

Test und Entwicklung von Pedotransferfunktionen für Wasserretention und hydraulische Leitfähigkeit von Waldböden

Testing and development of pedotransfer functions for water retention and hydraulic conductivity of forest soils

Heike Puhmann & Klaus von Wilpert

Abstract

The hydraulic properties of soils, i. e., their capability to store and to conduct water, largely regulate the availability of soil water for plants and the risk of water shortage in forests. To date, only a few systematic surveys on the hydraulic properties of forest soils have been done. We conducted multi-step outflow experiments to derive data on soil water retention and unsaturated hydraulic conductivity for 1504 undisturbed samples from forest soils in Baden-Württemberg. Using complementary measurements (fractions of fine and coarse soil, bulk density, organic carbon content), pedotransfer functions were developed for the prediction of the Mualem/van Genuchten model parameters. The predictions of the new pedotransfer functions were compared with various pedotransfer functions from the literature. An advantage of the new pedotransfer functions is that they provide an unbiased estimate of the hydraulic properties of the forest soils in Baden-Württemberg, and their predictive ability is comparable to those of published pedotransfer functions.

Keywords: soil hydraulic properties, pedotransfer functions, water retention, hydraulic conductivity, multi-step outflow experiments

Zusammenfassung

Die hydraulischen Bodeneigenschaften, also deren Fähigkeit Wasser zu speichern und zu leiten, bestimmen maßgeblich die Verfügbarkeit des Bodenwassers für Pflanzen und das Risiko von Wassermangel in Wäldern. Bislang existieren kaum systematische Untersuchungen zu den hydraulischen Eigenschaften von Waldböden. Wir führten Multi-Step-Outflow-Versuche durch, um die Wasserretentionskurve und die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit an insgesamt 1504 ungestörten Proben von Waldböden Baden-Württembergs zu ermitteln. Unter Verwendung zusätzlicher Messungen (Fraktionen des Fein- und Grobbodens, Trockenrohdichte, Gehalt an organischem Material) wurden Pedotransferfunktionen zur Schätzung der Parameter des Mualem/van Genuchten-Modells entwickelt. Die Schätzungen der neuen Pedotransferfunktionen wurden mit verschiedenen Pedotransferfunktionen aus der Literatur verglichen. Ein Vorteil der neuen Pedotransferfunktionen ist, dass sie unverzerrte Schätzungen der hydraulischen Eigenschaften der Waldböden von Baden-Württemberg liefern; ihre Vorhersagegüte ist vergleichbar mit veröffentlichten Pedotransferfunktionen.

Schlüsselwörter: bodenhydraulische Eigenschaften, Pedotransferfunktionen, Wasserrückhaltung, hydraulische Leitfähigkeit, Multi-Step-Outflow-Versuche

1 Einleitung

Bodenkundliche Monitoringdaten können eine wertvolle Basis für die Ableitung bodenphysikalischer Inputgrößen zur Modellierung von Wasser- und Stoffflüssen im Boden darstellen. Allerdings merkten unter anderem TIETJE & HENNINGS (1996) an, dass hierfür verlässlichere Daten zum Wasserretentions- und Leitfähigkeitsvermögen benötigt werden und diese im Rahmen von Routinemonitoring erfasst werden sollten. Dies gilt ganz besonders für Waldböden, da sich bodenhydraulische Messungen bislang überwiegend auf landwirtschaftliche Flächen konzentrieren (MECKE et al. 2000). Die Anwendung solcher Messungen für die hydraulische Modellierung von Waldböden ist problematisch, da Waldböden deutlich andere hydraulische Eigenschaften aufweisen als landwirtschaftlich genutzte Böden. Sie sind, unter anderem, weniger verdichtet, weisen eine höhere Aggregatstabilität und Makroporosität auf und haben deshalb in der Regel höhere gesättigte hydraulische Leitfähigkeiten und Luftkapazitäten (FISHER & BINKLEY 2000). Die Anwendung verfügbarer bodenhydraulischer Datenbanken wie UNSODA (NEMES et al. 2001), NIBIS (TIETJE & HENNINGS 1996) oder HYPRES (WÖSTEN et al. 1999) wird auch erschwert durch die vielfältigen Versuchsdesigns für die Messung der bodenhydraulischen Funktionen. Nicht zuletzt beschränken sich die meisten Datenbanken auf die Wasserretention und enthalten häufig keine oder nur in sehr beschränktem Umfang Informationen zur ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit.

Bodenhydraulische Datenbanken liefern die empirische Basis für die Entwicklung von Pedotransferfunktionen (PTFs). PTFs beschreiben statistische Beziehungen zwischen einfach messbaren und den hydraulischen Bodeneigenschaften. Unter Verwendung dieser Beziehungen können Wasserretention und hydraulische Leitfähigkeit aus leichter verfügbaren Bodendaten vorhergesagt und teure und zeitaufwändige Labormessungen der bodenhydraulischen Eigenschaften auf diese Weise vermieden werden. Einen umfassenden Überblick über die aktuellen Entwicklungen auf dem Gebiet der Pedotransferfunktionen geben PACHEPSKY & RAWLS (2004). Für die PTFs gilt analog zu den vorhandenen hydraulischen Datenbanken, dass die Mehrzahl für landwirtschaftlich genutzte Böden entwickelt wurde (HANGEN & SCHERZER 2004). HANGEN & SCHERZER (2004) prüften die Anwendbarkeit und die Aussagefähigkeit verschiedener Pedotransferfunktionen für Waldböden in Deutschland. Sie stellten fest, dass nur PTFs, die (wenigstens teilweise) Waldböden mit ihren spezifischen bodenphysikalischen Eigenschaften im Datensatz berücksichtigten, für die Schätzung von Kenngrößen des Bodenwasserhaushalts (Feldkapazität und nutzbares pflanzenverfügbares Wasser) geeignet sind. Zu diesen PTFs zählen nach HANGEN & SCHERZER (2004) die Entwicklungen von BATJES (1996), SCHEINOST et al. (1997),

AD-HOC-AG BODEN (1994), TEEPE et al. (2003) und RIEK et al. (1995). Relativ gute Ergebnisse für Waldstandorte wurden laut HANGEN & SCHERZER (2004) auch mit den PTFs von WÖSTEN et al. (1999) sowie den ursprünglich für landwirtschaftliche Standorte entwickelten PTFs von VEREECKEN et al. (1989) erzielt. PTFs (FK, nFK und Parameter des Mualem/van Genuchten-Modells) speziell für die (überwiegend sandigen) Waldböden des nordostdeutschen Tieflands entwickelten SCHINDLER et al. (2004), aufbauend auf ca. 200 mit dem Verdunstungsverfahren von SCHINDLER (1980) analysierten sowie ca. 200 weiteren Bodenproben. In einer Untersuchung verschiedener PTFs hinsichtlich der Anwendbarkeit auf brandenburgische Waldböden zeigten RUSS & RIEK (2011) unter anderem, dass PTFs eine höhere Schätzgüte aufwiesen, wenn der Datensatz zur Entwicklung der PTFs Böden enthielt, welche mit den Böden im Anwendungsgebiet vergleichbar waren. Sehr häufig werden die Tabellen der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AD-HOC-AG BODEN 2005) zur Schätzung der Bodenwasserkenngrößen eingesetzt. RENGER et al. (2008) argumentieren unter anderem, dass diesen Tabellen teilweise unplausible Ausgangsdaten zugrunde liegen und insbesondere die Tabelle der Zu-/Abschläge für den Humusgehalt korrekturbedürftig sind, und veröffentlichten eine überarbeitete Version dieser Schätztabellen.

In allen verfügbaren PTFs für die Berechnung der Parameter des weit verbreiteten Mualem/van Genuchten (MvG)-Modells (u. a. WÖSTEN & VAN GENUCHTEN 1988, VEREECKEN et al. 1989, SCHEINOST et al. 1997, SCHAAP & LEIJ 1998, WÖSTEN et al. 1999, TEEPE et al. 2003) liegen die größten Unsicherheiten bei der Schätzung des Lufteintrittspunktes, des Tortuositätsparameters und der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit. ZACHARIAS & WESSOLEK (2007) und WEYNANTS et al. (2009) erhöhten die Genauigkeit und die Schätzsicherheit von PTFs, wenn die Kalibrierungsmethode von SCHEINOST et al. (1997) zur Erstellung der PTFs verwendet wurde und nicht die üblicherweise eingesetzte schrittweise Vorwärtsselektion.

Die Mehrheit der veröffentlichten PTFs wurde auf der Basis von Wasserretentionsmessungen mit Sandbetten und Drucktöpfen entwickelt. Solche statischen Versuche sind allerdings sehr zeitaufwändig, wodurch der verfügbare Datenumfang zur Erstellung von PTFs in der Regel stark limitiert wird. Ein schnelleres Verfahren stellt die Kombination dynamischer Fließexperimente mit einer inversen Parameteroptimierung dar. Ein üblicher Versuchsaufbau sind Multi-Step-Outflow-Versuche (MSO-Versuche), bei denen am unteren Rand der Bodenprobe eine Folge von Unterdruckstufen angelegt und die Reaktion, d. h. der Wasserfluss durch die Probe oder Wassergehalte/Saugspannungen innerhalb der Probe, beobachtet wird (DANE & TOPP 2002). Inverse Parameterschätzverfahren verwenden eine nichtlineare Optimierungsprozedur, um die Retentions- und Leitfähigkeitskurven über eine Anpassung der numerischen Simulation des Fließexperimentes und der während des Versuchs gemessenen Daten zu bestimmen. MSO-Versuche sind schnell, relativ einfach durchzuführen und liefern verlässliche Messungen nicht nur der Wasserretention, sondern auch der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit. PUHLMANN et al. (2009) passten die MSO-Methode an die Erfordernisse von Routinemonitoringprogrammen an, insbesondere bezüglich einer Standardisierung der experimentellen Randbedingungen sowie der zeitlichen und personellen Anforderungen. Dieser Versuchsaufbau wurde verwendet, um eine repräsentative Datenbank für Waldböden zu erstellen, welche neben Retentionskurven und ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten auch einen umfassenden Satz weiterer bodenphysikalischer und -chemischer Eigenschaften enthält (PUHLMANN et al. 2009).

