

Standortsensitive Modellierung der Produktivität

Susanne Brandl¹, Wolfgang Falk¹, Tobias Mette¹, Thomas Rötzer², Hans Pretzsch²

¹Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF)

²Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Technische Universität München

Zusammenfassung

Die statistische Modellierung des Standort-Leistungsbezugs einer Baumart benötigt weite Umweltgradienten. Die Daten nationaler Waldinventuren (NFI) decken die jeweilige Landesfläche systematisch ab und bilden damit die Bandbreite an Standortbedingungen des jeweiligen Landes gut ab. Im Regelfall reicht das Verbreitungsgebiet einer Baumart aber über die Landesgrenzen hinaus. Oftmals werden gerade die klimatischen Randbereiche nicht erfasst. Die Kombination der Daten mehrerer Länder deckt einen größeren Umweltgradienten ab und erweitert damit die Anwendbarkeit standortbezogener Modelle. Allerdings bringt dies auch gewisse Anforderungen an die Zielgröße des Modells (Maß für die Produktivität) mit sich. Diese muss aus Daten ableitbar sein, die zumindest bei den meisten nationalen Waldinventuren standardmäßig und methodisch vergleichbar erhoben werden. Die Studie widmet sich deshalb der Frage, welche aus NFI-Daten ableitbare Zielgröße sich am besten für die standortsensitive Modellierung der Produktivität eignet. Aus theoretischen Überlegungen fiel die Wahl auf die Weise'sche Oberhöhe (hw) im Alter 100. Bonitiert wurde statisch nach dem Streifen-Verfahren, wobei die Alters-Höhen-Beziehung mit der Chapman-Richards-Funktion oder der semi-Log-Funktion angepasst wurde. An einem simulierten Datensatz wurden Stichproben nach dem Verfahren der deutschen Bundeswaldinventur (BWI) und der französischen NFI (NFIFR) gezogen. Es zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den aus Bestand und den jeweiligen Stichproben berechneten Oberhöhen. Ebenfalls am simulierten Datensatz wurden die Effekte unterschiedlicher Bestandesdichten und die Auswirkungen von Fehlern in der Altersschätzung untersucht. Anschließend wurde die Methodik auf die BWI und die NFIFR angewendet. In diesem Beitrag wird ein Modell für die Fichte vorgestellt, das die Höhenbonität in Abhängigkeit von mittlerer Temperatur und Niederschlagssumme während des wärmsten Quartals beschreibt.

Summary

Modelling the relationship between site conditions and productivity requires large environmental gradients. National forest inventories (NFI) systematically cover a country's forest area and thus represent the whole range of site conditions. Combining NFI data of various countries reduces the extrapolation range of statistical models and enhances their applicability. But this also entails some requirements for the response variable in the model. It has to be based on parameters that are surveyed in most NFIs. Therefore, this study investigates which response variable is best suited for modelling the relationship between site conditions and productivity based on NFI data. Theoretical reasoning led to the choice of the top height according to Weise (hw) at age 100 i.e. site index (SI). SI was derived based on the "Streifen-Verfahren", fitting a Chapman-Richards function or a semi-Log function to the height-age-relationship. In order to test the suitability of the approach stands were simulated and samples were drawn according to the German and French NFI sampling method. hw calculated from the sample represented the stand well. This was true both for the German NFI sample and for the French NFI sample. There was a good accordance between hw derived from the German NFI sample and the French NFI sample as well. The effects of stand density and errors in age measurements were analyzed using the simulated dataset as well. In the end the method developed was applied to the German and French NFI. In this article a model for Norway spruce is presented, that explains SI in dependence on mean temperature and precipitation sum of the warmest quarter.

Einleitung

Der Zusammenhang zwischen Standort und Leistung einer Baumart wird traditionell in Ertragstafeln abgebildet. Die Standorteinwertung klassischer Ertragstafeln erfolgt über die Alters-Höhenbeziehung des Bestandes. Heute übersteigt allerdings gerade das Jugendwachstum vieler Bestände den Rahmen der Ertragstafeln. Dies führt bei Bonitierung größerer Datensätze auf Ertragstafel-Basis zu einem Alterstrend in den Bonitäten. Offensichtlich ändern sich mit dem Klima auch die Alters-Höhen-Beziehungen

von Beständen und Ertragstafeln verlieren ihre Gültigkeit. Klimaszenarien prognostizieren für Deutschland einen deutlichen Temperaturanstieg sowie eine Veränderung der Niederschlagsverteilung über das Jahr. Nicht nur die Ertragstafeln, auch das Erfahrungswissen des Försters ist dann nicht mehr eins zu eins auf die Zukunft übertragbar. Ein statistisches Modell, das die Leistung einer Baumart in Abhängigkeit von Klima erklärt, ermöglicht hingegen Vorhersagen der Produktivität auch für veränderte Klimabedingungen.

In der klassischen Waldwachstumskunde werden meist Daten von forstlichen Versuchsflächen ausgewertet, um Fragestellungen zu Vitalität und Wachstum zu beantworten. Lange Beobachtungszeiträume, genaue Dokumentation der forstlichen Eingriffe und Messungen an allen Bäumen auf der Fläche machen Versuchsflächendaten zu einer einzigartigen Quelle für wissenschaftliche Erkenntnisse. Aufgrund der hohen Kosten gibt es jedoch nur eine begrenzte Anzahl von Versuchsflächen, die räumlich nicht gleichmäßig verteilt sind und nur einen Teil des Standortpektrums repräsentieren. Sollen allgemeine Zusammenhänge zwischen Standort und Leistung statistisch abgesichert erfasst werden, muss das Spektrum an Umweltbedingungen der Wälder ausreichend abgedeckt werden. Dies ist besonders im Hinblick auf die Verlässlichkeit von Prognosen entscheidend. Hier kommen die Daten nationaler Waldinventuren (NFI) ins Spiel, die in einem engmaschigen Gitternetz systematisch die gesamte Landesfläche abdecken. So deckt die Bundeswaldinventur in Deutschland die gesamte Landesfläche in einem 4 km x 4 km Raster ab.

Bei Zukunftsprognosen gelangt man allerdings, selbst bei der Verwendung auf deutschlandweiten Daten basierender Modelle, in weiten Bereichen in einen Extrapolationsbereich. Dies bedeutet, dass in der Zukunft klimatische Verhältnisse erreicht werden, für die es in der Gegenwart in Deutschland für die jeweilige Baumart keine Vorkommen bzw. keine Vorkommen in nennenswerter Dichte gibt. Prognosen der Produktivität unter zukünftigem Klima sind allerdings nur verlässlich, wenn sich das Modellverhalten auf ausreichend Lerndaten gründet.

Die Daten nationaler Waldinventuren in Europa, die teilweise online verfügbar sind, bieten die Chance, die Datenbasis für die Modellanpassung zu erweitern. Für verlässliche Erkenntnisse und Prognosen muss das Wachstumsverhalten in Regionen betrachtet werden, die bereits heute die klimatischen Verhältnisse aufweisen, die in Zukunft für Deutschland zu erwarten sind. Zu den wichtigsten Wachstumsfaktoren gehören vor allem Sommerwärme, ausreichend Niederschläge während der Vegetationsperiode und passende Wintertemperaturen (wichtig bzgl. der Frosttoleranz der jeweiligen Baumart). Natürlich spielt auch der Boden eine wichtige Rolle, aber im Hinblick auf Wachstumsveränderungen in der Zukunft sind die klimatischen Faktoren entscheidend. Jedes Klimaszenario prognostiziert eine bestimmte Entwicklung dieser drei Faktoren. Betrachtet man die in der Zukunft zu erwartenden Kombinationen dieser drei Faktoren für die Bundesrepublik und sucht nach Gebieten, in denen diese Verhältnisse jetzt schon auftreten, so wird man vor allem in Frankreich fündig (Abbildung 1). Das Wachstum und die Vitalität heimischer Baumarten in diesen sogenannten Analogklimaten liefern wichtige Erkenntnisse, womit in Zukunft auch in Deutschland zu rechnen ist (KÖLLING et al. 2016, KÖLLING und ZIMMERMANN 2014).

