Modellierung des Standort-Leistungsbezuges von Buche und Fichte auf Basis regionalisierter Klima-, Standorts- und Wasserhaushaltsdaten sowie Bestockungsdaten der Bundeswaldinventur

Levent Burggraef, Paul Schmidt-Walter, Matthias Schmid
NW-FVA Göttingen

Zusammenfassung

Bei der Beschreibung der Standortleistung über die Oberhöhenbonität werden gleichbleibende Standortbedingungen über die Bestandesentwicklung angenommen. Durch den Klimawandel bedingte Veränderungen der Standortbedingungen erfordern eine klimasensitive Schätzung der Standortleistung. Daten aus großräumigen Inventuren bieten dabei den Vorteil eines hohen Stichprobenumfangs mit großen Umweltgradienten. Im Rahmen des Projektes Waldproduktivität-Kohlenstoffspeicherung-Klimawandel (WP-KS-KW) wurden die an den Traktecken der Bundeswaldinventur erhobenen Bestockungsinformationen um Klima- und Bodenparameter erweitert und zudem Wasserhaushalts- und Trockenstressparameter abgeleitet. Basierend auf diesem Umweltvektor, werden Alters-Höhenmodelle für Buche und Fichte entwickelt. Dabei wird eine aus den Einzelbaumdaten der BWI-Traktecken modellierte Weise'sche Oberhöhe als Zielgröße verwendet. Zusätzlich zum Bestandesalter werden dynamisch über das Bestandesalter aggregierte Klima-, Boden- und Wasserhaushaltsparameter als Kovariablen selektiert. Dabei ergeben sich plausible und signifikante Effekte für die mittlere Temperatur der Monate Mai bis Juli sowie für die über die Vegetationsperiode aggregierte Menge des pflanzenverfügbaren Bodenwassers.

Abstract

The description of site productivity based on site index rely on the assumption of constant site conditions. Climate change demands climate sensitive estimates of site productivity. Data from extensive forest inventories comes with the advantage of high sample sizes and large environmental gradients. Within the scope of the project Waldproduktivität-Kohlenstoffspeicherung-Klimawandel (site productivity-carbon sequestration-climate change, WP-KS-KW), tree records on the plots of the German national forest inventory (NFI) were supplemented by climate and soil parameters with additionally derived hydrological parameters. Based on this data set, height-age models are fitted for beech and spruce. Weise's dominant height, modeled from the tree records provided by the NFI, is used as response variable. In addition to dominant age, parameters for climate, soil and hydrology are aggregated dynamically over dominant age and selected as covariables. Plausible and significant effects are identified for mean temperature for the months May to July and for the amount of plant-available soil water aggregated for the vegetation period.

Einleitung

Die Beziehung zwischen Alter und Oberhöhe in einem Bestand gilt als unabhängig von bewirtschaftungsbedingten Unterschieden in der Bestandesdichte. Die Höhenbonität als Abbildung der Alters-Höhenbeziehung zu einem bestimmten Bezugsalter (i. d. R. 100 Jahre) wird heute noch zur Einschätzung des Standort-Leistungsbezuges genutzt. Dabei ist die relative Höhenbonität in Form von Ertragsklassen ein zentraler Bestandteil klassischer Ertragstafeln, während die absolute Höhenbonität (engl. *site index*) häufig in internationalen ertragskundlichen Studien Verwendung findet. Bei der Beschreibung der Standortleistung mit Bonitätsfächern wird angenommen, dass die Standortbedingungen und damit das Wuchspotenzial des Bestandes über seine Entwicklungszeit gleich bleiben (SKOVSGAARD & VANCLAY 2013). Jedoch werden in den letzten Jahrzehnten Zuwächse beobachtet, die deutlich über dem in Ertragstafeln tabellierten Niveau liegen (SPIECKER ET AL. 2012; PRETZSCH ET AL. 2014), weshalb Möglich-

keiten der Rekalibrierung entwickelt wurden (PRETZSCH 2016; STAUPENDAHL & SCHMIDT 2016). Die Annahme der Standortkonstanz wird nicht zuletzt aufgrund steigender Stickstoffeinträge sowie der für Deutschland und Europa erwarteten Klimaveränderungen in Frage gestellt, wobei sowohl höhere Temperaturen als auch veränderte Niederschlagsmuster mit höheren Winterniederschlägen erwartet werden (SPELLMANN ET AL. 2011; JACOB ET AL. 2012).

