



Scopus Indexed Journal

## Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz – *Forest Ecology, Landscape Research and Nature Conservation*

[www.afsv.de/index.php/waldoekologie-landschaftsforschung-und-naturschutz](http://www.afsv.de/index.php/waldoekologie-landschaftsforschung-und-naturschutz)



### Aus Alt mach Neu – Altdaten der Standortkartierung für die räumlich differenzierte Ableitung der Bodenwasserspeicherung

#### *As good as new – Legacy soil data of forest site mapping for spatially explicit derivation of water storage properties*

Rainer Petzold, Johanna Danigel, Raphael Benning, Simon Mayer, Karl Burse, Friedrich Karas, Henning Andreae & Rainer Gemballa

#### Abstract

*From the early 1950s up to today forests in Eastern Germany have been mapped according to a uniform procedure. This approach combines the investigation of abiotic and biotic factors of a particular site. In connection to the procedure a considerable number of representative soil profiles (in the system of local soil forms) have been documented. Until recently, the descriptions of these soil profiles, which are partly supplemented by physical and chemical lab analyses, were only available in printed form. The digitization and knowledge-based harmonization of these legacy data allows the computerized processing and analysis of the soil information for current issues. By now, more than 2,600 Thuringian and Saxon soil profiles with laboratory-confirmed physical soil properties are georeferenced. In addition, about 1,000 Saxon soil profiles have already been completely harmonized. Since these soil profiles also show consistent physical soil properties, they are suitable for the calculation of pedotransfer functions. Due to the results it is possible to integrate spatially differentiated water storage properties of forest soils into silvicultural strategies.*

**Keywords:** *forest site mapping, legacy soil data, physical soil properties*

#### Zusammenfassung

Im Rahmen der Standortkartierung wurde in den ostdeutschen Bundesländern seit den 1950er Jahren über mehrere Jahrzehnte bis heute einheitlich nach einem einstufigen, kombinierten Verfahren kartiert. Dieser Ansatz umfasst die Erkundung von abiotischen und biotischen Standortfaktoren. Ein Teil der dokumentierten Ergebnisse, die detaillierten Profilbeschreibungen der Weiserprofile für Lokalbodenformen, welche häufig mit bodenphysikalischen und -chemischen Analysen hinterlegt sind, standen bisher nur analog zur Verfügung. Mit der Digitalisierung und expertenbasierten

Harmonisierung dieser Altdaten entstehen wertvolle Grundlagen für die rechnergestützte Verarbeitung und Auswertung für aktuelle Fragestellungen. In Thüringen und Sachsen wurden bisher über 2.600 Bodenprofile mit vorliegenden bodenphysikalischen Laboranalysen im Geografischen Informationssystem verortet. Rund 1.000 sächsische Profile wurden vollständig harmonisiert und enthalten horizontweise und lückenlos die bodenphysikalischen Eingangsgrößen für die Anwendung von Pedotransferfunktionen. Mit dieser Datenbasis wurde das Substratfeuchtekonzept angewendet und damit eine räumlich differenzierte Berücksichtigung der Wasserspeicherfähigkeit von Waldböden für waldbauliche Planungen möglich.

**Schlüsselwörter:** Standortkartierung, Altdaten, bodenphysikalische Eigenschaften

## 1 Einleitung

Ein Ziel der forstlichen Standortkartierung ist es, auf topischer Ebene aus einer Vielzahl von Punktinformationen flächige Einheiten mit gleicher ökologischer Wertigkeit abzuleiten. Das ostdeutsche Verfahren der Standortserkundung nach KOPP & SCHWANECKE (1994) erfasst in einem einstufigen Prozess relativ stabile Stammeigenschaften (z. B. Lokalbodenformen) und veränderliche Zustandseigenschaften (z. B. Humusformen) (AK STAO 2003). Auf dieser Befundebene werden Standorte mit gleichen bzw. sehr ähnlichen Eigenschaften zu Standortformen zusammengefasst. Erst danach werden im Rahmen der Bewertung die Standortformen zum Beispiel als waldbauliche Auswerteeinheit zu Standortformengruppen zusammengefasst. Die prinzipielle Einstufigkeit des Verfahrens erlaubt eine überregionale Vergleichbarkeit der Standortformen, insbesondere der auskartierten Lokalbodenformen. In allen ostdeutschen Bundesländern wurde bisher nahezu die gesamte Waldfläche nach diesem Verfahren kartiert. Die Kartiererergebnisse sind in Standortkarten, Legenden sowie umfangreichen Erläuterungsbänden festgehalten und finden in der waldbaulichen Planung, aber auch in der Einsatzplanung von Holzernetechnologien Anwendung.

In den letzten Jahren hat die Bedeutung von numerischen und quantitativen Daten bezüglich klimatischer, bodenphysikalischer und bodenchemischer Standortmerkmale gegenüber den teils aggregierten und oft eher qualitativen der traditionellen Standortkartierung stark zugenommen. Durch die technischen Entwicklungen in der Haltung (Datenbanken), Darstellung (Geografische Informationssysteme) und Interpretation von Standortdaten (Modellierung, Statistik) stehen heute vielfältige und flexible Werkzeuge zur Verfügung. Während Klimateigenschaften bereits räumlich und zeitlich sehr differenziert bereitgestellt werden (vgl. REKIS 2014), besteht noch ein großer Bedarf an möglichst detaillierten bodenphysikalischen Informationen in hoher räumlicher Auflösung (vgl. KOPP & JOCHHEIM 2002, ZIRLEWAGEN & WILPERT 2011, KÖNIG 2011, RUSS et al. 2013).

Im Rahmen der über Jahrzehnte durchgeführten Standortkartierung wurden zahlreiche Bodenprofile angelegt sowie weitgehend einheitlich feldbodenkundlich und laboranalytisch erfasst (vgl. PETZOLD et al. 2016). Bisher fehlte jedoch eine konsistente Zusammenführung der Lage- und Profildaten in einer Datenbank, aus der sich quantitative Bodeneigenschaften ableiten lassen. Dadurch fanden die Altdaten bisher selten Verwendung für die Lösung aktueller Fragestellungen (vgl. FIEDLER 2015).

Im ostdeutschen Erkundungsverfahren wurden die Wasserspeichereigenschaften des Substrates nicht explizit kartiert und fehlten damit als Bewertungsgrundlage für die Praxis. Deshalb wurde in Brandenburg (KONOPATZKY 2012) und auch in Sachsen (KÖNIG 2011) zur Darstellung der potenziellen Bodenwasserspeicherung das Substratfeuchtekonzept in die Standortinformationssysteme eingeführt. So werden in der aktuellen sächsischen Waldbauplanung für die Zuordnung von Zielzuständen der Waldentwicklung auf Basis von Leitwaldgesellschaften die Standortparameter dynamische Klimastufe, Höhenstufe, Bodenfeuchtestufe, Trophie und ein Expositionsindex auf Grundlage der modellierten direkten Sonneneinstrahlung in der Vegetationszeit sowie die Substratfeuchtestufe verwendet (vgl. EISENHÄUER & SONNEMANN 2009, GEMBALLA & SCHLUTOW 2007). Für die flächendeckend unverzerrte und objektive Ableitung der Substratfeuchtestufe standen bisher jedoch keine entsprechenden Daten zur Verfügung.

