

Erste Ergebnisse zur Modellierung des Standort-Leistungs-Bezuges der Baumart Fichte unter Klimawandel

Matthias Albert und Matthias Schmidt

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

1 Einleitung

Ziel dieser Untersuchung ist die klimasensitive Modellierung des Standort-Leistungs-Bezuges im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes „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.

Die klimasensitive Modellierung des Standort-Leistungs-Bezuges gliedert sich in die beiden Arbeitsschwerpunkte Schätzung der Veränderung der Höhenbonität (Standort-Leistungs-Modell) und die daraus abzuleitenden Entscheidungshilfen bei der Waldbauplanung. Herkömmliche Bonitierungssysteme unterstellen Konstanz der Standortfaktoren, die bereits seit mehreren Jahrzehnten nicht mehr gegeben ist (vgl. z.B. RÖHLE, 1995; STERBA, 1995; ELFVING und NYSTRÖM, 1996; SPIECKER ET AL., 1996; SCHADAUER, 1999). Zur Modellierung des Standort-Leistungs-Bezuges unter Klimawandel wird hier daher ein Bonitierungsansatz auf Basis der Arbeiten von MEHTÄTALO (2004) und SCHMIDT (2008) verwendet, der die Effekte sich ändernder Umweltbedingungen erfasst. Im Standort-Leistungs-Modell werden die Temperatur, der Niederschlag und die Evapotranspiration in der Vegetationszeit als relevante klimasensitive Standortparameter berücksichtigt.

Die Entscheidungshilfen bei der Waldbauplanung stützen sich auf dreidimensionale Ökogramme, in denen die Leistungsfähigkeit der Baumarten hinsichtlich der Standortfaktoren Temperatur und pflanzenverfügbares Wasser in der Vegetationszeit sowie Nährstoffversorgung der Böden dargestellt wird. Optimal- und Grenzbereiche der Baumarten in diesen Ökogrammen werden mit Hilfe des bedingten 10%-Quantils der Höhenbonität definiert, das über eine Quantilsregression als Funktion der Standortvariablen geschätzt wird (KOENKER, 2005, S. 311 ff). Auftretende nichtlineare Effekte werden auf der Basis von Regressionssplines modelliert.

Ein erstes klimasensitives Modell zur Schätzung der Höhenbonität für die Baumart Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) in Niedersachsen und daraus abgeleitete Optimal- und Grenzbereiche bezüglich der wirtschaftlichen Anbauwürdigkeit werden präsentiert.

2 Material und Methoden

Ertragskundliche Daten

Alle Betriebsinventurpunkte der Niedersächsischen Landesforsten mit Fichtenvorkommen (16.552 Probekreise) dienen als ertragskundliche Datengrundlage¹. Die Altersspreitung liegt bei einem Mittelwert von 70 Jahren zwischen 15 und 207, der Bereich des Grundflächenmittelstammes (dg) erstreckt sich von 7,1 bis 92,5 cm bei einem Mittelwert von 34,0 cm. Für jedes Fichtenvorkommen wird die Mittelhöhenbonität im Alter 100 mit dem longitudinalen Höhen-Durchmesser-Modell von SCHMIDT (2008) bestimmt. Die Schätzung der Bestandesoberhöhe im Bezugsalter 100 mit herkömmlichen Bonitierungssystemen, die konstante Standortverhältnisse voraussetzen, weist eine Verzerrung auf, da die beobachteten Bonitäten einen Trend über dem Alter aufweisen. Dieser Alterstrend wird u.a. durch die den Standort verändernden Stickstoffeinträge verursacht. Die verzerrte Bonitätsschätzung ist auf die nicht adäquate Abbildung des Wachstumstrends zurückzuführen und wird zusätzlich vom Bestandesalter zum Bonitierungszeitpunkt beeinflusst. Die Bonitierungsmethode von SCHMIDT (2008) trennt diesen Alterstrend von anderen Standorteffekten und ermöglicht somit eine alterstrendbereinigte Bonitätsschätzung. Es wird keine Konstanz der Standortverhältnisse vorausgesetzt, was das Modell insbesondere im Kontext der Klimaveränderung geeignet erscheinen lässt. Abb. 1 zeigt die Herleitung der in dieser Untersuchung verwendeten Mittelhöhenbonität im Alter 100.

¹ Ausgenommen sind aufgrund noch nicht zur Verfügung stehender Daten die Niedersächsischen Forstämter Neuenburg und Oldendorf sowie Teile von Ahlhorn und Nienburg.
DVFFA – Sektion Ertragskunde, Jahrestagung 2008

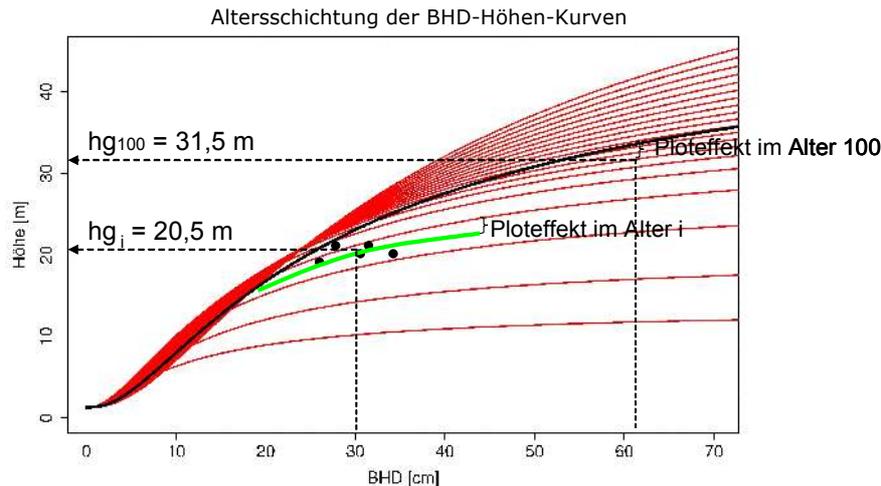


Abb. 1: Bonitierung mit dem longitudinalen Höhen-Durchmesser-Modell (SCHMIDT, 2008).

Das longitudinale Höhen-Durchmesser-Modell liefert eine altersgeschichtete Kurvenschar (Abb. 1). Über die Kalibrierung des Modells auf Probekreis- und Aufnahmeebene anhand gemessener Höhenwerte werden die plot- und aufnahmespezifischen Zufallseffekte, d.h. die Abweichungen der spezifischen Bestandeshöhenkurven vom sogenannten globalen Modell, geschätzt. Der Ploteffekt ist als unabhängig vom Aufnahmezeitpunkt bzw. Bestandesalter zu betrachten. Er erlaubt in Kombination mit dem auf das Alter 100 fortgeschriebenen globalen Höhen-Durchmesser-Modell die bestmögliche Schätzung der im Alter 100 zu erwartenden plotspezifischen Bestandeshöhenkurve. Die Kalibrierung des Modells wird durch seine Spezifikation als gemischtes Modell möglich (SCHMIDT, 2008). Der dg im Alter 100 wird im Anhalt an die Methodik von MEHTÄTALO (2004) ebenfalls über ein gemischtes Modell bzw. durch Kalibrierung geschätzt (SCHMIDT, 2008). Durch Einsetzen des dg in die Höhenkurve wird die zugehörige Mittelhöhe im Alter 100, also die Bonität, hergeleitet. Da die Schätzgenauigkeit für den dg auf Probekreisebene höher ist als für den Durchmesser eines Oberhöhenstammes wird anstelle der Ober- die Mittelhöhenbonität verwendet.

