



Scopus Indexed Journal

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

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


Bodeninformationen in den verschiedenen Standortserkundungssystemen Deutschlands: Gegenwärtiger Stand und Perspektiven

Soil information in the different forest site mapping systems of Germany: current state and perspectives

Rainer Petzold, Raphael Benning & Jürgen Gauer

Abstract

Soil information belongs to the crucial properties which are gathered by forest site survey. The differentiation is based more on forest relevant properties than on the severe soil genetic classification. Thereby it shows up that the distinction between relative stable properties and more variable conditional properties is reasonable. The forest site survey systems of the federal states of Germany acquire soil information with varying intensity and quality. These comprise pedologic oriented soil form or soil series mapping systems with comprehensive laboratory analysis as well as mapping systems oriented on vegetation ecology with an indirect assessment of soil properties. Also coverage of mapped forest area is different. Reappraisal and harmonization of legacy soil data as well as the integration of additional geodata and data intensive methods from the field of digital soil mapping are promising opportunities for the future designation of soil information from site survey systems.

Keywords: *Forest site mapping, soil survey, legacy soil data, soil properties*

Zusammenfassung

Bodeninformationen gehören zu den zentralen Merkmalen, die im Rahmen der forstlichen Standortskartierung erfasst werden. Die Differenzierung orientiert sich dabei weniger an einer streng bodengenethischen Gliederung (Deutsche Bodensystematik), sondern an forstlich relevanten Merkmalen (Standortsbewertungsverfahren). Dabei erweist sich eine Unterscheidung zwischen relativ stabilen Stammeigenschaften und variablen Zustandseigenschaften als sinnvoll. In den forstlichen Kartiersystemen der Bundesländer werden Bodeninformationen in unterschiedlicher Intensität und Qualität aufgenommen. Diese reichen von der bodenkundlich orientierten Bodenformen- oder Substratkartierung mit umfangreicher laboranalytischer Untersetzung bis zu vegetationsökologisch orientierten Aufnahmeverfahren mit

indirekter Abschätzung von Bodeneigenschaften. Auch die Abdeckung der kartierten Waldflächen ist unterschiedlich. Perspektiven für die Bereitstellung von Bodeninformationen aus der Standortskartierung ergeben sich durch die Aufarbeitung und Harmonisierung von Altdaten sowie die Integration von weiteren Geodaten und datenintensiven Methoden aus dem Bereich der digitalen Bodenkartierung.

Schlüsselwörter: Standortskartierung, Bodenkartierung, Altdaten, Bodeneigenschaften

1 Bedeutung von Bodeninformationen in der Standortskartierung

Die bodenkundliche Kennzeichnung ist neben den Standortmerkmalen Lage und Klima sowie Vegetation eine wichtige Grundlage für die Bewertung und Darstellung der Leistungsfähigkeit von Waldstandorten. Da die forstliche Standortaufnahme insgesamt ein nutzungsorientiertes Bodenbewertungsverfahren darstellt (AK STANDORTSKARTIERUNG 2016), stehen auch bei der Erfassung und Klassifikation von Bodenmerkmalen zunächst forstökologische und bewirtschaftungsrelevante Eigenschaften im Vordergrund. Die Kenntnis und flächenhafte Darstellung von Standortstypen und im engeren Sinne Bodenklassen unterstützt die Baumartenwahl, ermöglicht die Abschätzung des Ertragsvermögens und erlaubt Rückschlüsse auf die erzielbare Holzqualität sowie das Produktionsrisiko. Detaillierte Bodeninformationen sind auch weiter eine wichtige Voraussetzung für die zielgerichtete Auswahl von Waldbauverfahren und bodenschonenden Holzerntetechnologien. Und nicht zuletzt basieren Bodenschutz und -melioration (z. B. Bodenschutzkalkung) und die Definition von standortsspezifisch nachhaltig verträglichen Nutzungsintensitäten (Nährstoffentzug durch Biomassenutzung) auf hinreichend genauen Bodendaten.

Eine zentrale Bedeutung besitzen Standortmerkmale, die eine differenzierte Bewertung des **Wasser- und Lufthaushalts** ermöglichen (GAUER et al. 2011). Es interessieren hier zunächst die Einteilung in sickerwassergeprägte Böden sowie Böden mit Grund- oder Stauwassereinfluss. Kenntnisse

zu Wasserspeichervermögen, Luftkapazität, Durchwurzelbarkeit und Gründigkeit des Bodens erlauben weitere Differenzierungen. Mit detaillierten bodenhydraulischen Eigenschaften im Tiefenverlauf (Wassergehalts-Saugspannungs-Funktion, Funktion der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit) und zeitlich hoch auflösenden Klimadaten lassen sich numerische Wasserhaushaltsmodelle z.B. für die Ableitung von komplexen Indizes des Wasser- und Lufthaushalts anwenden (FALK et al. 2011, PETERS et al. 2011a,b, SCHWÄRZEL et al. 2011). Bodenhydraulische Eigenschaften sind meist nicht flächendeckend verfügbar, können jedoch mit Hilfe von Bodenart, Trockenrohdichte, Skelett- und Humusgehalt abgeschätzt werden (PUHLMANN & VON WILPERT 2011). Eng verknüpft mit dem Wasser- und Lufthaushalt ist der **Wärmehaushalt** des Bodens. Insbesondere dichte, feinporenreiche Böden mit hoher Wassersättigung erwärmen sich aufgrund der hohen Wärmekapazität des Wassers im Frühjahr langsamer (ZÖTTL 1958). Dadurch setzt das Wurzelwachstum später ein als auf lockeren, gut durchlüfteten Böden, da letztere sich schneller erwärmen.

Mit der **Nährstoffverfügbarkeit** wird in der Standortskartierung eine komplexe Größe erfasst. Sie kann zum einen das Nährstoffpotenzial, also die „nachsaffende Kraft des Bodens“ (KÖTTGEN & JUNG 1941) enthalten. Diese wird durch das Ausgangsgestein der Bodenbildung und dessen Potenzial zur Nährstofffreisetzung durch Verwitterung beschrieben (z. B. SVERDRUP 1990). Zum Beispiel werden im ostdeutschen Standorterkundungsverfahren dafür Stamm-Nährkraftstufen als vom Menschen schwer veränderbare Standortseigenschaft abgeleitet (KOPP & SCHWANECKE 1994). Die Zuordnung im Mittelgebirge und Hügelland erfolgt dabei über die Hilfsgrößen Ausgangssubstrat, Bodentyp sowie Standortseigenschaften (Stamm-Vegetationsformen) und bodenchemische Kennwerte von weitgehend unbeeinflussten Böden (SCHWANECKE 1970). Zur Stammnährkraft-Zuordnung im nordostdeutschen Tiefland wird auf den Artikel von KONOPATZKY (2016) in diesem Sonderheft verwiesen. Neben dem Potenzial des Standortes muss auch der bodenchemische Zustand bewertet werden. Dieser befindet sich unter mitteleuropäischen Bedingungen durch die Nutzungsgeschichte (z. B. Streunutzung) und Stoffeinträge in der Regel nicht mehr im natürlichen Gleichgewicht. Als Messgrößen dienen hier u. a. Humusgehalt, pH-Wert, C/N-Verhältnis, Kationenaustauschkapazität und Basensättigung sowohl im Mineralboden als auch in der Humusaufflage (WELLBROCK et al. 2006, EVERS et al. 2013). Im ostdeutschen Standorterkundungsverfahren werden Stamm-Nährkraftstufen (natürliches Standortspotenzial) und Zustands-Nährkraftstufen (chemisch charakterisierte Humuseigenschaften) unterschieden (WELLBROCK et al. 2015). Mithilfe der Zeigerwerte von Waldbodenpflanzen bzw. Artengruppen können zusätzlich Einschätzungen zur Trophie vorgenommen werden. Auch hier wird zwischen aktueller und potenzieller Trophie unterschieden. Diese sind nur identisch, wenn ungestörte Oberbodenverhältnisse vorherrschen (AK STANDORTSKARTIERUNG 2016).

Eine weitere Bedeutung haben Bodeninformationen für die Bewertung der **Sensibilität** gegenüber Umwelteinflüssen. Dazu zählen Erosionsanfälligkeit oder die Sensibilität für Verdichtung und Verformung durch Befahrung. Es interessieren aber auch die Pufferfähigkeit gegenüber Stoffeinträgen sowie zunehmend das nachhaltige Potenzial von unschädlichen Nährelementexporten durch intensivere Biomassennutzung (MEIWES et al. 2008, PRETZSCH et al. 2014).

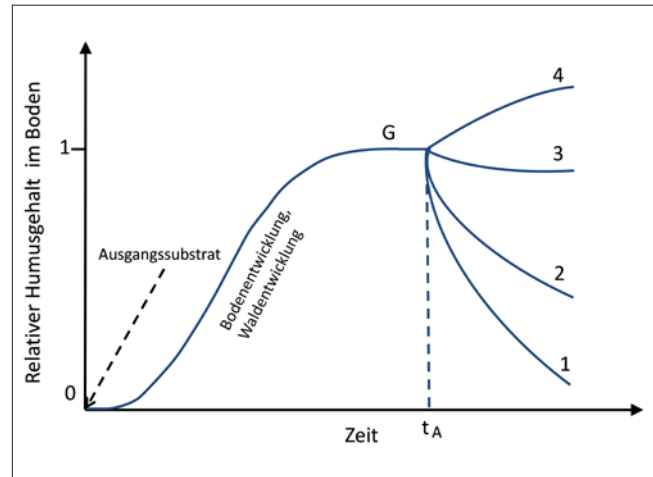


Abb. 1: Schema zur Entwicklung von Bodeneigenschaften am Beispiel von organischer Substanz (Humus) im Boden; G = natürlicher Gleichgewichtszustand, t_A = Zeitpunkt menschlicher Einflussnahme, 1 = Niederwaldwirtschaft und Streunutzung bzw. Rodung, 2 = Vollbaumnutzung, 3 = Derbholznutzung (Verbleib des Ast- und Kronenmaterials), keine N-Einträge, 4 = wie 3, jedoch mit erhöhten anthropogenen N-Einträgen (Zeichnung verändert in Anlehnung an JENNY 1941).

