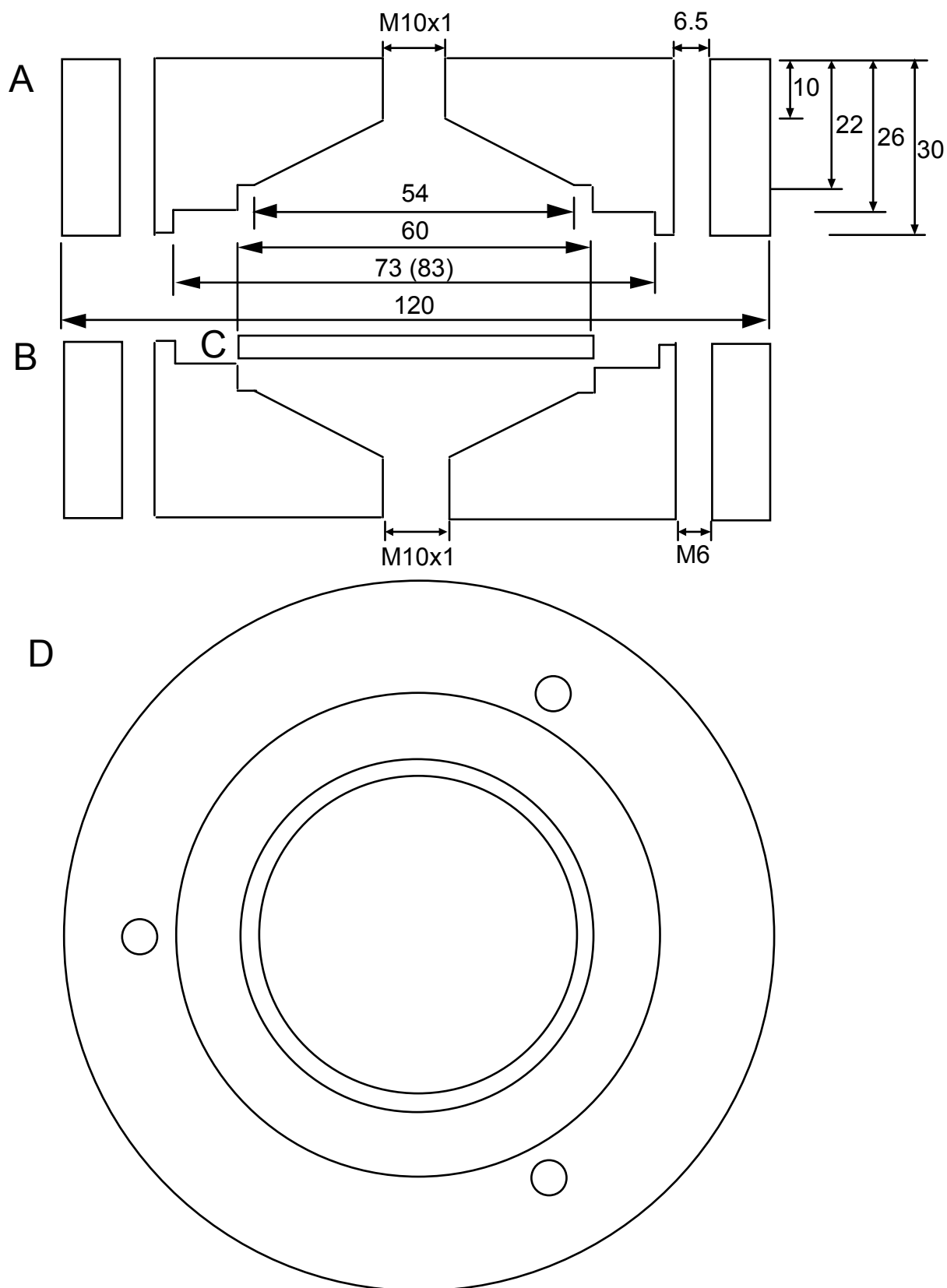


Abb. 3: Konstruktionsskizze der Plexiglasteile des Permeameters (Massangaben in mm). A: Aufriss der Deckplatte; B: Aufriss der Bodenplatte; C: Lochplatte mit ca. 200 – 250 Löchern ($\varnothing = 2$ mm); D: Grundriss von Deckplatte und Bodenplatte. Die Massangaben in Klammern stehen für die Version des Permeameters, das die Messung von Proben mit $\varnothing = 57$ mm im Paraffinmantel (ca. 2 mm) erlaubt

