



Scopus Indexed Journal

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

www.afsv.de/index.php/waldoekologie-landschaftsforschung-und-naturschutz


Ableitung von Leitbodenprofilen für die Punkte der Bundeswaldinventur in Sachsen und Thüringen

Generating characteristic soil profiles for the plots of the National Forest Inventory in Saxony and Thuringia

Raphael Benning, Rainer Petzold, Johanna Danigel, Rainer Gemballa & Henning Andreae

Abstract

The National Forest Inventory (NFI) is established as a sampling technique to gather data on forest area and tree species composition as well as wood increment and forest stock. To improve the description, explanation and prediction of forest growth soil information at the NFI plots is necessary. The aim of this publication is to present the aggregation of legacy soil profiles to characteristic soil profiles for local soil forms in Saxony and Thuringia. For 81 % of the Saxon NFI plots and 87 % of the Thuringian NFI plots a characteristic soil profile was derived with entire soil physical properties. These properties comprise the sequence of horizons with depths and for each horizon the designation, the contents of sand, silt and clay, rock content, bulk density, ground water or stanic properties influencing the horizon as well as geology and stratification. The results show that the aggregation of legacy soil profiles to characteristic soil profiles is relatively robust towards the aggregation method. Uncertainties caused by the aggregation methods were quantified. Thus simple parameters like the capacity of plant available water can be calculated for the NFI plots. This information together with other site ecological factors may be used for modelling forest growth or species distribution.

Keywords: *site survey, characteristic soil profiles, soil information, National Forest Inventory, legacy data, Algorithms for Quantitative Pedology (AQP)*

Zusammenfassung

Die Bundeswaldinventur (BWI) ist als Stichprobenverfahren zur Erhebung der Daten von Waldfläche und Baumartenverteilung sowie Holzzuwachs und Holzvorrat etabliert. Um das Wachstum der Bäume besser beschreiben, erklären und vorhersagen zu können, werden neben anderen Standortfaktoren Bodeninformationen an den Traktecken dieser Inventurpunkte benötigt. Im Rahmen dieser Publikation wird die Ableitung der Leitprofile zur Charakterisierung des

Bodens am BWI-Punkt aus Weiserprofilen der Standortserkundung für Sachsen und Thüringen aufgezeigt. An 81 % der sächsischen und 87 % der thüringischen Traktecken konnten Leitprofile mit vollständigen bodenphysikalischen Eigenschaften zugeordnet werden. Diese umfassen die Horizontabfolge in der Tiefe, für jeden Horizont die Horizontbezeichnung, Sand-, Schluff- und Tongehalte, Skelettgehalte, Angaben zur Trockenrohdichte, zum Stau- und Grundwassereinfluss sowie zu Geologie und Schichtung. Die Standortverhältnisse an den Traktecken, als Stichprobe der kartierten Waldfläche, sind repräsentativ für die landesweiten Verhältnisse. Die aus der Methodik resultierenden Unsicherheiten konnten beispielhaft quantifiziert werden und erwiesen sich als akzeptabel. Es hat sich gezeigt, dass die Ergebnisse der Aggregation zu Leitprofilen recht robust gegenüber verschiedenen Aggregationsansätzen sind. Damit ist es möglich, für die Traktecken der BWI Kenngrößen des Wasserhaushaltes zu berechnen, diese für die Standorts-Leistungs-Modellierung zu nutzen und damit das Waldwachstum besser zu beschreiben, zu erklären und zu prognostizieren.

Schlüsselwörter: Standortskunde, Leitbodenprofile, Bodeninformationen, Bundeswaldinventur, Altdaten, Algorithms for Quantitative Pedology (AQP)

1 Einleitung

Die Bundeswaldinventur (BWI, POLLEY & BOLTE 2010) liefert Daten zu Waldfläche, Baumartenverteilung, Holzzuwachs und Holzvorrat. Sie wird als Stichprobe in einem Raster von 4 × 4 km in zehnjährigem Turnus durchgeführt. Jeder Punkt dieser Stichprobe, ein sogenannter Trakt, besteht aus vier Ecken (syn. Traktecken). Neben der reinen waldwachstumskundlichen Auswertung der Ergebnisse werden die Daten zunehmend auch im Bereich der angewandten Forschung zur Baumartenverbreitung und Abschätzung der Standortsleistung herangezogen (KÖLLING et al. 2016, BRANDL et al. 2014). Die Bearbeitung dieser Fragestellungen erfordert detaillierte Kenntnisse zu den Standorts- und Bodenverhältnissen an den Traktecken, wie sie bisher noch nicht zur Verfügung standen.

Ein Teilziel des Verbundprojektes „Waldproduktivität – Kohlenstoffspeicherung – Klimawandel“ (syn. „Umweltvektor BWI“, METTE & KÖLLING 2015) war es daher, die besten verfügbaren Bodendaten für die Traktecken der BWI aus den Datengrundlagen der Bundesländer zusammenzustellen. Sowohl in Sachsen als auch in Thüringen werden die Waldflächen nach dem ostdeutschen Verfahren der Standortserkundung (KOPP & SCHWANECKE 1994) kartiert. In beiden Bundesländern stehen somit vergleichbare Datengrundlagen zur Verfügung. Im vorliegenden Beitrag werden I) die Methoden zur Ableitung von Leitbodenprofilen vorgestellt und II) die auftretenden Unsicherheiten hinsichtlich bodenphysikalischer Parameter durch die verschiedenen Aggregierungsmethoden beispielhaft diskutiert.

2 Material und Methoden

2.1 Datengrundlagen

Im Rahmen der Kartierung von Waldflächen nach dem ostdeutschen Verfahren der Standortserkundung (KOPP & SCHWANECKE 1994) wurden flächig Standortformen kartiert. Ein wichtiges Differenzierungsmerkmal von Standortformen sind ökologisch relevante bodenkundliche Unterschiede, die in der Lokalbodenform (vgl. SCHWANECKE 1994, PETZOLD et al. 2016) zum Ausdruck kommen. Diese Systematik erlaubt es, detaillierte Punktinformationen (Bodenprofile) mit den Flächeninformationen (Bodenformen, Standortformengruppen) zu verknüpfen. Nachfolgend werden die verwendeten Datengrundlagen kurz skizziert.