Dieser Datensatz wurde später schrittweise erweitert und zur Erstellung von Pedotransferfunktionen für das Mualem/van Genuchten-Modell verwendet (PUHLMANN & VON WILPERT 2011). Die vorliegende Arbeit baut methodisch auf die Entwicklungen von PUHLMANN & VON WILPERT (2011) auf, verwendet aber einen deutlich erweiterten Datensatz. Mithilfe dieses Datensatzes werden Pedotransferfunktionen entwickelt, welche im Vergleich zu den Pedotransferfunktionen von PUHLMANN & VON WILPERT (2011) reduzierte Anforderungen an die Eingangsgrößen in die Pedotransferfunktionen haben und somit in der Praxis breiter anwendbar sein werden.

2 Theorie und Methoden

2.1 Bodenhydraulische Funktionen

Zur Beschreibung der Wasserretention und der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit wurden die Modelle von MUALEM (1976) und VAN GENUCHTEN (1980) in einer Modifikation von VOGEL & CISLEROVA (1988) und VOGEL et al. (2001) verwendet:

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (1)$$

$$\theta(\psi) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_m - \theta_r}{\left[1 + |\alpha\psi|^n\right]^m}, & \psi < \psi_s \\ \theta_s, & \psi \geq \psi_s \end{cases} \quad (2)$$

$$K(\psi) = \begin{cases} K_s K_r(\psi), & \psi < \psi_s \\ K_s, & \psi \geq \psi_s \end{cases} \quad (3)$$

wobei

$$K_r(\Theta) = \Theta^\tau \left[\frac{1 - F(\Theta)}{1 - F(1)} \right]^2 \quad (4)$$

$$F(\Theta) = \left(1 - \Theta^{*1/m}\right)^m \quad (5)$$

$$\Theta^* = \frac{\theta_s - \theta_r}{\theta_m - \theta_r} \Theta \quad (6)$$

In diesen Gleichungen ist θ der volumetrische Wassergehalt ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) und ψ die Saugspannung (hPa). Θ ist der relative Wassergehalt, θ_s ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) und θ_r ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) sind der Sättigungs- und der Residualwassergehalt. α (hPa^{-1}), n und m (mit $m = 1 - 1/n$) sind empirische Formparameter der hydraulischen Funktionen, K_s (cm s^{-1}) ist die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit und τ ist Mualems dimensionsloser Tortuositätsfaktor. Der virtuelle Wassergehalt θ_m wurde über Gleichung (12) in VOGEL et al. (2001) berechnet. Die Einführung einer kapillaren Druckhöhe ψ_s führt zu einer weniger nicht-linearen Leitfähigkeitsfunktion im Bereich nahe Sättigung und bewirkt damit eine numerisch stabilere Lösung der Richards-Gleichung. Insbesondere für feinkörnige Substrate wird mit dieser Modifikation des Mualem/van Genuchten-Modells die Leitfähigkeitsfunktion nahe Sättigung besser abgebildet. Entsprechend den Empfehlungen in VOGEL et al. (2001) wurde der Wert von ψ_s auf -2 hPa festgesetzt.

Die Parameter der Funktionen (1) bis (6) – θ_r , θ_s , α , n , K_s , τ – werden im Weiteren als Mualem/van Genuchten-Parameter (kurz: MvG-Parameter) bezeichnet.

2.2 MSO-Versuche zur Bestimmung von Wasserretention und ungesättigter hydraulischer Leitfähigkeit

Die bodenhydraulischen Eigenschaften wurden an ungestörten Bodenproben (100 ml-Stechzylinder) mittels MSO-Versuchen im Labor bestimmt. In diesen Experimenten wird eine wassergesättigte Bodenprobe auf eine wasserdurchlässige keramische Platte gesetzt. Unterhalb der keramischen Platte wird ein Unterdruck angelegt, der in Form einer Treppenfunktion schrittweise erhöht wird. Durch den Unterdruck wird eine Entwässerung der Probe bewirkt. Während des Experiments wird der Auslauf aus der Probe in einer Flasche gesammelt und kontinuierlich gewogen. Mit Hilfe eines Mikrotensiometers wird die Druckveränderung in der Bodenprobe (Saugspannung) – in Reaktion auf den angelegten Unterdruck – gemessen. Der Versuchsaufbau ermöglicht die gleichzeitige Analyse von 10 Bodenproben. Details zum Versuchsaufbau und zur Festlegung der Druckregime können PUHLMANN et al. (2009) entnommen werden.

Aus den gemessenen Zeitreihen des Auslaufs und der Saugspannung werden die bodenhydraulischen Kenngrößen mit Hilfe inverser Parameterschätzung bestimmt. Hierfür wird der Laborversuch mit Hilfe eines numerischen Bodenwasserströmungsmodells und unter Verwendung der in Gl. (1) bis (6) definierten hydraulischen Funktionen simuliert. Ein Optimierungsalgorithmus minimiert die Differenz zwischen modellierten und gemessenen Zeitreihen des Auslaufs und der Saugspannung, indem die bodenhydraulischen Kennfunktionen im Bodenwasserströmungsmodell schrittweise verändert werden. Einen umfassenden Überblick über Multi-Step-Outflow-Versuche und die inverse Parameteroptimierung enthält DANE & TOPP (2002).

2.3 Entwicklung der PTFs

Die PTFs wurden mit Hilfe einer MATLAB-Implementierung der schrittweisen Vorwärtsregression ("stepwise forward regression") erstellt. Bei der schrittweisen Vorwärtsregression werden Terme entsprechend ihrer statistischen Signifikanz im Regressionsmodell zu einem multilinenen Modell addiert. Das Verfahren beginnt mit einem initialen Modell und vergleicht dann die Erklärungsgüte des Modells mit schrittweiser Erhöhung der Anzahl der Modellterme. Bei jedem Schritt werden die p -Werte einer F -Statistik berechnet, um Modelle mit und ohne einen neuen (potentiellen) Term zu vergleichen. Das Verfahren stoppt, wenn kein weiterer Schritt (d. h. die Hinzunahme eines weiteren Modellterms) die Modellgüte verbessert. In Abhängigkeit von den Termen des Initialmodells und von der Reihenfolge, in der neue Terme zum Modell hinzugefügt werden, kann das Verfahren vom gleichen Satz potentieller Modellterme unterschiedliche Regressionsmodelle erstellen. Aus diesem Grund wurden für jeden MvG-Parameter 100 verschiedene Regressionsmodelle mit 100 zufällig gewählten Sets potentieller Modellterme erstellt. Methodische Einzelheiten zur Entwicklung der PTFs sind in PUHLMANN & VON WILPERT (2011) enthalten.

Die Schätzgüte der PTFs wurde anhand des Bestimmtheitsmaßes R^2 , des mittleren Quadratwurzelfehlers $RMSR$ und des mittleren Fehlers MR beurteilt:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (p_i - p'_i)^2}{\sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})^2} \quad (7)$$

$$RMSR = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - p'_i)^2} \quad (8)$$

$$MR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - p'_i) \quad (9)$$

In Gl. (7) bis (9) ist N die Stichprobengröße, p und p' sind gemessene bzw. vorhergesagte MvG-Parameter (entweder θ_s , θ_r , α , n , K_s oder τ), Wassergehalte oder Leitfähigkeiten.

3 Datenmaterial

Zur Entwicklung und Validierung der PTFs wurden insgesamt 1504 Bodenproben („Gesamtdatensatz“) verwendet (788 Proben aus 10–14 cm, 691 Proben aus 30–34 cm und je 5 Proben aus 0–4 cm, 20–24 cm, 40–44 cm, 50–54 cm sowie 60–64 cm Mineralbodentiefe).

Die Druckregime der MSO-Versuche wurden hinsichtlich des Informationsgehalts der Messreihen (VRUGT et al. 2001) und des während des Versuchs entwässerten Volumens optimiert (PUHLMANN et al. 2009). Tabelle 1 enthält Angaben darüber, welcher Anteil des entwässerbaren Volumens einer Bodenprobe (bezogen auf $\theta_s - \theta_r$) während des MSO-Versuches tatsächlich entwässert wurde. Obwohl während der MSO-Versuche nur Unterdrücke bis -500 hPa angelegt wurden, verlor der überwiegende Teil der Proben deutlich mehr als die Hälfte seines entwässerbaren Volumens. Standardmäßig wurde an allen Proben, die während des MSO-Versuchs weniger als die Hälfte des entwässerbaren Volumens abgaben, ein zusätzlicher Wassergehaltswert im Drucktopf bei -900 hPa bestimmt, um die Form der Retentionskurve im trockenen Bereich besser abzubilden. Tabelle 1 gibt außerdem einen Überblick über die Güte der inversen Parameteroptimierung. Die Quadratwurzelfehler ($RMSR$) zwischen gemessenen und mit den optimierten MvG-Parametern simulierten Zeitreihen werden für die Saugspannungsbereiche $\psi > -63$ hPa und $\psi \leq -63$ hPa angegeben. Aufgrund der log-Transformation der Saugspannung (pF -Werte) in der Zielfunktion für die inverse Optimierung sind die $RMSR$ -Werte für die Saugspannung im trockenen Bereich etwas höher (mittlerer $RMSR = 7,7$ hPa über alle Bodenarten) als im feuchten Bereich (mittlerer $RMSR = 2,9$ hPa). Die $RMSR$ -Werte für das Wasservolumen sind im trockenen Bereich tendenziell kleiner (mittlerer $RMSR = 0,4$ cm³ über alle Bodenarten) als im feuchten Bereich (mittlerer $RMSR = 0,8$ cm³).

