

Tagungsbeitrag zu: Jahrestagung der
DBG, Kommission I
Titel der Tagung: Horizonte des Bodens
Veranstalter: DBG
Termin und Ort der Tagung: 2.-7. September 2017, Göttingen
Berichte der DBG (nicht begutachtete online Publikation)
<http://www.dbges.de>

Ableitung von bodenphysikalischen Parametern für Waldstandorte in Schleswig-Holstein

Silke Hafner, Bernd Ahrends*, Michael Köhler, Jan Evers, Henning Meesenburg

1 Einleitung

Die steigende Nachfrage nach großmaßstäbigen Standorts- und Bodeninformationen im Bereich der forstlichen Planungs- und Entscheidungsunterstützung ergibt sich aus den rasanten Veränderungen der forstlichen Standorte (ALBERT et al. 2016) aufgrund des Klimawandels (SMITH et al. 2015) und der atmosphärischen Stickstoff- (LAUBHANN et al. 2009) und Schwefeleinträge (HAUCK et al. 2012, KOLÁR et al. 2015). Die dynamische Veränderung und das Auftreten neuer Kombinationen von Umweltfaktoren beeinflusst die Bedingungen der Waldbewirtschaftung stark (LINDNER et al. 2014) und erschwert die betriebliche Entscheidungsfindung (JANSEN et al. 2008). Zur Beschreibung der Standortsveränderungen werden Simulationsstudien mit statistischen und prozessorientierten Modellen zum Wasser- und Stoffhaushalt durchgeführt (THIELE et al., 2017, ALBERT et al., 2016, FLECK et al. 2017, SCHWÄRZEL et al., 2009). Die Modellergebnisse ermöglichen die Auswirkungen der sich verändernden Umweltfaktoren auf die Waldökosysteme einzuschätzen und die waldbaulichen Alternativen zur gegenwärtigen

Schlüsselworte: Standortkartierung, Bodenleitprofile, Methodenvergleich, BWI

Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
Abt. Umweltkontrolle / SG Intensives Umweltmonitoring
Grätzelstraße 2
D-37079 Göttingen
Kontakt*: bernd.ahrends@nw-fva.de

Waldentwicklung zu bewerten. Daraus lassen sich Managementoptionen und Anpassungsstrategien ableiten. Das Hauptproblem bei der Anwendung entsprechender Modelle ist oft nicht das Modell selbst, sondern fehlende oder gering aufgelöste Bodendaten (z. B. Textur, Skelettgehalt, Trockenroh-dichte). So zeigten GREATISH et al. (2015) und FOLBERTH et al. (2016) die große Bedeutung von Bodendaten bei Simulationsstudien zum Landnutzungsmanagement und Klimawandel. Ziel des Projekts WP-KS-KW („Waldproduktivität-Kohlenstoffspeicherung-Klimawandel“) war es, länderübergreifende Bodeninformationen für die Inventurpunkte der Bundeswaldinventur (BWI) bereitzustellen. Innerhalb des 4 km x 4 km Grundnetzes der BWI werden deutschlandweit alle 10 Jahre an ca. 26.450 Inventurpunkten eine Vielzahl von Bestandesparametern (z.B. Baumartenzusammensetzung, Holzvorräte, Zuwächse, Altersverteilungen) erhoben. Allerdings fehlen bislang räumlich hochaufgelöste Bodendaten für die Inventurpunkte der BWI oder sind lediglich in uneinheitlicher und zu geringer Auflösung vorhanden. In Schleswig-Holstein liegen flächenhafte bodenphysikalische Informationen in Form der Waldbodenübersichtskarte 1:1.000.000 (BÜK1000 N2.3, BGR 2006), der Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:200.000 (BÜK 200, BGR 2015) und – bisher noch nicht vollständig – der Bodenkarte im Maßstab 1:25.000 (BK25, LANU 2015a) vor. Die forstliche Standortkarte in Schleswig-Holstein deckt viele Gebiete ab, die von der BK25 nicht erfasst werden. In ihr werden die Ergebnisse der Standortkartierung kategorisiert in Standortstypen zusammengefasst und dargestellt. Hierbei handelt es sich um ökologische Einheiten, die Informationen zum Geländewasser- und Nährstoffhaushalt und zum Ausgangsmaterial der Bodenbildung eines Standortes zusammenfassen. Allerdings lassen sich diese Informationen, im Gegensatz zu flächendeckend vorhandenen bodenkundlichen Kartenwerken, nicht direkt in metrische Werte einzelner bodenphysikalischer oder -chemischer Parameter übersetzen. Die Verbesserung der räumlichen Auflösung und der flächenhaften Abdeckung von Bodeneigenschaften und damit die Verringerung von Modellunsicherheiten

sollte durch die Ableitung idealisierter Bodenprofile für Standortstypen erreicht werden (ROßKOPF et al., 2015, BENNING et al., 2016). Deshalb ist das Ziel der Studie Bodenleitprofile (BLP) mit umfassenden bodenphysikalischen Eigenschaften für forstliche Standortstypen in Schleswig-Holstein abzuleiten und sie auf die Traktecken der BWI zu übertragen.

2 Material und Methoden

2.1 Datengrundlagen

Als Grundlage für die Aggregation von Bodeneigenschaften zu BLP für forstliche Standortstypen dienten ca. 4700 Bodenprofile der Standortskartierung (Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein). Für die Erstellung der BLP wurde die Horizontgrenzen der Bodenprofile, die Horizontbezeichnungen nach KA5 (AG BODEN 2005), der Sand-, Schluff- und Tongehalt (Masse-%), der Skelett- (Vol-%) und Humusgehalt (Masse-%) sowie die Trockenrohddichte (g cm^{-3}) der Horizonte benötigt. Zur Evaluierung der Aggregierungsmethoden und der abgeleiteten BLP wurden die Bodenprofile der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II) (WELLBROCK et al. 2016) verwendet. Die Übertragung der Bodenprofile auf die BZE-Punkte erfolgte mit Hilfe der forstlichen Standortskarte für die Waldflächen in Schleswig-Holstein (LANU 2015b). Zur Evaluierung der Güte der räumlichen Bodeninformationen anhand der erstellten BLP wurde als „Referenz“ die Bodenkarte im Maßstab 1:25.000 (BK25) von Schleswig-Holstein (LANU 2015a) herangezogen.

