



DEUTSCHER VERBAND
FORSTLICHER FORSCHUNGSANSTALTEN

Sektion Ertragskunde

2015

Tagungsbericht



Jahrestagung
18. - 20. 05. 2015
Kammerforst

Thüringen

Der Zusammenhang zwischen Produktivität und Standort für Fichten-dominierte Bestände in Bayern

Susanne Brandl¹⁾, Wolfgang Falk¹⁾, Thomas Rötzer²⁾, Hans Pretzsch²⁾

¹⁾ Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), Freising,

²⁾ Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Technische Universität München, Freising

Zusammenfassung

Die Höhenbonität wird oft als Maß für das Potential eines Standorts verwendet. Standorte gleicher Höhenbonität können sich aber dennoch in der Gesamtwuchsleistung unterscheiden. Ein direkteres und umfassenderes Maß für die Produktivität eines Standorts ist die Nettoprimärproduktion (NPP). Diese wurde basierend auf Daten der Bundeswaldinventur (BWI2 und BWI3) geschätzt. An zwei Regionen wurde exemplarisch untersucht, wodurch sich Fichtenbestände unterschiedlicher Produktivität (NPP) bei gleicher Höhenbonität in Bayern unterscheiden. Analog zu bereits erstellten Site-Index-Modellen (SI-Modelle) für Bayern wurden generalisierte additive Modelle (GAM) angepasst um den Zusammenhang zwischen NPP und Umweltvariablen für Fichten-dominierte Bestände zu modellieren. Dabei ist es entscheidend Bestandesalter und Bestandesdichte angemessen zu berücksichtigen. Die Modelle sollten eine flächenhafte Vorhersage der NPP und damit des Standortpotentials ermöglichen. Das Muster der NPP wurde von der Interaktion zwischen Wärme- und Wasserversorgung dominiert. Der Einfluss des Bodens war schwer zu fassen. Einzig die Basensättigung hatte einen deutlichen Einfluss auf die NPP.

Summary

Height at a certain age (site index) is often used as a measure for site potential. However, sites with the same site index can differ in total volume production. Net primary productivity (NPP) is a more comprehensive measure for site potential than height. It was estimated based on national forest inventory data. In an exploratory analysis stand parameters of spruce stands of two regions in Bavaria with differing NPP but similar site index were compared. The relationship between NPP and environmental variables was modelled for spruce-dominated stands in Bavaria using generalized additive models (GAM). As stand age and stand density greatly influence NPP, they have to be taken into account adequately when modelling NPP. The models enable spatially explicit predictions of NPP. The pattern was dominated by temperature and water supply. Base saturation was the only chemical soil parameter selected as explanatory variable.

1 Einleitung

In der forstlichen Praxis wird traditionell meist die Höhenbonität, auch als Site Index (SI) bezeichnet, verwendet um die Leistung eines Standorts einzuschätzen (ASSMANN 1961). Viele Studien über den Standort-Leistungsbezug basieren auf dem SI (NOTHDURFT et al. 2012, ALBERT und SCHMIDT 2010, SEYNAVE et al. 2005). Im LWF-Projekt „Wachstumspotentiale der Hauptbaumarten“ wurden SI-Modelle für Fichte (BRANDL et al. 2014), Kiefer und Buche erstellt. Die Höhe ist allerdings nur ein Indikator für die Produktivität eines Standorts. Standorte gleicher Höhenbonität können sich im Ertrag unterscheiden. So kann die Gesamtwuchsleistung auf Standorten gleicher Höhenbonität um $\pm 15\%$ variieren, von Assmann und Franz als untergliedertes spezielles Ertragsniveau beschrieben (PRETZSCH 2009). Deshalb stellen sich die Fragen, welche Zielgrößen die Produktivität eines Bestandes am umfassendsten erfassen und welche Möglichkeiten es gibt die Produktivität aus Bundeswaldinventurdaten (BWI) zu schätzen.

In der vorliegenden Studie wurde die Nettoprimärproduktion (NPP) als Zielgröße gewählt, da es sich dabei um eine physiologische Größe handelt. Im Gegensatz zur Höhe erfasst sie direkt die Produktivität eines Bestandes.

Zunächst wurde explorativ untersucht, wodurch sich Standorte gleicher Höhenbonität in Bayern unterscheiden. Es wurde untersucht, inwieweit die NPP als ein Maß für das Standortpotential interpretiert werden kann und als Ergänzung zum klassischen Site Index bzw. der Bonitierung über die Höhe dienen kann. Um die NPP flächendeckend für Bayern vorherzusagen, wurde sie in einem statistischen Modell mit Umwelttriebkraften verknüpft. Weiterhin wurden Vorhersagearten der NPP und des SI aus den bereits erstellten SI-Modellen für Bayern verglichen.