Fig. 1: Pattern for the development of soil properties using the example of organic substance (humus) in the soil; G = naturally equilibrium state, t_A = moment of human influence, 1 = coppice system and forest litter utilization resp. clearing, 2 = whole tree harvesting, 3 = compact wood utilization (material of branches and crown remains in the stand), no nitrogen inputs, 4 = same as 3, but with increasing anthropogenic nitrogen inputs (graph modified referring to JENNY 1941).

Bodeneigenschaften unterliegen permanenten Veränderungen. JENNY (1941) hat dies am Beispiel des Humusgehalts von Waldböden herausgearbeitet (Abb. 1). Das Ausgangssubstrat ist am Beginn der Bodenentwicklung humusfrei. Unter konstanten Bedingungen von Klima, Topographie und ungestörter Entwicklung von Bodenvegetation und Wald steigt der Humusgehalt so lange an, bis ein natürliches Gleichgewicht (G) zwischen Humusauf- und -abbau erreicht ist. Mit dem Zeitpunkt der menschlichen Einflussnahme (t_A) wird dieser natürliche Gleichgewichtszustand verändert. Intensive Niederwald- und Streunutzung oder gar Waldumwandlung in andere Nutzungsformen führen zu großen Humusverlusten (Szenario 1). Auch die Vollbaumnutzung führt zu starkem Humusverlust (Szenario 2). Bei einer Beschränkung auf die Entnahme von Derbholz und dem Verbleib von Ast- und Zweigmaterial (Nadeln) ist der Humusverlust gering oder wird durch natürliche Streu- und Stickstoffeinträge ausgeglichen (Szenario 3). Mit den derzeit anthropogen erhöhten Stickstoffeinträgen und den steigenden Holzzuwächsen ist bei gleichbleibender Holznutzung eine leichte Humusanreicherung zu erwarten (Szenario 4).

Die Dynamik der Bodenveränderungen ist merkmalspezifisch. Zudem ist die Richtung nicht zwingend konstant. Innerhalb weniger Jahrzehnte können Phasen von Humusaufbau Phasen mit Humusabbau folgen (JOHNSON et al. 2007). Auch nach den Ergebnissen der bundesweiten Bodenzustandserhebung (BZE II) verläuft die Entwicklung der organischen Kohlenstoffvorräte und der Humusqualität

in Abhängigkeit von Bodenform und Baumbestand recht unterschiedlich, wobei im Vergleich der Perioden 1987 bis 1992 und 2006 bis 2008 eine Kohlenstoffspeicherung von $0,41 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ im Mineralboden festgestellt wurde (GRÜNEBERG et al. 2014). Dagegen sind einige Bodeneigenschaften, z. B. die Korngrößenzusammensetzung und der Grobbodenanteil, relativ stabil. Es ist deshalb sinnvoll, für den Zeithorizont der forstlichen Standortskartierung veränderliche und relativ unveränderliche Bodeneigenschaften zu unterscheiden (Tab. 1).

Hydromorphe Standorte können sich durch jahrzehntelange Entwässerung oder Grundwasserstandsänderungen (z. B. KRÜMMELBEIN et al. 2012) stark verändern. In solchen Fällen ist die Aussagekraft historischer Standortinformationen kritisch zu bewerten. Dagegen sind die bodenphysikalischen Eigenschaften insbesondere der natürlich gewachsenen terrestrischen Bodenformen relativ konstant.

Im Vergleich zum forstlichen Umweltmonitoring ist zu unterscheiden, dass in der Praxis der forstlichen Standortskartierung für die Bodeneigenschaften in der Regel empirisch gewachsene Klasseneinteilungen verwendet werden. Das bedeutet, dass signifikante Trends zu Veränderungen von Bodeneigenschaften nicht zwangsläufig zu Umstufungen in der Standortskartierung führen. Zum Beispiel zeigen die Auswertungen zur Bodenzustandserhebung (GRÜNEBERG et al. 2014), dass die Änderungen der organischen Kohlenstoffkonzentrationen in den 16 dort ausgeschiedenen Bodengruppen in 22 von insgesamt 48 Tiefenstufen (0–5,

Tab. 1: Potenzielle Veränderlichkeit von ausgewählten Eigenschaften im Oberboden mesotropher natürlich entwickelter Böden (-- gering, +- mittel, ++ hoch).

Tab. 1: *Potential alterability of selected properties in the top soil of mesotroph naturally developed soils (-- low, +- medium, ++ high).*

Bodeneigenschaft	Zeithorizont [Jahre]		
	100	50	10
geologisches Ausgangssubstrat	--	--	--
Horizontierung	+-	+-	--
Feinbodenart	--	--	--
Grobbodenanteil	--	--	--
Trockenrohddichte	+-	+-	+-
Grundwassereinfluss	++	+-	+-
Stauwassereinfluss	+-	+-	--
Mächtigkeit und Qualität von Humusaufgaben	++	++	+-
Kohlenstoffgehalt	++	++	+-
C/N	++	++	++
Kationenaustauschkapazität	+-	+-	+-
Basensättigung	++	+-	+-
pH-Wert	++	++	++

5–10, 10–30 cm) signifikant sind (Signifikanzlevel 0,05). Umgerechnet in Humusgehalte führt das jedoch nur bei 12 Tiefenstufen zu einer Änderung der Humusstufe nach AK STANDORTSKARTIERUNG (2016).

2 Bodenheimformationen in den forstlichen Kartierverfahren der Länder (und der amtlichen Bodenkartierung)

Seit den Anfängen der modernen Standortskartierung (KRAUSS 1936) wurden Aufnahmeverfahren der Standort- und Bodenkartierung laufend weiterentwickelt. Aufgrund der föderalen Struktur bzw. Zuständigkeit werden in den einzelnen Bundesländern verschiedene Ansätze der Standortskartierung praktiziert. Diese Verfahren lassen sich auf zwei verschiedene Arbeitsweisen zurückführen. Bei der regionalen, zweistufigen Arbeitsweise werden in einem ersten Schritt aus regionalen Standortmerkmalen (Klima, Vegetation, Lage, Substrate) Wuchsbezirke als regionale ökologische Einheiten ausgeschieden. Im zweiten Schritt wird der Standortstyp innerhalb dieser Wuchsbezirke aus lokalen Standortmerkmalen (ökologische Artengruppen, Waldgesellschaft, Relief, Textur, Nährkraft, Wasserhaushalt, u. a.) als lokale ökologische Einheit abgeleitet. Im Gegensatz dazu werden in der überregionalen, einstufigen Arbeitsweise direkt Standortmerkmale aus den Bereichen Lage, Klima, Vegetation und Boden erhoben. Diese charakterisieren die Elemente des Standortstyps (Höhenstufe, Klima, Wasserhaushalt, Nährstoffausstattung, Boden und Relief), der daraus als ökologische Grundeinheit abgeleitet wird (GAUER 2009, ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 2016). Abbildung 2 gibt einen Überblick über die verschiedenen Standortserkundungsverfahren und ihre Arbeitsweise in den einzelnen Bundesländern.

Die Ergebnisse der Standortskartierungen in den einzelnen Bundesländern liegen als Flächendatensätze in Form der (digitalen) forstlichen Standortskarten vor. Neben den verfahrenstechnischen Unterschieden zwischen einzelnen Kartiersystemen (siehe nachfolgender Abschnitt) ist vor allem die Abdeckung der Waldfläche durch die Standortskarte relevant. Im Idealfall ist die Waldfläche flächendeckend kartiert, im bundesweiten Vergleich ist dies nur in Hessen der Fall. Oftmals liegen auch deutliche Unterschiede im Kartierstand an den Eigentumsverhältnissen. Der Stand der Kartierung ist dabei im Landeswald (Staatseigentum) meist höher als im Privat- und Körperschaftswald. Tabelle 2 enthält eine Übersicht über den Anteil der im Rahmen der Standortserkundung kartierten Waldfläche in den einzelnen Bundesländern. Zusätzlich sind alternative flächendeckend verfügbare Bodenheimformationen anderer Fachbehörden aufgeführt.

Im Folgenden wird die inhaltliche Ausrichtung der einzelnen Kartierverfahren skizziert. Von besonderem Interesse sind dabei eine Bodenprofilaufnahme mit genetischer Horizontierung, Informationen zu den Bodenarten in den einzelnen Horizonten, zum Grobbodenanteil sowie zur Trockenrohddichte. Diese relativ unveränderlichen Bodenheimformationen (vgl. Tab. 1) und Parameter ermöglichen die Berechnung bodenphysikalischer Eigenschaften aus den Kartierergebnissen.

Das regionale Südwestdeutsche Standortkundliche Verfahren in Baden-Württemberg ist sehr stark vegetationskundlich angelegt (vgl. ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 2016). Es existieren für die einzelnen Kartierobjekte ca.

