



Scopus Indexed Journal

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

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


### Regionalisierung von Bodendaten für Deutschland – Datenbasis, Zielgrößen und Modellgüte am Beispiel zweier Testgebiete

#### *Regionalization of soil data for Germany – data basis, target variables, model performance for two exemplary test regions*

Klaus von Wilpert, Dietmar Zirlewagen &amp; Heike Puhlmann

#### Abstract

In a project of the German “Waldklimafonds”, on the basis of soil data from the Forest Soil Inventory (FSI) as well as information from other soil profiles, stochastic downscaling models have been parameterized in order to assess those soil information at the grid points of the National Forest Inventory (NFI) where soil data have not been measured. This transfer provides not only assessments of soil data at the sampling points of NFI rather than assessments errors which allows to parameterize climate sensitive growth models. The “point to area” transfer is performed by classical regression techniques (OLS, Regression Kriging) or, alternatively by Random Forest models and Boosted Regression Trees – the more performant model being identified by split validation with an independent sub-dataset. The data basis for that procedure are measurements and semi-quantitative soil profile descriptions from FSI, other project data and from the site classing system. The regionalization of 13 target variables (coarse soil fraction, bulk density, %Sand, %Silt, % Clay, soil development depth, nFK, Hydromorphy, C-content, C/N-ratio, base saturation, Cation exchange capacity,  $\text{pH}_{\text{KCl}}$ ) is performed in 1–2 soil depths which sums-up to 25 regionalization models in 8 soil regions of the state-wide soil map (1 : 100.000). Individual parameter sets have been identified for the 8 soil regions respectively. So the individual relation to regional landscape characteristics is maximized and thus model performance. This contribution gives an overview on the German-wide evaluation structure, but is mainly restricted to the first test region “Prealpine hills and limestone Alps” for methodological details. The following could be shown:

1. That an objective and sensible delineation of regionalization regions is possible on the basis of the spatial variability of target variables according growth regions.

2. Regionalization models with acceptable error budget can be identified for the whole nation, even if data quality varies substantially among the federal states.
3. The effect of data quality on model performance could be quantified.

Regionalization models for soil data normally explain ca. 50–80% of the parameter variability – except of few parameters where the random, not landscape-related variability is high. Model residuals are randomly distributed and display no auto-correlation in space.

**Keywords:** Nation-wide regionalization of soil data, comparison of regression techniques, influence of data quality, including site classing data.

#### Zusammenfassung

Im Rahmen eines Waldklimafonds-Projektes werden auf Basis von Daten der Bodenzustandserfassung im Wald (BZE) und zusätzlichen Bodenprofilen Bodendaten auf die Traktecken der Bundeswaldinventur (BWI) so übertragen, dass nicht nur die Schätzdaten für die Parametrisierung klimasensitiver Wachstumsmodelle verfügbar, sondern auch deren Fehler abgeschätzt werden. Auf der Basis einer unabhängigen Validierung werden klassische Regressionstechniken (OLS, Regression-Kriging) alternativ zu Random-Forests- und BRT-Modellen getestet. Die Beobachtungsdatenbasis für die Modellbildung stammt aus den Messungen und Bodenbeschreibungen der BZE, anderen Projektdaten und der Forstlichen Standortskartierung. Die Regionalisierung von 13 Zielgrößen (Skelettgehalt, Trockenrohddichte, %Sand, %Schluff, %Ton, Gründigkeit, nFK, Hydromorphie, C-Gehalt, C/N-Verhältnis, Basensättigung, effektive Kationen Austauschkapazität,  $\text{pH}_{\text{KCl}}$ ) wird in 1–2 Bodentiefen durchgeführt, was je 25 Regionalisierungsmodelle in 8 aggregierten Bodengroßlandschaften der BÜK1000 ergibt. Für die Modell-anwendung werden individuell für die Charakteristika dieser

Straten angepasste Prädiktorenssets identifiziert und so die Erklärungsgüte der Modelle maximiert. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über die bundesweite Auswertungsstruktur, beschränkt sich für methodische Details und Ergebnisse aber hauptsächlich auf die Region Alpenvorland und Nördliche Kalkalpen. Dabei wird gezeigt:

1. dass eine objektive Abgrenzung von Regionalisierungsregionen anhand der naturräumlichen Variabilität der Zielvariablen innerhalb und zwischen Regionen
2. sowie eine länderübergreifende Regionalisierung trotz unterschiedlicher Datenqualitäten in den Ländern mit vertretbarem Fehlerrahmen möglich ist,
3. und die Auswirkung unterschiedlicher Datenqualitäten auf das Regionalisierungsergebnis quantifiziert werden kann.

Bisherige Regionalisierungen von Bodendaten haben gezeigt, dass der Anteil der erklärten Parametervarianz zwischen ca. 50 und 80% zu erwarten ist, dass die Residuen zufällig verteilt und nicht räumlich autokorreliert sind.

**Schlüsselwörter:** deutschlandweite Regionalisierung von Bodendaten, Vergleich verschiedener Regressions-techniken, Einfluss der Datenqualität, Einbeziehung von Standortskundendaten.

## 1 Einleitung

Im Rahmen des bundesweiten, vom Waldklimafonds geförderten Forschungsprojekts „Veränderte Produktivität und Kohlenstoffspeicherung der Wälder Deutschlands angesichts des Klimawandels“ WP-KS-KW (FKZ 28WC400301), sollen Bodeninformationen aus verschiedenen Datenquellen (z. B. BZE, Standortkartierung, Geologische Landesämter) mit Hilfe statistischer Regionalisierungsverfahren in Form quasi-kontinuierlicher Geländemodelle aufgearbeitet und auf die

Traktecken der BWI übertragen werden. Ziel ist dabei, an den Messorten der BWI die für eine klimasensitive Modellierung des Baumwachstums benötigten Bodenparameter zur Verfügung zu stellen. Die Auswahl der in die Regionalisierung einbezogenen Bodenparameter dient der Abschätzung der raum-zeitlichen Variation von Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit an den BWI Traktecken.

Die Messnetze von BWI und BZE wurden räumlich getrennt, da es sich bei der BWI um eine verdeckte Stichprobe handelt, um einen bewirtschaftungsbedingten Bias zu vermeiden. Die Anlage von Bodenprofilen an den BWI-Trakten würde deren Lage für die Waldbewirtschaftler erkennbar machen.

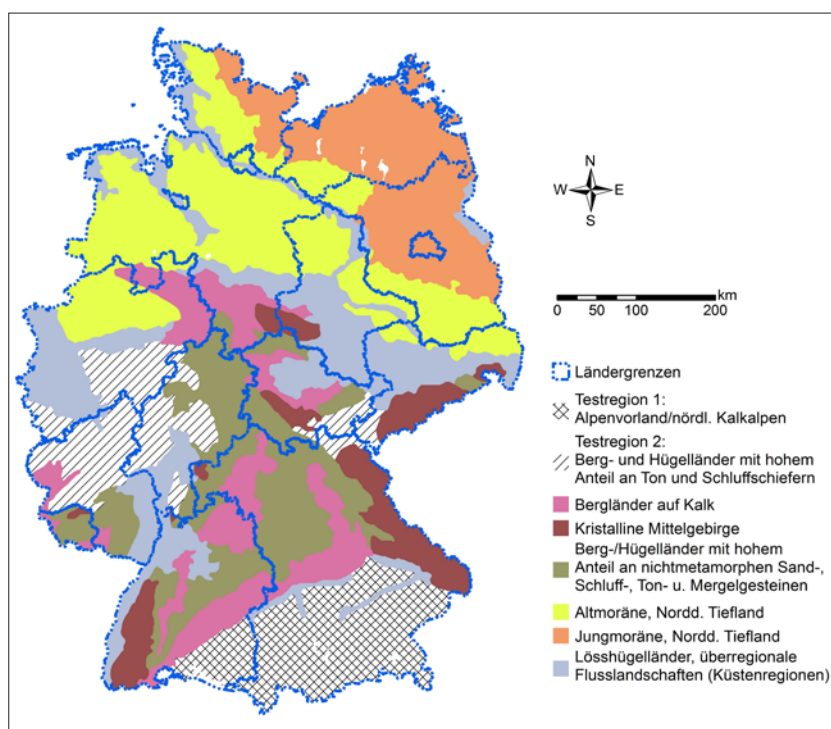
Das Regionalisierungsverfahren basiert vorzugsweise auf einer Kombination aus schrittweiser multipler Regressionsanalyse und Geostatistik (Regression-Kriging). Aufgrund der großen naturräumlichen Vielfalt in Deutschland und der beschränkten Aufnahmedichte der BZE werden für Bodengroßlandschaften mit deutlich unterschiedener Charakteristik individuelle Regressionsmodelle erstellt. In den untersuchten Testgebieten wurden alternative Modelle mit Ausgangsdaten unterschiedlicher Qualität und mit globalen vs. regional individuellen Prädiktorenssets gerechnet, um für die deutschlandweite Auswertung eine optimale Vorgehensweise zu identifizieren.

