

# Standortsensitive und kalibrierbare Bonitätsfächer: Wachstumspotenziale wichtiger Baumarten unter Klimawandel<sup>\*)</sup>

Aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt, Abteilung Waldwachstum

(Mit 8 Abbildungen und 12 Tabellen)

Ein umfangreicher Appendix mit baumartenspezifischen Häufigkeitsverteilungen der kategorischen Wasserhaushalts- und Nährstoffhaushaltskategorien sowie der zugehörigen Modelleffekte ist online verfügbar

MATTHIAS SCHMIDT<sup>1)</sup>

(Angenommen Januar 2020)

DOI-Nummer: 10.23765/afz0002043

## SCHLAGWÖRTER – KEY WORDS

*Klimafolgenforschung; Standort-Leistungs-Modelle; standortsensitive Bonitätsfächer; Gemeine Fichte; Rotbuche; Waldkiefer; Trauben- und Stieleiche.*

*Climate impact research; site-sensitive growth models; site-sensitive site index curves; Norway Spruce; common beech; Scots pine; sessile and pedunculated oak*

## 1. EINLEITUNG

Der bereits zu beobachtende Klimawandel, die fortwährende Deposition von Luftschadstoffen sowie die Erholung degradierter Standorte haben spätestens ab der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts zu fortlaufenden Veränderungen der forstlichen Standorte in Deutschland und Europa geführt (SPIECKER et al., 1996; Laubhann et al., 2009). Abgesehen von regionalen Wachstumsdepressionen und dem sogar flächigen Absterben von Waldbeständen in den 1970–1980er-Jahren, die durch die Deposition von Luftschadstoffen verursacht wurden, haben die mittleren Zuwächse wichtiger Wirtschaftsbaumarten in den letzten Jahrzehnten fast ausnahmslos zugenommen (STERBA, 1996; PRETZSCH et al., 2014). Dieser Trend ist auch global zu beobachten, solange die Standorte keine Wasserlimitierung für das Waldwachstum aufweisen (BOISVENUE und RUNNING, 2006). Beispielsweise liegen aus Südwestdeutschland Hinweise auf seit etwa Mitte der 1990er-Jahre im submontanen Bereich rückläufige Zuwächse bei Fichte, Kiefer und Buche vor (YUE et al., 2011, 2014, 2016; KOHNLE et al., 2014), die u.a. auf ungünstige Niederschlagsbedingungen zurückzuführen sein könnten. Noch deutlich größere und anhaltende Standortänderungen werden aus dem projizierten Klimawandel

resultieren, wobei global sehr unterschiedliche Wachstumsreaktionen in Abhängigkeit vom betrachteten Zeithorizont zu erwarten sind (VALLADARES, 2008). Es besteht daher ein zunehmender Bedarf der Forstwirtschaft an standortsensitiven Wachstumsmodellen (BONTEMPS und BOURIAUD, 2014) und dynamischen Bonitierungsverfahren u.a. für die Entscheidungsstützung bei der zukünftigen Baumartenwahl (SPELLMANN et al., 2011; ALBERT et al., 2015, 2016), bei der Adaptierung waldbaulicher Maßnahmenfolgen (PRETZSCH et al., 2008) und für Projektionen realistischer Holzaufkommens- und Waldentwicklungsszenarien (ROCK et al., 2013; WÖRDEHOFF et al., 2017) sowie die klimasensitive Anwendung moderner Ertragstabellen (STAUPENDAHL und SCHMIDT, 2016).

Grundsätzlich kann die Waldentwicklung im Kontext sich ändernder Standortbedingungen entweder mit prozessbasierten ökophysiologischen oder mit empirisch-statistischen Modellansätzen projiziert werden (WEISKITTEL et al., 2011). Für die Entscheidungsunterstützung in der Forstplanung ist es dabei erforderlich, Wachstums- und Ertragsgrößen auf der Basis von Standortparametern, die flächendeckend und in der notwendigen räumlichen und zeitlichen Auflösung zur Verfügung stehen, präzise einzuschätzen. Vor diesem Hintergrund verfolgt die Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA) im Rahmen der Klimafolgenforschung die Weiterentwicklung der Programmbibliothek TreeGroSS und damit eines statistischen Einzelbaumansatzes zur Wachstumsmodellierung (HANSEN und NAGEL, 2014). Dieses bereits seit Jahren in der Forstpraxis erfolgreich eingesetzte Modellsystem basiert auf einer breiten Datenbasis und kann für die mittelfristige Forstplanung relevante Größen hinreichend genau projizieren. Um auch langfristige Projektionen unter Klimawandel zu ermöglichen, zielt die aktuelle Weiterentwicklung auf eine explizite Standortsensitivität der Wachstumsmodelle.

Im Folgenden wird ein generalisiertes additives Modell (GAM) dargestellt, mit dem sich der Altersgang der Grundflächenmittelhöhe (Hg) standort- und somit klimasensitiv beschreiben lässt. Der Begriff „Standort“

<sup>\*)</sup> HERMANN SPELLMANN zur Pensionierung gewidmet – als Dank für die langjährige Förderung, Unterstützung und gute Zusammenarbeit.

<sup>1)</sup> Korrespondierender Autor: Dr. Matthias Schmidt. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt. Abteilung Waldwachstum, Grätzelstraße 2, D-37079 Göttingen.  
E-Mail: [matthias.schmidt@nw-fva.de](mailto:matthias.schmidt@nw-fva.de)

wird im Weiteren im Sinne seiner umfassenden Bedeutung verstanden, die die Kombination aller Klima-, Depositions- und Bodenparameter beinhaltet. Die resultierenden Funktionsverläufe können als standortsensitiver Bonitätsfächer verstanden werden, für dessen Anwendung die Annahme der Standortkonstanz klassischer Bonitätsfächer nicht mehr notwendig ist. Auch sind für die Anwendung der klassischen Bonitätsfächer Baumhöhenmessungen zur 'Einhängung' notwendig, da es sich um rein phytozentrische Ansätze handelt (DĂNESCU et al., 2017). Der neuartige standortsensitive Bonitätsfächer erlaubt hingegen eine Schätzung der Hg-Alters-Entwicklung und somit Bonitierung unter ausschließlicher Verwendung von Standortparametern. Liegen zusätzlich Baumhöhenmessungen vor, kann der standortsensitive Bonitätsfächer anhand dieser Informationen lokal kalibriert werden (LAPPI, 1997), womit die Genauigkeit der Schätzung deutlich erhöht wird. Der Gesamtansatz lässt sich damit als kombiniert geo-phytozentrisch beschreiben. Die geozentrische Modellkomponente weist große Ähnlichkeit mit der quasikausalen Modellierung des Standort-Leistung-Bezuges von KAHN (1995) auf, da auch in diesem Fall die Altersentwicklung einer Bestandeshöhe in Abhängigkeit von Standortparametern beschrieben wird.

Das hier vorgestellte geo-phytozentrische Modellsystem ist eine ertragskundliche Grundlage für:

- die Bonitierung von Waldbeständen unter Klimawandel bzw. sich ändernden Standortbedingungen
- die räumlich hoch aufgelöste Optimierung der Baumarten-Mischungs-Wahl unter Klimawandel
- die räumlich hoch aufgelöste klimasensitive Adaptierung von waldbaulichen Maßnahmenfolgen
- die klimasensitive Projektion von Potentialbestockungen, die für die Initialisierung von Modellen zur Abschätzung von biotischen und abiotischen Risiken benötigt werden. Unter Potentialbestockungen werden Baumarten-Mischungs-Kombinationen mit ihren standortsensitiven ertragskundlichen Eigenschaften verstanden, die unabhängig von der vorhandenen Bestockung modellbasiert projiziert werden.
- die Erweiterung von Waldwachstumssimulatoren um standort- bzw. klimasensitive Wachstumskomponenten, wobei die Kalibrierfähigkeit die Anwendung in Holzaufkommens- und Waldentwicklungsprognosen auf der Grundlage von Stichprobeninventuren wie der Bundeswaldinventur (BWI) ermöglicht.

## 2. MATERIAL UND METHODEN

### 2.1 Daten

Dendrometrische Datenbasis der Modellbildung sind die Bundeswaldinventuren 1 bis 3 inklusive aller Verdichtungsgebiete ergänzt um die Landeswaldinventur Brandenburg sowie Landeswald-Betriebsinventuren aus Hessen und Niedersachsen. Die sehr umfassende Datenbasis dient dazu, für alle untersuchten Baumarten auch seltene Standortbedingungen insbesondere an den Rändern der Datenbereiche zu erfassen. Weiterhin ist die sehr große Anzahl an Einzelbeobachtungen, die auf systematischen Stichprobennetzen über große Gradienten erhoben wurde, eine Grundvoraussetzung für die Schät-

zung plausibler Effekte der kausalen Standortparameter. BONTEMPS und BOURIAUD (2014) betonen in diesem Zusammenhang die besondere Bedeutung der Nationalen Waldinventuren für die Standort-Leistungs-Modellierung (SEYNAVE et al., 2005; WATT et al., 2010).

In die Modellbildung gingen nur Bäume des Hauptbestandes einer Baumart von Stichprobenpunkten ein, die zum Inventurzeitpunkt eine definierte Altersspanne nicht überschreiten. Dazu wurde das relative Alter als Quotient aus Einzelbaumalter und mittlerem Alter aller Hauptbestandsbäume einer Baumart berechnet. Es wurden alle Stichprobenpunktaufnahmen mit einer Standardabweichung der relativen Alter größer als 0,1 oder mit einer 90%-Interperzentilspanne größer als 0,2 von der Modellbildung ausgeschlossen. Durch diese Vorgehensweise wurden keine Daten aus stärker ungleichaltrigen Bestandesstrukturen verwendet, da die im standortsensitiven Bonitätsfächer verwendete Grundflächenmittelhöhe (Hg) in diesen Fällen keine aussagekräftige Zielvariable darstellt. Die Hg weist gegenüber Oberhöhen den Nachteil auf, dass es infolge von Durchforstungen zu rechnerischen Verschiebungen kommen kann. Allerdings stimmen Oberhöhen, die auf der Basis von Stichproben berechnet werden, nicht mit bestandesbezogenen Oberhöhen überein, da sie als obere Quantile der Höhenverteilung von der Varianz innerhalb der jeweiligen Bezugsseinheit (Bestand versus Stichprobenpunkt) abhängen. Um die Vergleichbarkeit mit klassischen ertragskundlichen Kenngrößen zu gewährleisten, wurde daher die Hg verwendet. Der Einfluss von Durchforstungen wird dabei als ungerichtet angenommen, so dass die Schätzungen der Hg im Mittel erwartungstreu sind und lediglich die Varianz erhöht ist.

In der Modellselektion wurden unterschiedliche klimatische, edaphische und Depositionsparameter auf Signifikanz getestet und die sachlogische Plausibilität ihrer Effekte beurteilt. Zur Ableitung dieser Standorteffekte wurde auf umfangreiche Datengrundlagen bzw. moderne Regionalisierungsmethoden zurückgegriffen. Klimaparameter wurden auf der Grundlage von Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD), die durch das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) weiter aufbereitet worden sind, abgeleitet und regionalisiert. Anstelle von Jahressummen wurden dabei Werte für dynamisch bilanzierte Vegetationsperioden (MENZEL, 1997; NUSKE, 2017) verwendet, um auch den Effekt des Klimawandels auf die Länge der Vegetationsperiode zu erfassen. Die Grundlage für die atmosphärischen Stickstoffeinträge bilden flächendeckende Berechnungen mit dem prozessorientierten LOTUS-EUROS Modell (SCHAAP et al., 2015). Aus diesen Ergebnissen wurden Zeitreihen der retrospektiven Deposition generiert (ALVETEG et al., 1998; TARRASÓN und NYÍRI, 2008; HÖHLE et al., 2016). Die Klimaparameter Temperatur- und Niederschlagssumme sowie die Stickstoffdeposition gehen in Form von dynamisch über das Bestandesleben gemittelten Kovariablen in das Modell ein, so dass neben räumlichen Gradienten auch zeitliche Standortveränderungen abgebildet werden.

Aufgrund der hohen Kollinearität zwischen dem Alter und der Stickstoffdeposition wurde letztere für die

Tab. 1

Statistische Kenngrößen der Datengrundlage der standortsensitiven Bonitätsfächer für Fichte, Buche, Kiefer und Eiche. Die Verteilungen der kategorischen Wasserhalts- und Nährstoffziffer sind im Appendix aufgeführt.

Statistical parameters of the data base of the site-sensitive site index curves for spruce, beech, pine and oak. The frequency distributions for the water and nutrient balance categories are listed in the appendix.

<b>Fichte</b>							
Quantile	Hg [m]	Alter [J]	NHN [m]	Temperatursumme in Vegetations- periode [°C]	Niederschlagssumme in Vegetations- periode [mm]	Jahres-N- Deposition [eq/ha/a]	Normierte Jahres- N-Deposition
0%	4,0	10	0	957	250	363	0,45
10%	14,3	30	113	1817	323	898	0,77
20%	18,9	40	272	1930	345	1035	0,85
50%	25,5	64	429	2135	396	1340	0,99
80%	30,6	100	593	2290	469	1630	1,15
90%	32,9	117	708	2353	521	1792	1,27
100%	44,4	171	1655	2933	1031	3094	2,14
Anzahl Datensätze = 89471							
<b>Buche</b>							
Quantile	Hg [m]	Alter [J]	NHN [m]	Temperatursumme in Vegetations- periode [°C]	Niederschlagssumme in Vegetations- periode [mm]	Jahres-N- Deposition [eq/ha/a]	Normierte Jahres- N-Deposition
0%	5,0	10	-1	1128	240	364	0,45
10%	15,9	41	100	1957	308	712	0,78
20%	20,6	59	220	2039	323	792	0,85
50%	27,1	100	338	2181	364	1045	0,97
80%	31,9	144	476	2313	419	1373	1,09
90%	34,1	160	586	2384	461	1531	1,18
100%	43,5	212	1478	2879	1008	3055	2,14
Anzahl Datensätze = 72661							
<b>Kiefer</b>							
Quantile	Hg [m]	Alter [J]	NHN [m]	Temperatursumme in Vegetations- periode [°C]	Niederschlagssumme in Vegetations- periode [mm]	Jahres-N- Deposition [eq/ha/a]	Normierte Jahres- N-Deposition
0%	4,3	10	-1	1460	238	360	0,49
10%	14,8	34	29	2135	277	787	0,77
20%	18,2	47	43	2212	289	903	0,82
50%	23,1	74	96	2323	325	1191	0,92
80%	27,3	115	376	2419	367	1430	1,05
90%	29,5	135	462	2469	409	1632	1,22
100%	38,7	181	1236	2978	949	3018	2,11
Anzahl Datensätze = 68044							
<b>Eiche</b>							
Quantile	Hg [m]	Alter [J]	NHN [m]	Temperatursumme in Vegetations- periode [°C]	Niederschlagssumme in Vegetations- periode [mm]	Jahres-N- Deposition [eq/ha/a]	Normierte Jahres- N-Deposition
0%	4,6	10	-4	1622	236	325	0,42
10%	14,2	39	36	2088	291	652	0,75
20%	18,3	60	63	2152	305	735	0,82
50%	24,5	110	272	2275	340	979	0,94
80%	28,9	153	396	2388	390	1346	1,08
90%	30,7	171	461	2450	427	1545	1,23
100%	40,0	243	1083	2964	838	3072	2,20
Anzahl Datensätze = 43301							

Modellbildung in Relation zu ihrem altersbedingten Erwartungswert gesetzt bzw. um ihren Alterstrend bereinigt. Somit ist bei gleicher absoluter Stickstoffdeposition der normierte Stickstoff-Wert umso höher, je geringer der zugehörige altersbedingte Erwartungswert ist. Der Alterstrend ist nicht baumartenspezifisch und wurde auf der gesamten Datenbasis aller Stichprobenpunkte geschätzt. Zur Erfassung der Bodeneigenschaften wurden konstante kategoriale Einstufungen des Wasserhaushaltes und der Nährstoffversorgung aus der forstlichen Standortkartierung verwendet. Somit werden der Energie-, Wasser- und Nährstoffhaushalt im Modell mit je mindestens einer Kovariablen erfasst und auf die Hg-Alters-Beziehung abgebildet.

Aktuell sind Modelle für Gemeine Fichte, Waldkiefer, Rotbuche sowie Stiel- und Traubeneiche (kombiniert), Europäische Lärche, Weißtanne und Douglasie parametrisiert. Allerdings ist die deutschlandweite Anwendung der Modelle für die vier Hauptbaumarten aufgrund der sehr viel umfangreicheren Datengrundlagen (*Tab. 1*) deutlich verlässlicher als für die drei letztgenannten Nadelholzarten weshalb im vorliegenden Beitrag nur die Hauptbaumarten behandelt werden. Baumartenübergreifend weisen sowohl die Hg, das Bestandesalter als auch die ausgewählten zeitveränderlichen Standortvariablen sehr breite Datenbereiche auf (*Tab. 1*). Gleichzeitig werden Unterschiede zwischen den Baumarten deutlich, die ihre räumliche und höhenzonale Verbreitung in Deutschland widerspiegeln. So haben Buche und besonders Fichte deutlich höhere Anteile an hochmontanen und somit kühleren Standorten als Kiefer und Eiche (*Tab. 1*). Für die Klimafolgenforschung sind aber die besonders warmen und trockenen Standortbereiche von besonderem Interesse. Dabei sind die Baumartenunterschiede bzgl. besonders warmer Standorte relativ gering, wobei aber die 90%-Quantile der Temperatursumme in der Vegetationszeit (*Tempsum\_Veg*) von Eiche und besonders Kiefer etwas höher liegen als die von Buche und Fichte (*Tab. 1*). Bei den Niederschlagssummen in der Vegetationszeit (*Niederschlag\_Veg*) haben Eiche und besonders Kiefer deutlich höhere Anteile relativ niedriger Werte als Fichte und Buche, was beim Vergleich der 80 und 90%-Quantile deutlich wird. Die jährliche Stickstoffdeposition (*NDep*) weist für alle Baumarten relativ ähnliche Verteilungen auf. Die zur Erfassung des Bodenwasser- (*WHZ*) und Nährstoffhaushaltes (*NZ*) verwendeten Kategorien der verschiedenen Standortkartierungsverfahren sind teilweise sehr unterschiedlich belegt (ein umfangreicher Appendix mit baumartenspezifischen Häufigkeitsverteilungen der kategorischen Wasserhaushalts- und Nährstoffhaushaltskategorien sowie der zugehörigen Modelleffekte ist online verfügbar). Die aufgeführten baumartenspezifischen Häufigkeitsverteilungen nach Kategorien von Wasserhaushalts- und Nährstoffziffern stellen dabei bereits das Ergebnis einer Aggregation der feineren Einteilungen der unterschiedlichen Standortkartierungsverfahren nach sachlogischen und statistischen Gesichtspunkten dar. Dabei wurden an Stichprobenpunkten mit forstlicher Standortkartierung in den Trägerländern der NW-FVA (Niedersachsen, Schleswig-Holstein, Hessen, Sachsen-Anhalt) sowie Brandenburg Informationen aus den jeweiligen länderspezifischen

Verfahren als Ausgangsbasis verwendet (NFP, 2007, 2009; HESSENFORST, 2017; RUSS, 2016). In allen anderen Bundesländern wurde auf dem 4x4 km Inventurnetz der Bundeswaldinventur auf die Synopse der Wasserhaushalts- und Nährstoffziffer aus dem Waldklimafond-Projekt WP-KS-KW (STAATSBETRIEB SACHSENFORST & THÜRINGENFORST, 2015; BENNING et al., 2019; s.a. WOLFF et al., 1998) als Datengrundlage zurückgegriffen. Stichprobenpunkte in den Trägerländern der NW-FVA und in Brandenburg ohne Standortkartierung sowie der BWI-Verdichtungsgebiete in allen übrigen Bundesländern wurden in der Sammelkategorie „ohne Standortkartierung“ zusammengefasst.

