

Dynamik der Standort-Leistungs-Beziehungen von Buche, Eiche, Fichte, Kiefer und Douglasie unter Klimaveränderungen in Deutschland

Matthias Albert und Matthias Schmidt

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

1 Einleitung

Die klimasensitive Modellierung 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) für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland ist der waldwachstumskundliche Beitrag im BMBF-Verbundprojekt „Anpassungsstrategien für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung unter sich wandelnden Klimabedingungen – Decision Support System Wald und Klimawandel (DSS-WuK)“ der Universität Göttingen, des von Thünen-Instituts und der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (JANSEN et al., 2008).

Aufgrund der sich u.a. durch den Klimawandel bereits mittelfristig verändernden Standortsbedingungen müssen dynamische Bonitierungssysteme in der Waldwachstumsmodellierung und der Forstplanung eingesetzt werden. Ziel des vorgestellten Forschungsprojektes ist es, mit Hilfe von verallgemeinerten additiven Modellen die aktuelle und zukünftige baumartenspezifische Leistungsfähigkeit eines Standortes auf Grundlage von Boden- und Klimavariablen zu schätzen. Dabei wird die Leistungsfähigkeit eines Standortes über die Mittelhöhenbonität beschrieben, die ein Bestand hypothetisch nach 100 Jahren unter konstanten aktuellen oder zukünftigen Standortsbedingungen erreichen würde. Die klimasensitiven Standort-Leistungs-Modelle dienen dazu, das Wuchspotenzial verschiedener Baumarten für waldbauliche Entscheidungen zu vergleichen. Gleichzeitig liefern die Modelle Eingangswerte für Waldwachstumssimulatoren.

2 Material und Methoden

2.1 Ertragskundliche Daten

Der Parametrisierungsdatensatz für die klimasensitiven Standort-Leistungs-Modelle besteht aus Inventurpunkten der Bundeswaldinventur I und II sowie der Betriebsinventur der Niedersächsischen Landesforsten, an denen die entsprechende Baumart in Rein- oder Mischform vorkommt und mindestens eine Baumhöhe gemessen wurde. Für die Baumart Buche sind dies 35.864 Beobachtungen, für die Eiche 20.666, für die Fichte 57.100, für die Kiefer 35.104 und für die Douglasie 4.586. An jedem Inventurpunkt wird baumartenspezifisch die Mittelhöhenbonität im Alter 100 mit Hilfe des longitudinalen Höhen-Durchmesser-Bonitierungsansatzes von SCHMIDT (2008, 2009) als Funktion von Bestandesparametern und der Seehöhe sowie der geografischen Lage geschätzt (vgl. auch ALBERT und SCHMIDT, 2008). Diese Bonitierungsmethode auf Basis der Arbeit von MEHTÄTALO (2004) erfordert im Gegensatz zu herkömmlichen Bonitierungssystemen keine Konstanz der Standortsbedingungen, die aufgrund des nachgewiesenen Wachstumstrends schon in den letzten Jahrzehnten nicht mehr gegeben ist (vgl. z.B. RÖHLE, 1995; STERBA, 1995; ELFING und NYSTRÖM, 1996; SPIECKER et al., 1996; SCHADAUER, 1999).

2.2 Bodenkundliche und klimatische Parameter

Als erklärende Variablen werden die Bodennährstoffversorgung (Nähr), die nutzbare Feldkapazität (nFK), die Stickstoffdepositionsrate (Ndep) sowie die Temperatursumme in der Vegetationszeit (Temp) und die klimatische Wasserbilanz in der Vegetationszeit (KWB) herangezogen. Ein räumlicher Trend quantifiziert den Einfluss der geografischen Lage auf die Standortleistungsfähigkeit und subsummiert sämtliche Effekte, wie z.B. den Windeinfluss, die nicht explizit von den anderen Modellvariablen beschrieben werden. Weitere Variablen wurden im Rahmen der Modellbildung durch Modellvergleiche auf Basis des Bayesian Information Criterion (BIC) ausgeschlossen.

Im einzelnen werden jedem BWI- und BI-Inventurpunkt die entsprechenden Parameterwerte zugeordnet. Die Bodenparameter werden ausgehend vom dem Punkt zugeordneten Leitprofil der flächendeckenden Wald-Bodenübersichtskarte (Wald-BÜK) über Transferfunktionen hergeleitet (AHRENDT, 2010). Die mit dem regionalen Klimamodell WETTREG (SPEKAT et al., 2006) projizierten Klimaparameter werden mit Hilfe des Modells WASIM-ETH (vgl. SCHULLA, 1997; SCHULLA und JASPER, 2007) auf 200 x 200 m Teilflächen regionalisiert und den Inventurpunkten über deren Mittelpunktkoordinaten zugeordnet.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die verwendeten erklärenden Variablen und die Methodik ihrer Herleitung. Tabelle 2 beschreibt die Verteilung der erklärenden Variablen anhand von Mittelwert und Standardabweichung bzw. von Klassenbesetzungen für die kategorischen Variablen.

Tabelle 1: Verwendete Modellvariablen und die zu ihrer Herleitung verwendete Methodik.

Variable	Einheit	Datenquelle
Bodennährstoffe	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-BÜK; modifiziert von AHRENDTS (2010)
nutzbare Feldkapazität	auf 1,4 m Bodentiefe bilanziert [mm]	abgeleitet aus Leitprofilen entsprechend der Wald-BÜK; modifiziert von AHRENDTS (2010)
Stickstoffdeposition	über das Bestandesleben gemittelte jährliche Stickstoffdepositionsrate [eq/ha/a]	modelliert mit modifizierter Version von MAKEDEP (ALVETEG et al., 1997; AHRENDTS et al., 2008)
Temperatursumme	Summe der täglichen Mitteltemperatur in der Vegetationszeit [°C], wobei die Vegetationszeit dynamisch und baumartspezifisch berechnet wird (vgl. MENZEL, 1997; v. WILPERT, 1990)	modelliert mit WETTREG für die Klimanormalperiode 1961 bis 1990; regionalisiert auf 200 x 200 m mit WASIM-ETH (vgl. SCHULLA, 1997; SPEKAT et al., 2006)
klimatische Wasserbilanz	Differenz aus der Niederschlagssumme und der potentiellen Evapotranspiration (vgl. MONTEITH, 1965) in der Vegetationszeit [mm]	modelliert mit WETTREG für die Klimanormalperiode 1961 bis 1990; regionalisiert auf 200 x 200 m mit WASIM-ETH (vgl. SCHULLA, 1997; SPEKAT et al., 2006)

Die Bodennährstoffversorgung wird im Anhalt an die Niedersächsische Standortskartierung (AK STANDORTSKARTIERUNG, 1996) klassifiziert. Eine Differenzierung zwischen Bergland- und Tieflandstandorten ist aufgrund unterschiedlicher Effekte gleicher Klassen auf das Wachstum notwendig. Diese Unterschiede liegen im Kartierschema begründet, das zwischen Bergland und Tiefland unterscheidet (vgl. AHRENDTS, 2010).

Da die effektive Durchwurzelungstiefe auf vielen Böden des Tieflandes bei mindestens 1,4 m liegt (CZAJKOWSKI et al., 2009), wird die nutzbare Feldkapazität einheitlich für alle Standorte auf 1,4 m bilanziert.

Im Gegensatz zur mittleren Temperatur in der Vegetationszeit, die in den für Niedersachsen parametrisierten klimasensitiven Standort-Leistungs-Modellen verwendet wurde (ALBERT und SCHMIDT, 2008, 2010), wird für die bundesweiten Modelle die Temperatursumme in der Vegetationszeit als erklärende Variable herangezogen. Dies hat den Vorteil, dass sich nicht nur der durch Klimawandel hervorgerufene absolute Temperaturanstieg sondern auch eine möglich Verlängerung der Vegetationszeit im Parameterwert widerspiegelt. Grundsätzlich beschreibt die Temperatursumme die zur Verfügung stehende Energiemenge besser als die Mitteltemperatur, da sich die letztere auf unterschiedliche Bilanzierungszeiträume beziehen kann.

Tabelle 2: Wertebereiche der verwendeten Variablen (Nähr: Anzahl der Beobachtungen je Nährstoffstufe von 1=arm bis 4=reich, getrennt nach Bergland und Tiefland; } kennzeichnet Klassen die aufgrund von nicht signifikanten Modelleffekten bei der Modellselektion zusammengefasst wurden; \bar{x} : Mittelwert; sd: Standardabweichung).

		Buche	Eiche	Fichte	Kiefer	Douglasie
Nähr Bergl.	1	487	} 1229	1898	} 6724	} 781
	2	1841		6668		
	3	} 24549	} 12642	22693	} 15987	1583
	4			13196		1128
Tiefl.	1	1346	1965	} 2145	} 7223	} 421
	2	101	} 3239			
	3	} 7540		1591	6150	3983
	4		4350		1187	
nFK	\bar{x}	157	173	158	187	178
	sd	48	52	43	44	47
Ndep	\bar{x}	2163	2202	2635	2728	3622
	sd	862	1149	1043	1351	1701
Temp	\bar{x}	2117	2215	2048	2070	2205
	sd	140	92	183	92	107
KWB	\bar{x}	-188	-234	-157	-237	-265
	sd	109	69	127	81	87

2.3 Modellierungsansatz

Der verwendete statistische Modellierungsansatz zur Beschreibung des Standort-Leistungs-Bezug 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:

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

mit Y_i =Response Variable, X_i =erklärende Variable, 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. Zur Darstellung nichtlinearer Modelleffekte bietet sich die graphische Darstellung der glättenden Funktion als Kurve inklusive eines punktwisen Prognoseintervalls an.

