

# Beurteilung der Anbauwürdigkeit von Baumarten unter Klimawandel mittels dreidimensionaler Ökogramme

MATTHIAS ALBERT und MATTHIAS SCHMIDT

Abteilung Waldwachstum, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Grätzelstr. 2, 37079 Göttingen

## 1 Einleitung

Der Forschungsschwerpunkt „klimasensitive Modellierung des Standort-Leistungs-Bezugs“ als Teil des BMBF-Verbundprojektes „Anpassungsstrategien für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung unter sich wandelnden Klimabedingungen – Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems Wald und Klimawandel“ befasst sich neben der Vorhersage von Bonitätsverschiebungen mit der Bereitstellung von waldbaulichen Entscheidungshilfen bei der Baumartenwahl. Ein verallgemeinertes additives Regressionsmodell ermöglicht die Schätzung des Erwartungswertes der Höhenbonität einer Baumart für eine bestimmte Kombination von Standortseigenschaften (vgl. ALBERT und SCHMIDT, 2008, 2009). Zukünftige Bonitätsveränderungen unter verschiedenen Klimaszenarien können analysiert werden. Für eine aus waldwachstumkundlicher Sicht abgeleitete Anbauempfehlung von Baumarten auf einem konkreten Standort reicht eine mittelwertbasierte Bonitätsschätzung jedoch nicht aus, schließlich sollen deutlich mehr als die Hälfte aller unter den Standortsbedingungen angebaute Bestände eine bestimmte Wuchseistung erbringen. Ziel dieser Untersuchung ist somit die Schätzung eines beliebigen Quantils der Verteilung der Höhenbonität. Welches konkrete Quantil letztlich prognostiziert werden soll, leitet sich aus den Anforderungen der forstlichen Praxis bezüglich der Leistungsfähigkeit von Waldbeständen ab. Es werden in diesem Beitrag Quantilsregressionsmodelle für die Baumarten Buche und Fichte in Niedersachsen präsentiert. Die Ergebnisse der Quantilsregression werden anschließend für eine Anbauempfehlung in die Klassen optimal, anbauwürdig und kritisch bezogen auf das Wuchspotenzial eingeteilt. Lagespezifische dreidimensionale Ökogramme mit den Achsen mittlere Temperatur und pflanzenverfügbares Wasser in der Vegetationszeit und der zeitlichen Entwicklung unter einem bestimmten Klimaszenario als dritte Dimension veranschaulichen diese Ergebnisse und unterstützen eine waldbauliche Entscheidungsfindung bei der Baumartenwahl. Ziel dieser Untersuchung ist die Darstellung der Methodik zur Herleitung der dreidimensionalen Ökogramme.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Daten

Die Parametrisierung der Quantilsregressionsmodelle erfolgt auf der Grundlage der Betriebsinventurpunkte der Niedersächsischen Landesforsten sowie den zugehörigen bodenkundlichen und klimatischen Standortdaten.

### Ertragskundliche Daten

Alle Betriebsinventurpunkte der Niedersächsischen Landesforsten mit Fichtenvorkommen (16.552 Probekreise) und Buchenvorkommen (9.474 Probekreise) dienen als ertragskundliche Datengrundlage. Das zweiphasige Stichprobenkonzept der Betriebsinventur zielt auf die genaue Erfassung älterer Bestände und unterstellt somit keine flächenrepräsentativen Auswahlwahrscheinlichkeiten (BÖCKMANN ET AL., 1998). Dies spiegelt sich in den hohen Werten der ertragskundlichen Kenngrößen in Tabelle 1 wider.

		Fichte		Buche	
		Mittelwert	sd	Mittelwert	sd
Alter	[J]	70	32	100	44
dg	[cm]	33,9	9,9	39,2	16,0
hg <sub>100</sub>	[m]	29,6	2,9	29,2	3,6
Ndep	[eq/ha/a]	3379	848	2805	935
nFK	[mm]	112	51	101	64
Temp	[°C]	13,5	1,0	14,0	0,7
Prec	[mm]	367	55	336	36
Evapo <sub>pot</sub>	[mm]	441	36	455	29

Tabelle 1: Kennwerte der Fichten- und Buchen-Probekreise (sd: Standardabweichung, hg<sub>100</sub>: Mittelhöhenbonität im Alter 100, Ndep: mittlere jährliche Stickstoffdeposition während des Bestandeslebens [1000 eq/ha/a = 14,01 kg/ha/a], nFK: nutzbare Feldkapazität bezogen auf 1 m Bodentiefe, Temp: mittlere Temperatur in der Vegetationszeit (VZ), Prec: Niederschlagssumme in VZ, Evapo<sub>pot</sub>: potentielle Evapotranspiration in VZ).

Für jedes Fichten- und jedes Buchenvorkommen wird die Mittelhöhenbonität im Alter 100 mit dem longitudinalen Höhen-Durchmesser-Modell nach SCHMIDT (2008) bestimmt. Die Bonitierungsmethode trennt den Wachstumstrend, hervorgerufen durch die veränderten Wachstumsbedingungen der letzten Jahrzehnte, von anderen Standorteffekten und ermöglicht somit eine Bonitätsschätzung unter Berücksichtigung dieses Wachstumstrends. Es wird keine Konstanz der Standortverhältnisse vorausgesetzt, was das Modell insbesondere im Kontext der Klimaveränderung geeignet erscheinen lässt. Die geschätzte Mittelhöhenbonität wird im Folgenden als die abhängige Variable bei der klimasensitiven Modellierung verwendet.

### Standortsdaten

Die Standortfaktoren Bodennährstoffe, nutzbare Feldkapazität (nFK) und Stickstoffdepositionsrate (Ndep) wurden im Rahmen der Modellselektion auf ihren Einfluss hin überprüft. Die Bodennährstoffe werden durch die Nährstoffziffer der niedersächsischen Standortkartierung (von 1=arm bis 6=reich) klassifiziert. Die Informationen liegen für jeden Betriebsinventurpunkt vor (vgl. Tab. 2). Die nutzbare Feldkapazität als wichtige Komponente der Gesamtwassermenge, die der Pflanze zur Verfügung steht, ist für die Inventurpunkte nur als kategoriale und nicht als kontinuierliche Größe verfügbar. Dies ist jedoch für eine Kombination mit den Niederschlags- und Evapotranspirationswerten notwendig, um die Menge des gesamten pflanzenverfügbaren Wassers (WH) herzuleiten, die als Prädiktor in das Quantilsregressionsmodell eingeht. In einem ersten Näherungsschritt wird die nutzbare Feldkapazität daher aus der Bodenkundlichen Übersichtskarte 1:50.000 von Niedersachsen entnommen (NLfB, 2004). Kennwerte der nutzbaren Feldkapazität sind in Tab. 1 aufgeführt.

	Nährstoffziffer					
	1	2	3	4	5	6
<b>Fichte</b>	50	1482	8366	6476	684	25
<b>Buche</b>	20	327	2337	5025	1656	109

Tabelle 2: Klassenbelegung der Nährstoffziffern für Buche und Fichte (1= sehr schwach ..., 2= schwach ..., 3= mäßig ..., 4= ziemlich gut ..., 5= gut ..., 6= sehr gut mit Nährstoffen versorgt).

Die mittlere jährliche Stickstoffdepositionsrate über das Bestandesleben ist ein mit einer modifizierten Version des Modells MAKEDEP prognostizierter und regionalisierter Wert (ALVETEG ET AL., 1997, AHRENDT ET AL., 2008). Das Modell berechnet die jährlichen Stickstoffdepositionsdaten auf der Grundlage der beobachteten Stickstoffdepositionen in Deutschland zwischen 1995 und 2004 (GAUGER ET AL., 2008) sowie rekonstruierten früheren Werten anhand der Daten des European Monitoring and Evaluation Programme (vgl. AHRENDT ET AL., 2008). Die modellierten Stickstoffdepositionsdaten haben eine räumliche Auflösung von 1 x 1 km, was als hinreichend genau für eine Zuordnung zu den Betriebsinventurpunkten angesehen wird. Stickstoffdepositionskennwerte der Buchen- und Fichtenplots sind in Tab. 1 aufgelistet.