## 2.2 Modelle

Als Grundmodell für den standortsensitiven Bonitätsfächer wurde eine modifizierte Form der Korf-Funktion gewählt, die ursprünglich zur Beschreibung longitudinaler Höhen-Durchmesser-Beziehungen entwickelt wurde (LAPPI, 1997). Die Funktion zeichnet sich dadurch aus, dass ihre Parameter biologisch interpretierbar und relativ schwach korreliert sind, was sich günstig auf die allgemeinen statistischen Eigenschaften der Modelle auswirkt. Die Funktionsparameter beschreiben in der vorliegenden Anwendung das Niveau und die Steigung der Altersentwicklung der Wachstumsgröße Hg (Formel 1.1-1.2). Die biologische Interpretierbarkeit ist insbesondere für die angestrebte Ableitung standortsensitiver Modelle von entscheidender Bedeutung, bei der die Funktionsparameter erster Ordnung (Formel 1.1:  $A_{kt}$ ,  $B_{kt}$ ) in Abhängigkeit von Wachstumsfaktoren beschrieben werden (Formel 1.2). Die Interpretierbarkeit der Parameter erleichtert zudem die Plausibilitätsprüfung der Modelleffekte. Die modifizierte Korf-Funktion (LAPPI, 1997) ist linear, so dass die weitere Modellentwicklung als verallgemeinertes additives Regressionsmodell (GAM) mit Normalverteilungsannahme und heterogener Varianz sowie logarithmischer Verknüpfungsfunktion erfolgen konnte (WOOD et al., 2016). Für die Linearisierung der Funktion ist es notwendig, die Parameter  $\lambda$  und  $C$  der Korf-Funktion in einer vorgeordneten Prozedur iterativ zu optimieren. Die Heteroskedastizität wurde über einen zweiten linearen Prädiktor explizit modelliert, wobei die Modellierung technisch für die Standardabweichung erfolgt (Formel 1.3). Diese explizite Modellierung der Standardabweichung ermöglicht die valide Schätzung von beliebigen Quantilen, die eine zusätzliche Informationsgrundlage für die Entscheidungsunterstützung darstellen (ALBERT und SCHMIDT, 2012) und ist im vorliegenden Fall für die Gewährleistung statistischer Annahmen notwendig. Die logarithmische Linkfunktion für den Erwartungswert (Formel 1.2) definiert, dass die Hg-Alters-Beziehung exponentiell multiplikativ durch die verschiedenen Wachstumsfaktoren beeinflusst wird und gewährleistet positive Erwartungswerte. Zur Erfassung des auftretenden großräumigen strukturierten Fehlers wurde ein 2-dimensionaler nichtlinearer Effekt der geographischen Lage geschätzt. Durch die Parametrisierung der modifizierten Korf-Funktion als GAM, werden sigmoide Verläufe der Hg-Alters-Entwicklungen gewährleistet und gleichzeitig

eine sehr flexible Schichtung dieser Verläufe in Abhängigkeit der verschiedenen Standortfaktoren ermöglicht.

$$E[Hg_{kt}] = g_E^{-1} [ A_{kt} - B_{kt} x_{kt} ] \quad [1.1]$$

$$\text{mit: } x_{kt} = \frac{(\text{Alter}_{kt} + \lambda)^{-C} - (100 + \lambda)^{-C}}{(50 + \lambda)^{-C} - (100 + \lambda)^{-C}}$$

$$E[Hg_{kt}] = g_E^{-1} [ \beta_{0a} + f_{1a}(\text{Tempsum\_Veg}_{kt}) + f_{2a}(\text{Niederschlag\_Veg}_{kt}) + f_{3a}(\text{NDep\_norm}_{kt}) + \text{WHZ}_k^T \beta_{\text{WHZ}_a} + \text{NZ}_k^T \beta_{\text{NZ}_a} + f_{geo\_a}(\text{RW}_k, \text{HW}_k) + \beta_{1b} x_{kt} ] \quad [1.2]$$

wobei:

$$A_{kt} = \beta_{0a} + f_{1a}(\text{Tempsum\_Veg}_{kt}) + f_{2a}(\text{Niederschlag\_Veg}_{kt}) + f_{3a}(\text{NDep\_norm}_{kt}) + \text{WHZ}_k^T \beta_{\text{WHZ}_a} + \text{NZ}_k^T \beta_{\text{NZ}_a} + f_{geo\_a}(\text{RW}_k, \text{HW}_k)$$

$$B_{kt} = \beta_{1b}$$

und:

$$SD[Hg_{kt}] = 0.01 + g_{SD}^{-1} [ \beta_{0SD} + f_{1SD}(\text{Alter}_{kt}) ], \quad [1.3]$$

mit:

$x_{kt}$ :

baumartenspezifisches transformiertes Bestandesalter an Stichprobenpunkt  $k$  zum Zeitpunkt  $t$

$\lambda$  und  $C$ :

baumartenspezifische Koeffizienten, die iterativ optimiert werden

$Hg_{kt}$ :

baumartenspezifische Grundflächenmittelhöhe [m] von Stichprobenpunkt  $k$  zum Zeitpunkt  $t$

$A_{kt}$ ,  $B_{kt}$ :

Koeffizienten 1. Ordnung (Niveau und Steigung) des Hg-Alters-Modells (modifizierte Korf-Funktion) für Stichprobenpunkt  $k$  zum Zeitpunkt  $t$

$\text{Tempsum\_Veg}_{kt}$ :

über das Bestandesleben gemittelte Temperatursumme in der Vegetationsperiode [°C] an Stichprobenpunkt  $k$  zum Zeitpunkt  $t$

$\text{Niederschlag\_Veg}_{kt}$ :

über das Bestandesleben gemittelte Niederschlagssumme in der Vegetationsperiode [mm] an Stichprobenpunkt  $k$  zum Zeitpunkt  $t$

$\text{NDep\_norm}_{kt}$ :

über das Bestandesleben gemittelte, normierte jährliche Stickstoffdeposition an Stichprobenpunkt  $k$  zum Zeitpunkt  $t$

$\text{WHZ}_k$ ,  $\text{NZ}_k$ :

Kategorien zur Beschreibung des Wasserhaushaltes und der Nährstoffversorgung nach dem jeweils gültigen und in der Modellbildung modifizierten Kartierverfahren an Stichprobenpunkt  $k$

$\text{RW}_k$ ,  $\text{HW}_k$ :

Rechts- und Hochwert von Stichprobenpunkt  $k$  als UTM-Koordinaten [m]

$\text{Alter}_{kt}$ :

Baumartenspezifisches Bestandesalter [Jahre] an Stichprobenpunkt  $k$  zum Zeitpunkt  $t$

$\beta_{0a}$ :

auf das Niveau der Hg-Alters-Beziehung wirkendes Interzept

$f_{1a}(\text{Tempsum\_Veg}_{kt})$ :

auf das Niveau der Hg-Alters-Beziehung wirkender 1-dimensionaler penalisierter Regressionsspline zur Beschreibung des Effektes der TempSum\_Veg

$f_{2a}(\text{Niederschlag\_Veg}_{kt})$ :

auf das Niveau der Hg-Alters-Beziehung wirkender 1-dimensionaler penalisierter Regressionsspline zur Beschreibung des Effektes der Niederschlag\_Veg

$f_{3a}(\text{NDep\_norm}_{kt})$ :

auf das Niveau der Hg-Alters-Beziehung wirkender 1-dimensionaler penalisierter Regressionsspline zur Beschreibung des Effektes der NDep\_norm.

$\beta_{\text{WHZ}_a}$ ,  $\beta_{\text{NZ}_a}$ :

auf das Niveau der Hg-Alters-Beziehung wirkende Koeffizientenvektoren zur Beschreibung der Effekte der Kategorien des Wasserhaushaltes und der Nährstoffversorgung

$f_{geo\_a}(\text{RW}_k, \text{HW}_k)$ :

auf das Niveau der Hg-Alters-Beziehung wirkender 2-dimensionaler isotroper penalisierter Regressionsspline zur Beschreibung des Effektes der regionalen Lage

$\beta_{1b}$ :

auf die Steigung der Hg-Alters-Beziehung wirkender Koeffizient des transformierten Bestandesalters  $x_{kt}$

$SD[Hg_{kt}]$ :

Standardabweichung der artspezifischen Grundflächenmittelhöhe Hg an Stichprobenpunkt  $k$  zum Zeitpunkt  $t$

$\beta_{0SD}$ :

auf die Standardabweichung der Hg wirkendes Interzept

$f_{1SD}$ :

auf die Standardabweichung der Hg wirkender 1-dimensionaler penalisierter Regressionsspline zur Beschreibung des Alters-Effektes

$g_E^{-1}$ ,  $g_{SD}^{-1}$ :

inverse Link-Funktionen mit  $g_E = \ln(\cdot)$  und  $g_{SD} = \ln(\cdot)$

Alle GAMs wurden in der Statistik-Umgebung R (Version 3.4.4, R CORE TEAM, 2018) unter Verwendung des Paketes mgcv (Version 1.8-24, Wood 2004, 2006, 2011) parametrisiert. Die Modelleffekte wurden in einem ersten Schritt unter Verwendung der Standardeinstellungen des R-Paketes mgcv geschätzt. Anschließend erfolgten gutachterlich teilweise Dimensionsreduktionen und weitere Modifikationen der Originaleffekte, um über den gesamten Datenbereich sachlogisch plausible Effektverläufe zu gewährleisten. Die Grundmuster der Originaleffekte wurden dabei kaum verändert, sondern lediglich partielle Abweichungen von einem monotonen Effektverlauf oder stark oszillierende Verläufe vor allem an den schwach besetzten Datenrandbereichen unterdrückt. Weiterhin wurde ein abnehmender Grenznutzen für monoton steigende Effekte unterstellt.

### 2.3 Kalibrierung

Das geozentrische Modell (Formel 1.2) kann anhand von gemessenen Baumhöhen (phytozentrische Modellkomponente) bzw. daraus abgeleiteter Hg-Werte lokal kalibriert werden. Zu diesem Zweck wurde in einer zweiten Modellstufe ein gemischtes verallgemeinertes lineares Regressionsmodell (GLMM) parametrisiert (Formel 2.1), das die standortsensitiven Schätzungen der originären Parameter 1. Ordnung (Formel 1.2) als Eingangswerte verwendet. Als Datengrundlage wurden dabei nur Stichprobenpunkte verwendet, die mindestens eine Wiederholungsmessung aufweisen, um valide Schätzungen der zufälligen Variabilität zwischen den Stichprobenpunkten zu gewährleisten. Weiterhin wurden alle Stichprobenpunkte ausgeschlossen, in denen ein Generationswechsel auftrat. Gegenüber der expliziten Modellierung der Standardabweichung (Formel 1.3) musste vereinfachend angenommen werden, dass die Hg-Werte Gamma-verteilt sind bzw. einen konstanten Variationskoeffizienten aufweisen, um das GLMM bei der hohen Anzahl an Stichprobenpunkten schätzen zu können. Die Gammaregression mit logarithmischer Verknüpfungsfunktion wird häufig zur Modellierung log-linearer Zusammenhänge verwendet (FAHRMEIR et al., 2009). Zur Parametrisierung wurden die R-Pakete nlme (Version 3.1-137, PINHEIRO et al., 2018) und MASS (Version 7.3-50, VENABLES und RIPLEY, 2002) in der Statistik-Umgebung R (Version 3.4.4, R CORE TEAM, 2018) verwendet.

$$E[Hg_{kt}] = g^{-1}[(\alpha \widehat{A}_{kt} + a_k) + (\beta \widehat{B}_{kt} + b_k) x_{kt}] \quad [2.1]$$

$Hg_{kt}$ :

baumartenspezifische Grundflächenmittelhöhe von Stichprobenpunkt  $k$  zum Zeitpunkt  $t$  mit Hg-Gamma

$\widehat{A}_{kt}, \widehat{B}_{kt}$ :

Geozentrische standortsensitive Schätzung des Niveaus und der Steigung des Hg-Alters-Modells von Stichprobenpunkt  $k$  zum Zeitpunkt  $t$  (Formel 1.2)

$x_{kt}$ :

baumartenspezifisches transformiertes Bestandesalter von Stichprobenpunkt  $k$  zum Zeitpunkt  $t$  (Formel 1.1)

$\alpha, \beta$ :

Koeffizienten zur Zentrierung des mittleren Populationsmodells

$a_k, b_k$ :

Zufallseffekte (Interzept  $a_k$  und Steigungskoeffizient  $b_k$ ) von Stichprobenpunkt  $k$

$g^{-1}$ :

inverse Link-Funktion mit  $g = \ln(\cdot)$

Anschließend lässt sich der Vektor der Zufallseffekte wie folgt vorhersagen:

$$\widehat{\mathbf{b}} = (\mathbf{Z}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{Z} + \mathbf{D}^{-1})^{-1} \mathbf{Z}^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{y} - \boldsymbol{\mu}) \quad [2.2]$$

wobei die Matrizen  $\mathbf{D}$  und  $\mathbf{R}$  durch die entsprechenden Schätzungen aus dem GLMM (Formel 2.1) ersetzt werden. Dabei enthält  $\widehat{\mathbf{D}}_{m \times m}$  die Schätzungen der Varianzen und Kovarianzen der Zufallseffekte und die Diagonalmatrix  $\widehat{\mathbf{R}}_{n \times n}$  die Restfehler-Varianz für die beobachteten Hg-Werte.  $\mathbf{Z}_{n \times m}$  ist die Modellmatrix zur Spezifizierung der Zufallseffekte und  $\mathbf{y}_m$  ist der Vektor beobachteter Hg-Werte und  $\boldsymbol{\mu}_m$  der Vektor der Hg-Schätzungen unter ausschließlicher Verwendung der festen Modelleffekte. Dabei spezifiziert  $n$  die Anzahl Hg-Werte und  $m = 2$  die vorherzusagende Anzahl an Zufallseffekten eines Stichprobenpunktes. Detaillierte Beschreibungen der Modellkalibrierung für die modifizierte Korff-Funktion sind bei LAPPI (1997) und MEHTÄTALO (2004) zu finden. Ausgehend von den Hg-Alters-Entwicklungen auf der Grundlage der geozentrischen Schätzungen (Formel 1.2) kann eine lokale Kalibrierung für einen spezifischen Stichprobenpunkt oder Bestand durchgeführt werden, der nicht Bestandteil der Datengrundlage sein muss, die für die Modellentwicklung verwendet wurde.

### 3. ERGEBNISSE

#### 3.1 Modellgüte

Der Standardfehler der Hg-Schätzungen der geozentrischen Modellkomponente (Formel 1.2) liegt zwischen 2,85 m für Kiefer und 3,44 m für Buche (Tab. 2). Der relative Standardfehler in Relation zur jeweiligen beobachteten Hg liegt zwischen 14,6% für Kiefer und 16,8% für Eiche. Somit weisen Buche und Eiche etwas höhere absolute und relative Standardfehler als Fichte und insbesondere Kiefer auf. Die mittlere Verzerrung der Schätzungen ist für alle Baumarten sehr gering.

Allerdings treten bei einer Residualanalyse nach Klassen von Modellschätzungen insbesondere bei Fichte und

Tab. 2

**Statistische Kenngrößen der geozentrischen Standort-Leistungs-Modelle zur Beschreibung der standortsensitiven Hg-Alters-Beziehung (Formel 1.2).**

**Statistical parameters of the geocentric site-sensitive site-index curves describing the Hg-age relationship (Formula 1.2).**

	Standardfehler [m]	rel. Standardfehler [%]	Verzerrung [m]	erklärte Varianz
Fichte	2,93	15,3	0,0	86,0%
Buche	3,44	16,0	0,0	83,3%
Kiefer	2,85	14,6	0,0	84,1%
Eiche	3,17	16,8	0,0	84,0%

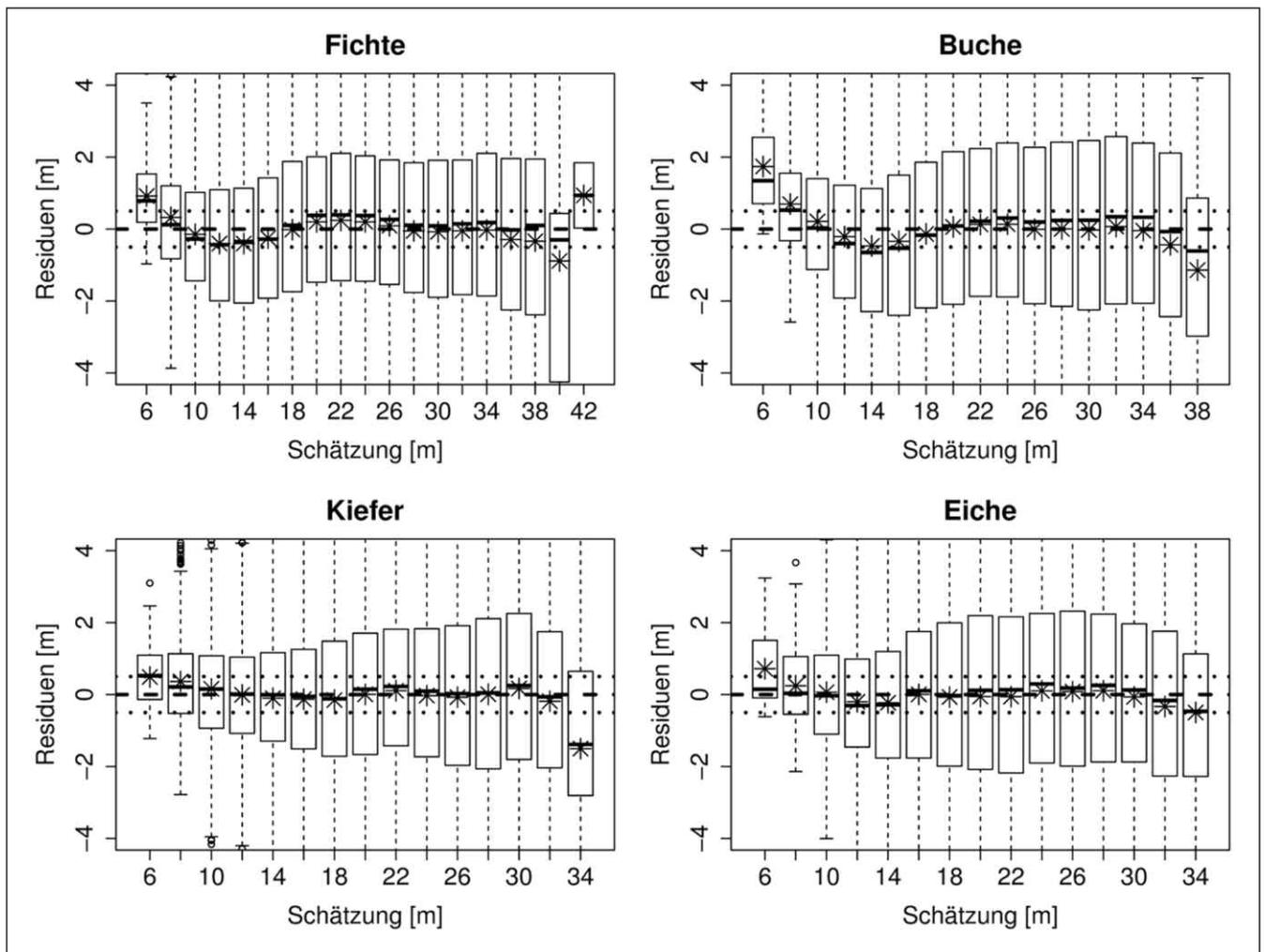


Abb. 1

Boxplots der Residuen über klassierten Modellschätzungen [2m] der geozentrischen Standort-Leistungs-Modelle zur Beschreibung der standortsensitiven Hg-Alters-Beziehung (Formel 1.2). Die waagerechten punktierten Linien markieren positive bzw. negative Abweichungen von 50 cm. Zusätzlich zu den Medianen der Boxplots sind die bedingten Mittelwerte durch Sternchen gekennzeichnet.