3 Ergebnisse

3.1 Modellierung des Standort-Leistungs-Bezuges

Das Modell für die Baumarten Buche, Eiche, Fichte und Kiefer lässt sich wie folgt spezifizieren:

$$hg100_i = \alpha_i + \text{Nähr}_i^T \beta + f_1(\text{Temp}_i) + f_2(\text{KWB}_i) + f_3(\text{nFK}_i) + f_4(\text{Ndep}_i) + f_5(\text{RW}_i, \text{HW}_i) + \varepsilon_i \quad [1]$$

mit $hg100_i$ =Mittelhöhenbonität im Alter 100 an Stichprobenpunkt i [m], Nähr_i^T =Indikatorenvektor für klassifizierte Bodennährstoffe, β =zu Nähr gehörender Parametervektor, KWB_i =klimatische Wasserbilanz in der Vegetationszeit (VZ) [mm], Temp_i =Temperatursumme in der VZ [°C], Ndep_i =mittlere Stickstoffdeposition [eq/ha/a], nFK_i = nutzbare Feldkapazität [mm], RW_i, HW_i =Gauss-Krüger-Lagekoordinaten, α_i =Regressionskoeffizient (Interzept), f_1, f_2, f_3, f_4 =eindimensionale glättende Funktionen, f_5 =zweidimensionale glättende Funktion zur Beschreibung des räumlichen Trends.

Bei der Baumart Douglasie ist es für die Gewährleistung eines biologisch plausiblen Modellverhalten notwendig, die Modelleffekte der verschiedenen Einflussgrößen in zwei Modellierungsschritten zu schätzen. Diese Vorgehensweise ist notwendig, da die untereinander korrelierten Prädiktoren bei gleichzeitig deutlich geringerer Datengrundlage für die Douglasie dazu führen, dass sich die Modelleffekte nicht voneinander trennen lassen. Darüber hinaus ist die Variable nutzbare Feldkapazität im Douglasienmodell nicht signifikant.

Vormodell:

$$hg100_i = \alpha_i + f_1(\text{Temp}_i) + f_2(\text{KWB}_i) + \varepsilon_i \quad [2.1]$$

Hauptmodell:

$$hg100_i = \alpha_i + \text{Nähr}_i^T \beta + \hat{f}_1(\text{Temp}_i) + \hat{f}_2(\text{KWB}_i) + f_4(\text{Ndep}_i) + f_5(\text{RW}_i, \text{HW}_i) + \varepsilon_i \quad [2.2]$$

mit \hat{f}_1, \hat{f}_2 = die im Modell [2.1] parametrisierten und in [2.2] übernommenen Effekte.

Die Parameterkoeffizienten und Kennwerte der glättenden Terme sind für die fünf Modelle in den Tabellen 3a und b angegeben.

Tabelle 3a: Statistische Kenngrößen der Modelle zur Beschreibung des Standort-Leistung-Bezuges der Baumarten Buche, Eiche und Fichte (se=Standardfehler).

Buche $R^2=0,31$; $se=3,4$ m						
Parameterkoeffizienten:						
		Schätzwert	Std.Fehler	t-Wert	Pr(> t)	
(Intercept)		2.478e+01	2.615e-01	94.776	< 2e-16	***
Nähr Bergland	2	1.746e+00	2.154e-01	8.106	5.40e-16	***
	3+4	2.303e+00	2.264e-01	10.172	< 2e-16	***
Tiefeland	1	1.581e+00	2.562e-01	6.171	6.87e-10	***
	2	1.914e+00	4.524e-01	4.231	2.33e-05	***
	3+4	2.580e+00	2.459e-01	10.493	< 2e-16	***
nFK		5.229e-03	9.744e-04	5.366	8.08e-08	***
Approximierte Signifikanz der glättenden Terme:						
	edf	Est.rank	F	p-value		
s(temp)	6.303	6.855	108.39	<2e-16	***	
s(KWB)	3.761	3.969	56.70	<2e-16	***	
s(ndep)	1.997	2.000	2497.85	<2e-16	***	
s(RW,HW)	145.090	148.800	54.68	<2e-16	***	
Eiche $R^2=0,33$; $se=3,1$ m						
Parameterkoeffizienten:						
		Schätzwert	Std.Fehler	t-Wert	Pr(> t)	
(Intercept)		23.4830	0.1077	217.943	< 2e-16	***
Nähr Bergland	3+4	0.7580	0.1115	6.797	1.09e-11	***
Tiefeland	1	0.3988	0.1372	2.906	0.00366	**
	2+3	1.0411	0.1464	7.113	1.18e-12	***
	4	1.4798	0.1606	9.215	< 2e-16	***
Approximierte Signifikanz der glättenden Terme:						
	edf	Est.rank	F	p-value		
s(nFK)	1.910	1.991	23.569	6.50e-11	***	
s(temp)	4.688	4.956	19.340	< 2e-16	***	
s(KWB)	2.822	3.416	7.468	2.04e-05	***	
s(ndep)	2.000	2.000	2417.637	< 2e-16	***	
s(RW,HW)	143.153	148.564	42.058	< 2e-16	***	
Fichte $R^2=0,44$; $se=3,1$ m						
Parameterkoeffizienten:						
		Schätzwert	Std.Fehler	t-Wert	Pr(> t)	
(Intercept)		29.45591	0.10000	294.56	<2e-16	***
Nähr Bergland	2	1.81775	0.09773	18.60	<2e-16	***
	3	2.53169	0.10304	24.57	<2e-16	***
	4	2.83786	0.11329	25.05	<2e-16	***
Tiefeland	1+2	1.69675	0.13630	12.45	<2e-16	***
	3	2.22131	0.13072	16.99	<2e-16	***
	4	2.72672	0.13920	19.59	<2e-16	***
Approximierte Signifikanz der glättenden Terme:						
	edf	Est.rank	F	p-value		
s(nFK)	1.978	1.999	87.4	<2e-16	***	
s(temp)	5.979	6.000	364.3	<2e-16	***	
s(KWB)	3.911	3.995	41.6	<2e-16	***	
s(ndep)	1.998	2.000	6885.9	<2e-16	***	
s(RW,HW)	146.705	148.932	115.3	<2e-16	***	

Tabelle 3b: Statistische Kenngrößen der Modelle zur Beschreibung des Standort-Leistung-Bezuges der Baumarten Kiefer und Douglasie (se=Standardfehler).

Kiefer $R^2=0,45$; $se=2,6$ m					
Parameterkoeffizienten:					
	Schätzwert	Std.Fehler	t-Wert	Pr(> t)	
(Intercept)	25.84291	0.04715	548.072	< 2e-16 ***	
Nähr Bergland 3+4	0.50034	0.05563	8.994	< 2e-16 ***	
Tiefland 1+2	0.29035	0.06704	4.331	1.49e-05 ***	
3	0.72367	0.09035	8.009	1.19e-15 ***	
4	0.86014	0.12318	6.983	2.95e-12 ***	
Approximierte Signifikanz der glättenden Terme:					
	edf	Est.rank	F	p-value	
s(nFK)	1.980	2.000	49.25	<2e-16 ***	
s(temp)	5.848	5.990	53.43	<2e-16 ***	
s(KWB)	1.968	1.999	48.88	<2e-16 ***	
s(ndep)	4.861	4.991	2943.15	<2e-16 ***	
s(RW,HW)	145.580	148.851	112.36	<2e-16 ***	
Douglasie $R^2=0,40$; $se=5,0$ m					
Vormodell					
Parameterkoeffizienten:					
	Schätzwert	Std.Fehler	t-Wert	Pr(> t)	
(Intercept)	47.45289	0.09458	501.7	<2e-16 ***	
Approximierte Signifikanz der glättenden Terme:					
	edf	Est.rank	F	p-value	
s(temp)	3.849	3.987	45.19	< 2e-16 ***	
s(KWB)	1.781	1.952	26.25	7.91e-12 ***	
Hauptmodell					
Parameterkoeffizienten:					
	Schätzwert	Std.Fehler	t-Wert	Pr(> t)	
(Intercept)	46.3697	0.2411	192.317	< 2e-16 ***	
Nähr Bergland 3	0.8133	0.3131	2.598	0.009410 **	
4	1.2432	0.3228	3.851	0.000119 ***	
Tiefland 1+2	1.8750	0.3746	5.005	5.79e-07 ***	
3+4	2.2112	0.3640	6.075	1.35e-09 ***	
Approximierte Signifikanz der glättenden Terme:					
	edf	Est.rank	F	p-value	
s(ndep)	2.0	2.0	866.92	<2e-16 ***	
s(RW,HW)	132.6	145.8	17.38	<2e-16 ***	

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					

Die linearen und nicht-linearen Effekte sind in allen Modellen hochsignifikant (vgl. Tab. 3a und b). 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 (linear im Buchenmodell) ist, desto besser ist die Mittelhöhenbonität. Die nicht-linearen Effekte inklusive der punktwisen Prognoseintervalle (5% Irrtumswahrscheinlichkeit) sind in Abb. 1a bis d dargestellt.

