

Standortleistungsschätzung und Biomasseermittlung in Kurzumtriebsplantagen

Ein Beitrag zum Gedenkkolloquium anlässlich des 10. Todestages von Prof. Dr. FRIEDRICH FRANZ am 27. Juli 2012

Aus dem Institut für Waldwachstum und Forstliche Informatik, TU Dresden

(Mit 10 Abbildungen)

HEINZ RÖHLE^{*)}

(Angenommen Februar 2013)

SCHLAGWÖRTER – KEY WORDS

Standortleistungsschätzung; Biomasseermittlung; Kurzumtriebsplantagen; Biomassefunktion; Pappel; Weide.

Site-based yield estimation; biomass calculation; short rotation coppice plantations; biomass function; poplar; willow.

1. STANDORTLEISTUNGSSCHÄTZUNG – DIE HERAUSFORDERUNG

Zur Bonitierung, d. h. zur Schätzung der standörtlichen Leistungsfähigkeit von Waldbeständen, dienen in der Forstwirtschaft entweder die seit über einem Jahrhundert etablierten Ertragstafeln bzw. in jüngerer Zeit auch Wachstumsmodelle, denen aber häufig die Wachstumsverläufe von Ertragstafeln hinterlegt sind. Als Eingangsgrößen zur Bonitierung verwenden die meisten dieser Tafeln bzw. Modelle die in einem bestimmten Alter auf einem Standort erbrachte Wuchsleistung, vorwiegend die Mittel- oder Oberhöhe. Die Bestimmung und Prognose der Ertragsfähigkeit eines Waldstandortes erfolgt also nicht direkt über die Standorteigenschaften, sondern indirekt anhand der Alters-Höhenbeziehung des aufstockenden Bestandes.

Da Ertragstafeln meist für größere räumliche Einheiten Gültigkeit besitzen, sind bei ihrer Anwendung bezüglich der Ertragsermittlung und Leistungsprognose Abweichungen zwischen den geschätzten und realen Wachstumsgängen oft die Folge. Um diese verfahrensbedingten Divergenzen zu minimieren, wurde von ASSMANN (1961, S. 177) folgender Vorschlag unterbreitet: „Künftig werden wir sowohl allgemeine Bezugstafeln für größere Gebiete benötigen wie auch besondere Standortstafeln für Standorte mit ähnlichen Wuchsverhältnissen.“

ASSMANN'S Vorschlag wurde von FRIEDRICH FRANZ, seinem Schüler, aufgegriffen, in seiner 1968 publizierten Habilitationsschrift mit dem Titel „Die Ergebnisse stand-

ortskundlich-ertragskundlicher Forschung als Grundlage zuverlässiger Ertragsschätzungen auf gegebener Standortseinheit“ methodisch unterlegt und in dem 1971 veröffentlichten Forschungsbericht „Grundlagen und Verfahren standortbezogener Leistungsschätzung“ auf ein breites Fundament gestellt. FRANZ (1971, S. 29) begründete die Notwendigkeit der standortbezogenen Leistungsschätzung mit den Worten: „Die bisher vorliegende standortkundlich-ertragskundliche Literatur enthält nur wenige Hinweise darauf, in welchem Maße das Moment der ertragskundlichen Homogenität beim Zusammenfassen von Standorteinheiten zu Standortgruppen in der Praxis berücksichtigt worden ist.“ Einen möglichen und zugleich eleganten Ausweg aus dem Dilemma sah FRANZ (1971, S. 293) in der „Konstruktion von Standort-Ertragstafeln für bestimmte Einzelstandorte oder Standorteinheiten“ und schuf deshalb mit dem in FORTRAN formulierten EDV-Programm STAOET ein leicht handhabbares Instrument zur Konstruktion von Standort-Leistungstabellen.

Dass es in der Folgezeit nicht zur Aufstellung einer Vielzahl von standortpezifischen Ertragstafeln für die Hauptbaumarten in Bayern kam, war zum einen der mangelnden Datenbasis geschuldet. Wesentlich bedeutsamer jedoch war die im Zuge der Waldschadensforschung in den 1980er Jahren gewonnene Erkenntnis, dass die bis dato unterstellte Standortkonstanz als Prämisse der ertragskundlichen Modellbildung und damit der forstlichen Bonitierung nicht mehr gegeben war¹⁾. Wie das von SPIECKER et al. 1996 herausgegebene Buch „Growth Trends in European Forests“ belegt, ließ sich die Diskrepanz zwischen Ertragsmodellen und forstlicher Realität in vielen europäischen Ländern nicht mehr abstreiten. Als wesentliche Ursachen des Phänomens wurden nach allgemeiner Auffassung anthropogen bedingte Luftverunreinigungen und der Klimawandel identifiziert. PRETZSCH, der Nachfolger von FRANZ, traf in diesem Zusammenhang bereits 1992 (S. 366) die Feststellung, dass sich aufgrund der vielfältigen Störfaktoren das „Erkenntnisinteresse der Waldwachstumsforschung ... geradezu von den Gesetzmäßigkeiten des Waldwachstums auf die Randbedingungen des Waldwachstums verlagert“.

Trotz zahlreicher wissenschaftlicher Anstrengungen ist es bisher noch nicht befriedigend geglückt, die Ertragsleistung von Hochwaldbeständen ausschließlich

^{*)} Korrespondierender Autor: Prof. Dr. HEINZ RÖHLE. Technische Universität Dresden, Fachrichtung Forstwissenschaften, Institut für Waldwachstum und Forstliche Informatik, Piennner Str. 8, D-01737 Tharandt. Tel. 03 52 03/3 83 16 14. E-Mail: roehle@forst.tu-dresden.de

¹⁾ Die Ertragstafeln wurden unter der Voraussetzung unveränderlicher Standortbedingungen aus der Empirie langperiodischer Messserien ertragskundlicher Dauerversuchsflächen abgeleitet. Dynamische Randbedingungen verbieten jedoch eine statische Definition des Begriffes Standort.



Abb. 1
Mehrschichtiger Plenterwald (Foto: Röhle).
Multi-layered selection forest.

mit Hilfe der Standorteigenschaften sowie des Bestandes- und/oder Einzelbaumalters zu erklären. Ein Grund dafür dürfte in der komplexen Struktur von Hochwäldern und den langen Produktionszeiträumen liegen, insbesondere wenn standortbasierte Wachstumsprognosen nicht für homogene, gleichaltrige und einschichtige Reinbestände, sondern für mehrschichtige, ungleichaltrige, strukturreiche Mischbestände getroffen werden sollen, in denen neben den bereits erwähnten Störfaktoren noch Konkurrenzeffekte die Entwicklung prägen (Abb. 1).

Im Gegensatz dazu finden zur Ertragsprognose homogener, strukturarmer Systeme wie z. B. annueller landwirtschaftlicher Kulturen seit langem erfolgreich Standortcharakteristika Verwendung, in deren Berechnung die Bodenwertzahl sowie klimatische Faktoren und die Geländebeziehungen einfließen. Schnellwachsende Baumarten im Kurzumtrieb (Kurzumtriebsplantagen, im Folgenden KUP genannt), die auf ehemaligen Ackerflächen kultiviert werden, stellen ebenfalls sehr homogene Systeme dar (Reihenverband, einschichtig, gleichaltrig, kurze Umtriebszeiten, genetisch identisch, da Klonmaterial, Abb. 2). Aus diesem Grund müsste für KUP die Aufstellung von Standort-Leistungsmodellen prinzipiell einfacher und mit weniger Aufwand zu realisieren sein als für strukturreiche Hochwaldbestände. Nach einer kurzen Einführung in die allgemeinen Wachstumscharakteristika von KUP werden deshalb im Folgenden ein erster Ansatz zur Standort-Leistungsschätzung für Pappel-KUP in Sachsen vorgestellt und darüber hinaus Verfahren zur Ertragsermittlung (Bestimmung der aufstockenden Biomasse) stehender KUP präsentiert.