Im Rahmen des Projektes WP-KS-KW wurde ein Umweltvektor für die Traktecken der dritten Bundeswaldinventur (BWI 3) bereitgestellt, der Klima- und Bodenparameter umfasst (METTE & KÖLLING 2015). Klimaparameter wurden aus Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in Verbindung mit Oberflächenmodellen regionalisiert (KAWOHL ET AL. 2017). Physikalische und chemische Bodenparameter wurden auf zwei verschiedenen Wegen gewonnen: zum Einen durch Regionalisierung von Bodenparametern aus der bundesweiten Bodenzustandserhebung (BZE), zum Anderen aus der Erstellung harmonisierter Leitprofile der landesspezifischen Standortskartierungen. Letztere wurden zusammen mit den Klimadaten genutzt, um Wasserhaushalts- und Trockenstressparameter mithilfe des Wasserhaushaltsmodells LWF-Brook90 (HAMMEL & KENNEL 2001) für die BWI-Traktecken abzuleiten (SCHMIDT-WALTER ET AL. 2017).

Auf Basis dieses Datensatzes soll, in Verbindung mit den Bestockungsdaten der BW I3, die Alters-Höhenbeziehung für Buche und Fichte klimasensitiv geschätzt werden. Die Einzelbaumdaten aus der Winkelzählprobe der Bundeswaldinventur enthalten allerdings keine Messung der Oberhöhe. Vielmehr wird die Höhe eines einzelnen Baumes pro Artengruppe und Bestandesschicht gemessen. Der Baum wird vom Aufnahmeteam nach praktischen Gesichtspunkten (z. B. Lage, Einsehbarkeit) ausgewählt. Die Messung repräsentiert daher höchstens zufällig die Ober- oder Mittelhöhe des Bestandes, was eine direkte Bonitierung verunmöglicht. Da die Anzahl gemessener Höhen nicht zur direkten Berechnung einer Oberhöhe ausreicht, kann die Weise'sche Oberhöhe verwendet werden. Sie ist als Höhe des Mittelstamms der 20 % stärksten Bäume eines Bestandes gegeben (Weise'scher Mittelstamm). Zur Modellierung der Höhen-Durchmesserbeziehung wird auf die nach LAPPI (1997) linearisierte Form der Korf-Funktion zurückgegriffen. Diese wird ebenfalls für die Beschreibung der Alters-Höhenbeziehung verwendet. Die Studie umfasst folgende Ziele:

1. Anpassung einer Alters-Höhenfunktion für Buche und Fichte auf Basis der linearisierten Form der Korf-Funktion,
2. Auswahl von Kovariablen aus einem vorläufigen Satz von Klima-, Boden- und Wasserhaushaltsparametern,
3. hypothesenbasierte Selektion von mindestens jeweils einem Parameter jeder wachstumsbestimmenden Parametergruppe (Klima, Bodenchemie, Bodenwasserhaushalt) zur klimasensitiven Vorhersage der Weise'schen Oberhöhe.

Material und Methoden

Die bereitgestellten Klimaparameter umfassen Retrodiktionen für den Zeitraum von 1961 bis 2013. Ein vorläufiger Datensatz aus den drei Parametergruppen Klima, Boden und Wasserhaushalt wird zur Modellselektion verwendet (Tabelle 1).

Tabelle 1: Zur Modellselektion verwendete Klima, Wasserhaushalts und Bodenparameter.

Kürzel	Parameter	Einheit	Datensatz
taym	Jahresmitteltemperatur	° C	Klima
rrys	Jahresniederschlagssumme	mm	Klima
taysm	Mitteltemperatur Mai–Juli	° C	Klima
rryss	Niederschlagssumme Mai–Juli	mm	Klima
awat.0100	mittlere pflanzenverfügbare Bodenwassermenge während der Vegetationszeit in 0–100 cm Bodentiefe	mm	Wasserhaushalt
evap	Evapotranspirationssumme während der Vegetationszeit	mm	Wasserhaushalt
defsum.psiwe.lower1200	Summe des Matrixpotenzials im Wurzelraum kleiner -1200 hPa während der Vegetationszeit	hPa	Wasserhaushalt
defsum.relawatwe.lower40	Defizitsumme des relativen pflanzenverfügbaren Wassergehalts im Wurzelraum unterhalb 40 % während der Vegetationszeit	-	Wasserhaushalt
cn.0.30	C/N-Verhältnis (0–30 cm Bodentiefe)	-	Boden
bs.0.30	Basensättigung (0–30 cm Bodentiefe)	%	Boden
bs.30.60	Basensättigung (30–60 cm Bodentiefe)	%	Boden