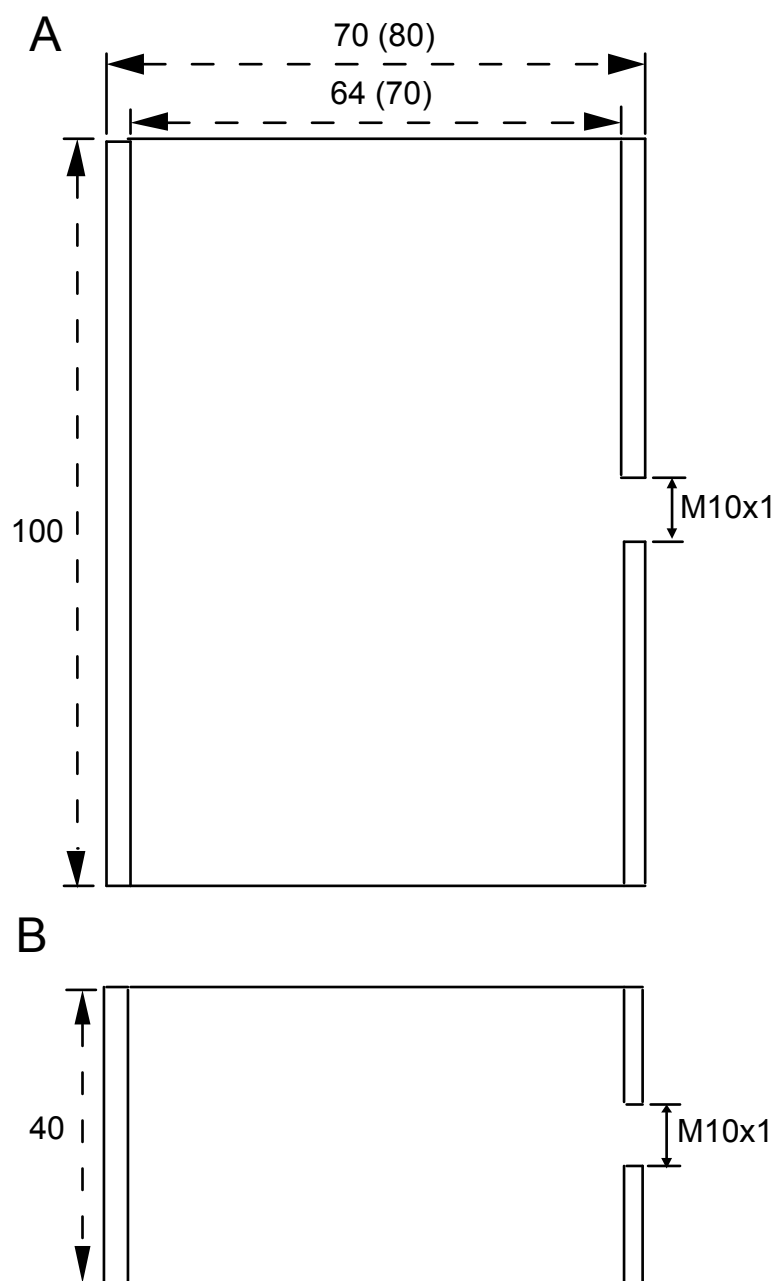


Abb. 4: Konstruktionsskizze der Plexiglasteile des Permeameters (Massangaben in mm): A: Zylinder für max. 10 cm lange Proben; B: Zylinder für max. 4 cm lange Proben. Die Massangaben in Klammern stehen für die Version des Permeameters, das die Messung von Proben mit $\varnothing = 57$ mm im Paraffinmantel (ca. 2 mm) erlaubt.

