

## Regionalisierung bodenphysikalischer Eingangsgrößen für bodenhydraulische Pedotransferfunktionen

### *Regionalization of soil physical input variables for soil hydraulic pedotransfer functions*

Dietmar Zirlewagen & Klaus von Wilpert

#### Abstract

Many studies in soil science provide qualitative or (semi-) quantitative assessments of soil physical properties such as soil texture or percentage of soil skeleton (the  $>2$  mm fraction). In this paper, we describe the process of upscaling soil physical properties measured during the second Forest Soil Monitoring Census (BZE II). In order to enhance the data basis for process-oriented hydrology models at the landscape level, the use of upscaling techniques based on point-related monitoring data is essential. The statistical methods used in this work included ordinary least square regression (OLS) and geostatistics. One aim of this study was to evaluate how the different spatial scales used for stratifying statistical approaches affect the quality of spatial estimates. When applied to soil physical properties, our evaluations showed that, by using a stratified modeling approach, the accuracy of the estimates could be improved compared to global modeling approaches. Thus the regression models displayed comparatively high coefficients of determination ranging from 0,59 to 0,7 (for soil skeleton), 0,52 to 0,65 (bulk density), 0,7 (depth of soil development) and 0,66 to 0,8 (soil texture). Only in the case of the response variable fine root density were the coefficients of determination markedly below 0,5 (0,2–0,4). One of the reasons for this could be the small-scale variation in silvicultural site conditions such as tree species distribution or stand density.

**Keywords:** Regionalization, pedometrics, multiple regression, soil physical properties, digital soil mapping

#### Zusammenfassung

In vielen bodenkundlichen Studien werden qualitative oder (semi-) quantitative physikalische Bodeneigenschaften aufgenommen, wie die Bodentextur oder der Grobbodengehalt. Im vorliegenden Beitrag beschreiben wir das Verfahren einer Regionalisierung bodenphysikalischer Eigenschaften der zweiten Bodenzustandserhebung in Wäldern (BZE II) für Baden-Württemberg. Um die Datenbasis einer prozessorientierten hydrologischen Modellierung auf Landschaftsebene zu verbessern, ist die Anwendung von Regionalisierungsmethoden auf bodenphysikalische Zielgrößen auf der Basis punktbezogener Monitoringdaten unentbehrlich. Als statistische Methoden wurde das gewöhnliche Kleinste-Quadrate-Verfahren in Kombination mit geostatistischen Analysetechniken eingesetzt. Angewandt auf bodenphysikalische Zielgrößen zeigt ein stratifizierender Methodenansatz in Kombination landesweiter und regionaler räumlicher Modelle eine wesentliche Verbesserung der Prognosegüte. Damit erreichen die

Regressionsmodelle für Bodeneigenschaften verhältnismäßig hohe Bestimmtheitsmaße von 0,59–0,70 (Grobbodengehalt), 0,52–0,65 (Trockenraumdichte), 0,70 (Entwicklungstiefe) und 0,66–0,80 (Textureigenschaften). Allein bei der Feinwurzelndichte liegt der Anteil der erklärten Messvarianz deutlich unter 50 % ( $R^2$  0,28–0,40), vermutlich bedingt durch die kleinräumige Variation waldbaulicher Einflussgrößen wie z. B. Baumartenzusammensetzung oder Bestandesdichte.

**Schlüsselwörter:** Regionalisierung, Pedometrics, multiple Regression, bodenphysikalische Eigenschaften, digitale Bodenkartierung

## 1 Einleitung

In vielen Forschungsprojekten mit feldbodenkundlichem Bezug werden qualitative oder semi-quantitative Abschätzungen zu bodenphysikalischen Eigenschaften wie Bodenart, Grobbodenanteil, Durchwurzelungsintensität oder Bodenentwicklungstiefe bereitgestellt. Häufig wird diese Information nur als qualitativer Hintergrund verwendet, ohne diese Daten selbst quantitativ auszuwerten. Im Zusammenhang mit der Diskussion um mögliche Auswirkungen der Klimaänderung auf Waldökosysteme ist es zunehmend von Bedeutung, Wasserhaushaltsmodelle im Landschaftskontext bereitstellen zu können. Praktische Forstplanung benötigt quantitative Informationen über zukünftige Trockenstressrisiken auf der Fläche, und nicht nur an einigen wenigen intensiv untersuchten Versuchsflächen. Da die Messung bodenhydraulischer Parameter, wie die Wasserretention  $\Theta_w$  ( $\Theta$  ist der relative Wassergehalt [ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ] und  $\psi$  die Wasserspannung [ $\text{N m}^{-2}$ ] und Wasserleitfähigkeit  $k_\theta$  ( $k$  ist die Wasserleitfähigkeit [ $\text{cm s}^{-1}$ ] and  $\theta$  der volumetrische Wassergehalt [ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ]), zeitraubend und teuer ist, können diese Eingangsparameter hydrologischer Modelle häufig nicht durch direkte Messung verfügbar gemacht werden.

Um die schwierig zu messenden hydraulischen Bodenparameter aus einfacher zu erhebenden Daten schätzen zu können, werden für eine flächenhafte Wasserhaushaltsmodellierung Pedotransferfunktionen (PTF) eingesetzt. PTFs lassen sich über statistische Beziehungen zu Proxy-Variablen ableiten. Proxy-Variablen mit einem Potenzial zur Schätzung von Wasserretention ( $pF$ ) und Wasserleitfähigkeit ( $k_\theta$ ) sind bodenphysikalische Basisparameter wie Lagerungsdichte, Textur oder Steingehalt. Möchte man Pedotransferfunktionen flächendeckend für Waldböden, also über die Bodenprofile einer Bodeninventur hinaus, anwenden, ist es notwendig, für die Eingangsgrößen der PTFs, also die bodenphysikalischen Parameter, flächendeckende und möglichst detailierte digitale Karten mit hinreichender Vorhersagegenauigkeit zu verfügen.

Diese Anforderung lässt sich ebenfalls nur modellgestützt lösen: indem mathematisch-statistische Regionalisierungs- bzw. Upscaling-Modelle dazu eingesetzt werden, für räumlich diskret vorliegende bodenphysikalische Mess- bzw. Schätzwerte Prognosewerte in der Fläche zu berechnen.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Datenbasis

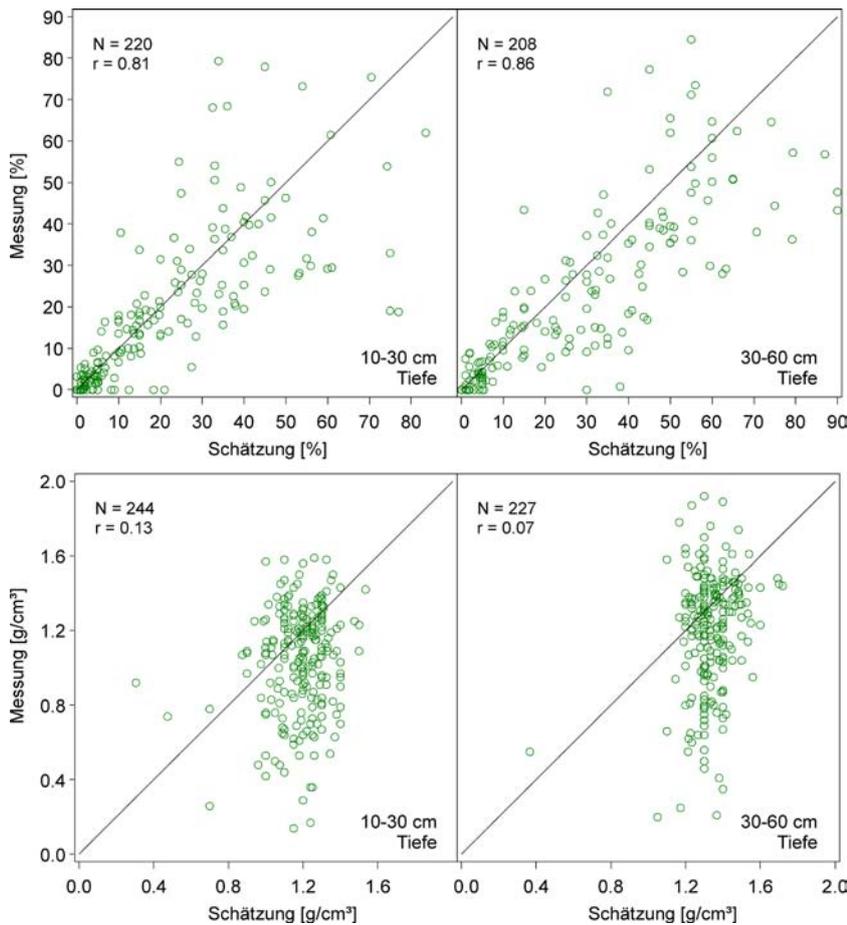
Regionalisierungen (Übertragung punktbezogener Daten auf die Fläche mit mathematisch-statistischen Verfahren) wurden in dieser Arbeit v. a. auf der Basis der Daten der zweiten bundesdeutschen Bodenzustandserfassung in Wäldern (BZE II; BMELV 2006) durchgeführt. In Baden-Württemberg sind die Stichprobenpunkte in einem regelmäßigen 8 x 8 km-Raster angeordnet. An jedem der 308 Rasterpunkte wurde ein Bodenprofil bis zum Ausgangsgestein bzw. maximal 2,40 m Tiefe gegraben. Die bei der BZE II angewandten Methoden der Geländeaufnahme und Analysen erfolgten nach der von den Mitgliedern der Bundesländer-Arbeitsgruppe „BZE“ ausgearbeiteten Arbeitsanleitung (BMELV 2006). Bodenphysikalische Daten wurden entweder den Profilbeschreibungen als Schätzwerte entnommen, oder lagen als tiefenstufenbezogene Messwerte vor. Sie beinhalteten Parameter wie Trockenraumdichte der Feinerde (< 2 mm), Grobbodenanteil, Bodentextur und Feinwurzeldichte. Aus den Profilbeschreibungen der BZE wurde die Bodenentwicklungstiefe abgeleitet. Das ist die Tiefe bis zum mineralischen, vom Ausgangssubstrat geprägten Untergrundhorizont (C-Horizont), semiterrestrischen oder stauwasserbeeinflussten Mineralbodenhorizont (G- / D-Horizont) oder mineralischem Unterbodenhorizont aus Tongestein oder Tonmergelgestein (P-Horizont). Bei Übergangshorizonten wurde die Hälfte der Tiefe des Übergangshorizontes als Bodenentwicklungstiefe angenommen.

