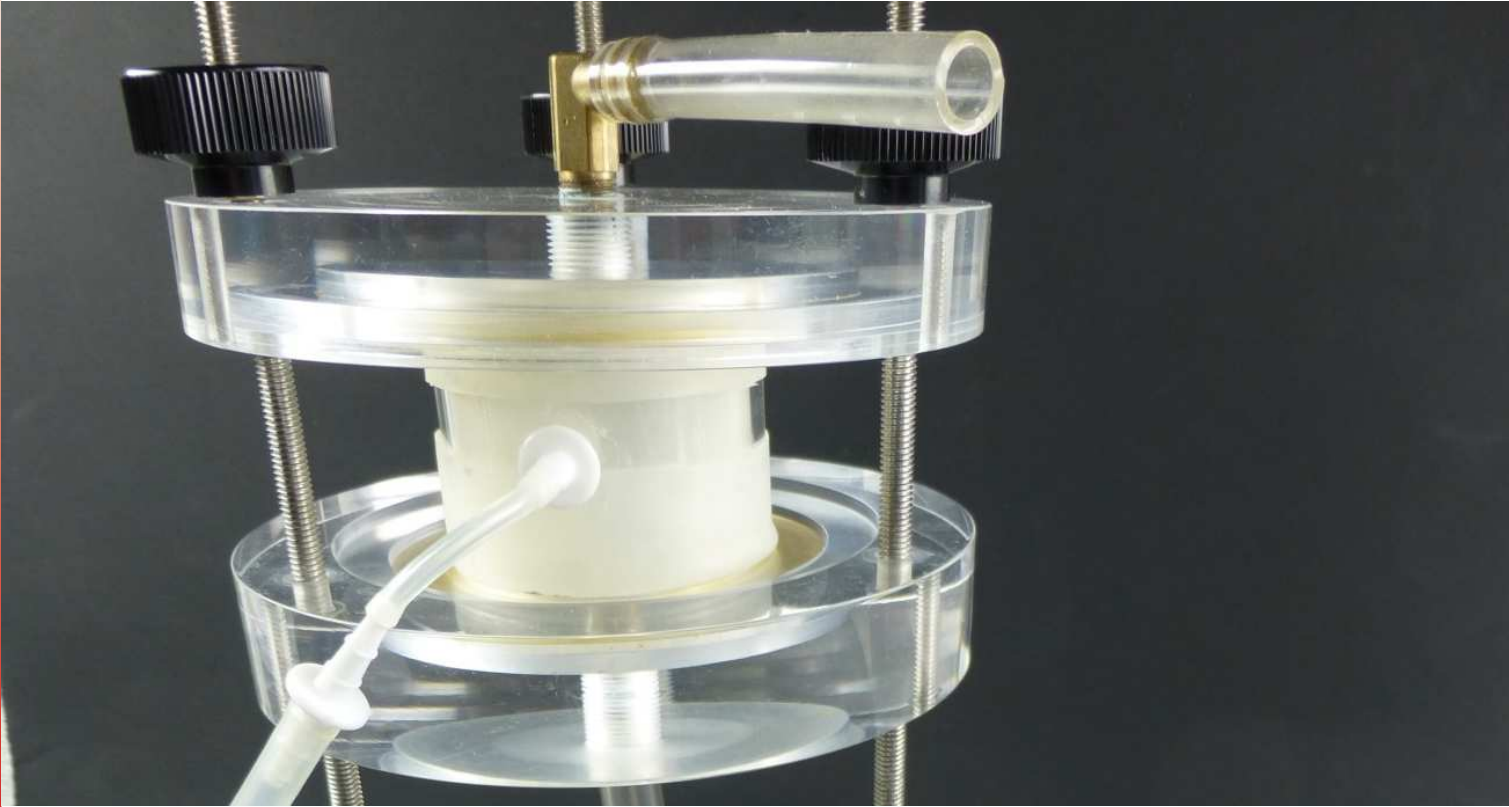


Umwelt

Agroscope Science | Nr. 15 / Februar 2015



Wasserleitfähigkeit im gesättigten Boden

Referenzapparatur – Referenzproben – Ringversuch

Autoren

Peter Weisskopf und Marlies Sommer, Agroscope, Zürich

Bernhard Buchter, Alberta GmbH, Zürich

Stephan Häusler, Terre AG Angewandte Erdwissenschaften, Muhen



Impressum

Herausgeber:	Agroscope Institut für Nachhaltigkeitswissenschaften INH Reckenholzstrasse 191, 8046 Zürich www.agroscope.ch
Auskünfte:	Peter Weisskopf E-Mail: peter.weisskopf@agroscope.admin.ch
Redaktion:	Erika Meili
Titelbild	Referenzapparatur und Referenzproben für die Bestimmung der gesättigten Wasserleitfähigkeit <i>Ksat</i> Marlies Sommer, Agroscope
Download:	www.agroscope.ch/science
Copyright:	© Agroscope 2015
ISSN:	2296-729X
ISBN:	978-3-905667-99-8

Projekt des Bundesamts für Umwelt BAFU «Verdichtung – Messmethoden – Normierungsarbeiten» Kontrakt No. 07.0125.PJ / H202-0480

Wir danken den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der beteiligten Labors für ihre fachlichen Beiträge und die konstruktive Zusammenarbeit, den Projektbegleiterinnen und -begleitern J.-P. Clement (als Vertreter des BAFU), S. Tobias (als Vertreterin des BGS-Vorstandes) sowie D. Schaub und W.G. Stürny (als Vertreter der kantonalen Bodenschutz-Fachstellen) für ihre Unterstützung.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
1 Einleitung	5
2 Modifikationen der Referenz-Messapparatur	6
2.1 Dichtungsschlauch	6
2.2 Mantelrohr	7
2.3 Ventil	7
2.4 Fazit	7
3 Verworfenne Materialien und Konstruktionen für Referenzproben	8
3.1 Filterscheiben aus Kunststoff-Sinter	8
3.2 Filterscheiben aus Glas-Sinter	8
3.3 Filterplatten aus Metallsinter und weitere Materialien	9
3.4 Fazit	9
4 Lochproben als Referenzproben	10
4.1 Theorie	10
4.2 Fazit	11
5 Ringversuch <i>Ksat</i> mit Lochproben als Referenzproben	12
5.1 Beteiligte Labors, Messprozedere, Eigenschaften der Referenzproben	12
5.2 Vergleich der Messergebnisse zwischen den Labors	13
5.3 Ergebnisse der Einzelmessungen	13
5.4 Resultate des Leitfähigkeits-Ringversuches	14
5.5 Fazit	18
6 Schlussfolgerungen aus dem Ringversuch <i>Ksat</i>	19
Literatur	19
Abbildungsverzeichnis	20
Anhang 1	21
Anhang 2	22
Anhang 3	23
Anhang 4	24

Zusammenfassung

Diese Agroscope-Publikation stellt die Entwicklung und Modellierung von Referenzproben für beliebig oft wiederholbare Labormessungen der gesättigten Wasserleitfähigkeit (K_{sat}) sowie die Eigenschaften einer Referenz-Messapparatur vor. Ausserdem zeigt sie Ergebnisse und Schlussfolgerungen eines informellen Ringversuches zur Bestimmung der gesättigten Wasserleitfähigkeit von Referenzproben, bei dem die Untersuchungsergebnisse von sechs erfahrenen analytischen Labors miteinander verglichen wurden, die jeweils mit ihren Standardmethoden arbeiteten. Ziel dieses Ringversuches war es, die Genauigkeit standardisierter Labormessmethoden mit Hilfe der neuartigen Referenzproben zu beurteilen, um die Leistungen verschiedener Labors miteinander vergleichen zu können und den einzelnen Labors die absolute Qualitätskontrolle ihrer Messergebnisse zu ermöglichen.

Die Wasserleitfähigkeit im gesättigten Zustand gilt seit rund einem Jahrzehnt als eine der wichtigen Eigenschaften des Bodens für die Beurteilung von Bodenverdichtungen. Insbesondere beim Vollzug der Umweltschutzvorschriften wurde daher die Tatsache zum Problem, dass Referenzproben zur Kalibrierung von Messapparaturen fehlen.

Auf unserer Suche nach Referenzproben, die beliebig oft wiederholbare Messungen im Labor zulassen, wurden in Analogie zum Boden diverse stabile poröse Referenzmaterialien getestet. Kein Material überzeugte. Das erklärt wohl auch, weshalb poröse Referenzproben in der Literatur nicht beschrieben werden – Ergebnisse erfolgloser Versuche sind nicht publizierbar.

Zum Erfolg führte schliesslich unsere Idee, Proben aus einem Rohr gleicher Grösse wie Bodenproben herzustellen. Die neuen Referenzproben sind einseitig mit einer Platte verschlossen, in die Löcher gebohrt sind, die als Porenäquivalente dienen. Die mit den Referenzproben gemessenen Leitfähigkeiten sind abhängig von der Fliessgeschwindigkeit in den Referenzproben und diese wiederum von der angewandten Druckdifferenz. Für den Vergleich zwischen Labors mit unterschiedlichen Messapparaturen und -protokollen müssen die Leitfähigkeitswerte deshalb aufgrund hydraulischer Gesetze vereinheitlicht werden.

Die Referenz-Messapparatur des für die Durchführung des Ringversuches verantwortlichen Labors wurde modifiziert. Hernach wurde die Leitfähigkeit der neuen Referenzproben vom Referenzlabor und von bodenphysikalisch erfahrenen Labors mit ihren eigenen Apparaturen und Methoden gemessen. Der Vergleich der Messergebnisse zeigte, dass die Lochproben die Anforderungen an Referenzproben erfüllen und dass die Bestimmung mit einer Genauigkeit von mindestens $\pm 0,2$ pK_{sat} -Einheiten möglich ist.

1 Einleitung

Obwohl die Wasserleitfähigkeit gesättigter Bodenproben seit mehr als 70 Jahren bestimmt wird, sind bis heute keine beliebig oft messbaren Referenzproben zur Kalibrierung der Messapparaturen bekannt. Bis vor einem Jahrzehnt wurde das Messverfahren für spezifische Fragestellungen von den einzelnen Anwendern optimiert. Der Vergleich von Messergebnissen verschiedener Labors war weder möglich noch erforderlich. Dieser Zustand wurde zum Hindernis, als die Wasserleitfähigkeit im gesättigten Zustand aus juristischer Sicht als eine der wichtigen Eigenschaften des Bodens für die Beurteilung von Bodenverdichtungen ausgewählt worden war (BGS 2004). Dazu müssen die Messwerte eine ausreichende Genauigkeit aufweisen. Sie müssen präzise und richtig sein. Sowohl zufällige als auch systematische Bestimmungsfehler müssen bekannt oder messbar sein. Die Methode muss kalibriert werden können; Messungen in verschiedenen Labors müssen vergleichbare Ergebnisse liefern. Diese Ziele lassen sich mit den Hilfsmitteln «Referenzprobe» und «Ringversuch» erreichen.

Aus Analogie zum Boden wurden für die Kalibrierung stabile poröse Referenzproben gesucht, die eine beliebig oft wiederholbare Messung der hydraulischen Leitfähigkeit im gesättigten Zustand ermöglichen sollten. Die Inexistenz von Beschreibungen solcher poröser Referenzproben in der Literatur lässt vermuten, dass frühere Versuche, stabile poröse Körper zu finden, gescheitert sind. Die möglichen Gründe für deren Scheitern wurden nicht publiziert, da Ergebnisse von erfolglosen Versuchen nicht publizierbar sind.

Auf der Suche nach Referenzproben für die Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit wurde die Referenz-Messapparatur des für die Durchführung des Ringversuches verantwortlichen Labors (Agroscope) soweit modifiziert, dass sie sicher und problemlos gehandhabt werden kann.

In einem Ringversuch wurde ein Set der neuen Referenzproben bodenphysikalisch erfahrenen Labors zur Verfügung gestellt und von diesen mit ihren eigenen Apparaturen und Methoden gemessen. Um die Genauigkeit der gesättigten Wasserleitfähigkeits-Messungen charakterisieren zu können, wurden die von den verschiedenen Labors erzielten Messergebnisse miteinander verglichen.

2 Modifikationen der Referenz-Messapparatur

Bei der Referenz-Messapparatur (Abb. 1) handelt es um einen Eigenbau nach dem Vorbild von Klute und Dirkson (1986). Nach derselben Vorlage gebaute Messapparaturen wurden von zwei weiteren am Ringversuch teilnehmenden Labors verwendet. Grundsätzlich wird bei fallender Druckhöhe gemessen, konstante Druckhöhe ist aber ebenfalls möglich.