2 Material und Methoden

2.1 Datengrundlage

Datengrundlage waren die Daten der BWI2 und BWI3 für Bayern. Die Berechnung der NPP basiert auf der Aufnahme der Winkelzählprobe 4, für die u.a. Bhd-Messungen, Altersschätzungen und für ein Teilkollektiv auch gemessene Höhen vorliegen. Für das SI-Modell der Fichte wurden die Alpen nicht in die Modellierung miteinbezogen. Für eine bessere Vergleichbarkeit wurde deshalb auch das NPP-Modell vorerst ohne diesen Teildatensatz erstellt. Es wurden nur Traktecken mit einem Fichtenanteil $\geq 50\%$ für die Modellierung verwendet.

Weiterhin stehen flächendeckend, relativ hoch aufgelöste Umweltdaten aus dem bayerischen Standortinformationssystem BaSIS (BECK et al. 2013, HERA et al. 2012) zur Verfügung (Tabelle 1). Diese umfassen den Wasserhaushalt, physikalische und chemische Bodenparameter und Reliefparameter. Als klimatische Größen wurden Monatsmittelwerte von Temperatur und Niederschlag (1971 – 2000) verwendet. An den Punkten der Bodenzustandserhebung wurden die im Standortinformationssystem modellierten physikalischen und chemischen Bodenparameter durch Messwerte ersetzt.

Tabelle 1: Statistische Kennwerte der im Modell verwendeten Umweltvariablen.

Parameter	Abkürzung	Einheit	Min	Max	Mittelwert	SD
Temperatursumme (Schwellenwert: 5 °C)	GDD5	°C	789	1948	1558	185
Wasserbilanz während der Vegetationsperiode (Niederschlag – Verdunstung + nFK)	WB	mm	-88	835	207	148
Basensättigung	BS	%	2	100	42	30

Die NPP wurde als Bestandesgröße betrachtet und flächenbezogen berechnet. Das Vorgehen orientiert sich an den Auswertungsmethoden der BWI (HENNIG et al. 2012, SCHMITZ et al. 2008). Die Höhen und Brusthöhendurchmesser entnommener und eingewachsener Bäume wurden für die Periodenmitte mit der Funktion von Sloboda modelliert (SCHMITZ et al. 2008, DAHM 2006). Die Kompartimente der NPP wurden auf Einzelbaumebene berechnet. Es wurden die Zuwächse zwischen BWI2 und BWI3 berechnet, über die Stammzahl pro ha auf einen Hektar hochgerechnet und durch die Periodenlänge geteilt. Die Kompartimente der NPP wurden dann für jede Traktecke zur jährlichen NPP pro ha aufsummiert.

Die NPP setzt sich zusammen aus:

$$NPP = dB + dCR + turnover_{CR} + turnover_{FR} + turnover_{LN} + turnover_{branches}$$

dB: Zuwachs an oberirdischer Biomasse (Stammholz und Astholz) ($t\ ha^{-1}\ a^{-1}$)

dCR: Zuwachs an Grobwurzeln ($t\ ha^{-1}\ a^{-1}$)

turnover_{CR}: Umsatz an Grobwurzeln ($t\ ha^{-1}\ a^{-1}$)

turnover_{FR}: Umsatz an Feinwurzeln ($t\ ha^{-1}\ a^{-1}$)

turnover_{LN}: Umsatz an Blättern/Nadeln ($t\ ha^{-1}\ a^{-1}$)

turnover_{branches}: Umsatz an Zweigen ($t\ ha^{-1}\ a^{-1}$)

Die oberirdische Biomasse (Stammholz und Astholz) wurde baumartenspezifisch als Funktion von Höhe und Bhd berechnet (ZELL 2008). Die Biomasse von Blättern und Nadeln wurde aus der oberirdischen Biomasse (Stammholz und Astholz) mit den Funktionen von PRETZSCH et al. (2014) geschätzt. Die Schätzung der Grobwurzelbiomasse basiert auf der Arbeit von OFFENTHALER und HOCHBICHLER (2006). Für jede Baumart wurde die empfohlene Funktion oder ein festes Wurzel-Spross-Verhältnis verwendet. Der Turnover von Blättern/Nadeln (turnover_{LN}) von Laubbäumen und der Lärche entspricht der Blattbiomasse und wurde als Mittelwert der Blattbiomasse von BWI2 und BWI3 berechnet. Der Turnover von Nadeln (turnover_{LN}) wurde als baumartenspezifischer Anteil an der Nadelbiomasse geschätzt. Für den Turnover an Feinwurzeln (turnover_{FR}) wurde angenommen, dass er dem Turnover an Blättern/Nadeln entspricht. Der Turnover an Grobwurzeln (turnover_{CR}) wurde als Anteil an der Grobwurzelbiomasse geschätzt (RÖTZER et al. 2010). Der Turnover an Zweigen (turnover_{branches}) wurde aus Daten zum Streufall von 22 Waldklimastationen geschätzt. Investitionen in die Reproduktion wurden nicht berücksichtigt.