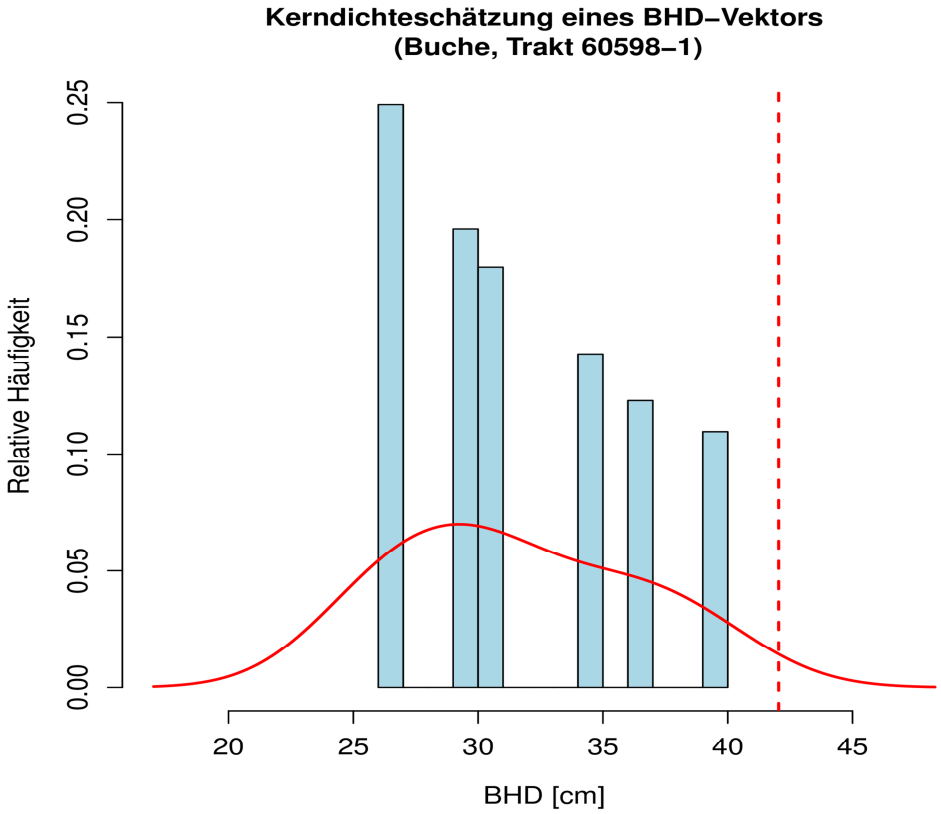

Abbildung 1: BHD-Verteilung mit Kerndichteschätzung für Buche am BWI-Trakt 60598, Ecke 1. Die rot gestrichelte Linie bezeichnet das 80 %-Quantil.

Zur Berechnung der Weise'schen Oberhöhe aus Einzelbaumdaten ist theoretisch eine Vollaufnahme aller Durchmesser eines Bestandes notwendig. Zur Schätzung der jeweiligen plot-spezifischen Durchmesserverteilungen aus der Winkelzählprobe wird ein Durchmesservektor aus den vorhandenen BHD-

Messungen durch Multiplikation mit dem jeweiligen Gewichtungsfaktor des Baums generiert. Der Gewichtungsfaktor steht in einem funktionalen Zusammenhang zum Radius des ideellen Probekreises des Baumes, der seinerseits vom Durchmesser abhängig ist. Der sich ergebende Durchmesservektor weist durch die Aufnahme mit einem Öffnungswinkel von 4 bei der Winkelzählprobe erhebliche Lücken auf (Abbildung 1). Daher wird durch eine Kerndichteschätzung mit einer Bandbreite von 3 eine kontinuierliche Durchmesserverteilung generiert. Von dieser Verteilung werden die Werte oberhalb des 80 %-Quantils ausgewählt und zur Berechnung des Weise'schen Mittelstamms verwendet (KRAMER & AKÇA 2008). Die Höhe des Weise'schen Mittelstamms wird schließlich mittels eines gemischten Höhen-Durchmessermodells modelliert. Dabei wird die linearisierte Form der Korf-Funktion nach Lappi verwendet (Gleichung 1.1), wobei die logarithmierte Baumhöhe abhängig von einem transformierten BHD (Gleichung 1.2) geschätzt wird (BURGGRAEF ET AL. 2016).

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

$$N \sim (0, \sigma)$$

mit $$x_{ki} = \frac{(BHD_{ki}+\lambda)^{-c}-(30+\lambda)^{-c}}{(10+\lambda)^{-c}+(30+\lambda)^{-c}} \qquad (1.1)$$

und:

$\ln(h_{ki})$: logarithmierte Baumhöhe für Baum *i* im Bestand *k*

BHD_{ki} : Brusthöhendurchmesser des Baums *i* für den Bestand *k*

A : Erwartungswert für die logarithmische Höhe eines Baumes mit 30 cm BHD (Niveau der Höhen-Durchmesserkurve)

B : Erwartete Differenz in der logarithmischen Höhe zwischen Bäumen mit 30 cm und 10 cm BHD (Steigungsparameter)

λ, C : Konstanten der Durchmessertransformation

ϵ_{ki} : Fehlerterm für Baum *i* an Stichprobenpunkt *k*

Das Ausgangsmodell nach Gleichung 1 wird in R als Generalisiertes Additives Gemischtes Modell (GAMM) implementiert. Dabei werden Zufallseffekte auf das Niveau der Kurve auf Ebene der Traktecken einbezogen (Gleichung 2). Zusätzliche Zufallseffekte auf das Niveau der Kurve zeigten keine Signifikanz.