Im vorliegenden Beitrag berichten wir I.) über die Aufbereitung von bodenphysikalischen Altdaten der Standortkartierung in Sachsen und Thüringen und stellen II.) die Anwendung der sächsischen Daten für die Überarbeitung des Substratfeuchtekonzepts (KONOPATZKY 2012, KÖNIG 2011) als eine zusätzliche Standortinformation für die waldbauliche Planung dar.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Herkunft und Georeferenzierung von Altdaten der Standortserkundung

Die umfangreichen Altdaten der Standortkartierung reichen in Sachsen und Thüringen bis in die 1950er Jahre zurück. Sie umfassen neben den originalen Arbeitskarten auch Profil- und Vegetationsaufnahmen der Geländebegehungen, Laboranalyseformulare von repräsentativen (Weiser-) Profilen aus den Standortsregionen Mittelgebirge, Hügel- und Tiefland sowie Bohrpunktformulare der Raster-Erhebungen im Tiefland. Die Kartiererergebnisse sind in Standortskarten

mit den zugehörigen Erläuterungsbänden und Legenden dokumentiert (vgl. Tab. 1). Dabei wurden die zentralen bodenkundlichen Informationen im Mittelgebirge und Hügelland in Lokalbodenformen (im Tiefland syn. Feinbodenformen) zusammengefasst. Die Charakterisierung und Gruppierung der Lokalbodenformen erfolgte vorrangig nach leicht erfassbaren objektiven, mineralischen und ökologischen Merkmalen (SCHWANECKE 1994). Schwanecke, der über Jahrzehnte wissenschaftlicher Leiter der Standortkartierung im Mittelgebirge und Hügelland war, erarbeitete zudem Merkmalstabellen für die Haupt- und Lokalbodenformen der forstlichen Standortserkundung. Die bodenphysikalischen Merkmale wurden in dieser Zusammenstellung jedoch stark aggregiert und entsprechen nicht den heutigen Anforderungen für die Anwendung von Pedotransferfunktionen oder gar numerischen Simulationsmodellen. Weiterführende Erläuterungen zum Aufnahmeverfahren nach der Standortserkundungsanleitung im Mittelgebirge/Hügelland und der Erfassung insbesondere von bodenphysikalischen Informationen von Lokalbodenformen sind in der Zusammenstellung von PETZOLD et al. 2016 in diesem Heft zu finden.

Die Arbeitskarten im Maßstab von 1:5.000 bis 1:10.000 enthalten die Autoreninformationen zur flächigen Abgrenzung der Standortformen. In den Karten ist auch die Lage von Punktinformationen (z. B. von Profilen oder Schürfgruben) mit Feldansprache der Lokalbodenform dokumentiert. Nahezu alle Profile konnten somit anhand der Lageskizzen und Forstadressen auf den Feldformularen sowie den analogen Arbeitskarten im GIS verortet werden. Dabei sind die Arbeitskarten die Grundlage mit der höchsten Lagegenauigkeit. Je nach Informationsbasis konnte die Genauigkeit der Verortung mit 25 m bis 2.500 m angegeben werden. Eine Digitalisierung und Georeferenzierung der Arbeitskarten ist bisher noch nicht erfolgt.

Bis 2007 wurden für Sachsen die bis dahin nur analog vorliegenden Standortskarten für die Darstellung im GIS mit den zugehörigen Attributen bis auf die Kartiereinheit der Lokalbodenformen aufbereitet. Ebenso wurden alle vorliegenden Formulare mit den Profilbeschreibungen der Feldaufnahmen, Bohrpunktformulare und Analyseformulare gescannt und archiviert. In Thüringen erfolgte die Überführung der analogen Standortskarte in das GIS von 1995 bis 1998. Eine digitale Archivierung der Arbeitskarten, Profilbeschreibungen und Laboranalyseformulare steht jedoch noch aus.

**Tab. 1:** Übersicht der analogen Altdatenbestände in Sachsen und Thüringen (ab 1950).

**Tab. 1:** Summary of legacy data in Saxony and Thuringia (since 1950).

Altdaten	Sachsen [Stk.]	Thüringen [Stk.]
Arbeitskarten, Bohrpunktkarten	ca. 2.500	keine Angabe
Profilbeschreibungen & Vegetationsaufnahmen	ca. 10.000	ca. 7.000
Profile mit Laboranalysen	ca. 1.000	ca. 1800
davon ökologische Waldzustandskontrolle (ÖWK)	96	145
Erläuterungsbände	über 38	über 27

Die Profilbeschreibungen, Vegetationsaufnahmen und Laboranalyseformulare bilden damit die Hauptquelle der Sachinformation. Zu Beginn der 1950er Jahre sind die Profilbeschreibungen noch wenig formalisiert. Jedoch bald, insbesondere mit der Vereinheitlichung und Überarbeitung des Kartierverfahrens ab 1962, sind nachvollziehbare Bezeichnungen und Klassenschlüssel Standard (FIEDLER 1989). Die Vermerke der Feldkartierer auf den Feld- und Laborformularen zeugen von der semiempirischen Klassifizierungsarbeit bei der Einstufung der Befunde in das System der Lokalbodenformen. Nachträgliche Notizen dokumentieren zusammen mit den Informationen in den Erläuterungsbänden die Kartierregeln und mit wachsendem Wissenstand auch vorgenommene Umstufungen oder Zusammenfassung von Kartiereinheiten bei Nachkartierungen und Überarbeitungen. Die Dokumentation der Standortkartierung ist damit sowohl aus standortkundlicher als auch aus forstgeschichtlicher Sicht ein einmaliges Zeugnis.

Voraussetzung für die weitere Verarbeitung von Altdaten ist jedoch die digitale Aufbereitung und Harmonisierung der Profilbeschreibungen und der zugehörigen Laboranalysen. Insbesondere bodenphysikalische Eingangsgrößen für die Anwendung von Pedotransferfunktionen zur Schätzung von Kenngrößen des Bodenwasser- und Lufthaushalts, wie z. B. die Horizontbezeichnung, die Bodenart, die Trockenrohdichte

(TRD) und der Skelettgehalt, mussten konsistent aufbereitet werden (vgl. Abb. 1). Im Tiefenverlauf fehlende Informationen wurden experten-basiert aus den Profilaufnahmen und Lokalbodenformenbeschreibungen, aus Erläuterungsbänden sowie Merkmalstabellen ergänzt. Weiterführende methodische Erläuterungen zu Lokalbodenformen und deren bodenphysikalischen Informationsgehalt sind in PETZOLD et al. (2016) verfügbar. Folgende Informationen und Hilfsgrößen wurden herangezogen und auch untereinander für bodenkundlich (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN 2005) und ökologisch konsistente Ableitungen verwendet:

- Vorhandensein von Messwerten aus darüber oder darunter liegenden Horizonten sowie ähnlich aufgebauten Profilen/Horizonten (vgl. auch SEQUEIRA et al. 2014)
- Horizontbezeichnungen (AD HOC AG BODEN 2005, KUNTZE et al. 1969, LIEBEROTH et al. 1991, SCHWANECKE 1966)
- Festigkeitsklassen
- Textur- und Substratklassen
- periglaziäre Umlagerungszonen (ALTERMANN et al. 2008, KOPP 1970, LORZ et al. 2013, SCHWANECKE 1970, 1994)