Der Stand Density Index nach Reineke (SDI) (REINEKE 1933, ZEIDE 2004) diente als Maß für die Bestandesdichte. Da sich die Arten in ihren Standraumansprüchen unterscheiden, wurde der SDI artspezifisch berechnet. Um den SDI für gemischte Bestände zu verwenden, war es notwendig den artspezifischen SDI zu gewichten. Als Referenz wurde die Fichte verwendet. Für jede Art wurde das 95%-Perzentil der SDI-Verteilung von Reinbeständen berechnet. Wichtungsfaktoren wurden berechnet, indem der Wert des 95%-Perzentils der Fichte durch den Wert des 95%-Perzentils der jeweiligen Baumart geteilt wurde. Für jede Traktecke wurden die SDI-Werte artspezifisch berechnet, mit dem jeweiligen Wichtungsfaktor multipliziert und zum SDI der Traktecke aufsummiert.

Tabelle 2: Bestandeskennwerte der BWI-Traktecken.

Parameter	Min	Max	Mittelwert	SD
mittlerer Bhd (cm)	9.3	61.9	29.8	10.2
mittlere Höhe (m)	3.6	41.4	26.3	6.7
Bestandesalter (a)	10	150	72	29
SDI	382	1900	1072	331
Biomasse (t ha ⁻¹)	50.8	788.5	308.6	114.0
dB (t ha ⁻¹ a ⁻¹)	1.0	18.2	6.4	2.7
NPP (t ha ⁻¹ a ⁻¹)	3.7	35.6	14.7	5.1

2.2 Explorative Datenanalyse

In einem ersten Schritt wurde explorativ untersucht, worauf Produktivitätsunterschiede von Standorten gleicher Höhenbonität im BWI-Datensatz zurückzuführen sind.

Exemplarisch wurden zwei Regionen in Bayern, Schwaben (Wuchsbezirk „Mittelschwäbisches Schotterriedel- und Hügelland“) und Spessart, ausgewählt und anhand verschiedener Maße verglichen. Die Wahl fiel auf Schwaben und Spessart, weil beide Regionen im SI-Modell für die Fichte als sehr günstige Standorte mit größter Höhenwuchsleistung identifiziert wurden. Basierend auf Erfahrungswissen gilt Schwaben jedoch als der ertragreichere Standort für die Fichte. Für den Vergleich wurden Traktecken mit einem Fichtenanteil größer 60 % ausgewählt, die sich nicht signifikant in der berechneten relativen Höhe als Maß für die Höhenbonität (BRANDL et al. 2014) und im Bestandesalter unterscheiden.

2.3 Statistische Modellierung

Ziel der Studie war es analog zum SI-Modell für die Fichte ein Modell zu entwickeln, dass anstelle der Höhe die NPP in Abhängigkeit von Umweltbedingungen erklärt und flächendeckende Vorhersagen der NPP ermöglicht. Für die Modellierung wurden generalisierte additive Modelle (GAM) verwendet.

Wir gehen davon aus, dass unterschiedliche Produktivität auf Standorten gleicher Höhenbonität oft auf eine höhere Bestandesdichte zurückzuführen ist. D.h. günstige Umweltbedingungen wirken nicht nur über einen schnelleren Höhen- und Bhd-Zuwachs, sondern v.a. über die Ermöglichung einer höheren Bestandesdichte. Es wird also mehr Biomasse produziert, weil schon mehr stehende Biomasse vorhanden ist. Daher muss bei einer statistischen Modellierung der NPP in Abhängigkeit von Standortbedingungen die Dichte berücksichtigt werden.

Letztendlich geht es darum zwischen der Limitierung der NPP durch die Bestandesstruktur und der Limitierung der NPP durch den Standort, d.h. die Umweltbedingungen, zu differenzieren um einen klaren Effekt der Umweltvariablen auf die NPP herauszuarbeiten. Klare und ökologisch plausible Effekte der Umweltvariablen sind eine Voraussetzung für die Prädiktion der NPP in die Fläche. Für Karten der NPP interessiert das Standortpotential, also die NPP, die unter den herrschenden Umweltbedingungen erreicht werden kann und nicht die unter den variierenden Bestandesstrukturen realisierte NPP.

Dafür wurden zwei Varianten getestet, von denen die erste hier genauer vorgestellt wird. Bei der ersten Variante wurde versucht durch die Verwendung eines zweistufigen Ansatzes Umwelt- und Durchforstungseffekte auf die Bestandesdichte zu trennen. Bei der zweiten Variante wurde der Datensatz nach Umweltvariablen stratifiziert. Innerhalb eines einheitlichen Umweltraums wurden dann jeweils nur die dichtesten Bestände ausgewählt.

Variante 1:

Der SDI ist nicht unabhängig von den Umweltbedingungen: Bessere Standortbedingungen ermöglichen einen höheren SDI. Geht der SDI als erklärende Variable in das Modell ein, so entzieht er den Umweltvariablen Erklärungskraft. Deshalb wurde in einem ersten Schritt der SDI in Abhängigkeit von Umweltvariablen und dem Bestandesalter modelliert. Als Umweltvariablen wurden Variablen herangezogen, die sich bereits im SI-Modell für die Fichte als relevant erwiesen haben. Dazu gehören die Basensättigung (BS) und die Interaktion zwischen Wasserbilanz (WB) und der Temperatursumme über 5 Grad (GDD5). Die Wasserbilanz ist eine aggregierte Größe aus dem Niederschlag und der Verdunstung während der Vegetationsperiode und der nutzbaren Feldkapazität.

$$SDI = f(Alter_{Bestand}) + f(BS) + f(GDD5 * WB)$$

Die Residuen aus diesem Modell wurden als angepasster SDI (SDI_{adj}) bezeichnet und als der Anteil am SDI interpretiert, der nicht auf Umwelteffekte, sondern möglichst rein auf Durchforstungseffekte bzw. die Bestandesstruktur, zurückzuführen ist. Dies ist eine Idealisierung, da diese Effekte nie vollständig voneinander getrennt werden können.