2.1.1 Flächendaten

Wesentliche Grundlage für die Ableitung der Boden- und Standortinformationen an den Traktecken der BWI waren in beiden Bundesländern die digitale forstliche Standortskarte im Maßstab 1:10.000 (SBS 2015, THÜRINGENFORST 2015) und die Geologische Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland im Maßstab 1:200.000 (ZITZMANN 2003). Als Ergänzung dazu wurden in Sachsen für die Geologie die digitale Karte der eiszeitlich bedeckten Gebiete im Maßstab 1:50.000 (HORNA & SCHIRN 2001) sowie die digitale Geologische Karte Erzgebirge/Vogtland im Maßstab 1:50.000 (KRENTZ 2007) genutzt. Zur Plausibilisierung bzw. Überprüfung der kartierten Standortformen, vor allem von Komplexstandorten, wurde in Sachsen das Digitale Geländemodell 10 (GeoSN 2013) herangezogen.

2.1.2 Punktdaten

Als Unterersetzung der flächig kartierten Bodeninformationen der forstlichen Standortskarte stehen in Sachsen ca. 1.000 Weiserprofile sowie Daten der ökologischen Waldzustandskontrolle (ÖWK) zur Verfügung. Sowohl die Weiserprofile, als auch die Bodenprofilansprachen der ÖWK wurden verortet. In Thüringen konnten bis dato ca. 2.100 Bodenprofile inklusive ÖWK- und BoFruKo-Profilen (Bodenfruchtbarkeitskontrolle) georeferenziert werden. Die räumliche Lage der Profilaufnahmen ist bekannt. 66 % der Profilaufnahmen konnten mit einer Genauigkeit bis 25 m, 23 % mit einer Genauigkeit bis 100 m und weitere 10 % mit einer Genauigkeit bis 500 m verortet werden. Deutlich weniger als 1 % der Profilaufnahmen konnten nur mit einer Genauigkeit bis zu 2.500 m verortet werden. Neben der feldbodenkundlichen Profilbeschreibung von unterschiedlicher Qualität, umfassen die Bodenprofilatensätze auch

Laboranalysen bodenchemischer und bodenphysikalischer Parameter (vgl. PETZOLD et al. 2016).

Das Thünen-Institut für Waldökosysteme hat die Koordinaten der BWI-Traktecken zur Verfügung gestellt. Dieser Datensatz enthält zwei Koordinatenqualitäten, zum einen die Soll-Koordinaten (Vorgabe des 4 × 4 km Rasters) und zum anderen die Ist-Koordinaten, welche bei der Aufnahme im Gelände mittels Global Positioning System (GPS) aufgezeichnet wurden.

Für Lokalbodenformen des nordostdeutschen Tieflands sind in KOPP & JOCHHEIM (2002) bereits Leitprofile veröffentlicht.

2.1.3 Überprüfung und Ergänzung der Datengrundlagen

Die digitalisierten Datensätze der Altweiser-, ÖWK-, BoFruKo- und weiterer Bodenprofile wurden vor der Zuweisung an die Traktecken kritisch auf Plausibilität geprüft (vgl. PETZOLD ET AL. 2016). Der Schwerpunkt der Prüfung lag auf der Ergänzung von Fehlwerten nach Recherche in den originalen Aufnahmebelegen, Merkmalstabellen oder Erläuterungsbänden. Vor allem die Feldansprachen, die in unterschiedlicher Form vorlagen, mussten harmonisiert werden. Dies bedeutete eine Umschlüsselung von Horizontbezeichnungen und Bodenarten aus dem Ostdeutschen Verfahren der Standortserkundung (SEA 74, VEB FORSTPROJEKTIERUNG POTSDAM 1974) in eine Notation, die konform zur 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AD-HOC AG BODEN 2005) ist. Damit ergibt sich eine unterschiedliche Güte der erzeugten Daten. Diese Variation in der Datenqualität ist über eine für jeden Parameter separat dokumentierte Qualitätsangabe nachvollziehbar. Anhand dieser ist gekennzeichnet, ob der Parameterwert aus einer Profilaufnahme (Schätzwert vs. Messwert einer Probe, Entfernung des Profils von der Traktecke), Standortskarte (differenziert nach Nutzung von Erläuterungsbänden, Übersetzungsschlüsseln und Primärdaten), Bodenkarte bzw. Geologischen Karte (Differenzierung nach Maßstab) oder per Digital Soil Mapping abgeleitet wurde.

2.2 Ableitung der Bodeninformationen aus den Daten der forstlichen Standortserkundung

2.2.1 Verknüpfung der Standorts- und Bodeninformationen mit den Traktecken

Die Koordinaten der Traktecken wurden für die Verschneidung der Boden- und Standortinformationen in Anlehnung an die Probekreise der BWI (BMEL 2014) mit dem einheitlich angenommenen Radius von 20 m gepuffert. Alle weiteren bodenkundlichen Ableitungen sind somit als aggregierende Flächeninformationen auf der räumlichen Betrachtungsebene der BWI (1.257 m²) aufzufassen. Die gepufferten Traktecken wurden mit der forstlichen Standortskarte verschritten und diesen so die Standortform (beinhaltet Lokalbodenform) und die Standortformengruppe zugewiesen. Die Nährkraftstufe und die Bodenfeuchtestufe wurden aus der Standortformengruppe extrahiert. Auch kleinflächig abweichende Standortverhältnisse (Flächen < 0,5 ha), durch Punktsignaturen in der Standortskarte gekennzeichnet, fanden Berücksichtigung. Dies betraf hauptsächlich kleinflächige Abweichungen der Bodenfeuchte- oder Nährkraftstufe, allerdings an sehr wenigen Traktecken. Die Informationen zur Nährkraft- und Bodenfeuchtestufe wurden nach den Tabellen