$$\begin{aligned} \ln(E[h_{ki}]) &= p_a - p_b x_{ki} + \alpha_k \\ h_{ki} &\sim Gamma \\ a_k &\sim N[0, D] \end{aligned} \qquad (2)$$

mit:

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

p_a, p_b : Koeffizienten zur Beschreibung linearer fester Effekte auf Niveau (originärer Parameter *A*) und Steigung (originärer Parameter *B*) der H-D-Beziehung

α_k : Zufallseffekt des originären Parameters A auf Ebene der Traktecke

Gleichung 1 wird zur altersabhängigen Modellierung der Weise'schen Oberhöhe angepasst. Dazu wird anstelle des transformierten BHD ein transformiertes Bestandesalter bzw. dominantes Alter in Form des mittleren Alters der 20 % stärksten Bäume eingesetzt. Entsprechend des Durchmesservektors wird dazu ein Altersvektor generiert. Die Konstanten aus Gleichung 1.1 werden auf 50 und 100 gesetzt, so-

dass *A* die erwartete logarithmierte Oberhöhe eines Bestandes im Alter 100 repräsentiert und *B* die erwartete Höhendifferenz zwischen Beständen im Alter 50 und 100. Die Parameter λ und *C* werden iterativ durch Minimierung des AIC bestimmt (Gleichungen 3.1 und 3.2).

$$\begin{aligned} \ln(h_{ki}) &= A - Bz_{ki} + \epsilon_{ki} \\ N &\sim [0, \sigma] \end{aligned} \tag{3}$$

$$\text{mit} \quad z_k = \frac{(T_k + \lambda)^{(-c)} - (100 + \lambda)^{(-c)}}{(100 + \lambda)^{(-c)} - (50 + \lambda)^{(-c)}} \tag{3.1}$$

und:

$\ln(h_k)$: logarithmierte Weise'sche Oberhöhe für den Bestand *k*

T_k : dominantes Alter als mittleres Alter der 20 % stärksten Bäume des Bestandes *k*

A : Erwartungswert für die logarithmische Weise'sche Oberhöhe eines Bestandes im Alter 100 (Niveau der Alters-Höhenkurve)

B : Erwartete Differenz in der logarithmischen Weise'schen Oberhöhe zwischen Beständen im Alter 100 und 50 (Steigungsparameter)

λ, C : originäre Parameter für die Alterstransformation entsprechend Gleichungen 1 und 1.1

ϵ_k : Fehlerterm für den Bestand *k*

Das Alters-Höhenmodell nach Gleichung 3.1 wird in R als Generalisiertes Additives Gemischtes Modell (GAM) implementiert (Gleichung 4). Die Erweiterung zum Shape Constraint Additive Model (SCAM) erlaubt dabei die Definition von Monotoniebedingungen, um plausible Verläufe nicht linearer Effekte insbesondere an den Datenrändern zu gewährleisten (PYA & WOOD 2015; PYA 2016; R CORE TEAM 2017).

$$\begin{aligned} \ln(E[h_k]) &= p_a + p_b z_k + f(x_{1k}) + f(x_{2k}) + \ldots f(x_{nk}) \\ h_k &\sim Gamma \\ a_k &\sim N[0, D] \end{aligned} \tag{4}$$

mit:

$\ln(E[h_k])$: Erwartungswert der logarithmierten Oberhöhe des Bestandes *k*

p_a, p_b : Koeffiziente zur Beschreibung linearer fester Effekte auf Niveau (originärer Parameter A) und Steigung (originärer Parameter B) der Alters- Höhenbeziehung

$f(x_{1k}) + \ldots f(x_{nk})$: penalisierte Regressionssplines zur Beschreibung des Niveaus der Alters-Höhenbeziehung (originärer Parameter A), ggf. mit Definition von Monotoniebedingung

Die gesamte Datengrundlage umfasst 1689 Bestände für die Buche und 3269 Bestände für die Fichte. Die Parameterselektion erfolgt in der Kombination klassischer statistischer Kenngrößen (AIC, Bestimmtheitsmaß) sowie durch visuelle Überprüfung der Plausibilität der Kovariableneffekte. Es soll möglichst ein Parameter pro Gruppe (Klima, Boden, Bodenwasserhaushalt) im finalen Modell berücksichtigt werden. Außerdem werden dynamische Parameter für Klima und Bodenwasserhaushalt bevorzugt, weil für diese bei einer Projektion auf der Basis von Klimaszenarien Veränderungen zu erwarten sind. Für statische Parameter des Bodendatensatzes würde ein gleichbleibender Effekt über den Projektionszeitraum unterstellt. Für eine Vorauswahl wird jeweils ein Modell getestet, das außer dem Alter nur den jeweiligen Effekt als penalisierten Regressionsspline enthält, um eine erste Einschätzung zu Verlauf und Plausibilität des Effektes zu erhalten. Anschließend werden schrittweise Parameter hinzugefügt und auf Signifikanz und Plausibilität überprüft, um ein finales Modell zu erhalten.