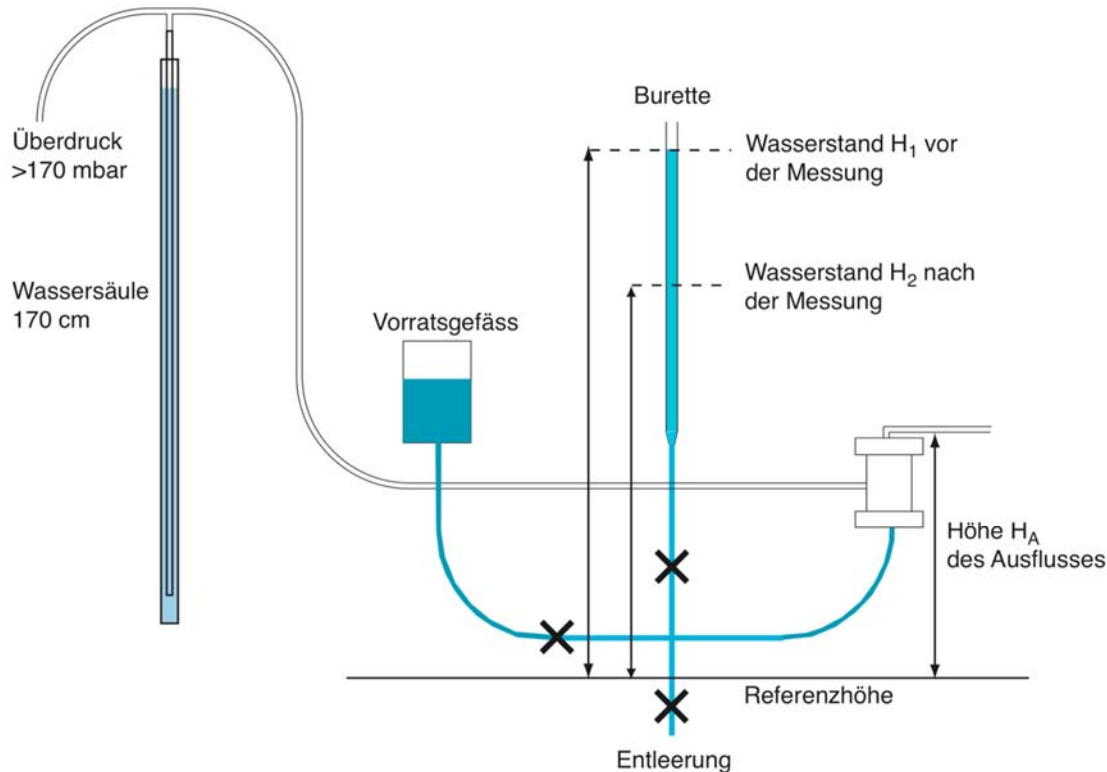


Abb. 1 | Schema der Messapparatur zur Bestimmung der Wasserleitfähigkeit im gesättigten Zustand mittels fallender Druckhöhe. Die Bodenprobe befindet sich in einem Dichtungsschlauch, der mit Hilfe des Überdruckes so an die Probe gepresst wird, dass kein Wasser entlang der Probenwand fließen kann.

2.1 Dichtungsschlauch

Der Dichtungsschlauch, der einen möglichen Wasserfluss entlang der Probenaussenseite verhindert, muss einerseits genügend flexibel und dünn sein, damit er sich den Unebenheiten des Paraffinmantels der Probe anpassen kann. Er muss andererseits aber auch genügend robust und dick sein, um die Übergänge von der Deckplatte zum Mantelrohr und vom Mantelrohr zur Bodenplatte dichten zu können und den Druck der Deckplatte gegen das Mantelrohr und des Mantelrohrs gegen die Bodenplatte unbeschädigt zu überstehen.

Der bisher aus $0,5$ mm starkem Silikon hergestellte Dichtungsschlauch war für die paraffinierten Bodenproben optimiert worden (natürlich gelagerte Proben mit Paraffinmantel, aufgetragen mit Pinsel). Die hier verwendeten künstlichen Referenzproben aus Plexiglas weisen eine glatte Oberfläche und einen etwas kleineren Durchmesser auf. Der zuvor aus $0,5$ mm starkem Silikon hergestellte Dichtungsschlauch bildete daher feine Wülste, in denen Wasser fließen konnte.

Nach diversen Versuchen konnte das Problem schliesslich mit einem Dichtungsschlauch aus Polyurethan (PU-E C119, Härte $35 \pm 5^\circ$ Sh A, Hofmann PU-Elastomere, 5623 Boswil) gelöst werden, der einen Durchmesser von $64/61$ mm (ausser/innen) aufweist. Er wird 30 mm länger als die Probe konfektioniert und wie beim ursprünglichen Silikonschlauch an beiden Enden übers Mantelrohr gestülpt. Zwischen den neuen PU-Schlauch und die Bodenplatte bzw. die Deckplatte wird

zusätzlich je eine ebenfalls speziell hergestellte Polyurethan-Flachdichtung (PU-E C31, Härte $60\pm 5^\circ$ Sh A, Hofmann PU-Elastomere, 5623 Boswil) gelegt.

2.2 Mantelrohr

Der Aussendurchmesser des neuen PU-Dichtungsschlauches ist für die bisher verwendeten Plexiglas-Mantelrohre 70/64 mm zu gross. Keine der anderen in der Schweiz handelsüblichen Rohre sind brauchbar. Die in den USA lieferbaren Plexiglasrohre im Zollmass mit dem Aussendurchmesser $2\frac{7}{8}$ " und der Wandstärke $\frac{1}{8}$ " (73,0/66,7 mm) sind für Proben mit PU-Schlauch genügend weit und weisen eine optimale Wandstärke auf.

2.3 Ventil

Die Leitfähigkeit der Messapparatur war anfänglich zu gering. Nach Ersatz des $\frac{3}{8}$ "-Kugelventils durch ein $\frac{1}{2}$ "-Kugelventil erreichte die Apparatur eine fünfmal grössere Leitfähigkeit, womit auch die am besten durchlässigen Referenzproben gemessen werden konnten.

2.4 Fazit

- Der bis anhin verwendete Silikon-Schlauch sollte durch einen dickeren Schlauch ersetzt und zwischen diesen und die Boden- bzw. Deckplatte jeweils zusätzlich eine Flachdichtung gelegt werden.
- Die Rändelschrauben zum Zusammenpressen von Boden- und Deckplatte können der einfacheren Handhabung wegen durch grössere ersetzt werden. Zur besseren Kraftübertragung und zum Schutze der Apparatur sollten die Unterlagsscheiben mit Federringen ergänzt werden.
- Plexiglasrohre mit Zollmass ermöglichen kostengünstige Rohrdimensionen; mit metrischen Rohrdimensionen wäre dies nur mit grossem Aufwand möglich.
- Der kleinste Fliessquerschnitt einer Messapparatur begrenzt deren Messbereich für gut durchlässige Proben; die Messgrenze entspricht etwa der Wasserleitfähigkeit der leeren Apparatur. Um auch gut durchlässige Proben messen zu können, sind alle Fliessquerschnitte der Messapparatur zu überprüfen.

3 Verworfenne Materialien und Konstruktionen für Referenzproben

3.1 Filterscheiben aus Kunststoff-Sinter

Als erstes wurden poröse Filterscheiben aus gesintertem Kunststoff verwendet (Markasub, Olten). Diese porösen Filter wurden in Plexiglasrohre mit Innendurchmesser 50 mm eingebaut. Einbauversuche mit Wellendichtringen (Simmerringen) und Nuten wie auch mit Kleben scheiterten an der Unmöglichkeit einer dichten Verbindung.

3.2 Filterscheiben aus Glas-Sinter

In einem zweiten Schritt wurden poröse Glasfilterscheiben aus gesintertem Glas verwendet. Glasfilter mit drei verschiedenen Porositäten (Porendurchmesser P1: 100–160 μm , P4: 10–16 μm , P5: 1,0–1,6 μm) wurden in Plexiglasrohre mit Innendurchmesser 50 mm eingebaut (Scheiben mit Durchmesser 50 mm, Bestellnummer 25 155 0X, X = Porosität, Schott Duran Technical Information, S. 169), zuerst nach dem gleichen System wie die Kunststoff-Filterscheiben. Ein- und Ausbau der Filterscheiben waren mit diesem Befestigungssystem nur schwer möglich und führten innert kurzer Zeit zu deren Bruch. Deshalb wurden 60 mm-Filterscheiben auf 55 mm abgedreht und in Plexiglasrohre 60/50 mm eingebaut, die ihrerseits entsprechend der Filterscheiben-Dicke einseitig auf 55 mm ausgedreht worden waren.

Die mit den Glasfilterscheiben gemessenen Leitfähigkeitswerte waren inkonsistent (Abb. 2). Einerseits waren sie abhängig davon, ob die Scheiben ausgebaut und anschliessend nass (Abb. 2: AWn) oder entlüftet (E60 und Exsik) wieder eingebaut wurden, oder ob sie in der Apparatur verblieben (nAp).

Die Abhängigkeit von der Vorbereitung der Filterscheiben (Ausbau: ja/nein, Entlüftung: ja/nein) war jedoch auch je nach der Porosität verschieden. Die grössten pK_{sat} -Werte werden bei den Scheiben mit den groben Poren nach dem Entlüften im Exsikkator erreicht, bei den Scheiben mit den mittleren Poren bei Belassen in der Apparatur und bei feinsten Poren nach dem Entlüften.

Unter der Annahme, dass der Grund für diese hohe Variabilität der Messwerte ein wasserabstossender Belag auf den Filterscheiben-Oberflächen sein könnte, der bei der Produktion entstanden ist, wurden die Filterscheiben mit Laurylsulfat gewaschen – ohne erkennbaren Erfolg. Auch die Reinigung mit Salzsäure (2 %) führte nicht zum Ziel. Weiter liess sich auch die Hypothese,

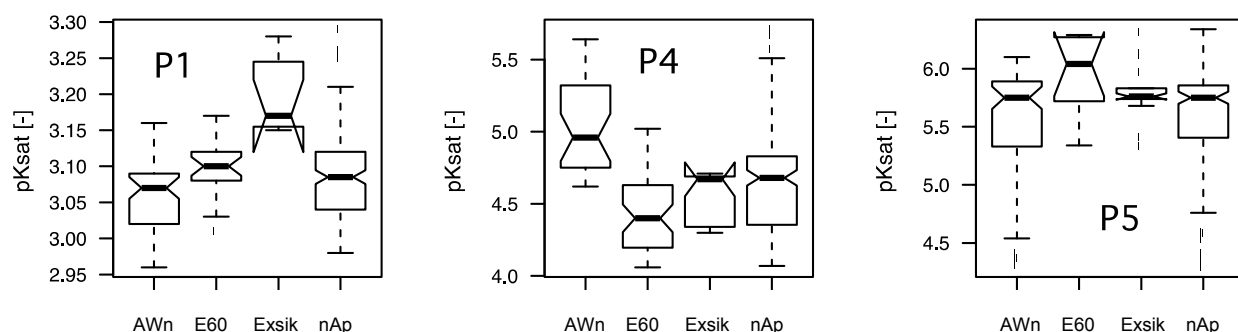


Abb. 2 | Gemessene pK_{sat} -Werte von Glassinter-Filterscheiben mit drei Porositäten (von links nach rechts: P1, P4, P5) und unterschiedlicher Vorbereitung. AWn: Ausbau und Wiedereinbau nass, E60: 60 Min. entlüftet, Exsik: im Exsikkator entlüftet, nAp: nass in Apparatur belassen.

dass das Glassinter-Material der Filterscheibe entgegen der bisherigen Erfahrung unter Wassereinfluss quellen könnte, nicht erhärten. Im Verlauf der Testmessungen trat ein brauner Niederschlag auf den Filterscheiben auf. Rostquelle war vermutlich der kleinere Absperrhahn mit Kugelventil 3/8“. Nach dessen Ersatz durch ein Exemplar mit 1/2“ Durchmesser war kein weiterer brauner Niederschlag zu beobachten. Angesichts all dieser nicht fassbaren Messprobleme wurden die porösen Glassinterplatten nicht weiter untersucht.

3.3 Filterplatten aus Metallsinter und weitere Materialien

Neben den Filterscheiben aus Kunststoff- und Glassintermaterialien wurden auch Proben aus Metallsinter untersucht – mit dem gleichen Resultat wie bei den Glassinter-Filterscheiben. Ausserdem wurden Filter aus Cellulose-Acetat, Pesu-Membranen (Polyethersulfon-Mikrofiltermembran) von Munktell, Bärenstein D, und Poremet (Metalldrahtgewebe) der Firma Bopp, Zürich-Affoltern, getestet. Letztere scheinen sich wegen ihres Aufbaues je nach Fliessrichtung anders zu verhalten, was mit der unterschiedlichen Bildung bzw. dem unterschiedlichen Verhalten von Luftblasen während des Messvorganges in Verbindung gebracht wurde.