2.2 Aggregation von Bodenleitprofilen

Da der forstliche Standortstyp Standorte mit ähnlichen Umweltbedingungen und waldbaulichen Möglichkeiten zusammenfasst, wurden die Standortstypen als übergeordnete Einheit zur Herleitung von BLP verwendet. Vorhandene Bodenprofile wurden anhand des zugewiesenen forstlichen Standortstyps gruppiert. Für forstliche Standortstypen, zu denen mindestens fünf Bodenprofile vorhanden waren, wurden die bodenphysikalischen Parameter mit verschiedenen Methoden aggregiert. In Abbildung 1 ist die

Aggregation von 6 Bodenprofilen und das daraus erstellte BLP für einen forstlichen Standortstyp schematisch dargestellt.

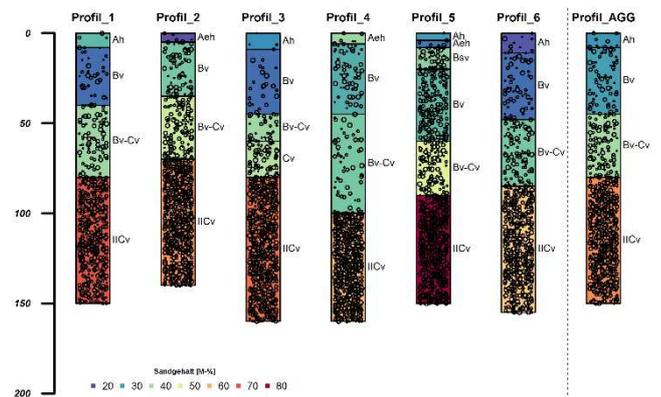


Abb. 1: Schematische Darstellung der Ableitung von Leitprofilen für forstliche Standortstypen in Schleswig-Holstein.

Zur Erstellung von BLP wurden verschiedene Ansätze verfolgt (KOPP & JOCHHEIM 2002, BEAUDETTE et al., 2013, 2016, ROßKOPF et al. 2015, BENNING et al. 2016). Sie variieren in Abhängigkeit von der Datenverfügbarkeit, des Kartiersystems und den Präferenzen der Entwickler. Aufgrund der Streuung der bodenphysikalischen Parameter bei der Einbeziehung aller Bodenprofile, die einem Standortstyp zugewiesen sind (Abb. 2), wurden unterschiedliche Aggregierungsmethoden zur Erstellung eines BLPs angewandt und anhand der BZE II-Profile evaluiert. Dabei wurden sowohl Methoden, die neben den Bodenparametern auch die Horizontierung (Abb. 3) des BLP bestimmen, als auch Methoden, die ohne Beachtung der Horizontierung lediglich die Bodenparameter aggregieren, angewandt (Abb. 4). Bei jeder der im Folgenden beschriebenen Methoden wurde sowohl der Mittelwert als auch der Median der Bodenparameter berechnet und in die Evaluierung mit einbezogen.

2.2.1 Horizontbezogene Aggregation

Die Mächtigkeit der Horizonte des BLP wurde anhand der Häufigkeit des Auftretens eines Horizontes abgeleitet. Dafür wurden alle Bodenprofile, die zu dem jeweiligen Standortstyp gehören, unter Verwendung des R-Paketes aqp in 1 cm Intervalle unterteilt (BEAUDETTE et al. 2013). Die Intervalle mit gleichen Horizontsymbolen wurden zusammengefasst, wodurch sich dann die Horizontierung des BLP ergab.