Bei der Interpretation der partiellen Effekte muss die Korrelation der Prädiktorvariablen untereinander beachtet werden. Da beispielsweise Temperaturveränderungen fast immer mit Veränderungen der klimatischen Wasserbilanz einhergehen, darf nicht vom Temperatureffekt direkt auf die Veränderung der Standortleistungsfähigkeit geschlossen werden. Desweiteren dürfen die Effekte in den Randbereichen der Beobachtungswerte nicht überinterpretiert werden, da sie mit nur wenigen Daten belegt sind. In Abb. 1a sind die unterschiedlichen Temperaturbereiche, in denen Datensätze der einzelnen Baumarten vorliegen, gut erkennbar. Fichte und Buche zeigen im unteren Temperaturbereich nur geringe Reaktionen der Leistungsfähigkeit, während die übrigen Baumarten auch vom Temperaturanstieg im unteren Wertebereich ihrer jetzigen Vorkommen profitieren. Ab einer Temperatursumme von ca. 1500 °C in der Vegetationszeit reagiert die Fichte stark, die Buche ab ca. 1800 °C. Für alle Baumarten zeigt der Temperatureffekt im oberen Bereich ein Abflachen, d.h. steigende Temperatursummen scheinen sich hier nicht mehr leistungssteigernd auszuwirken.

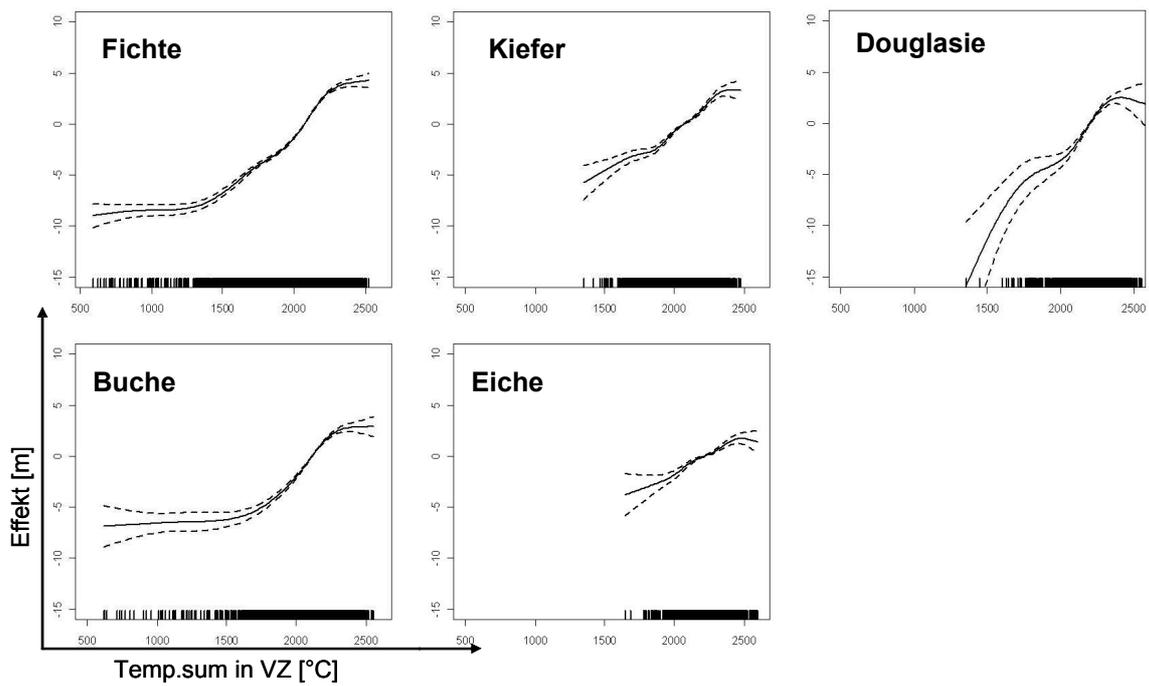


Abb. 1a: Nicht-linearer Effekt der Temperatursumme in der Vegetationszeit auf die Mittelhöhenbonität der fünf Baumarten. Die gestrichelten Linien beschreiben punktweise Prognoseintervalle (5% Irrtumswahrscheinlichkeit). Die Striche auf der Abszisse markieren Datensätze mit der entsprechenden Ausprägung.

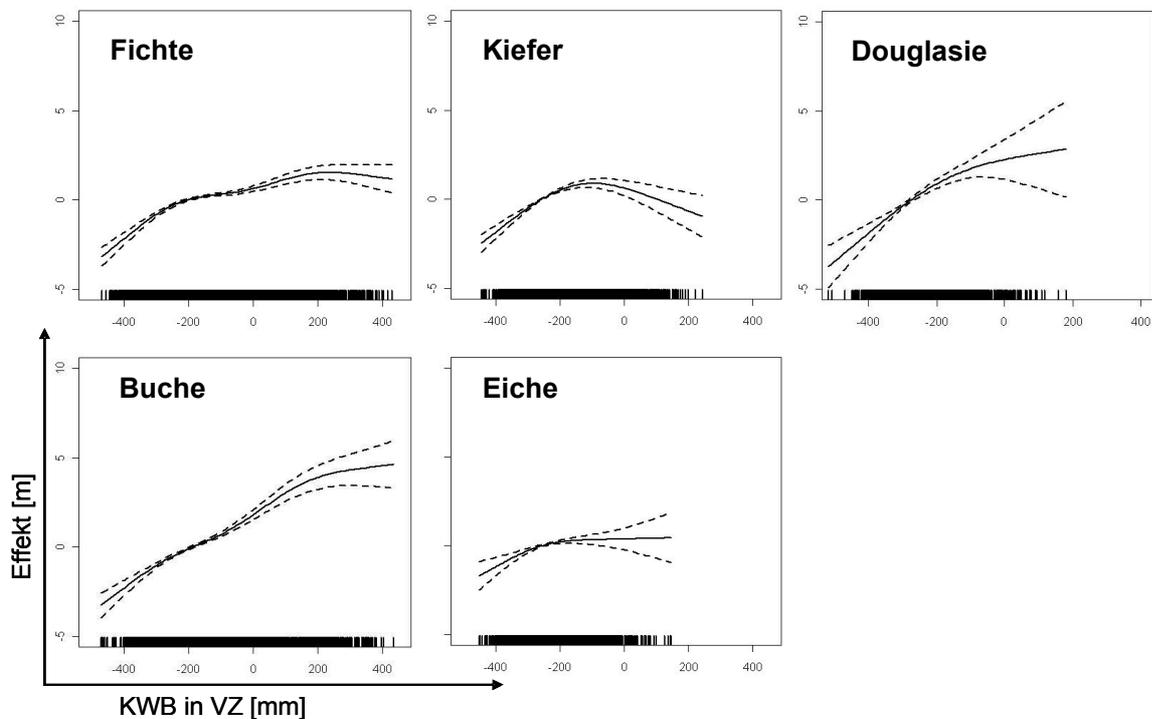


Abb. 1b: Nicht-linearer Effekt der klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationszeit auf die Mittelhöhenbonität der fünf Baumarten.

Der Effekt der klimatischen Wasserbilanz ist für die Baumart Buche über den gesamten Wertebereich fast gleichmäßig ansteigend und erst im oberen Bereich abflachend (Abb. 1b). Die Effekte bei den anderen Baumarten zeigen bereits bei ca. -200 mm ein deutliches Abflachen. Der nicht monoton steigende Effekt der klimatischen Wasserbilanz bei der Baumart Kiefer erscheint biologisch nicht sinnvoll, ist jedoch durch die vorliegenden (unbalancierten) Kombinationen der einzelnen Einflussfaktoren im Parametrisierungsdatensatz erklärbar. Kiefernbestände mit einer klimatischen Wasserbilanz größer -100 mm finden sich ein höherer Anteil an Hochlagenstandorten, die im Mittel eine geringere Bonität aufweisen. Diese geringere Leistungsfähigkeit trotz besserer Wasserversorgung als im Tiefland wird im Modell eben auch durch das Absinken des Effektes der klimatischen Wasserbilanz beschrieben und nicht ausschließlich über den Temperatureffekt. Abhilfe könnte hier der Einsatz neuer Modellierungsmethoden mit monoton steigenden Effekten bieten und für Prognosen eine bessere biologische Plausibilität gewährleisten (BREZGER, 2005, S. 83ff).

