

Regionalisierung bodenphysikalischer Parameter für Waldstandorte in Sachsen-Anhalt – Unsicherheitsbetrachtung an Standorten verschiedener Umweltmessnetze

Regionalisation of soil physical parameters for forest sites
in Saxony-Anhalt –
Uncertainty analysis at sites of various environmental
monitoring networks

*Bernd Abrends, Silke Hafner, Jan Evers, Christian Steinicke, Wolfgang
Schmidt und Henning Meesenburg*

Zusammenfassung

In Sachsen-Anhalt liegen flächenhafte Bodeninformationen in Form der vorläufigen Bodenkarte im Maßstab 1 : 50.000 (VBK50) und der räumlich höher aufgelösten forstlichen Standortskarte vor. Der Standortskarte können bodenphysikalische Parameter aus den Merkmalsspiegeln der forstlichen Lokalbodenformen (KOPP et al., unveröffentlicht, KOPP u. JOCHHEIM 2002, SCHWANECKE 1993, SCHULZE 1998) zugeordnet werden. Die Evaluierung dieser räumlich vorliegenden Bodeninformationen wurde anhand von punktuell vorliegenden Bodeninformationen der

zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II), der Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) und der Ökologischen Waldzustandskontrolle (ÖWK) in Sachsen-Anhalt durchgeführt.

Der Vergleich zwischen den Bodeninformationen dieser forstlichen Umweltmessnetze mit der Standortkartierung ergab eine genauere und verzerrungsfreiere Schätzung der bodenphysikalischen Parameter als die Schätzung der vorläufigen Bodenkarte. Sand- ($R^2 = 0,85$), Schluff- ($R^2 = 0,81$) und Tongehalte ($R^2 = 0,52$) der Bodenprofile der forstlichen Umweltmessnetze wurden durch die flächenhaften Daten der Merkmalsspiegel gut wiedergegeben. Deutlich geringere Übereinstimmungen ergeben sich für den Skelettgehalt ($R^2 = 0,44$), sowie für die aus den Grundlagendaten ermittelten Kenngrößen, wie nutzbare Feldkapazität ($R^2 = 0,23$) und potenzielle Kationenaustauschkapazität ($R^2 = 0,33$). Insbesondere bei der Abschätzung der nutzbaren Feldkapazität bestehen erhebliche Unsicherheiten, die vornehmlich auf die unsichere Schätzung der Skelettgehalte zurückzuführen sind.

Stichworte: Regionalisierung, bodenphysikalische Eigenschaften, Unsicherheitsbetrachtungen, nutzbare Feldkapazität, Verwitterungsoberfläche, Waldböden

Abstract

Spatial soil information in Saxony-Anhalt is available in the form of the preliminary 1 : 50000 soil map (VBK50) and the higher resolution forest site map. From the forest site map the soil physical parameters can be determined using characteristic soil profiles (KOPP et al., unpublished, KOPP and JOCHHEIM 2002, SCHWANECKE 1993, SCHULZE 1998). The quality of this available spatial soil information was evaluated using punctual soil information from the second national soil inventory (BZE II), the long-term soil monitoring network (BDF) and the ecological forest monitoring network (ÖWK) in Saxony-Anhalt.

The comparison of the soil information from these forest monitoring networks with the characteristic soil profiles from the forest site map revealed a more exact, distortion-free estimation of the soil physical parameters than the comparison with the preliminary soil map. The sand ($R^2 = 0.85$), silt ($R^2 = 0.81$) and clay content ($R^2 = 0.52$) in the soil profiles of the forest monitoring networks were well reflected in the spatial data of the characteristic soil profiles. There was, however, a much lower agreement for the soil stone content ($R^2 = 0.44$). Other parameters that were calculated based on the characteristic soil profile data and compared with the forest monitoring network data also showed a low agreement, for instance the available water capacity ($R^2 = 0.23$) and the potential cation exchange capacity ($R^2 = 0.33$). The estimation of the available water capacity was especially problematic, due to the unreliable estimation of the soil stone content.

Keywords: Regionalisation, soil physical properties, uncertainty analysis, available water capacity, weathering surface area, forest soils

1 Einleitung

Zur Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels, der atmosphärischen Deposition, der Vollbaumnutzung oder auch von Bodenschutzkalkungen auf forstlichen Standorten wird häufig auf dynamische prozessorientierte Modellansätze zurückgegriffen (AHRENDTS et al. 2010, SUTMÖLLER et al. 2011). Sowohl die dynamischen Wasserhaushaltsmodelle (BROOK90, WaSiM-ETH) als auch die dynamischen und semi-dynamischen Stoffhaushaltsmodelle (BIOME-BGC, SAFE, PROFILE, VSD) benötigen als „minimale“ Datenanforderungen von bodenkundlicher Seite Angaben der Bodenart, der Trockenrohddichte, des Skelett- und Humusgehalts. Anhand dieser Parameter können dann alle notwendigen Eingangsgrößen (z. B. nutzbare Feldkapazität (nFK), hydraulische Leitfähigkeit, Kationenaustauschkapazität (KAK), Verwitterungsoberfläche (VOF), van Genuchten-Parameter usw.) für die Modelle mit Hilfe von sog. Pedotransferfunktionen abgeleitet werden.