Standortsdaten

Die beiden Standortsfaktoren Bodennährstoffe und nutzbare Feldkapazität (nFK) wurden im Rahmen der Modellselektion auf ihren Einfluss hin überprüft. Die Bodennährstoffe werden durch die Nährstoffziffer der niedersächsischen Standortkartierung (von 1=arm bis 6=reich) klassifiziert. Die Informationen liegen für jeden Betriebsinventurpunkt vor. Die nutzbare Feldkapazität als wichtige Komponente der Gesamtwassermenge, die der Pflanze zur Verfügung steht, wurde nicht an den Inventurpunkten angesprochen. In einem ersten Näherungsschritt wird die nutzbare Feldkapazität daher aus der Bodenkundlichen Übersichtskarte 1:50.000 von Niedersachsen entnommen (NLfB, 2004).

Klimavariablen

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

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

3 Ergebnisse

3.1 Modellierung des Standort-Leistungs-Bezuges

Bisherige Standort-Leistungs-Modelle beruhen auf drei methodischen Ansätzen, nämlich (a) empirisch-statistischen Modellen wie z.B. den regressionsanalytischen Ansätzen von WYKOFF ET AL. (1982), STERBA ET AL. (1995) sowie KÄNDLER und RIEMER (2005), (b) theoretisch-qualitativen Modellen wie z.B. den von KAHN (1994) verwendeten Wirkungsfunktionen und (c) ökophysiologischen Prozessmodellen (vgl. u.a. BOSSEL, 1994; BUGMANN, 1997; MÄKELÄ, 2003).

In dieser Untersuchung wird der statistische Ansatz mit Hilfe verallgemeinerter additiver Modelle (vgl. HASTIE und TIBSHIRANI, 1990) bei der klima- und standortssensitiven Modellierung der Höhenbonität verfolgt. Folgende fünf Modelle werden formuliert und im Statistikpaket *R* (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2006) unter Verwendung der Bibliothek *mgcv* (WOOD, 2006) parametrisiert:

	R^2_{adj}	BIC	
$hg100_i = \alpha_1 + \text{Nähr}_i^T \beta + f_1(\text{WH}_i) + f_2(\text{Temp}_i) + f_3(\text{KJ}_i) + \epsilon_i$	0,24	78.436	[1]
$hg100_i = \alpha_1 + \text{Nähr}_i^T \beta + f_1(\text{KWB}_i) + \alpha_2 * n\text{FK}_i + f_2(\text{Temp}_i) + f_3(\text{KJ}_i) + \epsilon_i$	0,25	78.215	[2]
$hg100_i = \alpha_1 + \text{Nähr}_i^T \beta + f_1(\text{Prec}_i) + \alpha_2 * \text{Ep}_i + \alpha_3 * n\text{FK}_i + f_2(\text{Temp}_i) + f_3(\text{KJ}_i) + \epsilon_i$	0,27	77.914	[3]
$hg100_i = \alpha_1 + \text{Nähr}_i^T \beta + f_1(\text{Prec}_i) + \alpha_2 * \text{Ep}_i + f_2(n\text{FK}_i) + f_3(\text{Temp}_i) + f_4(\text{KJ}_i) + f_5(\text{RW}_i, \text{HW}_i) + \epsilon_i$	0,40	74.840	[4]
$hg100_i = \alpha_1 + \text{Nähr}_i^T \beta + \alpha_2 * \text{WH}_i + f_1(\text{Temp}_i) + f_2(\text{KJ}_i) + f_5(\text{RW}_i, \text{HW}_i) + \epsilon_i$	0,38	75.325	[5]

mit $hg100_i$ =Mittelhöhenbonität im Alter 100 an Stichprobenpunkt i [m], Nähr_i^T =Indikatorenvektor für Niedersächsische Nährstoffziffer, β =zu Nähr gehörender Parametervektor, WH_i =Wasserhaushalt in der Vegetationszeit (VZ) [mm], Temp_i =mittlere Temperatur in der VZ [°C], KJ_i =Keimjahr [Jahr], KWB_i =klimatische Wasserbilanz in der VZ [mm], $n\text{FK}_i$ =nutzbare Feldkapazität [mm], Prec_i =Niederschlagssumme in der VZ [mm], Ep_i =potenzielle Evapotranspiration in der VZ [mm], RW_i, HW_i =Lagekoordinaten, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ =Regressionskoeffizienten, f_1, f_2, f_3, f_4 =eindimensionale glättende Funktionen, f_5 =zweidimensionale glättende Funktion zur Beschreibung des räumlichen Trends.

Das Modell [1] enthält als erklärende Variablen die Nährstoffziffer als kategorische Standortsgröße und den Wasserhaushalt sowie die Temperatur als klimasensitive Standortvariablen, deren nicht-lineare Effekte mit Hilfe von glättenden Splines modelliert werden (vgl. WOOD, 2006). Die Variable Keimjahr beschreibt den Alterstrend der u.a. als Effekt der Düngung durch den Stickstoffeintrag interpretiert werden kann². Das einfachste Modell [1] beinhaltet direkt die Parameter Wasserhaushalt, Temperatur und Nährstoffe der drei Ökogramachsen. Die ertragskundlichen Ergebnisse des Standort-Leistungs-Modells können somit direkt zur waldbaulichen Fragestellung in Beziehung gesetzt werden, nämlich bei welchen Kombinationen der drei Standortvariablen die Fichte als anbauwürdig einzustufen ist.

Die Modelle [1] bis [3] unterscheiden sich danach, wie detailliert die einzelnen Komponenten des Wasserhaushalts berücksichtigt werden. Eine höhere Modellkomplexität erscheint sinnvoll, da z.B. unterschiedliche KWB- und nFK-Werte zu den gleichen WH-Werten führen aber unterschiedliche Bedingungen für das Baumwachstum beschreiben können. In Modell [4] wird zusätzlich eine zweidimensionale glättende Funktion zur Beschreibung des auftretenden räumlichen Trends integriert. Dieser räumliche Trend kann als Ersatz für die Effekte weiterer nicht erfasster Einflussfaktoren (z.B. Windgeschwindigkeit) interpretiert werden. Wie später gezeigt wird, führt die Modellierung des räumlichen Trends dazu, dass die Effekte der übrigen erklärenden Variablen klarere und aus Expertensicht plausiblere Verläufe zeigen. Das kann dahingehend interpretiert werden, dass nicht erfasste Variablen, die mit den Modellvariablen korreliert sind, zu einer Störung der Effekte führen. Ein besonderer Aspekt bei der Modellierung des räumlichen Trends ist die Bestimmung des optimalen Glättungsgrades. Je flexibler der räumliche Trend modelliert wird, desto stärker werden die Effekte störender, eventuell aber auch bereits im Modell integrierter Variablen erfasst. Die optimale Glättung wird üblicherweise über spezielle Kreuzvalidierungsverfahren ermittelt. Ziel einer optimalen Glättung ist die bestmögliche Beseitigung der Störvariableneffekte bei einer gleichzeitig objektiv hergeleiteten Klimasensitivität des Modells. Die Kreuzvalidierung zur Herleitung der optimalen Glättung, die letztlich auch für die eindimensionalen nicht-linearen Effekte erfolgen muss, ist das Ziel weiterer Untersuchungen.

Die deutliche Modellverbesserung durch die Modellierung des räumlichen Trends zeigt sich im korrigierten Bestimmtheitsmaß, insbesondere im Vergleich der Modelle [1] und [5]. Bei der Modellauswahl muss neben den Gütekriterien R^2_{adj} und Bayesian Information Criterion (BIC) auch die hohe Korrelation der erklärenden Variablen untereinander berücksichtigt werden, indem z.B. dem Modell [5] der Vorzug vor Modell [4] gegeben werden könnte ($r_{\text{Temp}, \text{Prec}} = -0,91$; $r_{\text{Temp}, \text{Ep}} = 0,87$; $r_{\text{Temp}, \text{KWB}} = -0,93$; $r_{\text{Temp}, \text{WH}} = -0,78$). Im Folgenden werden das Modell [4] mit

² Zum Zeitpunkt der Modellparametrisierung lagen noch keine regionalisierten Stickstoffdepositionswerte vor, so dass vorerst die Variable Keimjahr als Hilfsgröße verwendet wird.

den drei getrennt im Modell integrierten Komponenten des pflanzenverfügbaren Wassers und das Modell [5] mit der aggregierten Variablen Wasserhaushalt (vgl. Kapitel 3.2) näher vorgestellt.