Boxplots displaying residuals against classified model predictions [2m] of the geocentric site-sensitive site-index curves (Formula 1.2).

The horizontal dotted lines represent positive or negative deviations of 50 cm.

In addition to the median of the boxplots, the conditional mean values are denoted by asterisks.

Buche gewisse Verzerrungen auf. Für alle Baumarten weist der Bereich geringer Höhenschätzungen die Tendenz zur Unterschätzung auf (Abb. 1), wobei die unterste Klasse jeweils nur schwach mit Daten belegt ist. Im Bereich zwischen 12 und 16 m tritt bei allen Baumarten bis auf Kiefer eine unterschiedlich stark ausgeprägte Tendenz zur Überschätzung auf (Abb. 1). Im Bereich von 20 bis 24 m weisen die Schätzungen für Fichte eine Tendenz zur Unterschätzung auf. Oberhalb dieses Bereiches treten nur noch geringe Verzerrungen auf. Die drei übrigen Baumarten weisen bereits ab 18 m nur noch geringe Verzerrungen auf. Die Verzerrungen der jeweils obersten Klasse sind aufgrund der geringen Datenbelegung nicht

zu bewerten. Insgesamt treten nur ausnahmsweise Verzerrungen von mehr als 50 cm auf (Abb. 1).

### 3.2 Modelleffekte

Die baumartenspezifischen Wirkungen der Modelleffekte auf der Ebene des linearen Prädiktors werden für die Tempsum\_Veg, die Niederschlag\_Veg, die NDep\_norm (Formel 1.2) sowie den Alterseffekt zur Modellierung der heterogenen Standardabweichung (Formel 1.3) dargestellt. Dabei werden neben den Effekten des finalen Modells auch die unbeschränkten Originaleffekte abgebildet (Abb. 2/3). Für die Effekte der

Tempsum\_Veg ( $f_{1a}$ ) resultierten für Fichte und Buche direkt über den gesamten Datenbereich plausible Verläufe (Abb. 2a/2e), während für Kiefer und Eiche gutachterlich Reduktionen der Effektdimensionen vorgenommen wurden (Abb. 3a/3e). Die Effekte der Niederschlag\_Veg ( $f_{2a}$ ) wurden für alle Baumarten unter Berücksichtigung der originalen nicht beschränkten Effektverläufe bei baumartenspezifischen oberen Grenzwerten (Fichte: 540 mm, Buche: 450 mm, Kiefer: 485 mm, Eiche: 435 mm) begrenzt, wobei alle höheren Beobachtungen vor der Parametrisierung auf diese Grenzwerte zurückgesetzt wurden. Zusätzlich erfolgten mehr oder weniger starke Dimensionsreduktionen der Effekte (Abb. 2b/2f/3b/3f). Beide Maßnahmen waren notwendig, um monoton ansteigende Effektverläufe mit tendenziell abnehmendem Gradienten bzw. einem „abnehmendem Grenznutzen“ zu gewährleisten, die aus Gründen biologischer Plausibilität als Nebenbedingungen definiert wurden. Problematisch waren in diesem Zusammenhang vor allem unplausibel oszillierende Effektverläufe im Bereich sehr hoher Niederschläge, die nur auf einer geringen Datengrundlage basieren. Die Effektverläufe der NDep\_norm ( $f_{3a}$ ) unter Verwendung der Standardeinstellungen wurden für Fichte und Buche durch lineare Effekte der logarithmierten NDep\_norm ersetzt, um graduelle Abweichungen von einem monoton ansteigendem Effekt mit abnehmendem Gradienten zu unterdrücken (Abb. 2c/2g). Bei Kiefer und Eiche erfolgte zu diesem Zweck eine Dimensionsreduktion der Originaleffekte und bei Kiefer zusätzlich die Definition eines oberen Grenzwertes von 1,7 (Abb. 3c/3g). Die Originaleffekte zur Modellierung der heterogenen Standardabweichung wurden für alle Baumarten parametrisch approximiert (Formel 1.3 a-c), um monoton steigende Effekte zu erzwingen (Abb. 2d/2h/3d/3h).

Bei der Interpretation der Modelleffekte und ihrer Amplituden muss beachtet werden, dass die Baumarten wie bereits beschrieben, teilweise deutlich unterschiedliche Standortbereiche abdecken. Unterschiedliche Effektamplituden und -muster können somit sowohl aufgrund dieser unterschiedlichen Standortamplituden als auch aufgrund der baumartenspezifischen Wachstumsreaktion resultieren. Die folgenden Beschreibungen beziehen sich auf die Effekte der finalen Modellbildung mit teilweiser Beschränkung der Originaleffekte.

Die Effekte der Tempsum\_Veg ( $f_{1a}$ ) weisen für Fichte und Buche relativ deutliche und für Kiefer einen schwach ausgeprägten Optimumverlauf mit relativ ähnlichen Maxima bei ca. 2550 °C auf (Abb. 2a/2e/3a). Demgegenüber weist die Eiche einen monoton steigenden Effekt mit abnehmendem Gradienten auf (Abb. 3e). Somit würden Fichte und Buche unter sonst konstanten Wuchsbedingungen auf etlichen Standorten und in Abhängigkeit vom Ausmaß des Klimawandels mittel- bis langfristig mit mehr oder weniger starken temperaturbedingten Leistungsrückgängen reagieren. Bei Kiefer würden diese Wachstumsdepressionen jenseits von ca. 2550 °C deutlich geringer ausfallen und Eiche würde innerhalb ihres Parametrisierungsbereiches auf jede Temperaturerhöhung mit - allerdings tendenziell abnehmenden - Wachstumssteigerungen reagieren.

Die Effekte der Niederschlag\_Veg ( $f_{2a}$ ) weisen für alle vier Baumarten einheitlich monoton steigende Verläufe mit tendenziell abnehmendem Gradienten auf. Während aber bei Kiefer und Eiche schon unterhalb der gutachterlich definierten oberen Grenzwerte asymptotische Verläufe (Abb. 3b/3f) zu beobachten sind, weist Fichte bis zu einem deutlich höheren Grenzwert von 540 mm noch relativ hohe Steigungsraten auf (Abb. 2b). Auch bei Buche ist ein bis zum spezifischen Grenzwert von 450 mm ansteigender Effekt zu erkennen (Abb. 2f). Sollten die Niederschlagssummen in der Vegetationsperiode aufgrund des Klimawandels abnehmen, so würde das unter sonst konstanten Wuchsbedingungen bei allen vier Baumarten zu Leistungsrückgängen führen. Dabei weisen Fichte und vor allem Kiefer unterhalb von 350 mm deutlich größere Effektamplituden als Buche und Eiche auf, was aber insbesondere bei Kiefer vor allem durch den höheren Anteil sehr niederschlagsarmer Standorte in der Datenbasis verursacht sein dürfte (Tab. 1). Auch Eiche weist im Bereich sehr niederschlagsarmer Standorte deutlich höhere Anteile als Buche und Fichte auf (Tab. 1). Wenn ihre Sensitivität gegenüber nachlassenden Niederschlägen dennoch deutlich geringer ist als die der Fichte und ähnlich der der Buche, so deuten die Modellergebnisse auf eine relativ hohe Trockenheitstoleranz der Eiche hin. Da sie gleichzeitig als einzige Baumart einen monoton steigenden Effekt der Tempsum\_Veg aufweist, kann die Eiche unter Leistungsaspekten als vergleichsweise klima-tolerante Baumart beurteilt werden.

Die Effekte der NDep\_norm ( $f_{3a}$ ) weisen für alle vier Baumarten monoton steigende Effekte auf. Dabei wird bei Kiefer bereits ab dem ca. 1,25-fachen des altersbedingten Erwartungswertes eine Sättigung erreicht (Abb. 3c). Bei den drei anderen Baumarten tritt kein Sättigungseffekt auf, wobei die Effektamplitude der Eiche (Abb. 3g) insgesamt etwas größer ist, als die von Fichte und Buche (Abb. 2c/2g). Da aber gleichzeitig die baumartenspezifischen Datenbereiche der Stickstoffdeposition relativ ähnlich sind, kann unterstellt werden, dass die Eiche im Mittel relativ am stärksten von den anthropogen verursachten Stickstoffdepositionen profitiert hat und profitiert. Durch die Normierung der Stickstoffdeposition führen gleich hohe absolute Werte zu umso höheren Wachstumssteigerungen, je geringer der altersbedingte Erwartungswert ist.

Vergleicht man die Effekte der Standortvariablen, so gilt einheitlich, dass die Amplituden der Tempsum\_Veg deutlich größer sind als die der NDep\_norm und der Niederschlag\_Veg. Dabei sind für Fichte, Buche und Eiche die Effektamplituden der NDep\_norm größer als die der Niederschlag\_Veg. Kiefer weist einen größeren Effekt der Niederschlag\_Veg als der NDep\_norm auf. Die Auswirkungen des Klimawandels werden neben den Effektamplituden aber natürlich auch durch die tatsächlich eintretenden Standortveränderungen bestimmt werden.

Die parametrischen Approximationen des Alters-Effektes zur Beschreibung der Standardabweichung (Formel 1.3 a, b, c) führen bei allen vier Baumarten zu einer monotonen Zunahme der Varianz mit zunehmenden

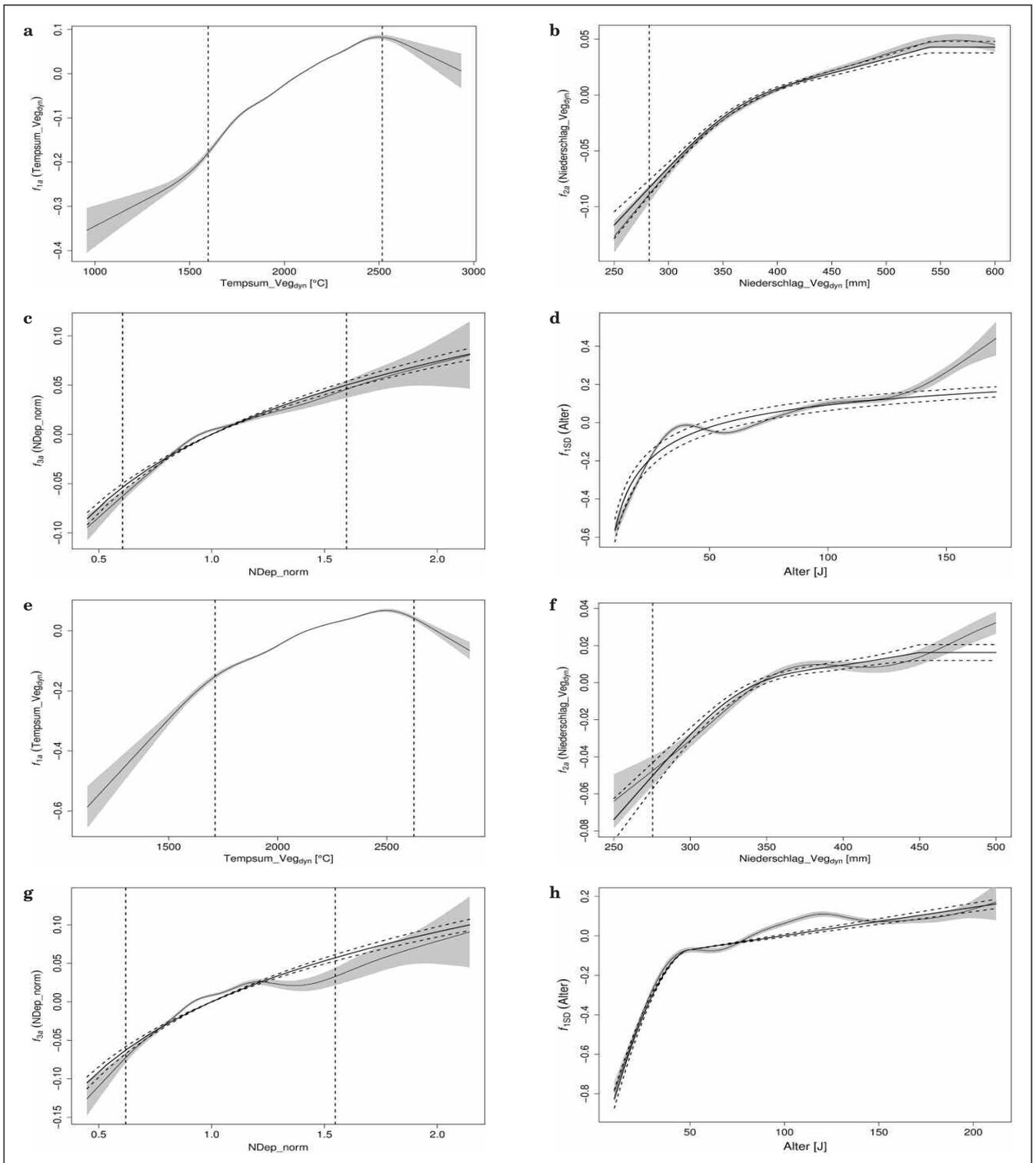


Abb. 2

Unbeschränkte original Modelleffekte (mit grau schattierten Konfidenzintervallen) der Temperatursumme [Fichte a) Buche e)] und der Niederschlagssumme [Fichte b) Buche f)] in der Vegetationsperiode sowie der normierten Jahresstickstoffdeposition [Fichte c) Buche g)] auf das Niveau des Erwartungswertes (Formel 1.2) der Hg-Alters-Beziehung sowie des Alters auf die Standardabweichung der Hg-Alters-Beziehung [Fichte d) Buche h)] (Formel 1.3). Senkrechte gestrichelte Linien markieren die 1 und 99%-Perzentile der Datenbasis. Die in den final ausgewählten Modellen anstelle der originalen Effekte verwendeten Approximationen sind durch schwarze durchgezogene und die zugehörigen Konfidenzintervalle durch schwarz gestrichelte Linien dargestellt.

Unconstrained original model effects (with gray shadowed areas denoting confidence intervals) of the accumulated temperature [spruce a) beech e)] and the accumulated precipitation [spruce b) beech f)] in vegetation period, as well as the standardized annual nitrogen deposition [spruce c) beech g)] on the level of the expectation value of the Hg-age relationship (Formula 1.2) and the age effect on the standard deviation of the Hg-age relationship [spruce d) beech h)] (Formula 1.3).

The vertical dotted lines mark the 1 and 99 % percentiles of the data. The approximations used in the final models instead of the original effects are displayed as solid black lines, with the confidence intervals denoted by black dotted lines.