In einem zweiten Schritt wurde die NPP in Abhängigkeit der Residuen des SDI, des Bestandesalters und der Umweltvariablen modelliert.

$$NPP = f(SDI_{adj}) + f(Alter_{Bestand}) + f(BS) + f(GDD5 * WB)$$

Variante 2:

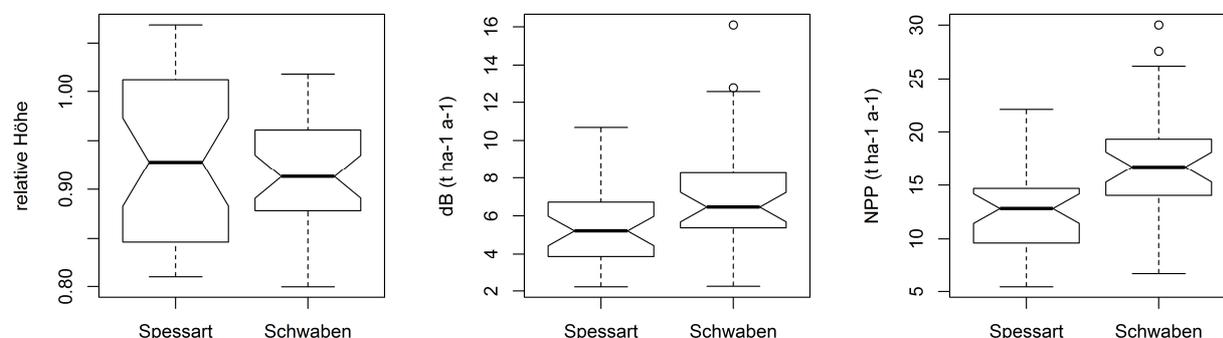
Bei der zweiten Variante wurde der Datensatz nach GDD5 (20 Klassen), WB (20 Klassen) und Tiefengradient der Basensättigung (6 Klassen) stratifiziert. Aus jeder Kombination wurden die 20 % dichtesten Bestände ausgewählt. Die Annahme dahinter ist, dass diese Bestände das Standortpotential voll ausschöpfen und die Dichte im Modell somit nicht mehr berücksichtigt werden muss.

$$NPP = f(Alter_{Bestand}) + f(BS) + f(GDD5 * WB)$$

3 Ergebnisse

3.1 Explorative Datenanalyse

Abbildung 1 zeigt den Vergleich zwischen Traktecken in Schwaben und im Spessart. Schwaben weist höhere NPP und höheren Zuwachs an oberirdischer Holzbiomasse pro ha und Jahr auf. Stehende Biomasse pro ha und SDI sind höher. Die Durchmesser der Einzelbäume hingegen unterscheiden sich nicht signifikant.



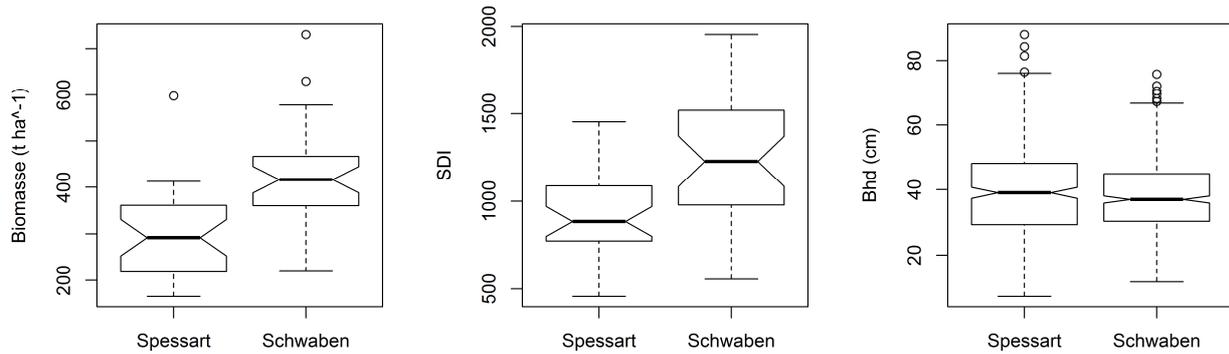


Abbildung 1: Vergleich der relativen Höhe (als Bonitätsmaß), der Produktivitätsmaße NPP und dB, der stehenden oberirdischen Biomasse von Stamm und Ästen und des SDI auf Trakteckenebene und des Bhd der Einzelbäume für die Regionen Schwaben (35 Traktecken) und Spessart (34 Traktecken).