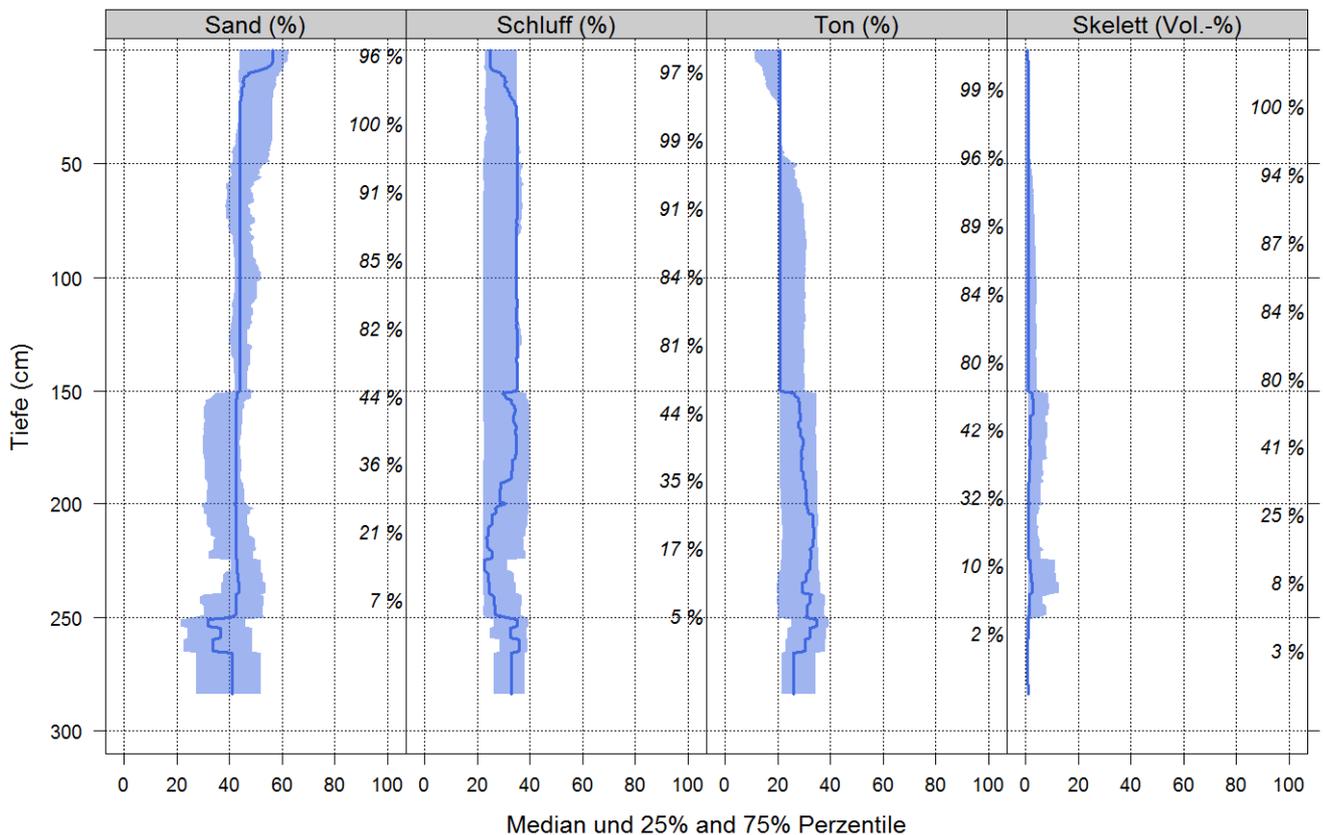


Abb. 2: Darstellung der Streuung und des Tiefenverlaufs bodenphysikalischer Parameter für den Standortstyp 37.5-8.5 (schwächer wechselfeucht bis staufreich; gut nährstoffversorgt; Geschiebelehm über Geschiebemergel).

Beispielhaft für einen Standortstyp ergibt sich ein Aeh-Horizont von 0-17 cm, darauf folgend ein Bv bis 63 cm und ein Cv bis 300 cm Bodentiefe (Abb. 3).

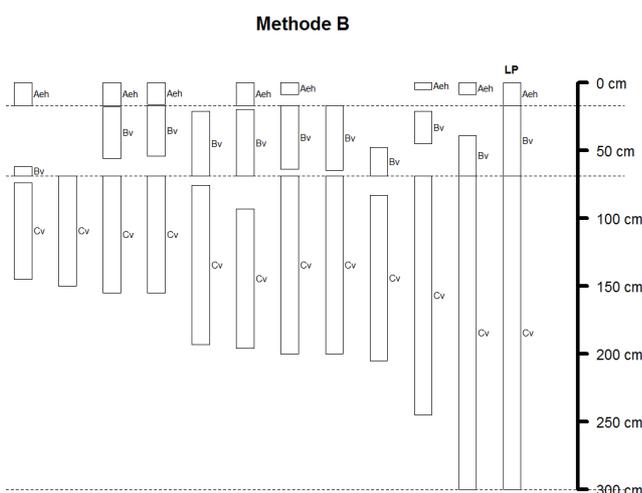


Abb. 3: Darstellung der horizontbezogenen Aggregation nach Methode B zur Erstellung eines Bodenleitprofils (BLP) am Beispiel eines Standortstyps mit 11 zugehörigen Bodenprofilen.

Innerhalb dieser ermittelten Horizontgrenzen wurde zur Erstellung des BLP der Mittel- und Medianwert der bodenphysikalischen

Parameter aller Bodenprofile des Standortstyps berechnet und dem BLP zugewiesen (Methode A). Da bei dieser Methode die Eigenschaften von unterschiedlichen Horizonten vermischt werden, wurden alternativ die Mittel- und Medianwerte der bodenphysikalischen Parameter innerhalb der Horizontmächtigkeiten lediglich von gleichen Horizonten berechnet (Methode B, Abb. 3).

2.2.2 Horizontunabhängige Aggregation

Die Methoden der horizontunabhängigen Aggregation erzeugen je ein BLP mit gemittelten Parametern ohne Ausweisung von Horizonten (Methoden C-E). Dafür wurde der Mittel- oder Medianwert der bodenphysikalischen Parameter in 1 cm Schritten von der Mineralbodenoberfläche bis zur maximalen Profiltiefe berechnet. In den Varianten wurden die Parameter aller Horizonte (D) oder lediglich die Parameter gleicher Horizonte der Bodenprofile (C) verwendet. Gänzlich unabhängig von der ursprünglichen Horizontierung der Bodenprofile eines Standortstyps wurde eine Aggregation der

bodenphysikalischen Parameter in Tiefenstufen (E, vgl. Abb. 4) (0-5, 5-10, 10-30, 30-60, 60-90, 90-140, 140-200 cm) vorgenommen.

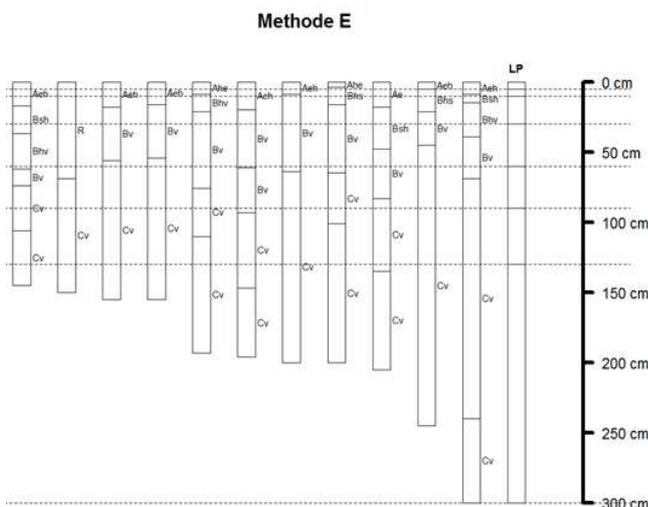


Abb. 4: Darstellung der Aggregation in Tiefenstufen nach Methode E zur Erstellung eines Bodenleitprofils (BLP) am Beispiel eines Standortstyps mit 11 zugehörigen Bodenprofilen.