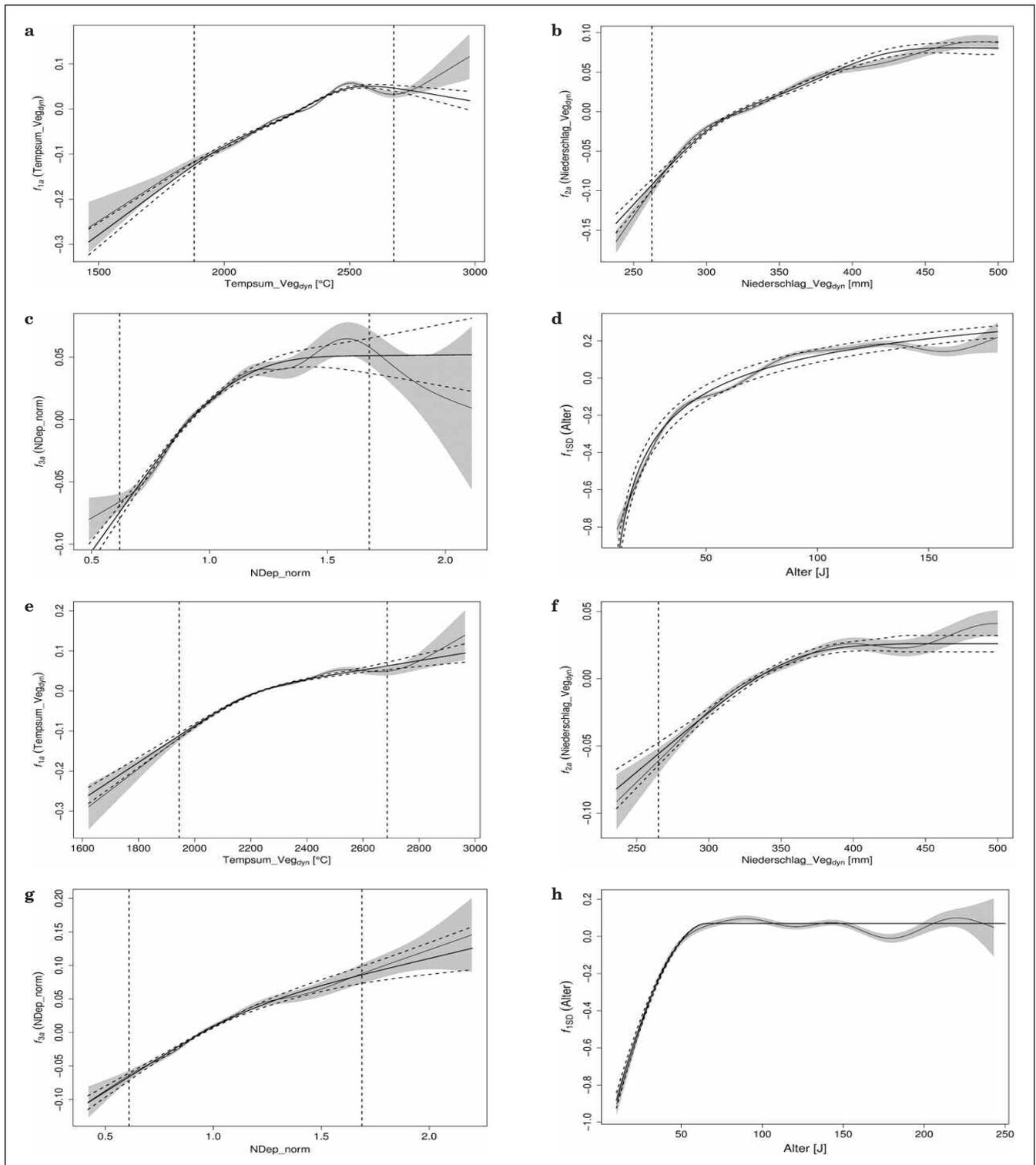


Abb. 3

Unbeschränkte originale Modelleffekte (mit grau schattierten Konfidenzintervallen) der Temperatursumme [Kiefer a) Eiche e)] und der Niederschlagssumme [Kiefer b) Eiche f)] in der Vegetationsperiode sowie der normierten Jahresstickstoffdeposition [Kiefer c) Eiche g)] auf das Niveau des Erwartungswertes (Formel 1.2) der Hg-Alters-Beziehung sowie des Alters auf die Standardabweichung der Hg-Alters-Beziehung [Kiefer d) Eiche h)] (Formel 1.3). Senkrechte gestrichelte Linien markieren die 1 und 99%-Perzentile der Datenbasis. Die in den final ausgewählten Modellen anstelle der originalen Effekte verwendeten Approximationen sind durch schwarze durchgezogene und die zugehörigen Konfidenzintervalle durch schwarz gestrichelte Linien dargestellt.

Unconstrained original model effects (with gray shadowed areas denoting confidence intervals) of the accumulated temperature [pine a) oak e)] and the accumulated precipitation [pine b) oak f)] in vegetation period, as well as the standardized annual nitrogen deposition [pine c) oak g)] on the level of the expectation value of the Hg-age relationship (Formula 1.2) and the age effect on the standard deviation of the Hg-age relationship [pine d) oak h)] (Formula 1.3).

The vertical dotted lines mark the 1 and 99 % percentiles of the data. The approximations used in the final models instead of the original effects are displayed as solid black lines, with the confidence intervals denoted by black dotted lines.

Tab. 3

Werte der Standortvariablen für die Sensitivitätsanalysen  
des standortsensitiven Bonitätsfächers (Formel 1.2).  
Values of the site variables used for the sensitivity analysis  
of the site-sensitive site index curves (Formula 1.2).

Temperatursumme in Vegetations- periode [°C]	Niederschlagssumme in Vegetations- periode [mm]	Jahres-N- Deposition [eq/ha/a]	Nährstoffziffer	Wasserhaushaltsziffer Tiefland
2300	350	1350	3+ (mesotroph) niedersächsisch/ schleswig-holsteinisches Kartierschema	mäßig frisch niedersächsisch/ schleswig-holsteinisches Kartierschema

dem Alter wobei der Gradient abnimmt (Abb. 2d, 2h, 3d, 3h).

(Formeln [1.3a], [1.3b] und [1.3c] siehe unten).

Die Approximationen wurden durch visuellen Vergleich mit den originalen Splinefunktionen  $f_{1SD(.)}$  (Formel 1.3) bestimmt, wobei die konstanten Parameter in den linearen Prädiktoren für Buche und Eiche (Formel 1.3 b, c) gutachtlich gesetzt wurden. Für Eiche und Kiefer resultieren die Approximationen in marginalen Verbesserungen und für Fichte und Buche in marginalen Verschlechterungen der Modellgüte auf der Grundlage des bayesianischen Informationskriteriums (BURNHAM und ANDERSON, 2004). Buche und noch mehr Eiche weisen sehr starke Gradienten bis zu einem Alter von ca. 50 Jahren auf, wohingegen in höherem Alter nur noch eine geringe (Buche) bzw. keine (Eiche) Zunahme zu beobachten ist (Abb. 2h/3h). Bei Fichte und Kiefer ist der Anstieg insgesamt gleichmäßiger mit einem im Vergleich zu Buche und Eiche geringeren Gradienten vor Alter 50 und einer schwächer nachlassenden Zunahme danach (Abb. 2d/3d).

Im Zuge der Modellselektion stellte sich heraus, dass eine Vereinheitlichung der WHZ und NZ der vier vorliegenden Standortkartierungsverfahren nicht möglich bzw. sinnvoll ist. Anhand der Effektschätzungen für einzelne Standortkategorien sowie Amplituden für bspw. die Gruppe der terrestrischen Berglandstandorte wurde

deutlich, dass für nominell gleiche Kategorien teilweise sehr unterschiedliche Modelleffekte geschätzt werden (Appendix). Als Ursache können sowohl direkte Verfahrensunterschiede als auch tradierte Vorgehensweisen der gutachtlichen Standortkartierung vermutet werden. Versuche anstelle der kategorischen WHZ auf terrestrischen Standorten eine regionalisierte nutzbare Feldkapazität als Kovariable zu verwenden, waren bisher nicht erfolgreich. Es resultierten dabei wenig sensitive und teilweise unplausible Effektverläufe. Demgegenüber weisen die Effekte der kategorischen WHZ und NZ zum Teil deutliche Amplituden auf (Appendix). Dies wird beispielsweise bei allen vier Baumarten an den Schätzungen für die WHZ in Hessen und die WHZ im niedersächsischen Bergland sowie die NZ in Niedersachsen bzw. Schleswig-Holstein deutlich. Durch die nach statistischen und sachlogischen Gesichtspunkten durchgeführte Zusammenfassung der teilweise sehr fein differenzierten Originalkategorien werden für terrestrische Standorte ausnahmslos monoton abnehmende Effekte von „nachhaltig frisch/vorratsfrisch“ nach „sommer-trocken/trocken“ geschätzt. Für grund- und stauwasserbeeinflusste Standorte erfolgten ebenfalls Zusammenfassungen der Originalkategorien, wobei die resultieren Effekte weniger einheitliche Muster aufweisen und auch deutlichere Unterschiede zwischen den Baumarten auf-treten. Die NZ weisen in Abhängigkeit von Baumart und Kartierverfahren teilweise monoton ansteigende Effekte

$SD[Hg_{kt}] = 0.01 + g_{SD}^{-1} [\beta_{0SD} + \beta_{1SD} \frac{1}{\ln(\text{Alter}_{kt})}]$	für Fichte und Kiefer	[1.3a]
$SD[Hg_{kt}] = 0.01 + g_{SD}^{-1} [\beta_{0SD} + \beta_{1SD}(50 - \text{Alter}_{kt})^{1.7} Z_1 + \beta_{2SD}(\text{Alter}_{kt} - 50) Z_2]$	für Buche mit:	$Z_1 = \begin{cases} 1, & \text{wenn } \text{Alter} \leq 50 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$ [1.3b]
		$Z_2 = \begin{cases} 1, & \text{wenn } \text{Alter} > 50 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$
$SD[Hg_{kt}] = 0.01 + g_{SD}^{-1} [\beta_{0SD} + \beta_{1SD} (65 - \text{Alter}_{kt})^{1.8} Z]$	für Eiche mit:	$Z = \begin{cases} 1, & \text{wenn } \text{Alter} \leq 65 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$ [1.3c]

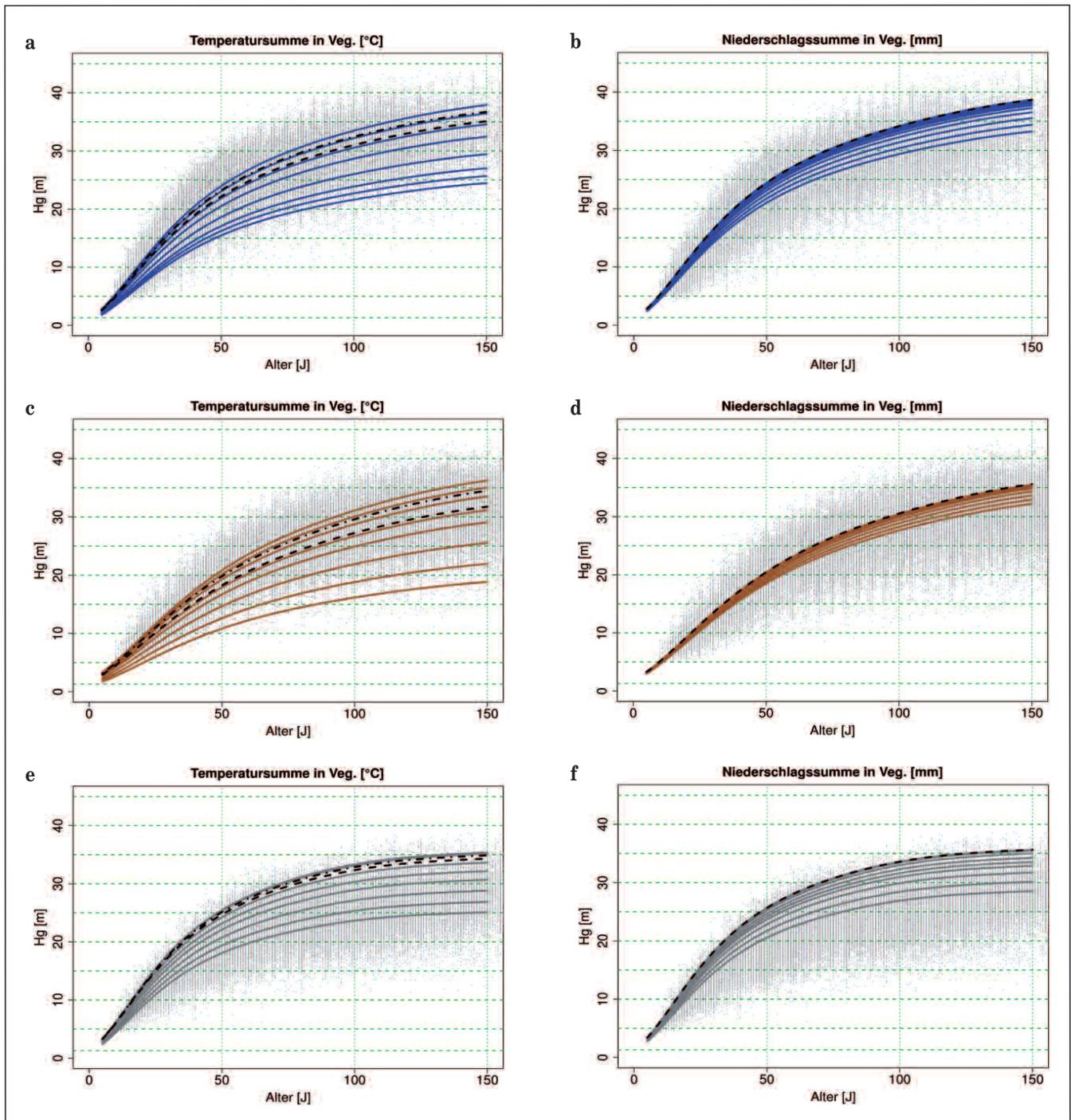


Abb. 4

Sensitivitätsanalysen anhand von geozentrisch geschätzten Hg-Alters-Beziehungen für Fichte, Buche und Kiefer, wobei die Temperatursumme (linke Spalte) bzw. die Niederschlagssumme in der Vegetationsperiode (rechte Spalte) variiert werden und die übrigen Wachstumsfaktoren konstant auf mittlere Bedingungen (Tab. 3) gesetzt werden.

Die Flächen stellen Schätzungen für die Variation der Temperatur- bzw. Niederschlagssumme in der Vegetationsperiode in zehn äquidistanten Schritten zwischen den jeweiligen Minimum- und Maximumwerten der baumartenspezifischen Datengrundlagen dar. Die Variationsschritte 1-8 (Temperatursumme) bzw. 1-9 (Niederschlagssumme) sind in blau (Fichte), braun (Buche) und grau (Kiefer) dargestellt. Die schwarz gestrichelte Linie stellt jeweils Schätzungen für die Maximalwerte dar. Für die Temperatursumme ist zusätzlich die Schätzung für den 9-ten Äquidistanzschritt durch die jeweils schwarz punktgestrichelte Linie hervorgehoben. Die grauen Punkte sind die Beobachtungen der Parametrisierungsgrundlage.

Sensitivity analyses using geocentric predictions of the Hg-age relationship for spruce, beech and pine.

Accumulated temperature (left) and accumulated precipitation (right) in vegetation period are varied, with the other growth factors held constant at mean conditions (Tab. 3). The curves represent predictions for varied accumulated temperature or precipitation in 10 equidistant steps between the respective minimum and maximum values in the species specific databases. Steps 1-8 (accumulated temperature) or 1-9 (accumulated precipitation) are shown in blue (spruce), brown (beech) and grey (pine). The black dotted lines denote predictions for the respective maximum values. For the accumulated temperatures, the prediction of the 9<sup>th</sup> equidistance step is marked by a black point-dotted line. The grey points are the observations used for parametrization.

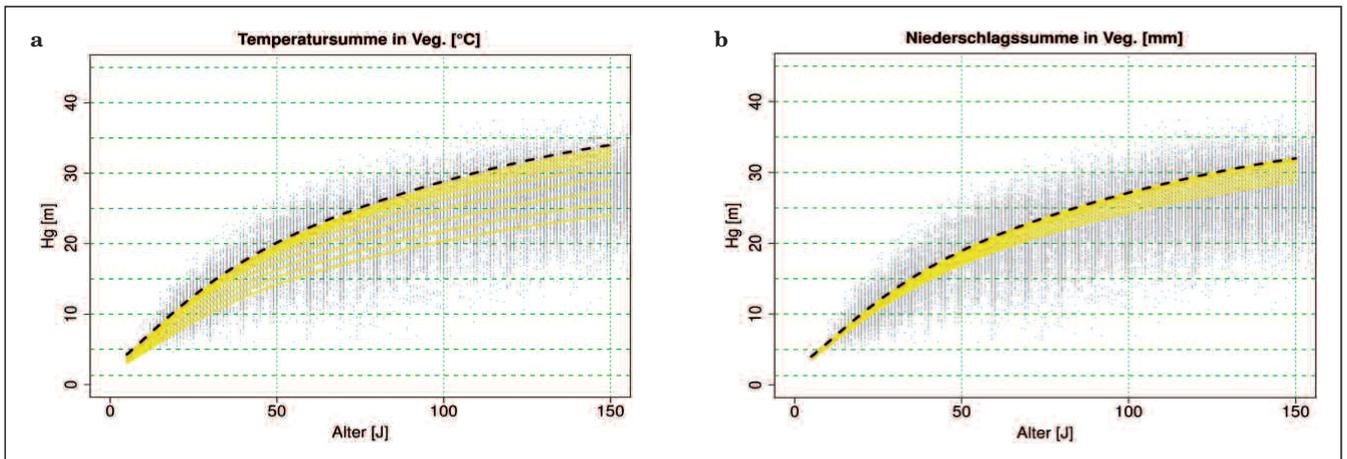


Abb. 5

Sensitivitätsanalysen anhand von geozentrisch geschätzten Hg-Alters-Beziehungen für Eiche, wobei die Temperatursumme a) bzw. die Niederschlagssumme in der Vegetationsperiode b) variiert werden und die übrigen Wachstumsfaktoren konstant auf mittlere Bedingungen (Tab. 3) gesetzt werden. Die Fächer stellen Schätzungen für eine Variation der Temperatur bzw. Niederschlagssumme in der Vegetationsperiode in 10 äquidistanten Schritten zwischen den Minimum- und Maximumwerten in der Datenbasis der Eiche dar. Die Variationsschritte 1-9 sind in gelb dargestellt. Die schwarz gestrichelte Linie stellt jeweils Schätzungen für die Maximalwerte dar. Die grauen Punkte sind die Beobachtungen der Parametrisierungsgrundlage.

Sensitivity analyses using geocentric predictions of the Hg-age relationship for oak. Accumulated temperature (left) and accumulated precipitation (right) in vegetation period are varied, with the other growth factors held constant at mean conditions (Tab. 3). The curves represent predictions for varied accumulated temperature or precipitation in 10 equidistant steps between the respective minimum and maximum values in the oak database. Steps 1-9 are shown in yellow. The black dotted lines denote predictions for the respective maximum values. The grey points are the observations used for parametrization.

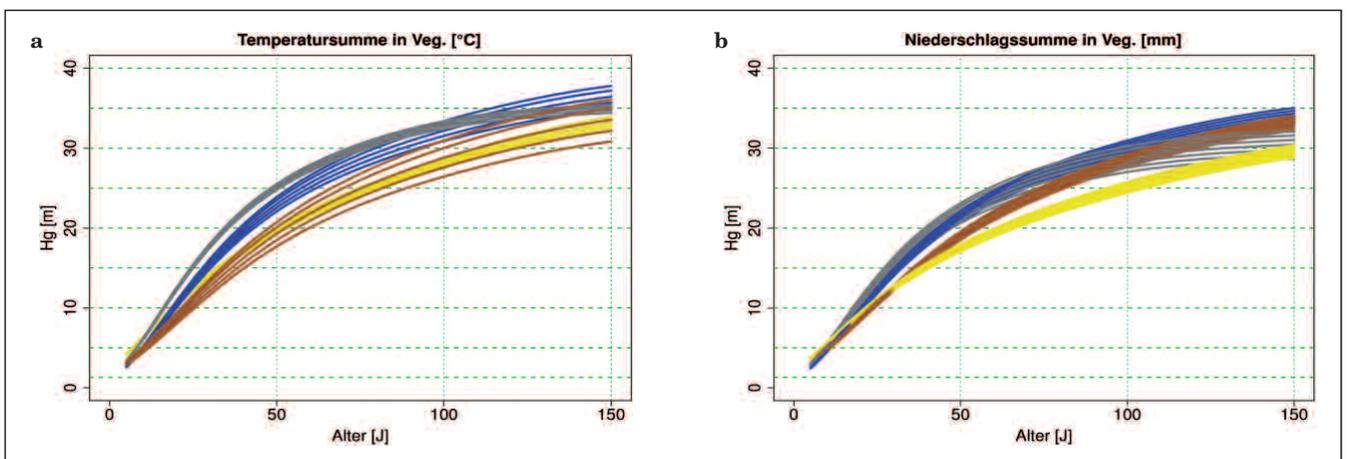


Abb. 6

Sensitivitätsanalysen anhand von geozentrisch geschätzten Hg-Alters-Beziehungen für Fichte (blau), Buche (braun), Kiefer (grau) Eiche (gelb), für einheitliche Variationsbereiche der Temperatursumme [2550 °C, 2950 °C] a) bzw. der Niederschlagssumme [240 mm, 300 mm] in der Vegetationsperiode b). Die übrigen Wachstumsfaktoren sind konstant auf mittlere Bedingungen (Tab. 3) fixiert. Die Hg-Alters-Verläufe verlagern sich bei Fichte, Buche und Kiefer mit steigender Temperatursumme von der jeweils obersten zur untersten Kurve. Bei Eiche verlagern sich die Kurven mit steigender Temperatursumme von unten nach oben. Die Hg-Alters-Verläufe verlagern sich mit abnehmender Niederschlagssumme einheitlich für alle vier Baumarten von der jeweils obersten zur untersten Kurve b).