## 2 Material und Methoden

Im Folgenden werden die verwendeten Datenquellen hinsichtlich Umfang, Verfügbarkeit und Qualität charakterisiert sowie ein Überblick über die verwendeten und getesteten Auswertungsmethoden gegeben.

### 2.1 Identifikation der Modellregionen

Die Erstellung der Regionalisierungsmodelle wurde in naturräumlich möglichst homogenen Bodengroßlandschaften (BGL) getrennt durchgeführt. Dabei wurden individuell für die Charakteristika der Großlandschaften angepasste und



**Abb. 1:** Lage der acht aus der Bodenübersichtskarte 1:1 Mio. abgeleiteten Regionalisierungsregionen.

**Fig. 1:** Situation and spatial distribution of the eight macrochores (strata) as derived from the German general soil map (1:1 Mio).

relevante Prädiktorenssets identifiziert. So wird erreicht, dass die während der Modellanpassung schrittweise identifizierten Prädiktorenssets auch bodenkundlich interpretierbar sind und die für die bearbeiteten Regionen relevanten bodenkundlichen Prozessrelationen abbilden. Deshalb wird hingenommen, dass der Modellierungsaufwand im Vergleich zum globalen Modellansatz ohne Stratifizierung stark erhöht wird. Dafür wird aber die Erklärungsgüte der Modelle maximiert und der Prognosefehler minimiert.

Die Regionalisierungsregionen (Straten) wurden auf Grundlage der BGL der Bodenübersichtskarten (BÜK 1:1 Mio., BGR 2014) modellgestützt abgegrenzt (Abb. 1). Zunächst wurden die BGL nach Kriterien wie Regionalklima, Substrat und Geologie zu größeren, aber möglichst homogenen Einheiten zusammengefasst. Deren Abgrenzungsgüte wurde mit einem statistischen Modellansatz überprüft. Ziel war es, für in Frage kommende Aggregierungsvarianten der BGLs diejenige mit der bestmöglichen Trennschärfe bodenchemischer und -physikalischer Eigenschaften im BZE-Messdatensatz zu finden. Hierfür wurden die BZE-Datensätze getrennt nach Herkunftsland (BY, BW, ...) und, balanciert für BÜK1000-Großlandschaften und chemisch-physikalische Bodeneigenschaften der Messwerte, zufällig hälftig in Test- und Validierungsdaten aufgeteilt (ergab 676 Test- und 677 Validierungsdatensätze). Für die jeweilige Aggregierungsvariante als Response wurde ein Random-Forests-Klassifikationsmodell mit bodenchemischen und -physikalischen Messdaten der BZE-II als Hilfsvariablen

angepasst. Bewertet wurde die Klassifikationsgüte nach individuellen und Gesamt-Kappa-Koeffizienten im Validierungsdatensatz und in der sogenannten Out-of-Bag-Stichprobe des RF-Modells. Sehr geringe individuelle Kappas nahe 0 gaben einen Hinweis auf geringe Trennschärfe zwischen Straten und führte zu Umgruppierung der Straten. Es wurden nur solche Straten zugelassen, die einen ausreichenden Stichprobenumfang für die zu erstellenden Regionalisierungsmodelle bereitstellten.

Neben den stratenbasierten Modellen wurden auch globale Modelle zu Vergleichszwecken berechnet. Das sind Modelle, bei denen auf eine Stratifizierung verzichtet wird und das gesamte Datenkollektiv, getrennt nach Test- und Validierungsdaten, zur Modellbildung verwendet wird.

Ebenfalls wurde getestet, wie die räumliche Verteilung und Aufnahmedichte von Zielvariablen (Grunddatensatz [BZE] vs. erweiterter Datensatz [BZE und Zusatzprofile]), die Güte der Zielvariablen (Mess- vs. Schätzgrößen) sowie das statistische Verfahren (Ordinary Least Squares OLS vs. Random Forests RF vs. Boosted Regression Trees BRT) die Güte der Modellvorhersage beeinflussen.

## 2.2 Datenquellen und Zielgrößen

Grundlage der Modellentwicklung sind die Datensätze der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE) sowie des BIOSOIL-Projektes (Forest Soil Condition Database

**Tab. 1:** Bodenkundliche Zielgrößen mit Tiefenbezug, deren sachwissenschaftlicher Kontext und erwarteter Nutzen im Projekt, sowie die Zahl der Regionalisierungsmodelle je Regionalisierungsregion.

**Tab. 1:** Soil target variables with soil depth, evaluation-related context, expected benefit to the project and expected number of regionalization models per stratum.

	Zielvariable	Nutzen	Modelle je Region
<b>Bodenphysik</b>	Skelett 0–30 u. 30–60 cm	Abschläge für nFK	2
	Trockenrohdichte 0–30 u. 30–60 cm	Einganggröße in PTFs	2
	Textur (%S, %U, %T) 0–30 u. 30–60 cm	Bezug zu Standortsleistung, Einganggröße in PTFs	6
	Gründigkeit (Oberkante Cv bzw. Sd)	Bezug zu Standortsleistung, Abschätzung Wurzelraum, nFK-Summen	1
<b>Wasser-/ Lufthaushalt</b>	nFK (Summe über Entwicklungstiefe)	Bezug zu Standortsleistung	1
	Oberkante Sd-Horizont / Hydromorphie		2
	Oberkante Gr-Horizont / Hydromorphie		2
<b>Bodenchemie</b>	Corg 0–30 u. 30–60 cm		2
	C/N 0–30 u. 60 cm		2
	BS 0–30 u. 30–60 cm	2	
	Ake 0–30 u. 30–60 cm	2	
	pH <sub>KCl</sub> 30–60 cm	1	
<b>Summe Modelle pro Region:</b>			<b>25</b>

Level I Version 2 FSCDB.LI.2 [BioSoil+], COOLS & DE VOS 2011). Beide Datensätze weisen einen insbesondere im Bereich der Bodenindikatoren nahezu perfekten Umweltvektor mit einer Vielzahl von gemessenen Zustandsgrößen auf (WELLBROCK et al. 2006, COOLS & DE VOS 2011). Alle Erhebungen fanden nach harmonisierten und qualitätsgeprüften Verfahren statt. Die gemessenen Indikatoren zum Bodenwasserhaushalt erlauben in Verbindung mit Klimadaten die dynamische Schätzung der Bodenwasserverfügbarkeit als wichtige Steuergröße für das Wachstum von Waldbeständen. Außerdem wurden Projektdaten von Bodenprofilen, die aus den Standortkartierungsverfahren der Länder, wissenschaftlichen Einzelprojekten oder von anderen Ressorts wie z. B. den Geologischen Landesämtern zur Verfügung standen, in die Regionalisierungsarbeiten einbezogen. Letztere waren besonders für die Modellierung der bodenphysikalischen Zielgrößen wertvoll.

In Baden-Württemberg wurden im Rahmen der BWI 3 ausgewählte Bodenmerkmale mit den Schwerpunkten auf die Indikatoren des Kohlenstoff- und Wasserhaushalts erfasst. Je Trakt erfolgte diese Erhebung nur an einer Traktecke. Es wurden an Kleinprofilen und Bohrungen Proben genommen, die auf bodenphysikalische und bodenchemische Parameter im Labor untersucht wurden. Daneben wurden Parameter wie der Steingehalt im Feld geschätzt. So lagen hier für die Parameter C-Gehalt,  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  und Grobbodenanteil an ca. 4.500 Messpunkten im 2 x 2 km-Raster zusätzlich zur BZE Bodeninformationen vor.

Der Grunddatensatz für die Erstellung der Regressionsmodelle besteht aus den Messungen und Schätzungen an den Profilen der zweiten bundesweiten Bodenzustandserhebung (BZE-II). Die bundesweiten BZE-Daten wurden vom Thünen-Institut für Waldökosysteme (TI), Eberswalde, bezogen und von unplausiblen und fehlerhaften Daten bereinigt. Da die BZE-Daten nur in einer relativ geringen räumlichen Dichte (8 x 8 km-Raster, ca. 2.000 BZE-Punkte) vorliegen, wurden weitere georeferenzierte Profile, die in den verschiedenen Bundesländern aus unterschiedlichen Länderaufnahmen und Projekten vorliegen, in die Datenbank der Zielvariablen einbezogen. Während die BZE-Daten vom TI in weitgehend harmonisierter Form bezogen werden konnten, war dies für die Zusatzprofile aus den länderspezifischen Aufnahmen nicht der Fall. Sämtliche aus den Ländern bezogenen Datensätze wurden formell harmonisiert und auf Plausibilität der Wertebereiche geprüft. Der Datensatz der Zielvariablen ist bis auf wenige Bundesländer, die noch weitere Zusatzprofile bereitstellen werden, vollständig.