3.2 Statistische Modellierung

Die NPP wird zu einem sehr großen Anteil durch die Bestandesdichte (SDI_{adj}) erklärt. Dies leuchtet ein, da die Bestandesdichte in direktem Verhältnis zur Blattmasse steht und davon ausgegangen werden kann, dass dichte Bestände maximale Blattfläche erreichen und damit maximale Lichtinterzeption. Im Gegensatz zur Höhenbonität ist die NPP stark vom Bestandesalter abhängig. Das Maximum ihrer Produktivität erreichen Bestände im Mittel zwischen 40 und 60 Jahren. Die Effekte der Umweltvariablen sind plausibel (Abbildung 2). Sehr niedrige Basensättigung wirkt sich negativ auf die NPP aus. Bei sehr hoher Basensättigung geht die NPP etwas zurück. Limitierende Effekte von Wasserhaushalt und deutlicher noch von Wärme können abgebildet werden. Die NPP ist am höchsten, wenn sowohl Wärme- als auch Wasserversorgung optimal sind.

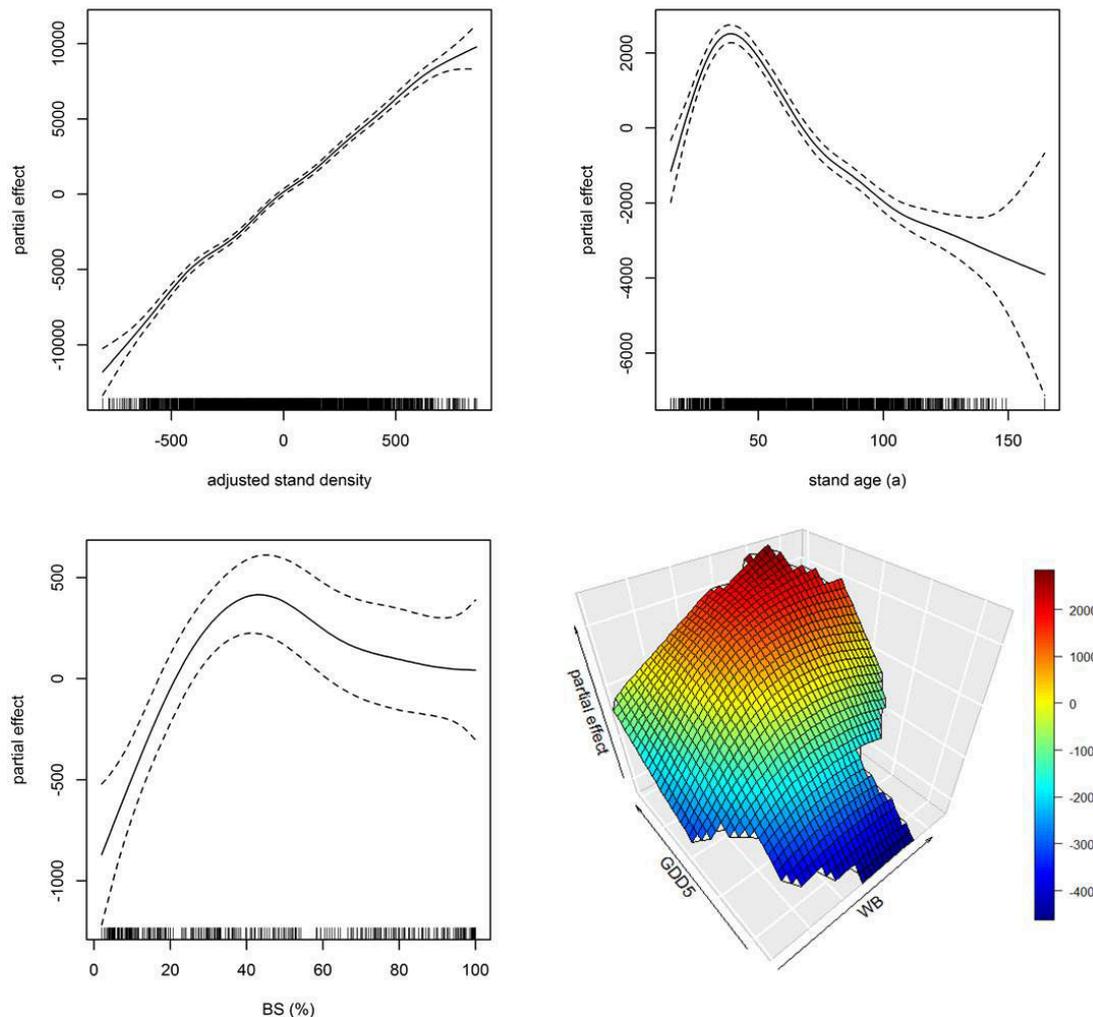


Abbildung 2: Partielle Effekte des angepassten SDI (SDI_{adj}), des Bestandesalters (stand age), der Basensättigung (BS) und der Interaktion zwischen Wasserbilanz (WB) und der Temperatursumme (GDD5) auf die NPP.