Modell [4]:

Parameterkoeffizienten:

	Schätzwert	Std.Fehler	t-Wert	Pr(> t)
(Intercept)	39,46968	0,72866	54,17	<2e-16 ***
Nähr.ziff. 3	1,15887	0,07478	15,50	<2e-16 ***
Nähr.ziff. 4 ⁽¹⁾	1,96417	0,07680	25,58	<2e-16 ***
Ep	-0,02536	0,00164	-15,46	<2e-16 ***

Approximierte Signifikanz der glättenden Terme:

	edf	Est.rank	F	p-value
s(Prec)	8,310	9	22,568	< 2e-16 ***
s(nFK)	6,410	9	4,676	3.23e-06 ***
s(Temp)	8,760	9	104,763	< 2e-16 ***
s(KJ)	8,925	9	80,093	< 2e-16 ***
s(RW,HW)	28,724	29	122,181	< 2e-16 ***

Signif.klassen: 0 '***' 0,001 '***' 0,01 '**' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Standardfehler: 2,28 m

⁽¹⁾ Die Nährstoffziffern 5 und 6 wurden aufgrund der geringen Klassenbelegung der Klasse 4 zugeschlagen.

Im Modell [4] sind alle linearen und nicht-linearen Effekte hochsignifikant. Die Koeffizienten der linearen Terme sind bezüglich ihrer Wirkungsrichtung aus biologischer Sicht als plausibel zu beurteilen: je besser die Nährstoffversorgung und je geringer die Evapotranspiration sind, desto besser ist die Mittelhöhenbonität. Die nicht-linearen Effekte inklusive der punkweisen Prognoseintervalle (5% Irrtumswahrscheinlichkeit) sind in Abb. 2a und b dargestellt.

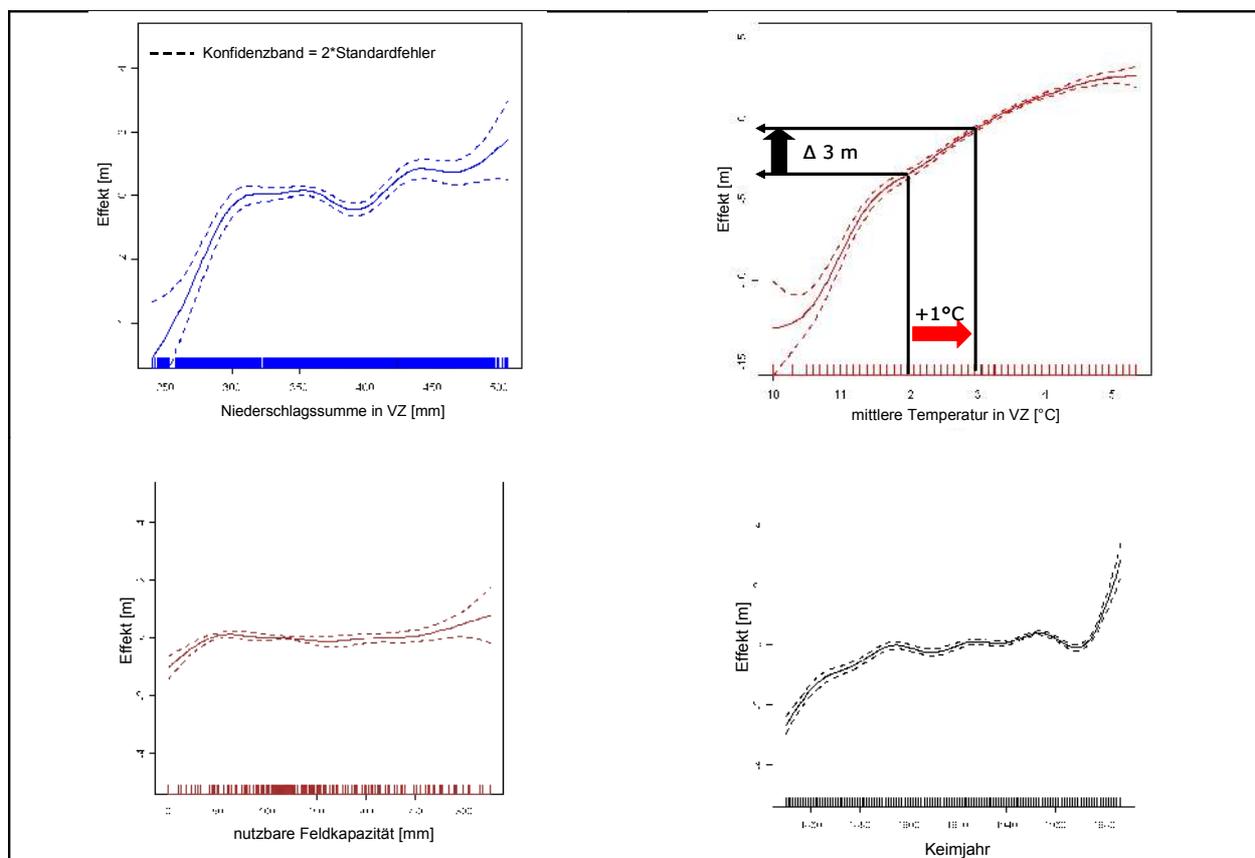


Abb. 2a: Nicht-lineare Effekte der Variablen Niederschlag, Temperatur, nutzbare Feldkapazität und Keimjahr auf die Mittelhöhenbonität der Baumart Fichte. Die gestrichelten Linien beschreiben punktwiese Prognoseintervalle (5% Irrtumswahrscheinlichkeit). Die Striche auf der Abszisse markieren Datensätze mit der entsprechenden Ausprägung.

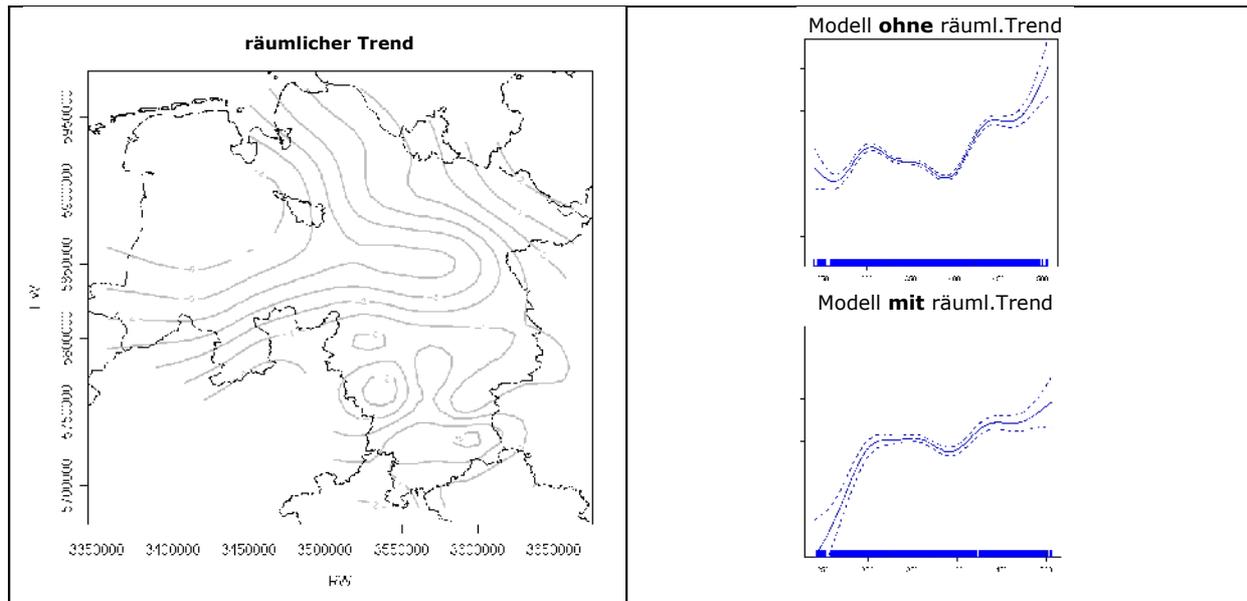


Abb. 2b: Nicht-linearer Effekt der Variablen Rechts- und Hochwert bzw. der räumlichen Lage (räumlicher Trend) auf die Mittelhöhenbonität der Baumart Fichte (links). Rechts: Effekt der Niederschlagssumme mit und ohne Berücksichtigung des räumlichen Trends (Modell [4] mit und ohne den Term $f_3(RW_i, HW_i)$).