In 3 Mineralbodentiefen der BZE (0–5, 10–30, 30–60 cm) wurden an gestörten Bodenproben mittels Nasssiebung die Sandfraktionen bestimmt und mittels Laserbeugung (Fritsch Analysette 22) die Schluff- und Tonfraktion. Für die mittels Laserbeugung gemessenen Korngrößenfraktionen wurden regressionsanalytisch Köhn-Pipette-Äquivalente hergeleitet, um diese mit den üblichen Schätzrahmen, z. B. KA5 (AD-HOC-AG BODEN 2005), vergleichbar zu machen. Für die vorliegende Studie wurden die berechneten Köhn-Pipette-Äquivalente verwendet. Schätzdaten der Bodentextur wurden nicht für die Regionalisierung verwendet, da diese gegenüber den Messungen eine Tendenz zur Überschätzung der Extreme und eine höher Streuung aufwiesen. Als Indikator der zur Wasser- und Nährstoffaufnahme befähigten Wurzeln wurde an der Profilwand die Tiefenverteilung der Feinwurzeln < 2 mm in einem 20 cm breiten Streifen durch Zählung mittels eines 20 x 20 cm großen, in 5 x 5 cm Zellen eingeteilten Zählrahmens ermittelt.

In den Mineralbodentiefenstufen bis 60 cm wurden je zehn 200 ml Stechzylinder entnommen, an denen gravimetrisch die Trockenraumdichte des Feinbodens und, nach Siebung durch das 2 mm Sieb und anschließender Tauchwägung, der volumetrische Skelettgehalt bestimmt wurden. In steinigten Böden (orientiert am geschätzten Skelettgehalt > 20 %), in denen die Entnahme von ungestörten Stechzylindern erschwert ist, wurden sogenannte Volumenersatzproben genommen. Dabei wurde ein Bodenvolumen von ca. 5 L in den Tiefenstufen 0–10, 10–30 und 30–60 cm aus der Profilwand

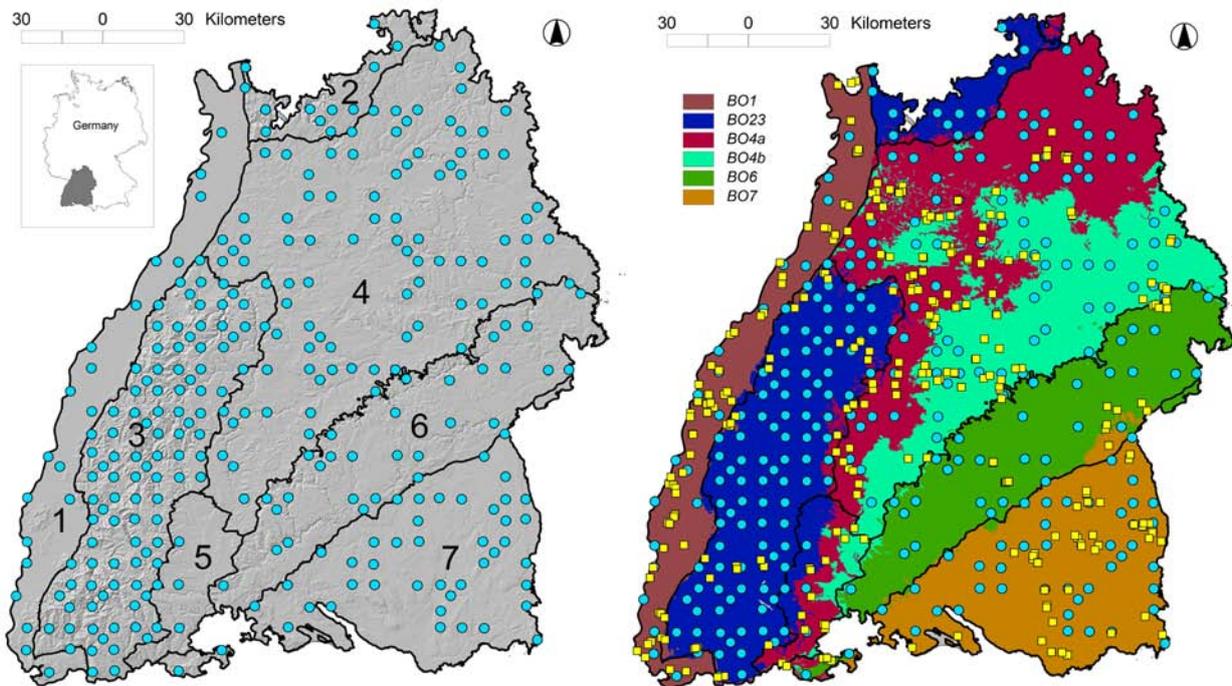
herausgestochen und mittels ca. 2 mm großen Styrodurkügelchen (Dämmmaterial aus dem Baustoffhandel) ausgelitert. Im Labor wurde durch Siebung und Tauchwägung der volumetrische Skelettgehalt, und anhand des Restvolumens und der Trockenmasse des Feinbodens < 2 mm die Trockenraumdichte des Feinbodens bestimmt. In Profilen mit geschätztem Skelettgehalt > 70 % lagen i. d. R. nur Schätzwerte von Skelettgehalt und Trockenraumdichte vor. Bei den 200 ccm-Stechzylinder- und Volumenersatzproben wurde die Skelettfraktion > 63 mm nicht erfasst. Diese Daten mussten den visuellen Schätzdaten entnommen und zur Korrektur der Messwerte der volumetrischen Grobbodenanteile verwendet werden. Da der volumetrische Grobbodenanteil nur bis 60 cm Tiefe gemessen worden ist, aber bis 90 cm Tiefe regionalisiert werden sollte, musste zur Regionalisierung der Grobbodenanteile für die Tiefenstufe 60–90 cm auf Schätzdaten zurückgegriffen werden. Ein Vergleich der Mess- und Schätzdaten zeigt für 10–30 cm Tiefe eine relativ gleichmäßige Streuung um die 1:1-Linie, in 30–60 cm Tiefe dagegen systematische Überschätzungen der geschätzten Grobbodenanteile von ca. 10 % an Standorten mit über 15–20 % Grobbodenanteil (Abb. 1, oben). Daher musste zwar auch in 60–90 cm Tiefe mit einer systematischen Überschätzung der Grobbodenanteile gerechnet werden. Eine Korrektur war aber mangels Validierung nicht möglich, weshalb in dieser Tiefenstufe die Original-Schätzdaten verwendet worden sind. Aber auch in den 4 Tiefenstufen bis 60 cm Tiefe lagen nur bei rund 2/3 der BZE-Stichprobenpunkte Messwerte vor Grobbodengehalte vor. Für die restlichen Punkte wurde auch in diesen Fällen auf die Schätzdaten der Grobbodengehalte zurückgegriffen. Ähnlich wie beim Grobbodengehalt lagen auch bei der Trockenraumdichte nur bei ca. 2/3 bis 80 % der BZE-Punkte gemessene Daten vor. Eine Verwendung von Schätzdaten zusätzlich zu den Messdaten verbot sich aber bei dieser Zielgröße, da die Schätzungen der Trockenraumdichte am Bodenprofil ein zu stark verzerrtes Wertespektrum aufwiesen (Abb. 1, unten).