### Klimavariablen

Als klimasensitive Standortfaktoren werden die mittlere Temperatur, die Niederschlagssumme und die potenzielle Evapotranspiration jeweils in der Vegetationszeit herangezogen. Die potenzielle Evapotranspiration wird hierbei nach der Methode von Penman-Monteith bestimmt (MONTEITH, 1965). Aus diesen Kenngrößen lassen sich die klimatische Wasserbilanz (KWB) als Differenz aus Niederschlag und Evapotranspiration und die der Pflanze zur Verfügung stehende Gesamtwassermenge (Wasserhaushalt WH) als Summe aus KWB und nFK herleiten. Die Klimavariablen Temperatur, Niederschlag und Evapotranspiration werden mit dem regionalen Klimamodell WETTREG (SPEKAT ET AL., 2006; UMWELTBUNDESAMT, 2007) für die Klimareferenzperiode 1961 bis 1990 simuliert. Die anschließende Regionalisierung mit dem Modell WaSIM-ETH (SCHULLA, 1997; SCHULLA und JASPER, 2007) auf ein 200 x 200 m Raster ermöglicht die Zuordnung zu den Betriebsinventurpunkten (Tab. 1).

Die Vegetationsperiode wird baumartenabhängig bestimmt. Der Beginn der Vegetationszeit wird mit Hilfe des Modells LNVAR von MENZEL (1997, S. 52 ff) geschätzt. Das Ende der Vegetationszeit richtet sich nach dem Temperatur- bzw. Kurztagskriterium und wird als baumartenunabhängig angenommen (v. WILPERT, 1990, S. 106 ff). Die Klimavariablen werden demnach baumarten- und lageabhängig bilanziert. Allerdings werden aus rechentechnischen Gründen die Bilanzen derzeit noch auf eine großräumig einheitliche Vegetationsperiode bezogen. Während also die Bilanzierung für großräumig einheitliche Zeiträume erfolgt, wird die Variabilität der Evapotranspiration durch die Berücksichtigung des Laubaustriebes auch kleinräumig abgebildet.

## 2.2 Modellbildung mittels Quantilsregression

Für eine spezifische Kombination von Standortseigenschaften sind die Höhenbonitäten approximativ normalverteilt, so dass ihr Erwartungswert mit dem klimasensitiven Standort-Leistungs-Modell (Mittelwertregressionsmodell) geschätzt werden kann (ALBERT und SCHMIDT, 2008, 2009). D.h., etwa die

Hälfte aller Bestände weist eine bessere Bonität auf als der prognostizierte Mittelwert. Für die Anbauempfehlung einer Baumart wird gefordert, dass ein deutlich größerer Anteil als 50 % eine bestimmte Höhenbonität aufweisen müssen. Folglich ist zur Beurteilung der Anbauwürdigkeit einer Baumart aus waldwachstumskundlicher Sicht ein zu definierendes Quantil der Bonitätsverteilung zu schätzen. Zur Identifikation der Optimum- und Grenzbereiche wird hier beispielhaft definiert, dass:

- optimale Standortbedingungen herrschen, wenn mindestens 80 % der Bestände mindestens die II. Ertragsklasse erreichen,
- kritische Standortbedingungen sind gegeben, wenn weniger als 80 % der Bestände mindestens die III. Ertragsklasse erreichen.

Somit ist das 20%-Quantil der Höhenbonität zu schätzen. Eine direkte Berechnung des 20%-Quantils des Mittelwertregressionsmodells ist dabei nicht zulässig, da (1) die Residuen der Höhenbonitätsschätzung für Fichte und Buche nur näherungsweise normalverteilt sind (ks-Test:  $p_{\text{Buche}}=7,924e-08$  und  $p_{\text{Fichte}}=7,025e-06$ ) und (2) ihre bedingte Varianz über den verwendeten Prädiktoren im Fall der Buche nicht homogen ist (Tab. 3). Für die Fichte ist eine homoskedastische Verteilung gegeben. Auf Heteroskedastizität wird mittels des Goldfeld-Quandt-Tests geprüft (library *lmtest*). Heteroskedastizität liegt vor, wenn ein Teil des Datensatzes eine hohe und der andere Teil eine niedrige Varianz aufweist. Der Datensatz wird entsprechend in zwei Teile zerlegt.

	Temp	WH	Ndep
$p_{\text{Buche}}$	0,0296	0,0299	0,0298
$p_{\text{Fichte}}$	1	1	1

Tabelle 3: Goldfeld-Quandt-Test auf Homoskedastizität.

### 2.2.1 LMS-Quantilsregression nach COLE und GREEN

Die LMS-Methode nach COLE und GREEN (1992) ist ein Quantilsregressionsverfahren, das voraussetzt, dass sich die Verteilung der abhängigen Variable durch die Box-Cox-Cole-Green-Wahrscheinlichkeitsverteilung beschreiben lässt. Die BCCG-Verteilung hat drei Parameter, die die Schiefe  $\lambda$  ( $L$ ), den Mittelwert  $\mu$  ( $M$ ) und den Variationskoeffizienten  $\sigma$  ( $S$ ) beschreiben. Die drei Parameter  $\lambda$ ,  $\mu$  und  $\sigma$  können mit Hilfe von verallgemeinerten additiven Modellen als Funktion von Kovariablen u.a. mittels glättender Splines modelliert werden, womit eine sehr hohe Flexibilität bezüglich der Modelleffekte erreicht wird (YEE, 2004). Die Parametrisierung der drei Funktionen erfolgt durch Maximierung der *penalized log-likelihood*. Ist die BCCG-Verteilung eine geeignete theoretische Approximation der Antwortvariable, führt die LMS-Methode zu einer Transformation der Response-Variable in eine standard-normalverteilte Größe  $z$ . Die Verteilung der transformierten Größe ist somit das Prüfkriterium für die Eignung der LMS-Methode als Quantilsregression für ein spezifisches Problem. Die Box-Cox-Cole-Green-Wahrscheinlichkeitsverteilung (BCCG-Verteilung) ist wie folgt definiert:

$$f(y|\mu, \sigma, \lambda) = \left( \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma}} \right) \cdot \left( \frac{y^{\lambda-1}}{\mu^{\lambda}} \right) \cdot \exp\left( -\frac{z^2}{2} \right) \quad [1]$$

$$\text{wenn } \lambda \neq 0 \quad z = \frac{\left[ \left( \frac{y}{\mu} \right)^{\lambda} - 1 \right]}{\mu \cdot \sigma} \quad [1.1]$$

$$\text{sonst} \quad z = \frac{\log\left( \frac{y}{\mu} \right)}{\sigma} \quad [1.2]$$

für  $y > 0, \mu > 0, \sigma > 0, \mu = (-\infty, +\infty)$

Die Box-Cox-transformierten z-Werte werden als standardnormalverteilt angenommen. Die bedingte Quantilsfunktion im LMS-Modell ist wie folgt definiert:

$$Q(\tau | X_i) = \mu(X_i) (1 + \lambda(X_i) \sigma(X_i) \Phi^{-1}(\tau))^{1/\lambda(X_i)} \quad [2]$$

mit  $\tau = \text{Anteil der Verteilung}$ ,

$X_i = \text{Kovariablenvektor } i$ ,

$\Phi^{-1} = \text{inverse Standardnormalverteilung}$ .