Sensitivity analyses using geocentric predictions of the Hg-age relationship for spruce (blue), beech (brown), pine (grey) and oak (yellow) for homogenous ranges of the accumulated temperature [2550 °C, 2950 °C] a) or the accumulated precipitation [240 mm, 300 mm] in the vegetation period b). The remaining growth factors are held constant at mean conditions (Tab. 3). The curves of the Hg-age relationship for spruce, beech and pine shift with increasing accumulated temperature from the respective upper to the lowest. For oak, the curves shift with increasing accumulated temperature from the lowest to the upper. The Hg-age curves for all 4 tree species consistently shift with decreasing accumulated precipitation from the respective upper to the lowest b).

von „oligotroph“ nach „eutroph/kalk-eutroph“ teilweise aber auch Optima im „gut mesotrophen“ bzw. „eutrophen“ Bereich auf. Die Bezeichnungen werden hier unabhängig von den jeweiligen länderspezifischen Kategorien (Appendix) als Sammelbegriffe verwendet.

### 3.3 Sensitivitätsanalyse (standortsensitiver Bonitätsfächer)

Anhand der Modelleffekte lässt sich die Wirkung verschiedener Standortvariablen auf die Wuchsleistung qualitativ interpretieren. Quantitative Aussagen bzgl. der geschätzten Amplituden und Gradienten sind zwar möglich, für Aussagen auf der Ebene der Mittelhöhe müssen jedoch Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden. Durch die exponentiell multiplikative Wirkung der verschiedenen Variablen gelten Schätzungen auf dieser Ebene – im Gegensatz zu den Modelleffekten – immer nur für bestimmte Kombinationen aller Standortfaktoren. Im Folgenden werden daher Schätzungen unter ceteris paribus Bedingungen durchgeführt (Tab. 3), wobei für alle Baumarten die gleichen konstanten

Nebenbedingungen im mittleren Standortbereich verwendet werden.

Durch die Variation einer einzigen Standortvariablen lässt sich ihre Wirkung auf die Entwicklungsgänge der Hg verdeutlichen. Neben den konstanten Nebenbedingungen werden das Alter und exemplarisch jeweils die Tempsum\_Veg bzw. die Niederschlag\_Veg innerhalb der baumartenspezifischen Datenspanne in zehn äquidistanten Schritten zwischen dem Minimum und Maximum variiert (Tab. 1). Obwohl somit bei eindimensionaler Betrachtung keine Schätzungen im Extrapolationsbereich durchgeführt werden, können Variablenkombinationen auftreten, die in der Parametrisierungsgrundlage nicht vorkommen. Das gilt vor allem für die Kombination der Tieflandskategorie der Wasserhaushaltsziffer mit niedrigen Temperatursummen- und hohen Niederschlagswerten. Da der Effekt der Kategorie „mäßig frisch Tiefland“ jeweils ungefähr im Mittel der baumartenspezifischen Effektamplituden liegt und als konstanter Wert in die Sensitivitätsanalyse eingeht, erfolgen jedoch auch für Extrapolationen keine grund-

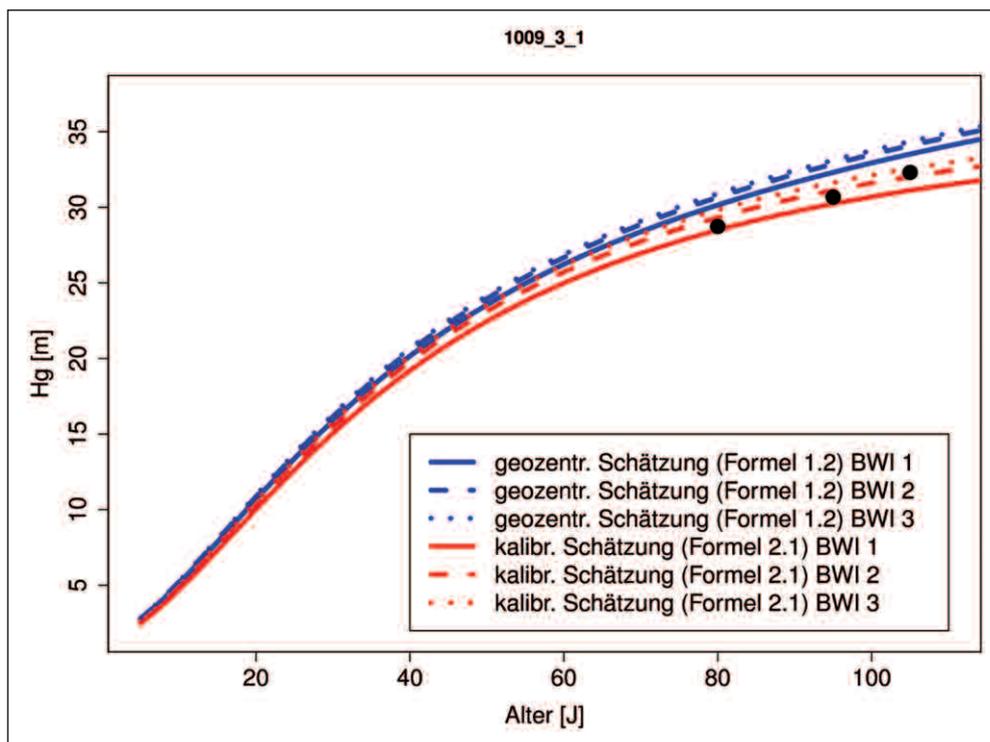


Abb. 7

Geozentrische Schätzungen von Hg-Alters-Verläufen unter Verwendung zeitveränderlicher (Tempsum\_Veg, Niederschlag\_Veg, NDep\_norm) und konstanter Standortparameter (WHZ, NZ) (blaue Linien) und zusätzlich anhand von Hg-Alters-Paaren (schwarze Punkte) kalibrierte Verläufe (rote Linien) für einen mit Fichte bestockten Stichprobenpunkt der BWI. Die Schichtung der Linien resultiert aus den Unterschieden der zeitveränderlichen Kovariablen zu den drei Inventurzeitpunkten.

Geocentric predictions of the Hg-age relationship using temporally dynamic covariates (Tempsum\_Veg, Niederschlag\_Veg, NDep\_norm) and constant site parameters (WHZ, NZ) (blue lines) and related curves (red lines) calibrated using Hg-age pairs (black points) for a BWI sample plot stocked with spruce. The layering of the curves results from the difference of the temporally dynamic covariates at the 3 inventory dates.

Tab. 4

Statistische Kenngrößen der kombiniert geo-phytozentrischen Standort-Leistungs-Modelle zur Beschreibung der standortsensitiven Hg-Alters-Beziehung (Formel 2.1).

Statistical parameters of the combined geo-phyto-centric site index curves describing the Hg-age relationship (Formula 2.1).

	Standardfehler [m]	rel. Standardfehler [%]	Verzerrung [m]
Fichte	0,97	4,2	0,0
Buche	1,29	5,3	0,0
Kiefer	1,06	4,8	0,0
Eiche	1,19	5,4	0,0

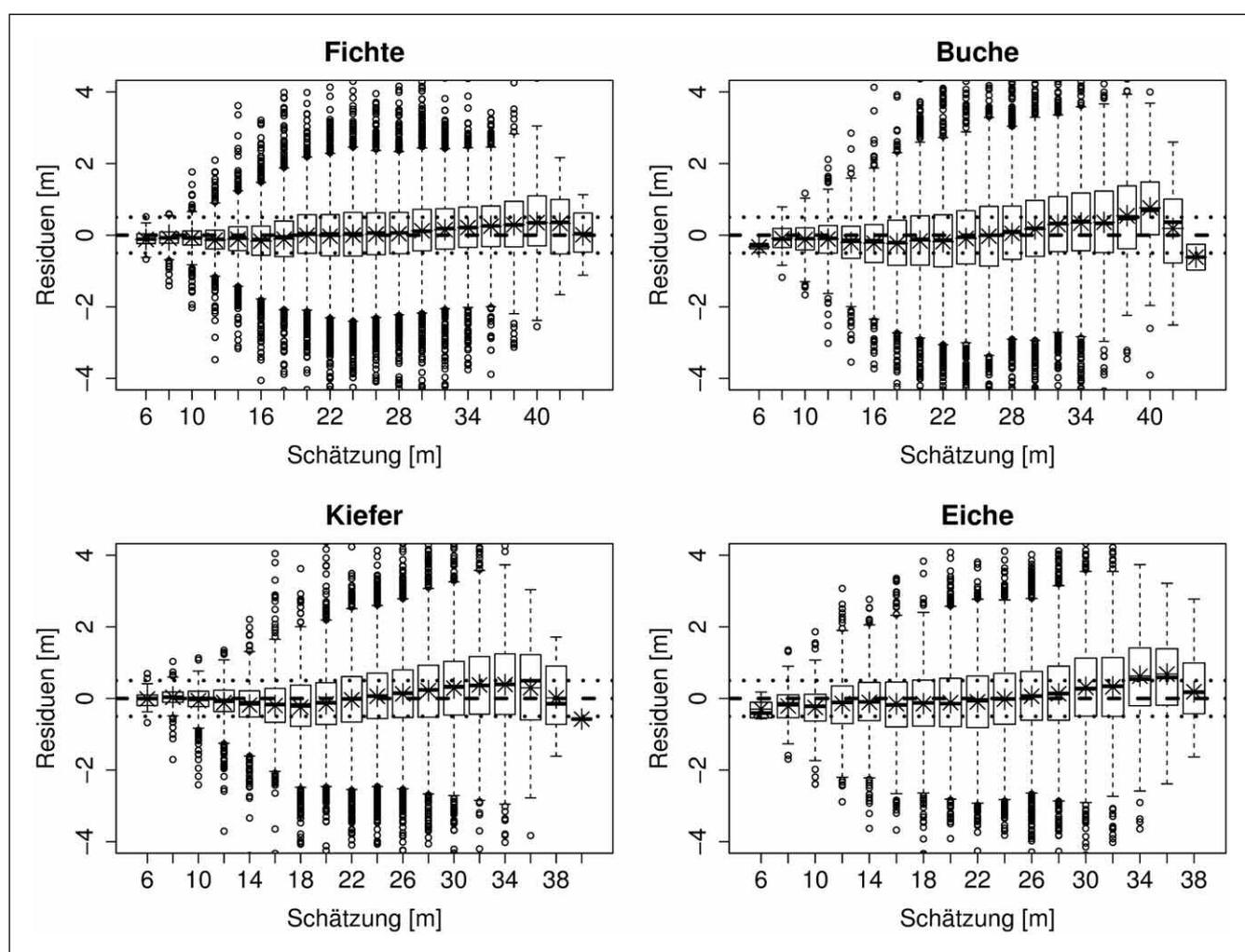


Abb. 8

Boxplots der Residuen über klassierten Modellschätzungen [2m] der kombiniert geophytozentrischen Standort-Leistungs-Modelle zur Beschreibung der standortsensitiven Hg-Alters-Beziehung (Formel 2.1). Die waagerechten punktierten Linien markieren positive bzw. negative Abweichungen von 50 cm. Zusätzlich zu den Medianen der Boxplots sind die bedingten Mittelwerte durch Sternchen gekennzeichnet.

Boxplots of residuals against classified model predictions [2m] of the combined geo-phyto-centric site-sensitive site-index curves (Formula 2.1). The horizontal dotted lines represent positive or negative deviations of 50 cm. In addition to the median of the boxplots, the conditional mean values are denoted by asterisks.

sätzlich unplausiblen Schätzungen (Abb. 4/5). Die resultierenden standortsensitiven Entwicklungsgänge sind spezielle Realisationen der Gesamtmenge aller möglichen Entwicklungsgänge und somit des gesamten standortsensitiven Bonitätsfächers innerhalb der Standortamplitude einer Baumart. Würden anstelle der mittleren Nebenbedingungen (Tab. 3) günstigere Standortbedingungen unterstellt, würde sich der aufgespannte Fächer insgesamt hin zu größeren Hg-Werten bzw. Höhenbonitäten verlagern. Gleichzeitig würde durch die exponentiell multiplikative Wirkung der Standortfaktoren eine noch etwas größere Auffächerung erfolgen. Entsprechend gegenläufige Muster von Modellschätzungen wären für ungünstigere als die unterstellten Standortbedingungen zu erwarten.

Für einen besseren Baumartenvergleich der Wachstumsreaktionen im besonders warmen bzw. trockenen Standortbereich, erfolgte zusätzlich eine Sensitivitätsanalyse für einheitliche Datenbereiche der Tempsum\_veg bzw. Niederschlag\_Veg (Abb. 6). Die Tempsum\_Veg wurde im Intervall [2550°C, 2950°C] mit einer Schrittweite von 100°C variiert. Für Fichte, Buche und Kiefer erfolgt die Schätzung damit für Werte oberhalb ihrer spezifischen Optimalwerte (Abb. 2a/2e/3a). Die Niederschlag\_Veg wurde im Intervall [240, 300mm] mit einer Schrittweite von 10mm variiert.

Aufgrund der großen höhenzonalen Standortamplitude der Fichte werden die zugehörigen Realisationen von Hg-Alters-Entwicklungsgängen relativ weit aufgefächert (Abb. 4a). Die zugehörigen absoluten Mittelhöhenbonitäten variieren zwischen 21,6m und 33,5m. Es wird deutlich, dass die Amplitude der Entwicklungsgänge aufgrund der unterschiedlichen Effektamplituden (Abb. 2a/2b) durch die Tempsum\_Veg deutlich weiter aufgespannt wird (Abb. 4a), als durch die Niederschlag\_Veg (Abb. 4b, Bonitätsrahmen [29,4m, 34,5m]). Der Optimumverlauf des Modelleffektes der Tempsum\_Veg wird daran deutlich, dass die Entwicklungsgänge für die beiden obersten Temperaturwerte (schwarz (punkt-) gestrichelt) unterhalb der obersten Kurve des 8-ten Äquidistanzschrittes verlaufen. Diese oberste Kurve liegt dabei für Fichte, Buche und Kiefer jeweils nur marginal unter der Kurve, die dem maximalen Effektwert entspricht. Bei Variation der Niederschlagssumme wird die maximale Leistung bei der Kappungsgrenze von 540mm Niederschlag\_Veg bzw. allen höheren Werten erreicht (Abb. 4b, schwarz gestrichelte Linie), was die Wirkung des monoton ansteigenden Effektes (Abb. 2b) widerspiegelt.

Die grundsätzlichen Muster der standortsensitiven Hg-Alters-Entwicklungsgänge der Buche ähneln denen der Fichte, entsprechend der Ähnlichkeit der zugehörigen Effektverläufe (Abb. 2e/f). Allerdings sind die temperaturbedingten Entwicklungsgänge noch weiter aufgefächert (Abb. 4c, Bonitätsrahmen [16,2m, 31,1m]), obwohl die Spreitung des Datenbereiches der Tempsum\_Veg bei Buche deutlich geringer ist (Tab. 1). Dieser Unterschied kann durch die größere Empfindlichkeit der Buche gegenüber geringeren Temperatursummen erklärt werden. Gleichzeitig liegen die Entwicklungs-

gänge für die beiden höchsten Temperaturwerte (schwarz (punkt-) gestrichelt) deutlicher unter dem obersten Verlauf des 8-ten Äquidistanzschrittes als die entsprechenden Verläufe bei Fichte. Da sich Fichte und Buche in diesem Datenbereich nur wenig unterscheiden (Tab. 1), kann eine etwas höhere Toleranz der Fichte gegenüber hohen Temperatursummen unterstellt werden. Demgegenüber ist die niederschlagsbedingte Spreitung (Bonitätsrahmen [27,6m, 30,5m]) bei der Buche deutlich geringer (Abb. 4d), was zum einen auf die geringere Kappungsgrenze bei 450mm, vor allem aber auf die geringere Sensitivität im Bereich geringer Niederschläge zurückzuführen ist. Die Datenbasis der Buche deckt hier sogar etwas extremere Standorte ab als die der Fichte (Tab. 1), so dass die geringere Sensitivität nicht auf unterschiedliche Datenbereiche zurückgeführt werden kann. Die größere Sensitivität der Buche über der Temperatur- als über der Niederschlagsamplitude ist somit noch deutlicher ausgeprägt als bei Fichte. Die unterschiedlichen Reaktionsmuster im warmen und trockenen Bereich werden auch bei der Sensitivitätsanalyse mit einheitlichem Variationsbereich deutlich: Buche zeigt mit steigenden Temperatursummen deutlich stärkere (Abb. 6a) und mit sinkenden Niederschlagssummen deutlich geringere (Abb. 6b) Wachstumsrückgänge als Fichte.

