

## Pedotransferfunktionen zur Ableitung der nutzbaren Feldkapazität – Validierung für Waldböden des nordostdeutschen Tieflands

### *Pedotransfer functions for estimation of plant available water capacity – validation for forest soils of the north-eastern lowlands*

Alexander Russ & Winfried Riek

#### Abstract

*The available water capacity (AWC) of especially coarse-textured forest soils of the federal state of Brandenburg – estimated by various pedotransfer functions (PTF) – induce huge systematic differences. Thus further validations of the PTF seem to be necessary.*

*The PTF were evaluated, using a dataset of overall 489 forest soil horizons of the north-eastern lowlands. The dataset includes measured AWC-values and further soil parameters required for the PTF. The comparison of measured and estimated AWC-values indicates that PTF, which were developed using large, geographically widespread datasets and which consider especially soils similar to those of the validation sample respectively, tend to smaller systematic prediction errors. The PTF, which consider a higher number of predicting variables generally induce higher coefficients of determination. The lowest overall error (square root of the mean square prediction error) was determined for the PTF RENGIER et al. (2009). The highest values describing the strength and accuracy of the linear relationship between measurements and predictions (coefficient of determination and slope) were found out for the approach of RIEK et al. (1992, 1995).*

**Keywords:** *available water capacity (AWC), pedotransfer functions (PTF), validation, north-eastern lowlands, forest soils*

#### Zusammenfassung

Die vergleichende Gegenüberstellung der mittels unterschiedlicher Pedotransferfunktionen (PTF) berechneten nutzbaren Wasserspeicherkapazitäten von vorwiegend sandigen brandenburgischen Standorten der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE) weist auf gravierende systematische Unterschiede hin. Es erscheint daher notwendig, die PTF weitergehend zu validieren.

Die Validierung der PTF erfolgte mit einer insgesamt 489 Waldbodenhorizonte des Nordostdeutschen Tieflands umfassenden Datenbank, für welche sowohl Messwerte der nFK als auch die notwendigen Eingangsdaten der PTF vorlagen. Die Gegenüberstellung von Mess- und Schätzwerten zeigte, dass diejenigen PTF, welche anhand umfangreicher, regional weit gefächelter Datengrundlagen entwickelt wurden, tendenziell geringere systematische Fehler aufwiesen. Für PTF, bei deren Entwicklung Böden berücksichtigt wurden, die mit den typisch brandenburgischen Verhältnissen vergleichbar sind, zeigte sich eine ähnliche Tendenz. Ansätze mit größerem Einsatz an Prädiktorvariablen wiesen in der

Regel größere Bestimmtheitsmaße auf. Der geringste Quadratwurzelfehler ergab sich bei Verwendung der PTF nach RENGIER et al. (2009). Die höchste Güte und Richtigkeit des Zusammenhangs zwischen Mess- und Vorhersagewerten (Anstieg der Ausgleichsgeraden und Bestimmtheitsmaß) zeigte der Ansatz nach RIEK et al. (1992, 1995).

**Schlüsselwörter:** nutzbare Feldkapazität (nFK), Pedotransferfunktionen (PTF), Validierung, Nordostdeutsches Tiefland, Waldböden

## 1 Einleitung

Die Charakterisierung des Wasserhaushalts von Waldstandorten gewinnt in Bezug auf die Waldbewirtschaftung zunehmend an Bedeutung. Besonders angesichts prognostizierter Temperaturanstiege, bei gleichzeitiger Abnahme der jährlichen Niederschlagssummen (GERSTENGARBE et al. 2003) erscheint es notwendig, das Waldbeständen zur Verfügung stehende Wasserangebot quantitativ abzuschätzen. Neben erreichbarem Grundwasser und Niederschlägen stellt der Bodenwasserspeicher einen wichtigen Anteil an der Wasserversorgung der Waldbestände während der Vegetationsperiode dar. Bei der Bewertung forstlicher Standorte in Hinblick auf einen möglichen Klimawandel sollte die Wasserspeicherkapazität des Bodens im Rahmen der Baumartenplanung neben Klimakennwerten mit berücksichtigt werden (SCHULZ & ASCHKE 2008).

Als quantitativer Kennwert zur Beschreibung des Wasserspeichervermögens von Böden dient die nutzbare Feldkapazität (nFK). Sie ist in Deutschland allgemein als die Differenz der volumetrischen Wassergehalte bei einer Wasserspannung von -60 hPa (pF 1,8, Feldkapazität) und -15.000 hPa (pF 4,2 permanenter Welkepunkt) definiert (ARBEITSGRUPPE BODEN 2005, DIN4220 2008). Im Labor wird die nutzbare Feldkapazität herkömmlich durch Entwässerung vollständig gesättigter Bodenproben auf keramischen Platten mit hängenden Wassersäulen oder mittels Überdruck in Drucktöpfen ermittelt (HARTGE & HORN 1992). Die aufwendige Entnahme geeigneter Bodenproben und nicht zuletzt der hohe Zeitaufwand bis zur Gleichgewichtseinstellung bei Entwässerung der Bodenproben machen die instrumentelle Messung im Labor somit ausgesprochen personal-, zeit- und materialintensiv (HANGEN & SCHERZER 2004). Neuere Verfahren zur Bestimmung bodenhydraulischer Parameter, wie Verdunstungsverfahren (SCHINDLER 1980, PETERS & DURNER 2008) oder die Multistep Outflow-Methode (PUHLMANN et al. 2009), haben einen deutlich geringeren Aufwand und ermöglichen die Messung größerer Probenzahlen. Eine etablierte Alternative

zu direkten Messungen im Labor ist die Ableitung hydraulischer Bodeneigenschaften aus vorliegenden, einfacher zu erhebenden Bodeneigenschaften mittels Pedotransferfunktionen (PTF). Häufig verwendete Eingangsgrößen solcher PTF sind Humus- oder Kohlenstoffgehalte, Texturklassen oder analysierte Kornfraktionenanteile, Trockenrohddichte sowie mit Substrat- und Horizontgenese assoziierte Bodeneigenschaften. Diese Bodeneigenschaften lassen sich vielfach aus vorliegenden bodenkundlichen Kartenwerken ableiten oder liegen als Ergebnisse bodenkundlicher Inventuren vor. Somit erlaubt der Einsatz von PTF die Quantifizierung und Regionalisierung der nutzbaren Feldkapazität beziehungsweise der daraus abgeleiteten pflanzenverfügbaren Wasserspeichermenge von Böden.

Eine flächendeckende Ermittlung der nutzbaren Feldkapazität für großräumige regionale Betrachtungen wie beispielsweise die Ableitung von Entscheidungshilfen für die forstliche Praxis erscheint gegenwärtig durch Messungen mit Laborverfahren aufgrund des hohen Zeit- und Kostenaufwandes noch nicht praktikabel. Insbesondere für die Regionalisierung ist die Verwendung von PTF, angesichts des geringeren Aufwandes und nicht zuletzt wegen der effektiven Nutzung vorhandener, räumlich oft gut aufgelöst vorliegender Bodenkennwerte, als eine auch zukünftig berechnete Alternative zu sehen. Es existieren viele verschiedene PTF, welche zum Teil anhand unterschiedlichster Böden aus regionalen Erhebungen oder nationalen und internationalen Bodendatenbanken mit verschiedensten methodischen Ansätzen entwickelt wurden.

Jüngere Studien, welche sich mit der Vorhersagegüte verschiedener PTF beschäftigen, konstatieren insbesondere für sandige Böden unter Wald hohe Vorhersagefehler (SCHRAMM et al. 2006, STUMPP et al. 2009). Zugleich wurden oft Indizien für eine regional eingeschränkte Gültigkeit von PTF beobachtet (vgl. (CORNELIS et al. 2001, GIVI et al. 2004, STUMPP et al. 2009, OSENSTETTER et al. 2009). Untersuchungen, welche sich speziell mit der regionalen Eignung einzelner PTF für Waldstandorte des pleistozänen Tieflands auseinandersetzen, fehlen bislang. Ziel dieser Studie war es, ausgehend von den Arbeiten von HANGEN & SCHERZER (2004) und SCHRAMM et al. (2006), die Eignung von PTF zur Ableitung der nFK für die brandenburgischen Inventurpunkte der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE) und für die Verwendung in Regionalisierungsansätzen zu prüfen.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Datengrundlagen

Ziel der Auswertungen ist die Bewertung der Vorhersageeigenschaften der PTF für typische, flächenrepräsentative, grundwasserferne, mineralische Waldböden des Nordostdeutschen Tieflands unter besonderer Berücksichtigung von Brandenburg. Sonderstandorte, wie Kippenböden der in Brandenburg auftretenden Bergbaufolgelandschaften und seltener nur regional oder kleinflächig auftretende Formen wie Moor- und Auenböden, wurden ausgeschlossen. Organische Auflagehorizonte wurden ebenfalls nicht in die Auswertungen einbezogen. Als Datengrundlage konnte eine insgesamt 505 Bodenhorizonte umfassende Datenbank mit Messwerten zur nFK und den zugehörigen Angaben zu den von den verschiedenen PTF benötigten Eingangsgrößen (Textur, Dichte, Humus, Kohlenstoff, Substrat- und

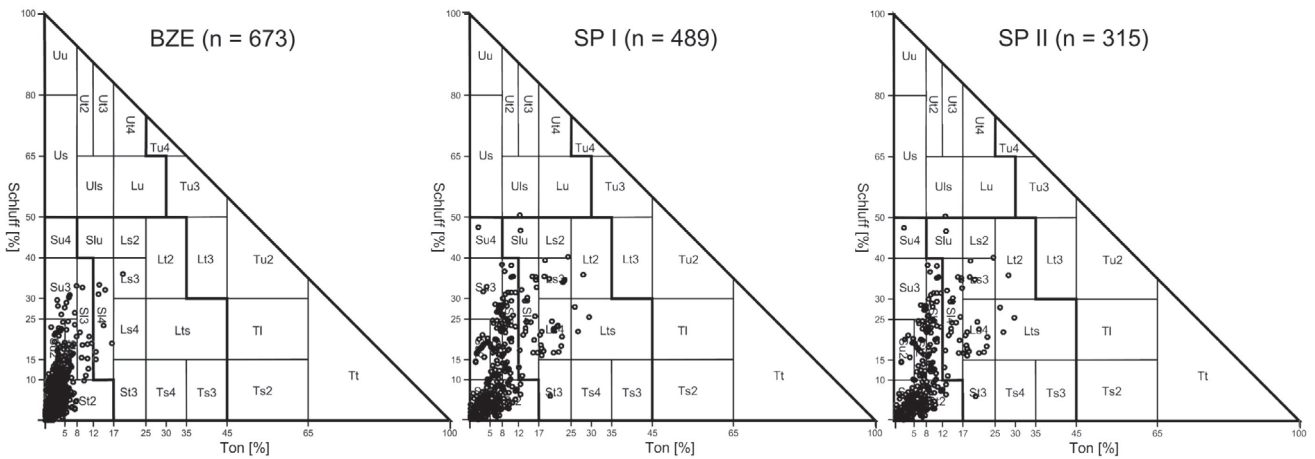
Horizontklassifikation, Tiefenspanne) zusammengestellt werden. Im Einzelnen handelt es sich um Proben folgender Einrichtungen, die für die Studie zur Verfügung gestellt wurden:

- 167 Datensätze vom Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg,
- 131 Datensätze vom Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde des Landesbetriebs Forst Brandenburg,
- 13 Datensätze vom Institut für Waldökologie und Waldinventuren des Johann Heinrich von Thünen-Instituts,
- 194 Datensätze vom Kompetenzzentrum für Wald- und Forstwirtschaft des Staatsbetriebs Sachsenforst

Zusätzlich standen die Ergebnisse der umfangreich untersuchten Standorte der BZE für das Land Brandenburg zur Verfügung (673 Horizonte von 137 mineralischen Standorten ohne anthropogene Formen wie Kippsubstrate). Für diese Standorte waren zwar sämtliche in PTF verwendeten Eingangsgrößen, jedoch keine Messwerte der nFK verfügbar. Die Daten erlauben indes, mit verschiedenen PTF die pflanzenverfügbaren Wasserspeicherkapazitäten im effektiven Wurzelraum (nWSK) für 137 Standorte zu berechnen und anhand dieser flächenrepräsentativen Stichprobe Aussagen zur mittleren Lage und Streubreite der Ergebnisse einzelner PTF zu gewinnen. Für die Berechnung der nWSK wurde die Tiefe des effektiven Wurzelraums vereinfachend mit 1 m Mineralbodentiefe angenommen. So konnten die PTF relational miteinander verglichen und die systematischen Unterschiede bei der Vorhersage der nWSK für konkrete brandenburgische Waldböden, d. h. repräsentative Ausprägungen und Ausprägungskombinationen der Eingangsgrößen der PTF quantifiziert werden.

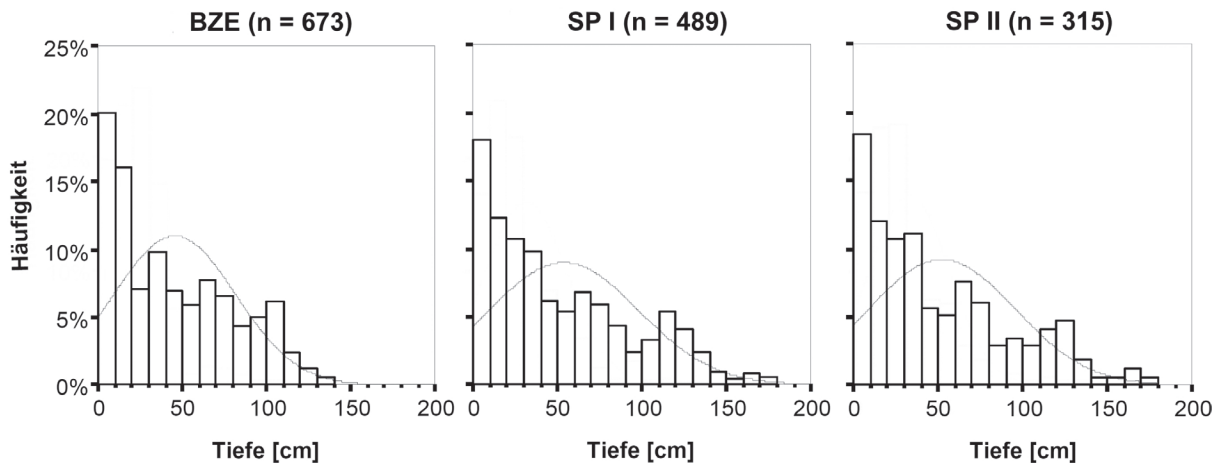
Analog zu den repräsentativen Häufigkeitsverteilungen der BZE für die wichtigen Einflussgrößen Textur, Trockenrohddichte und Humusgehalt wurden für Brandenburg charakteristische Teilstichproben aus den ursprünglich insgesamt 505 vorliegenden Datensätzen mit Messwerten zur nFK ausgewählt. Dies konnte durch Ausschließen der Bodenartenhauptgruppen Schluffe und Tone von der weiteren Auswertung erreicht werden (vgl. Abb. 1). Bezüglich der Häufigkeiten von Trockenrohddichte (Abb. 3) und Humusgehalt (Abb. 4) stimmten die Datensätze gut überein. Größere Unterschiede zeigen sich für die Verteilungen der mittleren Horizonttiefen der BZE und der Entnahmetiefen in den Stichproben SP I und SP II (Abb. 2). Diese sind wahrscheinlich auf gerichtete Unterschiede bei der Ansprache von Horizontgrenzen in den unterschiedlichen Stichproben zurückzuführen. Entgegen der zu vermutenden Unterschiede bei der Ansprache der Bodenhorizonte, zeigen die prozentualen Häufigkeiten der zu elf Horizontgruppen zusammengefassten Horizontsymbole zwischen den einzelnen Stichproben eine gute Übereinstimmung (vgl. Tab. 1).

Im Hinblick auf die nicht für alle Datensätze durchgeführten Korngrößenanalysen wurden zwei Stichproben ausgewählt. Die größere Stichprobe (SP I) umfasst alle 489 Datensätze, d. h. das Gesamtkollektiv. Die kleinere Stichprobe (SP II) enthält ausschließlich jene 315 Datensätze, für welche Korngrößenanalysen vorliegen. Ziel dieses Vorgehens war es, bei der späteren Validierung anhand der Stichprobe SP II alle betrachteten PTF einheitlich miteinander vergleichen zu



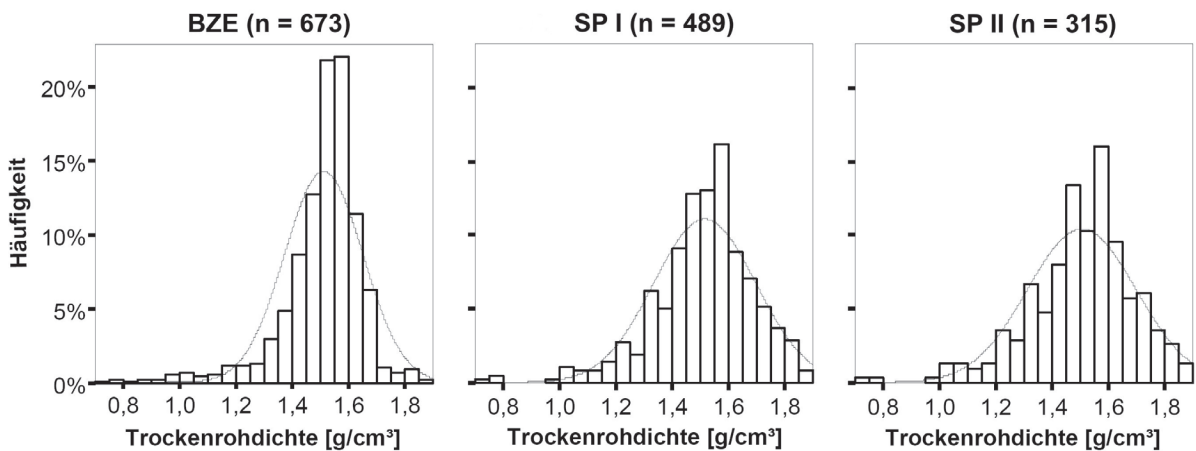
**Abb. 1:** Verteilung der Stichprobe der BZE, der Stichprobe SP I (Gesamtkollektiv) und der Stichprobe SP II (Datensätze mit Korngrößenanalysen) innerhalb der Texturklassen nach ARBEITSGRUPPE BODEN (2005).

**Fig. 1:** Distribution of the BZE-sample, the dataset SP I (total sample) and the dataset SP II (subsample with available particle size distributions) within the german texture triangle (ARBEITSGRUPPE BODEN 2005).



**Abb. 2:** Häufigkeitsverteilung der Entnahmetiefen für die BZE-Stichprobe, der Stichprobe SP I (Gesamtkollektiv) und der Stichprobe SP II (Korngrößenanalysen).

**Fig. 2:** Sampling depth of the BZE-Sample, the dataset SP I (total sample) and the dataset SP II (sub-sample with available particle size distributions).



**Abb. 3:** Häufigkeitsverteilung der Trodenrohddichten für die BZE-Stichprobe, der Stichprobe SP I (Gesamtkollektiv) und der Stichprobe SP II (Datensätze mit Korngrößenanalysen).

**Fig. 3:** Bulk density frequency of the BZE-Sample, the dataset SP I (total sample) and the dataset SP II (sub-sample with available particle size distributions).

können und zugleich mit der Stichprobe SP I eine möglichst umfangreiche Stichprobe für die Bewertung der auf Texturklassen basierenden PTF zur Verfügung zu haben.