Abb. 2
Einschichtige fünfjährige Pappelplantage (Foto: Röhle).
Single-layered five year poplar plantation.

2. WACHSTUMSCHARAKTERISTIKA VON KUP

Prinzipiell eignen sich für den Kurzumtrieb stockauschlagfähige Baumarten mit raschem Jugendwachstum, die mit Steckhölzern oder Setzstangen ausgebracht werden können. In Deutschland sind dies in erster Linie Pappel- und Weidenarten sowie die Robinie auf schlechter wasserversorgten Standorten. Nach PETZOLD et al. (2009) bieten sich für die Anlage von KUP Ackerstandorte mit mittlerer bis guter Nährstoffausstattung und durchschnittlichen Jahresmitteltemperaturen von über 7°C an. Von entscheidender Bedeutung ist jedoch die Wasserverfügbarkeit (Niederschläge von mindestens 300 mm in der Vegetationsperiode und eine hohe nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum). Geringere Niederschlagsmengen können allerdings durch direkten Grundwasseranschluss, z. B. im Nahbereich von Flüssen oder Vorflutern, kompensiert werden.

Weil das auf KUP produzierte Holz häufig der energetischen Verwertung dient, wird bei der Ertragsbestimmung bzw. -schätzung i. d. R. die Biomasse (oberirdische Biomasse im unbelaubten Zustand) herangezogen. Um Vergleiche zwischen verschiedenen Baumarten und Klonen zu ermöglichen, hat sich die Angabe der Biomasse in Tonnen Trockensubstanz [t_{atro}] bewährt. Als Leistungsgröße findet der durchschnittliche Gesamtzuwachs an Biomasse in Tonnen Trockensubstanz pro Hektar und Jahr Verwendung (dGZ_B [$t_{\text{atro}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$]).

Untersuchungen zu Ertrag und Biomassenleistung von KUP sind seit 1997 ein Arbeitsschwerpunkt am Institut für Waldwachstum und Forstliche Informatik der TU Dresden. Dazu wurde eine Reihe von Versuchsfeldern in Sachsen, Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern beprobt, teilweise in enger Kooperation mit anderen Einrichtungen wie dem Staatsbetrieb Sachsenforst, dem Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie und dem Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e.V. (FIB). Die Arbeiten konzentrierten sich anfangs auf Pappel, wurden später auf Weide ausgedehnt und seit kurzem steht auch die Robinie im Fokus des Interesses.

Mit insgesamt 54 beprobten Versuchsfeldern deckt das für Pappel vorliegende Datenmaterial ein weites Standortpektrum vom Tiefland bis in die mittleren Höhenlagen des Erzgebirges ab und repräsentiert damit die Vielfalt der Wuchsbedingungen in Ostdeutschland. Auf den Pappel-Versuchsfeldern variiert der dGZ_B in einem weiten Rahmen (RÖHLE et al., 2010). Ursächlich dafür ist neben der unterschiedlichen Standortgüte vor allem die Bestandesdichte. Nur bei hohen Stammzahlen ha^{-1} kann bereits in den ersten Jahren der verfügbare Standort effektiv zur Produktion genutzt werden. Besonders deutlich wird dies am Beispiel des in der Nähe von Rostock gelegenen Versuchsfeldes Laage in Mecklenburg-Vorpommern, wo die Pappel zwar kein ganz so rasches Höhenwachstum zeigt wie auf dem standörtlich vergleichbaren Versuchsfeld Methau I in Mittelsachsen, letzteres jedoch hinsichtlich des dGZ_B mit Werten von mehr als $20 t_{\text{atro}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ weit übertrifft, während der dGZ_B in Methau I maximal $12 t_{\text{atro}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ erreicht. Ausschlaggebend für die Überlegenheit des Versuchsfeldes Laage ist die Bestandesdichte, die im Alter von neun

Jahren noch weit mehr als $10.000 \text{ Bäume ha}^{-1}$ beträgt, in Methau I stocken im gleichen Alter nur rund $2.200 \text{ Bäume ha}^{-1}$. Befinden sich dagegen auf einem wuchsschwachen Standort wie auf dem Versuchsfeld Skäßchen (Nordostsachsen) Bestände geringer Dichte, erreicht der dGZ_B nur Werte im Bereich von 3 bis $4 t_{\text{atro}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und liegt damit weit unter den Größenordnungen von 8 bis $10 t_{\text{atro}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, die derzeit als Mindestmaß für die ökonomische Rentabilität von KUP angesehen werden (BEMMANN et al., 2007).

Annähernd proportional zur Bestandesdichte ansteigende dGZ_B -Werte wurden auf zahlreichen Pappel- und Weiden-KUP in Ostdeutschland beobachtet (RÖHLE et al., 2010). Auffallend markant trat der Zusammenhang auf dem bereits erwähnten Pappel-Versuchsfeld Laage hervor: Hier ließ eine Verdoppelung der Stammzahl von knapp 8.000 auf gut $16.000 \text{ Stück ha}^{-1}$ im Mutterquartier den dGZ_B im Alter von neun Jahren von $13,5 t_{\text{atro}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ auf knapp $24 t_{\text{atro}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ steigen, was einer Zunahme von $10,5 t_{\text{atro}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bzw. 77% entspricht (Abb. 3).

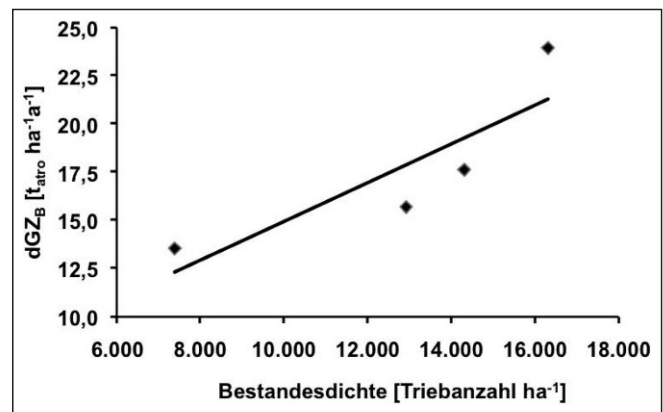


Abb. 3

Beziehung zwischen Bestandesdichte und durchschnittlichem Gesamtzuwachs an Biomasse (dGZ_B $t_{\text{atro}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$), Pappel-Versuchsfeld Laage.

Relationship between stocking density (shoot number ha^{-1}) and mean annual biomass increment (tonnes dry bulk $\text{ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$), poplar trial area Laage.

Neben Baumart und Klon, den Standorteigenschaften und der Bestandesdichte stellt der Rotationszyklus einen weiteren, bedeutsamen Einflussfaktor dar. Nach der ersten Ernte, d. h. ab der zweiten Rotation, tritt meist eine ausgeprägte Leistungssteigerung auf (SCHOLZ et al., 2004; BOELKE, 2006). Zurückzuführen ist dieser vor allem in den ersten Wuchsjahren nach der Ernte zu beobachtende Effekt auf das überproportional entwickelte Wurzelsystem der Unterlage, den Entfall der Anwuchsphase sowie die nach dem erneuten Ausschlag deutlich höhere Triebanzahl.

