

Konzept zur standort- und behandlungssensitiven Modellierung des Durchmesserzuwachses

MATTHIAS ALBERT, MATTHIAS SCHMIDT und EGBERT SCHÖNFELDER

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

1 Einleitung

Eine standort- und behandlungssensitive Modellierung des Durchmesserzuwachses ist neben der standortsensitiven Modellierung des Standort-Leistungs-Bezuges für die Beantwortung unterschiedlicher waldwachstumskundlicher Fragestellungen unter sich wandelnden Klimabedingungen wichtig. Ziel des vorgestellten Konzeptes ist es, mit Hilfe hierarchisch aufgebauter Modelle die verfügbare Datenbasis bestmöglich zu nutzen und die Einflüsse des Klimas, des Bodens und der waldbaulichen Behandlung auf den Durchmesserzuwachs des Einzelbaumes zu quantifizieren. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Überprüfung potenzieller Effekte von klimasensitiven Standortvariablen auf den Durchmesserzuwachs. Am Beispiel der Baumart Fichte (*Picea abies*, (L.) Karst.) werden die ersten beiden Modellstufen, ein „Klimaeffektmodell“ und ein „Bodeneffektmodell“, vorgestellt. Die Entwicklung des Modellierungskonzeptes und die Überprüfung der prinzipiellen Eignung des Schätzansatzes stehen in diesem ersten Arbeitsschritt zur Entwicklung eines operationalen standort- und behandlungssensitiven Durchmesserzuwachsmodells im Vordergrund.

2 Material und Methoden

Die zur Verfügung stehenden ertragskundlichen, klimatischen und bodenkundlichen Daten sind von unterschiedlicher Struktur und räumlicher Abdeckung. Zum einen werden Inventurdaten und Versuchsflächenaufnahmen kombiniert, zum anderen decken die Klimaparameter das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland ab, während die bodenkundlichen Parameter nur für die Region Niedersachsen zur Verfügung stehen, da dies der Parametrisierungsbereich des verwendeten Regionalisierungsmodells (OVERBECK ET AL., 2011) ist.

2.1 Ertragskundliche Daten

Als Parametrisierungsdatensatz für die standortsensitive Modellierung des Durchmesserzuwachses werden die mit Fichten bestockten Inventurpunkte der Bundeswaldinventur I und II der westlichen Bundesländer sowie ausgewählte ertragskundliche Fichten-Versuchsflächen der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA), des Landeskompetenzzentrums Forst Eberswalde (LFE) und des Kompetenzzentrums Wald und Forstwirtschaft im Staatsbetrieb Sachsenforst (SBS) verwendet. Da der Modellierungsansatz auf einer direkten Schätzung des Durchmessers beruht, gehen die insgesamt 271.517 gemessenen Fichtendurchmesser an 11.837 über ganz Deutschland verteilten Punkten (Beständen) als abhängige Variable in das Modell ein. Zu jedem gemessenen Durchmesser enthält der Datensatz ein korrespondierendes Baumalter. Das daraus berechnete Keimjahr wird als erklärende Variable verwendet und dient dabei als Proxy-Variablen für alle zeitdynamischen Einflussgrößen wie z.B. die Stickstoffdeposition. Die große Datenbasis gewährleistet, dass ein großer Standortgradient im Parametrisierungsdatensatz repräsentiert ist.

2.2 Klimatische und bodenkundliche Parameter

Als erklärende Variablen werden die klimatischen Parameter Temperatursumme in der Vegetationszeit (Temp) und Ariditätsindex (Ari) nach DE MARTONNE (1926) herangezogen. Die Vegetationszeit wird dabei dynamisch und baumartspezifisch berechnet (vgl. MENZEL, 1997; v. WILPERT, 1990). Die mit dem regionalen Klimamodell WETTREG (SPEKAT ET AL., 2006) projizierten Klimaparameter werden für die Klimanormalperiode 1961 bis 1990 bilanziert. Mit einem kombinierten geostatistischen regressionsanalytischen Ansatz auf Basis eines verallgemeinerten additiven Modells (WOOD, 2006) werden die projizierten Klimaparameter regionalisiert bzw. für die Mittelpunktkoordinaten der Inventurpunkte sowie Versuchsflächenparzellen geschätzt. Anhand dieser Daten wird die erste Modellstufe („Klimaeffektmodell“) parametrisiert.

Als Bodenparameter werden die Bodennährstoffversorgung (Nähr), die nutzbare Feldkapazität (nFK) und der Grundwasseranschluss verwendet. Diese Parameter stehen für diese Untersuchung in entsprechend hoher Qualität nur über die Forstliche Standortkartierung des Niedersächsischen Forstplanungsamtes zur Verfügung. Neben den direkt angesprochenen Nährstoffklassen dient ein statistisches Regionalisierungsmodell zur flächendeckenden Schätzung der nutzbaren Feldkapazität (OVERBECK ET AL., 2011). Die räumliche Beschränkung der zu verwendenden Bodenparameter auf die von den Niedersächsischen Landesforsten bewirtschafteten Landes- und betreuten Genossenschaftswälder reduziert den oben genannten Parametrisierungsdatensatz für diese zweite Modellstufe („Bodeneffektmodell“) auf 136.439 Durchmesserbeobachtungen an 453 Punkten. 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 Standortvariablen wurden im Rahmen der Modellbildung durch Modellvergleiche auf Basis des Bayesian Information Criterion (BIC) ausgeschlossen.

In Tabelle 1 und 2 sind die Parametrisierungsdatensätze des „Klimaeffektmodells“ und des „Bodeneffektmodells“ anhand von Kennwerten der Verteilung sowie von Klassenbesetzungen für die kategorischen Variablen beschrieben.

| | min | 1.Quantil | Mittelwert | 3.Quantil | max |
|-----------|------|-----------|------------|-----------|-------|
| Alter [a] | 9 | 35 | 61 | 84 | 350 |
| BHD [cm] | 5,1 | 14,9 | 24,8 | 33,2 | 118,4 |
| Ari | 26,6 | 42,2 | 53,3 | 59,7 | 147,1 |
| Temp [°C] | 95 | 1623 | 1837 | 2115 | 2774 |

Tab. 1: Kennwerte des Parametrisierungsdatensatzes für das „Klimaeffektmodell“.