Berücksichtigt werden muss hier, dass das hohe R^2 von 0.784 (Tabelle 3) auf den engen Zusammenhang zwischen NPP und Bestandesdichte zurückzuführen ist. Durch die Verwendung der Residuen des SDI als Durchforstungseffekt anstelle des SDI, konnten aber plausible Effekte der Umweltvariablen herausgearbeitet werden.

Tabelle 3: Detaillierte Zusammenfassung des NPP-Modells.

	Schätzung	Standardfehler	T-Statistik	p-Wert
Intercept	14730.42	53.02	277.8	$< 2 \times 10^{-16}$
	edf	df Residuen	F-Statistik	p-Wert
f(SDI _{adj})	6.722	7.869	695.701	$< 2 \times 10^{-16}$
f(Alter _{Bestand})	7.822	8.649	121.878	$< 2 \times 10^{-16}$
f(BS)	3.462	4.247	7.948	1.56×10^{-6}
f(WB,GDD5)	5.235	5.964	44.509	$< 2 \times 10^{-16}$
korrigiertes R^2		0.784		

3.3 Vergleich des SI und der NPP

Die Karten (Abbildung 3) des SI aus dem SI-Modell für die Fichte und der modellierten NPP zeigen ein größtenteils ähnliches Muster mit beispielsweise sehr hohen Site Index-Werten in Schwaben. Im Gegensatz dazu sind die Fränkische Platte, die Frankenalb oder der nordöstliche Teil Bayerns eher ungünstig für das Fichtenwachstum. Deutlich ist in beiden Karten die Temperaturlimitierung in den Hochlagen des Bayerischen Waldes erkennbar. Unterschiede zeigen sich im Nordwesten Bayerns. Dort wird höchstes Höhenwachstum geschätzt, während die modellierte NPP eher im mittleren Bereich liegt.

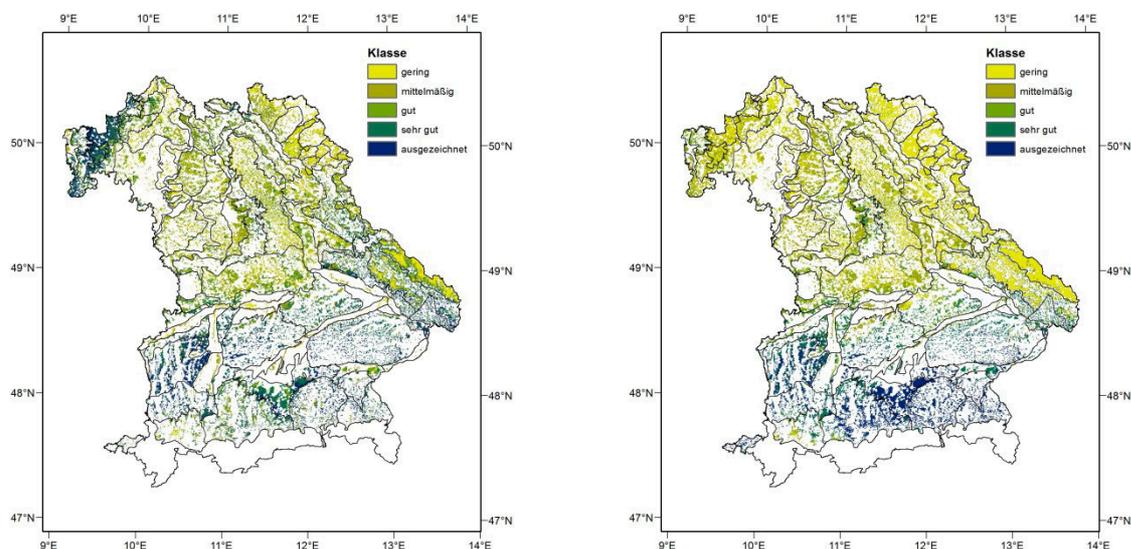


Abbildung 3: Flächenhafte Darstellung des SI für die Fichte (links) und der modellierten NPP (rechts) für Bayern, eingeteilt in fünf Produktivitätsklassen.

4 Diskussion

4.1 Berechnung der NPP

Die Berechnung der NPP aus Daten der Winkelzählprobe 4 ist teilweise mit hoher Unsicherheit behaftet. Besonders bei lichten Beständen liegen der Hochrechnung manchmal nur wenige Bäume zugrunde. Entnommene und eingewachsene Bäume müssen angemessen berücksichtigt werden. Über die Allokation unterirdischer Biomasse ist wenig bekannt und auch die Umsatzraten von Blättern, Zweigen und Wurzeln sind nur grobe Schätzungen, sodass bereits in der Zielgröße NPP ein großes Rauschen steckt. Durch die relativ große Datengrundlage sollte aber dennoch eine belastbare Schätzung möglich sein.