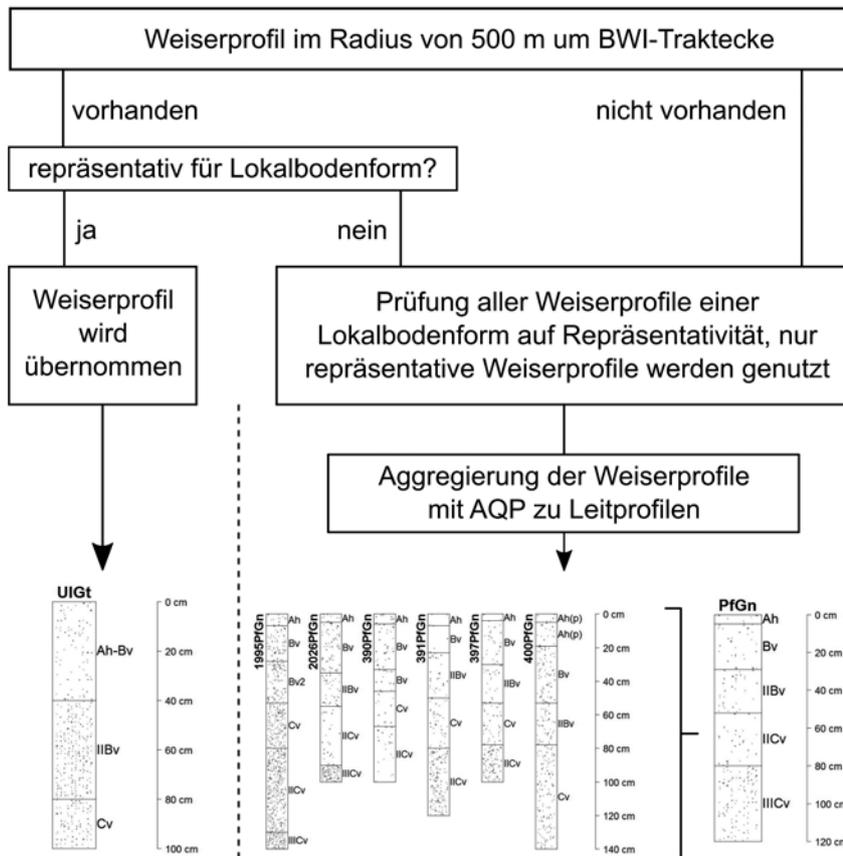


Abb. 1: Schema der Zuordnung der Bodenprofilinformationen (Weiser- und Leitprofile) an die Traktecke. AQP – Algorithms for Quantitative Pedology (BEAUDETTE et al. 2013).

Fig. 1: Diagram for the assignment of soil information (soil profiles) to the NFI plot. AQP – Algorithms for Quantitative Pedology (BEAUDETTE et al. 2013).

6 und 11–13 aus BENNING et al. (2015) in einen bundeseinheitlichen Schlüssel für die Wasserhaushaltsstufen umcodiert. Die Nährkraft ist dabei eine Stamm-Eigenschaft, die im Sinne eines Potentials, nicht aber eines aktuellen Zustandes, zu interpretieren ist (VEB FORSTPROJEKTIERUNG 1974).

Als Primärschlüssel für die Zuweisung konkreter Bodenprofile wurde das Klassenzeichen der mit der Standortform auskartierten Lokalbodenform verwendet. Die Zuordnung erfolgte nach dem in Abbildung 1 skizzierten Schema. Im Ergebnis wurde an den Traktecken entweder ein Weiserprofil (Feldaufnahme & Laboranalysen) oder ein Leitprofil (aus Primärdaten mehrerer Weiserprofile aggregiert) hinterlegt.

2.2.2 Aggregation der Leitbodenprofile

Die Klassifizierung von Weiserprofilen in Lokalbodenformen ermöglichte es, mehrere Weiserprofile einer Lokalbodenform zu einem charakteristischen Leitprofil zu aggregieren. Dessen Eigenschaften (Horizonte, Horizontmächtigkeiten, Textur, Skelettgehalt, Trockenrohddichte, etc.) ergaben sich durch die Berechnung von Medianen über das gesamte Profilkollektiv einer Lokalbodenform. In Sachsen wurde für die teilautomatisierte Aggregation von Leitprofilen aus größeren Datensätzen das Methodenset von BEAUDETTE et al. (2013) verwendet. Diese Ansätze sind in der Programmbibliothek „Algorithms for Quantitative Pedology – AQP“ integriert und in R nutzbar (R CORE TEAM 2014). Zur Generierung der thüringischen Leitprofile wurde dieser Ansatz in Anlehnung an BEAUDETTE & SKOVLIN (2015) geringfügig modifiziert. Nominale Parameter wie Stratigraphie, Schichtung und Gestein wurden in beiden Bundesländern unter Nutzung der Merkmalstabellen (SCHWANECKE 1994), der Erläuterungsbände sowie verschiedener geologischer Karten (vgl. Abschnitt 2.1.1) ergänzt.

2.3 Bewertung der Unsicherheiten von Zielgrößen durch unterschiedliche Aggregationsansätze

Da sich die Ansätze zur Aggregation der Profilvereinerungen in Sachsen und Thüringen geringfügig unterscheiden (vgl. Abschnitt 2.2.2), war es notwendig, die Vergleichbarkeit der beiden Ansätze sicherzustellen. Aus diesem Grund wurden auf fünf Lokalbodenformen, insgesamt 67 Weiserprofile umfassend, beide Aggregationsansätze angewendet und die Ergebnisse verglichen (BENNING & PETZOLD 2015). Durch den alleinigen Vergleich von Horizontmächtigkeiten bzw. von Sand-, Schluff- und Tonanteilen lassen sich mögliche Unterschiede nur schwer bewerten. Als Bewertungskriterium wurde die nutzbare Feldkapazität (nFK) gewählt, die über die Anwendung der Pedotransferfunktionen von RENGIER et al. (2009) bodenphysikalische Einzelparameter integriert. Anhand dieser Kenngröße wurde die Relevanz von Unterschieden zwischen beiden Ansätzen beurteilt. Für den Vergleich wurde mit einem festen Tiefenbezug von 80 cm gerechnet. Der mögliche Einfluss von Humus blieb unberücksichtigt.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Untersetzung der Traktecken mit Bodenprofilen

Nach dem Grundraster der BWI (4 × 4 km) liegen in Sachsen 416 Trakte mit 1.164 Traktecken und in Thüringen 425 Trakte mit 1.284 Traktecken. Durch die räumliche Analyse wurden an 956 sächsischen Traktecken genau eine Standortseinheit, an 208 Traktecken zwei Standortseinheiten ausgeschieden.

In Thüringen wurden an 1.141 Traktecken eine Standortseinheit und an 143 Traktecken zwei Standortseinheiten ermittelt. Abbildung 2 gibt einen Überblick über die Verteilung der Traktecken der BWI in Sachsen und Thüringen und deren Untersetzung mit Bodenprofilen. An 81 % der sächsischen und 87 % der thüringischen Traktecken wurde mindestens ein Profil hinterlegt, das vollständig durch bodenphysikalische Parameter charakterisiert ist. So hinterlegte Traktecken sind homogen über beide Bundesländer verteilt. Eine Ausnahme stellen insbesondere Rekultivierungsflächen des ehemaligen Kohlebergbaus in Nordost-Sachsen dar, wo deutlich weniger auswertbare Standortinformationen vorliegen. Folglich konnte in dieser Region nur wenigen Traktecken ein Bodenprofil zugeordnet werden. Insgesamt sind 19 % der sächsischen und 13 % der thüringischen Traktecken nicht mit Leitprofilen hinterlegt oder die bodenphysikalischen Parameter weisen Lücken auf. Weitere Ursachen für Lücken sind, dass a) für einige Lokalbodenformen keine Profilaufnahmen vorliegen und b) die digitalen forstlichen Standortskarten in beiden Ländern etwa 85 % der Waldfläche abdecken. Im Rahmen der Standortkartierung werden bereits vorliegende analoge Kartierungsergebnisse, z. B. auf Liegenschaften des Bundesforstes (Truppenübungsplätze), in das digitale Kartenwerk eingearbeitet. Nicht kartierte Flächen werden schrittweise aufgenommen und im GIS ergänzt.

