# Standortsensitive Wachstumsfunktionen zur Abschätzung des zukünftigen Wachstumspotentials von Waldbeständen und Einzelbäumen unter Klimawandel

Matthias Schmidt<sup>1</sup>, Robert Nuske<sup>1</sup>, Bernd Ahrends<sup>2</sup> NW-FVA, Göttingen, <sup>1</sup>: Abt. Waldwachstum, <sup>2</sup>: Abt. Umweltkontrolle

#### 1 Zusammenfassung

Der Beitrag stellt generalisierte additive Modelle vor, mit denen sich der Altersgang der Grundflächenmittelhöhe (Hg) standort- und somit klimasensitiv beschreiben lässt. Die Schätzungen der Hg erfolgen dynamisch, d.h. in Abhängigkeit von Standortveränderungen bzw. über die Modelleffekte von zeitveränderlichen Kovariablen. Die Modelle wurden für Fichte (Picea abies (L.) Karst.), Kiefer (Pinus sylvestris L.), Rotbuche (Fagus sylvatica) sowie Eiche (Trauben- (Quercus petraea (Matt.) Liebl.) und Stieleiche (Quercus robur L.) zusammengefasst) entwickelt. Als Grundmodell wurde eine modifizierte Form der Korf-Funktion gewählt, die ursprünglich zur Beschreibung longitudinaler Höhen-Durchmesser-Beziehungen entwickelt wurde (Lappi 1997, Mehtätalo 2004, 2005). Anschließend wurden Effekte wichtiger Standortparameter auf die originären Koeffizienten der Korf-Funktion geschätzt, so dass sich standortspezifische Altersverläufe modellieren lassen. Dendrometrische Datenbasis sind die Bundeswaldinventuren 1, 2 und 3 inklusive aller Verdichtungsgebiete ergänzt um Landeswald-Betriebsinventuren aus Hessen und Niedersachsen. 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. Die Grundlage für die atmosphärischen Stickstoffeinträge bilden die flächendeckenden Berechnungen mit dem prozessorientierten LOTUS-EUROS Modell (Schaap et al. 2015). Aus diesen Ergebnissen wurden Zeitreihen der retrospektiven Deposition generiert. Die Klimaparameter Temperatur- und Niederschlagssumme sowie die Stickstoffdeposition werden dynamisch über das Bestandesleben gemittelt, so dass neben räumlichen Gradienten auch zeitliche Veränderungen abgebildet werden. Zur Erfassung der Bodeneigenschaften wurden kategoriale Einstufungen des Wasserhaushaltes und der Nährstoffversorgung aus der Standortkartierung in Niedersachsen und Schleswig-Holstein (STO\_NDS\_SH) verwendet. Die resultierenden Hg-Altersverläufe zeigen eine starke Sensitivität gegenüber der Temperatursumme in der Vegetationszeit (TempSumVeg) und relativ deutliche Effekte der Niederschlagssumme in der Vegetationszeit (PrecSum-Veg), der jährlichen N-Deposition (NDep) sowie teilweise der kategorialen Bodenparameter zur Erfassung von Wasserhaushalt (WHZ) und Nährstoffversorgung (NZ). Für die im Folgenden skizzierten Modelleffekte gilt, dass die Verläufe insbesondere an den schwach belegten Datenrändern teilweise gutachtlich in ihrer Flexibilität beschränkt wurden, um sachlogisch plausible Effekte zu erzwingen. Für den Effekt der TempSumVeg deuten sich für Buche und etwas weniger stark für Fichte und Kiefer Optimumverläufe an, während für Eiche ein monoton ansteigender Effektverlauf mit abnehmendem Gradienten geschätzt wird. Somit würden für Buche und weniger deutlich für Fichte und Kiefer auf den wärmsten Standorten unter sonst konstanten Bedingungen Höhenwuchsleistungen geschätzt, die unterhalb der Maximalwerte liegen. Demgegenüber würden für Eiche unter konstanten Nebenbedingungen Maximalwerte für die wärmsten Standorte projiziert. Für die PrecSumVeg werden für alle Baumarten monoton ansteigende Effektverläufe geschätzt, die gegen asymptotische Werte laufen, so dass ab bestimmten Grenzwerten keine weiteren Steigerungen der Höhenwuchsleistung mit steigender Niederschlagsmenge projiziert werden. Zur Reduzierung der Korrelation zwischen Alter und NDep war es im Rahmen der Modellbildung notwendig, die NDep mit ihren altersbedingten Erwartungswerten zu normieren und diese abgeleitete Kovariable (NDep\_norm) zur Beschreibung der Stickstoffdeposition zu verwenden. Der Effekt der NDep norm ist für alle Baumarten monoton steigend mit abnehmendem Gradienten, wobei für Kiefer ein asymptotischer Verlauf dazu führt, dass ab höheren Werten keine Steigerung der

Wuchsleistung mehr projiziert wird. Die Effekte der NZ auf Basis der STO NDS SH steigen für Fichte und Kiefer von arm bis gut-mesotroph monoton an und nehmen dann über eutroph zu kalk-eutroph wieder leicht ab. Eiche weist ein ähnliches Grundmuster auf, wobei allerdings der höchste Effekt im eutrophen Bereich erreicht wird und lediglich für den kalk-eutrophen Bereich ein leichter Rückgang geschätzt wird. Buche weist als einzige Baumart über den gesamten Bereich der Nährstoffversorgung monoton ansteigende Effekte von arm bis kalk-eutroph auf. Die Kategorien der WHZ auf Basis der STO NDS SH weisen ebenfalls plausible Effekte auf. Dabei werden die größten Amplituden auf terrestrischen Standorten des Berglandes erreicht, wobei die Effekte von 'nachhaltig frisch' bis 'trocken' für alle Baumarten monoton abnehmen. Das Muster für terrestrische Standorte des Tieflandes ist ähnlich bei allgemein geringerer Amplitude. Die verschiedenen Ausprägungen von grund- und stauwasserbeeinflussten Standorten zeigen für die Baumarten uneinheitliche, aber insgesamt plausible Effekte mit allerdings geringeren Amplituden. Insgesamt weisen die entwickelten Hg-Alters-Modelle für wichtige Wachstumsfaktoren sensitive und plausible Effekte auf. Allerdings erscheinen insbesondere die Effekt-Amplituden der Bodenparameter im Vergleich mit forstlichem Erfahrungswissen als zu gering. Als eine Hauptursache werden die gualitativen aber auch räumlichen Unschärfen der Standortkartierung vermutet, die u.a. in der schwierig zu erfassenden Heterogenität des Faktors Boden begründet sind. Demgegenüber lassen sich langjährige retrospektive Klimaparameter mit größerer Genauigkeit regionalisieren. Allerdings tritt hier das Problem auf, dass zukünftige Projektionen aufgrund der dynamischen Entwicklung im Klimawandel und in Abhängigkeit vom Ausgangsniveau der Standorte schon mittelfristig im Extrapolationsbereich erfolgen können und somit keine belastbare Entscheidungsunterstützung ermöglichen. In diesem Zusammenhang ist auch das im Baumartenvergleich nicht immer plausible Ranking zu beurteilen. So zeigt z.B. die Kiefer von allen Baumarten die größte Sensitivität im Bereich mittlerer bis geringer Niederschläge, was mutmaßlich darin begründet ist, dass die Kiefer hier die weitaus größte Datenbasis aufweist. Die sachlogisch unplausible, geringere Wachstumsreaktion von Eiche und insbesondere Buche und Fichte im Bereich geringerer Niederschläge ist somit als Ergebnis sehr unterschiedlicher Beobachtungszahlen und unbalanzierter Datenstrukturen zu interpretieren. Zukünftige Modellverbesserungen erfordern daher gezielte Inventuren von seltenen Standort-Baumarten-Kombinationen insbesondere an den standörtlichen Randbereichen, die sich in Richtung zukünftig projizierter Bedingungen befinden.

### 2 Einleitung

Szenariosimulationen der Waldentwicklung mit Hilfe von Wachstumssimulatoren stellen seit Jahren eine Planungsgrundlage für die Forst- und Holzwirtschaft dar (Ahner et al. 2013, Fleck et al. 2015, Thiele et al. 2017). Waldentwicklungsprognosen stellen dabei Informationen für alle Waldfunktionen bereit (Sodtke et al. 2006). So werden beispielsweise die mittel- bis langfristigen Waldentwicklungs- und Holzaufkommensprognosen auf der Grundlage der Bundeswaldinventur (BWI) mit Einzelbaumsimulatoren durchgeführt (Rock et al. 2013, Wördehoff et al. 2017). Gleiches gilt für die Fortschreibung von Betriebsinventuren im Rahmen der Forsteinrichtung im Landeswald verschiedener Bundesländer sowie einiger Großprivat- und Kommunalwälder. Vereinzelt erfolgen aber auch Planungen auf der Grundlage des klassischen Waldbeganges mit Hilfe von Wachstumssimulatoren. Der zweite große Anwendungsbereich von Waldwachstumssimulatoren sind exemplarische Szenariosimulationen zur Ableitung optimaler waldbaulicher Behandlungsabfolgen und zur Unterstützung der forstwissenschaftlichen Lehre. Die meisten Simulatoren im deutschsprachigen Raum werden dabei über eine Bonitätseinschätzung (i. e. S.) initialisiert, die während der Simulation jedoch keiner Anpassung aufgrund von Standortveränderungen unterliegt. Eine Ausnahme ist das quasi-kausale Standort-Leistungs-Modell von Kahn (1994), das im Waldwachstumssimulator SILVA (Pretzsch 2001) implementiert ist. Darüber hinaus sind im Rahmen von vorangegangenen Studien (z. B. DSS-WUK: Thiele und Nuske 2016, NaLaMa-nT: Spellmann et al. 2017, WP\_KS\_KW: Burggraef und Brandl 2017, Burggraef et al. 2017) weitere standortsensitive Varianten der Simulatoren SILVA, ForestSimulator BWINPro und WEHAM getestet worden. Der methodische Vorteil standortsensitiver Modelle besteht darin, dass Standortveränderungen aufgrund des Klimawandels aber z.B. auch durch die atmosphärischen Stoffeinträge potentiell erfasst werden können. Eine statische Bonität unterstellt demgegenüber konstante Standortbedingungen, was in langfristigen Projektionen unter Klimawandel als realitätsfern betrachtet werden muss. Allerdings wurde im Rahmen der Studien deutlich, dass die Standortsensitivität sowohl bzgl. der Amplitude als auch des generellen Wirkungsmusters in vielen der Modellansätze als unbefriedigend beurteilt werden muss. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, Modelle für

- dynamische Schätzungen von Mittelhöhenbonitäten als eine Entscheidungsgrundlage für die standortbezogene Auswahl von Baumarten bzw. Waldentwicklungstypen unter Klimawandel,
- dynamische Schätzungen von Mittelhöhen-Altersverläufen zur standort- und damit klimasensitiven Initialisierung von Waldwachstumssimulatoren sowie
- dynamische Schätzung von standort- und damit klimasensitiven Erwartungswerten des Höhenzuwachses als eine Voraussetzung für die Entwicklung von witterungs- und konkurrenzsensitiven Höhenzuwachsmodellen und somit für die methodische Weiterentwicklung bestehender Waldwachstumssimulatoren

bereitzustellen, die sowohl bzgl. der quantitativen Amplituden als auch der qualitativen Verläufe der Modelleffekte realitätsnähere Abschätzungen ermöglichen.