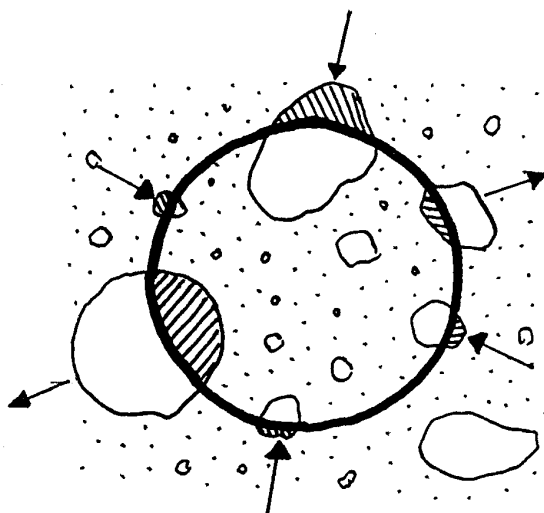


Abb. 5: Veranschaulichung der Problematik der Probenahme in Böden mit viel Grobskelett. Je nach ihrer Lage bezüglich der Probenahmesonde werden die Steine um den schraffierten Betrag in Pfeilrichtung verschoben (Löcher resp. Verdichtung der Probe).

2 Laborprotokolle

2.1 Probenahme und Vorbereitung

2.2 Eingabe der Messwerte

2.3 Auswertung

Bemerkung: Zur Charakterisierung wurde folgender Code gewählt:

F_ZK Messung im kurzen Stahlzylinder, $L \leq 3.9\text{cm}$

F_ZL Messung im langen Stahlzylinder, $L \leq 10\text{cm}$

F_PK kurzer Stahlzylinder ausgestossen, in Paraffinmantel gemessen, $L \leq 3.9\text{cm}$

F_PL langer Stahlzylinder ausgestossen, in Paraffinmantel gemessen, $L \leq 10\text{cm}$

P_PK PVC-Zylinder, in Paraffinmantel gemessen, $L \leq 4\text{cm}$

P_PL PVC-Zylinder, in Paraffinmantel gemessen, $L \leq 10\text{cm}$

1.1 Feld- und Laborprotokoll „Probenahme und Vorbereitung,,

1.2 Messprotokoll „Eingabe der Messwerte,,

1.3 Berechnungstabelle „Auswertung“

2 Theorie zur Messung der gesättigten Leitfähigkeit

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

$$\frac{dV}{dt} = \frac{k_{sat} H A}{L} \quad (1)$$

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

$$k_{sat} = \frac{aL}{At} \ln \frac{H_1}{H_2} \quad (2)$$

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

2.1 Fehlerrechnung

Die Genauigkeit der Ergebnisse hängt logischerweise von der Genauigkeit der verwendeten Messgrößen ab. Sie wirken sich jedoch unterschiedlich aus. Um abschätzen zu können, welche Messgrößen mit welcher Genauigkeit erhoben werden müssen, damit die gewünschte Genauigkeit der berechneten Durchlässigkeit (Gl. 2) erreicht wird, ist eine Fehlerrechnung nötig. Dazu wird die entsprechende Gleichung nach der Messgröße abgeleitet, mit dem vermuteten oder bekannten Fehler dieser Messgröße multipliziert und dann quadriert. Anschliessend werden die Terme summiert und die Wurzel daraus berechnet.

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

$$\begin{aligned} Fehler = & \left(\left(\frac{L}{At} \ln \frac{H_1}{H_2} \Delta a \right)^2 + \left(\frac{a}{At} \ln \frac{H_1}{H_2} \Delta L \right)^2 + \left(\frac{-aL}{A^2 t} \ln \frac{H_1}{H_2} \Delta A \right)^2 + \right. \\ & \left. \left(\frac{-aL}{At^2} \ln \frac{H_1}{H_2} \Delta t \right)^2 + \left(\frac{aL}{AtH_1} \Delta H_1 \right)^2 + \left(\frac{-aL}{AtH_2} \Delta H_2 \right)^2 \right)^{0.5} \end{aligned} \quad (3)$$

Die Grösse des Fehlers für die Methode der **konstanten** Druckhöhe findet sich im FaBo-Bericht "Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit (k_{sat}) an „ungestörten,, Bodenproben" (1998).

