



Ringversuch boden- physikalische Kenngrössen

Laborvergleich mit Standardmethoden

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
Auskunft:	Peter Weisskopf E-Mail: peter.weisskopf@agroscope.admin.ch
Redaktion:	Erika Meili
Titelbild	Beprobungsfläche des Ringversuches Marlies Sommer, Agroscope
Download:	www.agroscope.ch/science
Copyright:	© Agroscope 2015
ISSN:	2296-729X
ISBN:	978-3-905667-98-1

Projekt des Bundesamts für Umwelt BAFU «Verdichtung – Messmethoden – Erster Ringversuch 2007», Kontrakt No. 07.0125.PJ / G171-1168

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

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
1 Einleitung	6
1.1 Ausgangslage	6
1.2 Ziele des Projektes	7
2 Material und Methoden	9
2.1 Ablauf des informativen Ringversuches 2007	9
2.1.1 Lagerungsdichte D_a , Grobporenvolumen VP_g und Gesamtporenvolumen VP_t	9
2.1.2 Bestimmung der gesättigten Wasserleitfähigkeit pK_{sat}	11
2.2 Auswertung und Darstellung der Ergebnisse	11
3 Ergebnisse und Diskussion	12
3.1 Verwendete Methoden	12
3.1.1 Probenahme	12
3.1.2 Probenaufbereitung	12
3.1.3 Probenanalyse	12
3.1.4 Datenauswertung	13
3.2 Lagerungsdichte D_a	13
3.3 Grobporenvolumen VP_g bei 60 hPa	17
3.4 Gesamtporenvolumen VP_t	21
3.5 Reelle Dichte D_s	24
3.6 Gesättigte Wasserleitfähigkeit pK_{sat}	26
4 Zusammenfassung	27
4.1 Lagerungsdichte D_a	27
4.2 Grobporenvolumen VP_g bei 60 hPa	27
4.3 Gesamtporenvolumen VP_t	28
4.4 Gesättigte Wasserleitfähigkeit pK_{sat}	28
5.1 Ausblick	30
Literatur	31
Abbildungsverzeichnis	32

Zusammenfassung

Diese Agroscope-Publikation stellt das Vorgehen, die Ergebnisse und die Schlussfolgerungen des ersten informellen Ringversuches zur Bestimmung bodenphysikalischer Kenngrössen dar, bei dem die Untersuchungsergebnisse von zehn erfahrenen analytischen Labors miteinander verglichen wurden, die jeweils mit ihren Standardmethoden arbeiteten. Die Ziele dieses Ringversuches waren, (i) die Einflüsse der Entnahme, Präparation und Analyse von Bodenproben auf die Messergebnisse bodenphysikalischer Kenngrössen zu quantifizieren und (ii) die Genauigkeit standardisierter Labormethoden zu beurteilen, um die Unsicherheit bodenphysikalischer Messwerte letztlich mit Hilfe der Fehlerrechnung charakterisieren zu können.

Verdichtungen des Bodens, die seine Fruchtbarkeit langfristig beeinträchtigen, sind gemäss Umweltschutzgesetz und Verordnung über Belastungen des Bodens zu vermeiden. Verdichtungen des Bodens entstehen unter anderem bei der land- und forstwirtschaftlichen Bewirtschaftung des Bodens, auf Baustellen und bei Rekultivierungen.

Bis vor kurzem war es eine reine Ermessensfrage, wann die Bodenfruchtbarkeit durch Verdichtungen langfristig beeinträchtigt ist. Erst seit dem Vorschlag von Richt- und Massnahmenwerten für die Parameter (effektive) Lagerungsdichte, Grobporenvolumen, gesättigte Wasserleitfähigkeit und Eindringwiderstand, veröffentlicht im BGS-Dokument 13 (Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz 2004), sind für den Vollzug des physikalischen Bodenschutzes Vergleichswerte vorhanden, anhand derer das Verdichtungsausmass vor allem in Streitfällen beurteilt werden kann.

Im Verlauf der Zeit sind von den in teilweise sehr verschiedenen Arbeitsgebieten tätigen bodenkundlichen Labors zum Teil deutlich divergierende Untersuchungsmethoden zur Bestimmung bodenphysikalischer Parameter eingeführt und eingesetzt worden. Entsprechend dieser eigenständigen Entwicklung der Untersuchungsmethodik haben in der Schweiz bisher keine grösseren Vergleiche zwischen der Arbeitsweise und den Arbeitsergebnissen verschiedener Labors bei bodenphysikalischen Untersuchungen stattgefunden – und aus diesem Grund sind bodenphysikalische Ergebnisse verschiedener Labors heute auch nicht zweifelsfrei vergleichbar.

Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse des informativen Ringversuches 2007 als erster Etappe eines vom Bundesamt für Umwelt BAFU geförderten Ringversuchsprojektes zum Vergleich von bodenphysikalischen Untersuchungsmethoden und -ergebnissen vorgestellt.

An diesem informativen Ringversuch 2007 haben zehn bodenphysikalisch erfahrene Labors aus der ganzen Schweiz an demselben Standort (Mörswil/BE: Kunstwiese auf Braunerde aus sandigem Lehm) Zylinderproben entnommen und daran die im physikalischen Bodenschutz zurzeit am häufigsten verwendeten Parameter Lagerungsdichte (D_a), Grobporenvolumen bei 60 hPa (VP_g), Gesamtporenvolumen (VP_t) und gesättigte Wasserleitfähigkeit (ρK_{sat}) bestimmt. Dabei haben die Labors für Probenahme, Probenaufbereitung und Probenanalyse ihre gewohnten Methoden eingesetzt und dokumentiert. Weil die Beprobungen gemäss einem Schema mit vier Verfahren erfolgten, konnten nicht nur die Untersuchungsergebnisse der einzelnen Labors miteinander verglichen werden, sondern auch die Einflüsse von Probenahme, Probenaufbereitung und Probenanalyse auf die Untersuchungsergebnisse abgeschätzt werden.

Im Bericht werden die von den Labors verwendeten Untersuchungsmethoden miteinander verglichen, die erzielten Resultate vorgestellt und diskutiert sowie kritische Punkte aufgezeigt.

Der informelle Ringversuch 2007 führte zu folgenden Schlussfolgerungen:

- (i) Die erzielten Ergebnisse für Lagerungsdichte (D_a), Grobporenvolumen bei 60 hPa (VP_g), Gesamtporenvolumen (VP_t) und gesättigte Wasserleitfähigkeit (pK_{sat}) unterschieden sich signifikant voneinander, wenn die Untersuchung einer Bodenprobe nicht von einem Labor allein durchgeführt wurde, sondern mehrere Labors daran beteiligt waren.
- (ii) Etwas überraschend zeigte die Probenanalyse im Labor den stärksten Einfluss auf die Resultate; die Arbeitsschritte Probenahme und Probenaufbereitung sowie auch die standörtliche Heterogenität waren von geringerer Bedeutung.
- (iii) Messwerte müssen durch Fehlerwerte begleitet werden, die das Ausmass der Messunsicherheiten während des gesamten Untersuchungsablaufes charakterisieren; das erfordert eine gründliche Fehlerfortpflanzungsanalyse der verwendeten Methoden und Abläufe. Die Unterschiede zwischen den Untersuchungsergebnissen der einzelnen Labors lassen sich oftmals nicht aufgrund der verwendeten Methodenprinzipien erklären, sondern hängen vermutlich mit der spezifischen Realisierung von Arbeitsschritten und -abläufen in den einzelnen Labors zusammen.
- (iv) Die analytischen Methoden zur Bestimmung der untersuchten bodenphysikalischen Parameter müssen weiter verbessert und standardisiert werden, besonders für die Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit pK_{sat} .
- (v) Angesichts der Ergebnisse dieses Ringversuches besteht ein dringender Bedarf an Referenzproben, um die Abläufe während der Laboranalyse gründlich prüfen und verbessern zu können, so dass Messergebnisse erzielt werden, die im einzelnen Labor reproduzierbar und zwischen Labors absolut vergleichbar sind.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Verdichtungen des Bodens, die seine Fruchtbarkeit langfristig beeinträchtigen, sind zu vermeiden (Umweltschutzgesetz USG Art. 33 Abs. 2 und Verordnung über Belastungen des Bodens VBo Art. 6 Abs. 1). Verdichtungen entstehen unter anderem bei der land- und forstwirtschaftlichen Bewirtschaftung des Bodens, auf Baustellen und bei Rekultivierungen. In der Landwirtschaft kann die Ertragsfähigkeit von Ackerböden dank zunehmender Mechanisierung durch tiefer reichende Bearbeitung zwar potenziell verbessert werden, gleichzeitig erhöht sich aber auch die Wahrscheinlichkeit von Bodenverdichtungen. Daneben haben Linienbaustellen mit kurzfristigen intensiven Beanspruchungen zu Verdichtungen landwirtschaftlicher Böden geführt, die auch Jahrzehnte später deren Ertragsfähigkeit beeinträchtigen.

Bis vor kurzem war es eine reine Ermessensfrage, wann die Bodenfruchtbarkeit durch Verdichtungen langfristig beeinträchtigt ist. Erst seit dem Vorschlag von Richt- und Massnahmenwerten im BGS-Dokument 13 (Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz 2004) sind für den Vollzug des physikalischen Bodenschutzes Vergleichswerte vorhanden, anhand derer das Verdichtungsmaass vor allem in Streitfällen beurteilt werden kann. Richt- und Massnahmenwerte existieren für die (effektive) Lagerungsdichte, das Grobporenvolumen, die gesättigte Wasserleitfähigkeit und den Eindringwiderstand. Vor allem die ersten drei Parameter werden seit Jahrzehnten von Labors in der Schweiz und im Ausland bestimmt.

Im Verlauf der Zeit sind von den in teilweise sehr verschiedenen Arbeitsgebieten tätigen bodenkundlichen Labors jedoch unterschiedliche, zum Teil deutlich divergierende Untersuchungsmethoden zur Bestimmung bodenphysikalischer Parameter eingeführt und eingesetzt worden. Entsprechend dieser eigenständigen Entwicklung der Untersuchungsmethodik haben in der Schweiz bisher keine grösseren Vergleiche zwischen der Arbeitsweise und den Arbeitsergebnissen verschiedener Labors bei bodenphysikalischen Untersuchungen stattgefunden. Aus diesem Grund sind bodenphysikalische Ergebnisse verschiedener Labors heute nicht zweifelsfrei vergleichbar.

Die unterschiedlichen Methoden sind entstanden und eingeführt worden, weil die im bodenphysikalischen Bereich tätigen Labors verschiedene Zielsetzungen verfolgen:

- Labors von Hochschulen und Forschungsanstalten sind an der Lösung spezieller Fragen interessiert, wie zum Beispiel der Erfassung von Bodenverdichtungen als Folge des Einsatzes von land- und forstwirtschaftlichen Maschinen oder von Baufahrzeugen. Dabei sind die verwendeten Methoden entsprechend den spezifischen Fragestellungen optimiert worden, ein Resultatvergleich mit anderen Labors ist praktisch nur im Rahmen einzelner Forschungsprojekte von Interesse. Der Aufwand für die Anwendung der Methoden ist häufig nebensächlich.
- Labors von kantonalen Fachstellen sind an der Charakterisierung der Langzeitentwicklung von Böden unter dem Einfluss unterschiedlicher Nutzung interessiert (Monitoring, Dauerbeobachtung), im Rahmen des Vollzugs auch an der Erfassung von Bodenbelastungen in kleineren (Auffüllungen, Rekultivierungen) oder mittelgrossen Gebieten. Durch physikalische Bodenuntersuchungen soll sichergestellt werden, dass die Nutzung bzw. der Umgang mit Böden fachgerecht erfolgt, so dass die von physikalischen Eigenschaften abhängigen Bodenfunktionen möglichst erhalten oder sogar verbessert werden können. Der Aufwand für die Anwendung der Methoden ist üblicherweise ein wichtiges Kriterium, ebenso die Vergleichbarkeit der Resultate zwischen den kantonalen Fachstellen.

- Labors von privaten Ingenieurfirmen sind interessiert an Aufträgen aller Art, zum Beispiel an Monitoring- bzw. Dauerbeobachtungsprojekten sowie an punktuellen Untersuchungen auf Baustellen und bei Rekultivierungen. Wichtig für diese Gruppe sind genormte, sich möglichst wenig ändernde Methoden, damit einerseits ein minimaler Qualitätsstandard gegeben und andererseits der finanzielle Aufwand kalkulierbar wird.

1.2 Ziele des Projektes

Ziel dieses vom BAFU geförderten und in verdankenswerter Weise finanziell unterstützten Ringversuchsprojektes ist es, durch den Vergleich von bodenphysikalischen Untersuchungsmethoden und -ergebnissen zur Verbesserung der Untersuchungsmethodik in den beteiligten Labors beizutragen sowie die bodenphysikalischen Untersuchungsmethoden mittels gezielter Qualitätssicherungsmaßnahmen robuster und damit praxistauglich zu machen.

Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse des informativen Ringversuches 2007 als erster Schritt dieses Projektes vorgestellt.

Ringversuche motivieren die beteiligten Labors zur Anwendung geprüfter Methoden und fördern die Vergleichbarkeit von Untersuchungsergebnissen zwischen den beteiligten Labors. Durch den Vergleich der Messergebnisse und der verwendeten Untersuchungsmethoden im informativen Ringversuch 2007 werden den teilnehmenden Labors Verbesserungsmöglichkeiten für ihre Untersuchungsmethoden und ihre Qualitätssicherung geboten.

Im informativen Ringversuch 2007 haben zehn bodenphysikalisch erfahrene Labors aus der ganzen Schweiz an demselben Standort Zylinderproben entnommen und daran die im physikalischen Bodenschutz zur Zeit am häufigsten verwendeten Parameter Lagerungsdichte (D_a), Grobporenvolumen bei 60 hPa (V_{Pg}), Gesamtporenvolumen (V_{Pt}) und gesättigte Wasserleitfähigkeit (pK_{sat}) bestimmt. Dabei haben die Labors für Probenahme, Probenaufbereitung und Probenanalyse ihre gewohnten Methoden eingesetzt. Im Sinne einer Bestandesaufnahme wurden sie aufgefordert, die wichtigsten Schritte ihres Vorgehens zu dokumentieren. Als Vorbereitung dieses Ringversuches war zuvor im Auftrag der BAFU-Sektion «Stoffe, Boden, Biotechnologie» eine Vorstudie «Physikalische Kenngrößen von Schweizer Böden – Methodische Aspekte und Ringversuchs-Konzept» erarbeitet worden (Berli und Weisskopf 2006). Darin wurden der Untersuchungsbedarf und das Vorgehen beim Vergleich dieser bodenphysikalischen Parameter charakterisiert.