Der nur schwach ausgeprägte Optimumverlauf des Effektes der Tempsum\_Veg der Kiefer führt dazu, dass die Hg-Alters Verläufe für die beiden höchsten Temperaturwerte (schwarz (punkt-) gestrichelt) nur wenig unterhalb der obersten Kurve des 8-ten Äquidistanzschrittes verlaufen. Die temperaturbedingte Spreitung der Entwicklungsgänge ist etwas geringer als bei Fichte (Abb. 4e, Bonitätsrahmen [23,6m, 33,3m]), wobei das Standortsspektrum der Kiefer montane und hochmontane und damit kühlere Bereiche viel weniger abdeckt als bei Fichte (Tab. 1). Vergleicht man ähnliche Datenbereiche, so weisen Buche und Kiefer eine ähnliche und Fichte eine höhere Kältetoleranz bzgl. der Wuchsleistung auf. Die Toleranz der Kiefer gegenüber hohen Temperatursummen ist sehr viel höher als bei Fichte und insbesondere Buche, was umso mehr gilt, da dieser Datenbereich bei Kiefer vergleichsweise gut repräsentiert ist (Tab. 1). Die Relation der Reaktionsmuster im warmen Standortbereich wird beim Baumartenvergleich mit einheitlichem Variationsintervall (Abb. 6a) deutlich. Die niederschlagsbedingte Spreitung der Entwicklungsgänge der Kiefer ist entsprechend der Effektamplitude der Niederschlag\_Veg (Abb. 3b) die größte aller vier Baumarten (Abb. 4f, Bonitätsrahmen [26,9m, 33,6m]), wobei auch hier das baumartenspezifische Standortsspektrum zu berücksichtigen ist. So weist Kiefer bei weitem den höchsten Anteil von vergleichsweise trockenen Standorten in der Datenbasis auf (Tab. 1). Allerdings zeigt die Kiefer auch beim Vergleich einheitlicher Wertebereiche (Abb. 6b) immer noch eine deutlich stärkere Reaktion als die Buche. Die größere Sensitivität über der Temperatur- als über der Niederschlagsamplitude ist weniger deutlich ausgeprägt als bei Fichte und Buche.

Eiche weist die geringste temperaturbedingte Spreitung der Hg-Alters-Verläufe der vier Baumarten (Boni-

tätsrahmen [20,3m, 28,8m]) auf, was auf den engsten Datenbereich aller vier Baumarten zurückzuführen ist (Tab. 1). Aufgrund des monoton ansteigenden Effektes der Tempsum\_Veg (Abb. 3e) repräsentiert die oberste Kurve für Eiche im Gegensatz zu den anderen Baumarten die Maximaltemperatur in der Datenbasis (Abb. 5a). Beim Vergleich der Sensitivität für übereinstimmende Datenbereiche weist Eiche die höchste Sensitivität der vier Baumarten gegenüber nachlassenden Temperatursummen im kühlen Standortbereich auf. Dagegen zeigt sie innerhalb des einheitlichen Wertebereiches warmer Standorte die geringste Sensitivität und erreicht bei der Maximaltemperatur die höchste Leistung (Abb. 6a). Eiche zeigt sowohl über das baumartenspezifische Datenspektrum (Abb. 5b) als auch den einheitlichen Variationsbereich trockenerer Standorte (Abb. 6b) die geringste Variabilität gegenüber variierenden Niederschlagssummen.

### 3.4 Kalibrierung

Anhand von drei Hg-Alters-Paaren die während der BWI 1, 2 und 3 für einen Stichprobenpunkt gemessen wurden, wird die Kalibrierung beispielhaft dargestellt (Abb. 7). Die drei blauen Linien stellen die geozentrischen Schätzungen auf Grundlage der Standortparameter dar. Die geringfügigen Unterschiede resultieren daraus, dass sich die dynamischen Standortparameter zwischen den Inventurzeitpunkten verändern. Im vorliegenden Fall führt die lokale Kalibrierung anhand der beobachteten Hg-Alters-Paare über die Vorhersage der punktspezifischen Zufallseffekte  $a_k$  und  $b_k$  (Formel 2.1/2.2) zu einer Verlagerung der Kurven nach unten (rote Linien). Eine Kalibrierung könnte auch anhand eines einzigen Hg-Alters-Paares erfolgen, wobei jedoch die Genauigkeit im Mittel mit der Anzahl der Aufnahmen zunimmt. Das bedeutet aber auch, dass die Schätzgüte zukünftig mit jeder weiteren Bundeswaldinventur tendenziell zunehmen wird. Eine möglichst exakte Kalibrierung setzt selbstverständlich eine möglichst genaue Hg-Schätzung bzw. Messungen der zu ihrer Ableitung verwendeten Baumhöhen voraus.

Für einen Vergleich zwischen dem kombiniert geo-phytozentrischen und dem rein geozentrischen Ansatz (Formel 1.2) werden die entsprechenden statistischen Kennwerte auch für das GLMM (Formel 2.1) berechnet (Tab. 4). Anhand dieses Vergleichs lässt sich der Effekt der Kalibrierung unter Verwendung aller beobachteten Hg-Alters-Paare auf die Schätzgüte bestimmen. Dabei verringert sich der Standardfehler bei allen vier Baumarten um ca. 2 m. Entsprechend sinken die rel. Standardfehler auf Werte zwischen 4,2% (Fichte) und 5,4% (Eiche). Die mittleren Verzerrungen der Schätzungen sind bei allen vier Baumarten weiterhin sehr gering (Tab. 4).

Die detaillierte Residuenanalyse zeigt, dass die Kalibrierung im Schätzbereich unterhalb von 30 m (Fichte/Buche), 26 m (Kiefer) und 28 m (Eiche) zu einer deutlichen Reduzierung der Verzerrungen führt (Abb. 8 versus Abb. 1). So sind in diesem Bereich kaum noch Muster zu erkennen, wie sie bei den rein geozentrischen Modellschätzungen noch auftraten. Allerdings treten

oberhalb dieses Bereiches bei allen vier Baumarten Verzerrungen mit der Tendenz zur Unterschätzung auf, die aber nur bei Buche und Eiche im Bereich hoher Hg-Schätzungen mehr als 50 cm betragen. Insgesamt spiegeln die deutlich geringeren Spannen der Box-Plots die sehr viel geringeren Standardfehler der kalibrierten Schätzungen wider (Abb. 8 versus Abb. 1).

## 4. DISKUSSION

### 4.1 Modellansatz

Der kombiniert geo-phytozentrische Modellansatz erlaubt die deutschlandweite standortsensitive Schätzung von Hg-Alters-Entwicklungen bzw. standortsensitiven Bonitätsfächern in Abhängigkeit von zeitveränderlichen Klima- und Depositionsparametern sowie von konstanten Bodenparametern unterschiedlicher forstlicher Standortkartierungsverfahren. Der Modellansatz unterscheidet sich somit von der sehr viel häufiger angewendeten standortsensitiven Modellierung einer absoluten Höhenbonität (z.B. SEYNAVE et al., 2005; MONSERUD et al., 2006; ALBERT und SCHMIDT, 2010; NOTHDURFT et al., 2012; SHARMA et al., 2012; ANTÓN-FERNÁNDEZ et al., 2016). Ein gravierendes Problem dieser Ansätze besteht darin, dass die Herleitung der absoluten Höhenbonität vom jeweils verwendeten Bonitätsfächer abhängt. So beeinflusst beispielsweise die Verwendung eines ana- bzw. polymorphen Bonitätsfächers (GARCIA, 2006) die Schätzung der Höhenbonität und die überregionale Verwendung eines einheitlichen Bonitätsfächers bedeutet häufig eine unzulässige Vereinfachung (CALAMA et al., 2003; BONTEMPS und DUPLAT, 2012). Auch gelten die klassischen Bonitätsfächer entsprechend ihrer Datenbasis implizit immer nur für eine ganz bestimmte Historie der Standortbedingungen, da die Wachstumsgröße nur in Funktion des Alters nicht aber zusätzlicher zeit-dynamischer Standortvariablen beschrieben wird. Mit dem hier vorgestellten Ansatz werden die skizzierten Probleme dadurch vermieden, dass als Antwortvariable direkt gemessene Baumhöhen bzw. abgeleitete Bestandeshöhen und keine modellierte Bonitäten verwendet werden. Eine weitere Besonderheit ist die Modellierung einer linearisierten Wachstumsfunktion innerhalb der Modellklasse der GAM. Diese Vorgehensweise ermöglicht es, sowohl einen sigmoiden Entwicklungsgang der Hg über der Zeit zu gewährleisten als auch die standortsensitive Schichtung dieser Verläufe mit adäquater Flexibilität zu beschreiben. In diesem Zusammenhang sind auch die vorteilhaften statistischen Eigenschaften der modifizierten Korf-Funktion (LAPPI, 1997) mit ihren biologisch interpretierbaren Koeffizienten 1. Ordnung (Formel 1.1) als Voraussetzung für die standortsensitive Modellierung zu nennen. Allerdings ist noch zu prüfen, inwieweit die beobachteten leichten Verzerrungen (Abb. 1) durch die Annahme des sigmoiden Entwicklungsganges und der damit verbundenen eingeschränkten Flexibilität verursacht werden. Erste Vergleiche mit GAM ohne eine zugrundeliegende Wachstumsfunktion zeigen, dass diese überwiegend geringere Verzerrungen aufweisen. Allerdings zeigen die Schätzungen mit dem kombiniert geo-phytozentrischen Ansatz (Formel 2.1), dass die grundsätzliche Flexibilität der modifizierten

Korf-Funktion ausreicht, um mehr oder weniger unverzerrte Schätzungen zu ermöglichen (Abb. 8).

Ein weiterer Vorteil der verwendeten GAM (Wood 2006) besteht darin, die Effekte nicht erfasster potentieller Störvariablen bzw. die auftretende großräumige Autokorrelation über eine 2-dimensionale räumliche Splinefunktion beschreiben und somit die Unabhängigkeitsannahme gewährleisten zu können. Die Verknüpfung der Standortvariablen erfolgt durch die logarithmische Verknüpfungsfunktion exponentiell multiplikativ. Die Verwendung hochwertiger Standortvariablen, die Modellierung der großräumigen Autokorrelation sowie die Art der Verknüpfung dienen dazu, möglichst genaue und plausible Modellschätzungen zu gewährleisten.

## 4.2 Datengrundlagen

Der kombiniert geo-phytozentrische Ansatz verbindet die Vorteile statistischer Modelle wie ihre größere Robustheit, die direkte Schätzung forstlich relevanter Größen, die Verwendung der Standortkartierung zur Modellinitialisierung und die Möglichkeit zur regionalen Kalibrierung anhand von Messwerten mit einer möglichst hohen Sensitivität gegenüber kausalen Standortvariablen. Der bisherige Schwachpunkt einer relativ geringen Standort-Sensitivität vieler statistischer Standort-Leistungsmodelle wird durch die Verwendung von Klima-, Depositions- und Bodenparametern in vergleichsweise hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung überwunden. Die verwendete Datengrundlage deckt große Gradienten der selektierten Standortvariablen und ihrer Kombinationen ab, was die Grundvoraussetzung für die Schätzung plausibler Modelleffekte und Klimafolgenabschätzungen ist (BONTEMPS und BOURIAUD, 2014). In diesem Zusammenhang ist die vorteilhafte Verinerung der Kollinearität durch die Erfassung unterschiedlichster Kombinationen von Standortvariablen zu nennen. Für bestimmte Datenbereiche wie den Bereich sehr hoher Niederschlag\_Veg mussten allerdings weiterhin Nebenbedingungen definiert werden, um plausible Effektverläufe zu erzwingen. Als Ursache für eingeschränkt plausible Effektverläufe kann angenommen werden, dass die Variabilität der Standortkombinationen innerhalb Deutschlands in bestimmten Datenbereichen relativ gering ist. So treten sehr hohe Niederschlag\_Veg ausnahmslos in Kombination mit niedrigeren Tempsum\_Veg auf. Ansätze, das Problem durch die Berücksichtigung noch variablerer Standortbedingungen zu lösen, waren bisher nur eingeschränkt erfolgreich (BURGGRAEF et al., 2016). Als Ursache kann vermutet werden, dass insbesondere europäische Datensätze zwar eine sehr große Standortvariabilität aufweisen, gleichzeitig aber eine deutlich geringere Datenqualität bzgl. der räumlichen und zeitlichen Auflösung der Standortparameter haben. Zusätzlich steigt die Wahrscheinlichkeit, dass nicht erfasste Störfaktoren, wie genetische Unterschiede die Modelleffekte überlagern und zu verzerrten Schätzungen führen. In der vorliegenden Untersuchung wurde dagegen versucht, durch die Verwendung von Verdichtungsgebieten der BWI, der brandenburgischen Landeswaldinventur und von Betriebsinventuren die Grenzen der Standort-

gradienten innerhalb Deutschlands möglichst gut zu erfassen.

Standort-Leistungs-Modelle, die auf Datengrundlagen mit großen Gradienten von Standortvariablen und Bonitätsspannen basieren, weisen im allgemeinen geringere Modellgenauigkeiten auf als entsprechende Modelle mit nur regionalem Geltungsbereich (BONTEMPS und BOURIAUD, 2014). Dabei werden klimatische Standortvariablen in nur regional gültigen Modellen häufig gar nicht explizit verwendet, sondern implizit über die kleinräumige Datenauswahl berücksichtigt. Die explizite Modellierung von Standorteffekten in überregional gültigen Modellen setzt dagegen möglichst hochwertige Eingangsvariablen voraus, wobei Klima- und Depositionsparameter nicht als flächendeckende Messungen vorliegen sondern modellgestützt regionalisiert werden müssen. Die geringere Genauigkeit der großräumig gültigen Standort-Leistungs-Modelle kann somit auch aus den Schätzfehlern bei der Regionalisierung resultieren. Auch weisen Standort-Leistungs-Modelle mit großem klimatischen Gradienten teilweise keine oder nur geringe Sensitivitäten gegenüber Bodenparametern zur Beschreibung des Bodenwasser- und Nährstoffhaushaltes auf (BRANDL et al., 2014; BURGGRAEF et al., 2016), was auch zu höheren Schätzfehlern führt und ihre Anwendung in der strategischen forstlichen Planung und insbesondere für die Baumarten-Mischungs-Wahl unter Klimawandel stark einschränkt. Eine weitere Ursache kann in der nicht optimalen Verknüpfung der Effekte der Standortvariablen liegen, die rein additiv, rein multiplikativ oder auch als Kombination aus beiden Verknüpfungsformen erfolgen kann (KAHN, 1995).

In der vorliegenden Untersuchung werden die Klima- und Depositionsparameter mit Hilfe moderner Regressionsmethoden wie GAM auf der Datengrundlage von validierten Messdaten des DWD unter Berücksichtigung der geographischen Lage und des Höhengradienten regionalisiert. Die Klimaparameter lassen sich über diesen Ansatz prinzipiell in beliebiger räumlicher Auflösung schätzen. Dagegen werden in vielen statistischen Modellen nur Auflösungen von maximal 1 x 1 km erreicht (HIJMANS et al., 2005), was vor allem in Gebirgsregionen problematisch ist. Vereinzelt sind allerdings statistische Standort-Leistungs-Modelle unter Verwendung von sehr viel höher aufgelösten Klimaparametern entwickelt worden (NOTHDURFT et al., 2012). Die Verwendung von dynamisch bilanzierten Kovariablen ist eine weitere modelltechnische Verbesserung des kombiniert geo-phytozentrischen Modellansatzes, da die meisten statistischen Modelle zur Schätzung der Bonität langjährige Mittelwerte verwenden (z.B. ALBERT und SCHMIDT, 2010; NOTHDURFT et al., 2012). Es wird erwartet, dass sich die Auswirkungen des Klimawandels durch die Verwendung dieser dynamisch bilanzierten Klima- und Depositionsparameter sowie die Verwendung von dynamischen Vegetationsperioden deutlich realistischer beschreiben lassen als mit langjährigen Mittelwerten, die in erster Linie regionale und höhenzonale Unterschiede beschreiben.

In Fällen, in denen das Keimjahr in der Vergangenheit liegt, erfolgt die dynamische Bilanzierung und Mittel-

wertbildung in Szenariosimulationen unter Klimawandel durch die Verlängerung des Vektors rezenter Klimadaten mit den entsprechenden Werten der Klimaprojektionen. Bei Simulationen, die vollständig in der Zukunft liegen, wird nur über den Vektor der jeweiligen Projektionsdaten dynamisch bilanziert. Die Vorgehensweise ist aus sachlogischer Sicht der häufig in Klimaprojektionen angewendeten Methode von gleitenden Zeitfenstern vorzuziehen, wird aber auch erst durch den dynamischen Bilanzierungsansatz ermöglicht.

Im Rahmen der Modellierung wird bisher angenommen, dass sich die Effekte räumlicher und zeitlicher Gradienten nicht unterscheiden, da nur mithilfe dieser Annahme große Wertebereiche der Klimavariablen erfasst werden können, was bei Beobachtungen an ein und demselben geographischen Punkt nicht möglich ist. Obwohl unterschiedliche Effekte nicht ausgeschlossen werden können und beispielsweise in Jahrringanalysen nachgewiesen wurden (VITALI et al., 2017; VITALI und BAUHUS, 2019), erscheint die Verwendung räumlicher Gradienten zur Ableitung zeitlicher Effekte alternativlos: eine Modellbildung, die ausschließlich auf Longitudinaldaten basiert, würde innerhalb kürzester Zeit zu Schätzungen im Extrapolationsbereich führen, wenn sich das Klima entsprechend der Projektionen entwickelt. YUE et al. (2016) verwenden zwar longitudinale periodische Klima- und Stickstoffdepositionsparameter, allerdings werden mit diesem Ansatz Bonitätsveränderungen geschätzt und zur Initialisierung muss eine beobachtete Bonität vorliegen oder mit einem alternativen Modellansatz geschätzt werden.

Die Effekte der kategorischen WHZ und NZ weisen plausible und teilweise deutliche Amplituden auf (Appendix), so dass auch kleinräumige Leistungsunterschiede zwischen unterschiedlichen Bodentypen abgebildet werden können, was für eine operationale strategische Waldbauplanung unerlässlich ist. Dabei sind in Niedersachsen und Schleswig-Holstein besonders differenzierte Schätzungen möglich und es bestehen deutliche Unterschiede bzgl. der Effektamplituden zwischen den vier berücksichtigten Standortkartierungsverfahren (Appendix). Die Verwendung der anhand von im Gelände kartierten Bodeneigenschaften gutachtlich abgeleiteten Standortziffern für Modellierungszwecke wird allerdings kontrovers diskutiert: auch wenn teilweise Korrekturen insbesondere der NZ anhand von analysierten Bodenproben erfolgen, so kann nicht immer ausgeschlossen werden, dass die gutachtliche Einschätzung durch weitere subjektive Eindrücke des Kartierers überlagert wird. Insbesondere die etwaige zusätzliche Berücksichtigung großklimatischer Faktoren oder der Leistung des aufstockenden Bestandes ist unter Modellierungsaspekten problematisch. Für eine Analyse wurden daher alle Modelle mit und ohne Berücksichtigung der WHZ und NZ parametrisiert. Anschließend wurden die Unterschiede in den Effekten der Klima- und Depositionsparameter analysiert. Dabei wurde für alle Baumarten deutlich, dass zwischen den Modellvarianten kaum Unterschiede auftraten, was dahingehend interpretiert werden kann, dass sich die Effekte der Klima- und Depositionsparameter auch bei Berücksichtigung

von Bodenparametern unverzerrt schätzen lassen. Für etwaige gutachtliche Modifikationen der WHZ und NZ durch eine subjektive Berücksichtigung der Leistung des aufstockenden Bestandes wird in Projektionen unter Klimawandel unterstellt, dass diese Abweichungen auch zukünftig erhalten bleiben.