Drei Viertel des Gesamtdatensatzes dienten der Entwicklung der PTFs („Kalibrierungsdatensatz“). Von diesen Bodenproben fielen 395 Proben in die Gruppe der Lehme, 373 Proben waren Schluffe, 83 Tone und 277 Sande. Das verbleibende Viertel des Datensatzes (137 Lehme, 127 Schluffe, 29 Tone, 83 Sande) wurden zur Validierung der erstellten PTFs verwendet („Validierungsdatensatz“).

Die Korngrößenverteilung der Ton- und Schlufffraktionen wurde mit einem Laser-Particle-Sizer (Fritsch-Analysette 22), die der Sandfraktionen durch Nasssiebung ermittelt.

Tab. 1: Während der MSO-Versuche entwässertes Volumen bezogen auf $\theta_s - \theta_r$ (Mediane für Bodenartengruppen) und RMSR zwischen gemessenen Zeitreihen von Saugspannung/Wasservolumen und den mit den optimierten MvG-Parametern simulierten Zeitreihen im Gesamtdatensatz (Mittelwerte für Bodenartengruppen); Bodenartengruppen nach AD-HOC-AG BODEN (2005).

Tab. 1: Water volume drained during the MSO experiments in relation to $\theta_s - \theta_r$ (medians for soil texture groups) and root mean square residuals (RMSR) between measured time series of soil matrix potential/water volume and time series simulated with the optimized MvG parameters (mean values for soil texture groups); soil texture groups according to AD-HOC-AG BODEN (2005).

Bodenarten- gruppe	Probenzahl	Entwässertes Volumen /%	RMSR Saugspannung /pF		RMSR Wasservolumen /cm ³	
			$\psi > -63$ hPa	$\psi \leq -63$ hPa	$\psi > -63$ hPa	$\psi \leq -63$ hPa
ss	8	68,2	2,4	5,6	0,7	0,5
ls	287	62,0	2,7	7,2	0,8	0,4
us	69	72,1	3,2	6,4	0,9	0,4
sl	266	61,6	3,2	7,4	0,9	0,4
ll	239	64,0	3,0	7,4	0,5	0,3
su	9	64,9	2,8	11,0	0,9	0,4
lu	109	71,5	2,9	7,1	0,8	0,4
tu	410	57,4	2,8	7,2	0,8	0,4
ut	96	72,1	4,2	8,6	0,8	0,4
lt	11	67,7	2,0	9,4	0,7	0,6

Um die Vergleichbarkeit mit anderen PTF-Entwicklungen zu gewährleisten, wurden die Laserdaten über lineare Regressionen in "Pipette-Äquivalente" umgerechnet (PUHLMANN & VON WILPERT 2011). Der Datensatz umfasst eine große Spannbreite an Böden zwischen reinem Sand, leicht schluffigem Ton und leicht lehmigem Schluff. Lediglich sehr tonreiche Substrate fehlen im Datensatz.

Die Trockenraumdichte wurde direkt an den für die MSO-Versuche verwendeten Stechzylindern bestimmt. 41 % der Proben fallen in Dichteklasse 1 ($< 1,2$ g cm⁻³, Klassifizierung nach AD-HOC-AG BODEN 2005), 38 % in Klasse 2 ($1,2 \dots < 1,4$ g cm⁻³) und 19 % in Klasse 3 ($1,4 \dots < 1,6$ g cm⁻³). Nur 2 % gehören zu Klasse 4 oder 5 ($\geq 1,6$ g cm⁻³). Der Gehalt an organischem Kohlenstoff (C_{org}) variiert zwischen 4,6 und 61 g kg⁻¹ in den oberen Probenahmetiefen (0–30 cm) und ist geringer (1,6 bis 24 g kg⁻¹) in den unteren Tiefen (30–64 cm).

Die Skelettfractionen (2–6,3 mm, 6,3–20 mm, 20–63 mm und > 63 mm) wurden an 200 cm³-Stechzylindern (für Grobbodenanteile < 20 Vol%) oder gestörten Proben mit 5–10 l Probenvolumen (für Grobbodenanteile zwischen 20 und 70 Vol%) durch Sieben der ofentrockenen Proben bestimmt. Für die Entwicklung der Pedotransferfunktionen wurden nur Bodenproben mit einem Feinskelettgehalt < 10 Vol% verwendet.

Abb. 1 veranschaulicht die Spannweite der aus den MSO-Versuchen abgeleiteten MvG-Parameter und deren Zusammenhang zur Bodentextur (prozentuale Gehalte an Sand, Schluff und Ton), dem Gehalt an organischem Kohlenstoff und der Trockenraumdichte.

Die ermittelten Werte für den Parameter α steigen mit zunehmendem Sandgehalt bis zu einem Sandgehalt von ca. 50 %. Für feinkörnigere Böden sind die Werte von α tendenziell niedrigerer; sie sinken ab ca. 40 % Schluff bzw. Ton mit steigenden Schluff- und Tongehalten. α korreliert mit dem Lufteintrittspunkt und gibt damit in großem Maße den Einfluss der sekundären Bodenstruktur – wie Größe und Häufigkeit von Makroporen

oder Gefügeform – wieder. Dies zeigt sich im Einfluss der Trockenraumdichte auf α , welcher zu fallenden Werten für α bei steigenden Trockenraumdichten führt. Die Werte für n variieren in enger Beziehung zur Bodentextur. Sie steigen mit steigendem Sandgehalt, insbesondere ab Sandgehalten von ca. 60 %. Analog sinken die Werte für n mit steigenden Schluff- und Tongehalten. Der Zusammenhang zwischen n und C_{org} sowie Trockenraumdichte ist gering, wobei eine Tendenz zu niedrigeren n bei höheren Trockenraumdichten zu beobachten ist. Die Werte der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit variieren sehr stark und zeigen in erster Linie einen antiproportionalen Zusammenhang zur Trockenraumdichte, welche indirekt den Einfluss von Bodengefüge und Makroporosität wiedergibt. Die Werte für K_s steigen zudem mit steigenden Sandgehalten und sind kleiner bei höheren Schluff- und vor allem Tongehalten. Ähnlich wie K_s wird der Sättigungswassergehalt stark durch die Trockenraumdichte geprägt (niedrigere θ_s bei steigender Trockenraumdichte). Zudem besteht ein enger proportionaler Zusammenhang zum Gehalt an organischer Substanz, während die Bodentextur die Werte von θ_s kaum beeinflusst. Der Restwassergehalt steigt mit höherem Tonanteil. Allerdings wurden, unabhängig von der Bodenart, für 1/3 aller Proben Werte von $\theta_r = 0$ ermittelt. Stark variierende Werte wurden für Mualems Tortuositätsparameter τ erhalten, insbesondere bei den bindigeren Böden. Die Werte für τ liegen für Sande um Null und sind durchweg negativ für sehr tonreiche Böden. Nur für 8 % aller analysierten Proben wurde $\tau = 0,5 (\pm 0,3)$ – ein Wert, auf welchen τ in vielen Modellanwendungen festgesetzt wird – erhalten.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Vergleich der MSO-Ergebnisse mit den Schätztabelle in der KA5

Die Schätztabelle der KA5 (AD-HOC-AG BODEN 2005) geben Werte verschiedener kapazitiver Bodenwassergrößen sowie der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit in