Die Effektverläufe in Abb. 2 sind ebenfalls als qualitativ plausibel zu beurteilen. Für die Niederschlagssumme und mittlere Temperatur führt insbesondere ein Anstieg im niedrigen Wertebereich zu einem relativ starken Anstieg der Höhenbonität. Im Vergleich zeigt sich, dass der Temperatureffekt mit ca. 15 m Höhendifferenz im Wertespektrum wesentlich stärker ist als der Niederschlagseffekt mit ca. 6 m. In der Grafik des Temperatureffektes ist ferner illustriert, dass eine Temperaturerhöhung um 1 °C von 12 auf 13 °C bei sonst gleichbleibenden Standortsbedingungen in einer 3 m höheren Bonität resultiert. Durch den nicht-linearen Effekt wird abgebildet, dass die Bonitätsveränderung bei gleicher Temperaturveränderung stark vom Ausgangswert bestimmt wird. Die Auswirkungen der nutzbaren Feldkapazität auf die modellierte Höhenbonität fallen eher schwach aus. Auch der Effekt des Keimjahres ist über weite Bereiche vernachlässigbar, erst ab ca. 1975 tritt eine deutliche und anhaltende Verbesserung der Höhenbonitäten auf. Dies kann u.a. auf die Effekte der Stickstoffdeposition, der Erhöhung der Kohlendioxidkonzentration und der Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit auf ehemals devastierten Waldstandorten zurückzuführen sein. Da diese Einflüsse zum Zeitpunkt der Untersuchung nicht quantifiziert werden konnten, wurde als Ersatzgröße das Keimjahr verwendet. Schließlich ist für den Niederschlagseffekt die glättende Wirkung des räumlichen Trends erkennbar (Abb. 2, unten rechts). Erst mit im Modell integriertem räumlichen Trend ist der Verlauf des Niederschlagseffektes sinnvoll interpretierbar. Mit Hilfe von Modell [4] wird die Verschiebung der Fichtenbonität auf niedersächsischen Standorten unter veränderten Klimabedingungen prognostiziert (Abb. 3).

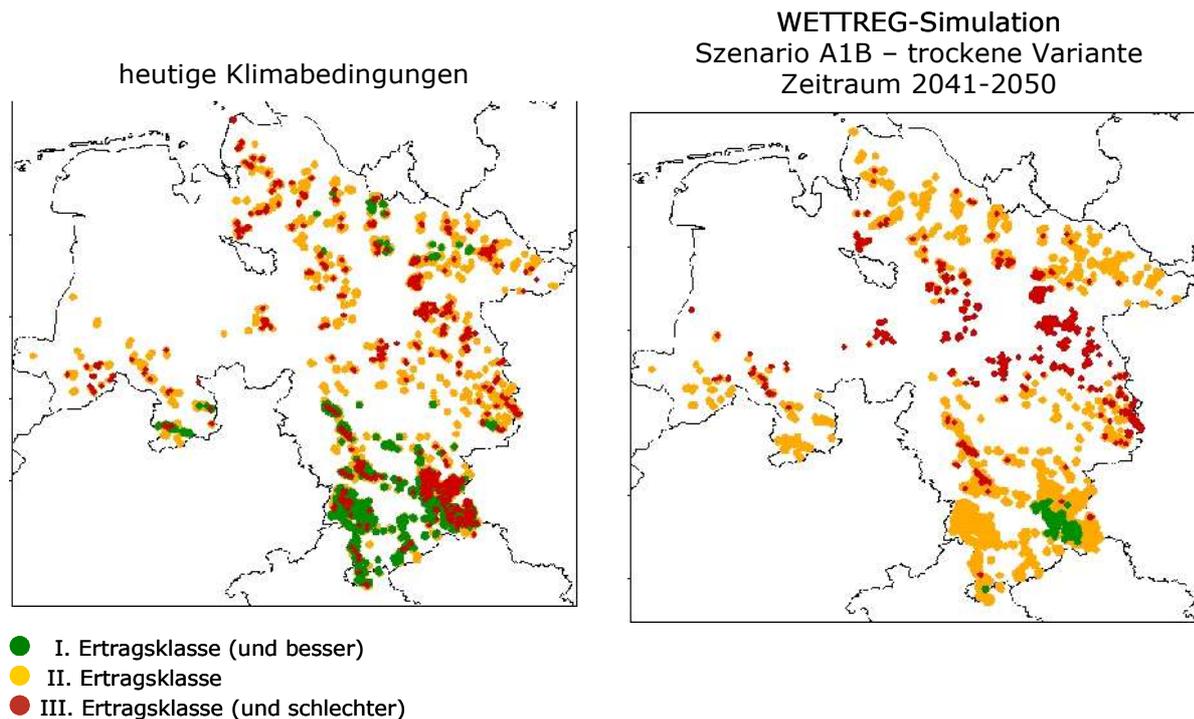


Abb. 3: Bonitätsänderung durch Klimawandel für heute mit Fichte bestockte Standorte in Niedersachsen.

In Abb. 3 (links) sind die heute mit Fichte bestockten Betriebsinventurpunkte in drei Bonitätsstufen klassifiziert dargestellt. Die Klimabedingungen für den Zeitraum 2041-2050 wurden mit dem regionalen Klimamodell WETTREG unter der trockenen Variante des Szenarios A1B (IPCC, 2007) prognostiziert und die Auswirkungen auf die Bonitäten abgeschätzt (Abb. 3, rechts). Zwei Tendenzen sind feststellbar. Zum einen führt die unterstellte Veränderung der klimatischen Standortfaktoren zu einer Bonitätsverschlechterung vor allem im niedersächsischen Bergland (ohne Harz) und in den Wuchsgebieten Mittel-Westniedersächsisches und Ostniedersächsisches Tiefland, was auf eine erhöhte Evapotranspiration und verringerte Niederschläge in der Vegetationszeit zurückzuführen ist. Im Solling und Bramwald führt die Klimaveränderung aber auch zu einer Nivellierung der Bonitäten. Einerseits kommt die Bonität I nicht mehr vor, andererseits verbessern sich die Standorte in den Hochlagen von Bonität III zu Bonität II. Die deutlichsten Bonitätsverbesserungen werden im Harz auftreten, wo die höheren Temperaturen und eine verlängerte Vegetationszeit bessere Wuchsbedingungen ermöglichen.

3.2 Herleitung von Optimum- und Grenzbereichen

Die Mittelwertregressionen der Modelle [1] bis [5] führen zu belastbaren Schätzungen der Höhenbonitäten und insbesondere zur Quantifizierung der Bonitätsveränderungen aufgrund sich wandelnder Klimabedingungen. Zur Modellierung von Extremwerten der Höhenbonitäten, also der oberen und unteren Leistungsfähigkeit einer Baumart unter gegebenen Standortbedingungen, erscheint die Mittelwertregression eher ungeeignet, wenn man davon ausgeht, dass die Residualstreuung weder normal noch homogen verteilt ist. Die Verwendung von Quantilsregressionen, z.B. die Modellierung des 10%-Quantils, ermöglicht hingegen die direkte Schätzung der oberen und unteren Leistungsfähigkeit und damit die Quantifizierung von Optimum- und Grenzbereichen.

