

# Standort-Leistungs-Modelle für die Entwicklung von waldbaulichen Anpassungsstrategien unter Klimawandel

Im Rahmen der Klimafolgenforschung der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) werden klimasensitive Standort-Leistungs-Modelle und biometrische Ansätze zur Quantifizierung abiotischer und biotischer Risiken entwickelt. Neben klimabedingten Verschiebungen im Wuchspotenzial werden sich verstärkende und neu auftretende abiotische und biotische Risikofaktoren negativ auf die Vitalität der Wälder und die Ertragslage der Forstwirtschaft auswirken. Ziel dieses Beitrages ist es, Modellansätze vorzustellen, die den Standort-Leistungs-Bezug so umfassend beschreiben, dass das gesamte Leistungsspektrum auf einem Standort quantifiziert werden kann. Dies ist zum einen ein verallgemeinertes additives Modell zur Schätzung des Erwartungswertes der Mittelhöhenbonität, welches im Rahmen von Szenariosimulationen eingesetzt werden kann, um z. B. Verjüngungs-, Pflege- und Nutzungskonzepte auf ihre Eignung zu prüfen und Anpassungsmaßnahmen zu planen, Holzaufkommensprognosen zu rechnen und die Möglichkeiten der Kohlenstoffsequestrierung im Bestand einzuschätzen. Der zweite Ansatz zur Modellierung der Standort-Leistungs-Beziehung beruht auf der Methode der Quantilsregression. Zur Beurteilung der Anbauwürdigkeit von Baumarten wird es als erforderlich erachtet, dass nicht nur die mittlere Leistungsfähigkeit eines Standortes sondern dass ein Quantil der Höhenbonitätsverteilung geschätzt wird. Somit können Anteile der Bestände geschätzt werden, die auf einer Standortseinheit eine bestimmte Wuchsleistung erreichen. Auf das Quantilsregressionsmodell aufbauend dienen mehrdimensionale Ökogramme als Entscheidungsunterstützungsinstrumente für die Baumartenwahl unter sich verändernden Klimabedingungen.

**Stichworte:** Standort-Leistungs-Bezug, Klimawandel, verallgemeinertes additives Modell, Quantilsregression, Produktivitätsveränderung, Baumartenwahl

**Site-productivity models for developing silvicultural adaptation strategies under climate change**

Climate-sensitive site-productivity models and biometric approaches to quantify abiotic and biotic risks are the core of the Northwest German Forest Research Institute's (NW-FVA) climate impact research. A climate induced shift in forest growth potential as well as increasing current and emerging new abiotic and biotic risks will impact forest ecosystem's vitality and the forest enterprises' economic condition. The presented research introduces two statistical models which comprehensively describe the site-productivity relationship of beech (*Fagus sylvatica*, L.), oak (*Quercus* spec.), spruce (*Picea abies*, [L.] KARST), pine (*Pinus sylvestris*, L.) and Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* [MIRB.] FRANCO). Firstly, species-specific generalized additive models predict the expected site index value. Based on scenario simulations silvicultural concepts for regeneration, tending and harvesting under a changing climate can be checked and adaptation measures can be applied in case of need. Furthermore, climate-sensitive predictions of future timber stocks and carbon sequestration calculations are possible fields of model application. Secondly, the site-productivity relationship is modelled using a quantile regression approach. In order to evaluate the tree species' worthiness of cultivation a predicted mean site productivity is considered not sufficient but additionally certain quantiles of the site index distribution need to be predicted. Thus, proportions of forest stands stocking on a specific site and reaching a certain productivity level can be predicted. Based on the species-specific quantile regression models multidimensional ecograms are developed as decision support instruments for selecting tree species for cultivation under a changing climate.

**Keywords:** Site-productivity relationship, climate change, generalized additive model, quantile regression, changes in productivity, choice of tree species

## 1 Einleitung

Forsteinrichtung und Waldbauplanung müssen durch den runden Wandel der ökologischen Rahmenbedingungen und ökonomischen Produktionsgrundlagen Entscheidungen in einem Umfeld treffen, das durch ein hohes Maß an Unsicherheit geprägt ist. Allein die projizierten Klimaveränderungen werden zu einer Zunahme abiotischer und biotischer Risiken und zu wuchsleistungsbeeinflussenden Standortveränderungen führen, deren räumliches und zeitliches Muster nur schwer quantifiziert werden kann. Instrumente zur waldbaulichen Entscheidungsunterstützung, die diese Veränderungen unter Berücksichtigung der Unsicherheit beschreiben und einen Handlungskorridor aufzeigen, können daher eine wertvolle Hilfestellung bieten.

Auch in Mitteleuropa beeinflusst der Klimawandel bereits heute die Wälder. Die Klimaprojektionen lassen zukünftig für Deutschland deutlich höhere Temperaturen bei gleichzeitig

veränderten jährlichen Niederschlagsverteilungen erwarten (UBA 2006, IPCC 2007, GERSTENGARBE 2008). Insbesondere die projizierte Zunahme extremer Witterungereignisse wie lang anhaltende Trockenperioden und Stürme werden sich negativ auf den Gesundheitszustand der Wälder und die Ertragslage der Forstwirtschaft auswirken. Angemessene Anpassungsmaßnahmen der mittel- bis langfristigen Waldbauplanung können die Risiken jedoch abschwächen (MILLAR et al. 2007; SPELLMANN et al. 2007; BOLTE et al. 2009).

Die klimasensitive Modellierung des Waldwachstums ist neben der Quantifizierung von abiotischen und biotischen Risiken einer der Schwerpunkte in der Klimafolgenforschung der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA). Es ist das Ziel, den Standort-Leistungs-Bezug so umfassend zu beschreiben, dass die Variabilität des Leistungsspektrums auf einem Standort quantifiziert werden kann. Für viele waldbauökologische Fragestellungen sind Schätzungen des Erwartungswertes einer Bonitätsverteilung aussagekräftig.

Für eine spezifische Kombination von Standortseigenschaften sind die beobachteten Höhenbonitäten approximativ normalverteilt, so dass ihr Erwartungswert mit einem Standardregressionsmodell geschätzt werden kann. Jedoch werden viele waldbauliche Entscheidungen wie z. B. die Baumartenwahl nicht ausschließlich an Erwartungswerten ausgerichtet. Die Anbauempfehlung für eine Baumart muss vielmehr die Variabilität der Bonitäten eines Standortes berücksichtigen. Ein mögliches Entscheidungskriterium ist daher der Anteil der Bestände (z. B. 70, 80 oder 90 %) einer Standortseinheit, der eine bestimmte Mindestbonität erreicht. Für die Entscheidungsunterstützung bei der Baumartenwahl muss folglich ein Quantil der Verteilung der Standortleistungsfähigkeit geschätzt werden. Die Anforderungen der forstlichen Praxis an die Leistungsfähigkeit von Waldbeständen bestimmen dabei, welches konkrete Quantil als ausreichend angesehen wird.

In diesem Beitrag werden sowohl verallgemeinerte additive Modelle zur Schätzung des Erwartungswertes als auch Schätzmodelle für Quantile des Standort-Leistungs-Bezuges für die Baumarten Buche (*Fagus sylvatica*, L.), Eiche (*Quercus spec.*), Fichte (*Picea abies*, [L.] KARST), Kiefer (*Pinus sylvestris*, L.) und Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* [MIRB.] FRANCO) vorgestellt. Ziel ist es (1) die unterschiedlichen Anwendungsbereiche der beiden Modellansätze aufzuzeigen und (2) den Beitrag der beiden Modellansätze für die Entwicklung von waldbaulichen Anpassungsstrategien an den Klimawandel vorzustellen.

## 2 Material und Methoden

Zur klimasensitiven Modellierung des Standort-Leistungs-Bezuges müssen Standortsvariablen räumlich hoch aufgelöst vorliegen. Viele Variablen stehen in adäquater Qualität jedoch entweder nicht flächendeckend für alle Besitzarten, wie z. B. bodenkundliche Informationen aus der Forstlichen Standortskartierung, oder sogar nur als Stationsmesswerte, wie z. B. die Klimaparameter auf Basis der DWD-Stationen, zur Verfügung. Somit müssen die Standortsvariablen über kombinierte geostatistische und regressionsanalytische Verfahren regionalisiert werden. Diese Regionalisierungen sind zum einen für die Modellentwicklung notwendig, weil ertragskundliche Erhebungen auf Versuchsfächern und in Waldinventuren nicht deckungsgleich mit z. B. bodenkundlichen Erhebungen wie der BZE sind. Zum anderen ist die flächendeckende Verfügbarkeit von Standortsvariablen für die spätere Initialisierung bzw. Anwendung der Modelle in der forstlichen Praxis notwendig.

### 2.1 Datenmaterial

Die Datengrundlage für die Modellierung des Standort-Leistungs-Bezuges sind Inventurpunkte der Bundeswaldinventuren 1 und 2 (BWI) sowie der Betriebsinventuren der Niedersächsischen Landesforsten (BI). Für die baumartenspezifischen Modelle wurden jeweils die Inventurpunkte selektiert, an denen die Baumart mit mindestens einer Baumhöhenmessung erfasst wurde (Tab. 1). Aufgrund der repräsentativen Stichprobemethoden ergeben sich umfangreiche baumartspezifische Datengrundlagen, die das gesamte Alters- und Bonitätsspektrum abdecken.

An jedem Inventurpunkt wird baumartspezifisch die Mittelhöhenbonität im Alter 100 mit Hilfe des longitudinalen Höhen-Durchmesser-Bonitierungsansatzes von SCHMIDT (2008, 2009), basierend auf den Arbeiten von LAPPI (1997) und MEHTÄTALO (2004), als Funktion von Bestandesparametern und der Seehöhe sowie der geografischen Lage geschätzt (vgl. auch ALBERT und SCHMIDT 2010). Dieser Bonitierungsansatz berücksichtigt die

**Tabelle 1:** Charakteristika der Parametrisierungsgrundlage ( $N$  – Anzahl der Beobachtungen;  $\bar{x}$  – Mittelwert;  $sd$  – Standardabweichung; 5 %- und 95 %-Quantil;  $hg_{100}$  – Mittelhöhenbonität im Alter 100)

**Table 1:** Characteristic values of the parameterization data base ( $N$  – number of observations;  $\bar{x}$  – mean;  $sd$  – standard deviation; 5 %- and 95 %- quantile;  $hg_{100}$  – site index at age 100)

		Buche	Eiche	Fichte	Kiefer	Douglasie
N		35 864	20 666	57 094	35 104	4 750
Alter	$\bar{x}$	96	100	69	75	44
	5 %	35	29	25	27	18
	sd	40	47	34	36	21
	95 %	161	177	130	140	90
$hg_{100}$	$\bar{x}$	27,9	24,3	31,8	26,2	47,5
	5 %	20,9	18,0	25,0	20,3	35,5
	sd	4,1	3,7	4,1	3,5	6,6
	95 %	34,5	30,3	38,5	31,7	57,1

**Tabelle 2:** Verwendete Modellvariablen und die zu ihrer Herleitung verwendete Methodik <sup>(1)</sup>  $1\ 000 \text{ eq}/\text{ha}\cdot\text{a} = 14,01 \text{ kg}/\text{ha}\cdot\text{a}$

**Table 2:** Selected model variables and method of derivation  
(<sup>(1)</sup>  $1\ 000 \text{ eq}/\text{ha}\cdot\text{a} = 14.01 \text{ kg}/\text{ha}\cdot\text{a}$ )

Variable	Einheit	Datenquelle
Boden-nährstoffe (Nähr)	nach Berg- und Tiefland klassifizierte und in (max.) je 4 Stufen gruppierte Bodennährstoffversorgung in Anlehnung an die niedersächsische Standortskartierung	abgeleitet aus Leitprofilen entsprechend der Wald-Bodenübersichtskarte (BÜK); modifiziert von AHRENDS (2010)
Nutzbare Feldkapazität (nFK)	auf 1,4 m Bodentiefe bilanziert [mm]	abgeleitet aus Leitprofilen entsprechend der Wald-BÜK; modifiziert von AHRENDS (2010)
Stickstoff-deposition (Ndep)	über das Bestandesleben gemittelte jährliche Stickstoffdepositionsrate [ $\text{eq}/\text{ha}\cdot\text{a}$ ] <sup>(1)</sup>	modelliert mit einer modifizierten Version von MAKEDEP (ALVETEG et al. 1997, AHRENDS et al. 2008)
Temperatur-summe (Temp)	Summe aller Tagesmitteltemperaturen in der Vegetationszeit [°C], wobei die Vegetationszeit dynamisch und baumspezifisch berechnet wird (vgl. MENZEL 1997, v. WILPERT 1990)	modelliert mit WETTREG für die Klimanormalperiode 1961 bis 1990; regionalisiert auf Einheiten von 200 m × 200 m mit WASIM-ETH (vgl. SCHULLA 1997, SPEKAT et al. 2006)
Klimatische Wasserbilanz (KWB)	Differenz aus der Niederschlagssumme und der potenziellen Evapotranspiration (vgl. MONTEITH 1965) in der Vegetationszeit [mm]	modelliert mit WETTREG für die Klimanormalperiode 1961 bis 1990; regionalisiert auf Einheiten von 200 m × 200 m mit WASIM-ETH (vgl. SCHULLA 1997, SPEKAT et al. 2006)

durch Klimawandel und Stoffeinträge hervorgerufenen Wachstumstrends, die bereits für die vergangenen Jahrzehnte beobachtet wurden (vgl. z. B. RÖHLE 1995, STERBA 1995, ELFING und NYSTRÖM 1996, SPIEKER et al. 1996; SCHADAUER 1999). Die so hergeleitete Mittelhöhenbonität drückt die Standortleistungsfähigkeit aus und ist die Zielgröße der im folgenden beschriebenen Modellierungsansätze.