Tab. 2: Charakterisierung der Forstlichen Standortskarten (Maßstab 1 : 5.000–1 : 10.000) als Flächendatensätze zur Ableitung von Bodeninformationen, ergänzt um alternativ flächendeckend verfügbare Bodeninformationen. Abkürzungen: BFD = Bodenflächendaten, BK = Bodenkarte, BÜK (ÜBK) = Bodenübersichts- bzw. Übersichtsbodenkarte, VBK (BKkonz) = Vorläufige (Konzept-) Bodenkarte, DGM = Digitales Geländemodell, DSM = Digital Soil Mapping, LW = Landeswald, PKW = Privat- und Körperschaftswald.

Tab. 2: Characterisation of forest site survey maps (scale 1 : 5.000–1 : 10.000) as areal dataset for the derivation of soil information, completed by alternatively available areal soil information. Abbreviations: BFD = soil area data, BK = soil map, BÜK (ÜBK) = general soil map, VBK (BKkonz) = preliminary (concept) soil map, DGM = digital elevation model, DSM = digital soil mapping, LW = state forest, PKW = private and entity forest.

Bundesland	Waldfläche [Mio ha]	Primäre Bodeninformationen zur Kartiereinheit	Kartierte Waldfläche [%]	Flächendeckend verfügbare Bodeninformation
BW	1,372	Tiefenlage, Bodenart, Skelett, TRD (Ökoserien/ähnliche Substrate)	78 ¹	DSM mit DGM10 (1 : 20.000)
BY	2,606	Bodenfarbe, Bodenart, Humus- und Kalkgehalt, Skelett, Entwicklungstiefe (Substrattyp)	ca. 80 PKW 99 LW ²	Bayerisches Standortinformationssystem (BaSIS, ÜBK 1 : 25.000)
HE	0,894	nur sekundäre Erfassung (Bodenprofil zur Absicherung vegetationskundlicher Zusammenhänge), sehr inhomogen	100 ³	1 : 25.000 (BFD25) und 1 : 50.000 (BFD50)
NS	1,205	Substratgruppe, Bodenart, Schichtung, Lagerung; Varianten, Referenzprofile	55 ¹	BK50 und STOK25 DSM, DGM10 KÖHLER et al. (2016)
NRW	0,910	basierend auf bodenkundlicher Landesaufnahme (BK5)	66 ⁴	BK50
RP	0,840	unterschiedliche Verfahrensintensitäten; sehr viele Referenzprofile	53 Standortstypen; 21 Standortsschätz.	1 : 50.000 (BKkonz) + DGM10, DGM 5
SL	0,103	Standortstypen nach Ökoserien und synoptischem Leitprofil	39 ⁵	BÜK 1 : 100.000, DGM12,5
SH	0,173	Substratgruppe, Bodenart, Schichtung, Lagerung; Varianten, Referenzprofile	80 ⁵	BK25
BB+BE	1,130	Feinbodenformen, Referenzprofile	80 ⁶	DSM mit DGM100 und BK300
MV	0,558	Feinbodenformen, Referenzprofile	94 ⁷	
ST	0,532	Lokalbodenformen, Referenzprofile	62 ⁸	VBK25
SN	0,533	Lokalbodenformen, Referenzprofile	ca. 90	BK50
TH	0,549	Lokalbodenformen, Referenzprofile	ca. 90	BK50 bzw. BÜK 200

¹WOLFF et al. (1999); ²MÜLLER (LW) & WEICINGER (PKW) pers. Mitteilung; ³REGIONALE PEFC-ARBEITSGRUPPE HESSEN e.V. (2015); ⁴MILBERT (2016); ⁵BENNING (2015); ⁶KONOPATZKY (2014); ⁷WIRNER pers. Mitteilung; ⁸ohne bereits kartierte Flächen des Bundesforst und Teile von Kippen, SCHULZ pers. Mitteilung

7.000 Weiserprofile aus Erläuterungsbänden, von denen ca. 1.000 digital vorliegen. Für die Standortseinheiten gibt es 43 Leitprofile (i. d. R. nach der Aufnahmeanleitung der Bodenzustandserhebung im Wald (BZE I) erhoben und analysiert) und auf gutachterlicher Basis aggregierte Leitprofile (Profil mit mittleren bodenphysikalischen Leitprofilen für eine regionalzonale Standortseinheit). Die Qualität und Vollständigkeit

der Profilinformatoren ist sehr inhomogen, so existieren beispielsweise für die aggregierten Leitprofile keine genetischen Bodenhorizonte. Die Texturanteile müssen fast ausschließlich als Mittelwerte aus der Körnungsansprache abgeleitet werden, Trockenrohdichte und Skelettgehalte sind überwiegend expertenbasiert hergeleitet. Auch die Zuordnung von Bodentypen zu Standortseinheiten ist von untergeordneter

Bedeutung, oftmals bestehen Unstimmigkeiten zwischen der Wasserhaushaltsstufe einer Standorteinheit und der Bodentypenangabe (PUHLMANN et al. 2015).

Die konventionelle Praxis der Standortkartierung in Bayern arbeitet regional, durchgeführt vom Verein für Forstliche Standortserkundung e.V. Dabei werden Wuchsgebiete nach physiogeographischen Bedingungen als regionale Einheiten ausgeschieden und durch die Standorteinheiten untersetzt. Als lokale ökologische Einheiten werden sie nach den Merkmalen Substrattyp, Geländewasserhaushalt, Geländemorphologie, Vegetation sowie standörtlichen Besonderheiten charakterisiert. Etwas vereinfacht bilden die Bayerischen Staatseinheiten die Standorteinheiten über Substrat und Wasserhaushalt in einem Geoinformationssystem ab (ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 2016). Parallel dazu wurde seit 2013 das neue digitale Standortinformationssystem BaSIS eingeführt, welches Kartenwerke unabhängig von der Eigentumsart landesweit verfügbar macht. Es umfasst Kartendarstellungen zu Klima, Wasser- und Lufthaushalt, bodenchemische Zustände und daraus abgeleitet, Anbaueignungen für die Baumarten. Die flächendeckende Verfügbarkeit der Bodeninformationen resultiert aus der Übersichtsbodenkarte ÜBK25, deren Einheiten die Grundlage für die Bodeneinheiten in BaSIS bilden. Sie werden untersetzt durch 2087 Bodenprofile unterschiedlicher Herkunft (Bodeninformationssystem, Beprobung im Rahmen des KLIP4-Projektes, Bodenzustandserhebung Wald II, Bodendauerbeobachtungsflächen, Waldklimastationen, etc.), die eine Ableitung bodenphysikalischer und bodenchemischer Kennwerte ermöglichen (ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 2016, METTE 2015).

Die Standortkartierung in Hessen ist als eine Teilkomponente in das Verfahren der Forsteinrichtung integriert. Es ist ein einstufiges Verfahren, die Zuweisung des Standortstyps erfolgt mithilfe von Standortmerkmalen der Bereiche Klima, Vegetation und Boden. Daraus wird auf die Elemente Wuchszone, Klimafeuchte, Geländewasserhaushalt und Trophie geschlossen, deren Ausprägung bestimmend für den Standortstyp ist (ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 2016). Nur sehr wenige Standorteinheiten sind mit qualitativ hochwertigen Bodenprofilinformationen hinterlegt. Die hohe kleinräumige Heterogenität der Waldböden spiegelt sich nicht in der inhaltlichen Auflösung der forstlichen Standortkartierung wider, sodass eine Ableitung bodenphysikalisch hinterlegter Leitprofile für Standorteinheiten nicht möglich ist. Stattdessen werden für die landesweit einheitliche Ableitung von physikalischen Bodeninformationen die Digitalen Bodenflächendaten von Hessen im Maßstab 1:25.000 bis 1:50.000 genutzt (STEINICKE & AHRENDTS 2015).

In Niedersachsen erfolgt die forstliche Standortkartierung nach dem regionalen Verfahren, wobei die Landesfläche zuerst nach klimatischen und geologischen Ausgangsbedingungen in Wuchsgebiete unterteilt wird. Diese Vorerkundung wurde in zwei geländeökologischen Schätzrahmen (Tiefeland; Bergland) zusammengeführt. Die Ausweisung von Standortstypen wird anhand von Merkmalen des Geländewasserhaushaltes, des Nährstoffhaushaltes, der Ausgangssubstrate und Lagerungsverhältnisse sowie der Vegetation unter Berücksichtigung von standörtlichen Besonderheiten innerhalb des jeweiligen Schätzrahmens vorgenommen (ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 2016). Für die kartierte Waldfläche (ca. 50 % der Landesfläche) stehen ca. 6.300 Datensätze von Bodenprofilen und Bohrkernen aus dem Landeswald Niedersachsens zur Verfügung, die mit Laboranalysen belegt sind

und zur Ableitung bodenphysikalischer Parameter nutzbar sind (HAFNER et al. 2016).

In Schleswig-Holstein wird wie in Niedersachsen kartiert und es kommt der geländeökologische Schätzrahmen für das pleistozäne Tiefland zur Anwendung. Für die auskartierten Standortstypen sind somit grundsätzliche Informationen zur Bodenart, Ausgangsmaterial, Humusgehalt, Skelettanteil sowie zur Lagerungsdichte verfügbar.

Bodenphysikalische Daten können darüber hinaus aus ca. 4.700 Datensätzen von Bodenprofilenaufnahmen abgeleitet werden (ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 2016, AHRENDTS & HAFNER 2016).