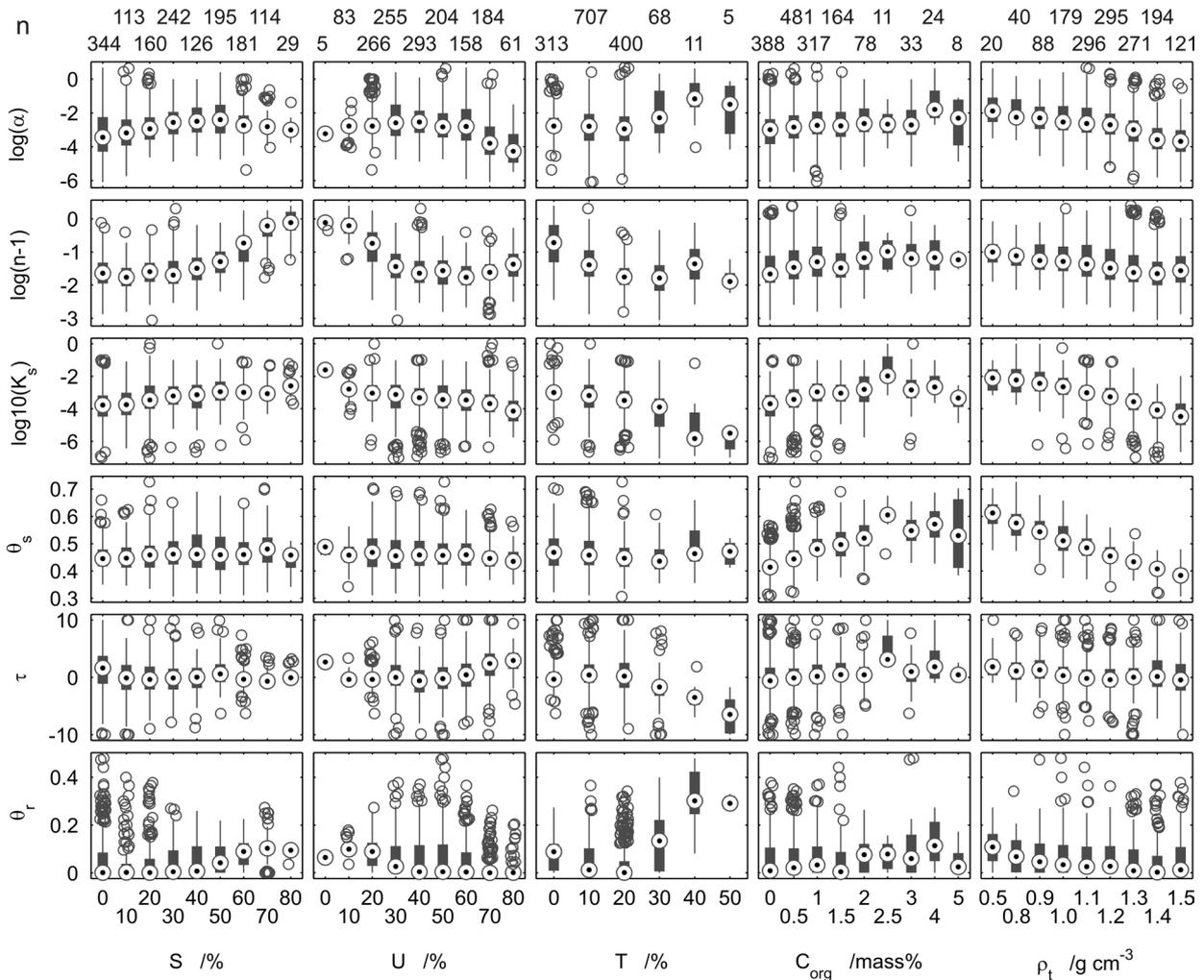


Abb. 1: MvG-Parameter im Gesamtdatensatz in Abhängigkeit von der Bodentextur (% S, % U, % T), dem Gehalt an organischem Kohlenstoff C_{org} und der Trockenraumdichte ρ_t ; Zahlen über oberster Reihe = Probenanzahl, Kreise mit Punkt = Mediane, Boxen = 25–75 %-Perzentile, leere Kreise = Ausreißer.

Fig. 1: MvG parameters of the total dataset in relation to soil texture (% S, % U, % T), organic carbon content (Corg) and bulk density (ρ_t); numbers above top row = number of samples, circles with dot = medians, boxes = 25–75 % percentiles, empty circles = outliers.

Abhängigkeit von der Bodenart, der Trockenraumdichte und dem organischen Gehalt an. Es ist zu vermuten, dass den KA5-Schätzwerten überwiegend landwirtschaftlich genutzte Böden zugrunde liegen und Waldböden im Datensatz der KA5 eher unterrepräsentiert sind. Da unser Datensatz ausschließlich Waldböden enthält, sind Abweichungen zwischen den hydraulischen Kengrößen unseres Datensatzes und den entsprechenden Schätzwerten der KA5 zu erwarten. Die KA5-Schätzwerte für die Luftkapazität AC , die Feldkapazität FC (Wassergehalt bei $pF = 1,8$), die nutzbare Feldkapazität AWC und den Wassergehalt am permanenten Welkepunkt PWP wurden mit den aus den MSO-Versuchen abgeleiteten Werten verglichen. Abb. 2 zeigt das Verhältnis der MSO-Werte zu den Schätzwerten der KA5, also z. B. für die Luftkapazität $AC_{rel} = 100 \% \cdot AC_{MSO} / AC_{KA5}$.

Die MSO-Werte der Luftkapazität AC weisen eine hohe Varianz auf; für einige Bodenarten schwanken die Werte von AC_{rel} zwischen 20 und 250 %. Für Böden mit geringen Trockenraumdichten liegen die MSO-Werte für AC im Bereich der KA-Schätzwerte (Median von AC_{rel} über alle Bodenarten für Dichteklassen 1 und 2 = 107 %). Im Bereich höherer Trockenraumdichten wird AC durch die KA5 in der Regel überschätzt

(Median von AC_{rel} für Dichteklassen ≥ 3 = 75 %). Unsere Ergebnisse stehen im Gegensatz zu den Beobachtungen von TEEPE et al. (2003), welche für ihre Waldböden insbesondere bei geringen Trockenraumdichten eine Unterschätzung durch die KA5 feststellten.

Die MSO-Werte der Feldkapazität FC zeigen eine deutlich geringere Varianz als AC . Die Werte aus den MSO-Versuchen liegen für alle betrachteten Bodenarten tendenziell im Bereich der KA5-Schätzungen. Über alle Proben hinweg ist der Median von $FC_{rel} = 100 \%$; für 25 % aller Proben liegt FC_{rel} unter 84 % und für weitere 25 % ist $FC_{rel} > 103 \%$.

Die nutzbare Feldkapazität AWC wird von der KA5 häufig überschätzt, insbesondere für die Gruppe der lehmigen und schluffigen Sande und für sehr tonige Substrate. Für die Hauptbodenart Sand ist der Median von AWC_{rel} 77 % und für Ton 72 %. Lehme und Schluffe werden in der KA5 deutlich besser abgebildet (Median von AWC_{rel} für Lehme 92 % und für Schluffe 103 %).

Der Wassergehalt am permanenten Welkepunkt PWP zeigt in den MSO-Werten eine relativ hohe Schwankungsbreite. Bei den Sanden liegt PWP_{rel} deutlich über 100 %, allerdings sind die

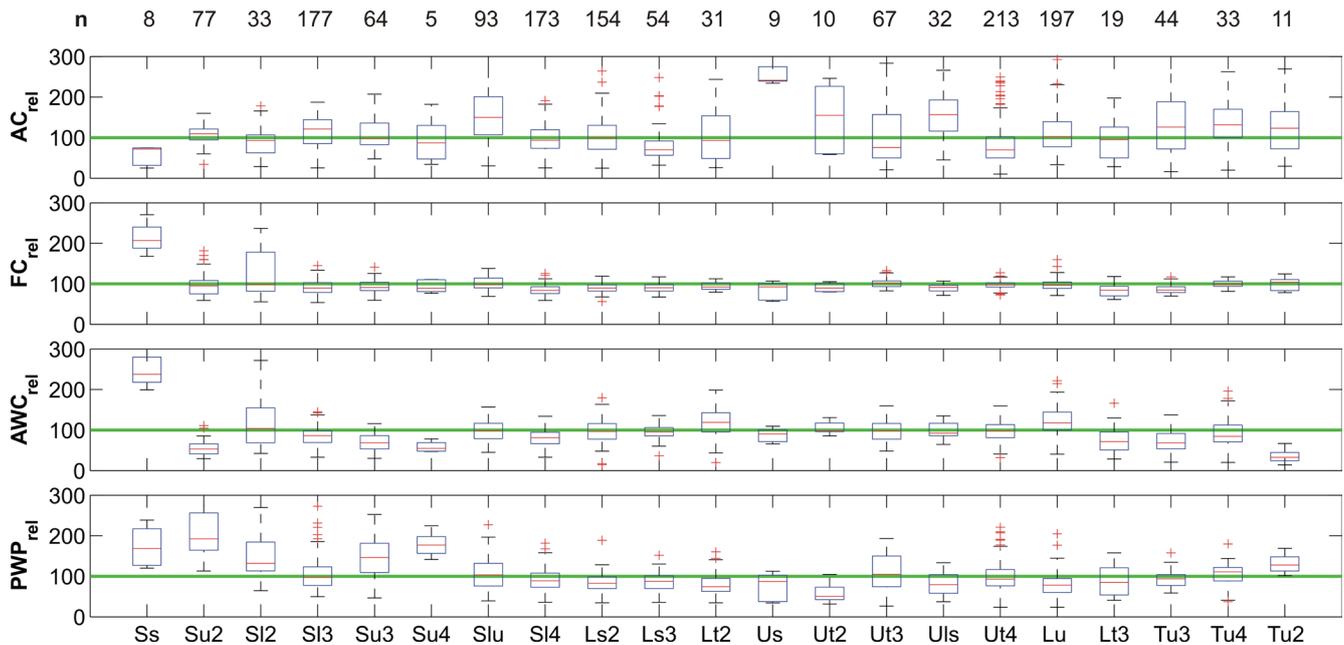


Abb. 2: Verhältnis der MSO-Werte zu den Schätzwerten der KA5 in % für Luftkapazität AC, Feldkapazität FC, nutzbare Feldkapazität AWC und Wassergehalt am permanenten Welkepunkt PWP im Gesamtdatensatz; Zahlen über dem obersten Plot = Probenanzahl.