## 3 Datengrundlagen

Eine besondere Bedeutung kommt der Datenbasis zu, die breite Gradienten aller wichtigen Wachstumsfaktoren erfassen sollte, damit die Modelle möglichst große Geltungsbereiche aufweisen und Störeffekte nicht erfasster Faktoren weitgehend ausgeschlossen werden können. Gleichzeitig ist die Abdeckung möglichst unterschiedlicher Kombinationen von Wachstumsfaktoren unabdingbar, um die Korrelation zwischen Faktoren wie der Temperatursumme in der Vegetationszeit (TempSumVeg) und der Niederschlagssumme in der Vegetationszeit (PrecSumVeg) zu reduzieren bzw. um plausible Effektverläufe schätzen zu können. In statistischen Modellen weisen Schätzungen in Randbereichen mit häufig geringerer Datenbelegung im Allgemeinen größere Unsicherheiten auf. In diesem Zusammenhang sind die Randbereiche zeitveränderlicher Faktoren, die unter den Bedingungen des projizierten Klimawandels immer häufiger auftreten werden, von besonderem Interesse. Aufgrund dieser Überlegungen und der unbefriedigenden Ergebnisse, die Modellentwicklungen auf der Grundlage einer regional auf Niedersachsen begrenzten Datengrundlage erbracht haben, wurde in der vorliegenden Untersuchung ein bundesweiter Datensatz verwendet. Dabei wirkt sich die zusätzliche Verwendung der Verdichtungsgebiete der BWI günstig auf die Erfassung von Extremstandorten und damit auf die Datenbesetzung an den Verteilungsrändern der Wachstumsfaktoren aus.

Dendrometrische Datenbasis sind die Bundeswaldinventuren (BWI) 1, 2 und 3 inklusive aller Verdichtungsgebiete ergänzt um Landeswald-Betriebsinventuren aus Hessen und Niedersachsen. Für die Modellbildung wurden nur Bäume des Hauptbestandes und des Überhaltes verwendet. Klimaparameter wurden auf der Grundlage von Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD), die durch das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) weiter aufbereiteten worden sind, abgeleitet und regionalisiert. In dieser Studie erfolgte die Regionalisierung direkt für die Vegetationsperioden- bzw. Jahressummenwerte über kalenderjahrspezifische hochdimensionale verallgemeinerte additive Modelle als Funktion der Höhe über NN und der geographischen Lage. Flächendeckende und räumlich detaillierte Eingangsdaten von atmosphärischen Stickstoffeinträgen in Deutschland basieren auf dem LOTUS-EUROS Modell (Schaap et al. 2015). Da diese sehr rechen- und zeitintensiven Modellierungen nur für wenige Jahre vorliegen, wurde die zeitliche Entwicklung mit Hilfe der gröber aufgelösten EMEP-Modellierung (Tarrasón & Nyíri 2008) und auf der Basis von Zeitreihen der Depositionsentwicklung für Mitteleuropa (Alveteg et al. 1998) rekonstruiert. Evaluierungen dieses Verfahrens sind bei Höhle et al. (2016) und Fleck et al. (2015) zu finden.

Die Klimaparameter TempSumVeg und PrecSumVeg sowie die NDep werden dynamisch über das Bestandesleben gemittelt, so dass neben räumlichen Gradienten auch zeitliche Veränderungen erfasst bzw. abgebildet werden. Die Länge der Vegetationszeit wurde mit dem R-Paket vegperiod (Nuske 2015) bestimmt, wobei der Startpunkt nach Menzel (1997) und der Endpunkt nach der Methode NuskeAlbert (Nuske 2015) definiert wurde. Traten innerhalb des Hauptbestandes (Überhaltes) einer Baumart mehrere Alter auf, so wurden die dynamischen Kovariablen als gewichtetes Mittel aller Höhenmessbäume berechnet, wobei die Gewichte aus den Auswahlwahrscheinlichkeiten der Bäume in den Waldinventuren resultieren. Dabei wurden Datensätze ausgeschlossen, in denen die Altersstreuung innerhalb einer Schicht und Baumart bestimmte Grenzwerte (die Standardabweichung beträgt mehr 10% des mittleren Schichtalters der Plotaufnahme oder der 10-90%-Perzentilabstand beträgt mehr als 20% des mittleren Schichtalters der Plotaufnahme) überschreitet. Die Mittelwertbildung ist notwendig, da mit der Grundflächenmittelhöhe eine Bestandesgröße als Wachstums bzw. Zielgröße verwendet wird. Einzelbaumhöhen können nicht verwendet werden, da in den verschiedenen Inventuren Höhen in verschiedenen Dimensionsbereichen des Bestandeskollektives erfasst werden und damit ein Inventurbias auftreten würde. Zur Reduzierung der Korrelation zwischen Bestandesalter und NDep war es im Rahmen der Modellbildung notwendig, die NDep mit ihren altersbedingten Erwartungswerten zu normieren und diese abgeleitete Kovariable (NDep norm) zur Beschreibung der Stickstoffdeposition zu verwenden. Nur die Antwortvariable Grundflächenmittelhöhe (Hg), das Bestandesalter (Alt), die verwendeten Klimaparameter sowie die NDep liegen flächendeckend vor. Bodenparameter zur Beschreibung des Wasserhaushaltes (WHZ) und der Nährstoffversorgung (NZ) liegen nur für den Teildatensatz der Betriebsinventurpunkte des niedersächsischen Landeswaldes sowie an den Stichprobenpunkten der BWI in Niedersachsen und Schleswig-Holstein mit STO\_NDS\_SH vor (Tab. 1). Den niedersächsischen Betriebsinventuren kommt dabei eine besondere Bedeutung zu, da gegenüber einer alleinigen Verwendung der BWI, deutlich mehr Datensätze mit erfassten Bodenparametern zu Verfügung stehen. Alle übrigen Stichprobenpunkte wurden bzgl. der NZ bzw. der WHZ in der Sammelkategorie 'brd' zusammengefasst.

Fab. 1: Häufigkeitsverteilungen der Stichprobenaufnahmen nach der Grundflächenmittelhöhe Hg und den kon-
inuierlichen Kovariablen Bestandesalter Alt, Temperatursumme in der Vegetationszeit TempSumVeg, Nieder-
chlagssumme in der Vegetationszeit PrecSumVeg, jährliche Stickstoffdeposition NDep und normierte jährliche
Stickstoffdeposition NDep norm für Fichte, Kiefer, Buche und Eiche.

	Min.	5 %-Qu.	25 %-Qu.	Median	Mittelwert	75 %-Qu.	95%-Qu.	Max.		
	Fichte									
Mittelhöhe Hg [m]	4.0	11.1	20.3	25.5	24.6	29.7	34.7	44.4		
Bestandesalter Alt [J]	10	23	44	64	70	93	130	171		
TempSumVeg [GT]	957	1750	1975	2136	2111	2265	2405	2933		
PrecSumVeg [mm]	250	309	355	396	417	455	603	1031		
NDep [eq/ha/a]	363	801	1091	1340	1349	1574	1955	3094		
NDep_norm	0.45	0.72	0.88	0.99	1.01	1.12	1.36	2.14		
				Ki	iefer					
Mittelhöhe Hg [m]	4.3	12.2	19.3	23.1	22.6	26.5	31.1	38.7		
Bestandesalter Alt[J]	10	26	51	74	80	108	148	181		
TempSumVeg [GT]	1460	2066	2240	2323	2314	2403	2516	2978		
PrecSumVeg [mm]	238	271	297	325	337	359	454	949		
NDep [eq/ha/a]	360	716	955	1191	1209	1379	1874	3018		
NDep_norm	0.49	0.73	0.84	0.92	0.96	1.02	1.43	2.11		

Schmidt et al.: Standortsensitive	Wachstumsfunktionen zu	r Abschätzung des Höhei	nzuwachspotentials

	Min.	5 %-Qu.	25 %-Qu.	Median	Mittelwert	75 %-Qu.	95%-Qu.	Max.	
	Buche								
Mittelhöhe Hg [m]	5.0	11.9	22.1	27.1	26.0	31.1	35.6	43.5	
Bestandesalter Alt [J]	10	29	65	100	101	137	171	212	
TempSumVeg [GT]	1128	1878	2068	2181	2176	2288	2453	2879	
PrecSumVeg [mm]	240	298	330	364	379	404	519	1008	
NDep [eq/ha/a]	364	654	832	1045	1091	1310	1668	3055	
NDep_norm	0.45	0.72	0.88	0.97	0.98	1.06	1.27	2.14	
				Ei	chen				
Mittelhöhe Hg [m]	4.6	11.4	19.7	24.5	23.5	28.1	32.1	40.0	
Bestandesalter Alt[J]	10	27	69	110	108	145	188	243	
TempSumVeg [GT]	1622	2038	2176	2275	2274	2365	2517	2964	
PrecSumVeg [mm]	236	279	309	340	351	378	460	838	
NDep [eq/ha/a]	325	590	771	979	1056	1271	1780	3072	
NDep_norm	0.42	0.70	0.85	0.94	0.97	1.04	1.39	2.20	

Für alle Baumarten werden sehr breite Hg- und Altersbereiche abgedeckt (Tab. 1). Die Werte gelten für die Modellierungsbasis, die unter Berücksichtigung einer zusätzlichen Ausreißerbereinigung erzeugt wurde (Umfang der Datenbasis, s. Tab. 3). So wurden für alle Baumarten nur Bäume mit einem Minimalalter von 10 Jahren verwendet und das Maximalalter auf das baumartenspezifische 99.5%-Quantil+10 fixiert, da für sehr hohe Alter eine starke Unausgeglichenheit der Datenbasis mit einem überproportional hohen Anteil ungünstigerer Standortkombinationen auftritt. Aus den spezifischen räumlichen Verteilungen der Baumarten in Deutschland resultieren insbesondere für die klimatischen Wachstumsfaktoren deutliche Unterschiede in den Häufigkeitsverteilungen. Dabei werden die Unterschiede teilweise weniger an den Extremwerten als vielmehr an den Perzentilbereichen deutlich. So liegen beispielsweise die Standorte mit den 5% niedrigsten Werten der PrecSumVeg bei Kiefer im Intervall [238,271] und bei Buche im Intervall [240,298] mm oder die Standorte mit den 5% höchsten Werten der TempSumVeg bei Fichte im Intervall [2405,2933] und bei den Eichen im Intervall [2517,2964] Tagesgrade. Die sehr differenzierten Kategorien der STO\_NDS\_SH zur Beschreibung des Wasserhaushaltes (vgl. NFP 2007, 2009) wurden für die terrestrischen Standorte in Anlehnung an die Synopse der Hauptmerkmale der forstlichen Standortskartierungsverfahren der Nordwestdeutschen Bundesländer (Schmidt et al. 2015) und für die grund- und stauwasserbeeinflussten Standorte im Anhalt an die Langfristige ökologische Waldentwicklung (LÖWE) in Niedersachsen (Niedersächsisches Ministerium für den ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz 2004) zu den folgenden Gruppen zusammengefasst:

- Bergland: 1=nachhaltig frisch, 2=vorratsfrisch, 3=frisch, 4=mäßig frisch, 5=kaum frisch, 6=mäßig sommertrocken, 7=mäßig sommertrocken bis trocken, trocken, 9=grundnass, staunass, quellig, 11=wechseltrockene und staufeuchte Plateaus, 12=grundfeucht, grundfrisch, 13=wechsel-, hangfeuchte Hänge, 16=Moore
- Tiefland: 17=nachhaltig frisch, 18=frisch bis vorratsfrisch, 19=mäßig frisch, 20=mäßig sommertrocken, trocken, 22=stau-, grundnass, 23=grundnass, 25=grundfeucht, 26=wechseltrocken, staufeucht, 27=grundfrisch, 28=staufrisch, 31=Moore

Tab. 2: Häufigkeitsverteilungen der verwendeten Stichprobenpunkte für die kategorischen Kovariablen Nährstoffversorgung NZ und Wasserhaushalt WHZ (Standortkartierung Niedersachsen / Schleswig-Holstein) für Fichte, Kiefer, Buche und Eiche. Die Verteilungen für die WHZ-Kategorien sind nach Bergland- und Tieflandstandorten getrennt (detaillierte Erläuterungen siehe Text).