		Buche	Eiche	Fichte	Kiefer	Douglasie
Nähr Bergland	schwach	487	1229	1898	6724	781
	mittel	1841		6668		
	gut	24549	12642	22693	15987	1583
	sehr gut			13196		1128
Tiefland	schwach	1346	1965	2145	7223	421
	mittel	101		3239		
	gut	7540	1591	6150	3983	673
	sehr gut			4350		1187
nFK	̄x	157	173	158	187	178
	sd	48	52	43	44	47
Ndep	̄x	2163	2202	2635	2728	3622
	sd	862	1149	1043	1351	1701
Temp	̄x	2117	2215	2048	2070	2205
	sd	140	92	183	92	107
KWB	̄x	-188	-234	-157	-237	-265
	sd	109	69	127	81	87

Die Mittelhöhenbonität der BWI- und BI-Punkte wird über die zugehörigen geografischen Koordinaten mit verschiedenen Standortsvariablen verknüpft, deren Effekte auf die Standortleistungsfähigkeit geprüft werden. Die im Rahmen der Modellbildung als signifikant herausselektierten erklärenden Variablen sind die Bodennährstoffversorgung (Nähr), die nutzbare Feldkapazität (nFK), die Stickstoffdepositionsrate (Ndep) sowie die Temperatursumme (Temp) in der Vegetationszeit und die klimatische Wasserbilanz (KWB) in der Vegetationszeit. Eine räumliche Trendfunktion quantifiziert den Einfluss der geografischen Lage auf die Standortleistungsfähigkeit und subsummiert Effekte, wie z. B. den Windeinfluss, die nicht explizit durch die im Modell integrierten kausalen Variablen beschrieben werden. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die verwendeten erklärenden Variablen und die Methodik ihrer Herleitung. Die Niederschlagssumme und Evapotranspiration in der Vegetationszeit sowie die CO<sub>2</sub>-Konzentration wurden als weitere erklärende Variablen untersucht, aber im Rahmen der Modellbildung durch Modellvergleiche auf Basis des Bayesian Information Criterion (BIC) ausgeschlossen.

Die große Streuungen in den Beobachtungswerten der erklärenden Variablen und die Klassenbesetzungen in der kategorischen Variablen Nähr, getrennt nach Baumarten, verdeutlicht die weitreichende Abdeckung der forstlichen Standorte (Tabelle 3).

Die Bodenparameter Nähr und nFK werden aus der bundesweit vorliegenden Wald-Bodenübersichtskarte (Wald-BÜK) hergeleitet. In einem ersten Schritt werden die Bodenparameter eines Leitprofils, das dem Stichprobenpunkt zugeordnet wird, übernommen. In einem zweiten Schritt werden diese Parameterwerte des Leitprofils anhand von Transferfunktionen modifiziert (AHRENDS 2010). Die Bodennährstoffversorgung wird im Anhalt an die Niedersächsische Standortskartierung klassifiziert (AK Standortskartierung 1996). Das Kartierschema unterscheidet dabei zwischen Bergland und Tiefland, was bei der Modellierung des Standort-Leistungs-Bezuges die Möglichkeit eröffnet, etwaige Unterschiede von Bergland- und Tieflandstandorten gleicher Nährstoffausstattung auf die Wuchsleistung zu identifizieren (vgl. AHRENDS 2010). Daher wird die kategorische Variable Bodennährstoffe ebenfalls nach Berg- und Tieflandstandorten klassifiziert. Die nutzbare Feldkapazität wird einheitlich für alle Standorte auf 1,4 m bilanziert, weil die Bäume auf vielen Böden des Tieflandes eine effektive Durchwurzelungstiefe von mindestens 1,4 m aufweisen (CZAJKOWSKI et al. 2009). Für Berglandstandorte ist die größere Bezugstiefe abgesehen von Lößstandorten und Gesteinsklüften meist unerheblich, da die effektive Durchwurzelungstiefe durch das anstehende Gestein selten mehr als 1,0 m beträgt.

**Tabelle 3:** Wertebereiche der verwendeten Variablen  
(Nähr – Anzahl der Beobachtungen je Nährstoffstufe; die geschweifte Klammer kennzeichnet Klassen die aufgrund von nicht signifikant unterschiedlichen Modelleffekten bei der Modellsélection zusammengefasst wurden;  
̄x – Mittelwert;  
sd – Standardabweichung)

**Table 3:** Range of parameter values  
(Nähr – number of observations in nutrient class; curly bracket indicates combined classes because of not significantly differing effects during model selection;  
̄x – mean; sd – standard deviation)

Die zeitdynamische Stickstoffdeposition (Ndep) wird als die durchschnittliche jährliche Rate bezogen auf das Bestandesleben am Beobachtungspunkt beschrieben. Der Bilanzierungszeitraum ist somit für Ndep dynamisch an den Zeitraum zwischen der Bestandesbegründung und dem jeweiligen Inventurzeitpunkt angepasst. Die jährlichen Stickstoffdepositionssdaten wurden mit einer modifizierten Version des Modells MAKEDEP von ALVETEG et al. (1997) geschätzt (AHRENDS et al. 2008; AHRENDS 2010). Die Mittelwerte der Temperatursumme (Temp) und der klimatischen Wasserbilanz (KWB) in der Vegetationszeit der 30-jährigen Klimanormalperiode 1961 bis 1990 werden mit dem regionalen Klimamodell WETTREG (SPEKAT et al. 2006) retrospektiv für die geografische Lage der DWD-Messstationen projiziert. Für die zeitdynamischen Klimaparameter wird somit ein fixer Bilanzierungszeitraum verwendet. Diese projizierten Klimaparameter werden danach mit Hilfe des Modells WASIM-ETH (vgl. SCHULLA 1997; SCHULLA und JASPER 2007) deutschlandweit auf 200 m × 200 m Teilflächen regionalisiert. Jeder ertragskundliche Inventurpunkt bekommt die Klimaparameterwerte derjenigen Teilfläche zugeordnet, die ihm räumlich entspricht.

## 2.2 Methodik der verallgemeinerten additiven Modelle (GAM)

Der verwendete statistische Modellierungsansatz zur Beschreibung des Standort-Leistungs-Bezuges der Baumarten Fichte, Buche, Kiefer, Eiche und Douglasie ist ein verallgemeinertes additives Modell (vgl. HASTIE und TIBSHIRANI 1990), das im Statistikpaket R 2.10.0 (R Development Core Team 2006) unter Verwendung der Bibliothek mgcv 1.6-0 (WOOD 2006) parametrisiert wurde. Additive Modelle erlauben es, nichtlineare Effekte der Prädiktorvariablen auf die Antwortvariable zu identifizieren, ohne dass Annahmen über eine bestimmte Funktionsform vorgegeben werden müssen. In der Methodik von WOOD (2006) werden dazu penalisierte Regressionssplines verwendet. Dabei wird die Flexibilität der Anpassung fast ausschließlich über einen Glättungsparameter gesteuert, der über verallgemeinerte Kreuzvalidierung optimiert wird. Die allgemeine Form eines verallgemeinerten additiven Modells (GAM) lautet für normal- und homogenverteilte Beobachtungen wie folgt:

$$Y_i = \alpha + f(X_i) + \varepsilon_i \quad \varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$$

$Y_i$  abhängige Variable für Beobachtung  $i$

$X_i$  Vektor von erklärenden Variable für Beobachtung  $i$

$f$  glättende Funktion

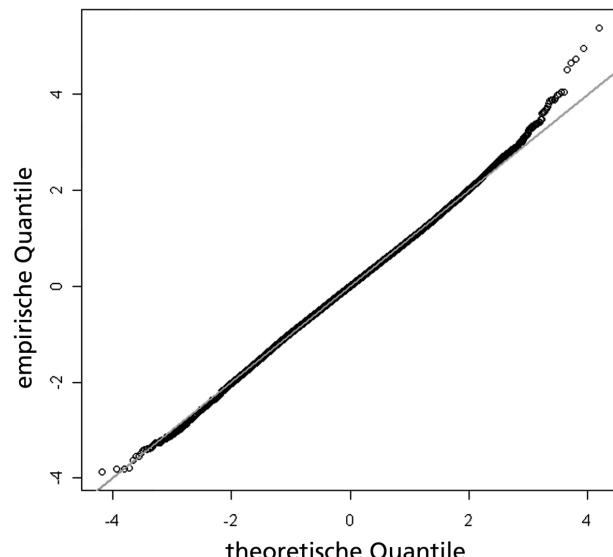
Im Gegensatz zum einfachen linearen Regressionsmodell, in dem die Beziehung zwischen  $Y_i$  und  $X_i$  durch einen konstanten Regressionsparameter beschrieben wird, werden im GAM glättende Funktionen zur Beschreibung potenzieller nichtlinearer Effekte verwendet. Das Schätzergebnis ist der Erwartungswert der Zielvariablen  $Y_i$ .

### 2.3 Methodik der Quantilsmodellierung

Die Modellierung von Quantilen zielt auf eine möglichst exakte Schätzung der bedingten Verteilungen der Zielvariablen  $y$  in Abhängigkeit der Prädiktorvariablen  $x$ . Quantilsmodellierungsverfahren können in zwei Gruppen eingeteilt werden: (1) nichtparametrische, verteilungsfreie Quantilsregressionsverfahren (vgl. KOENKER und BASSETT 1978; KOENKER 2005) und (2) verteilungsbasierte Verfahren wie z. B. die Generalized Additive Models for Location, Scale and Shape (GAMLSS-Modelle; vgl. RIGBY und STASINOPoulos 2005, STASINOPoulos und RIGBY 2007). GAMLSS-Modelle setzen eine bestimmte Verteilungsannahme, analog zur Normalverteilungsannahme im Standardregressionsmodell, für die Zielvariable voraus.

In dieser Untersuchung wird die LMS-Methode nach COLE und GREEN (1992) verwendet, bei der angenommen wird, dass die abhängigen Variablen der Box-Cox-Cole-Green-Wahrscheinlichkeitsverteilung (BCCG) folgen. Die BCCG-Verteilung hat drei Parameter, die die Schiefe  $\lambda$  (L), den Erwartungswert  $\mu$  (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 (RIGBY und STASINOPoulos 2004). Für eine einfache Interpretation additiver Effekte auf den Erwartungswert  $\mu$  wird die Verknüpfungs-Funktion  $g(\mu) = \mu$  verwendet (vgl. RIGBY und STASINOPoulos 2004, 2005, 2006, FENSKE, 2008). Um positive Werte von  $\sigma$  zu gewährleisten, wird die Verknüpfungs-Funktion  $g(\sigma) = \log(\sigma)$  gewählt. Die Schiefe  $\lambda$  unterliegt keiner Restriktion und wird wie  $\mu$  identisch verknüpft. Die Parametrisierung der drei Funktionen erfolgt durch Maximierung der penalized log-likelihood-Funktion. Die BCCG-Verteilung ist wie folgt definiert (RIGBY und STASINOPoulos 2004, 2006):

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



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

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

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

Die Box-Cox-transformierten  $z$ -Werte sind annähernd standard normal verteilt, d. h. durch die geeignete funktionale Beschreibung von  $\lambda$  wird jegliche Schiefe beseitigt, der Parameter  $\mu$  beschreibt den Median anstelle des Mittelwertes und der Skalenparameter  $\sigma$  entspricht approximativ dem dimensionslosen Variationskoeffizienten (COLE et al. 2009). Kurtosis wird als nicht vorhanden angenommen. Die bedingte Quantilsfunktion im LMS-Modell ist, im Anhalt an VAN BUUREN (2007), wie folgt definiert:

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

$\tau$  Anteil der Verteilung

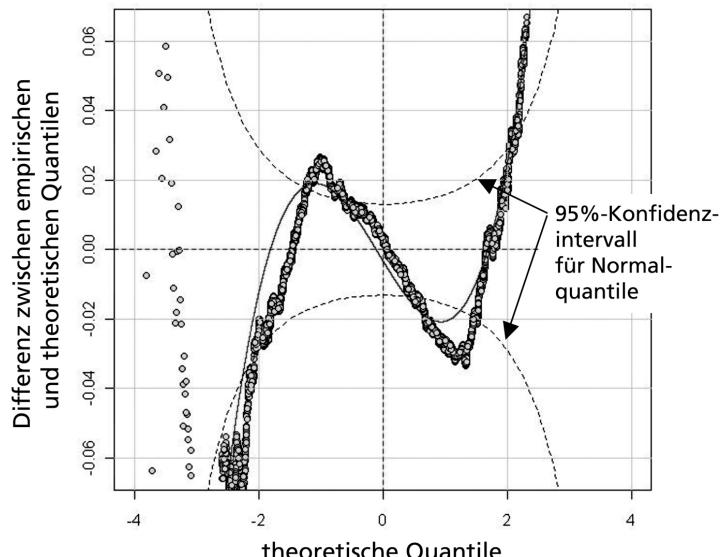
$X_i$  Kovariablenvektor i

$\phi^{-1}$  inverse Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung

Die Modellbildung zur Schätzung von Quantilen des Standort-Leistungs-Bezuges erfolgt mit Hilfe des Statistikpaketes R, Version 2.10.0 (R Development Core Team 2006), unter Verwendung der Bibliothek gamm, Version 3.0-1 (STASINOPoulos und RIGBY 2007).

Eine gute Modellanpassung bei der LMS-Quantilsregressionsmethode ist dadurch gekennzeichnet, dass die transformierte Variable  $z$  einer Standardnormalverteilung folgt. Ein einfaches grafisches Prüfmaß ist dafür ein Normal-Quantil-Plot (QQ-Plot), bei dem die beobachteten Quantile der Residuen des Modells über der theoretischen Quantilen bei Normalverteilung aufgetragen werden (Abb. 1). Dabei entsprechen die Quantilresiduen der transformierten Variable  $z$  (vgl. DUNN und SMYTH 1996).