Ergebnisse

In der Vorselektion mittels der Alter und jeweils eine Kovariable enthaltenden Modelle zeigen alle getesteten Klima-, Boden- und Wasserhaushaltsparameter einen signifikanten Effekt auf die logarithmische Alters-Höhenbeziehung zu einem Signifikanzniveau von 5 %. Die Bestimmtheitsmaße liegen bei der Buche für alle Parameterkombinationen (mit zwei Kovariablen und mehr) um 60 %, bei der Fichte um 67 %. Dabei zeigen sich allerdings starke Unterschiede in der Plausibilität der daraus resultierenden Effekte. Temperaturmittelwerte für das gesamte Jahr sowie die Monate Mai bis Juli zeigen jeweils plausible Verläufe, wobei sich bei der Buche eine Optimumsbeziehung, bei der Fichte ein Sättigungseffekt abzeichnet. Der Effekt zwischen Niederschlag und logarithmierter Baumhöhe ist für beide Arten auch in Verbindung mit dem Temperaturmittelwert negativ und daher unplausibel. Das pflanzenverfügbare Wasser zeigt in beiden Fällen eine plausible positive Beziehung zur Baumhöhe und ist durch einen Sättigungseffekt charakterisiert. Eine eindeutige Beziehung zur Evapotranspiration lässt sich durch den unregelmäßigen Verlauf bei der Buche nicht festmachen, bei der Fichte ist durch den positiven Effekt ebenfalls keine plausible Beziehung zu identifizieren. Der Effekt der kumulierten Unterschreitung von Matrixpotenzialen kleiner -1200 hPa im Wurzelraum (defsum.psiwe.lower1200) ist ebenfalls weder für Buche noch Fichte plausibel. Der Parameter defsum.relawat.lower40, der die Summe der Unterschreitung von relativen pflanzenverfügbaren Wassergehalten unter 40 % (GRANIER ET AL. 1999) angibt, zeigt für die Fichte einen weitestgehend plausiblen negativen Effekt, mit einem unplausiblen lokalen Maximum bei einem Wert von 20. Bei der Buche fällt die Beziehung zur Höhe positiv aus und ist daher nicht plausibel. Für die bodenchemischen Parameter C/N-Verhältnis und Basensättigung für 0 cm bis 30 cm und 30 cm bis 60 cm Bodentiefe zeigen sich keine plausiblen Effekte. Lediglich das C/N-Verhältnis zeigt für die Buche einen plausiblen Verlauf. Die Basensättigung zeigt für beide Arten und Tiefenstufen einen unplausiblen konkaven Verlauf mit einem Optimum bei ca. 40 % und danach starkem Abfallen bis 100 %. Die Effekte für den jährlichen Temperaturmittelwert sind plausibel, es soll aber im Hinblick auf spätere Vorhersagen bevorzugt die Temperatur innerhalb der Vegetationsperiode betrachtet werden. Diese wird im Prozessmodell Brook90 bereits dynamisch aggregiert. Für den Temperaturmittelwert wird hier die Temperatur von Mai bis Juli als Annäherung an die Vegetationsperiode verwendet. Da kein plausibler Niederschlagseffekt identifizierbar ist, wird die mittlere pflanzenverfügbare Wassermenge in 0 cm bis 100 cm Bodentiefe (awat.0100) für beide Arten übernommen. Sie berechnet sich als Funktion von Niederschlag, nutzbarer Feldkapazität und Evapotranspiration. Im Fichtenmodell wird der Effekt unter Einbeziehung der Temperatur linear, im Buchenmodell ist ein Sättigungseffekt erkennbar, der durch Definition einer Monotoniebedingung geglättet wird. Weitere in der Vorselektion plausible Parameter wie das Wasserdefizit bei der Fichte oder das C/N-Verhältnis bei der Buche zeigen in Verbindung mit Temperatur und Feldkapazität keine Signifikanz. Der Temperatureffekt geht für beide Arten in linearer Form und zusätzlich als nicht linearer Effekt auf den Steigungsparameter B der Alters-Höhenkurve ein (Tabelle 2). Dabei sind alle Kovariablen sowohl mit linearen als auch nicht linearen Effekten mit p-Werten unter 0.001 hoch signifikant. Weitere Klima-, Boden- oder Wasserhaushaltsparameter gehen aufgrund mangelnder Signifikanz oder unplausibler Effektverläufe nicht in die finalen Modelle ein.