4.2 NPP als Maß für die standortspezifische Produktivität

Das Konzept der Bonitierung über die Höhe wurde ursprünglich für regelmäßig bestockte, gleichaltrige Bestände entwickelt (SKOVSGAARD and VANCLAY 2008). Die Entwicklung hin zu strukturreichen Mischbeständen und hochdurchforstungsartigen Behandlungsregimen schränkt die Aussagekraft des SI ein (PRETZSCH 2009). Einzelbaumbasierte Bestandeswachstumsmodelle können das Wachstum für eine weite Bandbreite an Standortbedingungen vorhersagen, benötigen aber Dimensionsangaben für die Einzelbäume als Input (z.B. MONSERUD und STERBA 1996). Das Wachstum wird dann hauptsächlich durch Größe und Konkurrenz bestimmt. Liegt das Hauptinteresse aber auf der umweltabhängigen Variation der Produktivität und der räumlich expliziten Vorhersage des Standortpotentials, scheint ein Maß wie die hier verwendete NPP geeigneter.

4.3 Dichteabhängigkeit der NPP

Um die Umweltabhängigkeit der NPP abbilden zu können, muss das Zuwachspotential eines Standortes ausgeschöpft werden. Lichte, stark durchforstete Bestände nutzen dieses Zuwachspotenzial aber nicht voll. Daher muss bei einem flächenbezogenen Ansatz die Bestandesdichte berücksichtigt werden. Die Tatsache, dass die Bestandesdichte aber selbst nicht unabhängig von Umweltbedingungen ist erfordert eine zweistufige Modellierung oder eine Stratifizierung des Datensatzes um klare Umwelteffekte herauszuarbeiten.

4.4 SI und NPP

Regionen, die bezüglich der Höhenbonität ähnlich einzustufen sind, können sich dennoch deutlich in der NPP unterscheiden. Karten für Bayern der Modellvorhersagen des SI und der NPP zeigen in weiten Bereichen ein ähnliches Muster, aber auch Bereiche mit deutlichen Unterschieden. So werden beispielsweise die Regionen Schwaben und Spessart als sehr günstig für das Wachstum der Fichte durch das SI-Modell eingewertet. In der Forstpraxis gilt Schwaben jedoch als der ertragreichere Standort für die Fichte. Die Ergebnisse dieser Studie passen zu dieser empirischen Einschätzung. Karten der NPP zeigen niedrigere Leistungsklassen für den Spessart als für Schwaben. Die Unterschiede sind hauptsächlich auf höhere Stammzahlen in Schwaben zurückzuführen, während die Einzelbaumdurchmesser dort nicht höher sind. Somit erfasst der traditionelle SI nicht das gesamte Standortpotential und die Kombination mit der NPP bietet eine umfassendere Einschätzung des Standortpotentials.

4.5 Umweltabhängigkeit der NPP

Statistische Modelle identifizierten klare und ökologisch plausible Effekte von Wärme- und Wasserhaushalt sowie der Basensättigung auf die Produktivität. Auf globaler Ebene ist die NPP niedrig in kalten und trockenen Klimaten und nimmt mit steigenden Temperaturen und besserer Wasserversorgung zu (BARNES et al. 1998). Dieses globale Muster kann auch auf der Maßstabebene Bayerns nachvollzogen werden. So ist beispielsweise die Temperatur der limitierende Faktor in den Hochlagen des Bayerischen Waldes, während in den warm-trockenen Regionen im Nordwesten Bayerns die Wasserversorgung limitierend wirkt. Innerhalb desselben Klimas variiert die NPP durch den Einfluss des Bodens, der Artzusammensetzung und der Entwicklungsstufe des Ökosystems (BARNES et al. 1998). So beeinflusst im Modell die Basensättigung die NPP. Auf sauren Böden wird die Produktion durch die Verfügbarkeit von basischen Kationen limitiert. Für sehr basenreiche Böden geht die NPP leicht zurück. Dies könnte mit Ca-K-Antagonismus (REHFUESS 1990) und der Immobilisierung von Phosphor (MELLERT und EWALD 2014) erklärt werden. Wie auch bei den SI-Modellen ist der Einfluss der chemischen Bodenparameter schwer zu fassen. Das Muster wird von Temperatur- und Wasserhaushalt dominiert. Insgesamt ist der Erklärungsanteil der Umweltvariablen an der Varianz der NPP vergleichsweise gering. Für eine deutlichere Herausarbeitung des Umwelteffekts auf die NPP wären größere Umweltgradienten und damit die Ausweitung der Datengrundlage auf europaweite Daten wünschenswert. Bezüglich der Bodenparameter ist zudem zu berücksichtigen, dass es sich größtenteils nicht um punktgenaue Daten, sondern um modellierte Werte handelt und damit bereits die erklärenden Variablen mit Unsicherheit behaftet sind.

6 Fazit und Ausblick

Letztendlich stellt die Studie einen Versuch dar den Standort-Leistungsbezug über ein anderes Maß als die Höhe zu erfassen. Eine Betrachtung der NPP kann die traditionelle Höhenbonitierung sicher nicht

ersetzen, ist aber durchaus interessant als Ergänzung zum SI. Da neben der klassischen Holznutzung das Interesse an der Nutzung für Bioenergie wächst, gewinnen Biomasse und NPP, wie sie von den Modellen in dieser Studie vorhergesagt werden, an Bedeutung.