3.4 Fazit

- Weder Filterscheiben aus porösem Kunststoff (Kunststoffsinter) oder porösem Glas (Glassinter) noch Metallsinterkörper eignen sich als Bestandteile für *Ksat*-Referenzproben.
- Auch Metalldrahtgewebe und Mikrofiltermembranen eignen sich nicht zu diesem Zweck.

4 Lochproben als Referenzproben

Von Anfang an wurden neben Proben mit porösen Materialien auch Proben mit nur einem oder wenigen Löchern, die einen definierten Durchmesser hatten, getestet. Diese sogenannten „Lochproben“ (Abb. 3) waren ursprünglich Aussenseiter im Evaluationsverfahren, weil sie eine eher abstrakte Näherung an die Porosität einer Bodenprobe darstellen. Schliesslich erwiesen sie sich indes als das einzig brauchbare Konstruktionsprinzip für K_{sat} -Referenzproben. Sie bestehen einzig aus einem Rohr der Länge L mit Innendurchmesser D und einer Bodenplatte mit einem Loch oder mehreren Löchern der Länge l (= Stärke der Bodenplatte) und des Durchmessers d . Das Wasser fließt von unten durch das Loch, das als künstliche Pore wirkt.

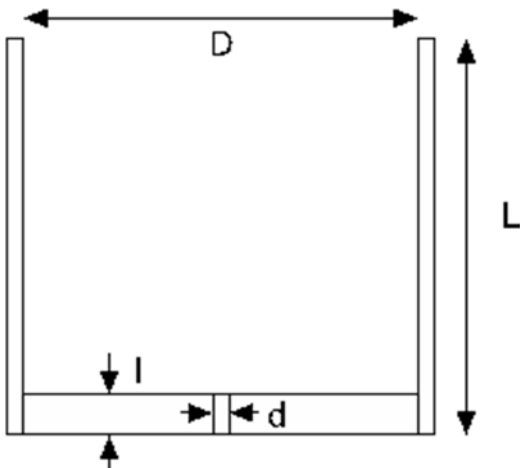


Abb. 4 | Lochprobe als K_{sat} -Referenzprobe. d : Lochdurchmesser (Porendurchmesser), l : Porenlänge (Stärke der Bodenplatte), D : Probeninnendurchmesser, L : Probenlänge.

4.1 Theorie

Das Gesetz von Darcy beschreibt den über die gesamte Querschnittsfläche gemittelten Wasserfluss in einem porösen Körper. Das Gesetz von Hagen-Poiseuille berechnet den Wasserfluss und die Fließgeschwindigkeit in einer einzelnen Pore. Es beruht auf geraden, zylindrischen Poren und Newtons Gesetz der Viskosität. Zusätzliche Fließwiderstände durch Querschnittsänderungen führen zu Druckhöhenverlusten h_c , die sich proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit verhalten. Die totale Druckhöhendifferenz h_{tot} , die im Gesetz von Darcy verwendet wird, setzt sich daher zusammen aus der wirksamen, effektiven Druckhöhendifferenz h_{eff} , die im Gesetz von Hagen-Poiseuille verwendet wird, und dem unwirksamen, zum Quadrat der Fließgeschwindigkeit v proportionalen Druckhöhenverlust h_c :

$$h_{tot} = h_{eff} + h_c = h_{eff} + \frac{1}{2g} \zeta v^2$$

wobei ζ den Proportionalitätskoeffizienten bezeichnet.

Der Proportionalitätskoeffizient ζ der Pore setzt sich zusammen aus dem Koeffizienten der Rohrverengung (Apparatur \rightarrow Loch, $\zeta = 0,5$) und demjenigen der Rohrerweiterung (Loch \rightarrow Probeninnenraum, $\zeta = 1,0$; Glück 1988). Der Gesamtkoeffizient für das Loch entspricht 1,5, der Summe der beiden Teilwiderstände. Mittels dieses Wertes und der beiden Fließgesetze von Darcy und Hagen-Poiseuille lässt sich die Fließgeschwindigkeit v berechnen und daraus mittels der totalen Druckdifferenz h_{tot} , der Probenlänge L und des Probendurchmessers D die Leitfähigkeit der Lochproben vorhersagen, sowohl bei konstanter Druckhöhe wie auch, etwas aufwendiger, bei fallender Druckhöhe (Buchter 2012).

Bei der Bestimmung der Wasserleitfähigkeit von feinporösen, gesättigten Bodenproben sind die von der Geschwindigkeit abhängigen Energiehöhenverluste klein. Die Fließwiderstände von Bodenproben, insbesondere feinporöser Bodenproben, können daher als unabhängig von der Geschwindigkeit angenommen werden. Diese Leitfähigkeitswerte sind grundsätzlich keine Funktion der applizierten Druckhöhen. Bei den Lochproben ist dies nicht der Fall. Wegen des grösseren Lochdurchmessers und der deshalb grösseren Fließgeschwindigkeiten sind die Fließwiderstände grösser. Die Fließwiderstände der Lochproben hängen somit von der Fließgeschwindigkeit des Wassers ab (Abb. 4), das heisst, die Leitfähigkeitswerte der Lochproben sind keine Konstanten.

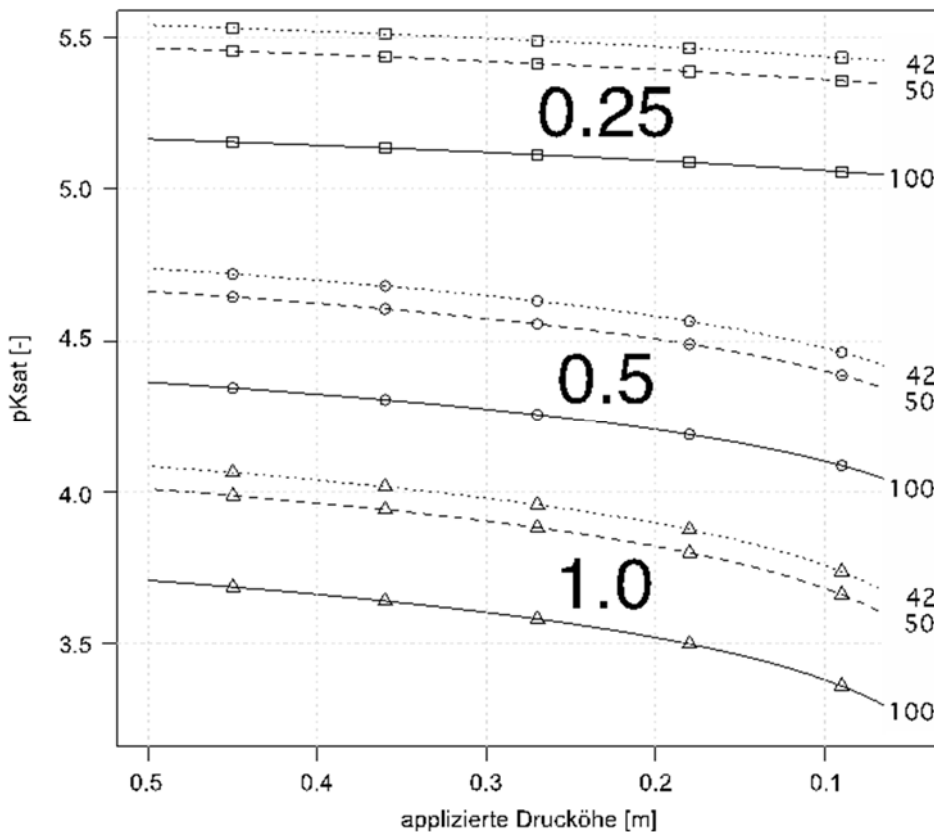


Abb. 5 | pK_{sat} berechnet für drei Lochdurchmesser (0,25, 0,5, 1 mm) und drei Probenlängen (42, 50, 100 mm) in Abhängigkeit der applizierten Druckhöhe h_{tot} .

4.2 Fazit

- Lochproben sind stabil und können problemlos gelagert, wiederverwendet und transportiert werden, das heisst, sie sind geeignet als K_{sat} -Referenzproben.
- Die mit Lochproben minimal möglichen Durchlässigkeiten hängen vom minimal erreichbaren Lochdurchmesser ab (vgl. Abb. 4).
- K_{sat} -Referenzproben auf der Basis von Lochproben ermöglichen somit zum ersten Mal, verschiedene Labors mit unterschiedlichen Messapparaturen und -abläufen miteinander zu vergleichen und dabei auch unterschiedliche Probeneigenschaften (Anzahl und Durchmesser der Löcher, Probenlänge) zu berücksichtigen.

5 Ringversuch *K_{sat}* mit Lochproben als Referenzproben

5.1 Beteiligte Labors, Messprozedere, Eigenschaften der Referenzproben

In einem Ringversuch, an dem sechs Labors teilnahmen, wurden die Lochproben als Referenzproben für die gesättigte Wasserleitfähigkeit getestet. Verwendet wurden Referenzproben mit je einem Loch von 0,25 mm und 0,5 mm Durchmesser sowie Referenzproben mit 1, 3, 5 und 7 Löchern von 1 mm Durchmesser, insgesamt also sechs verschiedene Referenzprobentypen.

Die dreimalige Messung einer Referenzprobe ergab drei Einzelwerte (Abb. 5; A, B und C) für die Wasserleitfähigkeit – berechnet als pK_{sat} -Wert (negativer Logarithmus des K_{sat} -Wertes in [m/s]) – und den Zentralwert 1 (arithmetisches Mittel). Die zweimalige Repetition dieses Messzyklus entsprechend den Vorgaben der Arbeitshilfe zur Erfassung und Beurteilung von Bodenschadverdichtungen (Buchter und Häusler 2009) ergab die Zentralwerte 2 und 3. Danach wurden die Referenzproben aus der Messapparatur aus- und wieder eingebaut. Die zweimalige Wiederholung dieses Prozederes ergab die Zentralwerte 4, 5, 6 und 7, 8, 9. Somit standen pro Referenzprobentyp je $3 \times 3 \times 3 = 27$ Einzelwerte und $3 \times 3 = 9$ Zentralwerte zur Verfügung. Eine vollständige Labormessserie umfasste die Werte für alle sechs Referenzprobentypen, also $6 \times 27 = 162$ Einzelwerte und $6 \times 9 = 54$ Zentralwerte.

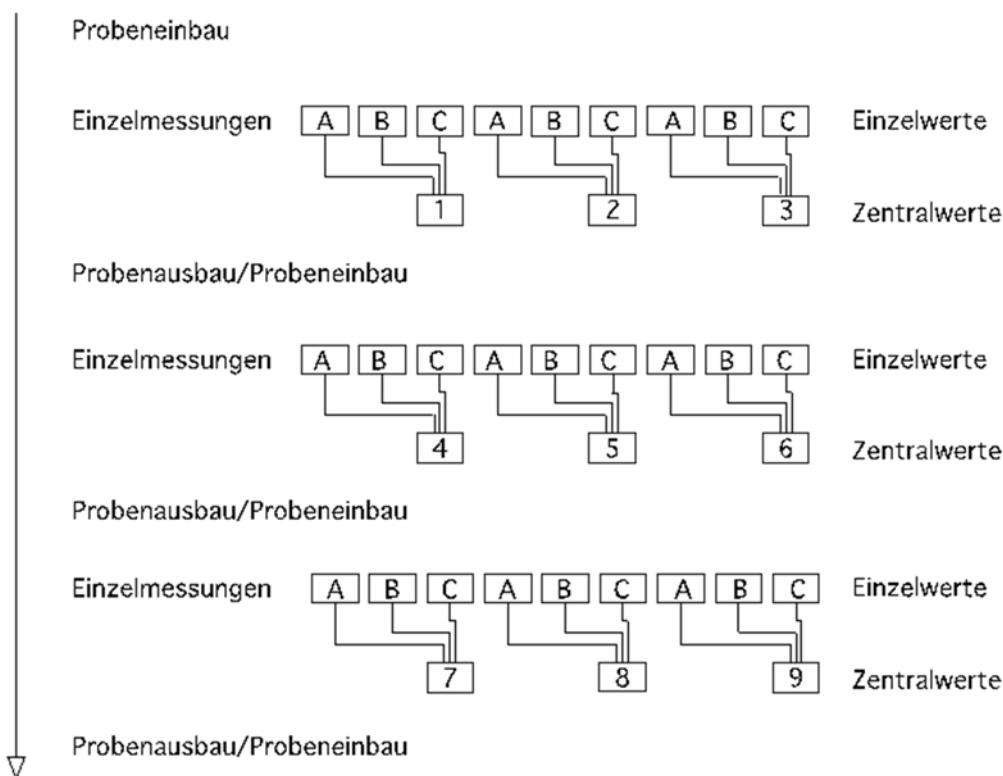


Abb. 6 | Ablaufschema der Messung eines Referenzprobentyps.