| | min | 1.Quantil | Mittelwert | 3.Quantil | max |
|-----------|------|-----------|------------|-----------|------|
| Alter [a] | 10 | 32 | 59 | 85 | 158 |
| BHD [cm] | 5,1 | 14,0 | 24,3 | 33,3 | 80,7 |
| Ari | 27,9 | 44,2 | 54,5 | 65,7 | 83,0 |
| Temp [°C] | 1002 | 1523 | 1750 | 2030 | 2335 |
| nFK [mm] | 36 | 115 | 138 | 148 | 258 |

| | Klasse | Anzahl |
|-------------|----------------------------|----------|
| Nähr Bergl. | schlecht | 22.979 |
| | mittel | 94.539 |
| | gut | 1.242 |
| Nähr Tiefl. | schlecht | } 17.679 |
| | mittel | |
| | gut | |
| Grundwasser | kein bzw. starker Einfluss | 132.278 |
| | mäßiger Einfluss | 4.161 |

Tab. 2: Kennwerte des Parametrisierungsdatensatzes für das „Bodeneffektmodell“ (die geschweifte Klammer kennzeichnet Klassen, die aufgrund von nicht signifikanten Modelleffekten bei der Modellselektion zusammengefasst wurden).

Vergleicht man die Werte der Verteilungen des Ariditätsindex und der Temperatursumme in der Vegetationszeit für den deutschlandweiten Datensatz (Tab. 1) mit denen der niedersächsischen Teilmenge (Tab. 2), so wird bereits an diesen einfachen Kennwerten deutlich, dass im Parametrisierungsdatensatz für das Bodeneffektmodell Standorte mit hohen Ariditätsindexwerten und hohen Temperatursummen fehlen. Dies bestätigt, dass bei der vorliegenden Datenstruktur ein hierarchischer Modellaufbau notwendig ist, um die Effekte der einzelnen Klima- und Bodenparameter auf das Durchmesserwachstum bestmöglich abzubilden.

Die regionalisierte nutzbare Feldkapazität (nFK) ist auf 1m bilanziert. Die Klassifizierung der Bodennährstoffe (Nähr) folgt der Niedersächsischen Forstlichen Standortskartierung mit der Unterscheidung von Bergland- und Tieflandstandorten. Für Berglandstandorte werden im Rahmen der Modellbildung aufgrund der Klassenbelegungen und signifikant unterschiedlicher Modelleffekte die drei Nährstoffklassen schlecht, mittel und gut gebildet. Für Tieflandstandorte kann für diesen Datensatz nur eine gemeinsame Klasse ausgewiesen werden. Zur Erfassung des Grundwassereinflusses werden die drei Klassen kein, mittlerer und starker Grundwassereinfluss unterschieden. Dabei weisen Standorte ohne Grundwasseranschluss und mit starkem Grundwassereinfluss keinen statistischen Unterschied auf und werden folglich zu einer Klasse zusammen gefasst.

2.3 Modellierungsansatz

Das Grundprinzip des hier gewählten Modellierungsansatzes zur Durchmesserschätzung ist ein hierarchischer Aufbau der drei statistischen Teilmodelle zur Beschreibung des klimatischen Einflusses („Klimaeffektmodell“), zur Berücksichtigung der bodenkundlichen Effekte („Bodeneffektmodell“) und zur Quantifizierung der behandlungsabhängigen Reaktionen („Bestandeseffektmodell“). Dabei werden folgende Hypothesen aufgestellt: (1) Ein Top-down Ansatz ist aufgrund der Datenstruktur für eine standort- und behandlungssensitive Durchmesserzuwachsmodellierung notwendig und geeignet, wenn Variablen, die erst in späteren Schritten integriert werden, annähernd ausbalanciert sind. Diese Annahme kann im vorliegenden Fall aufgrund der sehr großen Datenmengen und der vergleichsweise kleinräumigen Variation von Bodenparametern, Bestandesstrukturen und Bewirtschaftungsarten als gerechtfertigt gelten. (2) Ein Grundmodell mit biologisch interpretierbaren mathematischen Eigenschaften, z.B. Wendepunkte und Asymptote, ist als oberste Stufe in der

Modellhierarchie vorteilhaft, da dadurch eine Reduktion der Korrelation zwischen den Parametern erreicht wird, was für eine anschließende Modellierung der Standorteffekte als vorteilhaft beurteilt werden kann. Nachfolgend werden die Ansätze des Klima- und Bodeneffektmodells vorgestellt.

2.3.1 oberste Modellstufe - Klimateffektmodell

Als Grundmodell wird eine modifizierte Bertalanffy-Funktion zur Schätzung eines mittleren Durchmesserverlaufes über dem Alter gewählt. Dieses Wachstumsmodell wird als nichtlineares gemischtes Modell im Statistikpaket *R* 2.14.1 (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2006) unter Verwendung der Bibliothek *nlme* 3.1-102 (PINHEIRO ET AL., 2011) geschätzt und ist wie folgt spezifiziert (vgl. SCHÖNFELDER, 1987):

$$d_{ijk} = p_{1i} (1 - 1/3 \cdot \exp(p_3 / p_{1i} \cdot (p_2 - alt_{ijk}) \cdot 9/4))^3 + \varepsilon_{ijk} \quad [1]$$

mit

| | |
|---|--|
| <i>d</i> | Brusthöhendurchmesser [cm] |
| <i>alt</i> | Baumalter |
| <i>i</i> | Bestand (Plot) |
| <i>j</i> | Baum |
| <i>k</i> | Aufnahmezeitpunkt |
| $p_{1i} \sim N(0, D_1)$ | Zufallseffekte auf p_1 (Plotebene) für die Normalverteilung mit Mittelwert 0 und positiv-definiter Kovarianzmatrix <i>D</i> unterstellt wird |
| $\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma^2)$ | |

In der modifizierten Bertalanffy-Funktion bezeichnen die Parameter p_1 die Asymptote [cm], p_2 den Zeitpunkt des maximalen Durchmesserzuwachses [a] und p_3 den maximalen Durchmesserzuwachs [cm/a]. Im nächsten Schritt wird der Parameter p_1 als Funktion von Klimavariablen geschätzt und somit das „Klimateffektmodell“ erstellt. Das Ergebnis der Variablenselektion lässt sich wie folgt beschreiben:

$$d_{ijk} = (\alpha_{1i} + f_1(ari_i) + f_2(temp_i) + f_3(KJ_{ij})) (1 - 1/3 \cdot \exp(p_3 / (\alpha_{1i} + f_1(ari_i) + f_2(temp_i) + f_3(KJ_{ij})) \cdot (p_2 - alt_{ijk}) \cdot 9/4))^3 + \varepsilon_{ijk} \quad [2]$$

mit

| | |
|------------------------------|---|
| $\alpha_{1i} \sim N(0, D_1)$ | Zufallseffekte auf α_1 (Interzept) für die Normalverteilung mit Mittelwert 0 und positiv-definiter Kovarianzmatrix <i>D</i> unterstellt wird |
| f_1, f_2, f_3 | Funktionen zur Beschreibung von potenziell nicht-linearen Modelleffekten auf p_1 |
| <i>ari_i</i> | Ariditätsindex an Plot <i>i</i> |
| <i>temp_i</i> | Temperatursumme in der Vegetationszeit an Plot <i>i</i> [°C/1000] |
| <i>KJ_{ij}</i> | Keimjahr des Baumes <i>j</i> in Bestand <i>i</i> [1/1000] |