In einem auf den Ringversuch 2007 folgenden zweiten Projektschritt soll die Vergleichbarkeit von bodenphysikalischen Untersuchungsergebnissen zwischen verschiedenen Labors durch eine stärkere Vereinheitlichung der verwendeten Untersuchungsmethoden weiter verbessert werden. Dies geschieht aufgrund der Auswertung von informativen Ringversuchen und internationalen Methodenstandards, indem die bestehenden Referenzmethoden weiterentwickelt, validiert und den Labors als gemeinsame neue Untersuchungsstandards angeboten werden.

In einem abschliessenden dritten Projektschritt sollen die Labors und deren Kunden die Möglichkeit erhalten, durch absolute direkte Quervergleiche im Rahmen von sogenannten «normativen Ringversuchen» bodenphysikalische Untersuchungsergebnisse verschiedener Labors unmittelbar miteinander zu vergleichen. Dadurch steigt der Anreiz, physikalische Untersuchungsmethoden auch tatsächlich bei praktischen Fragestellungen einzusetzen.

Dank vereinheitlichter Referenzmethoden mit verfeinerten Qualitätssicherungsstandards sollten sich Ergebnisse von bodenphysikalischen Untersuchungen schliesslich auch mit absoluten Referenzwerten vergleichen lassen. Erst dadurch werden die Untersuchungsergebnisse aussagekräftig, und erst in diesem Moment wird die Definition von Grenzwerten für den physikalischen Bodenschutz überhaupt sinnvoll: Die Beurteilung von bodenphysikalischen Untersuchungsergebnissen wird praktikabel, der Vollzug des physikalischen Bodenschutzes erleichtert bzw. überhaupt erst möglich. Deshalb unterstützen diese

methodischen Normierungsarbeiten sowohl die bodenschützerischen Absichten des BAFU als auch jene der kantonalen Fachstellen:

- In der Land- und Forstwirtschaft können Bodenverdichtungen durch den Einsatz von ungeeigneten Maschinen zum falschen Zeitpunkt leichter nachgewiesen werden, so dass die Motivation zu sorgfältiger, gefügeschonender Bewirtschaftung wächst.
- In der Bauwirtschaft können Bodenverdichtungen als Folge ungeeigneter Arbeitsplanung oder des Einsatzes ungeeigneter Fahrzeuge dokumentiert und gegebenenfalls die Abnahme betroffener Bauabschnitte oder mangelhaft durchgeführter Rekultivierungsarbeiten verweigert werden.

2 Material und Methoden

2.1 Ablauf des informativen Ringversuches 2007

Beim untersuchten Ringversuchs-Standort auf einer Kunstwiese im dritten Hauptnutzungsjahr in Möriswil/BE (Landeskoordinaten 593.555/203.705, Höhe 630 m ü. M.) handelt es sich um den skelettfreien Oberboden einer Braunerde der Körnungsklasse sandiger Lehm (15 % Ton, 30–40 % Schluff) mit Krümelgefüge.

2.1.1 Lagerungsdichte D_a , Grobporenvolumen VP_g und Gesamtporenvolumen VP_t

Von den teilnehmenden Labors wurden auf der Beprobungsfläche 1 die zwei Probenserien der Verfahren 1 und 2 (Abb. 2) aus jeweils zwei Teilflächen entnommen (A und B, Abb. 1), am 5. Juni 2007 von allen Labors ausser Labor 8, am 14. Juni 2007 vom Labor 8. Am 6. Juni 2007 entnahm die Projektgruppe zusammen mit dem Referenzlabor zwei weitere Probenserien der Verfahren 3 und 4 (Abb. 2) aus der unmittelbar daneben liegenden Beprobungsfläche 2 (Abb. 1). Die Probenmitte lag dabei jeweils – unabhängig von den Probendimensionen – in 13 cm Bodentiefe.

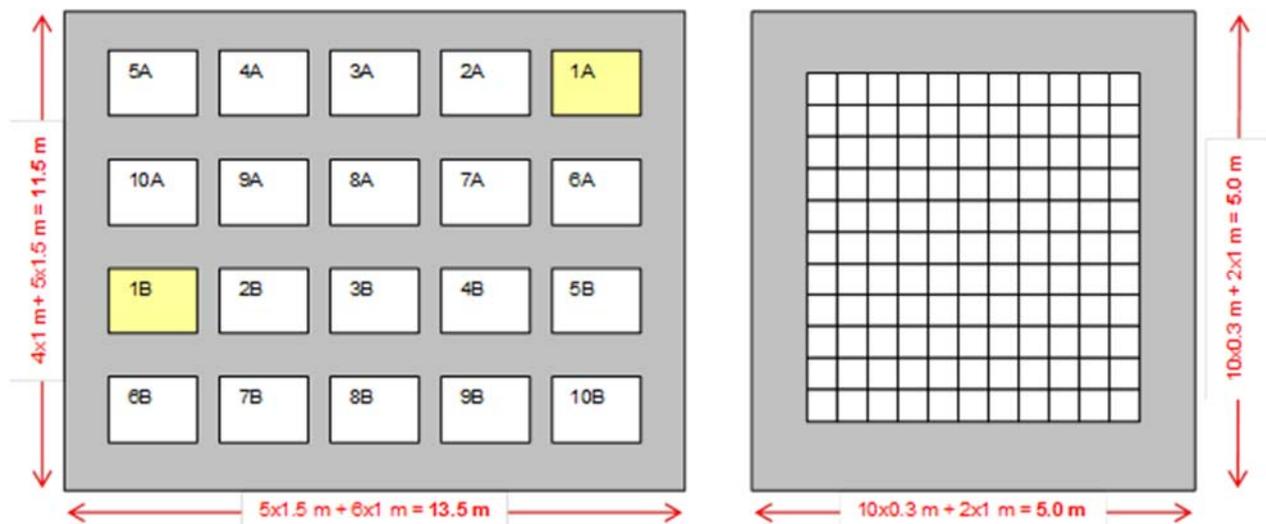


Abb. 1 | Links: Beprobungsfläche 1 (Verfahren 1 und 2) mit den Teilflächen A und B. Rechts: Beprobungsfläche 2 (Verfahren 3 und 4).

Für den informativen Ringversuch zur Bestimmung von Lagerungsdichte D_a und Grobporenvolumen VP_g sowie dem Gesamtporenvolumen VP_t wurde das in Abbildung 2 dargestellte Vorgehen gewählt.

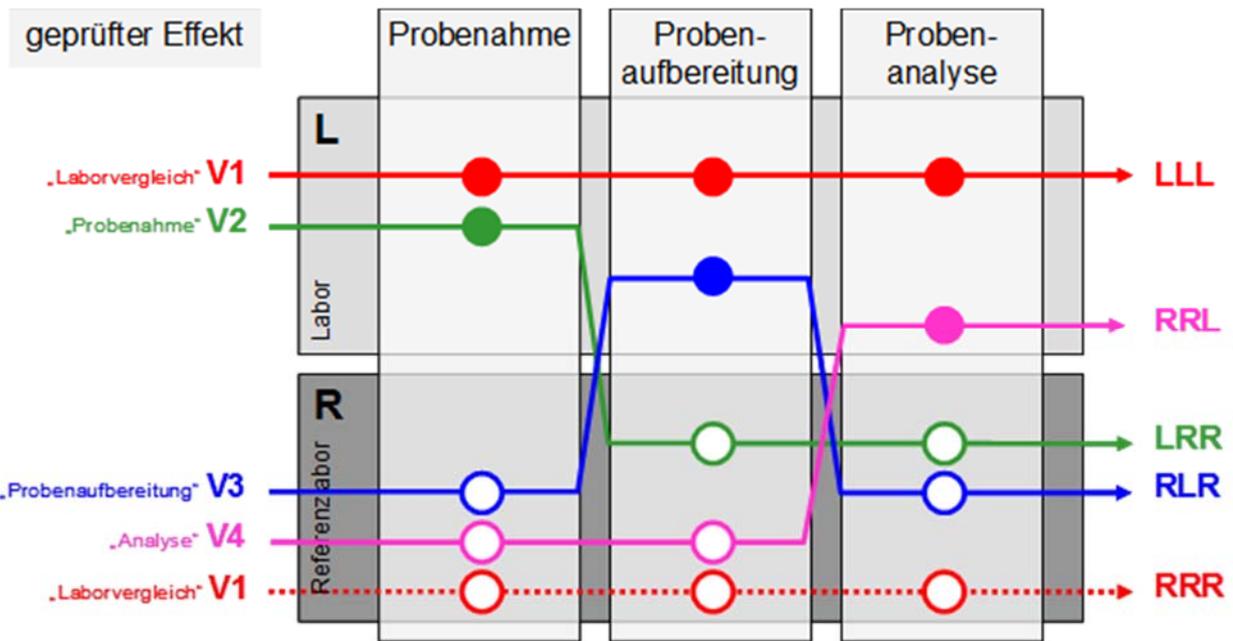


Abb. 2 | Schematische Zusammenstellung der Verfahren des informativen Ringversuches 2007 zur Bestimmung von Lagerungsdichte D_a und Grobporenvolumen VP_g sowie Gesamtporenvolumen VP_t .

Verfahren 1 (V1, Laborvergleich): Alle Labors entnehmen mit ihren eigenen Probenahmezylindern und dem eigenen Probenahmematerial zehn Bodenproben (je fünf pro Teilfläche); anschliessend präparierten und analysierten die Labors diese Proben mit den laborüblichen Methoden.

Verfahren 2 (V2, Probenahmeeffekt): Um den Einfluss unterschiedlicher Probenahmetechniken zu erfassen, entnahmen die einzelnen Labors am 5. Juni 2007 zehn Bodenproben (je fünf pro Teilfläche) mit den Probenahmezylindern und dem Probenahmematerial des Referenzlabors; diese Proben wurden anschliessend vom Referenzlabor präpariert und analysiert.

Verfahren 3 (V3, Probenaufbereitungseffekt): Um den Einfluss unterschiedlicher Präparationstechniken zu erfassen, entnahm die Projektgruppe des Referenzlabors mit den Probenahmezylindern und dem Probenahmematerial des Referenzlabors am 6. Juni 2007 für jedes teilnehmende Labor je zehn Bodenproben aus der Beprobungsfläche 2; diese Proben wurden den einzelnen Labors gebracht, von diesen entsprechend ihrem üblichen Vorgehen präpariert, anschliessend wieder abgeholt und schliesslich im Referenzlabor analysiert.

Verfahren 4 (V4, Analyseeffekt): Um den Einfluss der unterschiedlichen Analyseabläufe zu erfassen, entnahm die Projektgruppe des Referenzlabors mit den Probenahmezylindern und dem Probenahmematerial der einzelnen Labors am 6. Juni 2007 je zehn Bodenproben aus der Beprobungsfläche 2; diese Proben wurden im Referenzlabor aufbereitet und anschliessend zur Analyse den einzelnen Labors gebracht.

Labor 7 wurde als Referenzlabor bestimmt.

Für die nachfolgende Darstellung und Diskussion der Resultate werden die vier Verfahren V1, V2, V3 und V4 entsprechend dem Beitrag der einzelnen Labors und des Referenzlabors an den drei Arbeitsschritten Probenahme, Probenaufbereitung und Probenanalyse wie folgt bezeichnet (Abb. 2):

- **V1** (Laborvergleich): Alle drei Arbeitsschritte Probenahme, Probenaufbereitung und Probenanalyse wurden durch die einzelnen Labors (**LLL**) bzw. durch das Referenzlabor (**RRR**) durchgeführt.

- **V2** (Probenahmeeffekt): Die Probenahme wurde durch die einzelnen Labors ausgeführt, Probenaufbereitung und Probenanalyse machte dagegen zentral das Referenzlabor (**LRR**).
- **V3** (Probenaufbereitungseffekt): Die Probenahme wurde durch das Referenzlabor ausgeführt, die Probenaufbereitung durch die einzelnen Labors und die Probenanalyse wiederum durch das Referenzlabor (**RLR**).
- **V4** (Analyseeffekt): Probenahme und Probenaufbereitung wurden vom Referenzlabor ausgeführt, die Probenanalyse von den einzelnen Labors (**RRL**).

Für die Probenahme wurden immer die Probenzylinder und die Probenahme-Utensilien desjenigen Labors verwendet, das den Arbeitsschritt Probenanalyse ausführte.

2.1.2 Bestimmung der gesättigten Wasserleitfähigkeit pK_{sat}

Einige der Labors entnahmen entsprechend dem Verfahren 1 zusätzlich zehn Bodenproben (je fünf aus den beiden Teilflächen A und B der Beprobungsfläche 1) mit ihren eigenen Probenahmezylindern und dem eigenen Probenahmematerial für die Bestimmung der gesättigten Wasserleitfähigkeit pK_{sat} ; diese Bodenproben wurden von den einzelnen Labors gemäss ihrem üblichen Vorgehen aufbereitet und analysiert. Verfahren 2, 3 und 4 wurden für diesen Parameter nicht durchgeführt.

2.2 Auswertung und Darstellung der Ergebnisse

Die Ergebnisse des informativen Ringversuches 2007 werden auf den Stufen «Verfahrensvergleich» und «Laborvergleich» mit Boxplots dargestellt.

Dabei erstreckt sich die Box vom unteren bis zum oberen Quartil und wird vom Median unterteilt. Der Median teilt die Stichprobe so, dass je 50 % der Messwerte darüber bzw. darunter liegen. Das untere und obere Quartil teilen die Messwerte im Verhältnis 1:3 bzw. 3:1. Der Whisker über der Box erstreckt sich bis zum grössten Messwert, der vom oberen Ende der Box weniger als das 1,5-fache der Boxlänge (Interquartilsabstand, IQA) entfernt ist. Analog ist die Whiskerlänge nach unten definiert. Kreise bezeichnen Messwerte ausserhalb dieser Grenzen.

Die Grösse der Kerbe gibt einen Hinweis auf die Genauigkeit des Medians. Die halbe Kerbenbreite beträgt bei n Messwerten $1,7 \cdot IQA \sqrt{n}$, das heisst der Median liegt mit einer Wahrscheinlichkeit von rund 95 % im Bereich der Kerbe. Sofern sich die Kerben zweier Boxen nicht überlappen, sind die untersuchten Mediane deshalb als signifikant verschieden zu betrachten. Diese Auswertungen wurden mit der Software R durchgeführt.