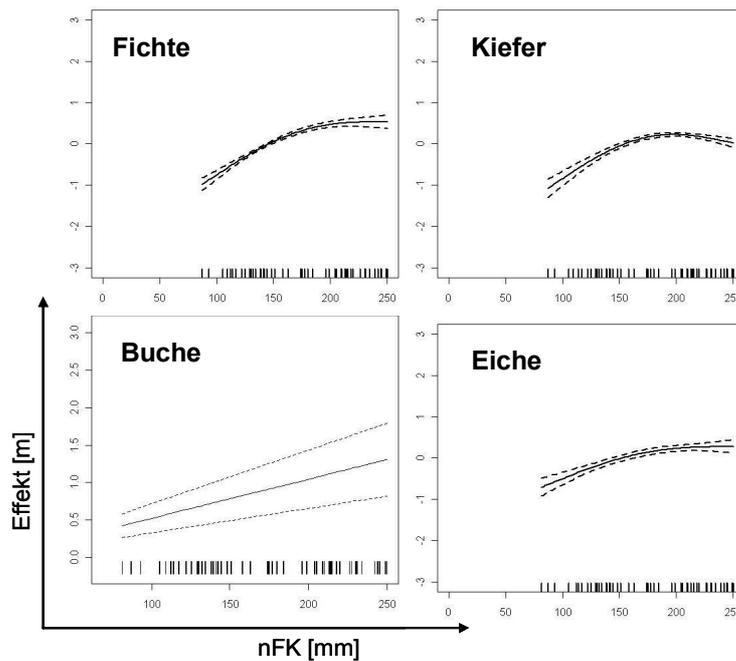


Abb. 1c: Nicht-linearer bzw. linearer (Buche) Effekt der nutzbaren Feldkapazität auf die Mittelhöhenbonität der vier Baumarten.

Der Effekt der nutzbaren Feldkapazität auf die Standortleistungsfähigkeit ist im Vergleich zum Effekt der Temperatursumme und der klimatischen Wasserbilanz recht gering (Abb. 1c). Die nutzbare Feldkapazität ist dennoch eine wichtige Kenngröße, da sie hilft, zwischen Standorten mit ähnlichen Niederschlags- und Temperaturverhältnissen aber unterschiedlichen Bodenarten zu differenzieren.

Die Stickstoffdepositionsrate hat einen großen Effekt auf die Standortleistungsfähigkeit (Abb. 1d). Allerdings weist sie eine starke räumliche Abhängigkeit auf, mit Werten in Nordwestdeutschland zwischen 6000 und 8000 eq/ha/a und Werten zwischen 700 und 5000 eq/ha/a im übrigen Bundesgebiet (AHRENDT, 2010).

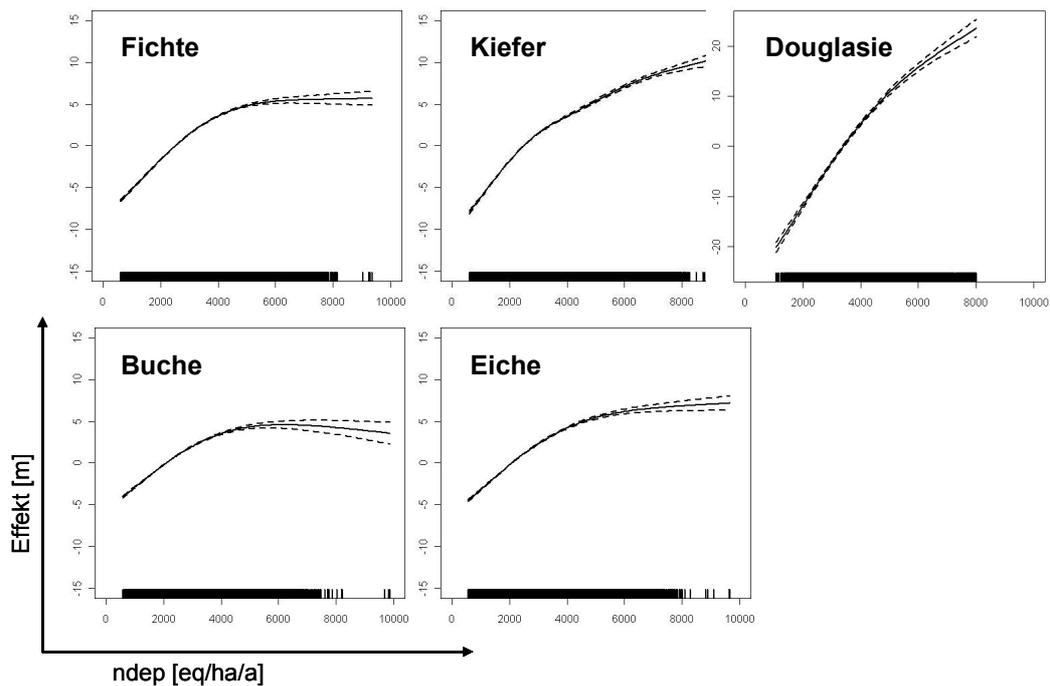


Abb. 1d: Nicht-linearer Effekt der Stickstoffdepositionsrate auf die Mittelhöhenbonität der fünf Baumarten.

3.2 Szenariosimulationen

Die mögliche Dynamik der Standortleistungsfähigkeit unter Klimawandel wird in Szenariosimulationen untersucht. Dabei werden die Klimabedingungen für drei 30-jährige Prognoseperioden von 2010 bis 2100 unter dem Szenario A1B in der trockenen Variante (IPCC, 2007) mit dem regionalen Klimamodell WETTREG (SPEKAT et al., 2006) projiziert. Während sich somit die Temperatursummen und klimatischen Wasserbilanzen der Standorte in der Szenariosimulation verändern, werden die übrigen erklärenden Modellvariablen als konstant angenommen. 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 zugrunde, dass selbst bei abnehmenden Stickstoffeinträgen die Böden mittelfristig als stickstoffgesättigt angesehen werden können. Die Verfügbarkeit der Bodennährstoffe wird sich unter Klimawandel verändern (vgl. AHREND, 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.

3.3 Anwendungsbeispiele

Beispielhaft wird die Veränderung des Standort-Leistungs-Bezuges für sämtliche aktuellen Fichten- bzw. Buchenvorkommen auf Basis der BWI und BI dargestellt (Abb. 2a bis d).

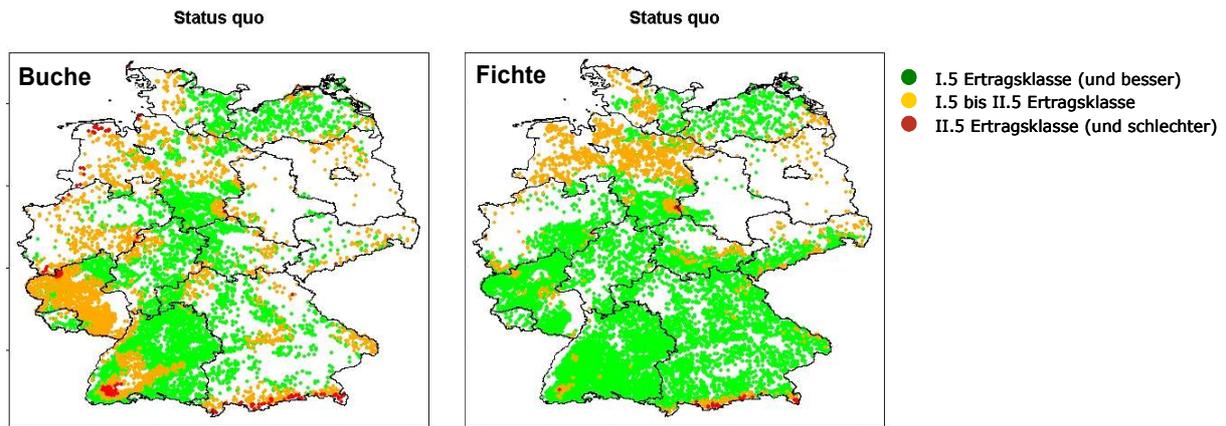


Abb. 2a: Status quo der räumlichen Verteilung der Standort-Leistungsfähigkeit der Baumarten Buche und Fichte.

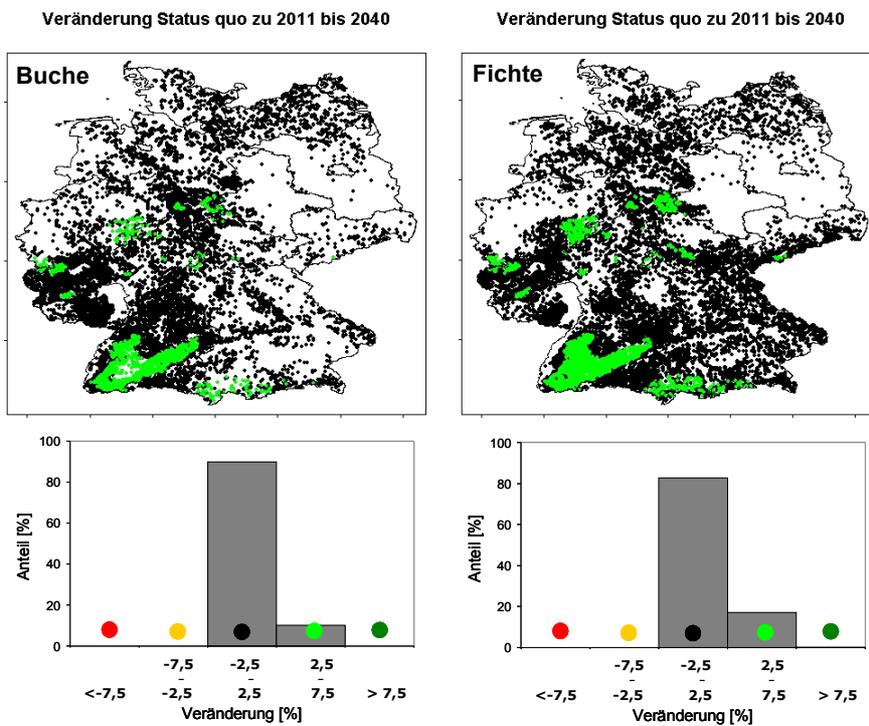


Abb. 2b: Dynamik der Standortleistungsfähigkeit für die Baumarten Buche (links) und Fichte (rechts) unter Szenario A1B – trockene Variante für die Prognoseperiode 2011 bis 2040. Die Häufigkeitsdiagramme zeigen jeweils die relativen Anteile in den fünf Klassen der Veränderung der Standort-Leistungsfähigkeit.