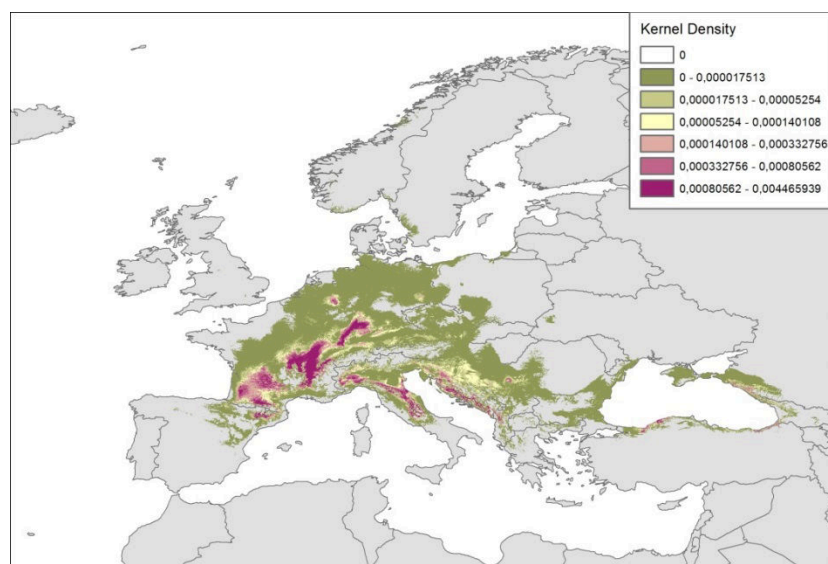


Abbildung 1: Einfärbung von Regionen in Europa, die bereits heute das für Deutschland im Jahr 2070 prognostizierte Klima aufweisen. Je höher der Wert der Kernel Density ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass Deutschland in der Zukunft ein Klima aufweist, wie es in der entsprechenden Region bereits heute vorherrscht. Die dunklen Magenta-Töne kennzeichnen die wahrscheinlichsten Analogklimata.

Frankreich ist deshalb so interessant, weil es das wahrscheinlichste Analogklima aufweist und gleichzeitig die wichtigsten deutschen Baumarten dort in ausreichender Abundanz vorkommen, um statistisch abgesicherte Schlüsse ziehen zu können.

Ziel dieser Arbeit war es deshalb, ein Standort-Leistungs-Modell basierend auf einem kombinierten Datensatz der BWI und der französischen NFI (NFI_{FR}) zu entwickeln. Der entwickelte Ansatz soll aber nicht auf deutsche und französische NFI-Daten beschränkt sein, sondern methodisch auf beliebige Waldinventurdaten mit Höhen- und Altersangaben übertragbar sein. Beispielhaft wird der Ansatz für die Fichte vorgestellt. Neben der tatsächlichen Anwendung auf BWI- und NFI_{FR}-Daten und der Erklärung der Leistung in Abhängigkeit von Standorteigenschaften sind zwei wichtige Aspekte dieser Arbeit die Überprüfung, wie gut sich Bonitäten bei verschiedenen Waldinventurdatensätzen in Einklang bringen lassen und mit welchen Unsicherheiten bei der Bonitierung gerechnet werden muss.

Wir stützen uns dabei auf die Alters-Höhen-Beziehung und verwenden aus theoretischen Überlegungen heraus die Weise'sche Oberhöhe (h_w) als Zielhöhe. Sie basiert auf dem Kollektiv der 20 % Durchmesserstärksten Bäume eines Bestandes und ist ein Kompromiss zwischen der sehr durchforstungsanfälligen Mittelstammhöhe und der für junge Bestände wenig repräsentativen Oberhöhe.

Zentrale Fragen sind deshalb:

1. Wie gut lässt sich die Weise'sche Oberhöhe aus den Stichprobenverfahren der BWI und NFI_{FR} ableiten?
2. Welche Unsicherheiten stecken in der Zielgröße? (a) Wie sehr wirken sich Dichteunterschiede auf die Zielgröße aus? (b) Wie stark wirken sich Fehler in der Altersschätzung auf die Zielgröße aus? (c) Liefert die Chapman-Richards-Funktion oder die semi-Log-Funktion die bessere Anpassung der Höhen-Alters-Beziehung?
3. Lassen sich Unterschiede in der Zielgröße auf klimatische Unterschiede zurückführen?

Zur Beantwortung von Frage 1 und 2 wurden das französische und das deutsche Stichproben-Verfahren auf simulierte Bestände angewendet. Die Beantwortung von Frage 3 ergibt sich aus den Ergebnissen der statistischen Modellierung des Zusammenhangs zwischen Leistung und klimatischen Variablen basierend auf dem kombinierten Datensatz aus NFI_{FR} und BWI.

Material

Datensätze

BWI

Mit der BWI 3 (2012) stehen aktuelle Waldinventur-Daten von hoher Qualität zur Verfügung, die mit dem gleichmäßig über ganz Deutschland verteilten 4 km x 4 km-Raster große Umweltgradienten des Vorkommens der jeweiligen Baumart abdecken. Die Rasterpunkte werden als Trakte bezeichnet und unterteilen sich in bis zu vier Traktecken, die im Abstand von 150 m rechteckig um die Traktecke A im Südwesten eines Traktes angelegt sind. An jeder Traktecke werden mit dem Spiegelrelaskop (Winkelzählprobe mit Zählfaktor 4) Probestämme mit einem Brusthöhendurchmesser größer gleich 7 cm ausgewählt (Tabelle 1). Bei einer bestimmten Anzahl von Bäumen wird die Höhe gemessen: Im Hauptbestand sind dies zwei Bäume aus der häufigsten und ein Baum aus jeder weiteren Baumartengruppe (vgl. BMELV 2011). Eine Altersschätzung steht für jeden Baum zur Verfügung.

Tabelle 1: Statistische Kennwerte von in den Inventuren erhobenen Einzelbaumparametern.

| Inventur | Parameter | Min | Max | Mittel | SD |
|-------------------|-----------|-----|-------|--------|------|
| BWI | BHD (cm) | 7,0 | 146,8 | 35,3 | 14,4 |
| | Höhe (m) | 2,7 | 51,9 | 25,8 | 7,3 |
| | Alter (a) | 9 | 399 | 70 | 33 |
| NFI _{FR} | BHD (cm) | 7,6 | 107,0 | 31,2 | 14,8 |
| | Höhe (m) | 2,5 | 46,5 | 21,4 | 7,7 |
| | Alter (a) | 1 | 401 | 62 | 46 |

NFI

Es werden die Daten der französischen nationalen Waldinventuren von 2005 bis 2013 verwendet, da diese ein einheitliches Aufnahmedesign aufweisen (Änderung des Aufnahmedesigns 2005) und der Aufnahmezeitraum in etwa mit der BWI 3 vergleichbar ist. Die französische NFI umfasst etwa 35000 Inventurpunkte auf einem 2 km x 2 km Gitternetz, das in einer 5-Jahres-Rotation abgedeckt wird (VIDAL et al. 2007). Dementsprechend decken die französischen Waldinventurdaten repräsentativ das Bestandes- und Klimaspektrum in Frankreich ab. Es werden Parameter zu den einzelnen Bäumen (Tabelle 1) in konzentrischen Probekreisen sowie zum Bestand und zum Standort erfasst.

Umweltdaten

Für das Klima wurden die Daten von WorldClim in einer Auflösung von 30 Sekunden (ca. 1 km) verwendet. Zur Erfassung des gegenwärtigen Klimas wird der Zeitraum von 1950 bis 2000 betrachtet. Für die Zukunft liegen die RCP-Szenarien 2.6, 4.5, 6.0 und 8.5 vor (HUMANS et al. 2005). Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die wichtigsten statistischen Kennwerte der verwendeten Klimavariablen für deutsche und französische Inventurpunkte.