3.2 Überblick zum Standortsspektrum an den BWI-Traktecken in Sachsen

Die standörtlichen Voraussetzungen wirken sich sowohl auf die Eignung des Standortes für die Baumarten als auch auf die Wuchsleistung der Bäume aus. Zur Charakterisierung des Standortes dienen neben Informationen zur Lage und zum Klima (nicht Gegenstand dieser Publikation) Angaben zu Böden, Nährkraft und Wasserhaushalt. Abbildung 3 zeigt für die Standortseinheiten die prozentualen Anteile der zugeordneten Bodenklassen, Nährkraft- und Wasserhaushaltsstufen. Den Traktecken der BWI wurden insgesamt 38 verschiedene Bodentypen nach AD-HOC-AG BODEN (2005) zugeordnet. Diese ließen sich nach der deutschen Systematik zu 9 Bodenklassen zusammenfassen. Demnach kommen am häufigsten Braunerden, Stauwasserböden und Podsole vor.

Für 15 % der Traktecken fehlen Informationen zum Bodentyp, da entweder der Horizontfolgetyp einer Lokalbodenform ohne Bodenprofil nicht direkt nach KA5 übersetzt werden konnte oder die Traktecke nicht kartiert war.

Die Trophie der Standortseinheiten wurde nach der Nährkraftklassifikation von WOLFF et al. (1998) eingestuft. Die Häufigkeit der Nährkraftstufen ist im mittleren Diagramm der Abbildung 3 dargestellt. Es überwiegen an den Traktecken die mesotrophen und oligotrophen Standorte. Erwartungsgemäß entsprechen diese Anteile den landesweiten standörtlichen Verhältnissen. Als Indikator für die Wasserversorgung wurden die Wasserhaushaltsstufen herangezogen. Basierend auf der Veröffentlichung von W. HÖLZER in WOLFF et al. (1998) wurden die Wasserhaushaltsstufen der Bundesländer einer entsprechenden bundeseinheitlichen Stufe zugeordnet (BENNING et al. 2015, siehe Anhang). Beispielhaft für Sachsen ist in Abbildung 3 rechts die Häufigkeit dieser Wasserhaushaltsstufen dargestellt. Es dominieren die terrestrischen Standorte. Für 11 % der Traktecken konnte weder eine Einstufung der Trophie noch des Wasserhaushaltes vorgenommen werden, da diese nicht kartiert sind. Insgesamt zeigt sich, dass die Standortbedingungen an den Traktecken der BWI eine repräsentative Stichprobe der landesweiten Verhältnisse sind. Dies lässt sich aus einem Vergleich der prozentualen Anteile der Trophie- und Wasserhaushaltsstufen an den Traktecken der BWI und der forstlichen Standortskarte (SBS 2015) ableiten.

3.3 Bodenphysikalische Untersetzung der Bodenprofile

Am Beispiel Sachsens wird die Datenbank der Bodenprofile und deren Untersetzung mit physikalischen Parametern vorgestellt. Sie enthält 21 Weiserprofile und 179 Leitprofile. Für jedes Profil umfasst sie folgende Merkmale: Bezeichnung der Lokalbodenform, Anzahl Horizonte, Horizontbezeichnungen, obere und untere Horizontgrenze, stratigrafische Angaben, Schichtung, Ausgangsgestein, Bodenart, Sand-, Schluff- und Tongehalt, Fein-, Mittel- und Grobsandanteile, Skelettgehalt, Trockenrohdichte (TRD) sowie Angaben zum Grund- bzw. Stauwassereinfluss. Abbildung 4 visualisiert das Ergebnis der Aggregation zu einem Leitprofil für zwei

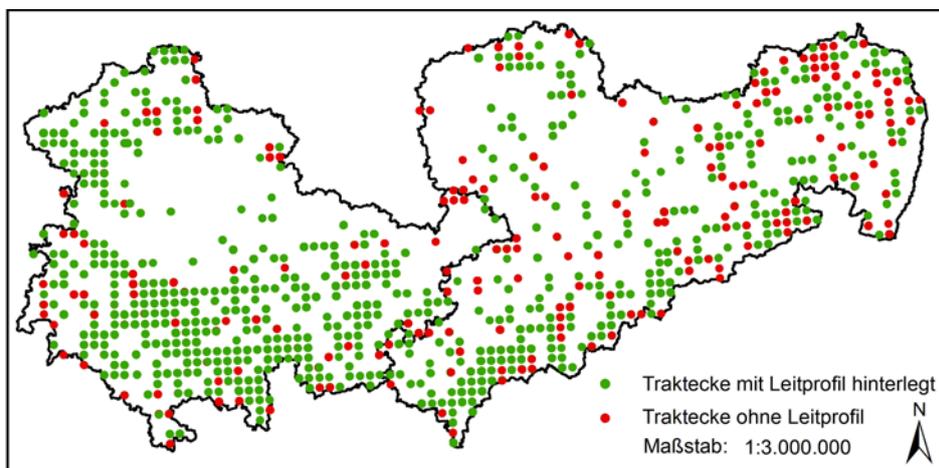


Abb. 2: Übersicht der räumlichen Verteilung der Traktecken der BWI in Sachsen und Thüringen. Die Hinterlegung der Traktecke mit einem bodenphysikalisch vollständigen Leitprofil ist farblich gekennzeichnet (grün - Leitprofil hinterlegt; rot - kein Leitprofil hinterlegt).

Fig. 2: Summary over the spatial allocation of the NFI sections in Saxony and Thuringia. The coloring indicates whether it exists a soil profile with complete soil physical data at the section or not (green – soil profile existing; red – no soil profile existing).

Granit-Bodenformen unterschiedlichen Substrates. Für jeden bodenphysikalischen Parameter ist die Streuung der Einzelwerte (25 %- und 75 %-Perzentil) sowie der Median im Tiefenverlauf dargestellt.