## 2.2.2 Modellierung des Höhenbonitätsquantils

Zur Modellierung des Höhenbonitätsquantils werden folgende LMS-Funktionen für Buche und Fichte aufgestellt und im Statistikpaket *R* (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2006) unter Verwendung der Bibliothek *gamlss* (STASINOPOULOS und RIGBY, 2007) parametrisiert:

$$\mu_i = \alpha_1 + \text{nut}_i^T \beta_1 + f_1(WH_i) + f_2(\text{Temp}_i) + \alpha_2 \cdot zNdep_i + \alpha_3 \cdot LP_{1_i} + \dots + \alpha_{k+3} \cdot LP_{k_i} \quad [3]$$

mit  $k_{\text{Fichte}} = 60, k_{\text{Buche}} = 32$

$$\log(\sigma_i) = \alpha_1 + \text{nut}_i^T \beta_1 + \alpha_2 \cdot zNdep_i + \alpha_3 \cdot LP_{1_i} + \dots + \alpha_{k+3} \cdot LP_{k_i} \quad [4]$$

mit  $k_{\text{Fichte}} = 15, k_{\text{Buche}} = 12$

$$\lambda_i = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot zNdep_i \quad [5]$$

mit

**nut**=Indikatorvektor für Nährstoffziffer, **WH**=pflanzenverfügbares Wasser in der Vegetationszeit (VZ) [mm], **Temp**=mittlere Temperatur in VZ [°C], **zNdep**=zentrierte mittlere jährliche Stickstoffdeposition [eq/a/ha], **LP<sub>1</sub> .. LP<sub>2</sub>**=Splinebasen des räumlichen Trends aus Mittelwertregressionsmodell, **β<sub>1</sub>**=Parametervektor zu Nährstoffziffern, **α<sub>1</sub> .. α<sub>k</sub>**=Regressionskoeffizienten, **f<sub>1</sub>, f<sub>2</sub>**=glättende Splines.

Das pflanzenverfügbare Wasser und die Temperatur in der Vegetationszeit sind Klimagrößen mit signifikantem Einfluss auf das Baumwachstum (MONSERUD ET AL., 2006). Die zu erstellenden klimasensitiven Ökogramme verwenden daher die beiden Parameter als Achsen und folglich gehen die Parameter als Prädiktoren in die Gleichungen [3] bis [5] ein. Weitere Variablen werden in die Funktionen aufgenommen, soweit ihre Effekte signifikant sind und eine Modellverbesserung anhand des *Bayesian Information Criterion* (BIC) festgestellt wird. Da die Bibliothek *gamlss* keine zweidimensionalen glättenden Splines zur Modellierung eines räumlichen Trends unterstützt, werden die Splinebasen des räumlichen Trends aus dem verallgemeinerten additiven Modell zur Schätzung der Mittelhöhenbonität verwendet (ALBERT und SCHMIDT, 2009). Das Mittelhöhenbonitätsmodell wird mit Hilfe der Bibliothek *mgcv* parametrisiert (WOOD, 2006) und die resultierenden Splinebasen werden als neue Prädiktoren in Form von linearen Termen zur Schätzung des Mittelwerts  $\mu$  und des Variationskoeffizienten  $\sigma$  im LMS-Modell verwendet. Die Basisdimension  $k$  des 2-dimensionalen Splines wird für die einzelnen Funktionen des LMS-Modells optimiert, indem das Mittelwertregressionsmodell mit unterschiedlichen Basisdimensionen parametrisiert wird, die Splinebasen in die Funktionen des LMS-Modells übergeben werden und anhand des BIC das optimale Modell selektiert wird. Der räumliche Trend ist für die Schätzung der Schiefe  $\lambda$  nicht signifikant. Die Verwendung des 2-dimensionalen glättenden Splines ist jedoch für die Funktionen [3] und [4] des LMS-Modells unbedingt notwendig, wie anhand des BIC nachgewiesen werden kann (BIC<sub>Buche</sub>: 47563 mit und 49314 ohne räumlichen Trend; BIC<sub>Fichte</sub>: 74673 mit und 78694 ohne räumlichen Trend).

Die Parameterwerte der drei LMS-Funktionen für Buche und Fichte sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Zu beachten ist, dass nur die den Verteilungsmittelwert  $\mu$  beschreibende Funktion [3] die klimasensitiven Variablen pflanzenverfügbares Wasser (WH) und mittlere Temperatur enthält. Unter der Annahme, dass der Nährstoffhaushalt mittelfristig unverändert sowie der Stickstoffspeicher im Boden gefüllt und somit der Düngeneffekt konstant bleibt, wirkt sich eine Veränderung der Klimabedingungen im LMS-Modell nur auf den Mittelwert  $\mu$ , nicht aber auf die Schiefe und den Variationskoeffizienten der Verteilung aus.

**Funktion [3]:****Parameterkoeffizienten für Buche:**

	Schätzwert	Std.Fehler	t-Wert	Pr(> t )	
(Intercept)	5.293626	1.123e+00	4.7149	2.453e-06	***
zNdep	0.001125	4.388e-05	25.6295	4.157e-140	***
Nähr.ziff.3 <sup>(1)</sup>	-2.786413	1.809e-01	-15.4063	6.530e-53	***
Nähr.ziff.4	-1.724331	1.007e-01	-17.1269	8.882e-65	***
Nähr.ziff.5	-0.613371	8.842e-02	-6.9371	4.266e-12	***
LP1 .. LP32					***
$f_1$ (WH)				3.765e-11	***
$f_2$ (Temp)				5.128e-106	***

**Parameterkoeffizienten für Fichte:**

	Schätzwert	Std.Fehler	t-Wert	Pr(> t )	
(Intercept)	5.681565	7.287e-01	7.797	6.725e-15	***
zNdep	0.000357	3.281e-05	10.882	1.750e-27	***
Nähr.ziff.3 <sup>(1)</sup>	-1.860154	7.492e-02	-24.829	1.236e-133	***
Nähr.ziff.4	-0.780745	3.996e-02	-19.540	4.471e-84	***
LP1 .. LP60					***
$f_1$ (WH)				7.811e-06	***
$f_2$ (Temp)				1.240e-244	***

**Funktion [4]:****Parameterkoeffizienten für Buche:**

	Schätzwert	Std.Fehler	t-Wert	Pr(> t )	
(Intercept)	-2.345e+00	1.795e-02	-130.6738	0.000e+00	***
zNdep	-8.564e-05	1.098e-05	-7.7986	6.919e-15	***
Nähr.ziff.3	2.094e-01	4.258e-02	4.9175	8.914e-07	***
Nähr.ziff.4	6.587e-02	2.389e-02	2.7572	5.841e-03	***
Nähr.ziff.5	-1.181e-02	2.101e-02	-0.5620	5.741e-01	***
LP1 .. LP12					***

**Parameterkoeffizienten für Fichte:**

	Schätzwert	Std.Fehler	t-Wert	Pr(> t )	
(Intercept)	-2.6065333	8.816e-03	-2.96e+02	0.000e+00	***
zNdep	-0.0001934	9.833e-06	-1.97e+01	4.094e-85	***
Nähr.ziff.3	0.1684423	2.253e-02	7.48e+00	7.983e-14	***
Nähr.ziff.4	0.0122860	1.248e-02	9.84e-01	3.249e-01	***
LP1 .. LP60					***

**Funktion [5]:****Parameterkoeffizienten für Buche:**

	Schätzwert	Std.Fehler	t-Wert	Pr(> t )	
(Intercept)	1.9714218	7.890e-02	24.986	1.726e-133	***
zNdep	-0.0002698	8.278e-05	-3.259	1.123e-03	***

**Parameterkoeffizienten für Fichte:**

	Schätzwert	Std.Fehler	t-Wert	Pr(> t )	
(Intercept)	1.5585963	7.772e-02	20.054	2.083e-88	***
zNdep	-0.0004535	9.426e-05	-4.811	1.514e-06	***

<sup>(1)</sup> Die Nährstoffziffern 1, 2 und 3 sowie 5 und 6 wurden aufgrund der geringen Klassenbelegung in den Buchendaten zusammengefasst (für Fichte wurden 1, 2 und 3 sowie 4, 5 und 6 zusammengefasst).