Tabelle 2: Übersicht über die Klimavariablen (WorldClim) für die deutschen und französischen Inventurpunkte.

| Parameter | Abkürzung | Min | Max | Mittel | SD |
|---|-----------|------|------|--------|-----|
| Mittl. Temperatur des wärmsten Quartals (°C) | Tmn_wq | 11,6 | 18,8 | 17,0 | 0,7 |
| Temperatur-Minimum des kältesten Monats (°C) | Tmin_cm | -7,9 | -0,2 | -3,1 | 0,8 |
| Niederschlagssumme des wärmsten Quartals (mm) | Psum_wq | 167 | 410 | 203 | 28 |

Methoden

Berechnung der Weisse'schen Oberhöhe

In die Berechnung von h_w fließen die 20 % (Durchmesser-)stärksten Bäume einer Baumart eines Bestandes ein. Für dieses Kollektiv wird der Durchmesser des Grundflächenmittelstamms bestimmt (Weisse-Durchmesser d_w). Die aus der Einheitshöhenkurve zu d_w abgegriffene Höhe entspricht der Weisse'schen Oberhöhe (PRETZSCH 2002). Zur Bestimmung der h_w eines Inventurpunkts wurde die Stichprobe auf einen Hektar hochgerechnet und eine Dichtefunktion (Bandweite $bw = 3$, VENABLES und RIPLEY 2002) über die BHD-Verteilung gelegt. Für die Kalibrierung der Einheitshöhenkurve (SLOBODA et al. 1993) wurden für jeden Inventurpunkt der BHD des Mittelstammes und die Mittelhöhe als Mittelwerte der Stichprobenbäume berechnet (DAHM 2006). Bei der BWI wurden für die Berechnung von h_w der Unterstand sowie Bäume mit Wipfel- und Kronenbruch entfernt. Bei der NFI_{FR} wurde h_w nur für Plots mit wenigstens einer Altersmessung an der jeweiligen Baumart berechnet, Bäume mit Schäden und Bäume ohne freien Kronenanteil (vergleichbar mit dem Unterstand bei der BWI) wurden ausgeschlossen.

Simulierter Datensatz

Auf Basis der Fichten-Ertragstafel von ASSMANN und FRANZ (1963) wurden 1000 Bestände simuliert. Dafür wurde jeweils basierend auf den Kennwerten eines zufällig ausgewählten Bestandes der Ertragstafel ein Einzelbaumdatensatz erzeugt. Die BHD-Verteilung wurde mittels einer Weibull-Funktion generiert (NAGEL und BIGING 1995). Die Durchmesser wurden so korrigiert, dass der ursprüngliche Durchmesser des Grundflächenmittelstammes (d_g) der Ertragstafel und der d_g des simulierten Bestandes übereinstimmen. Die entsprechenden Höhen wurden aus Einheitshöhenkurven abgegriffen und eine normalverteilte Varianz angenommen (Mittelwert = 0, Standardabweichung = $f(\text{BHD})$).

Stichproben

Auf jeden simulierten Bestand wurde sowohl das deutsche (Winkelzählprobe mit Zählfaktor 4, BMELV 2011) als auch das französische Stichprobendesign (konzentrische Probekreise, VIDAL et al. 2007) angewendet.

Die Aufnahmewahrscheinlichkeit eines Baumes bei der Winkelzählprobe ergibt sich aus seiner Grundfläche und dem Zählfaktor. Ist die Aufnahmewahrscheinlichkeit eines Baumes höher als eine Zufallszahl zwischen 0 und 1, so wird er in die Stichprobe aufgenommen. Der Quotient aus Zählfaktor und Grundfläche des Baumes entspricht seiner Stammzahl pro ha. Bis zu drei Bäume wurden als Höhenmessbau-

me ausgewählt. Für die übrigen Bäume wurden die Höhen als unbekannt angenommen und aus den Einheitshöhenkurven abgegriffen. Die Stichprobe wurde auf einen Hektar hochgerechnet.

Ein französischer Inventurpunkt besteht aus drei konzentrischen Probekreisen mit festen Radien. Somit können drei Durchmesserklassen mit verschiedenen Aufnahmewahrscheinlichkeiten unterschieden werden. Aufnahmewahrscheinlichkeiten wurden berechnet, indem die Fläche des entsprechenden Probekreises durch 10.000 geteilt wurde. Ist die Aufnahmewahrscheinlichkeit eines Baumes größer als eine Zufallszahl zwischen 0 und 1, so fällt er in die Stichprobe. Die Stichprobe wurde ebenfalls auf einen Hektar hochgerechnet.

Das d_w und h_w entsprechende Alter (a_w) wurde als das mittlere Alter des Oberhöhenkollektivs berechnet.

Die aus den Stichproben berechneten Maße wurden anhand der Wurzel des mittleren erwarteten Vorhersagefehlers (RMSE) und des Bias verglichen. RMSE wurde bezogen auf das aus dem Bestand basierende Maß berechnet. Der Bias entspricht der Steigung einer linearen Regression ohne Intercept des auf dem Bestand basierenden Maßes über dem aus der Stichprobe ermittelten Maß.

SI Berechnung

Um die Höhenbonität oder den Site Index (SI), also h_w im Alter 100, zu erhalten, müssen h_w und a_w zueinander in Beziehung gesetzt werden. Dafür wurden zwei weit verbreitete Funktionen getestet: die Chapman-Richards-Funktion ($h_w = A * (1 - e^{-k*a_w})^p$) und die semi-Log-Funktion ($h_w = a + b * \ln(a_w)$). Es wurden 5 %- und 95 %-Quantilsregressionen angepasst. Über die Position von h_w innerhalb der Spanne zwischen dem 5 %- und 95 %-Wert des jeweiligen Alters erfolgt eine Einordnung des Höhenwachstumspotentials. Über diese Einordnung kann h_w auf eine Höhe im Alter 100 umgerechnet werden. So wird beispielsweise einem Inventurpunkt, dessen Oberhöhe im Alter 50 beim 95 %-Quantil der für dieses Alter gemessenen Höhen liegt, das 95 %-Quantil der im Alter 100 gemessenen Höhen als Bonität zugewiesen.

Die Bonitierung entspricht damit dem durch von Baur eingeführten Streifen-Verfahren, bei dem die Bonität aus der momentanen Alters-Höhen-Relation ermittelt wird (PRETZSCH 2001).

Unsicherheit in der Altersschätzung

Die Altersangabe bei NFI-Daten wird häufig über Angaben zur Bestandesbegründung oder Jahrringzählung an Stöcken geschätzt und nur selten über Bohrungen verifiziert. Um die Auswirkungen von Unsicherheiten in der Altersschätzung zu veranschaulichen, wurde eine Chapman-Richards-Funktion an die Oberhöhen-Entwicklung für jede Bonität der Ertragstafel angepasst. In der Ertragstafel wird als Oberhöhe h_{100} und nicht h_w aufgeführt. Für die Untersuchung der Auswirkungen von Fehlern in der Altersschätzung macht dies allerdings keinen Unterschied. Die Analyse nimmt die Beziehung zwischen Oberhöhe und Alter als „wahr“ an. Wird der Exponent p in der Chapman Richards Funktion auf 1,8 fixiert, lässt sich die Höhen-Alters-Entwicklung der Ertragstafel hinreichend genau nachzeichnen. Wird zudem die Maximalhöhe A für jede Bonität aus der Ertragstafel geschätzt, lässt sich der Parameter k durch A über eine lineare Regression erklären. Die resultierenden Funktionen erlauben die Berechnung der Oberhöhe im Alter 100. Dieselbe Berechnung kann nun auch für einen gerichteten Altersfehler z.B. von +10 sowie -10 Jahren durchgeführt werden. Da es aber keine realistische Annahme darstellt, dass das Alter immer über- oder unterschätzt wird, wurde in einem nächsten Schritt eine Normalverteilung (Mittelwert = 0, Standardabweichung = 5) des Altersfehlers angenommen.