2.3 Evaluierung der Ergebnisse

Zur Evaluierung der nach unterschiedlichen Methoden abgeleiteten bodenphysikalischen Parametern eines BLP dienten die Bodenprofile der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II) (WELLBROCK et al. 2016). Die BZE II Profile wurden mit der forstlichen Standortskarte für die Waldflächen in Schleswig-Holstein (LANU 2015b) verschnitten, um ihnen einen Standortstyp zuzuweisen. Über den Standortstyp konnten dann die BZE II Profile den aggregierten BLP zugewiesen werden und deren bodenphysikalische Parameter miteinander verglichen. Hierfür wurden die nach den Methoden A-E abgeleiteten Parameter in die den BZE-Profilen entsprechenden Tiefenstufen 0-5, 5-10, 10-30, 30-60 und 60-90 cm umgerechnet (vgl. BEAUDETTE et al. 2013). Entsprechend wurde auch mit den Bodenprofilen der BK25 verfahren. Die Güte der Aggregierungsmethoden und der geschätzten Bodeneigenschaften wurde anhand des Bestimmtheitsmaßes (R^2), des mittleren Quadratwurzelfehlers (RMSE) und des mittleren Fehlers (MR) beurteilt (vgl. AHRENDTS et al. 2016). Zum Vergleich der Aggregierungsverfahren wurde für jedes statistische Gütemaß ein Rang vergeben und anschließend

die Rangsumme der Gütemaße einer jeweiligen Methode gebildet (CORNELIS et al. 2001, RUSS & RIEK 2011).

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Aggregierungsmethoden

Die statistischen Gütemaße sind für die jeweiligen Bodenparameter und Methoden in den Tabellen A1 & A2 im Anhang zusammengestellt. Tabelle 1 zeigt die Rangsummen der Evaluierung aus dem Vergleich der Aggregierungsmethoden. Bei der horizontunabhängigen Aggregierung werden insgesamt höhere Gütemaße erreicht.

Tab. 1: Rangsummen der statistischen Kennziffern aus dem Vergleich der Aggregierungsmethoden an Standorten der BZE II. AG: Aggregierung; X: arithmetisches Mittel; Md: Median

Methode	Beschreibung	AG	Rang Σ
A	innerhalb Horizontgrenzen	X	119
		Md	96
B	innerhalb der Grenzen gleicher Horizonte	X	93
		Md	72
C	1 cm Schritte gleicher Horizonte	X	102
		Md	84
D	1 cm Schritte	X	128
		Md	83
E	Tiefenstufen	X	122
		Md	90

Es erscheint somit bedeutender, dass die Schichtabfolge im Profil erhalten bleibt, als dass horizontspezifische Charakteristika berücksichtigt werden. Insgesamt sind die Unterschiede zwischen den Methoden gering. Auch BENNING et al. (2016) stellten bei ihren Untersuchungen nur geringe Effekte der Aggregierungsmethoden auf das generierte BLP fest.

3.1 Generierte Bodenleitprofile

In einem ersten automatisierten Bearbeitungsschritt konnten 58% der Waldfläche von Schleswig-Holstein mit BLP hinterlegt werden und somit an etwa 50% der BWI-Traktecken bodenphysikalische Informationen bereitgestellt werden. Zusammen mit den aus der BK25 abgeleiteten BLP liegen für über 2/3 der BWI-Traktecken Bodeninformationen in einer deutlich verbesserten räumlichen Auflösung im Vergleich zur BÜK200 vor. Auf Grundlage dieser Bodenprofile (Abb. 5) können wichtige ökologische Kennwerte wie die nutzbare Feldkapazität, die potenzielle Kationenaustauschkapazität,

Gapon-Austausch-Koeffizienten, die Verwitterungsoberfläche und van Genuchten Parameter berechnet und als Eingangsdaten für

weitere Modellierungen verwendet werden (vgl. z.B. Schmidt-Walter et al. 2017).