Praktische Forstplanung und Risikoeinschätzung erfordert nicht nur die Simulation an einigen wenigen intensiv untersuchten Standorten, sondern die flächenhafte Modellierung auf Landschaftsebene. Zur Parametrisierung dieser Simulationsmodelle, ist die flächendeckende Verfügbarkeit dieser bodenkundlichen Basisinformationen mit hinreichender Vorhersagegenauigkeit notwendig. Für Sachsen-Anhalt liegen flächenhafte Bodeninformationen digital in Form der Vorläufigen Bodenkarte im Maßstab 1 : 50.000 (VBK50, Landesamt für Geologie und Bergwesen in Halle) vor. Höher aufgelöste Flächendaten sind aus forstlichen Standortkartierungen verfügbar. Die forstliche Standortkartierung wird in Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt seit Mitte der 1960er Jahre auf Basis der Standortserkundungsanleitung (SEA) durchgeführt (SEA74: VEB FORSTPROJEKTIERUNG POTSDAM 1974, SEA95: SCHULZE 1996). Ein Bestandteil der SEA ist ein Bodenformenkatalog mit unzähligen Lokalbodenformen (allein 970 für das nordostdeutsche Tiefland - RUSS et al. 2013). Auf dieser Grundlage ist eine Ableitung von notwendigen Parametern für Simulationsmodelle nur bedingt möglich (KOPP u. JOCHHEIM 2002). Dementsprechend wurden in der Vergangenheit auf Grundlage des Lokalbodenformenkataloges der SEA und unter Berücksichtigung von bestehenden Merkmalsspiegeln (mittlere Bodeninformationen für die jeweilige Lokalbodenform) und Altweiserdaten Profilabfolgen mit Angaben zur Schichtmächtigkeit, Bodenart, Skelettgehalt, Trockenrohddichte und Humusgehalt abgeleitet (FLECK et al. 2015, KOPP u. JOCHHEIM 2002, PETZOLD et al. 2014). Für Sachsen-Anhalt liegt ein Katalog von Merkmalsspiegeln für flächendominante Lokalbodenformen nicht nur für das Tiefland, sondern auch für das Berg- und Hügelland vor (KOPP et al., unveröffentlicht, SCHWANECKE 1993).

Entsprechend war es das Ziel dieser Untersuchung, (1) die Güte der aus den Merkmalsspiegeln ermittelten bodenphysikalischen Basisdaten und hieraus abge-

leiteter Kennwerte anhand von Bodenprofilen aus den forstlichen Umweltmessnetzen zu evaluieren, (2) die erzielten Ergebnisse mit der VBK50 zu vergleichen und die Unsicherheiten bei den einzelnen Kennwerten zu beschreiben und (3) Empfehlungen für zukünftige Weiterentwicklungen abzuleiten.

2 Material und Methoden

2.1 Datengrundlagen und -aufbereitung

Für den Vergleich der punktuellen und räumlichen Bodeninformationen wurde die Lage der Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF), der ökologischen Waldzustandskontrolle (ÖWK) und der Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II, EVERS et al. 2013) in Polygonen der Standortkartierung und der VBK50 unter Verwendung des R-Paketes `sp` (PEBESMA u. BIVAND 2013) bestimmt. Dabei lagen 8 BDF-, 48 ÖWK- und 58 BZE-Bodenprofile in Polygonen der Standortkartierung mit Bodeninformationen von 50 verschiedenen Lokalbodenformen und 16 BDF-, 60 ÖWK- und 67 BZE-Bodenprofile in Polygonen der VBK50. Auf in der Standortkartierung vorhandenen Wechselstandorten wurde die flächenmäßig dominante Lokalbodenform ausgewählt.