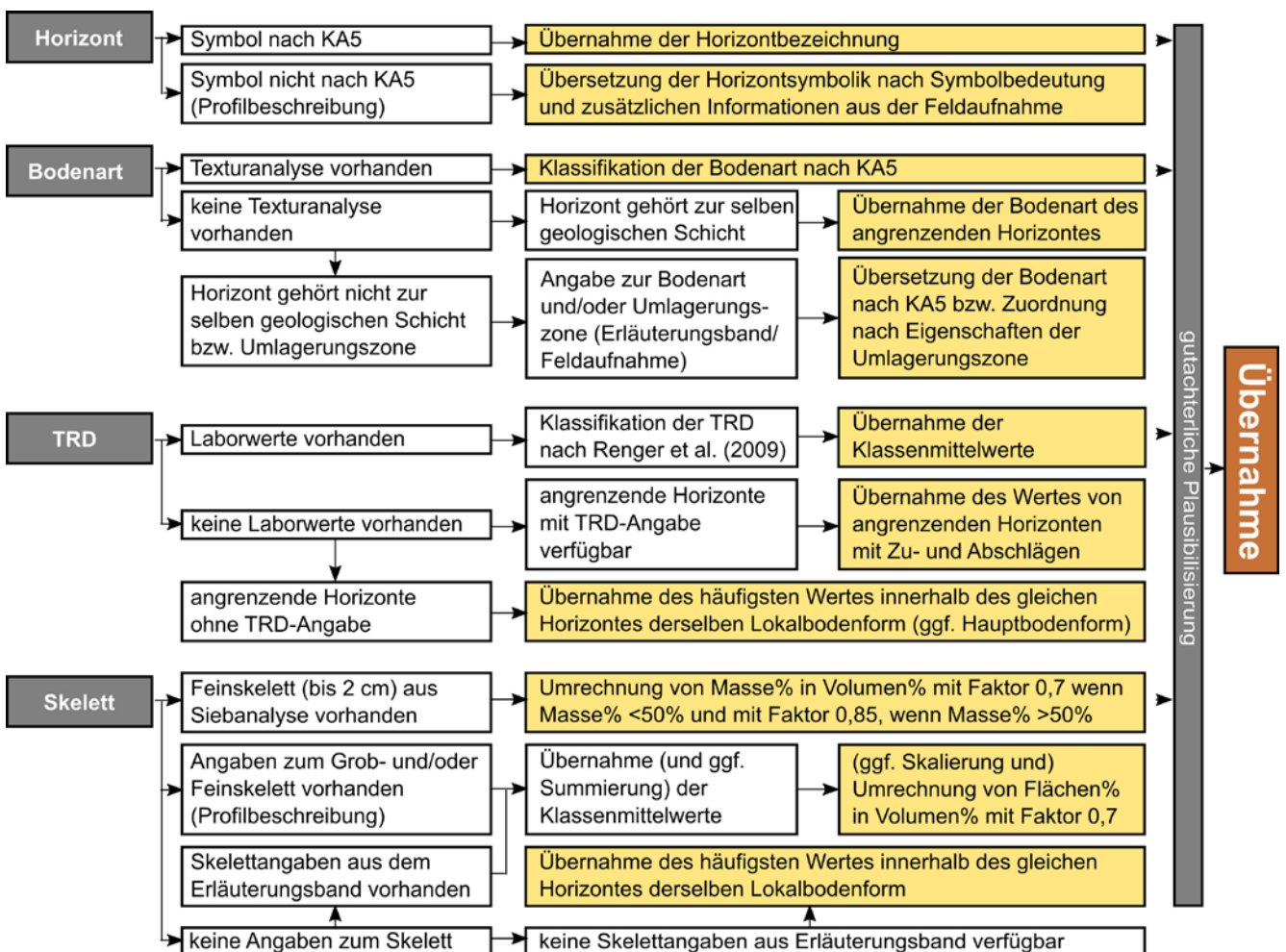


Abb. 1: Aufbereitungsschema der Altdaten.

Fig. 1: Work flow for harmonization of legacy soil data.

- Durchwurzelung (HILDEBRANDT 1983)
- verbale Beschreibungen.

## 2.2 Quantifizierung der Substratfeuchte terrestrischer Bodenformen unter Verwendung von Pedotransferfunktionen

Das Substratfeuchtekonzept wurde in Brandenburg von KONOPATZKY (2012) als zusätzliche Auswerteeinheit der Standortkartierung für terrestrische Bodenformen eingeführt und mittlerweile auch in Mecklenburg-Vorpommern und Sachsen (KÖNIG 2011) übernommen. Im Wesentlichen wird dabei mittels Pedotransferfunktion der pflanzenverfügbare Bodenwasserspeicher geschätzt und klassifiziert. KONOPATZKY (2012) berücksichtigt zudem das Entwässerungsverhalten von Substraten. In Sachsen wurden alle aus bodenphysikalischen Altdaten eindeutig und lückenlos rekonstruierbaren sowie nach Lokalbodenformen klassifizierten Profile für die Anwendung des Substratfeuchtekonzeptes verwendet. Zunächst wurde dazu mit Hilfe des Pedotransferansatzes nach RENGIER et al. (2009) die nutzbare Feldkapazität (nFK zwischen pF 1,8 und 4,2) je Horizont in Abhängigkeit von Bodenart und TRD ermittelt. Für Bodenhorizonte mit einer TRD unter 1,1 g/cm<sup>3</sup> wurde die nFK durch lineare Extrapolation geschätzt. Auf die Vergabe von Humuszuschlägen wurde verzichtet. Indirekt wurde der Humuseinfluss jedoch berücksichtigt, da die TRD von Mineralbodenhorizonten, insbesondere in den niedrigen Bereichen, stark mit dem Humusgehalt (ADAMS 1970) korreliert. Die ermittelten nFK-Werte [Vol.%] wurden horizontweise unter Abzug des Grobbodenanteils in mm bzw. l/m<sup>2</sup> umgerechnet und für einen definierten Wurzelraum aufaddiert. Generell wurden Sd- und Gr-Horizonte sowie C-Horizonte mit einem Skelettgehalt über 75 % als nicht durchwurzelbar aufgefasst. Diese wurden nicht mehr in die Berechnung der nFK [mm] einbezogen. Über den Median aus der Verteilung der berechneten Werte für eine Lokalbodenform erfolgte in einem ersten Schritt die Einstufung nach Tabelle 2. Die unterschiedlichen angenommenen Durchwurzelungstiefen berücksichtigen zunächst den Informationsbedarf für forstpraktische Erwägungen bei der Standortsdifferenzierung;

bis 40 cm z.B. für Risikobewertung von Pflanzungen, bis 80 cm für allgemeine waldbauliche Planungen, bis 160 cm insbesondere für die Beurteilung von Altbeständen auf tiefgründigen Tieflandstandorten.

Das statische Speicherkonzept der nFK in Tabelle 2 insgesamt ist in seiner Aussagekraft eingeschränkt. Die real stattfindende permanente Wasserbewegung und damit die tatsächliche Füllung und Entwässerung des Bodenwasserspeichers bleiben unberücksichtigt. Wenn bestimmte forstökologisch relevante Bodenbedingungen auftreten, kann es deshalb selbst bei Berücksichtigung zusätzlicher dynamischer Klimakennwerte (dynamische Klimastufe) zu deutlichen Fehleinschätzungen bei der Wasserverfügbarkeit kommen. Solche Bodenbedingungen sind beispielsweise schmale Lehmänder, die sich als Speicherschicht wenig auf die aufsummierte nFK, jedoch deutlich verzögernd auf die Entwässerung auswirken. Ebenso sind Lehmänder und Lehmunterlagerungen unter der eigentlichen Bewertungstiefe, jedoch im Einflussbereich des Wurzelsaums, günstig zu beurteilen. Um diese, über die nFK-Einstufung hinausgehenden Eigenschaften zu berücksichtigen, erfolgte in einem zweiten Schritt für die Bewertungstiefe 80 cm die Aufwertung der Substratfeuchtestufe um eine Stufe bei Auftreten von folgenden in Sachsen vorkommenden Merkmalen:

- Auftreten von Tieflehm oder Lehmunterlagerungen (analog Tone, Schluffe und Letten)
- Vorkommen von Lehmändern (Bänderformen)
- semiterrestrische Formen mit hydromorphen Merkmalen in 30 bis 60 cm Bodentiefe, z.B. Braunstaugleye (Pseudogley-Braunerden, ferner Gley-Braunerden, Gley-Podsole).