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

Die einzelnen Terme in der Gleichung (3) hängen von der Genauigkeit der einzelnen Eingabegrößen ab und sind daher für eine Verbesserung der Genauigkeit unterschiedlich wichtig.

Da bei einer Leitfähigkeit von 10^{-3} m/s die Messdauer nur doppelt so lang ist wie der angenommene Messfehler der Zeit, ergibt sich ein Fehler der daraus berechneten Leitfähigkeit von 48 % (Tab. 1). In diesem Falle wäre es am einfachsten, die Querschnittsfläche der Bürette zu vergrößern.

Tab. 2: Fehler der mit der fallenden Druckhöhe bestimmten Werte in Abhängigkeit von der Durchlässigkeit. Höhe der Probe $L = 3.9$ cm, Querschnittsfläche der Probe $A = 26$ cm², Fläche der Bürette $a = 0.8$ cm², Anfangsdruckhöhe $H_1 = 6$ cm, Schlussdruckhöhe $H_2 = 1$ cm. Angenommene Fehler: $\Delta a = 0.01$ cm², $\Delta L = 0.1$ cm, $\Delta A = 1$ cm², $\Delta t = 1$ s, $\Delta H_1 = H_2 = 0.1$ cm.

k_{sat}	Messdauer	Fehler	
		[m/s]	[%]
[m/s]	[s]	[m/s]	[%]
10^{-3}	2	$4.8 \cdot 10^{-4}$	48
10^{-4}	21	$9.9 \cdot 10^{-6}$	10
10^{-5}	211	$8.7 \cdot 10^{-7}$	9
10^{-6}	2114	$8.6 \cdot 10^{-8}$	9
10^{-7}	21135	$8.6 \cdot 10^{-9}$	9

2.2 "Leitfähigkeit" des Permeameters

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

2.3 Einfluss der Dichte und der Viskosität des Wassers

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

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

wobei η_w die dynamische Viskosität, ρ_w die Dichte des Wassers und g die Erdbeschleunigung bezeichnet. Die mit Wasser gemessene Leitfähigkeit hängt somit von der Dichte als auch von der dynamischen Viskosität ab. Erstere variiert wenig und nimmt von 0°C auf 30°C von 999.9 kg/m³ auf 995.6 kg/m³ ab. Diese Änderung ist vernachlässigbar, nicht hingegen diejenige der Viskosität. Sie beträgt 1.79 mPas bei 0°C, 1.31 mPas bei 10°C, 1.00 mPas bei 20°C und 0.80 mPas bei 30°C. Die Abnahme der dynamischen Viskosität beträgt allein zwischen 10°C und 20°C rund 25 %, entsprechend nimmt die gemessene gesättigte Leitfähigkeit bei konstanter intrinsischer Leitfähigkeit zu. Daraus folgt, dass die Temperatur des verwendeten Wassers gemessen und die Messergebnisse korrigiert werden sollten, sofern die Temperatur um mehr als $\pm 5^\circ\text{C}$ von einer vorgebenen Temperatur (z. B. 20°C) abweicht.

3 Erläuterungen zum Excel-Dokument

Das zur Auswertung der Messdaten entwickelte Excel-Dokument, besteht aus einer Mappe mit den Tabellen „P+V,, (Tab. 3), „E,, (Tab. 4) und „Auswertung,, (Tab. 5).

