

forstarchiv 82, 92-100
(2011)

DOI 10.2376/0300-
4112-82-92

© M. & H. Schaper
GmbH

ISSN 0300-4112
Korrespondenzadresse:
Marc.Overbeck@
nw-fva.de

Eingegangen:
09.02.2011

Angenommen:
10.05.2011

Ein statistisches Modell zur Regionalisierung der nutzbaren Feldkapazität von Waldstandorten in Niedersachsen

A statistical model to regionalize the available water capacity at forest sites in Lower-Saxony (Germany)

MARC OVERBECK, MATTHIAS SCHMIDT, CHRISTOPH FISCHER, JAN EVERS, ANDREAS SCHULZE, THOMAS HÖVELMANN und HERMANN SPELLMANN

Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Grätzelstraße 2, D-37079 Göttingen

Kurzfassung

Angesichts des Klimawandels spielt der Wasserhaushalt von Waldstandorten zunehmend eine bedeutsame Rolle in der Waldbauplanung. Dies gilt für die Einschätzung der biotischen und abiotischen Risiken sowie der Wuchsleistung der Wirtschaftsbaumarten. Zur Beschreibung des Wasserhaushalts ist die nutzbare Feldkapazität eine entscheidende quantitative Größe. Diese lag für größere Gebiete Niedersachsens bislang nur in einer geringen räumlichen Auflösung vor. Für die modellhafte Beschreibung des Standort-Leistungs-Bezuges und der darauf aufbauenden regionalen Waldbauplanung ist aber eine hoch auflösende Regionalisierung notwendig, die sich an forstlichen Planungseinheiten orientieren sollte. Der vorliegende Beitrag beschreibt ein Verallgemeinertes Additives Regressionsmodell (gam) mit einer Datenbasis von 3.856 Bodenprofilen zur Regionalisierung der nutzbaren Feldkapazität für die Waldflächen Niedersachsens, für die eine Standortkartierung vorliegt. Im Modell weisen die qualitativen Standortmerkmale „Wasserhaushalt“ und „Boden bildendes Substrat“ hoch signifikante Effekte auf die nutzbare Feldkapazität auf. Darüber hinaus wird die auftretende räumliche Autokorrelation durch die Modellierung einer zweidimensionalen Trendfunktion erfasst. Das Bestimmtheitsmaß des Modells liegt bei 0,785. Zudem zeigt eine Kreuzvalidierung, dass das Modell robust ist. Das entwickelte Modell ist somit gut geeignet, die nutzbare Feldkapazität von Waldstandorten in Niedersachsen höher aufgelöst zu schätzen bzw. darzustellen. Voraussetzung ist eine sorgfältig durchgeführte forstliche Standortkartierung. Auf einer solchen Basis soll das entwickelte Modell dazu genutzt werden, Karten der nutzbaren Feldkapazität (nFK) zu produzieren, die ganz allgemein als Grundlage für einen Waldbau auf standörtlicher Grundlage oder für Risikokarten verwendet werden können. Außerdem wird die Parametrisierung von standort- und damit klimasensitiven Waldwachstumsmodellen über eine Verschneidung der nFK-Karte mit Einzelbauminformationen aus Inventuren und ertragskundlichen Versuchsflächen ermöglicht.

Schlüsselwörter: Waldböden, nutzbare Feldkapazität, Regionalisierung, Verallgemeinerte Additive Regressionsmodelle, Niedersachsen

Abstract

Considering climate change the knowledge of water supply in forest soils is of increasingly importance to forest planning, this goes as well for estimating biotic and abiotic risks as for growth potential of single tree species. A key quantitative indicator of the water supply is the "available water capacity". For large areas of Lower Saxony, data for the available water capacity have up to now only been available at a low spatial resolution. For improved modelling of site productivity and large-scale forest planning, however, a high-resolution regionalization of data based on forest planning units is necessary. This article describes the regionalization of the available water capacity for forest sites in Lower Saxony (Germany), using a generalized additive regression model (gam) based on 3,856 soil profiles and forest soil maps.

The model developed is well suited to attain high resolution data for the available water capacity of forest sites in Lower Saxony. The two independent variables of the model are qualitative estimations of site water supply and the soil substrate, both showing highly significant influence on the available water capacity. Through the development of a spatial trend function the autocorrelation of the data is assessed. The coefficient of determination of the model is 0.785. A cross-validation highlights the robustness of the model.

The presented model can be applied in various fields. For example, an available water capacity map can be developed for improved forest planning and as a basis for risk maps. Linking high resolution usable field capacity data with single tree information from inventories or data from research sites, parameters for site- and climate-sensitive growth models could be improved.

Key words: forest soils, available water capacity, regionalization, generalized additive regression model (gam), Lower Saxony

Einleitung

Der Klimawandel führte im Zeitraum von 1906 bis 2005 zu einem globalen Anstieg der Lufttemperatur von 0,74 °C. Bis zum Ende dieses Jahrhunderts prognostizieren die verschiedenen Klimaszenarien einen weiteren durchschnittlichen globalen Anstieg von 1,8 bis 4,0 °C (IPCC 2007). Regionale Klimamodelle gehen von einem vergleichbaren Trend für Deutschland aus (Jacob et al. 2007, Spekat et al. 2007).

Die Niederschlagssummen werden sich nach den regionalisierten Klimaszenarien für Nordwestdeutschland gegenüber heute nur wenig ändern, wohl aber die Verteilungen der Niederschläge. Es werden trockenere Sommerhalbjahre mit längeren Dürreperioden und niederschlagsreichere Winterhalbjahre vorhergesagt (Werner et al. 2000, Jacob et al. 2007, Spekat et al. 2007). Aus den erwarteten höheren Temperaturen werden steigende Transpirationsraten resultieren, und zusätzlich werden sich die Vegetationsperioden verlängern (Menzel 1997, Menzel und Fabian 1998). Diese Faktoren erhöhen die Gefahr von Trockenstresssituationen für Waldökosysteme und unterstreichen die zentrale Bedeutung des Wasserhaushalts für die Einschätzung von Risiken, für die zu erwartenden Wuchsleistungen und die darauf aufbauenden Anbauempfehlungen für einzelne Baumarten.

In der Diskussion um die Verbreitung, die physiologischen Grenzen und die potenziellen Risiken heimischer Baumarten, werden bisher überwiegend die Jahresmitteltemperatur und der mittlere Jahresniederschlag betrachtet (Dengler 1935, Kölling 2007, Kölling und Zimmermann 2007, Michiels et al. 2009). Andere Studien zur Bewertung der klimatischen Eignung von Baumarten nutzen die klimatische Wasserbilanz während der Vegetationsperiode (Frischbier und Profft 2008).

Eine entscheidende Größe im Wasserhaushalt von Waldökosystemen, die in bisherigen Studien zur Klimasensitivität einzelner Baumarten wenig berücksichtigt wurde, ist die nutzbare Feldkapazität (nFK, pflanzenverfügbares Bodenwasser). Leuschner (1998) beispielsweise ersetzt die Bodenfeuchte im Ökogramm von Ellenberg (1996) durch den Jahresniederschlag, da Informationen zur nFK in nur geringem Umfang verfügbar sind, obwohl die Verbreitung der Buche auch durch das Wasserspeichervermögen des Standortes begrenzt ist (Otto 1994, Rennenberg et al. 2004). Geringe Niederschläge können durch eine hohe nFK in begrenztem Umfang ausgeglichen werden. Demzufolge ist die Abschätzung von Risiken und Prognosen zur Wuchsleistung einzelner Baumarten im Zuge des Klimawandels ohne die Berücksichtigung der nFK nur bedingt möglich (Wagner 2004, Ammer et al. 2005, Monserud et al. 2006).

Die nFK liegt für das Bundesgebiet flächendeckend in Form der Bodenkundlichen Übersichtskarte im Maßstab 1:1 Mio. vor (Richter et al. 2007). Auf Länderebene existieren Auflösungen im Maßstab 1:50.000 (NLFb 2004). Die Untersuchungen an der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt zur Leistungs- und Risikoabschätzung einzelner Baumarten infolge des Klimawandels nutzten bisher zusätzlich zur klimatischen Wasserbilanz die nFK (Spellmann et al. 2007, Suttmöller et al. 2008, Albert und Schmidt 2009a). Dabei wurde aufgrund der noch fehlenden Aufbereitung der Standortkartierungsergebnisse auf die Bodenkundliche Übersichtskarte mit ihrer relativ geringen Auflösung zurückgegriffen, die beispielsweise für große zusammenhängende Bereiche des Harzes nur einen einzigen nFK-Wert für über 30.000 ha ausweist (NLFb 2004).

Auf Basis der forstlichen Standortkartierung liegen qualitative Aussagen über den Wasserhaushalt großer Gebiete im Maßstab 1:5.000 vor. Problematisch ist jedoch, dass sich die für die Kennzeichnung des Wasserhaushalts verwendeten kategorialen Bezeichnungen (z. B. „frisch“, „trocken“) inhaltlich zwischen den einzelnen Bundesländern unterscheiden, subjektiv überprägt sind und sich

auf verschiedene Betrachtungsebenen (Bodenwasserhaushalt, reliefbedingter Wasserhaushalt, Gesamtwasserhaushalt oder ökologische Feuchtestufe) beziehen (Schwärzel et al. 2009). Eine genauere Berücksichtigung des Bodenwassers in klimasensitiven Waldwachstumsmodellen, bei der Waldbauplanung auf standörtlicher Grundlage oder bei der Beurteilung von Risiken erfordert daher die Ableitung numerischer Größen (beispielsweise der nFK) aus der kategorialen Ansprache der Standorte für große Gebiete. Aus diesem Grund wurde ein Verallgemeinertes Additives Regressionsmodell (gam) (Hastie und Tibshirani 1990) unter Verwendung der spezifischen Methodik von Wood (2006) parametrisiert. Die mittels einer Pedotransferfunktion geschätzte nFK kann mithilfe des Modells unter Verwendung von qualitativen Bodenparametern der forstlichen Standortkartierung Niedersachsens und der geografischen Lage hoch aufgelöst regionalisiert werden. Die Standortkartierung liegt für den Landeswald und für die von den Niedersächsischen Landesforsten betreuten Wälder nahezu komplett vor. Die von der Landwirtschaftskammer betreuten Wälder sind zu ca. 50 % kartiert.

Material und Methoden

Material

Die Parametrisierung des Modells erfolgt auf der Grundlage von 3.856 verorteten Bodenprofilen. Die Daten stammen überwiegend aus der forstlichen Standortkartierung im niedersächsischen Landeswald, von Dauerbeobachtungsflächen und Forschungsprojekten der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt sowie der zweiten Bodenzustandserhebung (BZE 2). Die Profilsprache erfolgte dabei im Wesentlichen auf Basis der Anleitung Forstliche Standortaufnahme (Arbeitskreis Standortkartierung 1996). Diese basiert überwiegend auf Schätzgrößen, sodass die zur Berechnung der nutzbaren Feldkapazität (nFK) notwendigen Bodenparameter Textur, Skelett, Humusgehalt und Lagerungsdichte in der Regel in kategorialer Form vorlagen. Jedes Profil ist mit einer Standortkennziffer (Standortstyp) versehen, welche u. a. qualitative Angaben zu Wasserhaushalt und Substrat enthält. Die nFK wurde für grundwasserferne Standorte auf Basis der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA5) (Ad-hoc-AG Boden 2005) unter Berücksichtigung optimierter Algorithmen zur bodenartenabhängigen Umrechnung von Lagerungsdichte zu Trockenraumdichte berechnet (Wessolek et al. 2009).

Die Datenlage ermöglichte keine Berücksichtigung der organischen Auflage. Die gewählte Bezugstiefe geht als Multiplikator in die Berechnung der nFK ein und hat damit einen erheblichen Einfluss auf die resultierenden Werte. Für Berglandstandorte (Gesteinsverwitterungsböden und Lösslehm) wurde vereinfachend eine Bezugstiefe von 100 cm und für Tieflandstandorte (quartäre Lockersedimente) eine Bezugstiefe von 140 cm zugrunde gelegt. Die größere Bezugstiefe von Tieflandstandorten ist einerseits notwendig, um die Heterogenität der Böden aus quartären Substraten zu berücksichtigen, deren Oberböden oftmals von reinen oder schwach verlehnten Sanden geprägt sind. Eine Differenzierung der überwiegend durch die Saale-Eiszeit geprägten Standorte findet häufig erst ab einer Tiefe von 80 bis 140 cm statt. Der hieraus resultierende Wert unterschätzt andererseits aber die nFK, da durch die generell nach unten hin abnehmende Durchwurzelungsintensität nicht das gesamte potenziell pflanzenverfügbare Wasser genutzt werden kann (Riek 1998). Auch ist ein Vergleich mit Berglandstandorten nicht mehr möglich. Aus diesem Grund wurde die nFK der Tieflandstandorte durch den Faktor 1,4 dividiert. Dieser Wert berücksichtigt den Aufbau quartärer Lockersedimente bei einer idealisierten Bezugstiefe von 100 cm.

Methodik

Stratifizierung der Standortdaten

Der Wasserhaushalt grundwasserfreier Standorte wird in den niedersächsischen Standortkennziffern durch insgesamt 105 und das Substrat durch 104 Kategorien beschrieben. Diese sehr differenzierten Kategorien wurden zusammengefasst, da die Modelleffekte nicht aller originalen Kategorien signifikant unterschiedlich waren. Allerdings erfolgte die Zusammenfassung nur dann, wenn sie auch sachlich, das heißt aus Sicht der Standortkartierung plausibel war. Daraus resultierten für die Region Bergland fünf und für die Region Tiefland vier grundwasserferne Frischestufen. Das Substrat wurde im Bergland vier und im Tiefland fünf Kategorien zugeteilt. Die nFK-Mittelwerte der gebildeten Straten unterscheiden sich innerhalb der Regionen signifikant (Tabelle 1, Tukey-Kramer-Test, $p < 0,05$).

Methodik der Modellbildung

Die nFK soll in einem statistischen Modell als Funktion der kategorialen Ansprache des Standortstyps geschätzt werden. Für die spätere

Tab. 1. Verteilungen der berechneten Werte der nutzbaren Feldkapazität (nFK) der einzelnen Straten, bezogen auf 100 cm Bodentiefe des Berglandes (BL) und des Tieflandes (TL). Frischestufen: BL_1 = nachhaltig frisch, BL_2 = frisch, BL_3 = mäßig frisch, BL_4 = sommertrocken, BL_5 = trocken, TL_1 = frisch, TL_2 = mäßig frisch bis frisch, TL_3 = mäßig frisch, TL_4 = trocken.

Substratgruppen: BL_1 = Lösslehm, BL_2 = tief verwitterte Böden mit Lösslehmbeimengung, BL_3 = mäßig verwitterte Silikat- und Carbonatböden, BL_4 = kaum verwitterte Silikat- und Carbonatböden, TL_1 = Sandlöss- und Alluvien, TL_2 = Geschiebelehme, TL_3 = bessere Geschiebesande, TL_4 = Geschiebesande, TL_5 = Reinsande.

Calculated values of single classes related to 100 cm soil depth of the mountainous area (BL) and Lower Saxony Plain (TL). Soil moisture groups: BL_1 = sustainably fresh, BL_2 = fresh, BL_3 = moderately fresh, BL_4 = moderately dry, BL_5 = dry, TL_1 = fresh, TL_2 = moderately fresh to fresh, TL_3 = moderately fresh, TL_4 = dry.

Soil classification: BL_1 = loess, BL_2 = deep weathered soils with loess, BL_3 = moderate weathered silicate- and carbonate soils, BL_4 = slightly weathered silicate- and carbonate soils, TL_1 = loessic sand and alluvion, TL_2 = till, TL_3 = medium loamy sand, TL_4 = slight loamy sand, TL_5 = pure sand.

	Nutzbare Feldkapazität (nFK) [mm/100 cm]				
	n	10 %- Perzentil	Median	arith. Mittel	90 %- Perzentil
Frischestufe BL_1	638	170	227	221*	263
Frischestufe BL_2	1.132	100	150	151*	204
Frischestufe BL_3	389	73	113	115*	155
Frischestufe BL_4	224	47	69	74*	116
Frischestufe BL_5	80	27	41	43*	56
Frischestufe TL_1	639	129	164	164*	199
Frischestufe TL_2	181	111	133	137*	171
Frischestufe TL_3	287	93	107	109*	124
Frischestufe TL_4	286	61	64	71*	95
Substrat BL_1	562	189	236	230*	264
Substrat BL_2	1.092	107	155	154*	199
Substrat BL_3	585	69	110	112*	155
Substrat BL_4	224	34	53	57*	84
Substrat TL_1	133	141	179	176*	214
Substrat TL_2	510	124	159	159*	195
Substrat TL_3	163	114	139	142*	179
Substrat TL_4	323	86	106	107*	128
Substrat TL_5	264	61	64	71*	91

* Signifikanzcode 0,05

Regionalisierung ist dabei zwingend notwendig, dass nur Variablen verwendet werden, die flächendeckend in der Standortkartierung zur Verfügung stehen. Bei der Ansprache der unscharfen Standortparameter sollte in jedem Fall geprüft werden, ob die Werte durch die teilweise nicht zu vermeidenden subjektiven Interpretationen unterschiedlicher Kartierer überlagert werden. Für eine erwartungstreue Schätzung müssen die Effekte derartiger (unbekannter) Störgrößen quantifiziert werden. Der Einsatz spezieller statistischer Methoden ermöglicht es, zumindest teilweise die Effekte von Variablen wie der Frischestufe, die in einem kausalen Zusammenhang zur nFK stehen, von den Effekten der Störgrößen zu trennen. Dabei wird davon ausgegangen, dass die räumliche Autokorrelation der Daten, die nicht über signifikante Prädiktoren beschrieben werden kann, auf unterschiedliche subjektive Einschätzungen der Gutachter während der Kartierung oder andere räumlich korrelierte Störgrößen zurückzuführen ist. Im vorliegenden Fall wird der zu beobachtende räumliche Trend als Effekt dieser fehlenden Informationen interpretiert und mittels eines bivariaten glättenden Spline-Terms quantifiziert. Die Schätzung des Effektes zur Beschreibung des räumlichen Trends sollte dabei gleichzeitig mit der Schätzung der Effekte der kausalen Einflussgrößen erfolgen. Für eine statistische Trennung des räumlichen Trends von den weiteren Modelleffekten wird dabei unterstellt, dass eine möglichst geringe Kollinearität zwischen potenziellen Prädiktoren und der geographischen Lage der Bodenprofile auftritt. Der hier verwendete Modelltyp ist ein Verallgemeinertes Additives Regressionsmodell (gam) (Formel 1):

$$y_i = x_i\beta + f(RW_i, HW_i) + \varepsilon_i \tag{1}$$

y_i : über eine Pedotransferfunktion (KA5) berechnete nFK [mm] am Profil i

x_i : ein Vektor von unabhängigen Prädiktorvariablen am Profil i

β : ein zugehöriger Parametervektor

f : ein glättender Term zur Beschreibung des räumlichen Trends, der als bivariater „isotroper Thin-Plate-Basis Penalized Regressionsspline“ spezifiziert wird

RW_i : Rechtswert des Profils i

HW_i : Hochwert des Profils i

ε_i : ein unabhängig und identisch verteilter Fehlerterm mit $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$

Standardsoftware zur Parametrisierung exakt dieses Modelltyps steht in Form der R-Programmbibliothek (R Development Core Team 2007) mgcv zur Verfügung (Wood 2006).

Ergebnisse

Im Zuge der Modellselektion wurden als erklärende Variablen zunächst die Wasserhaushaltszahl und anschließend zusätzlich die Substratklasse der forstlichen Standortkartierung ausgewählt (Formel 2.1 und 2.2). Beide Variablen weisen hoch signifikante Effekte auf die nFK auf. Die Integration einer zweidimensionalen Trendfunktion zur Erfassung der räumlichen Autokorrelation (Formel 2.3) führte zu einer weiteren Modellverbesserung (Tabelle 2). Dabei wird angenommen, dass keine Wechselwirkung zwischen Standortklassen und den räumlich korrelierten Abweichungen auftreten.

$$y_i = \beta_0 + Frischestufe_i^T \beta_1 + \varepsilon_i \tag{2.1}$$

$$y_i = \beta_0 + Frischestufe_i^T \beta_1 + Substrat_i^T \beta_2 + \varepsilon_i \tag{2.2}$$

$$y_i = \beta_0 + Frischestufe_i^T \beta_1 + Substrat_i^T \beta_2 + f_1(RW_i, HW_i) + \varepsilon_i \tag{2.3}$$

- y_i : über eine Pedotransferfunktion (KA5) berechnete nFK [mm] am Profil i
- $Frischestufe_i$: Indikatorvektor zur Kodierung der Wasserhaushaltszahl
- $Substrat_i$: Indikatorvektor zur Kodierung der Substratklasse
- RW_i : Rechtswert des Profils i (Gauß-Krüger-Koordinate, 3. Meridian)
- HW_i : Hochwert des Profils i (Gauß-Krüger-Koordinate, 3. Meridian)
- β_0 : Interzept
- β_1, β_2 : Vektoren von Regressionskoeffizienten
- f_1 : ein glättender Term zur Beschreibung des räumlichen Trends, der als bivariater „isotroper Thin-Plate-Basis Penalized Regressionsspline“ spezifiziert wird
- ϵ_i : ein unabhängig und identisch verteilter Fehlerterm mit $\epsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$

Die Güte des entwickelten Regressionsmodells (Formel 2.3) wurde anhand grafischer und numerischer Analysen der Residuen überprüft. Vier statistische Kriterien wurden dafür ausgewählt:

- Bias (\bar{E}), der die systematische Abweichung des Modells von den Beobachtungen quantifiziert (Verzerrung).
- Standardabweichung der Residuen (Sr), welche die Streuung der Beobachtungswerte um die Modellwerte quantifiziert (Treffgenauigkeit).
- Bestimmtheitsmaß (R^2_{adj}), welches die durch das Modell erklärte Varianz unter Berücksichtigung der Anzahl der Modellparameter und der Beobachtungen angibt.
- Akaikes information criterion (AIC), ein Index zur Auswahl des besten Modells unter Berücksichtigung des Maximum-Likelihood-Wertes und der Anzahl an Modellparametern.

Der Bias und die Standardabweichung der Residuen sind wie folgt definiert:

$$\text{Bias: } \bar{E} = \sum_{i=1}^n \frac{y_i - \hat{y}}{n} \quad (3)$$

Standardabweichung der Residuen:

$$Sr = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (4)$$

Hierbei entspricht y_i den beobachteten und \hat{y}_i den durch das Modell geschätzten bedingten Erwartungswerten der abhängigen Variablen (über PTF berechnete nFK) und n der Anzahl der Beobachtungen. Die statistischen Kenngrößen der Modelle sind Tabelle 2 zu entnehmen.

Alle im Modell (Formel 2.3) verwendeten Prädiktoren haben hoch signifikante Effekte auf die nFK, und ihre Wirkung ist aus bodenkundlicher Sicht plausibel (Tabelle 3). Das Bestimmtheitsmaß und der Standardfehler des final ausgewählten Modells (2.3) liegen bei 0,785 bzw. 25,8 mm bezogen auf eine Tiefe von 100 cm.

Tab. 2. Statistische Kenngrößen der Modelle. Statistical characteristics of the Models.

	Modell		
	2.1	2.2	2.3
AIC	37.683	36.540	36.110
R ² adj	0,673	0,758	0,785
\bar{E}	0,0	0,0	0,0
Sr	31,97	27,52	25,84

Tab. 3. Koeffizientenschätzungen, Standardfehler und p-Werte des finalen Modells (Formel 2.3).

Estimated parameters, standard errors, p-values of the final model (Eq. 2.3).

	Koeffizient	Standardfehler	p-Wert
Intercept (Frischestufe BL_1, Substrat BL_1)	233,0	2,0	<0,001
Frischestufe BL_2	-25,0	1,8	<0,001
Frischestufe BL_3	-45,1	2,4	<0,001
Frischestufe BL_4	-62,1	3,3	<0,001
Frischestufe BL_5	-82,5	4,8	<0,001
Frischestufe TL_1	-37,3	3,4	<0,001
Frischestufe TL_2	-54,8	3,6	<0,001
Frischestufe TL_3	-67,5	3,7	<0,001
Frischestufe TL_4	-88,0	4,7	<0,001
Substrat BL_2	-50,6	1,9	<0,001
Substrat BL_3	-80,5	2,3	<0,001
Substrat BL_4	-104,6	3,9	<0,001
Substrat TL_1	-27,6	3,7	<0,001
Substrat TL_2	-41,9	3,2	<0,001
Substrat TL_3	-46,0	3,2	<0,001
Substrat TL_4	-63,9	3,2	<0,001
Substrat TL_5	-68,2	4,5	<0,001
		Dimension	p-Wert
$f_1 RW, f_1 HW$		26,0	<0,001

Zur Überprüfung der ausgewählten Modelle wurde jeweils eine zehnfache Kreuzvalidierung durchgeführt, wofür die Datenbasis zufällig in zehn gleich große Teile zerlegt wurde. Darüber hinaus wurde das final ausgewählte Modell (2.3) gegen einen komplett unabhängigen Datensatz der Bodenzustandserhebung (BZE 2) validiert.

Das entwickelte Modell verhält sich während der Kreuzvalidierung stabil. Es besteht keine systematische Abweichung des final ausgewählten Modells von den Beobachtungen (Bias, Formel 3) und die Beobachtungswerte streuen um die Modellwerte in einer Größenordnung von $\pm 24,9$ bis $\pm 27,8$ mm. Das Ergebnis der Validierung gegen die BZE 2 ist im Vergleich zur Kreuzvalidierung geringfügig schlechter, absolut betrachtet aber noch sehr gut (Tabelle 4). Darüber hinaus wird die Verbesserung der statistischen Kenngrößen im Zuge der Modellentwicklung deutlich.

Um die Flexibilität des Modells zu überprüfen, sollten neben einer Analyse der Gesamtwerte auch die Werte in verschiedenen Straten des Datensatzes beurteilt werden. Hierfür eignen sich Boxplots

Tab. 4. Statistische Kenngrößen der zehnfachen Kreuzvalidierung und der Validierung des Modells 2.3 gegen die Daten der BZE 2.

Statistical characteristics of the cross-validation (ten runs) and the validation with the 2nd national soil survey (BZE 2).

Modell	Bias			Standardfehler		
	min	arith. Mittel	max	min	arith. Mittel	max
2.1	-2,973	-0,085	4,100	29,0	32,0	33,8
2.2	-2,662	-0,027	3,138	25,9	27,6	28,6
2.3	-1,980	0,006	1,418	24,9	25,9	27,8
BZE 2		5,761			27,4	

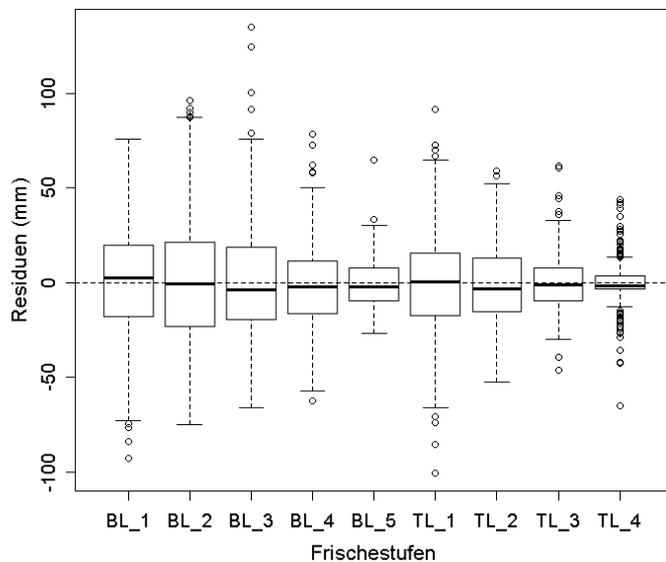


Abb. 1. Residuen des Modells (Formel 2.3) über Frischestufen des Berglandes (BL) und des Tieflandes (TL). BL_1 = nachhaltig frisch, BL_2 = frisch, BL_3 = mäßig frisch, BL_4 = sommertrocken, BL_5 = trocken, TL_1 = frisch, TL_2 = mäßig frisch bis frisch, TL_3 = mäßig frisch, TL_4 = trocken.
 Model residuals (Eq. 2.3) for each soil moisture group of the mountainous area (BL) and Lower Saxony Plain (TL). BL_1 = sustainably fresh, BL_2 = fresh, BL_3 = moderately fresh, BL_4 = moderately dry, BL_5 = dry, TL_1 = fresh, TL_2 = moderately fresh to fresh, TL_3 = moderately fresh, TL_4 = dry.

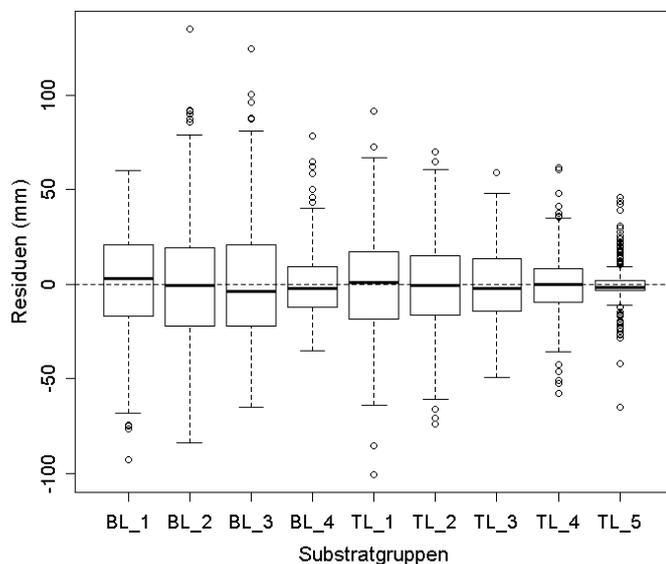


Abb. 2. Residuen des Modells (Formel 2.3) über Substratgruppen des Berglandes (BL) und des Tieflandes (TL). BL_1 = Lösslehm, BL_2 = tief verwitterte Böden mit Lösslehmbeimengung, BL_3 = mäßig verwitterte Silikat- und Carbonatböden, BL_4 = kaum verwitterte Silikat- und Carbonatböden, TL_1 = Sandlöss und Alluvien, TL_2 = Geschiebelehme, TL_3 = bessere Geschiebesande, TL_4 = Geschiebesande, TL_5 = Reinsande.
 Model residuals (Eq. 2.3) grouped by soil classifications of the mountainous area (BL) and Lower Saxony Plain (TL). BL_1 = loess, BL_2 = deep weathered soils with loess, BL_3 = moderate weathered silicate- and carbonate soils, BL_4 = slightly weathered silicate- and carbonate soils, TL_1 = loessic sand and alluvium, TL_2 = till, TL_3 = medium loamy sand, TL_4 = slight loamy sand, TL_5 = pure sand.

der Modellresiduen über den Prädiktoren. Diese sollten homogen normal verteilt und im Mittel null sein. Bei den Frischestufen und den Substratgruppen ist dies sowohl im Bergland als auch im Tiefland der Fall (Abbildung 1 und 2), während die Residuen getrennt nach forstlichen Wuchsbezirken Niedersachsens (NLF 2004) ein etwas heterogeneres Bild aufweisen (Abbildung 3). Im Wesentlichen verhält sich das Modell auch hier stabil. In einzelnen Wuchsbezirken wie Bramwald Brackenberg (BB), Eichsfeld (EF), Harz Hochlagen (HL) und Wesermünder Geest (WG) wird die nFK durch das Modell überschätzt, wogegen die nFK in den Wuchsbezirken Braunschweiger Hügelland (BH) und Ostfriesisch Oldenburgische Geest (OO) unterschätzt wird.

Der Effekt des räumlichen Trends auf die nFK wird in Abbildung 4 verdeutlicht. Hier wird die Schätzung der nFK für einen typischen Tieflandstandort (Frischestufe TL_3, Substrat TL_4) dargestellt. Durch die konstant gesetzte Frischestufe TL_3 und Substratgruppe TL_4 resultiert die räumliche Variation der nFK-Schätzung nur aus der räumlichen Trendfunktion. Die Isolinien verbinden Punkte gleicher nFK. Diese konkrete Standortsklasse (Frischestufe TL_3, Substrat TL_4) hat in den von Sandlöss und Lösslehm geprägten Regionen südlich von Bremen über Hannover Richtung Magdeburg wie auch im Leinegraben bei Göttingen eine nFK zwischen 110 und 120 mm. Demgegenüber hat die gleiche Standortsklasse auf den skelettreicheren Mittelgebirgslagen von Harz, Solling und Hils sowie auch in der durch Flugsand beeinflussten Region im Nordosten nur eine nFK zwischen 80 und 100 mm. In diesen Regionen beträgt der Effekt des räumlichen Trends auf die nFK dieser Standortsklasse zum Teil über 40 mm. In diesen Regionen kommt es somit zu besonders deutlichen positiven bzw. negativen Abweichungen vom Mittel der Standortsklassen.

Diskussion

Die Datengrundlage ist mit 3.856 verorteten Profilen relativ umfangreich. Große Datenmengen sind notwendig, wenn die Effekte von Standorteigenschaften auf Bodenparameter wie die nFK quantifiziert und diese Eigenschaften aus qualitativen Ansprachen abgeleitet werden sollen. Neben der Variation, die aus der subjektiven Einschätzung der Kartierer resultiert, kann auch davon ausgegangen werden, dass die Berechnung der nFK aus gemessenen, aber auch aus gutachterlich eingeschätzten Größen eine deutliche stochastische Komponente beinhaltet. Nur bei ausreichend großen Datenmengen ist anzunehmen, dass alle Standortsklassen in einem ähnlichen Maße von Störgrößen überlagert werden, sodass verzerrungsfreie Modellschätzungen gewährleistet sind. Was den Einfluss des Kartierers angeht, muss davon ausgegangen werden, dass diese Annahme verletzt ist, da im Allgemeinen räumlich arrandierte Gebiete durch dieselbe Person kartiert werden. Die auftretende Autokorrelation der Abweichungen vom Klassenmittelwert unterstreicht diese Einschätzung (Abbildung 4). Im Rahmen des Beitrags wird ein Verfahren beschrieben, das den potenziellen Einfluss des Kartierers quantifiziert. Dieses Verfahren setzt ebenfalls große Datenmengen mit einer möglichst hohen räumlichen Repräsentativität voraus. Regionalisierungen von Bodenparametern, die auf vergleichsweise geringen Datenumfängen basieren, sind somit kritisch zu hinterfragen, und es kann davon ausgegangen werden, dass die Schätzungen sowohl durch ungerichtete stochastische Komponenten als auch durch räumlich korrelierte Effekte vor allem als Resultat der teilweise subjektiven Ansprache des Kartierers überlagert werden. Schultze et al. (2005) entwickelten beispielsweise ein Verfahren zur Kennzeichnung des Wasserhaushalts von Waldböden in Bayern auf der Basis von Klimadaten, Geländeparametern und nur 144 Profilen. Als Zielgröße der Modellanwendung wählten Schultze et al. (2005) die Transpirationdifferenz (Tdiff).

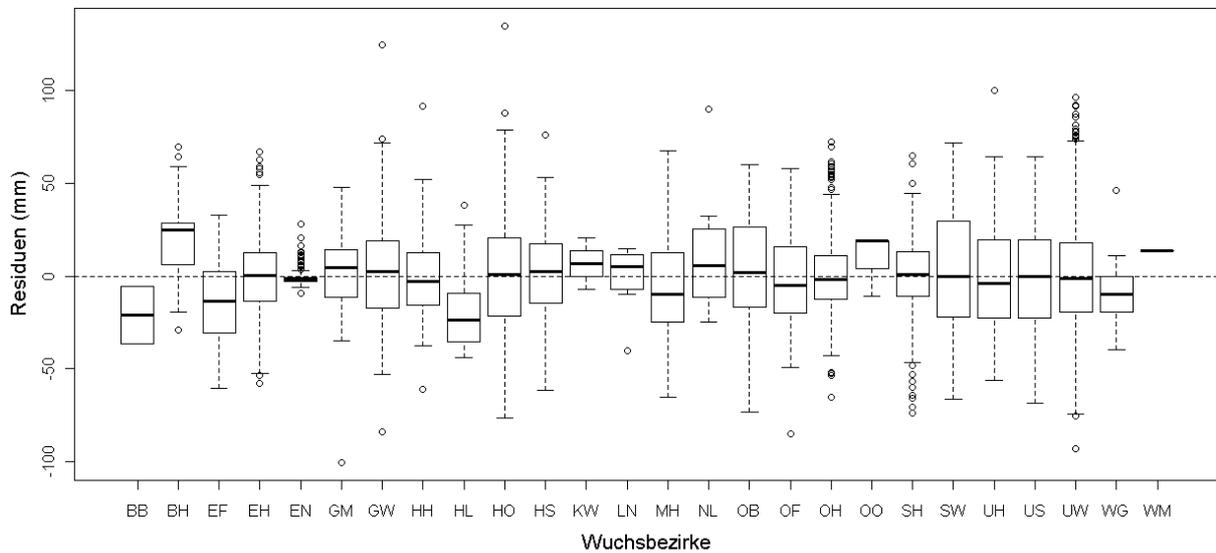


Abb 3. Residuen des Modells (Formel 2.3) über den niedersächsischen Wuchsbezirken.
Model residuals (Eq. 2.3) over forest growing districts of Lower Saxony.

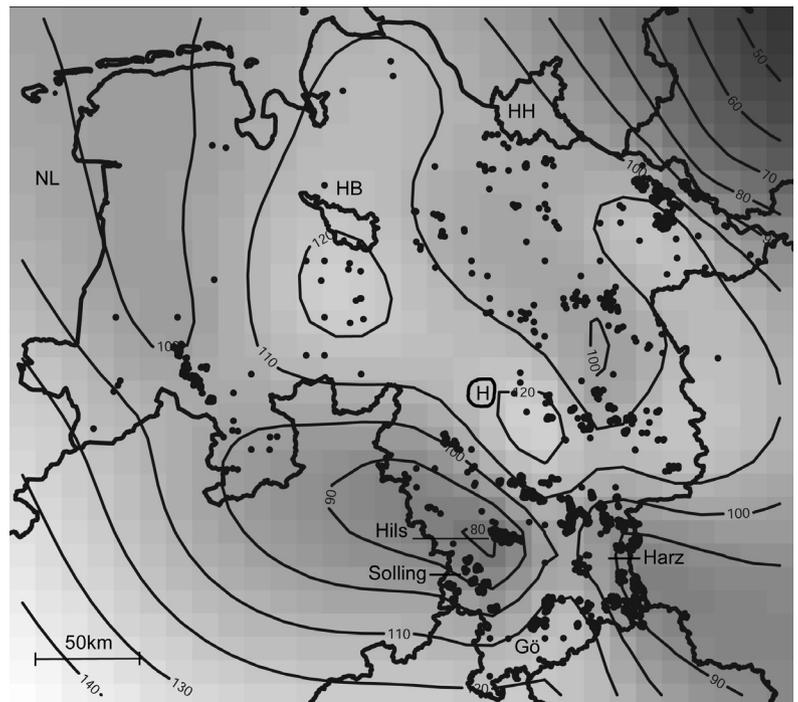


Abb. 4. Lage der Bodenprofile und Effekt des räumlichen Trends auf die nFK einer konkreten Standortseinheit (Frischestufe TL_3, Substrat TL_4). NL = Niederlande, HH = Hannover, HB = Bremen, H = Hannover, Gö = Göttingen.
Soil profile location and spatial trend effect of the nFK of a specific site class (soil moisture group TL_3, soil class, TL_4). NL = Netherlands, HH = Hannover, HB = Bremen, H = Hannover, Gö = Göttingen.

Die Größe ergibt sich aus der aktuellen und der potenziellen Transpiration von Beständen. Der Effekt des Bodens auf die T_{diff} ist in diesem Modell verhältnismäßig gering und größenordnungsmäßig vergleichbar mit den Effekten der Geländeparameter Exposition und Neigung, sodass der Wasserhaushalt primär über Klimaparameter beschrieben wird. Es ist zu vermuten, dass die geringe Anzahl an Profilen die Heterogenität der Böden Bayerns nur bedingt abbildet und so der Einfluss des Bodens zur Beschreibung des Wasserhaushalts unterschätzt wird. König (2011) regionalisiert die nFK auf Basis von Leitprofilen der einzelnen Lokalbodenformen für Sachsen, greift aber ebenfalls auf einen begrenzten Datensatz zurück, der regionale Besonderheiten nicht berücksichtigen kann.

Trotz der relativ umfangreichen Datenbasis des hier vorgestellten Modells würden zusätzliche Daten insbesondere aus weniger gut besetzten Regionen die Prognosegenauigkeit und -sicherheit verbessern. Weiterhin könnte eine deutlich erweiterte Datenbasis dafür genutzt werden, die Annahme zu überprüfen, dass zwischen den räumlich korrelierten Abweichungen und den Stratenmittelwerten selbst keine Wechselwirkung besteht. Diese Annahme kommt dadurch zum Ausdruck, dass eine einheitliche räumliche Trendfunktion für alle Frishestufen bzw. Substratgruppen parametrisiert wird (Formel 2.3).

Zur Herleitung der nFK wurden Schätzwerte einer Pedotransferfunktion (PTF) genutzt (KA5), da Messwerte nicht zur Verfügung standen. Prinzipiell liefern Messwerte bessere Ergebnisse. Eine Er-

weiterung der Profilsprache um Messwerte zur Textur und Trockenraumdichte könnte für eine Überprüfung der Eingangsgrößen der nFK-Berechnung bzw. für eine Kalibrierung der PTF verwendet werden. Messwerte werden insbesondere für Versuchsflächen empfohlen, zum Zweck der Regionalisierung sind PTF aber praktikabel (Russ und Riek 2011). Die zur Berechnung der nFK verwendete PTF erwies sich in einer Vergleichsstudie für Waldböden in Bayern als geeignet (Osenstetter et al. 2009). In einer Studie von Schramm et al. (2006) treten für die hier verwendete PTF mittlere quadratische Vorhersagefehler (RMSE) von 7,4 Vol.-% auf. Eine niedrigere Genauigkeit wird u. a. bei reinen Sanden (RMSE = 9,8 Vol.-%) beobachtet. Auch Russ und Riek (2011) weisen für überwiegend sandige Bodenarten in Brandenburg auf höhere Fehler bei Verwendung von PTF hin, beurteilen aber eine vergleichbare PTF für die hier betrachtete Fragestellung als empfehlenswert. Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass die Herleitung der nFK mittels der hier verwendeten PTF hinreichend präzise Ergebnisse liefert. Auf sandigen Substraten ist jedoch mit einem größeren Fehler zu rechnen.

Die gewählte Bezugstiefe geht als Multiplikator in die Berechnung der nFK ein und hat damit einen erheblichen Einfluss auf die resultierenden Werte. Häufig wird die Bezugstiefe über die effektive Durchwurzelungstiefe hergeleitet. Diese wird als die potenzielle Ausschöpfungstiefe von pflanzenverfügbarem Bodenwasser (nFK) verstanden, das durch Pflanzenwurzeln in Trockenjahren dem Boden maximal entzogen werden kann (Ad-hoc-AG Boden 2005). Für die Ableitung der effektiven Durchwurzelungstiefe von Waldstandorten existieren verschiedene Ansätze, die unterschiedliche Parameter wie Alter und Art der aufstockenden Bestände, Textur und Niederschlag berücksichtigen (Lehnardt und Brechtel 1980, Geldmacher 1993, DVWK 1996, Müller 2004, Raissi et al. 2009). Da im entwickelten Modell das Potenzial der Böden unabhängig von der Bestockung und den Niederschlägen, welche einem dynamischen Prozess unterliegen, beschrieben werden sollte, wurde eine einheitliche, in der Praxis übliche Bezugstiefe von 100 cm gewählt. Für die Zukunft ist angedacht, zusätzlich die nFK für weitere Tiefenstufen (20 und 50 cm) zu schätzen, um beispielsweise Risiken für Naturverjüngung bzw. Pflanzungen besser beurteilen zu können.

Die gewählte Methodik wird für die Modellierung räumlicher Datentrends von Wood (2006) als Standard empfohlen. Die räumliche Autokorrelation der Daten kann durch diese Methodik berücksichtigt und der raumbezogene Bias weitestgehend eliminiert werden. Auch wäre ohne die explizite Modellierung der Autokorrelation die Unabhängigkeitsannahme der Regressionsanalyse verletzt. Das hier entwickelte Modell ist räumlich explizit. Dies ist ein Vorteil gegenüber rein regressionsanalytischen Modellen, wie sie beispielsweise Zirlwagen (2003) für die Regionalisierung von bodenchemischen Eigenschaften oder Schultze et al. (2005) für die Regionalisierung der Transpirationsdifferenz wählten. Es ist zu vermuten, dass die in der hier vorliegenden Untersuchung auftretende räumliche Autokorrelation auch Folge der Betrachtung eines sehr großen Gebietes ist. Triantafilis et al. (2009) konnten bei der Regionalisierung der Kationenaustauschkapazität auf einer Versuchsfläche von nur 26 ha eine räumliche Autokorrelation der Daten ausschließen. Auch findet Zirlwagen (2003) innerhalb eines im Vergleich zu Niedersachsen kleinen Untersuchungsgebietes von 7.400 ha keinen Hinweis auf eine räumliche Autokorrelation der Daten. Allerdings erfolgte diese Überprüfung anhand der Residuen einer multiplen Regression und nicht auf der Basis von räumlich expliziten Regressionsmodellen, in denen die Autokorrelation simultan geschätzt wird. So kann bei der zum Teil hohen Anzahl an Prädiktorvariablen (Durchschnitt 5,5; maximal 8) eine Überparametrisierung des Modells nicht vollständig ausgeschlossen werden. Es bleibt aber zu berücksichtigen, dass Triantafilis et al. (2009) und Zirlwagen (2003) Messdaten als unabhängige Variablen verwendeten, sodass der potenzielle Effekt des Kartierers bei der Ansprache unscharfer Kategorien entfällt. Auch

beschränken sich die Untersuchungen auf geologisch weitestgehend homogene Gebiete, sodass stratigraphische oder morphologische Muster zu schwach ausgeprägt sein könnten, als dass sie zu räumlich korrelierten Abweichungen führten. Schultze et al. (2005) und König (2011) überprüfen ihre Daten nicht auf räumliche Autokorrelation, obwohl die von ihnen entwickelten Modelle bei der Regionalisierung für ganze Bundesländer verwendet werden sollen. König (2011) begründet dies mit einer unzureichenden Datenlage. Auch Jalabert et al. (2010) weisen in ihrem Modell zur Schätzung der Trockenraumdichte von Waldböden auf die geringe Präzision reiner regressionsanalytischer Modelle hin und befürworten für korrelierte Daten bzw. eine hohe Anzahl an Prädiktorvariablen „Verallgemeinerte Boosted Regressionsmodelle“ (Ridgeway 2006). Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, dass die in dieser Studie verwendete Methodik, insbesondere bei der Regionalisierung für sehr große Gebiete, rein regressionsanalytischen Ansätzen überlegen ist.

Weitere Anwendungsbeispiele zur Beschreibung räumlich korrelierter Daten mithilfe von Verallgemeinerten Additiven Modellen finden sich beispielsweise für Waldschadensanalysen (Augustin et al. 2009), den Standort-Leistungs-Bezug (Albert und Schmidt 2009b), die Abschätzung des Einzelbaumrisikos durch Stürme (Schmidt et al. 2010) und für die Beschreibung der Höhen-Durchmesser-Beziehung (Nanos et al. 2004, Schmidt et al. 2011).

Die Betrachtung der Residuen getrennt nach forstlichen Wuchsbezirken Niedersachsens (NLF 2004) dient der Analyse daraufhin, ob das Modell die räumlichen Abhängigkeiten bzw. die Abweichungen von den mittleren Verhältnissen der Daten in adäquater Weise erfasst (Abbildung 3). In der Modellselktion wurde bereits deutlich, dass die Integration der räumlichen Trendfunktion (Formel 2.3) zu einer weiteren Modellverbesserung führt (Tabelle 2 und 4). Die Residualanalyse nach Wuchsbezirken verdeutlicht weiter, dass die Verbesserung bzw. die Reduktion der Verzerrung in den verschiedenen Wuchsbezirken sehr unterschiedlich ist. Die Schätzungen mit dem räumlich expliziten Modell (Formel 2.3) weisen für die großen Waldgebiete in der Heide (Wuchsbezirke SH, HH, OH), in den unteren Harzlagen und im Solling (Wuchsbezirke UH, US, HS) wie auch im Unteren Weser Leine Bergland (Wuchsbezirk UW) keinen nennenswerten Bias mehr auf. Es kann vermutet werden, dass der darüber hinaus auftretende Bias im Wesentlichen auf die geringe Anzahl an Beobachtungen in den jeweiligen Wuchsbezirken zurückzuführen ist. So liegen für die sehr kleinen Wuchsbezirke BB, EF, HL, KW, WM und die Wuchsbezirke mit geringem Waldanteil OO und WG stets weniger als 15 Beobachtungen vor. Die nFK-Werte des Wuchsbezirks MH werden durch das Modell überschätzt. Dieser Wuchsbezirk repräsentiert die montanen Lagen des Harzes. Die Standorte in diesem Wuchsbezirk sind häufig sehr skelettreich, und die berechnete nFK ist entsprechend gering. Das Skelett einiger geologischer Formationen, wie zum Beispiel der Mittlere Muschelkalk oder der paläozoische Tonschiefer, hat jedoch Anteil am Bodenwasserspeicher (Müller 2004). Dies wird in der gewählten Methodik zur Berechnung der nFK nicht berücksichtigt. Auch ist zu vermuten, dass Bäume auf skelettreichen, durchlüfteten Böden tiefer wurzeln als auf skelettarmen, um ihren Wasserbedarf sicherzustellen. Daher könnte in diesen Fällen die gewählte Bezugstiefe von 100 cm zu gering sein. Der Kartierer, der diese Umstände berücksichtigt hat, weist demzufolge einen zu frischen Standortstyp aus und überschätzt somit die für 100 cm Bodentiefe berechnete nFK. Hinzu kommt die Möglichkeit der Fehleinschätzung durch den Kartierer, der tendenziell trockenere Standorte in der kühl feuchten Witterung der montanen Harzlagen frischer beschrieben haben könnte, als die edaphischen Gegebenheiten tatsächlich sind. Auch der Wuchsbezirk BH weist einen deutlichen Bias auf. Ursache hierfür könnte die begrenzte Anzahl von nur 47 Beobachtungen sein, die sich zudem fast ausschließlich aus nachhaltig frischen Lösslehmstandorten zusammensetzt. Die in den Wuchsbezirken BH und MH auftretenden Abweichungen vom

Mittel der Standortstypenklassen könnten auch darin begründet liegen, dass der Kartierer nur ein begrenztes Gebiet begutachtet und die Profile in einem relativen Verhältnis zueinander beurteilt hat. Im Wuchsbezirk MH mit negativen Abweichungen vom Klassenmittel kommt es eher zu einer Überschätzung, im lösslehmgeprägten Wuchsbezirk BH mit positiver Abweichung vom Klassenmittel zu einer Unterschätzung bei der qualitativen Ansprache des Wasserhaushaltes durch den Kartierer. Die gerichteten Abweichungen in Wuchsbezirken, die durch bestimmte Bodentypen dominiert werden, könnten aber auch ein Indiz dafür sein, dass Wechselwirkungen zwischen den Standortvariablen und der räumlichen Autokorrelation auftreten, die aufgrund der Datengrundlage bisher noch nicht modelliert werden können (Formel 2.3).

Danksagung

Wir bedanken uns beim Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur für die Finanzierung im Rahmen des Projektes „Waldbauliche Anpassungsstrategien an veränderte Klimabedingungen in den Regionen Harz und Lüneburger Heide“ des Forschungsverbundes Klimafolgenforschung in Niedersachsen (KLIF), den Niedersächsischen Landesforsten, dem Niedersächsischen Forstplanungsamt und der Landwirtschaftskammer Niedersachsen für die Bereitstellung der Daten. Vielen Dank auch zwei anonymen Gutachtern für konstruktive Überarbeitungsvorschläge.

Literatur

- Ad-hoc-AG Boden 2005. Bodenkundliche Kartieranleitung. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.). 5. Aufl. Hannover
- Albert M., Schmidt M. 2009a. Beurteilung der Anbauwürdigkeit von Baumarten unter Klimawandel mittels dreidimensionaler Ökogramme. In: Nagel J. (Hrsg.) Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten. Sektion Ertragskunde. Jahrestagung 25.-27. Mai 2009, Göttingen, 83-94
- Albert M., Schmidt M. 2009b. Climate-sensitive modelling of site-productivity relationships for Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and common beech (*Fagus sylvatica* L.). *Forest Ecol. Manage.* 259, 739-749
- Ammer, C. und 19 Mitautoren 2005. Zur Zukunft der Buche (*Fagus sylvatica* L.) in Mitteleuropa – Kritische Anmerkungen zu einem Beitrag von Rennenberg et al. 2004. *Allg. Forst- u. Jagd-Ztg.* 176, 60-67
- Arbeitskreis Standortskartierung 1996. Forstliche Standortaufnahme. Arbeitskreis Standortskartierung in der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung. Eching
- Augustin N.H., Musio M., von Wilpert K., Kublin E., Wood S.N., Schumacher M. 2009. Modeling spatiotemporal forest health monitoring data. *J. Am. Stat. Assoc.* 104 (487), 899-911
- Dengler A. 1935. *Waldbau auf ökologischer Grundlage - Ein Lehr und Handbuch.* Berlin
- DVWK (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau) 1996. Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. Merkblatt 238. Bonn
- Ellenberg H. 1996. *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht.* 5. Aufl. Stuttgart
- Frischbier N., Profft I. 2008. Praxisorientierte Regionalisierung forstlich relevanter Klimawerte und -szenarien für Thüringen. *Forst u. Holz* 63, 24-29
- Geldmacher K. 1993. Effektiver Wurzelraum und pflanzenverfügbares Bodenwasser charakteristischer Böden und Nutzungen in Berlin. Diplomarbeit am Fachbereich 14, TU Berlin (unveröff.)
- Hastie H.J., Tibshirani R.J. 1990. *Generalized additive models. Monographs on statistics and applied probability* 43. London
- IPCC (International Panel on Climate Change) 2007. Fourth assessment report. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf (26.04.2011)
- Jacob D., Barring L., Christensen O.B., Christensen J.H., Hagemann S., Hirschi M., Kjellström E., Lenderink G., Rockel B., Schär C., Seneyratne S.I., Somot S., Van Ulden A., Van Den Hurk B. 2007. An inter-comparison of regional climate models for Europe: Design of the experiments and model performance. *Climatic Change* 81, 31-52
- Jalabert S.S.M., Martin M.P., Renaud J.-P., Boulonne L., Jolivet C., Montanarella L., Arrouays D. 2010. Estimating forest soil bulk density using boosted regression modelling. *Soil Use and Management* 26, 516-528
- Kölling C. 2007. Klimahüllen für 27 Waldbaumarten. *AFZ/DerWald* 62, 1242-1245
- Kölling C., Zimmermann L. 2007. Die Anfälligkeit der Wälder Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* 67, 259-268
- König T. 2011. Substratfeuchte – wichtige Auswerteeinheit der Standortserkundung; dargestellt am Beispiel Sachsens. *Berichte Freiburger Forstliche Forschung* 88, im Druck
- Lehnardt F., Brechtel H.M. 1980. Durchwurzelungs- und Schöpftiefen von Waldbeständen verschiedener Baumarten und Altersklassen bei unterschiedlichen Standortverhältnissen. *Allg. Forst- u. Jagd-Ztg.* 151, 120-127
- Leuschner C. 1998. Mechanismen der Konkurrenzüberlegenheit der Rotbuche. *Beiträge der Reinhold-Tüxen-Gesellschaft* 10, 5-18
- Menzel A. 1997. Phänologie von Waldbäumen unter sich ändernden Klimabedingungen – Auswertung der Beobachtungen in den Internationalen Phänologischen Gärten und Möglichkeiten der Modellierung von Phänodaten. *Forstliche Forschungsberichte München* 164
- Menzel A., Fabian P. 1998. Änderungen der Vegetationsperiode im Zuge von Klimaänderungen. *Annalen der Meteorologie* 37, 151-152
- Monserud R.A., Huang S., Yang Y. 2006. Predicting lodgepole pine site index from climatic parameters in Alberta. *For. Chron.* 82, 562-571
- Michiels H.-G., Aydın C., Bolte A., Hein S., Husendörfer E., Mühlethaler U., Reif A., Schmidt W. 2009. Ökologischer Steckbrief und waldbauliche Bewertung der Buche. *Forst und Holz* 64, 18-21
- Müller U. 2004. Auswertungsmethoden im Bodenschutz. Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystem (NIBIS®). 7. Aufl. Arb.-H. Boden 2004/2. Hannover
- Nanos N., Calama R., Montero G., Gil L. 2004. Geostatistical prediction of height/diameter models. *Forest Ecol. Manage.* 195, 221-235
- NLF (Niedersächsische Landesforsten) 2004. Langfristige ökologische Waldentwicklung. Aus dem Walde 54. Wolfenbüttel
- NLF (Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung) 2004. Arbeitshefte Boden 2004/3. Hannover
- Osenstetter S., Falk W., Dietz E., Kölling C., Zimmermann L. 2009. Böden – eine endliche Ressource, Einflüsse der Pedotransferfunktionen auf Ergebnisse bodenhydrologischer Modellierung an Waldstandorten. http://eprints.dbges.de/1951/1/DBG-Tagung2009-Beitrag_SebastianOsenstetter.pdf (26.04.2011)
- Otto H.-J. 1994. *Waldökologie.* Stuttgart
- Raissi F., Müller U., Meesenburg, H. 2009. Ermittlung der effektiven Durchwurzelungstiefe von Forststandorten. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (Hrsg.) *Geofakten* 9. Hannover
- R Development Core Team 2007. *R: A language and environment for statistical computing.* R Foundation for Statistical Computing, Vienna. <http://www.r-project.org> (26.04.2011)
- Rennenberg H., Seiler W., Matyssek R., Gessler A., Kreuzwieser J. 2004. Die Buche (*Fagus sylvatica* L.) – ein Waldbaum ohne Zukunft im südlichen Mitteleuropa? *Allg. Forst- u. Jagd-Ztg.* 175, 210-224
- Richter A., Adler G.H., Fahrak M., Eckelmann W. 2007. Erläuterungen zur nutzungsdifferenzierten Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland im Maßstab 1:1000000 (BÜK 1000 N, Version 2.3). Hannover
- Ridgeway G. 2006. Gbm: generalized boosted regression models. R package version 1.5-6. <http://cran.r-project.org/web/packages/gbm/index.html> (26.04.2011)
- Riek W. 1998. Verfahren zur Bestimmung des effektiv nutzbaren Bodenwassers von Kiefernstandorten im pleistozänen Tiefland. *Beitr. Forstwirtschaftl. u. Landsch. ökol.* 32, 28-33
- Russ A., Riek W. 2011. Pedotransferfunktionen zur Ableitung der nutzbaren Feldkapazität – Validierung für Waldböden des nordostdeutschen Tieflands http://www.afsv.de/download/literatur/waldoekologie-online/waldoekologie-online_heft-11-3.pdf (26.04.2011)
- Schmidt M., Hanewinkel M., Kändler G., Kublin E., Kohnle U. 2010. An inventory-based approach for modeling single-tree storm damage – experiences with the winter storm of 1999 in southwestern Germany. *Can. J. For. Res.* 40, 1636-1652
- Schmidt M., Kiviste A., Gadow K. v. 2011. A spatially high-diameter model for Scots pine in Estonia. *Eur. J. Forest Res.* 130, 303-315
- Schramm D., Schultze B., Scherzer J. 2006. Validierung von Pedotransferfunktionen zur Berechnung von bodenhydrologischen Parametern als

- Grundlage für die Ermittlung von Kennwerten des Wasserhaushaltes im Rahmen der BZE II. http://bfh-web.fh-eberswalde.de/bze/upload/begleit-Studien/nach_jahre/2006/Validierung_PTF_Udata/Validierung_PTF_Udata.pdf (26.04.2011)
- Schultze B., Kölling C., Dittmar C., Rötzer T., Elling W. 2005. Konzept für ein neues quantitatives Verfahren zur Kennzeichnung des Wasserhaushaltes von Waldböden in Bayern: Modellierung – Regression – Regionalisierung. *Forstarchiv* 76, 155-163
- Schwärzel K., Feger K.-H., Häntzschel J., Menzer A., Spank U., Clausnitzer F., Köstner B., Bernhofer C. 2009. A novel approach in model-based mapping of soil water conditions at forest sites. *Forest Ecol. Manage.* 258, 2163-2174
- Spekat A., Enke W., Kreienkamp F. 2007. Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarien mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG 2005 auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarien B1, A1B und A2; FuE-Vorhaben Förderkennzeichen 204 41 138, Umweltbundesamt (Hrsg.). Potsdam
- Spellmann H., Suttmöller J., Meesenburg H. 2007. Risikovorsorge im Zeichen des Klimawandels. *AFZ/DerWald* 62, 1246-1249
- Suttmöller J., Spellmann H., Fiebiger C., Albert M. 2008. Der Klimawandel und seine Auswirkungen auf die Buchenwälder in Deutschland. In: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.) Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt 3. Göttingen, 135-157
- Triantafyllis J., Lesch S.M., La Lau K., Buchanan S.M. 2009. Field level digital soil mapping of cation exchange capacity using electromagnetic induction and a hierarchical spatial regression model. *Australian Journal of Soil Research* 47, 651-663
- Wagner S. 2004. Klimawandel – einige Überlegungen zu waldbaulichen Strategien. *Forst und Holz* 59, 394-398
- Werner P.C., Gerstengarbe F.-W., Fraedrich K., Oesterle H. 2000. Recent climate change in the North Atlantic/European sector. *Internat. J. Climatol.* 20, 463-471
- Wessolek G., Kaupenjohann M., Renger M. 2009. Bodenökologie und Bodengenese Heft 40. Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis. Berlin
- Wood S.N. 2006. Generalized additive models: an introduction with R. Boca Raton/USA
- Zirlewagen D. 2003. Regionalisierung bodenchemischer Eigenschaften in topografisch stark gegliederten Waldlandschaften. *Freiburger Forstliche Forschung* 19