Die Standortkartierung in Nordrhein-Westfalen wurde bis 1998 in einem regionalen Verfahren durchgeführt. Zunächst erfolgte die Gliederung der Landschaft in Wuchsgebiete und -bezirke. Im Anschluss daran wurden die lokalen Standortstypen anhand einer Bewertung aller waldwachstumsrelevanten Umweltfaktoren festgelegt. Bodenkundliche Informationen wurden der Waldbodenkarte im Maßstab 1:5.000 entnommen, die mit detaillierten Bodenprofilinformationen untersetzt ist. Allerdings steht diese nicht flächendeckend zur Verfügung, und die Profildatensätze liegen nicht in digital verwertbarer Form vor (JANOTT 2015). Für nicht kartierte Flächen wird die Bodenübersichtskarte 1:50.000 genutzt, für die bis zu drei Bodenschichten, aber keine Horizonte und keine Angaben zur Lagerung bzw. Trockenrohddichte hinterlegt sind (ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 2016, JANOTT 2015). Seit 1998 werden in Nordrhein-Westfalen die Standortstypen digital klassifiziert und damit nicht mehr zwei- sondern einstufig. Hierfür werden digital und flächendeckend vorliegende Grunddaten zu Lage, Klima, Boden, Geologie und Vegetation genutzt, daraus Informationen zum Gesamtwasserhaushalt und der Trophie abgeleitet und in der Standortstypenkarte kombiniert. Bodendaten und bodenphysikalische Kennzahlen sind daraus nicht direkt ableitbar, sondern müssen aus Geofachdaten des Geologischen Dienstes Nordrhein-Westfalen hinzugezogen werden (ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 2016).

Die Standortkartierung in Rheinland-Pfalz arbeitet mit überregionalen Elementen. Den Standortstyp charakterisieren die Wärme-, Wasserhaushalts-, und ggf. die Stau- oder Grundnässestufe sowie die Substratreihe. Eine Substratreihe fasst Bodenformen mit ähnlichen bodenphysikalischen und bodenchemischen Eigenschaften zusammen, sie orientieren sich an den großen stratigraphischen Einheiten des Landes (Rheinisches Schiefergebirge, Buntsandstein). Damit werden primäre Bodeninformationen in diesem Kartierverfahren erhoben. Der Wasserhaushalt wird im Vergleich zu den Verfahren anderer Bundesländer quantitativ über Korrelationen zwischen Wuchsleistung, Niederschlagsgruppen, Relief und Exposition beurteilt (ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 2016). Neben der flächigen Karteninformation ist ein sehr umfangreicher Punktdatensatz von ca. 9.500 georeferenzierten Bodenprofilen verfügbar, von dem ca. 6.300 Profile vollständig digitalisiert sind. Von den georeferenzierten Profilen sind ca. 2.700 Bodenprofile mit Laboranalysen belegt (GAUER 2015), aus denen bodenphysikalische und -chemische Parameter abgeleitet werden. Die Ausscheidung forstlicher Wuchsgebiete und Wuchsbezirke ist parallel zur Anpassung an die zweistufigen Verfahren erfolgt. Unmittelbar verfahrensrelevant ist die weitere Unterteilung in Niederschlagsgruppen und Wärme(Höhen)stufen.

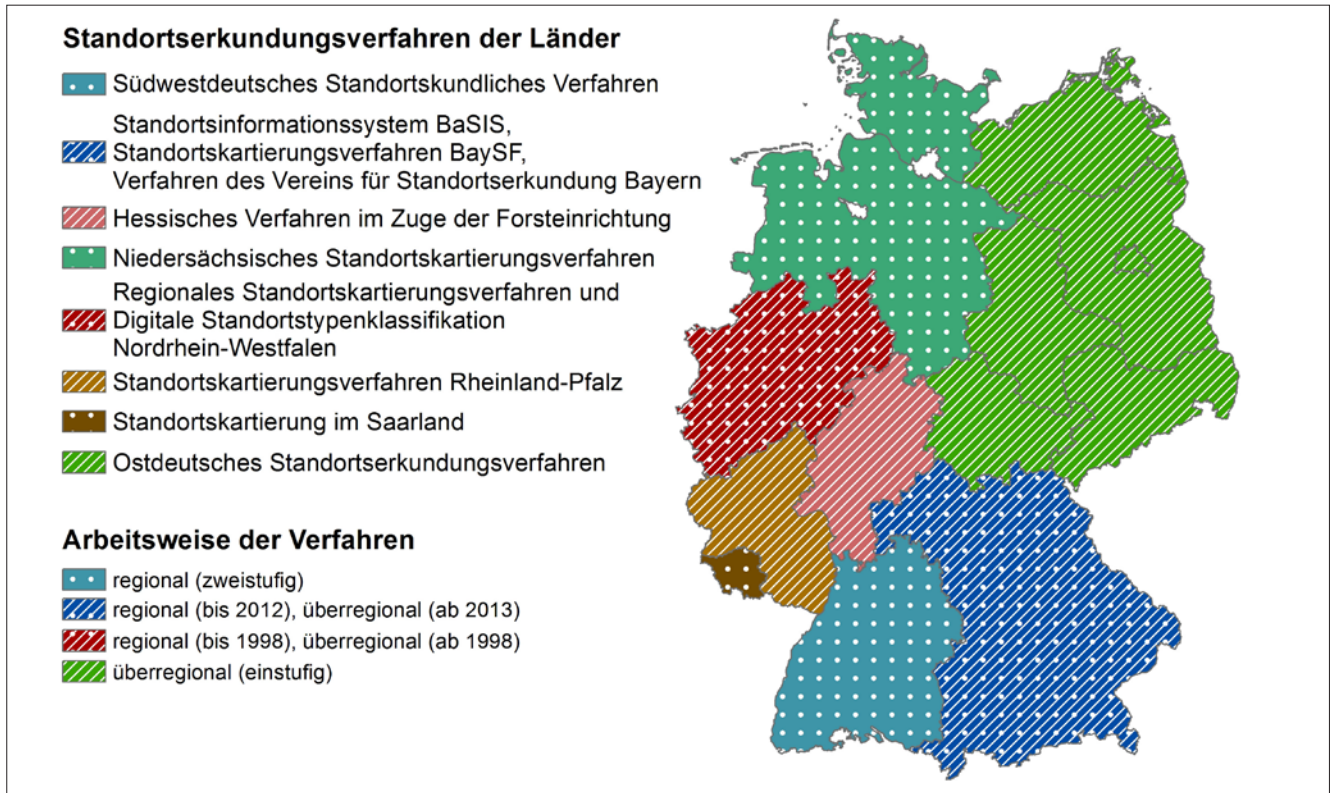


Abb. 2: Übersicht der Verfahren der Forstlichen Standortserkundung in den einzelnen Bundesländern. Weiße Punkte zeigen die regionale Arbeitsweise und weiße Schraffur die überregionale Arbeitsweise der Verfahren. Kombinationen dieser Signatur weisen auf eine Verfahrensänderung hin. Zusammengestellt in Anlehnung an ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016) und VON LÖWIS (2013).

Fig. 2: Summary of the different systems of forest site condition survey in the federal states of Germany. White points indicate the regional mapping procedure and white hatching the transregional mapping procedure. Combinations of both signatures suggest changes in the mapping procedure. Compiled referring to ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016) and VON LÖWIS (2013).

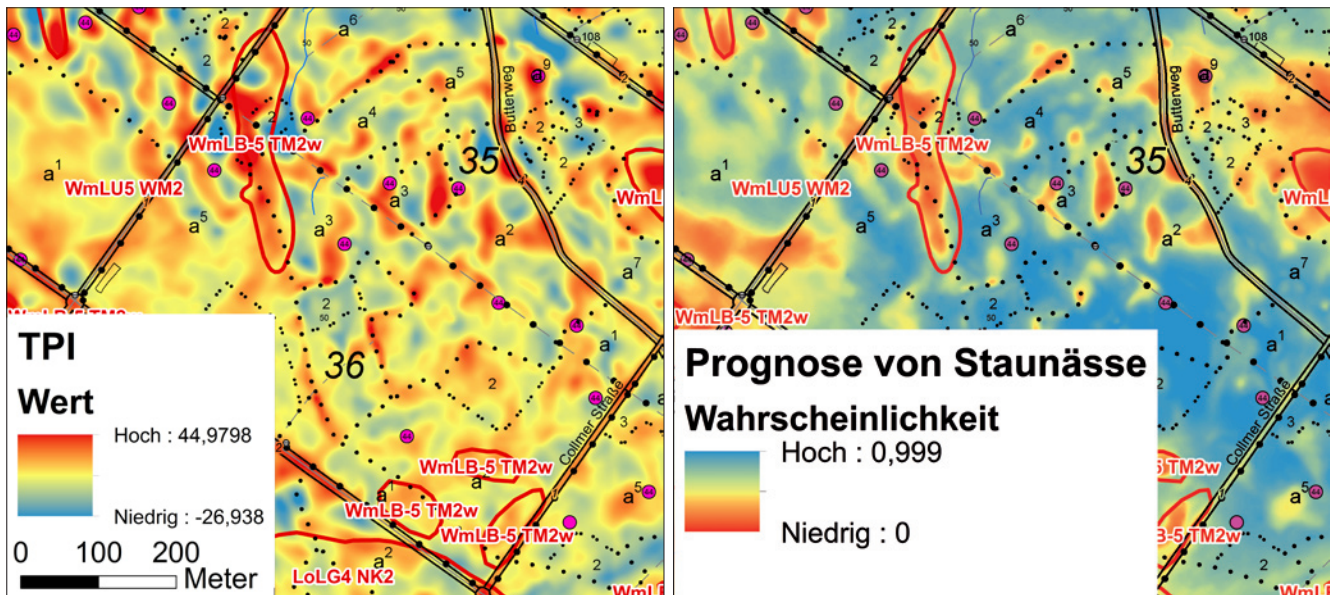


Abb. 3: links: Topographic Position Index (erstellt mit SAGA-GIS, 200 m-Radius); rechts: Modellprognose für das Auftreten von Staunässe mittels hyperskaliger Reliefanalyse (ConMap), Lerndaten der Standortskarte und Random-Forest-Klassifikation (BEHRENS unveröffentlicht); ursprüngliche DGM-Rasterweite 2 m, geglättet und resampled auf 4 m; konventionelle Standortskarte: rot umrandete Standortformen, violette Punktensignaturen für kleinflächig geringeren Staunässeinfluss.