3. STANDORT-LEISTUNGSSCHÄTZUNG FÜR PAPPEL-KUP

Auf Basis der seit Ende der 1990er Jahre beprobten Pappel-Versuchsfelder entwickelte ALI (2009) einen

ersten Ansatz zur standortbasierten Leistungsschätzung und Leistungsprognose für Pappel-KUP in Sachsen²⁾. Ergänzend zu den Ertragsdaten standen Witterungsdaten (Temperatur- und Niederschlagswerte in monatlicher Auflösung) sowie die Ackerzahl und die nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum zur Charakterisierung der standörtlichen Eigenschaften zur Verfügung³⁾. Mit Hilfe von Korrelations- und Regressionsanalysen erfolgte die Prüfung der Beziehungen zwischen den Zielgrößen (Ertragskennwerten) und den Bestimmungsgrößen (Standortcharakteristika und Bestandesalter). Diese Analysen wurden separat nach Klonen bzw. Gruppen von Klonen mit ähnlichem Wuchsverhalten durchgeführt. Da die Bestandesdichte (Stammzahl ha⁻¹) neben den Standortfaktoren die Wuchsleistung einer KUP maßgeblich beeinflusst, wurde zur Modellierung der Ertragsleistung ein zweistufiges Modell entwickelt: In einem ersten Schritt erfolgte die Schätzung der Oberhöhe (h_o [m]) mittels multipler linearer Regressionsanalyse in Abhängigkeit vom Bestandesalter (A) und den Standortfaktoren Mitteltemperatur der Monate April bis Juli (T_{4-7}), Niederschlagssumme der Monate Mai bis Juni (P_{5-6}), Ackerzahl (SQI) sowie nutzbare Feldkapazität (AWSC) im effektiven Wurzelraum (*Formel 1*):

$$h_o = a_1 * A + a_2 * P_{5-6} * SQI + a_3 * T_{4-7} / AWSC \quad (\text{Formel 1})$$

a_1, a_2, a_3 : Regressionskoeffizienten

Je nach Klon bzw. Klongruppe ergaben sich Bestimmtheitsmaße (R^2) von 0.975 bis 0.989. *Abbildung 4* veranschaulicht die Anpassungsgüte des Modells am Beispiel des Pappelklons Androscoggin.

Ebenfalls mittels nichtlinearer Regressionsanalyse erfolgte in einem zweiten Schritt die Schätzung der Bestandesbiomasse (BM [t_{atro} ha⁻¹]) für KUP in Abhängigkeit von der Oberhöhe [h_o]. Bestimmtheitsmaße von

$R^2 \geq 0.933$ weisen auch hier auf eine hohe Anpassungsgüte hin (*Formel 2*).

$$BM = a_4 * h_o^{a_5} \quad (\text{Formel 2})$$

a_4, a_5 : Regressionskoeffizienten

Gestützt auf das Datenmaterial der beprobten Versuchsfelder wurden die beiden Teilmodelle für folgende Gruppen von Pappelklonen und Bestandesdichten parametrisiert⁴⁾:

- Max-Gruppe: Klone Max 1, Max 2, Max 3, Max 4 und Max 5, Altersbereich zwei bis neun Jahre, Bestandesdichte von 1.150 bis 13.000 Bäumen ha⁻¹,
- Matrix-Gruppe: Klone Matrix und Hybride 275, Altersbereich zwei bis neun Jahre, Bestandesdichte 1.550 Bäume ha⁻¹,
- Androscoggin-Gruppe: Klon Androscoggin, Altersbereich zwei bis sieben Jahre, Bestandesdichte 1.550 Bäume ha⁻¹ und
- Münden-Gruppe: Klon Münden, Altersbereich zwei bis sieben Jahre, Bestandesdichte 1.550 Bäume ha⁻¹.

Um die Relevanz des Anbaus von Pappel-KUP für die Holzproduktion zu unterlegen, wurde durch Verknüpfung der Teilmodelle 1 und 2 der Standort-Leistungsschätzer abgeleitet und mit dessen Hilfe das Ertragspotenzial von Pappel-KUP für die gesamte sächsische Ackerfläche berechnet. Die zur Schätzung erforderlichen Standortvariablen wurden auf Gemeindebasis kalkuliert, mittels eines GIS-basierten Ansatzes aufbereitet sowie Simulationsrechnungen für verschiedene Bestandesdichten für die Klongruppe Max vorgenommen. Wie bedeutsam sich der Faktor Bestandesdichte auf den durchschnittlichen Gesamtzuwachs an Biomasse (dGZB) auswirkt, demonstriert *Abbildung 5* am Beispiel von Pappeln der Klongruppe Max für eine Rotationslänge von neun Jahren (RÖHLE et al., 2010):

- Bei einer Stammzahl von 1.667 Stück ha⁻¹ würden nur auf einem sehr kleinen Teil der Landesfläche, und zwar in einigen Gemeinden Mittelsachsens, dGZB-Werte von 8.01 bis 10 t_{atro} ha⁻¹a⁻¹ realisiert werden. Auf der restlichen Landesfläche wären dGZB-Werte zwischen 4.01 und 8 t_{atro} ha⁻¹a⁻¹ zu erwarten, in einer Gemeinde

²⁾ Im Verbundvorhaben ProLoc wurde die Entwicklung von standortbasierten Ertragsmodellen für Pappel und Weide weiter vorangetrieben (AMTHAUER GALLARDO et al., 2012). Dazu wurden im gesamten Bundesgebiet 38 Versuchsfelder auf landwirtschaftlichen Standorten angelegt und neben den Ertragsdaten auch bodenkundliche Parameter und Witterungsdaten erhoben. Nach einer Beobachtungszeit von drei Jahren erfolgte die Beerntung. Aufbauend auf dem dabei gewonnenen Datenmaterial entwickelt AMTHAUER GALLARDO im Rahmen einer Dissertation an der TU Dresden derzeit ein Standort-Leistungsmodell für Pappel und Weide im dreijährigen Umtrieb.

³⁾ Diese Angaben wurden dankenswerterweise vom Staatsbetrieb Sachsenforst und dem Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie übermittelt. Außerdem konnte auf detaillierte Standortdaten zurückgegriffen werden, die im Rahmen des Forschungsprojektes AGROWOOD durch die standortkundliche Arbeitsgruppe erhoben worden waren.

⁴⁾ *Abbildung 3* in Abschnitt 2 unterlegt den Zusammenhang zwischen Bestandesdichte und dGZB am Beispiel des Versuchsfeldes Laage. Da für die Klone der Max-Gruppe Parzellen mit unterschiedlicher Bestandesdichte (bezogen auf die Anzahl an ausgebrachten Steckhölzern bei der Flächenanlage) in ausreichendem Umfang vorhanden waren, konnte *Formel 2* für diese Klongruppe für vier unterschiedliche Bestandesdichten (1.150, 3.250, 7.400 und 13.000 Bäume ha⁻¹) parametrisiert werden. Für die übrigen Klone existierten lediglich Parzellen mit geringeren Stammzahlen ha⁻¹, weshalb die Parametrisierung nur für die Bestandesdichte von 1.550 Bäumen ha⁻¹ realisierbar war.