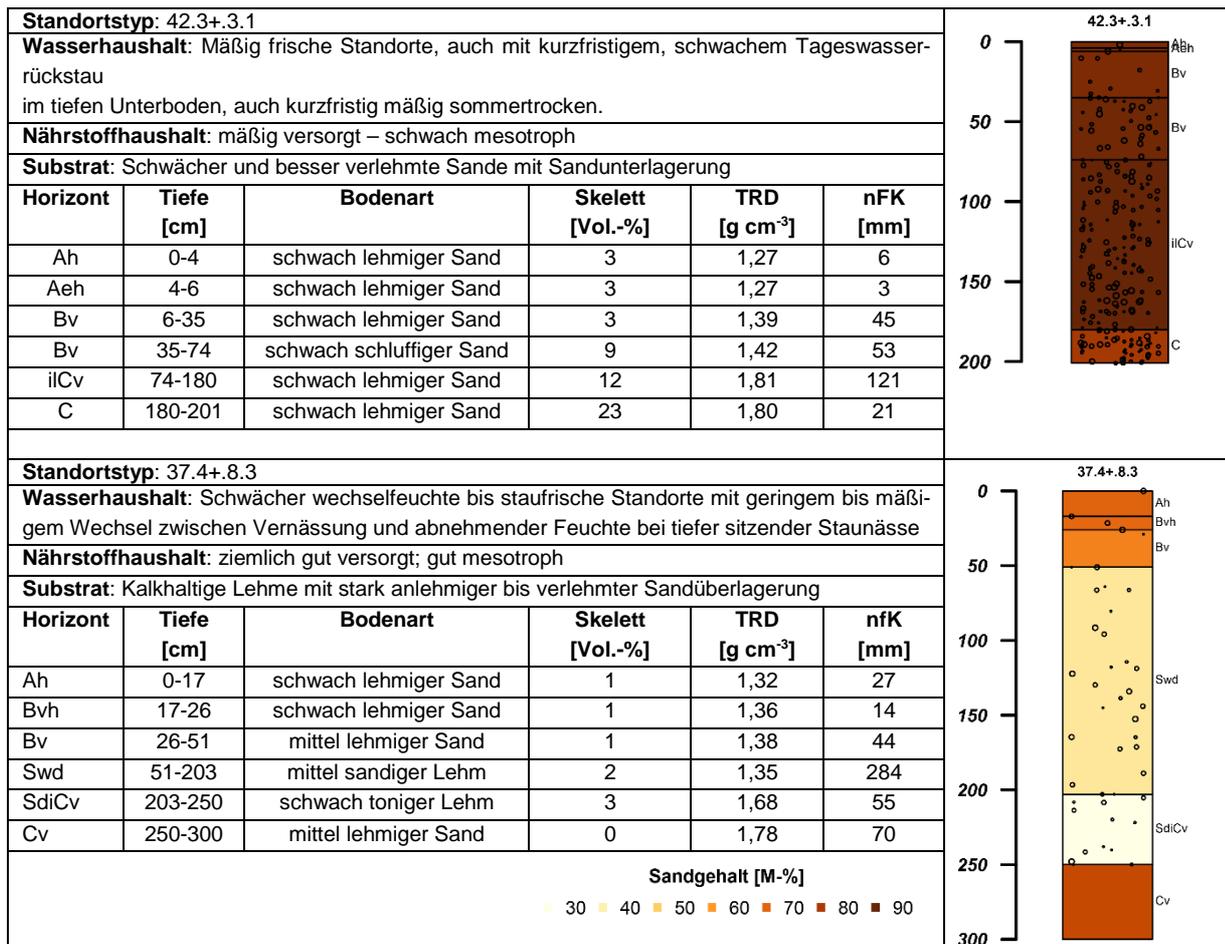


Abb. 5: Beispielhafte Darstellung zweier Bodenleitprofile für die forstlichen Standortstypen 42.3+.3.1 und 37.4+.8.3 in Schleswig-Holstein und ein Auszug der verfügbaren Profilinformatoren.

3.2 Evaluierung der bodenphysikalischen Parameter

Trotz der hohen kleinräumigen Variabilität von bodenphysikalischen Parametern ließen sich diese auf Grundlage der BLP annähernd verzerrungsfrei (MR) und mit verhältnismäßig hohen Bestimmtheitsmaßen schätzen (Abb. 6 & 7). Die Qualität der flächenhaften Information basierend auf den erstellten BLP ist vergleichbar mit den bodenphysikalischen Informationen der BK25 (Abb. 6 & 7). Bei einem direkten Vergleich dieser beiden Datengrundlagen ist jedoch zu beachten, dass sie aufgrund ihrer unterschiedlichen Flächenabdeckungen nicht die identischen BZE II Profile erfassen. Dieses

ist auch die Ursache für die deutlich höheren Bestimmtheitsmaße bei den BLP der Standortkartierung. Die Skelettgehalte weisen jedoch erhebliche Streuungen und einen Bias von über 5% beim Vergleich der BLP mit der BZE II auf. Dieses kann auf die Schwierigkeiten der Schätzung (WOLFF & RIEK 2006) und der hohen kleinräumigen Variabilität der Skelettgehalte (AHRENDTS et al. 2016) zurückgeführt werden. Die Trockenrohdichte und der Humusgehalt sind ebenfalls durch eine hohe Variabilität gekennzeichnet, werden aber sowohl mit der Standortkartierung als auch von der Bodenkarte verzerrungsfrei geschätzt.