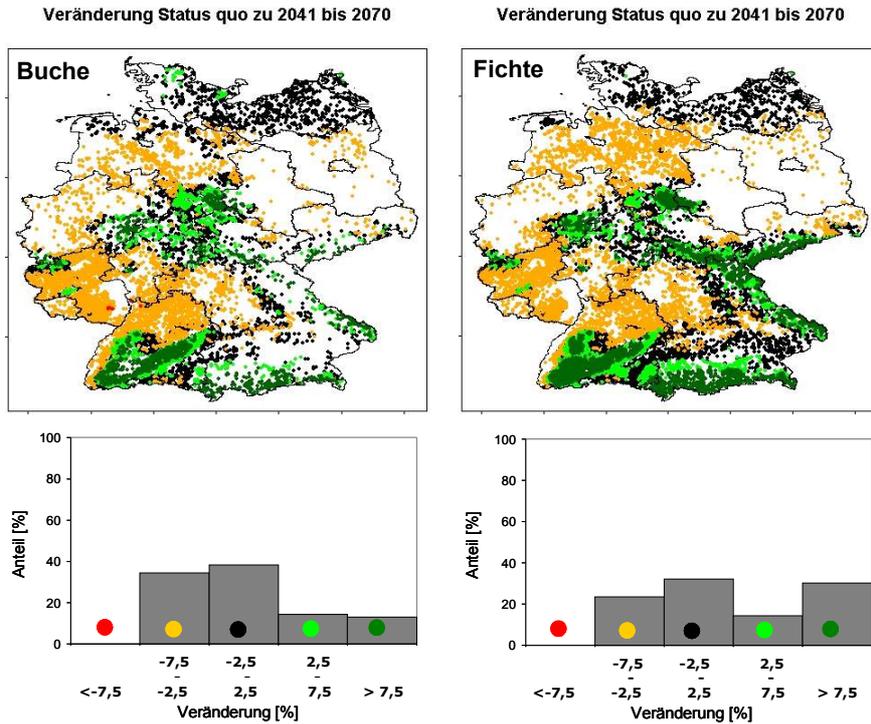


Abb. 2c: Dynamik der Standortleistungsfähigkeit für die Baumarten Buche (links) und Fichte (rechts) unter Szenario A1B – trockene Variante für die Prognoseperiode 2041 bis 2070. Die Häufigkeitsdiagramme zeigen jeweils die relativen Anteile in den fünf Klassen der Veränderung der Standort-Leistungsfähigkeit.

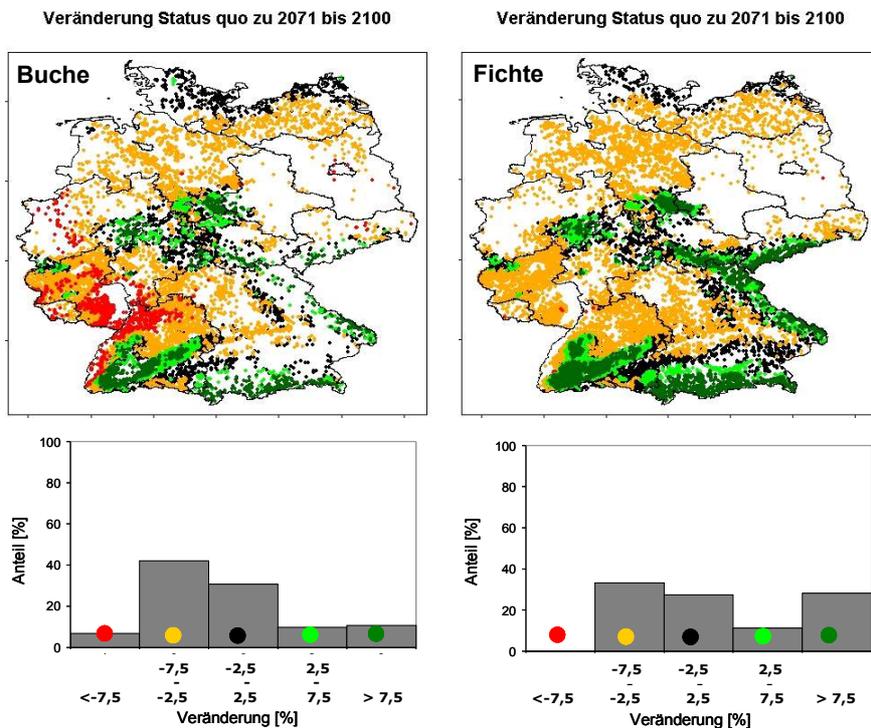


Abb. 2d: Dynamik der Standortleistungsfähigkeit für die Baumarten Buche (links) und Fichte (rechts) unter Szenario A1B – trockene Variante für die Prognoseperiode 2071 bis 2100. Die Häufigkeitsdiagramme zeigen jeweils die relativen Anteile in den fünf Klassen der Veränderung der Standort-Leistungsfähigkeit.

Die Veränderung der Standortleistungsfähigkeit, eingeteilt in fünf Klassen, zwischen dem Status quo (Periode 1981-2010) und der jeweils betrachteten Prognoseperiode ist in Abb. 2 b bis d illustriert. Für die erste Prognoseperiode 2011 bis 2040 wird für die Mehrzahl der aktuellen Buchen- und Fichtenstandorte keine oder nur

eine geringfügige Veränderung der Standortleistungsfähigkeit prognostiziert (Klasse -2,5% bis 2,5% Veränderung). Für Standorte in den Hochlagen der Mittelgebirge und Alpen wird eine positive Auswirkung der Klimaveränderung prognostiziert. In der ersten Prognoseperiode wird für keinen Standort eine Abnahme der Leistungsfähigkeit geschätzt. Die Prognose für die zweite Periode von 2041 bis 2070 fällt deutlich differenzierter aus. Während weiterhin die Hochlagen stark bis sehr stark von steigenden Temperaturen profitieren, führt der nachlassende Niederschlag in tieferen Lagen zu prognostizierten Produktivitätsverlusten. Die beiden betrachteten Baumarten Buche und Fichte zeigen dabei ähnliche Reaktionsmuster. In der dritten Periode von 2071 bis 2100 werden insbesondere für die Buche auf knapp 7% der Standorte starke Verluste der Leistungsfähigkeit prognostiziert. Die meisten heutigen Fichtenstandorte scheinen auch in der dritten Periode noch keine drastische Einbuße in der Leistungsfähigkeit zu erleiden. Aufgrund der ganz anderen heutigen Verteilung über die Höhenstufen werden bis in die dritte Periode für die Fichte deutlich höhere Standortanteile mit Produktivitätssteigerung (mehr als 7,5% Steigerung auf über 28% der Standorte) im Vergleich zur Buche (10,6% der Standorte) prognostiziert.

3.3.1 Veränderung der Standortleistungsfähigkeit entlang eines Höhengradienten

Die gegenläufigen Auswirkungen einer Temperaturerhöhung mit ihrem positiven Effekt auf die Standortleistungsfähigkeit und eines das Wuchspotenzial dämpfenden Niederschlagsrückganges lassen sich entlang eines Höhengradienten gut beobachten. Am Beispiel der Wälder zwischen Rheintalgraben, Schwarzwald und Schwäbischer Alb soll dies verdeutlicht werden (Abb. 3a und b).