							Fichte							
Nährstoffziffer	2-	2	2+	3-	3	3+	4-	4	4+	· 5·	- 5	5+	6-	Σ
Anzahl Stichprobenp.	7	404	664	968	3466	4042	3808	3991	1393	398	8 471	318	14	19.944
Wasserhaushaltsziffer														
Bergland (gruppiert)	1	2	3	4	4	5	6	7	9	11	12	13	16	Σ
Anzahl Stichprobenp.	1375	1637	8395	1832	2 77	1 1	31	75	208	422	82	418	69	15.415
Wasserhaushaltsziffer														
Tiefland (gruppiert)	17	18	19	9	20	22	23	25	5	26	27	28	31	Σ
Anzahl Stichprobenp.	94	769	120	9 3	354	64	53	309	3 3	70	577	549	181	4.529
							Kiefer							
Nährstoffziffer	2-	2	2+	3-	3	3+	4-	4	4+	· 5·	- 5	5+	6-	Σ
Anzahl Stichprobenp.	177	1842	3235 2	2013	3240	1601	700	1318	225	95	5 82	35	-	14.563
Wasserhaushaltsziffer														
Bergland (gruppiert)	1	2	3	4	4	5	6	7	9	11	12	13	16	Σ
Anzahl Stichprobenp.	32	148	211	88	8 11	.0	10	22	22	95	3	18	-	759
Wasserhaushaltsziffer														
Tiefland (gruppiert)	17	18	1	9	20	22	23	25	5	26	27	28	31	Σ
Anzahl Stichprobenp.	34	1109	3942	2 29	972	110	122	1114	15	16 2	904	691	290	13.804
Buche														
							Buche							
Nährstoffziffer	2-	2	2+	3-	3	3+	Buche 4-	4	4+	· 5·	- 5	5+	6-	Σ
Nährstoffziffer Anzahl Stichprobenp.	2- 4	2 72	2+ 113	3- 206	3 866	3+ 1455	Buche 4- 2423	4 3229	4+ 1678	· 5· 707	- 5 2 1467	5+ 1453	6- 63	Σ 13.736
Nährstoffziffer Anzahl Stichprobenp. Wasserhaushaltsziffer	2- 4	2 72	2+ 113	3- 206	3 866	3+ 1455	Buche 4- 2423	4 3229	4+ 1678	· 5· 707	- 5 7 1467	5+ 1453	6- 63	Σ 13.736
Nährstoffziffer Anzahl Stichprobenp. Wasserhaushaltsziffer Bergland (gruppiert)	2- 4	2 72 2	2+ 113 3	3- 206	3 866 4	3+ 1455 5	Buche 4- 2423 6	4 3229 7	4+ 1678 9	- 5- 5- 707 11	- 5 2 1467 12	5+ 1453 13	6- 63 16	Σ 13.736 Σ
Nährstoffziffer Anzahl Stichprobenp. Wasserhaushaltsziffer Bergland (gruppiert) Anzahl Stichprobenp.	2- 4 1 1350	2 72 2 1195	2+ 113 3 5431	3- 206 1464	3 866 4 4 80	3+ 1455 5 95 1	Buche 4- 2423 6 06	4 3229 7 96	4+ 1678 9 52	- 5. 707 11 145	- 5 7 1467 12 61	5+ 1453 13 199	6- 63 16	Σ 13.736 Σ 10.904
Nährstoffziffer Anzahl Stichprobenp. Wasserhaushaltsziffer Bergland (gruppiert) Anzahl Stichprobenp. Wasserhaushaltsziffer	2- 4 1 1350	2 72 2 1195	2+ 113 3 5431	3- 206 1464	3 866 4 4 80	3+ 1455 5 05 10	Buche 4- 2423 6 06	4 3229 7 96	4+ 1678 9 52	- 5- 707 11 145	- 5 7 1467 12 61	5+ 1453 13 199	6- 63 16 -	Σ 13.736 Σ 10.904
Nährstoffziffer Anzahl Stichprobenp. Wasserhaushaltsziffer Bergland (gruppiert) Anzahl Stichprobenp. Wasserhaushaltsziffer Tiefland (gruppiert)	2- 4 1 1350 17	2 72 2 1195	2+ 113 3 5431	3- 206 1464 9	3 866 4 4 80 20	3+ 1455 5 05 10 22	Buche 4- 2423 6 06 23	4 3229 7 96 25	4+ 1678 9 52	- 5. 707 11 145 26	- 5 7 1467 12 61 27	5+ 1453 13 199 28	6- 63 16 - 31	Σ 13.736 Σ 10.904 Σ
Nährstoffziffer Anzahl Stichprobenp. Wasserhaushaltsziffer Bergland (gruppiert) Anzahl Stichprobenp. Wasserhaushaltsziffer Tiefland (gruppiert) Anzahl Stichprobenp.	2- 4 1350 17 135	2 72 2 1195 18 700	2+ 113 3 5431 5431 533	3- 206 1464 9 3	3 866 4 4 80 20 77	3+ 1455 5 05 1 22 31	Buche 4- 2423 6 06 23 8	4 3229 7 96 25 111	4+ 1678 9 52 5 1 2	- 5- 3 707 11 145 26 94	- 5 7 1467 12 61 27 259	5+ 1453 13 199 28 661	6- 63 16 - 31 23	Σ 13.736 Σ 10.904 Σ 2.832
Nährstoffziffer Anzahl Stichprobenp. Wasserhaushaltsziffer Bergland (gruppiert) Anzahl Stichprobenp. Wasserhaushaltsziffer Tiefland (gruppiert) Anzahl Stichprobenp.	2- 4 1350 17 135	2 72 1195 18 700	2+ 113 3 5431 511 533	3- 206 1464 9 3	3 866 4 4 80 20 77	3+ 1455 5 05 1 22 31	Buche 4- 2423 6 06 23 8 Eichen	4 3229 7 96 25 111	4+ 1678 9 52 1 2	- 5- - 707 - 11 - 145 - 26 - 94	- 5 7 1467 12 61 27 259	5+ 1453 13 199 28 661	6- 63 16 - 31 23	Σ 13.736 Σ 10.904 Σ 2.832
Nährstoffziffer Anzahl Stichprobenp. Wasserhaushaltsziffer Bergland (gruppiert) Anzahl Stichprobenp. Wasserhaushaltsziffer Tiefland (gruppiert) Anzahl Stichprobenp. Nährstoffziffer	2- 4 1 1350 17 135 2-	2 72 2 1195 18 700	2+ 113 3 5431 51 53 2+	3- 206 1464 9 3 3-	3 866 4 4 20 77 3	3+ 1455 5 05 1 22 31 3+	Buche 4- 2423 6 06 23 8 Eichen 4-	4 3229 7 96 25 111	4+ 1678 9 52 5 L 2 4+	- 5. 3 707 11 145 26 94 - 5.	- 5 1467 12 61 27 259 - 5	5+ 1453 13 199 28 661 5+	6- 63 16 - 31 23 6-	Σ 13.736 Σ 10.904 Σ 2.832 Σ
Nährstoffziffer Anzahl Stichprobenp. Wasserhaushaltsziffer Bergland (gruppiert) Anzahl Stichprobenp. Wasserhaushaltsziffer Tiefland (gruppiert) Anzahl Stichprobenp. Nährstoffziffer Anzahl Stichprobenp.	2- 4 1350 17 135 2- 5	2 72 1195 18 700 2 163	2+ 113 5431 5431 53: 2+ 204	3- 206 1464 9 3 3- 270	3 866 4 4 80 77 77 3 908	3+ 1455 5 05 1 22 31 3+ 700	Buche 4- 2423 6 06 23 8 Eichen 4- 791	4 3229 7 96 25 111 4 1769	4+ 1678 9 52 5 1 2 4+ 1025	- 5. 3 707 11 145 26 94 - 5. 5 418	- 5 7 1467 12 61 27 259 - 5 3 647	5+ 1453 13 199 28 661 28 661 5+ 177	6- 63 16 - 31 23 6- 15	Σ 13.736 Σ 10.904 Σ 2.832 Σ 7.092
Nährstoffziffer Anzahl Stichprobenp. Wasserhaushaltsziffer Bergland (gruppiert) Anzahl Stichprobenp. Wasserhaushaltsziffer Tiefland (gruppiert) Anzahl Stichprobenp. Nährstoffziffer Anzahl Stichprobenp. Wasserhaushaltsziffer	2- 4 1350 17 135 2- 5	2 72 1195 18 700 2 163	2+ 113 3 5431 519 533 2+ 204	3- 206 1464 9 3 3- 270	3 866 4 4 20 77 3 908	3+ 1455 5 05 1 22 31 3+ 700	Buche 4- 2423 6 06 23 8 Eichen 4- 791	4 3229 7 96 25 111 4 1769	4+ 1678 9 52 1 2 4+ 1025	- 5. 3 707 11 145 26 94 - 5. 5 418	- 5 7 1467 12 61 27 259 - 5 8 647	5+ 1453 13 199 28 661 5+ 177	6- 63 16 - 31 23 6- 15	Σ 13.736 Σ 10.904 Σ 2.832 Σ 7.092
Nährstoffziffer Anzahl Stichprobenp. Wasserhaushaltsziffer Bergland (gruppiert) Anzahl Stichprobenp. Wasserhaushaltsziffer Tiefland (gruppiert) Anzahl Stichprobenp. Nährstoffziffer Anzahl Stichprobenp. Wasserhaushaltsziffer Bergland (gruppiert)	2- 4 1350 17 135 2- 5 1	2 72 1195 18 700 2 163 2	2+ 113 3 5431 5153 53 2+ 204 3	3- 206 1464 9 3 3- 270	3 866 4 4 20 77 3 908 4	3+ 1455 5 05 1 22 31 3+ 700 5	Buche 4- 2423 6 06 23 8 Eichen 4- 791 6	4 3229 7 96 25 111 4 1769 7	4+ 1678 9 52 5 1 2 4+ 1025 9	- 5- - 707 11 145 26 94 - 5- - 5- - 418 11	- 5 7 1467 12 61 27 259 - 5 3 647 12	5+ 1453 13 199 28 661 28 661 5+ 177 13	6- 63 16 - 31 23 6- 15 16	Σ 13.736 Σ 10.904 Σ 2.832 Σ 7.092
Nährstoffziffer Anzahl Stichprobenp. Wasserhaushaltsziffer Bergland (gruppiert) Anzahl Stichprobenp. Wasserhaushaltsziffer Tiefland (gruppiert) Anzahl Stichprobenp. Nährstoffziffer Anzahl Stichprobenp. Wasserhaushaltsziffer Bergland (gruppiert) Anzahl Stichprobenp.	2- 4 1350 17 135 2- 5 2- 5 1 409	2 72 1195 18 700 2 163 2 568	2+ 113 3 5431 5 533 2+ 204 3 1031	3- 206 1464 9 3 3- 270	3 866 4 4 20 77 3 908 4 7 11	3+ 1455 5 05 1 22 31 3+ 700 5 4	Buche 4- 2423 6 06 23 8 Eichen 4- 791 6 18	4 3229 7 96 25 111 4 1769 7 8	4+ 1678 9 52 1 2 1025 9 69	- 5. - 707 - 11 145 - 26 - 94 - 5. - 5. - 418 - 11 - 327	- 5 7 1467 12 61 27 259 - 5 3 647 12 21	5+ 1453 13 199 28 661 5+ 177 13 75	6- 63 16 - 31 23 6- 15 16 2	Σ 13.736 Σ 10.904 Σ 2.832 Σ 7.092 Σ 2.869
Nährstoffziffer Anzahl Stichprobenp. Wasserhaushaltsziffer Bergland (gruppiert) Anzahl Stichprobenp. Wasserhaushaltsziffer Tiefland (gruppiert) Anzahl Stichprobenp. Nährstoffziffer Anzahl Stichprobenp. Wasserhaushaltsziffer Bergland (gruppiert) Anzahl Stichprobenp. Wasserhaushaltsziffer	2- 4 1350 17 135 2- 5 5 1 409	2 72 1195 18 700 2 163 2 568	2+ 113 5431 5431 533 533 5431 533 5431 533 5431 533 5431 5431	3- 206 1464 9 3 3- 270	3 866 4 4 20 77 3 908 4 7 11	3+ 1455 5 05 10 22 31 3+ 700 5 .4	Buche 4- 2423 6 06 23 8 Eichen 4- 791 6 18	4 3229 7 96 25 111 4 1769 7 8	4+ 1678 9 52 5 1 2 4+ 1025 9 69	5. 3 707 11 145 26 94 5. 5 418 11 327	- 5 7 1467 12 61 27 259 - 5 3 647 12 21	5+ 1453 13 199 28 661 5+ 177 13 75	6- 63 16 - 31 23 6- 15 16 2	Σ 13.736 Σ 10.904 Σ 2.832 Σ 7.092 Σ 2.869
Nährstoffziffer Anzahl Stichprobenp. Wasserhaushaltsziffer Bergland (gruppiert) Anzahl Stichprobenp. Wasserhaushaltsziffer Tiefland (gruppiert) Anzahl Stichprobenp. Nährstoffziffer Anzahl Stichprobenp. Wasserhaushaltsziffer Bergland (gruppiert) Anzahl Stichprobenp. Wasserhaushaltsziffer Tiefland (gruppiert)	2- 4 1350 17 135 2- 5 409 17	2 72 1195 18 700 2 163 2 568 18	2+ 113 3 5431 5 533 2+ 204 3 1031	3- 206 1464 9 3 3- 270 222	3 866 4 4 20 77 3 908 4 7 11 20	3+ 1455 5 05 1 22 31 3+ 700 5 4 22	Buche 4- 2423 6 06 23 8 Eichen 4- 791 6 18 23	4 3229 7 96 25 111 4 1769 7 8	4+ 1678 9 52 5 1 2 4+ 1025 9 69	- 5. - 707 11 145 26 94 - 5. - 418 11 327 26	- 5 7 1467 12 61 27 259 - 5 3 647 12 21 27	5+ 1453 13 199 28 661 5+ 177 13 75 28	6- 63 16 - 31 23 6- 15 16 2 31	Σ 13.736 Σ 10.904 Σ 2.832 Σ 7.092 Σ 2.869 Σ