Die Liste der Zielgrößen aus dem Projektantrag wurde in Absprache mit den Projektbeteiligten aus dem Standortskunde-Modul (M1) ergänzt und so modifiziert, dass eine möglichst große Übereinstimmung der Zielgrößen aus dem Regionalisierungsmodul (M4) gegeben ist bzw. M4 auch die Zielgrößen abdeckt, für die aus M1 eine eher lückenhafte Datenlage zu erwarten ist. Hauptziel bei der Festlegung der Zielgrößen war, dass aus diesen sinnvolle Indikatoren zur Schätzung der Bodenwasser- und der Nährstoffverfügbarkeit abgeleitet werden sollen, die dann im weiteren Projektverlauf in die klimasensitive Modellierung des Baumwachstums einfließen soll. Es wurden die in Tabelle 1 dargestellten Zielgrößen vereinbart und für die dort genannten Bodentiefen Regionalisierungsmodelle erstellt.

## 2.3 Multivariate Statistische Verfahren

Die Regionalisierung wurde überwiegend mittels multiplen linearen Regressionsmodellen (Ordinary Least Squares OLS) durchgeführt. Alternativ wurden Regressionsbaumverfahren als Boosted Regression Trees BRT (FREUND & SCHAPIRE 1997, FRIEDMANN 2001, ELITH et al. 2008) und Random Forests Modelle (RF, BREIMANN 2001) angepasst. Unter diesen Alternativen wurden die Modelle mit der besten Erklärungsgüte ( $R^2$ ) und dem geringsten Fehler (RMSE) ausgewählt. OLS-Modelle haben den Vorteil, dass sie maximal transparent sind und die Prädiktoren und ihre Parameter sachwissenschaftlich gut interpretiert werden können. Sie haben jedoch den Nachteil, dass die formalen Modellprämissen aufwendig geprüft werden müssen und oftmals eine Transformation der Messwerte nötig wird, um die Normalverteilung hinreichend anzunähern. Außerdem sind keine nichtlinearen Responsefunktionen auf der Originalskala verfügbar. BRT- und RF-Modelle sind Ensemble-Methoden des maschinellen Lernens, bei denen jeweils viele Regressionsbäume zur Vorhersage eingesetzt werden. Sie stellen robuste Verfahren zur Vorhersage dar, bei denen eine Überanpassung vermieden wird und dabei auch nichtlineare Beziehungen zwischen Response- und Feature-Variablen angepasst werden können. Im Vergleich zum RF-Modell haben BRT-Modelle den Nachteil, dass Einstellungen teils subjektiv getroffen werden müssen. Dafür sind die Modelle besonders gut interpretierbar, da im Modell-Output nichtlineare Responsefunktionen grafisch in R abrufbar sind. Letzteres ist im RF-Modell nicht möglich, sie sind auch gegenüber Ausreißern anfälliger, da sie mit lokalen Optimierungsverfahren arbeiten, wodurch die Rechengeschwindigkeit aber hoch ist. Bei beiden Regressionsbaumverfahren wurden Residuenplots erstellt und mit denen der OLS-Modelle verglichen. Dabei zeigte sich, dass die RF-Modelle im Vergleich zu den BRT-Modellen zu stärkeren Varianzungleichheiten mit nichtlinearen Strukturen neigten, die Qualität der Residuenplots der BRT-Modelle aber mit denen der OLS-Modelle vergleichbar war. Daher wurde im Laufe des Projektes auf den Einsatz von RF-Modellen als Variante von Regressionsbaumverfahren verzichtet.

Mögliche Kovariablen in den OLS-Modellen bzw. Feature-Variablen bei den CART-Modellen waren Angaben zur Topographie, zur Geologie, zu Bodentypen, zum Klima bzw. der Depositionssituation (PINETI-Karten, SCHAAP et al. 2015), zu Bodenschutzkalkungen und zu den Eigenschaften des Waldbestandes (Alter, Baumartenzusammensetzung).

Die sehr heterogenen, länderspezifischen GIS-Karten und -Datensätze, die von den datenhaltenden Institutionen der Bundesländer abgefragt wurden, mussten harmonisiert und in ein einheitliches Koordinatensystem überführt werden. Das für das Projekt eigentlich vorgesehene vorhandene deutschlandweite DGM wies erhebliche Artefakte auf und entsprach nicht den für geowissenschaftliche Regionalisierungsarbeiten im Projekt definierten Mindeststandards. Es musste mit erheblichem Aufwand aus den DGM-Rasterkarten der einzelnen Länder ein Projekt-DGM in 25 m-Rasterauflösung erstellt werden, für das umfangreiche Reliefanalysen in ArcGIS- und SAGA-GIS durchgeführt wurden (geomorphometrische Reliefattribute, komplexe Reliefattribute, Hangpositionsindizes, Landschaftskategorien u. v. a. m.).

Als flächige geologische Information wurde die frei verfügbare GÜK200 verwendet. Bodeninformationen wurden, wo flächendeckend vorhanden, aus der BÜK50 generiert, sonst musste auf die BÜK200 (wo vorhanden) oder (wo auch diese

in selteneren Fällen fehlte) auf die BÜK1000 zurückgegriffen werden.

Alle statistischen Analysen wurden mit R 3.1.x (R CORE TEAM, 2015), OLS- und CART-Analysen mit den Packages random-Forest, gbm, dismo und stats durchgeführt.

### 2.4 Kriterien zur Prüfung der Modellgüte

Die Optimierung der OLS-Regressionsmodelle und die Modellgüte wurden für jedes Modell anhand statistischer Kenngrößen wie Kollinearitätsindex, Toleranzindex, RMSE,  $R^2$  des Modells, partielles  $R^2$  der ins Modell einbezogenen Prädiktoren sowie anhand der Entwicklung der statistischen

Kenngrößen während der schrittweisen Anpassung des Modells dokumentiert. Ebenso wurden anhand einschlägiger statistischer Tests für die verwendeten Prädiktoren und Zielgrößen und grafischen Auswertungen (Residuenanalyse) die Voraussetzungen für die Bildung multipler linearer Regressionsmodelle geprüft und ggf. über entsprechende Transformationen der Daten durchgeführt. Die Güte der Regionalisierungsmodelle wurde durch eingehende Fehleranalyse überprüft. Dabei wurde auch die räumliche Autokorrelation berücksichtigt.

Ein Beispiel der in dieser Studie durchgeführten Anpassungsdiagnosen zu formalstatistischen OLS-Prüfkriterien wird in Abbildung 2 am Beispiel eines OLS-Modells für die