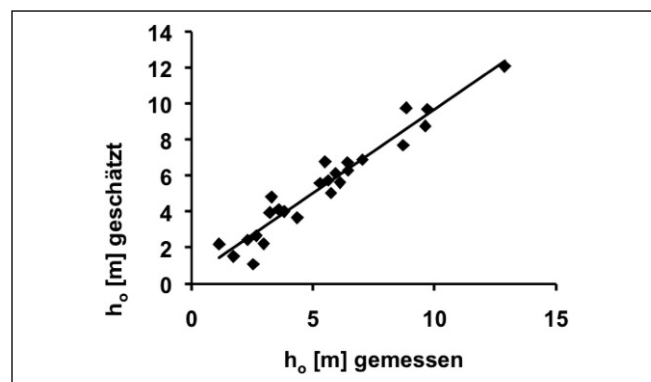


Abb. 4

Beziehung zwischen gemessenen und geschätzten Werten für die Oberhöhe (h_o) am Beispiel des Klons Androscoggin.

Relationship between observations and predictions of top height (h_o) for clone Androscoggin.

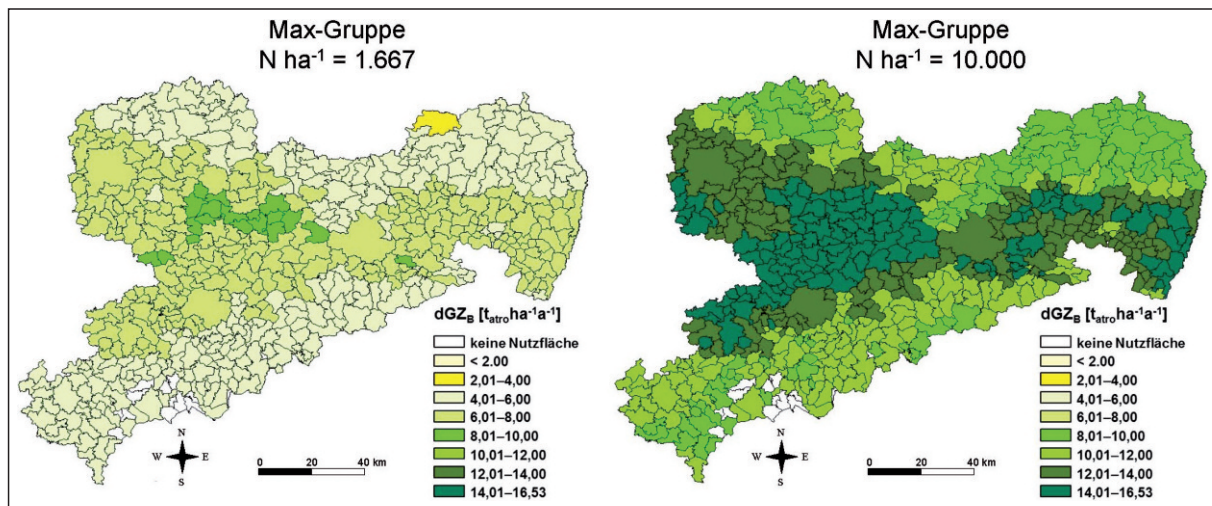


Abb. 5

Durchschnittlicher Gesamtzuwachs an Biomasse (dGZ_B [$t_{atro} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$]) auf landwirtschaftlichen Nutzflächen (Ackerfläche) für die Klongruppe Max bei neunjähriger Rotation und einer Bestandesdichte von 1.667 Stück ha^{-1} (linke Grafik) bzw. von 10.000 Stück ha^{-1} (rechte Grafik).

Mean annual biomass increment (tonnes dry bulk $\text{ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) on agricultural land for clone group Max at a stand density of 1.667 trees ha^{-1} (left) and 10.000 trees ha^{-1} (right) and a rotation of 9 years.

an der Grenze zu Brandenburg würden die Zuwächse noch niedriger liegen.

- Bei einer Stammzahl von 10.000 Stück ha^{-1} dagegen lägen die dGZ_B -Werte in allen Gemeinden über 8.01 $t_{atro} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Auf einem beachtlichen Teil der Landesfläche, insbesondere in Mittelsachsen, aber auch den bergnahen Lagen Ost Sachsens, dürften sich Leistungen von 12.01 bis 16 $t_{atro} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ einstellen.

4. BIOMASSEBESTIMMUNG IN KUP

Zur Messung der Biomasse in KUP bieten sich prinzipiell vier Verfahren an, die destruktiven Charakter besitzen, d.h. die Entnahme von Probenmaterial zwingend voraussetzen, weshalb sie in erster Linie für wissenschaftliche Zwecke von Relevanz sind (RÖHLE et al., 2009).

- Bei der **Vollerntemethode**, die ihren Ursprung in der Landwirtschaft hat, wird ein Versuchsfeld komplett beerntet, das Erntegut verwogen, nach Trocknung einer Stichprobe der Feuchtegehalt bestimmt und mit dessen Hilfe die Trockenbiomasse des gesamten geernteten Materials berechnet.

- Die **Teilerntemethode** (auch Probeflächenverfahren genannt) stützt sich auf Datenmaterial, das nicht auf dem gesamten Versuchsfeld sondern innerhalb dessen auf Stichprobenflächen gewonnen wird. Das weitere Vorgehen nach der Beerntung deckt sich mit dem bei der Vollerntemethode angewandten Prozedere.

- Das **Probebaumverfahren** (auch als Stockerntemethode oder Probestammverfahren bezeichnet) basiert auf der Beerntung einer Stichprobe von Individuen (Bäumen bzw. Stöcken inklusive aller Austriebe ab der zweiten Rotation) eines Versuchsfeldes. Nach Bestimmung des Frisch- und Trockengewichtes aller Stichprobenelemente wird das durchschnittliche Trockengewicht eines Individuums ermittelt und durch Multiplikation

der Individuenanzahl des gesamten Versuchsfeldes die aufstockende Biomasse berechnet.

- Bei der **Regressionsmethode** schließlich erfolgt die Beerntung einer Stichprobe von Individuen (Bäumen bzw. Trieben ab der zweiten Rotation) auf einem Versuchsfeld. An diesen Individuen werden die Dimensionsgrößen (z. B. Durchmesser, Höhe bzw. Trieb länge) gemessen und das Frisch- und Trockengewicht bestimmt. Darauf aufbauend werden mit Hilfe der Regressionsanalyse die Beziehungen zwischen dem Baum- bzw. Triebgewicht (bei Stockausschlägen) als abhängiger und einer oder mehrerer Dimensionsgrößen als unabhängige(r) Variable(r) untersucht und zur Herleitung von Biomassefunktionen genutzt (Abb. 6). Die Berechnung der Biomasse eines Versuchsfeldes gelingt durch Einsetzen der Dimensionsgrößen aller Individuen des Versuchsfeldes (oder der auf einem repräsentativen Flä-

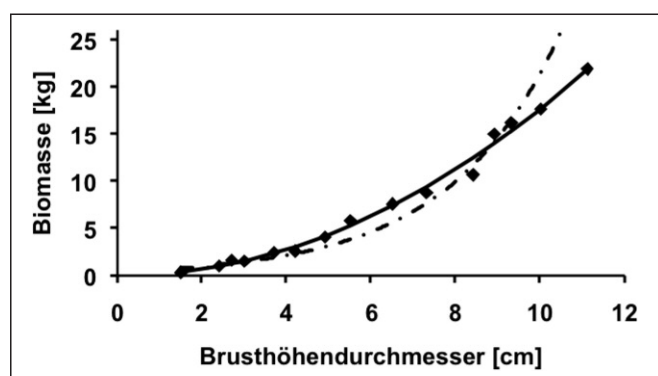


Abb. 6

Verlaufskurven der exponentiellen (durchgezogene Linie) und allometrischen (durchgezogene Linie) Biomassefunktion für Klon Max 1.