Zur Analyse der Effektverläufe von Ariditätsindex, Temperatursumme und Keimjahr auf den Parameter p_1 wird ein verallgemeinertes additives Modell (WOOD, 2006) angepasst. Dazu werden die Zufallseffekte des Parameters p_1 aus Modell (1) als Funktion von potenziellen Prädiktoren wie folgt beschrieben:

$$p_{1i} = \alpha + f_1(ari_i) + f_2(temp_i) + f_3(KJ_{ij}) \quad [3]$$

mit f_1, f_2, f_3 Funktionen zur Beschreibung von potentiell nicht-linearen Modelleffekten auf p_1

2.3.2 zweite Modellstufe - Bodeneffektmodell

Auf der zweiten Hierarchieebene werden der Erwartungswert des Durchmessers aus dem „Klimateffektmodell“ und Bodenparameter als erklärende Variablen herangezogen. Das „Bodeneffektmodell“ wird als verallgemeinertes gemischtes additives Modell (GAMM) spezifiziert und unter Verwendung der Bibliothek *mgcv* 1.6-0 (WOOD, 2006) und *nlme* (PINHEIRO ET AL., 2011) und *glmmPQL* (RIPLEY ET AL., 2012) parametrisiert. Die allgemeine Form lautet:

$$\log(E[d_{ijk}]) = \beta_0 + f_1(E_{KM}[d_{ijk}]) + Nähr_i^T \beta_1 + f_2(nFK_i) + GruWa_i^T \beta_2 + Zb_i; \quad E[d_{ijk}] \sim Gamma \quad [4]$$

mit

| | |
|-------------------|---|
| $E[d_{ijk}]$ | Erwartungswert des Durchmessers im Bestand <i>i</i> an Baum <i>j</i> zum Aufnahmezeitpunkt <i>k</i> |
| $E_{KM}[d_{ijk}]$ | logarithmierter Erwartungswert des Durchmessers aus dem Klimateffektmodell |
| <i>Nähr</i> | Bodennährstoffkategorie |
| <i>nFK</i> | nutzbare Feldkapazität |
| <i>GruWa</i> | Kategorie des Grundwassereinflusses |

| | |
|-----------------------|--|
| β_0 | Regressionskoeffizient |
| β_1, β_2 | Vektoren von Modellkoeffizienten |
| f_1, f_2 | Funktionen zur Beschreibung von potenziell nicht-linearen Modelleffekten auf $E[d_{ijk}]$ |
| Z | Modellmatrix der Zufallseffekte |
| $b_i \sim N(0, \psi)$ | Vektor der Zufallseffekte für die Normalverteilung mit Mittelwert 0 und positiv-definiter Kovarianzmatrix ψ unterstellt wird. |

3 Ergebnisse

3.1 Klimaeffektmodell

Die Koeffizienten und statistischen Kennwerte des spezifizierten Grundmodells (Formel 1) sind wie folgt:

| | Value | Std.Error | DF | t-value | p-value |
|----|----------|------------|--------|----------|---------|
| p1 | 95.68986 | 0.31146891 | 259678 | 307.2212 | 0 |
| p2 | 58.18974 | 0.15054010 | 259678 | 386.5398 | 0 |
| p3 | 0.47331 | 0.00133136 | 259678 | 355.5096 | 0 |

| Streuung der Zufallseffekte: | | | | |
|------------------------------|----------|----------|----------|--|
| | lower | est. | upper | |
| Standardabw. (p1) | 21.80503 | 22.15629 | 22.51321 | |

| Reststreuung innerhalb von Beständen/Stichprobenpunkten: | | | | |
|--|----------|----------|----------|--|
| | lower | est. | upper | |
| | 5.574087 | 5.589276 | 5.604507 | |

Das Pseudo-Bestimmtheitsmaß bei ausschließlicher Verwendung der festen Effekte beträgt 0,246. Unter Zuhilfenahme der Zufallseffekte können 80 % der Streuung erklärt werden. Dieses Modell stellt den mittleren Alters-Durchmesserverlauf über alle Standorte und Bestandesbehandlungen in Deutschland dar. Es gilt im nächsten Schritt, den Einfluss des großräumigen Klimas auf diesen mittleren Verlauf zu quantifizieren. Zu diesem Zweck werden die Muster der partiellen Effekte von ausgewählten Klimavariablen auf den Parameter p_1 mit Hilfe eines verallgemeinerten additiven Modells (GAM, Formel 3) analysiert. Die Modelleffekte sind alle hochsignifikant und die partiellen Effekte zeigen mehr oder weniger nicht-lineare Verläufe (Abbildung 1).