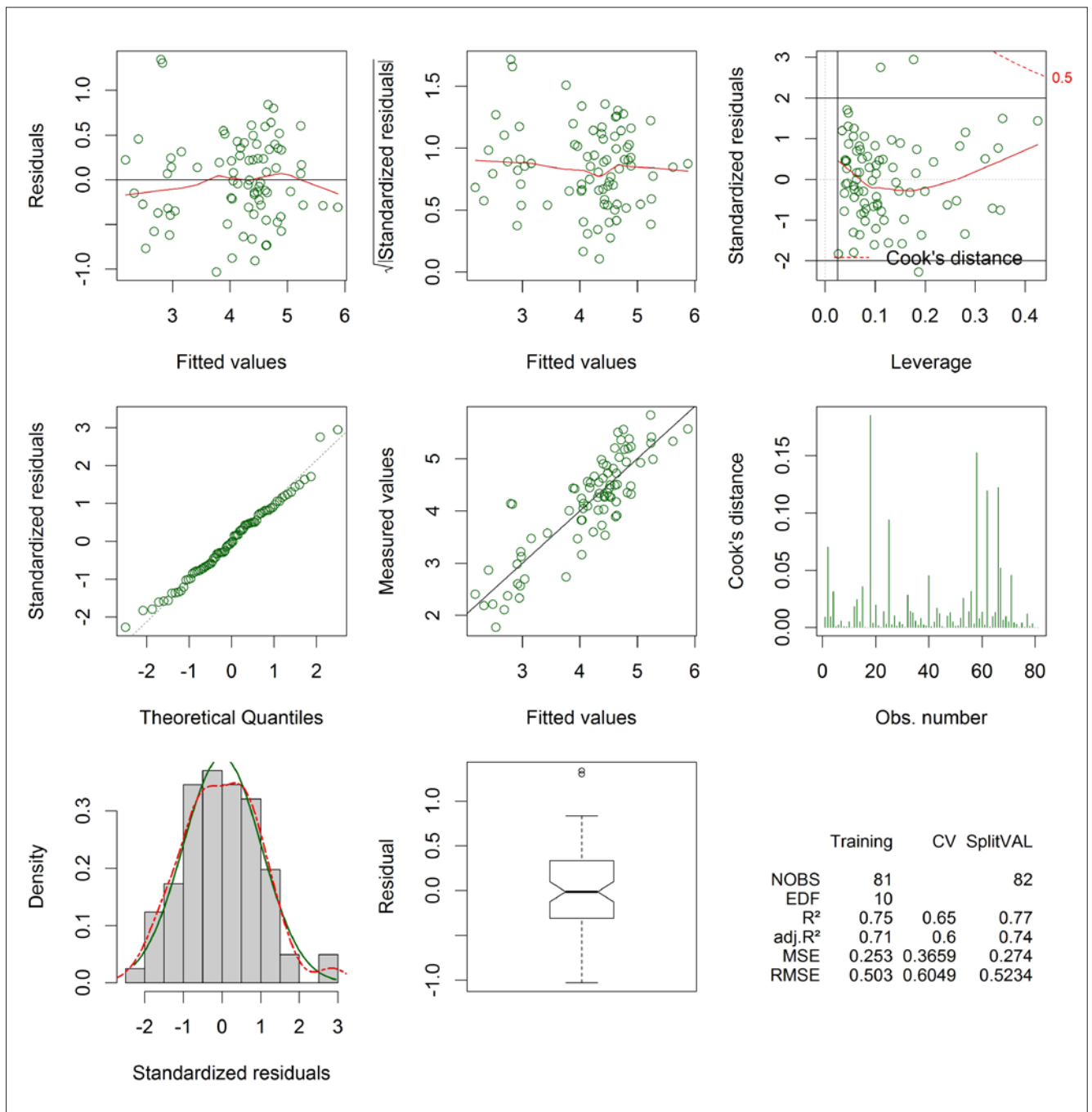


Abb. 2: Residuenplots für OLS-Modell AKe 30–60 cm, Regionalisierungsregion „Alpenvorland und Nördliche Kalkalpen“ (Stratum 1).

Fig. 2: Plot of model residuals for the OLS-model AKe 30–60 cm, macrochore „Pre-alpine landscape and Northern limestone Alps“ (stratum 1).

effektive Austauschkapazität (AKE) gezeigt. Doch auch bei BRT- und RF-Modellen wurden Residuenplots berechnet, um unerwünschte nichtlineare Verläufe aufzudecken. Bei allen Modelltypen wurden Variogramm- und (Moran-I-) Korrelogrammanalysen für Messwerte und Residuen berechnet. Dabei wurde die Signifikanz räumlicher Abhängigkeit durch 125 Simulationsläufe ermittelt (Abb. 3).

Zur Validierung der Modelle wurden die Messdatensätze getrennt nach Herkunftsland (BY, BW, ...) und Herkunftstyp (BZE-Daten vs. Zusatzprofile) und balanciert für BÜK1000-Großlandschaften, chemisch-physikalische Bodeneigenschaften der Messwerte und naturräumliche Faktoren der Hilfsvariablen (wie Klima, Kalkung, Kalkstandorte, Nadelbaumanteil und TWI) zufällig häufig in Test- und Validierungsdaten aufgeteilt.

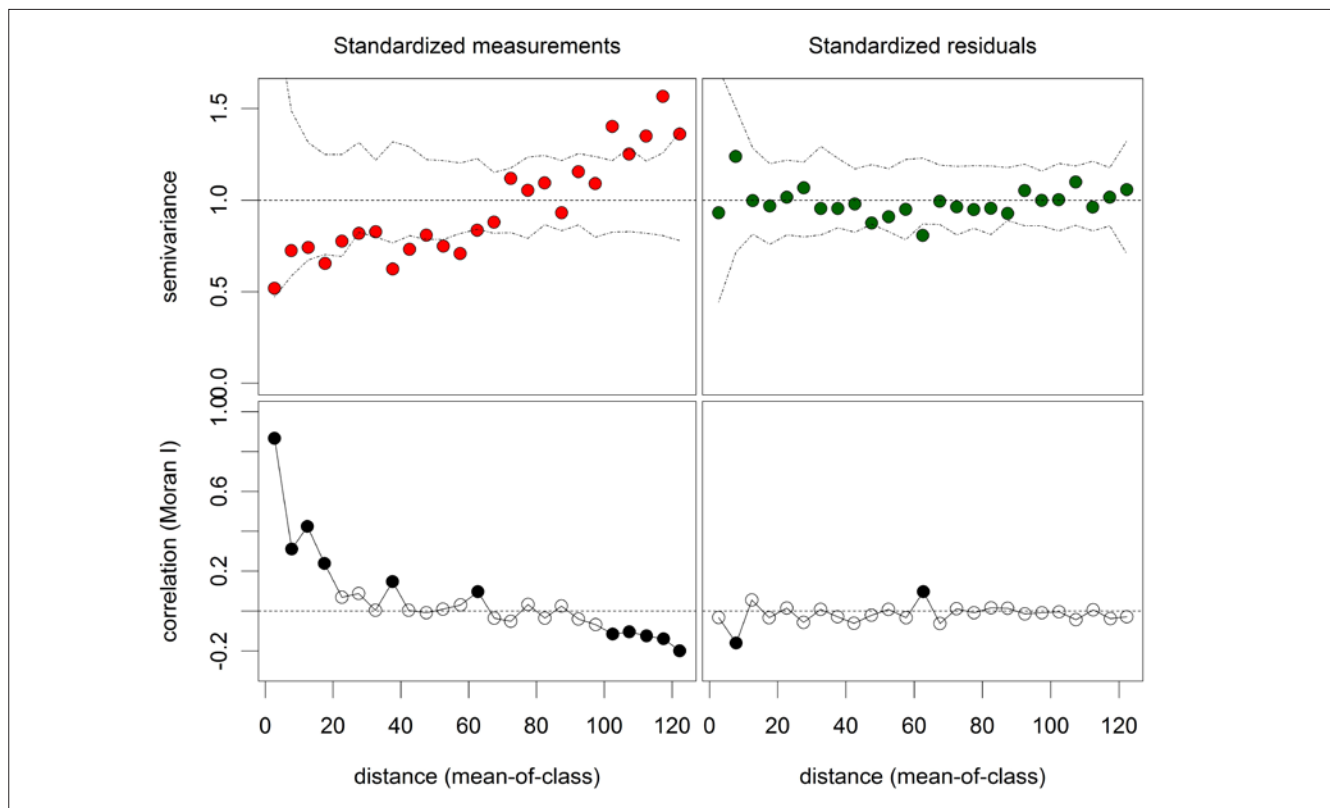
Bei den hier berechneten OLS-Modellen ließen sich zumindest keine ausgeprägten räumlichen Autokorrelationen der Residuen feststellen, daher konnte auf ein Kriging der Residuen verzichtet werden. Im Messwertdatensatz dagegen war räumliche Erhaltungsneigung häufig signifikant und deutlich (Abb. 3).

In einzelnen Fällen lagen die empirischen Beobachtungspunkte räumlich geklumpt in hoher Dichte vor. Dies war z. B. der Fall, wenn Projektdaten entsprechend dem Projektziel in bestimmten Regionen oder Geländesituationen gehäuft

waren oder, wie in Baden-Württemberg, wenn für bestimmte Bodenparameter an den BWI-Trakten (hier im 2 x 2 km-Raster) Messungen vorlagen. Dadurch konnte die Dichte der Beobachtungen innerhalb einer Modellregion sehr stark variieren. Deshalb wurden Nachbarschaftseffekte zwischen Aufnahmepunkten als Kerndichteschätzungen von Intensitäten der Punktaufnahmen erfasst. Bei der explorativen Variablenselektion wurden diese Nachbarschaftseffekte in Konkurrenz und Ergänzung zu den bisherigen Hilfsvariablen (Topographie, Geologie, Boden, Waldbestand, Kalkung, etc.) zeitgleich getestet und ggf. ausgewählt. Damit konnten unterschiedlich hohe Aufnahmedichten innerhalb eines Stratum (z. B. in zwei verschiedenen Bundesländern) bei der Erstellung der Regionalisierungsmodelle berücksichtigt werden. Die Einbeziehung von Kerndichteschätzungen führte zur Verbesserung des Modellergebnisses v. a. in den Fällen, wo die Korrelation zu den anderen Hilfsvariablen nur schwach ausgeprägt war.

### 3 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Abschnitt soll einerseits ein visueller Eindruck zu den Regionalisierungsergebnissen auf globaler und regionaler Ebene in Form von Kartendarstellungen vermittelt werden. Dazu ist anzumerken, dass die Karten unabhängig von der Prognose an den BWI-Punkten nur zur Visualisierung und zur Überprüfung der räumlichen und inhaltlich-bodenkundlichen



**Abb. 3:** Variogramm- und (Moran-I-) Korrelogrammanalysen für Messwerte und Residuen der OLS, BRT- und RF-Modelle (Distanzklassen in km). Im Beispiel des OLS-Modells Sandanteil 0–30 cm Tiefe, Stratum 1, ist die räumliche Abhängigkeit der Residuen (rechts), im Gegensatz zum Messdatensatz (links), nicht mehr gegeben. Dunkle Punkte im Korrelogramm stellen signifikante Distanzklassen dar. Die Signifikanz der Korrelationswerte und die Vertrauensintervalle im Variogramm wurden in 125 Simulationsläufen ermittelt.