Tabelle 4: Parameterschätzungen der linearen Prädiktoren zur Schätzung von  $\mu$ ,  $\sigma$ ,  $\lambda$  für Buche und Fichte (die einzelnen Parameter der Splinebasen des räumlichen Trends sind alle hochsignifikant, werden hier aber nicht einzeln aufgeführt).

### 2.2.3 Beurteilung der Modellgüte

Für ein gut angepasstes Modell wird für die transformierte Response-Variable  $z_i \sim N(0,1)$  erwartet. Der ks-Test weist dies für das Buchenmodell nach ( $p=0,124$ ), während für das Fichtenmodell eine Standardnormalverteilung nach ks-Test abgelehnt werden muss. Der QQ-Plot für das Fichtenmodell zeigt Abweichungen von der Standardnormalverteilung in den Randbereichen der Verteilung auf. Der Goldfeld-Quandt-Test bestätigt in allen Fällen für Buche und Fichte eine homoskedastische Verteilung der Residuen über den Prädiktoren.

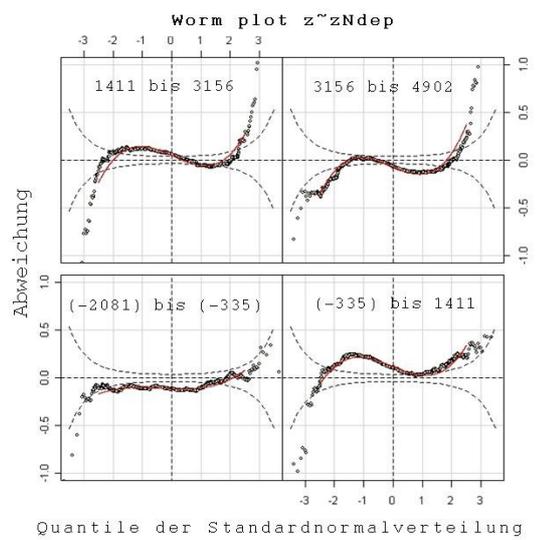
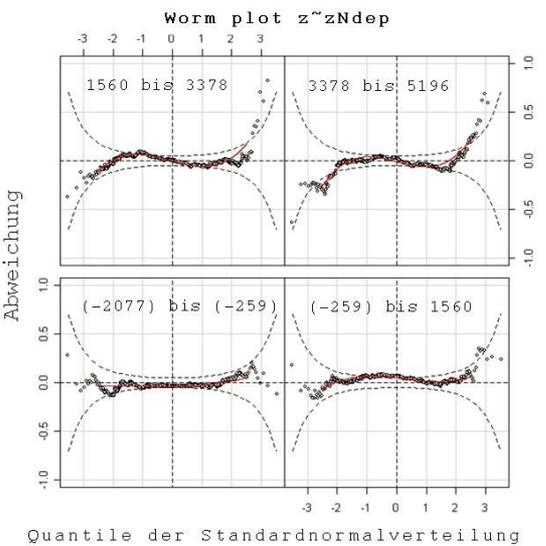
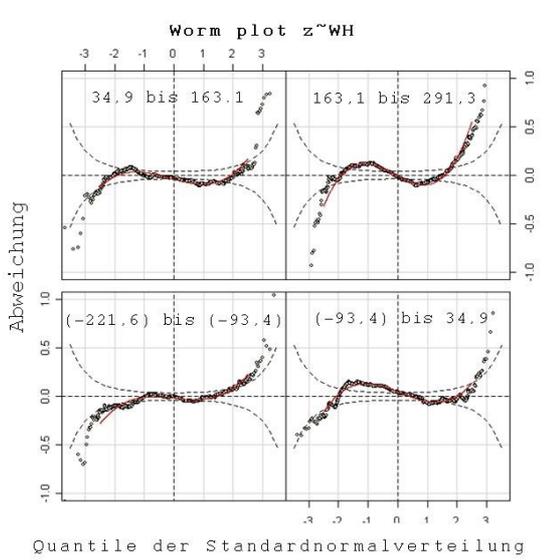
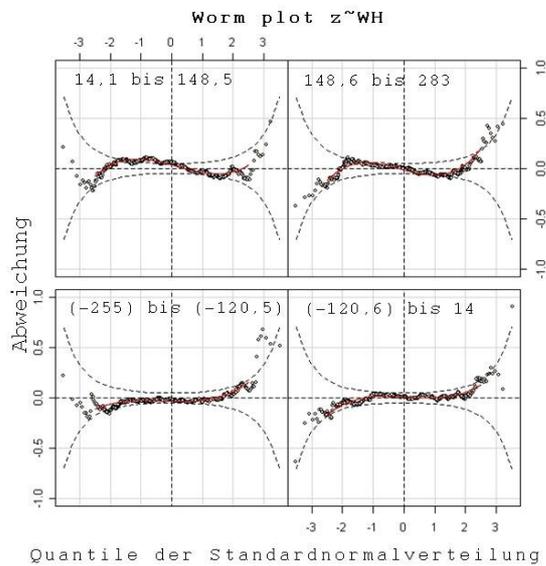
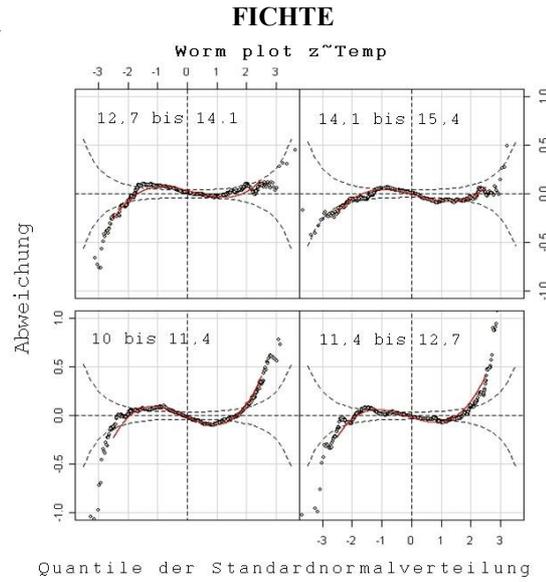
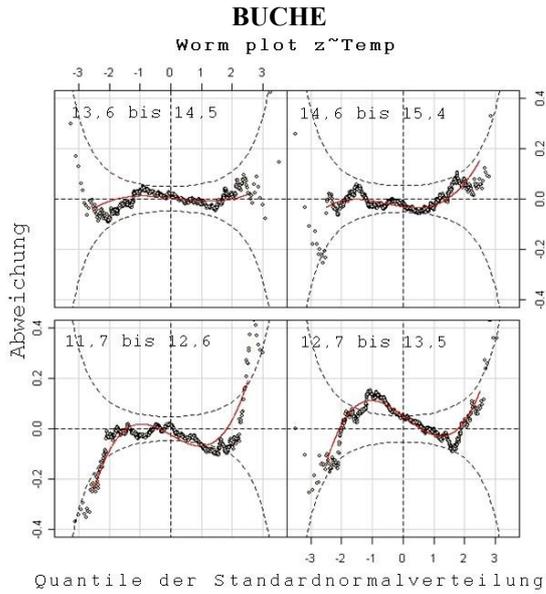


Abb. 1: Wurmplots der transformierten Response-Variablen über den Prädiktoren Temperatur (Temp), pflanzenverfügbares Wasser (WH) und Stickstoffdepositionsrate (zNdep) für das Buchenmodell (links) und das Fichtenmodell (rechts). Der Wertebereich der Prädiktoren ist dabei in jeweils vier Klassen aufgeteilt (Klassengrenzen oben in den einzelnen Diagrammen angegeben).

Nähere Analysen zur Normalverteilung liefert der Wurmplot (van BUUREN, 2007). Wurmplots sind Serien von trendbereinigten QQ-Plots für die einzelnen Kovariaten, d.h. dargestellt sind die Differenzen zwischen beobachteten und erwarteten Werten bei Normalverteilung über den Quantilen der Standardnormalverteilung für die einzelnen Kovariaten. Wurmplots visualisieren, wie gut ein statistisches Verteilungsmodell die Daten beschreibt (Abb. 1).