Als detaillierteres Prüfkriterium für die Modellgüte schlägt VAN BUUREN (2007) Quantil-Quantil-Plots (Wurmpplots) vor. Hierbei wird nicht wie bei den Normal-Quantil-Plots für jedes beobachtete Quantilresiduum das empirische Quantil auf der y-Achse aufgetragen, sondern es wird jeweils die Differenz zwischen empirischem und theoretischem Quantil über den theoretischen Quantilen bei Normalverteilung be-



**Abbildung 1:** Beispiel eines Normal-Quantil-Plots (links) und des entsprechenden Wurmpplots (rechts) für die Quantilresiduen

**Figure 1:** Example of a Normal-quantile plot (left) and corresponding worm plot (right) for quantile residuals

trachtet (vgl. FENSCHE 2008, S. 90 f.). Ein Wurmplot ist somit ein trendbereinigter QQ-Plot, da hier jeweils der senkrechte Abstand der Residuen im Normal-Quantil-Plot zur Winkelhalbierenden abgebildet wird (Abb. 1). Nach VAN BUUREN (2007) sind Wurmplots als Prüfkriterien in GAMLSS-Modellen geeigneter, weil herkömmliche QQ-Plots und statistische Tests auf Normalverteilung zu Fehlinterpretationen führen können (vgl. Abb. 4 in VAN BUUREN 2007). Im Beispiel in Abbildung 1 sind als Abweichungen von der Winkelhalbierenden im QQ-Plot bereits Mängel in der Modellgüte erkennbar. Die Detailanalyse mit Hilfe des Wurmplots offenbart durch den S-förmigen Verlauf der Differenzen, dass in diesem Fall die Enden der angepassten Verteilung zu leicht sind, d. h. die prognostizierten Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten extremer Werte werden zu gering geschätzt (VAN BUUREN 2007). Liegen Teile des „Wurms“ außerhalb des 95 %-Konfidenzintervalls für Normal-Quantile, so sollte das Modell verbessert werden.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Standort-Leistungs-Modell auf Basis des verallgemeinerten additiven Modells

Ziel der Modellierung ist es, die Standortleistungsfähigkeit für jeden beliebigen Forstort und verschiedene Baumarten in Abhängigkeit von Boden- und Klimavariablen aber ohne Kenntnis von Bestandesmerkmalen zu schätzen. Somit wird es möglich, die Standortleistungsfähigkeit unabhängig von der aktuell vorhandenen Baumart in die Zukunft zu projizieren. Die Modellbildung unter Verwendung des Bayesian Information Criterion (BIC) und von Plausibilitätsprüfungen führt für die Baumarten Buche, Eiche, Fichte und Kiefer zu einem einheitlichen Set an Variablen. Das Modell lässt sich wie folgt spezifizieren:

$$hg100_i = \alpha_1 + Nahr_i^T \beta + f_1(Temp_i) + f_2(KWB_i) + f_3(nFK_i) + f_4(Ndep_i) + f_5(RW_i, HW_i) + \epsilon_i \quad [3]$$

hg100<sub>i</sub> – Mittelhöhenbonität im Alter 100 an Stichprobenpunkt *i* [m]; Nahr<sub>i</sub><sup>T</sup> – Indikatorenvektor für klassifizierte Bodennährstoffe;  $\beta$  – zu Nähr gehörender Parametervektor, KWB<sub>i</sub> – klimatische Wasserbilanz in der Vegetationszeit (VZ) [mm], Temp<sub>i</sub> – Temperatursumme in der VZ [ $^{\circ}$ C], Ndep<sub>i</sub> – mittlere Stickstoffdeposition [eq/ha/a]; nFK<sub>i</sub> – nutzbare Feldkapazität auf 1,4 m Bodentiefe [mm]; RW<sub>i</sub>, HW<sub>i</sub> – Gauss-Krüger-Lagekoordinaten;  $\alpha_1$  – Regressionskoeffizient (Interzept); f<sub>1</sub>, f<sub>2</sub>, f<sub>3</sub>, f<sub>4</sub> – eindimensionale glättende Funktionen; f<sub>5</sub> – zweidimensionale glättende Funktion zur Beschreibung des räumlichen Trends

Bei der Baumart Douglasie führen die untereinander korrelierten Prädiktoren bei gleichzeitig deutlich geringerer Datengrundlage dazu, dass sich die Modelleffekte nicht voneinander trennen lassen. Insbesondere der Effekt der klimatischen Wasserbilanz zeigt bei simultaner Schätzung einen unplausiblen Verlauf, wonach zunehmende Trockenheit zu einer gesteigerten Standortleistungsfähigkeit führen würde. Für die Gewährleistung eines biologisch plausiblen Modellverhaltens werden deshalb die Modelleffekte der Variablen Temperatursumme (Temp) und klimatische Wasserbilanz (KWB) mittels einer Vorschätzung bestimmt. Anschließend gehen diese Modelleffekte als Konstanten in ein finales Modell ein, in dem lediglich noch die Effekte der übrigen Prädiktoren geschätzt werden. Darüber hinaus ist die Variable nutzbare Feldkapazität (nFK) im Douglasienmodell nicht signifikant. Für die Douglasie wird somit folgendes Modell definiert:

$$hg100_i = \alpha_1 + Nahr_i^T \hat{\beta} + \hat{f}_1(Temp_i) + \hat{f}_2(KWB_i) + \hat{f}_4(Ndep_i) + \hat{f}_5(RW_i, HW_i) + \epsilon_i \quad [3.1]$$

$\hat{f}_1 = \hat{f}_2$  mittels Vorschätzung bestimmte und konstant gesetzte Effekte; übrige Variablen wie für [3] spezifiziert

Die Kenngrößen der Modellgüte in Tabelle 4 weisen mittlere Bestimmtheitsmaße aus, der Standardfehler liegt je nach Baumart meist deutlich unter der Differenz einer Ertragsklasse und ein Bias ist nicht vorhanden.

**Tabelle 4: Kenngrößen der Modellgüte (se – Standardfehler)**

**Table 4: Characteristics of model quality (se – standard error)**

Baumart	R <sup>2</sup>	se [m]	Bias [m]
Fichte	0,44	3,1	-7,3e-14
Buche	0,31	3,4	1,6e-14
Kiefer	0,45	2,6	-4,0e-15
Eiche	0,33	3,1	-9,0e-17
Douglasie	0,40	5,0	8,7e-15

Die Modellkoeffizienten, die Kennwerte der glättenden Terme und die grafische Darstellung der nicht-linearen Effekte inklusive der punktweisen Prognoseintervalle (5 % Irrtumswahrscheinlichkeit) der fünf Modelle sind als Anhang zu dieser Publikation auf der Internetseite der NW-FVA abrufbar<sup>1</sup>.

Die linearen und nicht-linearen Effekte sind in allen Modellen hochsignifikant. Die Koeffizienten der kategorischen Variablen und linearen Terme sind bezüglich ihrer Wirkungsrichtung aus biologischer Sicht als plausibel zu beurteilen: je besser die Nährstoffversorgung und je höher die nutzbare Feldkapazität ist, desto besser ist die Mittelhöhenbonität.

#### 3.1.1 Anwendungsbereiche des Standort-Leistungs-Modells

Das Standort-Leistungs-Modell schätzt den Erwartungswert der Standortleistungsfähigkeit, definiert als Mittelwert der Höhenbonität, die eine Baumart hypothetisch nach 100 Jahren unter konstanten aktuellen oder zukünftigen Standortsbedingungen erreichen würde. Tatsächlich wird ein Bestand jedoch aufgrund u. a. sich verändernder Klimabedingungen ein variables Höhenwuchspotenzial über das Bestandesleben aufweisen. Ein Anwendungsbereich des Standort-Leis-

tungs-Modells ist somit eine Abschätzung des standortspezifischen Wuchspotenzials verschiedener Baumarten unter Klimawandel, z. B. eine zeitliche Analyse der Veränderung des Standort-Leistungs-Potenzials, eine Gegenüberstellung der projizierten Auswirkungen unterschiedlicher Klimaszenarien oder räumliche Analysen und Vergleiche von z. B. Standortsgruppen.

Zur Analyse der Standortleistungsfähigkeit unter Klimawandel werden Szenariosimulationen eingesetzt. Dabei gilt es, die Unsicherheiten zukünftiger Waldentwicklungen zu quantifizieren und abzuschätzen. Die Wahl des Klimaszenarios hat bei der Projektion der Standortleistungsfähigkeit einen entscheidenden Einfluss. An der NW-FVA werden derzeit die Klimabedingungen für drei 30-jährige Prognoseperioden von 2010 bis 2100, projiziert mit dem regionalen Klimamodell WETTREG (SPEKAT et al. 2006) unter dem Szenario A1B in der trockenen und in der feuchten Variante (IPCC 2007), verwendet. Die Betrachtung zweier Varianten spannt einen Bereich möglicher Klimapfade auf, der einen Teil der zukünftigen Unsicherheit abdeckt.

<sup>1</sup> [http://www.nw-fva.de/fileadmin/user\\_upload/Verwaltung/Publikationen/Zusatz/2012\\_Albert\\_Schmidt\\_Anhang.pdf](http://www.nw-fva.de/fileadmin/user_upload/Verwaltung/Publikationen/Zusatz/2012_Albert_Schmidt_Anhang.pdf)

Für die konkreten Szenariosimulationen mit dem Standort-Leistungs-Modell verändern sich laut unterstelltem Klimaszenario die Temperatursummen und klimatischen Wasserbilanzen der Standorte, während die übrigen erklärenden Modellvariablen als konstant angenommen werden. Der Boden wird zu Beginn der Vegetationszeit als wassergesättigt angesehen, die nutzbare Feldkapazität steht somit in vollem Umfang zur Verfügung. Die zukünftige Stickstoffdepositionsrate wird ebenfalls nicht dynamisch modelliert, sondern geht in Zukunftsszenarien mit dem Wert des Jahres 2004 ein. Dieser Überlegung liegt die Annahme zu Grunde, dass selbst bei abnehmenden Stickstoffeinträgen die Böden mittelfristig als stickstoffgesättigt angesehen werden können. Die Verfügbarkeit der Bodennährstoffe wird sich unter Klimawandel langfristig verändern (vgl. AHRENDS 2010). Im Modell wird diese aber vorerst als konstant angenommen.

Mit Hilfe der klimasensitiven Standort-Leistungs-Modelle kann die aktuelle und zukünftige Leistungsfähigkeit jedes beliebigen Standortes für die fünf Baumarten in Deutschland geschätzt werden (Abb. 2).

Die in Abbildung 2 dargestellten Simulationsergebnisse der Standortleistungsfähigkeit für die Baumart Buche im Zuständigkeitsbereich der NW-FVA verdeutlichen die zeitliche Dynamik, die räumlichen Unterschiede und durch Vergleich der beiden Varianten die klimabedingte Unsicherheit in der Projektion. Im Vergleich der drei Projektionsperioden werden unter dem Szenario A1B in beiden Varianten bis 2040 keine bis leicht positive Veränderungen der Standortleistungsfähigkeit erwartet. In der zweiten Periode sind besonders in der trockenen Variante bereits große Bereiche in der niedersächsischen Tiefebene, in Sachsen-Anhalt und Südhessen erkennbar, für die Verluste bis 7,5 % der Leistungsfähigkeit vermutet werden. Für die Hochlagen der Mittelgebirge werden andererseits Steigerungen des Wuchspotenzials von mehr als 7,5 % in beiden Varianten geschätzt. In der dritten Periode bis 2100 verstärken sich die projizierten Trends weiter. Dabei ist das negative Ausmaß der Veränderung in der trockenen Variante deutlich ausgeprägter als in der feuchten Variante, z. B. werden für die Rhein-Main-Ebene je nach Variante leichte (2,5 bis 7,5 %) bis deutliche (über 7,5 %) Einbrüche der Leistungsfähigkeit projiziert.

Die Häufigkeitsverteilungen der Standortleistungsveränderung für die drei Projektionsperioden in Abbildung 3 quantifizieren die Anteile der Einbußen und Steigerungen für die Baumart Kiefer. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass es sich um eine inventurpunktbasierter Auswertung handelt und die einzelnen Punkte dabei ganz unterschiedliche Flächenanteile repräsentieren. Die projizierte Entwicklung für die Kiefer folgt dem oben dargestellten Trend für die Buche. Der Anteil von Standorten, die große positive oder negative Veränderungen erfahren, nimmt mit der Zeit zu. Die trockene Variante des A1B-Szenarios führt zu einem größeren Anteil an Standorten mit Leistungseinbrüchen, während die feuchte Variante zu einem erheblichen Prozentsatz Leistungssteigerungen projiziert. Im Vergleich der Varianten kann hier das Maß der Unsicherheit in der Projektion quantifiziert werden: der Anteil von Inventurpunkten auf Standorten mit Leistungseinbußen umspannt einen Bereich von 5 % in der feuchten bis 19 % in der trockenen Szenariovariante für die Projektionsperiode 2071 bis 2100. Der Anteil ohne nennenswerte Veränderung schwankt zwischen 22 und 61 % und Leistungssteigerungen erfahren 20 % der Inventurpunkte in der trockenen und 73 % in der feuchten Variante.

In den beiden ersten Anwendungsbeispielen wurde kein Baumartenwechsel auf den beobachteten Standorten betrachtet. Das heißt für aktuell mit Buche bzw. Kiefer bestockte

Standorte wurde in der Projektion jeweils wieder dieselbe Baumart unterstellt. Unter veränderten Klimabedingungen wird es jedoch zu Arealflächenveränderungen der Baumarten kommen. Das folgende Anwendungsbeispiel analysiert, in welchem Umfang potenzielle Buchenstandorte zukünftig als ungeeignet für die Buchenwirtschaft angesehen werden müssen bzw. welche neuen Anbaustandorte diese Baumart hinzugewinnen könnte, wenn die Wuchsleistung als Auswahlkriterium verwendet wird. Ein potenziell für die Buchenwirtschaft geeigneter Standort wird dazu wie folgt definiert: es wird gefordert, dass mindestens die II. Ertragsklasse erreicht wird und zur Verminderung möglicher negativer Trockenheitseffekte darf das Wasserdefizit, berechnet als Summe aus KWB und nFK, am Standort höchstens 270 mm in der Vegetationszeit betragen. Legt man diese Definition zugrunde, so sind 86 % aller BWI-Punkte Deutschlands potenzielle Buchenstandorte (vgl. CZAJKOWSKI et al. 2006). Dieser inventurpunktbezogene Anteil nimmt unter dem Szenario A1B in der trockenen Variante auf 61 % bis 2070 und auf 43 % bis 2100 ab (Abb. 4).

Die als zukünftig ungeeignet eingestuften Standorte befinden sich in den bereits heute trocken-warmen Gebieten wie z. B. Teilen der norddeutschen Tiefebene, dem Rhein-Main-Gebiet, Teilen Frankens und dem Rheintal-Graben. Neue Anbaustandorte könnten für die Buchenwirtschaft aufgrund der projizierten Temperaturerhöhung in den Hochlagen der Mittelgebirge und Alpen erschlossen werden. Allerdings ist zu beachten, dass nicht alle limitierenden Einflussgrößen wie z. B. die Spätfrostgefahr und vernässte Standorte berücksichtigt werden und die Ergebnisse somit lokal überprüft werden müssen.