Weil die am Ringversuch teilnehmenden Labors ihre eigenen Messapparaturen verwendeten, mussten die Referenzproben in folgenden Probengrößen hergestellt werden (Durchmesser x Länge in mm): 50 x 42, 50 x 50, 53 x 50, 50 x 100 und 60 x 100. Alle Lochproben einer Probengröße bilden eine von drei Probentypenserien. Zum Vergleich bestimmte das Referenzlabor alle Probengrößen und wiederholte teilweise die Bestimmungen mit einzelnen Probengrößen und Probentypenserien. Schliesslich standen 14 vollständige bzw. unvollständige Labormessserien zur Verfügung (Tab. 1). Die entsprechenden Zentralwerte sind im Anhang aufgeführt. Für die Labormessserie 2 wurden zusätzlich die Einzelwerte ausgewertet.

Tab. 1 | Labormessserien LMS 1 bis 14 und Probenotypenserien PTS 1 bis 3. *D*: Probendurchmesser [mm], *H*: Probenhöhe [mm], *pK(A)*: Leitfähigkeit der leeren Apparatur, *s/m*: geschätzt oder gemessen, *o/x*: Referenzproben (x = gemessen, o = nicht gemessen; 1 x 0,25 mm, 1 x 0,5 mm, 1 x 1 mm, 3 x 1 mm, 5 x 1 mm, 7 x 1 mm)

LMS	PTS	Labor	Druckhöhe	<i>D</i>	<i>H</i>	<i>pK(A)</i>	<i>s/m</i>	<i>o/x</i>
1	1	2	konstant	50	42	1.67	m	ooxxxx
2	1	6	fallend	50	42	3.07	m	ooxxxx
3	1	6	fallend	50	42	2.92	s	ooxxxx
4	2	1	konstant	53	50	2.35	m	ooxoox
5	2	5	konstant	53	50	1.00	s	ooxoox
6	2	5	fallend	50	50	3.00	m	ooxoox
7	2	6	fallend	50	50	2.71	m	xxoox
8	3	3	fallend	60	100	2.43	m	ooxoox
9	3	6	fallend	50	100	2.26	m	oooooo
10	3	6	fallend	50	100	2.26	m	oooooo
11	3	6	fallend	50	100	2.63	m	ooxoox
12	3	6	fallend	50	100	2.44	m	ooxoox
13	3	7	fallend	50	100	2.55	m	ooxoox
14	6	6	konstant	50	100	2.23	m	oooooo

Zur Berechnung des *pKsat*-Wertes der Referenzproben verwendeten die Labors teils den Innendurchmesser, teils den Aussendurchmesser der Referenzproben. Der Fließwiderstand ist zwar gleich, wird aber auf eine andere Querschnittsfläche bezogen, womit die mitgeteilten Werte verschieden sind. Bei den im Folgenden erläuterten normierten Werten wurden auch derartige Berechnungsunterschiede harmonisiert.

5.2 Vergleich der Messergebnisse zwischen den Labors

Alle von den einzelnen Labors an den Referenzproben gemessenen Leitfähigkeiten wurden für den Quervergleich zwischen den Labors auf eine Probenquerschnittsfläche von 1 m² und eine Probenlänge von 1 m umgerechnet (= normierte Leitfähigkeit). Sowohl die aus den Messwerten berechneten Leitfähigkeiten als auch die normierten Leitfähigkeiten werden als *pKsat*-Werte, das heisst $-\log(Ksat [m/s])$, angegeben.

Die Normierung der Messwerte hat mehrere Vorteile:

- 1) Keine der zurzeit von den Labors verwendeten Probengrößen wird bevorzugt.
- 2) Die Diskussion der Mess(un)genauigkeiten kann ohne Vorbehalte geführt werden.
- 3) Unterschiedliche Bezugsprobenlängen und -querschnitte sind irrelevant.
- 4) Die gemessenen Leitfähigkeiten lassen sich auch mit Messwerten aus anderen Disziplinen vergleichen, die ebenfalls Leitfähigkeiten bestimmen (Hydrologie, Geotechnik, Erdölgeologie u. a.).

Normierte Leitfähigkeiten sowie an Proben mit einer Länge L' [m] und einem Durchmesser D' [m] gemessene Leitfähigkeiten sind durch folgende Gleichung miteinander verknüpft (Länge in m, Fläche in m²):

$$pKsat(L = 1; A = 1) = pKsat(L = L'; A = A') + \log_{10}(L') - \log_{10}(A')$$

5.3 Ergebnisse der Einzelmessungen

Im Folgenden werden die Einzelmessungen der Labormessserie 2 verglichen. Pro Referenzprobenotyp standen 3 x 3 x 3 = 27 Einzelwerte zur Verfügung (Anzahl Lochproben x wiederholte Messungen (Repetitionen) x Ein-/Ausbauzyklen). Die normierten Leitfähigkeitswerte

(Probenlänge 1 m, Probenquerschnittsfläche 1 m²) wurden mit dem Mittelwert des entsprechenden Referenzprobentyps standardisiert.

Auffällig sind die sich wiederholenden Muster der aufeinanderfolgenden Einzelmessungen (Abb. 6). Die Abbildung ist bewusst klein gehalten, da nicht die einzelnen Werte von Belang sind, sondern die Muster und deren Grössenordnung. Beim Referenzprobentyp 1 x 0,5 mm ist der erste pK_{sat} -Wert klein (entsprechend einer grossen Leitfähigkeit), gefolgt von zwei grossen pK_{sat} -Werten. Anschliessend folgen sechs kleiner werdende, nahezu konstante pK_{sat} -Werte. Nach dem Aus- und Wiedereinbau der Referenzprobe wiederholt sich das gleiche Muster, nach dem zweiten Aus- und Wiedereinbau nochmals. Beim Referenzprobentyp 1 x 1 mm ist ebenfalls ein Muster zu erkennen: Eine erste Dreiergruppe mit grossen pK_{sat} -Werten, eine zweite Dreiergruppe mit meist mittleren Werten und eine dritte Dreiergruppe mit kleinen Werten. Bei den andern Referenzprobentypen fallen kaum Muster auf, ausser dass beim Typ 3 x 1 mm der jeweils letzte Wert von drei Dreiergruppen, also der letzte Wert vor dem Aus- und Wiedereinbau, auch jeweils der kleinste pK_{sat} -Wert ist.

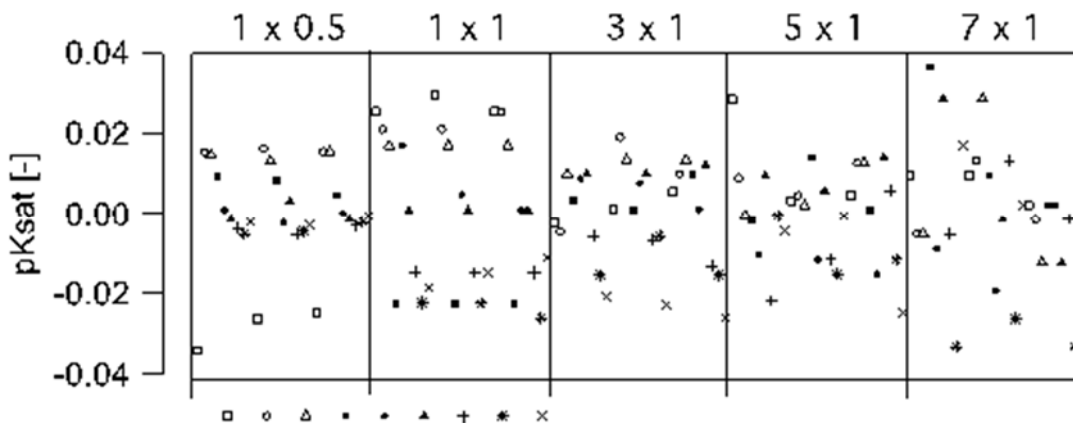


Abb. 7 | Leitfähigkeits-Einzelwerte der Labormessserie 2 für die Referenzprobentypen 1 x 0,5 mm, 1 x 1 mm, 3 x 1 mm, 5 x 1 mm und, 7 x 1 mm, standardisiert mit dem jeweiligen Zentralwert.

Offensichtlich hängen die einzelnen Messwerte der Referenzproben von der zeitlichen Abfolge der Messungen ab. Nach dem Einbau der Proben muss die Apparatur zuerst ins Gleichgewicht kommen. Sofern solche oder ähnliche Muster auftreten und eine Genauigkeit erforderlich ist, die kleiner als die Schwankungsbreite der Messwerte von etwa 0,05 pK_{sat} -Einheiten ist, braucht es rund zehn Messungen ohne Aus- und Wiedereinbau der Referenzproben, um einen Gleichgewichtswert bestimmen zu können. Bei einer erforderlichen Genauigkeit $> 0,05 pK_{sat}$ -Einheiten scheint eine einzige Messung zu genügen. Zur Sicherheit wird dennoch empfohlen, mindestens drei Messungen auszuführen.

5.4 Resultate des Leitfähigkeits-Ringversuches

Im Folgenden werden die aus jeweils drei Einzelmessungen berechneten Mittelwerte besprochen. Die drei Referenzproben-Sets wurden von den sechs Labors teilweise mehrmals gemessen. Alle Zentralwerte (Mittel aus drei Messungen) der 14 Messserien sind im Anhang in tabellarischer Form aufgeführt; in den folgenden Abbildungen werden sie dargestellt und diskutiert.

Obwohl es sich bei der Berechnung der Leitfähigkeit von Referenzproben um eine Näherung handelt, die prinzipiell für Löcher mit glatten Wänden und scharfen Kanten gültig ist, sind die Differenzen zwischen gemessenen und berechneten Leitfähigkeiten gering (Tab. 2, Abb. 7).

Diese überraschend gute Übereinstimmung zeigt einerseits, dass die als Näherung bezeichnete Berechnung ausserordentlich genau ist, und andererseits, dass alle Labors – unabhängig von den unterschiedlichen Messmethoden und Probengrössen – in der Lage sind, die gesättigte Wasserleitfähigkeit auch in absoluten Werten erstaunlich genau zu messen.

Tab. 2 | Gemessene und berechnete pK_{sat} -Werte

Probentypenserie		1–3	1	2	3
Labormessserie		1–14	1–3	4–7	8–14
Probentyp	berechnet	gemessen	gemessen	gemessen	gemessen
1 x 0,25	6,73	6,80	–	6,80	–
1 x 0,5	5,52	5,56	5,60	5,59	5,55
1 x 1	4,32	4,36	4,36	4,38	4,34
3 x 1	3,84	3,85	3,85	–	–
5 x 1	3,62	3,60	3,60	–	–
7 x 1	3,47	3,36	3,40	3,33	3,35

Abbildung 7 zeigt aber auch, dass die Differenzen mit zunehmender Leitfähigkeit (Referenzprobentypen mit mehr als einem Loch) negativer werden. Die gemessenen pK_{sat} -Werte werden gegenüber den berechneten Werten systematisch kleiner, die gemessenen Leitfähigkeiten K_{sat} also grösser. Die teilweise nur knapp genügenden Leitfähigkeiten der leeren Messapparaturen hätte erwarten lassen, dass diese mit zunehmender Leitfähigkeit der Referenzproben limitierend wirken, dass also die gemessenen K_{sat} -Werte zu klein bzw. die entsprechenden pK_{sat} -Werte zu gross ausfallen. Die Differenzen zwischen gemessenen und berechneten Leitfähigkeiten müssten also zunehmen. Dies ist nicht der Fall. Die Leitfähigkeit mehrerer Löcher zusammen ist grösser als die Summe der Leitfähigkeiten der einzelnen Löcher. Offensichtlich werden die zugrunde liegenden Annahmen der angewandten Theorie messbar verletzt, dass nämlich jeweils ein einzelnes grosses Loch in ein kleines übergeht oder umgekehrt. In diesem Falle ist die Begrenzung der Strömungsbahn starr; die Fließgeschwindigkeit $v = 0$. Geht jedoch die grosse Strömungsbahn in mehrere kleine über, stimmt diese Annahme nicht mehr.