Die horizontale Nulllinie der Wurmplots markiert den Verlauf bei Standardnormalverteilung. Abweichungen von der Nulllinie können unterschiedliche Ursachen haben, so deuten die in Abbildung 1 zum Teil auftretenden S-Kurven darauf hin, dass die Randbereiche der Verteilung nicht adäquat beschrieben werden. Die bereits vom ks-Test belegte Abweichung der transformierten Response-Variablen im Fichtenmodell wird in den Wurmplots bestätigt. Insgesamt kann das LMS-Modell für Buche und auch mit Einschränkungen für Fichte als geeignet beurteilt werden (vgl. Abbildung 3 in van BUUREN, 2007).

### 3 Ergebnisse

Das Ziel dieser Untersuchung ist die Erarbeitung der Methodik zur Bereitstellung eines dreidimensionalen Ökogrammes als praxistaugliches Instrument für die Entscheidungsfindung bei der Baumartenwahl unter Klimawandel. Zu diesem Zweck werden die Schätzungen des LMS-Quantilsregressionsmodells in Anbauwürdigkeitsklassen übersetzt und visualisiert. Dabei wird gefordert, dass mit Hilfe des 3D-Ökogramms für eine spezifische Kombination von Standortbedingungen Aussagen getroffen werden können, d.h. das Ökogramm muss eine punktgenaue (für Planungszwecke bedeutet dies: bestandsscharfe) Gültigkeit besitzen. Prinzipiell erhält jeder einzelne Bestand „sein“ eigenes lagespezifisches Ökogramm und Verallgemeinerungen sind streng genommen nicht möglich. Vor der Erstellung und Interpretation eines 3D-Ökogrammes ist die Einordnung des zu bewertenden Punktes/Bestandes innerhalb des Parametrisierungsbereiches interessant (Abb. 2).

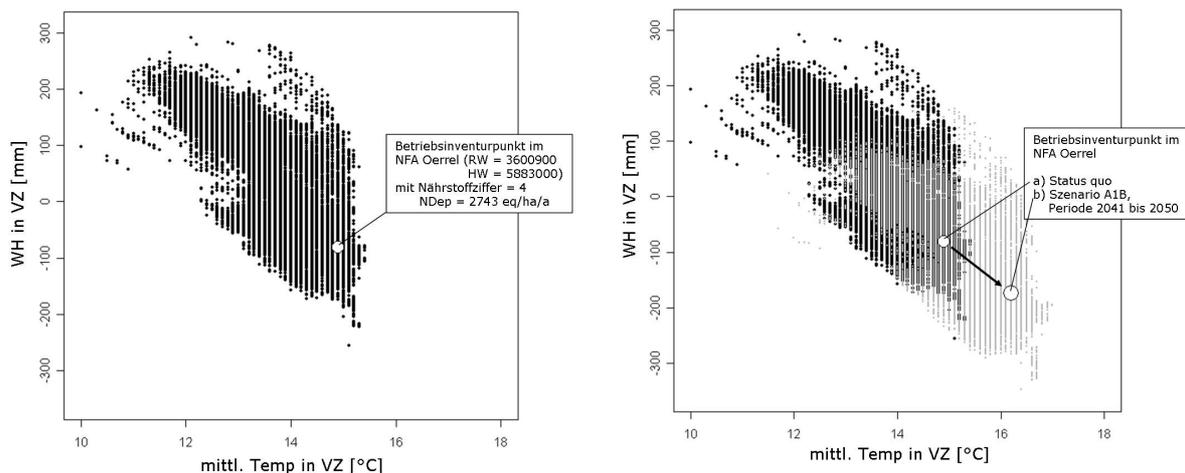


Abb. 2: Derzeitiger Wertebereich des pflanzenverfügbaren Wassers (WH) und der mittleren Temperatur in der Vegetationszeit aller Betriebsinventurpunkte in Niedersachsen (dunkle Punkte, linke Grafik) und die Verschiebung des Wertebereiches unter Klimaszenario A1B – trockene Variante für die Periode 2041-2050 (helle Punkte, rechte Grafik).

In Abbildung 2 ist der Wertebereich des pflanzenverfügbaren Wassers (WH) und der mittleren Temperatur (Temp) in der Vegetationszeit aller Betriebsinventurpunkte in Niedersachsen aufgespannt und die Lage des zu bewertenden Bestandes im Niedersächsischen Forstamt Oerrel (Rechtswert = 360900, Hochwert = 5883000) mit seiner spezifischen Kombination von Standortmerkmalen verzeichnet. Unter heutigen Klimabedingungen herrscht in dem Bestand eine mittlere Temperatur in der Vegetationszeit, die sich am Rand des in Niedersachsen beobachteten Temperaturspektrums befindet. Folglich führt eine projizierte Temperaturerhöhung unter dem Klimaszenario A1B – trockene Variante für die Periode 2041-2050 dazu, dass die Bonitätsschätzung für diesen Bestand im Extrapolationsbereich liegt. Diese zusätzliche Unsicherheit von Prognosen im Extrapolationsbereich muss bei der Bewertung der 3D-Ökogramme berücksichtigt werden.

Mit Hilfe des baumartspezifischen LMS-Modells (Funktion [3] bis [5]) werden bedingte 20%-Quantile der Mittelhöhenbonität geschätzt, indem die beiden klimasensitiven Parameter WH von -350 bis 300 mm und Temp von 10 bis 18°C kontinuierlich variiert werden. Die übrigen Parameter Bodennährstoffe, Stickstoffdeposition auf dem Niveau des Jahres 2004 und geographische Lage werden konstant gehalten. Für jede Parameterkombination

wird das prognostizierte 20%-Quantil der Mittelhöhenbonität artspezifisch in drei Anbauwürdigkeitsklassen eingeteilt (Abb. 3).

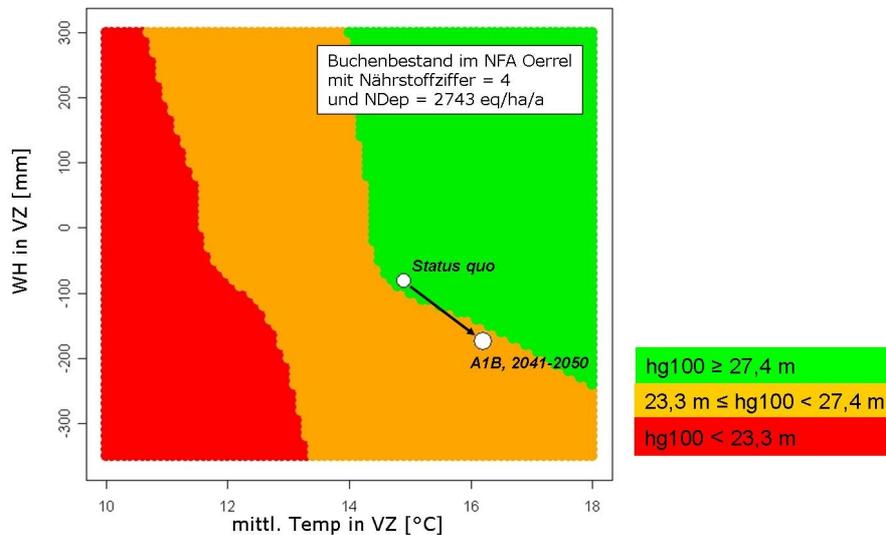


Abb.3: Lagespezifisches dreidimensionales Ökogramm mit drei wuchsleistungsbezogenen Anbauwürdigkeitsklassen (grün: optimale Wuchsleistung, orange: anbauwürdige Wuchsleistung, rot: kritische Wuchsleistung).