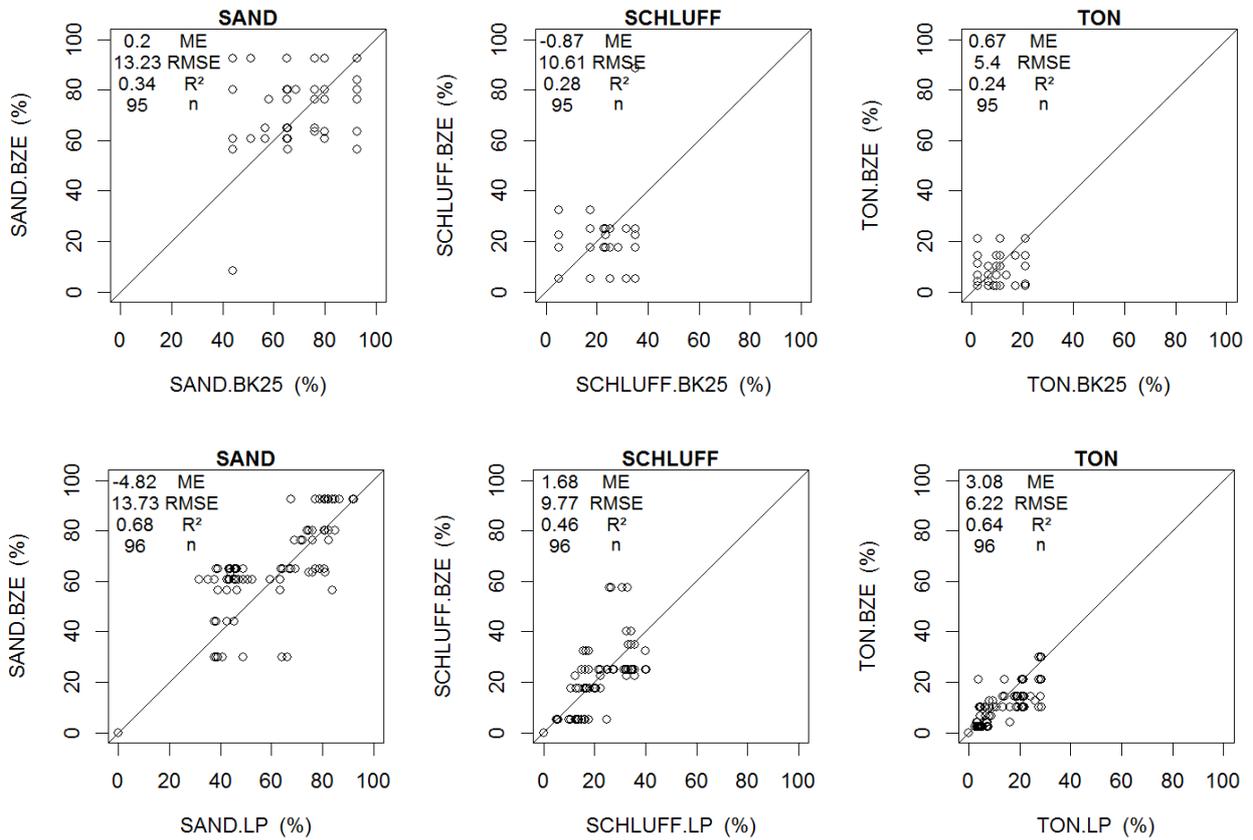


Abb. 6: Beziehungen zwischen den Korngrößenfraktionen verschiedener Tiefenstufen aus den Profilen der BZE II und der Standortkartierung (LP) (unten) bzw. der Bodenkarte (BK25) (oben). Datenpaare mit Sand-, Schluff- und Tongehalten von 0% sind organische Horizonte.

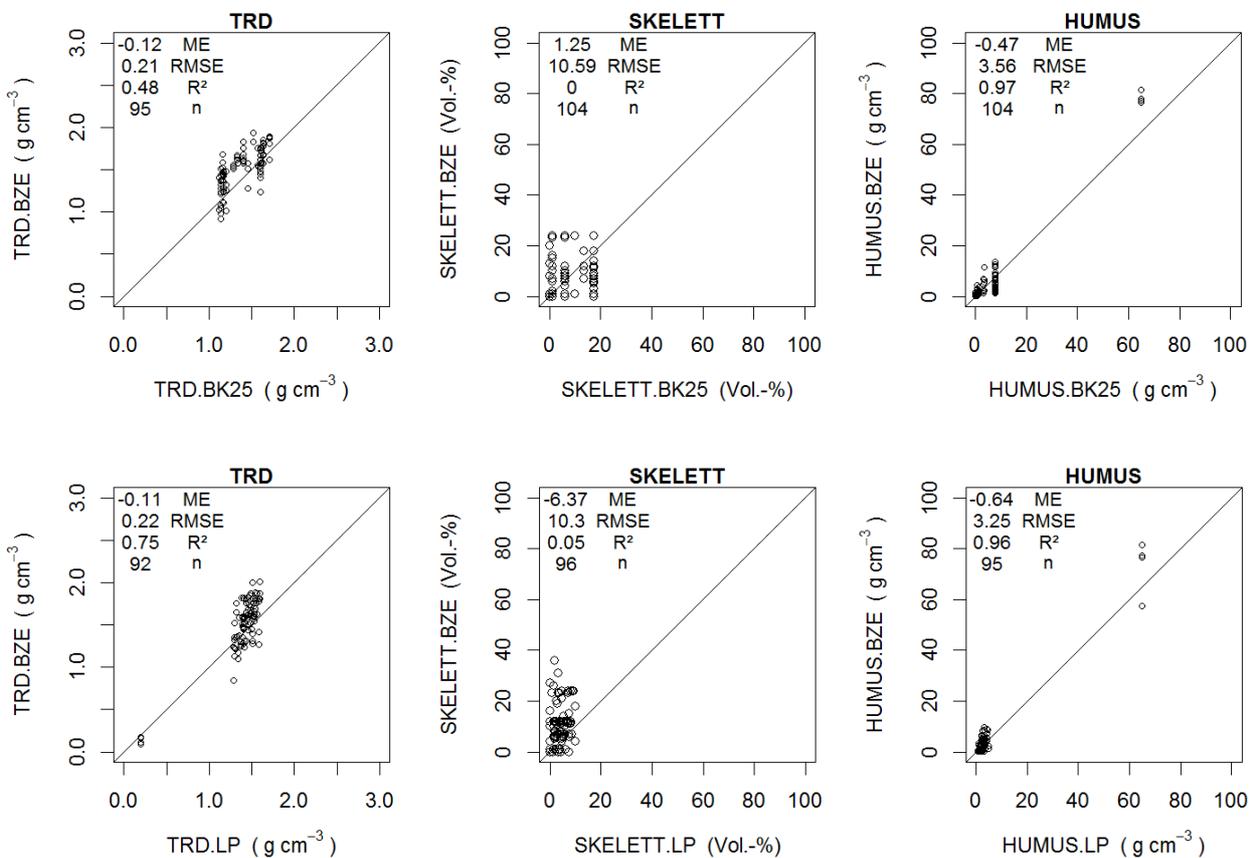


Abb. 7: Beziehungen zwischen bodenphysikalischen Bodeneigenschaften verschiedener Tiefenstufen aus den Profilen der BZE II und der Standortkartierung (LP) (unten) bzw. der Bodenkarte (BK25) (oben).