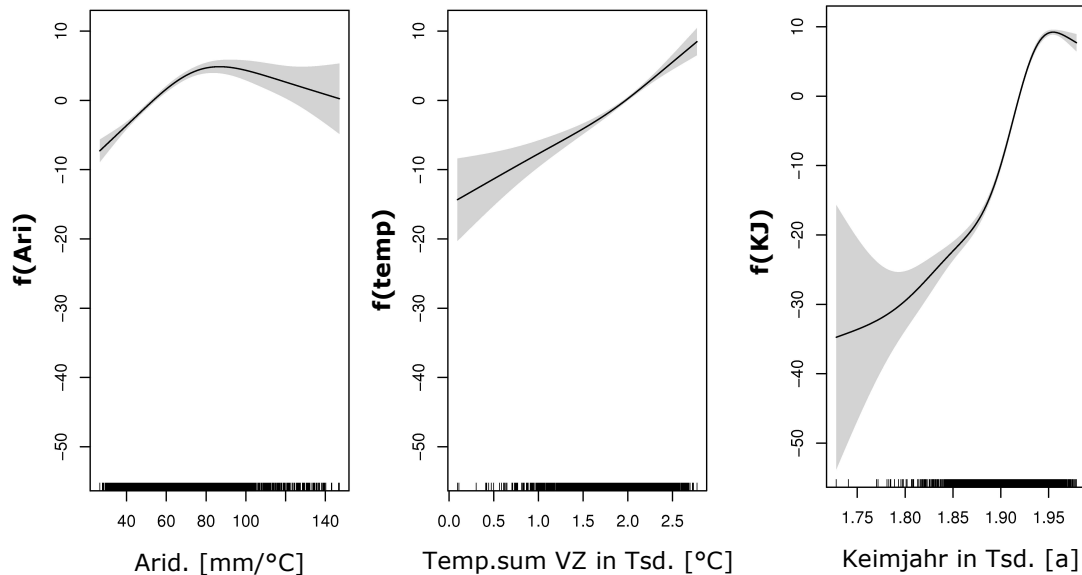


Abb. 1: Die mittels GAM (Formel 3) geschätzten partiellen Effekte des Ariditätsindex (Ari), der Temperatursumme in der Vegetationszeit (Temp) und des Keimjahres (KJ) auf den Parameter p_1 des Grundmodells.

Die Verläufe der partiellen Effekte erscheinen prinzipiell plausibel. Unter sonst konstanten Standortsbedingungen hat zunehmende Trockenheit einen negativen Einfluss auf den maximal erreichbaren Durchmesser (p_1), während ein höheres Temperaturangebot sich positiv auf p_1 auswirkt. Das Absinken des Ariditätseffektes ab Werten von 90 ist eher unplausibel, aber aufgrund des dort breiten Konfidenzintervalls nicht überzubewerten. Der zeitdynamische Einfluss z.B. durch erhöhte Stickstoffdepositionen im 20. Jahrhundert spiegelt sich im Verlauf des Keimjahreseffektes wider. Die Ergebnisse des GAM (Formel 3) dienen als

Hilfsmittel zur Approximation der Effektverläufe, um sie in das nichtlineare gemischte Modell (Formel 2) adäquat integrieren zu können.

Für eine Implementation der beiden Klimavariablen und des Keimjahres in das Grundmodell werden die Effektverläufe wie folgt approximiert (Abb. 2).

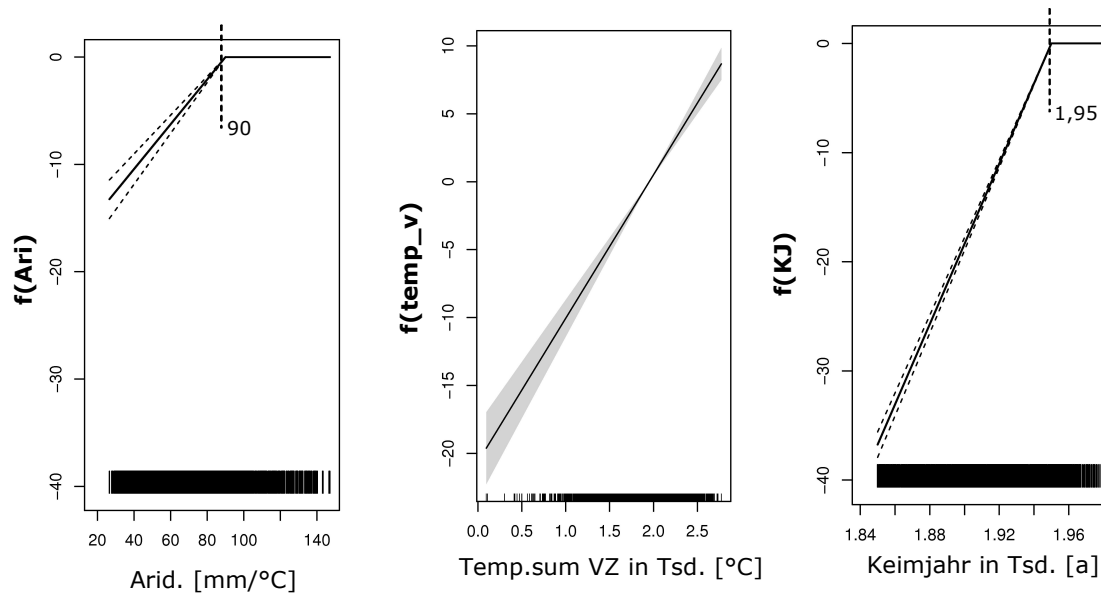


Abb. 2: Approximation der partiellen Effekte von Ariditätsindex (Ari), Temperatursumme in der Vegetationszeit (Temp) und Keimjahr (KJ) (Formel 3) auf den Parameter p_1 des Grundmodells (Formel 1).

Die Temperatursumme wird linear approximiert, für den Ariditätsindex und das Keimjahr werden segmentierte lineare Effektverläufe unterstellt (Abb. 2). Somit ergibt sich die Möglichkeit, den Parameter p_1 des Grundmodells (Formel 1) als Funktion der beiden Klimagrößen und des Keimjahres wie folgt zu beschreiben:

$$d_{ijk} = (\alpha_{0i} + \alpha_1(90 - ari_i) \cdot z_{i_{ari}} + \alpha_2 temp_i + \alpha_3(1,95 - KJ_{ij}) \cdot z_{i_{k,j}}) \cdot (1 - 1/3 \cdot \exp(p_3 / (\alpha_0 + \alpha_1(90 - ari_i) \cdot z_{i_{ari}} + \alpha_2 temp_i + \alpha_3(1,95 - KJ_{ij}) \cdot z_{i_{k,j}}) \cdot (p_2 - alt_{ijk}) \cdot 9/4))^3 + \varepsilon_{ijk} \quad [5]$$

mit $\alpha_{0i} \sim N(0, D_0)$ Zufallseffekte auf α_0 (Interzept) für die Normalverteilung mit Mittelwert 0 und positiv-definiten Kovarianzmatrix D unterstellt wird
 $\alpha_1, \dots, \alpha_3$ Modellkoeffizienten
 ari_i Ariditätsindex an Plot i
 $temp_i$ Temperatursumme in der Vegetationszeit an Plot i [°C/1000]
 KJ_{ij} Keimjahr des Baumes j im Bestand i [1/1000]

$$z_{i_{ari}} = \begin{cases} 1 & \text{wenn } ari_i < 90 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$z_{i_{k,j}} = \begin{cases} 1 & \text{wenn } KJ_i < 1,95 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Es ergeben sich folgende Modellkoeffizienten und statistischen Kennwerte:

| | Value | Std.Error | DF | t-value | p-value |
|------------|------------|-----------|--------|----------|---------|
| α_0 | 83.72062 | 1.406331 | 259675 | 59.5312 | 0 |
| α_1 | -0.20216 | 0.017726 | 259675 | -11.4049 | 0 |
| α_2 | 14.14411 | 0.877777 | 259675 | 16.1136 | 0 |
| α_3 | -293.68901 | 7.105490 | 259675 | -41.3327 | 0 |
| p_2 | 58.65247 | 0.139353 | 259675 | 420.8914 | 0 |
| p_3 | 0.49425 | 0.001473 | 259675 | 335.4343 | 0 |