Geplant sind ein detaillierter Vergleich der beiden Varianten für die Modellierung der NPP und eine Validierung der Modelle an Versuchsflächendaten. Weiterhin wird angestrebt den Datensatz zu erweitern um größere Umweltgradienten zu erfassen.

7 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.). In: *Forest Ecology and Management* 259 (4), S. 739–749, 2010
- ASSMANN, E.: Waldertragskunde. Organische Produktion, Struktur, Zuwachs und Ertrag von Waldbeständen. BLV Verlagsgesellschaft, München, Bonn, Wien, 1961
- BARNES, BURTON V., ZAK, DONALD R., DENTON, SHIRLEY R., SPURR, STEPHEN H.: *Forest Ecology*. 4. Aufl.: John Wiley & Sons, Inc., 1998
- BECK, J., KÖLLING, C.: Das bayerische Standortinformationssystem - Das neue Standortinformationssystem mit seinen zahlreichen Themenkarten ist ein wichtiges Hilfsmittel für die Beratung der Waldbesitzer. In: *LWF aktuell* 94, S. 4–7, 2013
- BRANDL, S., FALK, W., KLEMMT, H., 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). In: *Forests* 5 (11), S. 2626–2646, 2014
- DAHME, S.: Auswertungsalgorithmen für die zweite Bundeswaldinventur. Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg, Institut für Waldökologie und Waldinventuren. Eberswalde, 2006
- HENNIG, P., KROIHER, F., POLLEY, H., RIEDEL, T., SCHMITZ, F., SCHWITZGEBEL, F.: Arbeitsbericht Institut für Waldökologie und Waldinventuren. Die dritte Bundeswaldinventur - BWI 2012. Inventur- und Auswertungsmethoden. Hg. v. Thomas Riedel. Johann Heinrich von Thünen-Institut, 2012
- HERA, U., RÖTZER, T., ZIMMERMANN, L., SCHULZ, C., MAIER, H., WEBER, H., KÖLLING, C.: Klima en detail. In: *LWF aktuell* 86, S. 34–37, 2013
- MELLERT, K., EWALD, J.: Nutrient limitation and site-related growth potential of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst) in the Bavarian Alps 133, S. 433–451, 2014
- MONSERUD, R., STERBA, H.: A basal area increment model for individual trees growing in even- and uneven-aged forest stands in Austria. In: *Forest Ecology and Management* 80, S. 57–80, 1996
- NOTHDURFT, A., WOLF, T., RINGELER, A., BÖHNER, J., SABOROWSKI, J.: Spatio-temporal prediction of site index based on forest inventories and climate change scenarios. In: *Forest Ecology and Management* 279 (0), S. 97–111, 2012
- OFFENTHALER, I., HOCHBICHLER, E.: Estimation of root biomass of Austrian forest tree species. In: *Austrian Journal of Forest Science* 123 (1/2), S. 65–86, 2006
- PRETZSCH, H.: *Forest dynamics, growth and yield. From measurement to model*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009
- PRETZSCH, H., BLOCK, J., DIELER, J., GAUER, J., GÖTTLEIN, A., MOSHAMMER, R.: Nährstoffentzüge durch die Holz- und Biomassennutzung in Wäldern. Schätzfunktionen für Biomasse und Nährelemente und ihre Anwendung in Szenariorechnungen. In: *Allg. Forst- u. J-Ztg.* 185 (11/12), S. 261–285, 2014
- REHFUESS, K.: *Waldböden*. Hamburg: Parey (2), 1990
- REINEKE, L. H.: Perfecting a stand density index for even-aged forests. In: *Journal Agric. Res.* 46, S. 627–638, 1933
- 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. In: *Forestry* 83 (5), S. 483–495, 2010
- SCHMITZ, F., POLLEY, H., HENNIG, P., DUNGER, K., SCHWITZGEBEL, F.: Die zweite Bundeswaldinventur - BWI2. Inventur- und Auswertungsmethoden. Zu den Bundeswaldinventuren 2001 bis 2002 und 1986 bis 1988. Johann Heinrich von Thünen-Institut, 2008
- SEYNAVE, I., GÉGOUT, J., HERVÉ, J., DHÔTE, J., DRAPIER, J., BRUNO, É., DUMÉ, G.: *Picea abies* site index prediction by environmental factors and understorey vegetation: a two-scale approach based on survey databases. In: *Canadian Journal of Forest Research* 35, S. 1669–1678, 2005
- SKOVSGAARD, J. P., VANCLAY, J. K.: Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. In: *Forestry* 81 (1), S. 13–31, 2008
- ZEIDE, B.: How to measure stand density. In: *Trees* 19 (1), S. 1–14, 2005
- ZELL, Jürgen: *Methoden für die Ermittlung, Modellierung und Prognose der Kohlenstoffspeicherung in Wäldern auf Grundlage permanenter Großrauminventuren*. Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg im Breisgau, 2008