Grundsätzlich kann angenommen werden, dass insbesondere das Bestandesalter in Waldinventuren mit einer geringeren Genauigkeit erfasst wird als auf ertragskundlichen Versuchsflächen. Das gilt auch für die Bodenparameter, wenn Versuchsflächen gesondert kleinräumig standortkartiert wurden. Für die Modellbildung wird unterstellt, dass die Abweichungen zufällig und ungerichtet auftreten, was insbesondere wegen der sehr großen Datenumfänge gerechtfertigt ist. Die höhere Varianz der Beobachtungen aus Inventuren wirkt sich dann nur auf die Konfidenzintervalle nicht aber die Erwartungswerte der Modelleffekte aus. Die grundsätzliche Eignung von Nationalen Waldinventuren für die Waldwachstumsmodellierung ist vielfach nachgewiesen worden (MONSERUD und STERBA, 1996; BÖSCH et al., 2016).

### 4.3 Prozessmodelle

Prinzipiell bieten Prozessmodelle (BATTAGLIA und SANDS, 1998; MÄKELÄ et al., 2000) durch ihre explizit kausale Modellkonzeption die Möglichkeit, die Effekte von Klimaparametern auf die Nettoprimärproduktion in hoher zeitlicher Auflösung darzustellen. Allerdings erschweren nach BONTEMPS und BOURIAUD (2014) bestimmte Eigenschaften bisher den Einsatz von Prozessmodellen in der forstlichen Planung: a) so ist die Initialisierung aufgrund der hohen Modellkomplexität, die für die Abbildung von Prozessen notwendig ist, aufwendig und vielfach liegen nicht alle Eingangsparameter in der notwendigen Auflösung vor; b) die hohe zeitliche Auflösung der Modellschätzungen kann durch Fehlerfortpflanzung zu Problemen führen, wenn forstlich relevante Parameter wie die Bonität geschätzt werden und c) trotz ihrer hohen Komplexität besteht im Bereich der Prozessmodelle nach wie vor Forschungsbedarf bei der realitätsnahen Abbildung aller wichtigen Wachstumsprozesse. Weiterhin können Probleme auftreten, wenn die edaphischen Eingangsparameter nicht aus der forstlichen Standortkartierung abgeleitet werden, deren räumliche Einheiten bisher die Basis einer strategischen Waldbauplanung auf standörtlicher Grundlage darstellen.

## 5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Es wird ein kombiniert geo-phytozentrisches Standort-Leistungs-Modell für Fichte, Buche, Kiefer und Eiche (Trauben- und Stieleiche zusammengefasst) beschrieben, dessen wichtigste Eigenschaften und Anwendungen wie folgt zusammengefasst werden können:

- Die Verwendung einer theoretisch fundierten Wachstumsfunktion (modifizierte Korf-Funktion, LAPPI, 1997) mit vorteilhaften statistischen Eigenschaften als Basismodell, wodurch sigmoide Hg-Altersverläufe gewährleistet werden.

- Die Kombination von Flexibilität und gleichzeitiger Robustheit bei der Modellierung des Standort-Leistungsbezuges wird erreicht, indem die Wachstumsfunktion innerhalb der Modellklasse verallgemeinerter additiver Modelle GAM (WOOD, 2006) standortsensitiv parametrisiert wird.
- Die auftretende großräumige Autokorrelation wird in den Modellen über eine 2-dimensionale räumliche Trendfunktion (WOOD, 2006) erfasst.
- Die Standort-Leistungs-Modelle lassen sich anhand von gemessenen Hg-Alters-Messpaaren lokal kalibrieren, was ihre Schätzgenauigkeit deutlich erhöht und ihre Anwendung beispielweise für die Fortschreibung von Waldinventurdaten in Holzaufkommens- und Waldentwicklungsszenarien unter Klimawandel ermöglicht.
- Verwendung einer umfangreichen Datenbasis mit großen Standortgradienten aber auch Spannen der dendrometrischen Parameter durch die Verwendung der BWI 1, 2, 3 (inklusive der Verdichtungsgebiete), der Landeswaldinventur Brandenburg und von Betriebsinventuren der Niedersächsischen Landesforsten und von HessenForst.
- Verwendung von dynamisch über das Bestandesleben bilanzierten Klima- und Depositionsparametern als Kovariablen zur kombinierten Beschreibung der Raum-Zeit-Trends von Standortveränderungen. Zur Regionalisierung der Klima- und Depositionsparameter wurden spezielle GAM (WOOD, 2006) verwendet, die Schätzungen in hoher räumlicher Auflösung ermöglichen.
- Klimatische Kovariablen wurden über die Vegetationsperiode bilanziert, um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Länge der Vegetationsperiode berücksichtigen zu können.
- Die Modelle können die Effekte von Kategorien des Bodenwasser- und Bodennährstoffhaushaltes für vier verschiedene Standortkartierungsverfahren abbilden (Appendix): niedersächsisch/schleswig-holsteinisches, hessisches, sachsen-anhaltisch/brandenburgisches Verfahren sowie die im Waldklimafond-Projekt WP-KS-KW erarbeitete bundesweite Synopse der Länderkartierverfahren.
- Die geschätzten Modelleffekte der kausalen Standortvariablen zur Beschreibung des Energie-, Wasser und Nährstoffhaushaltes weisen überwiegend hohe Sensitivitäten und plausible Verlaufsmuster auf.
- Die entwickelten Standort-Leistungs-Modelle sind die Grundlage für realistische Projektionen der Höhenwuchsleistung und der absoluten Höhenbonität unter Klimawandel. Die Modelle ermöglichen die Schätzung von standortsensitiven Bonitätsfächern.
- Realistische Projektionen der Wuchsleistung liefern wichtige Grundlagen für die Optimierung der Baumarten-Mischungs-Wahl, die Anpassung von waldbaulichen Maßnahmenfolgen und realistische Holzaufkommens- und Waldentwicklungsszenarien unter Klimawandel.

Der kombinierte geo-phytozentrische Modellansatz weist erhebliche Verbesserungen gegenüber bisherigen statistischen Modellansätzen auf. Allerdings besteht

weiterhin erheblicher Entwicklungsbedarf. Der wichtigste Aspekt betrifft die Datenbasis im Bereich klimatischer und edaphischer Extremstandorte. Aufgrund der statistischen Modellkonzeption sind Extrapolationen insbesondere in Datenbereichen, die eine hohe Sensitivität aufweisen, unzulässig. Das gilt speziell für niederschlagsarme und warme Standorte aber auch für sehr nährstoffarme und sehr nährstoffreiche Standorte sowie terrestrische Standorte mit einer geringen nutzbaren Feldkapazität. Die sehr umfangreiche Datenbasis des dargestellten Modellansatzes ermöglicht bereits die vergleichsweise belastbare Schätzung von Modelleffekten an den Randbereichen der Standortvariablen. Allerdings gibt es extreme Standortbereiche, die nur durch gezielte ergänzende Messungen erfasst werden können. Von besonderem Interesse wären in diesem Zusammenhang Messungen an Eiche aber vor allem Fichte, Buche, Europäischer Lärche, Douglasie und Weißtanne im Bereich des innerdeutschen Trockengebietes, der östlichen Harzabdachung und des Plauer Beckens.

Weitere zukünftig angestrebte Modellverbesserungen betreffen die Modellierung der Effekte zusätzlicher potentieller Kovariablen wie beispielsweise der Windgeschwindigkeit oder der Globalstrahlung für eine noch umfassendere Beschreibung groß- und insbesondere kleinräumiger Unterschiede der Höhenwuchsleistung. Eine methodische Verbesserung soll durch eine Gewichtung der zeitveränderlichen Kovariablen bei der dynamischen Bilanzierung erreicht werden, die sich an mittleren Wachstumsgängen der Baumarten orientiert. In der Folge würden sich die spezifischen Wachstumsbedingungen einzelner Jahre in zuwachsstarken Phasen stärker auswirken als in zuwachsschwachen Phasen. Darüber hinaus sind weitere Detailanalysen der Modelle wie beispielweise die Validierung lokaler Schätzungen für Regionen geplant.

Der kombinierte geo-phytozentrische Modellansatz ermöglicht die standortsensitive Schätzung der Höhenbonität bzw. -wuchsleistung. Eine umfassendere Einschätzung des Standort-Leistungs-Bezuges sollte jedoch prinzipiell an der Nettoprimärproduktion oder zumindest Volumenleistung von Beständen orientiert sein (BONTEMPS und BOURIAUD, 2014). Die Schätzung der Volumenleistung im Gelände ist im Rahmen der Forstplanung jedoch unmöglich, da diese eine Erfassung aller Vornutzungen voraussetzt. In der Vergangenheit sind daher auf der Grundlage von ertragskundlichen Versuchsflächen Funktionen entwickelt worden, die die Gesamtwuchsleistung in Abhängigkeit von der Höhenbonität und für definierte Grundflächenhaltungen (ASSMANN, 1956) beschreiben. Allerdings wurden schon früh regionale Unterschiede in der Relation zwischen Höhenwuchs- und Gesamtwuchsleistung aufgrund von Standortunterschieden beobachtet (ASSMANN, 1955, 1959; SKOVSGAARD und VANCLAY, 2013). Diese Variabilität wurde teilweise durch die Differenzierung nach verschiedenen Ertragsniveaus berücksichtigt. Die fortlaufende Veränderung der Standorte durch Schadstoffdepositionen und den Klimawandel erfordert jedoch modellgestützte Methoden zur Schätzung der Gesamt-

wuchsleistung. Für eine umfassende Abschätzung der Wuchsleistung von Einzelbäumen und Beständen werden daher zusätzlich standortsensitive Modelle für die Abschätzung des Durchmesserwachstums unter Berücksichtigung von Konkurrenzeffekten sowie standortsensitive Modelle zur Abschätzung der Stammzahlhaltbarkeit benötigt, wobei auch etwaige Mischungseffekte berücksichtigt werden sollten (PRETZSCH und del Río, 2019). Eine einfachere Variante könnte darin bestehen, anhand von ertragskundlichen Versuchsfeldern periodische Grundflächenzuwächse in Funktion der zugehörigen periodischen Hg-Veränderungen, des Alters, von Standortvariablen sowie der Bestandesdichte und eventuell Mischungsformen mit Hilfe von Bestandesmodellen zu schätzen. Auf der Basis derartiger Modelle könnten die Projektionen der standortsensitiven Bonitätsfächer in Projektionen des zu erwartenden periodischen Volumenzuwachses beispielsweise für die Forsteinrichtung überführt werden. Wird dieser Ansatz auf den gesamten Verlauf der Hg-Alters-Entwicklung angewendet und Nutzungsszenarien bzw. Grundflächenhaltungen definiert, ließe sich auch die Gesamtwuchsleistung projizieren.

Als weitere Alternative ist die Kombination von standortsensitiven Schätzungen der Höhenwuchsleistung mit Schätzungen der Nettoprimärproduktion mit Hilfe von Prozessmodellen denkbar. Anschließend könnten die Zusammenhänge zwischen Höhenwuchs- und Gesamtwuchsleistung differenzierter untersucht werden und gegebenenfalls standortsensitive Übergangsmodelle entwickelt werden.

Die standortsensitiven Bonitätsfächer sollen zukünftig auch für die Erhöhung der Klimasensitivität von einzelbaum-basierten Wachstumssimulatoren genutzt werden. Dazu sollen auf ihrer Grundlage standortsensitive Erwartungswerte periodischer Hg-Veränderungen für die Inventurintervalle ertragskundlicher Versuchsfelder geschätzt werden. Diese Schätzungen beinhalten den Alterseffekt sowie langfristige Standorteffekte. Auf der Basis der Einzelbaumdaten von Versuchsfeldern sollen zusätzlich die Effekte der Einzelbaumdimension, der Konkurrenzsituation in Wechselwirkung mit Mischungseffekten sowie der Witterung in Zuwachsmo-  
dellen abgebildet werden. Auf diese Weise werden verschiedene Datenquellen in optimaler Weise kombiniert, da sich große Standortgradienten nur über Großrauminventuren abbilden lassen, spezifische Wuchskonstellationen, waldbauliche Maßnahmen sowie die Witterung aber sehr viel genauer auf ertragskundlichen Versuchsfeldern erfasst werden.

## 6. SUMMARY

Title of the paper: *Site-sensitive, calibratable site index curves: The growth potential of important tree species under climate change.*

A combined geo-phyto-centric site-sensitive growth model for Norway spruce, common beech, Scots pine and oak (sessile and pedunculate oak combined) is presented. The main characteristics and applications of the approach can be summarised as follows:

- The use of a theoretically well-founded growth function as the model basis (a modified Korf-function, LAPPI, 1997), which has advantageous statistical properties and ensures sigmoidal site index curves.
- A combination of flexibility and robustness in modelling the site-growth relationship is achieved by the site-sensitive parametrisation of the growth function as a generalised additive model GAM (WOOD, 2006).
- The occurring large-scale autocorrelation is captured in the model using a 2-dimensional trend function (WOOD, 2006).
- The site-sensitive site index curves can be calibrated locally using observed stand heights, which greatly improves the prediction accuracy and enables model use, for example, for extrapolating forest inventory data under different climate change scenarios in wood supply and forest development studies.
- The use of an extensive database, encompassing large site gradients and a wide range of dendrometric parameters, obtained from the three German national forest inventories (BWI 1, 2, 3), the Brandenburg forest inventory and from the enterprise level inventories of the Lower Saxony and Hesse state forestry services.
- The combined use of dynamic (determined for the life span of the forest stand) climate and deposition parameters as covariates to describe the space-time trends of site changes. Special GAM's (WOOD, 2006) are used to regionalize these climate parameters, which enable predictions with a high spatial resolution.
- Climatic covariates were determined for vegetation periods, in order to take the effect of climate change on the length of the vegetation period into account.
- The models include effects of different categories of soil water supply and nutrient balance for four different site mapping methods (Appendix): the procedures used in Lower-Saxony/Schleswig-Holstein, Hesse, Saxony-Anhalt / Brandenburg, as well as the procedure developed in the national synopsis of soil mapping methods by the forest climate fund project WP-KS-KW.
- The estimated model effects of the site variables describing the energy, water and nutrient balances mainly demonstrate high sensitivity and generally plausible patterns.
- The site-sensitive growth models are the basis for realistic forecasts of stand height development and site index under climate change. Hence, the models enable the prediction of site-sensitive site index curves.
- Realistic growth forecasts are an important information source for optimising the choice of tree species and their admixture, for adapting silvicultural management sequences and for predicting realistic wood supply and forest development under climate change.

## 7. RÉSUMÉ

Titre de l'article: *Classes de fertilité sensibles à la station et calibrables: potentiel de croissance des espèces ligneuses importantes dans le cadre du changement climatique.*

Un modèle géophytocentrique combiné de performance stationnelle est décrit pour l'épicéa, le hêtre, le pin et le chêne (chêne sessile et chêne pédonculé réunis ensemble), dont les principales caractéristiques et applications peuvent être résumées comme suit:

- L'utilisation d'une fonction de croissance théoriquement bien fondée (fonction de Korf modifiée, LAPPI, 1997) avec des propriétés statistiques avantageuses comme modèle de base, assurant ainsi des progressions sigmoïdes de l'âge.
- La combinaison de la flexibilité et de la robustesse simultanée dans la modélisation de la performance stationnelle est obtenue en paramétrant la fonction de croissance au sein de la classe de modèles additifs généralisés GAM (WOOD, 2006) sensible à la station.
- L'autocorrélation à grande échelle qui se produit, est intégrée dans les modèles par une fonction de tendance spatiale bidimensionnelle (WOOD, 2006).
- Les modèles de performance stationnelle peuvent être calibrés localement sur la base de plusieurs mesures de l'âge, ce qui augmente considérablement leur précision d'estimation et permet leur application, par exemple, pour la mise à jour des données d'inventaire forestier dans les *scenarii* de production de bois et de développement des forêts dans le cadre du changement climatique.
- Utilisation d'une base de données complète avec de grands gradients stationnels mais aussi des gammes de paramètres dendrométriques en utilisant les BWI 1, 2, 3 (y compris les zones de forte densité), l'inventaire forestier du Land de Brandebourg et les inventaires d'entreprises du *Land* de Basse-Saxe et de HessenForst.
- Utilisation de paramètres, dynamiques sur la vie d'un peuplement, climatiques et de dépôt équilibrés comme covariables pour la description combinée des tendances spatio-temporelles des changements stationnels. Des GAM spéciaux (WOOD, 2006) ont été utilisés pour la régionalisation des paramètres climatiques et de dépôt, permettant des estimations à haute résolution spatiale.
- Des covariables climatiques ont été équilibrées sur la période de végétation afin de prendre en compte les effets du changement climatique sur la durée de la période de végétation.
- Les modèles peuvent cartographier les effets des catégories du bilan hydrique et nutritif du sol pour quatre procédures différentes de cartographie de stations (annexe): Procédures de Basse-Saxe/Schleswig-Holstein, Hesse, Saxe-Anhalt/Brandebourg ainsi que le synopsis fédéral des procédures de cartographie dans les *Länder* dans le cadre du projet WP-KS-KW du Fonds pour le climat forestier.
- Les effets de modèle estimés des variables stationnelles causales pour la description des réserves énergétique, hydrique et nutritive montrent principalement des sensibilités élevées et des modèles plausibles.

- Les modèles de performance stationnelle développés constituent la base pour des projections réalistes de la performance de la croissance en hauteur et de la classe de fertilité en hauteur absolue dans le cadre du changement climatique. Les modèles permettent d'estimer les classes de fertilité sensibles à la station.
- Des projections réalistes de la performance de croissance constituent une base importante pour l'optimisation du choix des mélanges d'espèces ligneuses, l'adaptation des mesures sylvicoles et des *scenarii* réalistes de production de bois et de développement de la forêt dans le cadre du changement climatique.