Streuung der Zufallseffekte:

| | lower | est. | upper |
|-------------------------------|----------|----------|----------|
| Standardabw. (p1.(Intercept)) | 18.24034 | 18.56888 | 18.90334 |

Reststreuung innerhalb von Beständen/Stichprobenpunkten:

| | lower | est. | upper |
|--|----------|----------|----------|
| | 5.590951 | 5.606218 | 5.621526 |

In diesem modifizierten Grundmodell kann anhand nur der festen Effekte 46,7 % der Streuung des Durchmessers erklärt werden. Verwendet man auch die Zufallseffekte für Prognosen, so liegt der Anteil weiterhin bei 80 %. Während die Werte für p_2 und p_3 nahezu unverändert sind, ermöglicht somit allein die Beschreibung von p_1 als Funktion der beiden Klimaparameter und des Keimjahrs eine deutliche Erhöhung des Pseudo-Bestimmtheitsmaßes.

3.2 Bodeneffektmodell

Die Verknüpfung des Klima- und des Bodeneffektmodells geschieht durch Verwendung des Erwartungswertes des Durchmessers des Klimaeffektmodells als erklärende Variable auf der zweiten Hierarchieebene. Es wird folgendes verallgemeinertes gemischtes additives Modell (GAMM) auf Basis des niedersächsischen Teildatensatzes parametrisiert:

$$\log(E[d_{ijk}]) = \beta_0 + \beta_1 \log(E_{KM}[d_{ijk}]) + \text{Nähr}_i^T \beta_2 + \beta_3 nFK_i + \text{GruWa}_i^T \beta_4 + Zb_i; \quad E[d_{ijk}] \sim \text{Gamma} \quad [6]$$

| | | |
|-----|-----------------------------|--|
| mit | $E[d_{ijk}]$ | Erwartungswert des Durchmessers im Bestand i an Baum j zum Aufnahmezeitpunkt k |
| | $E_{KM}[d_{ijk}]$ | logarithmierter Erwartungswert des Durchmessers aus dem Klimaeffektmodell (Formel 5) |
| | Nähr^T | Indikatorvektor für klassifizierte Bodennährstoffe |
| | nFK | nutzbare Feldkapazität (0 bei Grundwasseranschluss) |
| | GruWa^T | Indikatorvektor für klassifizierte Grundwasserstände |
| | $\beta_0, \beta_1, \beta_3$ | Modellkoeffizienten |
| | β_2, β_4 | Vektoren von Modellkoeffizienten |
| | Z | Modellmatrix der Zufallseffekte |
| | $b_i \sim N(0, \psi)$ | Vektor der Zufallseffekte für die Normalverteilung mit Mittelwert 0 und positiv-definiter Kovarianzmatrix ψ unterstellt wird. |

Die logarithmische Transformation gewährleistet, dass die einzelnen Einflussgrößen exponentiell multiplikativ verknüpft werden. Der Erwartungswert des Durchmessers aus dem Klimaeffektmodell wird folglich unter gleichen Standorteffekten umso stärker modifiziert, je größer dieser Schätzdurchmesser ist, d.h. je älter der Baum ist bzw. je günstiger die klimatischen Bedingungen sind und je länger somit die Ausprägung der Bodenparameter wirken konnte. Desweiteren ist die Logarithmierung vorteilhaft, um die heterogene Varianz der Residuen zu beschreiben.

Es ergeben sich folgende Modellkoeffizienten und statistische Kennwerte:

| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) | |
|-------------|------------|------------|---------|----------|-----|
| (Intercept) | -1.3232665 | 0.0527108 | -25.104 | < 2e-16 | *** |
| E[d] | 1.2993211 | 0.0036974 | 351.416 | < 2e-16 | *** |
| Nähr_BL_m | 0.2302103 | 0.0426646 | 5.396 | 6.83e-08 | *** |
| Nähr_BL_g | 0.4398101 | 0.0609215 | 7.219 | 5.25e-13 | *** |
| Nähr_TL | 0.2381379 | 0.0498462 | 4.777 | 1.78e-06 | *** |
| GruWa_m | 0.3313382 | 0.0903883 | 3.666 | 0.000247 | *** |
| nFK | 0.0007564 | 0.0003070 | 2.464 | 0.013755 | * |

Zufallseffekte auf Plotebene:
 (Intercept) Residual
 StdDev: 0.2258133 0.2384289

wobei Nähr_BL_m mittlere Nährstoffversorgung auf Bergland-Standorten
 Nähr_BL_g gute Nährstoffversorgung auf Bergland-Standorten
 Nähr_TL Nährstoffversorgung auf Tiefland-Standorten
 GruWa_m mäßiger Grundwassereinfluss

Die Modellkoeffizienten sind biologisch plausibel: eine bessere Nährstoffversorgung auf Berglandstandorten ebenso wie ein mäßiger Grundwassereinfluss sowie eine ansteigende nFK haben einen positiven Einfluss auf den Durchmesser. Der Nährstoffeffekt auf Tieflandstandorten weist die Größenordnung von Berglandstandorten mit mittlerer Nährstoffversorgung auf.

3.3 Sensitivitätsanalyse

Der eingangs formulierte Fokus der Modellierung, potenzielle Effekte von klimasensitiven Standortvariablen auf den Durchmesserzuwachs abzubilden, wird mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen näher beleuchtet. Dazu wird der Ariditätsindex bzw. die Temperatursumme in der Vegetationszeit variiert und die jeweils anderen der drei erklärenden Variablen geht mit ihrem Mittelwert aus dem Parametrisierungsdatensatz in die Durchmesserschätzung mit dem Klimaeffektmodell (Formel 5) ein. Die Abbildungen 3 und 4 illustrieren die Durchmesserentwicklung über dem Alter für verschiedene Trockenheits- bzw. Temperaturbedingungen.