Das herzuleitende dreidimensionale Ökogramm mit den klimasensitiven Variablen pflanzenverfügbares Wasser und Temperatur sowie dem Standortfaktor Bodennährstoffe soll als waldbauliche Entscheidungshilfe bei der Baumartenwahl dienen. Das Entscheidungskriterium ist die Wuchsleistung der Baumart auf dem gegebenen Standort und nicht wie bei den Ökogrammen von ELLENBERG (1996) die Konkurrenzstärke, wobei zwischen den Relationen in der Wuchsleistung und der Konkurrenzstärke natürlich Zusammenhänge bestehen. Die Optimum- und Grenzbereiche für dieses Ökogramm der leistungsbezogenen Anbauwürdigkeit werden mit Hilfe eines Quantilsregressionsmodells unter Verwendung der Bibliothek *quantreg* (KOENKER, 2007) hergeleitet. Als erklärende Variablen dienen die drei Ökogrammgrößen. Aufgrund von bestimmten technischen Beschränkungen, die insbesondere die Spezifizierung von Regressionssplines in *R* betreffen, werden bei der Modellparametrisierung der Quantilsregression Informationen aus dem verallgemeinerten additiven Modell [5] der Mittelwertregression zur Quantifizierung des Standort-Leistungs-Bezuges herangezogen. Innerhalb der Quantilsregression werden Regressionssplines zur Beschreibung nicht-linearer Effekte verwendet, da die technischen Möglichkeiten zur Verwendung von glättenden Splines noch stark eingeschränkt sind.

Die folgende Übersicht und Abb. 4 verdeutlichen die Modelleffekte und statistischen Kennziffern des Mittelwertmodells [5]:

Modell [5]:**Parameterkoeffizienten:**

	Schätzwert	Std.Fehler	t-Wert	Pr(> t)	---
(Intercept)	2,816e+01	7,112e-02	395,93	< 2e-16	***
Nähr.ziff. 3	1,223e+00	7,542e-02	16,22	< 2e-16	***
Nähr.ziff. 4 ⁽¹⁾	2,076e+00	7,680e-02	27,03	< 2e-16	***
WH	1,862e-03	3,657e-04	5,09	3,61e-07	***

Approximierte Signifikanz der glättenden Terme:

	edf	Est.rank	F	p-value	---
s(Temp)	8,799	9	153,37	<2e-16	***
s(KJ)	8,928	9	72,23	<2e-16	***
s(RW,HW)	28,836	29	136,96	<2e-16	***

Signif.klassen: 0 '***' 0,001 '***' 0,01 '**' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Standardfehler: 2,32 m

⁽¹⁾ Die Nährstoffziffern 5 und 6 wurden aufgrund der geringen Klassenbelegung der Klasse 4 zugeschlagen.

Auch in Modell [5] erweisen sich sämtliche Modellparameter als hochsignifikant. Die mit glättenden Splines modellierten nicht-linearen Effekte der Temperatur, des Keimjahres und der modellierte räumliche Trend sind den entsprechenden Verläufen des Modells [4] sehr ähnlich (vgl. Abb. 2 und 4).

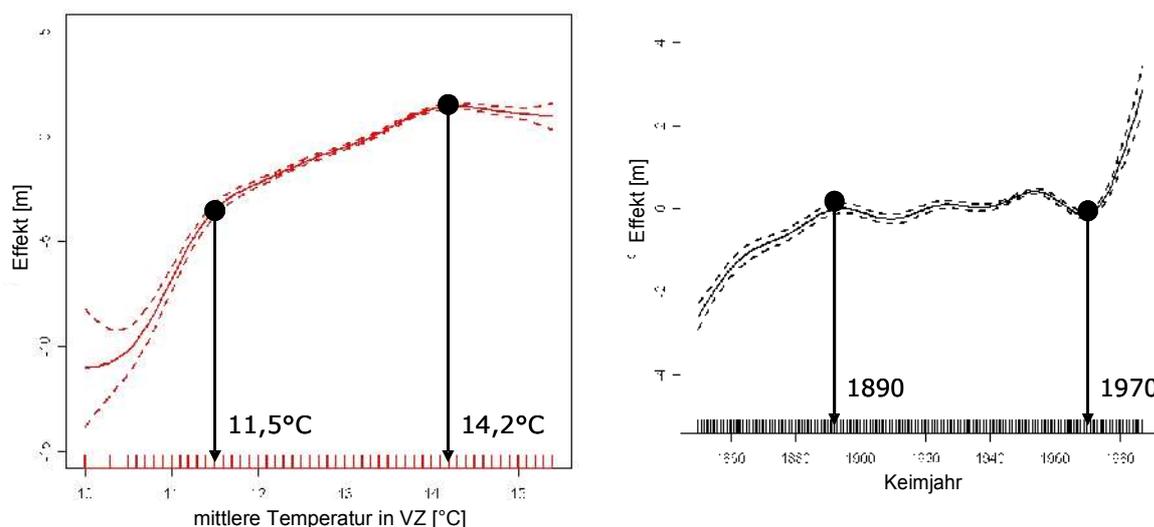


Abb. 4: Nicht-lineare Effekte der Temperatur und des Keimjahres auf die Mittelhöhenbonität der Baumart Fichte. Die dunklen Punkte markieren die Werte, an denen Knoten für die Regressionssplines der Quantilsregression gesetzt wurden. Die gestrichelten Linien beschreiben punktweise Prognoseintervalle (5% Irrtumswahrscheinlichkeit). Die Striche auf der Abszisse markieren Datensätze mit der entsprechenden Ausprägung.

Gibt man innerhalb der Quantilsregression für die Regressionssplines Knoten vor, die anhand der Verläufe der glättenden Splines der Mittelwertregression aus Modell [5] bestimmt wurden (vgl. Abb. 4), dann führt dies im Modell [5a] zu einer stärkeren Objektivierung der ansonsten subjektiven Auswahl der Knoten. Das Quantilsregressionsmodell [5a] ist wie folgt definiert:

$$hg100_{10\%-Q_i} = \alpha_1 + Nähr_i^T \beta + \alpha_2 * WH_i + f_1(Temp_i) + f_2(KJ_i) + \epsilon_i \quad [5a]$$

mit $hg100_{10\%-Q_i}$ = 10%-Quantil der Mittelhöhenbonität im Alter 100 an Stichprobenpunkt i [m], $Nähr_i^T$ = Indikatorenvektor für Niedersächsische Nährstoffziffer für Stichprobenpunkt i , β = zu Nähr gehörender Parametervektor, WH_i = Wasserhaushalt in der Vegetationszeit (VZ) [mm], $Temp_i$ = mittlere Temperatur in der VZ [°C], KJ_i = Keimjahr [Jahr], α_1, α_2 = Regressionskoeffizienten, f_1, f_2 = eindimensionale glättende Funktionen.