Fig. 3: left: topographic position index (calculated in SAGA-GIS, 200 m radius); right: Prediction of stagnant conditions via multi-scale terrain analysis (ConMap), training data of forest site map and random forest classification (BEHRENS unpublished); original DEM raster width 2 m, filtered and resampled to 4 m; conventional forest site map: red framed site forms and violet point signatures for small area with lower influence of stagnant water.

Die forstliche Standortskartierung im Saarland arbeitet mit einem regionalen, zweistufigen Verfahren. In Abhängigkeit vom Klima wurde die Landesfläche in zwei Wuchsgebiete aufgeteilt, diese untergliedern sich anhand der geologischen Ausgangsbedingungen nochmals in fünf Wuchsbezirke. In den Wuchsgebieten wurden dann Ökoserien ausgeschrieben (ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 2016). Während der Staatswald im Saarland flächendeckend kartiert ist, liegen für den Privat- und Körperschaftswald nur sehr spärliche Informationen vor. Damit deckt die Standortskarte nur ca. 39 % der saarländischen Waldfläche ab. Bodenprofilaufnahmen sowie Laboranalysen für die Ökoserien sind nicht verfügbar (persönliche Mitteilung ERICH FRITZ 2014). Alternativ steht für die Ableitung von Bodeninformationen nur die Bodenübersichtskarte im Maßstab 1 : 100.000 (BÜK 100) und Bodenprofile aus dem Saarländischen Bodeninformationssystem (SaarBIS) zur Verfügung. Die georeferenzierten Bodenprofile aus SaarBIS können nur über ihre räumliche Lage den Legendeneinheiten der BÜK 100 zugeordnet werden und die Qualität der Bodenprofildaten ist sehr inhomogen, sodass die Ableitung bodenphysikalischer Kenngrößen schwierig ist (persönliche Mitteilung DRESCHER-LARRES 2015, BENNING 2015).

In den Bundesländern Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen wird das ostdeutsche Standortskartierungsverfahren als überregionales einstufiges Verfahren angewendet (Details in PETZOLD et al. 2016a,b). Die Standortform bildet die Kartiereinheit und integriert Einzelstandorte mit gleichen ökologischen Eigenschaften. Waldbaulich vergleichbare Standortformen werden zu Standortformengruppen aggregiert. Im Rahmen der Kartierung werden über Bohrpunkte (Tiefeland) und Tastgruben (Mittelgebirge/Hügelland) flächendeckend Bodeninformationen aufgenommen. Ein wesentliches Element ist dabei die Kartierung der Bodenform, die eine wichtige Komponente bei der Ausscheidung der Standortform ist. Die Bodenform ist nach periglazialen Perstruktions- und Umlagerungsreihen gegliedert und beinhaltet sowohl Horizontfolgetyp als auch Substratfolgetyp (ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 2016). Die Verfügbarkeit und Qualität der Bodenprofil Datensätze ist von Bundesland zu Bundesland verschieden. In Sachsen sind ca. 1.000 Weiserprofile und in Thüringen ca. 1.800 Bodenprofile georeferenziert und digitalisiert (PETZOLD et al. 2016a). In Sachsen-Anhalt existieren digital verarbeitbar ca. 500 Leitprofile, die über die Jahre hinweg gutachterlich als charakteristische Profile für bestimmte Lokalbodenformen zusammengestellt wurden (persönliche Mitteilung SILKE HAFNER 2015, HAFNER et al. 2016). Die originalen Profilaufnahmen werden derzeit Schritt für Schritt recherchiert und digitalisiert (persönliche Mitteilung STEPHAN SCHULZ 2015). In Brandenburg sind schätzungsweise 600.000 analoge Bohrpunktaufnahmen vorhanden. Nur ein kleiner Teil dieser Bohrpunktaufnahmen (ca. 6.000), aus Kartierungen ab ca. 2006, liegt in digitaler Form als georeferenzierte Bohrpunkt datenbank vor (persönliche Mitteilung ALEXANDER KONOPATZKY 2016). Das Archiv der Standortserkundung in Mecklenburg-Vorpommern umfasst ca. 190.000 Bohrpunktformulare sowie ca. 20.000 Bodenprofil aufnahmen (sog. Grubenformulare), die noch nicht georeferenziert sind. Die Altunterlagen werden schrittweise gesannt und sollen zukünftig räumlich verortet und in eine Datenbank überführt werden (persönliche Mitteilung MICHAEL WIRNER 2016). Durch die Vielzahl an Weiserprofil-, Bohrpunkt- und Tastgrubenaufnahmen sowie die bodenphysikalischen und bodenchemischen Laboranalysen sind detaillierte Bodeninformationen für die Kartiereinheiten verfügbar.

Innerhalb von Bundesländern oder über Ländergrenzen hinweg mit scheinbar einheitlichen Kartierverfahren kann es zu Abweichungen der Standorts- und Bodenansprache und methodisch bedingten Klassifikationsunterschieden von ähnlichen Standorten kommen. Beispielsweise unterscheidet das Ostdeutsche Kartierverfahren zwei Ausdifferenzierungen des Kartiersystems in Tieflandsbereiche einerseits und ins Mittelgebirge/Hügelland andererseits. Hier existieren z. B. bei der Ausweisung der Nährkraftstufen Unterschiede. Auch in anderen Bundesländern wie Rheinland-Pfalz und Bayern existieren regional bzw. institutionell verschiedene Systeme, deren Ergebnisse verglichen und ggf. harmonisiert werden müssen. Ein wesentlicher Faktor für Unterschiede ist dabei die inzwischen über 50-jährige Kartiergeschichte. Nicht nur die aktuell in der Forstlichen Standortsaufnahme (7. Aufl., AK STANDORTSKARTIERUNG 2016) festgelegten Horizontsymbole unterscheiden sich mehr oder weniger stark von den Symbolen der Forstlichen Standortsaufnahme 1958 der 1. Auflage. Der Grad an detaillierten Definitionen hat zugenommen, selbst das Körnungsdreieck hat sich in Bereichen deutlich verändert. Die bodenchemische und -physikalische Analysemethodik hat sich weiterentwickelt.

3 Perspektiven zur Erfassung von Bodeninformationen in der Standortskartierung

Die konventionelle Standortskartierung leistet einen wichtigen Beitrag für die Schaffung von räumlich hoch aufgelösten Bodenmerkmalen. Das ist insbesondere der Fall, wenn detaillierte Bodeneigenschaften entweder als Punktinformation (Weiserprofile mit bodenkundlicher Aufnahme und evtl. Laboranalysen) oder Flächeneinheiten (Bodenformen, Substratreihen, Hydromorphiegrad, Humusaufgaben) erfasst werden, wie es zum Beispiel in Niedersachsen oder im ostdeutschen Erkundungsverfahren praktiziert wird. Veränderliche Zustandseigenschaften (chem. Laboranalysen, Weiserarten aus Vegetationsaufnahmen) aus länger zurückliegenden Kartierkampagnen sind durch stattfindende Standortveränderungen jedoch vorsichtig zu bewerten.

Intensive Feldarbeit ist unter den derzeitigen Rahmenbedingungen für viele Forstbetriebe jedoch nicht finanzierbar. Die bestehenden Kartierlücken lassen sich deshalb mittelfristig nicht schließen. Auch eine flächendeckende Aktualisierung oder Ersterfassung von variablen Zustandseigenschaften ist mit konventionellen Kartiermethoden kaum zu leisten.

Gleichzeitig steigt jedoch der Bedarf an räumlich hoch aufgelösten und aktuellen Bodendaten. Das gilt nicht nur für die ursprünglichen Adressaten der forstlichen Standortskartierung. Das Interesse an den Bodendaten steigt auch im Bereich der angewandten Umweltwissenschaften, z. B. für die hydrologische Modellierung oder die Biodiversitätsforschung. Mit der Notwendigkeit, die Wälder an den Klimawandel anzupassen, tritt das Thema Resilienz, also die Fähigkeit von Waldökosystemen nach Störungen, z. B. Dürreperioden, wieder in den Ausgangszustand zurückzukehren, in den Vordergrund der Diskussion (BOLTE 2013). Auch für diesen ganzheitlichen Ansatz, die Resilienz von Waldökosystemen abzuschätzen, sind qualitativ hochwertige und flächendeckend verfügbare Bodendaten eine wichtige Grundlage.

Welche Perspektiven ergeben sich aus der Diskrepanz zwischen Kartierlücken, teils veraltenden Daten und

eingeschränkten Möglichkeiten der Fortführung intensiver Feldkartierung auf der einen Seite sowie auf der anderen Seite dem steigenden Bedarf an hochauflösenden quantitativen Bodendaten?