Gemeinsame Bonitierung von BWI und NFI_{FR}

Für die Bonitierung über die Höhen-Alters-Beziehung wurden aus BWI- und NFI_{FR} Inventurpunkte mit einem Grundflächenanteil der Fichte ≥ 70 % ausgewählt. Bei der BWI liegt eine Altersschätzung für alle Bäume der Stichprobe vor. Bei der NFI_{FR} wird das Alter an einem oder zwei dominanten Bäumen durch Bohrung bestimmt. Für die BWI wurde das mittlere Alter des d_w -Kollektivs berechnet. Für die NFI wurden die gemessenen Alter auf Brusthöhe der Bäume des d_w -Kollektivs gemittelt (SEYNAVE et al. 2005) und pauschal 5 Jahre addiert (SHARMA et al. 2011) (Tabelle 3). Der Datensatz wurde bezüglich der Bestandesstruktur gefiltert: Bei der BWI wurden Plenterwälder ausgeschlossen. Bei der NFI_{FR} wurden

stark von Störungen betroffene Plots, Plots mit Niederwald oder einer Mischung aus Hoch- und Niederwald sowie Plots mit einer Waldbedeckung < 40 % oder Plots, bei denen die aufzunehmenden Bäumen ≤ 10 % der Bedeckung ausmachen, ausgeschlossen. Die Höhen-Alters-Beziehung wurde mit der Chapman-Richards-Funktion angepasst.

Tabelle 3: Statistische Kennwerte der für die Bonitierung und das SI-Modell relevanten Parameter.

| Parameter | Min | Max | Mittel | SD |
|------------|------|-------|--------|------|
| d_w (cm) | 11,8 | 125,8 | 43,2 | 14,3 |
| h_w (m) | 5,3 | 50,8 | 26,6 | 7,3 |
| a_w (a) | 9 | 291 | 70 | 35 |
| SI (m) | 14,3 | 49,9 | 32,4 | 4,7 |

Anwendung: Modellierung des SI

Um die Wirkung der klimatischen Faktoren möglichst klar herauszuarbeiten, wurde der Datensatz vor der Modellanpassung bezüglich der übrigen Umweltparameter gefiltert. Anhand der zur Verfügung stehenden Angaben, wurden Inventurpunkte mit Stau-/Grundwassereinfluss und hohen Skelettgehalten bzw. geringen Mächtigkeiten identifiziert. Es wurden also die Inventurpunkte entfernt, auf denen mit hoher Wahrscheinlichkeit Bodeneigenschaften das Wachstum entscheidend beeinflussen und damit das Klimasignal stören. Für eine Berücksichtigung von Bodenparametern im Modell müssten französische und deutsche Umweltparameter vereinheitlicht werden. Wegen unterschiedlicher Methodik und Variablendefinitionen wäre dies nur bedingt möglich gewesen. Ziel der Modellierung war es, ein möglichst klares Klima-Signal zu erhalten. Für die Erfassung des klimatischen Einflusses auf das Wachstum wurden basierend auf früherer Erfahrung die mittlere Temperatur des wärmsten Quartals (T_{mn_wq}), die Niederschlagssumme des wärmsten Quartals (P_{sum_wq}) und die Minimumtemperatur des kältesten Monats (T_{min_cm}) ausgewählt (BRANDL et al. 2014, ALBERT und SCHMIDT 2010). Sommertemperatur und Sommerniederschlag haben gegenüber Jahresmittelwerten bzw. -summen den Vorteil, dass sie sich stärker an den für die Bäume physiologisch relevanten Temperatur- bzw. Niederschlagszeiträumen orientieren. Für die Modellierung des Zusammenhangs zwischen SI und Klimavariablen wurden generalisierte additive Modelle (WOOD 2006) mit Monotonie-Vorgaben (SCAM) mit einer Gamma-Verteilung der Fehler und log-Link-Funktion verwendet (PYA und WOOD 2015). Monotonie-Vorgaben gewährleisteten die ökologische Plausibilität der modellierten Effekte (SCHMIDT et al. 2015). Die Variablenselektion und die Einführung von Monotonie-Vorgaben für die Effekte fallen unter den Begriff der hypothesengetriebenen Modellierung (MELLERT et al. 2011, MELLERT et al. 2016). Für T_{mn_wq} wird ein unimodaler Zusammenhang erwartet, für P_{sum_wq} erscheint eine Sättigungskurve am plausibelsten, für T_{min_cm} ist sowohl ein monoton steigender als auch ein unimodaler Zusammenhang vorstellbar (DOLOS et al. 2015, NOTHDURFT et al. 2012, LANDSBERG und SANDS 2011, KAHN 1995).

Ergebnisse

Wie gut lässt sich die Weise'sche Oberhöhe aus den Stichprobenverfahren der BWI und NFI_{FR} ableiten?

Vergleiche zwischen h_w berechnet für den gesamten Bestand und h_w berechnet aus der jeweiligen Stichprobe zeigen eine sehr gute Übereinstimmung (BWI: $cor = 0,992$, NFI_{FR} : $cor = 0,997$), es gibt keine systematische Verzerrung (BWI: $bias = 1,015$, NFI_{FR} : $bias = 1,010$) (Abbildung 2). Die Übereinstimmung zwischen den beiden Stichprobenverfahren ist ebenfalls hoch ($cor = 0,989$, $bias = 0,994$).

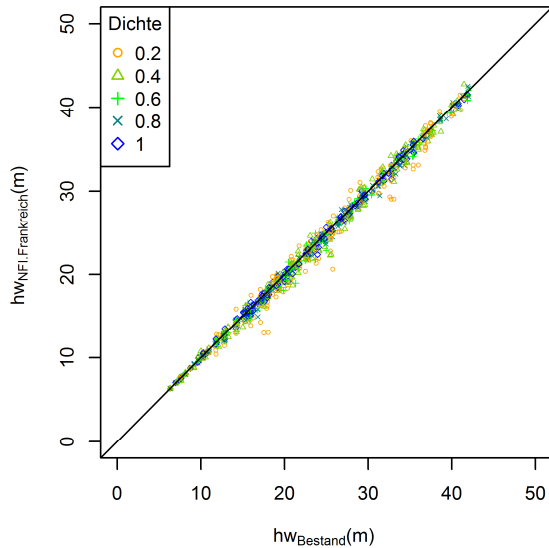


Abbildung 2: Zusammenhang zwischen der aus dem Bestand berechneten h_w und der aus der französischen NFI-Stichprobe berechneten h_w .

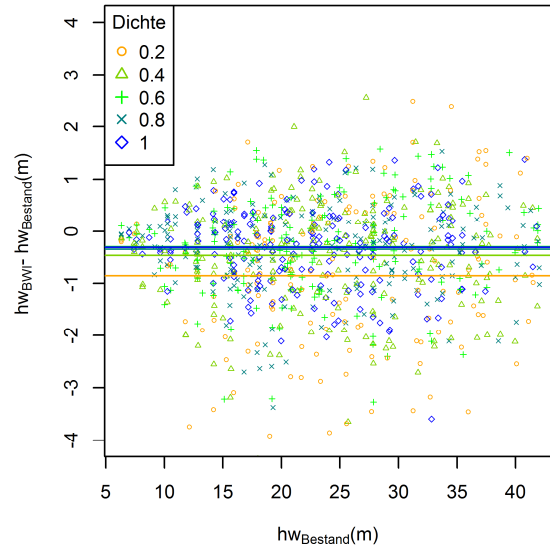


Abbildung 3: Abweichung zwischen der aus dem Bestand berechneten h_w und der aus der BWI-Stichprobe berechneten h_w für verschiedene Bestandesdichten; die horizontalen Linien kennzeichnen jeweils die mittlere Abweichung.

Welche Unsicherheiten stecken in der Zielgröße? (a) Wie sehr wirken sich Dichteunterschiede auf die Zielgröße aus? (b) Wie stark wirken sich Fehler in der Altersschätzung auf die Zielgröße aus? (c) Liefert die Chapman-Richards-Funktion oder die semi-Log-Funktion die bessere Anpassung der Höhen-Alters-Beziehung?

Da h_w als Höhe des Grundflächenmittelstamms der oberen 20 % der Durchmesser immer relativ zur Kollektiv-Stärke berechnet wird, ist sie sehr stabil gegenüber Dichte- und Dimensions-Effekten. So ist ab einer Bestockung von 40 % (relativ zur Ertragstafel Grundfläche) der Inventurmethode bedingte Bias < 0,5 m und die Standardabweichung < 1 m (Abbildung 3).