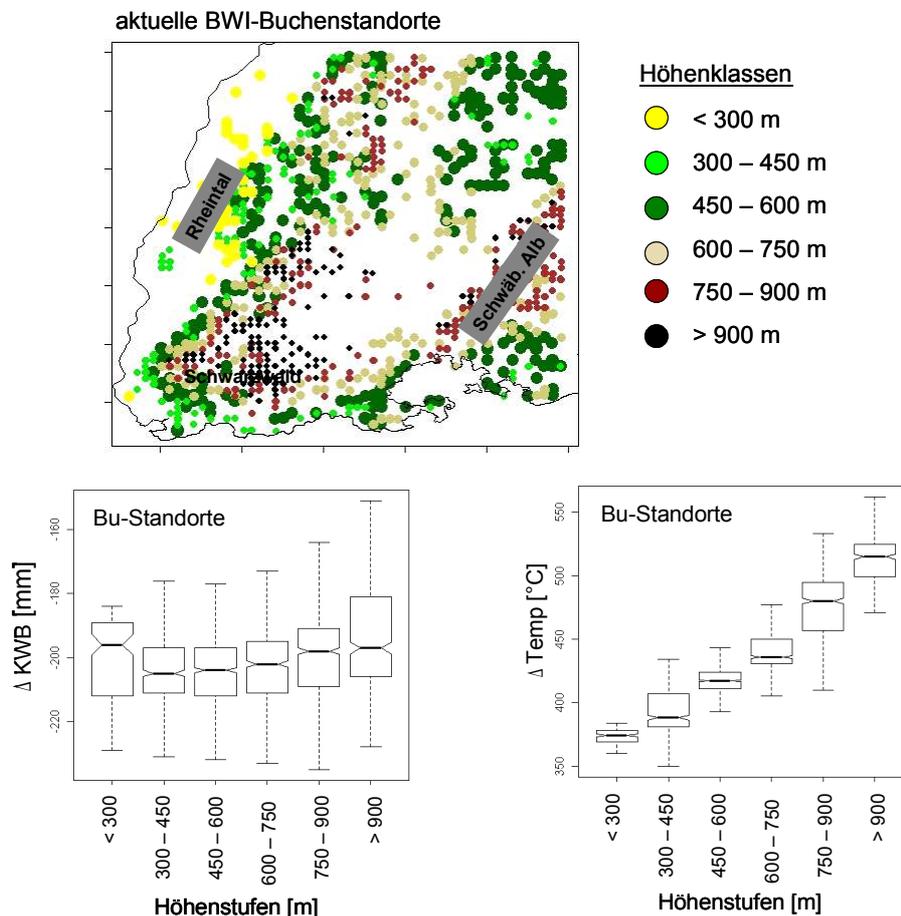


Abb. 3a: Die aktuellen BWI-Buchenstandorte im Bereich Rheintalgraben, Schwarzwald, Schwäbische Alb (oben) und die korrespondierenden Veränderungen der klimatischen Wasserbilanz (unten links) und der Temperatursumme in der Vegetationszeit (unten rechts) zwischen Status quo und der Prognoseperiode 2071 bis 2100 unter dem Szenario A1B – trockene Variante.

Im Untersuchungsgebiet Rheintal-Schwarzwald-Schwäbische Alb weist die aktuelle Niederschlagssumme in der Vegetationszeit einen deutlichen Anstieg mit zunehmender Höhenlage auf. Umgekehrt sinkt die Temperatursumme in der Vegetationszeit, je höher der Standort liegt. Die Temperaturunterschiede in den verschiedenen Höhenlagen der aktuellen Buchenstandorte werden unter Szenario A1B mit der Zeit geringer werden, da Standorte der oberen Lagen eine überproportionale Temperaturerhöhung (Standorte über 900 m ca. + 28%) gegenüber tieferen Lagen (Standorte unter 300 m ca. + 15%) erfahren (Abb. 3a). Die Projektion der klimatischen Wasserbilanz unter dem Szenario A1B – trockene Variante weist keinen eindeutigen Trend über der Höhenlage auf. Vielmehr nimmt die

klimate Wasserbilanz in der Vegetationszeit auf allen aktuellen Buchenstandorten im Mittel um ca. -190 bis -210 mm ab. Die Veränderung der klimatischen Parameter auf den aktuellen Standorten der anderen Baumarten weist ähnliche Trends auf.

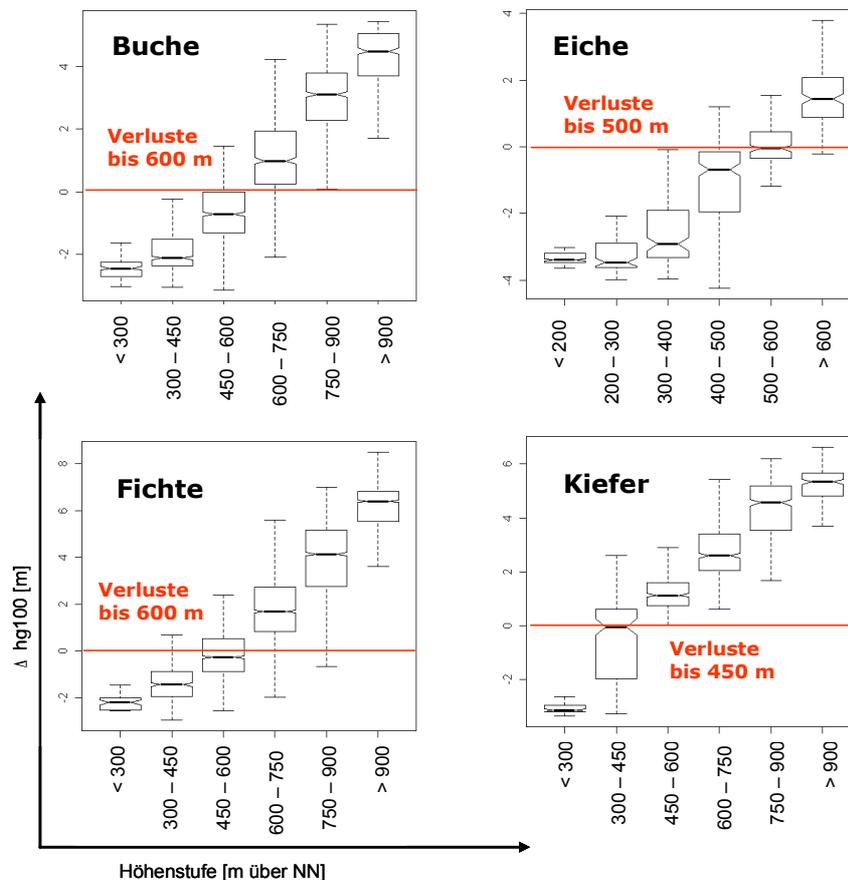


Abb. 3b: Veränderung der Mittelhöhenbonität zwischen Status quo und der Prognoseperiode 2071 bis 2100 (Δ hg100) über den Höhenstufen im Untersuchungsgebiet Rheintal-Schwarzwald-Schwäbische Alb für die aktuellen Standorte der Baumarten Buche, Eiche, Fichte und Kiefer.

Obwohl die Baumarten sehr ähnliche Reaktionsmuster auf Temperaturerhöhung und verstärktes Wasserdefizit zeigen (vgl. Abb. 1a und b), verdeutlicht die Analyse der klimabedingten Veränderung der Standortleistungsfähigkeit entlang eines Höhengradienten artspezifische Unterschiede (Abb. 3b). Während Buchen- und Fichtenstandorte unter dem Szenario A1B – trockene Variante bis zur Prognoseperiode 2071 – 2100 Produktivitätsverluste in Höhenlagen bis 600 m erleiden, profitieren die an Trockenheit besser adaptierten Baumarten Kiefer und Eiche bereits ab Höhenlagen von ca. 500 m. Den regionalen Einfluss verdeutlicht ein Vergleich mit den Ergebnissen eines Höhengradienten im Harz, wo die Buche und Fichte bereits ab Höhenlagen von 450 m und die Kiefer ab 300 m von der projizierten Klimaveränderung unter Szenario A1B profitiert.

3.3.2 Produktivitätsgewinne und –verluste der Buche

Für strategische forstplanerische Fragestellungen ist eine baumartenspezifische, flächengewichtete Analyse der Produktivitätsveränderung aussagekräftig. Regionale Unterschiede einer solchen Auswertung werden am Beispiel der Baumart Buche verdeutlicht. Die Berechnungsgrundlage sind sämtliche aktuellen BWI-Buchenstandorte, wobei potenzielle Flächenverluste bzw. –gewinne der Baumart bis zum Jahr 2100 nicht berücksichtigt werden. Eine Übersicht der Produktivitätsgewinne und –verluste auf Wuchsgebietsebene für die Bundesrepublik Deutschland bietet Abb. 4.

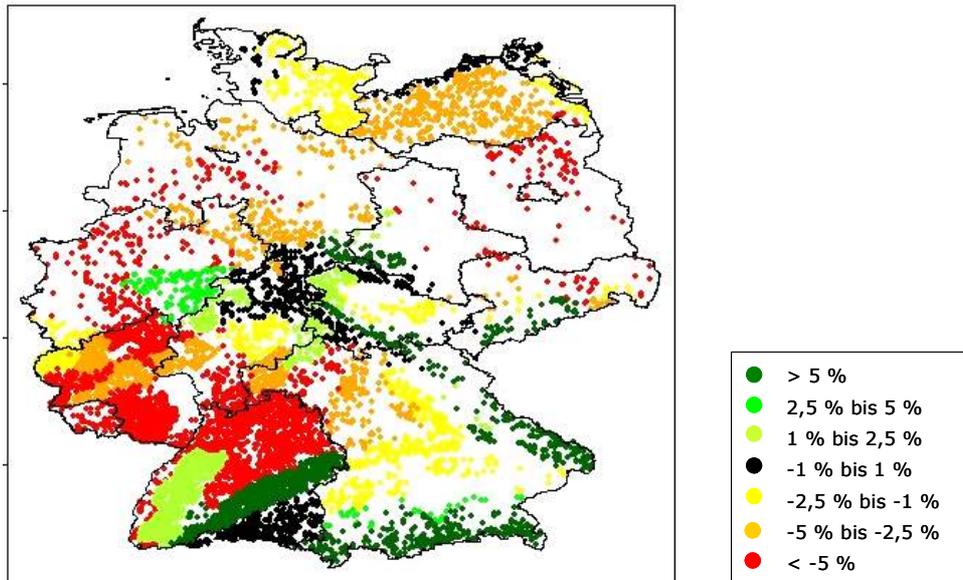


Abb. 4: Produktivitätsgewinne und –verluste auf den aktuellen BWI-Buchenstandorten in der Bundesrepublik Deutschland auf Wuchsgebietsebene unter dem Szenario A1B – trockene Variante zwischen Status quo und der Prognoseperiode 2071 bis 2100.