Einen intuitiven Ansatz zur Bewertung der Kovariableneffekte bietet die Amplitude der vorhergesagten Werte. Sie gibt Auskunft über die Verschiebung der logarithmischen Höhen über den beobachteten Datenbereich, die durch die Kovariable beschrieben wird. Die relative Amplitude gibt einen Eindruck des Anteils der Kovariablen an der Verschiebung der Alters-Höhenkurve. Dabei zeigt sich, dass bei der Buche etwa 44 % der Höhenkurven-Verschiebung durch das Alter erklärt werden, bei der Fichte ca. 72 %. Die Temperatur hat bei der Buche bei Berücksichtigung des linearen Effektes sowie des Effektes auf die Steigung einen Anteil von 48 % und die mittlere pflanzenverfügbare Bodenwassermenge von

acht Prozent. Bei der Fichte schlägt sich die Temperatur mit insgesamt ca. 24 % nieder, der Anteil der mittleren pflanzenverfügbaren Bodenwassermenge an der Höhenverschiebung liegt bei ca. 5 %. Auch wenn der anteilige Einfluss auf die Verschiebung der Alters-Höhenkurven beider Arten auf logarithmischer Ebene relativ gering erscheint, zeigt sich bei Betrachtung der entlogarithmierten Version der deutliche Einfluss extremer Werte (Abbildung 2). Bei einer Verschiebung des pflanzenverfügbaren Wassers von 50 mm auf 250 mm zeigen sich für hundertjährige Buche und Fichte Höhenverschiebungen von z. T. über 5 m. Der nicht lineare Effekt des Temperaturmittelwertes auf den Steigungsparameter *B* zeigt sich sowohl bei Buche als auch Fichte in höheren Steigungen bei höheren Temperaturen, insbesondere bei jüngeren Beständen.

Tabelle 2: Statistische Kenngrößen der Alters-Höhenmodelle für Buche und Fichte.

Buche $\ln(E[H]) = p_a + p_b z_k + p_c t + f(taysm) z_k + f(awat.0100)$

Term	Schätzung Koeffizient	p-Wert	Amplitude	rel. Amplitude
p_a	2.912	<.001		
$p_b z_k$	0.186	<.001	0.801	0.439
$p_c t$	0.028	<.001	0.247	0.136
$f(taysm) z_k$		<.001	0.639	0.346
$f(awat.0100)$		<.001	0.147	0.081

Fichte $\ln(E[H]) = p_a + p_b z_k + p_c awat.0100 + p_d t + f(taysm) z_k$

	Schätzung Koeffizient	p-Wert	Amplitude	rel. Amplitude
p_a	3.040	<.001		
$p_b z_k$	-8.446×10^{11}	<.001	1.769	0.715
$p_c awat.0100$	4.192×10^{-4}	<.001	0.120	0.048
$p_d t$	3.137×10^{-2}	<.001	0.293	0.118
$f(taysm) z_k$		<.001	0.291	0.119

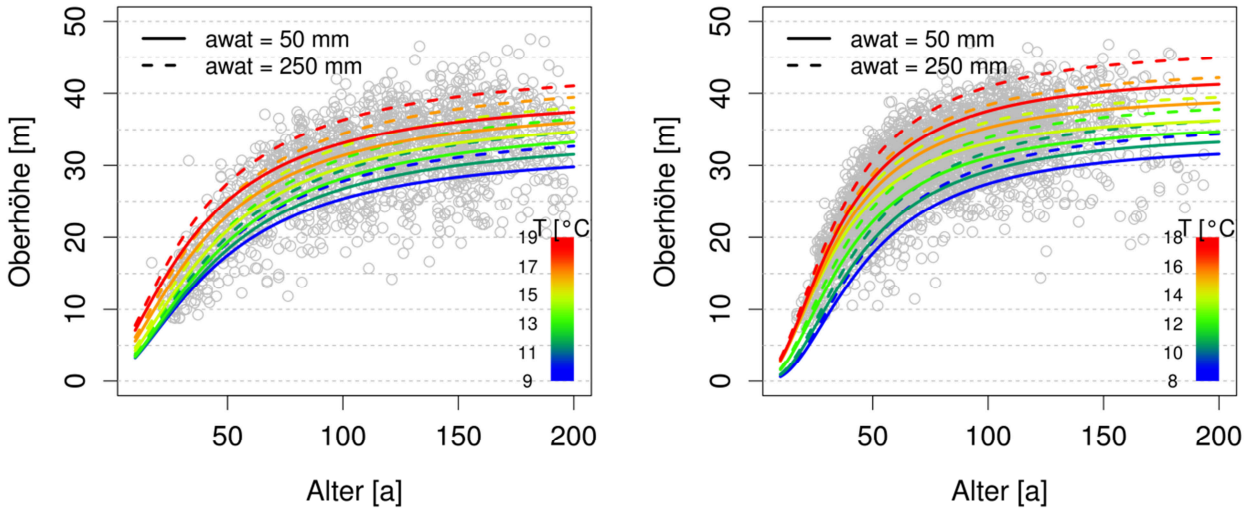

Abbildung 2: Alters-Höhenkurven für Buche (links) und Fichte (rechts) abhängig von der Temperatur in den Monaten Mai bis Juli und des pflanzenverfügbaren Bodenwassers (awat).