Der Übertragung der Knoten aus dem verallgemeinerten additiven Modell [5] in die Quantilsregression liegt die Annahme zugrunde, dass die stärkeren Änderungen der Steigung in den Effektverläufen der Mittelwertregression

und der Quantilsregression für das 10%-Quantil an den selben Datenpunkten erfolgen. Da die Schätzung des Intercepts aufgrund der speziellen Spezifikation der Regressionssplines in *R* eine große Unsicherheit aufweist, wurde anstelle des Intercepts α_1 eine Konstante in das Modell integriert. Als Konstante wurde das 0,1%-Quantil der beobachteten Mittelhöhenbonitäten (18,2 m) verwendet. Voruntersuchungen zeigten, dass sich dies neben der objektivierten Knotenauswahl ebenfalls positiv auf die Modellgüte auswirkt. Im Folgenden werden die Modelleffekte und einige statistische Kennziffern angegeben:

Modell [5a]

Koeffizienten:

	Schätzwert	Std.Fehler	t-Wert	Pr(> t)
Konstante	18,2			
Nähr.ziff. 1 u. 2	-21,23608	3,35922	-6,32172	0,00000
Nähr.ziff. 3	-19,28271	3,34954	-5,75682	0,00000
Nähr.ziff. 4,5 u. 6	-18,26188	3,35436	-5,44422	0,00000
WH	0,00124	0,00053	2,33050	0,01979
bs(Temp, knots = c(11,5, 14,2))1	20,21471	3,86631	5,22842	0,00000
bs(Temp, knots = c(11,5, 14,2))2	23,32112	3,16266	7,37390	0,00000
bs(Temp, knots = c(11,5, 14,2))3	27,02979	3,47541	7,77743	0,00000
bs(Temp, knots = c(11,5, 14,2))4	22,86510	3,32087	6,88527	0,00000
bs(Temp, knots = c(11,5, 14,2))5	22,37281	3,39997	6,58029	0,00000
bs(KJ, knots = c(1890, 1970))1	2,09708	0,49457	4,24024	0,00002
bs(KJ, knots = c(1890, 1970))2	1,76332	0,39696	4,44212	0,00001
bs(KJ, knots = c(1890, 1970))3	3,76862	0,42604	8,84567	0,00000
bs(KJ, knots = c(1890, 1970))4	3,37801	0,35699	9,46256	0,00000
bs(KJ, knots = c(1890, 1970))5	9,61917	0,90020	10,68556	0,00000

Standardfehler: 2,62 m

Die Koeffizienten der Nährstoffziffern sind biologisch plausibel interpretierbar. Zwischen den zu einer Gruppe zusammengefassten Nährstoffziffern 1 und 2 und der Nährstoffziffer 3 beträgt der Höhenbonitätsunterschied etwa 2 m. Die Gruppe der Nährstoffziffern 4 bis 6 weist eine Bonitätsverbesserung von 1 m gegenüber der Nährstoffziffer 3 auf. Eine Zunahme des pflanzenverfügbaren Wasser (WH) um 100 mm steigert die Höhenbonität um ca. 0,1 m (vgl. auch Abb. 5). Trotz dieses sehr schwachen Effektes ist der Parameter im Modell hochsignifikant. Die nicht-linearen Effekte der Variablen Temperatur und Keimjahr sind ebenfalls hochsignifikant. Vier Auffälligkeiten sind erkennbar (Abb. 5). Erstens sind die Prognoseintervalle (10% Irrtumswahrscheinlichkeit) bei allen Effekten sehr breit. Als Grund kann hierfür vermutet werden, dass die Regressionssplines im Minimum des Datenbereichs verankert sind (technisches Problem der Definition von Regressionssplines in *R*) und dadurch die Schätzung des Interceptes bzw. der Effekte von kategorischen Variablen (Nährstoffziffer) sehr unsicher ist. Die zweite Auffälligkeit ist ebenfalls durch die Verankerung der Regressionssplines für Temperatur und Keimjahr im Minimum mit dem Funktionswert Null verursacht. Der steile Anstieg des Effektes im niedrigen Wertebereich der erklärenden Variablen, insbesondere bei der Temperatur, muss daher zumindest teilweise als Artefakt gewertet werden. Drittens ist der überragende Einfluss des Temperatureffektes mit ca. 25 m Höhenbonitätsdifferenz zwischen Minimum- und Maximumtemperatur im Vergleich zu den relativ geringen Beiträgen der übrigen Modellparameter zur Höhenbonität bemerkenswert. Als vierter Punkt sei erwähnt, dass der extrem steile Anstieg des Keimjahreffektes ab 1980 nicht plausibel erscheint. Bei der Herleitung der Optimum- und Grenzbereiche unter der Fragestellung der Baumartenwahl bei Neubegründung wird daher vorerst das Keimjahr konstant auf 1980 gesetzt und der Effekt somit bei ca. 4,5 m (gegenüber dem Wert von 1850) fixiert.

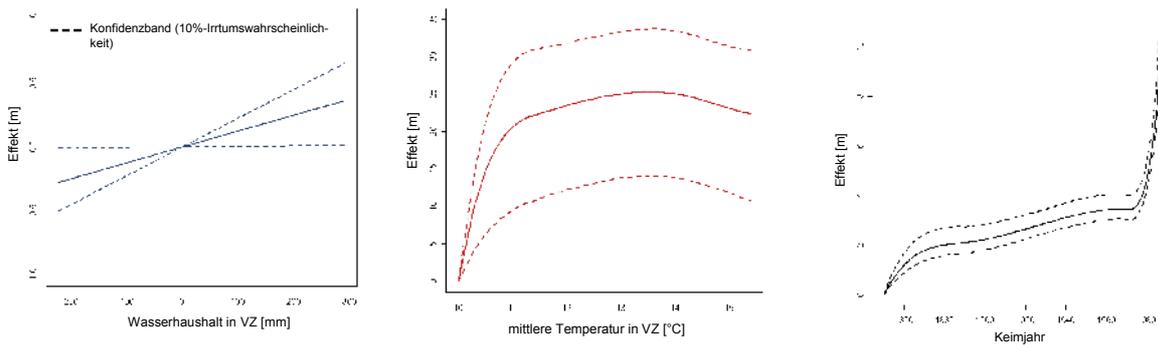


Abb. 5: Linearer Effekt des Wasserhaushalt und nicht-lineare Effekte der Temperatur und des Keimjahrs auf das 10%-Quantil der Mittelhöhenbonität der Baumart Fichte. Die gestrichelten Linien beschreiben punktweise Prognoseintervalle (10% Irrtumswahrscheinlichkeit).

Zur Herleitung der Optimum- und Grenzbereiche wird mit Modell [5a] das 10%-Quantil der Mittelhöhenbonität für 6032 nicht im Parametrisierungsdatensatz enthaltene Standorte prognostiziert (Abb. 6a und b).

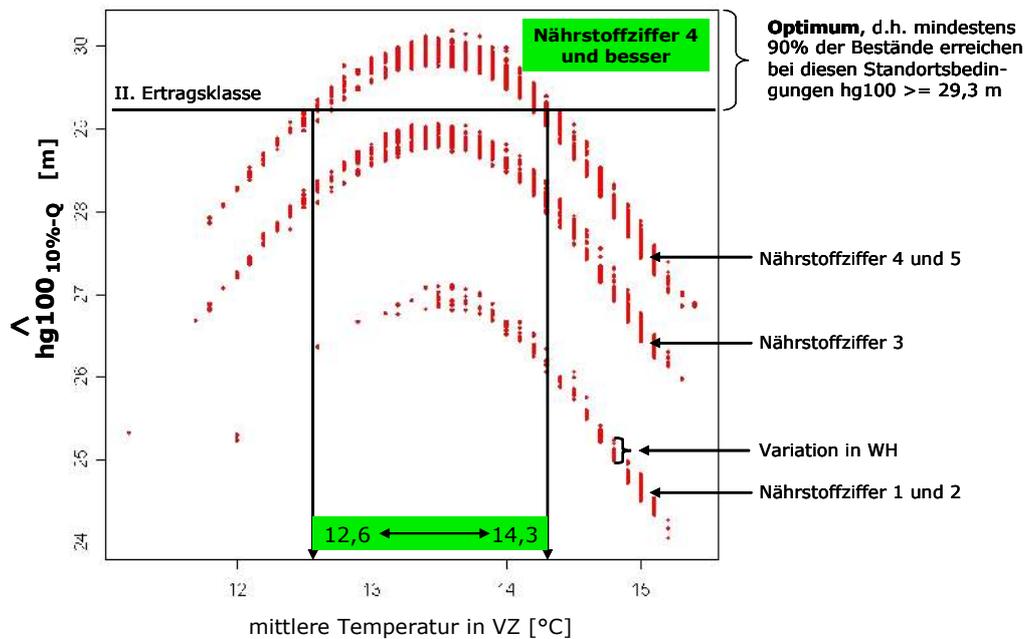


Abb. 6a: Herleitung des Optimumbereichs der leistungsbezogenen Anbauwürdigkeit der Baumart Fichte.