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Mit Hilfe der für die Standortkartierung generierten BLP wird die räumliche Abdeckung von Bodeninformationen in Schleswig-Holstein verbessert. Die Qualität der bodenphysikalischen Informationen, die nun an den BWI-Traktecken vorliegen, basierend auf den BLP ist vergleichbar mit den Bodeninformationen der BK25. Auf dieser verbesserten Datengrundlage können Wasser- und Stoffhaushaltsmodelle parametrisiert und bestehende Waldwachstumsmodelle weiterentwickelt werden. Aber auch eine Einbindung in die flächenhafte Standortkartierung ist durch eine weitere Bearbeitung von aktuell nicht erfassten Standortstypen (z.B. mit Profilen aus dem niedersächsischen Flachland) möglich. Aktuell wird 58% der Waldfläche in Schleswig-Holstein mit den erstellten BLP abgedeckt. Verbesserung und Anpassungen sind jedoch hinsichtlich der Skelettgehalte notwendig.

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) und dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) sowie dem Projektträger Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) für die Förderung der Arbeit im Rahmen des Waldklimafondsprojektes „Veränderte Produktivität und Kohlenstoffspeicherung der Wälder Deutschlands angesichts des Klimawandels“ (WP-KS-KW) (FKZ 28WC400303).

5 Literatur

AG-Boden (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung*. Hannover. 438 S.

Ahrends, B., S. Hafner, J. Evers, C. Steinicke, W. Schmidt & H. Meesenburg (2016): Regionalisierung bodenphysikalischer Parameter für Waldstandorte in Sachsen-Anhalt - Unsicherheitsbetrachtung an Standorten verschiedener Umweltmessnetze. *Beitr. aus der NW-FVA*, 14, 1-13.

Albert, M., G. Leefken, R. Nuske, B. Ahrends, J. Suttmöller & H. Spellmann (2016): Auswirkungen von klimatischer Unsicherheit auf die Forstplanung am Beispiel von vier Regionen im norddeutschen Tiefland. *Allg. Forst- u. J.-Ztg.*, 187, (9/10): 161-185.

Beaudette, D. E., P. Roudier & A. T. O'Geen (2013): Algorithms for quantitative pedology: A toolkit for

soil scientists. *Computer & Geosciences*, 52, 258-268.

Beaudette, D. E., P. Roudier & J. Skovlin (2016): Probabilistic representation of genetic soil horizons. In: Hartemink, A.E. & B. Minasny: *Digital Soil Morphometrics, Progress in Soil Science*. Springer, Switzerland, 281-293.

Benning, R., R. Petzold, J. Danigel, R. Gemballa & H. Andrae (2016): Ableitung von Leitbodenprofilen für die Punkte der Bundeswaldinventur in Sachsen und Thüringen. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz*, 16, 35-42.

BGR (2006): *Nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1:1.000.000 (BÜK 1000 N2.3)*. – Auszugskarten Acker, Grünland, Wald; Digit. Archiv FISBo BGR; Hannover und Berlin

BGR (2015): *BÜK200: Bodenübersichtskarte im Maßstab 1: 200 000 (BÜK200) von Schleswig-Holstein (BGR © 2015)*

Cornelis, W. M., J. Ronsyn, M. Van Meirvenne & R. Hartmann (2001): Evaluation of pedotransfer functions for predicting the soil moisture retention curve. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65, 638-648.

Fleck, S., B. Ahrends, J. Suttmöller, M. Albert, J. Evers & H. Meesenburg (2017): Is biomass accumulation in forests an option to prevent climate change induced increases in nitrate concentrations in the North German Lowland? *Forests*, 8, (6): 1-28.

Folberth, C., R. Skalský, E. Moltchanova, J. Balkovič, L. B. Azevedo, M. Obersteiner & M. Van Der Velde (2016): Uncertainty in soil data can outweigh climate impact signals in global crop yield simulations. *Nat. Commun.*, 7, 1-13.

Grealish, G. J., R. W. Fitzpatrick & J. L. Hutson (2015): Soil survey data rescued by means of user friendly soil identification keys and toposquence models to deliver soil information for improved land management. *Geo Res. J.*, 5, 81-91.

Hauck, M., J. Zimmermann, J. Mascha, C. Dulamsuren, C. Bade, B. Ahrends & C. Leuschner (2012): Rapid recovery of stem growth at reduced SO₂ levels suggests a major contribution of foliar damage in the pollutant-caused dieback of Norway spruce during the late 20th century. *Environ. Pollut.*, 164, 132-141.

Jansen, M., C. Döring, B. Ahrends, A. Bolte, T. Czajkowski, O. Panferov, M. Albert, H. Spellmann, J. Nagel, H. Lemme, M. Habermann, K. Staupendahl, B. Möhring, M. Böcher, S. Storch, M. Krott, R. Nuske, J. C. Thiele, J. Nieschulze, J. Saborowski & F. Beese (2008): Anpassungsstrategien für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung unter sich wandelnden Klimabedingungen - Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems Wald und Klimawandel (DSS-WuK). *Forstarchiv*, 79, 131-142.

Kolár, T., P. Cermák, F. Oulehle, M. Tmka, P. Stepánek, P. Cudlín, J. Hruska, U. Büntgen & M. Rybníček (2015): Pollution control enhanced spruce growth in the "Black Triangle" near the Czech-Polish border. *Sci. Total Environ.*, 538, 703-711.