Um die Ergebnisse der einzelnen Labors noch detaillierter miteinander vergleichen zu können, wurden die Werte einerseits aufgrund verteilungsfreier Gruppierungstests (Kruskal-Wallis ANOVA by Ranks, Median-Test) beurteilt, andererseits – wenn eine Normalverteilung vorlag – auch mit auf Normalverteilung beruhenden Methoden (Varianzanalyse, Mittelwertvergleich mit Hilfe des Gruppierungstests nach Tukey) analysiert. Dazu wurde die Software Statistica verwendet.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Verwendete Methoden

Die Methoden der teilnehmenden Labors sind im Anhang in Form eines «Methodenrasters» zusammengestellt. Sie unterscheiden sich bezüglich Probenahme, Probenaufbereitung, Probenanalyse und Datenauswertung.

3.1.1 Probenahme

- Probenahmeprotokolle werden von allen zehn Labors mehr oder weniger ausführlich erstellt.
- Fünf der zehn Labors führen eine Bodenansprache durch.
- Die Beprobungstiefe wird von allen Labors mittels Doppel- oder Klappmeter ermittelt.
- Verwendete Zylinderdimensionen (Durchmesser x Höhe in mm): 55 x 39, 55 x 42, 80 x 50, 60 x 40, 105 x 110, 50 x 50.
- Sechs Labors verwenden Zylinder ohne Schneide, vier Labors solche mit Schneide.
- Fünf Labors verwenden Zylinder mit eingestanzter Nummer, vier Labors beschriften die Zylinder direkt mit Filzstift, ein Labor verwendet Zettel unter dem Zylinderdeckel.
- Bei neun Labors werden die Zylinder überwiegend durch Schlagen eingetrieben, bei einem Labor ausschliesslich durch Drücken.
- Als Verwerfungskriterien gelten: Risse, Löcher, grosse Steine/Poren, fehlendes Volumen, Bruchstellen.
- Für den Probentransport verwenden alle zehn Labors Transportkisten, welche die mit Deckeln verschlossenen Zylinder enthalten.

3.1.2 Probenaufbereitung

- Acht Labors lagern die Zylinder im Kühlschrank oder im Kühlraum, teilweise bei kontrollierter Luftfeuchtigkeit, ein Labor verwendet einen Feuchtigkeitsraum mit 100 % Luftfeuchtigkeit bei 20 °C, ein Labor lagert die Proben im Keller ohne Temperatur- und Feuchtigkeitskontrolle.
- Für die Präparation der Probenoberflächen werden Messer oder Sägen oder beides verwendet.

3.1.3 Probenanalyse

- Die Bestimmung der Lagerungsdichte erfolgt bei allen zehn Labors mittels Trocknen bei 105–110 °C und anschliessendem Wägen.
- Als Kontrollkriterium für die Lagerungsdichte dient bei sieben Labors das spezifische Gewicht der Bodenfests substanz («reelle Dichte»), bei zwei Labors die analysierte Anzahl Proben; ein Labor verwendet kein Kontrollkriterium.
- Die Datenerfassung erfolgt bei fünf Labors elektronisch, bei fünf Labors manuell auf Papier.
- Neun Labors bestimmen das Grobporenvolumen; dabei verwenden fünf Labors Eijkelkamp-Sandboxen, zwei Labors Soilmoisture-Drucktöpfe, ein Labor Drucktopf oder hängende Wassersäule, ein Labor Soilmoisture-Drucktopf und Desorptionsbox.
- Es kommen unterschiedliche (teilweise gar keine) Kontrollkriterien und -grössen für das Grobporenvolumen zum Einsatz (Saugspannung, Referenz-/Kontrollproben, Druck-/Überdruckkontrolle, leere Apparatur, wählbare Nullpunkte, visuelle Kontrolle, Wassermanometer, Luftpyknometer).
- Die Datenerfassung erfolgt bei 2 Labors elektronisch, bei 7 Labors manuell auf Papier.
- Von den 7 Labors, welche die gesättigte Wasserleitfähigkeit bestimmen, verwenden 3 Labors Eijkelkamp-Permeameter (Probenhöhe 39 mm, konstante Druckhöhe, bis 25 Proben parallel), 3 Labors Permeameter eigener Bauart (Probenhöhe 42 bzw. 100 mm, konstante bzw. fallende Druckhöhe, 1 Probe pro Apparatur) und 1 Labor eine Triax-Maschine.
- Falls verwendet, kommen folgende Kontrollkriterien für die gesättigte Wasserleitfähigkeit zum Einsatz: Dichtigkeit der Apparatur, bekannte Minima/Maxima der Apparatur, Wiederholungsmessungen, Druckkontrolle.
- Die Datenerfassung erfolgt bei allen 7 Labors manuell auf Papier.

3.1.4 Datenauswertung

- Die Berechnung der Lagerungsdichte erfolgt bei allen zehn Labors aus dem Quotienten der Masse des getrockneten Bodens zum Zylinderinnenvolumen.
- Fünf Labors verwenden als Kontrollkriterium das spezifische Gewicht der Bodenfests substanz («reelle Dichte»), drei Labors führen eine Plausibilitätskontrolle durch, ein Labor vergleicht mit Kontrollgrössen.
- Von den neun Labors, die Grobporenbestimmungen durchführen, verwenden sieben Labors für die Bestimmung des Gesamtporenvolumens den Wassergehalt bei Sättigung oder das Sättigungsgewicht; das Grobporenvolumen wird dann als Differenz zum Wassergehalt oder dem Gewicht bei 60 hPa Saugspannung berechnet. Ein Labor bestimmt die Wassergehaltsdifferenz zwischen Sättigung und 60 hPa Saugspannung mit hängender Wassersäule an Einzelproben. Ein Labor berechnet das Gesamtporenvolumen aus der Bestimmung der Fests substanz via Luftpyknometer.
- Als Kontrollkriterien (falls verwendet) dienen Plausibilitätskontrollen, Boden-Schrumpfungskurven, Eichreihen und spezifisches Gewicht.
- Die sieben Labors, welche die gesättigte Wasserleitfähigkeit messen, benutzen unterschiedliche Masseinheiten (cm/s, m/s, cm/d, m/d, pK_{sat}) und verwenden für die Berechnung entweder das Volumen des in die Probe oder des aus der Probe geflossenen Wassers pro Zeiteinheit sowie die Probenquerschnittsfläche, die Probenhöhe und die Druckdifferenz zwischen Probenanfang und -ende.
- Als Kontrollkriterien dienen Plausibilitätskontrollen, Wiederholungsmessungen, Fehlerrechnungen und die Wasserleitfähigkeit der Apparatur.

3.2 Lagerungsdichte Da

Abbildung 3 zeigt die Lagerungsdichte-Werte als Boxplot, aufgeschlüsselt nach Beteiligung der Labors bzw. des Referenzlabors an den drei Arbeitsschritten Probenahme, Probenaufbereitung und Probenanalyse. Sofern nur die Probenahme oder die Probenaufbereitung durch die einzelnen Labors (**LRR** bzw. **RLR**) erfolgte, ergaben sich Werte, die sich von den durch das Referenzlabor entnommenen, aufbereiteten und analysierten Proben (**RRR**) nicht signifikant unterscheiden (die Kerben der Boxplots überlappen sich). Die gleiche Aussage ergibt sich aus dem Vergleich der beiden Kombinationen **LLL** und **RRL**: Trotz unterschiedlicher Probenahme bzw. Probenaufbereitung wurden von den Labors vergleichbare Werte analysiert. Zu eindeutig unterschiedlichen Ergebnissen führte hingegen die Probenanalyse durch die Labors bzw. durch das Referenzlabor. Dies zeigt der Vergleich von **RRR** mit **LLL**, vor allem aber von **RRR** mit **RRL** klar; in letzterem Fall wurde nur die Messung durch die beteiligten Labors ausgeführt.

Da anscheinend die Probenanalyse das Resultat der Lagerungsdichte-Bestimmung am stärksten beeinflusst hat, können im Verfahren V1 die Werte aller Labors (inklusive Referenzlabor) miteinander verglichen werden (Abb. 4). Auffallend ist die je nach Labor unterschiedlich grosse Variabilität der Messwerte; gross ist sie z.B. bei Labor 8, klein dagegen bei den Labors 2 und 5. Bezogen auf die gemessenen Absolutwerte zeichnen sich drei Gruppen ab: Labors mit eher geringen Werten (Labors 1, 4, 5 und 7), Labors mit eher hohen Werten (Labors 6, 8 und 9) sowie Labors mit hohen Werten (Labors 2, 3 und 10).

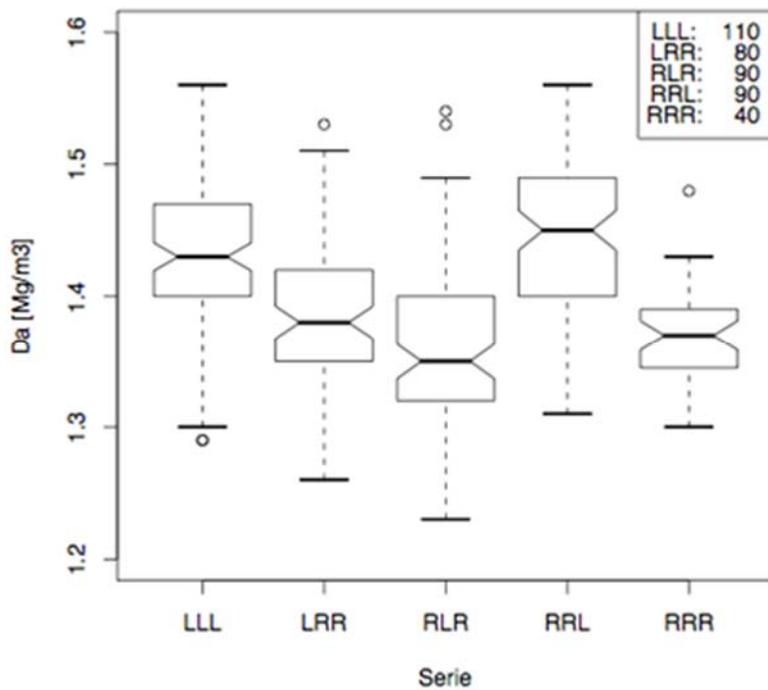


Abb. 3 | Lagerungsdichte D_a , aufgeschlüsselt nach den durch die einzelnen Labors (L) bzw. das Referenzlabor (R) durchgeführten Arbeitsschritten Probenahme (X.), Probenaufbereitung (.X.) und Probenanalyse (..X). Zahlen in der Legende bezeichnen die Anzahl der Messwerte pro Serie.

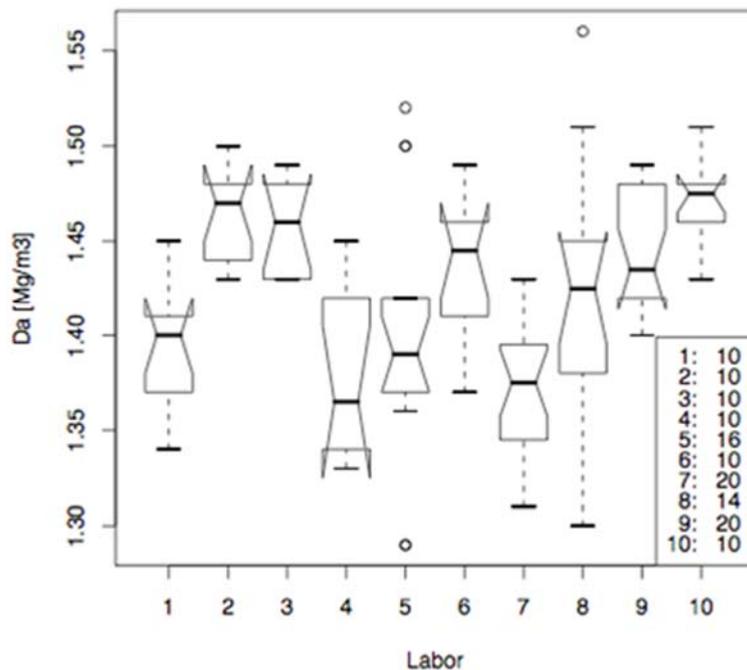


Abb. 4 | Lagerungsdichte D_a , bestimmt von den einzelnen Labors im Verfahren V1, das heisst alle drei Arbeitsschritte Probenahme, Probenaufbereitung und Probenanalyse wurden durch die einzelnen Labors durchgeführt (LLL, für Labor 7 als Referenzlabor RRR).

Abbildung 5 zeigt die Differenzen delta R-L der Lagerungsdichten D_a zwischen den einzelnen Labors und dem Referenzlabor, getrennt nach Beteiligung jedes einzelnen Labors und des Referenzlabors an den drei Arbeitsschritten. Die Differenzen werden verglichen mit der kleinsten gesicherten Differenz kgD aus der Zweiweg-Varianzanalyse (Verfahren x Labor). Zudem werden die Verfahrensmittel V1 bis V4 pro Labor und

der Gesamtmittelwert pro Labor mit Hilfe des Gruppierungstestes nach Tukey beurteilt. In der Zusammenfassung ergibt sich dieselbe generelle Aussage wie bei der Gesamtbetrachtung, nämlich dass der Arbeitsschritt Probenanalyse in den meisten Fällen (5 von 9) zu Unterschieden führte, während dies bei Probenaufbereitung (4 von 9) und Probenahme (2 von 9) seltener der Fall war. Bei der Einzelfallbetrachtung wird aber deutlich, dass es sehr unterschiedliche Abweichungskonstellationen gibt: Während einzelne Labors gar keine Abweichungen zeigen, weisen andere Labors bei allen Arbeitsschritten Abweichungen auf.

Diese Unterschiede zwischen den Labors lassen sich allein aufgrund der von den einzelnen Labors verwendeten Methodenprinzipien und Arbeitsschritten (siehe Methodenraster im Anhang) nicht erklären, sondern hängen vermutlich mit der spezifischen Realisierung von Arbeitsschritten bzw.-abläufen in den einzelnen Labors zusammen.