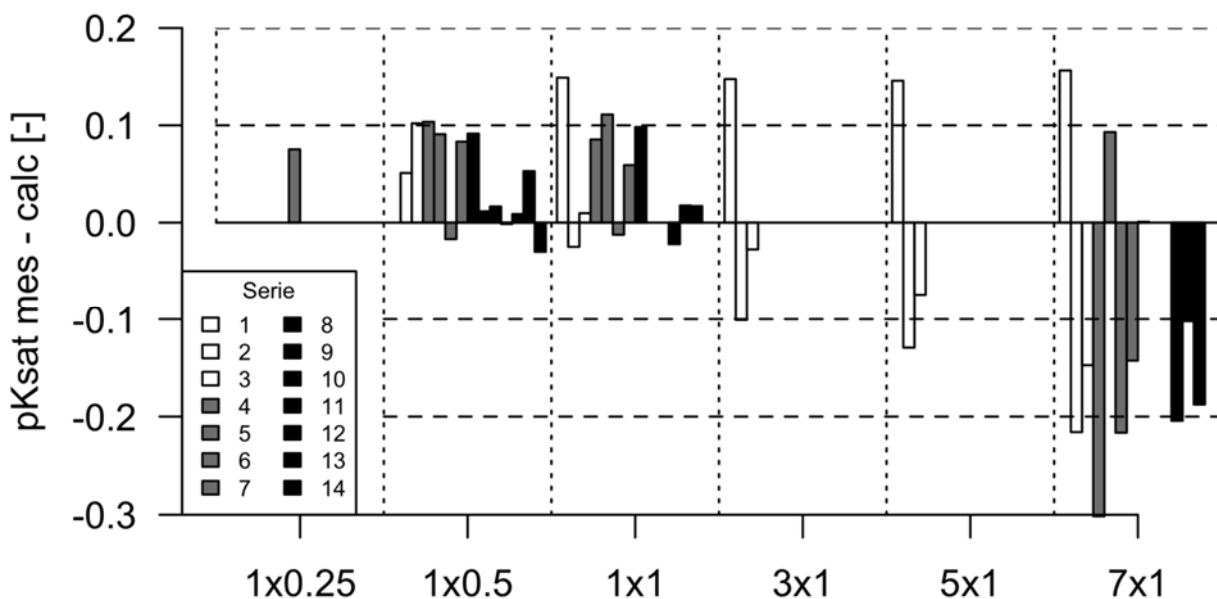


Abb. 8 | Abweichungen der gemessenen von den berechneten Leitfähigkeiten der Referenzprobentypen (Anzahl x Durchmesser der Löcher in mm) aller 14 Labormessserien.

Die Theorie bleibt also trotz der erstaunlichen Genauigkeit eine Näherung und sagt bei mehreren Löchern pro Referenzprobe die Messwerte ungenauer vorher. Zudem beruht sie auf der Annahme scharfkantiger Übergänge, glatter Porenwände und gleichen, vorgegebenen Durchmessern auf der ganzen Lochlänge. Dennoch können die aufgrund theoretischer Annahmen berechneten pK_{sat} -Werte in einem ersten Schritt als Referenz verwendet werden.

Da die Ungenauigkeiten der Messung, der Theorie und der Herstellung nicht voneinander getrennt analysiert, sondern nur als Ganzes beurteilt werden können, ist der Vergleich der Differenzen zwischen den Messwerten und deren Mittelwerten pro Referenzprobentyp und -serie aussagekräftiger (Abb. 8, Tab. 2).

Der Referenzprobentyp 1 x 0,25 mm wurde nur von einem Labor gemessen. Der Mittelwert entspricht somit dem Messwert, die Differenz zwischen Mittelwert und Messwert ist gleich Null. Bei den andern Referenzprobentypen führt die Verwendung der Mittelwerte erwartungsgemäß zu einem ausgeglicheneren Bild. Beim Referenzprobentyp 1 x 0,5 mm liegen alle Labormessserien innerhalb $\pm 0,1$ pKsat-Einheiten, die meisten sogar innerhalb $\pm 0,05$ pKsat-Einheiten. Beim Referenzprobentyp 1 x 1 mm weicht die Labormessserie 1 um etwas mehr als +0,1 Einheiten vom Gesamtmittelwert ab. Bei den Referenzprobentypen 3 x 1 mm, 5 x 1 mm und 7 x 1 mm nehmen die Abweichungen der Labormessserie 1 in positiver Richtung stetig zu und erreichen mehr als +0,2 Einheiten. Bei der Labormessserie 2 nehmen sie hingegen in negativer Richtung stetig zu. Beim durchlässigsten Referenzprobentyp 7 x 1 mm weichen die Labormessserien 1, 2, 4, 5 und 9 mehr als 0,1 Einheiten vom Gesamtmittelwert ab. Die Labormessserien 3, 6, 11, 12 und 13 hingegen weichen bei allen Referenzprobentypen weniger als 0,1 Einheiten vom Gesamtmittelwert ab.

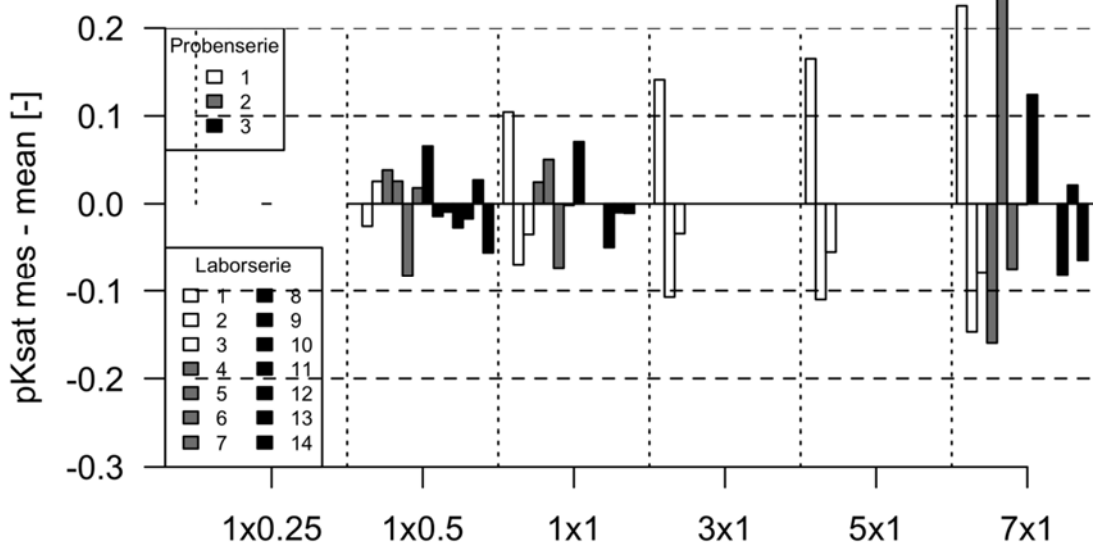


Abb. 9 | Abweichungen der gemessenen Leitfähigkeiten von deren Gesamtmittelwerten pro Referenzprobentyp und Referenzprobenserie 1 bis 3 (siehe Tab. 1).

Die Labormessserien 1 und 2 sowie 4 und 5 wurden jeweils an den gleichen Referenzproben bestimmt (Probentypenserien 1 und 2). Die unterschiedlichen Messwerte sind also allein durch die Messung verursacht. Die Daten für die Labormessserie 5 wurden mit Eingabewerten zur Berechnung der Leitfähigkeit der leeren Apparatur mitgeteilt, die physikalisch nicht möglich sind (Wasserfluss bei Gradient = 0), die Leitfähigkeit der leeren Apparatur wurde in der Labormessserie 5 daher als nahezu inexistent angenommen. Die positiven Differenzen der Messwerte zum Gesamtmittelwert beim Referenzprobentyp 7 x 1 mm zeigen jedoch, dass die gemachten Annahmen nicht zutreffen. Dies unterstreicht die Wichtigkeit der korrekten Bestimmung der Leitfähigkeit der leeren Apparatur.

Die Referenzprobentypenserien 1 bis 3 waren nötig, um allen interessierten Labors die Teilnahme mit ihren eigenen Apparaturen zu ermöglichen. Die Differenzierung der Messdaten nach den Referenzprobentypenserien ist daher mit der Differenzierung nach den Referenzprobendurchmessern (Abb. 9) fast identisch (Serie 1: Durchmesser 50 mm; Serie 2: 53 mm; Serie 3: 50 und 60 mm) und mit den Referenzprobenlängen (Abb. 10) völlig identisch (1: 42; 2: 50; 3:100).

Da keine systematische Abhängigkeit der Messwerte von den Mittelwerten der Referenzprobentypenserien festzustellen ist (Abb. 8), gibt es auch keine Abhängigkeit vom Durchmesser (Abb. 9) und von der Länge der Referenzproben (Abb. 10).

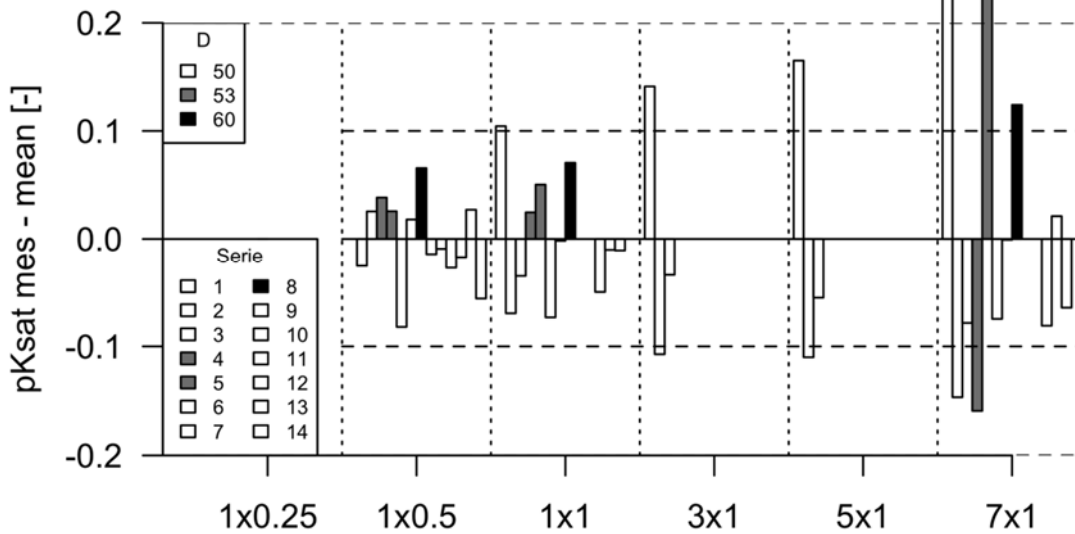


Abb. 10 | Abweichungen der gemessenen Leitfähigkeiten von den Mittelwerten pro Referenzprobentyp und Referenzprobenserie 1 bis 3 (vgl. Tab. 1), differenziert nach den Referenzprobendurchmessern.

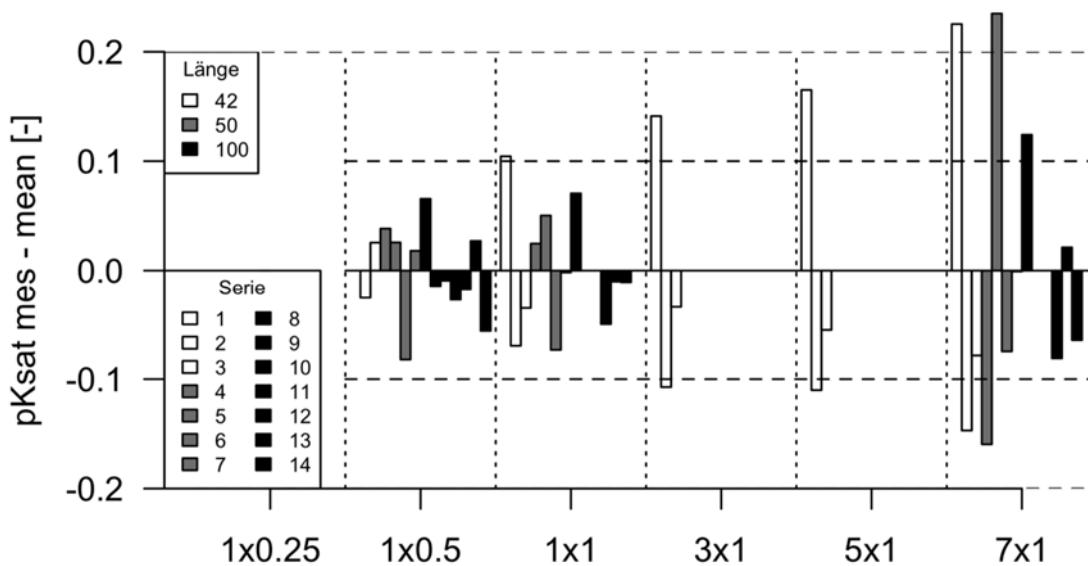


Abb. 11 | Abweichungen der gemessenen Leitfähigkeiten von den Mittelwerten pro Referenzprobentyp 2 bis 6 und Referenzprobenserie 1 bis 3 (vgl. Tab. 1), differenziert nach den Referenzprobenlängen.