### 3.2 Modellierung des Höhenbonitätsquantils

Die Verteilung der Residuen der Standort-Leistungs-Modelle auf Basis des verallgemeinerten additiven Ansatzes (vgl. 3.1) sind symmetrisch und somit dürfen die Schätzungen des Mittelwertes als erwartungstreue angenommen werden. Für die Ableitung von Quantilen ist es aber wichtig, dass auch die bedingte Varianz der Residuen gut durch Verteilungsannahmen approximiert wird. Bei den Residuen des verallgemeinerten additiven Modells treten jedoch Abweichungen von der Normalverteilung auf, z. B. zeigt die bedingte Varianz der Residuen über den Prädiktoren Temp, KWB und Ndep im Douglasienmodell Heteroskedastizität (Goldfeld-Quandt-Test auf Heteroskedastizität mit  $H_0: \sigma_1 = \sigma_2 : p_{\text{temp}} = 6,392e-06; p_{\text{KWB}} = 3,054e-06; p_{\text{Ndep}} = 1,016e-05$ ). Daher ist eine Quantilsschätzung der Höhenbonität auf Grundlage der oben genannten Standort-Leistungs-Modelle nicht gestattet, sondern die bedingte Varianz muss explizit mit Hilfe von Quantilsregressionsmodellen beschrieben werden (vgl. STASINOPoulos und RIGBY 2007).

Bei Anbauempfehlungen für eine Baumart stellt sich die Frage, wie groß der Anteil von Beständen sein darf, die auf einer gegebenen Standortseinheit nicht die geforderte Mindestwuchsleistung erreichen. Für die hier folgenden Ausführungen wird definiert, dass eine hinreichend sichere Grundlage für die Baumartenwahl gegeben ist, wenn für mindestens 80 % aller Bestände einer Standortseinheit eine bestimmte Leistungsfähigkeit prognostiziert wird. Somit ist das bedingte 20 %-Quantil der Höhenbonität zu schätzen.

Die Auswahl der verwendeten Prädiktoren aus dem zur Verfügung stehenden Variablenvektor erfolgt, sofern die Effekte signifikant sind und eine Modellverbesserung anhand des Bayesian Information Criterion (BIC) festgestellt wird. Wie auch bei den verallgemeinerten additiven Modellen ist der Effekt der geografischen Lage hochsignifikant und erhöht die Gesamtgüte des Modells. Die Methodik der verwendeten Bibli-

thek gammLSS 3.0-1 von STASINOPoulos und RIGBY (2007) ist jedoch auf eindimensionale glättende Funktionen beschränkt. Zur Beschreibung räumlicher Abhängigkeiten bzw. eines räumlichen Trends werden zweidimensionale glättende Funktionen benötigt, wie sie in der Methodik von WOOD (2006) zur Verfügung stehen. Im Quantilsregressionsmodell gehen daher die Splinebasen der 2-dimensionalen glättenden Funktion aus dem verallgemeinerten additiven Modell zur Schätzung der Mittelhöhenbonität (vgl. Gl. 3) als neue Prädiktoren in Form von linearen Effekten ein.

Für die fünf Baumarten werden folgende Quantilsregressionsmodelle mit jeweils drei Schätzfunktionen für den Erwartungswert  $\mu$ , die Schiefe  $\lambda$  und den Variationskoeffizienten  $\sigma$  der Höhenbonitätsverteilung parametrisiert:

Buche:	$\mu_i = \alpha_1 + \text{Nähr}_i^T \beta_1 + f_1(\text{WH}_i) + f_2(\text{Temp}_i) + f_3(\text{Ndep}_i) + \alpha_2 \cdot LP_{1_i} + \dots + \alpha_{k+3} \cdot LP_{k_i}$	[4.1]
	$\log(\sigma_i) = \alpha_1 + \text{Nähr}_i^T \beta_1 + f_1(\text{WH}_i) + f_2(\text{Ndep}_i)$	[4.2]
	$\lambda_i = \alpha_1 + f_1(\text{WH}_i) + \alpha_2 \cdot \text{Ndep}_i$	[4.3]
Eiche:	$\mu_i = \alpha_1 + \text{Nähr}_i^T \beta_1 + f_1(\text{WH}_i) + f_2(\text{Temp}_i) + f_3(\text{Ndep}_i) + \alpha_2 \cdot LP_{1_i} + \dots + \alpha_{k+3} \cdot LP_{k_i}$	[5.1]
	$\log(\sigma_i) = \alpha_1 + \text{Nähr}_i^T \beta_1 + f_1(\text{WH}_i) + f_2(\text{Ndep}_i)$	[5.2]
	$\lambda_i = \alpha_1 + \text{Nähr}_i^T \beta_1 + \beta_1$	[5.3]
Fichte:	$\mu_i = \alpha_1 + \text{Nähr}_i^T \beta_1 + f_1(\text{WH}_i) + f_2(\text{Temp}_i) + f_3(\text{Ndep}_i) + \alpha_2 \cdot LP_{1_i} + \dots + \alpha_{k+3} \cdot LP_{k_i}$	[6.1]
	$\log(\sigma_i) = \alpha_1 + \text{Nähr}_i^T \beta_1 + \alpha_2 \cdot \text{Ndep}_i + \alpha_3 \cdot LP_{1_i} + \dots + \alpha_{k+3} \cdot LP_{k_i}$	[6.2]
	$\lambda_i = \alpha_1 + \text{Nähr}_i^T \beta_1 + \alpha_2 \cdot \text{Temp}_i + f_1(\text{Ndep}_i)$	[6.3]
Kiefer:	$\mu_i = \alpha_1 + \text{Nähr}_i^T \beta_1 + f_1(\text{WH}_i) + \alpha_2 \cdot \text{Temp}_i + f_2(\text{Ndep}_i) + \alpha_3 \cdot LP_{1_i} + \dots + \alpha_{k+3} \cdot LP_{k_i}$	[7.1]
	$\log(\sigma_i) = \alpha_1 + \text{Nähr}_i^T \beta_1 + \alpha_2 \cdot \text{WH}_i + f_1(\text{Temp}_i) + f_2(\text{Ndep}_i)$	[7.2]
	$\lambda_i = \alpha_1 + \text{Nähr}_i^T \beta_1 + f_1(\text{Ndep}_i)$	[7.3]
Douglasie:	$\mu_i = \alpha_1 + f_1(\text{WH}_i) + \alpha_2 \cdot \text{Temp}_i + f_2(\text{Ndep}_i) + \alpha_3 \cdot LP_{1_i} + \dots + \alpha_{k+3} \cdot LP_{k_i}$	[8.1]
	$\log(\sigma_i) = \alpha_1 + f_1(\text{Ndep}_i)$	[8.2]
	$\lambda_i = \alpha_1 + f_1(\text{Ndep}_i)$	[8.3]

Nähr – Indikatorvektor für Nährstoffziffer; WH – Wasserhaushalt als Summe der klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationszeit (VZ) und nutzbarer Feldkapazität [mm]; Temp – Temperatursumme in VZ [°C]; Ndep – mittlere jährliche Stickstoffdeposition [eq/a-ha]; LP<sub>1</sub> ... LP<sub>k</sub> – Splinebasen der 2-dimensionalen glättenden Funktion aus einem Mittelwertregressionsmodell;  $\beta_1$  – Parametervektor zu Nährstoffziffern;  $\alpha_1$  ...  $\alpha_k$  – Regressionskoeffizienten;  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  – 1-dimensionale glättende Splines; k – Basisdimension des zweidimensionalen Splines im Mittelwertregressionsmodell

Die Modellkoeffizienten und Kennwerte der glättenden Terme der fünf LMS-Modelle sowie die bedingten trendbereinigten Quantil-Quantil-Plots (Wurmpplots) für die Anpassungsgüte der Modelle sind als Anhang zu dieser Publikation auf der Internetseite der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt abrufbar (siehe Fußnote 1).

Die Beurteilung der Modellgüte anhand von Wurmpplots wird am Beispiel des Quantilsregressionsmodells der Buche demonstriert (Abb. 5).

Die horizontale Nulllinie der Wurmpplots markiert den Verlauf bei Standardnormalverteilung. Abweichungen von der Nulllinie können unterschiedliche Ursachen haben, so deuten die in Abbildung 5 zum Teil auftretenden S-Kurven darauf hin, dass die Randbereiche der Verteilung nicht adäquat beschrieben werden. Bei U-förmigen bzw. invers-U-förmigen Verlauf ist die angepasste Verteilung zu links- bzw. rechtsschief. Insgesamt kann das Quantilsregressionsmodell für die Buche anhand der Wurmpplots als geeignet beurteilt werden, da das 95 %-Konfidenzintervall nur selten und dann auch nur geringfügig überschritten wird (vgl. auch VAN BUUREN 2007, Abb. 5 und Abb. 6). Die Modellgüte der anderen Baumarten ist auf Basis der Wurmpplot-Analyse ebenfalls als hinreichend zu bezeichnen.

Als problematisch erweist sich die Modellanwendung bei Projektionen im extremen Extrapolationsbereich der Datengrund-

lage. Besonders im Wertebereich starker Trockenheit wird der wuchsleistungsmindernde Effekt durch den positiven Beitrag einer Temperaturerhöhung überkompenziert und folglich resultieren unplausible Schätzwerte der Standortleistungsfähigkeit. In den unter 3.2.1 vorgestellten Ökogrammen wird diese Modelllimitation durch die zusätzliche Betrachtung des Risikos bei unzureichender Wasserversorgung entschärft.

### 3.2.1 Aufbau von mehrdimensionalen Ökogrammen

Die Baumartenwahl wird durch ökologische Kriterien und ökonomische Erwartungen beeinflusst. Der ökonomische Erfolg ist dabei u. a. von der Wuchsleistung und potenziellen abiotischen und biotischen Risiken, die zu Produktivitätsverlusten oder Mehraufwendungen führen können, bestimmt. Der

ertragskundlicher Beitrag zur Entscheidungsfindung bei der Baumartenwahl unter Klimawandel kann durch das mit dem Standort-Leistungs-Modell geschätzte 20 %-Quantil der Mittelhöhenbonität im Alter 100 als Ausdruck der Wuchsleistung berücksichtigt werden (vgl. Gl. 4.1 bis 8.3). Die Risiken sollen vorerst am Beispiel unzureichender Wasserversorgung Eingang in die Bewertung der Anbauwürdigkeit finden. Die Beurteilung der Anbauwürdigkeit erfolgt somit über die beiden Kriterien Standortleistungsfähigkeit und Wasserdefizit (Abb. 6).

Bei der Klassifikation der Anbauwürdigkeit bestimmt das Kriterium mit der schlechteren Ausprägung die zugewiesene Kategorie. Das Risiko durch Wasserdefizit bezieht sich auf Wachstumsbedingungen, bei denen die Einzelbaumvitalität und die Produktivität der Bestände durch Absterben von Bäumen massiv beeinträchtigt werden könnten. Die Risikoklassen beschreiben somit gutachterlich die Wahrscheinlichkeit und das Ausmaß eines Schadens durch unzureichende Wasserversorgung. Im Anhalt an das Vorgehen von SPELLMANN et al. (2007) werden Wasserdefizitbedingungen in vorläufige auf Expertenwissen basierende baumartspezifische Risikoklassen eingeteilt (Tab. 5). Als Kriterium wird hierzu das pflanzenverfügbare Wasser, definiert als Summe aus nFK und KWB in der Vegetationszeit, herangezogen.

Die fünf definierten Anbauwürdigkeitsklassen werden als lage-spezifische, d. h. für einen geografischen Standort gültige, mehr-

**Tabelle 5:** Definition des baumartspezifischen Wasserdefizit-Risikos anhand der Summe aus nutzbarer Feldkapazität ( $nFK$ ) und klimatischer Wasserbilanz ( $KWB$ ) in der Vegetationszeit (VZ)**Table 5:** Definition of species-specific risk of water-deficit based on the sum of available soil moisture ( $nFK$ ) and climatic water balance ( $KWB$ ) in growing season (VZ)

	nFK + KWB in VZ [mm]			
Wasserdefizit-Risiko	Fichte	Buche	Eiche/Kiefer	Douglasie
hoch	< -350	< -400	< -500	< -550
erhöht	-233 bis -350	-267 bis -400	-333 bis -500	-367 bis -550
mittel	-116 bis -233	-134 bis -267	-166 bis -333	-184 bis -367
gering	0 bis -116	0 bis -134	0 bis -166	0 bis -184
sehr gering	> 0	> 0	> 0	> 0

dimensionale Ökogramme visualisiert. Die beiden Achsen der Ökogramme sind mit den unter Klimawandel dynamischen Variablen Temperatursumme und pflanzenverfügbares Wasser belegt. Die zeitliche Entwicklung der Anbauwürdigkeit unter bestimmten Klimaszenarien kann somit dargestellt werden. Die übrigen im Modell verwendeten, zeitunabhängigen Standortsvariablen beeinflussen das Schätzergebnis mit dem jeweils für den geografischen Standort spezifischen konstanten Effekten. Prinzipiell erhält jeder lagespezifische Forstort mit den ihm eigenen Standortsmerkmalen für jede Baumart ein spezifisches Ökogramm. Der Aufbau des Ökogrammes erfolgt in vier Schritten:

(1) Ermittlung der geografischen Lage des Forstortes (z. B. Abteilung, Unterabteilung o. ä.), für den das Ökogramm gelten soll und Zuordnung der Standortparameter;

(2) Aufspannen eines Temperatursummen- und pflanzenverfügbaren Wasserwertebereiches;

(3) Schätzung des 20-%-Quantils der Mittelhöhenbonität ( $hg100_{20\%}$ ) für den aufgespannten Wertebereich unter Berücksichtigung aller Standortparameter (Gl. 4.1 bis 8.3) und Klassifizierung in die fünf Anbauwürdigkeitsklassen (Abb. 6) sowie

(4) Projektion der Standortsvariablen Temperatursumme und  $KWB$  unter unterstellten Klimaszenarien und Visualisierung des resultierenden „Entwicklungsfaßes“ im Ökogramm.