Für die Regionalisierung von Texturparametern (Ton-, Schluff- und Sandgehalte) standen neben dem kompletten BZE II-Datensatz auch Daten von 324 sogenannten Musterprofilen des geologischen Landesamtes von Baden-Württemberg (LGRB) zur Verfügung (nur Waldstandorte). Im Rahmen der Bodenkartierung des LGRB im Maßstab 1:25.000 werden Musterprofile mit dem Ziel untersucht, repräsentative Böden des Landes und ihre wichtigsten Eigenschaften zu erfassen. Zu diesem Zweck werden Profilgruben für die Entnahme von Bodenproben sowie für die Anfertigung einer detaillierten Profilbeschreibung einschließlich der Aufnahme eines Profildatensatzes angelegt. Neben boden- und substratgenetischen Aspekten sind für die Auswahl der Musterprofile auch von Klima, Relief und Nutzung abhängige Standortunterschiede maßgebend. Die Laboruntersuchungen umfassen wichtige bodenchemische und -physikalische Parameter zum Wasser-, Luft- und Nährstoffangebot. Die Texturdaten dieser Musterprofile wurden nach vergleichbaren Labormethoden wie die von der FVA Freiburg angewandten Methoden ermittelt. Im Gegensatz zum BZE-Datensatz (Abb. 2, links), zeigten die LGRB-Profildaten eine ungleichmäßige Verteilung in Baden-Württemberg (Abb. 2, rechts). Aus diesem Grund konnten die LGRB-Daten nicht für die Anpassung landesweiter Regionalisierungsmodelle, sondern nur für die Anpassung regional-stratifizierter Modellansätze verwendet werden.



**Abb. 1:** Gemessene(r) (y-Achse) und geschätzter (x-Achse) volumetrischer Grobbodenanteil (oben) und Trockenraumdichte (unten) in jeweils zwei Tiefenstufen im Vergleich zur 1:1-Achse; N = Anzahl Beobachtungen, r = Korrelationskoeffizient.

**Fig. 1:** Measured (y-axis) und estimated (x-axis) volumetric stone content (above) and bulk density (below) at 10–30 cm (left) and 30–60 cm soil depth (right) in comparison with the 1:1-axis; N = number of observations, r = correlation coefficient.



**Abb. 2:** Links: Inventurraster der BZE in Baden-Württemberg mit Wuchsgebieten (1 = Oberrhein, 2 = Odenwald, 3 = Schwarzwald, 4 = Neckarland, 5 = Baar-Wutach, 6 = Schwäbische Alb, 7 = Alpenvorland); rechts: wie links, aber zusätzlich mit der räumlichen Verteilung der LGRB-Stichprobenpunkte und Stratifizierung nach Bodenregionen im Wasser- und Bodenatlas von Baden-Württemberg.

**Fig. 2:** Left: Sampling points and growing regions of the BZE in Baden-Württemberg: 1 = lowlands of the upper Rhine valley, 2 = Oden Forest, 3 = Black Forest, 4 = plains and hilly region of the Neckar valley, 5 = Baar-Wutach, 6 = Swabian Alb, 7 = glacial moraine landscape of the foothills of the Alps; right: Sampling points of the BZE and LGRB using a stratified approach based on the soil regions in the Wasser- und Bodenatlas von Baden-Württemberg.

## 2.2 Regionalisierungsverfahren

Das Regionalisierungsverfahren für skalare bodenphysikalische Daten basiert auf einer Kombination aus schrittweiser multipler Regressionsanalyse und geostatistischen Methoden. Die schrittweise multiple Regressionsanalyse bestimmt nach objektivierten Regeln, welche Variablen in ein Modell aufgenommen bzw. daraus wieder entfernt werden. Da dennoch das Risiko bleibt, unerklärbares Grundrauschen zu parametrisieren, wurden nur solche Prädiktoren zugelassen, die in einem bodenkundlich sinnvollen Zusammenhang zu der Zielgröße stehen. (ZIRLEWAGEN & VON WILPERT 2004). Die Optimierung der Regionalisierungsmodelle und die Modellgüte wurden für jedes Regionalisierungsmodell anhand der statistischen Kenngrößen Kollinearitätsindex, Toleranzindex, RMSE,  $R^2$ , partielles  $R^2$  der ins Modell einbezogenen Prädiktoren sowie anhand der Entwicklung der statistischen Kenngrößen während der schrittweisen Anpassung des Modells und eingehende Fehleranalyse überprüft. Dabei wurde auch die Autokorrelation berücksichtigt. Die Überprüfung der Residuen mit Variogramm- und Korrelogrammanalysen auf räumliche Unabhängigkeit ergab allenfalls sehr schwach ausgeprägte räumliche Erhaltungsneigungen, so dass auf ein Kriging der Residuen verzichtet werden konnte. Dies bedeutet, dass bei der eigentlichen Übertragung der punktbezogenen Messdaten auf die Fläche geostatistische Techniken nicht benutzt worden sind, sondern ausschließlich der multiple Regressionsansatz. In einem Untersuchungsgebiet, in dem komplexe Landschaftsstrukturen mit sprunghaften Wechseln bodenbildender Prozesse auf kurzen Distanzen vorherrschen und gleichzeitig das Beprobungsraster verhältnismäßig grob ist (hier: 8 x 8 km-Raster), ist dies von großem Vorteil: Denn unter solchen Voraussetzungen sind geostatistische Regionalisierungsverfahren kaum sinnvoll einsetzbar (McBRATNEY et al. 2000).

Für jeden Auswahlsschritt der multiplen Regressionsanalyse wurde eine 10-Felder-Kreuzvalidierung (HASTIE et al. 2001) durchgeführt, um ineffektive Regressorvariablen aufzuspüren und die Gefahr einer Modell-Überparametrisierung zu begrenzen. Aufgrund der großen naturräumlichen Vielfalt in Baden-Württemberg und der beschränkten Aufnahmedichte der BZE musste von einem Splitten der Datenbasis in einen Trainingsdatensatz und unabhängigen Validierungsdatensatz abgesehen werden. Mit Ausnahme von Feinwurzelndichte und Grobbodengehalt, bei denen eine logarithmische Transformation der Zielvariable durchgeführt werden musste (Normalverteilungsproblem), wurde die Modellanpassung auf der ursprünglichen Messskala durchgeführt.

Die statistischen Methoden und Berechnungen von Reliefattributen sind im Detail bei ZIRLEWAGEN & VON WILPERT (2004) und ZIRLEWAGEN et al. (2007) beschrieben. In dieser Studie verfügte das digitale Geländemodell über eine Rasterauflösung von 25 m. Zur Parametrisierung von Bodeneigenschaften wurden GIS-Layer des Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg (LUBW 2007) herangezogen. Für die Regionalisierung von Feinwurzelndichten wurden auch Eigenschaften des Waldbestandes (Alter, Baumart) als Prädiktoren zugelassen.

Die Modellbildung wurde in einem zweistufigen Ansatz mit „globalen“ (d. h. landesweiten) und regional-stratifizierten Varianten durchgeführt. Bei den regional-stratifizierten Modellen wurde unterschieden zwischen den Modellen, bei denen (1) nur BZE-Daten oder (2) auch zusätzlich LGRB-Daten verwendet worden sind. (1) Im ersten Fall wurden die Straten auf Grundlage der Wuchsgebieteinteilung der Forstlichen

Standortskartierung vorgenommen (Abb. 2, links). Dabei waren aber nicht in allen Wuchsgebieten genügend Beobachtungen für die Durchführung regional angepasster Regionalisierungsmodelle vorhanden. Für das Oberrheintal konnte aus diesem Grund kein separates regionales räumliches Modell angepasst werden, und Regionale Einheiten 2, 3 und 5 (Odenwald, Schwarzwald, Baar-Wutach) wurden in einem regionalen Modell zusammengefasst. Für die restlichen Einheiten (Neckarland, Schwäbische Alb, Alpenvorland) wurden separate regionale Straten gebildet (d. h. insgesamt 4 regionale Straten und 1 landesweites Modell). (2) In den Fällen, wo LGRB-Daten zusätzlich zu den BZE-Daten verwendet worden sind (Abb. 2, rechts) konnten auch für das Oberrheintal regional stratifizierte Modelle berechnet werden. Statt der Einteilung nach Wuchsgebieten wurde aber die Einteilung nach Bodenregionen des WABOA bevorzugt. Im Neckarland konnte aufgrund der größeren Datendichte zwischen den Hügel- und Bergländern des Keupers (BO4b) vs. den Gäulandschaften (BO4a) differenziert werden.

Für Textureigenschaften (Sand, Ton-, Schluffgehalte) wurden die in Abb. 2/rechts dargestellten Straten verwendet, bei allen anderen Zielvariablen die in Abb. 2/links dargestellten Straten.

## 3 Ergebnisse und Diskussion

Die Modellanalysen wurden mithilfe eines zweistufigen Verfahrens durch Anpassung landesweiter und regional-stratifizierter Regressionsmodelle durchgeführt. Zunächst wurden die Regionalisierungsmodelle auf Basis des gesamten Stichprobenumfangs als landesweite Modelle berechnet. Damit wurden dielandesweit gültigen Effekte parametrisiert. Die Zielskala eines solchen Modellansatzes ist dementsprechend das Bundesland. Für die Zielvariablen Grobbodengehalt, Trockenraumdichte, Bodentextur, Bodenentwicklungstiefe und Feinwurzelndichte wurde ein Bestimmtheitsmaß zwischen 0,1 und 0,7 erreicht (Tab. 2, linker Teil). Dabei hebt sich die schlechte Modellperformance der Feinwurzelndichte-Zielvariablen mit einem  $R^2 < 0,25$  deutlich von derjenigen der anderen Zielvariablen ab. Dies hängt damit zusammen, dass die Feinwurzelndichte kleinräumig, auf lokaler Skala, in Abhängigkeit von Waldnutzung und Waldstruktur sehr stark variiert. In einem landesweiten Modell ließen sich diese Effekte nicht zufriedenstellend parametrisieren. Für die Trockenraumdichte, eine ebenfalls kleinräumig variierende Größe, konnte mit dem landesweiten Modellansatz immerhin zwischen 37 und 58 % der Messvarianz erklärt werden. Bessere Prognosegüten zeigten sich für den Grobbodengehalt ( $R^2$  0,47–0,56) und für Textureigenschaften ( $R^2$  0,49–0,70).

Die systematische Abnahme der Varianzaufklärung durch das Modell ( $R^2$ ) mit der Zunahme der Bodentiefe korrespondiert bei fast allen Zielvariablen mit einer Zunahme der Standardabweichung der Messwerte STD und des Standardschätzfehlers der Regressionsmodelle (RSME). Nur bei den Feinwurzelndichten ergaben sich ab 30 cm Tiefe höhere Bestimmtheitsmaße als im Oberboden, bedingt durch die straffere Beziehung zu topographischen und geo-pedologischen Hilfsvariablen im Unterboden. In allen Fällen hat die weitgehende Einbeziehung regional stratifizierter Modelle zu einer merklichen Verbesserung der Modellgüte geführt.

Um die speziellen Eigenschaften der landesweiten Regionalisierungsmodelle zu erläutern, werden im Folgenden beispielhaft Modelle zur Bodentextur dargestellt. Tab. 2 zeigt die schrittweise Parameterauswahl bei der Modellentwicklung

**Tab. 1:** Statistische Kennziffern für die Regionalisierung bodenphysikalischer Parameter in Baden-Württemberg; P Anzahl Parameter (inkl. Interzept), FG Fehler-Freiheitsgrade, R<sup>2</sup> Bestimmtheitsmaß, RMSE Standardschätzfehler; STD Standardabweichung der Messwerte; linker Tabellenteil: Anwendung landesweiter Modelle, rechter Tabellenteil: Kombination landesweiter mit regional-stratifizierten Modellansätzen.

**Tab. 1:** Goodness-of-fit using upscaling models to estimate soil physical parameters in Baden-Württemberg. P number of parameters (regressors + intercept), FG error degrees of freedom, RMSE root mean square error, STD standard deviation of measurements.

Bodentiefe	landesweite Modelle					Kombination mit regional-stratifizierten Modellen			
	P	FG	R <sup>2</sup>	RMSE	STD	P	FG	R <sup>2</sup>	RMSE
Volumetrischer Grobbodengehalt (ln [%])									
0–5	10	288	0,56	0,88	1,31	44	254	0,70	0,78
5–10	10	288	0,55	0,92	1,35	44	254	0,67	0,84
10–30	10	288	0,55	0,97	1,41	44	254	0,68	0,86
30–60	10	285	0,54	1,00	1,46	44	251	0,67	0,91
60–90	10	286	0,47	1,11	1,50	44	252	0,59	1,04
Trockenraumdichte im Feinboden [g/cm <sup>3</sup> ]									
0–5	9	196	0,58	0,12	0,18	41	164	0,65	0,12
5–10	10	191	0,57	0,15	0,22	40	161	0,68	0,14
10–30	10	249	0,43	0,20	0,26	43	216	0,61	0,18
30–60	9	232	0,37	0,25	0,31	43	199	0,52	0,24
Textur: Sandgehalt [%]									
10–30	11	275	0,70	14,5	25,9	71	544	0,80	13,4
30–60	10	285	0,66	15,8	26,5	71	489	0,76	14,9
Textur: Tongehalt [%]									
10–30	10	278	0,65	7,9	13,3	72	543	0,78	7,2
30–60	10	274	0,59	9,8	15,0	73	487	0,71	9,5
Textur: Schluffgehalt [%]									
10–30	11	276	0,56	11,6	17,1	69	547	0,73	10,2
3–60	11	274	0,49	12,6	17,4	71	489	0,66	11,7
Bodenentwicklungstiefe [cm]									
–	11	335	0,54	23,1	32,7	49	297	0,70	19,8
Feinwurzelndichte (ln[n/dm <sup>2</sup> ])									
0–5	9	316	0,10	0,61	0,63	45	280	0,31	0,57
5–10	10	315	0,12	0,62	0,65	44	281	0,28	0,60
10–30	10	316	0,12	0,62	0,65	45	281	0,33	0,45
30–60	10	315	0,25	0,69	0,79	45	280	0,42	0,64
60–90	9	316	0,23	0,78	0,87	45	280	0,40	0,73

zur räumlichen Prognose der Sandgehalte im Feinboden in 10–30 cm Tiefe. In der standardisierten Form geben die Regressionskoeffizienten der Tab. 2 die relative Eintauschstärke der selektierten Kovariablen, ein Maß für deren Modellsensitivität, an. Großräumig gültige topographische Trends werden hier durch die Proxy-Variablen NJA (Jahresniederschlagsverteilung) und die topographische Exponiertheit TOPEX parametrisiert. Auf der landesweiten Skala dominieren aber binär codierte Informationen zu den Bodenverhältnissen und geologischen Bedingungen das Prädiktorenkollektiv. 8 von 10 Regressorvariablen beschreiben Zusammenhänge

mit Dummy-Parametern, die aus dem Wasser- und Bodentlas von Baden-Württemberg abgeleitet worden sind, nur zwei Variablen topographische Zusammenhänge (NJA, TOPEX3000). Kalkstein-, Ton- und Lößstandorte sind mit negativen Koeffizienten, Sandstein-, Kristallgebirgsstandorte und quartäre Kiese und Sande mit positiven Koeffizienten verknüpft. Auf Grundlage der Regressionsgleichungen wurde der Sandanteil mit einer Rasterauflösung von 25 m als Karte dargestellt (Abb. 3), der räumlichen Auflösung des verwendeten Geländemodells. Entsprechend den sehr unterschiedlichen Landschaftscharakteristika in Baden-Württemberg

**Tab. 2:** Schrittweise Parameterauswahl und standardisierte Koeffizientenschätzung für die Regionalisierung des Sandgehalts in 10–30 cm Tiefe auf landesweiter Skalenebene (Baden-Württemberg); Part.R<sup>2</sup> partielles R<sup>2</sup>, Probt Signifikanz, Stand.Est. standardisierte Koeffizienten.

**Tab. 2:** Stepwise selection and parameter estimates for estimating the sand content at 10–30 cm depth in Baden-Württemberg. Part.R<sup>2</sup> partial R<sup>2</sup>, Probt significance, Stand.Est. standardized coefficients.

Step	Variable <sup>1)</sup>	Part.R <sup>2</sup>	Modell-R <sup>2</sup>	Probt	Stand.Est.
1	NJA	0.3517	0.3517	<.0001	0.20414
2	LGRB_KALKST	0.1478	0.4994	<.0001	-0.26880
3	LGRB_SANDST	0.0519	0.5513	<.0001	0.35945
4	TOPEX3000	0.0353	0.5866	0.0033	0.12334
5	GWT_40234	0.0336	0.6202	<.0001	0.22147
6	BO_CODE110	0.0315	0.6517	<.0001	0.33817
7	BO_CODE120	0.0136	0.6653	0.0005	0.15570
8	BO_CODE230	0.0121	0.6774	<.0001	-0.16120
9	HR_LEG3	0.0069	0.6843	0.0011	0.13086
10	LGRB_PELOSOL	0.0112	0.6955	0.0016	-0.12612

<sup>1)</sup> NJA Jahresniederschlagskarte, LGRB\_KALKST Kalksteinstandorte (binär), LGRB\_SANDST Sandsteinstandorte (binär), TOPEX3000\_ Topographische Exponiertheit im 3000-m-Radius, GWT\_40234 Quartäre Kiese und Sande / Tertiäre Sedimentgesteine / Becken- und Moränensedimente (binär), BO\_code110 Kristallines Grundgebirge (binär), BO\_code120 Unterer/Mittlerer Buntsandstein (binär), BO\_code230 Lößlandschaft im Gäu (binär), HR\_LEG3 spezielle geohydrologische Einheiten im Neckarland und Oberschwaben (binär), LGRB\_PELOSOL Tonsteinstandorte (binär)

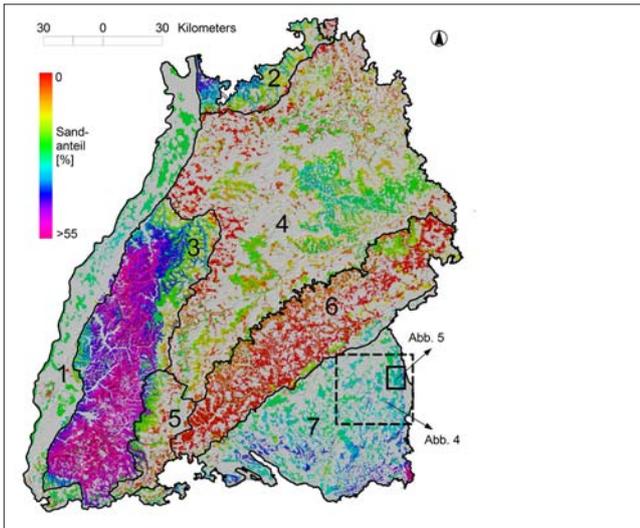
variiert der Sandanteil in der Modellkarte in einem sehr weiten Bereich zwischen niedrigen Werten unter 5 % auf den Kalkstandorten der Schwäbischen Alb und Lößstandorten im Gäu bis hin zu Maximalwerten über 50 % in den Hochlagen des Schwarzwaldes.

In den landesweiten Modellen kamen nur solche Prädiktoren zum Zuge, die auf der landesweiten Integrationsebene einen hinreichenden Varianzanteil erklären. Regressorvariablen mit begrenzter regionaler Bedeutung (z. B. geologische Straten wie Keupersande) werden auf dieser Integrationsebene von großflächig wirkenden Faktoren „verdrängt“. In den Flachlandschaften des Voralpengebietes (Abb. 4) ist die Schwankungsbreite der meisten Prädiktoren des landesweiten Modells, wie z. B. die Niederschlagsverteilung (Proxy-Variablen für Geländemorphologie), sehr viel geringer als in den landesweit dominierenden, geomorphologisch stärker gegliederten Landschaften Baden-Württembergs. Folglich führt die Anwendung des landesweiten Modells auf solch eine Region dort zu einer geringeren Differenzierung des Modellergebnisses als auf Landesebene. So variieren z. B. die prognostizierten Sandanteile mit Werten um 5–10 % quasi binär zwischen zwei dominanten hydrogeologischen Einflussbereichen (Abb. 4).

Räumliche Prognosemodelle tendieren immer zu einer mehr oder weniger stark vereinfachenden Darstellung der Realität, da nur bestimmte, das Stichprobenkollektiv dominierende Bereiche eines mehr oder weniger komplexen Beziehungsgeflechts zwischen Umwelt und Zielvariablen parametrisiert werden können (vgl. ZIRLEWAGEN et al. 2007). Dadurch sind solche Modelle auf heterogene Landschaften mitunter nur schwer zu übertragen. Durch die Verwendung der schrittweisen Variablenselektion im Rahmen der Regressionsanalyse werden die signifikanten Kovariablen mit der entsprechenden Prognosequalität ausgewählt. Die in der Realität vielschichtigen Zusammenhänge werden durch ein Modell ersetzt, von

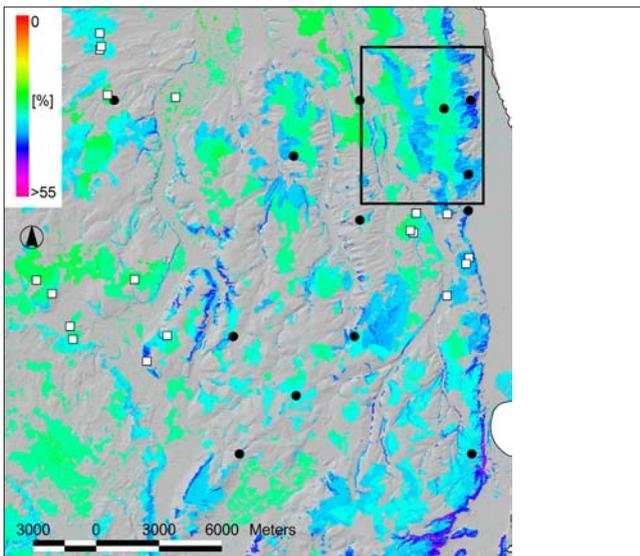
dem angenommen wird, dass es die unbedingt erforderlichen Parameter zur Darstellung der Zielgröße auf der gewählten Skalenebene enthält. Auf großen Skalenebenen führt dieser Ansatz zum Ergebnis, dass die „kleineren Details“ unterrepräsentierter Flächen nicht ausreichend gut modelliert werden (Abb. 4).

Um in solch einem Fall eine verlässliche Prognose erreichen zu können, die über die Darstellung von Übersichtskarten hinausgeht, ist es notwendig, die Stichprobe in Straten zu unterteilen und dafür separate Modelle mit kleinskaligerem Bezug anzupassen. Daher wurde nach der Regionalisierung der landesweiten Zusammenhänge im nächsten Schritt, bei ausreichend großem Stichprobenumfang, für die Wuchsgebiete der Forstlichen Standortserkundung (Zielvariablen: Bodenentwicklungstiefe, Grobbodenanteil, Durchwurzelungsdichte, Trockenraumdichte; Abb. 2 links) oder die Bodenregionen des WABOA (Zielvariable: Textureigenschaften; Abb. 2 rechts) separate Modelle angepasst. In dieser regional-stratifizierten Betrachtungsweise konnte die Anpassung der Hilfsvariablen für die regional gültigen Landschaftscharakteristika besser optimiert werden. Im stratifizierten Modellansatz war eine sensiblere Modellanpassung an die in den Regionen vorherrschenden topographischen, geologischen und pedologischen Gegebenheiten zu erreichen (Abb. 5). Im Beispiel der Modelle zur räumlichen Prognose von Sandgehalten in 10–30 cm Tiefe basiert der regionale Ansatz im Alpenvorland überwiegend auf topographischen Landschaftscharakteristika wie Vernässungsindex BR\_TWI, Positionsindex TPI750 und Sonnenscheindauer SOLDUR\_SOM (Tab. 3). Die (potenzielle) Sonnenscheindauer ist ein Parameter, mit dem sich eine kontinuierliche topographische Gliederung des Geländes in Flachlagen- und Hangbereiche erreichen lässt. Höhere Sonnenscheindauern sind mit Verebnungen verbunden, niedrigere Sonnenscheindauern mit Hanglagen. Die zur Verfügung stehende hochauflösende Reliefinformation ist ein Schlüssel



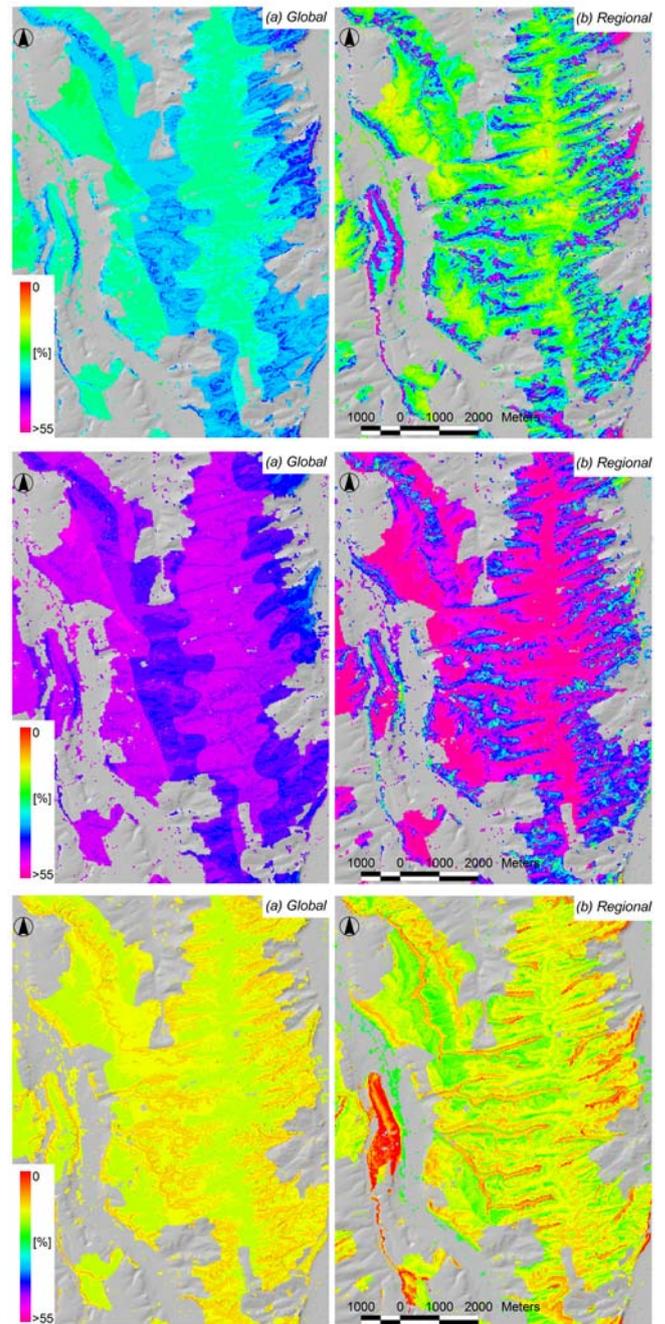
**Abb. 3:** Räumliche Prognose des Sandanteils im Feinboden (10–30 cm Tiefe) für Waldstandorte in Baden-Württemberg, modelliert auf Grundlage des gesamten landesweiten BZE-Datensatzes; schwarze Rechtecke verweisen auf Teile des Untersuchungsgebiets, wo landesweite und regional-skalierte Modellierungen verglichen werden (siehe Abb. 4, 5).

**Fig. 3:** Spatial distribution of predicted sand content at 10–30 cm soil depth of forests in Baden-Württemberg (on the basis of the statewide data set); the rectangles mark the part of the study area where large-scale and meso-scale modeling results were graphically compared (see Figs. 4, 5).



**Abb. 4:** Räumliche Prognose des Sandgehalts (10–30 cm Tiefe) für Waldstandorte in Baden-Württemberg, modelliert auf Grundlage des gesamten landesweiten BZE-Datensatzes. Kartenausschnitt Alpenvorland, zur Lage s. Abb. 3; Schwarze Punkte zeigen die Inventurpunkte der BZE, weiße Quadrate solche des LGRB (wurden in den landesweiten Modellen nicht verwendet); das Rechteck im Nordosten der Karte markiert den Kartenausschnitt in Abb. 5.

**Fig. 4:** Sand content prediction in mineral soils (10–30 cm depth) of forests in the alpine foothills of Baden-Württemberg using the statewide regression model as shown in Fig. 3 (for geographical position of the map section, see the red dotted rectangle in Fig. 3); black points (white squares) mark measurement plots of the BZE (LGRB), and the rectangle marks the map section shown in Fig. 5.



**Abb. 5:** Räumliche Prognose des Sand- (oben), Schluff- (Mitte) und Tongehalts (unten) im Feinboden für Waldstandorte in Baden-Württemberg, modelliert auf Grundlage des gesamten landesweiten BZE-Datensatzes (a - global) und alternativ auf Grundlage eines stratifizierten Modellansatzes (b - regional). Zur Lage des Kartenausschnitts siehe Abb. 3 u. 4.

**Fig. 5:** Comparison of the upscaling results for sand content predictions at the meso-scale using (a) the statewide model, (b) a regional-stratified approach (for geographic position of these map sections, see Figs. 3, 4).

zur erfolgreichen Prognose von bodenphysikalischen Parametern auf regionaler Skalenebene. Daneben spielen aber auch hier Informationen zu Bodenverhältnissen und physiographischen Regionen eine wichtige Rolle (LGRB\_GEO\_9, LGRB\_KALK\_PEL, Tab. 3).

Interessant ist, dass in dem in Abb. 4 gezeigten Ausschnitt aus der Deckenschotterlandschaft Oberschwabens die

**Tab. 3:** Schrittweise Parameterauswahl und standardisierte Koeffizientenschätzung für die Regionalisierung des Sandgehalts in 10–30 cm Tiefe auf regionaler Skalenebene (Alpenvorland); Part. $R^2$  partielles  $R^2$ , Probt Signifikanz, Stand.Est. standardisierte Koeffizienten.

**Tab. 3:** *Stepwise selection and parameter estimates for estimation of the sand content at 10–30 cm depth at regional scale (alpine foothills). Part. $R^2$  partial  $R^2$ , Probt significance, Stand.Est. standardized coefficients.*

Step	Variable <sup>1)</sup>	Part. $R^2$	Modell- $R^2$	Probt	Stand.Est.
1	BR_TWI	0.3020	0.3020	0.1132	-0.19275
2	SOLDUR_SOM	0.0557	0.3577	<.0001	-0.82467
3	LGRB_KALK_PEL	0.0460	0.4037	0.0013	-0.33704
4	TPI750	0.0443	0.4480	0.0009	0.39948
5	SlopeDegr_kl10	0.0325	0.4805	0.0055	0.41103
6	LGRB_GEO_9	0.0541	0.5346	0.0185	0.23444
7	TEMP	0.0217	0.5564	0.1097	-0.15399

<sup>1)</sup> BR\_TWI Topographic Position Index (Braunschweiger Reliefmodell), SOLDUR\_SOM Sonnenscheindauer im Sommer, LGRB\_KALKST Kalksteinstandorte (binär), LGRB\_KALK\_PEL Kalkstein- und Pelosolstandorte (binär), TPI750 Topographischer Positionsindex (750 m-Radius), SlopeDegr\_kl10 Hangneigung<10° (binär), LGRB\_GEO\_9 Würmeiszeitliche Schotter, TEMP Jahrestemperaturkarte

Sander der Oberen Süßwassermolasse (Tertiär), die an den Randhängen der tafelförmigen Deckenschotterriedel in Form von schmalen Säumen der schluff- und tonreichen Verebnungen der Hochflächen auftreten, durch eine Linearkombination aus geländemorphologischen Größen (Hangposition, Hangneigung und Sonnenscheindauer bzw. Temperatursumme) adäquat beschrieben wurde, ohne eine explizite Substratinformation zu benötigen.

Neben einer detaillierteren Modellierung räumlicher Verteilungsmuster stellt das regional angepasste Modell auch eine höhere statistische Sicherheit bereit. Dies ist eine wichtige Voraussetzung, sollen solche Modelle als Eingangsgröße zur Schätzung hydraulischer Funktionen im Landschaftsmaßstab herangezogen werden können. Bezogen auf den landesweiten Datensatz verbessert sich das  $R^2$  für die Prognose von Textureigenschaften von 0,49 bis 0,70 (Tab. 1, links) auf 0,66 bis 0,80 (Tab. 1, rechts), verwendet man statt des landesweiten Modells regionalspezifische Modellvarianten. Auch die Standardschätzfehler lassen sich durch diese Vorgehensweise merklich reduzieren. Dies hat zwar einen wesentlich höheren Verbrauch an Freiheitsgraden bei der Modellierung zur Folge, der aber im Rahmen der gegebenen Gesamtdatenumfänge vertretbar war. Bei den anderen bodenphysikalischen Zielvariablen zeigen sich vergleichbare positive Effekte des stratifizierenden Modellansatzes auf die Prognosegüte: Beim Grobbodengehalt steigt das  $R^2$ , bezogen auf den landesweiten Datensatz, von 0,47–0,56 (landesweites Modell) auf 0,59–0,70 (regionaler Methodenansatz), bei der Trockenraumdichte von 0,37–0,58 auf 0,52–0,65, bei der Entwicklungstiefe von 0,54 auf 0,70 und der Feinwurzelndichte von 0,10–0,25 auf 0,28–0,40. Auch auf regionaler Skalenebene ließen sich die Feinwurzelndichten zwar deutlich schlechter als die anderen hier untersuchten Zielvariablen regionalisieren, erreichten jetzt aber einen Anteil erklärter Messvarianz, mit dem deren Anwendung nun sinnvoll erscheint.

Unsere Studie zeigt also, dass die Definition von Straten innerhalb landesweiter Inventurdatensätze die Modellgüte skalenabhängig ganz wesentlich beeinflusst. Je nach Datenuntergliederung kann sie mithilfe einer unterschiedlichen Zusammensetzung an Hilfsvariablen zwischen klein- und großskaligen Auswertungen variieren. Durch diese

Vorgehensweise ist es möglich, räumlich verhältnismäßig vielschichtige Umweltmuster mit sparsam parametrisierten und noch interpretierbaren statistischen Modellen zu regionalisieren (ZIRLEWAGEN & VON WILPERT 2010). Begrenzende Faktoren sind die Qualität der Hilfsvariablen (z. B. räumliche Auflösung) und v. a. die Stichprobenintensität. Denn jedes Auswertungskollektiv muss in ausreichendem Umfang Beobachtungen zur Berechnung zuverlässiger statistischer Parameter enthalten. Für geostatistische Auswertungen (Variogrammanalysen) war der Stichprobenumfang bei den regionalen Straten in einigen Fällen zu niedrig, gewöhnliche Regressionsanalysen ließen sich aber meist gut durchführen. Nach unserer Erfahrung, die auf zahlreichen Regionalisierungen skalarer Bodeneigenschaften auf unterschiedlichen räumlichen Skalen basiert, sollte die Anzahl Beobachtungen im Normalfall nicht unter 40–50 liegen, um noch ausreichende statistische Qualität in der Regressionsanalyse zu erzielen. Im Gegensatz zu beträchtlich komplexeren räumlichen Vorhersageverfahren wie z. B. verallgemeinerten additiven Modellen, künstlichen neuronalen Netzwerken oder baumbasierten Verfahren, bietet der gewählte Modellansatz grundsätzliche Vorteile in Bezug auf die Einfachheit der Modellstruktur, deren Interpretierbarkeit und die Einfachheit der Anwendung. Dies kann mit Schwächen in der Vorhersagegüte verbunden sein (HASTIE et al. 2001), aber nicht zwangsläufig: dann nämlich, wenn das Regionalisierungsverfahren mit Methoden einer räumlichen Stratifizierung kombiniert und im Hinblick auf die angestrebte Auswertungsskala optimiert wird.

Ziel einer Regionalisierung ist immer, das Regionalisierungsmodell in bestmöglicher Art und Weise an den Messdatensatz anzupassen, um den Grad der Erklärung räumlicher Variabilität und damit die Prognosegüte zu optimieren. Dies wird maßgeblich von der Anzahl und Qualität der verwendeten Modellvariablen beeinflusst. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ab einem bestimmten (dem Modellierer unbekanntem) Grad der Modellkomplexität das Risiko falsch parametrisierter Prozesse überproportional mit der Anzahl der Modellvariablen ansteigt. Der Versuch, die Modellunsicherheit durch eine Ausweitung der Modellvariablen und damit eine verbesserte Erfassung struktureller Zusammenhänge im Modell zu reduzieren, kann auch dazu führen, dass ein Modell überparametrisiert wird, was mit einer Erhöhung des Parame-

terfehlers und damit der Modellunsicherheit verbunden ist (WENKEL & SCHULZ 1999). Die Entscheidung, an welcher Stelle der schrittweise Auswahlprozess von Regressorvariablen beendet werden soll, ist ein kritischer Punkt in der Regressionsanalyse, die selten eindeutig getroffen werden kann. Aus diesem Grund wurde neben der Einbeziehung statistischer Kennwerte zur Bewertung der technischen Integrität der Regressorvariablen diese zunächst auch im Hinblick auf offensichtliche oder vermutete Zusammenhänge bewertet, bevor sie in die Regressionsanalyse einbezogen worden sind. Außerdem beschränkten wir deren Obergrenze auf 10, um Überparametrisierungen der Stichprobendaten und irreführende Modelle zu vermeiden. Da aber dennoch weitere Quellen potenzieller Fehler in den Berechnungen und Modellierungen der Regressionsschätzungen nicht auszuschließen sind, wurde die schrittweise Auswahl der Regressorvariablen einer Kreuzvalidierung unterzogen. Die Kreuzvalidierungstechnik, angewandt auf den Originaldatensatz, wird oft benutzt, wenn nicht genug Beobachtungen zur Durchführung einer Validierung mit unabhängigen Datensätzen zur Verfügung stehen. Sie wird meist zur Überprüfung von Kennziffern des Gesamtmodells eingesetzt. In dieser Arbeit wurde sie dazu verwendet, die Regressorenauswahl zu überprüfen und die Modellparametrisierung zu steuern. Nur solche Regressoren wurden für eine Regionalisierung herangezogen, die auch in der kreuzvalidierten schrittweisen Auswahl zu einer Verbesserung statistischer Kontrollkennziffern (z. B. AIC) führten. Wir entschieden uns, den kompletten Datensatz während der Modellanpassung zu verwenden und keinen Anteil der Messdaten für eine Validierung mit einem unabhängigen Datenkollektiv zurückzustellen. Damit sollte es möglich sein, den gesamten Bereich der Standortcharakteristika auch auf regionaler Ebene in die Regressionsmodelle einbeziehen zu können.

#### 4 Schlussfolgerungen

Die vorliegende Studie zeigt, dass Boden-Landschaftsmodelle auf der Basis mathematisch-statistischer Methoden auch im Bereich physikalischer Bodeneigenschaften eine detailliertere Datengrundlage für weiterführende Datenauswertungen bereitstellen können, als dies die bestehenden Bodenkarten der konventionellen Bodenkartierung und Standortserkundung bislang i. d. R. in der Lage sind. Dies ist aktuell von zunehmender Bedeutung, da Bodeneigenschafts- und Funktionskarten von den Endnutzern und politischen Entscheidungsträgern vermehrt nachgefragt werden, in Ergänzung zu den Erkenntnissen, die aus der klassischen Bodenklassen- und Standortklassen-Kartierung gewonnen werden können (ZIADAT 2005, BEHRENS & SCHOLTEN 2006). Ein solches Vorgehen ist aber nur dann möglich, wenn die Qualität, der Umfang und die Vielseitigkeit des verwendeten Datenmaterials den anvisierten Regionalisierungszielen auch genügen. Daher ist es von großem Nutzen für die weitere Entwicklung räumlicher bodenphysikalischer Prognosemodelle, dass mit der zweiten Bodenzustandserhebung (BZE II) nun vermehrt bodenphysikalische Parameter gemessen statt nur (mehr oder weniger) qualifiziert geschätzt worden sind.

HILLEL (1998) beschrieb den bodenphysikalischen Zustand als etwas, das man sich als standortsspezifisches Raum-Zeitmuster der drei Bodenphasen Festphase, Flüssigphase und Gasphase vorstellen muss, das die Umweltfunktionen von Böden, deren Filter- und Speicherkapazitäten und deren Austausch von Wasser und Gasen zwischen Böden und angrenzenden Ökosphären bestimmt. Folglich spielt die Bodenphysik

eine zentrale Rolle für die Quantifizierung der Wechselwirkungen zwischen Boden/Pflanze und Pflanze/Atmosphäre (AHUJA et al. 2006). Sie erlaubt die Quantifizierung des Einflusses von Bewirtschaftungsverfahren auf Bodenfunktionen (AHUJA et al. 2006). Zum Beispiel kann der Einfluss der maschinenbedingten Bodenverdichtung auf Bodenfunktionen wie den Wurzelraum für Pflanzen mithilfe der Modellierung der Bodenbelüftung quantifiziert werden (HILDEBRAND & SCHACK-KIRCHNER 2002). Alle Stoffflüsse durch Böden werden von Transferparametern wie Gasflüsse vom Diffusionskoeffizienten oder Wasserflüsse von der Wasserleitfähigkeit als Proportionalitätsfaktoren bestimmt. Diese wiederum hängen von physikalischen Basisgrößen wie Promärkornung und Porosität ab.

Die Quantifizierung des in Böden gespeicherten Kohlenstoff-Pools ist eine wichtige Aufgabe im Zusammenhang mit der Abschätzung der Auswirkungen der globalen Klimaänderung (BARITZ et al. 2005). Elementpools, wie der Kohlenstoff-Pool, können aber nur dann richtig berechnet werden, wenn eine zuverlässige Quantifizierung des Verhältnisses Feinerde zu den größeren Bodenfraktionen verfügbar ist – andernfalls würde einer solchen Berechnung eine unverhältnismäßige Unsicherheit zugrunde gelegt werden (WIRTH et al. 2004). Auf die Wichtigkeit der Steine als pflanzenverfügbaren Nährstoffpool in Waldböden und die denkbare Einbeziehung dieses Aspektes in Monitoring-Routinen wurde von HEISNER et al. (2004) hingewiesen. Entsprechend den ICP Forest-Regularien sind Bodendaten im europäischen Monitoringsystem nur als punktbezogene Information an Bodenprofilen im 16 x 16 km-Raster und zusätzlich an 870 intensiv beprobten Monitoringorten verfügbar (ICP FORESTS 2006). Nationale Bodenmonitoringsysteme sind auch im dichteren Raster verfügbar. Dennoch ist, dessen ungeachtet, gemessene Bodeninformation für den Großteil der Forstfläche nicht verfügbar. Wenn Bodeninformation, und insbesondere solche zu bodenphysikalischen Parametern, für die Auswertung ökologischer Effekte der Waldbewirtschaftung benötigt wird, dann ist die Regionalisierung der verhältnismäßig wenigen Bodendaten mithilfe multivariater statistischer Modelle ein zentraler methodischer Schritt, um Bodeninformationen auf die gleiche räumliche Skalenebene zu übertragen, auf der die Waldbewirtschaftung stattfindet (ZIRLEWAGEN & VON WILPERT 2004).

Durch die vorliegende Studie werden alle für die Parametrisierung von in der Literatur eingeführten PTFs (z. B. TEEPE et al. 2003 oder WÖSTEN et al. 2001) zur Schätzung von bodenhydraulischen Eigenschaften benötigten bodenphysikalischen Basisparameter in regionalisierter Form flächendeckend zur Verfügung gestellt. Für den ebenfalls als Eingangsgröße der PTFs benötigten Kohlenstoffvorrat besteht bereits eine Regionalisierung (ZIRLEWAGEN & VON WILPERT 2010). Dies gilt auch für die im gleichen Heft von PUHLMANN & VON WILPERT (2011) vorgestellten, verbesserten PTFs, mit der Ausnahme des Prädiktors „Aggregatgröße“, die jedoch nur für die Schätzung der van Genuchten-Parameter  $\alpha$  und  $\tau$  (VAN GENUCHTEN 1980) und nicht für die Schätzung der kapazitiven Kenngrößen benötigt werden. Bei der Verwendung von aus Regionalisierungsmodellen geschätzten Eingangsgrößen für PTFs zur Berechnung bodenhydraulischer Eigenschaften ist jedoch zu bedenken, dass dabei zwei Modellansätze mit ihren jeweiligen Modellfehlern miteinander verrechnet werden. Aufgrund der Komplexität dieses kombinierten Modellansatzes ist eine Validierung der Modellergebnisse durch formal statistische Aufklärung der Fehlerfortpflanzung kaum möglich. Diese ist jedoch auf empirischem Weg möglich, indem mittels der von PUHLMANN et al. (2009) vorgestellten Methodik an ausgewählten Punkten

des Regionalisierungsgebiets die bodenhydraulischen Eigenschaften durch „Multistep-Outflow-Experimente“ bestimmt werden. In Baden-Württemberg liegen an den Messnetzpunkten der BZE in zwei Bodentiefen gemessene Daten zur Wasserretention und Wasserleitfähigkeit vor, so dass eine empirische Validierung von auf regionalisierten bodenphysikalischen Eingangsgrößen basierenden PTF-Ergebnisse an den 304 Messnetzpunkten der BZE möglich ist. Somit eröffnet die vorliegende Studie die Option, dynamische Wasserhaushaltsmodelle im quasi-kontinuierlichen Geländebezug mit bestimmbar Modellfehler anzuwenden. Dies ist angesichts der durch Klimawandel sich verändernden Wasserverfügbarkeit als neuer waldbaulicher Randbedingung von entscheidender, praktischer Bedeutung.

## Danksagung

Diese Studie wäre ohne die umfangreiche Förderung der erweiterten bodenphysikalischen Messungen an den Profilen der BZE II durch das Land Baden-Württemberg nicht möglich gewesen. Von Seiten des Landesamtes für Geologie, Rohstoffe und Bergbau im Regierungspräsidium Freiburg möchten wir Herrn Frank Waldmann für die Unterstützung dieser Studie durch Bereitstellung der Bodenprofilaten unter Wald des LGRB danken.

## Literatur

- AD-HOC-AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage, Hannover, 438 pp.
- AHUJA, L.R., MA, L., TIMLIN, D.J. (2006): Trans-disciplinary soil physics research critical to synthesis and modeling of agricultural systems. *Soil Science Society of America Journal* **70**: 311-326.
- BARITZ, R., ROVIRA, P., ROMANYA, J., ERLANDSSON, M., VAN RANST, E., ZIRLEWAGEN, D. (2005): Validated, representative soil carbon profiles under forest vegetation. Part I Final Report for Deliverable 3.1, Multi-source inventory methods for quantifying carbon stocks and stock changes in European forests (CarboInvent).
- BEHRENS, T., SCHOLTEN, T. (2006): Digital soil mapping in Germany – a review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **169**: 434-443.
- BMELV BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (2006): Arbeitsanleitung für die zweite bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II). HASTIE, T., TIBSHIRANI, R., FRIEDMAN, J. (2001): *The Elements of Statistical Learning*. Springer Verlag, New York.
- HEISNER, U., RABER, B., HILDEBRAND, E.E. (2004): The Importance of the Skeleton in Forest Sites of the Southern Black Forest. *European Journal of Forest Research* **123**: 249-257.
- HILDEBRAND, E.E., SCHACK-KIRCHNER, H. (2002): The influence of compaction on soil structure and functions in forest sites. In: AMBASHT, R.S., AMBASHT, N.K. (eds.) *Modern Trends in Applied Terrestrial Ecology*. Kluwer Academic Publishers: 1-11.
- HILLEL, D. (1998): *Environmental soil physics*. Academic Press, London, UK.
- INTERNATIONAL CO-OPERATIVE PROGRAMME ON ASSESSMENT AND MONITORING OF AIR POLLUTION EFFECTS ON FORESTS (ICP FORESTS 2006): *Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests, Part I*. (At: <http://www.icp-forests.org/>. Accessed: 29/01/2007)
- LUBW LANDESANSTALT FÜR UMWELT, MESSUNGEN UND NATURSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG / UMWELTMINISTERIUM BADEN-WÜRTTEMBERG (2007): WABOA - Wasser und Bodenatlas Baden-Württemberg.
- MCBRATNEY, A.B., ODEH, I.O.A., BISHOP, T.F.A., DUNBAR, M.S., SHATAR, T.M. (2000): An overview of pedometric techniques for use in soil survey. *Geoderma* **97**: 293-327
- PUHLMANN, H., VON WILPERT (2011): Datenbank hydraulischer Eigenschaften von Waldböden – Test und Entwicklung von Pedotransferfunktionen. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **12**: 61-71.
- PUHLMANN, H., VON WILPERT, K., LUKES, M., DRÖGE, W. (2009): MULTISTEP OUTFLOW EXPERIMENTS TO DERIVE A SOIL HYDRAULIC DATABASE FOR FOREST SOILS: *EUROPEAN JOURNAL OF SOIL SCIENCE* **60**(5): 792-806.
- TEEPE, R., DILLING, H., BEESE, F. (2003): Estimating water retention curves of forest soils from soil texture and bulk density. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **166**: 111-119.
- VAN GENUCHTEN, M.Th. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* **44**: 892-898.
- WENKEL, K.-O., SCHULZ, A. (1999): Vom Punkt zur Fläche – das Skalierungs- bzw. Regionalisierungsproblem aus der Sicht der Landschaftsmodellierung. In: STEINHARDT, U., VOLK, M. (eds.): *Regionalisierung in der Landschaftsökologie*. Forschung - Planung - Praxis. Teubner: 19-40.
- WIRTH, C., SCHWALBE, G., TOMCZYK, S., SCHULZE, E.D., SCHUMACHER, J., VETTER, M., BÖTTCHER, H., WEBER, G., WELLER, G. (2004): Dynamik der Kohlenstoffvorräte und -flüsse in den Wäldern Thüringens. Ergebnisse einer laufenden Studie zur Umsetzung des Kyoto-Protokolls. Jena, Gotha.
- WÖSTEN, J.H.M., PACHEPSKY, YA.A., RAWLS, W.J. (2001) Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology* **251**: 123-150.
- ZIADAT, F.M. (2005): Analyzing digital terrain attributes to predict soil attributes for a relatively large area. *Soil Science Society of America Journal* **69**: 1590-1599.
- ZIRLEWAGEN, D., VON WILPERT, K. (2004): Using model scenarios to predict and evaluate forest management impacts on soil base saturation at landscape level. *Eur. J. Forest Res.* **123**: 269-282.
- ZIRLEWAGEN, D., VON 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>
- ZIRLEWAGEN, D., RABEN, G., WEISE, M. (2007): Zoning of forest health conditions based on a set of soil, topographic and vegetation parameters. *For. Ecol. Manage.* **248**: 43-55.

submitted: 11.11.10  
 reviewed: 03.01.11  
 accepted: 03.02.11

**Autorenanschrift:**

Dr. Dietmar Zirlewagen  
Interra, Büro für Umweltmonitoring  
St.-Peter-Str. 30, D-79341 Kenzingen  
Tel.: +49 7644-930539  
E-Mail: [d.zirlewagen@interra.biz](mailto:d.zirlewagen@interra.biz)  
Internet: [www.interra.biz](http://www.interra.biz)

Dr. Klaus von Wilpert  
FVA Baden-Württemberg  
Abteilung Boden und Umwelt,  
Wonnhaldestraße 4, D-79100 Freiburg  
Telefon: +49 761 4018-173  
E-Mail: [Klaus.Wilpert@forst.bwl.de](mailto:Klaus.Wilpert@forst.bwl.de)