Auf der Wuchsgebietsebene werden aufgrund der unterschiedlichen BWI-Verdichtungsgebiete flächengewichtete Summen der relativen Produktionsveränderungen an jedem aktuellen BWI-Buchenvorkommen vom Status quo und der Prognoseperiode 2071 bis 2100 gebildet. Im Mittel beträgt die Produktivitätsveränderung -0,6% für die Bundesrepublik Deutschland, auf Wuchsgebietsebene zeigen sich die starken regionalen Unterschiede mit Verlusten von mehr als 5% aber auch Gewinnen von über 5%.

Die negative Wirkung zunehmender Trockenheit zeigt sich beispielhaft im Wuchsgebiet Oberrheinisches Tiefland und Rhein-Main-Ebene. Das Klimamodell WETTREG sagt für dieses Wuchsgebiet unter dem Szenario A1B – trockene Variante ein Absinken der klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationszeit von heute -334 mm auf -526 mm in der Periode 2071 bis 2100 voraus (-58%). Die Temperatursumme steigt in dieser Bilanz um 15 %. Das dramatisch verstärkte Wasserdefizit resultiert in einem prognostizierten Rückgang der Produktivität der Baumart Buche in diesem Wuchsgebiet von -7,6 % (Mittelhöhenbonität von 30,3 m auf 28,0 m).

Die gegenläufige Tendenz einer positiven Wirkung des projizierten Temperaturanstieges ist im Wuchsgebiet Harz feststellbar. Der leistungsfördernde Effekt der 21%-igen Temperatursummensteigerung in der Vegetationszeit bis 2100 überkompensiert den negativen Effekt durch das Absinken der klimatischen Wasserbilanz von -184 mm auf -363 mm. Insgesamt wird für die heutigen Buchenstandorte im Wuchsgebiet Harz eine Produktivitätssteigerung von im Mittel 8,8 % prognostiziert (Mittelhöhenbonität von 29,7 m auf 32,2 m).

4 Diskussion und Ausblick

Die Modellierung des Standort-Leistungs-Bezuges mit Hilfe verallgemeinerter additiver Modelle unter Berücksichtigung nicht-linearer Effekte stellt einen flexiblen Ansatz dar, die unterschiedlichen klimatischen und bodenkundlichen Einflussfaktoren simultan zu quantifizieren. Dies ermöglicht eine Ursachenanalyse der prognostizierten Leistungsminderungen bzw. -steigerungen. Desweiteren können die unterschiedlichen, baumartspezifischen Reaktionen auf sich verändernde Klimabedingungen verglichen werden, um quantitative Aussagen für eine Entscheidungsunterstützung in der waldbaulichen Planung zu ermöglichen.

An die Datenbasis für das statistische Modell wurde die Anforderung gestellt, dass möglichst alle klimatischen Kombinationen innerhalb Deutschlands von kalt-nass über warm-nass und warm-trocken vertreten sind. Nur so ist gewährleistet, dass sich im Rahmen von Szenariorechnungen unter Klimawandel die Prognosen möglichst lange im Parametrisierungsbereich bewegen. Trotzdem erreichen die Modelle unter extremen Klimaszenarien und bei langen Prognosezeiträumen den Extrapolationsbereich. Die nicht-linearen Splinefunktionen gewährleisten hier durch die Selektion der Basisdimension jedoch eher „konservative“ Prognosen, d.h. kein steiles Ansteigen oder Abfallen der Effekte. So nähert sich im oberen Temperatursummenbereich der Effekt einer Asymptote (vgl. Abb. 1a). Der Effekt der klimatischen Wasserbilanz bricht bei zunehmenden Wasserdefizit im Extrapolationsbereich nicht drastisch ein, sondern setzt den beobachteten Trend trotz sehr breiter Konfidenzintervalle kontinuierlich fort (vgl. Abb. 1b).

Die sehr allgemeinen Ergebnisse der Abschnitte 3.3.1 und 3.3.2 dienen in erster Linie dazu, die Analysemöglichkeiten der klimasensitiven Standort-Leistungs-Modelle zu demonstrieren. Für konkrete waldbauliche Empfehlungen müssen die Untersuchungsgebiete entsprechend der jeweiligen Fragestellung feiner

untergliedert werden, z.B. würde man im Beispiel des Abschnittes 3.3.1 zwischen der West- und Ostabdachung des Schwarzwaldes differenzieren und die Datengrundlage der aktuellen baumartspezifischen Standorte um potenziell für die entsprechende Baumart geeignete Standorte erweitern, um potenzielle Flächenverluste bzw. –gewinne quantifizieren zu können.

Die relativ kurze Zeitspanne weniger Jahrzehnte, für die eine drastische Temperaturerhöhung bzw. dramatischer Rückgang der Sommerniederschläge in Mitteleuropa projiziert wird (IPCC, 2007), stellt die klimasensitive Standort-Leistungs-Modellierung vor große Probleme. Während Analogieschlüsse -die zukünftigen klimatischen Bedingungen eines Gebiet gleichen den heutigen Klimabedingungen eines anderen Gebietes- sowohl mit Hilfe statistischer als auch ökophysiologischer Modelle leicht durchführbar sind (vgl. z.B. PUSSINEN et al., 2009, KRAMER et al., 2010), gibt es keine Beobachtungen, die z.B. eine Temperaturerwärmung um mehrere °C innerhalb einer Baumgeneration beschreiben. Die zeitliche Dynamik des projizierten Klimawandels zeigt somit eine klare Modellgrenze auf. Wie Wälder auf diese rasante zeitliche Dynamik reagieren, kann mit statistischen Modellen nicht abgebildet werden und etwaige Anpassungsmechanismen können auch in ökophysiologischen Modellen derzeit nur unzureichend integriert werden (WEISKITTEL et al., 2010).

Die vorgestellten statistischen Standort-Leistungsmodelle bieten eine größtmögliche Präzision (Standardfehler) und geringe Verzerrung (Bias) bei der Beschreibung der Antwortvariablen (VANCLAY, 1994), während ökophysiologische Modellansätze den Vorteil eines besseren Verständnisses des kausalen Wirkungsgefüges und damit einer größeren Verallgemeinerbarkeit haben (SHARPE, 1990). Ziel der Weiterentwicklung klimasensitiver Standort-Leistungs-Modelle ist ein Hybridansatz, der die Vorteile beider Modellphilosophien vereinigt (LANDSBERG, 2003; PINJUV, 2008; WEISKITTEL et al., 2010). Hybridmodelle enthalten mechanistisch modellierte Umweltkomponenten, die in ein empirisches Wachstumsmodell integriert werden. Erste Beispiele in der Hybridmodellierung sind vielversprechend (z.B. PINJUV et al., 2006; WEISKITTEL et al., 2010).

Im Fall der klimasensitiven Standort-Leistungs-Modellierung erscheint es insbesondere notwendig, ökophysiologische Erkenntnisse zu Trockenstressreaktionen in einen Hybridansatz zu integrieren. Desweiteren soll versucht werden, die erklärende Variable CO₂-Konzentration ebenfalls in einem Hybridmodell zu verwenden. Viele Untersuchungen quantifizieren den Effekt erhöhter CO₂-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; HANDA et al., 2006). Die Verwendung der CO₂-Konzentration als erklärende Variable in einer niedersächsischen Variante des vorgestellten empirischen Standort-Leistungs-Modells resultieren in deutlich höheren Bestimmtheitsmaßen, allerdings führten Prognosen zu unrealistisch hohen Mittelhöhenbonitäten im Extrapolationsbereich (vgl. ALBERT und SCHMIDT, 2010).

Die in diesem Beitrag dargestellten Ergebnisse beruhen auf der Projektion eines Klimaszenario, die mit einem regionalen Klimamodell berechnet wurde. Waldbauliche Schlussfolgerungen und verallgemeinernde Aussagen sind auf dieser Basis allein nicht zulässig. Vielmehr müssen für eine verantwortungsvolle Entscheidungsunterstützung für die Forst- und Holzwirtschaft Ensemblerechnungen mehrerer Klimamodelle und Klimaszenarien durchgeführt werden. Nur so lassen sich sichere Prognosekorridore erstellen und mögliche Modellfehler und Unsicherheiten in der Vorhersage der Klimaveränderung abfangen (BECKER, 2009; WALKENHORST u. STOCK, 2009).

Die Forstplanung hatte immer Entscheidungen unter Unsicherheit zu treffen. Aber bisher zielte die Waldbewirtschaftung immer auf die Anwendung bewährter Maßnahmen der nachhaltigen Waldnutzung. Vor dem Hintergrund des rasanten anthropogen verursachten Klimawandels fordern neuerdings Experten einen Paradigmenwechsel hin zu einer proaktiven Waldbewirtschaftung, die noch mehr die erhöhten Unsicherheiten und größeren Risiken berücksichtigt und auf Veränderungen schnell und innovativ reagiert (CARLE et al., 2008).