### 3.2.2 Beispiele

Die für die Baumarten Buche, Eiche, Fichte, Kiefer und Douglasie und das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland parametrisierten Quantilsregressionsmodelle ermöglichen die Schätzung der mehrdimensionalen Ökogramme für jeden beliebigen Forstort mit seinen spezifischen Standortsmerkmalen. Der ertragskundliche Beitrag bei der Baumartenwahl soll anhand von Ökogrammen für drei Beispielstandorte erläutert werden. Neben der zeitlichen Veränderung der Standortsbedingungen durch den projizierten Klimawandel werden auch räumliche Unterschiede mit Hilfe eines Niederschlagsgradienten entlang der drei Forstorte im norddeutschen Tiefland dargestellt (Abb. 7).

Die Einstufung der Bodennährstoffe ist für die drei ausgewählten Forstorte FO1, FO2 und FO3 gleich. Unterschiede gibt es hinsichtlich der mittleren Temperatur in der Vegetationszeit und des Wasserdefizits ( $KWB+nFK$ ), die von West nach Ost zunehmen (vgl. Abb. 7).

Der schleswig-holsteinische Forstort FO1 ist mit einer klimatischen Wasserbilanz von -263 mm in der Vegetationszeit derjenige mit dem geringsten Wasserdefizit (Abb. 7). Das gegenwärtig sehr geringe Wasserdefizit ( $nFK + KWB = -48 \text{ mm}$ ) lässt folglich neben den beiden Laubbaumarten Buche und Eiche

die ertragreiche Fichte als potenziell geeignet erscheinen. Die mehrdimensionalen Ökogramme in Abbildung 8 beschreiben die prognostizierten Ertragsentwicklungen und das Risiko aufgrund des Wasserdefizits für diese drei Baumarten unter dem Klimaszenario A1B in der trockenen und in der feuchten Variante für die drei Zukunftsperioden 2011 bis 2040, 2041 bis 2070 und 2071 bis 2100. Die Projektion der Standortleistungsfähigkeit für die Baumart Buche zeigt unter dem zu Grunde gelegten Klimaszenario A1B eine Verbesserung von der II.5 zur II. Ertragsklasse ab der Periode 2011 bis 2040. Das Wasserdefizit-Risiko verbleibt in der feuchten Szenariovariante auch zukünftig in der Klasse „gering“, während es in der trockenen Variante ab 2041 auf „mittel“ steigt. Die Standortleistungsfähigkeit für die Baumart Eiche verändert sich nur geringfügig und es wird nur für die trockenen Variante in der letzten Periode ein Veränderung des Wasserdefizit-Risikos von „gering“ auf „mittel“ projiziert. Die Anbauempfehlung für die Fichte wird dominiert durch das steigende Wasserdefizit-Risiko von aktuell „gering“ in die Klasse „mittel“, für die trockene Variante ab 2071 sogar „erhöht“. Für diesen Forstort empfiehlt sich aus ertragskundlicher Sicht unter Berücksichtigung des Wasserdefizit-Risikos ein Eichenanbau, auch die Buche ist trotz des langfristig mittleren Wasserdefizit-Risikos eine Anbaualternative. Von der Fichte als Hauptbaumart ist hier langfristig eher abzuraten, je nach Risikopräferenz ist sie als Mischbaumart aufgrund ihrer Wuchsleistung attraktiv.

Der niedersächsische Forstort FO2 weist gegenüber FO1 ein höheres Wasserdefizit in der Vegetationszeit auf (-99 mm), so dass die Baumart Fichte bereits mittelfristig als Hauptbaumart hier nicht mehr in Betracht kommt, da ab 2041 nur für die feuchte Variante die mittlere Risikoklasse und ansonsten ein „erhöhtes Wasserdefizit“ projiziert wird (Abb. 9). Die Anbauwürdigkeit der Baumart Buche ist aufgrund der sich unter Klimawandel an diesem Standort leicht auf die II. Ertragsklasse steigernden Wuchsleistung und des sich verschärfenden Wasserdefizits in die mittlere Risikoklasse als „mittel“ einzuschätzen. Das Wasserdefizit-Risiko für Eiche und Kiefer wird auch zukünftig als gering bis mittel projiziert. Die Baumarten Eiche und Kiefer sind auch bezüglich ihrer relativen Bonität auf diesem Standort für einen Anbau zu empfehlen, während ein Buchenanbau im Reinbestand langfristig als risikoreich erscheint.

Aufgrund des noch ausgeprägteren Wasserdefizites (-110 mm) gegenüber dem niedersächsischen Forstort FO2 und der bereits aktuell schwachen Leistungsfähigkeit schneidet die Baumart Buche in der Bewertung der Anbauwürdigkeit für den brandenburgischen Forstort FO3 noch schlechter ab (Abb. 10). Auch für die Baumarten Eiche und Kiefer wird ab 2041 ein mittleres Wasserdefizit-Risiko projiziert. An diesem Forstort empfiehlt sich die Buche allenfalls als Mischbaumart, Eiche und Kiefer sind trotz steigendem Wasserdefizits aus ertragskundlicher Sicht anbauwürdig.

## 4 Diskussion

### Gesamtkonzept zur Entwicklung von waldbaulichen Anpassungsstrategien

Die umfassende Beschreibung des gesamten Leistungsspektrums einer Standortseinheit mit Hilfe der klimasensitiven Standort-Leistungs-Modelle zur Schätzung des Erwartungswertes und Quantilen der Mittelhöhenbonität bildet den waldbauwissenschaftlichen Schwerpunkt in der Klimafolgenforschung der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt. Die bisherigen Simulationsergebnisse weisen darauf hin, dass sich in den nächsten Jahrzehnten die Leistungsfähigkeit der Standorte durch einen weiteren Temperaturanstieg und der damit einhergehenden Verlängerung der Vegetationszeit sowie durch weiter abnehmende Sommerniederschläge graduell verändern wird. Je nach geografischer Lage können dies negative aber auch, insbesondere in den Hochlagen der Mittelgebirge, positive Effekte für das Wuchsspotenzial sein. Dramatischere Auswirkungen auf den Gesundheitszustand der Wälder und die Ertragslage der Forstwirtschaft werden durch sich unter Klimawandel verstärkende und neu hinzukommende abiotische und biotische Risiken erwartet.

Zahlreiche biometrische Risikomodelle werden daher an der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt entwickelt, um die Eintrittswahrscheinlichkeit und das Schadensausmaß einzelner Risikofaktoren abschätzen zu können. Die Modellpalette umfasst bisher ein Sturmschadensmodell (SCHMIDT et al. 2010), zwei Ansätze zur Risikobeurteilung durch Borkenkäfer (HABERMANN et al. 2010, OVERBECK und SCHMIDT 2011) und ein Modell zur Schätzung der Maikäferengelingsdichte (SCHMIDT 2011). Weitere Risikomodelle zu Trockenstress, Waldbrandgefahr und Kiefern großschädlingen sind in der Entwicklung.

Die Standort-Leistungs- und die Risikomodelle sind Bestandteile des Gesamtkonzeptes der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt zur Entwicklung waldbaulicher Anpassungsstrategien für veränderte Klimaverhältnisse (vgl. SPELLMANN et al. 2011). Das erste Ziel hierbei ist es, die Entwicklung der aktuellen Bestockung zu projizieren, um Anpassungsmaßnahmen zur Stabilisierung der vorhandenen Wälder im mittelfristigen Zeitraum vornehmen zu können. Neben Vulnerabilitätsstudien zur Senkung und Verteilung von Risiken werden hier die Standort-Leistungs-Modelle auf Basis der verallgemeinerten additiven Modelle eingesetzt, um beispielsweise Verjüngungs-, Pflege- und Nutzungskonzepte auf ihre Eignung zu prüfen, Holzaufkommensprognosen zu rechnen und die Möglichkeiten der Kohlenstoffsequestrierung im Bestand einzuschätzen. Das zweite Ziel ist die Bereitstellung von Instrumenten zur Entscheidungsunterstützung für einen standortgemäßen, und das heißt auch klimaangepassten, Waldumbau. Hierfür ist die Beurteilung der Anbauwürdigkeit von Baumarten unter Klimawandel aus ertragskundlicher Sicht entscheidend, was mit Hilfe der Standort-Leistungs-Modelle auf Quantilsregressionsbasis und den darauf aufbauenden mehrdimensionalen Ökogrammen geschieht.

Die große Unsicherheit der Klimaprojektionen, allein schon durch die Wahl des Szenarios, beeinflusst die Simulationsergebnisse stark. Besonders gravierend wirkt sich diese Unsicherheit bei Entscheidungen zur Baumartenwahl aufgrund der langfristigen Bindung aus. Die mehrdimensionalen Ökogramme greifen diese Problematik auf, indem z. B. durch die Projektion mehrerer Szenariovarianten ein Korridor möglicher Entwicklungen aufgespannt wird. Dies verdeutlicht die Unsicherheit und ermöglicht der Waldbauplanung Anpassungsmaßnahmen im Sinne einer „best case“ und einer „worst case“ Analyse zu ergreifen. Aufgrund dieser Unsicherheit bezüglich

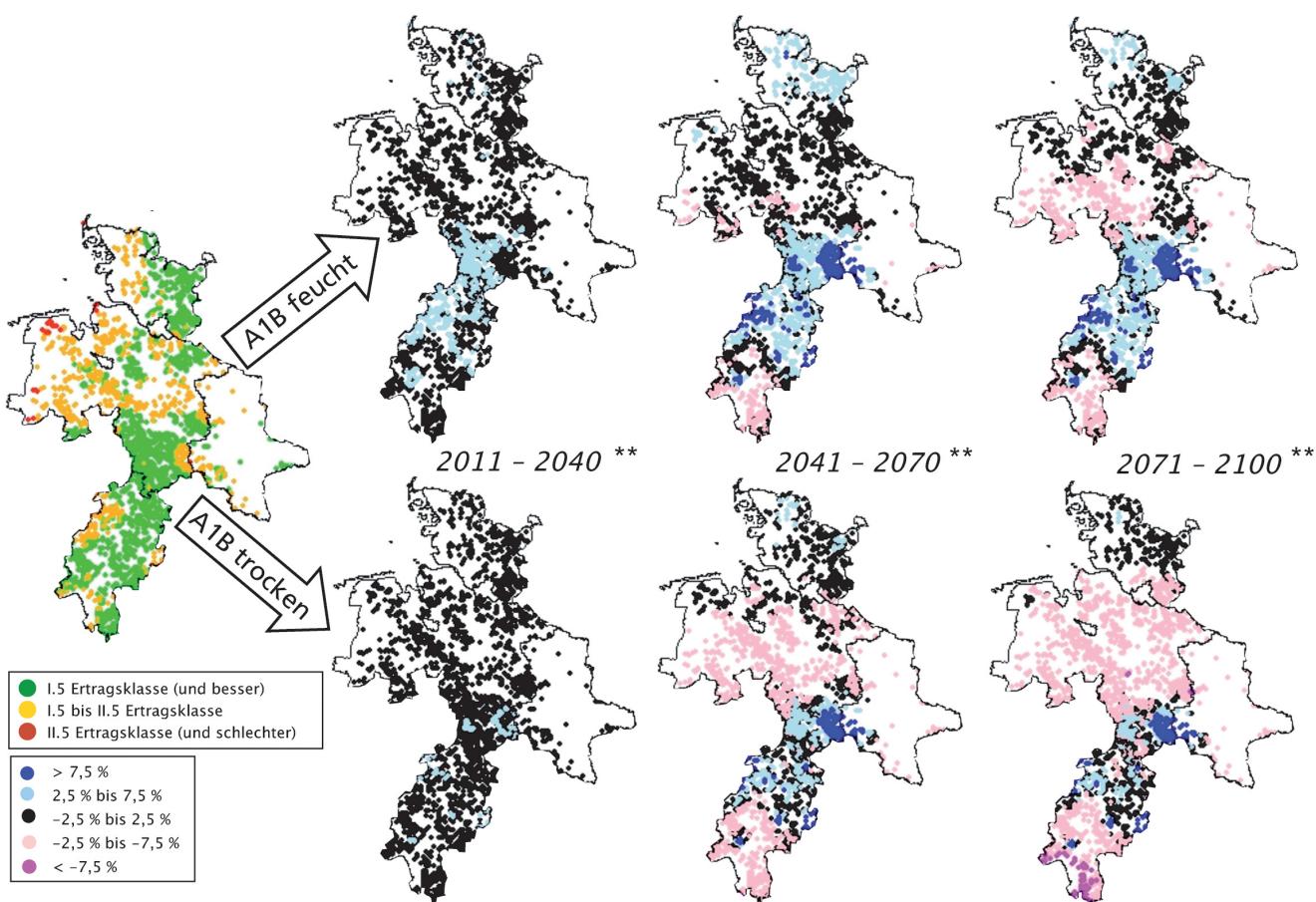
zukünftiger Standortsverhältnisse folgert VON LÜPKE (2009), dass für die Baumartenwahl insbesondere das Resilienzpotenzial der Wälder gestärkt werden muss. Eine Vermeidung des Anbaus von Baumarten an den Grenzen ihrer fundamentalen Nischen, eine geeignete kleinflächige, altersgestufte Baumartenmischung und die Senkung der Produktionszeit können laut VON LÜPKE zukünftigen Risiken entgegenwirken. 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. BOLTE et al. (2011) verdichten die Anpassungsmaßnahmen zu drei Strategien, nämlich aktive Unterstützung z. B. durch Waldumbau, passive Begleitung z. B. durch Dul dung von Sukzession und aktive Erhaltung z. B. durch angepasste Pflege- und Nutzungskonzepte.