Fig. 2: Relation between MSO values and tabular values of KA5 in % for air capacity AC, field capacity FC, available water capacity AWC and water content at the permanent wilting point PWP in the total dataset; numbers above top plot = number of samples.

absoluten Abweichungen gering, da die Schätzwerte der KA5 für Sande sehr klein sind. Tendenziell niedrigere PWP-Werte im Vergleich zur KA5 werden für Schluffe und Tone ermittelt (Median von $PWP_{rel} = 87\%$), während die MSO-Ergebnisse für Lehme sehr gut mit den Schätzwerten der KA5 übereinstimmen (Median von $PWP_{rel} = 100\%$).

Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit K_s hat in den analysierten Bodenproben einen außerordentlich hohen Wertebereich. Sie ist mit den Tabellen der KA5 kaum einzuschätzen. Für etwas mehr als die Hälfte der Bodenproben liegt K_s unter den Schätzwerten der KA5 ($K_{s,rel} < 100\%$). Andererseits liegt K_s für 17 % aller Proben um mehr als 500 % über den KA5-Werten (Abb. 3). Ein Viertel aller Werte von $K_{s,rel}$ liegt unter 25 % und ein weiteres Viertel hat $K_{s,rel}$ -Werte über 300 % der KA5-Werte.

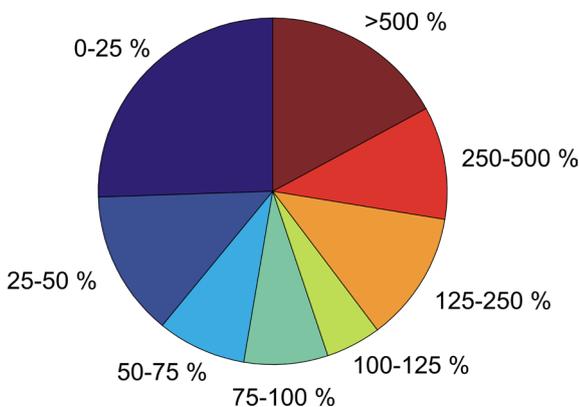


Abb. 3: Verhältnis der MSO-Werte zu den Schätzwerten der KA5 in % für die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit K_s im Gesamtdatensatz.

Fig. 3: Relation between MSO values and tabular values of KA5 in % for the saturated hydraulic conductivity K_s in the total dataset.

Insgesamt lässt sich sagen, dass nur FC relativ gut mit der KA5 geschätzt werden kann; für FC liegen 46 % der MSO-Messungen im Bereich von $\pm 10\%$ Abweichung um die KA5-Werte. Deutlich schlechter ist die Schätzgüte der KA5 bezüglich AWC (26 % im Bereich von $\pm 10\%$ Abweichung um die KA5-Werte), PWP (22 %) und AC (16 %). Die Schätzung der gesättigten Leitfähigkeit ist nur mit Abweichungen von einer bis mehrerer Zehnerpotenzen möglich.

4.2 Neue PTFs für Waldböden

PTFs wurden erstellt für die kapazitiven Bodenwassergrößen Porosität ϕ , Feldkapazität FC und nutzbare Feldkapazität AWC sowie für die MvG-Parameter θ_s , α , n , K_s und τ . Keine PTFs wurden entwickelt für den Wassergehalt am permanenten Welkepunkt PWP und die Luftkapazität AC, da diese direkt aus ϕ , FC und AWC abgeleitet werden können. Ebenso wurde für den Restwassergehalt θ_r keine PTF entwickelt, sondern der Wert von θ_r im Rahmen eines Optimierungsverfahrens auf $\theta_r = 0,069$ für alle Bodenproben festgesetzt (Details siehe PUHLMANN & VON WILPERT 2011).

In einem ersten Schritt entwickelten PUHLMANN & VON WILPERT (2011) PTFs, welche neben der Trockenraumdichte, dem Gehalt an organischem Kohlenstoff, den Texturfractionen des Feinbodens (% Sand, % Schluff, % Ton), dem Gesamtskelettgehalt und der mittleren Aggregatgröße auch weitere Kennwerte der Korngrößenverteilung (Unterfraktionen von Sand und Schluff, Verteilungsperzentile) enthalten (im Weiteren PTF-PUH1 genannt).

Details zur Modellerstellung mit dem Verfahren der schrittweisen Vorwärtsselektion, bodenphysikalische Interpretationen der in den PTFs enthaltenen Prädiktoren sowie eine Diskussion der Modellgüte enthält PUHLMANN & VON WILPERT (2011). Um die praktische Anwendbarkeit der PTFs zu verbessern wurden in einem zweiten Schritt vereinfachte PTFs entwickelt (im Weiteren

Tab. 2: Pedotransferfunktionen für die Porosität ϕ , Feldkapazität FC , nutzbare Feldkapazität AWC und die MvG-Parameter θ_s , α , n , K_s und τ^1 .

Tab. 2: Pedotransfer functions for porosity ϕ , field capacity FC , available water capacity AWC and the MvG parameters θ_s , α , n , K_s and τ^1 .

ϕ (cm ³ cm ⁻³)	=	- 0,38372 d_b + 1,0082	($R^2 = 0,936$; $RMSR = 0,018$)
FC (cm ³ cm ⁻³)	=	- 0,000020764 S^2 + 0,042095 $\ln(C + 0,5)$ + 0,00025376 $U \cdot d_b$ + 0,3430	($R^2 = 0,598$; $RMSR = 0,039$)
AWC (cm ³ cm ⁻³)	=	- 0,00002145 S^2 - 0,00009023 T^2 + 0,026072 $\ln(C + 0,1)$ + 0,2537	($R^2 = 0,414$; $RMSR = 0,046$)
θ_s (cm ³ cm ⁻³)	=	0,015362 $C^{0,5}$ - 0,2513 d_b - 0,026836 $\ln(T + 1)$ - 0,0055404 $S^{0,5}$ + 0,8648	($R^2 = 0,621$; $RMSR = 0,039$)
$\ln(\alpha)$ (hPa ⁻¹)	=	- 1,187 d_b^2 - 0,031899 S - 0,58805 $\ln(C + 0,1)$ - 0,00032963 U^2 - 0,016267 $U \cdot d_b$ + 2,021	($R^2 = 0,316$; $RMSR = 0,970$)
$\ln(n-1)$ (-)	=	0,0003758 S^2 + 0,004751 U + 0,017826 U/d_b - 2,9804	($R^2 = 0,462$; $RMSR = 0,476$)
$\log_{10}(K_s)$ (cm s ⁻¹)	=	- 1,2491 d_b^2 - 0,00087388 T^2 - 1,10316	($R^2 = 0,425$; $RMSR = 0,779$)
τ (-)	=	- 0,98063 $\ln(S + 0,1)$ - 0,004075 T^2 + 0,030022 $T \cdot C$ - 0,00457 S/C + 4,4304	($R^2 = 0,211$; $RMSR = 2,701$)

¹ d_b = Trockenraumdichte (g cm⁻³), C = Gehalt an organischem Kohlenstoff (Masse%), S = % Sand, U = % Schluff, T = % Ton. Einteilung der Feinbodenfraktionen nach AD-HOC-AG BODEN (2005).

PTF-PUH2 genannt), welche geringere Anforderungen an die Eingangsgrößen haben und unter anderem keine detaillierten Informationen zur Korngrößenverteilung benötigen (Tab. 2). Die Methodik zur Erstellung der PTFs entspricht dabei der in PUHL-MANN & VON WILPERT (2011) vorgestellten Vorgehensweise.

Mit den PTFs aus Tabelle 2 wird die Wasserretention im Kalibrierungsdatensatz mit einem mittleren $RMSR$ von 0,05 cm³ cm⁻³ geschätzt (Tab. 3). Im trockenen Bereich werden die Wassergehalte tendenziell unterschätzt ($MR > 0$). Auch die hydraulischen Leitfähigkeiten werden mit PTF-PUH2 in der Regel unterschätzt. Für Böden, welche im Datensatz zur Erstellung der PTFs besonders häufig vertreten sind, ist die Schätzgüte der PTFs in der Regel höher als für seltene Böden.

Tab. 3: Quadratwurzelfehler ($RMSR$) und mittlerer Fehler (MR) für die Schätzung der Wasserretention und der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit des Kalibrierungsdatensatzes unter Verwendung der PTFs aus Tab. 2; kursiv = Extrapolationsbereich der inversen Parameteroptimierung.

Tab. 3: Root mean squared residuals ($RMSR$) and mean residuals (MR) for the estimation of water retention and unsaturated hydraulic conductivity for the calibration dataset using the PTFs of Tab. 2; italics = extrapolation range of the inverse parameter optimization.

	Wasserretention /cm ³ cm ⁻³		Hydraulische Leitfähigkeit /log ₁₀ (cm s ⁻¹)	
-0	0,039	0,000	0,7776	0,0000
-2	0,039	0,000	0,7776	0,0000
-60	0,043	0,008	0,5828	0,0697
-100	0,044	0,009	0,5576	0,0756
-330	0,047	0,010	0,5804	0,0643
-1000	0,050	0,010	0,7426	0,0343
-3000	0,054	0,010	0,9917	-0,0018
-16000	0,058	0,009	1,4410	-0,0597

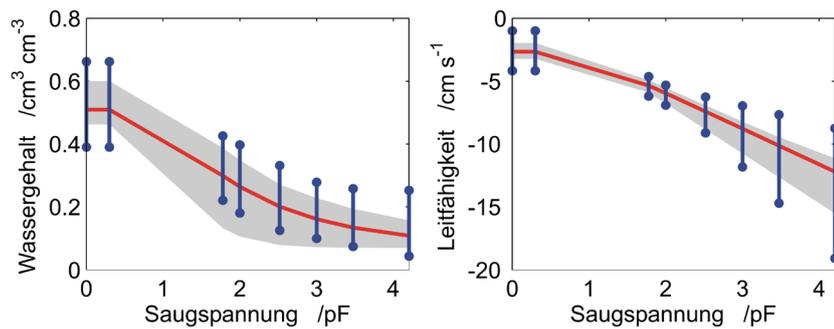
So ist für Schluffe (33 % des Kalibrierungsdatensatzes) und Lehme (35 %) der $RMSR$ der Retentionskurve 0,035 cm³ cm⁻³, während $RMSR$ für die weniger häufig erfassten Sande (25 % der Kalibrierungsdatensatzes) und Tone (7 %) 0,045 cm³ cm⁻³ bzw. 0,058 cm³ cm⁻³ beträgt.