Tab. 3: Stichprobenun	fänge nach Stichpro-
benpunkten und Stic	hprobenaufnahmen

	Anzahl							
	Stichproben-	Stichproben-						
	punkte	aufnahmen						
Fichte	53.676	89.611						
Kiefer	45.327	68.144						
Buche	47.067	72.662						
Eiche	28.613	43.301						

#### 4 Methoden

Eine grundsätzliche Konzeption der vorliegenden Untersuchung besteht in der Verwendung einer theoretischen Wachstumsfunktion als Grundmodell, die anschließend standortsensitiv generalisiert wird. Über diese Vorgehensweise soll gewährleistet werden, dass durch Ableitung der Funktion zwingend realistische Zuwächse resultieren. Diese Vorgabe könnte bei einer freien Schätzung d.h. ohne die Verwendung eines theoretischen Wachstumsmodells kaum erfüllt werden. Als zugrundeliegende Wachstumsfunktion wurde eine modifizierte Form der Korf-Funktion (Lappi 1997, Mehtätalo 2004, 2005) verwendet. Die mod. Korf-Funktion von Lappi (1997) ist ursprünglich für longitudinale Höhen-BHD-Kurven entwickelt worden. 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 das Niveau und die Steigung der Entwicklung der Wachstumsgröße über dem Alter. Die biologische Interpretierbarkeit ist insbesondere für die hier angestrebte Ableitung standortsensitiver Modelle von entscheidender Bedeutung, da die Funktionsparameter erster Ordnung in Abhängigkeit von Wachstumsfaktoren beschrieben werden. Die Interpretierbarkeit der Parameter ermöglicht eine Plausibilitätsprüfung der Effekte und im allgemeinen sind für die Effekte auch eher sachlogisch plausible Verläufe zu erwarten.

$$\ln(Hg_{kt}) = A_{kt} - B_{kt} (Alt_{kt} + \lambda)^{-C} + \varepsilon_{kt}$$
[1.1]

$$ln(Hg_{kt}) = A_{kt} - B_{kt} x_{kt} + \varepsilon_{kt}$$
 , wobei:

$$x_{kt} = \frac{(AIt_{kt} - \lambda)^{-C} - (100 - \lambda)^{-C}}{(50 - \lambda)^{-C} - (100 - \lambda)^{-C}}$$

mit:

mine.		
$Hg_{kt}$	:	baumartenspezifische Grundflächenmittelhöhe von Stichprobenpunkt $k$ zum Zeitpunkt $t$
$Alt_{kt}$	:	baumartenspezifisches Bestandesalter in Stichprobenpunkt k zum Zeitpunkt t
C, λ	:	Parameter der mod. Korf-Funktion, die in der weiteren Modellentwicklung konstant gesetzt werden
A <sub>kt</sub>	:	Parameter zur Beschreibung des Niveaus der Hg-Alters-Funktion für Stichprobenpunkt <i>k</i> zum Zeitpunkt <i>t</i>
B <sub>kt</sub>	:	Parameter zur Beschreibung des Steigung der Hg-Alters-Funktion für Stichprobenpunkt k zum Zeitpunkt t
X <sub>kt</sub>	:	transformiertes Bestandesalter von Stichprobenpunkt k zum Zeitpunkt t

Die bzgl. der Parameter C und  $\lambda$  nicht-lineare Funktion [1.1] lässt sich linearisieren [1.2], in dem in einer heuristischen Gittersuche die Kombination der beiden Parameter gesucht wird, bei der die maximale Modellgüte erreicht wird und die selektierten Parameter im weiteren als konstant betrachtet werden. In der vorliegenden Untersuchung wurde das Bayessche Informationskriterium (BIC) als Gütekriterium verwendet. Es werden die folgenden Werte für die Parameter C und  $\lambda$  (Fichte: C=-2.1,  $\lambda$ =31; Kiefer: C=-3.0,  $\lambda$ =42; Buche: C=-2.7,  $\lambda$ =59; Eichen: C=-1.4,  $\lambda$ =26) verwendet. Die Parameter A<sub>kt</sub> und B<sub>kt</sub> werden in der weiteren Modellentwicklung durch Wachstumsfaktoren beschrieben und X<sub>kt</sub> beschreibt ein transformiertes Bestandesalter [1.2]. In dieser Parametrisierung ergeben sich für A<sub>kt</sub> und B<sub>kt</sub> folgende Interpretationen: A<sub>kt</sub> ist der Erwartungswert der logarithmierten Hg im Alter 50 und B<sub>kt</sub> ist die Differenz zwischen den Erwartungswerten der logarithmierten Hg im Alter 50 und 100 Jahre von Stichprobepunkt *k* zum Zeitpunkt *t*. Die Indizes *k und t* beschreiben, dass die Parameter A und B in Raum und Zeit variieren. Die Linearisierung [1.2] ist notwendig weil [1.1] überparametrisiert ist, was sich an der hohen Korrelation zwischen C und B zeigt und weil so die Effekte der untersuchten Wachstumsfaktoren mit Hilfe eines GAM in einem Modellierungsschritt geschätzt werden können. Die hier vorgestellte Arbeit auf Basis der mod. Korf-Funktion weist im Vergleich zu den Arbeiten von Lappi (1997) und Mehtätalo (2004,

[1.2]

2005) einige Unterschiede auf. So parametrisieren Lappi (1997) und Mehtätalo (2004, 2005) bei der Gittersuche für C und  $\lambda$  individuelle Modelle für jeden Aufnahmezeitpunkt einer Versuchsfläche bzw. einer zu einem Bestand gehörenden Gruppe von Stichprobenpunkten. Diese Vorgehensweise war möglich, weil in beiden Fällen eine ausreichende Anzahl Baumhöhen je Aufnahme vorlag. In der vorliegenden Untersuchung liegen je Stichprobenaufnahme nur sehr wenige Höhenmessungen vor. Auch treten bei Verwendung der Hg nur innerhalb der Plot-Ebene Wiederholungen vor. Aus diesem Grund ließen sich keine individuellen Modelle je Plot bzw. Plotaufnahme parametrisieren. Auch der Weg über gemischte Modelle individuelle Parameter abzuleiten, wurde aufgrund der großen Anzahlen an Stichprobenpunkten (Tab. 3) verworfen. Stattdessen wurden komplexe GAM mit einem nicht-linearen Effekt der Geländehöhe über NN und einem hoch-dimensionalen Effekt der regionalen Lage in Deutschland parametrisiert, um die Variation der Parameter Akt und Bkt zumindest teilweise zu erfassen [2.1 und 2.2]. Dabei ist es sinnvoll — anstelle der log-linearen — generalisierte Modelle mit logarithmischer Verknüpfungsfunktionen zu verwenden, um die Verzerrung bei der Rücktransformation der logarithmierten Werte zu vermeiden. Üblicherweise wird dabei angenommen, dass die abhängige Variable einer Gamma-Verteilung folgt, was einen konstanten Variationskoeffizienten unterstellt. Allerdings stehen mittlerweile Methoden zur Verfügung, die neben der Modellierung des Erwartungswertes [2.1] eine simultane Modellierung der Varianz bzw. Standardabweichung über einen zweiten linearen Prädiktor ermöglichen [2.2]. In der vorliegenden Untersuchung wurde daher als Alternative zur Gamma-Verteilung die Normalverteilungsannahme mit expliziter Modellierung der Standardabweichung (Gaulss, Wood et al. 2016) in Funktion des transformierten Alters x<sub>kt</sub> getestet [2.2].