Bei Auftreten von mehreren Merkmalen wurde nur ein Zuschlag vergeben.

Die so ermittelten Substratfeuchtestufen der (semi-)terrestrischen Lokalbodenformen wurden anschließend direkt über die digitale Standortskarte in das GIS übernommen.

**Tab. 2:** Erster Schritt zur Klasseneinteilung der Substratfeuchte von terrestrischen Bodenformen auf Grundlage der nutzbaren Feldkapazität (nach KÖNIG 2011).

**Tab. 2:** Classification of substrate moisture for terrestrial soil forms according plant available water (KÖNIG 2011).

Substratfeuchtestufe	Symbol	Aufsummierte nFK in mm bis zu einer Profiltiefe von		
		40 cm	80 cm	160 cm
speicherdürr	x	< 25	< 50	< 100
sehr speichertrocken	a	25 bis < 40	50 bis < 80	100 bis < 160
speichertrocken	b	40 bis 45	80 bis 90	160 bis 180
mäßig speichertrocken	c	> 45 bis < 55	> 90 bis < 110	> 180 bis < 220
mäßig speicherfrisch	d	55 bis < 65	110 bis < 130	220 bis < 260
speicherfrisch	e	65 bis < 75	130 bis < 150	260 bis < 300
mäßig haftfrisch	g	75 bis < 85	150 bis < 170	300 bis < 340
haftfrisch	h	85 bis < 95	170 bis < 190	340 bis < 380
haftfeucht	j	> 95	> 190	> 380

### 3 Ergebnisse

Die Laboranalysen der bodenphysikalischen Altdaten liegen mittlerweile fast vollständig digitalisiert vor. Die zugehörigen Profile wurden im GIS verortet (Abb. 2).

In Abbildung 3 sind alle aus Weiserprofilen vorliegenden horizontweisen Korngrößenzusammensetzungen über den Texturklassen der AG Boden 2005 aufgetragen. Es wird ersichtlich, dass in Sachsen kaum Böden mit Tongehalten über 30 % vorkommen. Dagegen wird an den Thüringer Daten das Vorkommen von tonig verwitternden Ausgangsgesteinen deutlich. In Sachsen liegen für 2.070 von insgesamt

5.500 ausgewerteten Horizonten Messwerte zur Trockenroh-dichte vor, in Thüringen bisher über 1.800.

In Sachsen wurden bisher rund 1.000 Altdaten-Profile harmonisiert und im Tiefenverlauf lückenlos mit bodenphysikalischen Eigenschaften aufbereitet. Diese Daten stellen die Grundlage für die Herleitung der Substratfeuchtestufen dar. In Abbildung 4 sind berechnete nFK-Werte für Lokalbodenformen aus sandigen Substraten des Tieflandes dargestellt. Die Verteilungen der nFK-Werte der Lokalbodenformen unterscheiden sich signifikant (Kruskal-Wallis-Test). Damit ist eine Reihung und Klassifikation des Medians entsprechend Tabelle 1 möglich. Erwartungsgemäß zeichnen sich

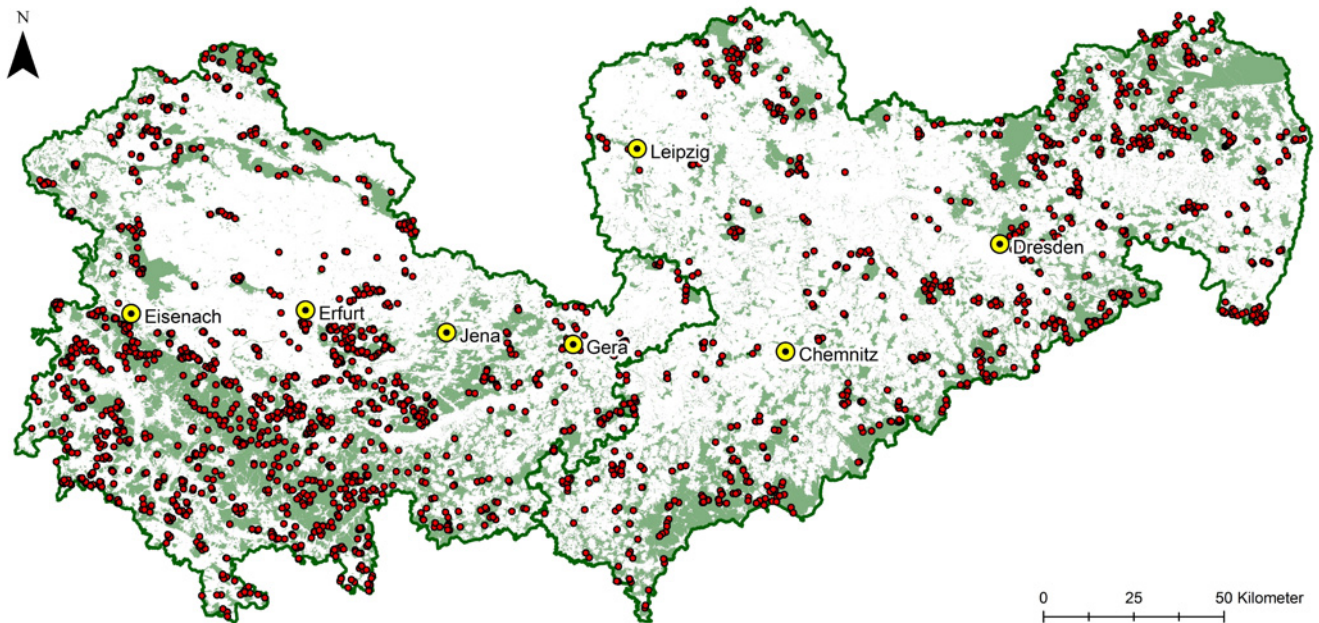


Abb. 2: Lage von Bodenprofilen der Standortserkundung mit Körnungsanalysen in Thüringen (n = 1.656) und Sachsen (n = 964).

Fig. 2: Location of soil profiles of forest site mapping with texture analysis in Thuringia (n = 1.656) and Saxony (n = 964).