Skelettgehaltes und der TRD in die Datenbank übernommen. In Tabelle 1 ist ein Auszug der bodenphysikalischen Eigenschaften aus der Datenbank für die in Abbildung 4 exemplarisch gezeigten Lokalbodenformen zusammengestellt.

Als Einzelwerte für die Horizonte eines Bodenprofils wurden die Mediane der Sand-, Schluff- und Tonanteile, des

An 38 Traktecken wurden aufgrund ihrer räumlichen Nähe und Repräsentativität Weiserprofile direkt hinterlegt.

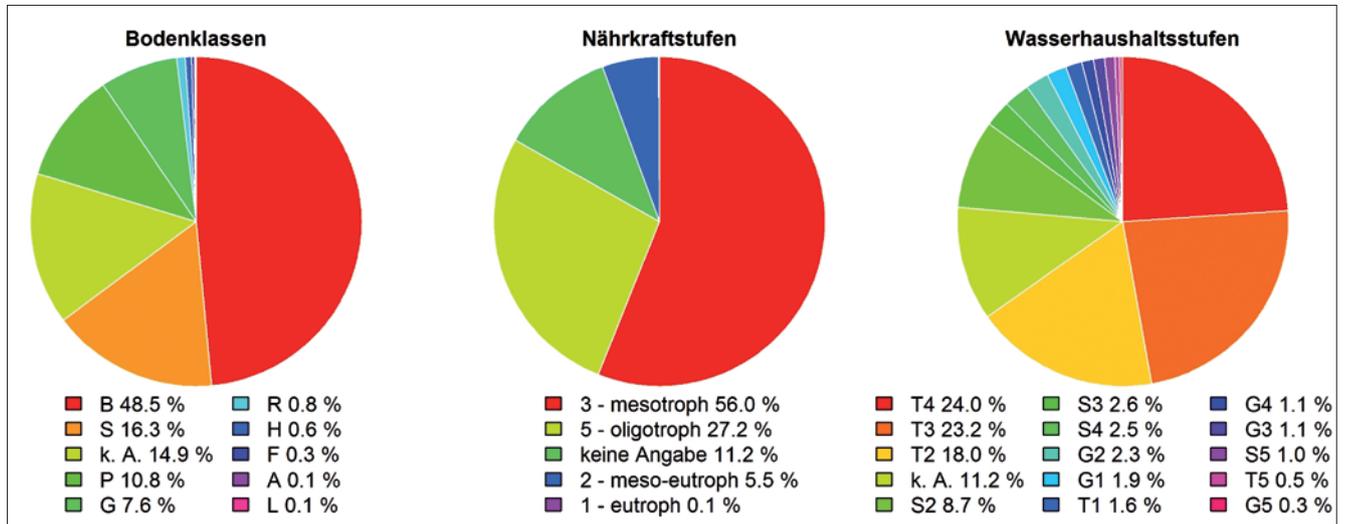


Abb. 3: Häufigkeitsverteilungen der Bodenklassen, Nährkraftstufen und Wasserhaushaltsstufen für die an den Traktecken der BWI in Sachsen abgeleiteten Standortseinheiten. Bodenklassen nach AD-HOC AG BODEN (2005) (k. A. ... keine Angabe), Nährkraftstufe nach WOLFF et al. (1998), Wasserhaushaltsstufen nach BENNING et al. (2015).

Fig. 3: Frequency distributions of soil classes, nutrient levels, and water balance levels for the site units at the Saxon NFI sections. Soil classes named according to AD-HOC AG BODEN (2005) (k. A. ... not available), nutrient levels named according to WOLFF et al. (1998), water balance levels named according to BENNING et al. (2015).

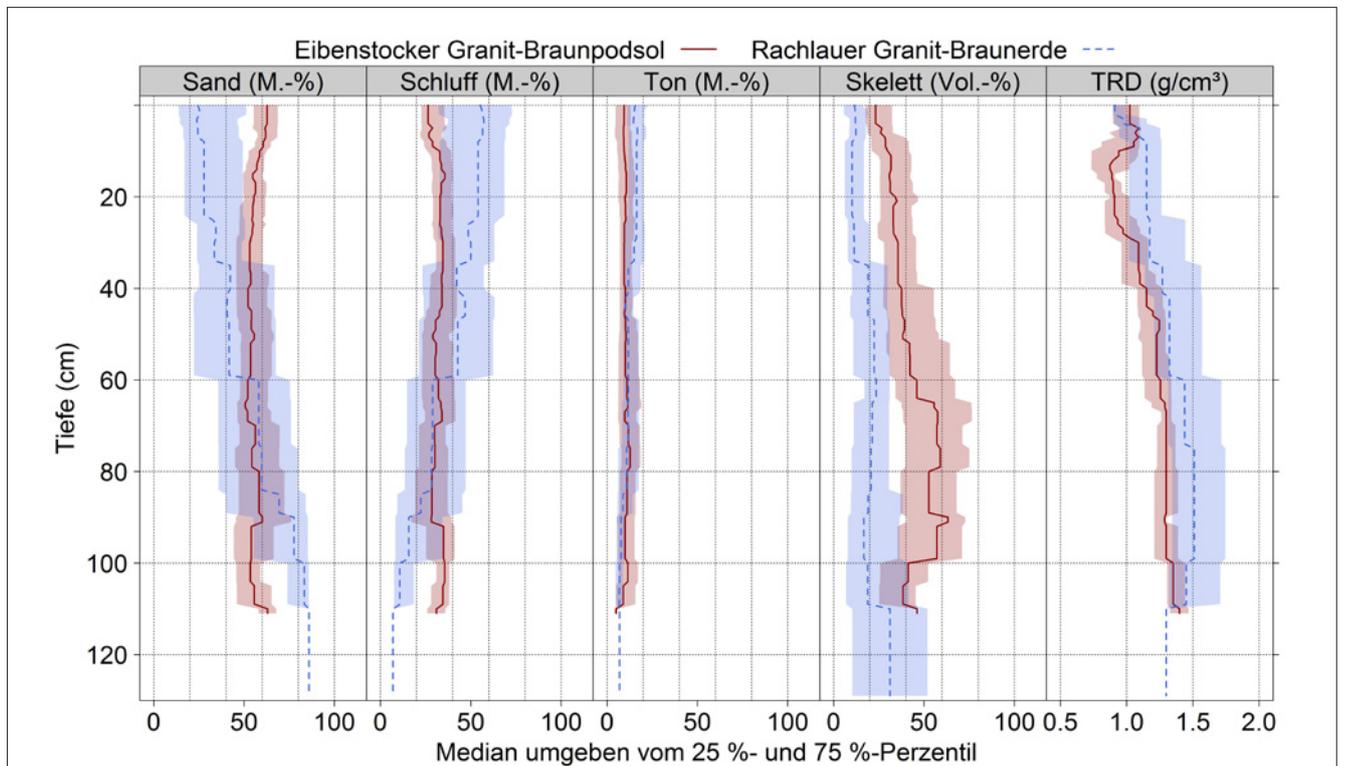


Abb. 4: Tiefenverlauf der bodenphysikalischen Parameter von Weiser- und Leitprofilen zweier Lokalbodenformen aus Granit unterschiedlichen Substrates.