Die standörtliche Homogenität der beprobten Fläche lässt sich anhand des Vergleiches der Lagerungsdichtewerte D_a zwischen den beiden Teilflächen A und B im Verfahren 1 beurteilen (Abb. 6). Die Lagerungsdichtewerte D_a der Labors 1 und 9 für die Teilflächen unterscheiden sich signifikant, die Daten der Labors 1, 5 und 8 zeigen in den einzelnen Teilflächen erhöhte Varianzen. Da der Vergleich mit Boxplots bei derart kleinen Probenanzahlen nicht eindeutig ist, wurden die Lagerungsdichtewerte D_a zusätzlich mit verteilungsfreien Gruppierungstests überprüft. Danach sind in einem Fall die Unterschiede statistisch signifikant (Labor 9), in drei anderen Fällen (Labors 1, 5 und 8) nur tendenziell vorhanden.

					Mittelwert V1-V4 pro Labor		
Da - Labor 1	V1 - LLL	V2 - LRR	V3 - RLR	V4 - RRL	1.379	delta R-L	kgD
	1.395	1.372	1.380	1.371			
PN	1.383		1.375			-0.008	
PA	1.387	1.371				-0.016	0.038
AN	1.383	1.376				-0.007	
Da - Labor 2	V1 - LLL	V2 - LRR	V3 - RLR	V4 - RRL	1.416	delta R-L	kgD
	1.464	1.370	1.325	1.508			
PN	1.417		1.416			-0.001	
PA	1.394	1.438				0.044	0.032
AN	1.485	1.348				-0.138	
Da - Labor 4	V1 - LLL	V2 - LRR	V3 - RLR	V4 - RRL	1.359	delta R-L	kgD
	1.376		1.333	1.368			
PN	1.378		1.350			-0.026	
PA	1.354	1.368				0.013	0.040
AN	1.372	1.333				-0.039	
Da - Labor 5	V1 - LLL	V2 - LRR	V3 - RLR	V4 - RRL	1.407	delta R-L	kgD
	1.405	1.330	1.477	1.417			
PN	1.367		1.447			0.080	
PA	1.441	1.374				-0.067	0.047
AN	1.411	1.403				-0.008	
Da - Labor 6	V1 - LLL	V2 - LRR	V3 - RLR	V4 - RRL	1.424	delta R-L	kgD
	1.440	1.390	1.378	1.498			
PN	1.410		1.438			0.028	
PA	1.409	1.439				0.029	0.034
AN	1.469	1.379				-0.090	
Da - Labor 7	V1 - LLL	V2 - LRR	V3 - RLR	V4 - RRL	1.368	delta R-L	kgD
	1.370		1.365	1.368			
PN	1.370		1.367			-0.003	
PA	1.367	1.368				0.001	0.030
AN	1.369	1.365				-0.004	
Da - Labor 8	V1 - LLL	V2 - LRR	V3 - RLR	V4 - RRL	1.404	delta R-L	kgD
	1.429	1.417	1.316	1.455			
PN	1.423		1.386			-0.038	
PA	1.373	1.436				0.064	0.047
AN	1.442	1.367				-0.075	
Da - Labor 9	V1 - LLL	V2 - LRR	V3 - RLR	V4 - RRL	1.410	delta R-L	kgD
	1.443	1.392	1.347	1.457			
PN	1.418		1.402			-0.016	
PA	1.395	1.425				0.030	0.030
AN	1.450	1.370				-0.080	
Da - Labor 10	V1 - LLL	V2 - LRR	V3 - RLR	V4 - RRL	1.448	delta R-L	kgD
	1.470	1.498	1.333	1.492			
PN	1.484		1.412			-0.072	
PA	1.401	1.495				0.094	0.032
AN	1.481	1.416				-0.065	

Abb. 5 | Differenz delta R-L zwischen den Lagerungsdichtewerten Da, getrennt nach den durch die einzelnen Labors (L) bzw. das Referenzlabor (R) durchgeführten Arbeitsschritten Probenahme (X..), Probenaufbereitung (.X.) und Probenanalyse (..X). PN = (V1 + V2) / 2 bzw. (V3 + V4) / 2, PA = (V1 + V3) / 2 bzw. (V2 + V4) / 2, AN = (V1 + V4) / 2 bzw. (V2 + V3) / 2.

Mittelwerte pro Arbeitsschritt: grün = Labor mit deutlich kleineren, rot = Labor mit deutlich grösseren Werten als das Referenzlabor, verglichen mit der kleinsten gesicherten Differenz kgD.
 Verfahrensmittel V1 bis V4 und Gesamtmittelwert: grün = günstigste, rot = ungünstigste Werte aufgrund des Gruppierungstestes nach Tukey.

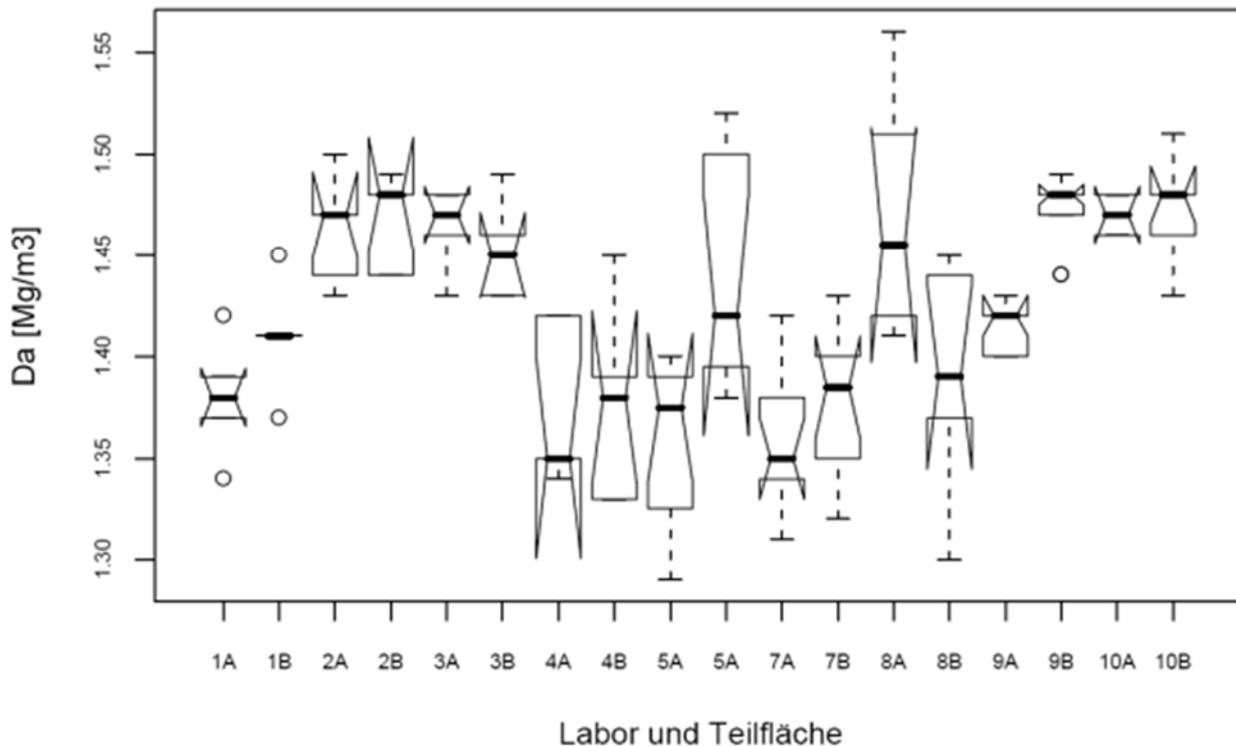


Abb. 6 | Lagerungsdichtewerte D_a , bestimmt von den einzelnen Labors in den beiden Teilflächen A und B der Beprobungsfläche 1 im Verfahren 1 (Probenahme, Probenaufbereitung und Probenanalyse durch die Labors).

Die Darstellung mit Boxplots lässt signifikant unterschiedliche Lagerungsdichtewerte D_a für die Labors 1 und 9 erkennen. Ein zusätzlicher Paarvergleich mit verteilungsfreien Gruppierungstests ergibt einen signifikanten Unterschied bei Labor 9 und tendenzielle Unterschiede bei 3 weiteren Labors (1, 5, 8).

3.3 Grobporenvolumen VP_g bei 60 hPa

Abbildung 7 zeigt die Grobporen-Werte bei 60 hPa als Boxplot, aufgeschlüsselt nach Beteiligung der Labors bzw. des Referenzlabors an den drei Arbeitsschritten Probenahme, Probenaufbereitung und Probenanalyse. Die Probenaufbereitung durch die einzelnen Labors (**RLR**) ergab Grobporen-Werte, die grösser sind als die Werte der vom Referenzlabor entnommenen, aufbereiteten und analysierten Proben (**RRR**), und die sich von ihnen auch statistisch knapp signifikant unterscheiden (die Kerben der Boxplots berühren sich). Erfolgte nur die Probenahme durch die einzelnen Labors (**LRR**), so resultierten daraus Werte, die kleiner sind als bei den durch das Referenzlabor entnommenen, aufbereiteten und analysierten Proben (**RRR**); diese beiden Werte unterscheiden sich voneinander auch statistisch knapp signifikant. Wenn die Labors nur die Analyse durchführten, ergaben sich hingegen - verglichen mit dem Referenzlabor - statistisch signifikant verschiedene Werte, wie der Vergleich **RRL** zu **RRR** zeigt. Die Werte der **LLL**-Proben und der **RRL**-Proben sind entsprechend nicht signifikant verschieden.

Da anscheinend wiederum die Probenanalyse das Resultat am stärksten beeinflusst hat, können die Werte des Verfahrens V1 aller Labors (inklusive Referenzlabor) miteinander verglichen werden (Abb. 8). Es gibt Labors mit eher kleiner (Labors 2, 7, 8 und 10) und solche mit eher grosser Variabilität der Werte (Labors 1, 3, 6 und 9). Auffallend ist die grosse Streubreite der gemessenen Werte: Die kleinsten Einzelwerte sind wenig grösser als 2 %, die grössten erreichen fast 16 %. Die Medianwerte pro Labor bewegen sich im Bereich von knapp 4 % (Labor 10) bis 12 % (Labor 1). Aufgrund der Medianwerte lassen sich die Labors im Verfahren 1 in vier Gruppen einteilen: Labor 10 bestimmte die mit Abstand kleinsten Werte, eher kleine Werte lieferten die Labors 2, 3 und 6, eher grössere Werte ergaben die Untersuchungen der Labors 8 und 9, während die Labors 1, 4 und 7 die grössten Werte lieferten.

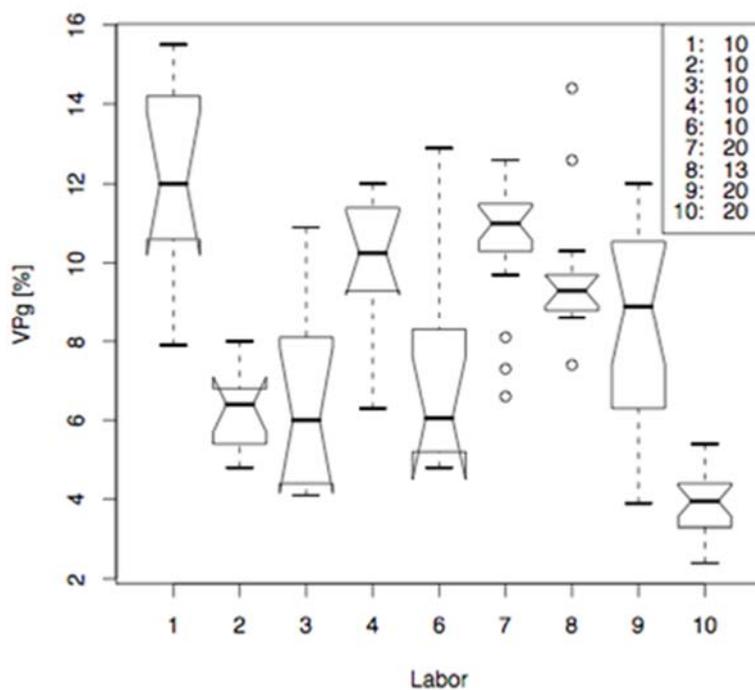
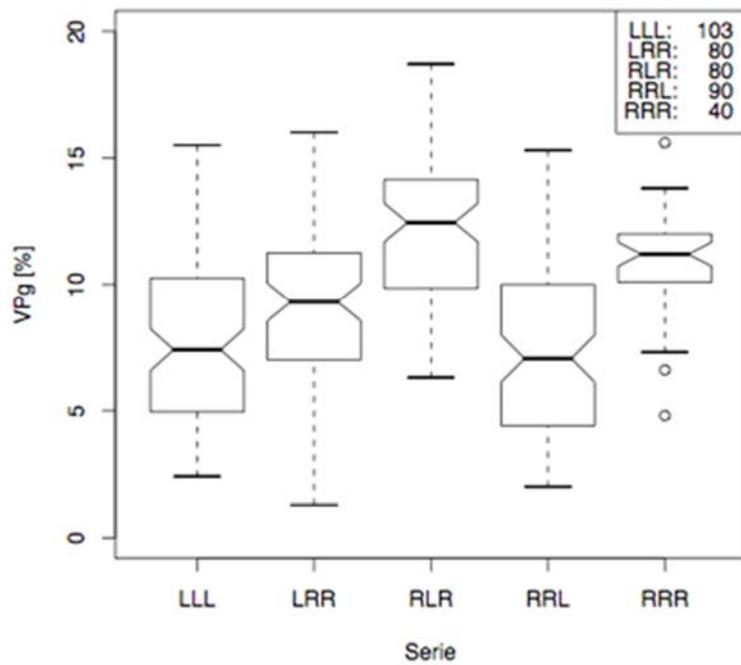


Abb. 7 | Grobporenvolumen VPg, aufgeschlüsselt nach den durch die einzelnen Labors (L) bzw. das Referenzlabor (R) durchgeführten Arbeitsschritten Probenahme (X.), Probenaufbereitung (.X.) und Probenanalyse (...X).

Die Zahlen in der Legende bezeichnen die Anzahl der Messwerte pro Serie.

Die Daten der Labors 9 und 10 enthalten neben den Ergebnissen ihrer Standardmethoden auch die Werte von zusätzlichen Validierungsmethoden.