Das für einen Beispielbestand berechnete lagespezifische Ökogramm in Abbildung 3 visualisiert neben den beiden Diagrammachsen pflanzenverfügbares Wasser und Temperatur die zeitliche Entwicklung als dritte Dimension. Gegenwärtig wächst der Buchenbestand laut definierter Anbauwürdigkeitsklassen unter optimalen Bedingungen. Zukünftig wird unter dem Szenario A1B – trockene Variante ein Absinken der Höhenbonität zu erwarten sein, da sich das Wasserdefizit weiter verschärft. Auf dem betrachteten Standort weist das 3D-Ökogramm aber auch für den Zeitraum bis 2050 anbauwürdige Bedingungen für die Buche aus. Ein großer Vorteil dieser Darstellung ist die direkte Beurteilbarkeit von Unsicherheit bei der Entscheidungsunterstützung. Sowohl unter Status quo- als auch unter zukünftigen Bedingungen liefert die bestandsspezifische Kombination von Standorteigenschaften ein 20%-Quantil der Mittelhöhenbonität, das in der Nähe eines Übergangs zweier Anbauwürdigkeitsklassen liegt. Schon geringe Veränderungen der klimatischen Bedingungen oder auch der (subjektiv gewählten) Klassengrenzen können einen Klassenwechsel bewirken, was aufgrund der Unsicherheit der projizierten zukünftigen Klimabedingungen zu beachten ist. Auch Modellungenauigkeiten können in einem solchen Fall einen Klassenwechsel bewirken, z.B. der oben angesprochene Fall der Prognose im Extrapolationsbereich.

Ein weiteres Beispiel verdeutlicht die Verwendung von 3D-Ökogrammen als Instrument der Entscheidungshilfe bei der Baumartenwahl. Abbildung 4 zeigt für Fichte und Buche die 3D-Ökogramme für einen Standort im Niedersächsischen Forstamt Clausthal im Harz (HNN = 621 m, podsolige Braunerde der Nährstoffziffer 3, Stickstoffdeposition = 3404 eq/ha/a).

Das Klimaszenario A1B – trockene Variante projiziert für den Standort im Harz eine Erhöhung der mittleren Temperatur in der Vegetationszeit von 1,6°C bei gleichzeitigem Rückgang des pflanzenverfügbaren Wassers um 159 mm für die Periode 2041 bis 2050 (Abb. 4). Während die Buche unter den gegenwärtigen Standortbedingungen eine in Bezug auf die Anbauwürdigkeit kritische Wuchsleistung zeigt und auch die Fichte sich nur am Übergang von kritisch zu anbauwürdig befindet, profitieren beide Baumarten zukünftig von der projizierten Klimaveränderung. Sowohl die Fichte als auch die Buche können unter dem angenommenen Klimaszenario als anbauwürdig eingestuft werden. Abbildung 5 illustriert die einzelnen Modelleffekte, die in ihrem Zusammenspiel zu einer verbesserten Bonität führen.

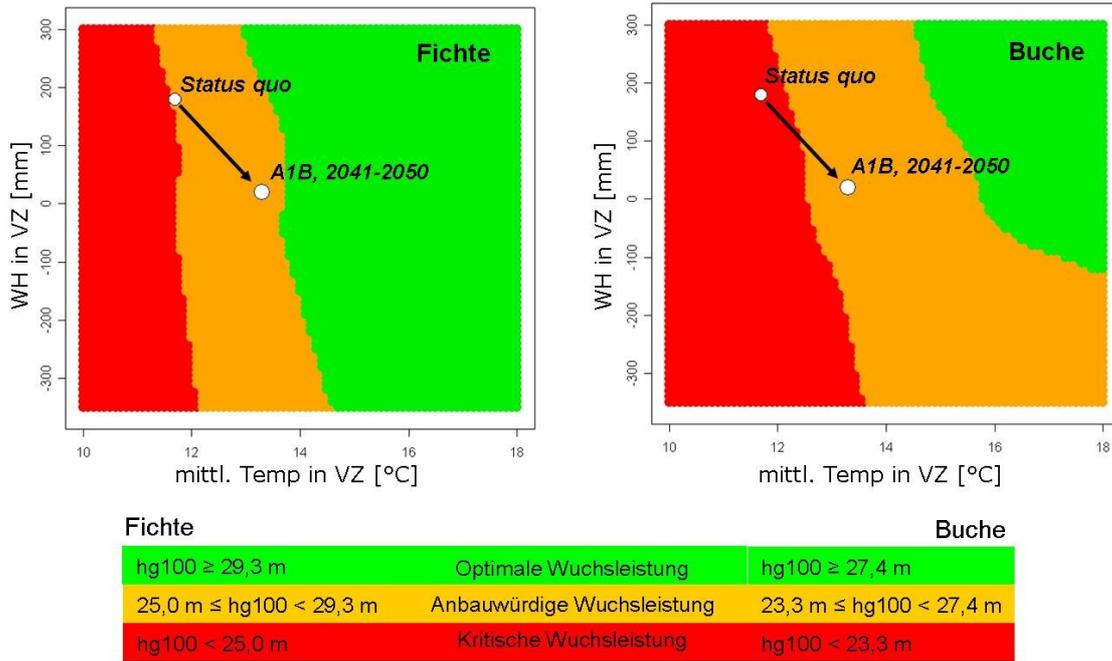


Abb. 4: 3D-Ökogramm für Fichte (links) und Buche (rechts) für einen spezifischen Standort im Niedersächsischen Forstamt Clausthal, Harz.

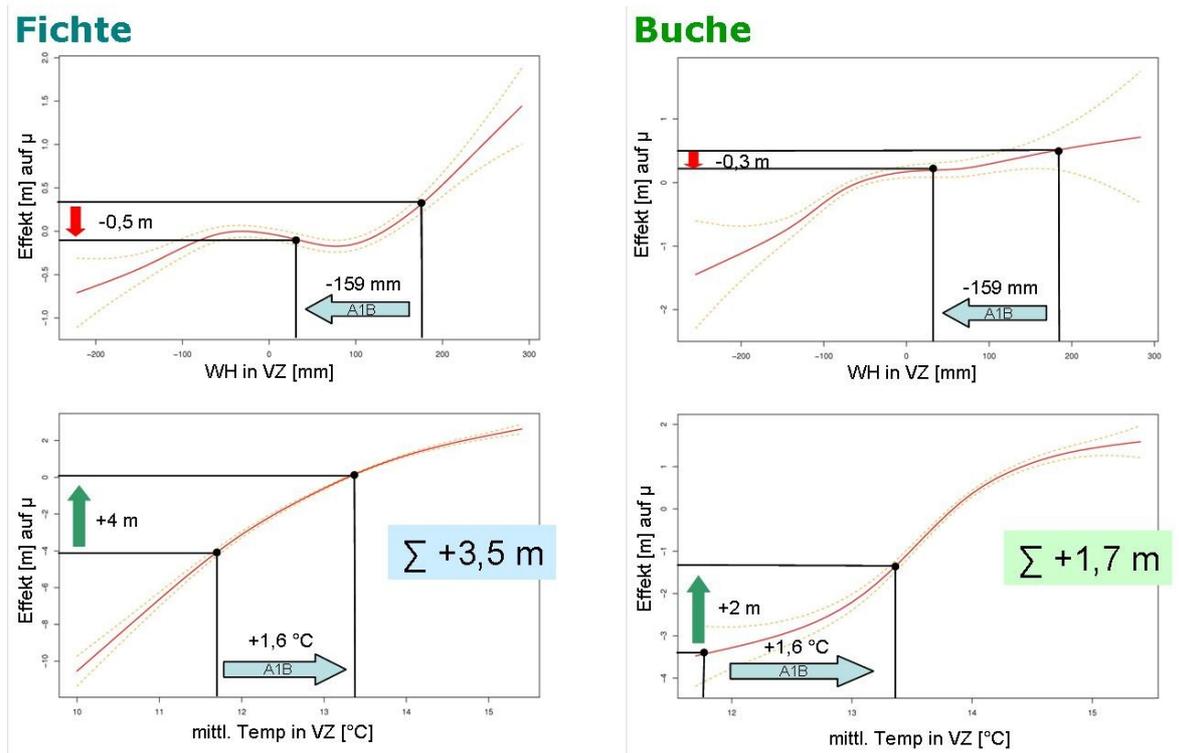


Abb. 5: Partielle Effekte der Prädiktoren pflanzenverfügbares Wasser (WH) und mittlere Temperatur in der Vegetationszeit auf den Mittelwert  $\mu$  der Verteilung der Mittelhöhenbonität für den spezifischen Standort im NFA Clausthal, Harz.