## 2.2 Auswahl und Anwendung der betrachteten PTF

Einen allgemeinen Überblick über PTF zur Bestimmung hydraulischer Bodeneigenschaften, die verschiedenen Ansätze zur Entwicklung sowie die Bewertung von PTF geben WÖSTEN et al. (2001). Grundsätzlich lassen sich nach ZACHARIAS & WESSOLEK (2007) drei verschiedene Typen von PTF zur Ableitung der Wasserspeichereigenschaften unterscheiden:

1. PTF, welche den jeweiligen Wassergehalt für ausgewählte Matrixpotentiale in der Regel den Wassergehalt bei Feldkapazität (pF 1,8 oder pF 2,5) und für den permanenten Welkepunkt (pF 4,2) vorhersagen, wie die Ansätze nach DIN4220 (2008), RENGIER et al. (2009), RIEK et al. (1992, 1995), ARBEITSGRUPPE BODEN (2005) oder TEEPE et al. (2003).
2. PTF, welche die Zusammenhänge zwischen Körnungssummenkurven, Porengrößenverteilungen und Wasserretentionskurven nutzen. Die jeweiligen Wassergehalte werden dann für aus der Korngrößenverteilung abgeleitete Porenvolumen in Abhängigkeit vom aus kapillaren Zusammenhängen abgeleiteten Matrixpotential bestimmt (ARYA & PARIS 1981).
3. PTF, welche Parameter für verschiedene Funktionen zur Beschreibung der Wasserspeicherung in Abhängigkeit vom Matrixpotential bestimmen (TEEPE et al. 2003, SCHAAP et al. 2001, WÖSTEN et al. 1999, VEREECKEN et al. 1989, SCHEINOST et al. 1997).

Die Auswahl der betrachteten PTF folgt den Empfehlungen von HANGEN & SCHERZER (2004), welche anhand umfangreicher Literaturstudien für deutsche Waldböden besonders geeignet erscheinende Ansätze extrahierten. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Auflösung der Korngrößenverteilung (TIETJE & HENNINGS 1993, ZACHARIAS & WESSOLEK 2007) und entsprechend den Empfehlungen von HANGEN & SCHERZER (2004) wurden PTF nach Typ 2 nicht in die Auswertungen

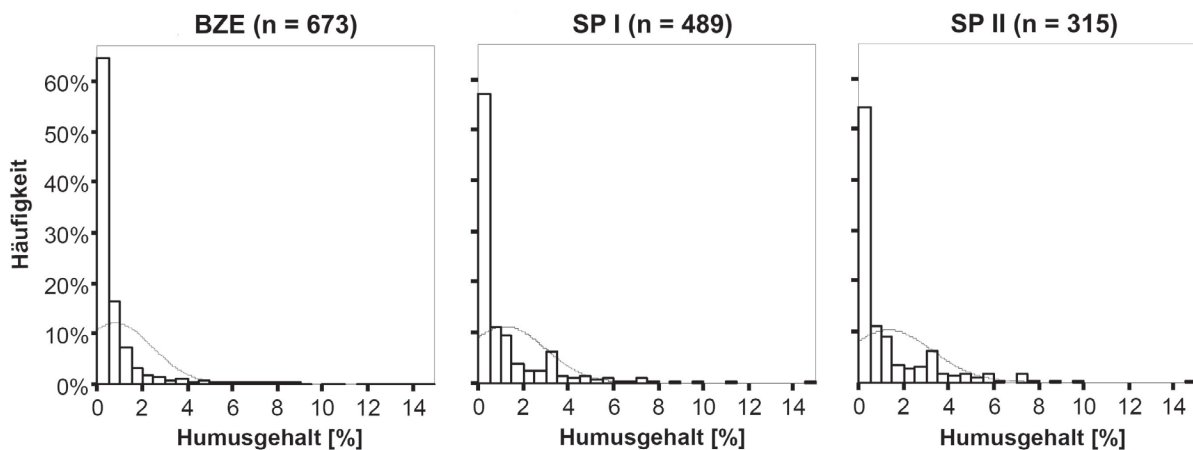
**Tab. 1:** Horizontierung der Stichprobe der BZE, der Stichprobe SP I (Gesamtkollektiv) und der Stichprobe SP II (Datensätze mit Korngrößenanalysen).

**Tab. 1:** Horizons of the BZE-sample, the dataset SP I (total sample) and the dataset SP II (sub-sample with available particle size distributions).

Horizonte	BZE (n = 673)	SP1 (n = 489)	SP II (n = 315)
Ah, Aeh	16,5 %	15,5 %	18,7 %
Ae, Ahe	7,6 %	5,9 %	4,8 %
Ael, Al	1,5 %	4,1 %	5,4 %
Bv, Bhv, Bsv, Ah+Bv	37,6 %	28,4 %	27,9 %
Bt, Cv+Bbt, Ael+Bt	3,9 %	6,1 %	7,6 %
Bs, Bhs, Bvs, Bsh	4,0 %	5,1 %	4,1 %
C, Cv	23,8 %	21,7 %	19,7 %
Go, Gw, rGo	2,7 %	4,1 %	3,5 %
Gr, Gor, rGr	0,3 %	2,2 %	1,9 %
Sw, Sew	0,7 %	3,5 %	2,9 %
Sd, Swd	1,5 %	3,3 %	3,5 %

einbezogen. Die im folgenden verwendeten Kurzbezeichnungen der betrachteten PTF, eine kurze Beschreibung der jeweiligen Ansätze sowie vorgenommene Anpassungen bei der Anwendung der PTF werden in Tabelle 2 dargestellt.

Die bekannte PTF nach ARBEITSGRUPPE BODEN (2005) zur Bestimmung der nFK anhand der Eingangsgrößen Texturklasse, Trockenrohdichte und Humusgehalt wurde nicht aufgenommen und durch den analogen Ansatz der DIN4220 (2008) ersetzt. Dadurch wurde erreicht, dass der Spannungsbereich aller für die Vorhersage der nutzbaren Feldkapazität genutzten PTF einheitlich (in allen Texturbereichen) zwischen pF 1,8 und pF 4,2 definiert war (vgl. SCHREY 2008). Zusätzlich wurde als Überarbeitung des Ansatzes nach ARBEITSGRUPPE BODEN (2005)/DIN4220 (2008) eine aktuell publizierte PTF von RENGIER et al. (2009) sowie ein im Vergleich zu den anderen Gleichungen zusätzlich Substrat und Horizontgenese berücksichtigender Ansatz nach RIEK et al. (1992) mit einbezogen. Für die PTF *Schaap KGA*, *Schaap*



**Abb. 4:** Häufigkeitsverteilung der Humusgehalte für die BZE-Stichprobe, der Stichprobe SP I (Gesamtkollektiv) und der Stichprobe SP II (Korngrößenanalysen).

**Fig. 4:** Content of organic matter frequency of the BZE-Sample, the dataset SP I (total sample) and the dataset SP II (sub-sample with available particle size distributions).

Tab. 2: Übersicht der validierten PTF, Hinweise zu Datengrundlage und vorgenommenen Anpassungen bei der Anwendung auf die Validierungsstichproben.

Tab. 2: Overview of the PTF considered in validation, remarks to data basis of PTF-development and performed necessary adjustments for use in validation dataset.

PTF-Bezeichnung	Literaturquelle	Eingangsgroßen	Ansatz/Methodik	Herkunft/Datenbasis	Annahmen / Anpassungen
<b>AG Boden pF</b>	ARBEITSGRUPPE BODEN (2005)	Texturklasse, TRD, Hum.	geometrisch gemittelte Werte für die jeweilige Bodenart	15.799 Datensätze der Bundesländer BW, BY, BE, BB, HE, NI, NW, RP, ST, und aus Datenbeständen von Teepe (Göttingen) und Vetterlein (DDR)	Der PWP wurde zur Vermeidung von Wertetriplets und Berücksichtigung des Humusgehaltes aus FK-nFK ermittelt.
<b>DIN4220</b>	DIN 4220 (2008)	Texturklasse, TRD, Hum.	geometrisch gemittelte Werte für Bodenart, TRD und Zuschläge in Abhängigkeit vom Hum.	siehe <b>DIN4220</b> + zusätzliche Erfahrungswert-/Messwerte	PWP-Berechnung erfolgte analog zu <b>DIN4220</b> . Für nicht definierte Varianten von TRD und Texturklasse wurde der Tabellenwert der gleichen Feinbodenart in der angrenzenden TRD-Stufe eingesetzt.
<b>Renger</b>	RENGER et al. (2008)	Texturklasse, TRD, Hum.	modifizierter Ansatz nach DIN 4220 (u. a. differenziertere TRD-Stufen, Kalibrierung der Tabellenwerte für Tone, Sande und Zuschläge für den Hum.)	6.000 Datensätze der Geol. Landesämter BY, BE, HE, NI, SH, NW, RP sowie aus Datenbeständen von Vetterlein (DDR)	die Substratgruppe wurde behelfsweise aus der Textur abgeleitet
<b>Riek</b>	RIEK et al. (1992, 1995)	KGA, TRD, Hum., Horizontgruppe	multiple Regressionsanalysen innerhalb von Substrat-Horizontgruppen	2.134 Bodenproben temperierter und subtropischer Klimate aus Nordamerika und Europa	Umrechnung der KGA entsprechend der Einteilung in der amerikanischen Nomenklatur durch Interpolation mit kubischen Splines
<b>Schaap KGA</b>	SCHAAP et al. (2001)	KGA	Training künstlicher Neuronaler Netze	132 Bodenproben aus einem 1,5 km <sup>2</sup> großen Intensivmessfeld Bayerns mit einem großen Wertebereich der Prädiktorvariablen	Für Porosität wurde aus 1-TRD/2,65 abgeleitet; es wurde nur mit den 3 Korngrößenklassen Ton, Schluff & Sand (ohne Skelettgehalt) gerechnet
<b>Schaap KGA+TRD</b>		KGA, TRD	Mittelwertberechnungen für 12 US-Texturklassen		
<b>Schaap klass</b>		Texturklasse	Regressionsanalysen, Berücksichtigung von geometrischem Mittelwert und Standardabweichung der Korngrößenverteilung		
<b>Scheinost</b>	SCHEINOST et al. (1997)	KGA, Corg, Porosität, Skelettgehalt	multiple Regressionsanalysen	1.850 pF-Kurven von Waldböden Deutschlands (1.500 vom Institut für Bodenkunde und Waldernährung der Univ. Göttingen + 350 aus der Literatur)	Für Schluff oder Sand < 0,5 % wurde der Wert 0,5 % eingesetzt
<b>Teepe KGA nFK</b>	TEEPE et al. (2003)	KGA, TRD	Clusteranalysen zur Ausscheidung von 10 Texturklassen, Berechnung von Mittelwerten für die 10 Textur-, sowie 5 neu eingeführte TRD-Klassen	182 Horizonte aus 40 Böden Belgiens mit einem breiten Bodenartenspektrum	Umrechnung der KGA analog zu Schaap KGA
<b>Teepe KGA vG</b>		KGA, TRD			
<b>Teepe klass nFK</b>		Texturklasse, TRD			
<b>Teepe klass vG</b>		Texturklasse, TRD	multiple Regressionsanalysen	4.030 Proben aus der 5.521 umfassenden HYPRES-Datenbank, welche überwiegend auf landwirtschaftlichen Standorten aus 14 europäischen Ländern basiert	Umrechnung der KGA analog zu Schaap KGA. Als Oberboden wurden alle Horizonte oberhalb 30 cm angenommen. Für Ton-, Schluff- und Humusgehalte < 0,5 % wurde 0,5 eingesetzt
<b>Vereecken</b>	VERECKEN et al. (1989)	KGA, TRD, Corg	multiple Regressionsanalysen, Hauptkomponentenanalyse		
<b>Wösten KGA</b>	WÖSTEN et al. (1999)	KGA, TRD, Hum., OB	multiple Regressionsanalysen		
<b>Wösten klass</b>		Texturklasse, OB	Kurvenanpassung an geometrische Mittelwerte der einzelnen Druckstufen		