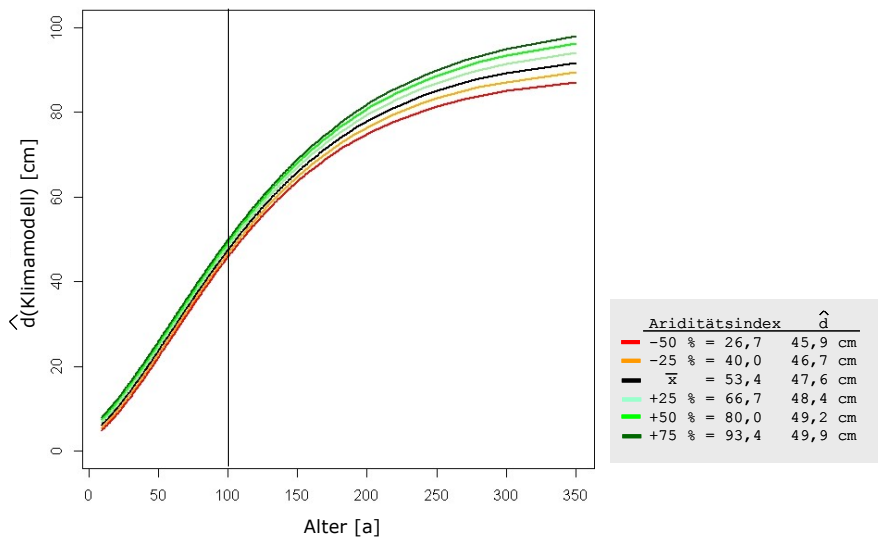


Abb. 3: Mit dem Klimaeffektmodell (Formel 5) geschätzte Durchmesserentwicklung über dem Alter unter variierenden Ariditätsindexwerten (Temperatursumme in der Vegetationszeit geht mit dem Mittelwert 1840°C und das Keimjahr mit dem Mittelwert 1924 des Parametrisierungsdatensatzes ein). Die in der Legende angegebenen Durchmesserschätzwerte gelten für das Bezugsalter 100.

Lässt man den Ariditätsindex von 26, was in etwa der heutigen Situation z.B. im östlichen Brandenburg entspricht, über den Mittelwert des Parametrisierungsdatensatzes von 53 (z.B. Standorte am Ostrand des Schwarzwaldes) bis hin zu Werten von 80 (z.B. Clausthal-Zellerfeld und Braunlage im Harz) oder sogar knapp bis unter 100 (z.B. Kahler Asten oder Freudenstadt im Nordschwarzwald) variieren, zeigt sich der partielle Effekt auf den Durchmesser im Bezugsalter 100 in einer Spreitung von ca. 4 cm (Abb. 3).

Eine noch größere Spreitung der geschätzten Durchmesser erhält man, wenn die Temperatursumme in der Vegetationszeit zwischen Werten von unter 500°C wie sie nur in den Hochlagen der Alpen über 1500 m NN vorkommen, über Werte um 900°C (z.B. Hochlagen im Schwarzwald und Bayrischen Wald über 1000 m NN)

und dem Mittelwert des Parametrisierungsdatensatzes von 1840°C (typisch für Mittelgebirgslagen zwischen 400 und 800 m NN) bis hin zu den heutigen Maximalwerten im Rheintalgraben (2760°C) und in den Extrapolationsbereich variieren lässt. Unter der Annahme eines mittleren Ariditätsindex schwankt der Durchmesser im Alter 100 zwischen 41 und 54 cm (Abb. 4).

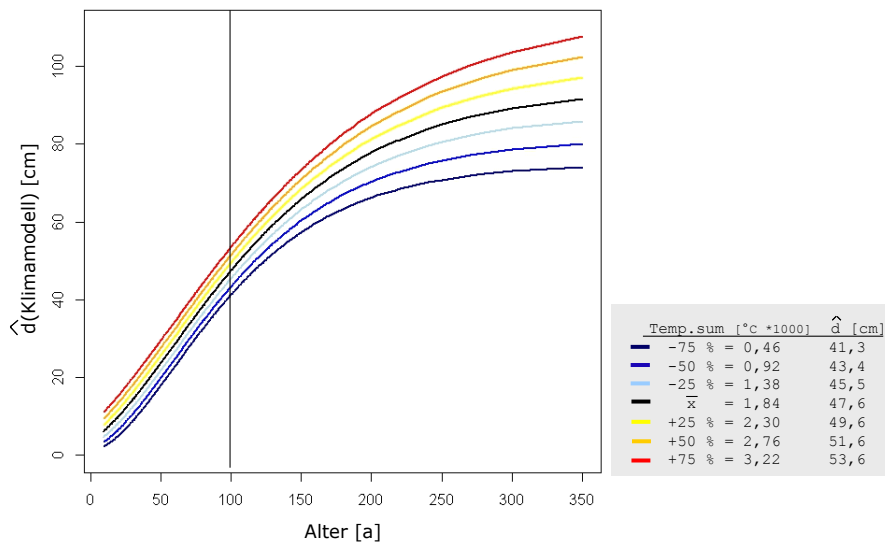


Abb. 4: Mit dem Klimaeffektmodell (Formel 5) geschätzte Durchmesserentwicklung über dem Alter unter variierenden Temperatursummen in der Vegetationszeit (Ariditätsindex geht mit dem Mittelwert 53,4 und das Keimjahr mit dem Mittelwert 1924 des Parametrisierungsdatensatzes ein). Die in der Legende angegebenen Durchmesserschätzwerte gelten für das Bezugsalter 100.