**Fig. 3:** Variogram- and (Moran-I-) correlogram analyses for measurements and residuals of OLS-, BRT- and RF-models (distance classes in km). The example of an OLS-model for sand content at 0–30 cm depth, stratum 1, shows that model residuals (right) don't contain spatial autocorrelation, in contrast to measurements (left).

Konsistenz der Regionalisierungsergebnisse und nur fallweise, für einen Teil der Modelle erstellt wurden. Die Prognose an den BWI-Punkten erfolgte nicht durch Verschneiden mit diesen Prognosekarten, da die Informationsdichte für die digitalen Karten schlechter als für Koordinaten der BWI-Traktecken war. Dies betraf v. a. die digitalen Informationen zu Waldeigenschaften und Bodenschutzkalkungen, die in einigen Ländern nicht flächig digital vorhanden waren bzw. nicht zur Verfügung gestellt wurden.

Der wichtigere Teil der Ergebnisdarstellung befasst sich aber mit zwei grundsätzlichen methodischen Fragestellungen, nämlich damit (1) wie die Qualität und Homogenität der Eingangsdaten die Modellgüte beeinflusst und (2) ob bundesweite Globalmodelle ausreichend sind oder ob Regionalmodelle mit homogeneren bodenkundlichen und naturräumlichen Randbedingungen eine relevante Verbesserung der Modellgüte erbringen, wie dies von ZIRLEWAGEN & v. WILPERT (2010) bereits in anderem Zusammenhang gezeigt werden konnte. Vergleiche zwischen verschiedenen alternativen Modellen werden anhand statistischer Kennwerte des Validierungsdatensatzes durchgeführt.

### 3.1 Globalmodelle für Deutschland mit BZE-Daten

Um einen ersten Überblick über die räumlichen Verteilungsmuster bodenchemischer und -physikalischer Eigenschaften zu erhalten, wurden zunächst globale OLS-Modelle für die verschiedenen Zielparameter auf der Basis des gesamten BZE-Datensatzes angepasst (ca. 2.000 Profile). Zusatzprofile aus anderen Datenquellen wurden nicht verwendet. Abbildung 4 zeigt ein Beispiel für eine Prognosekarte dieses Modelltyps, nämlich die deutschlandweite Verteilung der Basensättigung in 0–30 cm Mineralbodentiefe (nur Waldstandorte). Der Prognosekarte gegenübergestellt wird die räumliche Verteilung der dem Modell zugrunde liegenden Messwerte der BZE-II.

Die Darstellung zeigt, dass die Hochlagen der kalkfreien Mittelgebirge zu hohen Anteilen Messpunkte und Flächenanteile mit Basensättigungen im oberen Mineralboden (0–30 cm)  $\leq 14,2\%$  aufweisen, ebenso wie die Sandböden im nordostdeutschen Tiefland. Davon heben sich deutlich die Areale mit kalkhaltigem Ausgangsgestein (z. B. Schwäbische und Fränkische Alb, Nördliche Kalkalpen, Schwäbisch-Fränkischer Wald, Teile der Röhn und der Fläming) mit sehr hohen Basensättigungen  $> 87,5\%$  ab. Mittlere Basensättigungen um  $\pm 50\%$  finden sich in den Böden aus Jungmoränensubstraten im Alpenvorland, auf Keupertonen und Tonlehmen im Hessischen Bergland, Hunsrück, Taunus und der Schichtstufenlandschaft der Leine.

Die an einem unabhängigen Validierungsdatensatz ermittelten statistischen Kenngrößen der allein auf der Datenbasis der BZE erstellten Globalmodelle für Gesamt-Deutschland waren mit einem Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) von durchschnittlich 0,51 und einem standardisierten Schätzfehler ( $CV_{RMSE}$ ) von 0,46 unerwartet günstig. Für die überwiegende Zahl der Zielgrößen (Trockenraumdichte, Ton-, Sand- und Schluffgehalt, sowie Basensättigung, AKe und C/N-Verhältnis) in 0–30 cm Tiefe waren die Kennwerte mit durchschnittlichem  $R^2$  0,61 und CV 0,40 noch deutlich besser. In 30–60 cm Bodentiefe war die Zahl der sehr guten Modelle ( $R^2 > 0,5$ ) um knapp 1/3 niedriger.

### 3.2 Vergleich zwischen Global- und Regionalmodellen im Testgebiet

Am Beispiel der Region „Alpenvorland/Nördliche Kalkalpen“ und der Basensättigung in 0–30 cm Tiefe wird in Abbildung 5 die Verbesserung der Modelle durch regional angepasste Prädiktorensatzes dargestellt.

Die Abbildung zeigt einen Gebietsausschnitt im Bereich der Inn/Salzach/Platte im Osten der Modellregion „Alpenvorland/ Nördliche Kalkalpen“. Das Globalmodell gibt die räumlichen Relationen der Basensättigung im großräumigen Durchschnitt zutreffend wieder, zumindest wenn man die Karte des Regionalmodells als Referenz nimmt. Kleineräumige Heterogenitäten mit Extremen insbesondere in Richtung sehr niedriger Basensättigungen werden aber tendenziell unterdrückt. Insgesamt erscheint die Verteilung der Basensättigung im Globalmodell stark geglättet. Das Regionalmodell bildet kleineräumige Unterschiede im Kontext mit der Geländemorphologie deutlicher ab. Das sind typische Unterschiede zwischen Prognosekarten von Globalmodellen und Regionalmodellen, die so oder so ähnlich auch bei anderen Parametern und immer wieder auch in anderen Projektumgebungen beobachtet werden können (vgl. z. B. ZIRLEWAGEN & v. WILPERT 2010).

In Tabelle 2 wird der Performanceunterschied zwischen Global- und Regionalmodellen, wieder am Beispiel der Modellregion „Alpenvorland/Nördliche Kalkalpen“, für alle skalaren Zielgrößen hinsichtlich Bestimmtheitsmaß und Schätzfehler quantifiziert. In der Tabelle ist zu beachten, dass die Kennziffern für das globale Modell („Modell Deutschland“) direkt mit den Kennziffern des Regionalmodells verglichen werden können. Sie wurden berechnet, nachdem das jeweilige globale Modell (nur) auf den Validierungsdatensatz des regionalen Modells Alpenvorland angewandt worden ist, stellen also nicht Kennziffern für den gesamtdeutschen BZE-Datensatz dar.

Die Tabelle zeigt, dass die Regionalmodelle im Durchschnitt ein um knapp 0,2 höheres  $R^2$  und um 0,1 niedrigeren  $CV_{RMSE}$  aufweisen. Die Verbesserung der Modellgüte ist bei den Zielgrößen Sandanteil und organischer Kohlenstoffgehalt ( $C_{org}$ ) in 0–30 cm Bodentiefe und für den Grobbodenanteil (GBA), die effektive Austauschkapazität (AKe) und  $C_{org}$  mit einer Erhöhung des  $R^2$  um bis zu 0,43 und Absenkung des  $CV_{RMSE}$  um bis zu 1,12 am höchsten. Nur bei den Zielvariablen GBA, Tongehalt, AKe und C/N-Verhältnis (CN) konnte in 0–30 cm Mineralbodentiefe keine eindeutige Modellverbesserung durch das Regionalmodell erreicht werden und ebenso für die Zielgrößen Basensättigung (BS) und  $pH_{KCl}$  in 30–60 cm. In diesen Fällen trat aber auch keine deutliche Verschlechterung der Modellperformance durch die Regionalmodelle ein, die Differenz der statistischen Kennwerte liegt hier nahe Null.

Die Ergebnisse zeigen, dass die bodenphysikalischen Parameter TRD, Ton und Sand, sowie alle bodenchemischen Parameter mit überdurchschnittlich hoher Modellgüte regionalisiert werden konnten.