(KGA = Korngrößenanalysen, TRD = Trockenrohdichte, Hum. = Humusgehalt, Corg = Gehalt an organischen Kohlenstoff, OB = Oberbodenparameter)

KGA+TRD, Vereecken, Wösten KGA (Tab. 2), welche von den entsprechend der Einteilung der Korngrößenklassen nach ARBEITSGRUPPE BODEN (2005) vorliegenden Kornfraktionenanteilen abweichend definierte Kornfraktionenanteile als Eingangsgrößen benötigen, wurden die entsprechenden Kornfraktionenanteile in Anlehnung an die Empfehlungen von NEMES et al. (1999) durch Anpassung kubischer Splines interpoliert. Für die PTF *Schaap klass, Wösten klass* (Tab. 2), welche von der Einteilung nach ARBEITSGRUPPE BODEN (2005) abweichende Texturklassen benötigten, wurden die jeweiligen Texturklassen nach der rechnerischen Umformung der Kornfraktionenanteile mittels kubischer Splines aus den Kornfraktionenanteilen entsprechend der jeweiligen Klassifikation abgeleitet. Für Datensätze, für welche keine Korngrößenanalyseergebnisse, sondern nur Texturklassen aus der Feldansprache vorlagen, wurden die arithmetischen Mittelwerte der die jeweilige Texturklasse definierenden Wertespannen der Kornfraktionenanteile angenommen und anschließend analog dem Vorgehen bei vollständigen Datensätzen verfahren. Sonstige, für die praktische Anwendbarkeit notwendige Anpassungen bei der Verwendung der einzelnen Gleichungen, wie Modellgrenzen, das Vermeiden des Logarithmiers oder Dividierens mit null wurden entsprechend der Hinweise von SCHRAMM et al. (2006) übernommen (siehe hierzu auch Tab. 2, letzte Spalte).

### 2.3 Bewertung der Vorhersageeigenschaften

Die Bewertung der Vorhersagegüte der PTF erfolgte in Anlehnung an die Vorschläge von KOBAYASHI & SALAM (2000), GIVI et al. (2004) und DE VOS et al. (2005) mittels ausgewählter, statistischer Maßzahlen. Es wurden der arithmetische Mittelwert des Vorhersagefehlers MPE<sup>1</sup>, die Standardabweichung des Vorhersagefehlers SDPE<sup>2</sup>, der Quadratwurzelfehler RMSPE<sup>3</sup> und der Determinationskoeffizient zwischen Vorhersage- und Messwerten (R<sup>2</sup>) berechnet. Als Parameter der linearen Regressionsgleichung zwischen Vorhersage und Messwerten wurden der Anstieg b und der Schnittpunkt a mit der y-Achse ermittelt sowie diese auf Signifikanz gegen null und eins getestet. Zusätzlich wurden die Residuen der einzelnen PTF in Boxplots veranschaulicht und die Vorhersagewerte in Streudiagrammen den Messwerten gegenübergestellt. Die Gleichungen zur Berechnung der einzelnen Kennwerte zeigt Abbildung 5.

Dabei gibt der MPE, welcher dem Mittelwert aller Residuen entspricht, einen Anhalt, in wie weit die jeweiligen PTF zum systematischen Über- oder Unterschätzen der wahren Werte neigen. Der SDPE zeigt die nach Beseitigung der systematischen Abweichung durch Subtraktion des MPE verbleibenden, von der Funktion nicht erklärbaren, zufälligen Abweichungen, während der RMSPE als mittleren Betrag der einzelnen Vorhersagefehler ein Maß für den durchschnittlich zu erwartenden Gesamtfehler bei Anwendung der jeweiligen PTF auf das verwendete Datenkollektiv angibt. Die Verhältnisse MPE<sup>2</sup>/RMSPE<sup>2</sup> und SDPE<sup>2</sup>/RMSPE<sup>2</sup> geben die relativen Anteile systematischer und zufälliger Fehlerkomponenten am Gesamtfehler an (DE VOS et al. 2005). Der Determinationskoeffizient (Bestimmtheitsmaß) und die Parameter der Geradengleichung beschreiben die funktionalen Zusammenhänge zwischen den Mess- und Vorhersagewerten, wobei die Geradensteigung b im Idealfall den Wert 1 und der Y-Achsenabschnitt a den Wert 0 annimmt. Der Determinationskoeffizient R<sup>2</sup> erreicht im Fall optimaler Anpassung ebenfalls den Wert 1 und gibt Aufschluss über die Güte der funktionalen Zusammenhänge.

1 the mean predicted error

2 the standard deviation of the prediction error

3 square root of the mean square prediction error

menhänge zwischen den Mess- und Vorhersagewerten, wobei die Geradensteigung b im Idealfall den Wert 1 und der Y-Achsenabschnitt a den Wert 0 annimmt. Der Determinationskoeffizient R<sup>2</sup> erreicht im Fall optimaler Anpassung ebenfalls den Wert 1 und gibt Aufschluss über die Güte der funktionalen Zusammenhänge.

Als ein zusammenfassendes Hilfsmittel für die Ableitung von Empfehlungen zur Verwendung konkreter PTF wurde analog zu SCHRAMM et al. (2006) und CORNELIS et al. (2001) die Rangfolge der PTF innerhalb der sechs herangezogenen statistischen Kennwerte gebildet und aus den ungewichteten arithmetischen Mittelwerten eine Gesamttrangliste erstellt.

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Relationaler Vergleich – Ergebnisse für die BZE-Stichprobe

Beim im ersten Schritt durchgeführten relationalen Vergleich der PTF anhand von Blockberechnungen der nFK bis 1 m Bodentiefe (konventionelle Tiefe des effektiver Wurzelraums) für die ausgewählten Standorte der brandenburgischen BZE zeigten sich erhebliche systematische Unterschiede. Die aus den unterschiedlichen PTF resultierenden Ergebnisse sind in Abbildung 6 dargestellt. Der Median der nFK wurde im Minimum mit unter 60 mm (*Schaap KGA*) und im Maximum mit über 220 mm (*Scheinost*) vorhergesagt. Danach würde sich beispielsweise entsprechend des Bewertungsrahmens des ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2003) für die PTF

$$MPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{V,i} - y_{M,i}) \quad (1)$$

$$SDPE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n ((y_{V,i} - y_{M,i}) - MPE)^2} \quad (2)$$

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{V,i} - y_{M,i})^2} \quad (3)$$

$$R^2 = \frac{\left( \sum_{i=1}^n (y_{M,i} - \bar{y}_M) \cdot (y_{V,i} - \bar{y}_V) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (y_{M,i} - \bar{y}_M)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_{V,i} - \bar{y}_V)^2} \quad (4)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{M,i} - \bar{y}_M) \cdot (y_{V,i} - \bar{y}_V)}{\sum_{i=1}^n (y_{M,i} - \bar{y}_M)^2} \quad (5)$$

$$a = \bar{y}_V - b \cdot \bar{y}_M \quad (6)$$

mit  $y_M$  als Messwerten und  $y_V$  als Vorhersagewerte

**Abb. 5:** Statistische Maßzahlen zur Validierung der PTF.

**Fig. 5:** Statistical parameters used for validation of PTF.

*Schaap KGA* eine sehr "geringe" und bei Anwendung der PTF *Scheinost* eine "sehr hohe" nFK ergeben, was einer Differenz von vier bei insgesamt sieben definierten Bewertungsstufen entspricht. Auch die Variabilität der vorhergesagten nFK-Werte innerhalb der verschiedenen PTF war mit Boxbreiten (25 %- bis 75 %-Perzentil) zwischen unter 10 mm (*Wösten klass*) und über 60 mm (*Riek*) deutlich differenziert. Diese Ergebnisse bestätigten auch für Brandenburg die bereits von anderen Autoren beobachtete Notwendigkeit einer möglichst genauen Prüfung und Auswahl von PTF vor ihrer Anwendung auf Böden anderer Regionen beziehungsweise Datenkollektive (z. B. CORNELIS et al. 2001, GIVI et al. 2004, STUMPP et al. 2009).

### 3.2 Validierung durch Vergleich mit gemessenen Werten

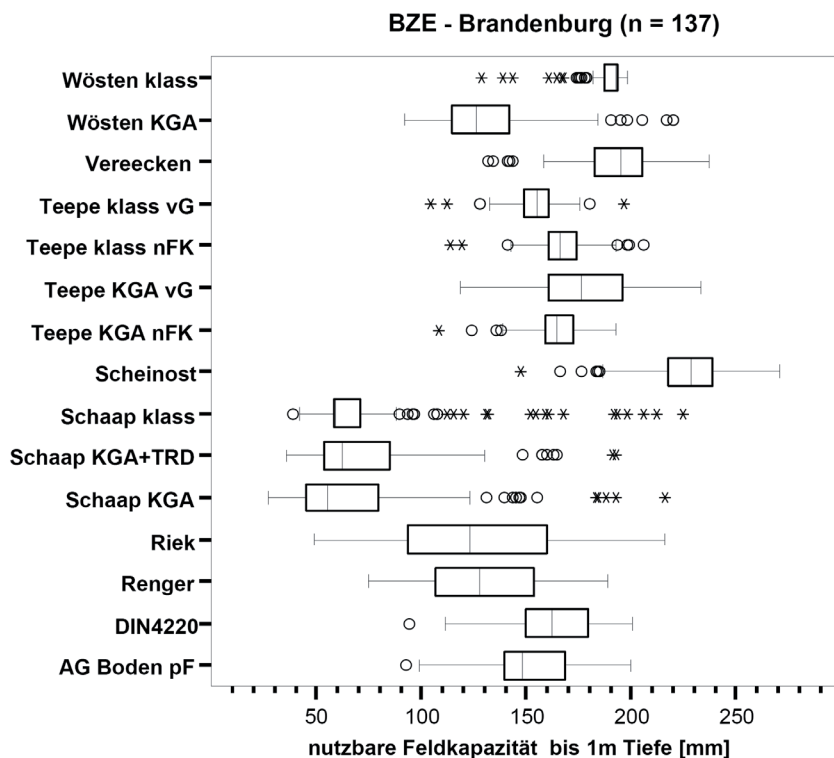
Eine Wertungsmöglichkeit, mit welcher PTF die nFK am besten vorhergesagt wird, ist anhand der BZE-Daten nicht möglich, da für die Standorte der BZE in Brandenburg die nFK nicht messtechnisch ermittelt wurde. Diese Einschätzung erfolgte anhand der mit Messwerten belegten 489 bzw. 315 Datensätze der Stichproben SP I und SP II.