- Kopp, D. & H. Jochheim (2002): Forstliche Boden- und Standortformen des nordostdeutschen Tieflands als Datenbasis für die Landschaftsmodellierung. Dr. Kessel. Remagen-Oberwinter. 207 S.
- LANU (2015a): BK25: Bodenkarte im Maßstab 1:25 000 (BK25) von Schleswig-Holstein.
- LANU (2015b): Die forstliche Standortskarte für die Waldflächen in Schleswig-Holstein.
- Laubhann, D., H. Sterba, G. J. Reinds & W. de Vries (2009): The impact of atmospheric deposition and climate on forest growth in European monitoring plots: An individual tree growth model. *For. Ecol. Manage.*, 258, (8): 1751-1761.
- Lindner, M., J. B. Fitzgerald, N. E. Zimmermann, C. Reyer, S. Delzon, E. van der Maaten, M. J. Schelhaas, P. Lasch, J. Eggers, M. van der Maaten-Theunissen, F. Suckow, A. Psomas, B. Poulter & M. Hanewinkel (2014): Climate change and European forests: What do we know, what are the uncertainties, and what are the implications for forest management? *J. Environmental Management*, 146, 69-83.
- Roßkopf, N., H. Fell & J. Zeitz (2015): Organic soils in Germany, their distribution and carbon stocks. *Catena*, 133, 157-170.
- Russ, A. & W. Riek (2011): Pedotransferfunktionen zur Ableitung der nutzbaren Feldkapazität - Validierung für Waldböden des nordostdeutschen Tieflandes. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz*, (11): 5-17.
- Schmidt-Walter, P., B. Ahrends & H. Meesenburg (2017): Wasserhaushalt und Trockenstress für die BWI quantifiziert. *AFZ-DerWald*, 72, 36-39.
- Schwärzel, K., K. H. Feger, J. Häntzschel, A. Menzer, U. Spank, F. Clausnitzer, B. Köstner & C. Bernhofer (2009): A novel approach in model-based mapping of soil water conditions at forest sites. *For. Ecol. Manage.*, 258, 2163-2174.
- Smith, S. J., J. Edmonds, C. A. Hartin, A. Mundra & K. Calvin (2015): Near-term acceleration in the rate of temperature change. *Nat. Clim. Change* 5, 333–336.
- Thiele, J. C., R. Nuske, B. Ahrends, O. Panferov, M. Albert, K. Staupendahl, U. Junghans, M. Jansen & J. Saborowski (2017): Climate change impact assessment—A simulation experiment with Norway spruce for a forest district in Central Europe. *Ecol. Modelling*, 346, 30-47.
- Wellbrock, N., A. Bolte & H. Flessa (2016): Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland. *Thünen Report*, 43, 558.
- Wolff, B. & W. Riek (2006): Evaluierung von Verfahren zur Erfassung des Grobbodenanteils von Waldböden. Erarbeitung von Empfehlungen für die Anwendung dieser Verfahren im Rahmen der Bodenzustandserhebung im Wald – Endbericht, Falkenberg. 59 S.

Anhang

Tab. A1: Statistische Gütemaße aus dem Vergleich der Aggregierungsmethoden für die Bodentextur an BZE II Punkten. AG: Aggregierung; X: arithmetisches Mittel; Md: Median.

Parameter	Methode	AG	R ²	RMSE	ME
Sand	A	X	0,68	13,73	-4,82
		Md	0,62	15,66	-5,89
	B	X	0,63	14,98	-3,66
		Md	0,58	16,15	-3,12
	C	X	0,67	14,42	-4,16
		Md	0,62	15,62	-3,89
	D	X	0,69	13,49	-4,84
		Md	0,61	15,57	-4,91
	E	X	0,69	13,49	-4,83
		Md	0,62	15,18	-4,55
Schluff	A	X	0,46	9,77	1,68
		Md	0,41	10,31	2,08
	B	X	0,38	10,72	0,66
		Md	0,31	11,56	0,16
	C	X	0,44	10,35	1,38
		Md	0,41	10,64	1,01
	D	X	0,45	9,78	1,95
		Md	0,38	10,82	1,59
	E	X	0,45	9,78	1,94
		Md	0,41	10,40	1,37
Ton	A	X	0,64	6,22	3,08
		Md	0,65	6,61	3,21
	B	X	0,58	6,89	3,00
		Md	0,62	6,27	2,53
	C	X	0,56	6,70	2,78
		Md	0,58	6,43	2,46
	D	X	0,65	5,88	2,83
		Md	0,63	5,80	2,28
	E	X	0,65	5,88	2,83
		Md	0,63	5,76	2,27

Tab. A2: Statistische Gütemaße aus dem Vergleich der Aggregierungsmethoden für Skelettgehalt [Vol-%], TRD [g/cm³], und Humusgehalt [M-%] an BZE II Punkten. AG: Aggregierung; X: arithmetisches Mittel; Md: Median

Parameter	Methode	AG	R ²	RMSE	ME
Skelett	A	X	0,05	10,30	-6,37
		Md	0,01	12,29	-8,96
	B	X	0,17	9,81	-6,22
		Md	0,06	11,74	-8,51
	C	X	0,04	10,11	-6,11
		Md	0,02	11,23	-7,75
	D	X	0,03	10,49	-6,46
		Md	0,02	12,24	-9,06
	E	X	0,03	10,50	-6,47
		Md	0,01	12,27	-9,07
TRD	A	X	0,75	0,22	-0,11
		Md	0,71	0,22	-0,10
	B	X	0,83	0,20	-0,09
		Md	0,79	0,22	-0,10
	C	X	0,85	0,19	-0,08
		Md	0,83	0,20	-0,09
	D	X	0,76	0,21	-0,11
		Md	0,74	0,22	-0,11
	E	X	0,77	0,21	-0,09
		Md	0,77	0,21	-0,10
Humus	A	X	0,96	3,25	-0,64
		Md	0,96	3,28	-0,89
	B	X	0,97	3,64	-1,12
		Md	0,97	3,78	-1,48
	C	X	0,97	3,72	-1,14
		Md	0,97	3,88	-1,53
	D	X	0,96	3,20	-0,65
		Md	0,96	3,39	-1,07
	E	X	0,96	3,32	-0,77
		Md	0,96	3,47	-1,20