Abb. 4 veranschaulicht an zwei Beispielen die Retentions- und Leitfähigkeitskurven aus den MSO-Versuchen und die entsprechenden Schätzungen mit PTF-PUH2. Die bodenartentypischen Kurvenverläufe – steilere Kurven bei Sanden, flache Kurven bei Schluffen – werden durch die PTF-Schätzungen sehr gut wiedergegeben. Die mittleren PTF-Schätzungen (rote Linien in Abb. 4) liegen in allen Fällen innerhalb der Spannweiten der MSO-Versuche. Für lockere, sandige Böden berechnen die PTFs allerdings teilweise zu steile Retentionskurven, während dichte, schluffige Böden mit extrem flachen Retentionskurven durch die PTFs nicht abgebildet werden.

Tab. 4 fasst die statistischen Kennwerte für die Anwendung von PTF-PUH2 auf den Validierungsdatensatz zusammen. Der Vergleich mit den entsprechenden Kennwerten von PTF-PUH1 erlaubt die Beurteilung, inwiefern die reduzierten Anforderungen an die PTF-Eingangsdaten die Schätzgüte der neuen PTFs im Vergleich zu PTF-PUH1 verringern. $RMSR$ und MR der neuen PTFs sind sowohl für die Wasserretention als auch für die hydraulische Leitfähigkeit ähnlich gut wie die der deutlich komplexeren PTF-PUH1 (Tab. 4). Dies kann dadurch erklärt werden, dass zur Erstellung von PTF-PUH2 ein um ca. 50 % größerer Datensatz als für PTF-PUH1 zur Verfügung stand. In diesem Datensatz sind zum einen Tone (> 50 % Tongehalt) und Schluffe (> 45 % Schluffgehalt), aber auch reine Sande stärker als im alten Datensatz vertreten.

Auch bei der Vorhersage der einzelnen MvG-Parameter sind sich PTF-PUH1 und PTF-PUH2 ähnlich. Abb. 5 veranschaulicht die Vorhersage der einzelnen MvG-Parameter in Form von Häufigkeitsverteilungen der Parameterschätzungen mit PTF-PUH1 und PTF-PUH2, welche mit den Häufigkeitsverteilungen der entsprechenden MSO-Ergebnisse verglichen werden. Die

a) lockere, sandige Böden ($>40\%$ Sand, $\rho_t < 1,2 \text{ g cm}^{-3}$)



b) dichte, schluffige Böden ($>40\%$ Schluff, $\rho_t > 1,4 \text{ g cm}^{-3}$)

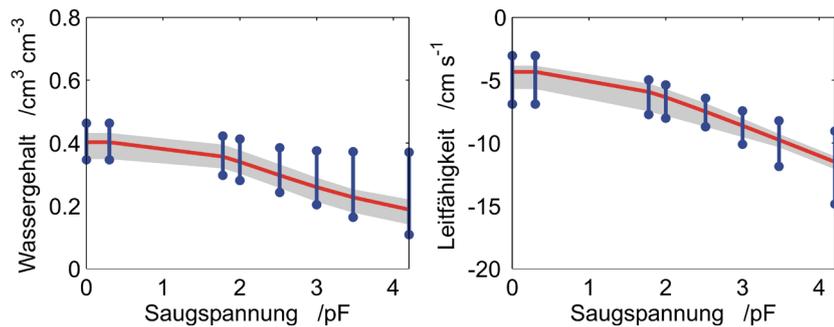


Abb. 4: Retentions- und Leitfähigkeitskurven aus dem Validierungsdatensatz für die Gruppen a) lockere, sandige Böden und b) dichte, schluffige Böden; graue Flächen = Spannweite der PTF-Schätzungen, rote Linien = Mittelwerte der PTF-Schätzungen, blaue vertikale Linien = Spannweite der MSO-Versuche.

Fig. 4: Retention curves and unsaturated hydraulic conductivities of the validation dataset for the groups of a) loose, sandy soils and b) dense, silty soils; grey areas = range of PTF estimates, red lines = mean values of PTF estimates, blue vertical lines = range of MSO values.

Schätzungen der Parameter α und n sind sowohl für PTF-PUH2 als auch PTF-PUH1 im Vergleich zu den MSO-Ergebnissen erwartungstreu, weisen allerdings eine etwas engere Werteverteilung auf. Während θ_s mit PTF-PUH2 im Mittel überschätzt wird, stimmen die Häufigkeitsverteilungen im Bereich $\theta_s < 0,4 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ und $\theta_s > 0,55 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ gut überein. Die Schätzgüte von PTF-PUH1 für θ_s ist insgesamt besser. Die Häufigkeitsverteilungen der Schätzungen für K_s sind für PTF-PUH2 und PTF-PUH1 sehr ähnlich; im Mittel wird K_s jedoch von beiden PTFs überschätzt. Der Parameter τ kann weder von PTF-PUH2 noch von PTF-PUH1 zufrieden stellend geschätzt werden. Für beide PTFs liegen die Schätzungen im Vergleich zu den MSO-Werten in einem deutlich engeren Wertebereich. Während PTF-PUH1 erwartungstreu ist, überschätzt PTF-PUH2 τ im Mittel.

4.3 Vergleich der neuen PTFs mit den PTFs von Teepe et al. (2003) zur Schätzung der Retentionskurve

Die MvG-Parameter aus den MSO-Versuchen sowie die Schätzungen der in Tab. 2 vorgestellten PTFs wurden mit den Schätzungen der Pedotransferfunktionen von Teepe et al. (2003) – im Weiteren als PTF-TEE bezeichnet – verglichen.

Die PTFs von Teepe et al. (2003) für die Retentionskurve wurden an einem sehr umfangreichen Datensatz (überwiegend Waldböden) erstellt, welcher im Sandbett und Drucktopf gemessene Wassergehalte (bei 0, -2,5, -60, -100, -330, -1000, -3000 und -16000 hPa) für 1850 Retentionskurven enthielt. Im Vergleich zu unseren Messungen mit Multi-Step-Outflow-Versuchen deckt dieser Datensatz den trockenen Saugspannungsbereich deutlich besser ab. Die MSO-Versuche haben hingegen den Vorteil, dass der Bereich um den Luftpunkt kontinuierlich gemessen wird und, insbesondere durch an die Hauptbodenarten angepasste Unterdruckregime (vgl. Puhlmann et al. 2009), der Informationsgehalt in diesem

Saugspannungsbereich besonders hoch ist. Dies hat Einfluss auf die Schätzung der van-Genuchten-Parameter α (welcher mit dem Luftpunkt korreliert) und den mit α korrelierten Parameter n .

Tab. 4 zeigt MR und $RMSR$ von PTF-TEE für die Vorhersage der Retentionskurven unseres Validierungsdatensatzes. Die Retentionsfunktion wurde dabei mit dem klassischen van-Genuchten-Ansatz, wie er in Teepe et al. (2003) verwendet wurde, berechnet. PTF-TEE überschätzt die Wasserretention für den überwiegenden Teil der analysierten Bodenproben (MR zwischen $-0,057$ und $-0,148 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Die Abweichungen sind besonders im Bereich des Wendepunktes der Retentionskurve hoch (Stützstellen -60 bis -330 hPa). Hier liegt $RMSR$ um den Faktor 3,5 bis 4 über den entsprechenden $RMSR$ -Werten von PTF-PUH2. $RMSR$ beträgt im Mittel über alle Stützstellen $0,118 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ und liegt um den Faktor 2,5 über dem $RMSR$ von PTF-PUH2.

Betrachtet man die Schätzungen von PTF-TEE für die einzelnen MvG-Parameter (Abb. 5), so ist zu erkennen, dass die PTF-Schätzungen für den Parameter α deutlich niedriger als die MSO-Ergebnisse sind. Während der Median von α in den MSO-Werten $0,063 \text{ hPa}^{-1}$ beträgt, erreicht α mit PTF-TEE maximal Werte von $0,018 \text{ hPa}^{-1}$. Für den Parameter n liegen die Schätzungen mit PTF-TEE nur geringfügig unter den MSO-Werten (Median MSO = 1,22; Median PTF-TEE = 1,20), Allerdings ist der Wertebereich der PTF-Schätzungen mit Maximalwerten bis 1,54 deutlich geringer. θ_s wird von PTF-TEE in einem ähnlichen Wertebereich wie die MSO-Ergebnisse vorhergesagt, jedoch besteht eine Tendenz zur Überschätzung durch PTF-TEE.

Tab. 4: Quadratwurzelfehler (*RMSR*) und mittlere Abweichung (*MR*) für die Vorhersage der Wasserretention und der hydraulischen Leitfähigkeit für den Validierungsdatensatz unter Verwendung der PTFs aus Tab. 2 (PTF-PUH2) sowie der PTFs von PUHLMANN & VON WILPERT (2011, PTF-PUH1), TEEPE et al. (2003, PTF-TEE) und WÖSTEN et al. (1999, PTF-WOE); kursiv = Extrapolationsbereich der inversen Parameteroptimierung.