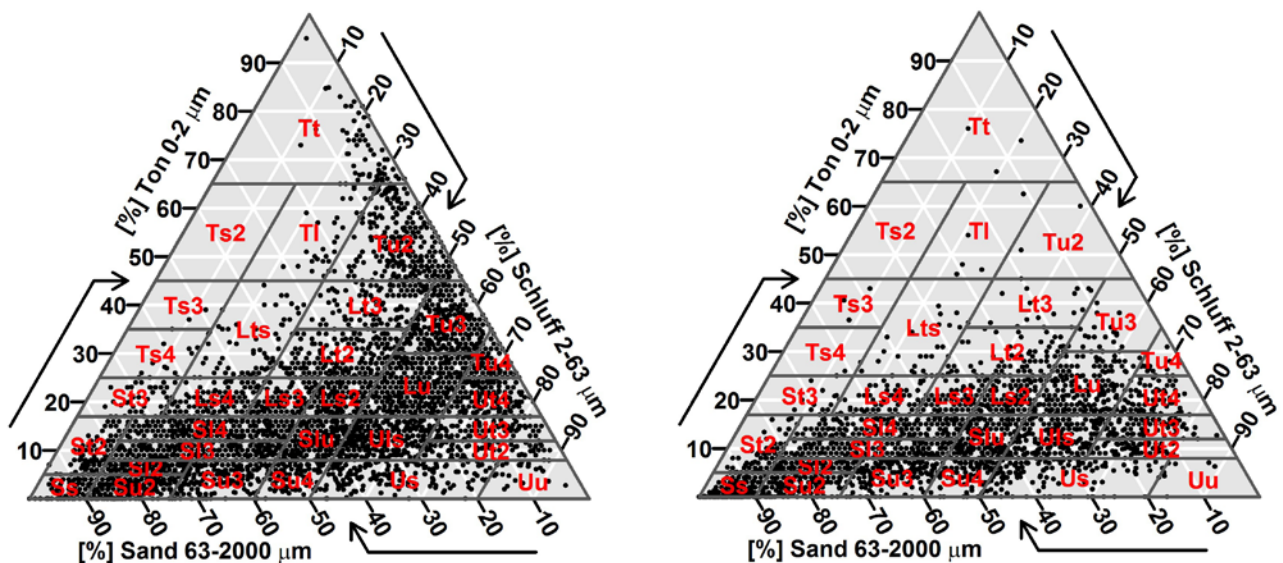


Abb. 3: Bodenartendreiecke mit Daten aus Thüringen (links, n = 5.420) und Sachsen (rechts, n = 3.383).

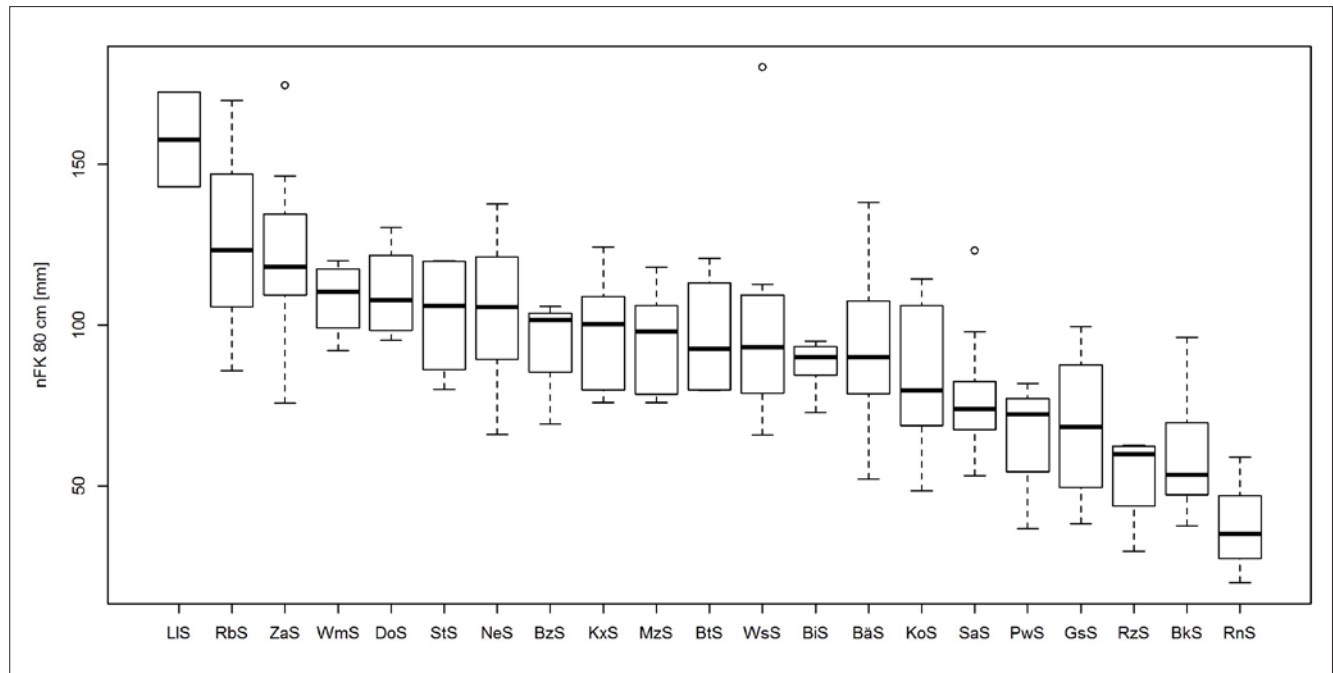
Fig. 3: Texture triangles with data from Thuringia (left, n = 5.420) and Saxony (right, n = 3.383).

schluffreiche Feinsand-Substrate, z. B. in der Lokalbodenform Lindthaler Staubsand-Braunerde (LIS), durch signifikant höhere nFK-Werte als schwach lehmige Mittelsand-Substrate, z. B. in der Bärenthorener Sand-Braunerde (BäS), aus. Die schlechtesten Speichereigenschaften weisen kiesreiche Grobsand-Bodenformen wie der Reudnitzer Grand-Sand-Rostpodsol (RnS) auf. Die Interquartilsabstände spiegeln die Variabilität der bodenphysikalischen Eigenschaften innerhalb der auskartierten Lokalbodenformen wider.

Auch die Festgesteins-Verwitterungsböden der sächsischen Mittelgebirge (ohne Abbildung) weisen teils sehr variable

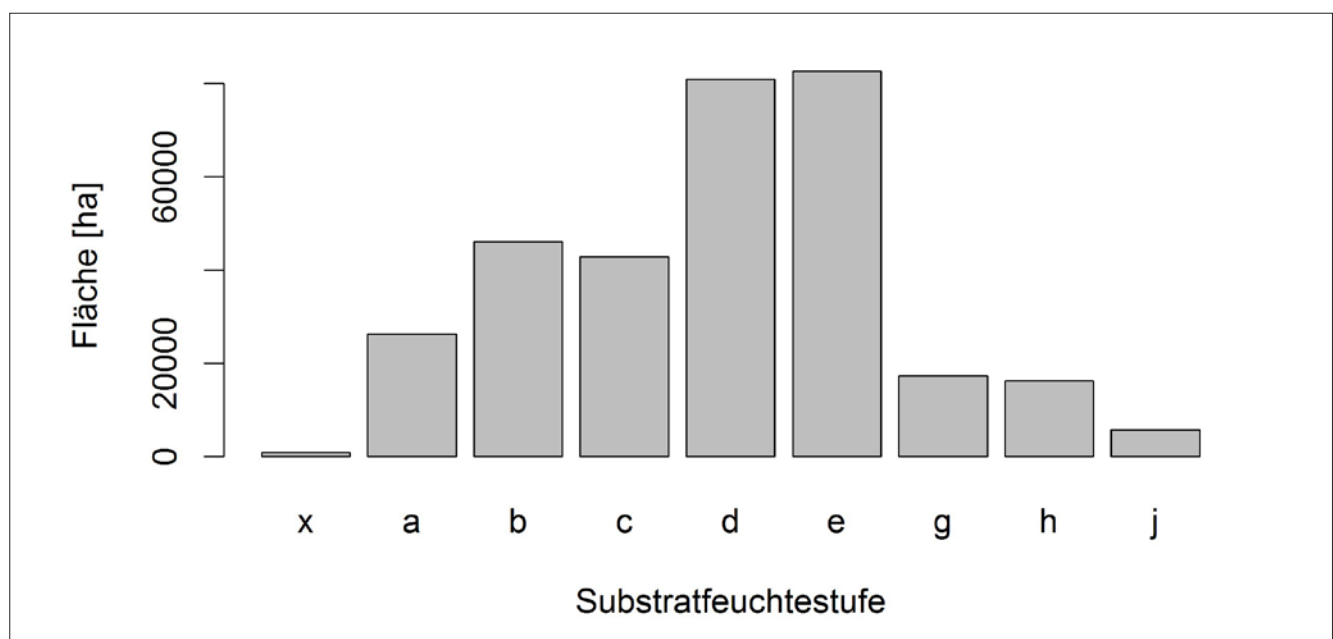
nFK-Werte innerhalb einer Lokalbodenform auf. Hier ist vor allem die Variabilität der Skelettgehalte und Entwicklungstiefen (Grabbarkeit) wirksam, die in den periglazial überprägten Schuttdecken sehr kleinräumig ausgeprägt sein kann. Trotzdem spiegeln auch hier Median und Spannweite ein hinreichend genaues und deutliches Klassifizierungsmerkmal für die nFK und die Zuordnung von Substratfeuchtestufen wider.