Diskussion

Die nach LAPPI (1997) linearisierte Form der Korf-Funktion lässt sich nach Anpassung der Parameter λ und C sinnvoll zur Abbildung der Alters-Höhenbeziehung anwenden. Das finale Modell enthält für beide Arten das transformierte Alter, den von Mai bis Juli aggregierten Temperaturmittelwert sowie die Menge des pflanzenverfügbaren Bodenwassers. Für die pflanzenverfügbare Bodenwassermenge ergibt sich für die Buche ein Sättigungsverlauf, für die Fichte ein linearer Effekt. Weitere Klima-, Wasserhaushalts- und Bodenparameter zeigen keine Plausibilität oder in Verbindung mit Temperatur und pflanzenverfügbarer Bodenwassermenge keine Signifikanz. Besonders der Niederschlag zeigt einen durchgehend negativen Effekt. Hier zeigt sich ein häufig beobachtetes Artefakt aus einer negativen Korrelation zwischen Temperatur und Niederschlag, die besonders durch die kühl-feuchten Hochlagen der Mittelgebirge und Alpen geprägt ist. Ein Ausschluss dieser Standorte aus der Analyse führt aber nicht zu einem plausiblen Niederschlagseffekt. Möglicherweise befindet sich die über das Bestandesalter gemittelte Niederschlagssumme für die betrachteten Traktecken der BWI immer in einem für die Bestandesentwicklung ausreichenden Bereich. In diesem Bereich ist der Niederschlagsgradient nicht hoch genug, um eine Wirkung zu beobachten. Eine Auflösung der Korrelation zwischen Temperatur und Niederschlag ist in Verbindung mit der nutzbaren Feldkapazität möglich, wie der Effekt des pflanzenverfügbaren Wassers zeigt. Eine weitere Möglichkeit läge in einer Vergrößerung des Umweltgradienten, um auch Standorte im feucht-warmen und kalt-trockenen Bereich abzudecken. Dies wäre z. B. durch eine Erweiterung der Datengrundlage auf europaweite Ebene möglich (BRANDL ET AL. 2016; BURGGRAEF ET AL. 2016). Die mangelnden Plausibilitäten von Matrixpotenzial- und Defizitsumme des pflanzenverfügbaren Wassergehalts sowie Evapotranspiration sind ebenfalls auf die unplausible Beziehung zum Niederschlag zurückzuführen. Unplausible bzw. nur schwache Effekte des C/N-Verhältnisses sind durch einen geringen Gradienten zu begründen, während der negative Effekt einer hohen Basensättigung als Artefakt des Bodentyps interpretiert werden kann, wobei hohe Werte häufig auf besonders flachgründigen Kalkstandorten beobachtet werden. Insgesamt sind die Effekte der bodenchemischen Parameter nur schwach und zeigen in Verbindung mit Temperatur und pflanzenverfügbarem Bodenwasser keine Signifikanz. Im finalen Modell wirkt die Temperatur linear auf das Niveau der Höhen-Durchmesserkurve und nicht linear auf die Steigung. Für beide Arten zeigt sich eine etwas stärkere Reaktion jüngerer Bestände auf Temperaturveränderungen im Vergleich zu älteren Beständen (Abbildung 2). Dies ist biologisch plausibel, da bei zuwachskräftigeren, jüngeren Beständen eine deutlichere Reaktion auf günstigere Bedingungen zu erwarten ist. Gleichzeitig können sich hier die in den vergangenen Jahrzehnten ebenfalls höheren Stickstoffeinträge niederschlagen, auf die bei jüngeren Beständen eine stärkere Reaktion zu erwarten ist. Das Hinzufügen einer dynamisch aufsummierten Stickstoffdepositionsmenge als Kovariable könnte Aufschluss über mögliche Korrelationen geben. Insgesamt reagieren beide Arten stark auf Temperaturveränderungen. Addiert man die relativen Amplituden der Effekte auf Niveau und Steigung, so ergibt sich ein Anteil von 50 % an der gesamten Verschiebung der Alters-Höhenkurve bei der Buche. Bei der Fichte zeichnet der Temperaturmittelwert mit fast 24 % Anteil an der gesamten Verschiebung der Alters-Höhenkurve. Bei der Interpretation muss die Wechselwirkung zwischen Alter und Temperatur beachtet werden, der Anteil des Effektes auf den Steigungsparameter ist also nicht komplett der Temperatur zuzuschreiben. Die Ergebnisse zeigen jedoch einen deutlichen Effekt der Temperatur auf den Standort-Leistungsbezug. Ein negativer Einfluss langfristig erhöhter Temperaturen auf die Standortleistung, wie er sich in der Vorselektion für die Buche andeutet, wäre zu erwarten. Es ist jedoch unsicher, inwieweit dieser anhand einer statischen Zielgröße wie der Bestandesoberhöhe verlässlich zu identifizieren ist. In vergleichbaren Studien zeigen sich ebenfalls Sättigungs- anstelle von Optimumsbeziehungen (ALBERT & SCHMIDT 2010; BRANDL ET AL. 2014; PYA & SCHMIDT 2016). Das pflanzenverfügbare Bodenwasser zeigt im finalen Modell ebenfalls einen Sättigungsverlauf für die Buche und einen linearen