Einzig die Methode, die zur Bestimmung von K_{sat} verwendet wurde, war von den Referenzprobentypenserien unabhängig: Hier nehmen die mit der Methode der konstanten Druckhöhe bestimmten pK_{sat} -Werte der Labormessserien 1 und 5 zu, diejenigen der Labormessserie 4 dagegen ab. Die gemessenen pK_{sat} -Werte werden somit grösser bzw. kleiner als die Mittelwerte.

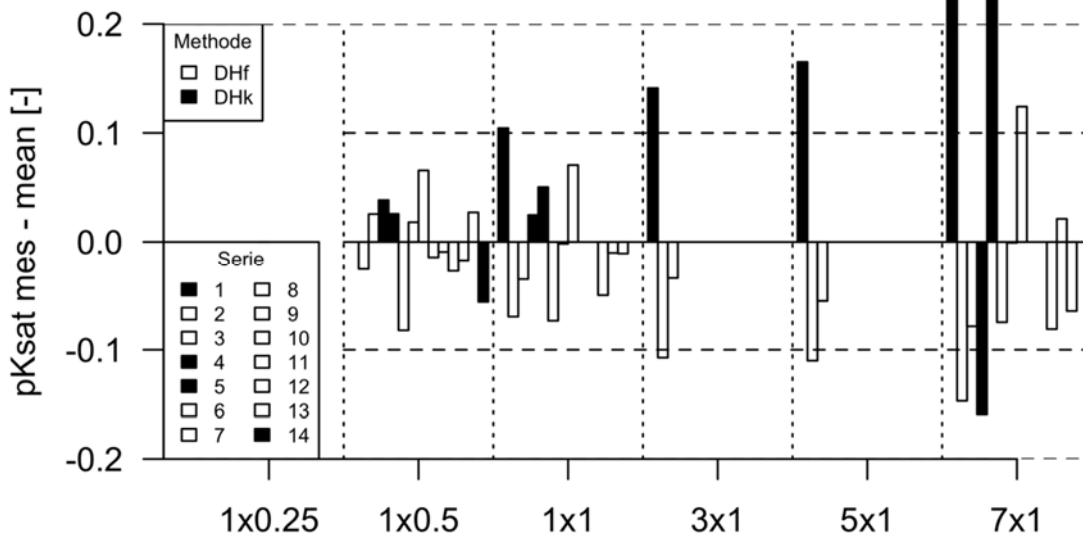


Abb. 12 | Abweichungen der gemessenen Leitfähigkeiten von den Mittelwerten pro Referenzprobentyp 2 bis 6 und Referenzprobenserie 1 bis 3 (vgl. Tab. 1), differenziert nach der Methode der fallenden (DHf) bzw. der konstanten (DHk) Druckhöhe.

Die Werte der mit der Methode der fallenden Druckhöhe gemessenen Labormessserie 2 nehmen vom Referenzprobentyp 2 zum Referenzprobentyp 6 ab, diejenigen der Labormessserie 8 dagegen zu. Die übrigen mit der Methode der fallenden Druckhöhe gemessenen Labormessserien sind praktisch konstant. Üblicherweise wird die Methode der fallenden Druckhöhe für grosse Leitfähigkeiten als ungeeignet erachtet, was hier offensichtlich nicht zutrifft.

Die gemessenen pK_{sat} -Werte hängen demzufolge weder vom Durchmesser (Abb. 9) noch von der Länge der Referenzproben ab (Abb. 10) und auch nicht von der Messmethode (Abb. 11). Dies bedeutet, dass auch unterschiedliche Druckhöhen keinen Einfluss auf die bestimmten Leitfähigkeitswerte der Referenzproben zeigten, vorausgesetzt, dass der quadratisch von der Strömungsgeschwindigkeit abhängige Druckverlust (Energiehöhenverlust) bei der Berechnung der Leitfähigkeit der Referenzproben berücksichtigt wurde.

Die Herstellung der Referenzproben muss jedoch präzise erfolgen, vor allem müssen die Löcher mit sehr gut schneidenden Bohrern hergestellt werden, die keine Spuren an den Bohrwänden hinterlassen. Sofern Kunststoffe – insbesondere Plexiglas – verwendet werden, ist darauf zu achten, dass die Bohrwände nicht anschmelzen.

5.5 Fazit

- Wenn der quadratisch von der Strömungsgeschwindigkeit abhängige Druckverlust (Energiehöhenverlust) bei der Berechnung der gemessenen Leitfähigkeit berücksichtigt wird, ist der pK_{sat} -Wert einer Lochprobe konstant und **weder vom Durchmesser, noch von der Länge, noch von der Messmethode abhängig** – sowohl bei fallender als auch bei konstanter Druckhöhe.
- Die gemessenen pK_{sat} -Leitfähigkeitswerte der Referenzproben sind auf $\pm 0,05$ pK_{sat} -Einheiten genau. Sie können daher mit einer Stelle nach dem Komma angegeben werden.

6 Schlussfolgerungen aus dem Ringversuch Ksat

- ✓ Lochproben eignen sich als Referenzproben, um Wasserleitfähigkeits-Messapparaturen zu kalibrieren.
- ✓ Alle zurzeit von den am Ringversuch beteiligten Labors verwendeten gekauften wie selbst gebauten Messapparaturen ermöglichen eine Messgenauigkeit von $\pm 0,1$ *pKsat*-Einheiten bei den Referenzprobentypen 1 x 0,25 mm, 1 x 0,5 mm und 1 x 1 mm. Beim Referenzprobentyp 1 x 7 mm hingegen erreichen nur noch die Messapparaturen der Labors 5, 6 und 7 diese Genauigkeit.
- ✓ Die Bestimmung der gesättigten Wasserleitfähigkeit mit den zurzeit verwendeten Messapparaturen bei den Referenzprobentypen 1 x 0,5 (Lochprobe mit einem Loch des Durchmessers 0,5 mm) und 1 x 1 ist besser als $\pm 0,10$ *pKsat*-Einheiten, teilweise sogar besser als $\pm 0,05$. Bei den Referenzprobentypen mit mehreren 1-mm-Löchern streuen die Werte deutlich stärker. Zurzeit ist noch offen, ob die der Berechnung zugrunde liegende Theorie für diesen Fall angepasst werden muss.
- ✓ Die in einem vorangegangenen Ringversuch festgestellte eindeutig schlechtere Genauigkeit bei realen Bodenproben (Weisskopf *et al.* 2008) ist somit nicht ein Problem der Messapparaturen, sondern der realen Bodenproben bzw. des methodischen Umganges mit ihnen.

Daraus folgt, dass die Hauptschwierigkeit der Leitfähigkeitsbestimmung vermutlich auf jene Eigenschaft zurückzuführen ist, wegen der die Methode zur Erfassung von Bodenschadverdichtungen ausgewählt worden ist: ihre Empfindlichkeit auf Veränderungen des Bodenporenraumes hinsichtlich Grössenverteilung, Kontinuität und Tortuosität. Jegliche mechanische Belastung führt zwangsläufig zu einer Verformung des Porenraumes. Zu einer Störung der Leitfähigkeitseigenschaften des Porenraumes von Bodenproben können auch methodische Einflüsse bei Leitfähigkeitsbestimmungen führen, zum Beispiel beim Beprobieren (Stauchungen des Porenraumes), beim Präparieren (Verschmieren der Proben-Querschnittsflächen) oder beim Konditionieren, Aufsättigen und Einbauen der Proben (eingeschlossene Luftblasen im Porenraum). Entsprechende Verbesserungen werden bei der Revision der Referenzmethode für die Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit berücksichtigt.

Literatur

Buchter B. & Häusler S., 2009. Gesättigte Wasserleitfähigkeit. Beilage zur Arbeitshilfe zur Erfassung und Beurteilung von Bodenschadverdichtungen (Hrsg. Kantonale Bodenschutzfachstellen). Zugang: http://www.soil.ch/doku/physikalisch_arbeitshilfe_beilage_wasserleitfaehigkeit.pdf [4.3.2015].

Weisskopf P., Buchter B. & Häusler S., 2008. Physikalische Kenngrössen von Schweizerböden – Ringversuch 2007 – Laborvergleich mit Standardmethoden. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Zürich.

BGS, 2004. Definition und Erfassung von Bodenschadverdichtungen, Positionspapier der BGS-Plattform Bodenschutz. Dokument 13 der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz (BGS), Zollikofen. 56 S.

Buchter B., Weisskopf P., Häusler S., 2011. Standard specimens to determine the hydraulic conductivity of saturated soils. Agroscope Science No. 12, Agroscope, Zürich-Reckenholz.

Glück B., 1988. Hydrodynamische und gasdynamische Rohrströmung. Druckverluste. Bausteine der Heizungstechnik. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.

Klute A. & Dirksen C., 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. In: A. Klute (Hrsg.). Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2. Ausgabe. ASA, Madison, USA. S. 687–734.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Schema der Messapparatur zur Bestimmung der Wasserleitfähigkeit im gesättigten Zustand mittels fallender Druckhöhe.	6
Abb. 2 Gemessene pK_{sat} -Werte von Glassinter-Filterscheiben mit drei Porositäten (von links nach rechts: P1, P4, P5) und unterschiedlicher Vorbereitung.	8
Abb. 3 Gemessene pK_{sat} -Werte von Glassinter-Filterscheiben mit drei Porositäten (von links nach rechts: P1, P4, P5) und unterschiedlicher Vorbereitung.	8
Abb. 4 Lochprobe als K_{sat} -Referenzprobe.	10
Abb. 5 pK_{sat} berechnet für drei Lochdurchmesser (0,25, 0,5, 1 mm) und drei Probenlängen (42, 50, 100 mm) in Abhängigkeit der applizierten Druckhöhe h_{tot}	11
Abb. 6 Ablaufschema der Messung eines Referenzprobentyps.	12
Abb. 7 Leitfähigkeits-Einzelwerte der Labormessserie 2 für die Referenzprobentypen 1 x 0,5 mm, 1 x 1 mm, 3 x 1 mm, 5 x 1 mm und, 7 x 1 mm, standardisiert mit dem jeweiligen Zentralwert.	14
Abb. 8 Abweichungen der gemessenen von den berechneten Leitfähigkeiten der Referenzprobentypen (Anzahl x Durchmesser der Löcher in mm) aller 14 Labormessserien.	15
Abb. 9 Abweichungen der gemessenen Leitfähigkeiten von deren Gesamtmittelwerten pro Referenzprobentyp und Referenzprobenserie 1 bis 3 (siehe Tab. 1).	16
Abb. 10 Abweichungen der gemessenen Leitfähigkeiten von den Mittelwerten pro Referenzprobentyp und Referenzprobenserie 1 bis 3 (vgl. Tab. 1), differenziert nach den Referenzprobendurchmessern.	17
Abb. 11 Abweichungen der gemessenen Leitfähigkeiten von den Mittelwerten pro Referenzprobentyp 2 bis 6 und Referenzprobenserie 1 bis 3 (vgl. Tab. 1), differenziert nach den Referenzprobenlängen.	17
Abb. 12 Abweichungen der gemessenen Leitfähigkeiten von den Mittelwerten pro Referenzprobentyp 2 bis 6 und Referenzprobenserie 1 bis 3 (vgl. Tab. 1), differenziert nach der Methode der fallenden (DHf) bzw. der konstanten (DHk) Druckhöhe.	18

Anhang 1

Zeile 1: Spaltennummer

Spalte 1: pKsat gemessen

Spalte 2: korrigiert mit Leitfähigkeit der Apparatur

Spalte 3: korrigiert mit Widerstandsbeiwert ζ

Spalte 4: umgerechnet auf Probelänge 1 m und Probestrichungsfläche 1 m²

Zeile 2: Labor-Nummer (links; 1, 2, 3, 5, 6, 7) und Laborseriennummer (rechts; 1–14)

Zeile 3: Monat und Jahr der Messung

Zeile 4: Methode; *DHk*: konstante Druckhöhe, *DHf*: fallende Druckhöhe

Zeile 5: Probendurchmesser in mm (42, 53, 60)

Zeile 6: Probenhöhe in mm (42, 50, 100)

Zeile 7: Leitfähigkeit pK(A) der Apparatur

Spalten 1–4, Zeilen: 8–16, 17–25, 26–34, 35–43, 44–52, 53–61 entsprechen den Referenzproben-
 bentypen (1 x 0,25 mm; 1 x 0,5 mm; 1 x 1 mm; 3 x 1 mm, 5 x 1 mm, 7 x 1 mm); 62–67: Mittel