Tab. 3: Erläuterungen zur Excel-Tabelle „Probenahme und Vorbereitung,,

Spalte	1. Zeile	2. Zeile	3. Zeile	4.- 25. Zeile	Kommentar
A	Probenahme	Datum			
B		Probe	Nr		
C		Standort	Nr		
D		Gemeinde	Flurname		
E		Koord.			
F		Tiefe [cm]	von		
G			bis		
H		Horizont			
I		Probenahme-gerät			
J		Zylinder	Nr		3.9 cm lange Zylinder: 1 – 1999; 10 cm: > 2000; PVC-Zylinder: negative Zahl
K		Bemerkungen			
L	Vorbereitung	Datum			
M		Paraffin	ja		Falls Paraffinmantel: „x,,
N			nein		Falls Spalte O „x,,: kein Eintrag; sonst „x,,
O		Präparierung	ja		Falls Probe präpariert: „x,,
P			nein		Falls Spalte Q „x,,: kein Eintrag; sonst „x,,
Q		Probe	Typ		Code für Probetyp der Information über Probenahmezylinder, Paraffin/Stahlzylinder und zur Länge der Probe beinhaltet
R		Sättigung	i_{max}		max. hydraulischer Gradient (Druckhöhe/Probenlänge) während dem Sättigen
S		Bemerkungen			

Tab. 4: Erläuterungen zur Excel-Tabelle „Eingabe der Messwerte,,

Spalte	1. Zeile	2. Zeile	3. Zeile	4. – 25. Zeile	Kommentar
A		Datum			
B		Probe	Nr.		

Spalte	1. Zeile	2. Zeile	3. Zeile	4. – 25. Zeile	Kommentar
C		Zylinder	Nr.	=WENN(\$B4="";"";SVERWEIS(\$B4;'P+V'!\$B\$4:\$J\$4;9;FALSCH))	Sucht in Tabelle „P+V“, die zur Probe-Nr. gehörende Zylinder-Nr.
D	Permeameter	A	[cm ²]		Querschnittsfläche der Probe: 26 cm ² für FaBo-Proben
E		L	[cm]		Länge der Probe (messen!)
F		B	Nr		Nr. der verwendeten Büretten (1-8)
G		a	[cm ²]	=WENN(I4=1;0.949;WENN(I4=2;0.936;WENN(I4=3;0.949;WENN(I4=4;0.951;WENN(I4=5;0.949;WENN(I4=6;0.947;WENN(I4=7;0.951;WENN(I4=8;0.947;""))))))))	wählt die zur Büretten-Nr. gehörende Querschnittsfläche
H		T	[°C]		Temperatur des Wassers
I		H_A	[cm]		Höhe des Ausflusses über der Referenzhöhe
J	1. Messung	H_1^*	[cm]		Höhe der Wassersäule in der Bürette über Referenzhöhe am Anfang der Messung
K		H_2^*	[cm]		Höhe der Wassersäule in der Bürette über Referenzhöhe am Ende der Messung
L		t	[s]		Dauer von H_1^* bis H_2^*
M	2. Messung	H_1^*	[cm]		Analog zu Spalte J
N		H_2^*	[cm]		Analog zu Spalte K
O		t	[s]		Analog zu Spalte L
P	3. Messung	H_1^*	[cm]		Analog zu Spalte J
Q		H_2^*	[cm]		Analog zu Spalte K
R		t	[s]		Analog zu Spalte L

Tab. 5: Erläuterungen zur Excel-Tabelle „Auswertung“

Spalte	1. Zeile	2. Zeile	3. – 24. Zeile	Kommentar
A		=E!A2	=WENN(E!A4="";"";E!A4)	Datum
B		=E!B2	=WENN(E!B4="";"";E!B4)	Probe-Nr
C		Standort Nr.	=WENN(\$B3="";"";SVERWEIS(\$B3;'P+V'!\$B\$4:\$J\$25;2;FALSCH))	Sucht in Tabelle „P+V“, die zur Probe-Nr. gehörende Standort-Nr.
D		Horizont	=WENN(\$B3="";"";SVERWEIS(\$B3;'P+V'!\$B\$4:\$J\$25;7;FALSCH))	Analog zu Spalte C
E		Probe Typ	=WENN(\$B3="";"";SVERWEIS(\$B3;'P+V'!\$B\$4:\$Q\$25;18;FALSCH))	Analog zu Spalte C
F		Länge	=WENN(\$B3="";"";E!E4)	