## 8. DANKSAGUNG

Die dargestellten Modellentwicklungen wären ohne die umfangreichen Datengrundlagen der Bundeswaldinventur, der Landeswaldinventur Brandenburg sowie der Betriebsinventuren der Niedersächsischen Landesforsten und von HessenForst nicht möglich gewesen. Das Gleiche gilt für Standortkartierungsdaten aus Niedersachsen, Schleswig-Holstein, Hessen, Sachsen-Anhalt und Brandenburg sowie die Synopse der Kartierverfahren auf dem 4 x 4 km Netz der Bundeswaldinventur. Der Autor bedankt sich für die Möglichkeit diese Inventur- bzw. Standortkartierungsdaten im Rahmen von Forschungsprojekten nutzen zu können beim Institut für Waldökosysteme des Thünen-Instituts (namentlich Frau P. HENNIG und Herrn Dr. H. POLLEY), dem Landesbetrieb Forst Brandenburg (namentlich Herrn J. MÜLLER), den Niedersächsischen Landesforsten (namentlich Herrn Dr. TH. BÖCKMANN) und HessenForst (namentlich Frau C. LOREY). Herrn Dr. T. METTE wird für die Bereitstellung der Daten der Synopse der Standortkartierverfahren aus dem Waldklimafondprojekt WP-KS-KW (Förderkennzeichen 28WC400309) gedankt. Herrn Dr. B. AHRENDTS wird für die Regionalisierung der Stickstoffdepositionsdaten und Herrn Dr. R. NUSKE für die Aufbereitung der Klimaparameter gedankt. Die eigentlichen Modellentwicklungen wurden zum Teil durch das Waldklimafondprojekt RiskMan (Förderkennzeichen 28WB401501) gefördert. Herrn Dr. P. BIBER und einem anonymen Gutachter wird für die sehr wertvollen Anregungen, Ergänzungen und Korrekturvorschläge gedankt.

## 9. LITERATURVERZEICHNIS

- ALBERT, M. und M. SCHMIDT (2010): Climate-sensitive modelling of site-productivity relationships for Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and common beech (*Fagus sylvatica* L.). *For. Ecol. Manag.*, **259** (4): S. 739–749. doi:10.1016/j.foreco.2009.04.039
- ALBERT, M. und M. SCHMIDT (2012): Standort-Leistungs-Modelle für die Entwicklung von waldbaulichen Anpassungsstrategien unter Klimawandel (Site-productivity models for developing silvicultural adaptation strategies under climate change). *Archiv für Forstwesen und Landschaftsökologie*, S. 46.
- ALBERT, M., J. HANSEN, J. NAGEL, M. SCHMIDT und H. SPELLMANN (2015): Assessing risks and uncertainties in forest dynamics under different management scenarios and climate change. *Forest Ecosystems* **2** (14). doi:10.1186/s40663-015-0036-5

- ALBERT, M., G. LEEFKEN, R. NUSKE, B. AHREND, J. SUTMÖLLER und H. SPELLMANN (2016): Auswirkungen von klimatischer Unsicherheit auf die Forstplanung am Beispiel von vier Regionen im norddeutschen Tiefland. *Allg. Forst- und Jagdzeitung* **187** (9/10): S. 161–185.
- ALVETEG, M., C. WALSE und P. WARFVINGE (1998): Reconstructing historic atmospheric deposition and nutrient uptake from present day values using MAKEDEP. *Water Air Soil Pollut.* **104**: S. 269–283. doi:10.1023/A:1004958027188
- ANTÓN-FERNÁNDEZ, C., B. MOLA-YUDEGO, L. DALSGAARD und R. ASTRUP (2016): Climate sensitive site index models for Norway. *Canadian Journal of Forest Research* **99**: S. 1–33. doi:10.1139/cjfr-2015-0155
- ASSMANN, E. (1955): Die Bedeutung des 'erweiterten Eichhorn'schen Gesetzes' für die Konstruktion von Fichten-Ertragstafeln. *Forstwiss. Centralbl.* **74**: S. 321–330.
- ASSMANN, E. (1956): Natürlicher Bestockungsgrad und Zuwachs. *Forstwiss. Centralbl.* **75**: S. 257–265.
- ASSMANN, E. (1959): Höhenbonität und wirkliche Ertragsleistung. *Forstwiss. Centralbl.* **78**: S. 1–20.
- BATTAGLIA, M. und P. J. SANDS (1998): Process-based forest productivity models and their application in forest management. *For. Ecol. Manag.* **102**: S. 13–32. doi: 10.1016/S0378-1127(97)00112-6
- BENNING, R., R. PETZOLD und J. DANIGEL et al. (2019): BWI 2012 Umweltdatenbank Bodenprofile. Open Agrar Repositorium, Göttingen. doi:10.3220/DATA20190625100522
- BONTEMPS, J.-D. und P. DUPLAT (2012): A non-asymptotic sigmoid growth curve for top height growth in forest stands. *Forestry* **85** (3): S. 353–368. doi:10.1093/forestry/cps034
- BONTEMPS, J.-D. und O. BOURIAUD (2014): Predictive approaches to forest site productivity: recent trends, challenges and future perspectives. *Forestry* **87** (1): S. 109–128. doi:10.1093/forestry/cpt034
- BOISVENUE, C. und S. W. RUNNING (2006): Impacts of climate change on natural forest productivity – evidence since the middle of the 20<sup>th</sup> century. *Global Change Biology* **12** (5): S. 862–882. doi:10.1111/j.1365-2486.2006.01134.x
- BÖSCH, B., G. KÄNDLER, H. POLLEY und P. HENNIG (2016): Fachkonzept WEHAM 2012. Modelle und Algorithmen, Version: 2.1. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA).
- BRANDL, S., W. FALK, H.-J. KLEMMT, G. STRICKER, A. BENDER, TH. RÖTZER und H. PRETZSCH (2014): 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**: S. 2626–2646. doi:10.3390/f5112626
- BURGGRAEF, L., P. SCHMIDT-WALTER, L. HILBRIG und M. SCHMIDT (2016): Standort-Leistungsmodelle als Grundlage für realistische Waldentwicklungsszenarien unter Klimawandel: Jahrestagung 2016 der Sektion Ertragskunde im DVFFA vom 09.–11.05.2016: Lyss/Schweiz.
- BURNHAM, K. P. und D. R. ANDERSON (2004): Multimodel inference: understanding AIC and BIC in model selection. *Sociol Method Res* **33** (2): S. 261–304. doi:10.1177/0049124104268644
- CALAMA, R., N. CAÑADAS und G. MONTERO (2003): Inter-regional variability in site index models for even-aged stands of stone pine (*Pinus pinea* L.) in Spain. *Ann. For. Sci.* **60**: S. 259–269. doi:10.1051/forest:2003017
- DĂNESCU, A., A. T. ALBRECHT, J. BAUHUS und U. KOHNLE (2017): Geocentric alternatives to site index for modeling tree increment in uneven-aged mixed stands. *Forest Ecology and Management* **392** (15): S. 1–12. doi:10.1016/j.ecolmodel.2016.06.005
- FAHRMEIR, L., TH. KNEIB und S. LANG (2009): *Regression – Modelle, Methoden und Anwendungen*. 2<sup>nd</sup> edition. Springer Verlag, Berlin.
- GARCIA, O. (2006): Site index: concepts and methods. *In*: CIESZEWSKI, C. J. and STRUB, M. (eds): Second International Conference on Forest Measurements and Quantitative Methods and Management & The 2004 Southern Mensurationists Meeting: S. 275–283. Warnell School of Forestry and Natural Resources, University of Georgia, Athens.
- HANSEN, J. H. und J. NAGEL (2014): *Waldwachstumskundliche Softwaresysteme auf Basis von TreeGrOSS – Anwendung und theoretische Grundlagen*. Beiträge aus der NW-FVA, 11, 224 S.
- HESSENFORST (2017): *Hessische Waldbaufibel: Grundsätze und Leitlinien zur naturnahen Wirtschaftsweise im hessischen Staatswald*.
- HIJMANS, R., S. E. CAMERON, J. L. PARRA, P. G. JONES und A. JARVIS (2005): Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int. J. Clim.* **25**: S. 1965–1978. doi:10.1111/j.1365-2486.2006.01134.x
- HÖHLE, J., N. KÖNIG, L. HILBRIG, J. BIELEFELD, D. ZICHE, E. GRÜNEBERG, N. EICKENSCHIEDT, B. AHREND und N. WELLBROCK (2016): Methodenüberblick und Qualitätssicherung. *In*: WELLBROCK, N., BOLTE, A. und FLESSA, H.: *Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland: Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008*. Thünen Rep **43**: S. 6–43. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig.
- KAHN, M. (1995): Quasikausale Modellierung des Standort-Leistung-Bezuges als Voraussetzung zum Aufbau flexibler Mischbestandsmodelle. *Forstwiss. Centralbl.* **114** (1): S. 175–187. doi:10.1007/BF02742223
- KOHNLE, U., A. ALBRECHT, E. LENK, K. OHNEMUS und C. YUE (2014): Zuwachstrends im Spiegel langfristiger Versuchsflächen in Südwestdeutschland. *Allg. Forst- und Jagdzeitung* **187**: S. 97–117.
- LAPPI, J. (1997): A longitudinal analysis of height/diameter curves. *Forest Science* **43** (4): S. 555–570. doi:10.1093/forestscience/43.4.555
- LAUBHANN, D., H. STERBA, G. J. REINDS und W. DEVRIES (2009): The impact of atmospheric deposition and climate on forest growth in European monitoring plots: An individual tree growth model. *For. Ecol. Manag.* **258** (8): S. 1751–1761. doi:10.1016/j.foreco.2008.09.050
- MÄKELÄ, A., J. LANDSBERG, A. R. EK, T. E. BURK, M. TERMIKAEKIAN und G. AGREN et al. (2000): Process-based models for forest ecosystem management: current state of the art and challenges for practical implementation. *Tree Physiol.* **20**: S. 289–298. doi: 10.1093/treephys/20.5-6.289
- MEHTÄTALO, L. (2004): A longitudinal height-diameter model for Norway spruce in Finland. *Canadian Journal of Forest Research* **34**: S. 131–140. doi:10.1139/x03-207
- 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**: 147 S.

- MONSERUD, R. A., S. HUANG und Y. YANG (2006): Predicting lodgepole pine site index from climatic parameters in Alberta. *The Forestry Chronicle* **82** (4): S. 562–571. doi:10.5558/tfc82562-4
- MONSERUD, R. A. und H. Sterba (1996): A basal area increment model for even- and uneven-aged forest stands in Austria. *For. Ecol. Manag.* **80** (1): S. 57–80. doi:10.1016/0378-1127(95)03638-5
- NFP (2007): Forstliche Standortsaufnahme – Geländeökologischer Schätzrahmen. Anwendungsbereich: Mittelgebirge, Bergland und Hügelland. Wolfenbüttel, 12 S.
- NFP (2009): Forstliche Standortsaufnahme – Geländeökologischer Schätzrahmen. Anwendungsbereich: Pleistozänes (Diluviales) Flachland. Wolfenbüttel, 14 S.
- NUSKE, R. (2017): vegperiod: Determine Thermal Vegetation Periods [Software]. Zenodo. doi:org/10.5281/zenodo.1466541
- NOTHDURFT, A., T. WOLF, A. RINGELER, J. BÖHNER und J. SABOROWSKI (2012): Spatio-temporal prediction of site index based on forest inventories and climate change scenarios. *Forest Ecology and Management* **279**: S. 97–111. doi:10.1016/j.foreco.2012.05.018
- PRETZSCH, H., R. GROTE, B. REINEKING, T. RÖTZER und S. SEIFERT (2008): Models for Forest Ecosystem Management: A European Perspective. *Ann Bot.* **101** (8): S. 1065–1087. doi: 10.1093/aob/mcm246
- PRETZSCH, H., P. BIBER, G. SCHÜTZE, E. UHL und T. RÖTZER (2014): Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. *Nature Communications* **5** (4967). doi:10.1038/ncomms5967
- PRETZSCH, H. und M. DEL RÍO (2019): Density regulation of mixed and mono-specific forest stands as a continuum: a new concept based on species-specific coefficients for density equivalence and density modification. *Forestry*: S. 1–15, doi:10.1093/forestry/cpz069
- PINHEIRO, J., D. BATES, S. DEBROY, D. SARKAR and R CORE TEAM (2018): nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-137. <https://CRAN.R-project.org/package=nlme>.
- R CORE TEAM (2018): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- ROCK J., B. BÖSCH und G. KÄNDLER (2013): WEHAM 2012 – Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung für die dritte Bundeswaldinventur: Tagungsbericht der Jahrestagung der Sektion Ertragskunde im deutschen Verband forstlicher Forschungsanstalten: S. 127–133.
- RUSS, A. (2016): Unveröffentlichte Synopse der Standortkartierung in Brandenburg und im Tiefland von Sachsen-Anhalt innerhalb des Waldklimafond-Projektes RiskMan (Förderkennzeichen: 28WB401501)
- SCHAAP, M., R.W. KRUIT, C. HENDRIKS, R. KRANENBURG, A. SEGERS und P. BUILTJES (2015): Atmospheric deposition to German natural and semi-natural ecosystems during 2009. Umweltforschungsplan Projekt No. (FKZ) 371263240-1 UBA-FB00. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Berlin.
- SEYNAVE, I., J.-C. GÉGOUT, J.-C. HERVÉ, J.-F. DHÔTE, J. DRAPIER, E. BRUNO und G. DUMÉ (2005): *Picea abies* site index prediction by environmental factors and understory vegetation: a two-scale approach based on survey databases. *Can. J. For. Res.* **35**: S. 1669–1678. doi:10.1139/x05-088
- SHARMA, R. P., A. BRUNNER und T. EID (2012): Site index prediction from site and climate variables for Norway spruce and Scots pine in Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research* **27** (4): S. 619–636. doi: 10.1080/02827581.2012.685749
- SKOVSGAARD, J. P. und J. K. VANCLAY (2013): Forest site productivity: a review of spatial and temporal variability in natural site conditions. *Forestry: An International Journal of Forest Research* **86** (3): S. 305–315, doi:10.1093/forestry/cpt010
- SPELLMANN, H., M. ALBERT, M. SCHMIDT, J. SUTMÖLLER und M. OVERBECK (2011): Waldbauliche Anpassungsstrategien für veränderte Klimaverhältnisse. *AFZ/Der Wald* **66** (11): S. 19–23.
- SPIECKER, H., K. MIELIKÄINEN, M. KÖHL und J. P. SKOVSGAARD (1996): *Growth Trends in European Forests*. Springer Berlin Heidelberg. 372 S.
- STAATSBETRIEB SACHSENFORST, Kompetenzzentrum für Wald und Forstwirtschaft; ThüringenForst, Forstliches Forschungs- und Kompetenzzentrum Gotha, Redaktion: BENNING R., DANIGEL J., PROFFT I., PETZOLD R.: Waldproduktivität – Kohlenstoffspeicherung – Klimawandel: Dokumentation für die Ableitung und Bereitstellung der Bodendaten.
- STAUPENDAHL, K. und M. SCHMIDT (2016): Kalibrierung der Ertragstafeln für die Hauptbaumarten in Hessen mithilfe der Daten der Bundeswaldinventur. *Allg. Forst- und Jagdzeitung* **187** (9/10): S. 197–216.
- STERBA, H. (1996): Forest Decline and Growth Trends in Central Europe – a Review. In: SPIECKER, H., MIELIKÄINEN, K., KÖHL, M., SKOVSGAARD, J.P. (eds) *Growth Trends in European Forests*. Springer, Berlin, Heidelberg
- TARRASÓN, L. und Á. NYÍRI (2008): Transboundary acidification, eutrophication and groundlevel ozone in Europe in 2006. In: EMEP Status Report. The Norwegian Meteorological Institute, Oslo, Norway <http://www.emep.int>.
- VALLADARES, F. (2008): A Mechanistic View of the Capacity of Forests to Cope with Climate Change. In: BRAVO, F., JANDL, R., LEMAY, V., VON GADOW, K. (eds) *Managing Forest Ecosystems: The Challenge of Climate Change*. Managing Forest Ecosystems, 17. Springer, Dordrecht
- VITALI, V., U. BÜNTGEN und J. BAUHUS (2017): Silver fir and Douglas-fir are more tolerant to extreme droughts than Norway spruce in south-western Germany. *Glob. Change Biol.* **23**: S. 5108–5119. doi:10.1111/gcb.13774
- VITALI, V. und J. BAUHUS (2019): Weißtanne und Douglasie als Ersatz für Fichte. *AFZ-Der Wald* **74**: S. 23–26.
- VENABLES, W. N. und B. D. RIPLEY (2002): *Modern Applied Statistics with S*. Fourth Edition. Springer, New York. ISBN 0-387-95457-0
- WATT, M. S., D. J. PALMER, M. O. KIMBERLEY, B. K. HÖCK, T.W. PAYN und D. J. LOWE (2010): Development of models to predict *Pinus radiata* productivity throughout New Zealand. *Can. J. For. Res.* **40**: S. 488–499. doi:10.1139/X09-207
- WEISKITTEL, A. R., D.W. HANN, J. A. KERSHAW und J. K. VANCLAY (2011): *Forest Growth and Yield Modeling*. John Wiley & Sons, Ltd. Print ISBN:9780470665008, Online ISBN:9781119998518. doi:10.1002/9781119998518 2011
- WOLFF, B., W. HÖLZER, D. FRÖMDLING und S. BONK (1998): Datenaufbereitung für Modellrechnungen aus der Bundeswaldinventur (BWI) und dem Datenspeicher Waldfonds (DSW). Arbeitsbericht des Instituts für Forstökologie und Walderfassung 98/3. Eberswalde.

- WOOD, S. N. (2004): Stable and efficient multiple smoothing parameter estimation for generalized additive models. *Journal of the American Statistical Association* **99**: S. 673–686. doi:10.1198/016214504000000980
- WOOD, S. N. (2006): *Generalized Additive Models: An Introduction* with R. Chapman and Hall/CRC.
- WOOD, S. N. (2011): Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models. *Journal of the Royal Statistical Society (B)* **73** (1): S. 3–36. doi:10.1111/j.1467-9868.2010.00749.x
- WOOD, S. N., N. PYA und B. SAEFKEN (2016): Smoothing parameter and model selection for general smooth models (with discussion). *Journal of the American Statistical Association* **111**: S. 1548–1575. doi:10.1080/01621459.2016.1180986
- WÖRDEHOFF, R., C. FISCHER und H. SPELLMANN (2017): II. Cluster- und Kohlenstoffstudie Forst und Holz Niedersachsen. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.), Göttingen, 40 S.
- YUE, C., U. KOHNLE, H.-P. KAHLE und J. KLÄDTKE (2011): Exploiting irregular measurement intervals for the analysis of growth trends of stand basal area increments: A composite model approach. *Forest Ecology and Management* **263**: S. 216–228. doi:10.1016/j.foreco.2011.09.007
- YUE, C., H.-P. KAHLE, U. KOHNLE, Q. ZHANG und X. KANG (2014): Detecting trends in diameter growth of Norway spruce on long-term forest research plots using linear mixed-effects models. *Eur. J. For. Res.* **133**: S. 783–792. doi: 10.1007/s10342-014-0795-5
- YUE, C., H.-P. KAHLE, K. v. WILPERT und U. KOHNLE (2016): A dynamic environment-sensitive site index model for the prediction of site productivity potential under climate change. *Ecological Modelling* **337**: S. 48–62: doi:10.1016/j.ecolmodel.2016.06.005