In Abb. 6a sind die Schätzwerte für das 10%-Quantil der Bonität in Abhängigkeit von der mittleren Temperatur, des Wasserhaushalt in der Vegetationszeit sowie der Bodennährstoffe dargestellt. Jeder Punkt markiert damit den Bonitätswert, den 90% der unter diesen Standortsbedingungen stockenden Bestände mindestens erreichen. Die drei Punktbänder werden durch die unterschiedlichen Effekte der verschiedenen Nährstoffziffern hervorgerufen. Die bedingte Streuung zu einer Temperatur im jeweiligen Punktbereich wird durch die Variation im Wasserhaushalt hervorgerufen. Für die Ableitung von Optimum- und Grenzbereichen müssen Grenzwerte definiert werden. Als Grenzwert für den Optimumbereich wurde gutachtlich eine Mittelhöhe von 29,3 m im Alter 100 (entspricht einer II. Ertragsklasse) als unter ökonomischen Gesichtspunkten minimal zu erreichender Wert definiert. Es ist ersichtlich, dass der resultierende Optimumbereich der leistungsbezogenen Anbauwürdigkeit der Baumart Fichte mindestens die Nährstoffziffer 4 voraussetzt und zusätzlich die Temperatur in der Vegetationszeit im Intervall von 12,6 bis 14,3 °C liegen muss. Bei der unteren Grenztemperatur von 12,6 °C muss der Wasserhaushalt mindestens 113 mm in der Vegetationszeit betragen und bei der oberen Grenztemperatur von 14,3 °C mindestens 55 mm. Sobald man sich von diesen Grenzwerten nur wenig in Richtung günstigerer Temperaturwerte bewegt, hat der Wasserhaushalt keinen Einfluss auf die Abgrenzung des Optimumbereiches mehr.

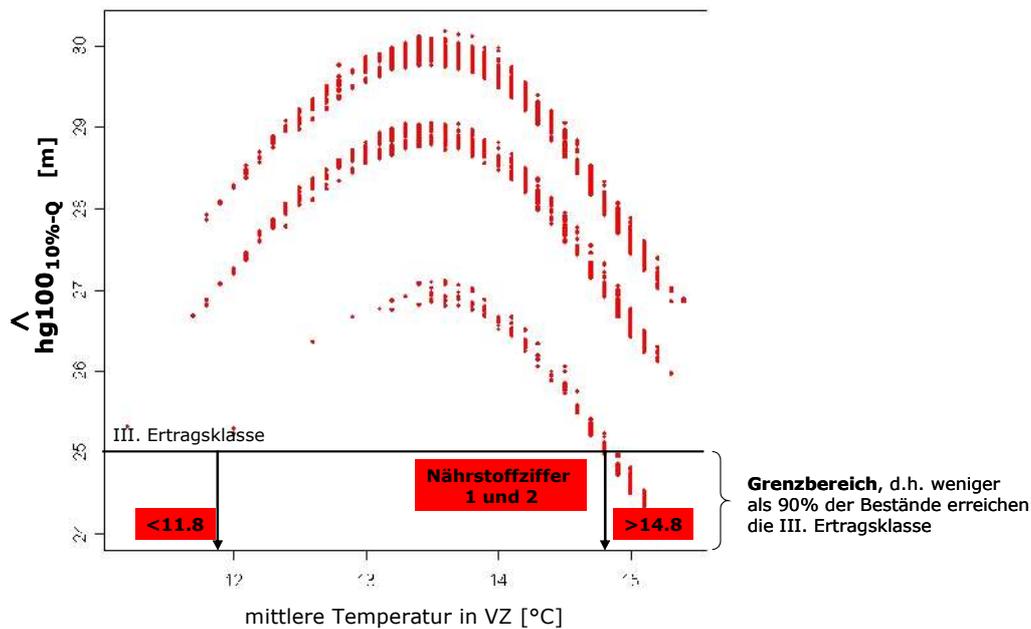


Abb. 6b: Herleitung des Grenzbereichs der leistungsbezogenen Anbauwürdigkeit der Baumart Fichte.

Ein analoges Vorgehen führt zur Festlegung des Grenzbereiches der Anbauwürdigkeit. Die III. Ertragsklasse wird als Limit festgesetzt. Alle Standorte, an denen weniger als 90% der Bestände nicht mindestens die Mittelhöhenbonität von 25 m im Alter 100 erreichen, werden somit für den Fichtenanbau nicht empfohlen. Dies sind Standorte mit einer Nährstoffversorgung der Ziffern 1 und 2 bei mittleren Temperaturen in der Vegetationszeit von unter 11,8 °C und über 14,8 °C. Der Wasserhaushalt muss für einen Standortausschluss bei 11,8 °C unter 255 mm liegen und bei 14,8 °C geringer als -138 mm sein.

4 Diskussion und Ausblick

Die ersten Ergebnisse der Modellierung des klimasensitiven Standort-Leistungs-Bezuges für die Baumart Fichte erscheinen vielversprechend. Mit Hilfe von verallgemeinerten additiven Modellen kann die Mittelhöhenbonität auch unter Berücksichtigung nicht-linearer Effekte insbesondere unter Einbeziehung des räumlichen Trends mit Hilfe von klimasensitiven Standortvariablen hinreichend genau geschätzt werden (Standardfehler 2,3 m). Die Verwendung der Modellparameter mittlere Temperatur, Niederschlagssumme und Evapotranspiration in der Vegetationszeit ermöglicht eine Vorhersage der durch Klimawandel hervorgerufenen Bonitätsveränderung. Die Effekte der einzelnen Standortparameter auf die Höhenbonität können identifiziert und quantifiziert werden. Hierbei zeigt sich der überragende Einfluss des Temperatureffektes auf die Bonität der Fichte im Vergleich zu den Effekten der übrigen erklärenden Variablen. Dies hängt sicherlich auch mit dem beobachteten Standortbereich zusammen, denn auf fast allen mit Fichte bestockten Betriebsinventurpunkten in Niedersachsen ist das pflanzenverfügbare Wasser derzeit kein limitierender Faktor. Der Einfluss des Wassers im Standort-Leistungs-Modell kann erst durch eine Ergänzung des Datenmaterials um Standorte, auf denen bereits heute Trockenstress herrscht, adäquat erfasst werden. Die Erweiterung des untersuchten Standortpektrums ist daher auch eine elementare Forderung bei der weiteren Modellierung.

Desweiteren wird die Maximumbeziehung des Temperatureffektes im Modell nachgewiesen. Ab einer gewissen Wärmesumme nimmt folglich die Bonität nicht weiter zu sondern sinkt im Gegenteil ab. Beide Beobachtungen, der große Temperatureinfluss und seine Maximumbeziehung, bestätigen Erkenntnisse anderer Standort-Leistungs-Modelle (KAHN, 1994; SCHADAUER, 2006). SCHADAUER (2006) liefert auch einen Erklärungsansatz für die Tatsache, dass der Temperatureffekt nicht monoton steigend verläuft. So treten in Österreich auf Standorten mit hohen Temperatursummen häufig längere Trockenperioden auf, die sich auf das Wachstum offensichtlich negativ auswirken. In den ins Modell eingehenden Durchschnittswerten der Niederschlagssumme sind solche Trockenperioden laut SCHADAUER (2006) eventuell nicht erkennbar. Somit wird möglicherweise der negative Einfluss des Trockenstresses über den abfallenden Verlauf des Temperatureffektes im hohen Temperaturbereich im Modell abgebildet.