Wie oben bereits ausgeführt, wirken sich Veränderungen der klimasensitiven Größen WH und Temp im formulierten LMS-Quantilsregressionsmodell (Funktion [3] bis [5]) nur auf den Mittelwert  $\mu$  der Verteilung der Mittelhöhenbonität aus. Die in den 3D-Ökogrammen der Abbildung 4 dargestellten Bonitätsveränderungen können somit im Modell mit den partiellen Effekten der beiden Prädiktoren WH und Temp auf  $\mu$  erklärt werden

(Abb. 5). Die erwartete Temperaturerhöhung bewirkt direkt einen Anstieg der Mittelhöhenbonität um 4 m bei der Fichte und 2 m bei der Buche. Das Absinken des pflanzenverfügbaren Wasser wirkt sich leicht negativ für beide Baumarten aus. Beide Effekte addieren sich jedoch insgesamt zu einem deutlich verbesserten Leistungspotenzial der Fichte (+3,5 m) und der Buche (+1,7 m). Die indirekte positive Wirkung einer verlängerten Vegetationszeit durch die Temperaturerhöhung wirkt sich aufgrund der rechen-technischen Einschränkung bei der Bilanzierung (vgl. oben) im derzeitigen Modell noch nicht auf die prognostizierte Bonität aus.

#### **4 Diskussion und Ausblick**

Die Betrachtung des Wuchspotenzials greift nur einen, wenn auch wichtigen Aspekt im Entscheidungsprozess der Baumartenwahl heraus. Vor dem Hintergrund sich verändernder klimatischer Bedingungen wird es in Zukunft zu graduellen Bonitätsverschiebungen kommen. Erste Modellergebnisse für Niedersachsen deuten ein regionales Absinken der Bonitäten an, lassen aber auch gebietsweise einen Anstieg des Wuchspotenzials erwarten (ALBERT und SCHMIDT, 2009). Andere Stress- und Risikofaktoren wie Windwurf, Trockenheit und biotische Schäden werden aufgrund sich verändernder klimatischer Bedingungen Waldökosysteme noch wesentlich stärker beeinflussen. Diese Faktoren können katastrophale Auswirkungen auf Waldbestände haben. Daher ist für eine verantwortungsvolle Entscheidungsunterstützung bei der Baumartenwahl unter Klimawandel die Risikoabschätzung neben der Beurteilung des Wuchspotenzials unabdingbar. Im Entscheidungsunterstützungssystem *Wald und Klimawandel* des BMBF-Verbundprojektes wird daher auf einer breiten Datengrundlage eine ökonomische Bewertung und eine waldbauliche Planung unter Verwendung der mit Hilfe des LMS-Quantilsregressionsmodells erstellten 3D-Ökogramme abgeleitet (JANSEN ET AL., 2008).

Die große Unsicherheit der Klimaprojektionen belastet die Entscheidung der Baumartenwahl aufgrund der langfristigen Bindung. v.LÜPKE (2009) zieht daher für die Baumartenwahl die Schlussfolgerung, dass insbesondere das Resilienzpotenzial der Wälder gestärkt werden muss. Das Risiko von Fehlentscheidungen kann laut v.LÜPKE durch eine geförderte Einwanderung von Baumarten, die Senkung der Produktionszeit, u.a. durch Anbau raschwüchsiger Baumarten, die Vermeidung des Anbaus von Baumarten an den Grenzen ihrer fundamentalen Nischen und eine geeignete kleinflächige, altersgestufte Baumartenmischung gemindert werden. Auch die Empfehlungen von SPELLMANN ET AL. (2007) zum Fichtenanbau und von SUTMÖLLER ET AL. (2008) zum Umgang mit Buchenwäldern unter Klimawandel setzen auf risikobewussten Waldbau.

Trotz oder auch gerade wegen der herrschenden Unsicherheiten besteht ein Bedarf an Instrumenten zur waldbaulichen Entscheidungsunterstützung. KÖLLING (2007) propagiert die Klimahülle zur Beurteilung der Auswirkungen des Klimawandels auf Baumarten. Die Klimahülle ist eine zweidimensionale Häufigkeitsverteilung von Jahresdurchschnittstemperatur und Jahresniederschlag. Dabei dient die Karte der natürlichen Vegetation Mitteleuropas als Bezugsareal der Baumarten. Während die Klimahülle allein das Vorkommen einer Baumart berücksichtigt, nimmt das 3D-Ökogramm bereits eine Bewertung des Baumartenvorkommens bezüglich des Leistungspotenzials vor. Desweiteren ist die Aussagefähigkeit der Klimahüllen in der derzeitigen Form beschränkt, da neben den beiden Faktoren Jahresdurchschnittstemperatur und Jahresniederschlag keine weiteren Standortparameter berücksichtigt werden (vgl. BOLTE ET AL., 2008). Das vorgestellte Quantilsregressionsmodell und damit auch das 3D-Ökogramm ist in dieser Beziehung wesentlich flexibler, da die Effekte zahlreiche Standortfaktoren auch unter Berücksichtigung nicht-linearer Zusammenhänge in die Bonitätsschätzung eingehen und ggf. auch kompensatorisch wirken können.

Das BMBF-Verbundprojekt DSS-WuK strebt an, deutschlandweit standortspezifische Aussagen über die Leistungsfähigkeit der Hauptbaumarten Eiche, Buche, Fichte, Kiefer sowie Douglasie zu machen und mit Hilfe der 3D-Ökogramme ein Instrument zur Entscheidungsfindung bei der Baumartenwahl bereit zu stellen. Im Zuge der Parametrisierung von deutschlandweit gültigen Modellen auf der Grundlage der Bundeswaldinventurdaten werden die Datenbereiche erweitert. Die Berücksichtigung von Extremstandorten sowie neuer Wertekombinationen, z.B. warm-feucht, kann dazu beitragen, dass die Modelle einzelne Effekte noch stabiler darstellen können und die Prognosen im derzeitigen Extrapolationbereich verlässlicher werden. Neben der Erweiterung des Wertespektrums können qualitativ hochwertigere Bodeninformationen über Nährstoffe und die nutzbare Feldkapazität zu einer Modellverbesserung beitragen. Schließlich soll anstelle der mittleren Temperatur die Temperatursumme verwendet werden, da sich durch diese Variable der Einfluss unterschiedlich langer Vegetationszeiten besser beschreiben lässt. Und schlussendlich muss die Bilanzierung auf Basis einer lagespezifischen Vegetationsdauer anstelle der großräumig einheitlichen Bezugsperiode durchgeführt werden.

#### **5 Zusammenfassung**

Das Forschungsprojekt „klimasensitive Modellierung des Standort-Leistungs-Bezugs“ befasst sich neben der Vorhersage von Bonitätsverschiebungen (vgl. ALBERT und SCHMIDT, 2008, 2009) mit der Bereitstellung von waldbaulichen Entscheidungshilfen vor dem Hintergrund sich wandelnder Klimabedingungen.