Abbildung 4 zeigt die Auswirkung eines gerichteten Altersfehlers von ± 10 Jahren auf die Schätzung der Oberhöhe über die Chapman-Richards-Funktion für jede Ertragsklasse der Ertragstafel. Die gepunkteten Linien stellen die geschätzte Oberhöhe bei einer Unterschätzung des Alters dar, die gestrichelten Linien bilden den Effekt einer Überschätzung des Alters ab. Abbildung 5 zeigt die Spanne des Fehlers in der Oberhöhenschätzung in Abhängigkeit vom Alter bei Annahme eines normalverteilten Altersfehlers.

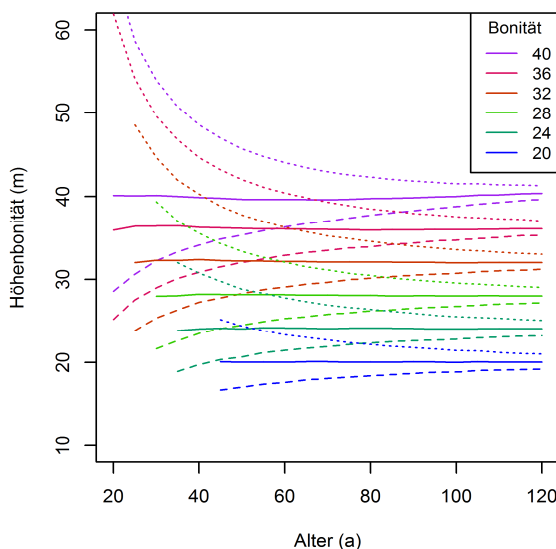


Abbildung 4: Effekt eines gerichteten Altersfehlers ± 10 Jahre auf die Oberhöhe; gepunktete Linien stellen die geschätzte Oberhöhe bei einer Unterschätzung des Alters dar, gestrichelte Linien bei einer Überschätzung des Alters.

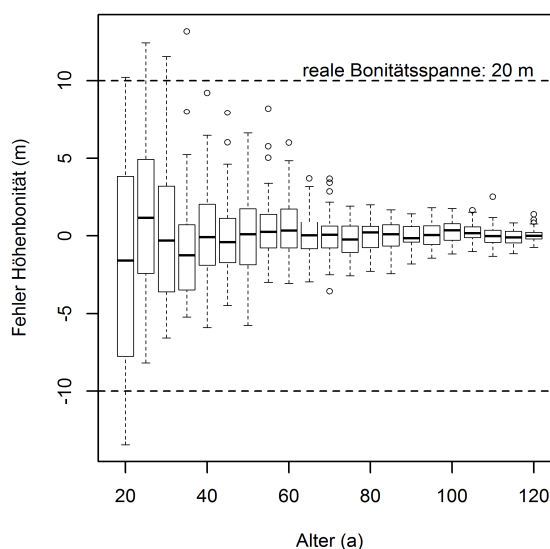


Abbildung 5: Spanne des Fehlers in der Oberhöhenschätzung bei normalverteiltem Altersfehler.

Die Alters-Höhen-Beziehung für die Bonitierung wurde sowohl mit einer Chapman-Richards-Funktion als auch einer semi-Log-Funktion angepasst (Abbildung 6). Die so ermittelten SI wurden mit den, den simulierten Beständen zugrunde liegenden, Höhenbonitäten der Ertragstafel über lineare Regressionen verglichen. Werden die SI über die Chapman-Richards-Funktion ermittelt, ergibt sich ein R^2 von 0,953. Für die semi-Log-Funktion ergibt sich ein R^2 von 0,949. Ein Vergleich der Standardabweichungen je Ertragstafel-Bonität zeigte ebenfalls keine nennenswerten Unterschiede. Das unterschiedliche Verhalten der beiden Funktionen würde sich v.a. bei sehr niedrigen und sehr hohen Altern auswirken, die im auf der Ertragstafel basierenden simulierten Datensatz nicht (für alle Bonitäten) repräsentiert sind.

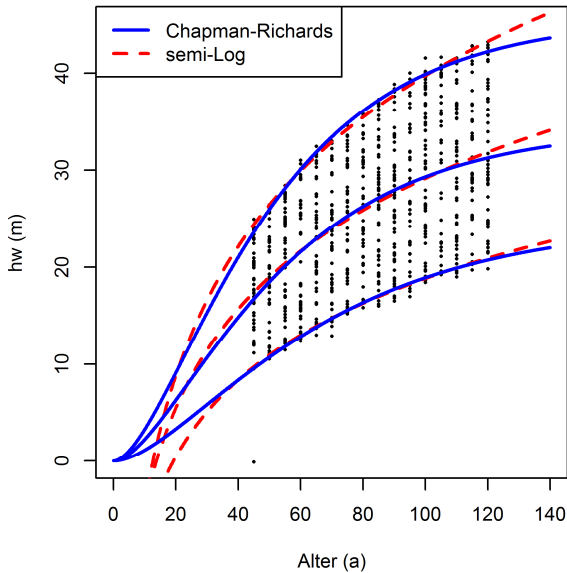


Abbildung 6: Anpassung der Chapman-Richards-Funktion und der semi-Log-Funktion an die Höhen-Alters-Beziehung.

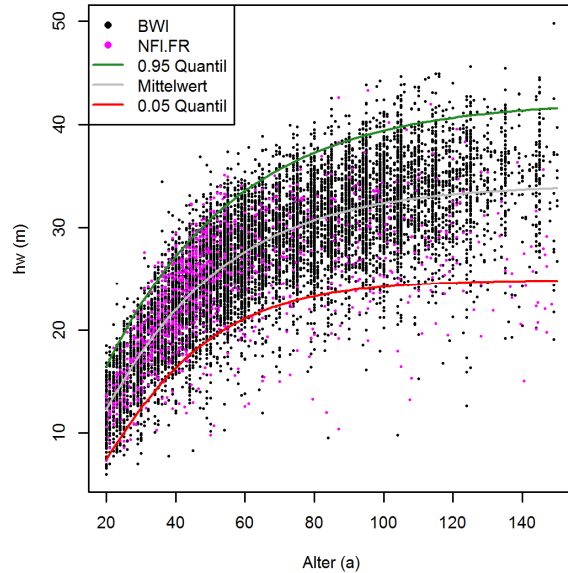


Abbildung 7: Anpassung der Chapman-Richards-Funktion für den Zusammenhang zwischen Weiser'scher Oberhöhe und Alter für die Fichte.

Lassen sich Unterschiede in der Zielgröße auf klimatische Unterschiede zurückführen? (Anwendungsbeispiel: Bonitierung von BWI und NFI_{FR} und statistische Modellierung des SI)

Die entwickelte Methodik wurde auf den kombinierten Datensatz aus BWI und NFI_{FR} angewendet. Für die Fichte wurde für die Ermittlung des SI die Beziehung zwischen h_w und Alter mit der Chapman-Richards-Funktion angepasst (Abbildung 7).

Es wurde ein Modell ausgewählt, das den SI in Abhängigkeit der klimatischen Variablen erklärt (Tabelle 4):

$$SI = f(Psum_wq) + f(Tmn_wq)$$

Tabelle 4: Detaillierte Zusammenfassung des SI-Modells.

| | Schätzung | Standardfehler | T-Statistik | p-Wert |
|--------------------|-----------|----------------|-------------|------------------------|
| Intercept | 2,4565 | 0,1355 | 18,14 | $< 2 \times 10^{-16}$ |
| | edf | df Residuen | F-Statistik | p-Wert |
| s(Tmn_wq) | 2,015 | 2,001 | 449,27 | $< 2 \times 10^{-16}$ |
| s(Psum_wq) | 2,741 | 3,120 | 16,31 | $9,41 \times 10^{-11}$ |
| korrigiertes R^2 | | 0,132 | | |

Bei niedrigen Sommertemperaturen zeigt sich ein starker Anstieg des SI, bei hohen Temperaturen wird dieser Anstieg schwächer (Abbildung 8). Bei sehr hohen Sommertemperaturen (ab ca. 18 °C) wird der Optimumsbereich überschritten und der SI geht wieder zurück. In diesem Bereich stehen aber nur noch sehr wenige Datenpunkte hinter der Modellanpassung. Für den Niederschlag kann eine Sättigungskurve angepasst werden (Abbildung 8). Unterschiede im trockenen Bereich wirken sich stark aus, ab einem Niederschlag von ca. 250 mm wirkt sich dieser im Modell kaum mehr auf den SI aus.