Fig. 4: Depth functions of soil physical parameters from soil profiles out of granite but different substrate.

Tab. 1: Bodenphysikalische Untersetzung der Leitprofile für die Lokalbodenformen Eibenstocker Granit-Braunpodsol und Rachlauer Granit-Braunerde.

Tab. 1: Soil physical characteristics of the local soil forms "Eibenstocker Granit-Braunpodsol" and "Rachlauer Granit-Braunerde."

Lokalbodenform	Horizont-bezeichnung	Mächtigkeit	Sand	Schluff	Ton	Skelett	TRD
		cm	Masse-%			Vol.-%	g cm ⁻³
Eibenstocker Granit-Braunpodsol	Ahe	8	63,6	26,8	9,6	23,3	1,0
	Ae	7	57,9	32,5	9,6	31,8	0,9
	Bsv	12	55,8	33,6	10,6	32,9	0,9
	Bv	24	55,0	35,0	10,0	35,6	1,1
	Cv	24	56,3	32,3	11,4	46,1	1,3
Rachlauer Granit-Braunerde	Ah	4	25,8	58,4	15,8	11,8	0,9
	Bv	28	28,3	55,0	16,7	10,3	1,2
	Bv-Cv	22	43,4	44,4	12,2	19,2	1,3
	Cv	31	58,9	29,3	11,8	21,4	1,4

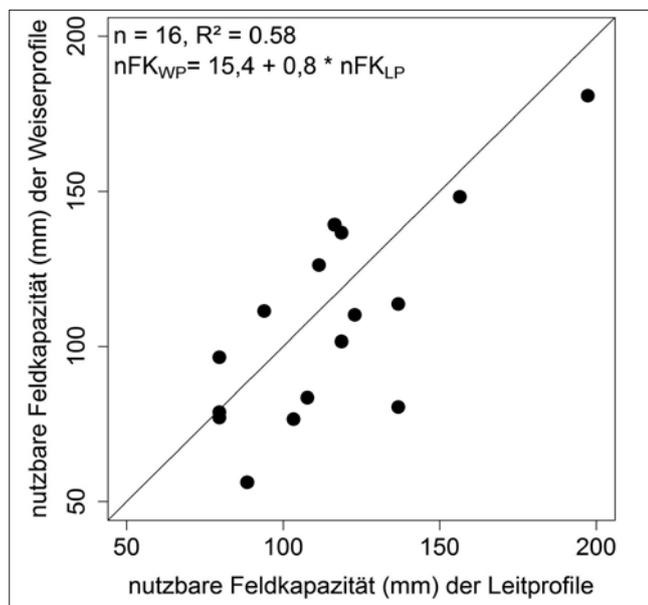


Abb. 5: Korrelation zwischen der nutzbaren Feldkapazität (nFK) von 16 Leit- und Weiserprofilen verschiedener Lokalbodenformen. Abkürzungen: nFK_{LP} – nFK der Leitprofile, nFK_{WP} – nFK der Weiserprofile.

Fig. 5: Correlation between the available field capacity (AWC) of 16 aggregated and legacy soil profiles of different local soil forms. Abbreviations: nFK_{LP} – AWC of aggregated soil profiles, nFK_{WP} – AWC of legacy soil profiles.

Zusätzlich stehen für diese Leitprofile zur Verfügung. Sowohl für die Weiser- als auch die Leitprofile erfolgte die Berechnung der nFK bis in 80 cm Tiefe. Damit war es möglich, die aus der Aggregation zu Leitprofilen resultierende Unsicherheit dieser Zielgröße zu quantifizieren. Abbildung 5 zeigt den Zusammenhang zwischen der nFK von 16 Leit- und Weiserprofilen.

Bei der Kartierung der Waldflächen nach dem ostdeutschen Verfahren der Standortserkundung wurden die Bodenformen zu Lokalbodenformen klassifiziert. Aus bodenphysikalischer

Sicht kann diese Klassenbildung grundsätzlich nachvollzogen werden. Dies wird exemplarisch durch die in Abbildung 4 präsentierten Tiefenverläufe der bodenphysikalischen Parameter für die beiden Granit-Bodenformen verdeutlicht und die Zusammenstellung deren Mediane in Tabelle 1 unterstrichen. Obwohl beide Lokalbodenformen zur gleichen Hauptbodenform, den Granit-Braunerden, gehören, unterscheiden sie sich deutlich in der Textur und im Skelettgehalt. Die ökologische Relevanz dieser Unterschiede wird anhand der nFK bewertbar: der Eibenstocker Granit-Braunpodsol wird mit einer nFK von 100 mm in die Substratfeuchtestufe „mäßig speichertrocken“ und die Rachlauer Granit-Braunerde mit einer nFK von 144 mm in die Substratfeuchtestufe „speicherfrisch“ eingeordnet (vgl. PETZOLD et al 2016). Gleichzeitig zeigt Abbildung 4 auch die Variabilität der bodenphysikalischen Eigenschaften innerhalb einer Lokalbodenform, dargestellt durch die Perzentile. Diese Variabilität kann auch als Unsicherheit der Werte bodenphysikalischer Parameter für Lokalbodenformen angesehen werden. Die Variabilität an der Traktecke (Pufferkreis 1.257 m²) kann mit der von allen Weiserprofilen abgebildeten Variabilität übereinstimmen, aber in Abhängigkeit von der Genese des bodenbildenden Ausgangssubstrates auch abweichen. Beispielsweise können periglaziale Prozesse als Erklärung dienen. Andererseits dient die Ausprägung von periglazialen Deckschichten im Mittelgebirge und Hügelland (SCHWANECKE 1970) bzw. von Perstruktionszonen im Tiefland (KOPP 1970) als Differenzierungsmerkmal von Lokalbodenformen, so dass deren Einfluss auf die Variabilität von bodenphysikalischen Eigenschaften berücksichtigt ist (vgl. MOLDENHAUER et al. 2013). Für einige Lokalbodenformen ist allerdings bekannt, dass diese in bestimmten Lagen als Frostmusterböden ausgebildet sind (SCHWANECKE 1994). Ein sehr kleinräumiger Wechsel des Skelettgehaltes und der Textureigenschaften des Feinbodens sind hier typisch. Allerdings ist eine repräsentative und quantitative Erfassung der kleinräumigen Variabilität von bodenphysikalischen Parametern von Lokalbodenformen mit herkömmlichen Methoden nur mit sehr hohem Aufwand möglich (vgl. SUCRE et al. 2011). Eine indirekte Möglichkeit zur Bewertung der Variabilität bzw. Unsicherheit ist die Gegenüberstellung der nFK von Weiser- und Leitprofilen für unterschiedliche Lokalbodenformen wie in Abbildung 5. Die