Die vorhandenen Bodenprofile wurden vor der Evaluierung unter Verwendung des R-Paketes `aqp` (BEAUDETTE et al. 2013) auf Konsistenz getestet und Inkonsistenzen behoben oder Profile von dem Vergleich ausgeschlossen. Die Evaluierung der räumlich vorliegenden bodenphysikalischen Parameter Sand-, Schluff- und Tongehalt [Masse-%], Skelettgehalt [Vol. %], Trockenrohdichte [g cm^{-3}] und Humusgehalt [%] wurde für den Mineralboden bis in 90 cm Tiefe durchgeführt. Die horizontbezogenen bodenphysikalischen Parameter der Bodenprofile der BDF, der ÖWK, der Merkmalsspiegel und der VBK50 wurden in die den BZE-Profilen entsprechenden Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm, 10-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm umgerechnet. Dafür wurden alle vorhandenen Bodenprofile in 1 cm mächtige Schichten unterteilt und danach die Mittelwerte der bodenphysikalischen Parameter für die oben genannten Tiefenstufen berechnet (BEAUDETTE et al. 2013). Die Skelettgehalte wurden, soweit erforderlich, von Massen- in Volumenprozent (AG BODEN 2005) bzw. von Flächen- in Volumenprozent umgerechnet (WOLFF u. RIEK 2006).

Bei der Gegenüberstellung wurden sowohl bodenphysikalische Grundlagendaten (Bodenart, Skelettgehalt, Trockenrohdichte, Humusgehalt) als auch aus ihnen abgeleitete Größen betrachtet. Hierbei wurden die nFK nach WESSOLEK et al. (2009) ermittelt und für die gewählte Profiltiefe (90 cm) aufsummiert. Die Tiefe von 90 cm wurde als Betrachtungsraum gewählt, da von vielen BZE-Profilen nur bis zu dieser Tiefenstufe Daten vorliegen. Die VOF [$\text{m}^2 \text{g}^{-1}$] wurde durch eine empirische Schätzfunktion in Anlehnung an KOPTSIK et al. (2002) beschrieben:

$$VOF = \left(\sum_{i=1}^4 P_i \cdot f_i \right) \cdot \frac{TRD}{1000} \cdot 10^6 \quad [\text{m}^2 \text{m}^{-3}] \quad (1)$$

wobei f_i den Anteil an Ton (T), Schluff (U), Sand (S), Skelett (G), P_i die Koeffizienten (a-d) und damit die Beziehung zwischen Bodenart und Oberflächen und TRD die Trockenrohdichtedichte [kg m^{-3}] beschreibt. Zur Parametrisierung der Funktion wurden die Koeffizienten von SVERDRUP u. WARFVINGE (1993) verwendet ($a = 0,08$, $b = 0,02$, $c = 0,003$, $d = 0$). Die Summe von T + U + S + G ergibt 100. Die horizontspezifischen Werte wurden unter Berücksichtigung der Mächtigkeit bis zu einer Tiefe von 90 cm aufsummiert.

Die potenzielle KAK wurde nach AG BODEN (2005) aus der Bodenart und dem Humusgehalt (H) [%] abgeleitet:

$$KAK_{pot} = 0,5 \cdot T + 0,05 \cdot U + 2 \cdot H \quad [\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}] \quad (2)$$

Die horizontspezifischen Werte wurden unter Berücksichtigung der Trockenrohdichte und des Skelettgehaltes für die Bezugstiefe von 90 cm auf Flächenwerte [$\text{kmol}_c \text{ha}^{-1}$] umgerechnet.

Die organischen Böden wurden bei dem Vergleich nicht berücksichtigt, da sie nur in einem geringen Umfang vorkamen.

2.2 Bewertungskriterien

Die Güte der geschätzten Bodeneigenschaften und Kennwerte wurde anhand des Bestimmtheitsmaßes (R^2), des mittleren Quadratwurzelfehlers (RMSE) und des mittleren Fehlers (MR) beurteilt:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (BE_i - BE_i')^2}{\sum_{i=1}^N (BE_i - \overline{BE})^2} \quad (3)$$

$$MR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (BE_i - BE_i') \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (BE_i - BE_i')^2} \quad (5)$$

In den Gleichungen (3) bis (5) ist N der Stichprobenumfang, BE die Bodenparameter der Umweltmessnetze und BE' die aus der Standortskartierung oder VBK50 entnommenen Bodenparameter (Textur, Trockenrohdichte, Skelettgehalt, Humusgehalt) oder aus ihnen abgeleitete Kennwerte (nFK, VOF, KAK_{pot}).

Zur Beurteilung der Stärke und Signifikanz von räumlichen Autokorrelationen wurde der Moran's I-Test (LICHTSTEIN et al. 2002) mit der R-Bibliothek ape (PARADIS et al. 2004) durchgeführt.