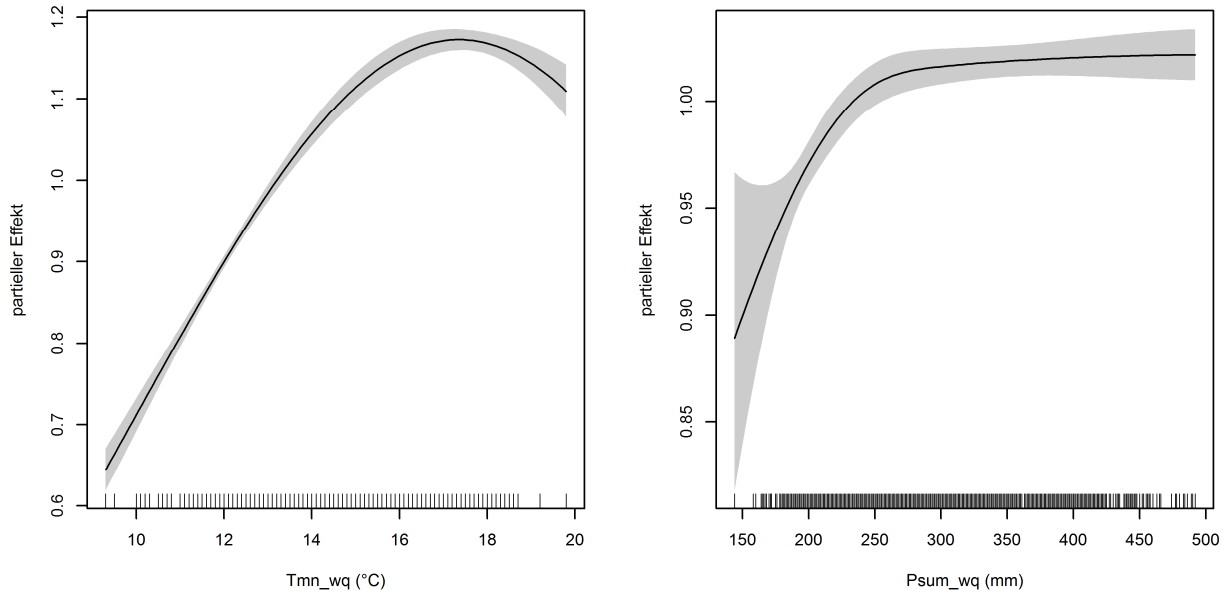


Abbildung 8: partielle Effekte von Tmn_wq und $Psum_wq$ im SI-Modell für die Fichte.

Bei flächig vorliegenden Klimavariablen ist auch eine flächenhafte Vorhersage des SI möglich. Die Karte (Abbildung 9) zeigt den modellierten SI für die Gegenwart für die Fichte. Teile des borealen Verbreitungsgebiets der Fichte sind grau maskiert, da hier das Modell über BWI und NFI_{FR} keine Lerndaten hatte. Insgesamt bildet die Karte ab, dass das Wachstum dort am besten ist, wo sowohl Temperatur als auch Niederschlag während des wärmsten Quartals ausreichend sind. So zeigt sich beispielsweise eine hohe Leistung der Fichte in Süddeutschland, wohingegen das Wachstum in Skandinavien kältelimitiert ist. Bei der Interpretation der Karte ist zu beachten, dass rein das klimatische Potential abgebildet wird und keine Effekte des Bodens berücksichtigt sind. So können z.B. ungünstige Bodeneigenschaften das Wachstum reduzieren und günstige Bodeneigenschaften negative klimatische Effekte abschwächen.

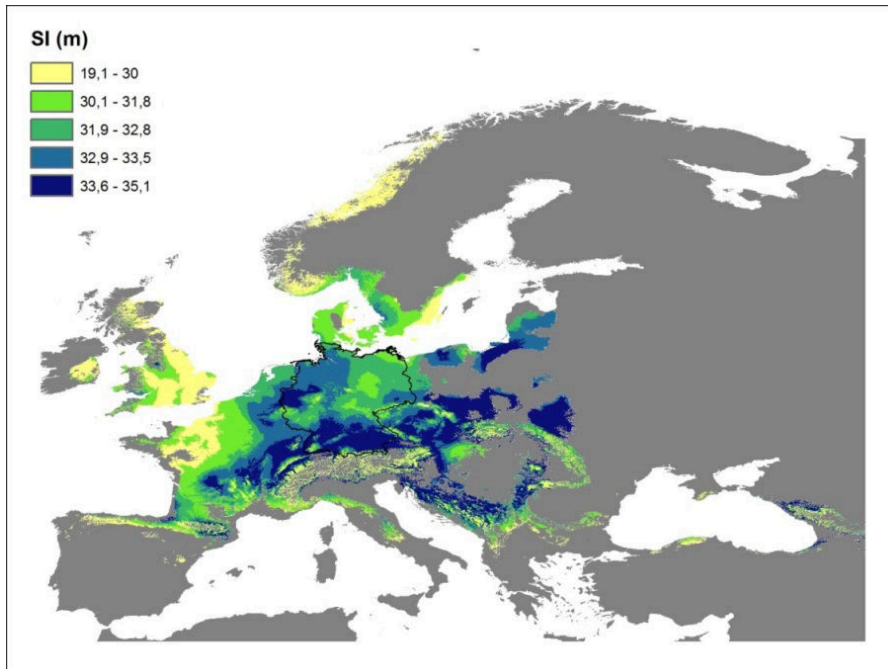


Abbildung 9: Modellierter SI der Fichte für die Gegenwart.

Diskussion

h_w als Maß für die Leistung

In einer früheren Studie haben wir für Bayern basierend auf BWI -Daten Modelle mit sehr einfacher Struktur angepasst, die die Höhe des Einzelbaums in Abhängigkeit von Alter, sozialer Stellung und

Standortparametern erklären und konnten damit flächendeckende Vorhersagen des Höhenwachstumspotentials machen (BRANDL et al. 2014). Allerdings liegen im Gegensatz zur BWI für viele Inventuren keine Einzelbaumalter vor. Liegen Wiederholungsaufnahmen vor, könnte alternativ der Höhenzuwachs des Einzelbaums betrachtet werden. Aufgrund des Messfehlers bei der Höhenmessung wäre die Zielgröße jedoch mit relativ großer Unsicherheit behaftet.

In einer früheren Studie wurde auch der Versuch unternommen die Produktivität eines Standorts direkt zu erfassen und den oberirdischen Biomassezuwachs sowie die Nettoprimärproduktion (NPP) eines Bestandes aus BWI-Daten abzuleiten (BRANDL et al. 2015). Dafür spricht, dass die Höhe nur Indikator für die Produktivität eines Standorts, die NPP hingegen eine direkte, physiologische Größe darstellt. Da sich Standorte gleicher Höhenbonität im Ertrag unterscheiden können, kann mit der NPP zumindest theoretisch zwischen verschiedenen Ertragsniveaus differenziert werden. Allerdings bringt dieser Ansatz für NFI-Daten auch viele Schwierigkeiten mit sich: Durchforstete Bestände nutzen das Zuwachspotential des Standortes nicht voll aus. Deshalb muss ein Weg gefunden werden, wie die Effekte von Bestandesdichte und der Durchforstung auf die NPP von den Effekten der Umweltvariablen unterschieden werden können. Letztendlich müssen dabei viele Annahmen getroffen werden, die zur Unsicherheit der Schätzung beitragen. Hinzu kommt, dass Wiederholungsaufnahmen oder Zuwachsmessungen notwendig sind.