In der sächsischen Standortskarte kommen rund 1.000 (Thüringen 1.200) unterschiedliche Lokalbodenformen einschließlich Sonderstandorte vor. Dabei ist das flächenmäßige



**Abb. 4:** Boxplots der berechneten nutzbaren Feldkapazität (bis 80 cm) für häufige Lokalbodenformen aus sandigem Substrat.

**Fig. 4:** Boxplots of the calculated plant available water (up to 80 cm) of frequent local soil forms consisting of sandy substrate.



**Abb. 5:** Flächenanteile der Substratfeuchtestufen auf den sicherwassergeprägten Standorten in Sachsen.

**Fig. 5:** Relation between the forest area and substrate moisture classes at Saxon sites characterized by percolating water.

Auftreten von Lokalbodenformen sehr unterschiedlich. Die Oelsengrunder Gneisbraunerde (OgGn) tritt in Sachsen mit rund 30.000 ha am häufigsten auf. Am geringsten vertreten ist mit 0,16 ha der Blankensteiner Schiefer-Humusstaugley. Mit 36 Lokalbodenformen können bereits 50 %, mit 108 rund 75 % der kartierten Waldfläche in Sachsen beschrieben werden. Die Größenverhältnisse der Abdeckung sind in Thüringen ähnlich. Mit der Überführung der abgeleiteten Substratfeuchtestufen für terrestrische und semiterrestrische Lokalbodenformen ins GIS steht für rund 320.000 ha der sächsischen Waldfläche (ca. 70 % der Holzbodenfläche) ein zusätzliches Standortmerkmal für waldbauliche Entscheidungen zur Verfügung (Abb. 5).

Haftfrische und haftfeuchte Standorte (g, h) kommen fast nur in den Altauen-Standorten bei Leipzig sowie im sächsischen Lössgürtel vor. Speicherdürre und sehr speichertrockene Standorte (x, a) sind einerseits auf den kiesreichen und grobsandigen pleistozänen Ablagerungen des Tieflandes zu finden. Andererseits sind auch viele flachgründige und skelettreiche Festgesteinsböden auf Gneis und Quarzporphyr in den oberen Lagen des Erzgebirges sowie auf Granit im Raum Eibenstock durch schlechte Speichereigenschaften geprägt.

## 4 Diskussion

### 4.1 Datengrundlagen und -harmonisierung

Für die Harmonisierung und lückenlose Belegung mit Bodeneigenschaften pro Bodenhorizont wurde ein stark expertenbasiertes Vorgehen gewählt. Die Voraussetzungen dafür waren neben der intensiven Begutachtung der vorliegenden Profildaten eigene feldbodenkundliche Kenntnisse in den Kartierregionen, aber auch die Berücksichtigung der umfangreichen Dokumentationen zu den Kartierobjekten, bis hin zur Konsultation von Standortserkundern mit dem Erfahrungsschatz eines Berufslebens. Dieses Vorgehen ist nicht frei von Fehlinterpretationen, nutzt aber vorhandene Daten und Erfahrungswissen im größtmöglichen Umfang. Statistische Modelle zur Vorhersage von fehlenden Bodeneigenschaften in Datenbanken stellen dagegen Mindestanforderungen an die Daten. Das sei am Beispiel der Herleitung von TRD-Werten erläutert: Die von STEINICKE et al. (2016) anhand von Daten der Bodenzustandserhebung getesteten Pedotransferfunktionen zur Schätzung der TRD erfordern beispielsweise lückenlose Texturangaben (Sand, Schluff, Ton) und den Humusgehalt. Diese Voraussetzung ist bei Altdaten häufig nicht gegeben und führt zur Aussonderung der Profile. SEQUEIRA et al. (2014) schätzten fehlende TRD auf der Basis von gemessenen TRD in spezifischen Horizonten (über oder unter sowie benachbart oder nicht benachbart zum gesuchten Horizont), ferner Texturklassen und grundlegende Profilm Merkmale (Horizontbezeichnung, obere/untere Horizonttiefe). Diese Herleitung von SEQUEIRA et al. (2014) mit Hilfe des Random-Forest-Algorithmus (RF) ähnelt den gutachterlichen Ableitungen (vgl. Abb. 1) der vorliegenden Arbeit. Jedoch erfordert auch die Anwendung von RF eine gutachterliche Zusammenfassung von Horizontbezeichnungen zu Klassen.

Das expertenbasierte Vorgehen der Datenharmonisierung führt zu hochwertigen Datensätzen für objektive und robuste Bewertungsroutinen. Darüber hinaus gewährleistet dieser Ansatz gegenüber modellgestützten Verfahren die Übernahme einer größeren Anzahl von Profilen.

### 4.2 Substratfeuchtekonzept

Die Substratfeuchtestufe ist direkt an die genannten substratspezifischen Eigenschaften der Lokalbodenform gebunden. Diese sind grundsätzlich relativ schwer beeinflussbar und die Substratfeuchtestufe somit als Stammeigenschaft anzusehen.

Die Ableitung der nFK erfolgte mithilfe von Pedotransferfunktionen direkt über die bodenkundlichen Informationen auskartierter Bodenformen. OVERBECK et al. (2011) schätzten die nFK mit einem stochastischen Verfahren über die Frischestufen und die Substratgruppen des niedersächsischen Standortserkundungsverfahrens sowie einen räumlichen Trend. Und auch SCHMIDT et al. (2015) verwenden in ihrer Synopse für die Klassifikation des Geländewasserhaushalts von terrestrischen Standorten in Niedersachsen (Bergland), Hessen und Sachsen-Anhalt (Berg- und Hügelland) Frischestufen und zugeordnete nFK-Schätzwerte bis 1 m Bodentiefe. Die Frischestufen bzw. reliefbedingten Wasserhaushaltsstufen nach der Standortserkundungsanweisung (SEA, VEB FORSTPROJEKTIERUNG POTSDAM 1974) werden für terrestrische Standorte im Mittelgebirge und Hügelland (Sachsen-Anhalt, Thüringen, Sachsen) jedoch auf Grundlage der Reliefeigenschaften angesprochen und spiegeln somit primär die Mesoklimaeigenschaften wider. Für Kartiereinheiten der SEA bildet das hier vorgestellte Vorgehen die bodenkundlichen Bedingungen im Vergleich zu den Ansätzen von OVERBECK et al. (2011) oder SCHMIDT et al. (2015) somit deutlich besser ab. Im Vergleich zu KONOPATZKY (2012) verzichteten wir bei der Herleitung der Substratfeuchtestufe auf eine getrennte Bewertung des Entwässerungsverhaltens, welches KONOPATZKY (2012) aus den substratspezifischen Saugspannungs-Wassergehaltskurven gutachterlich abschätzte. Nach unserer Auffassung wird das Entwässerungsverhalten im Verlaufe von Trockenperioden jedoch durch die Funktion der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Saugspannung beschrieben (z. B. Modell von VAN GENUCHTEN 1980) und ist grundsätzlich z. B. über die Pedotransferfunktion in RENGER et al. (2009) quantifizierbar. Das Entwässerungsverhalten ist ein komplexer Prozess und neben den Substrateigenschaften auch von der Witterung und baumartenspezifischen Einflüssen abhängig. Das widerspricht allerdings dem von uns eingangs angestrebten Ziel, mit der Substratfeuchte eine robuste Bewertungsgröße im standortkundlichen Informationssystem zu etablieren, die landesweit vergleichbar sowie unabhängig vom Klima und baumartenspezifischen Einflüssen ist. Aus diesem Grund verzichteten wir für die Berechnung der nFK auch auf die Anwendung von Frühjahrsfeuchteäquivalenten (vgl. RENGER et al. 2009) für die Definition der Feldwassergehalte im Frühjahr. Im Unterschied zu einer reinen nFK-Klassifikation verwendeten wir zusätzlich jedoch pauschale Zuschläge bei der Substratfeuchtestufe, um die verbesserte Wasserspeicherung von Böden mit Lehmunterlagerungen, Lehmstäben oder auf semiterrestrischen Standorten in unserer Bewertung zu berücksichtigen.