3 Ergebnisse und Diskussion

Trotz hoher kleinräumiger Variabilität ließen sich die meisten bodenphysikalischen Parameter auf Grundlage der Standortkartierung verzerrungsfrei (MR) und mit verhältnismäßig hohen Bestimmtheitsmaßen schätzen (s. Tab. 1 und Abb. 1 u. Abb. 2). Die Skelettgehalte zeigten jedoch eine erhebliche Streuung. Diese kann auf die Schwierigkeiten der Schätzung (WOLFF u. RIEK 2006) und der hohen kleinräumlichen Variabilität des Skelettgehaltes zurückgeführt werden. Entsprechend ermittelten PUHLMANN et al. (2007) an 54 zufällig gewählten Punkten in einem bewaldeten Einzugsgebiet Variationskoeffizienten (VK) für den Skelettgehalt zwischen 11 und 18 % abhängig von der Tiefenstufe.

Tabelle 1: Zusammenstellung der Gütemaße für verschiedene bodenphysikalische Grundlagendaten

Karte	Kennwert	N	R ²	RMSE	MR
STOK	Sand [%]	475	0,85	13,27	-3,85
VBK50	Sand [%]	642	0,65	19,79	1,45
STOK	Schluff [%]	475	0,81	11,65	2,89
VBK50	Schluff [%]	642	0,65	15,47	1,24
STOK	Ton [%]	475	0,52	6,57	1,00
VBK50	Ton [%]	642	0,30	9,14	0,42
STOK	Skelett [%]	476	0,44	13,16	-0,45
VBK50	Skelett [%]	641	0,25	14,88	2,63
STOK	TRD [g cm ⁻³]	482	0,52	0,21	0,06
VBK50	TRD [g cm ⁻³]	646	0,18	0,40	-0,24
STOK	Humus [%]	489	0,58	3,73	1,32
VBK50	Humus [%]	655	0,35	4,16	1,47

N = Stichprobenumfang, R² = Bestimmtheitsmaß, RMSE = Quadratwurzelfehler, MR = mittlerer Fehler, STOK = Standortkartierung, VBK50 = vorläufige Bodenkarte im Maßstab 1 : 50.000

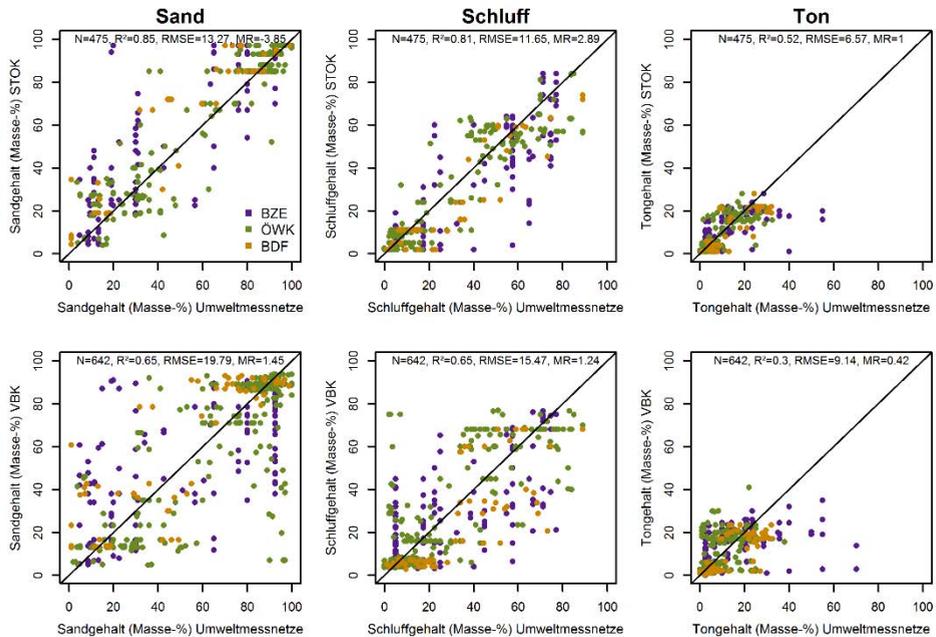


Abbildung 1: Beziehungen zwischen den Korngrößenfraktionen verschiedener Tiefenstufen aus den Bodenprofilen der jeweiligen Umweltmessnetze und der Standortskartierung (STOK) (oben) bzw. der Bodenübersichtskarte (VBK50) (unten)

Die Untersuchungen von RYTTER (2012) ergaben für sehr skelettarme landwirtschaftlich genutzte Böden VK zwischen 18 und 120 %. Bei einem angenommenen VK des Skelettgehaltes von 20 % würde sich nach dem Ansatz von MOLLITOR et al. (1980) der Mittelwert des Skelettgehaltes in einem Bodenprofil nur mit einer Unsicherheit von 39 % schätzen lassen. Diese Größenordnung macht deutlich, mit welchen Unsicherheiten die Skelettgehalte behaftet sein können.