Ein dreidimensionales Ökogramm soll als waldbauliches Entscheidungsunterstützungsinstrument eingesetzt werden. Die Baumartenwahl im Kontext der Klimaveränderung kann mit dem Ökogrammansatz hinsichtlich der beiden klimasensitiven Standortfaktoren Temperatur und pflanzenverfügbares Wasser sowie der Bodennährstoffe erleichtert werden. Die wichtige Bestimmung des Optimum- und des Grenzbereiches der leistungsbezogenen

Anbauwürdigkeit erfolgt mit Hilfe von Quantilsregressionen. Auch hier ist wie bei der Modellierung des Standort-Leistungs-Bezuges mit einer deutlichen Modellverbesserung bezüglich des Gültigkeitsbereiches und klarerer Trends der Variableneffekte zu rechnen, wenn das Datenspektrum insbesondere um Grenzstandorte erweitert wird. Im Ausblick sind vier Schwerpunkte zu nennen, deren zukünftige Bearbeitung das Standort-Leistungs-Modell und die Herleitung der Optimum- und Grenzbereiche der Anbauwürdigkeit verbessern werden. Der erste Bereich befasst sich mit einer qualitativen Verbesserung der Datengrundlage. Dies sind (a) eine genauere Herleitung der nutzbaren Feldkapazität an den Stichprobenpunkten, z.B. über Pedotransferfunktionen, (b) das Ersetzen des Keimjahres als reinen zeitlichen Trend durch eine 'echte' erklärende Variable wie die Stickstoffdeposition, (c) die Verwendung der Temperatursumme anstelle einer mittleren Temperatur, da sich durch diese Variable der Einfluss unterschiedlich langer Vegetationszeiten besser beschreiben lässt, (d) die Bilanzierung auf Basis einer lagespezifischen Vegetationsdauer anstelle der großräumig einheitlichen Bezugsperiode und (e) die Einbeziehung von Wechselwirkungen der erklärenden Variablen im Modell. Zweitens muss, wie oben erwähnt, das Standortspektrum um Grenzstandorte wie z.B. extrem trockene aber auch warm-feuchte Gebiete erweitert werden. Diese quantitative Verbesserung der Datengrundlage wird auch zu einer Reduktion der hohen Korrelation zwischen einigen Modellvariablen führen. Der dritte Schwerpunkt befasst sich mit der Verbesserung der Quantilsregression. Dazu müssen die Probleme, die aus der spezifischen Definition der Regressionssplines in *R* resultieren, überwunden werden. Viertens soll der Geltungsbereich und das Baumartenspektrum des Modells erweitert werden. Das BMBF-Verbundprojekt DSS-WuK strebt an, deutschlandweit standortspezifische Aussagen über die Leistungsfähigkeit der Hauptbaumarten Eiche, Buche, Fichte, Douglasie sowie Kiefer und mögliche Risiken der Waldbewirtschaftung zu machen.

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). Die beiden Ziele des Teilprojektes werden hier vorgestellt. Zum einen wird der Standort-Leistungs-Bezug mit Hilfe verallgemeinerter additiver Regressionsmodelle quantifiziert. Das zweite Ziel ist die Bereitstellung einer waldbaulichen Entscheidungshilfe für die Baumartenwahl in Form eines dreidimensionalen Ökogrammes. Mit Hilfe von (nicht-linearen) Quantilsregressionen werden Optimum- und Grenzbereiche der leistungsbezogenen Anbauwürdigkeit der Baumart Fichte im Hinblick auf die Standortfaktoren pflanzenverfügbares Wasser, Temperatur und Bodennährstoffe geschätzt.

Am Beispiel der Baumart Fichte wird unter Verwendung von Betriebsinventurdaten der niedersächsischen Landesforsten ein erstes Standort-Leistungs-Modell erstellt. Die Mittelhöhenbonitäten werden mit Hilfe des verallgemeinerten longitudinalen Durchmesser-Höhen-Modells von SCHMIDT (2008) geschätzt, das keine Konstanz der Standortfaktoren voraussetzt. Als klimasensitive Parameter gehen die mittlere Temperatur, die Niederschlagssumme und die potenzielle Evapotranspiration in der Vegetationszeit in das verallgemeinerte additive Modell zur Beschreibung des Standort-Leistungs-Bezuges ein. Weitere erklärende Variablen sind die Nährstoffausstattung, die nutzbare Feldkapazität, das Keimjahr und die Lagekoordinaten. Die Effekte der einzelnen Variablen auf die Mittelhöhenbonität werden identifiziert und quantifiziert. Ein Anwendungsbeispiel zeigt die Bonitätsveränderung an niedersächsischen Fichtenstandorten unter einem spezifischen Klimaszenario.

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.

Literatur

- BOSSEL, H., 1994: TREEDYN3 Forest Simulation Model. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Uni Göttingen, Reihe B, Vol. 35: 118 S.
- BUGMANN, H., 1997: An efficient method for estimating the steady-state species composition of forest gap models. *Can. J. For. Res.* 27: S. 551-556.
- 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.
- 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.

- KAHN, M., 1994: Modellierung der Höhenentwicklung ausgewählter Baumarten in Abhängigkeit vom Standort. Forstliche Forschungsberichte München, Band 141: 204 S.
- KÄNDLER, G. UND RIEMER, U., 2005: Der Zusammenhang zwischen Wuchsleistung und Standort bei Fichte, Tanne und Buche auf den wichtigsten Standorteinheiten des Südschwarzwaldes. In: Waldumbau für eine zukunftsorientierte Waldwirtschaft, Berlin-Heidelberg, Springer Verlag: 57-84
- KOENKER, R., 2005: Quantile Regression. Cambridge University Press, New York. 349 S.
- KOENKER, R., 2007: quantreg: Quantile Regression. R package version 4.06. <http://www.r-project.org>
- MAKELÄ, A., 2003: Process-based modelling of tree and stand growth: towards a hierarchical treatment of multiscale processes. Can. J. For. Res. 33: pp. 398-409.
- 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.
- 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.
- SCHADAUER, K., 2006: Wie wirkt das Klima auf das Wachstum von Fichtenbeständen? BFW-Praxisinformation Nr. 10: S. 18-20.
- SCHMIDT, M., 2008: Ein longitudinales Durchmesser-Höhenmodell für Fichte in Nordwestdeutschland. Jahrestagung des DVFFA, Sektion Ertragskunde, in Trippstadt vom 05. bis 07. Mai 2008.
- SCHULLA, J., 1997: Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderung. Diss. 12018, ETH Zürich: 163 S.
- SCHULLA, J. AND JASPER, K., 2007: Model Description WaSIM-ETH. Technical report: 181 S.
- SPEKAT, A., ENKE, W., KREIENKAMP, F., 2006: Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarien mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG 2005 auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI – OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES – Szenarien B1, A1B und A2. Projektbericht im Rahmen des F+E-Vorhabens 204 41 138 „Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland“: 94 S.
- 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.
- STERBA, H., MOSER, M., MONSERUD, R., 1995: Prognaus - Ein Waldwachstumssimulator für Rein- und Mischbestände. Österr. Forstzeitung: 19 - 20.
- UMWELTBUNDESAMT, 2007: Neue Ergebnisse zu regionalen Klimaänderungen. Das statistische Regionalisierungsmodell WETTREG. <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/hintergrund/Regionale-Klimaaenderungen.pdf> : 27 S.
- WILPERT, K.V., 1990: Die Jahrringstruktur von Fichten in Abhängigkeit vom Bodenwasserhaushalt auf Pseudogley und Parabraunerde : ein Methodenkonzept zur Erfassung standortsspezifischer Wasserstreßdisposition. Freiburger bodenkundl. Abhandlungen, Nr.24: 184 S.
- WYKOFF, W.R., CROOKSTON, N.L., STAGE, A.R., 1982: User's Guide to the Stand Prognosis Model. U.S. For. Serv., Gen. Techn. Rep. INT-133: 112 S.
- WOOD, S.N., 2006. Generalized additive models: an introduction with R. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton: 391p.