1	A	B	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
2		Labor 2					Labor 6				Labor 6				
3		November 2010					Feb 2010				September 2011				
4		DHk					DHf				DHf				
5		D = 50					D = 50				D = 50				
6		H = 42					H = 42				H = 42				
7		pK(A)	1.67 gemessen				pK(A)	3.07 gemessen			pK(A)	2.92 angenommen			
8	1 x	1													
9	0.25	1													
10		2													
11		3													
12		4													
13		5													
14		6													
15		7													
16		8													
17	1 x	1					4.72	4.71	4.21	5.54	4.80	4.79	4.30	5.54	
18	0.5	2					4.76	4.75	4.26	5.59	4.77	4.76	4.27	5.59	
19		3					4.76	4.75	4.26	5.59	4.77	4.76	4.27	5.59	
20		4					4.75	4.74	4.25	5.58	4.83	4.83	4.34	5.58	
21		5					4.75	4.74	4.24	5.57	4.84	4.84	4.35	5.57	
22		6					4.75	4.74	4.24	5.57	4.76	4.76	4.26	5.57	
23		7					4.74	4.73	4.24	5.57	4.83	4.83	4.33	5.57	
24		8					4.74	4.73	4.24	5.57	4.78	4.77	4.28	5.57	
25		9					4.74	4.74	4.24	5.57	4.74	4.74	4.24	5.57	
26	1 x	1	3.79	3.78	3.18	4.51	4.07	4.02	2.99	4.51	4.08	4.05	3.02	4.51	
27	1	2	3.69	3.69	3.08	4.41	4.07	4.02	2.99	4.41	4.07	4.04	3.01	4.41	
28		3	3.81	3.81	3.21	4.54	4.06	4.01	2.98	4.54	4.07	4.04	3.00	4.54	
29		4	3.82	3.82	3.22	4.55	4.02	3.97	2.94	4.55	4.06	4.03	3.00	4.55	
30		5	3.70	3.70	3.10	4.43	4.05	4.00	2.97	4.43	4.06	4.03	2.99	4.43	
31		6	3.74	3.74	3.14	4.47	4.04	4.00	2.96	4.47	4.06	4.03	3.00	4.47	
32		7	3.73	3.72	3.12	4.45	4.03	3.98	2.95	4.45	4.05	4.02	2.99	4.45	
33		8	3.67	3.67	3.07	4.40	4.02	3.97	2.94	4.40	4.04	4.01	2.97	4.40	
34		9	3.72	3.72	3.12	4.45	4.03	3.98	2.95	4.45	4.05	4.02	2.99	4.45	
35	3 x	1	3.28	3.27	2.67	4.00	3.60	3.44	2.41	4.00	3.82	3.76	2.73	4.00	
36	1	2	3.20	3.19	2.59	3.92	3.60	3.45	2.42	3.92	3.63	3.54	2.51	3.92	
37		3	3.14	3.13	2.53	3.86	3.60	3.46	2.42	3.86	3.60	3.50	2.47	3.86	
38		4	3.49	3.48	2.88	4.21	3.60	3.45	2.41	4.21	3.58	3.48	2.44	4.21	
39		5	3.32	3.31	2.71	4.04	3.60	3.45	2.41	4.04	3.58	3.47	2.44	4.04	
40		6	3.39	3.38	2.78	4.11	3.60	3.45	2.42	4.11	3.58	3.47	2.44	4.11	
41		7	3.27	3.25	2.65	3.98	3.59	3.44	2.40	3.98	3.58	3.48	2.44	3.98	
42		8	3.21	3.19	2.59	3.92	3.59	3.43	2.40	3.92	3.58	3.47	2.44	3.92	
43		9	3.15	3.13	2.53	3.86	3.58	3.42	2.39	3.86	3.57	3.46	2.42	3.86	
44	5 x	1	3.08	3.06	2.46	3.79	3.44	3.20	2.17	3.79	3.42	3.26	2.22	3.79	
45	1	2	3.03	3.01	2.41	3.74	3.44	3.20	2.17	3.74	3.41	3.24	2.20	3.74	
46		3	3.01	2.99	2.39	3.72	3.44	3.20	2.16	3.72	3.41	3.24	2.20	3.72	
47		4	3.09	3.07	2.47	3.80	3.44	3.20	2.16	3.80	3.42	3.25	2.22	3.80	
48		5	3.07	3.05	2.45	3.78	3.43	3.18	2.15	3.78	3.41	3.24	2.21	3.78	
49		6	3.02	3.00	2.39	3.72	3.44	3.20	2.17	3.72	3.41	3.24	2.20	3.72	
50		7	3.06	3.04	2.44	3.77	3.43	3.18	2.15	3.77	3.45	3.30	2.27	3.77	
51		8	3.05	3.03	2.43	3.76	3.43	3.18	2.15	3.76	3.40	3.23	2.19	3.76	
52		9	3.09	3.07	2.47	3.80	3.43	3.18	2.15	3.80	3.40	3.23	2.20	3.80	
53	7 x	1	2.96	2.94	2.34	3.67	3.32	2.97	1.93	3.67	3.28	3.04	2.01	3.67	
54	1	2	2.93	2.90	2.30	3.63	3.32	2.96	1.93	3.63	3.28	3.03	2.00	3.63	
55		3	2.90	2.87	2.27	3.60	3.32	2.96	1.93	3.60	3.27	3.01	1.98	3.60	
56		4	2.99	2.97	2.37	3.70	3.32	2.98	1.94	3.70	3.28	3.03	2.00	3.70	
57		5	2.93	2.91	2.31	3.64	3.31	2.95	1.92	3.64	3.28	3.03	2.00	3.64	
58		6	2.88	2.85	2.25	3.58	3.32	2.97	1.93	3.58	3.27	3.02	1.98	3.58	
59		7	2.89	2.87	2.26	3.59	3.32	2.96	1.93	3.59	3.28	3.03	1.99	3.59	
60		8	2.94	2.92	2.32	3.65	3.30	2.93	1.90	3.65	3.28	3.03	2.00	3.65	
61		9	2.90	2.88	2.27	3.60	3.32	2.96	1.93	3.60	3.28	3.02	1.99	3.60	
62	1x0.25	1-9	gemessen												
63	1x0.5	1-9					4.75	4.74	4.24		4.79	4.79	4.29		
64	1x1	1-9	3.74	3.74	3.14	4.47	4.04	4.00	2.96	4.47	4.06	4.03	3.00	4.47	
65	3x1	1-9	3.27	3.26	2.66	3.99	3.59	3.44	2.41	3.99	3.61	3.51	2.48	3.99	
66	5x1	1-9	3.05	3.04	2.43	3.76	3.43	3.19	2.16	3.76	3.41	3.25	2.21	3.76	
67	7x1	1-9	2.93	2.90	2.30	3.63	3.32	2.96	1.93	3.63	3.28	3.03	1.99	3.63	

Anhang 2

Zeile 1: Spaltennummer
 Spalte 1: pKsat gemessen
 Spalte 2: korrigiert mit Leitfähigkeit der Apparatur
 Spalte 3: korrigiert mit Widerstandsbeiwert ζ
 Spalte 4: umgerechnet auf Probelänge 1 m und Probequerschnittsfläche 1 m²
 Zeile 2: Labor-Nummer (links; 1, 2, 3, 5, 6, 7) und Laborseriennummer (rechts; 1–14)
 Zeile 3: Monat und Jahr der Messung
 Zeile 4: Methode; *DHk*: konstante Druckhöhe, *DHf*: fallende Druckhöhe
 Zeile 5: Probendurchmesser in mm (42, 53, 60)
 Zeile 6: Probenhöhe in mm (42, 50, 100)
 Zeile 7: Leitfähigkeit pK(A) der Apparatur
 Spalten 1–4, Zeilen: 8–16, 17–25, 26–34, 35–43, 44–52, 53–61 entsprechen den Referenzpro-
 bentypen (1 x 0,25 mm; 1 x 0,5 mm; 1 x 1 mm; 3 x 1 mm, 5 x 1 mm, 7 x 1 mm); 62–67: Mittel

1	A	B	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
2			Labor 1			4	Labor 5			5	Labor 6			6	Labor 6				7
3			Juli 2010			2	März 2011			2	März 2010			2	Oktober 2011				2
4			DHk				DHk				DHf				DHf				
5			D = 53				D = 53				D = 50				D = 50				
6			H = 50				H = 50				H = 50				H = 50				
7			pK(A) 2.35 gemessen				pK(A) 1 angenommen				pK(A) 3 gemessen				pK(A) 2.71 gemessen				
8	1 x	1													5.36	5.35	5.24	6.64	
9	0.25	2													5.35	5.35	5.23	6.63	
10		3													5.53	5.53	5.41	6.82	
11		4													5.47	5.47	5.35	6.76	
12		5													6.22	6.22	6.10	7.51	
13		6													5.36	5.35	5.24	6.64	
14		7													5.32	5.32	5.20	6.61	
15		8																	
16		9																	
17	1 x	1	4.48	4.48	4.36	5.72	4.38	4.38	4.35	5.71	4.68	4.67	4.18	5.59	4.79	4.79	4.30	5.70	
18	0.5	2	4.22	4.21	4.11	5.46	4.28	4.28	4.25	5.60	4.64	4.63	4.14	5.54	4.65	4.65	4.16	5.56	
19		3	4.44	4.44	4.33	5.69	4.27	4.27	4.23	5.59	4.75	4.74	4.25	5.65	4.80	4.80	4.31	5.71	
20		4	4.41	4.40	4.29	5.64	4.32	4.32	4.29	5.65	4.66	4.65	4.16	5.57	4.68	4.68	4.19	5.59	
21		5	4.33	4.32	4.21	5.56	4.22	4.22	4.18	5.54	4.67	4.66	4.17	5.57	4.64	4.63	4.14	5.55	
22		6	4.53	4.52	4.41	5.77	4.21	4.21	4.18	5.53	4.68	4.67	4.18	5.59	4.72	4.72	4.23	5.64	
23		7	4.37	4.37	4.25	5.61	4.32	4.32	4.28	5.64	4.43	4.42	3.92	5.33	4.65	4.64	4.15	5.56	
24		8	4.32	4.32	4.21	5.57	4.36	4.36	4.34	5.69	4.48	4.46	3.97	5.38	4.62	4.61	4.12	5.53	
25		9	4.35	4.35	4.25	5.60	4.24	4.24	4.20	5.56	4.42	4.40	3.91	5.32	4.69	4.68	4.19	5.60	
26	1 x	1	3.54	3.51	3.05	4.41	3.33	3.32	3.07	4.42	3.97	3.93	2.90	4.30	3.87	3.84	2.81	4.22	
27	1	2	3.51	3.48	3.05	4.41	3.30	3.30	3.06	4.41	3.98	3.94	2.91	4.31	4.03	4.01	2.98	4.39	
28		3	3.54	3.51	3.06	4.42	3.34	3.34	3.08	4.44	4.00	3.95	2.92	4.32	4.02	4.00	2.97	4.38	
29		4	3.50	3.47	3.09	4.44	3.30	3.30	3.05	4.40	3.94	3.88	2.85	4.26	4.00	3.98	2.95	4.36	
30		5	3.48	3.45	3.02	4.37	3.31	3.31	3.06	4.41	3.94	3.89	2.86	4.27	4.01	3.99	2.96	4.36	
31		6	3.54	3.51	3.04	4.39	3.30	3.30	3.04	4.40	3.94	3.88	2.85	4.26	4.01	3.98	2.95	4.36	
32		7	3.50	3.47	3.07	4.42	3.35	3.35	3.09	4.45	4.01	3.96	2.93	4.34	4.09	4.07	3.04	4.44	
33		8	3.56	3.53	3.09	4.45	3.36	3.36	3.09	4.45	4.01	3.96	2.93	4.34	4.09	4.07	3.04	4.44	
34		9	3.38	3.34	2.96	4.31	3.29	3.29	3.12	4.47	4.01	3.97	2.94	4.34	4.08	4.06	3.03	4.44	
35	3 x	1																	
36	1	2																	
37		3																	
38		4																	
39		5																	
40		6																	
41		7																	
42		8																	
43		9																	
44	5 x	1																	
45	1	2																	
46		3																	
47		4																	
48		5																	
49		6																	
50		7																	
51		8																	
52		9																	
53	7 x	1	2.59	2.22	1.87	3.22	2.37	2.35	2.16	3.52	3.25	2.88	1.85	3.26	3.20	3.03	2.00	3.41	
54	1	2	2.61	2.27	1.89	3.24	2.37	2.35	2.18	3.54	3.25	2.89	1.86	3.27	3.20	3.03	2.00	3.41	
55		3	2.61	2.26	1.88	3.23	2.37	2.35	2.20	3.55	3.23	2.83	1.80	3.21	3.19	3.02	1.99	3.40	
56		4	2.45	1.77	1.45	2.81	2.47	2.46	2.25	3.60	3.22	2.81	1.78	3.19	3.12	2.91	1.88	3.28	
57		5	2.61	2.25	1.88	3.24	2.37	2.36	2.18	3.54	3.24	2.88	1.85	3.25	3.15	2.95	1.92	3.32	
58		6	2.56	2.14	1.79	3.14	2.39	2.37	2.20	3.56	3.25	2.89	1.86	3.26	3.14	2.95	1.92	3.32	
59		7	2.60	2.23	1.89	3.25	2.54	2.52	2.31	3.67	3.25	2.90	1.87	3.27	3.00	2.68	1.65	3.06	
60		8	2.61	2.25	1.88	3.24	2.37	2.35	2.18	3.54	3.26	2.92	1.89	3.29	3.19	3.02	1.99	3.40	
61		9	2.55	2.11	1.81	3.16	2.36	2.34	2.22	3.58	3.26	2.92	1.89	3.30	3.16	2.98	1.95	3.35	
62	1x0.25	1-9													5.51	5.51	5.40	6.80	
63	1x0.5	1-9	4.38	4.38	4.27	5.62	4.29	4.29	4.26	5.61	4.60	4.59	4.10	5.50	4.69	4.69	4.20	5.60	
64	1x1	1-9	3.51	3.47	3.05	4.40	3.32	3.32	3.07	4.43	3.98	3.93	2.90	4.30	4.02	4.00	2.97	4.38	
65	3x1	1-9																	
66	5x1	1-9																	
67	7x1	1-9	2.58	2.17	1.82	3.17	2.40	2.38	2.21	3.57	3.25	2.88	1.85	3.26	3.15	2.95	1.92	3.33	