Die Humusgehalte wurden tendenziell durch die Standortskartierung unterschätzt. Aufgrund der geringeren räumlichen Auflösung der VBK50 war die Schätzung des Humusgehaltes verglichen mit der Standortskartierung ungenauer (s. Tab. 1). Hervorzuheben ist die systematische Überschätzung der Trockenrohdichten in den Bodenprofilen der VBK50.

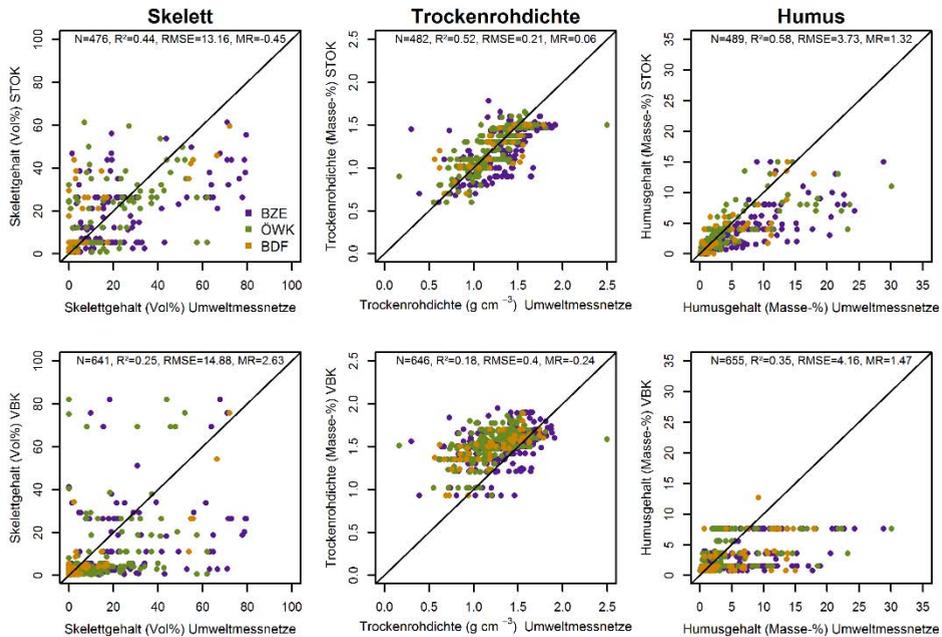


Abbildung 2: Beziehungen zwischen physikalischen Bodeneigenschaften verschiedener Tiefenstufen aus den Bodenprofilen der jeweiligen Umweltmessnetze und der Standortkartierung (STOK) (oben) bzw. der Bodenübersichtskarte (VBK50) (unten)

Die bodenphysikalischen Kennwerte nFK , KAK_{pot} und VOF wurden aus den vorab beschriebenen bodenkundlichen Grundlagendaten in unterschiedlicher Weise und Gewichtung abgeleitet. Während die nFK durch die Standortkartierung verzerrungsfrei abgebildet werden konnte ($MR = 1,33$ mm), wurde sie durch die VBK50 unterschätzt ($MR = 17,93$ mm) (s. Tab. 2, Abb. 3). Insgesamt sind jedoch beide Kartengrundlagen durch geringe Bestimmtheitsmaße und relativ hohe Quadratwurzelfehler gekennzeichnet. Die vergleichsweise schlechte Schätzung der nFK wurde insbesondere durch einen hohen Einfluss des ebenfalls schlecht vorher-sagbaren Skelettgehaltes hervorgerufen (vgl. Abb. 1). VOF und KAK_{pot} mit ihrer stärkeren Sensitivität hinsichtlich der Bodenarten weisen deutlich bessere Güte-maße, insbesondere bei der Standortkartierung, auf (s. Abb. 4 und Abb. 5). Eine bessere Prognose der KAK_{pot} wurde durch die hohe Sensitivität des mit hohen Unsicherheiten behafteten Humusgehalts erschwert (vgl. Tab. 1). Signifikante räumliche Autokorrelationen waren für die Standortkartierung bei der Ermittlung der VOF und bei der VBK50 für VOF und KAK_{pot} nachzuweisen. Die berechneten Werte der nFK sind jedoch bei beiden Kartengrundlagen räumlich stabil.