Aus diesen Gründen fiel die Entscheidung auf die Oberhöhe im Alter 100 (Höhenbonität, SI). Dies bringt einige Vorteile mit sich: Die Höhe ist messbar und relativ „behandlungsstabil“. Zudem ist sie ein in der Forstwirtschaft etabliertes und intuitiv verständliches Maß für die Ertragsfähigkeit eines Standorts. Wird die Höhenbonität als Zielgröße im Modell verwendet, werden als erklärende Variablen nur Standortparameter benötigt. Damit ist der Erklärungsbeitrag der Umweltvariablen sofort klar ersichtlich und Veränderungen der Leistung mit sich verändernden Standortbedingungen können direkt abgeschätzt werden. Da die Oberhöhe ein Maß auf Bestandesebene ist, werden auch nicht unbedingt Einzelbaumalter benötigt.

Als Oberhöhe wurde die Weise'sche Oberhöhe (h_w) gewählt. Diese ist definiert als die Höhe des Grundflächenmittelstamms der 20 % stärksten Bäume und repräsentiert die herrschenden Bäume während des gesamten Bestandeslebens (KRAMER und AKÇA 1995). Sowohl h_{100} , definiert als die Höhe des Grundflächenmittelstamms der 100 stärksten Bäume, als auch h_w sind größtenteils unbeeinflusst von Niederdurchforstung, während Hochdurchforstung eine geringere Verschiebung in h_w als in h_{100} bewirkt (KRAMER und AKÇA 1995).

Bonitierung

Im Vergleich zum Bonitieren über Ertragstabellen mit vorgegebenen Alters-Höhen-Beziehungen leitet man beim Bonitieren über das Streifen-Verfahren die Alters-Höhen-Beziehung direkt aus den Daten ab. Man gleicht damit automatisch einen Alterstrend aus, allerdings erfordert das Verfahren große Datensätze, da nur dann die Annahme einer Gleichverteilung des Standortleistungsspektrums über das Altersspektrum mit hoher Wahrscheinlichkeit erfüllt ist. Bei Verwendung von NFI-Daten stehen große Datensätze zur Verfügung. Vorteile des Verfahrens sind, dass es nicht von konstanten Standortbedingungen ausgeht, keine Zeitreihen notwendig sind und die Bonitierung von NFI-Beständen aus einer Aufnahme möglich ist.

Die „statische“ Oberhöhen-Altersbeziehung liefert trotz Unsicherheiten ein empirisch stabiles und weitgehend dichte-unabhängiges Standortleistungsmaß. Die Bonität kann dabei als Integral der Leistung bis zum Messzeitpunkt interpretiert werden. Am simulierten Datensatz konnte gezeigt werden, dass die aus den Stichproben berechneten Maße repräsentativ für den Bestand sind. Ebenso konnte eine gute Übereinstimmung zwischen dem Wert für die BWI-Stichprobe und für die NFI_{FR}-Stichprobe gezeigt werden. Für die Fichte bietet die Chapman-Richards-Funktion eine geeignete Anpassung der Höhen-Alters-Beziehung. In Abhängigkeit vom Alter können sich Fehler in der Altersschätzung jedoch relativ stark auswirken. Mit höheren Altern wirken sich Unsicherheiten in der Altersschätzung aber weniger stark aus.

SI-Modell

Obwohl der Datensatz zuvor nach Bodeneigenschaften gefiltert worden war, ist die Erklärungskraft der Klimavariablen insgesamt relativ gering ($R^2 = 0,132$). Die angepassten Effekte von T_{mn_wq} und P_{sum_wq} sind jedoch ökologisch plausibel und statistisch signifikant auf einem Niveau von 0,01. Denkbare Erklärungen für die unerklärte Varianz sind fehlende Einflussfaktoren auf das Höhenwachstum, die Qualität der Datengrundlage sowie die Eignung der Methode. Das Entfernen von Inventurpunkten, auf denen der Boden mit großer Wahrscheinlichkeit das Wachstum limitiert, kann dem komplexen Einfluss des Bodens auf das Wachstum sicher nicht gerecht werden. Das Projekt zielt zwar darauf den Einfluss des Klimas auf das Wachstum zu fassen, kann dies aber nur über Mittelwerte von Temperatur und Niederschlag verwirklichen. Neben Mittelwerten der Klimavariablen spielt aber auch die Verteilung von Temperatur und Niederschlägen über das Jahr eine Rolle. Extremereignisse wie Dürre und Spätfrost können das Baumwachstum entscheidend beeinflussen. Auch Schädlingsbefall und andere Störereignisse können eine Rolle spielen (PRETZSCH et al. 2012, PRETZSCH und DIELER 2011, RÖTZER et al. 2012). Eine weitere Ursache für Variationen im Höhenwachstum könnte die genetische Diversität innerhalb der Baumarten sein (MÜLLER-STARCK et al. 1992), die sich gerade bei einer großräumigen Studie bemerkbar machen kann.

Die Eignung und Genauigkeit der Daten kann sowohl auf der Seite der Zielgröße als auch auf der Seite der erklärenden Variablen hinterfragt werden. Die Daten der BWI haben eine sehr hohe Aufnahmequalität und decken einen weiten Bereich an Umweltbedingungen ab. Dennoch weisen sie einige Nachteile auf. Das Alter ist oft nur eine grobe Schätzung. Die Untersuchung hat gezeigt, dass Fehler in der Altersschätzung sich merklich auf die SI-Schätzung auswirken. So könnte es beispielsweise einen Bias in der Altersschätzung geben, in dem für besser wachsende Bäume höhere Alter geschätzt werden, was teilweise den Einfluss der Umweltbedingungen in den Modellen nivellieren würde. Die Umweltvariablen werden hier als konstant betrachtet. Ein Baum kann jedoch im Laufe seines Lebens Änderungen in den Umweltbedingungen erfahren haben (SKOVSGAARD und VANCLAY 2013). Behandlungseffekte (RÖTZER et al. 2010) können nicht angemessen berücksichtigt werden und es ist schwierig, den Einfluss von Konkurrenz und Dichte zu erfassen, da aufgrund des Aufnahmeverfahrens der Winkelzählprobe für die BWI eine vollständige Umgebungsinformation fehlt (POMMERENING 1997). Auch bei der französischen NFI ist die Stichprobe klein und nicht unbedingt immer repräsentativ für den Bestand. Das Alter wird zwar durch die Bohrung sehr genau bestimmt, allerdings nur für ein bis zwei dominante Bäume je Inventurpunkt. Auch bei den klimatischen Variablen handelt es sich bereits um modellierte Werte, die nicht am Punkt gemessen worden sind. Dies erhöht die Unsicherheit bei der Modellierung.

Trotz all dieser Limitierungen kann aber festgehalten werden, dass die Modelle sowohl signifikante als auch ökologisch plausible Effekte der Klimavariablen anpassen und es damit ermöglichen, Veränderungen des Wachstumspotentials bei sich änderndem Klima zu prognostizieren.

Fazit

Bei der standortsensitiven Modellierung der Produktivität ist es für die Vorhersage entscheidend, weite Klimagradien abzudecken. NFI-Daten sind deshalb eine wichtige und wertvolle Datenquelle für die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Standort und Leistung. Die Zielgröße in den Modellen muss deshalb relativ einfach und aus NFI-Daten ableitbar sein. So ist die vorgestellte Methode der Bonitierung auf alle Daten mit Altersangaben anwendbar und benötigt keine Wiederholungsmessungen. Anhand eines simulierten Datensatzes konnte gezeigt werden, dass deutsche und französische NFI-Daten für die Modellierung des Standort-Leistungsbezugs kombiniert werden können.