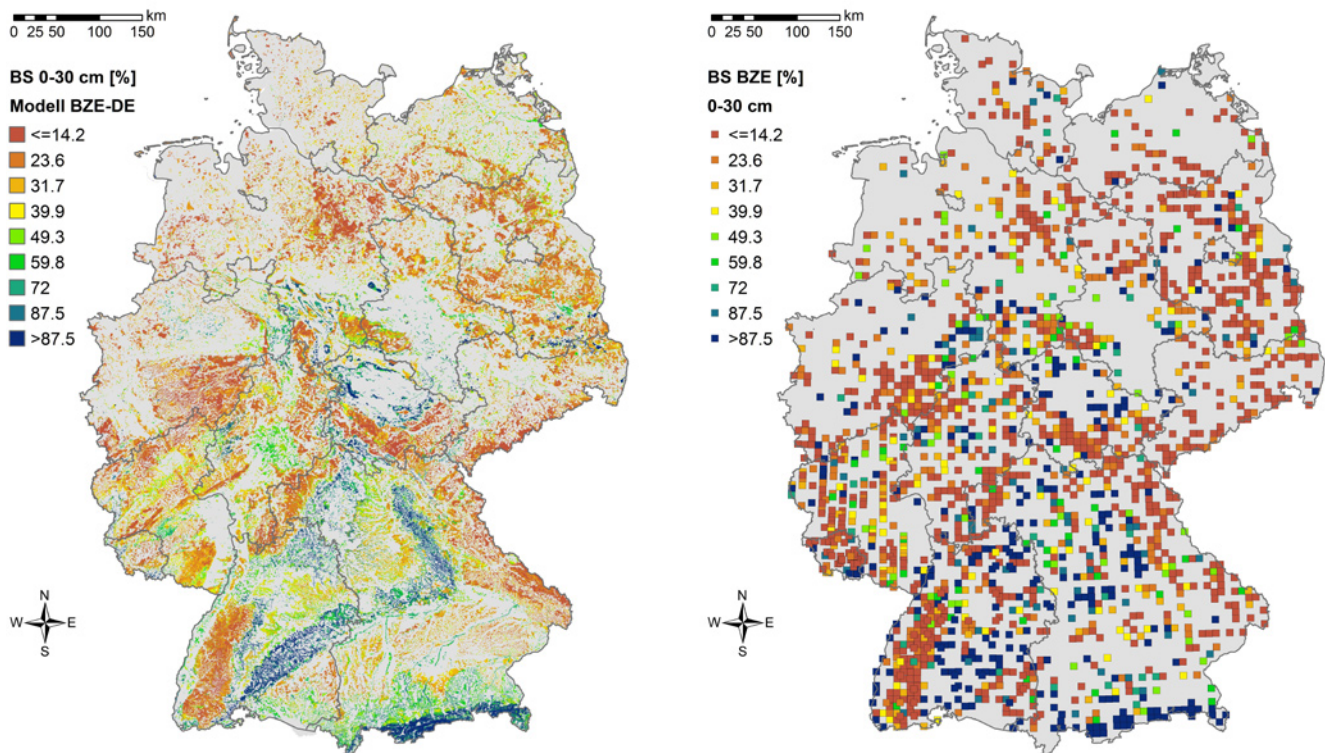
### 3.3 Einfluss von Messdatenumfang und Datenqualität auf die Prognosegüte

In der Testregion „Alpenvorland und Nördliche Kalkalpen“ wurden mit unterschiedlichen Mess- und Schätzdatensätzen für Modellkalibrierung und -validierung der Einfluss von (1)

Messdatenumfang und (2) Datenqualität (Mess- vs. Schätzdaten) auf die Modell- und Prognosegüte untersucht.

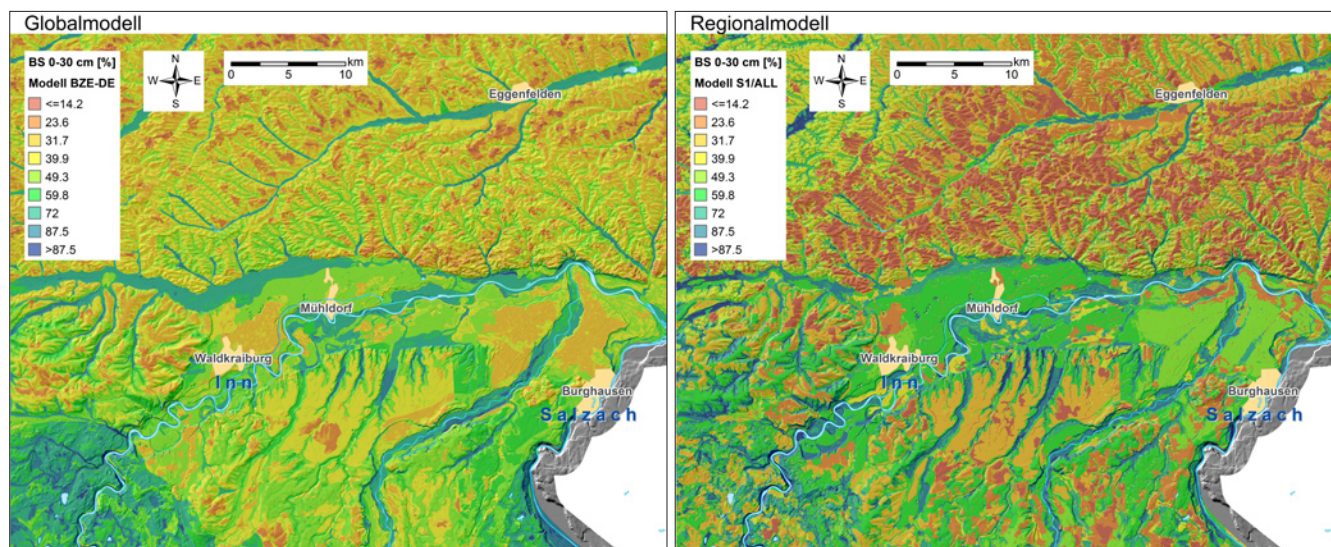
Zunächst wurde der Einfluss des Messdatenumfangs getestet. Durch die Erweiterung des Messdatensatzes der BZE mit gemessenen bodenphysikalischen und -chemischen

Parametern aus anderen Projektquellen als der BZE-II (in dieser Region waren das bodenkundliche Messungen an BWI-Trakten, Daten von bayerischen Zusatzprofilen, Texturdaten des geologischen Landesamtes von Baden-Württemberg und Messdaten von standortkundlichen Leitprofilen), konnte für einige Parameter die Zahl der



**Abb. 4:** Prognose der Basensättigung für Waldstandorte in Deutschland in 0–30 cm Tiefe (links) auf der Basis von BZE-II-Messwerten (rechts).

**Fig. 4:** Prognosis of base saturation for forest areas in Germany (left) at 0–30 cm soil depth on the basis of BZE-II measurements (right).



**Abb. 5:** Vergleich der räumlichen Differenzierung der Basensättigung in 0–30 cm Tiefe im bundesweiten Globalmodell (links) und im Regionalmodell für die Modellregion „Alpenvorland/Nördliche Kalkalpen“ (rechts).

**Fig. 5:** Comparison of model results at meso-scale for base saturation at depth level 0–30 cm using the German-wide global model (left) and the regional model for the model region “Pre-alpine landscape and Northern limestone Alps” (right).



**Tab. 2:** Vergleich der statistischen Kennzahlen Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ), Schätzfehler (RMSE) und standardisierter Schätzfehler ( $CV_{RMSE}$ ) für deutschlandweite, nur auf BZE-Daten basierende Globalmodelle und Regionalmodelle für die Modellregion Stratum 1. Bestimmung der Kennzahlen unabhängig von der Modellkalibrierung an einem unabhängigen Validierungsdatensatz. Die Kennzahlen des globalen Modells („Modell Deutschland“) wurden für den Validierungsdatensatz des regionalen Modells Oberschwaben (Stratum 1) berechnet.

**Tab. 2:** Goodness-of-fit for the global and regional models in stratum 1 in terms of  $R^2$  (coefficient of determination), RMSE (root mean square error) and standardized RMSE ( $CV_{RMSE}$ ). The statistics are determined at independent validation data on the basis of the BZE data of stratum 1.

		Modell Deutschland			Modell Oberschwaben			$R^2_{Diff}$	$CV_{Diff}$
Variable	Einheit	$R^2_{BZE}$	$RMSE_{BZE}$	$CV_{BZE}$	$R^2_{BZE}$	$RMSE_{BZE}$	$CV_{BZE}$		
GBA 0–30	[%]	0,21	6,80	0,94	0,25	6,92	1,00	0,04	0,06
TRD 0–30	[g/m <sup>3</sup> ]	0,56	0,22	0,25	0,68	0,19	0,23	0,13	-0,02
Ton 0–30	[%]	0,48	8,25	0,32	0,50	8,95	0,32	0,03	0,00
Sand 0–30	[%]	0,15	15,83	0,62	0,46	14,25	0,51	0,32	-0,11
Schluff 0–30	[%]	0,07	11,87	0,29	0,34	11,46	0,26	0,27	-0,03
BS 0–30	[%]	0,60	26,73	0,48	0,69	23,26	0,43	0,08	-0,04
AKe 0–30	[µeq/g]	0,64	125,11	0,64	0,63	155,23	0,76	-0,02	0,12
C <sub>org</sub> 0–30	[g/kg]	0,58	113,72	1,05	0,82	43,06	0,71	0,24	-0,34
CN 0–30	[1/1]	0,31	9,54	0,20	0,35	3,73	0,24	0,04	0,04
GBA 30–60	[%]	0,12	17,53	1,34	0,38	12,32	0,95	0,27	-0,39
TRD 30–60	[g/m <sup>3</sup> ]	0,45	0,30	0,28	0,67	0,25	0,24	0,22	-0,05
Ton 30–60	[%]	0,25	9,87	0,39	0,46	9,98	0,35	0,21	-0,04
Sand 30–60	[%]	0,14	16,37	0,62	0,39	16,01	0,53	0,24	-0,08
Schluff 30–60	[%]	0,13	10,99	0,30	0,40	10,70	0,26	0,27	-0,04
BS 30–60	[%]	0,41	28,91	0,47	0,45	29,88	0,48	0,04	0,02
AKe 30–60	[µeq/g]	0,23	141,84	0,97	0,66	112,25	0,84	0,43	-0,13
C <sub>org</sub> 30–60	[g/kg]	0,63	83,92	2,03	0,93	23,69	0,90	0,30	-1,12
CN 30–60	[1/1]	0,24	11,16	0,40	0,57	4,21	0,35	0,33	-0,05
pH <sub>KCl</sub> 30–60	-	0,59	1,08	0,22	0,52	1,27	0,26	-0,08	0,04
<b>Mittlere Kennzahl</b>		<b>0,36</b>		<b>0,62</b>	<b>0,53</b>		<b>0,51</b>	<b>0,18</b>	<b>-0,11</b>