Zur Identifikation der Optimum- und Grenzbereiche der Anbauwürdigkeit einer Baumart, bezogen auf ihre Wuchsleistung, werden anstelle der Mittelwertregression Quantilsregressionen verwendet (YEE, 2004). Die Verwendung von Quantilsregressionen, z.B. die Modellierung des 20%-Quantils, ermöglicht durch Vergleich

mit beliebigen Grenzwerten die Schätzung von Anbauwürdigkeitsklassen bezogen auf die Wuchsleistung (optimal, anbauwürdig, kritisch). Es wird definiert, dass optimale Standortbedingungen herrschen, wenn mindestens 80% aller unter diesen Standortbedingungen stockenden Bestände mindestens die II. Ertragsklasse aufweisen. Analog wird für Grenzstandorte definiert, dass die Baumart nicht anbauwürdig ist, wenn weniger als 80% der Bestände die III. Ertragsklasse erreichen. Diese Optimum- und Grenzbereiche werden mit Hilfe eines Quantilsregressionsmodelles für die Baumarten Fichte und Buche artspezifisch hergeleitet. Daraus abgeleitete punktscharfe dreidimensionale Ökogramme mit den Achsen mittlere Temperatur und pflanzenverfügbares Wasser in der Vegetationszeit und der zeitlichen Entwicklung unter einem bestimmten Klimaszenario als dritte Dimension unterstützen eine wuchsleistungsbezogene Entscheidungsfindung bei der Baumartenwahl.

### Danksagung

Das Verbundprojekt „Anpassungsstrategien für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung unter sich wandelnden Klimabedingungen – Decision Support System Wald und Klimawandel“ wird vom BMBF im Rahmen des Programms "Klimazwei" gefördert. Die Betriebsinventurdaten wurden vom Niedersächsischen Forstplanungsamt zur Verfügung gestellt. Herrn Sutmöller danken wir für die Berechnung der Werte der Klimavariablen und Herr Ahrends hat dankenswerterweise die Stickstoffdepositionsraten modelliert.

### Literatur

- AHREND, B., H. MEESENBURG, M. JANSEN UND C. DÖRING, 2008: Dynamic modelling of forest management effects on N retention and output at three catchments at the Harz Mountains, Germany. Eurosoil Congress Vienna, Austria. August 25-29.
- ALBERT, M. und SCHMIDT, M., 2008: Erste Ergebnisse zur Modellierung des Standort-Leistungs-Bezuges unter Klimawandel. Jahrestagung der Sektion Ertragskunde des DVFFA in Trippstadt vom 05.-07.05.2007. S. 32-43.
- ALBERT, M. und SCHMIDT, M., 2009: Climate-sensitive modelling of site-productivity relationships for Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and common beech (*Fagus sylvatica* L.). *Forest Ecol. Manage.* In press.
- ALVETEG, M., C. WALSE AND P. WARFVINGE, 1997: Reconstructing Historic Atmospheric Deposition and Nutrient Uptake from Present Day Values Using MAKEDEP. *Water, Air, and Soil Pollution* 104: S. 269-283.
- BUUREN, S.VAN, 2007: Worm plot to diagnose fit in quantile regression. *Statistical Modelling* 7(4): pp. 363-376.
- BÖCKMANN, TH., SABOROWSKI, J., DAHM, ST., NAGEL, J. und SPELLMANN, H., 1998: Die Weiterentwicklung der Betriebsinventur in Niedersachsen. *Forst u. Holz* 53 (8): 219- 226.
- BOLTE, A., IBISCH, P., MENZEL, A. UND ROTHE, A., 2008: Was Klimahüllen uns verschweigen. *AFZ-Der Wald*: S. 2-4.
- COLE, T.J. AND GREEN, P.J., 1992: Smoothing Reference Centile Curves: the LMS Method and Penalized Likelihood. *Statistics in Medicine*, Vol. 11: pp. 1305-1319.
- GAUGER TH., HAENEL H.-D., RÖSEMANN C., NAGEL H.-D., BECKER R., KRAFT P., SCHLUTOW A., SCHÜTZE G., WEIGELT-KIRCHNER R. AND ANSHELM F, 2008. Nationale Umsetzung UNECE-Luftreinhaltekonvention (Wirkungen). Abschlussbericht zum UfoPLAN-Vorhaben FKZ 204 63 252. Dessau-Rosslau (in German)
- JANSEN, M; DÖRING, C; AHREND, B; BOLTE, A; CZAIKOWSKI, T; PANFEROV, O; ALBERT, M; SPELLMANN, H; NAGEL, J; LEMME, H; HABERMANN, M; STAUPENDAHL, K; MÖHRING, B; BÖCHER, M; STORCH, S; KROTT, M; NUSKE, R; THIELE, J.C.; NIESCHULZE, J; SABOROWSKI, J; BEESE, F., 2008: Anpassungsstrategien für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung unter sich wandelnden Klimabedingungen – Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems „Wald und Klimawandel“ (DSS-WuK). *Forstarchiv*, 79. Jg., 131-142.
- KÖLLING, C., 2007: Klimahüllen für 27 Waldbaumarten. *AFZ-Der Wald* 23: S. 1242-1245.
- LÜPKE, B.V., 2009: Überlegungen zu Baumartenwahl und Verjüngungsverfahren bei fortschreitender Klimaänderung in Deutschland. *Forstarchiv* 80: S. 67-75.
- 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*, Nr. 164: 147 S.
- MONSERUD, R.A., HUANG, S. AND YANG, Y., 2006: Predicting lodgepole pine site index from climatic parameters in Alberta. *For. Chron.* 82(4): pp.562-571.
- MONTEITH, J.L., 1965: Evaporation and environment. *Symp. Soc. Exp. Biol.* 19: S. 205-224.
- NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG (HSG.), 2004: Arbeitshefte Boden 2004/3. 61 S.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2006: R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>
- SCHMIDT, M., 2008: Ein longitudinales Durchmesser-Höhenmodell für Fichte in Nordwestdeutschland. Jahrestagung des DVFFA, Sektion Ertragskunde, in Trippstadt vom 05. bis 07. Mai 2008.
- SCHULLA, J., 1997: Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderung. Diss. 12018, ETH Zürich: 163 S.

- SCHULLA, J. AND JASPER, K., 2007: Model Description WaSIM-ETH. Technical report: 181 S.
- SPEKAT, A., ENKE, W., KREIENKAMP, F., 2006: Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarien mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG 2005 auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI – OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES – Szenarien B1, A1B und A2. Projektbericht im Rahmen des F+E-Vorhabens 204 41 138 „Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland“: 94 S.
- SPELLMANN, H., SUTMÖLLER, J. UND MEESENBURG, H., 2007: Risikovorsorge im Zeichen des Klimawandels. AFZ-Der Wald 23: S. 1246-1249.
- STASINOPOULOS, M. and RIGBY, B. with contributions from C. AKANTZILIOTOU, 2007: gamlss: Generalized Additive Models for Location Scale and Shape. R package version 1.6-0. <http://www.londonmet.ac.uk/gamlss/>
- SUTMÖLLER, J., SPELLMANN, H., FIEBIGER, C. UND ALBERT, M., 2008: Der Klimawandel und seine Auswirkungen auf die Buchenwälder. In: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hsg.): Ergebnisse angewandter Forschung zur Buche. Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt, Bd. 3. Universitätsverlag Göttingen: S. 135-158.
- UMWELTBUNDESAMT, 2007: Neue Ergebnisse zu regionalen Klimaänderungen. Das statistische Regionalisierungsmodell WETTREG. <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/hintergrund/Regionale-Klimaaenderungen.pdf> : 27 S.
- WILPERT, K.V., 1990: Die Jahrringstruktur von Fichten in Abhängigkeit vom Bodenwasserhaushalt auf Pseudogley und Parabraunerde : ein Methodenkonzept zur Erfassung standortsspezifischer Wasserstreßdisposition. Freiburger bodenkundl. Abhandlungen, Nr.24: 184 S.
- WOOD, S.N., 2006: Generalized additive models: an introduction with R. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton: 391p.
- YEE, T.W., 2004: Quantile regression via vector generalized additive models. Statist. Med. 23: pp. 2295-2315.