### Modelllimitationen und zukünftige Arbeitsschritte

Die beiden Modellansätze zur Beschreibung des Standort-Leistungs-Bezuges ermöglichen waldbauwissenschaftlich fundierte Aussagen über die Entwicklung der mittleren Standortleistungsfähigkeit und zu Quantilen der Höhenbonitätsverteilung im Bereich des Parametrisierungsdatensatzes. Weil für die Modellerstellung Beobachtungen aus ganz Deutschland verwendet wurden, befinden sich die zukünftigen klimatischen Verhältnisse im Zuständigkeitsbereich der NW-FVA meist noch nicht im Extrapolationsbereich, so dass Projektionen dort problemlos möglich sind. Dennoch sind das Mittelwert- und das Quantilsregressionsmodell anfällig für unplausible Schätzergebnisse im extremen Extrapolationsbereich. Besonders der Effekt bei sich vergrößerndem Wasserdefizit erscheint nicht hinreichend mit Daten belegt, was die extrem weiten Konfidenzintervalle in dem Bereich andeuten (vgl. Grafiken im Anhang zu dieser Publikation auf der Internetseite der NW-FVA, siehe Fußnote 1).

Im Rahmen einer Weiterentwicklung der Standort-Leistungs-Modelle wird von folgenden Änderungen eine Modellverbesserung erhofft:

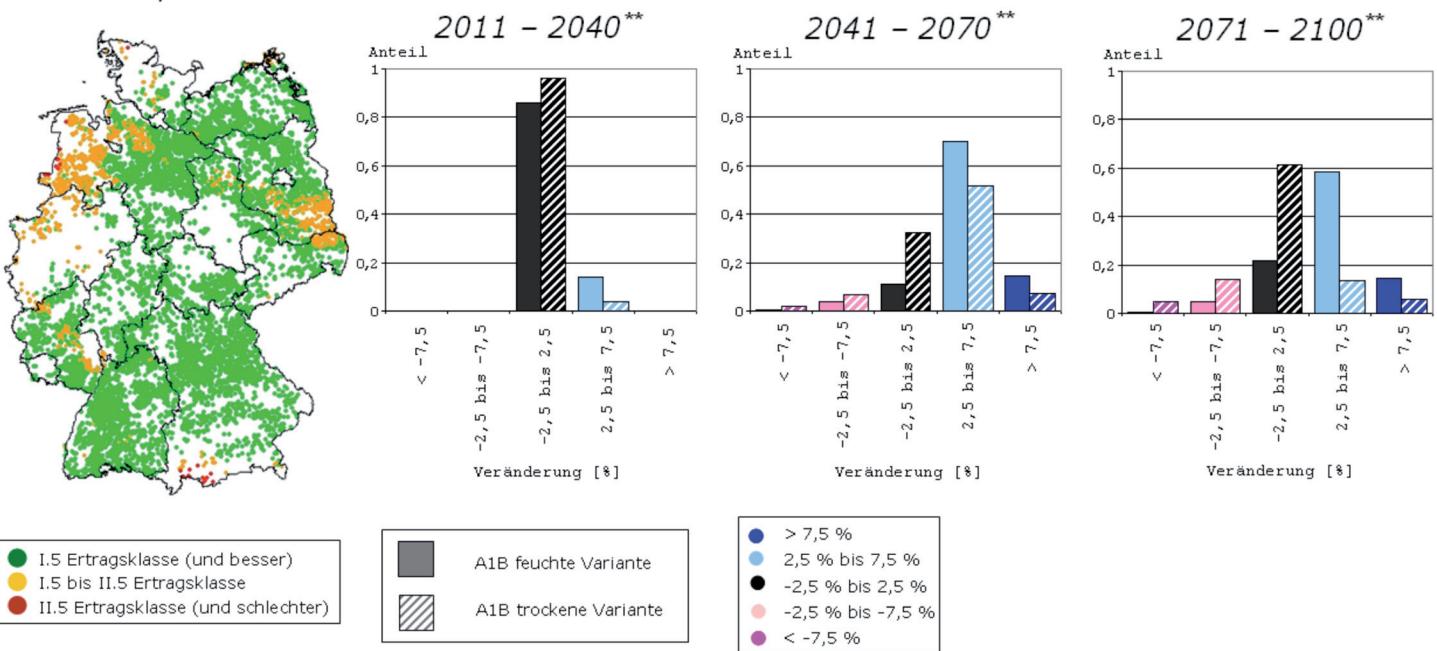
1. Erweiterung des Parametrisierungsdatensatzes insbesondere um bereits heute trockene Standorte.
2. Verwendung der Messdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für die Temperatursumme und die klimatische Wasserbilanz anstelle der mit WETTREG für die Klimanormalperiode 1961 bis 1990 projizierten Klimadaten. Für die hier dargestellten Untersuchungen waren die DWD-Messdaten noch nicht verfügbar.
3. Flexible Bilanzierung der DWD-Messdaten bezogen auf das Bestandesleben anstelle des fixen Bilanzierungszeitraumes der Klimanormalperiode. Eine derartige flexible Bilanzierung war bei der bisherigen Modellbildung auf Grund der erforderlichen Periodenlänge von 30 Jahren für Klimaprojektionen, wie eben die herangezogene Klimanormalperiode von 1961 bis 1990, nicht möglich.
4. Die Wald-BÜK als Grundlage zur Bestimmung der Bodenparameter eines Standortes ist zwar die einzige flächendeckend für Deutschland vorliegende Quelle, in ihrer räumlichen Auflösung ist sie jedoch für Modellierungszwecke zu ungenau. Zukünftig wäre eine Herleitung der nFK auf der Grundlage statistischer Regionalisierungsmodelle wünschenswert (OVERBECK et al. 2011).
5. Neben der wuchsleistungssteigernden Wirkung der Stickstoffdeposition erscheint die Aufnahme der wachstumsmindernden Schwefeldeposition als erklärende Variable sinnvoll (BUILTJES et al. 2011, SAVVA und BERNINGER 2010, NELLEMANN und THOMSEN 2000).



**Abbildung 2:** Projektion der Standort-Leistungsfähigkeit für die Baumart Buche unter dem mit WETTREG gerechneten Klimaszenario A1B in der feuchten (oben) und trockene (unten) Variante für drei Perioden (\* basierend auf der A1B-trockenen Variante für die Periode 1981 bis 2010; \*\* Veränderung gegenüber jeweils der feuchten bzw. trockenen Variante der Periode 1981 bis 2010). Simulationsgrundlage sind alle aktuell im Zuständigkeitsbereich der NW-FVA mit Buchen bestockten BWI- und niedersächsischen BI-Punkte.

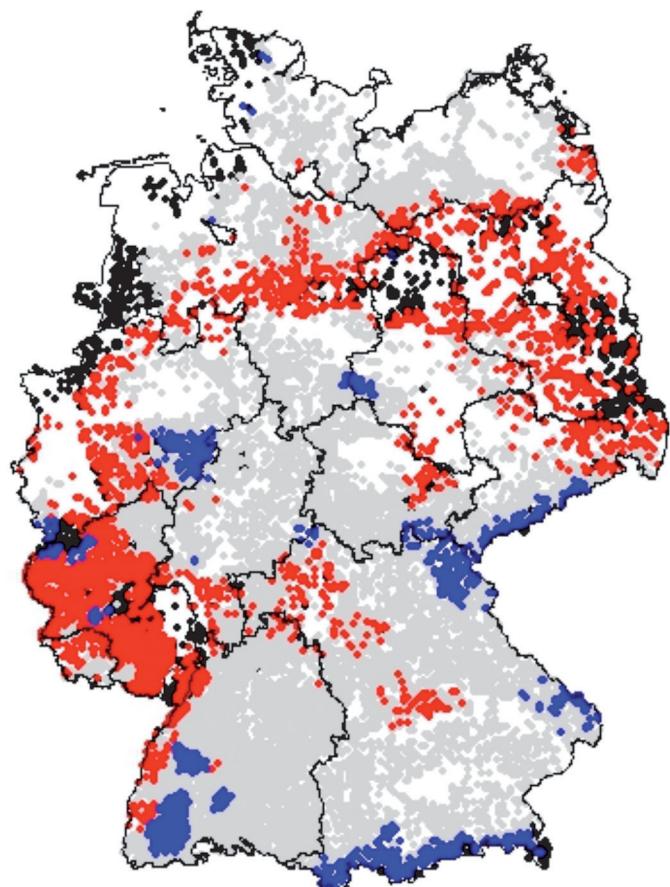
**Figure 2:** Projection of site productivity for beech under the climate scenario A1B in the wet (top) and dry (bottom) variante for three periods (\* based on the A1B dry variante in the period 1981 to 2010; \*\* changes based on the wet and dry, respectively, variante in the period 1981 to 2010). Climate parameters are modelled using WETTREG. Projection is made within the area of responsibility of the Northwest German Forest Research Institute for all inventory points of the National Forest Inventory and the Forest Enterprise Inventory of Lower Saxony which are currently stocked with beech.

### Status quo\*



**Abbildung 3:** Projektion der Standort-Leistungsfähigkeit für die Baumart Kiefer unter dem mit WETTREG gerechneten Klimaszenario A1B in der feuchten und trockene Variante für drei Perioden (\* basierend auf der A1B-trockenen Variante für die Periode 1981 bis 2010; \*\* Veränderung gegenüber jeweils der feuchten bzw. trockenen Variante der Periode 1981 bis 2010). Simulationsgrundlage sind alle aktuell mit Kiefer bestockten BWI- und niedersächsischen BI-Punkte.

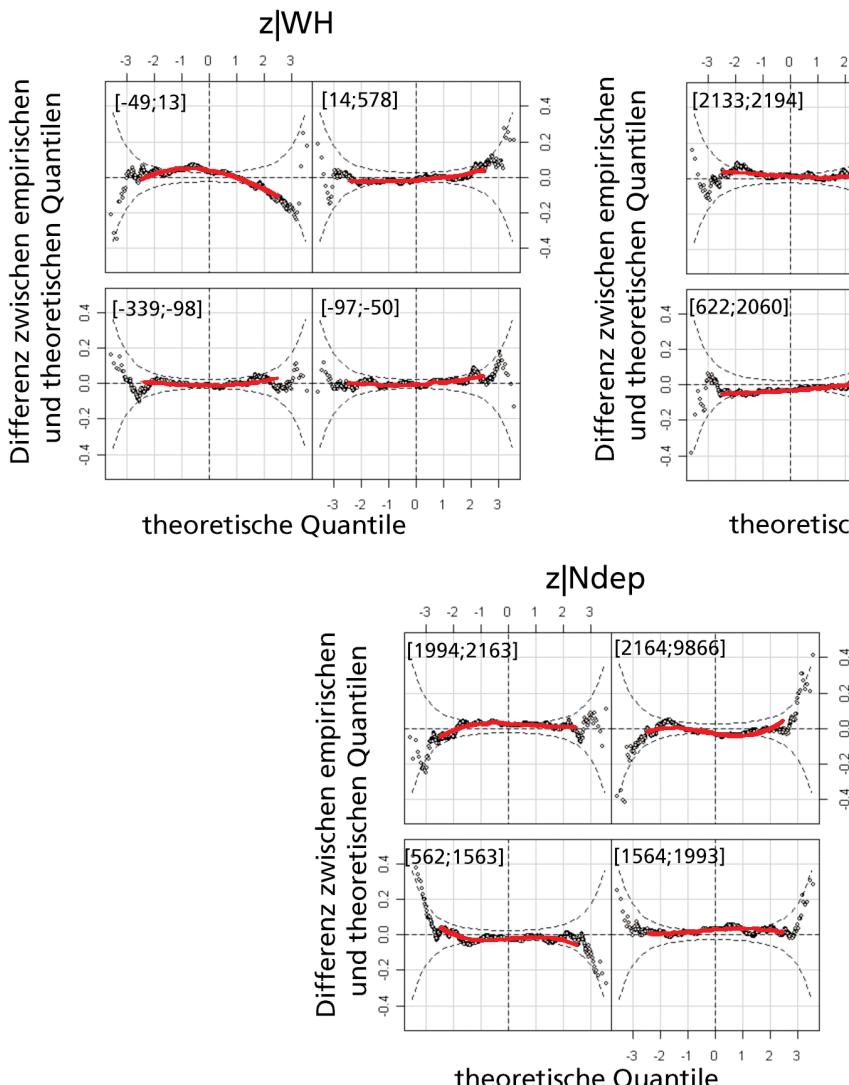
**Figure 3:** Projection of site productivity for pine under the climate scenario A1B in the wet (top) and dry (bottom) variante for three periods (\* based on the A1B dry variante in the period 1981 to 2010; \*\* changes based on the wet and dry, respectively, variante in the period 1981 to 2010). Climate parameters are modelled using WETTREG. Projection is made nationwide for all inventory points of the National Forest Inventory and the Forest Enterprise Inventory of Lower Saxony which are currently stocked with pine.



**Abbildung 4:** Veränderungen im Buchenanbau vom Status quo zur Periode 2071 bis 2100 unter dem mit WETTREG gerechneten Klimaszenario A1B in der trockenen Variante bezogen auf sämtliche BWI-Punkte in Deutschland, wobei die Wuchsleistung als Auswahlkriterium der Anbaueignung verwendet wird

**Figure 4:** Changes in beech cultivation between status quo and the period 2071 to 2100 projected under climate scenario A1B in the dry variante. Climate parameters are modelled using WETTREG. Projection is made nationwide for all inventory points of the National Forest Inventory

- für Buchenanbau ungeeignet
- potenzielle Buchenstandorte
- zukünftig wegfallende Standorte
- zukünftig hinzukommende Standorte



**Abbildung 5:** Serien von bedingten Wurmplots der transformierten Response-Variablen  $z$  (Quantilresiduen) für die Prädiktoren Wasserhaushalt (WH) in der Vegetationszeit (VZ) (oben links), Temperatursumme (Temp) in der VZ (oben rechts) und Stickstoffdepositionsraten (Ndep) (unten) für das Quantilsregressionsmodell der Baumart Buche. Der Wertebereich der Prädiktoren ist dabei in jeweils vier Klassen gleicher Besetzung aufgeteilt (Klassengrenzen in den Diagrammen angegeben).

**Figure 5:** Series of worm plots of the transformed response variable  $z$  (quantile residuals) conditional on the predictor variables water balance (WH) in the growing season (GS) (top left), temperature sum (Temp) in GS (top right) and nitrogen deposition rate (Ndep) (bottom). Worm plots correspond to the quantile regression model of beech. The range of observed values is subdivided into four classes of equal frequency (thresholds are given in the diagrams).