$$E[Hg_{kt}] = g_{E}^{-1}[\beta_{0a} + f_{1}(NHN_{k}) + f_{0e0}(RW_{k}, HW_{k}) + \beta_{1b}x_{kt}]$$
[2.1]

$$SD[Hg_{kt}] = 0.01 + g_{SD}^{-1} [\beta_{0SD} + f_{1SD}(x_{kt})]$$
[2.2]

$$Hg_{kt} \sim N(\mu, \sigma^2)$$

mit:

E[Hg <sub>kt</sub> ], SD[Hg <sub>kt</sub> ]	:	Erwartungswert bzw. Standardabweichung der baumartenspezifischen Grundflächenmittel- höhe Hg von Stichprobenpunkt <i>k</i> zum Zeitpunkt <i>t</i>
NHN <sub>k</sub>	:	Geländehöhe über NN [m] von Stichprobenpunkt k
RW <sub>k</sub> , HW <sub>k</sub>	:	Rechts- und Hochwert von Stichprobenpunkt k [UTM-Koordinaten]
x <sub>kt</sub>	:	transformiertes Bestandesalter von Stichprobenpunkt k zum Zeitpunkt t
$g_{\rm E}^{-1}, g_{\rm SD}^{-1}$	:	inverse Link-Funktionen mit $g_E = ln(.)$ und $g_{SD} = ln(.)$
$\beta_{0a}$	:	auf den Parameter erster Ordnung A wirkendes Interzept
f <sub>1</sub>	:	auf den Parameter erster Ordnung A wirkender 1-dimensionaler penalisierter Regressions- spline zur Beschreibung des Effektes der Geländehöhe über NN
f <sub>geo</sub>	:	auf den Parameter erster Ordnung A wirkender 2-dimensionaler isotroper penalisierter Regressionsspline zur Beschreibung des Effektes der regionalen Lage mit einer Dimensions- begrenzung von 100.
$\beta_{1b}$	:	auf den Parameter erster Ordnung B wirkender Koeffizient
$\beta_{0SD}$	:	auf die Standardabweichung wirkendes Interzept
f <sub>1SD</sub>	:	auf die Standardabweichung wirkender 1-dimensionaler penalisierter Regressionsspline zur Beschreibung des Effektes des transformierten Bestandesalters x <sub>kt</sub>

An die baumartenspezifische Optimierung der Parameter C und  $\lambda$  zur Ableitung von x<sub>kt</sub> mittels heuristischer Gittersuche schließt sich die eigentliche Modellselektion und die Quantifizierung der Effekte auf die Altersentwicklung der Hg für die vier untersuchten Baumarten(gruppen) an [3]:

$$E[Hg_{kt}] = g_{E}^{-1}[\beta_{0a} + f_{1a}(X_{1kt}) + \dots + f_{na}(X_{nkt}) + f_{geo_a}(RW, HW)$$

$$+ \beta_{1b}X_{kt} + f_{1b}(X_{1kt})X_{kt} + \dots + f_{nb}(X_{nkt})X_{kt}]$$
[3.1]

1	1
$SD[Hg_{kt}] = 0.01 + g_{SD}^{-1}[\beta_{0SD} + \beta_{1SD}]$	<u> </u>
	log(Alt <sub>kt</sub> ) <sup>-</sup>

mit:		
$Hg_{kt}$	:	baumartenspezifische Grundflächenmittelhöhe von Stichprobenpunkt k zum Zeitpunkt t
x <sub>kt</sub>	:	transformiertes Bestandesalter von Stichprobenpunkt k zum Zeitpunkt t
$X_{1kt}X_{nkt}$	:	potentielle Wachstumsfaktoren von Stichprobenpunkt <i>k</i> zum Zeitpunkt <i>t</i>
$RW_k$ , $HW_k$	:	Rechts- und Hochwert von Stichprobenpunkt k [UTM-Koordinaten]
$g_{\rm E}^{-1}, g_{\rm SD}^{-1}$	:	inverse Link-Funktionen mit $g_E = ln(.)$ und $g_{SD} = ln(.)$
$\beta_{0a}$	:	auf den Parameter erster Ordnung A wirkendes Interzept
$f_{1a} \dots f_{na}$	:	auf den Parameter erster Ordnung A wirkende 1-dimensionale penalisierte Regressionssplines
$f_{geo}$	:	auf den Parameter erster Ordnung A wirkender 2-dimensionaler isotroper penalisierter Regres- sionsspline zur Beschreibung des Effektes der regionalen Lage
$\beta_{1b}$	:	auf den Parameter erster Ordnung B wirkender Koeffizient
$f_{1b} \dots f_{nb}$	:	auf den Parameter erster Ordnung B wirkende 1-dimensionale penalisierte Regressionssplines
$\beta_{\text{OSD}}$	:	auf die Standardabweichung der Hg wirkendes Interzept
f <sub>1SD</sub>	:	auf die Standardabweichung der Hg wirkender 1-dimensionaler penalisierter Regressionsspline zur Beschreibung des Effektes des (transformierten) Bestandesalters
i	:	baumartenspezifischer Koeffizient

Dabei wurde die Variablenselektion auf den linearen Prädiktor des Erwartungswertes der Hg [3.1] beschränkt und für den linearen Prädiktor zur Beschreibung der heterogenen Varianz nur das transformierte Alter xkt als Kovariabale [3.2] verwendet bzw. als Alternative zur Annahme der Gamma-Verteilung getestet. Zur Bewertung der Modellgüte im Rahmen der schrittweisen Modellselektion wurde das BIC verwendet. Die resultierenden Verläufe nicht-linearer Modelleffekte wurden an den schwach belegten Datenrändern teilweise gutachtlich in ihrer Flexibilität beschränkt, um sachlogisch plausible Effekte zu erzwingen. Die Approximation erfolgte entweder durch die Verwendung parametrischer Terme oder durch Reduktion der Basisdimension der glättenden Terme und teilweise zusätzliche Definition von Grenzwerten, ab denen konstante Effektverläufe erzwungen wurden. Für die Koeffizienten der WHZ wurden teilweise weitere sachlogisch begründete Nebenbedingungen definiert, wie z.B. jeweils von 'nachhaltig frisch' bis 'trocken' monoton sinkende Effekte für die terrestrischen Standorte im Berg- bzw. Tiefland. In seltenen Fällen mussten sachlogisch benachbarte Kategorien zur Gewährleistung dieser Nebenbedingungen zusammengefasst werden (Tab. 4/6). Für die Kategorien der NZ wurden keine Monotoniebedingungen für die Gesamtabfolge definiert. Aber auch hier erfolgten vereinzelte Zusammenfassungen, um nicht plausible Schwankungen zu unterdrücken (Tab. 4/6). Alle GAM's wurden in der Statistik-Umgebung R (Version 3.4.4, R Core Team 2018) unter Verwendung des Paketes mgcv (Version 1.8-24, Wood 2003, 2004, 2011) parametrisiert.

#### 5 Ergebnisse und Diskussion

Für die Eichen und Fichte werden beispielhaft die Ergebnisse und Baumartenunterschiede anhand der Modelleffekte dargestellt. Für Fichte erfolgt zusätzlich eine graphische Sensitivitätsanalyse. Für Buche und Kiefer werden die Effekte der Wachstumsfaktoren ebenfalls beschrieben, aber keine Abbildungen gezeigt. Die grundsätzliche Struktur der Hg-Alters-Modelle [4.1] ist bzgl. der verwendeten und als signifikant identifizierten Kovariablen für die vier untersuchten Baumarten(gruppen) identisch. Beim Vergleich der Gamma-Regression gegenüber der Regression mit Normalverteilungsannahme und expliziter Modellierung der Standardabweichung (Gaulss) wies die letztere für alle Baumarten eine deutlich höhere Modellgüte (BIC) auf. Die Ergebnisdarstellung erfolgt daher für die Gaulss-Modelle. Die explizite Modellierung der Standardabweichung garantiert eine verzerrungsfreie Schätzung der Modelleffekte, kann

[3.2]

aber auch für realistischere Simulationen unter Berücksichtigung stochastischer Komponenten genutzt werden. Die für alle Baumarten einheitliche Modellstruktur lässt sich wie folgt beschreiben:

$$\begin{aligned} & [Hg_{k1}] = g_{E}^{T} [f_{0as} + f_{1a} (TempSumVeg_{k1}) + f_{2a} (PrecSumVeg_{k1}) & [4.1] \\ & + f_{1a} (NDep_norm_{k1}) \\ & + WHZ_{1}^{T} [h_{WHZ_{a}} + NZ_{k}^{T} [h_{Z_{a}} a \\ & + f_{geo_{a}} (RW_{k} + HW_{k}) + \beta_{1b} X_{k1}] \\ & SD[Hg_{k1}] = 0.01 + g_{SD}^{T} [f_{0SD} + \beta_{1SD} \frac{1}{\log(Alt_{k1})}], & mit i=1 für Fichte und Kiefer, i=1.6 für [4.2] \\ & Buche und i=3.4 für Eiche \\ & mit: \\ & Hg_{k1} & : & baumartenspezifische Grundflächenmittelhöhe von Stichprobenpunkt k zum Zeitpunkt t \\ TempSumVeg_{k1} & : & über das Bestandesleben gemittelte Temperatursumme in der Vegetationszeit [GT] der Hg \\ & an Stichprobenpunkt k zum Zeitpunkt t \\ & PrecSumVeg_{k1} & : & über das Bestandesleben gemittelte Niederschlagssumme in der Vegetationszeit [GT] der Hg \\ & an Stichprobenpunkt k zum Zeitpunkt t \\ & NDep_norm_{k1} & : & über das Bestandesleben gemittelte, normierte jährliche Stickstoffdeposition [eq/ha/a] der Hg an Stichprobenpunkt k zum Zeitpunkt t \\ & WHZ_{k2}, NZ_{k} & : & Kategorien zur Beschreibung des Wasserhaushaltes und der Nährstoffversorgung nach niedersächsisch-schleswig-holsteinischem Kartierverfahren an Stichprobenpunkt k \\ & RW_{k2}, HW_{k} & : & Rechts- und Hochwert von Stichprobenpunkt k zum Zeitpunkt t \\ & Alt_{k2} & : & Itransformiertes Bestandesalter von Stichprobenpunkt k zum Zeitpunkt t \\ & Alt_{k2} & : & auf den Parameter erster Ordnung A wirkender 1-dimensionaler penalisierter Regressions-spline zur Beschreibung des Effektes der TempSumVeg \\ & f_{2a} & : & auf den Parameter erster Ordnung A wirkender 1-dimensionaler penalisierter Regressions-spline zur Beschreibung des Effektes der TempSumVeg \\ & f_{3a} & : & auf den Parameter erster Ordnung A wirkender 1-dimensionaler penalisierter Regressions-spline zur Beschreibung des Effektes der normierten N-Deposition \\ & ger_{a}, & : & auf den Parameter erster Ordnung A wirkender 1-dimensionaler penalisierter Regressions-spline zur Beschreibung des Effektes der regionalen Lage \\ & f_{4a} & : & auf den Parameter erster Ordnung A wirkender 1-d$$

Etwaige Approximationen der Modelleffekte sind in den Graphiken als rote Linien über die Originaleffekte gelegt. Die Beschreibung des Modellverhaltens bezieht sich in diesen Fällen auf die approximierten Effekte. In der Varianzfunktion [4.2] wurde anstelle des transformierten Alters  $x_{kt}$  [3.2] das Bestandesalter Alt<sub>kt</sub> direkt verwendet, das aufgrund seines ausschließlich positiven Wertebereiches eine einfache Approximation des Originaleffektes mit Hilfe eines parametrischen Terms erlaubt (Abb. 1f). Die parametrische Approximation erscheint sinnvoll, um einen monotonen Verlauf zu gewährleisten. Diese Monotonie ist bei Verwendung eines glättenden Terms [3.2] nicht gewährleistet, wobei die Abweichungen als die Wirkung von Störvariablen interpretiert werden. Die Effektdarstellungen werden mit einer Übersicht der statistischen Kenngrößen ergänzt (Fichte: Tab. 4, Eiche: Tab. 6).