Spalte	1. Zeile	2. Zeile	3. – 24. Zeile	Kommentar
G	k_T		=2.106+0.009*E!H4-0.286*E!H4^0.5	Berechnet den Korrekturfaktor für Temperatur des Wassers (T-Abhängigkeit der Viskosität, siehe Anhang B.4.3)
H	H_1	[cm]	=E!L4-E!\$J4	Anfangsdruckhöhe
I	H_2	[cm]	=E!M4-E!\$J4	Enddruckhöhe
J	1. Messung	k_{sat} [m/s]	=WENN(E!P4=0;"",10^-2*E!\$I4*E!\$G4*E!\$E4*LN(G3/H3)/(E!\$D4*E!P4))	Berechnet k_{sat} nach Gl. 2 in Anhang B.4.1
K		Δk_{sat}	=WENN(E!P4=0;"",((E!\$E4/(E!\$D4*E!P4)*LN(G3/H3)*\$T\$27)^2+(E!\$G4/(E!\$D4*E!P4)*LN(G3/H3)*\$T\$25)^2+(E!\$E4*E!\$G4/(E!\$D4^2*E!P4)*LN(G3/H3)*\$T\$26)^2+(E!\$E4*E!\$G4/(E!\$D4*E!P4^2)*LN(G3/H3)*\$T\$30)^2+(E!\$E4*E!\$G4/(E!\$D4*E!P4*G3)*\$T\$28)^2+(E!\$E4*E!\$G4/(E!\$D4*E!P4*H3)*\$T\$29)^2)^0.5/(I3*100/E!\$I4))	Berechnet Messfehler nach Formel Gl. 3 in Anhang B.4.1
L		i_{max}	=WENN(E!L4="";"",;(E!L4-E!J4)/E!E4)	Max. hydraulischer Gradient während der Messung
M	H_1	[cm]	=E!Q4-E!\$J4	Anfangsdruckhöhe
N	H_2	[cm]	=E!R4-E!\$J4	Enddruckhöhe
O	2. Messung	k_{sat} [m/s]	=WENN(E!U4=0;"",10^-2*E!\$I4*E!\$G4*E!\$E4*LN(L3/M3)/(E!\$D4*E!U4))	Analog Spalte J
P		Δk_{sat}	=WENN(E!U4=0;"",((E!\$E4/(E!\$D4*E!U4)*LN(L3/M3)*\$T\$27)^2+(E!\$G4/(E!\$D4*E!U4)*LN(L3/M3)*\$T\$25)^2+(E!\$E4*E!\$G4/(E!\$D4^2*E!U4)*LN(L3/M3)*\$T\$26)^2+(E!\$E4*E!\$G4/(E!\$D4*E!U4^2)*LN(L3/M3)*\$T\$30)^2+(E!\$E4*E!\$G4/(E!\$D4*E!U4*L3)*\$T\$28)^2+(E!\$E4*E!\$G4/(E!\$D4*E!U4*M3)*\$T\$29)^2)^0.5/(N3*100/E!\$I4))	Analog Spalte K
Q		i_{max}	=WENN(E!Q4="";"",;(E!Q4-E!J4)/E!E4)	Analog Spalte L
R	H_1	[cm]	=E!V4-E!\$J4	Anfangsdruckhöhe
S	H_2	[cm]	=E!W4-E!\$J4	Enddruckhöhe
T	3. Messung	k_{sat} [m/s]	=WENN(E!Z4=0;"",10^-2*E!\$I4*E!\$G4*E!\$E4*LN(Q3/R3)/(E!\$D4*E!Z4))	Analog Spalte J
U		Δk_{sat}	=WENN(E!Z4=0;"",((E!\$E4/(E!\$D4*E!Z4)*LN(Q3/R3)*\$T\$27)^2+(E!\$G4/(E!\$D4*E!Z4)*LN(Q3/R3)*\$T\$25)^2+(E!\$E4*E!\$G4/(E!\$D4^2*E!Z4)*LN(Q3/R3)*\$T\$26)^2+(E!\$E4*E!\$G4/(E!\$D4*E!Z4^2)*LN(Q3/R3)*\$T\$30)^2+(E!\$E4*E!\$G4/(E!\$D4*E!Z4*Q3)*\$T\$28)^2+(E!\$E4*E!\$G4/(E!\$D4*E!Z4*R3)*\$T\$29)^2)^0.5/(S3*100/E!\$I4))	Analog Spalte K
V		i_{max}	=WENN(E!V4="";"",;(E!V4-E!J4)/E!E4)	Analog Spalte L
W	x_w	[m/s]	=WENN(I3="";"",WENN(N3="";"",WENN(S3="";"",;(I3/J3+N3/O3+S3/T3)/(1/J3+1/O3+1/T3))))	Berechnet gewichteten Mittelwert aus Spalten J, O und T (Gewichte aus Spalten K, P, U)