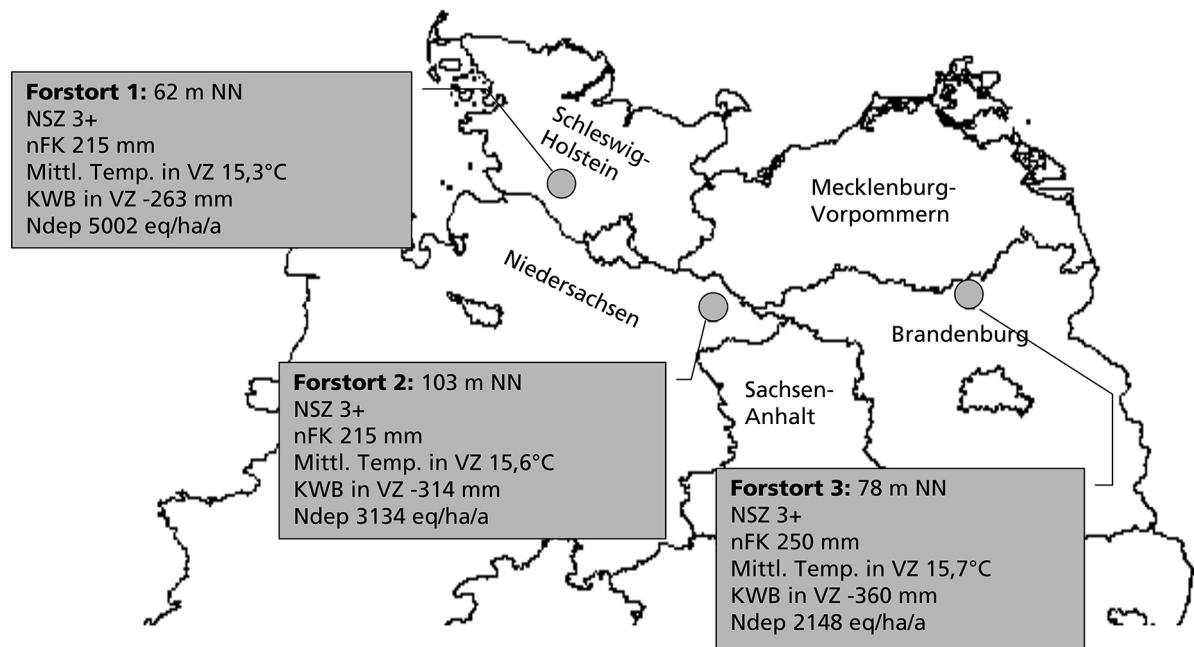


**Abbildung 6:** Definition der Anbauwürdigkeitsklassen (Kategorie) in Abhängigkeit der beiden Kriterien Standort-leistungsfähigkeit und Wasserdefizit-Risiko

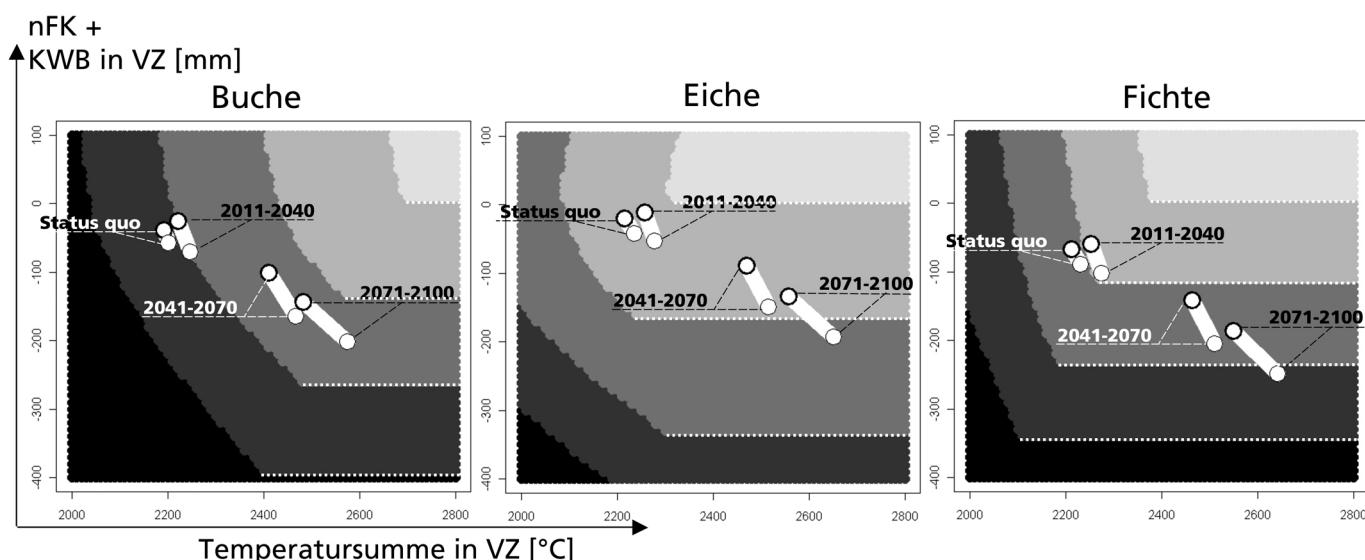
Figure 6: Classes of suitability for cultivation (category) depending on the two criteria site-productivity and water-deficit

**Abbildung 7:** Lage und charakteristische aktuelle Standortsmerkmale von drei Forstorten in Schleswig-Holstein (FO1), Niedersachsen (FO2) und Brandenburg (FO3), für die Ökogramme erstellt werden.

NSZ – niedersächsische Nährstoffziffer; nFK – nutzbare Feldkapazität auf 1,4 m Bodentiefe; KWB – klimatische Wasserbilanz; VZ – Vegetationszeit für Buche; Ndep – Stickstoffdepositionsrate im Jahr 2004 (für Projektion fixiert)

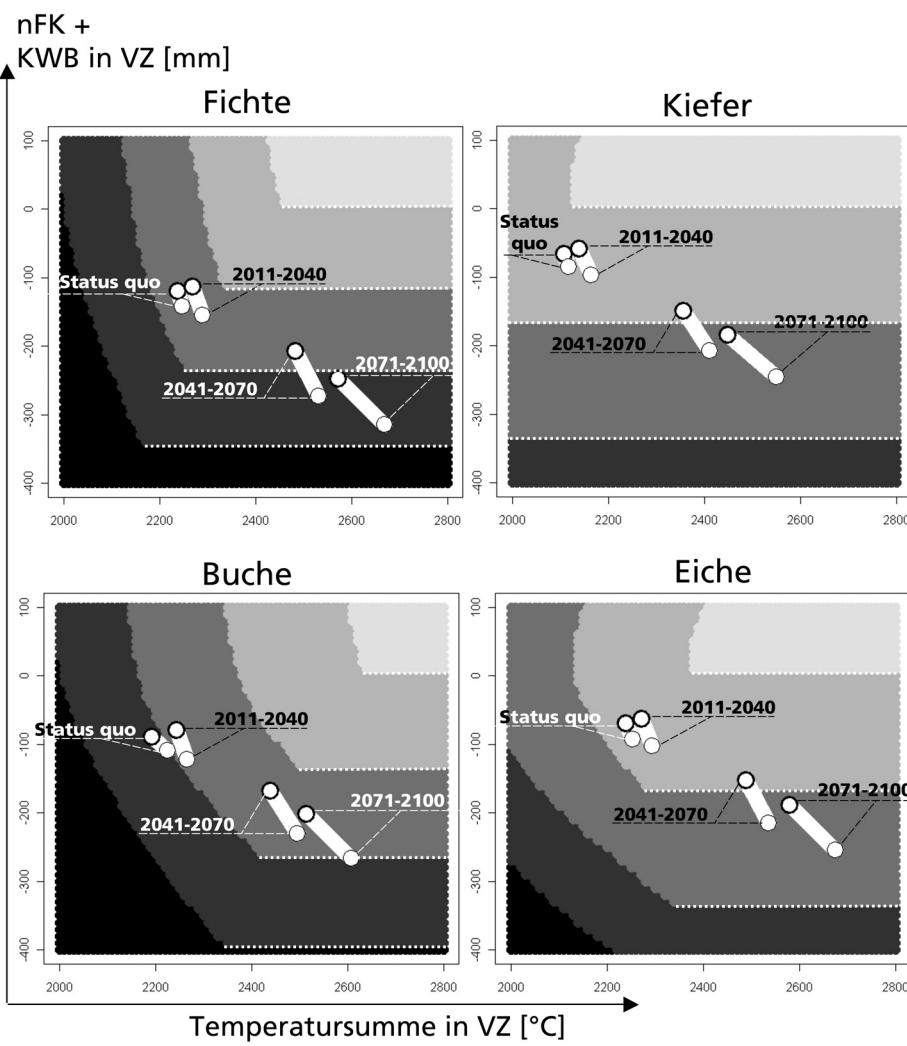


**Figure 7:** Geographic location and current site characteristics of three forest sites (FO1, FO2 and FO3) as examples for multidimensional ecograms. NSZ – soil nutrient class; nFK – available soil moisture for 1.4 m soil depth; KWB – climatic water balance; VZ – growing season for beech; Ndep – nitrogen deposition rate in 2004 (fixed for projection)



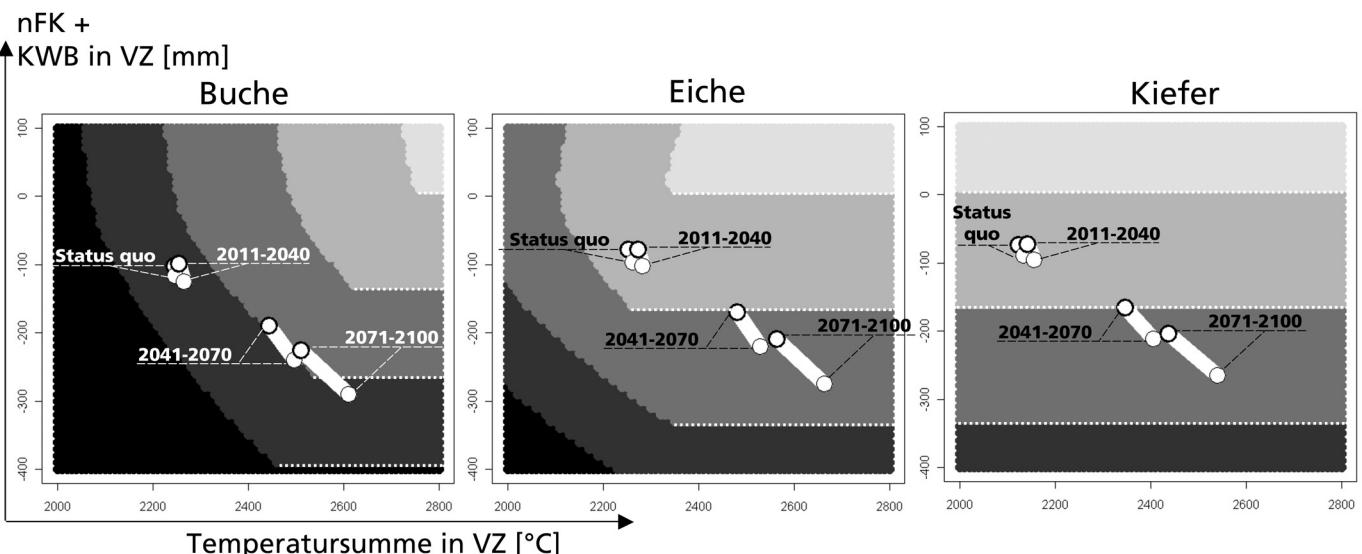
**Abbildung 8:** Mehrdimensionale Ökogramme für die Baumarten Buche, Eiche und Fichte für den schleswig-holsteinischen Forstort (FO1). Die weiß gepunktete Linie markiert die Übergänge, wo das Standortleistungskriterium durch das Wasserdefizit-Kriterium als kategorie-bestimmend ersetzt wird.

**Figure 8:** Multidimensional ecograms for beech, oak and spruce at the forest site (FO1) in Schleswig-Holstein. The dotted white lines mark areas, where the water-deficit criterion replaces the site-productivity criterion to determine the suitability for cultivation category.



**Abbildung 9:**  
Mehrdimensionale  
Ökogramme für die Baumarten  
Fichte, Kiefer, Buche und  
Eiche für den niedersächsischen  
Forstort (FO2).  
Die weiß gepunktete Linie  
markiert die Übergänge, wo  
das Standortleistungskriterium  
durch das Wasserdefizit-  
Kriterium als kategorie-  
bestimmend ersetzt wird.

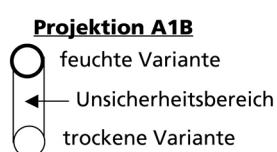
**Figure 9:** Multidimensional ecograms for spruce, pine, beech and oak at the forest site (FO2) in Lower Saxony. The dotted white lines mark areas, where the water-deficit criterion replaces the site-productivity criterion to determine the suitability for cultivation category.



**Abbildung 10:** Mehrdimensionale Ökogramme für die Baumarten Buche, Eiche und Kiefer für den brandenburgischen Forstort (FO3). Die weiß gepunktete Linie markiert die Übergänge, wo das Standortleistungskriterium durch das Wasserdefizit-Kriterium als kategorie-bestimmend ersetzt wird.

**Figure 10:** Multidimensional ecograms for beech, oak and pine at the forest site (FO3) in Brandenburg. The dotted white lines mark areas, where the water-deficit criterion replaces the site-productivity criterion to determine the suitability for cultivation category.

Legende zu  
den Abbildungen  
8, 9 und 10:



- I. Ekl (und besser) und **sehr geringes** Wasserdefizit
- I.5 Ekl und/oder **geringes** Wasserdefizit
- II. Ekl und/oder **mittleres** Wasserdefizit
- II.5 Ekl und/oder **erhöhtes** Wasserdefizit
- III. Ekl (und schlechter) und/oder **hohes** Wasserdefizit

6. Viele Untersuchungen quantifizieren den Effekt erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf das Waldwachstum, allerdings mit zum Teil widersprüchlichen Ergebnissen (z. B. NOWAK et al. 2004, AINSWORTH und LONG 2005, KÖRNER et al. 2005, KÖRNER 2006, HANNA et al. 2006). Die Verwendung der CO<sub>2</sub>-Konzentration als erklärende Variable in einer niedersächsischen Variante des vorgestellten Standort-Leistungs-Modells resultiert in deutlich höheren Bestimmtheitsmaßen, allerdings führten Prognosen zu unrealistisch hohen Mittelhöhenbonitäten im Extrapolationsbereich (ALBERT und SCHMIDT 2010). Eine erneute Integration der CO<sub>2</sub>-Konzentration als Modellvariable sollte bei einer Neuparametrisierung jedoch in Betracht gezogen werden.
7. Im Zuge der Neuparametrisierung der Standort-Leistungs-Modelle muss auf Interaktionen zwischen erklärenden Variablen geprüft werden. In einer früheren Modellvariante konnte bereits ein hochsignifikanter Effekt der Interaktion von Bodennährstoffen und Stickstoffdeposition auf die Höhenbonität der Fichte identifiziert werden (ALBERT und SCHMIDT 2010).