Im Ergebnis kamen wir trotz unterschiedlicher Ableitung der Substratfeuchte im Vergleich zu KONOPATZKY (2012) bei Tieflandsbodenformen zu sehr ähnlichen Bewertungen. Beispielsweise wurde die Bärenthorener Sandbraunerde Bäs (vgl. Abb. 4) in die Stufe b (c bei Vorkommen von Tieflehm oder Lehmunterlagerung) eingestuft. Die Spanne zwischen den Quartilen der nFK bis 80 cm umfasste die Stufen a bis c (d). In Brandenburg wurde die Bäs zwischen a bis d (e) eingestuft (KONOPATZKY 2012).

Die nFK ist zunächst im Vergleich zu den vielfältigen ableitbaren Kennwerten aus den Ergebnissen von Wasserhaushaltssimulationen (vgl. SCHWÄRZEL et al. 2011) eine relativ einfach zu ermittelnde und vergleichsweise robuste Kenngröße für den Bodenwasserhaushalt. Durch die lückenlos aufbereiteten Profildaten können bei Vorliegen neuer Erkenntnisse auch problemlos andere Pedotransferfunktionen (z.B. DEHNER et al. 2015) in das Bewertungssystem integriert werden. Der Nachteil des Substratfeuchtekonzeptes ist jedoch, dass eine ökologische Bewertung zur tatsächlichen Wasserverfügbarkeit von Standorten nur indirekt durch die gleichzeitige Interpretation der Niederschläge bzw. der klimatischen Wasserbilanz möglich wird. Die aufbereiteten Profildaten könnten künftig jedoch auch für die Parametrisierung von Simulationsmodellen und damit für die räumlich und zeitlich differenzierte Darstellung und Bewertung des Standortwasserhaushaltes von Wäldern genutzt werden (vgl. SCHWÄRZEL et al. 2011).

## 5 Schlussfolgerungen

Wir sind überzeugt, dass das expertenbasierte Vorgehen der Datenharmonisierung zu hochwertigen Datensätzen für objektive und robuste Bewertungsroutinen führt. Unabhängig von den Unsicherheiten, die angesichts des Klima- und Standortwandels bei der Interpretation von Standortinformationen für die Baumarteneignung bestehen, ist eine weitere Qualitätsverbesserung von Bodeninformationen notwendig. Insbesondere für die Umsetzung von Investitionen in den Waldbau, beispielsweise die flächenkonkrete Planung und erfolgreiche Umsetzung von oft kleinflächigen Verjüngungseinheiten mit Baumartenwechsel (ab 0,2 ha), ist die weitere Disaggregation und Aktualisierung von Standortinformationen sehr hilfreich. In diesem Sinne könnte die Substratfeuchte nach KONOPATZKY (2012) künftig arealweise auf der Basis direkt zugeordneter Geländebefunde bzw. Bohrpunktraster abgeleitet werden. Dafür wäre allerdings zunächst die weitere digitale Aufarbeitung dieses Teils der Altdaten notwendig, um eine entsprechend hohe Punktdichte zu erzielen. Mithilfe von digitalisierten und im GIS georeferenzierten Arbeits- und Bohrpunktkarten können Leitprofilen deutlich besser verortete Referenzdaten zugewiesen werden. Mit dieser Datenbasis könnten in Verbindung mit Reliefanalysen aus hochauflösenden Geländemodellen (Rasterweite 10 x 10 m, besser 5 x 5 m) datengetriebene Modellierungsansätze aus der digitalen Bodenkartierung (MINASNY & BRATNEY 2015) zur Anwendung kommen. Dies würde zu genaueren und mit geringeren Unsicherheiten behafteten Prognosen bodenphysikalischer Eigenschaften auf Standortformenebene, das heißt mindestens der Maßstabsebene 1 : 10.000 führen.

In Zukunft sollen weitere Altdaten aus der Standortserkundung aufbereitet und die Qualität der Georeferenzierung verbessert werden. Die entstehende Datenbasis stellt damit eine wertvolle Grundlage für die Anwendung objektiver Bewertungsroutinen, z.B. Pedotransferfunktionen oder numerischen Simulationsmodellen für den Wasserhaushalt dar. Die Daten liefern auch wesentliche Eingangsparameter für die räumlich explizite Darstellung bodenphysikalischer Eigenschaften mithilfe von innovativen Regionalisierungstechniken.

## 6 Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft sowie dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit für die Förderung des Projektes „WP-KS-KW“ aus dem Waldklimafonds (FKZ 28WC400307, FKZ 28WC400304), in dessen Rahmen ein Teil der hier vorgestellten Arbeiten durchgeführt wurden. Außerdem danken wir den beiden anonymen Gutachtern für die wertvollen Hinweise zur Verbesserung des Manuskriptes.