Tabelle 2: Zusammenstellung der Gütemaße für bodenphysikalische Kennwerte

Karte	Kennwert	N	R ²	RMSE	MR	MORAN I
STOK	nFK [mm]	101	0,23	27,29	1,33	0,19
VBK50	nFK [mm]	143	0,20	33,37	17,93	0,36
STOK	KAK _{pot} [kmol _c /ha]	101	0,33	2464,56	1385,36	0,99
VBK50	KAK _{pot} [kmol _c /ha]	143	0,15	2423,28	496,15	9,53E-06
STOK	VOF [m ² /m ³]	101	0,59	2,20E+05	7,05E+05	0,04
VBK50	VOF [m ² /m ³]	143	0,36	1,03E+06	-1,47E+06	5,05E-04

N = Stichprobenumfang, R² = Bestimmtheitsmaß, RMSE = Quadratwurzelfehler, MR = mittlerer Fehler, MORAN I = Signifikanzniveau des Moran I-Tests, STOK = Standortskartierung, VBK50 = vorläufige Bodenkarte im Maßstab 1 : 50.000

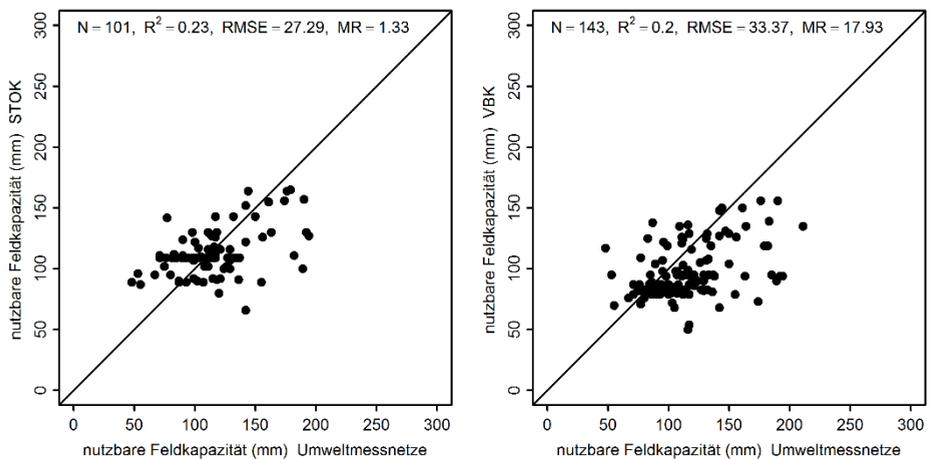


Abbildung 3: Beziehungen zwischen der nutzbaren Feldkapazität (nFK) bis 90 cm Bodentiefe der Bodenprofile der jeweiligen Umweltmessnetze und der Standortskartierung (STOK) (linke Abb.) bzw. der vorläufigen Bodenkarte im Maßstab 1 : 50.000 (VBK50) (rechte Abb.); organische Böden wurden nicht berücksichtigt

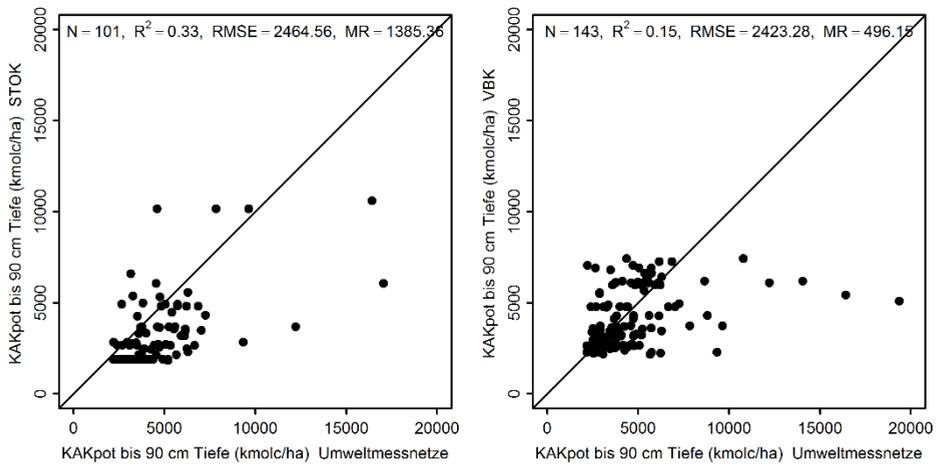


Abbildung 4: Beziehungen zwischen der potenziellen Kationenaustauschkapazität KAK_{pot} bis 90 cm Bodentiefe der Bodenprofile der jeweiligen Umweltmessnetze und der Standortskartierung (STOK) (linke Abb.) bzw. der vorläufigen Bodenkarte im Maßstab 1 : 50.000 (VBK50) (rechte Abb.); organische Böden wurden nicht berücksichtigt