Die Bodeninformationen aus Altdaten der Standortskartierung haben potenziell einen sehr hohen Wert nicht nur für die Forstpraxis. Der Wert richtet sich allerdings sehr nach der Qualität der verfügbaren, oft noch analog vorliegenden Informationen. Deshalb ist zunächst sehr kritisch die Qualität der vorhandenen Punktinformationen (Profildaten aus Feldaufnahmen und Laboranalysen von Weiserprofilen) sowie der Flächendaten (Konsistenz von Abgrenzungen der Kartiereinheiten) zu prüfen. Besondere Bedeutung haben georeferenzierbare Laboranalysen von Weiserprofilen (vgl. PETZOLD et al. 2016a, AHRENDTS et al. 2016). Aber auch standardisiert erhobene Kartiermerkmale aus der Feldarbeit, beispielsweise zur Textur, können qualitativ hochwertige Daten liefern (Vos et al. 2016).

Punktinformationen müssen georeferenziert sowie die dabei nicht auszuschließenden Lageungenauigkeiten dokumentiert werden. Die Sachdaten müssen datenbanktauglich, d. h. eindeutig und vollständig ablegbar sein. Das beinhaltet zum einen die Harmonisierung und den Abgleich von unterschiedlichen Labormethoden sowie empirisch erhobenen Klassendaten. Zum anderen müssen geeignete Verfahren angewendet werden, um auftretende Lücken in den Datensätzen zu füllen, d. h. fehlende Daten zu ergänzen. Für eine erfolgreiche Aufarbeitung von solchen Altdaten ist eine sehr gute Dokumentation der zum Zeitpunkt der Aufnahme angewendeten Labormethoden und Kartierregeln (Kartieranweisungen, Erläuterungsbände) notwendig, um die Daten interpretieren und in den heutigen Wissensstand überführen zu können. Im günstigsten Fall kann (noch) auf das nicht niedergeschriebene Wissen erfahrener Kartierer zurückgegriffen werden.

Noch kritischer als Punktinformationen sind digitalisierte und georeferenzierte Flächendaten, z. B. alte Standortskarten zu werten. Wertvoll sind solche Daten insbesondere, wenn diese mit detaillierten Feldkartierungen und zusätzlichen Bodeneinschlägen zur Flächenabgrenzung erhoben wurden. Nachteilig können sich dagegen Lageungenauigkeiten in Verbindung mit Abgrenzungen durch Schrittmaß auswirken. Ebenso können unvollständige Signaturen oder fehlende Erläuterungen die Interpretation der Standorts- bzw. Bodenverhältnisse zum Aufnahmezeitpunkt erschweren.

Die Entwicklung der Informationstechnologien allgemein und das Aufkommen von geografischen Informationssystemen (GIS) im Speziellen haben auch der Standortskartierung neue Möglichkeiten für die Darstellung und Erzeugung von Bodeninformationen eröffnet. Zum einen können die eigenen Daten digital räumlich wesentlich besser aufbereitet und dargestellt werden als in analogen Karten, zum anderen stehen parallel auch wichtige Basisinformationen, die üblicherweise von Dritten übernommen werden, wie digitale Geländemodelle (DGM), Klimadaten, Vegetationsdaten aus der Fernerkundung digital und in hoher Auflösung zur Verfügung. Das ermöglicht einerseits eine Qualitätsverbesserung und neue Auswertungsoptionen vorhandener Daten für die Standortskartierung (vgl. SCHULZ 2003). Andererseits lässt sich mit den vorhandenen Flächen-Daten auch die Bodenfunktionsgleichung von JENNY (1914) für die Erzeugung von Bodeneigenschaften anwenden:

$$S = f(Cl, O, R, P, T)$$

S	=	Boden- oder Standortseigenschaft
Cl	=	Klimaparameter
O	=	Organismen (Flora + Fauna)
R	=	Reliefparameter (z. B. Exposition, Hangneigung, komplexe Reliefparameter)
P	=	Ausgangsmaterial der Bodenbildung (Gestein)
T	=	Zeit

Für die Daten-Verarbeitung stehen leistungsfähige Softwarepakete zur Verfügung. Neben den kommerziellen ESRI-Produkten (ArcGIS) haben sich freie Software-Pakete, z. B. SAGA – System for Automated Geoscientific Analysis (CONRAD et al. 2015, HENGL et al. 2007) oder QGIS (QGIS DEVELOPMENT TEAM 2016) etabliert. Einfache Routinen zur Erstellung von Reliefanalysen erbringen räumliche Muster, die mit der Verteilung von Bodenformen oder Standortseigenschaften korrelieren (Abb. 3 links). Über die Kopplungsmöglichkeiten von SAGA mit der ebenfalls freien Software R (R CORE TEAM 2016) können weitere Funktionalitäten implementiert werden. Relativ neue Methoden der Reliefanalyse stellen hyperskalige und auf statistischen Nachbarschaftsanalysen beruhende Ansätze, z. B. ConMap und ConStat von BEHRENS et al. (2010, 2014) dar. Von den Autoren wurde gezeigt, dass solche Ansätze in Verbindung mit Algorithmen des maschinellen Lernens eine sehr hohe Prognosefähigkeit von Bodeneigenschaften erzielen können. In Abbildung 3 ist beispielhaft dargestellt, dass ein einfacher Reliefparameter zumindest teilweise die räumliche Variabilität von nach dem ostdeutschen Verfahren kartierten Standortformen im Wermisdorfer Wald nachbildet. Deutlich besser werden die Verhältnisse jedoch mit der Modellprognose zum Staunässeinfluss getroffen. Die Validierung im Feld erlaubte Korrekturen bei der Abgrenzung und Lagegenauigkeit von Punktsignaturen. Die bisher nicht erfasste kleinräumige Variabilität konnte bestätigt werden.

Solche Prognosemodelle ermöglichen somit in der Kartierpraxis eine wesentlich bessere Abgrenzung und Disaggregation von einzelnen Standortsinformationen, insbesondere aber auch der Zuordnung der zu kartierenden Bodenformen (Substratabfolge + Bodentyp). Flächig vorhandene Umweltdaten, die in Modellierungen einfließen, müssen allerdings auch die notwendige inhaltlich-räumliche Auflösung besitzen. Diese sollten dem Äquivalenzmaßstab von Standortskarten entsprechen. Für den Maßstab 1:10.000 sind deshalb nach der Formel von TOBLER (1987) mindestens Rasterweiten z. B. des DGM von 5 m anzustreben.

Eine weitere Anwendung zur Verwertung und gleichzeitig Erzeugung von Bodeninformationen in Verbindung mit GIS ist der sogenannte „Lückenschluss“. Dabei werden Profildaten in Verbindung mit kartierten „Lerngebieten“ mittels digitaler Bodenkartierung (DSM) und kontinuierlich vorhandene Umweltvariablen – vor allem dem DGM – verwendet, um für Bereiche ohne oder unzureichenden Standortsinformationen (Kartierung) die erforderlichen Standortsinformationen zu extrapolieren. Komponenten des Standorts werden dabei in Einzelaspekte zerlegt (Wasserhaushalt, Staunässe, Substrate), komplexe Bodenstrukturen (Substratreihen) auch in Teilaspekte (z. B. Vorhandensein oder Mächtigkeit von Hauptlagen). Reliefattribute haben meist in Verbindung mit geologischen Informationen den höchsten Erklärungswert, insbesondere wenn es gelingt, neben Punkt- und Catenen-Informationen auch regionale bis überregionale Aspekte

einzu beziehen. Vorhandene Profildaten sind wichtige Stützen für die Verifizierung (GAUER et al. 2016). Diese skizzierten Verfahren des DSM können somit eine Grundlage für die Aktualisierung und Vervollständigung klassischer Standortskarten zur Darstellung von Stammeigenschaften (z. B. Bodenformen) sein (vgl. KÖHLER et al 2016).

ZIRLEWAGEN et al. (2003, 2007), VON WILPERT et al. (2016) und HARTMANN et al. (2016) zeigen, dass die flächige Darstellung von Bodeneigenschaften auch auf aktuellen Messdaten, z. B. an den Punkten der Bodenzustandserhebung, aufbauen kann. Solche Daten sind besonders wertvoll, da damit auch die Zustandseigenschaften, insbesondere von Bodenchemie und Humusaufgaben abgebildet werden. Zu berücksichtigen ist, dass die bisher einfließenden Reliefanalysen auf Basis von DGMs mit Rasterweiten von 25 m und neuerdings auch 10 m erstellt werden. Damit entstehen Reliefanalysen mit Äquivalenzmaßstäben von 1:50.000 bzw. 1:20.000. Sie entsprechen damit noch dem Maßstab von Bodenübersichtskarten. Darüber hinaus wird die räumlich scharfe Prognosegüte dadurch limitiert, dass die Stichprobenpunkte auf einem 8 × 8 km-Raster bzw. bei Verdichtungen auf einem 4 × 4 km-Raster liegen (WELLBROCK et al. 2015, VON WILPERT et al. 2016). Wünschenswert ist also ein höherer Stichprobenumfang. Inhomogen vorliegende Altdaten können diese Lücke kaum schließen, weil für die variablen, chemischen Eigenschaften des Mineralbodens und der Humusaufgabe ein einheitlicher Aufnahmezeitpunkt mit einheitlichen Labormethoden notwendig ist. Auch die Netzverdichtungen der BZE müssen durch die zeitlichen Verschiebungen bei der Aufnahme entsprechend kritisch bewertet werden. Nicht zuletzt verhindern häufig die nicht unerheblichen Kosten für die standardisierte Probennahme und Laboranalytik die Vergrößerung der Stichprobenumfänge.