4. Diskussion und Ausblick

Das Konzept eines hierarchisch aufgebauten Systems von statistischen Modellen zur standort- und behandlungssensitiven Schätzung der Durchmesserentwicklung von Einzelbäumen nutzt die zur Verfügung stehende Datenbasis, deren Parameter in unterschiedlicher regionaler Abdeckung zur Verfügung stehen, bestmöglich aus. Die Verwendung der modifizierten Bertalanffy-Funktion gewährleistet als mathematisches Grundmodell die biologische Interpretierbarkeit der Modellkoeffizienten. Die deutschlandweite Datenbasis der Klimaparameter ist wichtig, um möglichst viele Kombinationen von Temperatur- und Trockenheitsbedingungen sowie Extremstandorte d.h. große Gradienten in der Modellparametrisierung zu berücksichtigen. Die Klimasensitivität wird durch die Beschreibung des Parameters p_1 (Asymptote) der modifizierten Bertalanffy-Funktion als Funktion von Klimaparametern erreicht („Klimaeffektmodell“). Da im Rahmen dieser Untersuchung qualitativ hochwertige Bodeninformationen nicht flächendeckend für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland zur Verfügung stehen, kann der Einfluss der Bodenparameter auf die Durchmesserentwicklung nur anhand eines Teildatensatzes quantifiziert werden. Die zweite Hierarchiestufe wird vom „Bodeneffektmodell“ gebildet, das mit Versuchsflächen- und Inventurdaten parametrisiert wurde, für die eine nutzbare Feldkapazität, eine Bodennährstoffklasse und eine Grundwasserklasse auf Basis der Standortskartierung der Niedersächsischen Landesforsten geschätzt bzw. zugeordnet werden kann. Die dritte Modellebene soll die Effekte der Bestandesbehandlung auf das Dickenwachstum quantifizieren. Dies soll anhand von Versuchsflächendaten durchgeführt werden, da der Abgang von Bäumen dort im Gegensatz zu Stichprobenpunkten der Bundeswald- bzw. Betriebsinventur zeitlich dokumentiert ist und somit die Veränderung der Dichte- und Konkurrenzsituation bekannt ist. Desweiteren ist die Raumstruktur aufgrund verfahrensbedingt nicht erfasster Bäume in den Inventurdaten unvollständig, während die vollständig bekannte Raumstruktur in den Versuchsflächendaten die Verwendung von abstandsabhängigen Konkurrenzmaßen ermöglicht. Diese dritte Hierarchieebene der Modellierung konnte bisher noch nicht realisiert werden und ist somit nicht Teil dieses Beitrages.

Ziel dieser Untersuchung ist es, das methodische Gerüst des hierarchischen Modellsystems aufzustellen und erste Validierungen durchzuführen. Die bisherigen Ergebnisse scheinen zu bestätigen, dass die aufeinander aufbauenden Modelle den Durchmesser von Einzelbäumen mit zunehmender Genauigkeit erwartungstreu prognostizieren und dass die geforderte Klimasensitivität gegeben ist. Die Methodik sollte es demnach bei einer Reparametrisierung auf der Grundlage einer derzeit im Aufbau befindlichen erweiterten Datenbasis ermöglichen (siehe unten), die Sensitivität gegenüber den Standortparametern weiter zu erhöhen.

4.1 Zukünftig erweiterte Datenbasis

Die ertragskundliche Datenbasis wird für die Reparametrisierung der Modelle um die Bundeswaldinventur 2 der östlichen Bundesländer und die Inventurstudie 2008 sowie die Niedersächsische Betriebsinventur erweitert. Dies führt vor allem zu einer besseren Abdeckung in den östlichen Bundesländern und somit zu mehr Extremstandorten im warm-trockenen Bereich. Die Klimaparameter, die in dieser Untersuchung auf der Grundlage von Wettreg-Projektionen für die Klimanormalperiode 1961 bis 1990 bilanziert wurden, werden zukünftig als regionalisierte Messdaten des Deutschen Wetterdienstes eingehen, die dynamisch für den entsprechenden Zeitraum von Keimjahr des Baumes bis zum Aufnahmezeitpunkt bilanziert werden. Dies gewährleistet, dass das wachstumsbeeinflussende Klimasignal für jeden Baum individuell herausgefiltert wird. Mit der baumspezifischen Bilanzierung der Klimaparameter erscheint es sinnvoll, das Keimjahr als Proxyvariable eines zeitdynamischen Prädiktors durch Einflussgrößen wie z.B. die Stickstoffdeposition oder als Antagonist die Schwefeldeposition sowie eventuell die CO₂-Konzentration zu ersetzen.

4.2 Modifizierter Modellansatz

Im Rahmen einer Modelloptimierung muss geprüft werden, ob Zufallseffekte für die Parameter p_2 und p_3 der modifizierten Bertalanffy-Funktion signifikant sind und ob diese sich gegebenenfalls auch mittels Klimagrößen funktionalisieren lassen. Als Alternative zur modifizierten Bertalanffy-Funktion kann die Korf-Funktion getestet werden (vgl. SCHMIDT, 2010). Die linearisierte Form der Korf-Funktion ermöglicht die direkte Verwendung der GAM-Technologie, wodurch z.B. ein räumlicher Trend in Form eines zweidimensionalen Splines berücksichtigt werden könnte. Außerdem bräuchten die Zufallseffekte dann nicht mehr in einem Zwischenschritt analysiert und approximiert werden, um sie in das Klimaeffektmodell zu integrieren. Die dritte Hierarchieebene, auf der Dichte- und Konkurrenzeffekte auf die Durchmesserentwicklung abgebildet werden, muss noch entwickelt werden.

5. Zusammenfassung

Die projizierten Klimaveränderungen werden zu wuchsleistungsbeeinflussenden Standortveränderungen führen, deren komplexes räumliches und zeitliches Muster in der Waldwachstumsmodellierung berücksichtigt werden muss. Neben den standortsensitiven Standort-Leistungsmodellen zur Schätzung des Wuchspotenzials (ALBERT UND SCHMIDT, 2010 a und b) und Höhenzuwaches (SCHMIDT, 2010) werden im Rahmen der Klimafolgenforschung der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt die im waldwachstumkundlichen Softwarepaket TreeGrOSS (NAGEL, 2009) implementierten Durchmesserzuwachsmodelle angepasst. Ziel ist die standort- und behandlungssensitive Modellierung des Einzelbaumdurchmesserzuwaches.