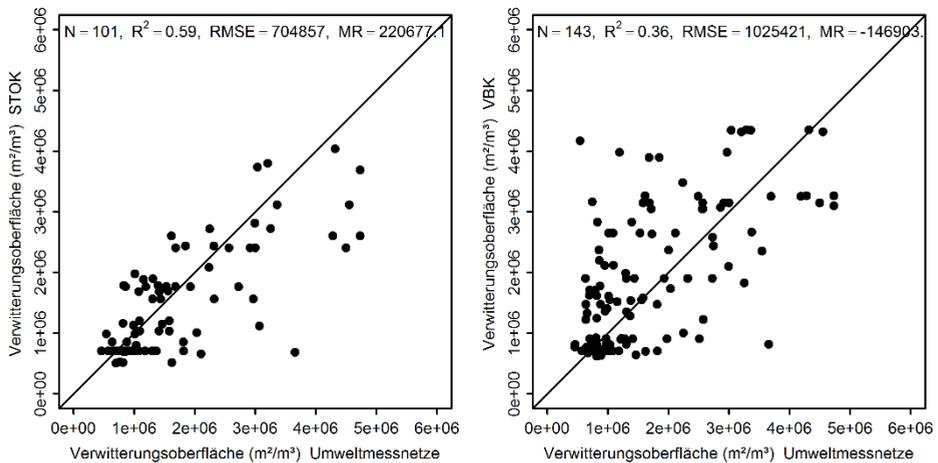


Abbildung 5: Beziehungen zwischen der Verwitterungsoberfläche (VOF) bis 90 cm Bodentiefe der Bodenprofile der jeweiligen Umweltmessnetze und der Standortskartierung (STOK) (linke Abb.) bzw. der Bodenübersichtskarte (VBK50) (rechte Abb.); organische Böden wurden nicht berücksichtigt

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die verfügbaren räumlichen Bodeninformationen in Sachsen-Anhalt (Kombination der Standortkartierung mit den mittleren Merkmalsspiegeln der Lokalbodenformen) sind eine geeignete Datengrundlage zur flächenhaften Abschätzung wesentlicher bodenphysikalischer Parameter. Verbesserungen und Anpassungen sind hinsichtlich der Humus- und Skelettgehalte notwendig. Diese können z. B. durch die Aufbereitung und Auswertung von Altweiserprofilen für Sachsen-Anhalt erfolgen. Die große Unsicherheit bei der Ermittlung der nutzbaren Feldkapazität durch die kleinräumliche Variabilität der Skelettgehalte wird jedoch auch dadurch nur schwer zu verbessern bzw. beheben sein.

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 Waldklimafonds, Projekt „Veränderte Produktivität und Kohlenstoffspeicherung der Wälder Deutschlands angesichts des Klimawandels“ (WP-KS-KW) (FKZ 28WC400303).

Literatur

- AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung 5. Auflage, 438 S.
- AHRENDTS, B.; MEESENBURG, H.; DÖRING, C. u. JANSEN, M. (2010): A spatio-temporal modelling approach for assessment of management effects in forest catchments. Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins. IAHS Publ. 336, 32-37
- BEAUDETTE, D. E.; ROUDIER, P. u. O'GEEN, A. T. (2013): Algorithms for quantitative pedology: A toolkit for soil scientists. Computer & Geosciences, 52, 258-268
- EVERS, J.; PAAR, U. u. EICHHORN, J. (2013): Bestätigt die BZE die Trophieeinschätzung der forstlichen Standortkartierung? Ergebnisse der BZE II in Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt. AFZ-DerWald, 14, 11-55
- FLECK, S.; ALBERT, M.; PLAŠIL, P.; NAGEL, R.; SUTMÖLLER, J.; AHRENDTS, B.; SCHMIDT, M.; EVERS, J.; HANSEN, J.; OVERBECK, M.; SCHMIDT, W.; SPELLMANN, H. u. MEESENBURG, H. (2015): Pilotstudie zu den lokalen Auswirkungen des Klimawandels auf die Forstwirtschaft in ausgewählten Regionen Sachsen-Anhalts. Beiträge aus der NW-FVA, Band 13, 221 S.
- KOPP, D. u. JOCHHEIM, H. (2002): Forstliche Boden- und Standortformen des nordostdeutschen Tieflands als Datenbasis für die Landschaftsmodellierung. Verlag Kessel, 207 S.
- KOPP, D.; SCHWANECKE, W. u. SCHMIDT, W. (unveröffentlicht, in Bearbeitung): Merkmalsspiegel zur Kennzeichnung der wichtigsten forstlichen Lokalbodenformen Sachsen-Anhalts
- KOPTSIK, G.; TEVELDAL, S.; KOPTSIK, S. u. SRAND, L. (2002): Calculations of weathering rate and soil solution chemistry for forest soils in the Norwegian-Russian border area with the Profile model. A reply to the comment by M.E. Hodson. Appl. Geochemistry, 17, 123-127
- LICHTSTEIN, J. W.; SIMONS, T. R.; SHRINER, S. A. u. FRANZREB, K. E. (2002): Spatial autocorrelation and autoregressive models in ecology. Ecological Monographs, 72, (3), 445-463