## Literatur

- ADAMS, W. (1970): The effect of organic matter on the bulk and true densities of some uncultivated podzolic soils. *Journal of Soil Science* **24**: 10-17.
- AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung* 5. Auflage (KA5). Schweitzerbart'sche Verlagsbuchhandlung Stuttgart: 438 S.
- AK STAO – Arbeitskreis Standortkartierung/Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung (2003): *Forstliche Standortaufnahme – Begriffe, Definitionen, Kennzeichnungen, Erläuterungen*. 6. Auflage. IHW-Verlag Eching bei München: 352 S.
- ALTERMANN, M., JÄGER, K.D., KOPP, D., KOWALKOWSKI, A., KÜHN, D., SCHWANECHE, W. (2008): Zur Kennzeichnung und Gliederung von periglaziär bedingten Differenzierungen in der Pedosphäre. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **6**: 5-42.
- DEHNER, U., BAURIEGEL, A., BRÄUNIG, A., BURBAUM, B., HARTMANN, K.J., IDLER, F., LAMPARTER, A., MARTIN, W., MEYER, K., SCHREY, H.P., WALDMANN, F. (2015): Neue Kennwerte für die Wasserbindung in Böden. Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft München, 5.–10. September. Tagungsband: **58**.
- EISENHAUER, D.-R., SONNEMANN, S. (2009): Waldbaustrategien unter sich ändernden Umweltbedingungen – Leitbilder, Zielsystem und Waldentwicklungstypen. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **8**: 71-88.
- FIEDLER, H.J. (1989): Die Entwicklung der forstlichen Standortlehre seit G.A. Krauss. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* **108**: 177-187.
- FIEDLER, H.J. (2015): Das „Jahr des Bodens“ und die Forstliche Standortserkundung. *AFZ/DerWald* **21**: 35.
- GEMBALLA, R., SCHLUTOW, A. (2007): Überarbeitung der forstlichen Klimagliederung Sachsens. *AFZ/DerWald* **15**: 822-826.
- HILDEBRANDT, E. E. (1983): Der Einfluss der Bodenverdichtung auf die Bodenfunktionen im forstlichen Standort. *Forstwissenschaftliches Zentralblatt* **102**: 111-125.
- KÖNIG, T. (2011): Substratfeuchte – wichtige Auswerteeinheit der Standortserkundung; am Beispiel Sachsens. *Freiburger Forstliche Forschung* **88**.
- KONOPATZKY, A. (2012): Das Wasser macht's – Substratfeuchte in der forstlichen Standortsgliederung. – Erste Skalierungs- und Bewertungsansätze in Brandenburg. *Eberswalder forstliche Schriftenreihe* **49**: 73-82.
- KOPP, D. (1970): Periglaziäre Umlagerungs- (Perstruktions-) zonen im nordmitteleuropäischen Tiefland und ihre bodengenetische Bedeutung. Tagungsbericht der deutschen Akademie der Landwirtschaftswissenschaften zu Berlin **102**: 55-81.



- KOPP, D., SCHWANECKE, W. (1994): Standörtlich-naturräumliche Grundlagen ökologiegerechter Forstwirtschaft: Grundzüge von Verfahren und Ergebnissen der forstlichen Standortserkundung in den fünf ostdeutschen Bundesländern. DLV Verlag Berlin: 248 S.
- KOPP, D., JOCHHEIM, H. (2002): Forstliche Boden- und Standortformen des Nordostdeutschen Tieflands als Datenbasis für die Landschaftsmoellierung. Verlag Dr. Kessel, Remagen-Oberwinter: 207 S.
- KUNTZE, H., ROESCHMANN, G., SCHWERDTFEGGER, G. (1969): Bodenkunde. Verlag Eugen Ulmer. Stuttgart: 568 S.
- LIEBEROTH, I., KOPP, D., SCHWANECKE, W. (1991): Zur Klassifikation der Mineralböden bei der land- und forstwirtschaftlichen Standortskartierung. Petermanns geographische Mitteilungen **135**: 153-164.
- LORZ, C., FRÜHAUF, M., MAILÄNDER, R., PHILLIPS, J.D., KLEBER, A. (2013): Influence of Cover Beds on Soils. In: KLEBER, A., TERHORST, B. (Hrsg.): Mid-Latitude Slope Deposits (Cover beds). Developments in Sedimentology **66**: 95-12.
- MINASNY, B., BRATNEY, A.M. (2015): Digital soil mapping: A brief history and some lessons. Geoderma <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.017>
- OVERBECK, M., SCHMIDT, M., FISCHER, C., EVERS, J., SCHULZE, A., HÖVELMANN, T., SPELLMANN, H. (2011): Ein statistisches Modell zur Regionalisierung der nutzbaren Feldkapazität von Waldstandorten in Niedersachsen. Forstarchiv **82**: 92-100.
- PETZOLD, R., BURSE, K., BENNING, R., GEMBALLA, R. (2016): Die Lokalbodenform im System der forstlichen Standortserkundung im Mittelgebirge/Hügelland und deren bodenphysikalischer Informationsgehalt. Zusammenge stellt aus den Unterlagen der Standortskartierung nach dem Verfahren in den ostdeutschen Bundesländern von DIETRICH KOPP und WALTHER SCHWANECKE. Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz **16**: 27-31.
- REKIS (2014): Regionales Klimainformationssystem für Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen. Abruf online am 17.02.2014: <http://141.30.160.224/fdm/index.jsp?k=rekis>
- 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.
- RUSS, A., RIEK, W., WESSOLEK, G. (2013): Regionalisierung bodenphysikalischer Kennwerte auf Grundlage forstlicher Standortskarten. Freiburger Forstliche Forschung **96**: 113-127.
- SCHMIDT, W., STÜBER, V., ULLRICH, T., PAAR, U., EVERS, J., DAMMANN, K., HÖVELMANN, T., SCHMIDT, M. (2015): Synopse der Hauptmerkmale der forstlichen Standortskartierungsverfahren der Nordwestdeutschen Bundesländer. Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt Band **12**.
- SCHWÄRZEL, K., PETERS, R., PETZOLD, R., HÄNTZSCHEL, J., MENZER, A., CLAUSNITZER, F., SPANK, U., KÖSTNER, B., BERNHOFER, C., FEGGER, K.H. (2011): Räumlich-differenzierte Berechnung und Bewertung des Standortswasserhaushaltes von Wäldern des Mittelgebirges. Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz **12**: 119-126.
- SCHWANECKE, W. (1966): Für die Bodensystematik wichtige Ergebnisse der forstlichen Standortserkundung im Hügelland und Mittelgebirge der DDR. Sitzungsbericht der Deutschen Akademie der Landwirtschaftswissenschaften zu Berlin **15** (18): 79-95.
- SCHWANECKE, W. (1970): Die periglaziären Umlagerungszonen im Mittelgebirge und Hügelland der DDR und ihre bodenkundliche Bedeutung. Tagungsbericht der Deutschen Akademie der Landwirtschaftswissenschaften zu Berlin **102**: 83-107.
- SCHWANECKE, W. (1994): Merkmalstabellen für Haupt- und Lokalbodenformen der forstlichen Standortserkundung.
- SEQUEIRA, C.H., WILLS, S.A., SEYBOLD, C.A., WEST, L.T. (2014): Predicting soil bulk density for incomplete databases. Geoderma **213**: 64-73.
- STEINICKE, C., KÖHLER, M., AHRENDTS, B. (2016): Pedotransferfunktionen zur Abschätzung der Trockenrohdichte von Waldböden. Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz **16**: 95-107.
- VEB FORSTPROJEKTIERUNG POTSDAM (1974): Anweisung für die forstliche Standortserkundung in der DDR (Standortserkundungs-Anweisung/SEA).
- VAN GENUCHTEN, M.T. (1980): A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. SSSAJ **44**: 892-898.
- ZIRLEWAGEN, D., WILPERT, K. (2011): Regionalisierung bodenphysikalischer Eingangsgrößen für bodenphysikalische Pedotransferfunktionen. Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz **12**: 73-83.

submitted: 17.12.2015

reviewed: 26.02.2016

accepted: 10.05.2016

**Autorenanschrift:**

Dr. Rainer Petzold, Raphael Benning, Dr. Henning Andreae,  
Rainer Gemballa  
Kompetenzzentrum Wald und Forstwirtschaft  
Referat Standortskunde, Bodenmonitoring, Labor  
Bonnewitzer Str. 34  
01796 Pirna

E-Mail: [rainer.petzold@smul.sachsen.de](mailto:rainer.petzold@smul.sachsen.de)

Friedrich Karas  
GIS-Beratung Karas  
Wernerstraße 21  
01159 Dresden

Johanna Danigel, Simon Mayer, Karl Burse  
Forstliches Forschungs- und Kompetenzzentrum Gotha  
Referat Monitoring, Klima und Forschung  
Jägerstraße 1  
99867 Gotha