Graphs of exponential (dotted line) and allometric (filled line) biomass function of clone Max 1.

chenausschnitt gemessenen Individuen) in die Biomassefunktion.

4.1 Biomasseermittlung in Pappelplantagen

Analysen des von Pappel-Versuchsfeldern verfügbaren Materials ergaben, dass sich die meist sehr straffen Beziehungen zwischen der Einzelbaumbiomasse (bm [kg]) und den Dimensionsgrößen mit einer Vielzahl von Gleichungen beschreiben lassen (RÖHLE et al., 2006). Da mehrparametrische Funktionen jedoch zu keiner Verbesserung der Schätzgenauigkeit beitrugen, wurde aus Gründen der Praktikabilität folgendem einparametrischen Funktionstyp, der mit dem Durchmesser nur eine Eingangsgröße erfordert, der Vorzug bei der Aufstellung von Biomassefunktionen gegeben (Formel 3):

$$bm = a_0 * d^{a_1} \quad (\text{Formel 3})$$

bm : Trockenbiomasse eines Individuums
(Einzelbaum oder Trieb bei Stockausschlägen)

d : Durchmesser in Brusthöhe ($d_{1,3}$ [cm])

a_0, a_1 : Regressionskoeffizienten

Für insgesamt 54 Pappel-Versuchsfelder wurden mit Hilfe der allometrischen Gleichung Biomassefunktionen hergeleitet. Die Verlaufskurven dieser Funktionen streuen in einem weiten Bereich. Infolgedessen ergeben sich je nach versuchsfeldspezifischer Biomassefunktion beispielsweise bei einem Brusthöhendurchmesser von 15 cm Einzelbaum-Biomassen von knapp unter 40 kg bis zu Werten von mehr als 60 kg. Weitergehende Analysen der Biomassefunktionen ergaben allerdings, dass die Werte der Koeffizienten a_0 und a_1 der in Formel 3 dargestellten allometrischen Funktion keine statistisch belegbaren Unterschiede zwischen den Klonen zeigen, jedoch signifikante Beziehungen sowohl zwischen der Bestandesmittelhöhe/Oberhöhe als auch der Bestandesdichte und den Werten der Koeffizienten bestehen⁵⁾. Aus Abbildung 7 geht hervor, dass sowohl mit zunehmender Bestandesmittelhöhe als auch bei höheren Stamm- bzw. Triebanzahlen ha^{-1} der Wert des Koeffizienten a_0 sinkt. Diese Beziehungen können regressionsanalytisch beschrieben werden, sind jedoch aufgrund ihrer geringen Bestimmtheitsmaße zur weiterführenden Modellierung nicht geeignet.

$$a_1 = -3.379 * a_0 + 2.593 \quad (\text{Formel 4})$$

a_0, a_1 : Regressionskoeffizienten der
Biomassefunktion (vgl. Formel 3)

Darüber hinaus wurde zwischen den Koeffizienten a_0 und a_1 eine straffe lineare Beziehung gefunden (Abb. 8,

⁵⁾ Diese Abhängigkeiten sind plausibel und biologisch gut interpretierbar: Biomassefunktionen verlagern sich mit zunehmender Mittelhöhe nach oben, da höhere Bäume bei gleichem Durchmesser in Brusthöhe eine größere Biomasse besitzen. Außerdem entwickeln Bäume gleicher Brusthöhendurchmesser und Höhe in KUP mit geringer Stammzahl ha^{-1} eine größere Biomasse als in KUP mit hoher Dichte, da Bäume bei geringeren Bestandesdichten eine vergleichsweise größere Krone ausbilden. Deshalb verändert sich bei identischer Schaftbiomasse die Relation zwischen dem Schaft und in der Krone fixierter Biomasse zugunsten der Krone, was zwangsläufig eine Vergrößerung der Gesamtbiomasse bewirkt.

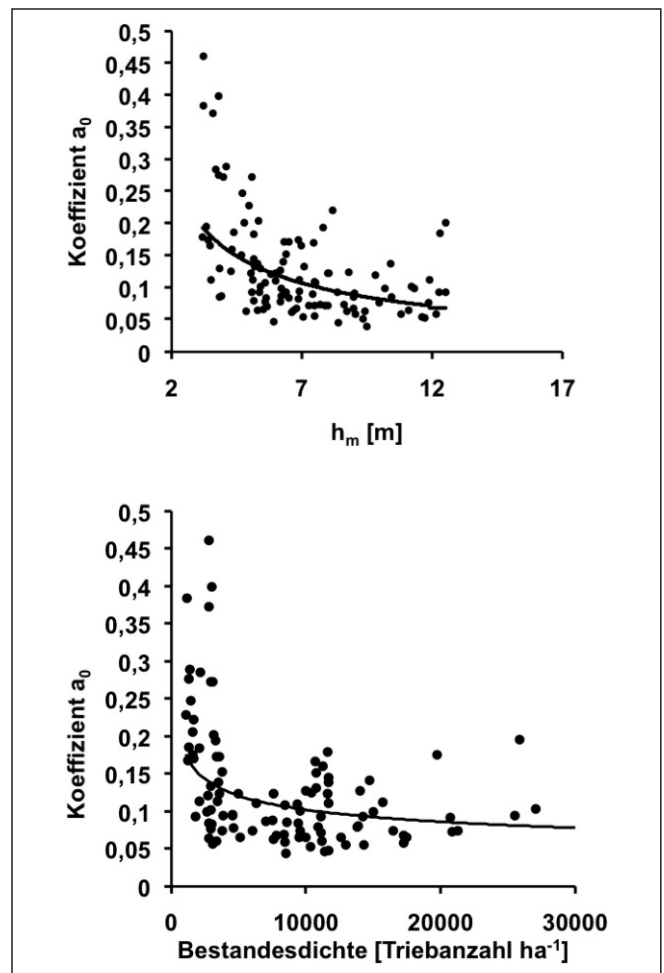


Abb. 7

Beziehung zwischen der Mittelhöhe (h_m) und dem Koeffizienten a_0 (links, R^2 : 0.48) sowie der Bestandesdichte (Triebanzahl ha^{-1}) und dem Koeffizienten a_0 (rechts, R^2 : 0.37).

Relationship between mean height (h_m) and coefficient a_0 (left, R^2 -value: 0.48) and stocking density (shoot number ha^{-1}) and coefficient a_0 (right, R^2 -value: 0.37).