Werden die Grobporen-Werte nach den verwendeten Methoden gruppiert (Abb. 9), zeigt sich, dass die Methode mit dem Drucktopf und die Bestimmung mit dem Luftpyknometer Grobporen-Werte um 5 % ergeben. Die Berechnung des Grobporenvolumens aus dem mit Luftpyknometer bestimmten Gesamtporenvolumen abzüglich des Wassergehalts bei 60 hPa ergibt grössere Werte, die sich aber statistisch von den direkt mit dem Luftpyknometer bei 60 hPa bestimmten Werten nicht signifikant unterscheiden. Die Bestimmung mit der Sandbox ergibt signifikant grössere Werte mit einem Median von 10 %. Sie fallen durch die grosse Spannweite der gemessenen Werte auf, von minimal 1 % bis 18 %. Der einzige mit der Schrumpfkurve bestimmte Wert passt zu den Sandbox-Werten.

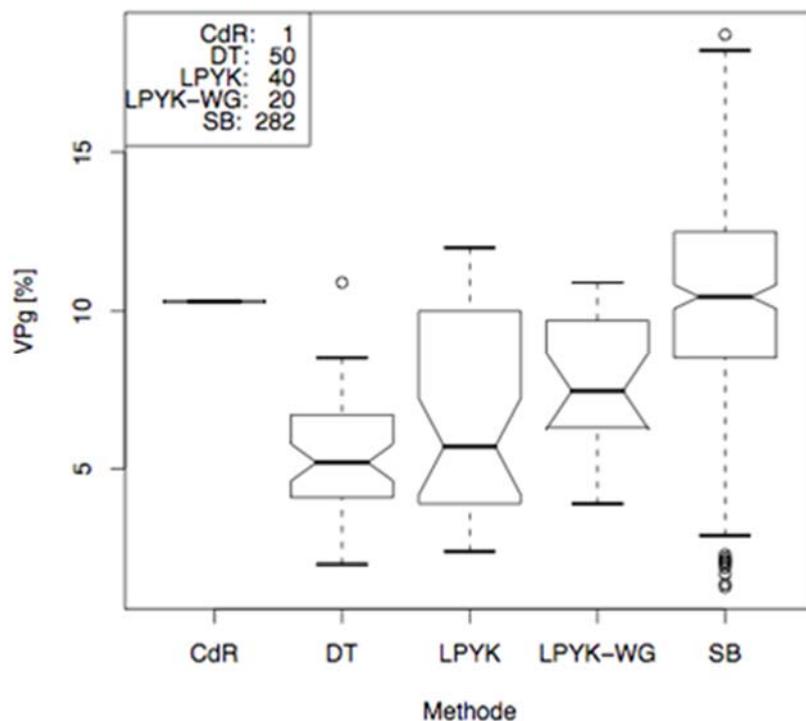


Abb. 9 | Grobporenvolumen VP_g 60 hPa, bestimmt von den einzelnen Labors im Verfahren 1, d. h. jedes Labor führte alle drei Arbeitsschritte Probenahme, Probenaufbereitung und Probenanalyse selber durch. Gruppierung nach den verwendeten Analysemethoden: CdR = Schrumpfkurve, DT = Drucktopf, LPYK = Luftpyknometer bei 60 hPa, LPYK-WG = Gesamtporenvolumen bestimmt mit LPYK minus Wassergehalt bei 60 hPa, SB = Sandbox.

Abbildung 10 zeigt die Differenzen delta R-L des Grobporenvolumens VP_g zwischen den einzelnen Labors und dem Referenzlabor, getrennt nach Beteiligung jedes einzelnen Labors und des Referenzlabors an den drei Arbeitsschritten. Die Differenzen werden verglichen mit der kleinsten gesicherten Differenz kgD aus der Zweiweg-Varianzanalyse (Verfahren x Labor). Zudem werden die Verfahrensmittel V1 bis V4 pro Labor und der Gesamtmittelwert pro Labor mit Hilfe des Gruppierungstestes nach Tukey beurteilt. In der Zusammenfassung ergibt sich dieselbe generelle Aussage wie bei der Gesamtbetrachtung, nämlich dass der Arbeitsschritt Probenanalyse praktisch immer (in 7 von 8 Fällen) zu Unterschieden führte, während dies bei Probenahme (5 von 8) und Probenaufbereitung (4 von 8) seltener, aber immer noch deutlich häufiger als bei den Lagerungsdichte-Untersuchungen der Fall war. Bei der Einzelfallbetrachtung wird wiederum deutlich, dass es sehr unterschiedliche Abweichungskonstellationen gibt; bei den Grobporen-Untersuchungen treten aber Fälle mit Abweichungen bei allen drei Arbeitsschritten häufiger auf (4 von 8 statt wie bei der Lagerungsdichte 1 von 9).

	V1	V2	V3	V4	Mittelwert V1-V4 pro Labor	delta R-L	kgD
VPq - Labor 1	12.1	9.4	10.1	12.9	11.1		
PN	10.8		11.5			0.8	
PA	11.1	11.1				0.0	2.0
AN	12.5	9.8				-2.8	
VPg - Labor 2	V1	V2	V3	V4	8.7	delta R-L	kgD
PN	6.3	9.3	13.2	6.0		1.8	
PA	7.8	9.7	7.6	9.6		-2.1	1.6
AN	6.1	11.2				5.1	
VPq - Labor 4	V1	V2	V3	V4	11.3	delta R-L	kgD
PN	10.0		12.7	11.3		2.0	
PA	10.0	11.3	12.0			-0.1	2.2
AN	11.3	10.6	8.4			-4.3	
VPq - Labor 6	V1	V2	V3	V4	7.8	delta R-L	kgD
PN	7.0	9.7	10.4	3.8		-1.3	
PA	8.4	8.7	6.8	7.1		-1.9	2.0
AN	5.4	10.1				4.6	
VPg - Labor 7	V1	V2	V3	V4	11.0	delta R-L	kgD
PN	10.6		11.3	11.2		0.6	
PA	10.6	11.0	11.2			0.3	1.6
AN	10.9	11.3				0.3	
VPq - Labor 8	V1	V2	V3	V4	9.8	delta R-L	kgD
PN	9.7	7.6	14.4	7.5		2.2	
PA	8.7	12.1	10.9			-4.5	2.1
AN	12.1	8.6	11.0			2.4	
VPq - Labor 9	V1	V2	V3	V4	9.2	delta R-L	kgD
PN	8.0	8.3	12.9	7.5		2.0	
PA	8.2	10.5	10.2			-2.5	1.9
AN	7.9	7.9	10.6			2.8	
VPg - Labor 10	V1	V2	V3	V4	5.8	delta R-L	kgD
PN	3.8	2.1	13.1	4.0		5.6	
PA	2.9	8.5	3.0	8.6		-5.4	1.5
AN	3.9	3.9	7.6			3.7	

Abb. 10 | Differenz delta R-L zwischen den Grobporenvolumenwerten VPg, getrennt nach den durch die einzelnen Labors (L) bzw. das Referenzlabor (R) durchgeführten Arbeitsschritten Probenahme (X.), Probenaufbereitung (.X.) und Probenanalyse (..X). PN = (V1+V2)/2 bzw. (V3+V4)/2, PA = (V1+V3)/2 bzw. (V2+V4)/2, AN = (V1+V4)/2 bzw. (V2+V3)/2.

Mittelwerte pro Arbeitsschritt: grün = Labor mit deutlich kleineren, rot = Labor mit deutlich grösseren Werten als das Referenzlabor, verglichen mit der kleinsten gesicherten Differenz kgD.

Verfahrensmittel V1 bis V4 und Gesamtmittelwert: grün = günstigste, rot = ungünstigste Werte aufgrund des Gruppierungstestes nach Tukey.

Der zwecks Beurteilung der standörtlichen Heterogenität pro Labor angestellte Vergleich des Grobporenvolumens VPg zwischen den beiden Teilflächen A und B zeigt (Abb. 11), dass sich die Grobporenvolumenwerte VPg für die Labors 1, 2 und 9 signifikant unterscheiden und dass die Variabilität innerhalb der Teilflächen bei den Labors 1, 2, 8, 9, 10 unterschiedlich gross ist. Weil der Vergleich mit Boxplots bei derart kleinen Probenanzahlen nicht eindeutig ist, wurden die Grobporenvolumenwerte VPg zusätzlich noch mit verteilungsfreien Gruppierungstests überprüft. Danach sind die Unterschiede in einem Fall (Labor 9) statistisch signifikant, in einem weiteren Fall (Labor 2) nur tendenziell vorhanden.

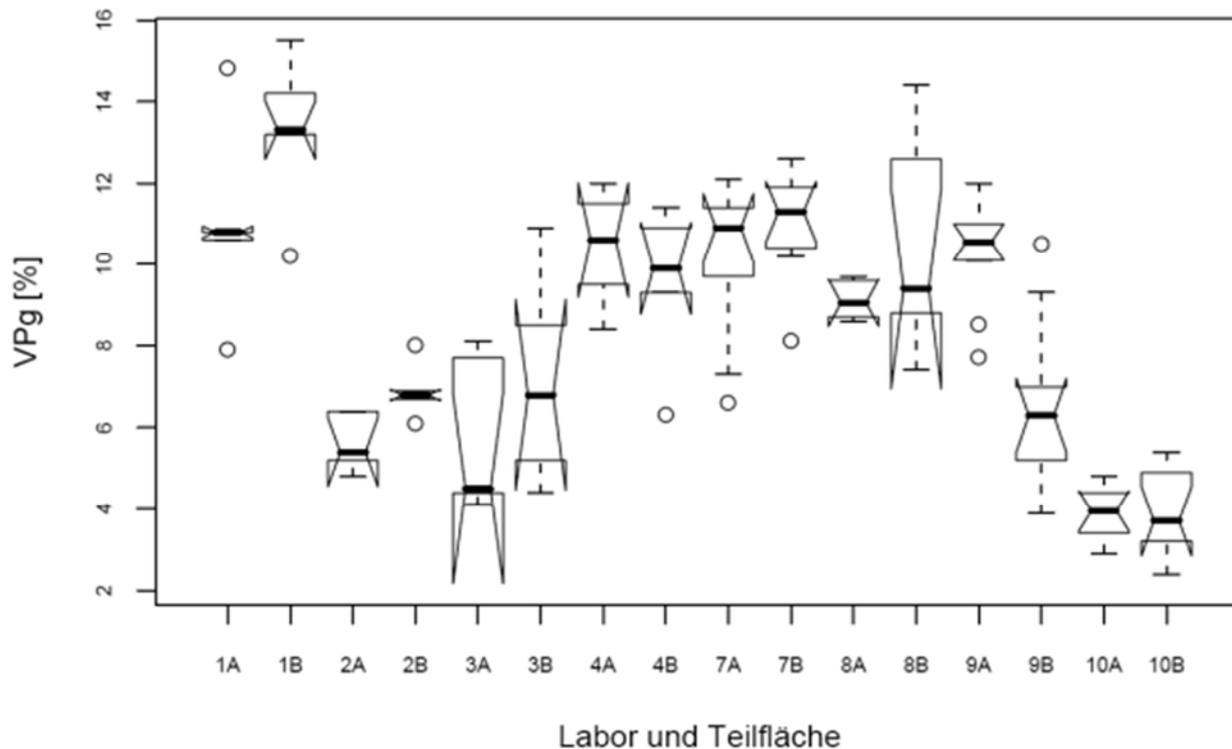


Abb. 11 | Grobporenvolumenwerte VP_g , bestimmt von den einzelnen Labors in den beiden Teilflächen A und B der Beprobungsfläche 1 im Verfahren 1 (Probenahme, Probenaufbereitung und Probenanalyse durch die Labors).

Die Darstellung mit Boxplots ergibt signifikant unterschiedliche Grobporenvolumenwerte VP_g für die Labors 1, 2 und 9. Der zusätzliche Paarvergleich mit verteilungsfreien Gruppierungstests zeigt einen signifikanten Unterschied für Labor 9 und einen tendenziellen Unterschied bei Labor 2.

3.4 Gesamtporenvolumen VP_t

Abbildung 12 zeigt die Gesamtporen-Werte als Boxplot, aufgeschlüsselt nach Beteiligung der Labors bzw. des Referenzlabors an den drei Arbeitsschritten Probenahme, Probenaufbereitung und Probenanalyse. Probenahme oder Probenaufbereitung durch die einzelnen Labors (**LRR** oder **RLR**) ergab Werte, die sich von den vollständig durch das Referenzlabor bestimmten Proben (**RRR**) nicht signifikant unterscheiden (die Kerben der Boxplots überlappen sich). Die Werte der Kombinationen **LLL** und **RRL** unterstützen diese Aussage: Probenahme und Probenaufbereitung zusammen führten nicht zu signifikant verschiedenen Werten. Hingegen ergab die Probenanalyse durch die Labors bzw. durch das Referenzlabor eindeutig unterschiedliche Ergebnisse, wie der Vergleich der Kombinationen **RRR** mit **LLL** und vor allem **RRR** mit **RRL** klar zeigt: Im letzteren Fall wurde einzig die Messung durch eines der Labors bzw. durch das Referenzlabor ausgeführt.

Da anscheinend auch bei der Gesamtporenvolumen-Bestimmung die Probenanalyse das Ergebnis am stärksten beeinflusst hat, können die Werte des Verfahrens V1 aller Labors (inklusive Referenzlabor) miteinander verglichen werden (Abb. 13). Die Variabilität der Mediane, ausgedrückt als 95%-Vertrauensbereich (entsprechend der Kerbenhöhe), beträgt 1 bis 2 %. Der Wertebereich von 43 bis 50 % Gesamtporenvolumen wird von den Ergebnissen der einzelnen Labors lückenlos überstrichen, wobei sich drei Gruppen herauschälen lassen: Die kleinsten Werte lieferten die Labors 3 und 10, mittlere Werte bestimmten die Labors 4, 6 und 9, während die grössten Werte von den Labors 1, 5 und 7 stammten.