Spalte	1. Zeile	2. Zeile	3. – 24. Zeile	Kommentar
X	CV_w	[%]	=WENN(I3="";"";WENN(N3="";"";WENN(S3="";"";((J3^1*(I3-V3)^2+O3^1*(N3-V3)^2+T3^1*(S3-V3)^2)/(3*(J3^1+O3^1+T3^1))))^0.5/V3))	Berechnet gewichteten Variationskoeffizienten aus Spalten J, O und T (Gewichte aus Spalten K, P, U)
Y	Δk_{sat}^*	[%]	=WENN(W3="";"";MITTELWERT(J3;O3;T3))	Berechnet Mittelwert der Messfehler
Z	Durchlässigkeitsklasse	extrem hoch	=WENN(\$V3="";"";WENN(\$V3*(1+\$X3)>3.5*10^-5;1;""))	Beurteilt Wert aus Spalte P (nach PYZYL-WD); Mehrfacheinträge sind eine Folge des Messfehlers
AA		sehr hoch	=WENN(\$V3="";"";WENN(\$V3*(1-\$X3)<3.5*10^-5;WENN(\$V3*(1+\$X3)>1.2*10^-5;1;""))	Analog Spalte Z
AB		hoch	=WENN(\$V3="";"";WENN(\$V3*(1-\$X3)<1.2*10^-5;WENN(\$V3*(1+\$X3)>4.6*10^-6;1;""))	Analog Spalte Z
AC		normal	=WENN(\$V3="";"";WENN(\$V3*(1-\$X3)<4.6*10^-6;WENN(\$V3*(1+\$X3)>2.9*10^-6;1;""))	Analog Spalte Z
AD		mässig	=WENN(\$V3="";"";WENN(\$V3*(1-\$X3)<2.9*10^-6;WENN(\$V3*(1+\$X3)>1.2*10^-6;1;""))	Analog Spalte Z
AE		gehemmt	=WENN(\$V3="";"";WENN(\$V3*(1-\$X3)<1.2*10^-6;WENN(\$V3*(1+\$X3)>4.6*10^-7;1;""))	Analog Spalte Z
AF		gering	=WENN(\$V3="";"";WENN(\$V3*(1-\$X3)<4.6*10^-7;WENN(\$V3*(1+\$X3)>1.2*10^-7;1;""))	Analog Spalte Z
AG		sehr gering	=WENN(\$V3="";"";WENN(\$V3*(1-\$X3)<1.2*10^-7;1;""))	Analog Spalte Z

4 Literatur

- FaBo, 1998. Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit (k_{sat}) an ‚ungestörten‘ Bodenproben. Interner Bericht, Fachstelle Bodenschutz, Kanton Zürich.
- Klute and Dirksen, 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. P. 687 – 734. In A. Klute (ed.). Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2nd edition. ASA, Madison, USA.
- FAL, 1996. Schweizerische Referenzmethoden der Eidg. Landwirtschaftlichen Forschungsanstalten. Methode PYZYL-WD. Band 2. Zürich Reckenholz.