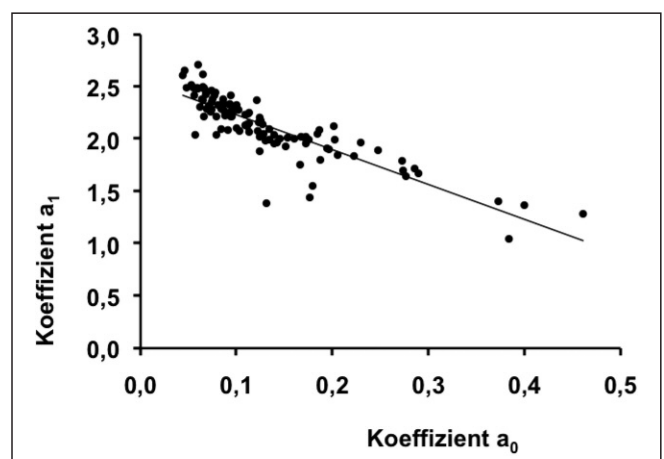


Abb. 8

Beziehung zwischen den Koeffizienten a_0 und a_1 der allometrischen Biomassefunktionen (R^2 : 0.73).

Linear relationship between the coefficients a_0 and a_1 of the allometric biomass functions (R^2 -value: 0.73).

Formel 4). HARTMANN (2010) hat diese Beziehungen näher analysiert, für beliebige Bestandesdichte-/Höhenkombinationen modelliert und somit die Möglichkeit zur Aufstellung generalisierbarer Biomassefunktionen geschaffen. Darauf aufbauend wurde von HARTMANN ein vorläufiges, praxistaugliches Schätzverfahren entwickelt, mit dessen Hilfe dem Anwender (Landwirt) ohne die Entnahme von Probenmaterial auf der Basis von leicht durchführbaren Messungen eine präzise Ermittlung der Trockenbiomasse einer Pappel-KUP gelingt. Im Rahmen eines von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) finanzierten Forschungsvorhabens wurde dieses vorläufige Schätzverfahren anhand weiterer Datensätze von Pappel-KUP überprüft und teilweise modifiziert. Die Grundprinzipien und die praktische Anwendung dieses Verfahrens werden im Folgenden kurz umrissen.

Wird das für die Koeffizientenschätzung verwendete Datenmaterial in sechs Klassen steigender Mittelhöhe unterteilt und für jede Klasse separat eine Beziehung zwischen Stamm- bzw. Triebanzahl ha^{-1} und dem Koeffizienten a_0 hergeleitet, führt dies zu einer wesentlichen Verbesserung der Anpassungsgüte (RÖHLE und SKIBBE, 2012). Wie aus *Abbildung 9* hervorgeht, liegen die Bestimmtheitsmaße in den einzelnen Mittelhöhenklassen bei Werten zwischen 0.46 und 0.96. Da Form und Lage einer Biomassefunktion über die Werte der beiden Koeffizienten a_0 und a_1 gesteuert werden, lassen sich mit Hilfe der in *Abbildung 9* ergänzend aufgeführten sechs Regressionsfunktionen die Werte des Koeffizienten a_0 für die sechs Höhenklassen berechnen. Der fehlende Wert für den Koeffizienten a_1 wird über die Regressionsfunktion nach *Formel 4* ermittelt.

Soll nun für eine beliebige Pappel-KUP, deren Mittelhöhe innerhalb des parametrisierten Bereiches zwischen 3 und 12.5 m liegt, die Biomasse geschätzt werden, sind folgende Arbeitsschritte durchzuführen:

1. Stichprobenartige Erhebung der Brusthöhendurchmesser auf der KUP zur Bestimmung des Mitteldurchmessers (d_g [cm]) und der Stamm-/Triebanzahl (N) pro Hektar.

2. Messung von 15 Baum-/Triebhöhen zur Bestimmung der Mittelhöhe (hm [m]) als Eingangsgröße in die entsprechende Regressionsfunktion (*Abb. 9*) zur Bestimmung des Wertes des Koeffizienten a_0 .

3. Berechnung des Wertes des Koeffizienten a_1 durch Einsetzen des Wertes des Koeffizienten a_0 in die Formel 4.

4. Berechnung der Biomasse (BM [$t_{atro} ha^{-1}$]) der KUP anhand der *Formel 5*:

$$BM = (N * a_0 * d_g^{a_1}) / 1000 \quad (\text{Formel 5})$$

a_0, a_1 : Regressionskoeffizienten der Biomassefunktion

Damit wurde ein praxistaugliches Verfahren zur Bestimmung der aufstockenden Biomasse von KUP aus Pappel geschaffen, bei dessen Anwendung keine aufwändigen Probestamentnahmen anfallen, sondern lediglich die Stammzahl ha^{-1} , der Mitteldurchmesser und die Mittelhöhe erhoben werden müssen⁶⁾.

4.2 Biomasseermittlung in Weidenplantagen

Zur Erzeugung von Energieholz in sehr kurzen Umtriebszeiten ist die Weide aufgrund ihres Wachstumsverhaltens besonders gut geeignet. Da aus jedem Steckholz bereits in der ersten Rotation eine Vielzahl an Ruten austreibt, ist die Weide in der Lage, den verfügbaren Standraum ab dem zweiten Wuchsjahr besonders effek-

⁶⁾ Sowohl das in Kapitel 3 vorgestellte Standort-Leistungsmodell als auch der Ertragsschätzer sind als allgemein zugängliche Applikationen inklusive Bedienungsanleitung auf der Homepage der Professur für Waldwachstum und Holzmesskunde der TU Dresden verfügbar (<http://www.forst.tu-dresden.de/Waldwachstum/index.php?page=kup-ertrag>).

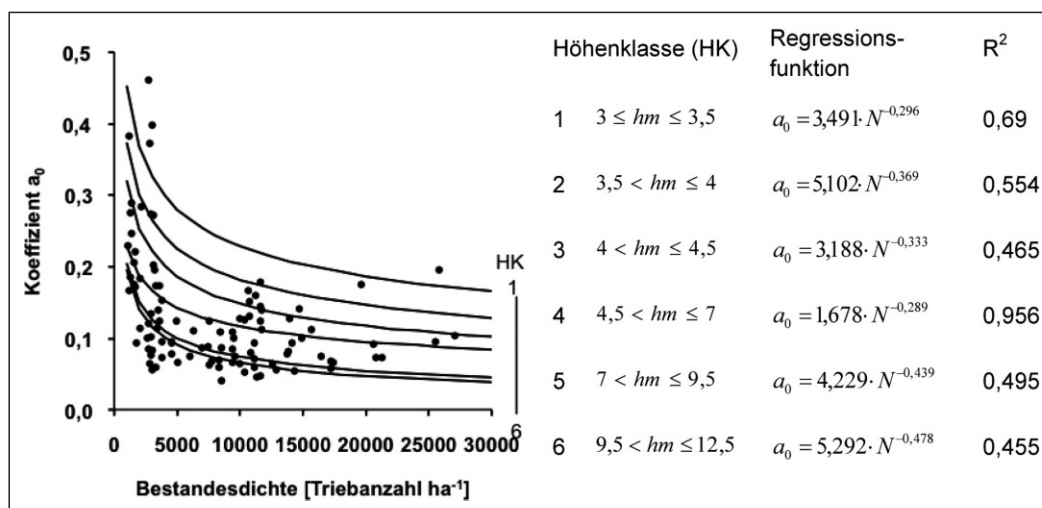


Abb. 9

Modifizierter Ansatz zur Schätzung des Koeffizienten a_0 der allometrischen Biomassefunktion für unterschiedliche Mittelhöhenbereiche.

Modified approach for deriving coefficient a_0 of the allometric biomass functions for classes of different mean stand height.