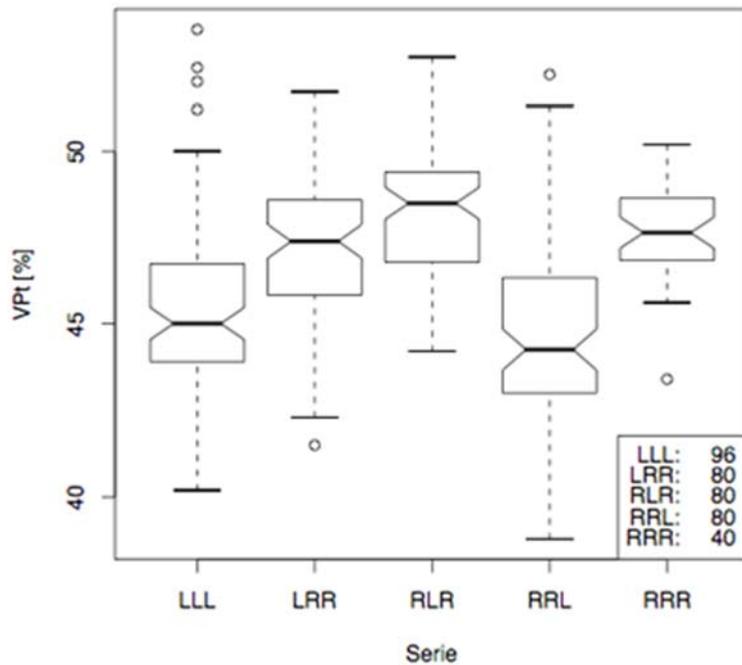


Abb. 12 | Gesamtporenvolumen VPt, aufgeschlüsselt nach den durch die einzelnen Labors (L) bzw. das Referenzlabor (R) durchgeführten Arbeitsschritten Probenahme (X.), Probenaufbereitung (.X.) und Probenanalyse (..X). Die Zahlen in der Legende bezeichnen die Anzahl der Messwerte pro Serie.

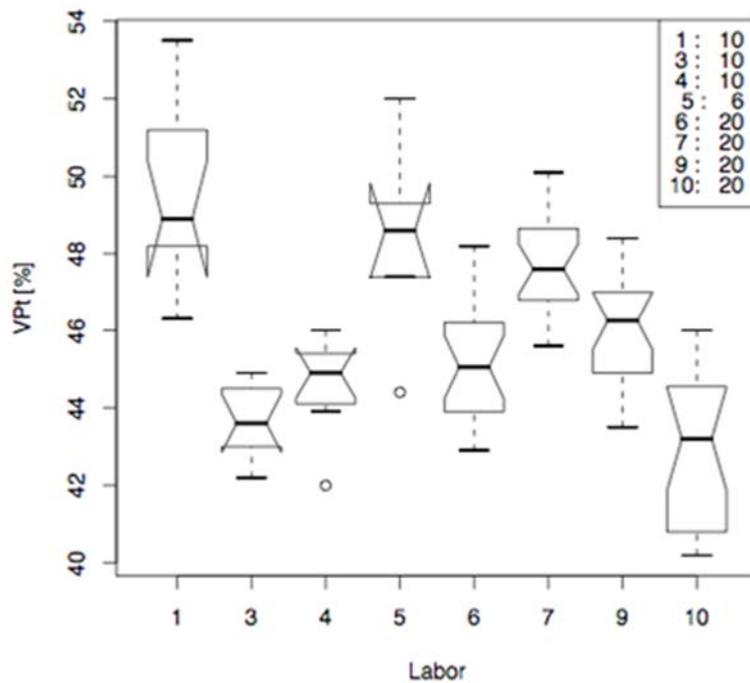


Abb. 13 | Gesamtporenvolumen VPt, bestimmt von den einzelnen Labors im Verfahren V1, das heißt alle drei Arbeitsschritte Probenahme, Probenaufbereitung und Probenanalyse wurden durch die einzelnen Labors durchgeführt (LLL, für Labor 7 als Referenzlabor RRR). Die Daten der Labors 6, 9 und 10 enthalten neben den Ergebnissen ihrer Standardmethoden auch die Werte von zusätzlichen Validierungsmethoden.

Werden die Gesamtporen-Werte aller Labors nach den verwendeten Methoden gruppiert (Abb. 14), wird deutlich, dass je nach Methode unterschiedliche Werte resultieren. Die Methode des Sättigungsgewichtes (SG) liefert die kleinsten Werte, die aber statistisch nicht signifikant verschieden von den mit Luftpyknometer direkt bestimmten, leicht grösseren Werten sind. Die aus den mit dem Luftpyknometer bei 60 hPa bestimmten Grobporenvolumen zuzüglich des Wassergehalts bei 60 hPa berechneten Gesamtporenvolumen sind noch etwas und statistisch signifikant grösser. Die Berechnung aus Lagerungsdichte D_a und reeller Dichte D_s liefert schliesslich Werte von 42 bis 53 % mit einem Median von 47,5 %; diese Methode ist die von den beteiligten Labors am häufigsten verwendete.

Einzelne Labors haben das Gesamtporenvolumen VP_t nicht nur mit ihrer Standardmethode bestimmt, sondern noch eine unabhängige zweite Methode eingesetzt. Diese Direktvergleiche zeigten folgende Effekte:

- Der Vergleich zwischen der Gesamtporenvolumen-Bestimmung mittels Sättigungsgewicht oder mittels Berechnung aus der Lagerungsdichte D_a und der reellen Dichte D_s ergab keine signifikanten Unterschiede (Labor 6);
- Der Vergleich zwischen der Gesamtporenvolumen-Bestimmung mittels Addition von Luftpyknometerwert bei 60 hPa und gravimetrischem Restwassergehalt bei 60 hPa oder mittels Berechnung aus der Lagerungsdichte D_a und der reellen Dichte D_s ergab keine signifikanten Unterschiede (Labor 9);
- Der Vergleich zwischen der Gesamtporenvolumen-Bestimmung mittels Sättigungsgewicht oder mittels Direktbestimmung mit Luftpyknometer ergab signifikante Unterschiede (Labor 10).

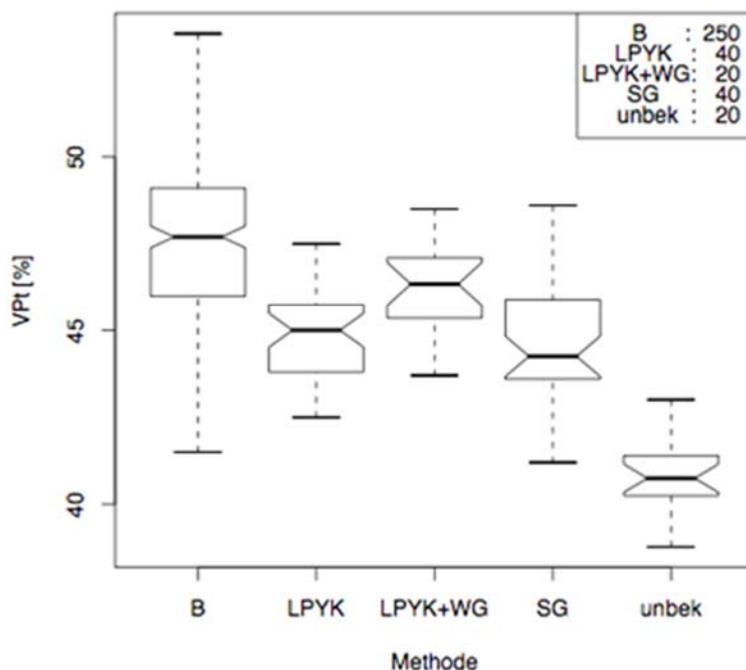


Abb. 14 | Gesamtporenvolumen VP_t , bestimmt von den einzelnen Labors im Verfahren 1, das heisst jedes Labor führt alle drei Arbeitsschritte Probenahme, Probenaufbereitung und Probenanalyse selber durch. Darstellung der Werte gruppiert nach den verwendeten Labormethoden: B = Berechnung aufgrund von Lagerungsdichte D_a und reeller Dichte D_s , LPYK = Luftpyknometer, LPYK+WG = Grobporenvolumen VP_g mit Luftpyknometer bestimmt plus Wassergehalt bei 60 hPa, SG = Sättigungsgewicht, unbek = keine Angabe.

Abbildung 15 zeigt die Differenzen delta R-L des Gesamtporenvolumens *VPt* zwischen den einzelnen Labors und dem Referenzlabor, getrennt nach Beteiligung jedes einzelnen Labors und des Referenzlabors an den drei Arbeitsschritten. Die Differenzen werden wiederum verglichen mit der kleinsten gesicherten Differenz *kgD* aus der Zweiweg-Varianzanalyse (Verfahren x Labor). Zudem werden die Verfahrensmittel V1 bis V4 pro Labor und der Gesamtmittelwert pro Labor mit Hilfe des Gruppierungstestes nach Tukey beurteilt. In der Zusammenfassung ergibt sich dieselbe generelle Aussage wie bei der Gesamtbetrachtung, nämlich dass der Arbeitsschritt Probenanalyse praktisch immer (in 5 von 6 Fällen) zu Unterschieden führte, während dies bei Probenahme (2 von 6) und Probenaufbereitung (1 von 6) seltener der Fall war. Diese Verhältnisse deuten noch etwas stärker auf den Arbeitsschritt Analyse als Hauptursache für zusätzliche Variabilität zwischen den Labors hin als dies bei den Lagerungsdichte-Untersuchungen der Fall war.

VPt - Labor	Mittelwert V1-V4 pro Labor				Mittelwert V1-V4 pro Labor	delta R-L	kgD
	V1	V2	V3	V4			
VPt - Labor 1	V1 49.5	V2 47.6	V3 47.1	V4 49.5	48.4		
PN	48.6		48.3			-0.2	
PA	48.3	48.6				0.3	1.7
AN	49.5	47.4				-2.1	
VPt - Labor 4	V1 44.7	V2	V3 48.9	V4 48.4	46.7		
PN	44.7		47.7			3.0	
PA	46.8	46.4				-0.4	1.6
AN	46.5	48.9				3.4	
VPt - Labor 6	V1 44.5	V2 47.3	V3 47.2	V4 43.0	45.5		
PN	45.9		45.1			-0.8	
PA	45.9	45.2				-0.7	1.4
AN	43.8	47.3				3.5	
VPt - Labor 7	V1 47.7	V2	V3 47.7	V4 47.7	47.7		
PN	47.7		47.7			0.0	
PA	47.7	47.7				0.0	1.1
AN	47.7	47.7				0.0	
VPt - Labor 9	V1 45.6	V2 46.9	V3 48.4	V4 45.1	46.5		
PN	46.2		46.7			0.5	
PA	47.0	46.0				-1.0	1.2
AN	46.3	47.6				2.3	
VPt - Labor 10	V1 41.0	V2 42.8	V3 48.9	V4 40.7	43.4		
PN	41.9		44.8			3.0	
PA	45.0	41.8				-3.2	1.1
AN	40.9	45.9				5.0	

Abb. 15 | Differenz delta R-L zwischen den Gesamtporenvolumenwerten *VPt*, getrennt nach den durch die einzelnen Labors (L) bzw. das Referenzlabor (R) durchgeführten Arbeitsschritten Probenahme (X..), Probenaufbereitung (.X.) und Probenanalyse (..X). PN = (V1+V2)/2 bzw. (V3+V4)/2, PA = (V1+V3)/2 bzw. (V2+V4)/2, AN = (V1+V4)/2 bzw. (V2+V3)/2. Mittelwerte pro Arbeitsschritt: grün = Labor mit deutlich kleineren, rot = Labor mit deutlich grösseren Werten als das Referenzlabor, verglichen mit der kleinsten gesicherten Differenz *kgD*. Verfahrensmittel V1 bis V4 und Gesamtmittelwert: grün = günstigste, rot = ungünstigste Werte aufgrund des Gruppierungstestes nach Tukey.

3.5 Reelle Dichte *Ds*

Abbildung 16 zeigt die Werte der reellen Dichte *Ds* als Boxplot, aufgeschlüsselt nach Beteiligung der Labors bzw. des Referenzlabors an den drei Arbeitsschritten Probenahme, Probenaufbereitung und Probenanalyse. Probenahme oder Probenaufbereitung durch die einzelnen Labors (**LRR** oder **RLR**) ergab reelle Dichte-Werte, die sich von den durch das Referenzlabor bestimmten Proben (**RRR**) nicht unterscheiden. Die Werte der Kombinationen **LLL** und **RRL** unterstützen die Aussage: Probenahme und Probenaufbereitung spielen auch zusammen keine Rolle. Hingegen führt die reelle Dichte-Messung durch die Labors bzw. das Referenzlabor zu eindeutig unterschiedlichen Ergebnissen. Dies zeigt der Vergleich

der Kombinationen **RRR** mit **LLL** und vor allem **RRR** mit **RRL** klar: Im letzteren Fall wurde einzig die Messung durch eines der Labors oder das Referenzlabor ausgeführt.

Werden die reelle Dichte-Werte des Verfahrens V1 aller Labors (inklusive Referenzlabor) miteinander verglichen (Abb. 17), zeigt sich, dass die Labors 1, 3, 6 und 7 sowie die Labors 5 und 9 ähnliche Werte ermitteln, wobei angesichts der wenigen Werte die Aussage nur für die zweite Gruppe vertretbar ist.

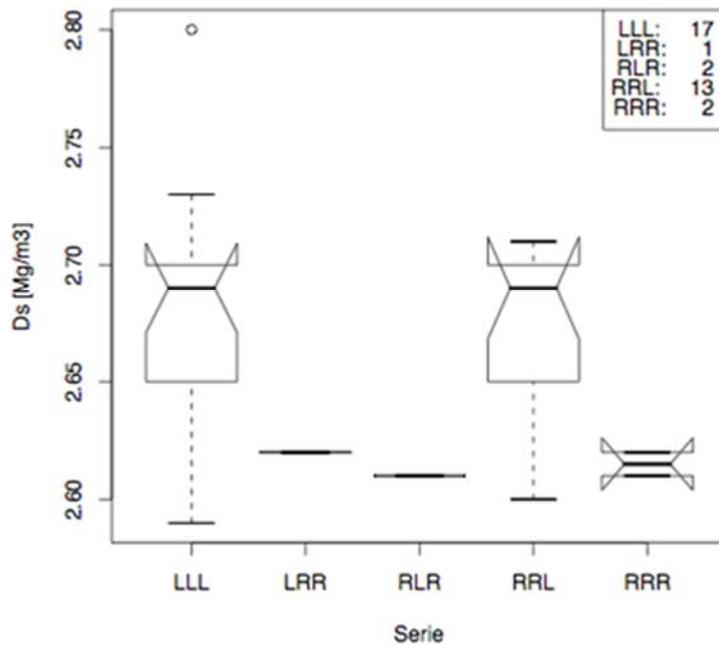


Abb. 16 | Reelle Dichte D_s , aufgeschlüsselt nach den durch die einzelnen Labors (L) bzw. das Referenzlabor (R) durchgeführten Arbeitsschritten Probenahme (X.), Probenaufbereitung (X.) und Probenanalyse (..X).

Die Zahlen in der Legende bezeichnen die Anzahl der Messwerte pro Serie.

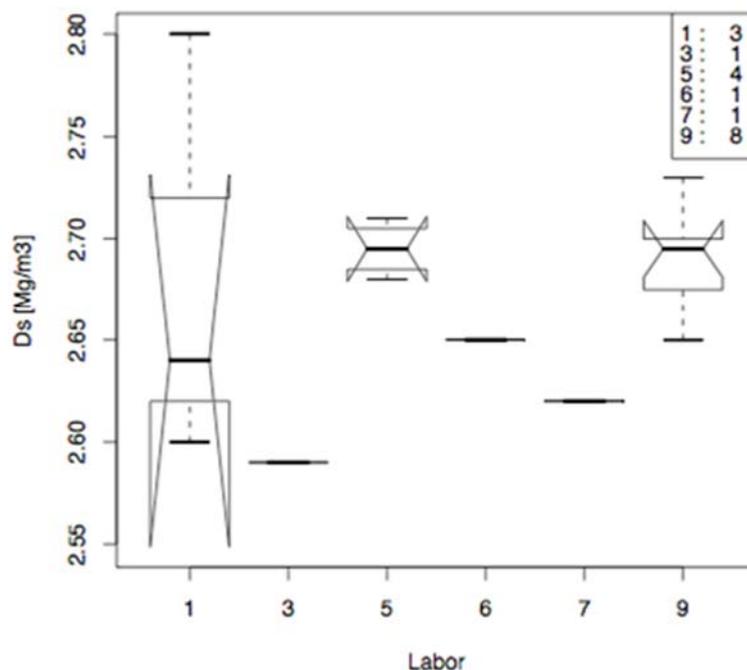


Abb. 17 | Reelle Dichte D_s , bestimmt von den einzelnen Labors im Verfahren V1, das heißt alle drei Arbeitsschritte Probenahme, Probenaufbereitung und Probenanalyse wurden durch die einzelnen Labors durchgeführt (LLL, für Labor 7 als Referenzlabor RRR).

3.6 Gesättigte Wasserleitfähigkeit pK_{sat}

Bei der gesättigten Wasserleitfähigkeit pK_{sat} wurden Probenahme, Probenaufbereitung und Probenanalyse jeweils durch die einzelnen Labors ausgeführt (entsprechend Verfahren 1 bei der Bestimmung von Lagerungsdichte D_a und Grobporenvolumen VP_g), das heisst es wurden nur die Kombinationen **LLL** bzw. **RRR** realisiert.

Abbildung 18 zeigt die Werte der einzelnen Labors. Es wurden pK_{sat} -Einzelwerte im Bereich von 3 bis 8 bestimmt, die Mediane der Labors liegen bei 5 bis 6,5. Auffällig ist die Variabilität der Werte (ersichtlich an der Breite der Kerben), die sich auch je nach Labor unterscheidet: Labor 2 weist eine Streuung von 0,1 auf, Labor 6 eine solche von über 3.

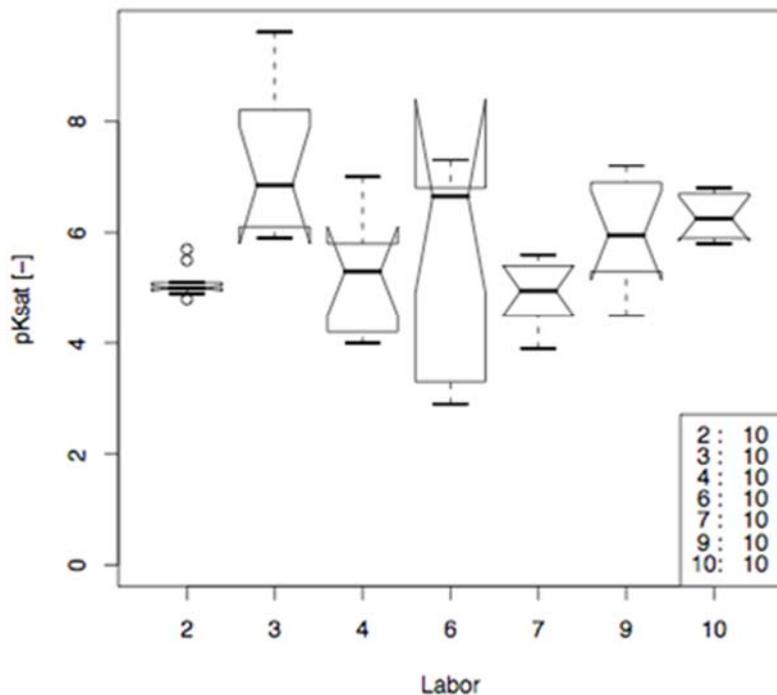


Abb. 18 | Gesättigte Wasserleitfähigkeit pK_{sat} , bestimmt von den einzelnen Labors, das heisst alle drei Arbeitsschritte Probenahme, Probenaufbereitung und Probenanalyse wurden durch die einzelnen Labors durchgeführt (**LLL**, für Labor 7 als Referenzlabor **RRR**).

Die Zahlen in der Legende bezeichnen die Anzahl der Messwerte pro Serie.

Methodisch nutzte Labor 2 als einziges Labor die Messanordnung mit fallender Druckhöhe; zudem verwendete es Proben von 100 mm Länge gegenüber 40 bis 50 mm bei den übrigen Labors. Die in Abbildung 19 dargestellte Gruppierung der Werte nach der Probenlänge (lang und kurz) sieht daher sehr ähnlich aus wie die Darstellung gruppiert nach Labor (nicht dargestellt). Bei den langen Proben war die Variabilität deutlich geringer.

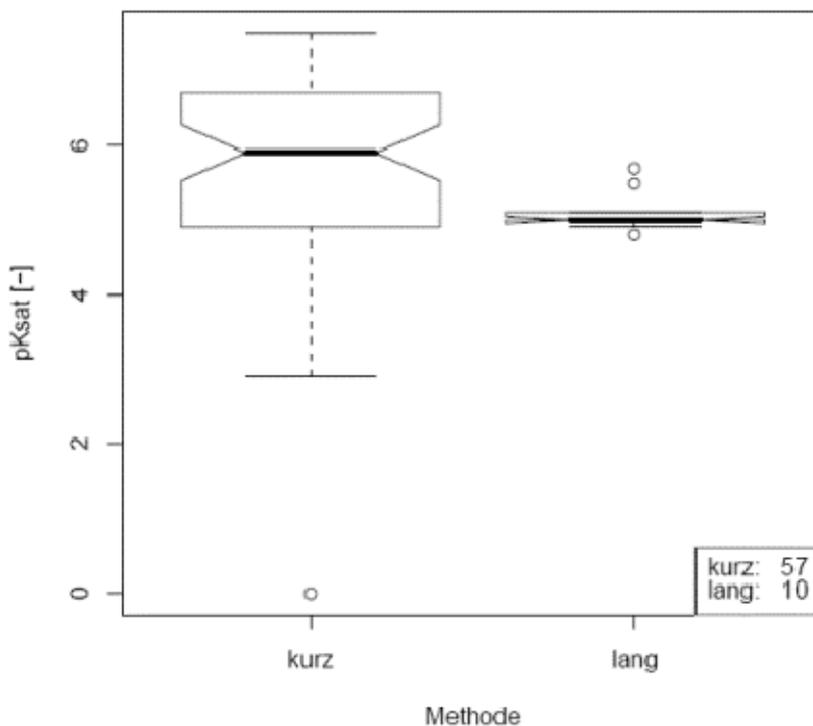


Abb. 19 | Gesättigte Wasserleitfähigkeit pK_{sat} , bestimmt von den einzelnen Labors, d. h. alle drei Arbeitsschritte Probenahme, Probenaufbereitung und Probenanalyse wurden durch die einzelnen Labors durchgeführt.

Darstellung der Werte gruppiert nach der verwendeten Probenlänge.

4 Zusammenfassung

4.1 Lagerungsdichte D_a

Probenahme und Probenaufbereitung beeinflussten die Messwerte statistisch nicht nachweisbar. Dagegen war ein Einfluss der Probenanalyse auf die Lagerungsdichte-Werte erkennbar. Diese Unterschiede lassen sich nicht mit dem Einfluss der verwendeten Methodenprinzipien erklären. Vermutlich sind Handlungsabläufe oder methodische Details wichtig, die in den Methodenbeschreibungen (siehe Methodenraster im Anhang) nicht zum Ausdruck kommen.

Kleinräumige Unterschiede des Bodens haben bei allen Verfahren zur Variabilität der Messwerte beigetragen. Die Auswertung der Ringversuchsergebnisse hat aber gezeigt, dass die bodenbedingte Heterogenität nicht die grösste Variabilitätsursache ist, sondern dass sie offenbar derart klein ist, dass sie zusammen mit den Einflüssen von Probenahme, Probenaufbereitung und Probenanalyse nicht zu nachweisbaren systematischen Unterschieden geführt hat.

4.2 Grobporenvolumen VP_g bei 60 hPa

Probenahme und Probenaufbereitung beeinflussten die Messwerte statistisch knapp nachweisbar. Am stärksten wirkte sich auch bei der Grobporenbestimmung die Probenanalyse aus. Die festgestellten Unterschiede lassen sich mit einem direkten Einfluss der verwendeten Methodenprinzipien nur schwer erklären. Vermutlich sind auch hier Handlungsabläufe oder methodische Details wichtig, die sich nicht direkt aus den Methodenbeschreibungen ablesen lassen (siehe Methodenraster im Anhang).

Ein früherer Vergleich zwischen Sandbox und Drucktopf, ausgeführt im gleichen Labor und von derselben Person, ergab kleinere Grobporenvolumina mit der Sandbox-Methode (Isler *et al.*, 2002). Bei beiden Methoden ist der hydraulische Kontakt zwischen Probe und Unterlage sehr wichtig. Bei Sandboxes wird die eingestellte Saugspannung an der Sandoberfläche zudem nur in den wenigsten Fällen überprüft. Die

Evaporation wird durch das Dampfdruckdefizit der Luft über der Sandoberfläche beeinflusst; meistens wird versucht, die Evaporation mittels einer Abdeckung (Deckel, Folie) zu vermindern. Der Erfolg dieser Massnahmen hängt jedoch ab vom Luftvolumen zwischen Sandoberfläche und Abdeckung, von der Qualität der Abdeckung und von der Dauer der Unterbrüche bei Kontrollen. Schlechter Kontakt zwischen Probe und Unterlage führt wegen ungenügendem Druckausgleich und beschränktem Wasserfluss tendenziell zu kleineren Grobporenvolumen-Werten, unkontrollierte Evaporation wegen grösserer Saugspannung zu eher grösseren Grobporenvolumen-Werten.

4.3 Gesamtporenvolumen V_{Pt}

Probenahme und Probenaufbereitung haben die Messwerte statistisch nicht nachweisbar beeinflusst. Das Gesamtporenvolumen wird von den einzelnen Labors auf methodisch unterschiedliche Art bestimmt: Erstens aus der Gewichts-differenz zwischen gesättigten und völlig getrockneten Proben, zweitens aus reeller Dichte und Lagerungsdichte, und drittens mittels direkter Bestimmung via Luftpyknometer. Bei der ersten und dritten Methode muss das Probenvolumen bekannt sein, bei der zweiten Methode die reelle Dichte. Bei der ersten Methode ist die Bestimmung des Sättigungsgewichtes kritisch, da die Entleerung der grössten Poren nicht einfach zu verhindern ist. Allfällige Fehler bei der Differenzenbildung sind jedoch weniger gravierend als bei der zweiten Methode, wo der Quotient aus zwei Dichtewerten bestimmt wird. Beim Pyknometer hängt die Genauigkeit vom Verhältnis zwischen Probenvolumen und Pyknometer-Volumen ab. Ohne Angabe der geschätzten Messfehler bei den Ausgangsgrössen und der berechneten Messfehler bei den Resultaten kann die Genauigkeit der Angaben allerdings nicht richtig beurteilt werden.

4.4 Gesättigte Wasserleitfähigkeit pK_{sat}

Die Ergebnisse der Messungen erlauben die Schlussfolgerung, dass Proben der Länge 100 mm zusammen mit der Messung in der Apparatur des betreffenden Labors Resultate mit geringer Variabilität ergeben – bei allen anderen Kombinationen aus Probenlänge und Messapparatur war die Variabilität grösser. Je grösser die Variabilität der Ergebnisse ist, desto grösser ist die notwendige Anzahl Proben, um eine vorgegebene Standardabweichung des Mittelwertes zu erreichen. Die Messwerte der langen Proben liegen absolut betrachtet im Bereich kleinerer pK_{sat} -Werte bzw. grösserer Leitfähigkeiten.

Im Gegensatz dazu ergab eine frühere Vergleichsstudie, bei der lange und kurze Proben im gleichen Labor analysiert worden waren, dass die pK_{sat} -Werte langer Proben im oberen Bereich der pK_{sat} -Werte der kurzen Proben lagen, das heisst dass die Leitfähigkeit von langen Proben tendenziell eher kleiner war als die von kurzen Proben (Buchter *et al.*, 2000). Dieses Ergebnis ist mit der grösseren Wahrscheinlichkeit des Auftretens kontinuierlicher Makroporen bei kürzeren Proben erklärbar. Dazu kommt die grössere Wahrscheinlichkeit probenahmebedingter künstlicher Makroporen zwischen Bodenprobe und Zylinderinnenwand. Kleinere Leitfähigkeiten, das heisst grössere pK_{sat} -Werte bei kurzen Proben wie in dieser Studie sind mit diesen Hypothesen nicht zu erklären. Sie sind wohl eher Hinweise auf Einflüsse von Probenahme (Stauchung) und Probenaufbereitung (verschmierte Probenquerschnittsflächen), die allerdings im Ringversuch 2007 bei diesem Parameter nicht systematisch untersucht worden sind.