130



Abb.1: Modelleffekte, die auf die Hg-Alters-Beziehung wirken für Fichte für den Erwartungswert (a-e) [4.1] und die Standardabweichung (f) [4.2]. Die NZ d) sind nach dem folgenden Schema kodiert 209=2-, 200=2, 201=2+, 309=3- usw., die WHZ e), die durch Tiefstriche verbunden sind, wurden im Rahmen der Modellbildung zusammengefasst und weisen somit einen einheitlichen Modelleffekt auf. Blau-gestrichelte Linien in a)-c) markieren die 1, 2.5, 97.5 und 99%-Perzentile der jeweiligen Kovariablen.

Für den Effekt der TempSumVeg deuten sich für Buche und etwas weniger stark für Fichte (Abb. 1a) und Kiefer Optimumverläufe an, während für Eiche (Abb. 2a) ein monoton ansteigender Effektverlauf mit abnehmendem Gradienten geschätzt wird. Somit würden für Buche und weniger deutlich für Fichte (Abb. 3a, grüne Linie) und Kiefer auf den wärmsten Standorten unter sonst konstanten Bedingungen Höhenwuchsleistungen geschätzt, die unterhalb der Maximalwerte liegen. Demgegenüber würden für Eiche unter konstanten Nebenbedingungen Maximalwerte für die wärmsten Standorte projiziert. Für die PrecSumVeg werden für alle Baumarten monoton ansteigende Effektverläufe (Fichte: Abb. 1b, Eiche: Abb. 2b) geschätzt, die gegen asymptotische Werte laufen, so dass ab bestimmten Grenzwerten (Fichte: 540 mm, Kiefer: 485 mm, Buche: 450 mm, Eichen: 460 mm) keine weiteren Steigerungen der Höhenwuchsleistung mit steigender Niederschlagsmenge geschätzt werden (Abb. 3b). Der Effekt der NDep\_norm ist für alle Baumarten monoton steigend mit abnehmendem Gradienten (Fichte: Abb. 1c, Eichen: Abb. 2c), wobei der Effekt für die Kiefer asymptotisch verläuft.

	Schätzer	Std.Fehler	z-Wert	Pr(> z )	
$\beta_{0a}$	3.4893017	0.0030558	1141.844	<2e-16	***
f <sub>3a</sub> (NDep_Norm <sub>kt</sub> )=log(Alter <sub>kt</sub> )	0.1122915	0.0039138	28.691	<2e-16	***
NZ=109_209	-0.1103127	0.0468632	-2.354	0.018576	*
NZ=200_201	-0.0911992	0.0049787	-18.318	<2e-16	***
NZ=309	-0.0767248	0.0038967	-19.690	<2e-16	***
NZ=300	-0.0493858	0.0025404	-19.440	<2e-16	***
NZ=301	-0.0224428	0.0023031	-9.744	<2e-16	***
NZ=409	-0.0101908	0.0021468	-4.747	2.07e-06	***
NZ=401	0.0238944	0.0028374	8.421	<2e-16	***
NZ=509_500	0.0129626	0.0036012	3.600	0.000319	***
NZ=501_601	-0.0009911	0.0056515	-0.175	0.860797	
WHZ=2	-0.0149715	0.0032160	-4.655	3.23e-06	***
WHZ=3	-0.0267306	0.0026872	-9.947	<2e-16	***
WHZ=4	-0.0343351	0.0034010	-10.096	<2e-16	***
WHZ=5	-0.0541600	0.0043807	-12.363	<2e-16	***
WHZ=6_7	-0.0792163	0.0077162	-10.266	<2e-16	***
WHZ=9	-0.0263240	0.0067399	-3.906	9.40e-05	***
WHZ=11	-0.0602522	0.0054276	-11.101	<2e-16	***
WHZ=12	0.0103581	0.0095342	1.086	0.277297	
WHZ=13	-0.0480821	0.0051636	-9.312	<2e-16	***
WHZ=16	-0.1344126	0.0122899	-10.937	<2e-16	***
WHZ=17	0.0109592	0.0113831	0.963	0.335668	
WHZ=18_19	-0.0324513	0.0053669	-6.047	1.48e-09	***
WHZ=20	-0.0567076	0.0088601	-6.400	1.55e-10	***
WHZ=22_23_26	-0.0634832	0.0064316	-9.871	<2e-16	***
WHZ=25	-0.0391312	0.0079144	-4.944	7.64e-07	***
WHZ=27	-0.0308322	0.0067718	-4.553	5.29e-06	***
WHZ=28	-0.0335844	0.0060801	-5.524	3.32e-08	***
WHZ=31	-0.0675647	0.0098276	-6.875	6.20e-12	***
WHZ=Sammelkategorie brd für					
nicht kartierte Stichprobenpunkte	-0.0841557	0.0036032	-23.356	<2e-16	***
$\beta_{1b}$	0.3024255	0.0005401	559.942	<2e-16	***
β <sub>OSD</sub>	1.8693637	0.0169825	110.076	<2e-16	***
$\beta_{1SD}$	3.2153340	0.0680265	-47.266	<2e-16	***
Näherungsweise Signifikanz der glätte	enden Terme:				
	edf	Ref.df	Chi.sq	p-value	
f <sub>1a</sub> (TempSumVeg <sub>kt</sub> )	8.450	8.920	8581.6	<2e-16	***
f <sub>2a</sub> (PrecSumVeg <sub>kt</sub> )	3.884	3.992	882.9	<2e-16	***
f <sub>geo a</sub> (RW <sub>k</sub> ,HW <sub>k</sub> )	28.559	28.986	5462.8	<2e-16	***
Signifikanzniveau: 0 '***' 0.001 '**'	0.01 '*' 0.05 '.' 0.	1 ' ' 1; Erklärte I	Devianz = $85.9\%$	0	

Tab.	4:	Statistische	Kenngrößen der	parametrischen und	glättenden Terme	e des Hø	-Alters-Modells	für F	lichte
ruo.	7.	Simistische	Menngroßen der	pur unici iscricii unu	Siunchuch Icrine	ucs 115	micro moucus	juii	icnic

Die Effekte der kategorialen Ausprägungen der NZ auf Basis der STO\_NS\_SH steigen für Fichte (Abb. 1d) und Kiefer von arm bis gut-mesotroph monoton an und nehmen dann über eutroph zu kalk-eutroph wieder leicht ab. Eiche weist ein ähnliches Grundmuster auf, wobei allerdings der höchste Effekt im

eutrophen Bereich (Abb. 2d) erreicht wird und lediglich für den kalk-eutrophen Bereich ein leichter Rückgang geschätzt wird. Buche weist als einzige Baumart über den gesamten Bereich der Nährstoffversorgung monoton ansteigende Effekte von arm bis kalk-eutroph auf. Die Kategorien der STO\_NDS\_SH zur Beschreibung des WHZ weisen ebenfalls plausible Effekte auf. Dabei werden die größten Amplituden auf terrestrischen Standorten des Berglandes erreicht, wobei die Effekte von 'nachhaltig frisch' bis 'trocken' für alle Baumarten monoton abnehmen (Fichte: Abb. 1e, Eiche: Abb. 2e). Das Muster für terrestrische Standorte des Tieflandes ist ähnlich bei allgemein geringerer Amplitude (Fichte: Abb. 1e, Eiche: Abb. 2e). Die verschiedenen Ausprägungen von grund- und stauwasser-beeinflussten Standorten zeigen – wie zu erwarten – für die Baumarten uneinheitliche, aber insgesamt plausible Effekte mit allerdings geringeren Amplituden (Fichte: Abb. 1e, Eiche: Abb. 2e). Ausnahmen treten – vermutlich aufgrund der geringen Belegung und ihrer uneinheitlichen Ausprägungen – bei den Mooren auf, die beispielsweise bei Eiche zu günstig erscheinende Effekte (Abb. 2e) aufweisen. Bei der Interpretation der Effekte für die NZ und WHZ im Tiefland ist zu beachten, dass die Ausprägungen eine stärkere Korrelation aufweisen als im Bergland. So weisen Tieflandstandorte mit einer höheren nutzbaren Feldkapazität im Allgemeinen auch eine bessere Nährstoffversorgung auf.

Die mittlere quadratische Abweichung der Hg-Schätzung ist für die Buche am höchsten und für die Kiefer am niedrigsten (Tab. 5). Betrachtet man die relativen mittleren quadratischen Abweichungen so sind die Baumartenunterschiede weniger deutlich, wobei die Kiefer weiterhin die geringsten Fehler aufweist. Weiterhin ist erkennbar, dass die Verwendung der Kovariablen NZ und WHZ zu einer deutlichen Reduktion des Schätzfehlers führt, wobei Kiefer und Fichte die größten absoluten und Eiche den größten relativen Unterschied aufweist. Bei der Interpretation der Fehler der Schätzungen mit bzw. ohne Verwendung von Kovariablen der STO\_NS\_SH ist zu beachten, dass die jeweiligen Teilmengen überwiegend aus unterschiedlichen regionalen Bereichen stammen. Es ist somit nicht gänzlich auszuschließen, dass die Unterschiede nicht ausschließlich auf die Modelleffekte der Bodenparameter zurückzuführen sind.

Tab. 5: Absolute und relative mittlere quadratische Abweichung RSME [m] bzw. [%] der Hg-Schätzungen ge-
trennt nach Teilmengen für die kategorische Kovariablen zur Nährstoffversorgung NZ und zum Wasserhaushalt
WHZ (STO NS SH) bei der Schätzung berücksichtigt bzw. nicht berücksichtigt werden konnten für Fichte, Kie-
fer, Buche und Eiche.

	Stichprob mit STO	enpunkte _NS_SH	Stichprobenpunkte ohne STO_NS_SH			
	RMSE [m]	RMSE [%]	RMSE [m]	RMSE [%]		
Fichte	2.37	13	3.27	17		
Kiefer	2.23	12	3.18	16		
Buche	3.11	15	3.70	17		
Eiche	2.61	13	3.45	19		



Abb. 2: Modelleffekte auf die Hg-Alters-Beziehung für Eiche für den Erwartungswert (a-e) [4.1] und für die Standardabweichung (f) [4.2]. Die NZ d) sind nach dem folgenden Schema kodiert 209=2-, 200=2, 201=2+, 309=3usw., die WHZ e), die durch Tiefstriche verbunden sind, wurden im Rahmen der Modellbildung zusammengefasst und weisen somit einen einheitlichen Modelleffekt auf. Blau-gestrichelte Linien in a)-c) markieren die 1, 2.5, 97.5 und 99%-Perzentile der jeweiligen Kovariablen.