Abb. 10
Dreijährige Weidenplantage (Foto: Röhle).
Three year willow plantation.

tiv zu nutzen und rasch hohe Biomasseerträge zu leisten (Abb. 10).

Aktuell lassen sich die Biomasseerträge von Weiden-KUP nur mit sehr hohem Zeit- und Kostenaufwand, z. B. durch Anwendung der Regressionsmethode, schätzen. Daher wird derzeit im Rahmen eines von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) finanzierten Forschungsvorhabens an der Entwicklung eines praxistauglichen und zerstörungsfreien Schätzverfahrens gearbeitet. Nach den bisher vorliegenden Ergebnissen zeigen zwar auch die für Weiden-Versuchsfelder hergeleiteten Biomassefunktionen, dass ähnlich wie bei Pappel eine wechselseitige Abhängigkeit zwischen den Koeffizienten a_0 und a_1 besteht. Im Gegensatz zur Pappel konnten aber weder signifikante Einflüsse der Bestandesdichte noch der Bestandesmittelhöhe auf den Koeffizienten a_0 nachgewiesen werden. Deshalb wird alternativ geprüft, ob die Aufstellung eines Schätzverfahrens über eine Modellierung und Fortschreibung von Durchmesser-Häufigkeitsverteilungen mit Hilfe der Weibullfunktion und deren Verknüpfung mit Biomassefunktionen möglich ist.

5. AUSBLICK

Aufgrund des Klimawandels sowie der anthropogen bedingten Stoffeinträge und der damit verbundenen Änderung der standörtlichen Produktionskraft kommt der Untersuchung der Standort-Leistungsbeziehungen und der Entwicklung von standortbasierten Wachstumsmodellen nicht nur für schnellwachsende Baumarten im Kurzumtrieb eine steigende Bedeutung zu. Vielmehr ist zur Formulierung von nachhaltigen Bewirtschaftungsstrategien und wegen der steigenden Nachfrage nach dem Rohstoff Holz der Untersuchung von Standort-Leistungsbeziehungen im weltweiten Kontext höchste Priorität einzuräumen. Aufgrund der komplexen Struktur

von Hochwäldern und naturnahen Waldaufbauformen dürfte dieses Ziel allerdings nicht in der näheren Zukunft und auch nur unter der Voraussetzung erreicht werden, dass die in diesen Systemen ablaufenden Prozesse in interdisziplinären Vorhaben fachübergreifend erforscht werden.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Die Schätzung der standörtlichen Leistungsfähigkeit von Waldbeständen ist ein zentrales Anliegen der waldwachstumkundlichen Forschung. Erste Ansätze dazu wurden von ASSMANN (1961) formuliert und von FRANZ (1968, 1971) vertieft. Eine einigermaßen zutreffende Standort-Leistungsmodellierung gelingt bis heute allerdings nur in vergleichsweise einfachen Waldaufbauformen wie einschichtigen Reinbeständen und Kurzumtriebsplantagen.

Für den Kurzumtrieb eignen sich in erster Linie stockausschlagfähige Baumarten mit raschem Jugendwachstum wie Pappel, Weide und Robinie. Die durchschnittlichen Gesamtzuwächse an Biomasse (dGZ_B) bei Pappel reichen in Abhängigkeit von den standörtlichen Gegebenheiten von etwa 4 bis zu mehr als $20 t_{atro} ha^{-1}a^{-1}$. Optimale Wuchsleistungen werden bei hohen Bestandesdichten auf gut wasserversorgten Böden erzielt.

Zur standortbasierten Leistungsschätzung von Pappeln im Kurzumtrieb dient ein zweistufiges Modell: Zuerst wird die Oberhöhe mittels multipler linearer Regressionsanalyse in Abhängigkeit vom Bestandesalter und vier Standortfaktoren (Mitteltemperatur der Monate April bis Juli, Niederschlagssumme der Monate Mai bis Juni, Ackerzahl sowie nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum) geschätzt. Danach wird der Biomassevorrat mittels nichtlinearer Regressionsanalyse durch die Bestandesoberhöhe bestimmt. Simulationsrechnungen zufolge könnte bei einer Bestandesdichte

von 10.000 Bäumen ha^{-1} und einer Rotationslänge von neun Jahren auf der gesamten sächsischen Ackerfläche ein durchschnittlicher Gesamtzuwachs an Biomasse von mehr als $8 t_{\text{atro}} \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ in der ersten Rotation erzielt werden.

Die Entwicklung eines Ertragsschätzers für Kurzumtriebsplantagen (KUP) aus Pappel basiert auf der Modellierung der Koeffizienten von allometrischen Biomassefunktionen in Abhängigkeit von der Bestandesmittelhöhe (h_m) und der Bestandesdichte (Triebanzahl ha^{-1}). Bei der Anwendung des Ertragsschätzers müssen lediglich Durchmesser und Höhen einer KUP erhoben und deren Triebanzahl ha^{-1} bestimmt werden, um den Biomassevorrat zu ermitteln.

Erste Untersuchungen zur Entwicklung eines Ertragsschätzers für KUP aus Weide zeigten, dass der bei Pappel gewählte Ansatz nicht erfolgversprechend ist und statt der Koeffizientenmodellierung Alternativen wie z.B. die Fortschreibung von Durchmesserverteilungen mit der Weibull-Funktion in Verknüpfung mit Biomassefunktionen zu prüfen sind.

7. SUMMARY

Title of the paper: *Site-based yield estimation and biomass calculation in short rotation coppice plantations.*

The estimation of the site productivity of forest stands is a major facet of the study of growth and yield in the forest sciences. Initial approaches were formulated by ASSMANN (1961) and expanded upon by FRANZ (1968, 1971). To date, reliable site-based yield modelling is possible only in relatively simply structured forests such as pure, single-layered stands and in short rotation coppice stands (*Fig. 1, Fig. 2*).

Tree species with the capacity to coppice and with rapid early growth such as poplar, willow and black locust are suitable foremost for cultivation in short rotation plantations. Depending on site conditions, the mean annual biomass increment ranges from 4 to more than 20 tonnes dry bulk $\text{ha}^{-1} \text{year}^{-1}$ for poplar. Optimal growth is achieved at high stocking densities on soils with good water availability (*Fig. 3*).

A two-tiered model was applied for site-based estimations of poplar production in short rotation coppice. First the dominant height was estimated in a multiple linear regression analysis in relation to stand age and the following four site factors (*Fig. 4*): available water storage capacity (AWSC), soil quality index (SQI), mean temperature between April and July (T_{4-7}) and total precipitation between May and June (P_{5-6}). Subsequently the forest biomass was determined in a non-linear regression analysis of the dominant stand height. Simulation calculations showed that, for a given stand density and a rotation of 9 years, a mean annual biomass increment of more than 8 tonnes dry bulk $\text{ha}^{-1} \text{year}^{-1}$ can be achieved in the first rotation on all agricultural land in the German state Saxony (*Fig. 5*).

The yield estimator for short rotation poplar plantations was developed based on the modelling of coefficients from allometric biomass functions (*Fig. 6*) relative to mean stand height [m] and stocking density (shoot

number ha^{-1}) (*Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9*). Use of the yield estimator, i.e. to calculate the biomass of a short rotation coppice plantation, requires only data pertaining to the diameter, height and the shoot number per hectare.

Preliminary studies to develop a yield estimator for short rotation willow plantations have shown the approach adopted for poplar to be unsuitable and that, instead of coefficient modelling, alternatives such as the extrapolation of diameter distributions using the Weibull function linked with biomass functions should be investigated.