In den Boxplot-Darstellungen der Residuen für die Stichprobe SP I (Abb. 8) und die Stichprobe SP II (Abb. 7) spiegeln sich die an der BZE-Stichprobe festgestellten allgemeinen Tendenzen zur Über- bzw. Unterschätzung auch in den Residuen zu den Messwerten wieder. Auffällig ist, das PTF mit geringen Wertespanssen (Boxbreiten) für das BZE-Kollektiv (z. B: *Wösten klass*, *Schaap klass*, *Scheinost*) auffällig weite Wertespanssen bei den auftretenden Residuen aufweisen, was darauf hindeutet, dass von diesen PTF ein größerer Teil der auftretenden Unterschiede bei der Ausprägung der nFK nur schlecht erklärt werden kann. Im Gegensatz dazu weist unter den Korngrößenanalysen berücksichtigenden Ansätzen insbesondere die PTF *Riek* für das BZE-Kollektiv die breiteste, für die auftretenden Residuen jedoch die niedrigste

Wertespansse auf. Weniger deutlich ausgeprägt trifft dies für die PTF *Renger* unter den auf Texturklassen basierenden Ansätzen zu. Dies deutet auf ein insgesamt besseres Erklärungspotential dieser PTF hin.

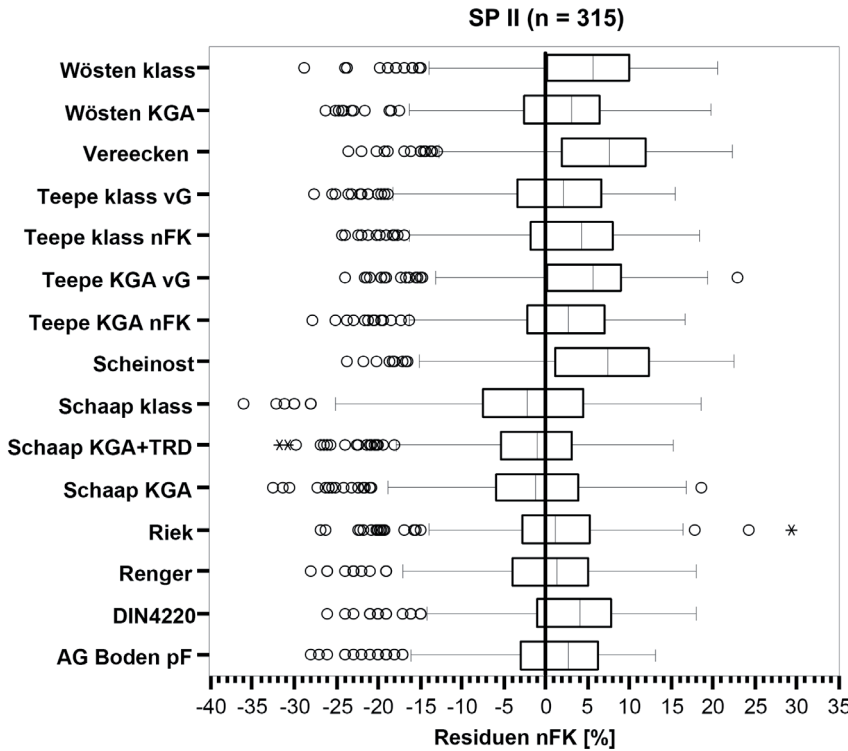
Die berechneten statistischen Maßzahlen (Tab. 3) zeigen, dass neben den hohen systematischen Unterschieden für das BZE-Kollektiv, mit teilweise zweistelligen Quadratwurzelfehlern (RMSPE), auch hohe Vorhersagegenauigkeiten bei allen betrachteten PTF bestehen. In Relation zu den Mittelwerten der gemessenen nFK von 15,64 % für die Stichprobe SP II und 14,65 % in der Stichprobe SP I ergeben sich für den mittleren Gesamtvorhersagefehler relative Fehler zwischen 69 % (*Scheinost*) und 50 % (*Renger*). Aus den zahlreichen Ausreißern der Residuen von teilweise über 30 % resultieren somit maximale relative Fehler im dreistelligen Prozentbereich. Den größten Anteil am Gesamtvorhersagefehler nehmen dabei bei allen Ansätzen mit Anteilen zwischen 70 % (*Vereecken*, *Scheinost*) und 100 % (*Riek*, *Renger*, *AG Boden pF*) nicht systematische, zufällige Abweichungen (SDPE) ein. Für den Anteil systematischer Fehler gelten entsprechend umgekehrte Verhältnisse. Die größeren Unterschiede zwischen den PTF bestehen mit einer Spanne von -2,24 % (*Schaap KGA*) und 5,86 % (*Scheinost*) jedoch im Bereich der systematischen Fehler, während die PTF im Bereich der zufälligen Fehler mit Werten zwischen 7,27 % und 9,82 % relativ nah zusammen liegen.

Die funktionalen Zusammenhänge, welche in der vorliegenden Studie mittels Bestimmtheitsmaß und den Parametern der Geradengleichung einer linearen Regression zwischen Mess- und Vorhersagewerten beschrieben wurden (Tab. 3), erscheinen insgesamt nur relativ schwach ausgeprägt. So erreicht das Bestimmtheitsmaß nur Werte von 0,03 (*Wösten klass*) bis 0,29 (*Riek*). Die Parameter der Geradengleichung sind mit Werten für b zwischen 0,04 (*Wösten klass*) und 0,44 (*Riek*) durchgehend signifikant verschieden von eins sowie mit Werten für a zwischen 7,73 (*Schaap KGA+TRD*) und



**Abb. 6:** Vorhersage der nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum bis 1 m Tiefe für die brandenburgischen Standorte der zweiten Bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE).

**Fig. 6:** Estimation of plant available water capacity for 1 m effective rooting zone for sites of the second national forest soil inventory in the federal state of Brandenburg (BZE).

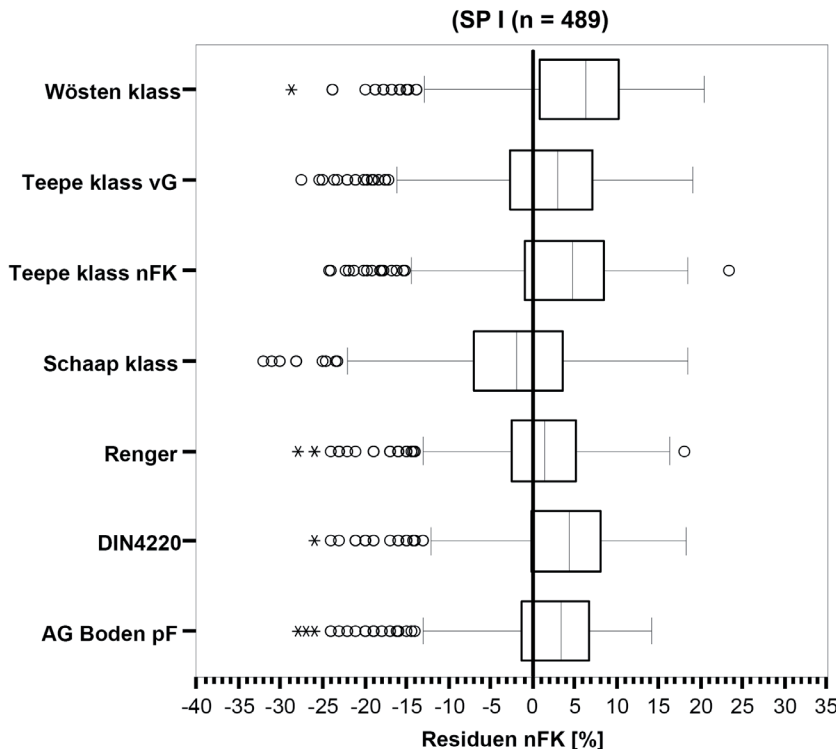


**Abb. 7:** Verteilung der Residuen bei Vorhersage der nutzbaren Feldkapazität für die Stichprobe SP II (Korngrößenanalysen).

**Fig. 7:** Distribution of the residuals estimating the available water capacity for dataset SP II (sub-sample with available particle size distributions).

19,62 (*Scheinost*) signifikant verschieden von null. Bezüglich der systematischen Abweichung der PTF (Median und MPE) erscheinen jene Ansätze, für deren Aufstellung besonders breit gefächerte Datengrundlagen verwendet wurden, besser auf Waldböden im nordostdeutschen Tiefland übertragbar zu sein, während an kleinen Probenkollektiven und für regional eng umgrenzte Gebiete entwickelte Ansätze zum Teil erhebliche Abweichungen aufweisen (*Vereecken*, *Scheinost*). Die PTF mit den kleinsten MPE sind ausschließlich Ansätze, welche anhand Datensätze des nordostdeutschen Tieflands mit einschließender Probenkollektive entwickelt wurden (*Riek*,

*Renger*, *AG Boden pF*). Dies entspricht auch den Erwartungen im Hinblick auf die Empfehlungen vieler PTF-Entwickler, die für Böden unterschiedlicher Regionen spezielle PTF entwickelten (BEKE & MACCORMICK 1985) oder die Anwendung der aufgestellten PTF nur für vergleichbare Regionen, Bodenverhältnisse bzw. Probenkollektive (SCHAAP & LEIJ 1998) empfehlen. Die Validierungsstudien von TIETJE & HENNINGS (1993), CORNELIS et al. (2001) und GIVI et al. (2004), bei welchen in der Regel anhand ähnlicher Böden und Regionen entwickelte PTF die besten Vorhersageeigenschaften aufwiesen, kommen zu einem ähnlichen Ergebnis.