Ein Ausweg könnten optimierte Strategien zur Probennahme bieten, z. B. Stratified Random Sampling oder Conditioned Latin Hypercube Sampling (MINASNY & MCBRATNEY 2006). Damit würde man mit zusätzlichen Probennahmen in Ergänzung zu den bestehenden Rasternetzen der BZE eine bessere Repräsentanz im Untersuchungsgebiet erzielen. Um den zusätzlichen Aufwand für die Laboranalytik in Grenzen zu halten, stehen indirekte Messverfahren aus dem Bereich der Geophysik, insbesondere der optischen Spektroskopie im sichtbaren und nahen Infrarotbereich (VNIR-Spektroskopie) zur Verfügung (NOCITA et al. 2015). Diese Methode hat den Vorteil, dass bei relativ geringem Aufwand für die Probenvorbereitung hohe Probenumfänge zerstörungsfrei in kurzer Zeit gemessen werden können. Dass die VNIR-Spektroskopie – bisher überwiegend auf landwirtschaftlichen Flächen eingesetzt – auch erfolgreich auf Waldstandorten zur Analyse von Humushorizonten angewendet werden kann, zeigten CHODAK et al. (2007). Die VNIR-Spektroskopie setzt voraus, dass zwischen gemessenem Spektrum und der gesuchten Bodeneigenschaft eine Korrelation besteht. Somit müssen zunächst mit standardmäßig erhobenen Laboranalysen und den zugehörigen Spektren von vorhandenen Proben Regressionsmodelle aufgebaut werden. Dafür bietet sich Material aus den Rückstellproben der Standortskartierung oder der BZE an. Danach können mit den kalibrierten Modellen und den gemessenen Spektren von Boden- und Humusproben die gesuchten Bodeneigenschaften geschätzt werden.

Die forstliche Standortskartierung kann einen wertvollen Beitrag zur Bereitstellung von qualitativ hochwertigen Bodeninformationen leisten. Voraussetzung dafür sind jedoch standardisierte und feldbodenkundlich belastbare Auf-

nahmeverfahren. Eine zunehmende Bedeutung erhält die digitale Aufarbeitung und Harmonisierung von Altdaten. Praxistaugliche Methoden aus der Bodenforschung, insbesondere einige Modellierungstechniken der digitalen Bodenkartierung sowie indirekte, kostengünstige Messverfahren eröffnen neue Möglichkeiten, Kartierlücken zu schließen und die Qualität von Bodeninformationen zu erhöhen. Egal ob „konventionelle“ Standortskartierung oder modellgestützte Kartierverfahren – eine enge Verzahnung von bodenkundlichem, ökohydrologischem und forstlichem Sachverstand sowie eine solide Felderfahrung werden auch in Zukunft benötigt. Dies ist umso mehr der Fall, wenn komplexe Prozesse zu Bodenveränderungen führen, die erkannt, forstökologisch interpretiert sowie für die forstliche Praxis flächendeckend dargestellt werden müssen.

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. Die mit forstlicher Standortskartierung befassten Institutionen in den Bundesländern unterstützten uns mit zusätzlichen Informationen und Hinweisen. Außerdem danken wir den beiden anonymen Gutachtern für die wertvollen Hinweise zur Verbesserung des Manuskriptes.

Literatur

- AHRENDTS, B., HAFNER, S., EVERS, J., STEINICKE, C., SCHMIDT, W., MEESBURG, H. (2016): Regionalisierung bodenphysikalischer Parameter für Waldstandorte in Sachsen-Anhalt. Beiträge aus der NW-FVA, Band 14:1-13.
- AHRENDTS, B., HAFNER, S. (2016): Dokumentation zur Ableitung der Bodendaten an den BWI-Traktecken des Bundeslandes Schleswig-Holstein (Modul 1). Projektbericht.
- ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016): Forstliche Standortsaufnahme – Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. 7. Aufl., IHW-Verlag, Eching: 400 S.
- BEHRENS, T., SCHMIDT, K., RAMIREZ-LOPEZ, L., GALLANT, J., ZHU, A.-X., SCHOLTEN, T. (2014): Hyper-scale digital soil mapping and soil formation analysis. *Geoderma* **213**: 578-588, <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.07.031>
- BEHRENS T., SCHMIDT K., ZHU, A.-X., SCHOLTEN T. (2010): The ConMap approach for terrain based digital soil mapping. *Eur. J. Soil Sci.* **61**: 133–143.
- BENNING, R. (2015): Dokumentation zur Ableitung der Bodendaten an den BWI-Traktecken des Bundeslandes Saarland (Modul 1). Projektbericht.
- BOLTE, A. (2013): Resilienz und Klimawandel. *AFZ/DerWald* **17**: 28-30.
- CHODAK, M., NIKLIŃSKA, M., BEESE, F. (2007): Near-infrared spectroscopy for analysis of chemical and microbiological properties of forest soil organic horizons in a heavy-metal-polluted area. *Biol. Fertil. Soils* **44**: 171-180, doi:10.1007/s00374-007-0192-z
- CONRAD, O., BECHTEL, B., BOCK, M., DIETRICH, H., FISCHER, E., GERLITZ, L., WEHBERG, J., WICHMANN, V., BÖHNER, J. (2015): System for Automated Geoscientific Analysis (SAGA) v. 2.1.4. *Geosci. Model Dev.* **8**: 1991-2007, doi:10.5194/gmd-8-1991-2015.