Die zur Verfügung stehende Datengrundlage weist unterschiedliche regionale Abdeckungen auf. Während klimatische Größen bundesweit vorliegen, können Bodenparameter in entsprechender Qualität nur für das Gebiet Niedersachsens hergeleitet werden und Dichte- und Konkurrenzeffekte können schließlich nur anhand von Versuchsflächendaten analysiert werden. Daher wird ein hierarchisches Modellsystem vorgeschlagen, welches schrittweise die Einflussfaktoren, von Klima- über Boden- bis zu Bestandes- und Einzelbauminformationen, auf das Dickenwachstum quantifiziert (Top-down Ansatz). Folgende Hypothesen werden aufgestellt:

1. Ein Top-down Ansatz ist aufgrund der Datenstruktur für eine standort- und behandlungssensitive Durchmesserzuwachsmodellierung notwendig und geeignet, wenn Variablen, die erst in späteren Schritten integriert werden, annähernd ausbalanciert sind. Diese Annahme kann im vorliegenden Fall aufgrund der sehr großen Datenmengen und der vergleichsweise kleinräumigen Variation von Bodenparametern, Bestandesstrukturen und Bewirtschaftungsarten als gerechtfertigt gelten.
2. Ein Grundmodell mit biologisch interpretierbaren mathematischen Eigenschaften, z.B. Wendepunkte und Asymptote, ist als oberste Stufe in der Modellhierarchie vorteilhaft, da dadurch eine Reduktion der Korrelation zwischen den Parametern erreicht wird, was für eine anschließende Modellierung der Standorteffekte als vorteilhaft beurteilt werden kann.
3. Aufgrund der verfügbaren Datenbasis sind drei Modellstufen notwendig, um das Durchmesserwachstum eines Einzelbaumes hinreichend standort- und behandlungssensitiv abzubilden. Die drei Stufen umfassen die modifizierte Bertalanffy-Funktion als Grundmodell, deren Parameter p_1 dabei in Abhängigkeit von Klimavariablen geschätzt wird, die Berücksichtigung von Effekten von Bodenvariablen auf der zweiten Hierarchieebene und von Dichte- und Konkurrenzmaßen auf der dritten Hierarchieebene.

6. Summary

The projected climate change will induce growth relevant changes in site conditions. The complex spatial and temporal pattern of various climate variables needs to be addressed in forest growth modelling. The climate impact research of the Northwestern Forest Research Institute (NW-FVA) comprises climate-sensitive site-productivity modelling as well as adapting the diameter growth functions implemented in the forest growth model TreeGrOSS (NAGEL, 2009). It is the goal of the here presented research to model single tree diameter growth site and treatment sensitively.

The available data base represents different regions of Germany. Climate variables are on hand nationwide, while soil variables can only be retrieved for the area of Lower Saxony with adequate precision. Finally, density and competition measures are only available for long-term experimental plots. Thus, a hierarchy of models are proposed to include step-wise the different growth relevant factors, beginning with climate variables, followed by soil parameters and finally stand and tree information. Following hypotheses are postulated:

1. The top-down modelling approach is necessary because of the available data base. It is suitable, if variables to be subsequently included are approximately balanced. This assumption holds true in our case as the data base is large with fairly small-scale variation of soil parameters, stand structures and treatment methods.
2. At the highest model hierarchy it is beneficial to formulate a basic model with biologically interpretable mathematical entities such as inflection points and an asymptote. Furthermore, such a basic model reduces the between parameter correlation, which is advantageous for subsequently modelling of site effects.
3. Owing to the data base three model hierarchies are necessary to represent the single-tree diameter growth site and treatment sensitively. The three model levels comprise a modified Bertalanffy function with the parameter p_1 estimated as a function of climate variables, accounting for soil effects at the second level, and finally quantifying the effects of stand density and competition at the lowest hierarchical level.

7. Danksagung

Diese Untersuchung entstand im Rahmen des Verbundprojektes „Nachhaltiges Landmanagement im Norddeutschen Tiefland“ und wird unter dem Förderkennzeichen 033L029 vom [BMBF](#) im Rahmen der Fördermaßnahme [Nachhaltiges Landmanagement](#) gefördert.

Wir danken dem Niedersächsischen Forstplanungsamt für die Bereitstellung der bodenkundlichen Informationen und dem von-Thünen-Institut für die Bundeswaldinventurdaten. Dem Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde und dem Staatsbetrieb Sachsenforst wird für die Überlassung von Fichten-Versuchsflächendaten gedankt.

8. Literatur

- ALBERT, M. AND SCHMIDT, M., 2010a: 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., 2010b: Dynamik der Standort-Leistungs-Beziehungen von Buche, Eiche, Fichte, Kiefer und Douglasie unter Klimaveränderungen in Deutschland. Jahrestagung der Sektion Ertragskunde des DVFFA in Möhnesee-Körbecke vom 17.-19.05.2010.
- MARTONNE DE, E., 1926: Une nouvelle fonction climatologique: l'indice d'aridité. *La Météorologie* 21: S. 449-458.
- 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.
- NAGEL, J., 2009: Waldwachstumssimulation mit dem Softwarepaket TreeGroSS – Neuerungen, Erweiterungsmöglichkeiten und Qualitätsmanagement. In: Römisch, K.; Nothdurft, A.; Wunn, U. (Hrsg.): Tagungsband der gemeinsamen Jahrestagung der Sektion Forstliche Biometrie und Informatik im DVFFA (20. Tagung) und der AG Ökologie u. Umwelt in der Intern. Biometr. Gesell., 22.-24.09.2008 in Freiburg. *Die Grüne Reihe*, S. 174-178
- OVERBECK, M., SCHMIDT, M., FISCHER, CH., EVERS, J., SCHULZE, A., HÖVELMANN, T. UND SPELLMANN, H., 2011: Ein statistisches Modell zur Regionalisierung der nutzbaren Feldkapazität von Waldstandorten in Niedersachsen. *Forstarchiv* 82: S. 92-100.
- PINHEIRO, J., BATES, D., DEBROY, S., SARKAR, D. AND THE R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011: nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-102.
- 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>
- RIPLEY, B., HORNIK, K., GEBHARDT, A., AND FIRTH, D., 2012: Package ‘MASS’. <http://www.stats.ox.ac.uk/pub/MASS4/>
- SCHMIDT, M., 2010: Ein standortsensitives, longitudinales Höhen-Durchmesser-Modell als eine Lösung für das Standort-Leistungs-Problem in Deutschland. Tagungsband der Jahrestagung der Sektion Ertragskunde im DVFFA vom 17.-19.05.2010 in Körbecke am Möhnesee, 131-152
- SCHÖNFELDER, E., 1987: Eigenschaften der Schätzungen für Parameter in nichtlinearen Regressionsfunktionen – dargestellt am Beispiel der vierparametrischen RICHARDS-Funktion. Diss. Uni. Rostock,
- 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.
- WILPERT, K.V., 1990: [Die Jahrringstruktur von Fichten in Abhängigkeit vom Bodenwasserhaushalt auf Pseudogley und Parabraunerde : ein Methodenkonzept zur Erfassung standortsspezifischer Wasserstreßdisposition](#). *Freiburger bodenkundl. Abhandlungen*, Nr.24: 184 S.
- WOOD, S.N., 2006. *Generalized additive models: an introduction with R*. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton: 391p.