Verlauf für die Fichte. Die relative Amplitude beträgt bei der Buche ca. 8 %, bei der Fichte 11 % (Tabelle 2). Bei extremen Werten kann er jedoch zu einer Verschiebung der Alters-Höhenkurve im Bereich von bis zu 5 m für über hundertjährige Bestände führen (Abbildung 2). Trotz marginaler Änderung des Bestimmtheitsmaßes der finalen Modelle im Vergleich zu einem reinen Alters-Höhenmodell haben die identifizierten Umwelteffekte also durchaus einen starken Einfluss auf die vorhergesagte Höhe.

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 Daten der BWI 3 wurden vom Thünen-Institut für Waldökosysteme bereitgestellt.

Literatur

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

BRANDL, S., FALK, W., KLEMMT, H.-J., STRICKER, G., BENDER, A. et al.: 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

BRANDL, S., FALK, W., METTE, T., RÖTZER, T. & PRETZSCH, H.: Standortsensitive Modellierung der Produktivität. Tagungsband der Jahrestagung der Sektion Ertragskunde im DVFFA: 89–101, 2016

BURGGRAEF, L., SCHMIDT-WALTER, P., HILBRIG, L. & SCHMIDT, M.: Standort-Leistungsmodelle als Grundlage für realistische Waldentwicklungsszenarien unter Klimawandel. Tagungsband der Jahrestagung der Sektion Ertragskunde im DVFFA: 8–19, 2016

GRANIER, A., BRÉDA, N., BIRON, P. & VILLETTE, S.: A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. Ecological Modelling 116 (2): 269–283, 1999

HAMMEL, K. & KENNEL, M.: Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90. Frank, 2001

JACOB, D., BÜLOW, K., KOTOVA, L., MOSELEY, C., PETERSEN, J. et al.: Regionale Klimaprojektionen für Europa und Deutschland: Ensemble Simulationen für die Klimafolgenforschung., 2012

KAWOHL, T., DIETRICH, H., WEHBERG, J., BÖHNER, J., WOLF, T. et al.: Das Klima in 80 Jahren – Wein- statt Waldbau? AFZ-Der Wald 15: 32–35, 2017

KRAMER, H. & AKÇA, A.: Leitfaden zur Waldmesslehre. Sauerländer, 2008

LAPPI, J.: A Longitudinal Analysis of Height/Diameter Curves. Forest Science 43 (4): 555–570, 1997

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

PRETZSCH, H.: Ertragstafel-Korrekturfaktoren für Umwelt-und Mischungseffekte. AFZ Der Wald 14: 47–50, 2016

PRETZSCH, H., BIBER, P., SCHÜTZE, G., UHL, E. & RÖTZER, T.: Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. Nature communications 5, 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

PYA, N. & WOOD, S. N.: Shape constrained additive models. Statistics and Computing 25 (3): 543–559, 2015

R CORE TEAM: R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2017

SCHMIDT-WALTER, P., AHRENDS, B. & MEESENBURG, H.: Wasserhaushalt und Trockenstress für die BWI quantifiziert. AFZ-Der Wald 72: 36–39, 2017

SKOVSGAARD, J. P. & VANCLAY, J. K.: Forest site productivity: a review of spatial and temporal variability in natural site conditions. Forestry 86 (3): 305–315, 2013

SPELLMANN, H., ALBERT, M., SCHMIDT, M., SUTMÖLLER, J. & OVERBECK, M.: Waldbauliche Anpassungsstrategien für veränderte Klimaverhältnisse. AFZ-Der Wald 11 (2011): 19–23, 2011

SPIECKER, H., MIELIKÄINEN, K., KÖHL, M. & SKOVSGAARD, J. P.: Growth trends in European forests: studies from 12 countries. Springer Science & Business Media, 2012

STAUPENDAHL, K. & SCHMIDT, M.: Kalibrierung der Ertragstafeln für die Hauptbaumarten in Hessen mithilfe der Daten der Bundeswaldinventur. Allgemeine Forst und Jagdzeitung 187: 197–216, 2016