Beobachtungen erheblich erweitert werden. So konnte die Datenbasis für TRD um den Faktor 1,3–1,7, für die Texturparameter, pH<sub>KCl</sub>, C<sub>org</sub> und C/N um den Faktor 2,5–3,6 und für Basensättigung und AKe um den Faktor 1,3–1,5 erweitert werden, während für die Grobbodenanteile und das C/N-Verhältnis in 30–60 cm Bodentiefe keine Zusatzdaten verfügbar waren. Die unterschiedlichen Erweiterungsmöglichkeiten je Parameter ergaben sich daraus, dass die Daten bei unterschiedlichen Projekten erhoben worden waren und dabei, je nach Zielsetzung, unterschiedliche Parameter gemessen worden waren. Bodenchemische Zusatzdaten wurden auch nur dann verwendet, wenn deren Probenahmezeitpunkte in das Zeitraster der BZE-II hineinfielen.

Verglichen wurde, in welchem Maße sich die Güte der Regionalisierungsmodelle verändert, wenn neben dem Grunddatensatz der BZE-II Messwerte von anderen Bodenprofilen, die mit vergleichbarer Qualität und Methode erhoben worden

waren, für die Erstellung der Regressionsmodelle verwendet werden. Mit den erweiterten Messdatensätzen wurden erneut Regionalisierungsmodelle angepasst und mit den „reinen“ BZE-Regionalisierungsmodellen verglichen. Dabei wurden zwei Validierungsvarianten unterschieden: die Validierungsdaten der reinen BZE-Stichprobe und die Validierungsdaten des erweiterten Messdatensatzes. Die Validierungsdaten der BZE-Stichprobe waren Teil der Validierungsdaten des erweiterten Messdatensatzes. Für die schon berechneten BZE-Modelle wurden die Güte-Kennziffern nun auch für den erweiterten Validierungsdatensatz berechnet.

Auf der Basis der **BZE-Validierungsdaten** berechnete Kennziffern zeigten für beide Modellvarianten im Durchschnitt vergleichbare Güte. Durch die Erweiterung der Messdatenbasis erhöhte sich das Bestimmtheitsmaß im BZE-Validierungsdatensatz ganz geringfügig um 0,01, der durchschnittliche, standardisierte Schätzfehler stieg aber

ebenfalls um 0,01. Bezogen auf die **erweiterten Validierungsdaten** aus BZE- und Zusatzdaten zeigten die BZE-Modelle aber deutlich schlechtere Prognosegüte. Die erklärte Varianz der ausschließlich auf BZE-Daten basierenden OLS-Modelle für den erweiterten Validierungsdatensatz lag im Mittel über alle Zielgrößen um rund 16 Prozentpunkte oder 1/3 niedriger als bei den Modellen, die auf der Basis des erweiterten Datensatzes erstellt wurden. Der standardisierte Schätzfehler lag um 0,15 höher. Diese Ergebnisse zeigen den großen Mehrwert von zusätzlichen Messwerten, die neben den BZE-Daten bei der Erstellung der Regressionsmodelle verwendet werden. Modelle, die auf dem erweiterten Messdatensatz beruhen, können zwar nicht die BZE-Verhältnisse besser, aber doch in gleicher Qualität wie die BZE-Modelle vorhersagen. Sie beruhen aber auf einer breiteren Datenbasis und können Umweltverhältnisse, die so u.U. nicht Teil des BZE-Datensatzes sind, besser, d.h. verlässlicher vorhersagen.

In einem zweiten Ansatz wurde getestet, ob die Modellgüte noch weiter verbessert werden kann, indem für die Zielgrößen Grobbodenanteil, Trockenrohddichte und Textur (S, U, T) zusätzlich zu den Messdaten an Bodenprofilen der BZE und aus Projekten (erweiterter Datensatz), die an diesen Profilen aus den verbalen Profilbeschreibungen extrahierten Schätzdaten der genannten Zielgrößen zu Kalibrierung und Validierung, mit herangezogen werden. Dieser Vergleich wurde aufgrund des hohen Modellieraufwands nur in der Modellregion „Alpenvorland und Nördliche Kalkalpen“ und nur für Regionalmodelle durchgeführt. Die Hinzunahme von Schätzdaten führte jedoch zu einem regelrechten Zusammenbruch der Modellgüte. Im Durchschnitt sank das validierte Bestimmtheitsmaß auf die Hälfte und der RMSE stieg auf den 1,5 bis 3-fachen Wert. Die Verschlechterung der Modellgüte war bei den Parametern Grobbodenanteil, Trockenrohddichte und Ton besonders ausgeprägt. Aus diesem Grund wurde entschieden, für die bundesweite Auswertung konsequent Schätzdaten der Zielgrößen auszublenden. Da die Modellierungen bei tiefenstufenbezogenen Parametern sich ausschließlich auf die Mineralbodentiefen 0–30 und 30–60 cm bezogen und in diesen Tiefenstufen bei der BZE und auch in Projekten die meisten Messdaten vorliegen, war diese Vorgehensweise möglich.

### 3.4 Beste Modelle mit allen verfügbaren Messdaten

In der Modellregion „Alpenvorland und Nördliche Kalkalpen“ wurden alternativ OLS-, BRT- und RF-Modelle anhand einer Untermenge aller verfügbaren Bodenprofile mit Messdaten kalibriert. An einer zweiten Untermenge dieses Datensatzes (Validierungsdatensatz) wurde eine unabhängige Modellkalibrierung durchgeführt.

Dabei fällt auf, dass gegenüber den ausschließlich auf BZE-Daten basierenden Modellen in Tabelle 2 insbesondere der Schätzfehler deutlich gesenkt werden konnte. Dies trifft vor allem bei den Parametern AKe und  $C_{org}$  zu. Im Vergleich der Zielvariablen fällt die Performance für die Gründigkeit der Bodenentwicklung deutlich ab ( $R^2$  0,26). Bei allen anderen Modellen beträgt das  $R^2$  mindestens 0,35,  $\frac{3}{4}$  der Modelle haben ein Bestimmtheitsmaß über 0,4 (Tab. 3). Für die Zielgröße Grundwasserstand konnte in der Modellregion „Alpenvorland und Nördliche Kalkalpen“ kein Regionalisierungsmodell kalibriert werden, da ausgeprägte Gleymerkmale in dieser Region zu selten vorkamen.

**Tab. 3:** Modelltyp (OLS=Ordinary Least Squares, BRT = Boosted Regression Trees, RF=Random Forests), Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) und Wurzel aus dem mittleren Quadratafehler (RMSE) für die „besten Modelle“ in Stratum 1. Datengrundlage: alle Profile mit Messwerten (BZE + Zusatzprofile). Bestimmung der Kennzahlen unabhängig von der Modellkalibrierung mit dem erweiterten unabhängigen Validierungsdatensatz.

**Tab. 3:** Model types (OLS=Ordinary Least Squares, BRT=Boosted Regression Trees, RF=Random Forests), coefficient of determination ( $R^2$ ) and root mean square error (RMSE) for “best models” in Stratum 1. Data basis: all soil profiles with measured data (BZE + additional project data). Identification of statistical key figures at an independent validation data set.