**Abb. 8:** Verteilung der Residuen bei Vorhersage der nutzbaren Feldkapazität für die Stichprobe SP I (Gesamtkollektiv).

**Fig. 8:** Distribution of residuals estimating the available water capacity for dataset SP I (total sample).



Tab. 3: Statistische Maßzahlen und Rangplätze der PTF in den Stichproben SP I und SP II.

Tab. 3: Statistical parameters and ranking of the PTF within the datasets SP I and SP II.

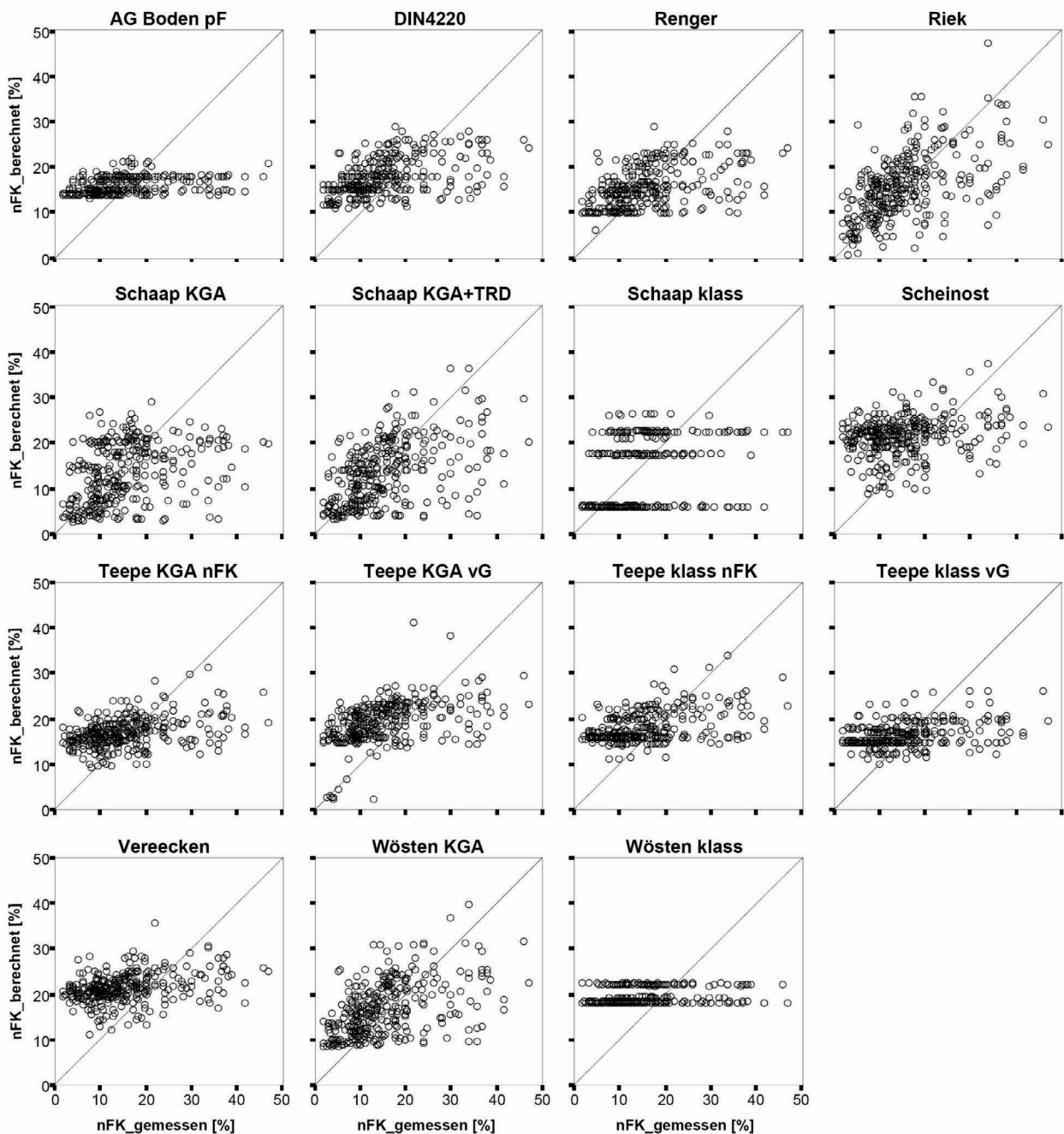
PTF	Stichprobe SP II (Datensätze mit Korngrößenanalysen, n = 315)										Stichprobe SP I (Gesamtkollektiv, n = 489)														
	MPE	SDPE	RMSPE	R <sup>2</sup>	a	b	MPE	SDPE	RMSPE	R <sup>2</sup>	a	b	MPE	SDPE	RMSPE	R <sup>2</sup>	a	b							
AG Boden pF	0,47 [3]	8,55 [10]	8,55 [10]	0,134 [8]	14,93 [9]	0,0755 [14]	1,58 [2]	7,71 [4]	7,86 [2]	0,140 [5]	14,80 [4]	0,0984 [5]	2,19 [8]	7,99 [2]	8,27 [4]	0,222 [5]	14,54 [7]	0,2102 [8]	3,03 [5]	7,29 [2]	7,89 [3]	0,219 [2]	14,39 [3]	0,2249 [3]	
DIN4220	-0,35 [2]	7,93 [1]	7,92 [1]	0,234 [1]	11,60 [3]	0,2359 [7]	0,33 [1]	7,27 [1]	7,27 [1]	0,229 [1]	11,11 [2]	0,2640 [2]	0,28 [1]	8,01 [3]	8,00 [2]	0,293 [1]	9,00 [2]	0,4419 [1]	0,11 [1]						
Schaap KGA	-2,24 [10]	9,09 [14]	9,35 [11]	0,127 [10]	9,37 [4]	0,2579 [6]	-2,23 [6]						-2,13 [7]	8,28 [7]	8,53 [6]	0,238 [2]	7,73 [1]	0,3696 [2]	-2,26 [2]						
Schaap klass	-2,20 [9]	9,82 [15]	10,05 [13]	0,099 [13]	9,32 [3]	0,2632 [4]	-2,00 [4]	8,85 [7]	9,06 [6]	0,140 [4]	7,66 [1]	0,3405 [1]	5,86 [15]	9,05 [13]	10,77 [15]	0,060 [14]	19,62 [15]	0,1203 [12]	7,05 [12]						
Scheinost	1,24 [5]	8,31 [8]	8,39 [5]	0,158 [8]	14,60 [8]	0,1458 [10]	2,16 [10]						1,24 [5]	8,31 [8]	8,39 [5]	0,158 [8]	14,60 [8]	0,1458 [10]	2,16 [10]						
Teepe KGA nFK	3,76 [12]	8,04 [4]	8,87 [10]	0,219 [6]	15,30 [11]	0,2620 [5]	4,81 [5]						3,76 [12]	8,04 [4]	8,87 [10]	0,219 [6]	15,30 [11]	0,2620 [5]	4,81 [5]						
Teepe klass nFK	2,45 [11]	8,19 [6]	8,54 [7]	0,182 [7]	15,54 [12]	0,1633 [9]	3,30 [9]	7,62 [6]	8,29 [5]	0,148 [3]	15,78 [6]	0,1481 [4]	0,68 [4]	8,55 [11]	8,57 [9]	0,108 [12]	14,79 [9]	0,0980 [13]	1,67 [5]	7,96 [3]	8,13 [4]	0,070 [6]	15,13 [5]	0,0816 [6]	
Teepe klass vG	0,68 [4]	8,55 [11]	8,57 [9]	0,108 [12]	14,79 [9]	0,0980 [13]	1,67 [5]	7,96 [3]	8,13 [4]	0,070 [6]	15,13 [5]	0,0816 [6]	5,79 [14]	8,53 [9]	10,30 [14]	0,113 [11]	19,54 [14]	0,1211 [11]	6,68 [11]						
Vereecken	1,30 [6]	8,12 [5]	8,21 [3]	0,228 [4]	12,06 [6]	0,3121 [3]	2,10 [3]						1,30 [6]	8,12 [5]	8,21 [3]	0,228 [4]	12,06 [6]	0,3121 [3]	2,10 [3]						
Wösten KGA	3,76 [13]	8,90 [12]	9,65 [12]	0,034 [15]	18,84 [13]	0,0354 [15]	4,72 [15]	8,07 [6]	9,34 [7]	0,044 [7]	18,73 [7]	0,0444 [7]	3,76 [13]	8,90 [12]	9,65 [12]	0,034 [15]	18,84 [13]	0,0354 [15]	4,72 [15]	8,07 [6]	9,34 [7]	0,044 [7]	18,73 [7]	0,0444 [7]	

MPE: arithmetischer Mittelwert des Vorhersagefehlers [%], SDPE: Standardabweichung des Vorhersagefehlers [%], RMSPE: Quadratwurzelfehler [%], R<sup>2</sup>: Determinationskoeffizient, b: Anstieg der linearen Regressionsgerade und a: Schnittpunkt mit der y-Achse der linearen Regressionsgerade [%]. Die Parameter der linearen Regressionsgeraden waren in allen Fällen auf dem 0,05-Niveau für a signifikant verschieden von 0 und für b signifikant verschieden von 1. In eckigen Klammern [ ] ist jeweils der Rang angegeben, welchen die PTF im Vergleich zu den anderen PTF für die jeweilige Maßzahl erzielt.