Tab. 2: Vergleich der nFK für fünf Leitprofile in Abhängigkeit von der Aggregierungsmethode: kontinuierliche Aggregierung (BEAUDETTE et al. 2013) vs. diskontinuierliche Aggregierung (BEAUDETTE & SKOVLIN 2015).

Tab. 2: Comparison of the AWC of five characteristic soil profiles depending on the aggregation method: continuous aggregation (BEAUDETTE ET AL. 2013) versus discontinuous aggregation (BEAUDETTE & SKOVLIN 2015).

Hauptbodenform (Kürzel der Lokalbodenform)	nutzbare Feldkapazität (mm)		
	kontinuierliche Aggregierung (k)	diskontinuierliche Aggregierung (d)	Differenz k – d
Schiefer-Braunerde (Hd.Sf)	105,7	108,3	-2,6
Sand-Braunerde (Kx.S)	83,3	81,8	1,5
Gneis-Braunerde (Pf.Gn)	162,7	157,7	5
Granit-Braunerde (Ra.Gt)	144,6	131,4	13,2
Phyllit-Braunerde (Zw.Ph)	118,9	115,8	3,1
Mittelwert	123,0	119,0	4,0

nFK der Leitprofile überschätzt die nFK der Weiserprofile gering. Das relativ hohe Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,58$ für die Schätzung der nFK der Weiserprofile mittels der nFK der Leitprofile verdeutlicht, dass die Unsicherheit der bodenphysikalischen Parameter durch die Leitprofile grundsätzlich akzeptabel ist. Die in den Weiserprofilen vorhandene und in Abbildung 4 ersichtliche Variabilität der bodenphysikalischen Eigenschaften innerhalb einer Lokalbodenform geht in der Datenbank verloren, da nur der Median der Eigenschaften hinterlegt wird. Für zukünftige Fragestellungen stehen statistische Maßangaben für die Lokalbodenformen zur Verfügung, die durch mehrere Weiserprofile charakterisiert sind. Die Streumaße können mittels AQP (BEAUDETTE et al. 2013) für Horizonte, 1-cm-Schichten oder auch Tiefenstufen unterschiedlicher Mächtigkeiten berechnet werden.

3.4 Auswirkungen unterschiedlicher Aggregierungsansätze

Leitprofile einer Lokalbodenform, die mittels kontinuierlicher Aggregierung nach BEAUDETTE et al. (2013) erstellt wurden, unterscheiden sich geringfügig von denen, die über diskontinuierliche Aggregierung (BEAUDETTE & SKOVLIN 2015) abgeleitet wurden. Als integrierende und letztlich ökologisch interpretierbare Größe der bodenphysikalischen Eigenschaften wurde die nFK zur Bewertung herangezogen. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die aus unterschiedlichen Aggregierungsmethoden resultierenden Unterschiede der nFK bis 80 cm von fünf Lokalbodenformen. Sie liegen im Mittel bei 4,0 mm. Verglichen mit der Evapotranspiration eines Fichtenbestandes von 3 mm d^{-1} (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003) ist diese Differenz und ihre ökologische Auswirkung sehr gering. Bereits ein Fehler im Skelettgehalt von $\pm 10 \text{ Vol.-%}$ wirkt sich auf die nFK dieser exemplarischen Lokalbodenformen mit $\pm 15 \text{ mm}$ deutlich stärker aus.

5 Schlussfolgerungen

Im Rahmen des Projektes WP-KS-KW konnten in Sachsen und Thüringen für die Traktecken der BWI Standorts- und Bodeninformationen abgeleitet werden. Diese erlauben eine Berechnung von bodenphysikalischen Kennwerten für die Traktecken, beispielsweise die nFK. Die Standortsverhältnisse an den Traktecken, als Stichprobe der kartierten Waldfläche, sind repräsentativ für die landesweiten Verhältnisse. Es

zeigte sich, dass die bodenphysikalischen Eigenschaften gegenüber den beiden Aggregierungsansätzen robust sind und für sie eine Quantifizierung der Unsicherheit möglich ist. Da die Eigenschaften über den Median abgeleitet werden, sind sie stabil gegenüber Ausreißern. Damit ist eine Grundlage geschaffen, um boden- und standortkundliche Bewertungen in Standorts-Leistungs-Modellierungen an BWI-Traktecken zu berücksichtigen.

Ein Schwerpunkt zukünftiger Arbeiten liegt auf der Validierung und Verbesserung der Datensätze durch Lückenfüllung (TRD) und Ergänzung (C_{org} , C/N, BS). Hierfür müssen geeignete Ansätze länderübergreifend abgestimmt werden. Nur harmonisierte Ansätze zur Lückenfüllung sichern eine Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit der Ergebnisse zwischen Bundesländern.

Danksagung

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

Literatur

- AD-HOC-AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Aufl., E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Hannover: 438 S.
- AK STANDORTSKARTIERUNG (2003): Forstliche Standortaufnahme: Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen / bearb. u. zsgest. vom „Arbeitskreis Standortkartierung“ in der „Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung“. 6. Aufl., IHW-Verlag, Eching bei München: 352 S.
- BEAUDETTE, D. E., ROUDIER, P., O'GEEN, A. T. (2013): Algorithms for quantitative pedology: A toolkit for soil scientists. *Computers & Geosciences* **52**: 258-268, doi: 10.1016/j.cageo.2012.10.020.