8. RÉSUMÉ

Titre de l'article: *Estimation des potentialités stationnelles et détermination de la biomasse dans des plantations à courtes rotations.*

L'estimation de la capacité stationnelle de peuplements forestiers est une interrogation centrale de la recherche en croissance forestière. Les premières approches sur ce point ont été formulées par ASSMANN (1961) et approfondies par FRANZ (1968, 1971). Une modélisation de la capacité stationnelle à peu près exacte ne réussit, jusqu'à présent, à vrai dire uniquement dans des formes sylvicoles comparativement simples comme les peuplements monospécifiques à une strate et les plantations à courtes rotations.

Pour les courtes rotations, se prêtent, en première ligne, les espèces pouvant rejeter de souche, telles que le peuplier, le saule et le robinier. La valeur moyenne des accroissements totaux en biomasse (dGZ_B) chez le peuplier atteignent, en relation avec les qualités stationnelles, d'environ 4 jusqu'à 20 t de matière sèche/ha/an. Les capacités de croissance optimales sont atteintes dans le cas de hautes densités de peuplement sur des sols bien pourvus en eau.

Quant aux estimations de production basées sur la station, pour le peuplier en courte rotation, on peut utiliser un modèle à deux strates: tout d'abord la hauteur maximale est estimée par une analyse de régression multiple linéaire en relation avec l'âge du peuplement et quatre facteurs stationnels (température moyenne de mois d'avril à juin, somme des précipitations des mois de mai à juin, l'indice de qualité du sol tout comme la capacité au champ utilisable dans l'espace racinaire effectif). Après cela, la quantité de biomasse est calculée au moyen d'une analyse de régression non linéaire de la hauteur maximale du peuplement. Des calculs de simulation ont montré que, pour une densité de peuplements de 10 000 arbres/ha et une durée de rotation de 9 ans sur l'ensemble de la surface de sol agricole du Land allemand de Saxe, un accroissement total moyen en biomasse de plus de 8 t de matière sèche/ha/an était atteint lors de la première rotation.

Le développement de l'estimateur pour des plantations à courtes rotations de peupliers était basé sur la modélisation de coefficients de fonctions allométriques de biomasse en relation avec la hauteur moyenne du peuplement (m) et la densité du peuplement (nombre de tiges/ha). Lors de la mise en œuvre de l'estimateur, le diamètre et les hauteurs d'une plantation à courte rota-

tion doivent être mesurées ainsi que le nombre de tiges à l'hectare afin de calculer la quantité de biomasse.

Les premières expérimentations pour le développement de l'estimateur sur de courtes rotations avec le saule ont montré que l'approche choisie avec le peuplier n'est pas garantie de résultat et qu'à la place de la modélisation de coefficients, des alternatives, telles que par exemple l'extrapolation sur les distributions des diamètres avec la fonction Weibull en lien avec les fonctions de biomasse, sont à étudier.

9. LITERATURVERZEICHNIS

- ALI, W. (2009): Modelling of Biomass Production Potential of Poplar in Short Rotation Plantations on Agricultural Land of Saxony, Germany. Dissertation, Fachrichtung Forstwissenschaften, TU Dresden, 130 S.
- AMTHAUER GALLARDO, D., M. HOFMANN und H. RÖHLE (2012): Standortbasierte Ertragsmodellierung von Pappel- und Weidenhybriden. *In: Züchtung und Ertragsleistung schnellwachsender Baumarten im Kurzumtrieb, Erkenntnisse aus drei Jahren FastWOOD, ProLoc und Weidenzüchtung. Beiträge aus der NW-FVA, Band 8*, 91–104.
- ASSMANN, E. (1961): Waldertragskunde. BLV Verlagsgesellschaft. München-Bonn-Wien.
- BEMMANN, A., K.-H. FEGER, D. GEROLD, W. GROSSE, K.-U. HARTMANN, R. PETZOLD, H. RÖHLE, J. SCHWEINLE und C. STEINKE (2007): Kurzumtriebsplantagen auf landwirtschaftlichen Flächen in der Region Großhain im Freistaat Sachsen. *Forstarchiv* **78**: 95–101.
- BOELCKE, B. (2006): Schnellwachsende Baumarten auf landwirtschaftlichen Flächen. Leitfaden zur Erzeugung von Energieholz. Hrsg.: Ministerium f. Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern: 40 S.
- FRANZ, F. (1968): Die Ergebnisse standortkundlicher-ertragskundlicher Forschung als Grundlage zuverlässiger Ertragsschätzungen auf gegebener Standortseinheit. Mit Leistungstabellen der Fichte für einige Standortseinheiten in Mittelschwaben. Habilitationsschrift Universität München.
- FRANZ, F. (1971): Grundlagen und Verfahren standortbezogener Leistungsschätzung. Forschungsberichte, Forstliche Forschungsanstalt München, Nr. 2.
- HARTMANN, K.-U. (2010): Entwicklung eines Ertrags-schätzers für Kurzumtriebsbestände aus Pappel. Dissertation, Fachrichtung Forstwissenschaften, TU Dresden, 150 S.
- PETZOLD, R., K.-H. FEGER und K. SCHWÄRZEL (2009): Wasserhaushalt von Kurzumtriebsplantagen. *In: REEG, T. et al. (Hrsg.): Anbau und Nutzung von Bäumen auf landwirtschaftlichen Flächen. Wiley-VCH Verlag, Weinheim*, 41–55.
- PRETZSCH, H. (1992): Zunehmende Unstimmigkeiten zwischen erwartetem und wirklichem Wachstum unserer Waldbestände. *FwCbl* (**111**), 366–382.
- RÖHLE, H., K.-U. HARTMANN, D. GEROLD, C. STEINKE und J. SCHRÖDER (2006): Überlegungen zur Aufstellung von Biomassefunktionen für Kurzumtriebsbestände. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, **177**, 178–187.
- RÖHLE, H., K.-U. HARTMANN, C. STEINKE und D. MURACH (2009): Leistungsvermögen und Leistungserfassung von Kurzumtriebsbeständen. *In: REEG, T. et al. (Hrsg.): Anbau und Nutzung von Bäumen auf landwirtschaftlichen Flächen. Wiley-VCH Verlag, Weinheim*, 41–55.
- RÖHLE, H., W. ALI, K.-U. HARTMANN und C. STEINKE (2010): Wachstum und Biomasseproduktion schnellwachsender Baumarten im Kurzumtrieb. *In: BEMMANN, A., KNUST, C. (Hrsg.): Agrowood – Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven. Weißensee Verlag, Berlin*, 103–116.
- RÖHLE, H. und K. SKIBBE (2012): Ertragsschätzung in Kurzumtriebsplantagen aus Pappel und Weide. *In: Züchtung und Ertragsleistung schnellwachsender Baumarten im Kurzumtrieb, Erkenntnisse aus drei Jahren FastWOOD, ProLoc und Weidenzüchtung. Beiträge aus der NW-FVA, Band 8*, S. 105–117.
- SCHOLZ, V., H. J. HELLEBRAND und A. HÖHN (2004): Energetische und ökologische Aspekte der Feldholzproduktion. *Bornimer Agrartechnische Berichte* **35**: 15–32.
- SPIECKER, H., K. MIELIKÄINEN, M. KÖHL und J. P. SKOVSGAARD (eds.) (1996): Growth Trends in European Forests. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York.