Güte und Richtigkeit des funktionalen Zusammenhangs zwischen den von den PTF erzeugten Werten und den Messwerten scheint an die Anzahl der berücksichtigten Eingangsgrößen gekoppelt zu sein. Die PTF *AG Boden pF*, *Schaap KGA*, *Schaap klass* und *Wösten klass*, welche neben der Textur keine weiteren Einflussgrößen berücksichtigen, erreichen nur niedrige Bestimmtheitsmaße und mit  $b = 0,0354$  für die PTF *Wösten klass* und  $b = 0,0755$  für die PTF *AG Boden pF* die niedrigsten Anstiege für die lineare Regressionsgerade zwischen Mess- und Vorhersagewerten. Eine Ausnahme stellen dabei die PTF *Schaap KGA* und *Schaap klass* dar, welche mit vergleichsweise hohen Werten für  $b$  und ausgesprochen niedrigen Werten für  $a$  mit zu den diesbezüglich Besten von allen betrachteten PTF gehören. Bessere Er-

gebnisse erzielt nur die PTF *Riek* mit den höchsten Werten für Bestimmtheitsmaß und Anstieg, sowie die PTF *Schaap KGA+TRD* mit dem deutlich niedrigsten Wert für  $a$  und den zweithöchsten Werten für  $R^2$  und  $m$ .

Die Beobachtung von SCHRAMM et al. (2006), dass PTF, welche speziell für die Ableitung der nutzbaren Feldkapazität entwickelt wurden, gegenüber kontinuierlichen PTF die nFK besser vorhersagen, zeigt sich mit Einschränkungen auch für die dieser Untersuchung zugrunde liegenden Stichproben. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die von SCHRAMM et al. (2006) durchgeführte Bewertung am RMSPE ausgerichtet ist. So erzielen innerhalb der Stichprobe SP I die PTF *Renger*, *DIN4220* und *AG Boden pF* sowie innerhalb der Stich-



**Abb. 9:** Gegenüberstellung der Mess- und Vorhersagewerte für die Stichprobe SP II.

**Fig. 9:** Comparison of measured and estimated values for dataset SP II.

probe SP II die PTF *Riek* und *Renger* die insgesamt besten Ergebnisse. Ausnahmen bilden in der Stichprobe SP II die PTF *Wösten KGA* und die PTF *Schaap KGA+TRD*, welche insgesamt ebenfalls sehr gute Ergebnisse erzielen und im Fall der PTF *Schaap KGA+TRD* zu den besten PTF bezüglich der Kennwerte  $R^2$ ,  $a$  und  $b$  zählen. Innerhalb der Stichprobe SP I muss berücksichtigt werden, dass die schlechter abschneidenden PTF *Wösten klass* und *Schaap klass* im Vergleich zu den anderen Ansätzen teilweise deutlich weniger Eingangsgrößen berücksichtigen und zudem eine wesentlich gröber gefasste Texturklasseneinteilung zugrunde legen. Die Effekte dieser gerade für den relativ schmalen betrachteten Texturbereich groben Texturklasseneinteilung im Vergleich zu den anderen betrachteten PTF verdeutlichen sich in den Streudiagrammen zwischen Mess- und Vorhersagewerten (Abb. 9 und 10).

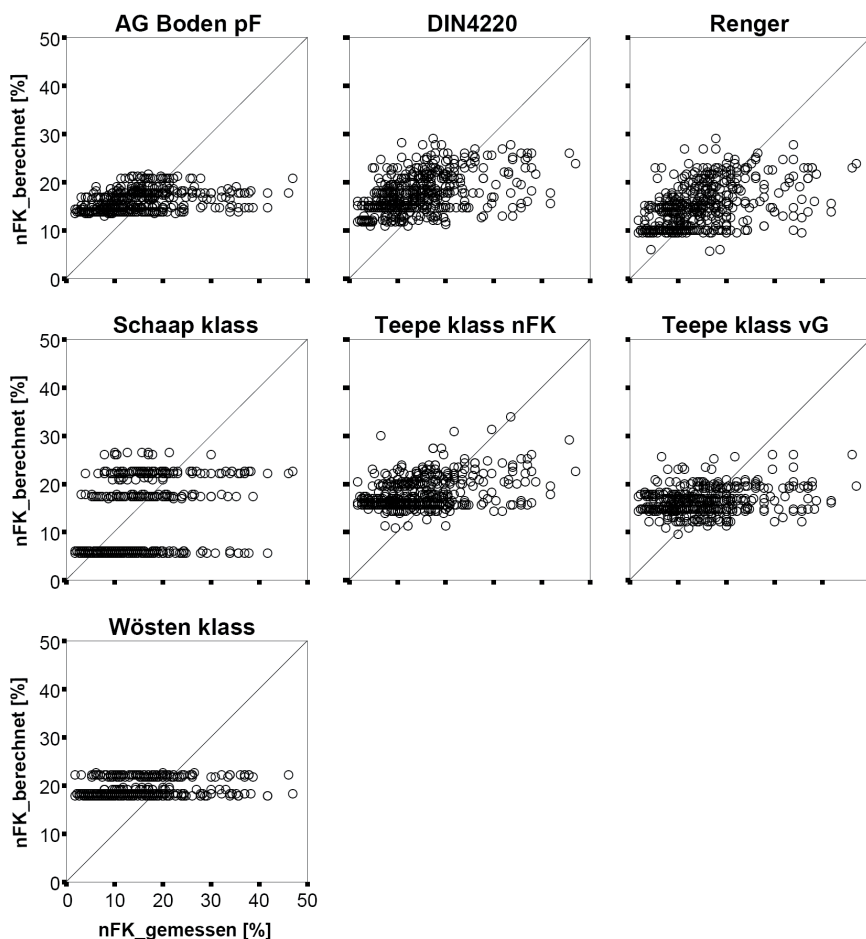
#### 4 Schlussfolgerung

Die insgesamt hoch erscheinenden Vorhersagefehler und weit vom Optimum entfernten Werte für  $R^2$ ,  $a$  und  $b$  (vgl. Tab. 3 und Abb. 9 und 10) zeigen klare Grenzen für die Verwendung von PTF. Soweit möglich, etwa bei detaillierten Betrachtungen an Versuchsflächen oder kleinerer homogener Gebiete, sollte nicht auf PTF ausgewichen und die nFK besser durch Messung im Labor ermittelt werden. Angesichts der schlechten Werte für die Parameter  $a$  und  $b$  sowie die für einige PTF hohen systematischen Abweichungen erscheint bei ausreichend vorhandenen, geeigneten Messwerten eine Rekalibrierung der PTF für das jeweilige Untersuchungsgebiet interessant. Die großen Anteile der zufälligen Feh-

lerkomponente (SDPE) am Gesamtfehler (RMSPE) sowie die niedrigen Werte für  $R^2$  deuten darauf hin, dass sich ein großer Teil der auftretenden Variabilität der nFK nicht durch die den PTF zugrunde liegenden Modelle und herangezogenen Eingangsgrößen erklären lässt. Interessant erscheint in Hinblick auf das mit der PTF *Riek* erzielte, vergleichsweise hohe Bestimmtheitsmaß, die Berücksichtigung von Substrat- und Horizonteigenschaften bei der Ableitung der nutzbaren Feldkapazität.

Wenn die entsprechenden Eingangsgrößen aus bodenkundlichen und geologischen Karten oder aus Kartenwerken der forstlichen Standortserkundung ableitbar sind, erscheinen PTF für Anwendungen der Regionalisierung praktikabel. Die Berücksichtigung weiterer Einflussgrößen, über standardmäßig aus Bodenkarten und Bodeninventuren vorliegende Kennwerte hinaus, ist für eine schnelle, einfache und kostengünstige Ableitung der nFK nicht empfehlenswert (vgl. RUBIO et al. 2008). Insbesondere für die Regionalisierung der nFK für die vorwiegend sandigen Böden des nordostdeutschen Tieflands erscheint die Verwendung weiterer Kennwerte, wie Wassergehalte bei bestimmten Matrixpotentialen oder zusätzlicher Kennwerte der Bodenstruktur, weniger interessant.

In der abschließenden Gesamtbewertung der PTF durch Festlegen einfacher Rangfolgen (Tab. 4) erzielen in der Stichprobe SP II die PTF *Riek* und in der Stichprobe SP I die PTF *Renger* die besten Ergebnisse. Die abschließend gebildete Rangliste sollte nicht als alleiniges Kriterium für die Auswahl einer PTF herangezogen werden. Neben den sich in der Regel häufig ergebenden Ausschlusskriterien aufgrund der nur eingeschränkt vorliegenden Eingangsgrößen



**Abb. 10:** Gegenüberstellung von Mess- und Vorhersagewerten für die Stichprobe SP I.

**Fig. 10:** Comparison of measured and estimated values for dataset SP I.

sollte bei der Auswahl einer konkreten PTF ebenfalls berücksichtigt werden, ob für die angestrebte Anwendung möglichst geringe durchschnittlich zu erwartende Fehler (RMSPE) oder die Ausprägung des Zusammenhangs zwischen Vorhersagewerten und den angenommenen Einflussgrößen im Vordergrund stehen soll ( $R^2$ , a, b). So erscheint in Abhängigkeit von der jeweiligen Präferenz und den verfügbaren Eingangsgrößen auch die Anwendung der PTF *AG Boden pF*, *Schaap klass*, *Schaap KGA*, *Schaap KGA+TRD*, *Teepe KGA nFK*, und *Wösten KGA* empfehlenswert.

**Tab. 4:** Gesamtanzahl Plätze der PTF in den Stichproben SP I und SP II.

**Tab. 4:** Final ranking of PTF within the datasets SP I and SP II.

PTF	Rang SP I	Rang SP II
AG Boden pF	3	9
DIN4220	2	5
Renger	1	2
Riek		1
Schaap KGA		10
Schaap KGA+TRD		3
Schaap klass	4	11
Scheinost		15
Teepe KGA nFK		6
Teepe KGA vG		7
Teepe klass nFK	5	8
Teepe klass vG	6	12
Vereecken		13
Wösten KGA		4
Wösten klass	7	14

## Danksagung

Wir danken dem Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (Dr. D. Kühn & Dr. A. Bauriegel), dem Johann Heinrich von Thünen-Institut Bundesforschungsinstitut für ländliche Räume, Wald und Fischerei, Institut für Waldökologie und Waldinventuren (Dr. S. Schobel) sowie dem Staatsbetrieb Sachsenforst Kompetenzzentrum für Wald und Forstwirtschaft (R. Gemballa) für die Unterstützung bei der Zusammenstellung geeigneter Validierungsdatensätze, welche diese Untersuchung erst ermöglichten.