## Literatur

- AHRENDS, B., 2010: Entwicklung eines dynamischen Standortmodells auf der Basis flächenhafter Standortsdaten. 3. Zwischenbericht des BMBF-Verbundprojektes „Anpassungsstrategien für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung unter sich wandelnden Klimabedingungen – Decision Support System Wald und Klimawandel“. S. 10–19.
- AHRENDS, B., MEESENBURG, H., JANSEN, M., DÖRING, C., 2008: Dynamic modeling of forest management effects on N retention and output at three catchments at the Harz Mountains, Germany. *Eurosoil Congress Vienna, Austria. August 25–29 2008.*
- AINSWORTH, E. A., LONG, S. P., 2005: What have we learned from 15 years of free air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO<sub>2</sub>. *New Phytol.*, 165: pp. 351–372.
- AK Standortskartierung, 1996: Forstliche Standortsaufnahme. AG Forsteinrichtung, 5<sup>th</sup> edition, IHW Verlag Eching. 352 S.
- 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.). *Forest Ecol. Manage.* 259: 739–749 (doi: 10.1016/j.foreco.2009.04.039).
- ALVETEG, M., WALSE, C., WARFVINGE, P., 1997: Reconstructing Historic Atmospheric Deposition and Nutrient Uptake from Present Day Values Using MADEP. *Water, Air, and Soil Pollution*, 104: pp. 269–283.
- BOLTE, A., AMMER, C., LÖF, M., MADSEN, P., NABUURS, G.-J., SCHALL, P., SPATHELF, P., ROCK, J., 2009: Adaptive forest management in central Europe: Climate change impacts, strategies and integrative concept. *Scan. J. For. Res.* 24: pp. 473–482.
- BOLTE, A., WELLBROCK, N., DUNGER, K., 2011: Wälder, Klimaschutz und Klimaanpassung: Welche Maßnahmen sind umsetzbar? AFZ-DerWald 2: S. 27–29.
- BUITJES, P., HENDRIKS, E., KOENEN, M., SCHAAP, M., BANZHAF, S., KERSCHBAUMER, A., GAUGER, T., NAGEL, H.-D., SCHEUSCHNER, T., SCHLUTOW, A., 2011: Abschlussbericht zum UFOPLAN-Vorhaben FKZ 3707 64 200: Erfassung, Prognose und Bewertung von Stoffeinträgen und ihren Wirkungen in Deutschland (Modelling of Air Pollutants and Ecosystem Impact – MAPESI). Im Auftrag des Umweltbundesamtes, gefördert vom BMU. Dessau-Roßlau. 98 S.
- BUUREN, S. VAN, 2007: Worm plot to diagnose fit in quantile regression. *Statistical Modelling* 7(4): pp. 363–376.
- COLE, T. J., GREEN, P. J., 1992: Smoothing Reference Centile Curves: the LMS Method and Penalized Likelihood. *Statist. Med.*, Vol. 11: pp. 1305–1319.
- COLE, T. J., STANOJEVIC, S., STOCKS, J., COATES, A. L., HANKINSON, J. L., WADE, A. M., 2009: Age- and size-related reference ranges: A case study of sirometry through childhood and adulthood. *Statist. Med.*, Vol. 28: pp. 880–898 (DOI: 10.1002/sim.3504).
- CZAJKOWSKI, T., AHRENDS, B., BOLTE, A., 2009: Critical limits of soil water availability (CL-SWA) for forest trees – an approach based on plant water status. *Landbauforschung – vTI Agriculture and Forestry Research* 2(59): S. 87–94.
- CZAJKOWSKI, T., KOMPA, T., BOLTE, A., 2006: Zur Verbreitungsgrenze der Buche (*Fagus sylvatica* L.) im nordöstlichen Mitteleuropa. *Forstarchiv* 77: S. 203–216.
- DUNN, P., SMYTH, G., 1996: Randomized Quantile Residuals. *Journal of Computational and Graphical Statistics* 5: S. 236–244.
- ELFVING, B., NYSTRÖM, K., 1996: Stability of Site Index in Scots Pine (*Pinus sylvestris*, L.) Plantations over Year of Planting in the Period 1900–1977 in Sweden. In: SPIEKER, H., MIELIKÄINEN, K., KÖHL, M., AND SKOVSGAARD, J. P. (Eds.): *Growth Trends in European Forests*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. pp. 71–78.
- FENSKE, N., 2008: Flexible Longitudinaldaten-Regression mit Anwendungen auf Adipositas. Dipl.-Arbeit in Statistik, LMU München: 216 S.
- GERSTENGARBE, F.-W., 2008: Der Klimawandel – Ursachen und Veränderungen. Gartower Gespräche. Eigenverlag. S. 12–22.
- HABERMANN, M., LEMME, H., JUNGHANS, U., 2010: Einschätzung zukünftiger Waldschutzrisiken durch biotische Schaderreger unter Berücksichtigung der prognostizierten Klimaänderungen. Abschlussbericht des BMBF-Verbundprojektes „Anpassungsstrategien für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung unter sich wandelnden Klimabedingungen – Decision Support System Wald und Klimawandel“. S. 110–126.
- HANNA, I. T., KÖRNER, C., HÄTTENSCHWILER, S., 2006: Conifer stem growth at the altitudinal treeline in response to four years of CO<sub>2</sub> enrichment. *Global Change Biology*, 12: pp. 2417–2430.
- HASTIE, T. J., TIBSHIRANI, R. J., 1990: Generalized Additive Models. *Monographs on Statistics and Applied Probability* 43. Chapman&Hall, London. 335 S.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report. [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf): 73 S.
- KOENKER, R., 2005: Quantile Regression. Cambridge University Press, New York. 349 S.
- KOENKER, R., BASSETT, G., 1978: Regression Quantiles. *Econometrica*, 46: pp. 33–50.
- KÖRNER, C., 2006: Plant CO<sub>2</sub> responses: an issue of definition, time and resource supply. *New Phytol.*, 172: pp. 393–411.
- KÖRNER, C., ASSHOFF, R., BIGNUCOLO, O., HÄTTENSCHWILER, S., KEEL, S. G., PELÁEZ-RIEDL, S., PEPIN, S., SIEGWOLF, R. T. W., ZOTZ, G., 2005: Carbon Flux and Growth in Mature Deciduous Forest Trees Exposed to Elevated CO<sub>2</sub>. *Science*, 309: pp. 1360–1362.
- LAPPI, J., 1997: A Longitudinal Analysis of Height/Diameter Curves. *For. Sci.*, vol. 43: pp. 555–570.
- LÜPKE, B. v., 2009: Überlegungen zu Baumartenwahl und Verjüngungsverfahren bei fortschreitender Klimaänderung in Deutschland. *Forstarchiv* 80: S. 67–75.
- MEHTÄLÄ, L., 2004: A longitudinal height-diameter model for Norway spruce in Finland. *Can. J. For. Res.*, 34: pp. 131–140.
- 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.
- MILLAR, C. I., STEPHENSON, N. L., STEPHENS, S. L., 2007: Climate change and forests of the future: managing in the face of uncertainty. *Ecol. Appl.*, 17(8): pp. 2145–2151.
- MONTEITH, J. L., 1965: Evaporation and environment. *Symp. Soc. Exp. Biol.* 19: S. 205–224.
- NELLEMANN, C. H., THOMSEN, M. G., 2001: Long-term Changes in Forest Growth: Potential Effects of Nitrogen Deposition and Acidification. *Water, Air, and Soil Pollution* 128: pp. 197–205.
- NOWAK, R. S., ELLSWORTH, D. S., SMITH, S. D., 2004: Functional responses of plants to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> – do photosynthetic and productivity data from FACE experiments support early predictions? *New Phytol.*, 162: pp. 253–280.
- OVERBECK, M., Schmidt, M., 2011: Modelling infestation risk of Norway spruce by *Ips typographus* (L.) in the Lower Saxon Harz Mountains (Germany). *For. Ecol. Mgmt.* 266: pp. 115–125.

- OVERBECK, M., SCHMIDT, M., FISCHER, Ch., EVERE, J., SCHULZE, A., HÖVELMANN, T., SPELLMANN, H., 2011: Ein statistisches Modell zur Regionalisierung der nutzbaren Feldkapazität von Waldstandorten in Niedersachsen. *Forstarchiv* 82: S. 92–100.
- 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>
- RIGBY, R. A., STASINOPoulos, D. M., 2004: Smooth centile curves for skew and kurtotic data modelled using the Box-Cox Power Exponential distribution. *Statistics in Medicine*, 23: 3053–3076.
- RIGBY, R. A., STASINOPoulos D. M., 2005: Generalized additive models for location, scale and shape, (with discussion), *Appl. Statist.*, 54, part 3, pp. 507–554.
- RIGBY, R. A., STASINOPoulos D. M., 2006: Using the Box-Cox t distribution in GAMLS to model skewness and kurtosis. *Stat. Modelling* 6: pp. 209–229.
- RÖHLE, H., 1995: Zum Wachstum der Fichte auf Hochleistungsstandorten in Südbayern. Mitt. aus der Staatsforstverwaltung Bayerns, 48. Heft. 272 S.
- SAVVA, Y., BERNINGER, F., 2010: Sulphur deposition causes a large-scale growth decline in boreal forests in Eurasia, *Global Biogeochem. Cycles*, 24, GB3002, doi:10.1029/2009GB003749.
- SCHADAUER, K., 1999: Oberhöhenbonität und Standort der Fichte nach Daten der Österreichischen Forstinventur. *Mitteilungen der Forstl. Bundesversuchsanstalt Wien*, Nr. 171: 135 S.
- SCHMIDT, M., 2009: Ein longitudinales Höhen-Durchmesser Modell für Fichte in Deutschland. Tagungsband der Jahrestagung der Sektion Ertragskunde im DVFFA vom 25.–27.05.2009 in Ascona, Schweiz, 69–82.
- SCHMIDT, M., 2010: Ein standortsensitives, longitudinales Höhen-Durchmesser-Modell als eine Lösung für das Standort-Leistungs-Problem in Deutschland. Tagungsband der Jahrestagung der Sektion Ertragskunde im DVFFA vom 17.–19.05.2010 in Körbecke am Möhnesee, S. 131–152
- SCHMIDT, M., 2011: Waldentwicklungsszenarien für das Hessische Ried. Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt. Universitätsverlag Göttingen (in Vorbereitung).
- SCHMIDT, M., HANEWINDEL, M., KÄNDLER, G., KUBLIN, E., KOHNLE, U., 2010: An inventory-based approach for modeling single-tree storm damage – experiences with the winter storm of 1999 in southwestern Germany. *Can. J. For. Res.* 40: 1636–1652.
- SCHULLA, J., 1997: Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderung. Diss. 12018, ETH Zürich: 163 S.
- SCHULLA, J., JASPER, K., 2007: Model Description WaSIM-ETH. Technical report: 181 S.
- SPEKAT, A., ENKE, W., KREINKAMP, 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., ALBERT, M., SCHMIDT, M., SUTMÖLLER, J., OVERBECK, M., 2011: Waldbauliche Anpassungsstrategien für veränderte Klimaverhältnisse. *AFZ-DerWald* 11: S. 19–23.
- SPELLMANN, H., SUTMÖLLER, J., MEESenburg, H., 2007: Risikovorsorge im Zeichen des Klimawandels. *AFZ-DerWald* 23: S. 1246–1249.
- SPIECKER, H., MIELIKÄINEN, K., KOHL, M., SKOVSGAARD, J. P., 1996: Growth Trends in European Forests. European Forest Institute Research Report No. 5, Springer: 368 S.
- STASINOPoulos, D. M., RIGBY R. A., 2007: Generalized additive models for location scale and shape (GAMLSS) in R. *Journal of Statistical Software*, Vol. 23, Issue 7, Dec 2007, <URL: <http://www.jstatsoft.org/v23/i07>>.
- STERBA, H., 1995: Forest decline and increasing increments: a simulation study. *Forestry*, Vol. 68, No. 2: pp. 153–163.
- SUTMÖLLER, J., SPELLMANN, H., FIEBIGER, C., ALBERT, M., 2008: Der Klimawandel und seine Auswirkungen auf die Buchenwälder. In: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.): Ergebnisse angewandter Forschung zur Buche. Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt, Bd. 3. Universitätsverlag Göttingen: S. 135–158.
- UBA (Umweltbundesamt), 2007: Neue Ergebnisse zu regionalen Klimänderungen. Das statistische Regionalisierungsmodell WETTREG. <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/hintergrund/Regionale-Klimaänderungen.pdf>: 27 S.
- WILPERT, K. v., 1990: Die Jahrringstruktur von Fichten in Abhängigkeit vom Bodenwasserhaushalt auf Pseudogley und Parabraunerde : ein Methodenkonzept zur Erfassung standortspezifischer Wasserstreßdisposition. Freiburger bodenkundl. Abhandlungen, Nr. 24: 184 S.
- WOOD, S. N., 2006. *Generalized additive models: an introduction with R*. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton: 391 p.

## Autoren

**Dr. Matthias Albert und Dr. Matthias Schmidt**  
 sind Wissenschaftliche Angestellte  
 in der Abteilung Waldwachstum,  
 Sachgebiet Wachstumsmodellierung und Informatik,  
 an der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt  
 Grätzelstraße 2, 37079 Göttingen  
 Tel. 0551-69401-110  
 Fax. 0551-69401-160  
 E-Mail: matthias.albert@nw-fva.de