5 Zusammenfassung

Das vorgestellte Forschungsvorhaben ist der waldwachstumskundliche Teil des BMBF-Verbundprojektes „Anpassungsstrategien für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung unter sich wandelnden Klimabedingungen – Decision Support System Wald und Klimawandel (DSS-WuK)“⁶. Ziel ist die klimasensitive Modellierung des Standort-Leistungs-Bezuges für die Baumarten Buche, Eiche, Fichte, Kiefer und Douglasie. Der verallgemeinerte additive Modellansatz ermöglicht die Quantifizierung linearer und nicht-linearer Effekte der Einflussgrößen Temperatursumme und klimatische Wasserbilanz in der Vegetationszeit, Bodennährstoffe, nutzbare Feldkapazität und Stickstoffdeposition sowie der geografischen Lage auf die baumartspezifische Standortleistungsfähigkeit. Die Modelle sind für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland parametrisiert. Die klimasensitiven Standort-Leistungs-Modelle dienen dazu, das Wuchspotenzial verschiedener Baumarten für waldbauliche Entscheidungen zu vergleichen. Die Veränderung der Standortleistungsfähigkeit unter Klimawandel wird in Szenariosimulationen exemplarisch dargestellt.

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 Suttmöller danken wir für die Berechnung der Werte der Klimavariablen und Herrn Ahrends für die Bereitstellung der Stickstoffdepositionsraten, der Bodennährstoffinformationen und der nutzbaren Feldkapazität.

Literatur

- AHRENDTS, B., MEESENBERG, H., JANSEN, M. AND 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.
- AHRENDTS, B., 2010: Entwicklung eines dynamischen Standortmodells auf der Basis flächenhafter Standortdaten. 3. Zwischenbericht des BMBF-Verbundprojektes „Anpassungsstrategien für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung unter sich wandelnden Klimabedingungen – Decision Support System Wald und Klimawandel“. S. 10-19.
- AINSWORTH, E.A. AND LONG, S.P., 2005. What have we learned from 15 years of free air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytol.*, 165: pp. 351-372.
- AK STANDORTSKARTIERUNG, 1996. Forstliche Standortaufnahme. AG Forsteinrichtung, 5th edition, IHW Verlag Eching. 352 S.
- ALVETEG, M., WALSE, C. AND WARFVINGE, P., 1997. Reconstructing Historic Atmospheric Deposition and Nutrient Uptake from Present Day Values Using MAKEDEP. *Water, Air, and Soil Pollution*, 104: pp. 269-283.
- ALBERT, M. AND 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)
- 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.-07.05.2008. S. 32-43.
- BECKER, P., 2009: Präsentation auf dem KlimaMORO-Expertenworkshop „Regionale Klimamodellierung für Anpassungsstrategien“, 05.10.2009 in Bonn.
- BREZGER, A., 2005: Bayesian P-Splines in Structured Additive Regression Models. Dissertation an der Fakultät für Mathematik, Informatik und Statistik der LMU München. 183 S.
- CARLE, J., LOBOVIKOV, M., HANELL, B., KUSHLIN, A., SCHOENE, D. AND BERNIER, P., 2008. Adaptation of Forests and Forest Management to Changing Climate with Emphasis on Forest Health: A Review of Science, Policies and Practices. Conference Report. <http://www.forestadaptation2008.net/home/en/>
- CZAIKOWSKI, T., AHRENDTS, B. UND 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.
- ELFVING, B. AND 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: SPIECKER, H., MIELIKÄINEN, K., KÖHL, M., AND SKOVSGAARD, J.P. (Eds.): *Growth Trends in European Forests*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. pp. 71-78.
- ELLENBERG, H., 1996: *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen*. 5. Auflage. Verlag Ulmer Stuttgart: 1095 S.
- HANDA, I.T., KÖRNER, C. AND HÄTTENSCHWILER, ST., 2006. Conifer stem growth at the altitudinal treeline in response to four years of CO₂ enrichment. *Global Change Biology*, 12: pp. 2417-2430.
- HASTIE, T.J. AND TIBSHIRANI, R.J., 1990: *Generalized Additive Models*. Monographs on Statistics and Applied Probability 43. Chapman&Hall, London. 335 S.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2007: *Climate Change 2007: Synthesis Report*. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf: 73 S.
- JANSEN, M; DÖRING, C; AHRENDTS, 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.
- KÖRNER, C., 2006. Plant CO₂ responses: an issue of definition, time and resource supply. *New Phytol.*, 172: pp. 393-411.
- KÖRNER, C., ASSHOFF, R., BIGNUCOLO, O., HÄTTENSCHWILER, ST., KEEL, S.G., PELÁEZ-RIEDL, S., PEPIN, S., SIEGWOLF, R.T.W. AND ZOTZ, G., 2005. Carbon Flux and Growth in Mature Deciduous Forest Trees Exposed to Elevated CO₂. *Science*, 309: pp. 1360-1362.
- KRAMER, K., DEGEN, B., BUSCHBOM, J., HICKLER, T., THUILLER, W., SYKES, M.T. UND DE WINTER W., 2010: Modelling exploration of the future of European beech (*Fagus sylvatica*, L.) under climate change – Range, abundance, genetic diversity and adaptive response. *For.Ecol.and Mgmt* 259: pp. 2213-2222.
- LANDSBERG, J., 2003: Modelling forest ecosystems: state of the art, challenges, and future directions. *Can. J. For. Res.* 33: pp. 385-397.
- MEHTÄTALO, L., 2004: A longitudinal height-diameter model for Norway spruce in Finland. *Can.J.For.Res.*, Vol. 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.
- 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.
- NOWAK, R.S., ELLSWORTH, D.S. AND SMITH, S.D., 2004. Functional responses of plants to elevated atmospheric CO₂ – do photosynthetic and productivity data from FACE experiments support early predictions? *New Phytol.*, 162: pp. 253-280.
- PINJUV, G.L., MASON, E.G., AND WATT, M., 2006: Quantitative validation and comparison of a range of forest growth model types. *For. Ecol. and Manage.* 236: pp. 37-46.
- PINJUV, G.L., 2008: *Hybrid forest modelling*. VDM Verlag. 224 S.

- PUSSINEN, A., G.J. NABUURS, H.J.J. WIEGERS, G.J. REINDS, G.W.W. WAMELINK, J. KROS, J.P. MOL-DIJKSTRA, W. DE VRIES, 2009: Modelling long-term impacts of environmental change on mid- and high-latitude European forests and options for adaptive forest management. *ForEcolMgmt* 258: pp. 1806-1813.
- 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>
- RÖHLE, H., 1995: Zum Wachstum der Fichte auf Hochleistungsstandorten in Südbayern. Mitt. aus der Staatsforstverwaltung Bayerns, 48. Heft. 272 S.
- SCHADAUER, K., 1999: Oberhöhenbonität und Standort der Fichte nach Daten der Österreichischen Forstinventur. Mitteilungen der Forstl. Bundesversuchsanstalt Wien, Nr. 171: 135 S.
- SCHMIDT, M., 2008: Ein longitudinales Durchmesser-Höhenmodell für Fichte in Nordwestdeutschland. Jahrestagung des DVFFA, Sektion Ertragskunde, in Trippstadt vom 05. bis 07. Mai 2008.
- 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
- 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.
- SHARPE, P.J.H., 1990: Forest modelling approaches: compromises between generality and precision. In: Dixon, R.K., Mehdahl, R.S., Ruark, G.A., Warren, W.G. (eds.): Process modelling of forest growth responses to environmental stress. Timber Press: pp. 180 – 191.
- 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.
- SPIECKER, H., MIELIKÄINEN, K., KÖHL, M., AND SKOVSGAARD, J.P., 1996: Growth Trends in European Forests. European Forest Institute Research Report No. 5, Springer: 368.S.
- STERBA, H., 1995: Forest decline and increasing increments: a simulation study. *Forestry*, Vol. 68, No. 2: pp. 153-163.
- UMWELTBUNDESAMT, 2007: Neue Ergebnisse zu regionalen Klimaänderungen. Das statistische Regionalisierungsmodell WETTREG. <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/hintergrund/Regionale-Klimaaenderungen.pdf> : 27 S.
- VANCLAY, J.K., 1994. Modelling Forest Growth and Yield. Applications to Mixed Tropical Forests. CAB International, Wallingford UK: 312 pp.
- WALKENHORST, O. UND STOCK, M., 2009: Regionale Klimaszenarien für Deutschland. Eine Leseanleitung. E-Paper der Akademie für Raumforschung und Landesplanung (ARL), Nr. 6. 24 S.
- WEISKITTEL, A.R., MAGUIRE, D.A., MONSERUD, R.A., AND JOHNSON, G.P., 2010: A hybrid model for intensively managed Douglas-fir plantations in the Pacific Northwest, USA. *Eur J Forest Res* 129: pp. 325–338
- WILPERT, K.V., 1990: [Die Jahrringstruktur von Fichten in Abhängigkeit vom Bodenwasserhaushalt auf Pseudogley und Parabraunerde : ein Methodenkonzept zur Erfassung standortsspezifischer Wasserstrebdisposition](#). Freiburger bodenkundl. Abhandlungen, Nr.24: 184 S.
- WOOD, S.N., 2006. Generalized additive models: an introduction with R. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton: 391p.