- MOLLITOR, A. V.; LEAF, A. L. u. MORRIS, L. A. (1980): Forest soil variability on northeastern flood plains. *Soil Sci, Soc. Am. J.*, 44, (3), 617-620
- PARADIS, E.; CLAUDE, J. u. STRIMMER, K. (2004): APE: analyses of phylogenetics and evolution in R language. *Bioinformatics*, 20, 289-290
- PEBESMA, E. u. BIVAND, L. A. (2013): Package sp: Classes and methods for spatial data. [https:// r-forge.r-project.org/projects/rsatial/](https://r-forge.r-project.org/projects/rsatial/)
- PETZOLD, R.; BENNING, R.; GEMBALLA, R.; KARAS, F. u. ANDREAE, H. (2014): Aus alt mach neu. Altweiserdaten für die Ableitung und Regionalisierung bodenphysikalischer Eigenschaften in Sachsen. Tagungsband der Forstwissenschaftlichen Tagung, 203 S.
- PUHLMANN, H.; WILPERT, V. K. u. ERLER, K. (2007): Einfluss des Bodenskeletts und der Bestandesstruktur auf den Bodenwassertransport im Conventwald (Schwarzwald). *Dresdner Schriften zur Hydrologie*, 5, 299-308
- RUSS, A.; RIEK, W. u. WESSOLEK, G. (2013): Regionalisierung bodenphysikalischer Kennwerte auf Grundlage forstlicher Standortskarten. *Freiburger Forstliche Forschung*, 96, 113-127
- RYTTER, R.-M. (2012): Stone and gravel contents of arable soils influence estimates of C and N stocks. *Catena*, 95, 153-159
- SCHULZE, G., (1996): Anleitung für die forstliche Standortserkundung im nordostdeutschen Tiefland (Standortserkundungsanleitung) SEA 95 Teil A. Unter Mitarbeit von D. Kopp. 2. Auflage der SEA 74
- SCHULZE, G. (1998): Anleitung für die forstliche Standortserkundung im nordostdeutschen Tiefland (Standortserkundungsanleitung) SEA 95 Teil D. Bodenformen-Katalog. Merkmalsübersichten und -tabellen für Haupt- und Feinbodenformen. Unter Mitarbeit von D. Kopp. 3. Auflage
- SCHWANECKE, W. (1993): Merkmalstabellen für Haupt- und Lokalbodenformen der forstlichen Standortserkundung im Bundesland Sachsen-Anhalt. Teil: Mittelgebirge und Hügelland (Bodenformen-Katalog). Im Auftrag des Forstplanungsamtes Sachsen-Anhalt, Gernrode-Haferfeld
- SUTMÖLLER, J.; HENTSCHEL, S.; HANSEN, J. u. MEESENBURG, H. (2011): Coupled forest growth-hydrology modelling as an instrument for the assessment of effects of forest management on hydrology in forested catchments. *Adv. Geosci.*, 27, 149-154
- SVERDRUP, H. u. WARFVINGE, P. (1993): Calculating field weathering rates using a mechanistic geochemical model PROFILE. *Appl. Geochemistry*, 8, 273-283
- VEB Forstprojektiertung Potsdam (Hrsg.) (1974): Anweisung für die forstliche Standortserkundung in der DDR; Standortserkundungs-Anweisung (SEA; unter Leitung von KOPP, D. u. SCHWANECKE, W.). Potsdam
- VBK50: Vorläufige Bodenkarte Sachsen-Anhalt, Maßstab 1:50 000 (VBK 50). Landesamt für Geologie und Bergwesen (LAGB) Sachsen-Anhalt, Halle
- WOLFF, B. u. RIEK, W. (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. Wald+Boden Umweltconsult GmbH, Falkenberg, 59 S.
- WESSOLEK, G.; KAUPENJOHANN, M. u. RENGER, M. (2009): Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis. *Bodenökologie und Bodengenese*, 40, 80 S.

Korrespondierender Autor:

Dr. Bernd Ahrends
Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
Abt. Umweltkontrolle
Grätzelstraße 2
D-37079 Göttingen
bernd.ahrends@nw-fva.de

Dr. Silke Hafner
Dr. Jan Evers
Dr. Henning Meesenburg
Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt

Christian Steinicke
Wolfgang Schmidt
Vormals: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt