

Standort-Leistungsmodelle als Grundlage für realistische Waldentwicklungsszenarien unter Klimawandel

Levent Burggraef¹, Paul Schmidt-Walter¹, Lutz Hilbrig² und Matthias Schmidt¹
¹Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen
²Thünen-Institut für Waldökosysteme Eberswalde

Zusammenfassung

Der Beitrag beschreibt die Parametrisierung von klima- und standortsensitiven Höhen-Durchmessermodellen auf Basis eines europaweiten Datensatzes aus Einzelbaumdaten, Klima- und Bodenparametern zur Anwendung auf den Traktecken der BWI 3. Einzelbaumdaten werden aus der Harmonisierten Waldinventur (HBI) auf den Stichprobenpunkten der zweiten Bundesweiten Bodenzustandserhebung (BZE II), der europaweiten BioSoil-Inventur und der französischen nationalen Waldinventur bezogen. Bodenparameter sind in den drei Inventuren mit unterschiedlicher Qualität enthalten. Klimaparameter werden dem WorldClim-Datensatz entnommen. Als Grundmodell wird eine reparametrisierte und linearisierte Form der Korf-Funktion (LAPPI 1997) verwendet, deren originäre Parameter als Funktion von Klima- und Bodenparametern beschrieben werden. Das Grundmodell wird für Eiche, Buche, Fichte und Kiefer als Generalisiertes Additives Modell mit Monotoniebedingungen (Shape Constrained Additive Model, SCAM) parametrisiert. In einer zweiten Stufe wird ein Generalisiertes Additives Gemischtes Modell (GAMM) parametrisiert, wobei Effekte von zusätzlichen Bodenparametern des BioSoil/BZE-Teildatensatzes geschätzt werden. Die resultierenden Höhengschätzungen werden anhand von Höhenmessungen an den Traktecken der BWI 3 kalibriert. Bei der Modellselektion ergaben sich signifikante und plausible Effekte für den d_g , den Temperaturmittelwert und die Niederschlagssumme des wärmsten Quartals sowie die nutzbare Feldkapazität (nFK). Weitere Bodenparameter zeigten keine signifikanten oder plausiblen Effekte oder werden an den Traktecken der BWI 3 nicht erhoben. Die Ziele der Modellbildung sind zusammengefasst: (1) die Parametrisierung klima- und standortsensitiver Höhen-Durchmessermodelle für die Traktecken der BWI 3, welche (2) anhand vorhandener Höhenmessungen kalibrierbar und (3) als Grundlage für Szenariosimulationen zur Prognose von Holzaufkommen und Kohlenstoffbindung verwendbar sind.

Abstract

The article presents the parameterization of climate- and site-sensitive height-diameter models, based on a European dataset of tree data, climate- and soil-parameters, for the application on the plots of the third German National Forest Inventory (NFI). Tree data is gathered from the second German National Forest Soil Inventory (NFSI), the European BioSoil inventory and the French National Forest Inventory. Soil parameters of varying quality are included in these inventories. Climate parameters were added from the WorldClim dataset. A reparameterized and linearized version of the Korf-Function (LAPPI 1997) is used as a basic model. The original parameters are described as function of climate and soil parameters. The basic model is parameterized as a shape constrained additive model (SCAM) for oak, beech, spruce and pine. In a second step, a generalized additive mixed model (GAMM) was parameterized and effects of additional soil parameters of the BioSoil/NFSI data set were estimated. Resulting height estimates are calibrated based on measured heights at the German NFI plots. Model selection yielded significant and plausible effects for the quadratic mean diameter, mean temperature and precipitation sum of the warmest quarter and field capacity. Additional soil parameters yielded no significant or plausible effects or are not sampled at the plots of the third German NFI. In summary, the goals of model building were (1) the parameterization of climate- and site-sensitive height-diameter models for the plots of the third German NFI which (2) can be calibrated based on available height measurements and (3) are usable as a basis for simulations aimed at the prediction of wood production and carbon sequestration.

Einleitung

Im Rahmen der Klimafolgenforschung an der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt werden Standort-Leistungs- und Risikomodelle entwickelt. Risikomodelle dienen der Einschätzung der Vulnerabilität von Waldbeständen gegenüber biotischen und abiotischen Risiken und bilden damit eine wichti-

ge Grundlage für adaptive waldbauliche Maßnahmen (ALBERT et al. 2015). Standort-Leistungsmodelle ergänzen die Risikoanalyse um die Prognose der zukünftigen Produktivität der Waldstandorte (ALBERT & SCHMIDT 2010; SPELLMANN et al. 2011). Die Entwicklung klimasensitiver Standort-Leistungsmodelle ist auch ein Hauptziel des Projektes „Waldproduktivität-Kohlenstoffspeicherung-Klimawandel (WP-KS-KW)“. Die im Rahmen des Projektes entwickelten Modelle sollen auf die Stichprobenpunkte (Traktecken) der dritten Bundeswaldinventur (BWI 3) anwendbar sein. Als Eingangsparameter zur einzelbaumbasierten Volumenschätzung werden Brusthöhendurchmesser (BHD) und Baumhöhe benötigt. BHD-Messungen liegen an den BWI-Traktecken für alle aufgenommenen Bäume vor, während Baumhöhen nur an ein bis zwei repräsentativen Bäumen je Baumartengruppe und Bestandesschicht gemessen werden. Zur Ergänzung der nicht gemessenen Baumhöhen bieten sich Höhen-Durchmessermodelle an, wie sie von LAPPI (1997) und MEHTÄTALO (2004) verwendet wurden. Die Höhenschätzungen sollten anhand der vorhandenen Höhenmessungen lokal kalibrierbar sein, um die Höhen-Durchmesserbeziehung an jeder Traktecke zum Simulationsstart realistisch bzw. mit möglichst geringem Fehler zu schätzen. Für die Standortsensitivität und die Fortschreibung auf Basis von Klimaprojektionen müssen zudem Kovariablen, die Klima- und Bodeneigenschaften beschreiben, in die Modellbildung einbezogen werden. Dabei sollen potenziell nicht-lineare Kovariablen-Effekte auf die Baumhöhe berücksichtigt und gleichzeitig aber – häufig an den Datenrändern auftretende – unplausible Effektverläufe durch die Definition von Monotoniebedingungen unterdrückt werden. Zu diesem Zweck wurden Shape Constrained Additive Models (SCAM) parametrisiert (PYA & SCHMIDT 2016). Der vorliegende Beitrag beschreibt die Parametrisierung der Standort-Leistungsmodelle auf Basis eines europaweiten Satzes von Klima-, Boden- und Waldinventurdaten. Die Bodeninformationen wurden direkt an den jeweiligen Stichprobenpunkten der Waldinventuren erhoben. Sie sind potenziell über Schätzfunktionen hergeleiteten Daten überlegen und bieten daher eine hervorragende Basis für die Evaluation von Standort-Leistungsbeziehungen.

Zur Anwendung der Modelle auf den Traktecken der BWI 3 wurden die Traktecken um einen sog. Umweltvektor ergänzt (METTE & KÖLLING 2015). Dazu wurden Bodenparameter aus den Standortkartierungen der Länder und zusätzlichen geologischen und topographischen Hilfsvariablen abgeleitet und auf die Traktecken der BWI 3 regionalisiert. Klimaparameter wurden durch Regionalisierung von meteorologischen Stationsdaten in Verbindung mit Geländeinformationen generiert. Die Implementierung in die Waldwachstumssimulatoren WEHAM, Waldplaner/TreeGROSS und SILVA sowie die Simulationen für die Traktecken der BWI 3 sind Ziel eines weiteren Arbeitspaketes des WP-KS-KW Projektes. Über Simulationsläufe sollen das zukünftige Holzaufkommen und die Entwicklung der Kohlenstoffspeicherung prognostiziert werden.

Material und Methoden

Datengrundlage

Als Kerndatensatz für die Modellparametrisierung wird auf die zweite bundesweite Bodenzustandserhebung (BZE II) zurückgegriffen. An den Stichprobenpunkten wurden neben Bodendaten im Rahmen der Harmonisierten Bestandesinventur (HBI) auch Einzelbaum- und Bestandesparameter aufgenommen (HILBRIG et al. 2014). Zur Erhöhung der Klima- und Standortsamplitude wurde der Parametrisierungsdatensatz um die Bestandesparameter der Biodiversity-Aufnahmen der BioSoil-Inventur auf dem europaweiten Level I-Netz erweitert (BASTRUP-BIRK et al. 2007; DE VOS & COOLS 2011). Da für die französischen BioSoil-Plots keine Einzelbaumdaten erfasst werden, wurde die Datenbasis durch Stichprobenpunkte der französischen nationalen Waldinventur ergänzt (VIDAL et al. 2005). Die Basis bilden die Plots auf dem 8x8 km Raster der BZE II (Tabelle 1). Bäume wurden in drei konzentrischen Probekreisen mit Radien von 5,64 m, 12,62 m und 17,84 m und Kluppschwellen von 7 cm, 10 cm und 30 cm aufgenommen. Für jeden Baum wurden u.a. Art, Alter, BHD und Bestandesschicht bestimmt. Höhen wurden für jede Art ein Mal für Durchmesserklassen von 7-10 cm und ab 10 cm in 5-cm Schritten gemessen, jedoch für mindestens fünf Bäume pro Art. In Bayern stellen die Stichprobenpunkte des BZE II Rasters einen Teildatensatz der zweiten Bundeswaldinventur (BWI 2) dar. Statt einer gesonderten Inventur entsprechend der HBI-Vorgaben wurden hier die Aufnahmen aus der Winkelzählprobe der BWI 2 in den Datensatz übernommen. Im Rahmen der BWI 2 ist mindestens eine Baumhöhe pro Bestandesschicht und Baumart

tengruppe (Fichte, Tanne, Douglasie, Kiefer, Lärche, Eiche, Buche, andere Laubhölzer und andere Nadelhölzer) zu erfassen. Im Rahmen der BioSoil-Inventur werden Bäume ebenfalls anhand von drei konzentrischen Probekreisen mit Radien von 3,09m, 11,28 m und 25,24 m und Kluppschwellen von 0 cm (und Höhe > 130 cm), 10 cm und 50 cm aufgenommen, wobei die Höhen der drei stärksten Bäume unabhängig von der Baumart zu messen sind. Im Rahmen der französischen nationalen Waldinventur erfolgt die Aufnahme in drei konzentrischen Probekreisen mit Radien von 6 m, 9 m und 15 m und Umfängen von 23,5 cm, 70,5 cm und 117,5 cm in 1,30 m Höhe (entspricht Kluppschwellen von 7,4 cm, 22,44 cm und 37,4 cm BHD), wobei die Höhe für jeden aufgenommenen Baum gemessen wird.

Tabelle 1: Teildatensätze der verwendeten Einzelbaumdaten.

Inventur	Anzahl Bäume	Anzahl Stichprobenpunkte	Mittlere Bäume/Plot	Anzahl Höhenmessungen/Plot	Mittlere Rasterabstand (km)
BZE II/HBI	50.396	1414	36	10	8x8
BWI 2 Bayern	10.037	1107 Traktecken auf 358 Trakten	9	3	8x8*
BioSoil Level I	46.759	1557	30	3	16x16
NFI Frankreich	283.996	41.781	7	6	1.41x1.41

**In Bayern sind die Raster von BWI 2 und BZE II identisch, weshalb Einzelbaumdaten hier aus der BWI 2 bezogen werden.*

Zur Modellierung des Standort-Leistungspotenzials ist es sinnvoll Bäume des Hauptbestandes zu verwenden, da angenommen werden kann, dass sich Effekte von Konkurrenz oder Überschirmung hier nur schwach auswirken. Zudem wurden im Rahmen der BioSoil Level I-Inventur nur Höhen der drei stärksten Bäume und in der französischen Waldinventur nur Bäume ab einer Kluppschwelle von 24,5 cm aufgenommen. Daher werden aus dem HBI/BWI 2 Teildatensatz nur Bäume des Hauptbestandes verwendet. Die Daten aus allen drei Inventuren liegen jeweils nur für einen Aufnahmezeitpunkt vor.

Bodendaten liegen für die verschiedenen Datenkollektive in sehr unterschiedlicher Genauigkeit vor. Während für die französische NFI nur grobe Ansprachen der physikalischen Boden- und Standorteigenschaften getrennt nach Ober- und Unterboden vorliegen, handelt es sich bei den Daten des BZE- und BioSoil: Soil-Kollektivs (Tabelle 2) um physikalische und chemische Messwerte einzelner Tiefenstufen (BZE: 0-5, 5-10, 10-30, 30-60, 60-90 cm; BioSoil: 0-10, 10-20, 20-40, 40-80 cm). Aufgrund fehlender Angaben zu Trockenrohdichte und Humusgehalt im französischen NFI-Datensatz wurden zur Herleitung der nutzbaren Feldkapazität (nFK) die nach Textur tabellierten Werte für mittlere Trockenrohdichten ($1,3 \text{ g cm}^{-3}$) in allen drei Datensätzen verwendet (WESSOLEK et al. 2009). Hierfür mussten die Textur-Angaben im französischen Datensatz in das deutsche Klassifikationssystem übersetzt werden (AD-HOC AG BODEN 2006). Die so für die einzelnen Tiefenstufen bzw. Ober- und Unterboden erhaltenen Angaben zur nFK wurden unter Berücksichtigung des Grobbodenanteils bis zur Bodenentwicklungstiefe (ansteheendes Festgestein), maximal jedoch bis in 100 cm Tiefe aggregiert. Alle anderen Tiefenstufen-Messwerte wurden zusätzlich zur Bodenentwicklungstiefe für unterschiedliche Mineralbodentiefen und für die Humusaufgabe berechnet. Weitere Angaben zum Standort wie Stau- und Grundnässeinfluss oder das Vorkommen von Torfhorizonten stammen aus der WRB-Bodenklassifikation (IUSS WORKING GROUP WRB 2007). Moorstandorte (Histosole) wurden mithilfe dieser Angaben aus weiteren Analysen ausgeschlossen.

Tabelle 2: Bodenparameter aus drei Teildatensätzen (BS: BioSoil: Soil, BZE: Zweite Bundesweite Bodenzustandserhebung, NFI: Nationale Waldinventur Frankreich, ET: Bodenentwicklungstiefe)

Parameter	Berechnungstiefen (cm)	Einheit	Datensatz
Bodenentwicklungstiefe	Max. 100 cm	cm	BS, BZE, NFI
Moorstandort	Gesamtprofil	Ja/Nein	BS, BZE, NFI
Stauwassereinfluss	Gesamtprofil	Ja/Nein	BS, BZE, NFI
Grundwassereinfluss	Gesamtprofil	Ja/Nein	BS, BZE, NFI
Nutzbare Feldkapazität	0 - ET	mm	BS, BZE, NFI
Minimalwert der Luftkapazitäten der Bodenschichten	0 - ET	%	BS, BZE
Feinbodenvorrat der Humusaufgabe	Aufgabe	t/ha	BS, BZE
Kohlenstoffvorrat	Aufgabe, Mineralboden (0-10, 0-40, 0-ET)	t/ha	BS, BZE
Stickstoffvorrat	Aufgabe, Mineralboden (0-10, 0-40, 0-ET)	t/ha	BS, BZE
Phosphorvorrat	Aufgabe, Mineralboden (0-10, 0-40, 0-ET)	t/ha	BS, BZE
C:N-Verhältnis	Aufgabe, Mineralboden 0-10, 0 - 40	-	BS, BZE
C:P-Verhältnis	Aufgabe, Mineralboden 0-10, 0-20	-	BS, BZE
pH-Wert (CaCl ₂)	Aufgabe, Mineralboden, 0-10,0-40, 40-80	-	BS, BZE
Basensättigung	Aufgabe, Mineralboden 0-10, 0 – 40, 40-80, 0-ET	%	BS, BZE
Basensättigungs-Tiefenverlaufstyp (Kölling 1999)	Gesamtprofil	Typ1- Typ6	BS, BZE
Kationenaustauschkapazität	Aufgabe, Mineralboden 0-10, 0 – 40, 0-ET	molc/ha	BS, BZE
Austauschbar gebundener Kalziumvorrat	Aufgabe, Mineralboden 0-10, 0 – 40, 0-ET	kg/ha	BS, BZE
Austauschbar gebundener Magnesiumvorrat	Aufgabe, Mineralboden 0-10, 0 – 40, 0-ET	kg/ha	BS, BZE
Austauschbar gebundener Kaliumvorrat	Aufgabe, Mineralboden 0-10, 0 – 40, 0-ET	kg/ha	BS, BZE

Klimadaten wurden dem WorldClim-Datensatz entnommen (HUIJMAN et al. 2005). Die Daten liegen weltweit als Raster mit einer Auflösung von 30 Winkelsekunden (ca. 1x1 km) von Temperatur- und Niederschlagswerten über den Zeitraum 1950 bis 2000 gemittelt vor. Die Parameter werden in verschiedenen Aggregationen in Form von 19 sog. Bioclim-Variablen angeboten, von denen sechs Parameter getestet wurden (BIOCLIM 2016) (Tabelle 3). Einen Überblick über die Zusammensetzung des Gesamtdatensatzes aus Einzelbaum-, Boden-, und Klimadaten gibt Tabelle 4.

Tabelle 3: Getestete Parameter des Bioclim-Datensatzes (BIOCLIM 2016)

Parameterbezeichnung	Beschreibung
BioClim	
BIO1	Jahresmitteltemperatur [°C]
BIO5	Temperaturmaximum wärmster Monat [°C]
BIO6	Temperaturminimum kältester Monat [°C]
BIO10	Mitteltemperatur wärmstes Quartal [°C]
BIO12	Jahresniederschlagssumme [mm]
BIO18	Niederschlagssumme wärmstes Quartal [mm]

Tabelle 4: Übersicht über die Komponenten des Gesamtdatensatzes.

Teildatensatz	Einzelbaumdaten	Boden	Klima
Deutschland	BZE (HBI)	BZE (teilw. BioSoil)	WorldClim
Europa	BioSoil: Biodiversity	BioSoil: Soil	WorldClim
Frankreich	NFI	nur nFK aus NFI	WorldClim

Modelle

Als grundlegendes Höhen-Durchmessermodell wurde die nach LAPPI (1997) linearisierte Form der Korffunktion verwendet (Gleichung 1). Die Niveau- und Steigungsparameter der Kurve, A und B, sind biologisch interpretierbar. A bezeichnet den Erwartungswert der logarithmierten Höhe eines Baumes mit 30 cm BHD und B die erwartete Differenz der logarithmierten Höhen zwischen Bäumen mit 10 und 30 cm BHD. Der BHD geht dabei nach Gleichung 1.1 transformiert in das Modell ein. Die Parameter λ und C wurden in vorherigen Analysen iterativ über die Minimierung des AIC für das jeweilige Modell bestimmt.

$$\ln(h_{ki}) = A - Bx_{ki} + \epsilon_{ki} \quad (1)$$

mit:
$$x_{ki} = \frac{(BHD_{ki} + \lambda)^{-C} - (30 + \lambda)^{-C}}{(10 + \lambda)^{-C} - (30 + \lambda)^{-C}} \quad (1.1)$$

und:

- h_{ki} : Baumhöhe von Baum i an Stichprobenpunkt k
- BHD_{ki} : Durchmesser des Baumes i an Stichprobenpunkt k in 1,30 m Höhe
- A, B, λ, C : originäre Parameter des Höhen-Durchmessermodells
- ϵ_{ki} : Fehlerterm für Baum i an Stichprobenpunkt k

Aufgrund der heterogenen Datenbasis wird Gleichung 1 als zweistufiges Modell umgesetzt. Die originären Parameter A und B werden durch ein Generalisiertes Additives Modell mit Monotoniebedingungen (SCAM) mit Kovariablen für Klima und Boden beschrieben (Gleichung 2). Dabei wird die gesamte Datenbasis genutzt. In einer zweiten Modellstufe werden die standortsensitiven Schätzungen (Gleichungen 3.2 und 3.3) der originären Parameter A und B als Kovariablen verwendet (Gleichung 3.1). Dazu wird nur der BioSoil/BZE-Teil des Datensatzes verwendet, um die höherwertigen Bodenparameter (Tabelle 2) als Kovariablen testen zu können.

$$\ln(E[h_{ki}]) = p_{1a} - p_{1b}x_{ki} - p_{2b}x_{ki}d_{gk} + f_{11}(x_{11k}) + f_{12}(x_{12k}) + \dots + f_{1n}(x_{1nk}) \quad (2)$$

$h_{ki} \sim \text{Gamma}$

mit:

- $\ln(E[h_{ki}])$: Erwartungswert der logarithmierten Baumhöhe von Baum i an Stichprobenpunkt k
- p_{1a} : Interzept, Effekt auf das Niveau der H-D Beziehung (originärer Parameter A)
- p_{1b}, p_{2b} : Feste Koeffizienten zur Beschreibung linearer Effekte auf die Steigung der H-D Beziehung (originärer Parameter B)
- x_{ki} : entsprechend Gleichung 1.1 reparametrisierter BHD von Baum i an Stichprobenpunkt k
- d_{gk} : Durchmesser des Grundflächenmittelstamms an Stichprobenpunkt k
- $x_{11k} \dots x_{1nk}$: Kovariablen für Stichprobenpunkt k mit Effekten auf das Niveau (originärer Parameter A) der H-D Beziehung
- $f_{11}(x_{11k}) \dots f_{1n}(x_{1nk})$: penalisierte Regressionssplines zur Beschreibung des Niveaus der H-D Beziehung (originärer Parameter A)

$$\ln(E[h_{ki}]) = q_a A_k - q_b B_k x_{ki} + f_{21}(x_{21k}) + f_{22}(x_{22k}) + \dots + f_{2m}(x_{2mk}) + \alpha_k A_k - \beta_k B_k x_{ki} \quad (3.1)$$

$h_{ki} \sim \text{Gamma}$

$\alpha_k, \beta_k \sim N[0, D]$

wobei:

$$A_k = p_{1a} + f_{11}(x_{11k}) + f_{12}(x_{12k}) + \dots + f_{1n}(x_{1nk}) \quad (3.2)$$

$$B_k = p_{1b} + p_{2b} d_{gk} \quad (3.3)$$

mit:

$\ln(E[h_{ki}])$: Erwartungswert der logarithmierten Baumhöhe von Baum i an Stichprobenpunkt k

q_a, q_b : Feste Koeffizienten mit linearen Effekten auf die Vorschätzungen der originären Parameter A und B.

x_{ki} : entsprechend Gleichung 1.1 reparametrisierter BHD von Baum i an Stichprobenpunkt k

$x_{21k} \dots x_{2mk}$: Kovariablen mit eindimensionalen Effekten auf das Niveau (originärer Parameter A) der H-D Beziehung

$f_{21}(x_{21k}) \dots f_{2m}(x_{2mk})$: eindimensionale penalisierte Regressionssplines zur Beschreibung des Niveaus der H-D Beziehung (originärer Parameter A)

α_k : Zufallseffekt des originären Parameters A auf Ebene des Stichprobenpunktes

β_k : Zufallseffekt des originären Parameters B auf Ebene des Stichprobenpunktes

D : Varianz-Kovarianzmatrix der Zufallseffekte auf Ebene der Stichprobenpunkte

A_k : Vorschätzung des originären Parameters A an Stichprobenpunkt k

B_k : Vorschätzung des originären Parameters B an Stichprobenpunkt k

Die Kalibrierung der Höhenschätzung an BWI 3-Punkten erfolgt auf Basis von sog. Best Linear Unbiased Predictors (BLUPs, vergl. MEHTÄTALO (2004)). Die Vorschätzungen von A und B werden mit zwei weiteren linearen Koeffizienten korrigiert, die sich nach Gleichung 4.2 berechnen. Dadurch werden Niveau und Steigung der geschätzten Höhen-Durchmesser Beziehung an gemessene Höhen angepasst.

$$y = \mu + Zb + e \quad (4.1)$$

$$\hat{b} = (Z'R^{-1}Z + D^{-1})^{-1}Z'R^{-1}(y - \mu) \quad (4.2)$$

mit

y : log-transformierte gemessene Höhen

μ : Erwartungswert der log-transformierten Messhöhen (vergl. Gleichung 3)

Z, b : Modellmatrix und Vektor der Zufallseffekte

e : Fehlerterm

D, R : Varianz-Kovarianzmatritzen von Zufallseffekten und Residuen (vergl. Gleichung 3)

Bei der Auswahl der Klima- und Bodenparameter in den Gleichungen 2 und 3 wurden statistische Kenngrößen wie das Akaike Information Criterion (AIC) und das Bayesian Information Criterion (BIC) berücksichtigt sowie die Plausibilität der Verläufe der nichtlinearen Effekte visuell überprüft. Monotoniebedingungen wurden definiert, um biologisch plausible Verläufe insbesondere an den Datenrändern zu gewährleisten. So kann z.B. der häufig beobachtete negative Effekt von hohen d_g -Werten als Artefakt von einzelnen niedrigen, alten Bäumen auf armen Standorten entfernt werden. Es wurden Monotonie- und Konkavitätsbedingungen getestet, um sowohl asymptotische als auch parabolische Verläufe identifizieren zu können. Alle Analysen erfolgten in R mit den Paketen SCAM und MGCV (WOOD 2006; PYA 2016; R CORE TEAM 2016).

Ergebnisse

Bei der Anpassung des Generalisierten Additiven Modells nach Gleichung 2 für Eiche, Buche, Fichte und Kiefer ergaben sich signifikant nicht-lineare Effekte für den d_g . Stichprobenpunkte mit einem d_g von unter 10 oder über 60 cm wurden nach ersten Plausibilitätskontrollen aus weiteren Analysen ausgeschlossen, da hier meist unplausible Verläufe mit breiten Konfidenzintervallen, bedingt durch eine geringe Anzahl aufgenommener Bäume, beobachtet wurden. Alle Parameter des Bioclim-Teildatensatzes zeigten signifikant nicht-lineare Effekte. Die stärksten Signifikanzen zeigten dabei die jährlich und quartalsweise aggregierten Parameter, mit weitgehend plausiblen asymptotischen Verläufen. Unplausible Effektverläufe an den Datenrändern konnten durch Angabe von Monotoniebedingungen unterdrückt werden. Um in den geplanten Simulationen Veränderungen in der Vegetationsperiode abbilden zu können, wurden die Bioclim-Parameter Bio10 und Bio18 (Temperaturmittel und Niederschlagssumme für das wärmste Quartal) als Kovariablen verwendet. Der Niederschlagseffekt für die Eiche zeigte als Regressions-Spline einen deutlich nicht-linearen Verlauf, der Effekt der Temperatur war in diesem Fall jedoch nicht signifikant. Daher wurde der Niederschlagseffekt als segmentierter linearer Term beschrieben. Zusätzlich wurden der d_g für alle Baumarten und die nFK als Kovariablen für Buche, Fichte und Kiefer selektiert und ihrer Effekte auf Nicht-Linearität überprüft. Für alle Baumarten ergaben sich größtenteils Effekte mit asymptotischem Verlauf, wobei eine Sättigung für die Niederschlagseffekte bei Fichte und Kiefer nicht erreicht wird. Tabelle 5 zeigt die Spanne der zugrundeliegenden Datenbasis für alle Kovariablen mit nicht-linearen Effekten und den ungefähren Bereich der Sättigung. Der Sättigungsbereich wurde visuell als die Spanne der Kovariablen identifiziert, in der die Steigung ihres Effektes null erreicht. Außerdem ist die Amplitude des jeweiligen Effektes auf der Y-Achse auf logarithmischer Ebene angegeben, um die Stärke der Effekte vergleichbar zu machen. Der Effekt des d_g ist bei der Eiche mit 0,35 Einheiten am geringsten und bei der Kiefer mit 0,6 Einheiten am höchsten. Bei Buche und Fichte ist der Effekt mit 0,51 und 0,45 ähnlich stark. Bei der Kiefer tritt eine Sättigung zudem erst bei einem d_g von 40 – 50 cm im Vergleich zu 30 – 40 bei den anderen Baumarten cm ein. Bei der Temperatur zeigt sich für alle Baumarten eine Sättigung im Bereich von 16 – 17 °C, bei der Fichte etwas früher bei 15 – 16 °C. Die Amplitude ist bei der Buche mit ca. 0,63 Einheiten deutlich höher als bei den anderen Arten und übersteigt hier die Amplitude des d_g -Effektes. Die Kiefer liegt mit 0,44 Einheiten an zweiter Stelle. Für die Fichte ist die Amplitude des Effektes mit 0,38 Einheiten eher gering, bei der Eiche ist die Amplitude mit 0,32 Einheiten am niedrigsten. Allerdings ist auch der Datenbereich bei Kiefer und Buche am größten, bei der Eiche am geringsten. Beim Niederschlagseffekt ist für Eiche, Buche und Kiefer eine Sättigung zu beobachten, die bei der Eiche relativ früh bei 150 mm und bei Buche und Kiefer erst bei hohen Werten von 400 mm liegt. Die Amplitude des Modelleffektes ist bei der Kiefer mit 0,63 Einheiten am höchsten. Dabei ist der Datenbereich mit 97 – 454 mm etwas kleiner als bei Buche und Fichte, bei denen die Amplituden mit 0,4 und 0,45 Einheiten aber geringer sind. Bei der Eiche sind sowohl die Amplitude mit 0,21 Einheiten als auch der Datenbereich am kleinsten. Die Effekte der nFK zeigen eine Sättigung bei 150 mm für Fichte und Kiefer und bei 200 mm für die Buche. Die Amplitude ist bei der Kiefer mit 0,3 etwas höher als bei Buche und Fichte mit 0,19 und 0,10 Einheiten. Ein nFK-Effekt wurde für die Eiche in der ersten Modellstufe nicht berücksichtigt, da in diesem Fall die simultane Schätzung eines signifikanten Niederschlagseffektes nicht möglich war. Ein linearer Effekt in der zweiten Modellstufe zeigt eine mittlere Amplitude von 0,15 Einheiten. Die Datenbereiche bewegen sich bei allen Arten im Bereich zwischen 0 und 260 – 280 mm. Zur visuellen Plausibilitätskontrolle nicht-linearer Effekte wurden die zugehörigen Verläufe über dem jeweiligen Datenbereich der Kovariablen betrachtet (Beispiel für die Kiefer in Abbildung 1).

Tabelle 5: Amplitude der nichtlinearen Modell-Effekte der ersten Modellierungsstufe (Gleichung 2) in Abhängigkeit vom Datenbereich (Minimum – Maximum) der zugehörigen Kovariablen in der Parametrisierungsgrundlage für Fichte, Kiefer, Buche und Eiche. Zusätzlich ist bei asymptotischen Effektverläufen der ungefähre Sättigungspunkt angegeben, ab dem eine weitere Erhöhung der jeweiligen Kovariablen keinen oder nur einen marginalen Effekt auf die Höhengschätzung hat.

	d_g [cm]			Temperaturmittel wärmstes Quartal [°C]		
	Datenbereich	Sättigung	Amplitude Effekt [log]	Datenbereich	Sättigung	Amplitude Effekt [log]
Eiche	10 – 60	30 – 40	0,35	13,0 – 20,7	16 – 17	0,32
Buche	10 – 60	30	0,51	10,4 – 20,7	16 – 17	0,63
Fichte	10 – 60	30 – 40	0,45	10,0 – 19,8	15 – 16	0,38
Kiefer	10 – 60	40 – 50	0,6	10,6 – 21,2	16 – 17	0,44

	Niederschlagssumme wärmstes Quartal [mm]			nFK [mm]		
	Datenbereich	Sättigung	Amplitude Effekt [log]	Datenbereich	Sättigung	Amplitude Effekt [log]
Eiche	113 – 300	150 *	0,21	0 – 280 **	–	0,15 **
Buche	86 – 478	400	0,40	0 – 260	200	0,19
Fichte	140 – 523	–	0,45	0 – 280	150	0,10
Kiefer	97 – 454	–	0,63	0 – 277	150	0,30

* Der Effekt des Niederschlages wurde für die Eiche nicht über einen penalisierten Regressionspline beschrieben, sondern als linearer Effekt in zwei Segmenten. ** Die nFK geht bei der Eiche in der zweiten Modellstufe als linearer Effekt ein.

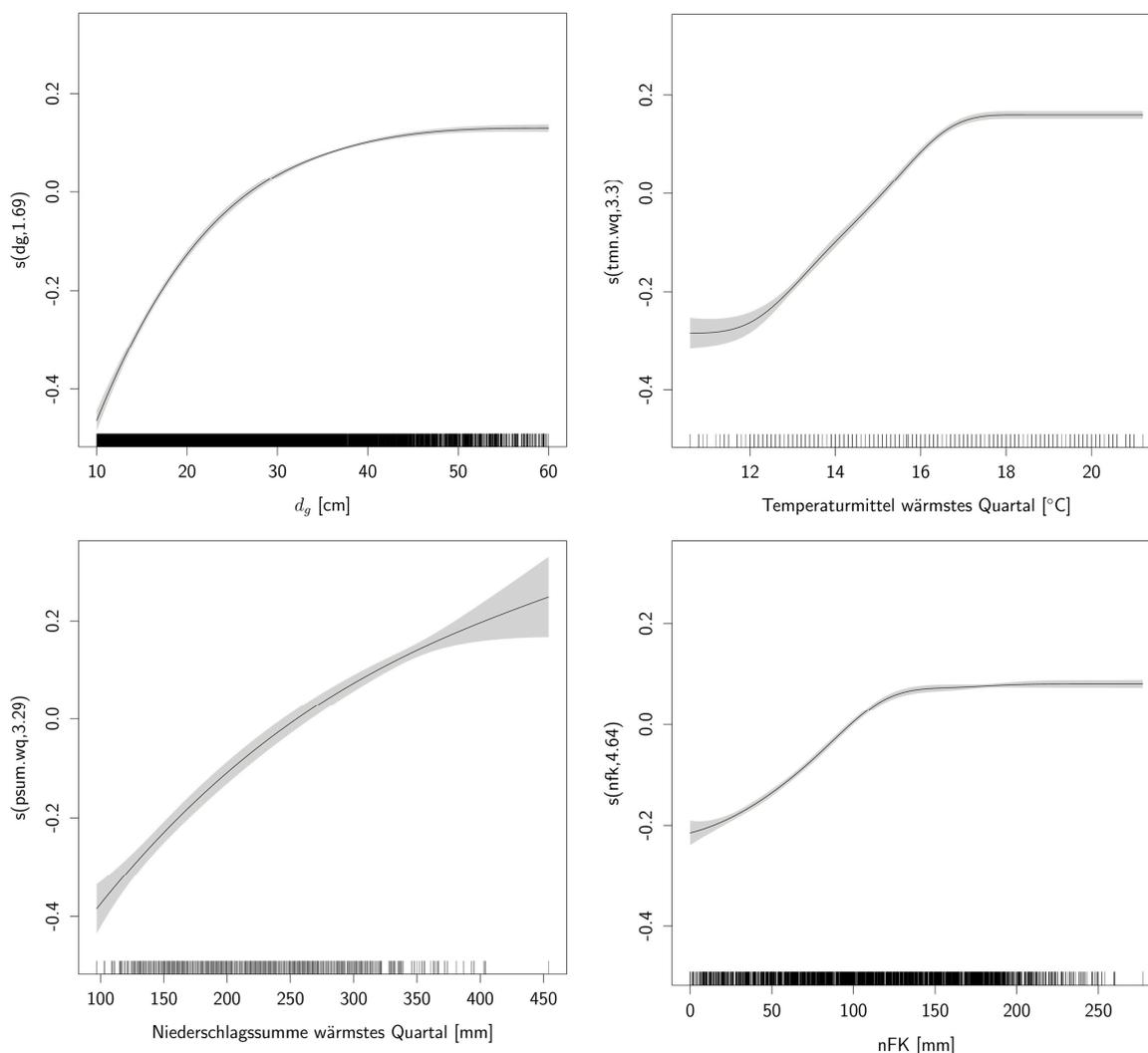


Abbildung 1: nicht-lineare Effekte des Modells der ersten Modellierungsstufe (Gleichung 2) für die Kiefer. Auf der X-Achse sind die Datenpunkte der jeweiligen Kovariablen als sogenannter „rugplot“ aufgetragen. Auf der Y-Achse ist die Wirkung auf die Höhengschätzung in logarithmischen Einheiten abgebildet. Im Ausdruck „s(x,edf)“ bezeichnet x den Namen des Parameters im Modellaufruf, edf bezeichnet die geschätzte Anzahl der Freiheitsgrade und gibt Aufschluss über die Nicht-Linearität des Effektes.

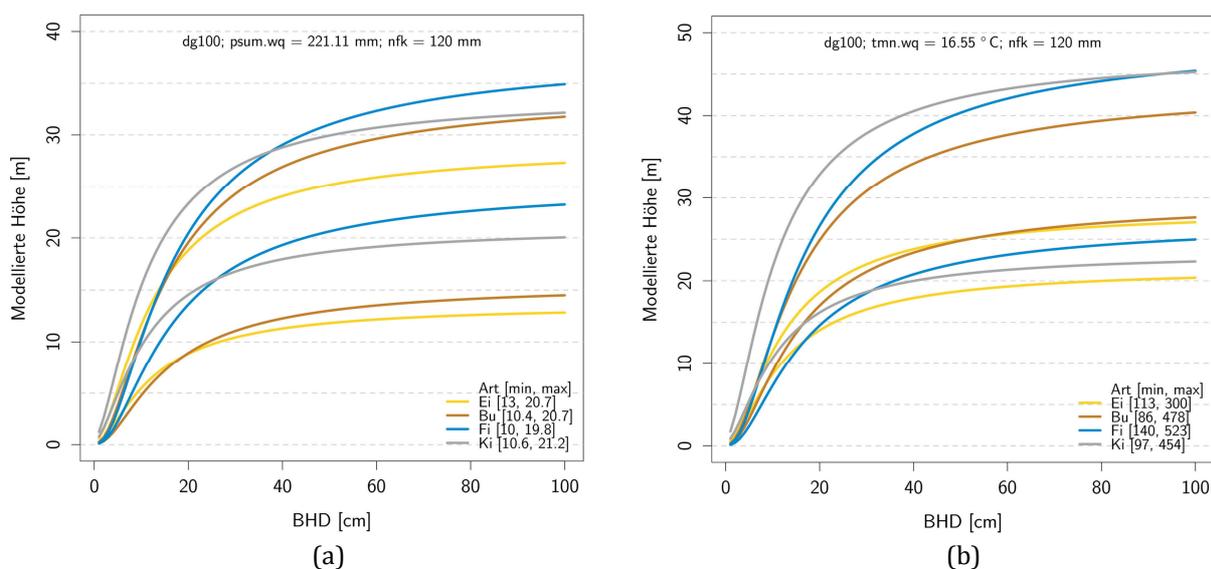


Abbildung 2: Höhen-Durchmesser-Kurven für Eiche, Buche, Fichte und Kiefer für Extremwerte von Temperatur und Niederschlag. Die übrigen Kovariablen gehen jeweils mit dem Mittelwert des Gesamtdatensatzes in die Schätzung ein. Abweichend wurde der d_g auf baumartenspezifische Werte für einen hundertjährigen Bestand gemäß der Ertragstafeln für mäßige Durchforstung der Ertragstafelsammlung nach SCHÖBER (1975) fixiert. Die Legende zeigt die Datenbereiche aus Tabelle 4.

Um die Temperatursensitivität der Modelle für alle vier Arten zu überprüfen, wurden Höhen-Durchmesserkurven für Extremwerte der Temperatur im wärmsten Quartal (9 und 22 °C) vorhergesagt (Abbildung 2a). Für den d_g wurde der Wert eines hundertjährigen Bestandes aus einer Ertragstafel für mäßige Durchforstung verwendet (Eiche 34 cm; Buche 33,6 cm; Fichte 37,6 cm; Kiefer 35,3 cm) (SCHÖBER 1975). Niederschlag und nFK wurden artunabhängig auf den Mittelwert des Gesamtdatensatzes gesetzt. Die Buche zeigt dabei die größte Höhendifferenz (17,3 m) bei einem BHD von 100 cm, mit geschätzten Höhen von 12,8 m bei 9 °C und 27,3 m bei 22 °C. An zweiter Stelle folgt die Eiche, mit einer Höhendifferenz von 14,5 m bei 100 cm BHD, 12,8 m bei 9 °C und 27,3 m bei 22 °C. Kiefer und Fichte weisen ähnliche Höhendifferenzen von 11,7 m und 12,1 m auf. Dabei erreicht die Fichte bei 9 °C eine Höhe von 23,2 m, die Kiefer erreicht 20,1 m. Bei 22 °C erreicht die Fichte 34,9 m, die Kiefer 32,2 m. Bei 9 °C liegt die Vorhersage für die Eiche mit einem Temperaturminimum von 13 °C am stärksten im Extrapolationsbereich, bei 22 °C die Fichte mit einem Maximum von 19,8 °C. Für die Niederschlagsensitivität wurden Extremwerte von 100 und 500 mm für das wärmste Quartal ausgewählt. Die Kiefer zeichnet am deutlichsten mit einer Höhendifferenz von 22,9 m bei einem BHD von 100 cm, mit einer Höhe von 22,3 m bei 100 mm Niederschlag und 45,3 m bei 500 mm Niederschlag. Darauf folgt die Fichte mit 20,44 m Höhenunterschied bei 100 cm BHD. Die Höhe bei 100 cm BHD beträgt dabei 25 m bei 100 mm und 45,4 m bei 500 mm. Bei geringerem BHD liegen die vorhergesagten Höhen der Kiefer über denen der Fichte, die Kurven laufen dabei mit steigendem BHD gegeneinander. Die Buche liegt mit einer Höhendifferenz von 12,8 m bei 100 cm BHD in der Mitte. Die vorhergesagten Höhen für 100 mm Niederschlag sind für diese Art bei hohem BHD mit 27,6 m bei 100 cm BHD am höchsten. Bei 500 mm Niederschlag liegen die Höhenvorhersagen für die Buche unter Kiefer und Fichte, mit einer Höhe von 40,4 m bei 100 cm BHD. Die Eiche reagiert mit einer Höhendifferenz von 6,7 m nur sehr schwach auf Niederschlagsunterschiede. Bei 100 mm Niederschlag weist sie mit 20,4 m die geringste Höhe bei 100 cm BHD auf. Die Kurve liegt bei BHD ab ca 20 cm unter den Vorhersagen der anderen Baumarten. Bei 500 mm Niederschlag liegt die Eiche mit 27,0 m noch unter der Höhenvorhersage für die Buche bei 100 mm Niederschlag. Bei 100 mm liegen die Vorhersagen für Eiche und Fichte im Extrapolationsbereich, wobei die Modelle für Mindestniederschläge von 140 und 113 mm angepasst wurden. Bei 500 mm liegt die Eiche mit einem Maximalniederschlag von 300 mm am stärksten im Extrapolationsbereich, Buche und Kiefer mit 478 und 454 mm nur schwach. Die Vorhersage für die Fichte liegt mit einem Maximalniederschlag von 523 noch im abgedeckten Datenbereich.

In der zweiten Modellstufe (Gleichung 3) konnte für alle Baumarten das Kohlenstoff-Phosphor-Verhältnis (C:P-Verhältnis) als signifikanter linear wirkender Parameter identifiziert werden. Da es jedoch an den Traktecken der BWI 3 nicht erhoben wird, wurde es nicht in das finale Modell übernom-

men. Bei der Eiche wurde die nFK in der zweiten Modellstufe als lineare wirkender Parameter hinzugefügt.

Abbildung 3 zeigt eine beispielhafte Kalibrierung nach Gleichung 4.2 für Höhenschätzungen an einem Punkt der BWI 3. Unplausibilitäten in der Kalibrierung für alle vier behandelten Baumarten ließen sich auf Fehler in der Schichtansprache bzw. den Höhenmessungen im BWI 3-Datensatz zurückführen. Liegen für eine Bestandesschicht einzelne stark abweichende Messhöhen vor, resultiert daraus eine hohe Abweichung von der kalibrierten Höhe.

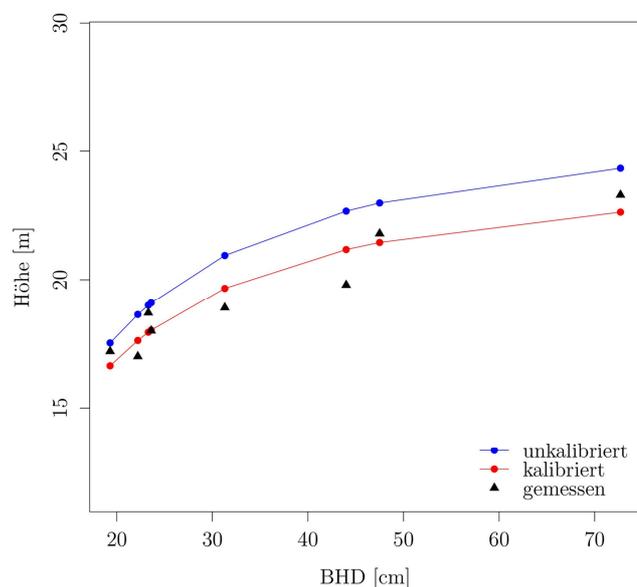


Abbildung 3: Kalibrierung von Höhenschätzungen für Eiche im Hauptbestand auf BWI Trakt Nr. 22167, Traktecke Nr. 3.

Diskussion

Ein wesentlicher Unterschied der vorgestellten Methode in Bezug auf LAPPI (1997) und MEHTÄTALO (2004) besteht in der Verwendung von einmalig aufgenommenen Inventurdaten mit einer hohen räumlichen Ausdehnung im Gegensatz zu zeitlich hoch aufgelösten Versuchsflächendaten. LAPPI (1997) leitet Alterstrends für die originären Parameter A und B aus Wiederholungsinventuren ab, was die Modellierung spezifischer H-D Kurven für Fläche und Aufnahmezeitpunkt erlaubt. Der vorliegende Datensatz enthält jedoch keine Wiederholungsmessungen. Außerdem fehlen ausreichend präzise Altersschätzungen für den BioSoil-Teildatensatz. Die additive GAM-Struktur ermöglicht jedoch die Beschreibung eines artspezifischen, nicht-linearen d_g -Effektes. Der d_g wurde bereits von MEHTÄTALO (2004) als Kovariable zur Beschreibung der Entwicklungsstufe des Bestandes verwendet. Zwar ist der d_g selber von Standortseigenschaften abhängig. Dennoch konnten bei der Modellselektion nach Gleichung 4 plausible Effekte für Temperatur, Niederschlag und nFK identifiziert werden. Die zukünftige Modellentwicklung sieht die Schätzung des d_g abhängig vom Bestandesalter und Kovariablen für Klima und Standort als Vorstufe der Höhenschätzung vor. Insbesondere bei der Temperatur zu erwartende parabolische Verläufe wurden allerdings nicht durch die Daten gestützt. Asymptotische Verläufe zeigten sich auch bei der Parametrisierung von Höhen-Durchmesser- und Bonitätsmodellen für Fichte in Niedersachsen bei ALBERT & SCHMIDT (2010) und PYA & SCHMIDT (2016) sowie bei der Identifizierung von Parameterräumen mit besonders hohen bzw. geringen Wuchsleistungen für Fichte durch BRANDL et al. (2014). Bei der Parametrisierung eines klimasensitiven Bonitätsmodells für Küstenkiefer auf Basis kanadischer und skandinavischer Versuchsflächen durch FRIES et al. (2000) zeigten sich ähnliche Verläufe für Temperatursummen über einem 5.6 °C-Schwellenwert und das Temperaturmittel im Juli. Für den schwellenwertbasierten Parameter zeigte sich hier ein leicht parabolischer Effektverlauf. Möglicherweise ist der Verlauf aber ein Artefakt der verwendeten Funktion (Polynom zweiten Grades). LOEHLE (2000) kommt zu dem Schluss, dass parabolische Temperatureffekte i.d.R. nicht durch Daten gestützt werden können. Ein negativer Einfluss erhöhter Temperaturen auf die Baumhöhe zeigt sich möglicherweise nur in Verbindung mit dem Wasserhaushalt in Form von Trockenstreißindikatoren. Diese lagen jedoch für den Gesamtdatensatz nicht vor. Der Effekt des aus Temperatur und Niederschlag berechneten Ariditätsindex nach

DE MARTONNE (1926) wurde in vorherigen Analysen getestet, zeigte jedoch auch nicht den erwarteten parabolischen Verlauf. Im Vergleich zwischen den Baumarten anhand von Tabelle 5 zeigt die Buche die höchste und die Eiche die geringste Klimasensitivität gemessen an der Amplitude der Temperatur- und Niederschlagseffekte. Die Höhen-Durchmesserkurven in Abbildung 2 zeigen jedoch eine höhere Sensitivität der Eiche im Vergleich zu Fichte und Kiefer, die auf einen stark abfallenden Effekt bei niedrigen Temperaturen und eine stärkere Extrapolation zurückzuführen ist. Dieses Ergebnis charakterisiert die Eiche grundsätzlich als wärmeliebende Baumart. In einer Analyse von Jahrringdaten durch FRIEDRICHS et al. (2009), in der Sommetrockenheit durch eine Hauptkomponentenanalyse als wichtigster Wachstumsparameter identifiziert wurde, reagierte die Buche ebenfalls am sensitivsten, die Traubeneiche am wenigsten sensitiv, jeweils im Vergleich zur Kiefer. In einer ähnlichen Studie von GARCÍA-SUÁREZ ET AL. (2009) zeigte die Buche ebenfalls die höchste Klimasensitivität. Die Niederschlagssensitivitäten der Modelle sind deutlich schwieriger zu interpretieren. Fichte und Kiefer reagieren hier deutlich stärker als die anderen Baumarten, während die Eiche nur sehr schwach zeichnet. Dies liegt an der fehlenden Asymptote bei Fichte und Kiefer einerseits und am fehlenden Effekt von höheren Niederschlägen bei der Eiche andererseits. Dabei sind unplausible Verläufe besonders im Extrapolationsbereich zu erwarten. Hier könnte eine Kappung der Effekte für Fichte und Kiefer in hohen Niederschlagsbereichen Abhilfe schaffen. Bei der Bewertung ist hervorzuheben, dass kein Effekt von Tages-, Monats- oder Jahresmitteln auf eine Wachstumsrate modelliert wird, sondern von einem Zeitraum von über 50 Jahre umfassenden gemittelten Werten auf die Höhe zu einem einzigen Inventurzeitpunkt. Eine dynamische Aggregation über das Baumalter könnte plausible Effekte ergeben, ist aber auf Basis des Worldclim-Datensatzes und der groben Altersschätzungen im BioSoil-Datensatz nicht möglich. Der Effekt der nFK ist relativ schwach ausgeprägt, zeigt jedoch plausible Funktionen mit einer Sättigung im Bereich von 150 bis 200 mm. Bei geringerer nFK kann mangelnde Bodenwasserverfügbarkeit zu einer Reduktion der Produktivität führen.

Die Auswahl von weiteren Bodenparametern ergab trotz der vermuteten hohen Datenqualität kein zufriedenstellendes Ergebnis. Die Kovariablen waren entweder nicht signifikant oder zeigten unplausible Effektverläufe. Es ist zu vermuten, dass sich Effekte der Nährstoffvorräte oder der Basensättigung bei der Modellelektion im Vergleich zu generellen klimatischen Trends nur auf einer feineren räumlichen Skala durchsetzen, die im 16x16 bzw. 8x8 km-Raster des BioSoil/BZE Teildatensatzes nicht gegeben ist. Studien, in denen quantitative oder qualitative Bodeneigenschaften wie z.B. Nährstoffverfügbarkeit Eingang in Standort-Leistungsmodelle fanden, basieren entweder auf einem Stichprobenraster mit einer Dichte von min. 4x4 km (ALBERT & SCHMIDT 2010; BRANDL ET AL. 2014; PYA & SCHMIDT 2016), oder Probeflächen wurden aktiv im Hinblick auf Standortsunterschiede ausgewählt (FRIES ET AL. 2000; PAULO ET AL. 2014).

Zukünftig wird eine Validierung der Modellkalibrierung anhand von Versuchsflächendaten angestrebt. Dabei ist zum einen die Sensitivität der Kalibrierung für die Anzahl der verwendeten Höhenmessungen von Interesse. Zum anderen soll die anzunehmende Erhöhung des Vorhersagefehlers bei der Fortschreibung im Verhältnis zum Kalibrierungszeitpunkt überprüft werden.

Danksagung

Das Projekt WP-KS-KW wird im Rahmen des Waldklimafonds (FKZ 28WC400303) durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) und das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördert. Die Erhebung der BZE-Daten wurde von den Forstlichen Versuchsanstalten der Länder durchgeführt und finanziert. Die HBI-Daten wurden vom Thünen-Institut für Waldökosysteme erhoben und finanziert. Wir danken Nicole Wellbrock (Thünen-Institut für Waldökosysteme) für die Bereitstellung der Daten. Die BioSoil-Daten wurden im Rahmen des BioSoil-Projekts unter der ForestFocus-Regulation EC No. 2152/2003 erhoben und kofinanziert. Wir danken Nathalie Cools, Bruno de Vos (Forest Soil Coordinating Centre of ICP Forests, Research Institute for Nature and Forest (INBO), Geraardsbergen, Belgien), Roberto Canullo (International School of Advanced Studies, Universität Camerino, Italien) und Till Kirchner (Thünen-Institut für Waldökosysteme) für die Bereitstellung der Daten. Unser Dank für die Bereitstellung der Daten der französischen nationalen Waldinventur gilt dem Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), Saint-Mandé Cedex, Frankreich.

Literatur

- ALBERT, M., HANSEN, J., NAGEL, J., SCHMIDT, M., & SPELLMANN, H.: Assessing risks and uncertainties in forest dynamics under different management scenarios and climate change. *Forest Ecosystems* 2 (1): 1–21, 2015
- ALBERT, M. & SCHMIDT, M.: Climate-sensitive modelling of site-productivity relationships for Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and common beech (*Fagus sylvatica* L.). *Forest Ecology and Management* 259 (4): 739–749, 2010
- AD-HOC AG BODEN: Bodenkundliche Kartieranleitung. KA5. Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart, Germany, 2006
- BASTRUP-BIRK, A., NEVILLE, P., CHIRICI, G., & HOUSTON, T.: The BioSoil Forest Biodiversity Field Manual., 2007
- BIOCLIM: Bioclim | WorldClim - Global Climate Data., 2016 URL: <http://www.worldclim.org/bioclim>
- BRANDL, S., FALK, W., KLEMMT, H.-J., STRICKER, G., BENDER, A., RÖTZER, T. & PRETZSCH, H.: Possibilities and limitations of spatially explicit site index modelling for spruce based on national forest inventory data and digital maps of soil and climate in Bavaria (SE Germany). *Forests* 5 (11): 2626–2646, 2014
- DE MARTONNE, E.: Une nouvelle fonction climatologique: l'indice d'aridité. *La Meteorologie* 21: 449–458, 1926
- DE VOS, B. & COOLS, N.: Second European Forest Soil Condition Report. Volume I: Results of the BioSoil Soil Survey. Research Institute for Nature and Forest, Brussel, 2011
- FRIEDRICH, D. A., TROUET, V., BÜNTGEN, U., FRANK, D. C., ESPER, J., NEUWIRTH, B. & LÖFFLER, J.: Species-specific climate sensitivity of tree growth in Central-West Germany. *Trees* 23 (4): 729–739, 2009
- FRIES, A., LINDGREN, D., YING, C. C., RUOTSALAINEN, S., LINDGREN, K., ET AL.: The effect of temperature on site index in western Canada and Scandinavia estimated from IUFRO *Pinus contorta* provenance experiments. *Canadian journal of forest research* 30 (6): 921–929, 2000
- GARCÍA-SUÁREZ, A., BUTLER, C., & BAILLIE, M.: Climate signal in tree-ring chronologies in a temperate climate: a multi-species approach. *Dendrochronologia* 27 (3): 183–198, 2009
- HIJMANS, R. J., CAMERON, S. E., PARRA, J. L., JONES, P. G., & JARVIS, A.: Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology* 25 (15): 1965–1978, 2005
- HILBRIG, L., WELLBROCK, N., BIELEFELDT, J., HILBRIG, L., WELLBROCK, N. & BIELEFELDT, J.: Harmonisierte Bestandesinventur: Zweite Bundesweite Bodenzustandserhebung BZE II. Methode., 2014 URL: <http://EconPapers.repec.org/RePEc:zbw:jhtiwp:26>
- IUSS WORKING GROUP WRB: World Reference Base for Soil Resources., 2007
- KÖLLING, C.: Ordination von Waldökosystemen nach Stoffkonzentrationen der Lösungsphase und bodenchemischen Tiefengradienten. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 162 (1): 89–95, 1999
- LAPPI, J.: A Longitudinal Analysis of Height/Diameter Curves. *Forest Science* 43 (4): 555–570, 1997
- LOEHLE, C.: Forest ecotone response to climate change: sensitivity to temperature response functional forms. *Canadian journal of forest research* 30 (10): 1632–1645, 2000
- MEHTÄTALO, L.: A longitudinal height–diameter model for Norway spruce in Finland. *Canadian Journal of Forest Research* 34 (1): 131–140, 2004
- METTE, T. & KÖLLING, C.: Wald, Wachstum, Umwelt. Großes Gemeinschaftsprojekt WP-KS-KW verschneidet die Bundeswaldinventur mit Boden- und Umweltdaten. *LWF aktuell* 107: 46–49, 2015
- PAULO, J. A., PALMA, J. H. N., GOMES, A. A., FAIAS, S. P., TOMÉ, J. & TOMÉ, M.: Predicting site index from climate and soil variables for cork oak (*Quercus suber* L.) stands in Portugal. *New Forests* 46 (2): 293–307, 2014
- PYA, N.: *scam: Shape Constrained Additive Models*. 2016
- PYA, N. & SCHMIDT, M.: Incorporating shape constraints in generalized additive modelling of the height-diameter relationship for Norway spruce. *Forest Ecosystems* 3 (1): 1–14, 2016
- R CORE TEAM: *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2016
- SPELLMANN, H., ALBERT, M., SCHMIDT, M., SUTMÖLLER, J., & OVERBECK, M.: Waldbauliche Anpassungsstrategien für veränderte Klimaverhältnisse. *AFZ-Der Wald* 11 (2011): 19–23, 2011
- SCHÖBER, R.: *Ertragstabellen wichtiger Baumarten*. J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a. M., 1975
- VIDAL, C., BÉLOUARD, T., HERVÉ, J.-C., ROBERT, N., & WOLSACK, J.: A New Flexible Forest Inventory in France. Seventh Annual Forest Inventory and Analysis Symposium, 2005
- WESSOLEK, G., KAUPENJOHANN, MARTIN, & RENGGER, M.: *Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis*. Rote Reihe. Institut für Ökologie, Fachgebiet Bodenkunde, Standortkunde und Bodenschutz, Berlin, 2009
- WOOD, S. N.: *Generalized Additive Models: An Introduction with R*. Chapman and Hall/CRC, 2006