Literaturverzeichnis

- ALBERT, M., SCHMIDT, M.: Climate-sensitive modelling of site-productivity relationships for Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and common beech (*Fagus sylvatica* L.), *Forest Ecology and Management*, 259(4):739–749, 2010
- ASSMANN, E., FRANZ, F.: Vorläufige Fichten-Ertragstafel für Bayern. Institut für Ertragskunde der Forstlichen Forschungsanstalt München, München, 1963
- BRANDL, S., FALK, W., KLEMMT, H.-J., STRICKER, G., BENDER, A., RÖTZER, T., PRETZSCH, H.: Possibilities and limitations of spatially explicit site index modelling for spruce based on National Forest Inventory data and digital maps of soil and climate in Bavaria (SE Germany), *Forests*, 5(11):2626–2646, 2014
- BRANDL, S., FALK, W., RÖTZER, T., PRETZSCH, H.: Der Zusammenhang zwischen Produktivität und Standort für Fichten-dominierte Bestände in Bayern. In: KLÄDTKE, J., KOHNLE, U. (Hg.): Tagungsbericht. Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten. Sektion Ertragskunde. Jahrestagung. Kammerforst/Thüringen, 18.-20. Mai 2015, S. 87–94, 2015
- BMELV (BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ) (Hg.): Aufnahmeanweisung für die dritte Bundeswaldinventur (BWI³) (2011-2012). 2. Aufl. Institut für Waldökologie und Waldinventuren im Johann Heinrich von Thünen-Institut, Bonn, 2011
- DAHM, S.: Auswertungsalgorithmen für die zweite Bundeswaldinventur. Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg, Institut für Waldökologie und Waldinventuren, Eberswalde, 2006
- DOLOS, K., BAUER, A., ALBRECHT, S.: Site suitability for tree species: Is there a positive relation between a tree species' occurrence and its growth?, *European Journal of Forest Research*, 134(4):609–621, 2015
- HIJMANS, R. J., CAMERON, S. E., PARRA, J. L., JONES, P. G., JARVIS, A.: Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas, *International Journal of Climatology*, 25(15): 1965–1978, 2005
- KAHN, M.: Quasikausale Modellierung des Standort-Leistungs-Bezuges als Voraussetzung zum Aufbau flexibler Mischbestandsmodelle, *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 114:175–187, 1995
- KÖLLING, C., METTE, T., KNOKE, T.: Waldertrag und Anbaurisiko in einer unsicheren Klimazukunft, *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 167(1): 29–38, 2016
- KÖLLING, C., ZIMMERMANN, L.: Klimawandel gestern und morgen. Neue Argumente können die Motivation zum Waldumbau erhöhen, *LWF aktuell* 99:27–31, 2014
- KRAMER, H., AKCA, A.: Leitfaden zur Waldmesslehre. 3. Aufl., J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt/M., 1995
- LANDSBERG, J. J., SANDS, P. J.: *Physiological ecology of forest production. Principles, processes and models.* 1st ed. Amsterdam, Boston: Elsevier/Academic Press (Terrestrial ecology series, v. 4), 2011
- MELLERT, K. H., EWALD, J., HORNSTEIN, D., DORADO-LIÑÁN, I., JANTSCH, M., TAEGER, S., ZANG, C., MENZEL, A., KÖLLING, C.: Climatic marginality: a new metric for the susceptibility of tree species to warming exemplified by *Fagus sylvatica* (L.) and Ellenberg's quotient, *European Journal of Forest Research*, 135(1):137–152, 2016
- MELLERT, K. HEINZ, FENSTERER, V., KÜCHENHOFF, H., REGER, B., KÖLLING, C., KLEMMT, H. J., EWALD, J.: Hypothesis-driven species distribution models for tree species in the Bavarian Alps, *Journal of Vegetation Science*, 22(4):635–646, 2011
- MÜLLER-STARCK, G., BARADAT, P., BERGMANN, F.: Genetic variation within European tree species, *New Forests*, 6:23–47, 1992
- NAGEL, J., BIGING, G. S.: Schätzung der Parameter der Weibull-Funktion zur Generierung von Durchmesserverteilungen, *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 166:185–189, 1995
- NOTHDURFT, A., WOLF, T., RINGELER, A., BÖHNER, J., SABOROWSKI, J.: Spatio-temporal prediction of site index based on forest inventories and climate change scenarios, *Forest Ecology and Management*, 279:97–111, 2012
- POMMERENING, A.: Eine Analyse neuer Ansätze zur Bestandesinventur in strukturreichen Wäldern. Georg-August-Universität Göttingen, Göttingen, 1997
- PRETZSCH, H.: Modellierung des Waldwachstums. Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin, Wien, 320 S., 2001
- PRETZSCH, H.: Grundlagen der Waldwachstumsforschung. Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin, Wien, 380 S., 2002
- PRETZSCH, H., DIELER, J.: The dependency of the size-growth relationship of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* [L.] in forest stands on long-term site conditions, drought events, and ozone stress, *Trees*, 25(3):355–369, 2011

- PRETZSCH, H., DIELER, J., RÖTZER, T.: Principles of growth partitioning between trees in forest stands under stress, In: MATYSSEK, R., SCHNYDER, H., OßWALD, W., ERNST, D., MUNCH, C., PRETZSCH, H. (Hg.): Growth and defence in plants. Springer-Verlag Berlin Heidelberg (Ecol Studies 220), S. 311–329, 2012
- PYA, N., WOOD, S. N.: Shape constrained additive models, *Statistics and Computing*, 25(3):543–559, 2015
- RÖTZER, T., DIELER, J., METTE, T., MOSHAMMER, R., PRETZSCH, H.: Productivity and carbon dynamics in managed Central European forests depending on site conditions and thinning regimes, *Forestry*, 83(5):483–495, 2010
- Rötzer, T., Seifert, T., Gayler, S., Priesack, E., Pretzsch, H.: Effects of stress and defence allocation on tree growth - simulation results at the individual and stand level, In: In: Matyssek, R., Schnyder, H., Oßwald, W., Ernst, D., Munch, C., Pretzsch, H. (Hg.): Growth and defence in plants. Springer-Verlag Berlin Heidelberg (Ecol Studies 220), S. 401–432, 2012
- SCHMIDT, M., BREIDENBACH, J., ASTRUP, R.: Möglichkeiten der Berücksichtigung von Expertenwissen in verallgemeinerten additiven Regressionsmodellen dargestellt am Beispiel von longitudinalen Höhen-Durchmesser-Modellen für Fichte, Kiefer und Sandbirke in Norwegen. In: KLÄDTKE, J., KOHNLE, U. (Hg.): Tagungsbericht. Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde, Jahrestagung, Kammerforst/Thüringen, 18.-20. Mai 2015, S. 167–181, 2015
- SEYNAVE, I., GÉGOUT, J.-C., HERVÉ, J.-C., DHÔTE, J.-F.: Is the spatial distribution of European beech (*Fagus sylvatica* L.) limited by its potential height growth?, *Journal of Biogeography*, 35(10):1851–1862, 2008
- SHARMA, R. P., BRUNNER, A., EID, T., OYEN, B.-H.: Modelling dominant height growth from national forest inventory individual tree data with short time series and large age errors, *Forest Ecology and Management*, 262(12):2162–2175, 2011
- SKOVSGAARD, J., VANCLAY, J. K.: Forest site productivity: a review of spatial and temporal variability in natural site conditions, *Forestry*, 86(3):305-315, 2013
- SLOBODA, B., GAFFREY, D., MATSUMURA, N.: Regionale und lokale Systeme von Höhenkurven für gleichaltrige Waldbestände, *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 164:225–229, 1993
- VENABLES, W. N. and RIPLEY, B. D.: *Modern Applied Statistics with S*, New York: Springer, 2002
- VIDAL, C., BÉLOUARD, T., HERVÉ, J.-C., ROBERT, N., WOLSACK, J.: A new flexible Forest Inventory in France. In: McRoberts, R. E., Reams, G. A., Van Deusen, P. C., McWilliams, W. H. (Hg.): Proceedings of the Seventh Annual Forest Inventory and Analysis Symposium. Seventh Annual Forest Inventory and Analysis Symposium. Portland, ME, 03.-06.10.2005. USDA Forest Service. Washington, DC, S. 67–73, 2007
- WOOD, S.: *Generalized Additive Models: An introduction with R*. Boca Raton: Chapman and Hall/CRC, 2006