Variable	Einheit	Modell	$R^2_{sv}$	RMSE <sub>sv</sub>
<b>GBA 0–30</b>	[%]	RF	0,39	5,81
<b>TRD 0–30</b>	[g/m <sup>3</sup> ]	OLS	0,59	0,22
<b>Ton 0–30</b>	[%]	OLS	0,42	9,21
<b>Sand 0–30</b>	[%]	OLS	0,42	14,84
<b>Schluff 0–30</b>	[%]	OLS	0,41	11,07
<b>BS 0–30</b>	[%]	OLS	0,71	23,09
<b>AKe 0–30</b>	[µeq/g]	OLS	0,76	119,09
<b>C<sub>org</sub> 0–30</b>	[g/kg]	RF	0,75	40,33
<b>CN 0–30</b>	[1/1]	OLS	0,39	3,10
<b>GBA 30–60</b>	[%]	RF	0,50	11,04
<b>TRD 30–60</b>	[g/m <sup>3</sup> ]	OLS	0,45	0,31
<b>Ton 30–60</b>	[%]	OLS	0,34	11,01
<b>Sand 30–60</b>	[%]	OLS	0,43	16,53
<b>Schluff 30–60</b>	[%]	OLS	0,38	11,79
<b>BS 30–60</b>	[%]	OLS	0,58	26,85
<b>AKe 30–60</b>	[µeq/g]	OLS	0,72	87,42
<b>C<sub>org</sub> 30–60</b>	[g/kg]	OLS	0,94	20,92
<b>CN 30–60</b>	[1/1]	OLS	0,56	4,29
<b>pH<sub>KCl</sub> 30–60</b>	-	OLS	0,47	1,08
<b>Gründigkeit</b>	[cm]	BRT	0,26	34,26
<b>NFK</b>	[cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	BRT	0,61	2,80
<b>Stauwasser</b>	[cm]	OLS	0,38	19,11
<b>Grundwasser</b>	[cm]	NOBS zu niedrig, keine Modellierung		
<b>Mittlere Koeffizienten</b>			<b>0,52</b>	<b>21,55</b>

## 4 Schlussfolgerungen

Die Modellvergleiche in der Testregion „Alpenvorland/Nördliche Kalkalpen“ zeigten, dass eine Übertragung von Bodeninformationen auf BWI-Trakte mit für Modellanwendungen

hinreichender Vorhersagegüte möglich ist. Im Einzelnen sind folgende Befunde festzuhalten:

- Die deutschlandweiten **Globalmodelle** (OLS, BZE) ergaben, bezogen auf die Messdaten des gesamtdeutschen BZE-Datensatzes, für viele der modellierten Zielgrößen befriedigende Modelle mit  $R^2 = 0,10-0,71$ , durchschnittlich **0,50**.
- Die **Regionalmodelle** „Alpenvorland/Kalkalpen“ (OLS/BZE) ergaben Modelle mit  $R^2 = 0,25-0,93$ , durchschnittlich **0,53**; für diesen Landschaftsausschnitt betrug das  $R^2$  der **Globalmodelle** **0,07-0,64**, durchschnittlich **0,36**.
- Bei Einbeziehung **aller Messdaten** von Profilen lag das  $R^2$  der auf diese erweiterte Datenbasis übertragenen regionalen BZE-Modelle um 16 Prozentpunkte oder 1/3 niedriger und der standardisierte Schätzfehler um 15 Prozentpunkte höher als bei regionalen Modellen, bei denen die Messdatenerweiterung schon bei der Modellanpassung berücksichtigt worden ist. Dagegen konnte die Qualität der BZE-Prognose im erweiterten Messdatensatz stabil gehalten werden.
- Durch Einbeziehung von **BRT und RF** wurde die Modellgüte geringfügig erhöht.
- Die Einbeziehung von Schätzdaten reduzierte  $R^2$  durchschnittlich auf die Hälfte. Die Modelle sind außer für die Trockenraumdichte mit  $R^2 \ll 0,5$  nicht befriedigend.
- Aus diesen Befunden wurden folgende Schlüsse gezogen:

Wenn die Datenlage dies erlaubt, sollten zusätzlich zu BZE-Messdaten von allen zusätzlich verfügbaren georeferenzierten Bodenprofilen die Messdaten für die Kalibrierung und Validierung der Regionalisierungsmodelle verwendet werden. Dies ist insbesondere für kleine Modellregionen wichtig, wenn für selten vertretene Zielgrößen wie z.B. hoch anstehendes Grundwasser, für die Modellerstellung zu wenige Beobachtungen verfügbar sind.

In Fällen, in denen im BZE-Material keine Messdaten zur Verfügung stehen, wie z.B. in Niedersachsen und Sachsen-Anhalt, wo die Textur nicht gemessen wurde, können für die betreffenden Zielgrößen Schätzwerte aus den jeweiligen bundesweiten Globalmodellen eingesetzt werden.

Im Projekt WP-KS-KW werden die Regionalisierungsmodelle nur auf die an den BWI-Traktecken vorliegenden Prädiktoreninformationen angewandt und so auf die Traktecken bezogene Punktinformationen zu den entsprechenden bodenkundlichen Zielgrößen geschätzt. Damit wird ein umfangreicher Umweltvektor generiert, der insbesondere Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit sowie Bodenversauerung und Kohlenstoffspeicherung beschreibt.

Prinzipiell stellt sich die Frage, ob auch in von den Testregionen naturräumlich sehr verschiedenen Regionen performante Regionalisierungsmodelle identifiziert werden können. Mittlerweile wurden für alle Regionalisierungsregionen Regionalmodelle erstellt. Dabei zeigte sich, dass die durchschnittliche Modellgüte in allen Regionen mit derjenigen in den Testregionen vergleichbar war. Es traten keine auffälligen Häufungen modellresistenter Fälle auf. Nicht befriedigende Modelle wurden lediglich in zwei Drittel der

Regionen für den Grobbodenanteil identifiziert. Das kann mit der Tatsache erklärt werden, dass für den Grobbodenanteil meist keine Messwerte, sondern nur Schätzwerte verfügbar waren. Außerdem waren die Modelle für Basensättigung,  $AK_0$  und Corg in den Regionen 6 und 7 nicht befriedigend. In allen anderen Regionen waren die Modellgüten durchwegs befriedigend bis gut.

Wenn diese Informationen in einzelnen Bundesländern flächendeckend gewünscht werden, müssen in diesen Ländern die für die Punkt-Flächenübertragung notwendigen Schlüsselgrößen auf Landesebene im Vergleich zu den bislang vorliegenden Datenbeständen ergänzt und die Regionalisierungsergebnisse in Form von landesweiten GIS-Karten aufgearbeitet werden. Der Aufwand dafür ist angesichts der Differenziertheit der dann flächendeckend verfügbaren Bodeninformationen begrenzt und müsste von den interessierten Ländern aufgebracht werden.

## Danksagung

Das dieser Veröffentlichung zugrundeliegende Vorhaben wurde aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz durch den Waldklimafonds unter dem Förderkennzeichen 28WC400301 gefördert. Wir danken für die finanzielle Unterstützung dieser wichtigen Projektarbeit. Außerdem danken wir den Bundesländern und dem Thünen Institut für Waldökosysteme für die Bereitstellung der Grundlagendaten.

## Literatur

- BREIMAN, L. (2001): Random Forests, *Machine Learning* **45**(1): 5-32.
- BGR (BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE 2014): Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1:1.000.000 (BUEK1000), Hannover.
- COOLS, N., DE VOS, B. (2011): Availability and evaluation of European forest soil monitoring data in the study on the effects of air pollution on forests. *iForest – Biogeosciences and Forestry*. doi: 10.3832/ifer0588-004, 205-211.
- ELITH, J., LEATHWICK, J.R., HASTIE, T. (2008): A working guide to boosted regression trees. *J. of Animal Ecology* **77**: 802-813.
- FRIEDMAN, J.H. (2001): Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine. *Annals of Statistics* **29** (5): 1189-1232.
- FREUND, Y., SCHAPIRE, R.E. (1997): A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting. *Journal of Computer and System Sciences*, **55** (1): 119-139.
- R (R CORE TEAM, 2015): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org>
- SCHAAP, M., WICHINK KRUIT, R. J., HENDRIKS, C., KRANENBURG, R., SEGERS, A., BUILTJES, P., BANZHAF, S., SCHEUSCHNER, T. (2015): „Atmospheric deposition to German natural and semi-natural ecosystems during 2009.“ Zwischenbericht zum BMUB/UBA UFOPLAN-Projekt 3712 63 240 – 1
- WELLBROCK, N., AYDIN, C.T., BLOCK, J., BUSSIAN, B., DECKERT, M., 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, W., WOLFF, B., et al (2006): Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II), Arbeitsanleitung für die Außenaufnahmen. Bonn: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 431 p.

ZIRLEWAGEN, D., v. WILPERT, K. (2010): Upscaling of environmental information – support of land-use management decisions by spatio-temporal regionalization approaches. *Environmental Management*, <http://dx.doi.org/10.1007/s00267-010-9468-4>

submitted: 01.12.2015

reviewed: 22.01.2016

accepted: 09.05.2016

Dr. Klaus-Hermann von Wilpert  
Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt  
Baden-Württemberg  
Abteilung Boden und Umwelt  
Wonnhaldestraße 4  
79100 Freiburg  
E-Mail: [klaus.wilpert@forst.bwl.de](mailto:klaus.wilpert@forst.bwl.de)