

Hydraulische Eigenschaften lehmiger Sande: Heterogenität und methodische Unsicherheiten am Beispiel Versuchsfeld Wagna (Österreich)

*Hydraulic Properties of Loamy Sands: Heterogeneity and Methodological
Uncertainties at the Test Site Wagna (Austria)*

G. WINKLER¹), S. BIRK²) & J. FANK³)

Inhalt

	Seite
1. Einleitung.....	6
2. Untersuchungsgebiet/Grundlagen.....	7
3. Methoden	8
3.1. Probenvorbereitung.....	8
3.2. Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (K_S) und feld-gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (K_{fs})	8
3.3. Ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit (K_U) und Saugspannungskurven	9
4. Ergebnisse und Diskussion	10
4.1. Korngrößen, Bodenansprache.....	10
4.2. Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (K_S) und feld-gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (K_{fs})	10
4.3. Hydraulische Kenngrößen der ungesättigten Proben	15
4.4. Vergleich der Ergebnisse aus stationären und instationären Mess- methoden	21
5. Schlussfolgerungen.....	21
Zusammenfassung.....	23
Literatur	24
Summary.....	26
Dank.....	26

¹) Mag. Dr. Gerfried WINKLER, Institut für Erdwissenschaften, Karl-Franzens-Universität Graz, Heinrichstraße 26, 8010 Graz, Österreich. E-Mail: gerfried.winkler@uni-graz.at

²) Prof. Dr. Steffen BIRK, Institut für Erdwissenschaften, Karl-Franzens-Universität Graz, Heinrichstraße 26, 8010 Graz, Österreich. E-Mail: steffen.birk@uni-graz.at

³) Univ.-Doz. Dr. Johann FANK, RESOURCES – Institut für Wasser, Energie und Nachhaltigkeit, JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH, Elisabethstraße 16/II, 8010 Graz, Österreich. E-Mail: johann.fank@joanneum.at

1. Einleitung

Der Wasserfluss in der ungesättigten Zone ist bei der Bestimmung der Grundwasserneubildung, dem Stoffeintrag und -transport, aber auch bei der Optimierung von Bewässerungssystemen in der Landwirtschaft von hoher Relevanz. Unterschiedliche Untersuchungsmethoden und Messeinrichtungen im Labor und Feld wie beispielsweise Lysimeter erlauben die Bestimmung des Wasserflusses und der hierfür nötigen hydraulischen Bodeneigenschaften auf kleiner (cm^3) bis mittlerer Skala (m^3). Auf der Feldskala ist die Erfassung der bodenhydraulischen Eigenschaften für die Modellierung des Wasserflusses aufgrund der räumlichen und zeitlichen Variabilität jedoch sehr aufwendig. Unabhängig von der Untersuchungsmethode erfordern die Bestimmung der räumlichen Verteilung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit und des Wasserrückhaltevermögens (Saugspannungskurven) der Böden viele Messdaten (z. B. D. Russo et al., 1997, G. SEVERINO et al., 2003, J. STOLTE et al., 2003). Bei der Erfassung der Messdaten ist zu berücksichtigen, dass sowohl die bodenphysikalischen Eigenschaften skalenabhängig sind (z. B. H. J. VOGEL & K. ROTH, 2003, F. BARTOLI et al., 2005) als auch die verschiedenen Untersuchungsmethoden auf unterschiedliche Skalen bezogen sind. Die Skalen der Untersuchungsmethoden reichen vom Millimeterbereich im Labor über Zentimeter bei In-situ-Tensiometermessungen zur Ermittlung der Saugspannungen im Feld; von bis zu mehreren hundert Kubikzentimetern bei Stechzylinderprobenahmen bis zu Lysimetern mit mehreren Kubikmetern. Zudem weisen unterschiedliche Auswerteverfahren methodenspezifische Unsicherheiten auf, die einen Vergleich der Ergebnisse erschweren. Als Beispiel können unterschiedliche Methoden (stationäre und/oder instationäre) zur Bestimmung der bodenhydraulischen Eigenschaften im Labor angeführt werden.

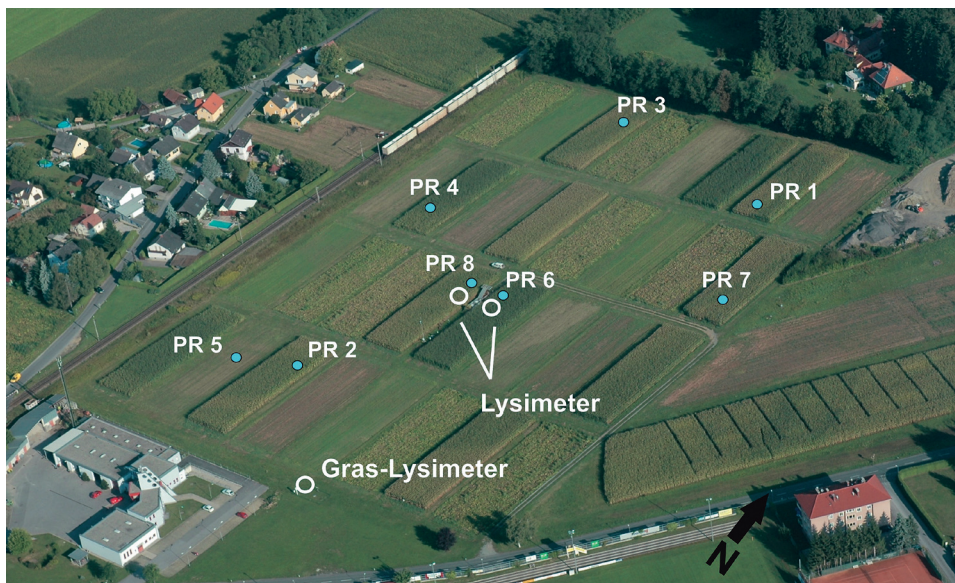


Fig. 1: Versuchsfeld Wagna mit den Positionen der acht Standorte (PR1 bis PR8), Blickrichtung NW (Foto: J. FANK).

Test site Wagna with the position of the eight sampling sites (PR1 to PR8), view direction NW (photo: J. FANK).

In dieser Studie wurden an acht Standorten im Versuchsfeld Wagna (Fig. 1) die hydraulischen Eigenschaften lehmiger Sande im Ap-Horizont auf Heterogenitäten und methodische Unsicherheiten untersucht. Hierfür wurden im Herbst 2008, Frühjahr und Herbst 2009 an allen Standorten 100 cm³ (fünf bis sechs Proben) und 250 cm³ (vier bis zehn Proben) große Stechzylinderproben aus einer Tiefe von 15 cm unter Geländeoberkante (GOK) genommen, um die bodenhydraulischen Kennwerte im Labor mit unterschiedlichen Methoden zu bestimmen. Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (K_S) wurde mit Hilfe eines Laborpermeameters und die hydraulischen Eigenschaften ungesättigter Proben (Saugspannungskurve, ungesättigte Leitfähigkeit K_U) stationär mittels Sandkasten/Drucktopf und instationär nach der Evaporationsmethode (G. P. WIND, 1966, U. SCHINDLER, 1980) mittels HYPROP (UMS, 2008) bestimmt. Ergänzend wurden im Testfeld In-situ-Messungen der feld-gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (K_{fs}) mittels Guelph-Permeameter an einigen Standorten durchgeführt. Um die teilweise anthropogen bedingten Heterogenitäten an einem Standort untersuchen zu können, die beispielsweise durch die Bewirtschaftung mit schweren landwirtschaftlichen Gerätschaften entstehen können, wurden an den Standorten PR3, PR6 und PR8 im Zuge der letzten Probenahme sowohl in Bereichen von Fahrspuren als auch zwischen den Fahrspuren (Räderabstand) Stechzylinderproben genommen.

2. Untersuchungsgebiet/Grundlagen

Seicht liegende, quartäre Grundwasserleiter wie beispielsweise im Grazer Feld und Leibnitzer Feld südlich von Graz bis Radkersburg sind für die regionale Trinkwasserversorgung von großer Bedeutung (J. FANK, 1999). Die Erfassung des Speicherverhaltens und der Fließprozesse in der ungesättigten Zone und im Speziellen von Böden ist somit neben den landwirtschaftlichen Anforderungen auch von großer wasserwirtschaftlicher Relevanz, vor allem bei der Ausweisung von großflächigen Schutz- und Schongebieten. Hierbei sind neben lokalen konzentrierten Schadstoffeinträgen vor allem großflächige Schadstoffeinträge wie Nitrat aufgrund landwirtschaftlicher Nutzung als wesentliche Fragestellung anzusehen. Aus diesen Gründen wurde bereits 1987 das ackerbauliche Versuchsfeld Wagna südlich von Leibnitz angelegt und 1992 die Forschungsstation Wagna mit der zugehörigen Lysimeteranlage errichtet (J. FANK, 1999, W. BERG, 2003, J. FANK & Ch. LANTHALER, 2008). In den Jahren 2004 bis 2006 wurde die Anlage durch drei Präzisionslysimeter ergänzt (J. FANK & G. VON UNOLD, 2007).

Das Testfeld Wagna liegt im Steirischen Becken, welches geologisch im W vom Altkristallin der Koralpe und im N vom Grazer Paläozoikum begrenzt wird. Ein Teil des Steirischen Beckens bildet das Leibnitzer Feld mit der Forschungsstation Wagna südlich von Leibnitz (Steiermark, Österreich). Das Testfeld liegt auf der Würm-Niederterrasse (Quartär) mit einem mächtigen fluviatil abgelagerten Kieskörper, welcher von lehmig-sandigen Deckschichten überlagert wird. Der Stauer wird von miozänen, feinklastischen Sedimenten gebildet. Die fluviatil abgelagerten Aquiferschichten (vorwiegend Kiese und Sande) besitzen relativ hohe hydraulische Leitfähigkeitswerte im Bereich von 10⁻³ m/s, die Schadstoffeinträge und -ausbreitungen im Grundwasser begünstigen. Beim Testfeld Wagna handelt es sich um eine landwirtschaftliche Großparzellenversuchsanlage (Gesamtfläche 4,2 ha), bestehend aus 32 Feldern (jeweils 0,1 ha), zur Untersuchung unterschiedlicher Bewirtschaftungs- und Düngevarianten hinsichtlich Ertrag und Nitratreintrag in das Grundwasser. Ein wägbares, monolithisches Präzisions-Unterdruck-Lysimeter befin-

det sich auf einem konventionell, ein weiteres auf einem organisch-biologisch bewirtschafteten Feld, ein drittes in einer durch extensive Grünlandnutzung charakterisierten Fahrgasse. Es wurden Messsysteme und Probenahmemöglichkeiten in verschiedenen Tiefen der ungesättigten und gesättigten Zone für hydrochemische und isotopenhydrologische Analysen errichtet (W. BERGER et al., 2008, J. FANK, 2009, M. WALTHER et al., 2010).

3. Methoden

3.1. Probenvorbereitung

Die Probenahme aller Stechzylinder (100 cm³ und 250 cm³) erfolgte in einer Tiefe von 15 cm (Stechzylinderoberkante) unter GOK, um denselben Horizont zu untersuchen, der auch für die In-situ-Messungen (siehe Guelph-Permeameter) herangezogen wurde. Alle Proben (100 cm³ und 250 cm³), die für die bodenhydraulischen Untersuchungen ins Labor gebracht wurden, wurden für die weiteren Untersuchungen präpariert (plane ebene Oberflächen) und langsam gesättigt. Die Aufsättigung der Proben geschah einheitlich im Laborpermeameter durch langsames, mehrstufiges Erhöhen (2–3 Stufen) des Wasserstandes, bis ein dünner Wasserfilm auf allen Stechzylindern oben erkennbar war.

3.2. Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (K_s) und feld-gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (K_{fs})

Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit wurde mittels Laborpermeameter und im Feld mittels Guelph-Permeameter bestimmt. In einem Laborpermeameter wurden die vertikalen Leitfähigkeitswerte der gesättigten Stechzylinderbodenproben gemessen. In dieser Untersuchung wurden Stechzylinderproben mit 100 cm³ (STZ100) und 250 cm³ (STZ250) von jedem Standort genommen, um die Einflüsse der Probengröße auf die hydraulischen Eigenschaften untersuchen zu können. Die gesättigten Proben (alle STZ100 und alle STZ250) wurden mittels Ringhalter in das Laborpermeameter mit konstantem Wasserspiegel eingebracht. Die Wasserhöhe im Vorratsbehälter lag wenige Zentimeter über der Probenoberkante. Der Wasserspiegel über der Probe im Ringhalter wurde mit Hilfe eines Saughebers gegenüber dem Wasserspiegel im Vorratsbehälter abgesenkt, wodurch sich ein hydraulischer Gradient zwischen außerhalb und innerhalb des Ringhalters ergab und ein Durchströmen der Probe ermöglicht wurde. Der Versuch wurde je nach Leitfähigkeit der Probe bei konstanter oder abnehmender Druckhöhe durchgeführt, wobei die Berechnung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit auf Basis des Gesetzes von DARCY erfolgte (z. B. W. D. REYNOLDS, 2008a).

Die In-situ-Messungen am Testfeld zur Bestimmung der feld-gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (K_{fs}) wurden mittels Guelph-Permeameter vorgenommen (z. B. W. D. REYNOLDS, 2008b). Die gegenständlichen Versuche wurden in 15 cm tiefen Bohrlöchern mit Wasserständen von 5 cm und 10 cm durchgeführt. Die Berechnung der Ergebnisse erfolgte nach der Single-Head-Methode mit einem α -Wert von 0,12 cm⁻¹ (W. D. REYNOLDS et al., 1986), da die Ergebnisse aus der Two-Head-Methode (W. D. REYNOLDS & D. E. ELRICK, 1986) negative Werte für die hydraulische Leitfähigkeit oder das Matrixflusspotential ergaben. Dies ist sehr wahrscheinlich durch Bodenheterogenitäten wie Wurzelkanäle oder Bodenschichtung (D. Russo et al., 1997) und die damit verbundenen unterschiedlichen

Infiltrationsbedingungen bei den zwei Wasserstandshöhen (5 cm und 10 cm) im Bohrloch bedingt.

3.3. Ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit (K_U) und Saugspannungskurven

Nach der Bestimmung der K_S -Werte aller Stechzylinderproben im Laborpermeameter wurden die Saugspannungskurven stationär für Werte zwischen pF 0 bis pF 2,0 für alle STZ100 und etwa die Hälfte der STZ250 im Sandsaugtisch bestimmt. Ab pF 2,0 bis pF 4,2 erfolgten die Untersuchungen in Drucktöpfen, wobei hierfür ausschließlich die STZ100 weiterverwendet wurden. Die Saugspannungskurven und auch die ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeitswerte wurden darüber hinaus instationär über die Verdunstungsmethode nach WIND/SCHINDLER (G. P. WIND, 1966, U. SCHINDLER, 1980, U. SCHINDLER et al., 2004, U. SCHINDLER & L. MÜLLER, 2006) mittels der Messapparatur HYPROP (UMS, 2008) bestimmt. Für diese Untersuchungsschritte wurden die STZ250 verwendet.

Zur Ermittlung der Saugspannungskurve ungestörter Bodenproben im Messbereich von pF 0 bis pF 2,0 wurden die ungestörten Stechzylinderbodenproben gesättigt und in einen mit synthetischem Sand und Wasser gefüllten Sandkasten gestellt. Über eine hängende Wassersäule wurden die Unterdrücke 1 hPa (pF 0), 2,5 hPa (pF 0,4), 10 hPa (pF 1), 32 hPa (pF 1,5), 63 hPa (pF 1,8) und 100 hPa (pF 2,0) erzeugt. Jede Unterdruckstufe wurde über eine ausreichend lange Zeit bis zum Einstellen eines Gleichgewichts (Gewichtskonstanz) angelegt, und im Anschluss wurde der gravitative Wassergehalt über Wiegen und Trocknen ermittelt sowie in den volumetrischen Wassergehalt mittels der Lagerungsdichte der einzelnen Stechzylinderproben umgerechnet.

Zur Bestimmung des Wassergehaltes bei höheren pF-Stufen (pF 2,5, pF 3, pF 3,5 und pF 4,2) wurde die Drucktopfmethode angewendet. Die Proben wurden dabei einem Überdruck von 316 hPa, 1000 hPa, 3162 hPa und 15 000 hPa ausgesetzt, wodurch das Wasser bei den einzelnen Druckstufen aus den Feinporen „gepresst“ wurde. Über die Quantifizierung des Abflusses aus dem Drucktopf wurde bestimmt, wann das Gleichgewicht erreicht war. Nach Eintreten des hydrostatischen Gleichgewichts auf einer Stufe (Abfluss aus dem Drucktopf = 0) wurden die Proben gewogen und die nächsthöhere Druckstufe angelegt. Für diese Methode wurden die Proben aus dem Sandsaugtisch in 1 cm hohe Ringe mit einem Durchmesser von 5 cm aufbereitet. Die volumetrischen Wassergehalte wurden mit den individuellen Lagerungsdichten der jeweiligen Stechzylinder, aus denen die Ringe gezogen wurden, berechnet. Es wurden die Mittelwerte (MEAN) und die Standardabweichungen (STABW) der Wassergehalte aller STZ100 pro Standort (fünf bis sechs Stechzylinder pro Standort) ermittelt, des Weiteren die STABW aller Stechzylinder (45 Stück) über das gesamte Versuchsfeld. Um die Heterogenitäten an den jeweiligen Standorten mit der Heterogenität über das gesamte Testfeld vergleichen zu können, wurden die STABW der einzelnen Standorte gemittelt und auf die STABW des gesamten Testfeldes normiert (Spalte NGSTABW in Tab. 3). Bei gleicher Streuung der Werte zwischen einem Standort und dem gesamten Testfeld ergibt die normierte, gemittelte Standardabweichung (NGSTABW) das Resultat „1“. Des Weiteren wurden für alle STZ100 und STZ250 die Porositäten aus den Lagerungsdichten und den mittels Pycnometer bestimmten Feststoffdichten der einzelnen Standorte (Tab. 4) errechnet, um diese den durch Wägung ermittelten Wassergehalten gegenüberstellen zu können.

Die ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeitswerte und die Saugspannungskurven wurden instationär nach der vereinfachten Verdunstungsmethode (G. P. WIND, 1966, U. SCHINDLER, 1980) mittels der Messapparatur HYPROP (UMS, 2008) bestimmt.

In eine gesättigte Bodenprobe mit einem Volumen von 250 cm³ wurden zwei Tensiometer in zwei unterschiedlichen Höhen vertikal eingebaut. In bestimmten Zeitabständen wurden die Saugspannung und das Probengewicht ermittelt. Über den Masseverlust (Verdunstung des Wassers) und die mittlere Saugspannung der beiden Tensiometer zu den Messzeitpunkten wurde die Retentionsfunktion ermittelt. Aus den gemessenen Saugspannungen wurde zudem der hydraulische Gradient zwischen den beiden Messpunkten und aus dem Gewichtsverlust der Volumenstrom berechnet. Mit diesen Daten wurde die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit als Funktion der Saugspannung mit Hilfe des Gesetzes von DARCY berechnet (G. P. WIND, 1966, U. SCHINDLER, 1980, U. SCHINDLER et al., 2004, U. SCHINDLER & L. MÜLLER, 2006, W. DURNER et al., 2008). Im Unterschied zum stationären Verfahren, bei dem der Verlauf der Saugspannungskurve von der Wassersättigung (0 hPa) bis zum permanenten Welkepunkt (15 000 hPa) gemessen wurde, erlaubte der Messbereich der im instationären Verfahren verwendeten Tensiometer maximale Saugspannungen von rund 1000 hPa (pF 3,0). Die HYPROP-Retentionsdaten wurden anschließend mit den Messergebnissen aus den stationären Messverfahren verglichen. Hierfür wurde zuerst eine bodenhydraulische Modellfunktion – bester Fit mit dem bimodalen VAN GENUCHTEN/MUALEM-Modell (W. DURNER, 1994, E. PRIESACK & W. DURNER, 2006) – an die Messwerte angepasst, wobei die Retentionsdaten um den Faktor 1000 stärker als die Leitfähigkeitsdaten gewichtet wurden. Auf Basis der Modellfunktionen wurden die Wassergehalte für die pF-Stufen 0, 0,4, 1, 1,5, 1,8, 2,0, 2,5 und 3,0 errechnet und den stationär berechneten Ergebnissen gegenübergestellt.

4. Ergebnisse und Diskussion

4.1. Korngrößen, Bodenansprache

Entsprechend der österreichischen Bodenzustandsinventur (W. E. H. BLUM et al., 1996) handelt es sich im Ap-Horizont bei allen Standorten bis auf PR6 um lehmige Sande (IS), der Boden an PR6 entspricht einem schluffigen Sand (uS) (Fig. 2a, b). Der Tonanteil der Böden liegt zwischen ca. 4 % bis ca. 10 %, der Grobkornanteil (> 2 mm) liegt zwischen ca. 2 % und 22 %.

4.2. Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (K_S) und feld-gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (K_{fS})

Die Ermittlung von K_S aller Standorte erfolgte mittels Laborpermeameter. Eine Übersicht der Schwankungsbreiten von K_S der einzelnen Standorte mit den unterschiedlichen Probengrößen STZ100 und STZ250 und den statistischen Kenngrößen arithmetisches Mittel der log K_S und Standardabweichung sind in Fig. 3a und Tab. 1 dargestellt bzw. aufgelistet.

Die K_S -Mittelwerte der STZ250 liegen mehrheitlich über den Werten der STZ100 mit Ausnahme von PR2 und PR8 (Fig. 3a und Tab. 1, „MEAN“). Die Schwankungsbereiche der einzelnen Standorte überlappen sich größtenteils, die Streuung der Standortmittelwerte der STZ100 liegen zwischen ca. 74 cm/d bzw. ca. 2300 cm/d (entspricht den log K_S -Werten 1,87 und 3,37). Die Standortmittelwerte der STZ250 liegen zwischen ca. 74 cm/d und 10 000 cm/d (entspricht den log K_S -Werten 1,87 und 4,0). Die Untersu-

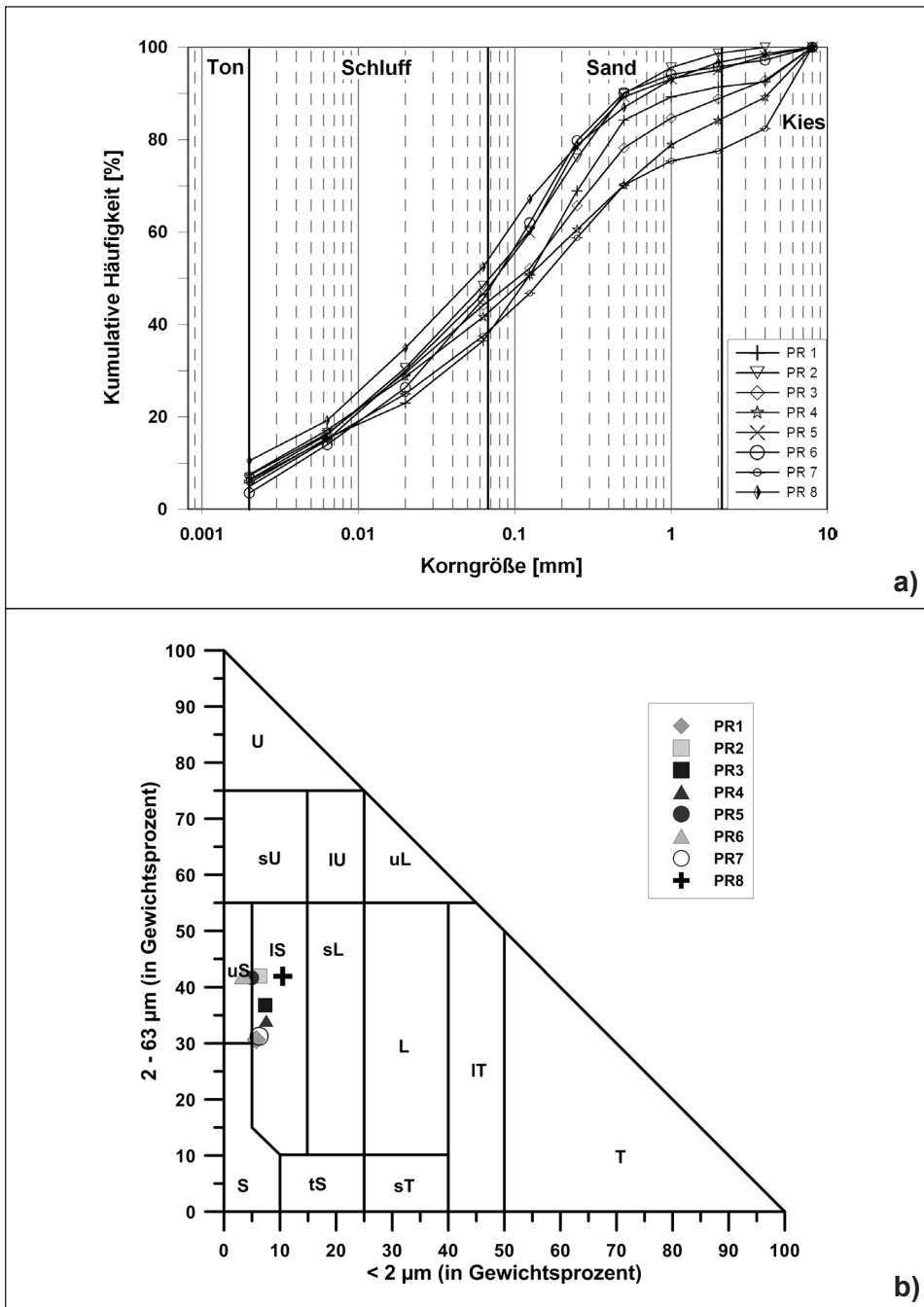
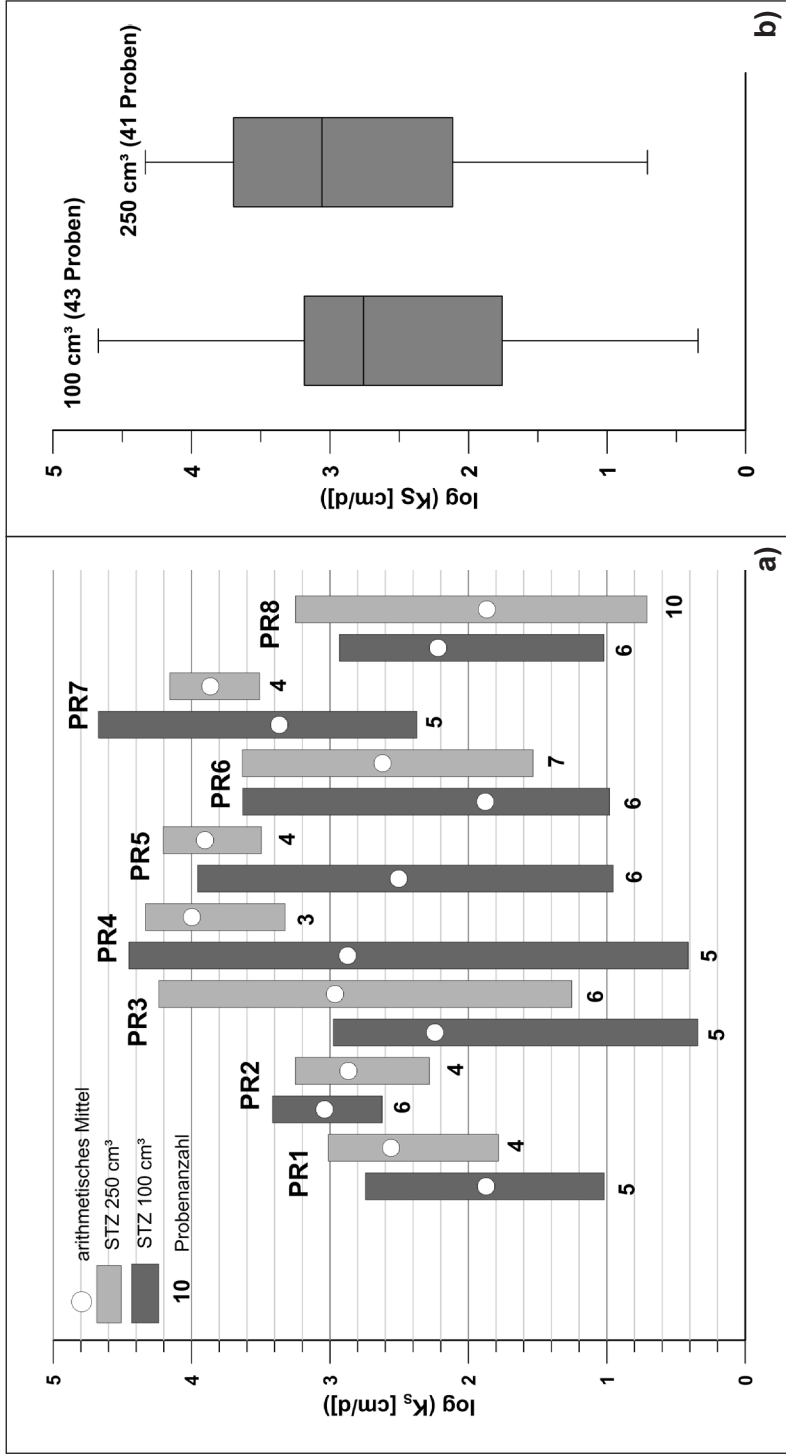


Fig. 2: a) gemittelte Kornsummenkurven und b) die Bodenarten nach österreichischer Bodenzustandsinventur (W. E. H. BLUM et al., 1996) der Standorte PR1 bis PR8.
a) averaged grain size distributions and b) the soil types after Austrian soil-status-inventory (W. E. H. BLUM et al., 1996) of the sampling sites PR1 to PR8.



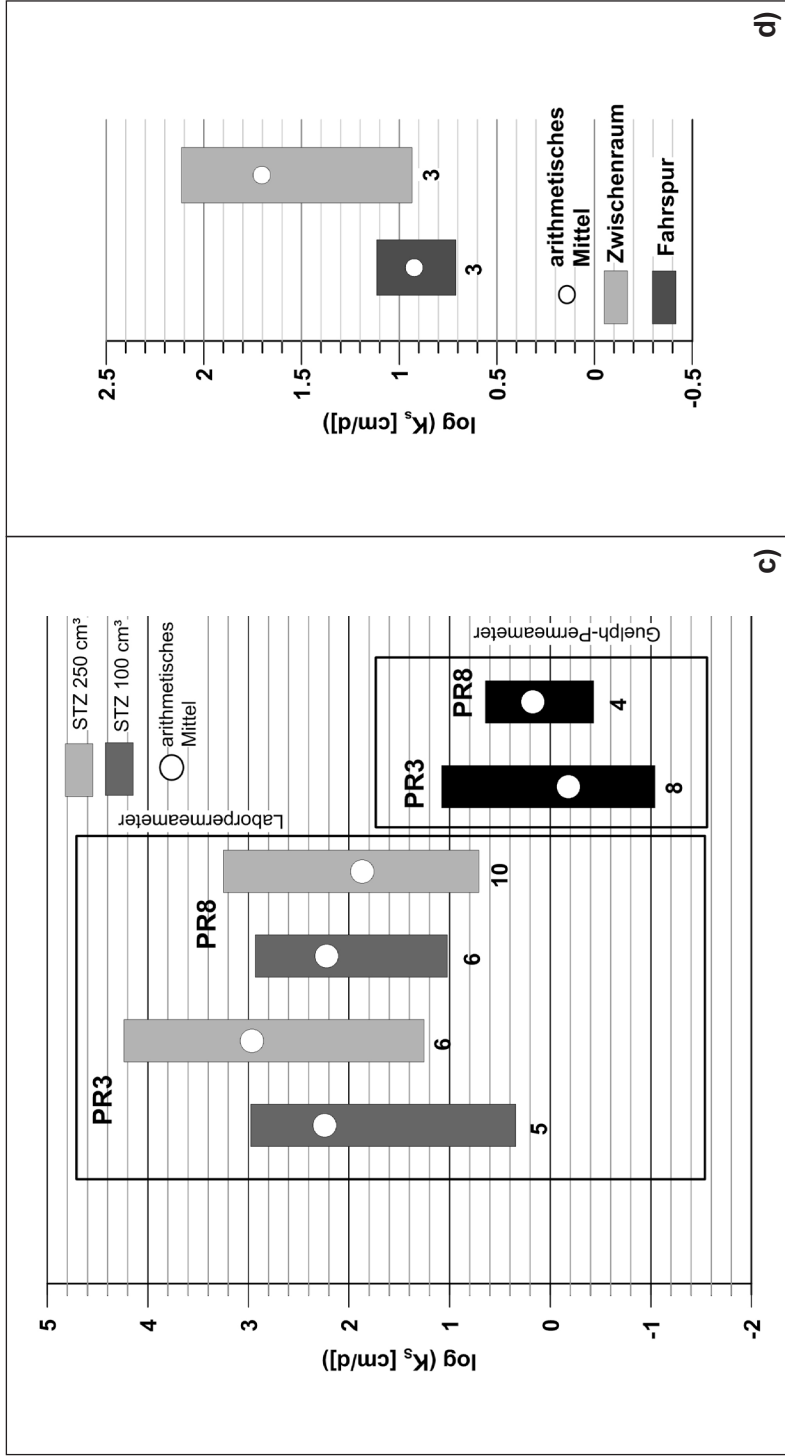


Fig. 3: Logarithmierte, gesättigte hydraulische Leitfähigkeitswerte ($\log(K_s [\text{cm/d}])$): a) Schwankungsbreiten (MAX-MIN) der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeitswerte (Laborpermeameter) der Standorte PR1 bis PR8 mit ihren Mittelwerten (weiße Kreise), b) Box-Plot für alle STZ100 und STZ250, c) Vergleich der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit von Labor- mit Feldmessungen, d) Standort PR8: Heterogenität aufgrund von Fahrspuren (Laborpermeameter). Logarithmized, saturated hydraulic conductivity values ($\log(K_s [\text{cm/d}])$): a) range of fluctuation (MAX-MIN) of the saturated hydraulic conductivity values (laboratory permeameter) of the sampling sites PR1 to PR8 with their means (white circles), b) box-plot of all STZ100 and STZ250, c) relation of the hydraulic conductivity of laboratory and field measurements, d) sampling site PR8: heterogeneity caused by lanes (laboratory permeameter).

chungen ergaben, dass bei PR1, PR2, PR3 und PR8 die K_S -Werte bei den STZ250 stärker streuen als bei den STZ100 und bei den restlichen Standorten umgekehrt (Tab. 1). Der Vergleich der K_S -Standortmittelwerte zueinander (Tab. 1, „Vergleich der Standortmittelwerte“) zeigt eine leicht höhere Streuung bei den Proben STZ250. Die Standardabweichungen der K_S -Standortmittelwerte liegen für die STZ100 und STZ250 bei 0,55 bzw. 0,77 $\log K_S$ [cm/d]. Die Proben aller STZ100 aller Standorte zusammen zeigen geringere K_S -Werte als die Proben STZ250 (Fig. 3b und Tab. 1), die Streuung zeigt aber für beide Stechzylindergrößen die gleichen Werte von ca. 1,05 (Tab. 1 „alle STZ gesamt“).

Tab. 1: *Logarithmierte, gesättigte hydraulische Leitfähigkeit ($\log(K_S$ [cm/d])) der einzelnen Standorte für STZ100 und STZ250. MIN – kleinster Wert, MAX – größter Wert, MEAN – arithmetisches Mittel, STABW – Standardabweichung.*
Logarithmized saturated hydraulic conductivity ($\log(K_S$ [cm/d])) of the individual sampling sites of STZ100 and STZ250. MIN – minimum, MAX – maximum, MEAN – mean, STABW – standard deviation.

Standort	STZ	MIN	MAX	MEAN	STABW
PR1	100	1,02	2,74	1,87	0,82
	250	1,78	3,01	2,56	0,55
PR2	100	2,62	3,41	3,04	0,34
	250	2,28	3,25	2,87	0,51
PR3	100	0,34	2,98	2,24	1,09
	250	1,25	4,24	2,96	1,29
PR4	100	0,41	4,45	2,87	1,50
	250	3,32	4,33	4,00	0,58
PR5	100	0,95	3,96	2,50	1,24
	250	3,50	4,20	3,90	0,30
PR6	100	0,98	3,63	1,88	1,08
	250	1,53	3,63	2,62	0,87
PR7	100	2,37	4,67	3,37	0,87
	250	3,51	4,16	3,86	0,31
PR8	100	1,02	2,93	2,22	0,73
	250	0,71	3,25	1,87	0,89
alle STZ gesamt	100	0,34	4,67	2,49	1,05
	250	0,71	4,33	2,85	1,06
	alle	0,34	4,67	2,66	1,06
Vergleich der Standortmittelwerte	100	1,87	3,37	2,50	0,55
	250	1,87	4,00	3,08	0,77
	alle	1,87	4,00	2,79	0,71
Guelph-Permeameter	PR3	-1,04	1,08	-0,18	0,72
	PR8	-0,43	0,64	0,17	0,53

An den Standorten PR3 und PR8 wurden die gesättigten hydraulischen Leitfähigkeitswerte sowohl im Labor mittels Laborpermeameter als auch die feld-gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (K_{fS}) im Feld mittels Guelph-Permeameter ermittelt. Die Auswertung der Guelph-Permeameter-Messungen erfolgte nach der Single-Head-

Methode mit einem α -Wert von $0,12 \text{ cm}^{-1}$. Der Vergleich der Ergebnisse der Feldversuche (Guelph-Permeameter) und der Ergebnisse der Laborversuche zeigt, dass die Feldversuche um ca. zwei bis drei Größenordnungen geringere gesättigte hydraulische Leitfähigkeitswerte ergaben (Fig. 3c und Tab. 1). Die Detailuntersuchungen an den Standorten PR8 bezogen auf anthropogen hervorgerufene Heterogenitäten wie Fahrspuren von schweren landwirtschaftlichen Gerätschaften ergaben, dass die im Bereich von Fahrspuren gezogenen Proben gegenüber den Proben aus dem Zwischenraum um ca. eine Größenordnung geringere K_S -Werte aufweisen (Fig. 3d). Der K_S -Mittelwert der Proben aus den Fahrspuren entspricht ca. 9 cm/d , wobei eine sehr geringe Streuung aller Proben aus den Fahrspuren zu erkennen ist. Der K_S -Mittelwert der Proben zwischen den Fahrspuren liegt bei ca. 90 cm/d und die Werte streuen über eine Größenordnung von ca. 9 cm/d bis über 100 cm/d . Zusätzlich wurden an den Standorten Guelph-Permeameter-Messungen durchgeführt, um die feld-gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (K_{fs}) im Bereich der Fahrspuren und zwischen den Fahrspuren zu ermitteln.

Die ersten drei Versuche (FS) erfolgten im Bereich der Fahrspuren, der letzte Versuch (ZR) zwischen den Fahrspuren (Tab. 2). Die Ergebnisse zeigen eine höhere hydraulische Leitfähigkeit zwischen den Fahrspuren und bestätigen die Ergebnisse der Laborpermeametermessungen (Fig. 3d).

Tab. 2: Logarithmierte feld-gesättigte hydraulische Leitfähigkeit ($\log(K_{fs} [\text{cm/d}])$) des Standorts PR3 berechnet nach der Single-Head-Methode (W. D. REYNOLDS et al., 1986) mit einem α -Wert von $0,12 \text{ cm}^{-1}$, Probenahme am 28. 10. 2009. FS – Fahrspur, ZR – Zwischenraum, H1 = 5 cm unter GOK, H2 = 10 cm unter GOK.

Logarithmized field saturated hydraulic conductivity ($\log(K_{fs} [\text{cm/d}])$) of the sampling site PR3 calculated with the single-head method (W. D. REYNOLDS et al., 1986) with an α -value of $0,12 \text{ cm}^{-1}$, sampling date 28. 10. 2009. FS – lanes, ZR – area between lanes, H1 = 5 cm below surface, H2 = 10 cm below surface.

PR3	H1	H2	H1	H2
FS	-0,62	0,08	0,24	1,20
FS	-1,04	-0,92	0,09	0,12
FS	-0,34	-0,18	0,46	0,66
ZR	0,48	1,08	3,00	12,00

4.3. Hydraulische Kenngrößen der ungesättigten Proben

Die Wassergehalte ändern sich kontinuierlich über den gesamten untersuchten Saugspannungsbereich, wie am Beispiel PR3 (Fig. 4a) und den für die Standorte gemittelten pF-Kurven (Fig. 4b) gezeigt werden kann. Der Verlauf der stationär ermittelten Saugspannungskurven weist auf ein breites Porengrößenspektrum hin (Grob- bis Feinporen) und ist für alle Standorte ähnlich (Fig. 4b). Die Wassergehalte zeigen auch nahe der Sättigung noch eine deutliche Abhängigkeit von der Saugspannung, was auf gut strukturierte lehmige Böden (M. R. CARTER & E. G. GREGORICH, 2008) hinweist. Die größte Streuung der Wassergehalte von ca. 42 % bis ca. 51 % zwischen den gemittelten Kurven ergibt sich vor allem nahe der Sättigung. Zudem wurden für alle Stechzylinderproben die Lagerungsdichten und daraus die Porositäten bei Sättigung errechnet (Tab. 4). Die hierfür erforderlichen Feststoffdichten wurden mittels Laborpyknometer bestimmt und sind in der Tabellenerläuterung der Tab. 4 aufgelistet.

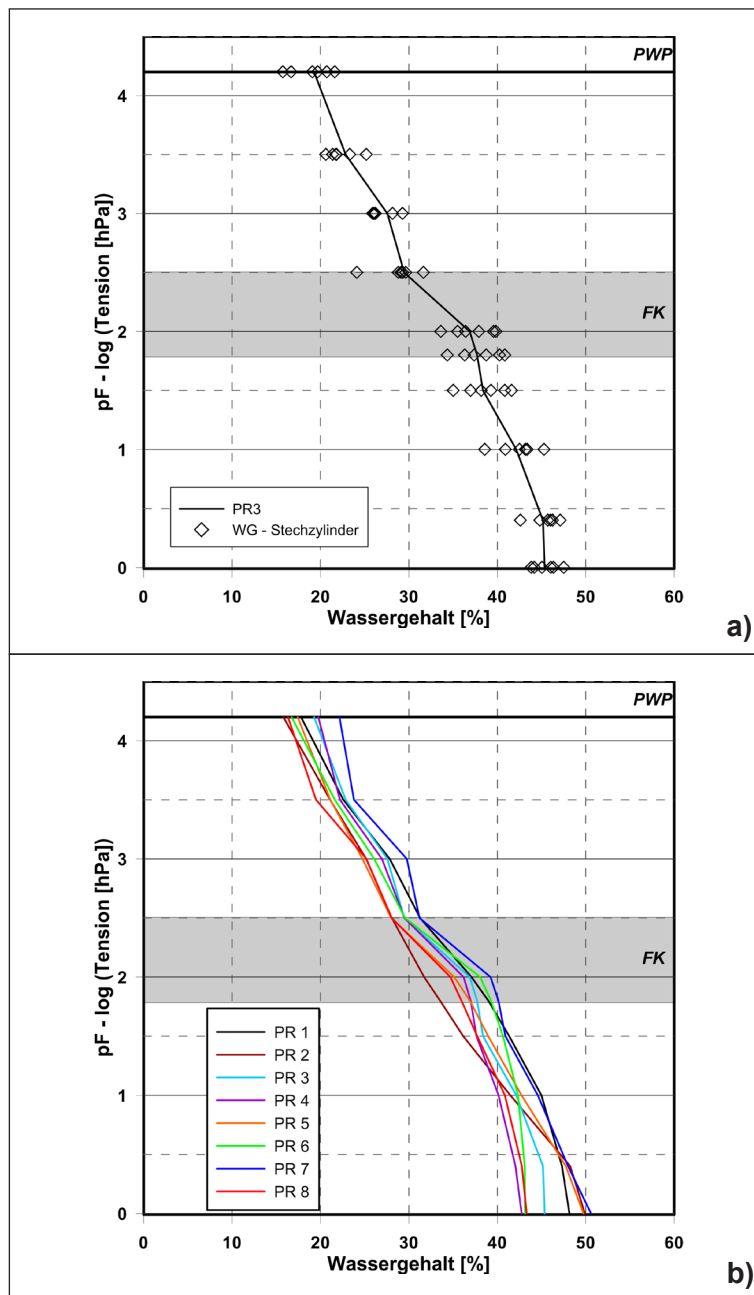


Fig. 4: a) Stechzylinderproben (STZ100) und gemittelte Saugspannungskurve des Standorts PR3, b) gemittelte Saugspannungskurven aller acht Standorte (STZ100). WG – Wassergehalt, PWP – permanenter Welkepunkt, FK – Feldkapazität.
a) steel pipe samples (STZ100) and averaged tension curves of the sampling site PR3, b) averaged tension curves of all sampling sites (STZ100). WG – water content, PWP – permanent wilting point, FK – field capacity.

Pro Standort wurden fünf bis acht Stechzylinderproben für die stationäre Bestimmung der Saugspannungskurve herangezogen und die Wassergehalte für die einzelnen pF-Stufen sowie bei Sättigung berechnet. Die Wassergehalte der Proben eines Standorts zeigen über alle pF-Stufen ähnlich geringe Streubreiten, wie am Beispiel PR3 ersichtlich ist (Fig. 4a). Ähnliche Streubreiten der Wassergehalte sind auch an den Mittelwerten aller acht Standorte zu erkennen (Fig. 4b und Tab. 3). Es wurden die Standardabweichungen (STABW) der Wassergehalte aller Stechzylinderproben pro Standort (fünf bis sechs Stechzylinder pro Standort) ermittelt und des Weiteren die STABW aller Stechzylinder (45 Stück) über das gesamte Versuchsfeld. Der gleichmäßige Kurvenverlauf wird durch den Vergleich der STABW der Wassergehalte an den pF-Stufen 0, 0,4, 1, 1,5, 1,8, 2, 2,5, 3, 3,5 und 4,2 pro Standort zur STABW der mittleren Wassergehalte des gesamten Testfeldes bestätigt (Tab. 3). Um die Heterogenitäten an den jeweiligen Standorten mit der Heterogenität über das gesamte Testfeld vergleichen zu können, wurden die STABW der einzelnen Standorte gemittelt und auf die STABW des gesamten Testfeldes normiert (Spalte NGSTABW in Tab. 3). Bei gleicher Streuung der Werte zwischen einem Standort und dem gesamten Testfeld ergibt die normierte, gemittelte Standardabweichung (NGSTABW) das Resultat „1“. Die Ergebnisse zeigen ausschließlich Werte unter „1“, was darauf hinweist, dass die Heterogenitäten an den Standorten kleiner sind als die Heterogenität über das gesamte Testfeld. Die Heterogenität über das gesamte Testfeld ist bei Sättigung am größten. Bei der höchsten Saugspannungsstufe (pF 4,2) ist die gemittelte Heterogenität der Standorte ähnlich der des Testfeldes.

Tab. 3: Statistische Kennwerte der Wassergehalte (WG) für das gesamte Testfeld und die Standardabweichungen pro Standort bei Sättigung und für die stationär ermittelten pF-Stufen; STABW – Standardabweichung, NGSTABW – normierte, gemittelte Standardabweichungen für alle Standorte. *Statistics of the water content (WG) of the test site and the standard deviation per sampling site considering saturation and for the steady state pF-values; STABW – standard deviation, NGSTABW – normalized averaged standard deviation of all sampling sites.*

		WG [%] gesamtes Testfeld				Standardabweichungen WG [%] pro Standort								NGSTABW
		MIN	MAX	MEAN	STABW	PR1	PR2	PR3	PR4	PR5	PR6	PR7	PR8	
Sättigung:		38,63	57,33	47,72	3,62	1,29	1,79	1,15	3,15	3,61	0,86	1,86	0,50	0,49
pF-Stufen	0	38,13	55,87	46,59	4,32	1,58	3,09	2,89	3,64	5,01	2,80	0,81	3,17	0,67
	0,4	37,58	51,64	45,52	3,52	1,84	2,62	2,40	3,66	3,71	2,73	1,32	2,21	0,73
	1	35,43	48,02	42,39	2,60	1,20	2,86	1,92	2,78	2,34	2,56	1,14	1,07	0,76
	1,5	32,01	45,39	38,97	2,71	2,56	2,76	1,87	2,03	2,74	2,30	0,91	0,36	0,72
	1,8	29,11	43,68	37,48	2,94	3,04	2,97	1,74	1,98	2,91	2,17	0,92	0,55	0,69
	2	27,34	41,82	37,46	2,56	3,16	2,94	1,69	1,93	2,95	2,14	0,87	0,69	0,80
	2,5	24,10	34,41	29,42	2,23	0,90	1,03	2,50	2,19	0,90	1,98	1,22	0,93	0,65
	3	21,99	32,90	26,74	2,48	1,01	1,24	2,02	2,62	1,23	1,67	0,84	0,78	0,58
	3,5	18,12	25,95	22,22	1,74	0,77	1,12	1,63	1,96	1,87	1,41	1,07	0,67	0,75
4,2	12,17	23,03	17,92	2,59	3,42	2,77	2,64	1,37	2,99	2,29	0,84	3,14	0,94	

Die gemittelten Lagerungsdichten und Porositäten aller kleinen (STZ100) sowie aller großen Stechzylinderproben (STZ250) weisen sehr ähnliche Messwerte auf (Tab. 4). Die Wassergehalte zeigen für die STZ100 eine größere Streubreite und höhere Mittelwerte

als bei den STZ250. Es zeigt sich bei beiden Stechzylindergrößen, dass die Heterogenität am Standort kleiner ist als die Heterogenität über das gesamte Testfeld. Der Vergleich der mittleren Porositäten mit den mittels Wägung und auf Volumenprozent umgerechneten mittleren Wassergehalten ergibt, dass bei den STZ100 die Wassergehalte systematisch um ca. 3% höher und die STZ250-Wassergehalte systematisch um ca. 3% niedriger als die errechneten Porositäten sind (Tab. 4).

Tab. 4: Statistische Kennwerte der Wassergehalte bei Sättigung, der Lagerungsdichten und der daraus errechneten Porositäten auf Basis folgender Feststoffdichten (in g/cm^3): PR1: 2,75, PR2 und PR3: 2,74, PR4 und PR5: 2,72, PR6 und PR7: 2,73, PR8: 2,76. Die STZ100 wurden für die stationäre, die STZ250 für die instationäre Messmethode verwendet.

Statistics of the water content by saturation, the bulk density and out of it the calculated porosities based on the following grain densities (in g/cm^3): PR1: 2,75, PR2 and PR3: 2,74, PR4 and PR5: 2,72, PR6 and PR7: 2,73, PR8: 2,76. STZ100 were used for steady state methods, STZ250 were used for transient methods.

		PR1	PR2	PR3	PR4	PR5	PR6	PR7	PR8	alle
		STZ100								
Wassergehalt (Vol.)	MIN	0,48	0,48	0,43	0,39	0,47	0,47	0,46	0,48	0,39
	MAX	0,51	0,54	0,47	0,47	0,57	0,49	0,52	0,49	0,57
	MEAN	0,49	0,51	0,45	0,42	0,51	0,48	0,49	0,48	0,48
	STABW	0,01	0,02	0,01	0,03	0,04	0,01	0,02	0,01	0,01
Lagerungsdichte (g/cm^3)	MIN	1,36	1,28	1,40	1,45	1,21	1,50	1,29	1,44	1,21
	MAX	1,63	1,40	1,65	1,67	1,68	1,66	1,61	1,74	1,74
	MEAN	1,50	1,37	1,50	1,55	1,44	1,57	1,47	1,62	1,50
	STABW	0,10	0,04	0,10	0,08	0,18	0,06	0,13	0,10	0,12
Porosität	MIN	0,41	0,49	0,40	0,39	0,38	0,39	0,41	0,37	0,37
	MAX	0,50	0,53	0,49	0,47	0,56	0,45	0,53	0,48	0,56
	MEAN	0,45	0,50	0,45	0,43	0,47	0,42	0,46	0,41	0,45
	STABW	0,04	0,02	0,03	0,03	0,07	0,02	0,05	0,04	0,04
		STZ250								
Wassergehalt (Vol.)	MIN	0,41	0,41	0,35	0,41	0,41	0,37	0,40	0,37	0,35
	MAX	0,44	0,45	0,43	0,44	0,45	0,46	0,43	0,42	0,46
	MEAN	0,42	0,43	0,39	0,43	0,43	0,41	0,42	0,39	0,41
	STABW	0,01	0,02	0,03	0,01	0,02	0,03	0,01	0,01	0,03
Lagerungsdichte (g/cm^3)	MIN	1,39	1,42	1,38	1,63	1,23	1,34	1,43	1,51	1,23
	MAX	1,64	1,60	1,63	1,72	1,35	1,73	1,54	1,79	1,79
	MEAN	1,51	1,54	1,51	1,68	1,32	1,57	1,49	1,61	1,54
	STABW	0,11	0,08	0,10	0,04	0,06	0,15	0,05	0,09	0,13
Porosität	MIN	0,40	0,42	0,40	0,37	0,50	0,36	0,43	0,35	0,35
	MAX	0,49	0,48	0,50	0,40	0,55	0,51	0,48	0,45	0,55
	MEAN	0,45	0,44	0,45	0,38	0,52	0,42	0,45	0,42	0,44
	STABW	0,04	0,03	0,04	0,01	0,02	0,06	0,02	0,03	0,05

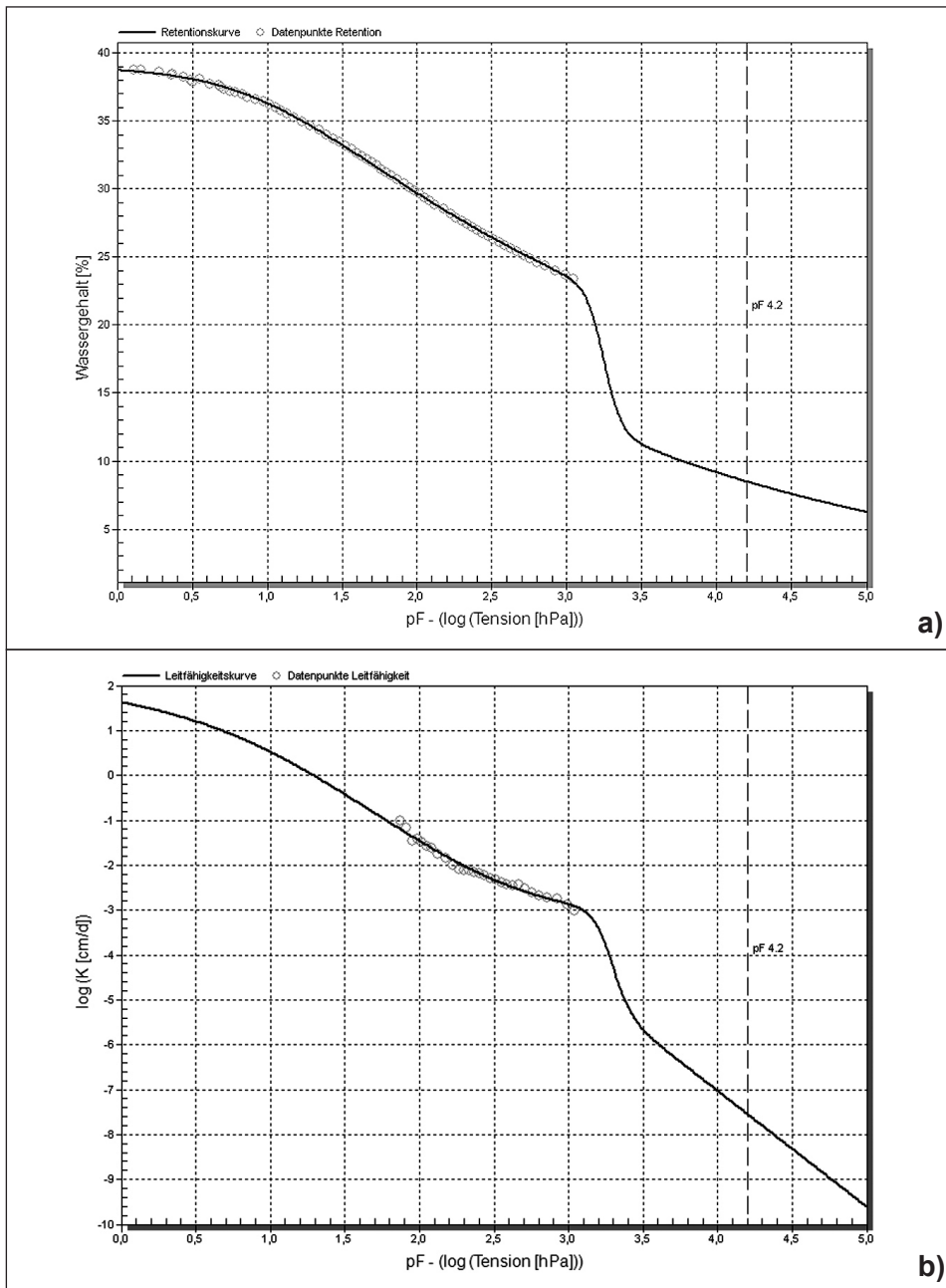


Fig. 5: Angepasste bodenhydraulische Modellfunktionen an die HYPROP-Messdaten unter Verwendung des bimodalen VAN GENUCHTEN/MUALEM-Modells: a) Retentionsdaten, b) ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit (K_U). $\log(K [cm/d])$ – Logarithmus der hydraulischen Leitfähigkeit.
 Soil hydraulic model functions fitted to the HYPROP-measuring data using the bimodal VAN GENUCHTEN/MUALEM-model: a) retention data, b) unsaturated hydraulic conductivity (K_U). $\log(K [cm/d])$ – logarithm of the hydraulic conductivity.

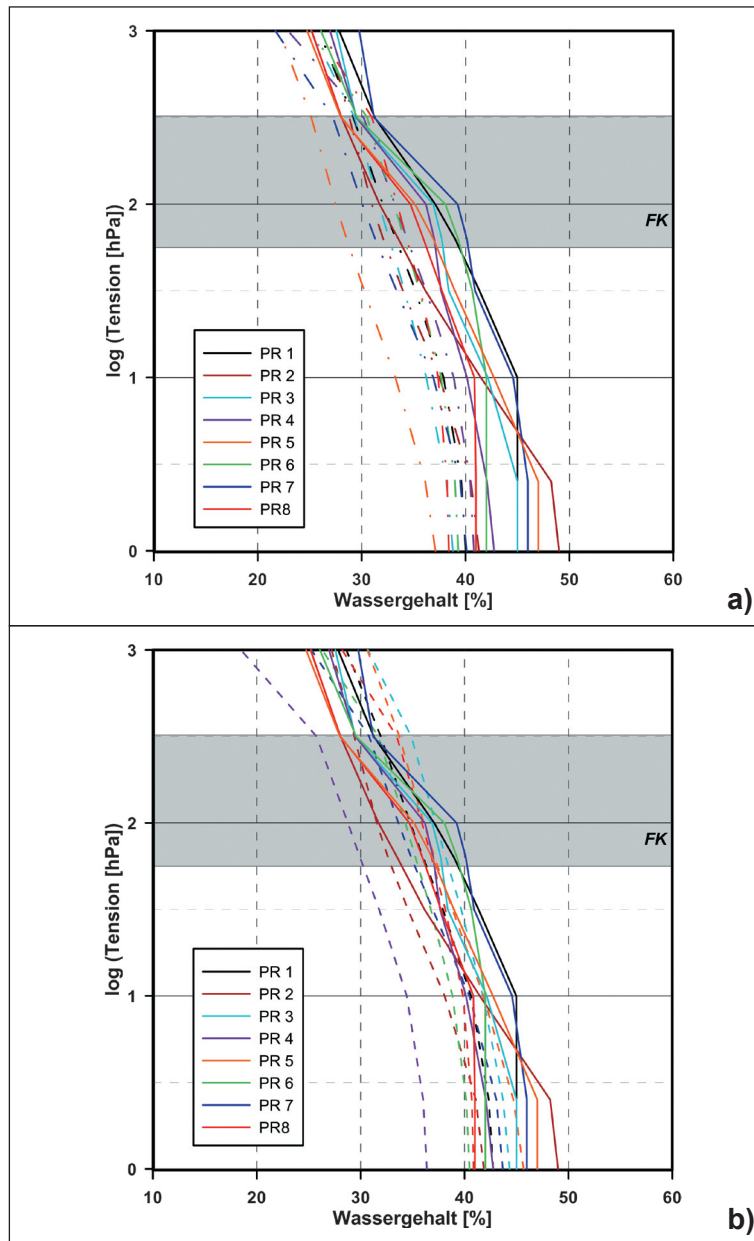


Fig. 6: Gemittelte Saugspannungskurven aller Standorte stationär (STZ100, durchgezogene Linien) und instationär (STZ250, strichlierte Linien): a) rein durch Wägung und auf Volumenprozent umgerechnete Wassergehalte der HYPROP-Daten, b) Retentionsdaten aus dem HYPROP unter Berücksichtigung der berechneten Lagerungsdichten und Porositäten. FK – Feldkapazität.
Averaged retention curves of all sampling sites analysed with steady state (STZ100 solid line) and transient (STZ250 dashed lines) methods: a) volumetric water content of the HYPROP data calculated from the weight data of the samples, b) retention data of the HYPROP considering the calculated bulk density and the porosity. FK – field capacity.

4.4. Vergleich der Ergebnisse aus stationären und instationären Messmethoden

An die instationär ermittelten Retentionsdaten wurden zuerst bodenhydraulische Modellfunktionen (bimodales VAN GENUCHTEN/MUALEM-Modell, Fig. 5a und 5b) angepasst, daraus die Wassergehalte für die pF-Stufen 0, 0,4, 1, 1,5, 1,8, 2,0, 2,5 und 3,0 errechnet und diese mit den stationär ermittelten Daten verglichen (Tab. 3). Figur 6a zeigt für alle Standorte die instationär mit der Verdunstungsmethode (G. P. WIND, 1966, U. SCHINDLER, 1980) ermittelten Wassergehalte im Vergleich zu den stationär ermittelten. Die stationär ermittelten Wassergehalte nahe Sättigung zeigen jedoch durchwegs höhere Werte als die aus der Lagerungsdichte errechneten Porositäten (Tab. 4). Dies weist vermutlich auf verdichtete Böden hin (K. H. HARTGE & R. HORN, 2009), was auch durch die teilweise hohen Lagerungsdichten bestätigt wird. Dies führt bei der Stechzylinderprobenahme zu einer Spannungsentlastung der Bodenproben und bei der Wassergehaltsbestimmung im Labor zu höheren Wassergehalten, was eine Verfälschung der Ergebnisse darstellt. Die Autoren K. H. HARTGE & R. HORN (2009) schlagen in solchen Fällen vor, anstelle der zu hohen Wassergehalte nahe der Sättigung die errechneten Porositäten zu verwenden. Daher wurde der Wassergehalt dem Porenvolumen bis zu jener pF-Stufe gleichgesetzt, ab der ein kleinerer Wert als das Porenvolumen der Sättigung vorliegt (Fig. 6a und 6b).

Die mit der instationären Verdunstungsmethode (G. P. WIND, 1966, U. SCHINDLER, 1980) an den STZ250 ermittelten Saugspannungskurven stimmen vom Kurvenverlauf gut mit den Ergebnissen der stationären Methode (STZ100) überein. Vor allem bei Saugspannungen <63 hPa sind die mit der instationären Methode ermittelten Wassergehalte jedoch systematisch um ca. 5–7 % geringer. Für die Vergleichbarkeit der stationären und instationären Methoden wurden die Anfangswassergehalte der Stechzylinderproben für das HYPROP ebenfalls auf die Porositätswerte aus Tab. 4 korrigiert (Fig. 6b). Mit den korrigierten Wassergehalten zeigt sich eine gute Übereinstimmung der beiden Methoden. Die Unterschiede der beiden Methoden mit Ausnahme von PR4 und PR2 liegen in der Größenordnung von ca. 2–3 % Wassergehalt. Neben einem möglichen Skaleneffekt der Stechzylinder, welcher bereits bei der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit beschrieben wurde, muss insbesondere berücksichtigt werden, dass bei beiden Untersuchungsmethoden der relative Fehler der Saugspannungsmessung in diesem Bereich am höchsten ist.

5. Schlussfolgerungen

Die beprobten Bodenhorizonte aller acht Standorte weisen sehr ähnliche bodenphysikalische Eigenschaften auf. Es handelt sich bei allen um strukturierte, lehmige bis schluffige Sande, deren Korngrößenverteilung und Saugspannungskurven auf ein breites Porengrößenspektrum hindeuten. Die Wassergehalte zeigen auch nahe der Sättigung noch eine deutliche Abhängigkeit von der Saugspannung, was auf gut strukturierte lehmige Böden (M. R. CARTER & E. G. GREGORICH, 2008) und Makroporen schließen lässt.

Die gesättigten hydraulischen Leitfähigkeitswerte aus den Laborpermeameterversuchen zeigen, dass es Schwankungen hinsichtlich der Stechzylindergrößen (100 cm³ oder 250 cm³), der einzelnen Stechzylinderproben an einem Standort und zwischen den Standorten gibt. Dies liegt zum einen daran, dass mit den kleinen Stechzylindern

(100 cm³) nicht immer repräsentative Proben bezüglich der Makroporen gezogen werden können. Zum anderen muss die Heterogenität des Standorts und somit auch der Proben berücksichtigt werden. Alle STZ100 zeigen geringere K_S -Mittelwerte an den Standorten, aber auch über das gesamte Versuchsfeld, wobei die Streuungen ähnliche Werte aufweisen wie die der großen STZ250. Generell zeigt sich aber bei den K_S -Werten eine Streuung, die darauf hinweist, dass auch die größeren Stechzylinder nur ein eingeschränktes repräsentatives Probenvolumen zur Erfassung der Makroporen ermöglichen, was durch eine höhere Probenzahl kompensiert werden muss. Eine deutliche Beeinflussung der K_S -Werte ist durch die Bewirtschaftung mittels schwerer landwirtschaftlicher Geräte und den dadurch verursachten Fahrspuren zu erkennen. Die K_S -Werte sind in den Fahrspuren um ca. eine Größenordnung geringer als in den Zwischenräumen. Dies wird auch durch die starke Streuung der Lagerungsdichten und den Retentionsdaten an einem Standort und durch erste In-situ-Messungen (Guelph-Permeameter) in und außerhalb von Fahrspurenbereichen bestätigt, wobei die Stichprobenzahl der In-situ-Messungen für eine statistische Auswertung noch zu gering ist.

Der Vergleich der K_S -Werte des Laborpermeameters mit K_{FS} des Guelph-Permeameters ergibt, dass mit dem Laborpermeameter höhere gesättigte hydraulische Leitfähigkeitswerte als mit den In-situ-Versuchen erzielt wurden. Kleinere K_{FS} -Werte gegenüber K_S -Werten sind aus der Literatur vor allem für Verhältnisse „stationärer Wasserstand im Bohrloch/Bohrlochradius“ < 5 bekannt (z. B. J. XIANG, 1994, G. CASSIANI, 1998). Vor allem die unsicheren Randbedingungen an der Bohrlochwand (Druckhöhe sowie punktueller Fluss) führen zu Unsicherheiten bei den analytischen Lösungen. Die Werte des Guelph-Permeameters sind in etwa um zwei bis drei Größenordnungen geringer. Mögliche Erklärungen liegen in den unterschiedlichen methodischen Ansätzen. Beispielsweise könnte bei der Feldsättigung während der Guelph-Permeameter-Messungen keine volle Sättigung des Bodens erreicht werden, sodass noch kleinste Luftporen die hydraulische Leitfähigkeit herabsetzen. Zudem können vereinzelte Makroporen, die einen Stechzylinder durchdringen, einen präferenziellen Wasserfluss bewirken und somit die Leitfähigkeit in diesem erhöhen. Für eine umfassende Charakterisierung eines Bodens sind je nach Fragestellungen beide Methoden aufgrund ihrer methodischen Unterschiede anzuwenden und wichtig. Dies ist auch bei der Anpassung der Modellfunktionen an den Kurvenverlauf der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit mit der vereinfachten Verdunstungsmethode von Bedeutung.

Die Untersuchungen zur Heterogenität der Standorte bezüglich ihrer Wassergehalte ergaben, dass die Wassergehalte der Stechzylinder eines Standorts über alle pF-Stufen ähnlich geringe Standardabweichungen bzw. Streubreiten zeigen. Ähnliche Standardabweichungen bzw. Streubreiten der Wassergehalte sind auch an den Mittelwerten aller acht Standorte zu erkennen (Fig. 4b). Zusammenfassend sind die Heterogenitäten am Standort geringer als die Heterogenität des gesamten Testfeldes.

Die mit der instationären Verdunstungsmethode an STZ250 ermittelten Saugspannungskurven stimmen vom Kurvenverlauf und den Absolutbeträgen gut mit den Ergebnissen der stationären Methode (STZ100) überein. Der Kurvenverlauf der HYPROP-Messdaten konnte mit dem bimodalen VAN GENUCHTEN/MUALEM-Modell sehr gut nachgebildet werden. Vor dem Methodenvergleich wurden die Wassergehalte noch auf die über die Lagerungsdichten errechneten Porositäten korrigiert. Die Gegenüberstellung der Methoden ergab eine systematische Differenz von ca. 2–3 % Wassergehalt bei Unterdrücken von < 63 hPa. Neben einem möglichen Skaleneffekt zwischen den beiden Stechzylindergrößen, wie bei den gesättigten hydraulischen Leitfähigkeitswerten beschrieben, muss insbesondere berücksichtigt werden, dass bei den Untersuchungsme-

thoden der relative Fehler der Saugspannungsmessung in diesem Bereich am höchsten ist. Die hohe Streuung der Lagerungsdichten an den Standorten selbst und über das gesamte Testfeld bestätigen die bodenhydraulischen Heterogenitäten der Standorte. Dies ist sicherlich auch auf den anthropogenen Einfluss durch die landwirtschaftliche Bewirtschaftung zurückzuführen. Des Weiteren muss berücksichtigt werden, dass die Proben zu unterschiedlichen Zeitpunkten (Frühjahr und Herbst) genommen wurden.

Zusammenfassend zeigt sich, dass alle Standorte sehr ähnliche Böden aufweisen, aber die gesättigten hydraulischen Leitfähigkeitswerte an einem Standort und unter den Standorten stark variieren, sowohl in den Absolutwerten als auch in der Streubreite. Die Retentionsdaten sind an allen Standorten sehr ähnlich und spiegeln im Wesentlichen das Korngrößenspektrum wider. Die unterschiedlichen stationären und instationären Untersuchungsmethoden liefern teilweise unterschiedliche Ergebnisse, was auf die jeweiligen methodischen Unsicherheiten zurückgeführt werden kann. Es konnten aber mit allen Untersuchungsmethoden die zum Teil anthropogen bedingten Heterogenitäten des beprobten Bodenhorizonts gezeigt werden, jedoch offenbarten sich teilweise systematische Differenzen in den Ergebnissen der unterschiedlichen Methoden. Eine Kombination unterschiedlicher Methoden für eine Fragestellung ohne näheren Vergleich am selben Beprobungspunkt ist daher sicherlich kritisch, da festgestellte Heterogenitäten oft nur methodische Unsicherheiten und daraus resultierende Streuungen der Ergebnisse sein können.

Zusammenfassung

Auf Grund steigender Nitratwerte im Grundwasser des Murtal-Aquifers wurde seit 1987 auf dem Versuchsfeld Wagna (Österreich) ein landwirtschaftlicher Großparzellenversuch aufgebaut, um die Auswirkungen unterschiedlicher Bewirtschaftungs- und Düngevarianten zu erforschen. Ein wägbares, monolithisches Präzisions-Unterdruck-Lysimeter befindet sich auf einem konventionell, ein weiteres auf einem organisch-biologisch bewirtschafteten Feld, ein drittes in einer durch extensive Grünlandnutzung charakterisierten Fahrgasse. Rückschlüsse von den Lysimetern auf andere Flächen erfordern Kenntnisse bezüglich der Heterogenität der bodenhydraulischen Kenngrößen innerhalb des Versuchsfeldes. Aus diesem Grund wurden ungestörte Stechzylinderproben aus dem Ap-Horizont in einer Tiefe von 15 cm unter GOK in unmittelbarer Nähe zu den Lysimetern und an mehreren Stellen innerhalb des Versuchsfeldes entnommen, um die bodenhydraulischen Kenngrößen der Oberböden im Labor zu ermitteln. Darüber hinaus wurden In-situ-Messungen der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit mittels Guelph-Permeameter durchgeführt.

Zur Ermittlung der Saugspannungskurven wurde neben dem stationären Standardverfahren (Sandsaugtisch, Drucktopf) die instationäre Verdunstungsmethode (HYPROP) verwendet. Für den Vergleich der stationären mit den instationären Verfahren müssen bodenhydraulische Modellfunktionen an die Messwerte aus dem HYPROP angepasst werden, um für die in den stationären Verfahren untersuchten pF-Stufen die Wassergehalte berechnen zu können. Es wurden hierfür das bimodale VAN GENUCHTEN/MUALEM-Modell eingesetzt, welches eine gute Anpassung an die Daten ermöglichte.

Bei beiden Verfahren zeigt sich eine kontinuierliche Änderung der Wassergehalte über den gesamten untersuchten Saugspannungsbereich. Daraus kann geschlossen werden,

dass die Oberböden auf dem Versuchsfeld über ein breites Porengrößenspektrum verfügen, insbesondere auch im Grobporenbereich. Obwohl beide Verfahren in dieser Hinsicht qualitativ gut übereinstimmen, unterscheiden sich die ermittelten Wassergehalte vor allem im sättigungsnahen Bereich systematisch, wobei die Werte der instationären Methode niedriger sind als jene der stationären. Insgesamt unterscheiden sich die Saugspannungskurven an den verschiedenen Standorten jedoch nur geringfügig und zeigen eine gegenüber Stechzylinderproben eines einzelnen Standorts nur unwesentlich höhere Variabilität.

Die im Laborpermeameter ermittelte gesättigte hydraulische Leitfähigkeit zeigt im Unterschied zu den Kenngrößen der ungesättigten Böden eine höhere Streubreite auch innerhalb der einzelnen Standorte, insbesondere bei Verwendung kleiner (100 cm^3) Stechzylinder. Selbst bei Verwendung größerer (250 cm^3) Stechzylinder variieren die an einem Standort ermittelten gesättigten Leitfähigkeitswerte jedoch um bis zu drei Größenordnungen. Dies weist darauf hin, dass mit dem gegebenen Probenvolumen keine repräsentative Beprobung des Makroporensystems erreicht wird. Die in situ mit dem Guelph-Permeameter ermittelten Leitfähigkeitswerte liegen um zwei bis drei Größenordnungen unter den im Labor ermittelten. Dies könnte ein Effekt der im größeren Testvolumen nicht durchgehend verbundenen Makroporen sein, aber ebenso durch eine im Feldversuch nicht vollständige Sättigung des Porenraums bedingt sein. Sowohl Labor- als auch In-situ-Untersuchungen zeigen eine deutliche Verringerung der gesättigten Leitfähigkeit im Bereich der durch schwere landwirtschaftliche Geräte verursachten Fahrspuren.

Literatur

- BARTOLI, F., V. GENEVOIS-GOMENDY, J. ROYER, S. NIQUET, H. VIVIER & R. GRAYSON (2005): A multi-scale study of silty soil structure.– *Eur. J. Soil Sci.*, **56**, 207–224 (Blackwell Publishing Ltd.).
- BERG, W. (2003): Monitoring, analysis and interpretation of nitrogenous components and their layered transport into the groundwater of a shallow quaternary aquifer (Leibnitzer Feld, Wagna).– Dissertation, Inst. f. Geographie und Raumforschung, Karl-Franzens-Universität, 201 S., Graz.
- BERGER, W., N. BÖTTCHER, W. DURNER, J. FANK, S. C. IDEN, U. JANSEN, Ch. LANTHALER, P. MAŁO-SZEWSKI, Th. PÜTZ, Th. REIMANN, G. ROCK, H. RÜTZEL, M. SCHEITHAUER, I. SCHEUERING, A. STEINS, E. STENITZER, W. STICHLER, C. STUMPP, G. VON UNOLD & H. VEREECKEN (2008): Lysimeter – ein Werkzeug zur genauen Erfassung von Wasser- und Stoffkreislaufparametern.– In: FANK, J. & Ch. LANTHALER (Hrsg., 2008): Diffuse Einträge in das Grundwasser: Monitoring – Modellierung – Management. Landwirtschaft und Wasserwirtschaft im Fokus zu erwartender Herausforderungen.– Beiträge zur Hydrogeologie, **56** (Jg. **2007/08**), 91–146, Graz.
- BLUM, W. E. H., H. SPIEGEL & W. W. WENZEL (1996): Bodenzustandsinventur.– 2. überarb. Aufl., 102 S., Wien.
- CARTER, M. R. & E. G. GREGORICH (Eds., 2008): Soil Sampling and Methods of Analysis.– 2nd edition, 1224 S., Boca Raton (CRC Press).
- CASSIANI, G. (1998): A new method for the interpretation of the constant-head well permeameter.– *Journal of Hydrology*, **210**, 11–20, Amsterdam (Elsevier).
- DURNER, W. (1994): Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure.– *Water Resour. Res.*, **30**, 211–223, Washington D.C. (Am. Geophys. Union).
- DURNER, W., U. JANSEN & S. C. IDEN (2008): Effective hydraulic properties of layered soils at lysimeter scale determined by inverse modeling.– *Eur. J. Soil Sci.*, **59**, 114–124 (Blackwell Publishing Ltd.).
- FANK, J. (1999): Die Bedeutung der ungesättigten Zone für Grundwasserneubildung und Nitratbefrachtung des Grundwassers in quartären Lockersediment-Aquiferen am Beispiel des Leibnitzer Feldes (Steiermark, Österreich).– Beiträge zur Hydrogeologie, **49/50**, 101–388, Graz.

- FANK, J. (2009): Das landwirtschaftliche Versuchsfeld Wagna und seine hydrometeorologischen Mess-einrichtungen.– Bericht zur 13. Gumpensteiner Lysimetertagung „Lysimeter – Perspektiven in Forschung und Anwendung“, 21.–22. April 2009, LFZ Raumberg-Gumpenstein, 123–126, Irdning.
- FANK, J. & Ch. LANTHALER (Hrsg., 2008): Diffuse Einträge in das Grundwasser: Monitoring – Modellierung – Management. Landwirtschaft und Wasserwirtschaft im Fokus zu erwartender Herausforderungen.– Beiträge zur Hydrogeologie, **56** (Jg. **2007/08**), 244 S., Graz.
- FANK, J. & G. VON UNOLD (2007): High-precision weighable field lysimeter – a tool to measure water and solute balance parameters.– *International Water & Irrigation*, **27/3**, 28–32, Tel Aviv.
- HARTGE, K. H. & R. HORN (2009): Die physikalische Untersuchung von Böden. Praxis, Messmethoden, Auswertung.– 4. vollst. überarb. Aufl., 178 S., Stuttgart (Schweizerbart).
- PRIESACK, E. & W. DURNER (2006): Closed-form expression for the multi-modal unsaturated conductivity function.– *Vadose Zone Journal*, **5**, 121–124, Madison, Wisconsin.
- REYNOLDS, W. D. (2008a): Saturated Hydraulic Properties: Laboratory Methods.– Chapter 75 in: CARTER, M. R. & E. G. GREGORICH (Eds., 2008): *Soil Sampling and Methods of Analysis*.– 2nd edition, 1013–1024, Boca Raton (CRC Press).
- REYNOLDS, W. D. (2008b): Saturated Hydraulic Properties: Well Permeameter.– Chapter 76 in: CARTER, M. R. & E. G. GREGORICH (Eds., 2008): *Soil Sampling and Methods of Analysis*.– 2nd edition, 1025–1042, Boca Raton (CRC Press).
- REYNOLDS, W. D. & D. E. ELRICK (1986): A method for simultaneous in situ measurement in the vadose zone of field saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the conductivity-pressure head relationship.– *Ground Water Monitoring Review*, **6**, 84–95, Worthington, Ohio.
- REYNOLDS, W. D., D. E. ELRICK & B. E. CLOTHIER (1986): The constant head well permeameter: effect of unsaturated flow.– *Soil Sci.*, **139**, 172–180, Hagerstown, Md.
- RUSSO, D., I. RUSSO & A. LAUFER (1997): On the spatial variability of parameters of the unsaturated hydraulic conductivity.– *Water Resour. Res.*, **33**, 947–956, Washington D.C. (Am. Geophys. Union).
- SCHINDLER, U. (1980): Ein Schnellverfahren zur Messung der Wasserleitfähigkeit im teilgesättigten Boden an Stechzylinderproben.– *Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenk.*, **24/1**, 1–7, Berlin.
- SCHINDLER, U. & L. MÜLLER (2006): Simplifying the evaporation method for quantifying soil hydraulic properties.– *J. of Plant Nutrition and Soil Science*, **169** (5), 623–629, Weinheim (Wiley).
- SCHINDLER, U., J. THIÈRE, J. STEIDL & L. MÜLLER (2004): Bodenhydrologische Kennwerte heterogener Flächeneinheiten – Methodik der Ableitung und Anwendungsbeispiel für Nordostdeutschland.– *Fachbeiträge des Landesumweltamtes*, H. **87**, Bodenschutz **2**, 55 S., Landesumweltamt Brandenburg, Potsdam.
- SEVERINO, G., A. SANTINI & A. SOMMELLA (2003): Determining the soil hydraulic conductivity by means of a field scale internal drainage.– *Journal of Hydrology*, **273**, 234–248, Amsterdam (Elsevier).
- STOLTE, J., B. VAN VENROOIJ, GUANGHUI ZHANG, K. O. TROUWBORST, LIU GUOBIN, C. J. RITSEMA & R. HESSEL (2003): Land-use induced spatial heterogeneity of soil hydraulic properties on the Loess Plateau in China.– *Catena*, **54** (1-2), Soil erosion and participatory land use planning on the Loess Plateau in China, 59–75, Gießen (Elsevier).
- UMS (2008): Handbuch HYPROP, Laborverdunstungsmethode nach WIND/SCHINDLER.– Homepage: www.ums-muc.de/produkte/bodenlabor/hyprop.html [6. 6. 2011].
- VOGEL, H. J. & K. ROTH (2003): Moving through scales of flow and transport in soil.– *Journal of Hydrology*, **272** (1–4), *Soil Hydrological Properties and Processes and their Variability in Space and Time*, 95–106, Amsterdam (Elsevier).
- WALTHER, M., J. FANK & Th. REIMANN (2010): Tiefengestaffeltes Wasserprobennahmesystem zur spezifischen Beprobung der ungesättigten Zone, dem Kapillarsaum und der gesättigten Zone.– *Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie*, **15/1** (2010), 19–32, DOI 10.1007/s00767-009-0129-6, Heidelberg (Springer).
- WIND, G. P. (1966): Capillary conductivity data estimated by a simple method.– In: UNESCO/IASH (1966): *Proc. Symp. Water in the unsaturated zone*, Wageningen, The Netherlands, 181–191, Wageningen.
- XIANG, J. (1994): Improvements in evaluating constant-head permeameter test data.– *Journal of Hydrology*, **162**, 77–97, Amsterdam (Elsevier).

Summary

Because of increasing nitrate concentrations in the groundwater of the Mur valley an agricultural large-parcel experiment has been established since 1987 at the test site Wagna (Austria) to examine the effects of various management and fertilization techniques. Weighable, monolithic, suction-controlled lysimeters are located on parcels with conventional farming, organic farming, and grassland. Inferences from lysimeters on other parcels require knowledge about the heterogeneity of soil-hydraulic parameters within the test site. For this reason, undisturbed steel-pipe samples were taken from the Ap horizon in a depth of 15 cm below ground surface in close vicinity to the lysimeters and at several other locations within the test site to quantify the soil-hydraulic parameters of the topsoils in the lab. In addition, the saturated hydraulic conductivity was measured in situ using a Guelph permeameter.

Soil-water retention curves were identified using the stationary standard method (sand box, pressure extractor) and the transient evaporation method (HYPROP). To compare stationary and transient methods the soil-hydraulic functions have to be fitted to data measured with the HYPROP to be able to calculate water contents at the pF values investigated by the stationary methods. To this end, the bimodal VAN GENUCHTEN/MUALEM retention function, which enabled a good fit to the data, was employed.

Results from both methods reveal that the soil samples release water over the entire tension range measured. This suggests that the topsoils on the test site provide a broad range of pore sizes, including also macropores. Although both methods agree qualitatively in this respect, the measured water contents deviate systematically close to saturation; the values measured using the transient method are generally lower than those obtained with the stationary method. Overall, the soil-water retention curves of the different sampling locations deviate only slightly and show only marginally higher variability compared with that of samples from a single location.

As opposed to the parameters of the unsaturated soil, the saturated hydraulic conductivity measured using the lab permeameter exhibits high variability even within a single sampling location, in particular, if small (100 cm³) steel pipes are used. Even if larger (250 cm³) steel pipes are used the saturated conductivity may vary by three orders of magnitude within a single location. This suggests that the sampling volume is not sufficiently large to provide a representative sample of the macropore system. The conductivities measured in situ with the Guelph permeameter are lower by two to three orders of magnitude than the values measured in the lab. This might be an effect of not sufficiently connected macropores within the larger test volume, but might be also caused by incomplete saturation of the soil pores in the field test. Both lab and in-situ method demonstrate a reduced saturated conductivity within lanes created by heavy agricultural engines.

Dank

Die Gelände- und Laborarbeiten wurden durch die JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH im Zuge des EU-Projekts iSOIL unterstützt.

iSOIL – “Interactions between soil related sciences – Linking geophysics, soil science and digital soil mapping” is a Collaborative Project (Grant Agreement number 211386) co-funded by the Research DG of the European Commission within the RTD activities of the FP7 Thematic Priority Environment. This publication reflects the author’s views. The European Commission is not liable for any use that may be made of the information contained therein.

Die Autoren bedanken sich bei Wolfgang DURNER für die kritische Durchsicht des Manuskripts und die konstruktiven Anregungen.

Schlüsselwörter: Saugspannungskurve, bodenhydraulische Eigenschaften, Bodenheterogenität, lehmige Sande

Keywords: retention curve, soil hydraulic properties, soil heterogeneity, loamy sands