5 Fazit

Aufgrund der im Ringversuch 2007 gewonnenen Erkenntnisse und den Erfahrungen der daran Beteiligten lassen sich zusammengefasst folgende Probleme und Empfehlungen formulieren:

- Die Unterschiede zwischen den Untersuchungsergebnissen der einzelnen Labors lassen sich oftmals nicht aufgrund der verwendeten Methodenprinzipien erklären, sondern hängen vermutlich mit der spezifischen Realisierung von Arbeitsschritten und -abläufen in den einzelnen Labors zusammen bzw. ergeben sich aus Wechselwirkungen verschiedener Einflussgrößen.
- Eine standörtliche Heterogenität der Beprobungsfläche liess sich – beurteilt anhand der Untersuchungsergebnisse aus den beiden Teilflächen A und B – bei einzelnen Labors zwar erkennen. Die Bodenheterogenität beeinflusste die Resultate des Ringversuches 2007 aber deutlich weniger als die geprüften methodischen Verfahren, insbesondere die Probenanalyse.
- Etwas überraschend hat die Probenanalyse im Labor den stärksten Einfluss auf die Resultate gezeigt, nicht die Arbeitsschritte Probenahme und Probenaufbereitung und auch nicht die standörtliche Heterogenität. Vor dem Hintergrund der kleinräumigen Variabilität des beprobten Bodens war ein genereller Effekt von Probenahme oder Probenaufbereitung auf die Bestimmung der Lagerungsdichte D_a , des Grobporenvolumens VP_g , und des Gesamtporenvolumens VP_t statistisch zwar nicht klar erkennbar. Werden aber die Ergebnisse der einzelnen Labors betrachtet, zeigt sich, dass auch Probenahme und Probenaufbereitung die Untersuchungsergebnisse beeinflusst haben. Der Einfluss der methodischen Arbeitsschritte auf das Untersuchungsergebnis nimmt von der Lagerungsdichte- über die Gesamtporenvolumen- bis zur Grobporenvolumenbestimmung zu, das heisst je stärker die Qualität des Porensystems durch eine Methode erfasst wird, umso grösser werden die Variabilitätsanteile der methodischen Arbeitsschritte.
- Der Analyseinfluss hängt auch von den möglichen Messfehlern (Ungenauigkeiten) ab, und diese wiederum werden unter anderem von der Probengrösse beeinflusst. Zur genaueren Bestimmung von Lagerungsdichte, Grobporenvolumen und Gesamtporenvolumen sind vermutlich eher grössere Proben zu verwenden, insbesondere bei heterogeneren Böden. Für die Bestimmung der gesättigten Wasserleitfähigkeit könnte die Verwendung von längeren Proben vorteilhaft sein. Zu diesen Aspekten werden im Rahmen des Projektes bei der Methodenentwicklung und -validierung detailliertere Abklärungen gemacht.
- Als kritischer Punkt bei der Probenahme wurde identifiziert:
 - Bei der Bestimmung der gesättigten Wasserleitfähigkeit könnte der Arbeitsschritt Probenahme eine Rolle gespielt haben. Da im Ringversuch 2007 bei diesem Parameter nur das Verfahren 1 (**LLL** und **RRR**) realisiert worden ist, kann das Ausmass der Gefügeveränderungen einer Probe, das durch die Probenahme entstanden ist, nicht quantifiziert werden.
- Als kritische Punkte bei der Probenaufbereitung wurden identifiziert:
 - Bei der mittel- bis längerfristigen Lagerung von Proben bei 100 % Luftfeuchtigkeit und 20 °C besteht das Risiko von biologischen Prozessen, welche Auswirkungen unbekanntes Ausmasses auf den Porenanteil haben könnten. Empfehlenswert ist daher die kurzfristige Lagerung von Proben im Kühlschrank oder Kühlraum.
 - Bei der Probenaufbereitung ist dringend darauf zu achten, dass die Zylinderoberflächen nicht verschmiert werden. Unabhängig davon, ob für die Probenpräparation ein Messer oder eine Säge verwendet wird, sollte überstehendes Probenmaterial möglichst abgebrochen und nicht abgeschnitten werden.
- Als kritische Punkte bei der Probenanalyse wurden identifiziert:
 - Die Bestimmung des Bezugsvolumen einer Bodenprobe wird unterschiedlich gehandhabt; dieser Punkt muss sowohl konzeptionell als auch operativ geklärt werden.

- Beim Bestimmen des gesättigten Wassergehalts bzw. des Sättigungsgewichts tritt zwangsläufig ein Wasserverlust beim Übergang von der Desorptionsanlage (z. B. Sättigungs-Box) zur Waage auf. Dieser hat einen Einfluss auf die Messung und muss deshalb vermieden werden (durch Verwendung von Schalen o. ä.).
- Die an der Apparatur eingestellte Saugspannung zur Bestimmung des Grobporenvolumens muss kontrollierbar sein. Dabei gilt es auch zu berücksichtigen, dass die Saugspannung an der Probenober- und -unterseite nicht gleich gross ist.
- Als kritische Punkte bei der Datenauswertung wurden identifiziert:
 - Statistische Verfahren zur Beurteilung der Resultatequalität werden erst sporadisch und uneinheitlich eingesetzt.
 - Eine Interpretation der Ergebnisse im Hinblick auf ihre fachliche Bedeutung wird praktisch nicht vorgenommen.
- Die Qualitätssicherung wird von den verschiedenen Labors sehr uneinheitlich gehandhabt. Praktisch jedes Labor verwendet zwar Kontrollkriterien, eine einheitliche Vorgabe der zu kontrollierenden Punkte gibt es aber nicht. Die Systematisierung der Qualitätssicherung ist eines der wichtigsten Ziele dieses Projektes. Eine wichtige, bislang vernachlässigte Komponente der Qualitätssicherung ist insbesondere die systematische Anwendung einer Fehlerrechnung für jede Methode.
- Um den Einfluss der Analytik auf das Messresultat erfassen zu können, muss die Heterogenität des Bodens ausgeschaltet werden. Dazu sind standardisierte Referenzproben nötig. Referenzproben verhalten sich hydraulisch wie Böden, weisen aber eine absolut stabile Matrix auf, das heisst, an ihnen kann eine unbeschränkte Anzahl von Messungen durchgeführt werden. Dies eröffnet die Möglichkeit, dass dieselbe Probe unabhängig von Probenahme- und Probenaufbereitungseffekten von allen am Ringversuch beteiligten Labors wiederholt analysiert werden kann.

5.1 Ausblick

Parallel zum Ringversuch 2007 und dessen Auswertung sind Arbeiten zur Bereitstellung von Referenzproben und zur Validierung der Referenzmethoden für die Analyse von Lagerungsdichte D_a , Grobporenvolumen PV_g und gesättigter Wasserleitfähigkeit pK_{sat} durchgeführt worden. Die Erkenntnisse aus dem Ringversuch 2007 fliessen in diese methodischen Weiterentwicklungen ein und werden für die Ausarbeitung der neuen Referenzmethoden berücksichtigt.

Weil der Ringversuch 2007 gezeigt hat, dass die Analytik im Allgemeinen die häufigste und zugleich deutlichste Ursache von Resultatunterschieden zwischen den beteiligten Labors war, wird die Verbesserung dieses Arbeitsschrittes im nächsten Ringversuch 2009 im Vordergrund stehen. Sobald operable Referenzproben zur Verfügung stehen, werden diese den beteiligten Labors im Rahmen des Ringversuches 2009 zur Verfügung gestellt, um ihnen Gelegenheit zu geben, ihre Analytik mit Hilfe dieser Referenzproben zu überprüfen. Bei der Durchführung und Auswertung dieser Prüfarbeiten wird das Projektteam die Labors unterstützen.

Literatur

Berli M. & Weisskopf P., 2006. Physikalische Kenngrößen von Schweizer Böden – Methodische Aspekte und Ringversuchs-Konzept. Interner Bericht Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART zu BAFU-Vorstudie; 25 S.

Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz, 2004. Definition und Erfassung von Bodenschadverdichtungen. Positionspapier der BGS-Plattform Bodenschutz. Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz, Dokument 13; Landwirtschaftliche Lehrmittelzentrale Zollikofen; 56 S.

Buchter B., Isler S. & Matile L., 2000. Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit (Ksat) an ausgewählten Standorten. Bericht Nr. 28, Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich.

Isler S., Buchter B. & Matile L., 2002. Verfahrensoptimierung bei der Bestimmung von Grobporen. Bericht Nr. 33, Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich.

Schweizerischer Bundesrat, 1998. Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo). Stand am 28. März 2000. SR-Nr. 814.12; Eidgenössische Drucksachen- und Materialzentrale, Bern; 12 S.

Schweizerische Bundesversammlung, 1997. Bundesgesetz über den Umweltschutz (Umweltschutzgesetz USG). Stand am 21. Dezember 1999. SR-Nr. 814.01; Eidgenössische Drucksachen- und Materialzentrale, Bern; 36 S.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Links: Beprobungsfläche 1 (Verfahren 1 und 2) mit den Teilflächen A und B. Rechts: Beprobungsfläche 2 (Verfahren 3 und 4).	9
Abb. 2 Schematische Zusammenstellung der Verfahren des informativen Ringversuches 2007 zur Bestimmung von Lagerungsdichte D_a und Grobporenvolumen VP_g sowie Gesamtporenvolumen VP_t .	10
Abb. 3 Lagerungsdichte D_a , aufgeschlüsselt nach den durch die einzelnen Labors (L) bzw. das Referenzlabor (R) durchgeführten Arbeitsschritten Probenahme (X.), Probenaufbereitung (.X.) und Probenanalyse (..X). Zahlen in der Legende bezeichnen die Anzahl der Messwerte pro Serie.	14
Abb. 4 Lagerungsdichte D_a , bestimmt von den einzelnen Labors im Verfahren V1, das heisst alle drei Arbeitsschritte Probenahme, Probenaufbereitung und Probenanalyse wurden durch die einzelnen Labors durchgeführt (LLL , für Labor 7 als Referenzlabor RRR).	14
Abb. 5 Differenz delta R-L zwischen den Lagerungsdichtewerten D_a , getrennt nach den durch die einzelnen Labors (L) bzw. das Referenzlabor (R) durchgeführten Arbeitsschritten Probenahme (X.), Probenaufbereitung (.X.) und Probenanalyse (..X). $PN = (V1 + V2) / 2$ bzw. $(V3 + V4) / 2$, $PA = (V1 + V3) / 2$ bzw. $(V2 + V4) / 2$, $AN = (V1 + V4) / 2$ bzw. $(V2 + V3) / 2$.	16
Abb. 6 Lagerungsdichtewerte D_a , bestimmt von den einzelnen Labors in den beiden Teilflächen A und B der Beprobungsfläche 1 im Verfahren 1 (Probenahme, Probenaufbereitung und Probenanalyse durch die Labors).	17
Abb. 7 Grobporenvolumen VP_g , aufgeschlüsselt nach den durch die einzelnen Labors (L) bzw. das Referenzlabor (R) durchgeführten Arbeitsschritten Probenahme (X.), Probenaufbereitung (.X.) und Probenanalyse (..X).	18
Abb. 8 Grobporenvolumen VP_g bei 60 hPa, bestimmt von den einzelnen Labors im Verfahren V1, das heisst alle drei Arbeitsschritte Probenahme, Probenaufbereitung und Probenanalyse wurden durch die einzelnen Labors durchgeführt (LLL, für Labor 7 als Referenzlabor RRR).	18
Abb. 9 Grobporenvolumen VP_g 60 hPa, bestimmt von den einzelnen Labors im Verfahren 1, d. h. jedes Labor führte alle drei Arbeitsschritte Probenahme, Probenaufbereitung und Probenanalyse selber durch.	19
Abb. 10 Differenz delta R-L zwischen den Grobporenvolumenwerten VP_g , getrennt nach den durch die einzelnen Labors (L) bzw. das Referenzlabor (R) durchgeführten Arbeitsschritten Probenahme (X.), Probenaufbereitung (.X.) und Probenanalyse (..X). $PN = (V1+V2)/2$ bzw. $(V3+V4)/2$, $PA = (V1+V3)/2$ bzw. $(V2+V4)/2$, $AN = (V1+V4)/2$ bzw. $(V2+V3)/2$.	20
Abb. 11 Grobporenvolumenwerte VP_g , bestimmt von den einzelnen Labors in den beiden Teilflächen A und B der Beprobungsfläche 1 im Verfahren 1 (Probenahme, Probenaufbereitung und Probenanalyse durch die Labors).	21
Abb. 12 Gesamtporenvolumen VP_t , aufgeschlüsselt nach den durch die einzelnen Labors (L) bzw. das Referenzlabor (R) durchgeführten Arbeitsschritten Probenahme (X.), Probenaufbereitung (.X.) und Probenanalyse (..X).	22
Abb. 13 Gesamtporenvolumen VP_t , bestimmt von den einzelnen Labors im Verfahren V1, das heisst alle drei Arbeitsschritte Probenahme, Probenaufbereitung und Probenanalyse wurden durch die einzelnen Labors durchgeführt (LLL, für Labor 7 als Referenzlabor RRR).	22
Abb. 14 Gesamtporenvolumen VP_t , bestimmt von den einzelnen Labors im Verfahren 1, das heisst jedes Labor führt alle drei Arbeitsschritte Probenahme, Probenaufbereitung und Probenanalyse selber durch.	23
Abb. 15 Differenz delta R-L zwischen den Gesamtporenvolumenwerten VP_t , getrennt nach den durch die einzelnen Labors (L) bzw. das Referenzlabor (R) durchgeführten Arbeitsschritten Probenahme (X.), Probenaufbereitung (.X.) und Probenanalyse (..X). $PN = (V1+V2)/2$ bzw. $(V3+V4)/2$, $PA = (V1+V3)/2$ bzw. $(V2+V4)/2$, $AN = (V1+V4)/2$ bzw. $(V2+V3)/2$.	24
Abb. 16 Reelle Dichte D_s , aufgeschlüsselt nach den durch die einzelnen Labors (L) bzw. das Referenzlabor (R) durchgeführten Arbeitsschritten Probenahme (X.), Probenaufbereitung (.X.) und Probenanalyse (..X).	25
Abb. 17 Reelle Dichte D_s , bestimmt von den einzelnen Labors im Verfahren V1, das heisst alle drei Arbeitsschritte Probenahme, Probenaufbereitung und Probenanalyse wurden durch die einzelnen Labors durchgeführt (LLL, für Labor 7 als Referenzlabor RRR).	25
Abb. 18 Gesättigte Wasserleitfähigkeit pK_{sat} , bestimmt von den einzelnen Labors, das heisst alle drei Arbeitsschritte Probenahme, Probenaufbereitung und Probenanalyse wurden durch die einzelnen Labors durchgeführt (LLL, für Labor 7 als Referenzlabor RRR).	26
Abb. 19 Gesättigte Wasserleitfähigkeit pK_{sat} , bestimmt von den einzelnen Labors, das heisst alle drei Arbeitsschritte Probenahme, Probenaufbereitung und Probenanalyse wurden durch die einzelnen Labors durchgeführt.	27