- BEAUDETTE, D. E., SKOVLIN, J. M. (2015): Assigning Generalized Horizon Labels. URL: https://r-forge.r-project.org/scm/viewvc.php/*checkout*/docs/aqp/gen-hz-assignment.html?root=aqp [access 24-09-2015].
- BENNING, R., DANIGEL, J., PROFFT, I., PETZOLD, R. (2015): Dokumentation für die Ableitung und Bereitstellung der Bodendaten. Unveröffentlichtes, projektinternes Arbeitsdokument des Staatsbetriebes Sachsenforst (Referat Bodenmonitoring, Standortserkundung und Labor) und ThüringenForst AöR (Forstliches Forschungs- und Kompetenzzentrum Gotha), Graupa: 35 S.
- BENNING, R., PETZOLD, R. (2015): Welche Unsicherheiten resultieren aus der Berechnung der nutzbaren Feldkapazität auf Basis aggregierter Leitprofile? Berichte der DBG. URL: http://eprints.dbges.de/1061/2/Benning_DBG_eprints_2015.pdf [access 18-04-2016].
- BMEL (2014): Der Wald in Deutschland. Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Berlin: 52 S.
- BRANDL, S., FALK, W., KLEMMT, H.J., STRICKER, G., BENDER, A., RÖTZER, T., PRETZSCH, H. (2014): Possibilities and Limitations of Spatially Explicit Site Index Modelling for Spruce Based on National Forest Inventory Data and Digital Maps of Soil and Climate in Bavaria (SE Germany). *Forests* **5** (11): 2626-2646.
- GEO SN (2013): Digitales Geländemodell DGM10. Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung des Freistaates Sachsen.
- HORNA, F., SCHIRN, R. (2001): Geologische Karte der eiszeitlich bedeckten Gebiete von Sachsen 1:50.000 (GK50). Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.
- KOPP, D. (1970): Periglaziale Umlagerungs- (Perstruktions-) zonen im nordmitteleuropäischen Tiefland und ihre bodengenetische Bedeutung. Tagungsbericht der deutschen Akademie der Landwirtschaftswissenschaften zu Berlin **102**: 55-81.
- KOPP, D., JOCHHEIM, H. (2002): Forstliche Boden- und Standortdaten des Nordostdeutschen Tieflands als Datenbasis für die Landschaftsmodellierung. Verlag Dr. Kessel, Remagen-Oberwinter: 207 S.
- KOPP, D., SCHWANECKE, W. (1994): Standortlich-naturräumliche Grundlagen ökologiegerechter Forstwirtschaft. Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin: 248 S.
- KÖLLING, C., METTE, T., KNOKE, T. (2016): Waldertrag und Anbauisiko in einer unsicheren Klimazukunft. *Schweiz Z Forstwes* **167**: 29-38.
- KRENTZ, O. (2007): Geologische Karte Erzgebirge/Vogtland 1:50.000. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Freiberg.
- METTE, T., KÖLLING, C. (2015): Wald, Wachstum, Umwelt. Großes Gemeinschaftsprojekt »WP-KS-KW« verschnidet die Bundeswaldinventur mit Boden- und Umweltdaten. *LWF aktuell* **107**: 46-49.
- MOLDENHAUER, K.-M., HELLER, K., CHIFFLARD, P., HÜBNER, R., KLEBER, A. (2013): Influence of Cover Beds on Slope Hydrology. In: KLEBER, A., TERHORST, B. (Hrsg.): Mid-latitude slope deposits (cover beds). *Developments in sedimentology* **66**: 127-152. Elsevier Science, Amsterdam, London.
- PETZOLD, R., DANIGEL, J., BENNING, R., MAYER, S., BURSE, K., KARAS, F., ANDREAE, H., GEMBALLA, R. (2016): Aus Alt mach Neu – Altdaten der Standortkartierung für die Ableitung und Regionalisierung von Substratspeichereigenschaften. *Waldökologie online* **16**: 17-25. URL: http://www.afsv.de/download/literatur/waldoekologie-online/waldoekologie-online_heft-16-3.pdf [access 09.11.2016].
- POLLEY, H., BOLTE, A. (2010): Dritte Bundeswaldinventur beginnt 2011. *AFZ-DerWald* **17**: 35-37.
- R CORE TEAM (2014): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <http://www.R-project.org/>.
- RENGER, M., BOHNE, K., FACKLAM, M., HARRACH, T., RIEK, W., SCHÄFER, W., WESSOLEK, G., ZACHARIAS, S. (2009): Teil I: Ergebnisse und Vorschläge der DBG-Arbeitsgruppe „Kennwerte des Bodengefüges“ zur Schätzung bodenphysikalischer Kennwerte. In: WESSOLEK, G., KAUPENJOHANN, M., RENGER, M. (Hrsg.): *Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis. Bodenökologie und Bodengenese* 40. Berlin.
- SBS (2015): Digitale forstliche Standortskarte im Maßstab 1:10.000. Staatsbetrieb Sachsenforst, Referat Standortserkundung, Bodenmonitoring und Labor.
- SCHWANECKE, W. (1970): Die periglaziale 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 in den Standortsregionen Mittelgebirge und Hügelland der ostdeutschen Länder (Bodenformen-Katalog). Forsteinrichtungsamt Potsdam: 200 S.
- SUCRE, E.B., TUTTLE, J.W., FOX, T.R. (2011): The use of Ground-Penetrating Radar to Accurately Estimate Soil Depth in Rocky Forest Soils. *Forest Science* **57**: 59-66.
- THÜRINGENFORST (2015): Digitale forstliche Standortskarte im Maßstab 1:10.000. ThüringenForst.
- VEB FORSTPROJEKTIERUNG POTSDAM (1974): Anweisung für die forstliche Standortserkundung in der DDR (Standortserkundungs-Anweisung / SEA 74).
- WOLFF, B., HÖLZER, W., FRÖMDLING, D., BONK, S. (1998): Datenaufbereitung für Modellrechnungen aus der Bundeswaldinventur (BWI) und dem Datenspeicher Waldfonds (DSW). Arbeitsbericht des Institutes für Forstökologie und Walderfassung **98**(3): Eberswalde.
- ZITZMANN, A. (2003): Geologische Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1:200.000 (GÜK 200). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

submitted: 17.12.2015
 reviewed: 26.02.2015
 accepted: 19.04.2016

Autorenanschriften:

Raphael Benning, Dr. Rainer Petzold, Rainer Gemballa,
 Henning Andreae
 Staatsbetrieb Sachsenforst
 Referat Standortserkundung, Bodenmonitoring und Labor
 Bonnewitzer Str. 34
 01796 Pirna / OT Graupa

E-Mail: raphael.benning@smul.sachsen.de,
rainer.petzold@smul.sache

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