Tab. 4: *Root mean squared residuals (RMSR) and mean residuals (MR) for the estimation of water retention and unsaturated hydraulic conductivity for the validation dataset using the PTFs of Tab. 2 (PTF-PUH2) and the PTFs of PUHLMANN & VON WILPERT (2011, PTF-PUH1), TEEPE et al. (2003, PTF-TEE) and WÖSTEN et al. (1999, PTF-WOE); italics = extrapolation range of the inverse parameter optimization.*

Wasserretention /cm ³ cm ⁻³						
	PTF-PUH2		PTF-PUH1		PTF-TEE	
ψ /hPa	<i>RMSR</i>	<i>MR</i>	<i>RMSR</i>	<i>MR</i>	<i>RMSR</i>	<i>MR</i>
-0	0,043	0,001	0,045	0,013	0,075	-0,059
-2	0,043	0,001	0,045	0,013	0,074	-0,059
-60	0,041	0,004	0,051	0,004	0,166	-0,149
-100	0,043	0,005	0,051	0,008	0,173	-0,157
-330	0,046	0,007	0,055	0,016	0,162	-0,149
-1000	<i>0,050</i>	<i>0,008</i>	<i>0,059</i>	<i>0,021</i>	<i>0,136</i>	<i>-0,121</i>
-3000	<i>0,054</i>	<i>0,007</i>	<i>0,064</i>	<i>0,024</i>	<i>0,110</i>	<i>-0,089</i>
-16000	<i>0,059</i>	<i>0,007</i>	<i>0,070</i>	<i>0,027</i>	<i>0,082</i>	<i>-0,047</i>
Hydraulische Leitfähigkeit /log ₁₀ (cm s ⁻¹)						
	PTF-PUH2		PTF-PUH1		PTF-WOE	
ψ /hPa	<i>RMSR</i>	<i>MR</i>	<i>RMSR</i>	<i>MR</i>	<i>RMSR</i>	<i>MR</i>
-0	0,7599	0,0374	0,8519	0,0196	0,9657	0,3211
-2	0,7599	0,0374	0,8519	0,0196	1,1723	0,7273
-60	0,5282	0,0806	0,6481	-0,0741	0,6568	-0,1781
-100	0,5096	0,0894	0,6451	-0,0579	0,6897	-0,3165
-330	0,5728	0,0878	0,7029	-0,0164	0,9032	-0,5928
-1000	<i>0,7703</i>	<i>0,0657</i>	<i>0,8461</i>	<i>0,0141</i>	<i>1,2171</i>	<i>-0,8227</i>
-3000	<i>1,0402</i>	<i>0,0353</i>	<i>1,0535</i>	<i>0,0383</i>	<i>1,5885</i>	<i>-1,0451</i>
-16000	<i>1,5098</i>	<i>-0,0155</i>	<i>1,4407</i>	<i>0,0716</i>	<i>2,2096</i>	<i>-1,3821</i>

4.4 Vergleich der neuen PTFs mit den PTFs von WÖSTEN et al. (1999) zur Schätzung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit

WÖSTEN et al. (1999) erstellten PTFs – im Weiteren als PTF-WOE bezeichnet – für die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit auf der Basis von bodenhydraulischen Messungen aus der HYPRES-Datenbank. Die Autoren analysierten insgesamt 1136 Proben (überwiegend landwirtschaftliche Böden), welche von 21 verschiedenen europäischen Institutionen zur Verfügung gestellt wurden und für welche Informationen sowohl zur Retention als auch zur Leitfähigkeit vorlagen. HYPRES ist ein vergleichsweise heterogener Datensatz, insbesondere hinsichtlich der Versuchsmethoden zur Bestimmung der hydraulischen Kennfunktionen, aber auch der erklärenden Größen wie der Bodentextur.

Für die meisten Proben überschätzt PTF-WOE die hydraulische

Leitfähigkeit ($MR < 0$), besonders im trockenen Bereich (Tab. 4). Die Leitfähigkeit bei oder nahe Sättigung wird durch PTF-WOE hingegen in der Regel unterschätzt. Der mittlere Quadratwurzelfehler liegt, außer für die Stützstelle bei 16000 hPa, um den Faktor 1,2 bis 1,6 über dem *RMSR* von PTF-PUH2 (Tab. 4).

Betrachtet man die PTF-Schätzungen für die einzelnen MvG-Parameter, so wird ersichtlich, dass die Schätzungen mit PTF-WOE für den Parameter α in einem engen Bereich variieren und wie die Schätzungen mit PTF-TEE deutlich unter den MSO-Werten liegen (Abb. 5). Der Parameter n wird im Vergleich zu den MSO-Werten häufig überschätzt, allerdings fehlen – ähnlich wie bei den Schätzungen mit PTF-TEE – die hohen Werte ($n > 1,54$), welche in den MSO-Ergebnissen noch 15 % aller Werte ausmachen. Der Wertebereich von K_s ist mit PTF-WOE ähnlich wie der der MSO-Ergebnisse, allerdings werden auch für diesen Parameter die hohen Werte nicht abgebildet. Für den Tortuositätsparameter τ liefern die MSO-Versuche deutlich stärker variierende Werte als die Schätzungen mit

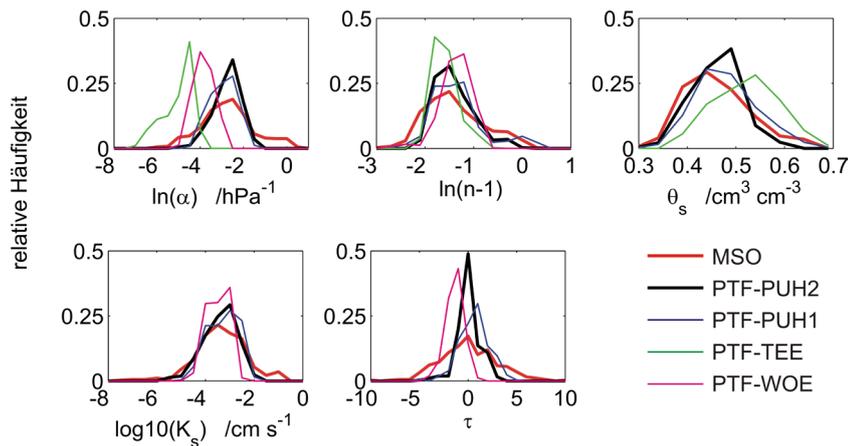


Abb. 5: Relative Auftretenshäufigkeit der Werte von $\ln(\alpha)$, $\ln(n-1)$, θ_s , $\log_{10}(K_s)$ und τ in den MSO-Ergebnissen sowie bei Anwendung der verschiedenen PTFs auf den Validierungsdatensatz.

Fig. 5: Relative frequency of occurrence for values of $\ln(\alpha)$, $\ln(n-1)$, θ_s , $\log_{10}(K_s)$ and τ in the MSO results and in the estimates of the various PTFs for the validation dataset.

PTF-WOE; der Erwartungswert der MSO-Versuche liegt zudem über dem Erwartungswert von PTF-WOE.

5 Schlussfolgerungen

Bodenhydraulische Eigenschaften stellen Schlüsselgrößen bei der Einschätzung von Bodenqualität und Bodenfunktionen dar (NEMES et al. 2001) und sollten deshalb im Rahmen von Bodenmonitoring-Programmen erfasst werden. Wir integrierten bodenhydraulische Messungen (Multi-Step-Outflow-Versuche) in die Bundesweite Bodenzustandserfassung im Wald (BZEII), um eine Datenbank zu den hydraulischen Eigenschaften der Waldböden in Baden-Württemberg zu erstellen. Seit Abschluss der BZEII wurde die erstellte bodenhydraulische Datenbank kontinuierlich durch weitere Proben ergänzt. Aufbauend auf dieses Datenmaterial wurden PTFs entwickelt, welche die Abschätzung der bodenhydraulischen Eigenschaften aus einfacher zu erhebenden Bodeneigenschaften ermöglichen. Mit den hier vorgestellten PTFs wird die Wasserretention für unabhängige Validierungsdaten mit einem *RMSR* von ca. 0,04 bis 0,05 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ vorhergesagt. Die Schätzgüte der entwickelten PTFs ist damit ähnlich gut wie – und zum Teil auch besser als – andere veröffentlichte PTFs (vgl. z.B. WÖSTEN et al. (2001), welche die Vorhersagegüte von PTFs aus der Literatur verglichen und für die verschiedenen PTFs *RMSR* für den Wassergehalt von 0,02 bis 0,11 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ erhielten). Die Vorhersage der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit ist weniger zufrieden stellend möglich, was auf die schlechte Vorhersage für die Parameter α , K_s und τ zurückzuführen ist. Offensichtlich ist die Beziehung zwischen der hydraulischen Leitfähigkeit und anderen Bodeneigenschaften wie Textur und Trockenraumdichte nicht so eng, wie es für die Erstellung von soliden PTFs erforderlich wäre. In diesem Zusammenhang ist zu bedenken, dass die PTF-Eingangsdaten (mit Ausnahme der Trockenraumdichte) nicht schneller oder einfacher analysiert werden können als die bodenhydraulischen Eigenschaften, wenn man für letztere standardisierte Multistep-Outflow-Versuche verwendet. Sowohl die Multistep-Outflow-Versuche als auch die Bodentexturanalyse benötigen einschließlich der Probenvorbereitung etwa ein bis zwei Arbeitsstunden pro Bodenprobe. Trotz dieses Einwands wird es natürlich immer einen Bedarf nach verlässlichen PTFs geben, da nicht in jedem Fall und vor allem nicht immer mit der benötigten Flächenabdeckung die bodenhydraulischen Eigenschaften direkt gemessen werden können. Deshalb sind auch weiterhin Anstrengungen zur Entwicklung besserer PTFs notwendig, d. h. weitere Messungen der bodenhydraulischen Eigenschaften sowie die weitere Suche nach sinnvollen Proxygrößen sind unverzichtbar.