Tah	6 · Statistische	Kenngrößen der	parametrischen und	glättenden Terme	des Hø-Alter	s-Modells für Eiche
I uo.	0. Statistische	iseningi ojseni dei	paramentisenen ana	Sumenaen reime	ues ing inter	s modells fur Liene

0,	-	5					
	Schätzer	Std.Fehler	z-Wert	Pr(> z )			
$\beta_{0a}$	3.267731	0.005945	549.693	<2e-16	***		
NZ=109_209	-0.158661	0.080200	-1.978	0.047893	*		
NZ=200_201	-0.096645	0.010104	-9.565	<2e-16	***		
NZ=309	-0.077729	0.008949	-8.686	<2e-16	***		
NZ=300	-0.050108	0.005928	-8.452	<2e-16	***		
NZ=301	-0.044538	0.005645	-7.890	3.01e-15	***		
NZ=409	-0.009283	0.004711	-1.971	0.048766	*		
NZ=401_509	0.017704	0.003745	4.727	2.28e-06	***		
NZ=500	0.035122	0.004870	7.212	5.53e-13	***		
NZ=501_601	0.010300	0.008271	1.245	0.213038			
WHZ=2	-0.019902	0.006259	-3.180	0.001474	**		
WHZ=3	-0.024304	0.005838	-4.163	3.14e-05	***		
WHZ=4	-0.060560	0.008811	-6.873	6.28e-12	***		
WHZ=5	-0.112052	0.012268	-9.134	<2e-16	***		
WHZ=6	-0.155260	0.031313	-4.958	7.11e-07	***		
WHZ=7	-0.329355	0.049250	-6.687	2.27e-11	***		
WHZ=9	-0.022867	0.012977	-1.762	0.078058			
WHZ=11	-0.046304	0.007712	-6.004	1.92e-09	***		
WHZ=12	0.003498	0.019643	0.178	0.858645			
WHZ=13	-0.025693	0.013105	-1.961	0.049935	*		
WHZ=16	0.032172	0.067766	0.475	0.634958			
WHZ=17	0.042877	0.014619	2.933	0.003356	**		
WHZ=18	-0.012798	0.007766	-1.648	0.099345			
WHZ=19	-0.035534	0.008757	-4.058	4.95e-05	***		
WHZ=20	-0.071770	0.015394	-4.662	3.13e-06	***		
WHZ=22_23	-0.047955	0.011324	-4.235	2.29e-05	***		
WHZ=25	-0.045327	0.008460	-5.358	8.42e-08	***		
WHZ=26	-0.031693	0.007379	-4.295	1.75e-05	***		
WHZ=27	-0.021224	0.007233	-2.934	0.003344	**		
WHZ=28	-0.047791	0.013914	-3.435	0.000593	***		
WHZ=31	-0.047955	0.011324	-4.235	2.29e-05	***		
WHZ=Sammelkategorie <i>brd</i> für							
nicht kartierte Stichprobenpunkte	-0.078684	0.006272	-12.545	<	2e-16		
β <sub>1b</sub>	0.311240	0.001019	305.313	<	2e-16		
β <sub>osd</sub>	1.376925	0.005840	235.761	<	2e-16		
$\beta_{1SD}$	-31.373457	0.684130	-45.859	<	2e-16		
Näherungsweise Signifikanz der glättenden Terme:							
	edf	Ref.df	Chi.sq	p-value			
f <sub>1a</sub> (TempSumVeg <sub>kt</sub> )	2.971	2.999	1853.4	<2e-16	***		
f <sub>2a</sub> (PrecSumVeg <sub>kt</sub> )	2.908	2.993	383.8	<2e-16	***		
f <sub>3a</sub> (NDep_Norm <sub>kt</sub> )	2.781	2.967	873.1	<2e-16	***		
f <sub>geo a</sub> (RW <sub>k</sub> ,HW <sub>k</sub> )	28.212	28.958	3200.4	<2e-16	***		
Signifikanzniveau: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1; Erklärte Devianz = 83.7%							

Anhand der Amplituden der Modelleffekte (Abb. 1/2) lassen sich die Sensitivitäten bereits qualitativ einschätzen. Für Fichte werden zusätzlich quantitative Unterschiede auf der Ebene der Hg bzw. der Bonität (Hg<sub>Alter=100</sub>) anhand von Projektionen unter konstanten Nebenbedingungen in Abhängig eines einzelnen variierenden Wachstumsfaktors dargestellt (Abb. 3). Die Werte der übrigen konstant gesetzten Wachstumsfaktoren betragen: TempSumVeg: 2111 [GT], PrecSumVeg: 417 [mm], NDep: 1000[eq/ha/a], NZ: 4=mesotroph, WHZ: 3=frisch (Bergland), wobei die Werte für TempSumVeg und PrecSumVeg den Mittelwerten in der Datengrundlage entsprechen. Der Wert für NDep liegt unterhalb des Mittelwertes in der Datengrundlage wurde aber aus Gründen einer leichteren Vergleichbarkeit zwischen den Baumarten (hier nicht dargestellt) einheitlich auf 1000 [eq/ha/a] gesetzt.



*Abb. 3: Sensitivitätsanalysen anhand von geschätzten Hg-Alters-Beziehungen [4.1/4.2] für Fichte, wobei einzelne Wachstumsfaktoren (Abbildungstitel) jeweils variiert und die übrigen Wachstumsfaktoren konstant gesetzt werden. Die dunkelblauen Fächer stellen Schätzungen für eine Variation der TempSumVeg a) bzw. PrecSumVeg b) in 10% Perzentilschritten zwischen dem Minimal- und Maximalwert in der Datenbasis dar. Abweichend wurde die NDep c) zwischen 500 und 1500 [eq/ha/a] variiert. Der dunkelblaue Fächer für die NZ nach STO\_NDS\_SH d) stellt die Schätzungen für alle Ausprägungen der NZ von oligotroph bis kalk-eutroph dar. Der dunkelblaue Fächer für die WHZ nach STO\_NDS\_SH stellt die Schätzungen für alle Ausprägungen terrestrischer WHZ im Bergland von trocken bis nachhaltig frisch dar. Zusätzlich ist in hellblau-punktgestrichelt der Fächer für alle Ausprägungen terrestrischer WHZ im Tiefland von trocken bis nachhaltig frisch dargestellt. In dunkelgrün sind die Verläufe für die Maximalwerte innerhalb der durch die Fächer aufgespannten Datenräume a) b) c) bzw. der Verlauf für die Ausprägung kalk-eutroph d) dargestellt. In a) b) sind dunkelrot-punktgestrichelt Extrapolationen um ein 10%-Perzentil dargestellt. Für die PrecSumVeg b) ist zusätzlich eine Extrapolation um ein weiteres 10%-Perzentil in den Bereich sehr geringer Niederschläge dargestellt (unterste rot-gestrichelte Linie). Für die NDep kennzeichnet die dunkelrot-punktgestrichelte Linie).* 

Innerhalb der Datenbasis ist die Amplitude der Hg-Alters-Verläufe bzgl. der TempSumVeg am größten (Abb. 3a). Ähnliche Muster ergeben sich auch für die übrigen Baumarten, wobei das Nachlassen der Leistung mit abnehmender TempSumVeg in dieser Reihenfolge bei Kiefer, Buche und Eiche deutlicher bzw. sehr viel deutlicher ausgeprägt ist. Tendenziell verringert sich die Zunahme der Wuchsleistung mit steigender TempSumVeg bei allen Baumarten, wobei bei Kiefer, Fichte und Buche in zunehmender Deutlichkeit Optima auftreten. Dieses Muster wird für Fichte in Abb.3a daran deutlich, dass die grüne Linie unterhalb der Linie mit der höchsten Wuchsleistung verläuft. Bei Extrapolation um ein weiteres 10%-Percentil in den sehr warmen Bereich (obere rot-punktgestrichelte Linie) lässt die Leistung weiter nach. Die Variabilität gegenüber der PrecSumVeg innerhalb der Datenbasis ist für Fichte (Abb. 3b) aber auch für die anderen Baumarten deutlich geringer. Einheitlich weisen alle Baumarten durch die asymptotischen Effektverläufe (Abb. 1b, Abb. 2b) monoton steigende Verläufe auf, wobei ab spezifischen Grenzwerten keine Steigerungen mehr geschätzt werden, so dass sowohl die Schätzung für den Maximalwert (grüne Linie) als auch die Extrapolation in den sehr niederschlagsreichen Bereich (obere rotpunktgestrichelte Linie) identisch sind. Mit nachlassenden Niederschlägen lässt die Leistung in zunehmendem Ausmaß nach, was an den zunehmenden Abständen der Linien des Fächers deutlich wird. Bei Extrapolation in den sehr niederschlagsarmen Bereich um ein bzw. zwei 10%-Perzentile lässt die Leistung weiter nach, das Ausmaß erscheint allerdings zu gering. Ähnliche Muster zeigen die anderen Baumarten wobei die Kiefer die größte Sensitivität im niederschlagsarmen Bereich aufweist, was dahingehend interpretiert wird, dass die Effekte der anderen Baumarten in diesem Grenzbereich aufgrund der deutlich geringeren Datengrundlage weniger vertrauenswürdig sind. Der Effekt der NDep für Fichte (Abb. 3c) und die anderen Baumarten ist monoton steigend mit abnehmendem Gradienten, wobei bei Kiefer ab einem bestimmten Grenzwert keine weitere Steigerung mehr auftritt. Die Leistung nimmt bei Fichte (Abb. 3d) mit zunehmender NZ von oligotroph bis gut-mesotroph zu und nimmt dann über eutroph zu kalk-eutroph (Abb. 3d, grüne Linie) wieder leicht ab. Die Amplitude des Fächers der durch die WHZ-Kategorien aufgespannt wird (Abb. 3e), ist bei der Fichte deutlich geringer als die Amplitude des entsprechenden Fächers der Nährstoffversorgung NZ. Dabei ist die Amplitude der terrestrischen Tieflandstandorte (Abb. 3e, hellblau punktgestrichelt) noch einmal geringer als die Amplitude der terrestrischen Berglandstandorte (Abb. 3e dunkelblau). Die Kiefer zeigt ein ähnliches Bild, wobei jedoch die Sensitivitäten gegenüber den Ausprägungen der WHZ und NZ einander ähnlicher sind. Auch zeigt die Wuchsleistung der Kiefer für die Kategorien NZ=oligotroph bzw. WHZ=trocken einen deutlicheren Abfall der Leistung, was aber ebenfalls auf die in diesem Bereich breitere Datengrundlage gegenüber der Fichte zurückgeführt werden kann. Buche und Eiche weisen gegenüber den Ausprägungen der NZ etwas geringere Sensitivitäten als gegenüber denen der WHZ auf, wobei die Buche als einzige Baumart bis in den kalk-eutrophen Bereich eine monotone Zunahme der Wuchsleistung zeigt. Bei der Eiche steigt die Wuchsleistung von oligotroph bis eutroph monoton an und sinkt dann zu kalk-eutroph wieder leicht ab. Ein solcher Rückgang lässt sich auf eine geringere Kaliumversorgung auf den flachgründigen Karbonatböden zurückführen (Weis & Göttlein 2016, Weis et al. 2014, Mellert & Ewald 2014). Die größten Amplituden der WHZ werden sowohl für Buche als auch Eiche wie bei den übrigen Baumarten für die terrestrischen Berglandstandorte geschätzt. Buche und Eiche zeigen wie Kiefer auf sehr nährstoffarmen wie sehr trockenen Standorten einen deutlichen Leistungseinbruch.