## Literatur

- ARBEITSGRUPPE BODEN (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung*. 5. Aufl. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart: 437 S.
- ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2003): *Forstliche Standortaufnahme – Begriffe, Definitionen, Einteilung, Kennzeichnungen, Erläuterungen*. 6. Aufl. IHW-Verlag, Eiching bei München: 352 S.
- ARYA, L.M., PARIS, J.F. (1981): A Physicoempirical Model to Predict the Soil Moisture Characteristic from Particle-Size Distribution and Bulk Density Data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **45** (6): 1023-1030.

<http://soil.scijournals.org/cgi/content/abstract/soilsci:45/6/1023>

- BEKE, G.J., MACCORMICK, M.J. (1985): Predicting Volumetric Water Retentions for Subsoil Materials from Colchester County, Nova Scotia. *Can. J. Soil Sci.* **65** (1): 233-236.

- CORNELIS, W.M., RONSYN, J., VAN MEIRVENNE, M., HARTMANN, R. (2001): Evaluation of Pedotransfer Functions for Predicting the Soil Moisture Retention Curve. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **65** (3): 638-648.

<http://soil.scijournals.org/cgi/content/abstract/soilsci:65/3/638>

- DE VOS, B., VAN MEIRVENNE, M., QUATAERT, P., DECKERS, J., MUYS, B. (2005): Predictive Quality of Pedotransfer Functions for Estimating Bulk Density of Forest Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **69** (2): 500-510.

<http://soil.scijournals.org/cgi/content/abstract/soilsci:69/2/500>

- DIN4220 (2008): *Bodenkundliche Standortbeurteilung – Kennzeichnung, Klassifizierung und Ableitung von Bodenkennwerten*. Beuth, Berlin: 50 S.

- GERSTENGARBE, F.W., BADECK, F., HATTERMANN, F., KRYSANOVA, V., LAHMER, W., LASCH, P., STOCK, M., SUCKOW, F., WECHSUNG, F., WERNER, P.C. (2003): Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung: 79 S.

<http://www.pik-potsdam.de/research/publications/pikreports/files/pr83.pdf>

- GIVI, J., PRASHER, S., PATEL, R. (2004): Evaluation of pedotransfer functions in predicting the soil water contents at field capacity and wilting point. *Agric. Water Manage.* **70** (2): 83-96.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6T3X-4DB567X-3/2/ab9e3e848317eabc3485fb0b2dd2d0cb>

- HANGEN, E., SCHERZER, J. (2004): Ermittlung von Pedotransferfunktionen zur rechnerischen Ableitung von Kennwerten des Bodenwasserhaushalts (FK, PWP, nFK, kapillarer Aufstieg). UDATA Umweltschutz und Datenanalyse im Auftrag des Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL).

[http://bfh-web.fh-eberswalde.de/bze/upload/Pedotransfer\\_Physik\\_1/PTF-Studie.pdf](http://bfh-web.fh-eberswalde.de/bze/upload/Pedotransfer_Physik_1/PTF-Studie.pdf)

- HARTGE, K.H., HORN, R. (1992): *Die physikalische Untersuchung von Böden*. 3. Aufl. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart: 177 S.

- KOBAYASHI, K., SALAM, M.U. (2000): Comparing Simulated and Measured Values Using Mean Squared Deviation and its Components. *Agron. J.* **92** (2): 345-352.

<http://agron.scijournals.org/cgi/content/abstract/agrojn:92/2/345>

- NEMES, A., WÖSTEN, J.H.M., LILLY, A., VOSHAAR, J.H.O. (1999): Evaluation of different procedures to interpolate particle-size distributions to achieve compatibility within soil databases. *Geoderma* **90** (3-4): 187-202.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V67-3WVRF2R-D/2/dbe45a3fa387fcbac64c64974d1c264c>

- OSENSTETTER, S., FALK, W., DIETZ, E., KÖLLING, C., ZIMMERMANN, L. (2009): Einflüsse der Pedotransferfunktionen auf Ergebnisse bodenhydrologischer Modellierung an Waldstandorten. Jahrestagung der DBG.

[http://eprints.dbges.de/195/1/DBG-Tagung2009-Beitrag\\_SebastianOsenstetter.pdf](http://eprints.dbges.de/195/1/DBG-Tagung2009-Beitrag_SebastianOsenstetter.pdf)

- PETERS, A., DURNER, W. (2008): Simplified evaporation method for determining soil hydraulic properties. *J. Hydrol.* **356** (1-2): 147-162.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V6C-4SBHXBY-1/2/634bcc5abe518d441cee8c7c02d4b3ad>
- PUHLMANN, H., WILPERT, K., LUKES, M., DRÖGE, W. (2009): Multistep outflow experiments to derive a soil hydraulic database for forest soils. *Eur. J. Soil Sci.* **60** (5): 792-806.  
<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01169.x>
- RENGER, M., BOHNE, K., FACKLAM, M., HARRACH, T., RIEK, W., SCHÄFER, W., WESSOLEK, G., ZACHARIAS, S. (2009): Ergebnisse und Vorschläge der DBG-Arbeitsgruppe „Kennwerte des Bodengefüges“ zur Schätzung bodenphysikalischer Kennwerte. *Bodenökologie und Bodengenese* **40**: 5-51.
- RIEK, W., WESSOLEK, G., RENGER, M., FACKLAM, M. (1992): Ableitung bodenphysikalischer Kennwerte aus Basisdaten auf der Grundlage von bodenkundlichen Labordatenbanken. TU-Berlin im Auftrag der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Hannover: 51 S.
- RIEK, W., WESSOLEK, G., RENGER, M., VETTERLEIN, E. (1995): Luftkapazität, nutzbare Feldkapazität und Feldkapazität von Substrat-Horizontgruppen – eine statistische Auswertung von Labordatenbanken. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* **158** (5): 485-491.  
<http://dx.doi.org/10.1002/jpln.19951580512>
- RUBIO, C.M., LLORENS, P., GALLART, F. (2008): Uncertainty and efficiency of pedotransfer functions for estimating water retention characteristics of soils. *Eur. J. Soil Sci.* **59** (2): 339-347.  
<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.2007.01002.x>
- SCHAAP, M.G., LEIJ, F.J. (1998): Database related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions. *Soil Science* **163** (10): 765-779.
- SCHAAP, M.G., LEIJ, F.J., VAN GENUCHTEN, M.T. (2001): Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *J. Hydrol.* **251** (3-4): 163-176.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V6C-43RJY0T-4/2/4b836c035872975b62b2b871b57918f2>
- SCHNEIDT, 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.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V67-3T7JK5N-1/2/e0c0ff7f14d0cc92a82818837e09ccc21>
- SCHINDLER, U. (1980): Ein Schnellverfahren zur Messung der Wasserleitfähigkeit im teilgesättigten Boden an Stechzylinderproben. *Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenk.* **24**: 1-7.
- SCHRAMM, D., SCHULTZE, B., SCHERZER, J. (2006): Validierung von Pedotransferfunktionen zur Berechnung von bodenhydrologischen Parametern als Grundlage für die Ermittlung von Kennwerten des Wasserhaushaltes im Rahmen der BZE II. TU Bergakademie Freiberg und UDATA Umweltschutz und Datenanalyse im Auftrag des Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV): 151 S.  
[http://bfh-web.fh-eberswalde.de/bze/upload/Pedo\\_Physik\\_2/Abschlussbericht\\_PTFII.pdf](http://bfh-web.fh-eberswalde.de/bze/upload/Pedo_Physik_2/Abschlussbericht_PTFII.pdf)
- SCHREY, H.P. (2008): Die bodenartenspezifischen Kennwerte der KA5 - FAQ\_KA5 – die Liste der häufig gestellten Fragen zu den Kennwerten der KA5. Geologischer Dienst NRW: 63 S.  
[http://www.bgr.bund.de/nm\\_325378/DE/Themen/Boden/Zusammenarbeit/Adhocag/Downloads/KA5\\_bodenspezKennwerte\\_templateld=raw.property=publicationFile.pdf/KA5\\_bodenspezKennwerte.pdf](http://www.bgr.bund.de/nm_325378/DE/Themen/Boden/Zusammenarbeit/Adhocag/Downloads/KA5_bodenspezKennwerte_templateld=raw.property=publicationFile.pdf/KA5_bodenspezKennwerte.pdf)
- SCHULZ, R., ASCHE, N. (2008): Klima, Standort, Wald Regionales Wasserhaushaltsmodell auf Bundesebene übertragbar? *AFZ-Der Wald* (1): 20-24.
- STUMPP, C., ENGELHARDT, S., HOFMANN, M., HUWE, B. (2009): Evaluation of pedotransfer functions for estimating soil hydraulic properties of prevalent soils in a catchment of the Bavarian Alps. *Eur. J. Forest Res.* **128** (6): 609-620.  
<http://dx.doi.org/10.1007/s10342-008-0241-7>
- TÉEPE, R., DILLING, H., BEESE, F. (2003): Estimating water retention curves of forest soils from soil texture and bulk density. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **166** (1): 111-119.  
<http://dx.doi.org/10.1002/jpln.200390001>
- TJETJE, O., HENNINGS, V. (1993): Bewertung von Pedotransferfunktionen zur Schätzung der Wasserspannungskurve. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* **156** (5): 447-455.  
<http://dx.doi.org/10.1002/jpln.19931560512>
- 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.
- WÖSTEN, J.H.M., LILLY, A., NEMES, A., BAS, C.L. (1999): Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma* **90** (3-4): 169-185.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V67-3WWWRF2R-C/2/50af110f999083a308c55eedc997ed4c>
- 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. *J. Hydrol.* **251** (3-4): 123-150.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V6C-43RJY0T-2/2/a8317964724604f360e9d339606ae51b>
- ZACHARIAS, S., WESSOLEK, G. (2007): Excluding Organic Matter Content from Pedotransfer Predictors of Soil Water Retention. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **71** (1): 43-50.  
<http://soil.scijournals.org/cgi/content/abstract/soilsci:71/1/43>

submitted: 09.02.2010

reviewed: 17.06.2010

accepted: 07.07.2010

**Autorenanschriften:**

Alexander Russ  
 Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (FH)  
 Alfred-Möller-Str. 1  
 16225 Eberswalde  
 Email: [Alexander.Russ@hnee.de](mailto:Alexander.Russ@hnee.de)

Prof. Dr.-Ing. Winfried Riek  
 Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (FH)  
 und Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde  
 Alfred-Möller-Str. 1  
 16225 Eberswalde  
 Email: [Winfried.Riek@hnee.de](mailto:Winfried.Riek@hnee.de)