- EVERS, J., PAAR, U., EICHHORN, J. (2013): Bestätigt die BZE die Trophieeinschätzung der forstlichen Standortskartierung? *AFZ/DerWald* **14**: 11-15.
- FALK, W., OSENSTETTER, S., DIETZ, E. (2011): Konzept für ein quantitatives Verfahren zur Kennzeichnung des Lufthaushaltes von Waldböden in Bayern. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **12**: 93-99.
- GAUER, J., BEHRENS, T., STEINRÜCKEN, U. (2016): Standort-Prognose als effiziente Methode zur Beschaffung von Standortdaten in Rheinland-Pfalz. *Forstarch*. **87**: 121-131.
- GAUER, J. (2015): Dokumentation zur Ableitung der Bodendaten an den BWI-Traktecken des Bundeslandes RLP (Modul 1). Projektbericht.
- GAUER, J., FEGER, K.H., SCHWÄRZEL, K. (2011): Erfassung und Bewertung des Wasserhaushalts von Waldstandorten in der forstlichen Standortskartierung: Gegenwärtiger Stand und künftige Anforderungen. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **12**: 7-16.
- GAUER, J. (2009): Böden als Waldstandorte – BLUME, H.-P. u. a. (Hrsg): *Handbuch der Bodenkunde*. 32. Erg.Lfg. 06/09, 4.2.1, WILEY-VCH, Weinheim: 79 S.
- GRÜNEBERG, E., ZICHE, D., WELLBROCK, N. (2014): Organic carbon stocks and sequestration rates of forest soils in Germany. *Glob. Change Biol.* **20**: 2644-2662.
- HAFNER, S., AHREND, B., KÖHLER, M. (2016): Dokumentation zur Ableitung der Bodendaten an den BWI-Traktecken des Bundeslandes Niedersachsen (Modul 1). Projektbericht.
- HARTMANN, P., BUBERL, H., PUHLMANN, H., SCHÄFFER, J., TREFZ-MALCHER, G., ZIRLEWAGEN, D., VON WILPERT, K. (2016): Waldböden Südwestdeutschlands – Ergebnisse der Bodenzustandserhebungen im Wald von 1989–1992 und 2006–2008. Verlag Kessel, Remagen-Oberwinter: 328 S.
- HENGL, T., GROHMANN, C.H., BIVAND, R.S., CONRAD, O., LOBO, A. (2009): SAGA vs GRASS: A Comparative Analysis of the Two Open Source Desktop GIS for the Automated Analysis of Elevation Data. *Proc. Geomorphometry 2009*, Zurich, 31.08.–02.09.2009.
- JANOTT, M. (2015): Dokumentation zur Ableitung der Bodendaten an den BWI-Traktecken des Bundeslandes Nordrhein-Westfalen. Projektbericht.
- JENNY, H. (1941): *Factors of soil formation: A system of quantitative pedology*. McGraw-Hill, New York: 320 S.
- JOHNSON, D.W., TODD, D.E., TRETIN, C.F., SEDINGER, J.S. (2007): Soil carbon and nitrogen changes in forests of walker branch watershed, 1972 to 2004. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **71**: 1639–1646.
- KONOPATZKY, A. (2016): Bodenlagenbasierte Ableitung der Stamm-Nährkraftaus lithochemieabhängigen Grundwerten als Ergänzung zur üblichen Bewertung von Gesamtprofilen der Standortskartierung nach nordostdeutschem Verfahren SEA95. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **16**: 41-51.
- KONOPATZKY, A. (2014): Waldmonitoring Bericht 2014 – Standortskartierte Fläche. URL: http://www.forstliche-umweltkontrolle-bb.de/info/monitoring/2.1b_Standortausstattung.pdf [access 15-07-2016].
- KOPP, D., SCHWANECKE, W. (1994): *Standörtlich-naturräumliche Grundlagen ökologischer Forstwirtschaft. Grundzüge von Verfahren und Ergebnissen der forstlichen Standortserkundung in den fünf ostdeutschen Bundesländern*. Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin, 248 S.
- KÖHLER, M., STEINICKE, C., EVERS, J., MEESENBURG, H., AHREND, B. (2016): Modellierung von Wasserhaushalts- und Nährstoffstufen im Rahmen der Niedersächsischen forstlichen Standortskartierung. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **16**: 83-94.
- KÖTTGEN, P., JUNG, L. (1941): Zur Frage der nachschaffenden Kraft des Bodens. *Z. Bodenkd. Pflanzenernähr.* **24**: 257-265.
- KRAUSS, G.A. (1936): *Aufgaben der Standortskunde*. Jahresber. Dtsch. Forstvereins, Berlin: 319 S.
- KRÜMMELBEIN, J., BENS, O., RAAB, T., NAETH, A. (2012): A history of lignite coal mining and reclamation practices in Lusatia, eastern Germany. *Can. J. Soil Sci.* **92**: 53-66.
- MEIWES, K.J., ASCHE, N., BLOCK, J., KALLWEIT, R., KÖLLING, C., RABEN, G., VON WILPERT, K. (2008): Potenziale und Restriktionen der Biomassenutzung im Wald, *AFZ/DerWald* **63** (11): 598-604.
- METTE, T. (2015): Dokumentation zur Ableitung der Bodendaten an den BWI-Traktecken des Bundeslandes Bayern (Modul 1). Projektbericht.
- MINASNY, B., MCBRATNEY, A.B. (2006): A conditioned Latin Hypercube Method for Sampling in the Presence of Ancillary Information. *Computers Geosci.* **32**: 1378-1388.
- MILBERT, G. (2016): Bodendaten erheben & bewerten – Großmaßstäbige Bodenkartierungen. URL: http://www.gd.nrw.de/bo_eb.htm [access 15-07-2016].
- NOCITA, M., STEVENS, A., VAN WESEMAEL, B., AITKENHEAD, M., BACHMANN, M., BARTH, B., DOR, E.B., BROWN, D.J., CLAIROTT, M., CSORBA, A., DARDENNE, P., DEMATTE, J.A.M., GENOTY, V., GUERRERO, C., KNADL, M., MONTANARELLA, L., NOONX, C., RAMIREZ-LOPEZ, L., ROBERTSON, J., SAKAI, H., SORIANO-DISLA, J.M., SHEPHERD, K.D., STENBERG, B., TOWETT, E.K., VARGA, R., WETTERLIND, J. (2015): Soil Spectroscopy: An Alternative to Wet Chemistry for Soil Monitoring. *Advances Agron.* **132**: 139-159.
- PETERS, R., SCHWÄRZEL, K., CLAUSNITZER, F., BERNHOFER, C., FEGER, K.H. (2011a): Einfluss von Relief, Boden, und Bestockung auf den Standortwasserhaushalt. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **12**: 101-109.
- PETERS, R., SCHWÄRZEL, K., FEGER, K.H. (2011b): Fuzzy-Inference-Systeme zur Regionalisierung der Standortwasserhaushaltes von Wäldern. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **12**: 111-117.
- PETZOLD, R., DANIGEL, J., BENNING, R., MAYER, S., BURSE, K., KARAS, F., ANDREAE, H., GEMBALLA, R. (2016a): Aus Alt mach Neu – Altdaten der Standortskartierung für die räumlich differenzierte Ableitung der Bodenwasserspeicherung. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **16**: 17-25.
- PETZOLD, R., BURSE, K., BENNING, R., GEMBALLA, R. (2016b): Die Lokalbodenform im System der forstlichen Standortserkundung im Mittelgebirge/Hügelland und deren bodenphysikalischer Informationsgehalt. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **16**: 27-31.
- PRETZSCH H., BLOCK, J., DIELER, J., GAUER, J., GÖTTLEIN, A., MOSHAMMER, R., SCHUCK, J., WEIS, W., WUNN, U. (2014): Nährstoffentzüge durch die Holz- und Biomassenutzung in Wäldern. Teil 1: Schätzfunktionen für Biomasse und Nährelemente und ihre Anwendung in Szenariorechnungen. *AFJZ* **11/12**: 261-285.
- PUHLMANN, H., MICHIELS, H.-G., HEINZ, F., KOLB, S. (2015): Dokumentation zur Ableitung der Bodendaten an den BWI-Traktecken des Bundeslandes Baden-Württemberg (Modul 1). Projektbericht.
- PUHLMANN, H., VON WILPERT, K. (2011): Datenbank hydraulischer Eigenschaften von Waldböden – Test und Entwicklung von Pedotransferfunktionen. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **12**: 61-71.
- QGIS DEVELOPMENT TEAM (2016): *QGIS Benutzerhandbuch 2.2* URL: <http://qgis.org/de/site/> [access 20-07-2016].

- R CORE TEAM (2016): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/> [access 02-08-2016].
- REGIONALE PEFC-ARBEITSGRUPPE HESSEN e.V. (2015): Regionaler Waldbericht Hessen 2015. Friedrichsdorf. URL: https://pefc.de/media/filer_public/c2/2d/c22d6ce7-3bcb-4580-ae1-c465b85dd094/hessen_waldbericht_2015.pdf [access 07-06-2016].
- SCHULZ, R. (2003): Flächenbezogene Modelle zur Unterstützung der Forstlichen Standortkartierung im Niedersächsischen Bergland. Diss. Universität Göttingen: 340 S.
- SCHWANECKE, W. (1970): Richtlinie für die Bildung und Kartierung der Standortseinheiten im Hügelland und Mittelgebirge der DDR. VEB Forstprojektion Potsdam.
- 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 Standortwasserhaushaltes von Wäldern des Mittelgebirges. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **12**: 119-126.
- STEINICKE, C., AHREND, B. (2015): Dokumentation zur Ableitung der Bodendaten an den BWI-Traktecken des Bundeslandes Hessen (Modul 1). Projektbericht.
- SVERDRUP, H.U. (1990): The Kinetics of Base Cation Release due to Chemical Weathering. Lund University Press, Lund, Schweden: 246 S.
- TOBLER, W. (1987): Measuring Spatial Resolution. Proceedings, Land Resources Information Systems Conference, Beijing: 12-16.
- VON LÖWIS, O. (2013): Modern – wertvoll – nachhaltig. Die Forstliche Standortserkundung des VfS, eine Grundlage der Waldwirtschaft. *BLW* (30/2013): 26-27. URL: http://www.vfs-muenchen.de/images/stories/download/VfS%20Artikel%20im%20BLW%2030_2013.pdf [access 19-05-2016].
- VOS, C., DON, A., PRIETZ, R., HEIDKAMP, A., FREIBAUER, A. (2016): Field-based soil-texture estimates could replace laboratory analysis. *Geoderma* **267**: 215-219.
- WELLBROCK, N., AYDIN, C.-T., BLOCK, J., BUSSIAN, B., DIEKMANN, O., EVERS, J., FETZER, K.D., GAUER, J., GEHRMANN, J., KÖLLING, C., KÖNIG, N., LIESEBACH, M., MARTIN, J., MEIWES, K.J., MILBERT, G., RABEN, G., RIEK, W., SCHÄFFER, J., SCHWERHOFF, J., ULLRICH, T., UTERMANN, J., VOLZ, H.A., WEIGEL, A., WOLFF, B. (2006): Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II). Arbeitsanleitung für die Außenaufnahmen. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft und Forsten, Berlin: 413 S.
- WELLBROCK, N., GRÜNEBERG, E., ZICHE, D., EICKENSCHIEDT, N., HOLZHAUSEN, M., HÖHLE, J., GEMBALLA, R., ANDREAE, H. (2015): Entwicklung einer Methodik zur stichprobengestützten Erfassung und Regionalisierung von Zustandseigenschaften der Waldstandorte. Thünen Report 36. URL: http://literatur.ti.bund.de/digbib_extern/dn056086.pdf [access 09-05-2016].
- VON WILPERT, K., ZIRLEWAGEN, D., PUHLMANN, H. (2016): Regionalisierung von Bodendaten für Deutschland – Datenbasis, Zielgrößen und Modellgüte am Beispiel zweier Testgebiete. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **16**: 109-120.
- WOLFF, B., HÖLZER, W., BONK, S., FRÖMDLING, D., BARITZ, R. (1999): Harmonisierung von Ergebnissen der forstlichen Standortkartierung. *Forst Holz* **54**: 291-298.
- ZIRLEWAGEN, D., VON WILPERT, K. (2003): Regionalisierung bodenchemischer Eigenschaften in topographisch stark gegliederten Waldlandschaften. *Schriftenreihe Freiburger Forstliche Forschung* **19**: 154 S.
- ZIRLEWAGEN, D., RABEN, G., WEISE, M. (2007): Zoning forest health conditions based on a set of soil topographic and vegetation parameters. *For. Ecol. Manag.* **248**: 43-55.
- ZÖTTL, H.W. (1958): Die Abhängigkeit der Bodentemperatur vom Wasserhaushalt wechselfeuchter Standorte. *Forstw. Cbl.* **77**: 329-335.

submitted: 09.08.2016
 reviewed: 12.08.2016
 accepted: 15.08.2016

Autorenanschrift:

Dr. Rainer Petzold, Raphael Benning
 Kompetenzzentrum für Wald und Forstwirtschaft
 Referat Standortskunde, Bodenmonitoring, Labor
 Bonnewitzer Str. 34, 01796 Pirna
 E-Mail: rainer.petzold@smul.sachsen.de
 E-Mail: raphael.benning@smul.sachsen.de

Dr. Jürgen Gauer
 Landesforsten Rheinland-Pfalz
 Forschungsanstalt für Waldökologie und Waldwirtschaft
 Standortskartierung
 Oberstr. 43
 56355 Nastätten
 E-Mail: juergen.gauer@wald-rip.de