## 6 Schlussfolgerungen

Insgesamt weisen die entwickelten Hg-Alters-Modelle für wichtige Wachstumsfaktoren sensitive und plausible Effekte auf. Allerdings erscheinen insbesondere die Effekt-Amplituden der Bodenparameter im Vergleich mit forstlichem Erfahrungswissen als relativ gering. Als eine Hauptursache werden die qualitativen aber auch räumlichen Unschärfen der Standortkartierung vermutet, die u.a. in der Heterogenität des Faktors Boden begründet sind. Auch in anderen Studien (Albert & Schmidt 2010, Laubhann

et al. 2009, Toledo et al. 2011) zeigt sich, dass die Modelleffekte von Klimaparametern und der Stickstoffdeposition das Baumwachstum wesentlich stärker bestimmen, als die Effekte der verfügbaren Bodenparameter. Eine weitere Problematik besteht darin, dass die vorgestellten Modelle bodensensitive Schätzungen überhaupt nur auf standortkartierten Flächen in Niedersachsen und Schleswig-Holstein zulassen. Schätzungen außerhalb dieser Kulisse gelten nur für mittlere NZ- und WHZ-Verhältnisse. Zur Lösung des Problems für den Bereich der Trägerländer der NW-FVA sollen multinomiale Übergangsmodelle anhand von verorteten Wald-Bodenprofilen in Hessen und Sachsen-Anhalt unter Verwendung weiterer Hilfsversfahren entwickelt werden, mit denen sich die jeweils originalen Kartierverfahren in das STO\_NDS\_SH transformieren lassen. Auch sind Ansätze denkbar, bei denen verschiedene Kartierverfahren in einem Modell berücksichtigt werden, wobei es allerdings in den Grenzbereichen zu unplausiblen Brüchen kommen könnte. Langfristig sollten jedoch kontinuierliche Bodenparameter regionalisiert bzw. als Kovariablen in Standortleistungsmodellen verwendet werden.

Langjährige retrospektive Klimaparameter lassen sich mit größerer Genauigkeit regionalisieren als die Bodenparameter. Allerdings tritt hier das Problem auf, dass zukünftige Projektionen aufgrund der dynamischen Entwicklung im Klimawandel und in Abhängigkeit vom Ausgangsniveau der Standorte schon mittelfristig im Extrapolationsbereich erfolgen können und somit keine belastbare Entscheidungsunterstützung ermöglichen. In diesem Zusammenhang ist auch das im Baumartenvergleich nicht immer plausible Modellverhalten zu beurteilen. So zeigt z.B. die Kiefer von allen Baumarten die größte Sensitivität im Bereich mittlerer bis geringer Niederschläge, was mutmaßlich darin begründet ist, dass die Kiefer hier die weitaus größte Datenbasis aufweist. Die geringeren Wachstumsreaktionen von Eiche und insbesondere Buche und Fichte im Bereich geringerer Niederschläge sind somit vermutlich das Ergebnis sehr unterschiedlicher Beobachtungszahlen und unbalanzierter Datenstrukturen in diesem Datenbereich. Zukünftige Modellverbesserungen erfordern daher gezielte Inventuren von seltenen Standort-Baumarten-Kombinationen insbesondere an den Randbereichen, die sich in Richtung zukünftig projizierter Bedingungen befinden.

Innerhalb dieser Einschränkungen ermöglichen die vorgestellten Modelle Abschätzungen der Wuchsleistungen für die eingangs formulierten Anwendungsbereiche:

- Baumartenwahl unter Klimawandel
- Initialisierung existierender Wachstumssimulatoren für standort- und damit klimasensitive Projektionen der Waldentwicklung
- Weiterentwicklung existierender Wachstumssimulatoren zur Verbesserung klimasensitiver Projektionen der Waldentwicklung

### 7 Literaturverzeichnis

- Albert M., Schmidt M. 2010: Climate-sensitive modelling of site-productivity relationships for Norway spruce (Picea abies (L.) Karst.) and common beech (Fagus sylvatica L.). For. Ecol. Manage., 259, (4): 739-749
- Ahner J., Ahrends B., Engel F., Hansen J., Hentschel S., Hurling R., Meesenburg H., Mestermacher U., Meyer P., Möhring B., Nagel J., Nagel R., Pape B., Rohde M., Rumpf H., Schmidt M., Schmidt M., Spellmann H., Sutmöller J. 2013: Waldentwicklungsszenarien für das Hessische Ried. Entscheidungsunterstützung vor dem Hintergrund sich beschleunigt ändernder Wasserhaushaltsund Klimabedingungen und den Anforderungen aus dem europäischen Schutzgebietssystem Natura 2000. Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt, 10. 398 S.
- Alveteg M., Walse C., Warfvinge P. 1998: Reconstructing historic atmosphericdeposition and nutrient uptake from present day values using MAKEDEP.Water Air Soil Pollut. 104, 269–283.
- Burggraef L.; Brandl S. 2017: Umweltdaten für Standort-Leistungs-Modelle. AFZ/Der Wald, 72. Jg., 15, 39-42.

- Burggraef L., Schmidt-Walter P., Schmidt M. 2017: Modellierung des Standort-Leistungsbezuges von Buche und Fichte auf Basis regionalisierter Klima-, Standorts- und Wasserhaushaltsdaten sowie Bestockungsdaten der Bundeswaldinventur. In: Kohnle, U.; Klädtke, J. (Hrsg.): Tagungsband zur Jahrestagung der Sektion Ertragskunde im DVFFA vom 29.-31.05.2017 im Kloster Untermarchtal, 73-82
- Fleck S., Albert M., Plasil P., Nagel R., Sutmöller J., Ahrends B., Schmidt M., Evers J., Hansen J., Overbeck M., Schmidt W., Spellmann H., Meesenburg H. 2015: Pilotstudie zu den lokalen Auswirkungen des Klimawandels auf die Forstwirtschaft in ausgewählten Regionen Sachsen-Anhalts. Beitr. aus der NW-FVA, 13, 221.
- Höhle J., König N., Hilbrig L., Bielefeld J., Ziche D., Grüneberg E., Eickenscheidt N., Ahrends B., Wellbrock N. 2016: Methodenüberblick und Qualitätssicherung. In: Wellbrock, N., A. Bolte & H. Flessa: Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland: Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008. Thünen Rep, 43. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Braunschweig. S. 6-43.
- Lappi J. 1997: A longitudinal analysis of height/diameter curves. Forest Science. 43 (4): 555-570.
- Laubhann D., Sterba H., Reinds G. J., Devries W. 2009: The impact of atmospheric deposition and climate on forest growth in European monitoring plots: An individual tree growth model. For. Ecol. Manage., 258, (8): 1751-1761.
- Mehtätalo L. 2004: A longitudinal height-diameter model for Norway spruce in Finland. Canadian Journal of Forest Research 34: 131-140.
- Mehtätalo L. 2005: Height-diameter models for Scots pine and birch in Finland. Silva Fennica 39(1): 55–66.
- Mellert K. H., Ewald J. 2014: Nutrient limitation and site-related growth potential of Norway spruce (Picea abies [L.] Karst) in the Bavarian Alps. European Journal of Forest Research, 133, (3): 433-451.
- 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.
- 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. 2015: vegperiod: Determine Vegetation Periods of Forest Trees. R package version 0.2.1. http://computerfoerster.de/r-pkgs

R Core Team 2018: R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <u>https://www.R-project.org/</u>.

- Rock J., Bösch B., Kändler G. 2013: WEHAM 2012 Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung für die dritte Bundeswaldinventur: Tagungsbericht der Jahrestagung der Sektion Ertragskunde im deutschen Verband forstlicher Forschungsanstalten: 127-133.
- Schaap M., Kruit R.W., Hendriks C., Kranenburg R., Segers A., Builtjes P. et al. 2015: Atmospheric

deposition to German natural and semi-natural ecosystems during 2009. Umweltforschungsplan

Projekt No. (FKZ) 371263240-1 UBA-FB00. Bundesministerium fur Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Berlin.

Sodtke R.M., Utschig H., Pretzsch H. 2006: A Decision Support System for Multi-Criteria Forest Estate Planning, Integrating a Forest Growth Simulator, Fuzzy-Inference Techniques and a Heuristic Optimisation Approach. In: Hasenauer H. (eds) Sustainable Forest Management. Springer, Berlin, Heidelberg

- Spellmann H., Ahrends B., Albert M., Andert S., Barkmann T., Böcher M., Breckling B., Christen O., Dvorak J., Eggers M., Fleck S., Fohrer N., Gauly M., Gerowitt B., Gieseke D., Grocholl J., Hakes W., Hammes V., Hartje V., Haunert G., Hoffmann M., Hufnagel J., Isselstein J., Kätzel R., Kayser M., Kehr I., Knauer H., Krott M., Lambertz C., Lange A., Langer G., Leefken G., Löffler S., Meesenburg H., Meißner R., Messal H., Meyer P., Möhring B., Möller K., Nagel J., Nuske R., Oetzmann A., Ohrmann S., Redwitz C. v., Riediger J., Schmidt M., Schröder J., Schröder W., Siebert R., Spindelndreher D., Stahlmann H., Stöck L., Sutmöller J., Svoboda N., Tänzer D., Tiedemann A. v., Ulber B., Wegner K., Werner P.C., Winter. M., Wüstemann H., Zander P., Ziesche T. 2017: Nachhaltiges Landmanagement im Norddeutschen Tiefland. Beiträge aus der NW-FVA, Band 18, 436 S.
- Tarrasón L., Nyíri Á. 2008: Transboundary acidification, europhication and groundlevel ozone in Europe in 2006. In: EMEP Status Report. The NorwegianMeteorological Institue, Oslo, Norway <a href="http://www.emep.int">http://www.emep.int</a>.
- Thiele J. C., Nuske R. 2016: Design and implementation of a web-based decision support
- system for climate change impact assessment on forests. Forstarchiv 87, 11-23 (2016) DOI 10.4432/0300-4112-87-11
- Thiele J. C., Nuske R., Ahrends B., Panferov O., Albert M., Staupendahl K., Junghans U., Jansen M. Saborowski J. 2017: Climate change impact assessment—A simulation experiment with Norway spruce for a forest district in Central Europe. Ecological Modelling, 346, 30-47.
- Toledo M., Poorter L., Pena-Claros M., Alarcon A., Balcazar J., Leano C., Licona J. C., Llanque O., Vroomans V., Zuidema P., Bongers F. 2010: Climate is a stronger driver of tree and forest growth rates than soil and disturbance. Journal of Ecology, doi: 10.1111/j.1365-2745.2010.01741.x,
- Weis W., Göttlein A. 2016: Bewirtschaftungsmöglichkeiten zur Sicherung einer nachhaltigen Waldwirtschaft vor dem Hintergrund der Nährstoffversorgung kalkalpiner Standorte. Forstliche Schriftenreihe, Universität für Bodenkultur Wien, 21, 97-127.
- Weis W., Blumenthal B., Göttlein A. 2014: Wälder der nördlichen Kalkalpen: Ernährung, Wasser- und Stoffhaushalt. LWF aktuell, 99, 40-43.
- Wood S.N. 2004: Stable and efficient multiple smoothing parameter estimation for generalized additive models. Journal of the American Statistical Association. 99: 673-686.
- 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): 3-36.
- Wood S.N., Pya N., Saefken B. 2016: Smoothing parameter and model selection for general smooth models (with discussion). Journal of the American Statistical Association 111:1548-1575.
- Wördehoff R., Fischer C., Spellmann H: 2017: II. Cluster- und Kohlenstoffstudie Forst und Holz Niedersachsen. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.), Göttingen, 40 S.