Wir konnten zeigen, dass Multi-Step-Outflow-Versuche ein attraktives Verfahren sind, um bodenhydraulischen Eigenschaften im Rahmen von Routinemonitoring zu erfassen. Die erstellte Datenbank kann vorhandene bodenhydraulische Datenbanken (z. B. HYPRES) sinnvoll ergänzen und sollte nach Möglichkeit in diese integriert werden. Die mit Hilfe der Multi-Step-Outflow-Versuche generierte bodenhydraulische Datenbank stellt zudem für weiterführende Untersuchungen eine wertvolle Datenbasis dar. In einem ersten Schritt wurden die MSO-Versuche verwendet, um die Parameter des weit verbreiteten Mualem/van Genuchten-Modells zu bestimmen. Die hydraulischen Eigenschaften natürlich gelagerter Böden – und insbesondere von in der Regel stark strukturierten Waldböden – werden mit diesem Porenmodell allerdings nur unzureichend beschrieben. Es ist deshalb geplant, an unseren Datensatz auch flexiblere hydraulische Kennfunktionen (z. B. IDEN & DURNER 2007) anzupassen, die eine bessere Abbildung der spezifischen bodenphysikalischen Eigenschaften von Waldböden ermöglichen. Im Rahmen dieser Untersuchungen werden zusätzlich MSO-Versuche mit einem modifizierten Messaufbau durchgeführt, mit welchem der Informationsgehalt der Messungen im Bereich der Makroporen erhöht werden kann.

Literatur

- AD-HOC-AG BODEN (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Auflage, Schweitzerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart: 392 S.
- AD-HOC-AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage, Schweitzerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart: 438 S.
- BATJES, N.H. (1996): Development of a world data set of soil water retention properties using pedotransfer rules. *Geoderma* **71** (1-2): 31-52. doi: 10.1016/0016-7061(95)00089-5
- DANE, J.H., TOPP, G.C. (eds.) (2002): Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods. SSSA Book Series: 5.
- FISHER, R.F., BINKLEY, D. (2000): Ecology and Management of Forest Soils. 3. Auflage, John Wiley & Sons Inc. 512 S.
- HANGEN, E., SCHERZER, J. (2004): Ermittlung von Pedotransferfunktionen zur rechnerischen Ableitung von Kennwerten des Bodenwasserhaushalts (FK, PWP, nFK, kapillarer Aufstieg). Unveröffentlichter Projektbericht im Auftrag des Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL). http://bfh-web.fh-egerswalde.de/bze/upload/begleitStudien/nach_jahre/2004/Pedotransfer_Udata/PTF_Udata.pdf (zuletzt besucht 21.03.11)

- IDEN, S.C., DURNER, W. (2007): Free-form estimation of the unsaturated soil hydraulic properties by inverse modeling using global optimization. *Water Resources Research* **43**: W07451. doi: 10.1029/2006WR005845
- MECKE, M., WESTMAN, C.J., ILVESNIEMI, H. (2000): Prediction of near-saturated hydraulic conductivity in three podzolic boreal forest soils. *Soil Science Society of America Journal* **64**: 485-492.
- MUALEM, Y. (1976): A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research* **12**: 513-521.
- NEMES, A., SCHAAP, M.G., LEIJ, F.J., WÖSTEN, J.H.M. (2001): Description of the unsaturated soil hydraulic database UNSODA version 2.0. *Journal of Hydrology* **251**: 151-162.
- PACHEPSKY, YA.A., RAWLS, W.J. (eds.) (2004): Development of pedotransfer functions in soil hydrology. *Developments in Soil Sciences*, **30**: 1-512 S.
- PUHLMANN, H., VON WILPERT, K. (2011): Pedotransfer functions for water retention and unsaturated hydraulic conductivity of forest soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, zur Veröffentlichung angenommen.
- PUHLMANN, H., VON WILPERT, K., LUKES, M., DRÖGE, W. (2009): Multistep outflow experiments to derive a soil hydraulic database for forest soils. *European Journal of Soil Science* **60** (5): 792-806.
- RENGER, M., BOHNE, K., FACKLAM, M., HARRACH, T., RIEK, W., SCHÄFER, W., WESSOLEK, G., ZACHARIAS, S. (2008): Ergebnisse und Vorschläge der DBG-Arbeitsgruppe „Kennwerte des Bodengefüges“ zur Schätzung bodenphysikalischer Kennwerte. *Schriftenreihe „Bodenökologie und Boden-genese“*, Heft **40**.
- RIEK, W., WESSOLEK, G., RENGER, M., VETTERLEIN, E. (1995): Luftkapazität, nutzbare Feldkapazität und Feldkapazität von Substrat-Horizontgruppen – eine statistische Auswertung von Labordatenbanken. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* **158**: 485-491.
- RUSS, A., RIEK, W. (2011): Pedotransferfunktionen zur Ableitung der nutzbaren Feldkapazität – Validierung für Waldböden des nordostdeutschen Tieflands. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **11**: 85-91.
- SCHAAP, M.G., LEIJ, F.J. (1998): Database-related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions. *Soil Science* **163** (10): 765-779.
- SCHEINOST, A.C., SINOWSKI, W., AUERSWALD, K. (1997): Regionalization of soil water retention curves in a highly variable soilscape. I. Developing a new pedotransfer function. *Geoderma* **78** (3-4): 129-143 doi: 10.1016/S0016-7061(97)00046-3
- SCHINDLER, U. (1980): Ein Schnellverfahren zur Messung der Wasserleitfähigkeit im teilgesättigten Boden an Stechzylinderproben. *Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenk.* **24** (1): 1-7.
- SCHINDLER, U., THIÈRE, J., STEIDL, J., MÜLLER, L. (2004): Bodenhydrologische Kennwerte heterogener Flächeneinheiten: Methodik der Ableitung und Anwendungsbeispiel für Nordostdeutschland, *Fachbeiträge des Landesumweltamtes Brandenburg* – Bodenschutz **2**, Heft **87**: 56 S.
- TEEPE, R., DILLING, H., BEESE, F. (2003): Estimating water retention curves of forest soils from soil texture and bulk density. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **166**: 111-119.
- TIETJE, O., HENNINGS, V. (1996): Accuracy of the saturated hydraulic conductivity prediction by pedo-transfer functions compared to the variability within FAO textural classes. *Geoderma* **69**: 71-84.
- VAN GENUCHTEN, M.TH. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* **44**: 892-898.
- VERECKEN, H., MAES, J., FEYEN, J., DARIUS, P. (1989): Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. *Soil Science* **148** (6): 389-403.
- VOGEL, T., CISLEROVA, M. (1988): On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from the moisture retention curve. *Transport in Porous Media* **3** (1): 1-15.
- VOGEL, T., VAN GENUCHTEN, M.TH., CISLEROVA, M. (2001): Effect of the shape of the soil hydraulic functions near saturation on variably-saturated flow predictions. *Advances in Water Resources* **24**: 133-144.
- VRUGT, J.A., BOUTEN, W., WEERTS, A.H. (2001): Information content of data for identifying soil hydraulic parameters from outflow experiments. *Soil Science Society of America Journal* **65**: 19-27.
- WEYNANTS, M., VERECKEN, H., JAVAUX, M. (2009): Revisiting Vereecken pedotransfer functions: introducing a closed-form hydraulic model. *Vadose Zone Journal* **8** (1): 86-95. doi: 10.2136/vzj2008.0062
- WÖSTEN, J.H.M., VAN GENUCHTEN, M.TH. (1988): Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic functions. *Soil Science Society of America Journal* **52** (6): 1762-1770.
- WÖSTEN, J.H.M., LILLY, A., NEMES, A., LE BAS, C. (1999): Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma* **90**: 169-185.
- WÖSTEN, J.H.M., PACHEPSKY, Y.A., RAWLS, W.J. (2001): Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology* **251**(3-4): 123-150. doi: 10.1016/S0022-1694(01)00464-4
- ZACHARIAS, S., WESSOLEK, G. (2007): Excluding organic matter content from pedotransfer predictors of soil water retention. *Soil Science Society of America Journal* **71** (1): 43-50 doi: 10.2136/sssaj2006.0098

submitted: 11.11.2010

reviewed: 21.12.2010

accepted: 10.04.2011

Autorenanschrift:

Dr. Heike Puhlmann
 Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
 Institut für Hydrologie
 Fahnenbergplatz, 79098 Freiburg
 Telefon: +49 761 203-9277
 E-Mail: heike.puhlmann@hydrology.uni-freiburg.de

Dr. Klaus von Wilpert
 FVA Baden-Württemberg
 Abteilung Boden und Umwelt
 Wonnhaldestraße 4, D-79100 Freiburg
 Telefon: +49 761 4018-376
 E-Mail: klaus.wilpert@forst.bwl.de