Anhang 3

- Zeile 1: Spaltennummer
 Spalte 1: pKsat gemessen
 Spalte 2: korrigiert mit Leitfähigkeit der Apparatur
 Spalte 3: korrigiert mit Widerstandsbeiwert ζ
 Spalte 4: umgerechnet auf Probelänge 1 m und Probequerschnittsfläche 1 m²
- Zeile 2: Labor-Nummer (links; 1, 2, 3, 5, 6, 7) und Laborseriennummer (rechts; 1–14)
- Zeile 3: Monat und Jahr der Messung
- Zeile 4: Methode; *DHk*: konstante Druckhöhe, *DHf*: fallende Druckhöhe
- Zeile 5: Probendurchmesser in mm (42, 53, 60)
- Zeile 6: Probenhöhe in mm (42, 50, 100)
- Zeile 7: Leitfähigkeit pK(A) der Apparatur
- Spalten 1–4, Zeilen: 8–16, 17–25, 26–34, 35–43, 44–52, 53–61 entsprechen den Referenzpro-
 bentypen (1 x 0,25 mm; 1 x 0,5 mm; 1 x 1 mm; 3 x 1 mm, 5 x 1 mm, 7 x 1 mm); 62–67: Mittel

1	A	B	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
2			Labor 3				Labor 6				Labor 6			
3			Mai 2010				3 März 2010				3 März 2010			
4			DHf				DHf				DHf			
5			D = 60				D = 50				D = 50			
6			H = 100				H = 100				H = 100			
7			pK(A) 2.43 gemessen				pK(A) 2.26 gemessen				pK(A) 2.26 gemessen			
8	1 x	1												
9	0.25	2												
10		3												
11		4												
12		5												
13		6												
14		7												
15		8												
16		9												
17	1 x	1	4.36	4.35	4.03	5.58	4.38	4.38	3.83	5.54	4.36	4.36	3.83	5.53
18	0.5	2	4.64	4.64	4.28	5.83	4.37	4.37	3.82	5.53	4.36	4.36	3.83	5.53
19		3	4.30	4.30	4.01	5.56	4.38	4.38	3.83	5.53	4.36	4.36	3.83	5.53
20		4	4.48	4.48	4.18	5.73	4.27	4.26	3.83	5.54	4.26	4.25	3.83	5.54
21		5	4.22	4.21	3.98	5.52	4.26	4.26	3.83	5.53	4.26	4.25	3.83	5.54
22		6	4.25	4.24	3.97	5.52	4.27	4.27	3.83	5.54	4.27	4.26	3.84	5.55
23		7	4.30	4.29	4.01	5.56	4.12	4.11	3.83	5.53	4.16	4.16	3.83	5.54
24		8	4.35	4.34	4.05	5.60	4.11	4.10	3.82	5.52	4.16	4.15	3.83	5.53
25		9	4.34	4.34	4.06	5.60	4.12	4.11	3.82	5.53	4.17	4.16	3.84	5.54
26	1 x	1	3.49	3.45	2.82	4.36								
27	1	2	3.48	3.43	2.77	4.32								
28		3	3.54	3.51	2.81	4.36								
29		4	3.60	3.57	2.85	4.40								
30		5	3.70	3.68	2.92	4.47								
31		6	3.74	3.71	2.92	4.46								
32		7	3.76	3.74	2.91	4.46								
33		8	3.74	3.71	2.89	4.44								
34		9	3.71	3.69	2.91	4.46								
35	3 x	1												
36	1	2												
37		3												
38		4												
39		5												
40		6												
41		7												
42		8												
43		9												
44	5 x	1												
45	1	2												
46		3												
47		4												
48		5												
49		6												
50		7												
51		8												
52		9												
53	7 x	1	2.87	2.68	1.86	3.41								
54	1	2	2.94	2.78	1.98	3.53								
55		3	2.87	2.67	1.94	3.49								
56		4	2.88	2.69	1.93	3.48								
57		5	2.85	2.64	1.92	3.46								
58		6	2.91	2.73	1.95	3.50								
59		7	2.87	2.67	1.91	3.46								
60		8	2.84	2.62	1.89	3.44								
61		9	2.91	2.73	1.93	3.48								
62	1x0.25	1-9												
63	1x0.5	1-9	4.36	4.35	4.06	5.61	4.25	4.25	3.83	5.53	4.26	4.26	3.83	5.54
64	1x1	1-9	3.64	3.61	2.87	4.42								
65	3x1	1-9												
66	5x1	1-9												
67	7x1	1-9	2.88	2.69	1.92	3.47								

Anhang 4

Zeile 1: Spaltennummer

Spalte 1: pK_{sat} gemessen

Spalte 2: korrigiert mit Leitfähigkeit der Apparatur

Spalte 3: korrigiert mit Widerstandsbeiwert ζ

Spalte 4: umgerechnet auf Probelänge 1 m und Probequerschnittsfläche 1 m²

Zeile 2: Labor-Nummer (links; 1, 2, 3, 5, 6, 7) und Laborseriennummer (rechts; 1–14)

Zeile 3: Monat und Jahr der Messung

Zeile 4: Methode; *DHk*: konstante Druckhöhe, *DHf*: fallende Druckhöhe

Zeile 5: Probendurchmesser in mm (42, 53, 60)

Zeile 6: Probenhöhe in mm (42, 50, 100)

Zeile 7: Leitfähigkeit pK(A) der Apparatur

Spalten 1–4, Zeilen: 8–16, 17–25, 26–34, 35–43, 44–52, 53–61 entsprechen den Referenzproben-typen (1 x 0,25 mm; 1 x 0,5 mm; 1 x 1 mm; 3 x 1 mm, 5 x 1 mm, 7 x 1 mm); 62–67: Mittel

1	A	B	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
2			Labor 6 11				Labor 6 12				Labor 7 13				Labor 6 14			
3			März 2010 3				September 2011 3				September 2010 3				März 2010 3			
4			<i>DHf</i>				<i>DHf</i>				<i>DHf</i>				<i>DHk</i>			
5			D = 50				D = 50				D = 50				D = 50			
6			H = 100				H = 100				H = 100				H = 100			
7			pK(A) 2.63 gemessen				pK(A) 2.44 gemessen				pK(A) 2.55 gemessen				pK(A) 2.23 gemessen			
8	1 x	1																
9		2																
10		3																
11		4																
12		5																
13		6																
14		7																
15		8																
16		9																
17	1 x	1	4.28	4.27	3.80	5.51	4.35	4.34	3.88	5.59	4.22	4.21	3.85	5.56	5.47	5.47	5.47	5.47
18		2	4.28	4.27	3.81	5.51	4.31	4.30	3.84	5.55	4.22	4.22	3.84	5.54	5.48	5.48	5.48	5.48
19		3	4.24	4.23	3.77	5.48	4.30	4.30	3.83	5.54	4.24	4.23	3.86	5.57	5.51	5.51	5.51	5.51
20		4	4.32	4.31	3.85	5.55	4.29	4.29	3.83	5.53	4.29	4.28	3.90	5.60	5.51	5.51	5.51	5.51
21		5	4.25	4.24	3.78	5.48	4.25	4.24	3.78	5.49	4.24	4.23	3.86	5.56				
22		6	4.35	4.34	3.88	5.59	4.28	4.28	3.82	5.52	4.27	4.26	3.88	5.59				
23		7	4.33	4.32	3.86	5.57	4.28	4.27	3.81	5.52	4.20	4.19	3.82	5.53				
24		8	4.26	4.25	3.79	5.49	4.29	4.28	3.82	5.53	4.24	4.23	3.86	5.56				
25		9	4.25	4.24	3.78	5.49	4.27	4.27	3.80	5.51	4.34	4.33	3.95	5.65				
26	1 x	1	3.65	3.60	2.61	4.32	3.65	3.63	2.63	4.34	3.57	3.53	2.63	4.33				
27		2	3.62	3.57	2.58	4.29	3.65	3.63	2.63	4.34	3.56	3.51	2.62	4.33				
28		3	3.61	3.57	2.57	4.28	3.66	3.63	2.64	4.34	3.55	3.50	2.62	4.32				
29		4	3.62	3.58	2.58	4.29	3.63	3.61	2.61	4.32	3.58	3.53	2.62	4.33				
30		5	3.61	3.56	2.56	4.27	3.64	3.61	2.61	4.32	3.56	3.52	2.62	4.33				
31		6	3.62	3.58	2.58	4.29	3.62	3.59	2.60	4.30	3.52	3.48	2.61	4.31				
32		7	3.65	3.61	2.61	4.32	3.67	3.64	2.65	4.36	3.62	3.59	2.64	4.35				
33		8	3.64	3.60	2.60	4.31	3.66	3.64	2.64	4.35	3.59	3.55	2.64	4.35				
34		9	3.63	3.58	2.59	4.30	3.66	3.63	2.64	4.34	3.62	3.58	2.65	4.35				
35	3 x	1																
36		2																
37		3																
38		4																
39		5																
40		6																
41		7																
42		8																
43		9																
44	5 x	1																
45		2																
46		3																
47		4																
48		5																
49		6																
50		7																
51		8																
52		9																
53	7 x	1	2.90	2.57	1.58	3.28	2.89	2.69	1.70	3.41	2.89	2.62	1.64	3.35				
54		2	2.90	2.57	1.58	3.29	2.89	2.70	1.70	3.41	2.89	2.63	1.65	3.36				
55		3	2.91	2.58	1.59	3.30	2.88	2.68	1.68	3.39	2.88	2.61	1.63	3.34				
56		4	2.90	2.56	1.56	3.27	2.85	2.64	1.65	3.35	2.85	2.55	1.58	3.28				
57		5	2.86	2.48	1.48	3.19	2.86	2.65	1.65	3.36	2.84	2.53	1.56	3.27				
58		6	2.90	2.56	1.57	3.27	2.85	2.63	1.63	3.34	2.84	2.53	1.56	3.27				
59		7	2.92	2.60	1.60	3.31	2.86	2.65	1.65	3.36	2.80	2.43	1.52	3.23				
60		8	2.88	2.53	1.53	3.24	2.87	2.67	1.67	3.38	2.77	2.37	1.48	3.19				
61		9	2.89	2.55	1.56	3.26	2.84	2.61	1.62	3.33	2.84	2.51	1.57	3.27				
62	1x0.25	1-9																
63	1x0.5	1-9	4.28	4.27	3.81	5.52	4.29	4.28	3.82	5.53	4.25	4.24	3.87	5.57	5.49	5.49	5.49	5.49
64	1x1	1-9	3.63	3.58	2.59	4.29	3.65	3.62	2.63	4.33	3.58	3.53	2.63	4.33				
65	3x1	1-9																
66	5x1	1-9																
67	7x1	1-9	2.90	2.56	1.56	3.27	2.86	2.66	1.66	3.37	2.85	2.53	1.58	3.28				