

Oberirdische holzige Biomasse in Kiefern-/Buchen- und Eichen-/Buchen-Mischbeständen

Aboveground Woody Biomass in Mixed Stands of Scots Pine/Common Beech and European Oak/Common Beech

R. GROTE, J. SCHUCK, J. BLOCK, H. PRETZSCH

Zusammenfassung

Wie viel holzige Biomasse sich in einem forstlichen Ökosystem befindet, ist für verschiedenste ökonomische und ökologische Fragestellungen relevant. Da detaillierte Messungen aufwendig und daher nicht großflächig durchzuführen sind, ist man bei ihrer Bestimmung auf Schätzfunktionen angewiesen, die allerdings eine Reihe von Schwächen aufweisen: Erstens liegen unterschiedlich viele Untersuchungen zu den einzelnen Baumarten vor, die zudem nicht gleichmäßig auf die Verbreitungsgebiete und Altersstufen der Baumarten verteilt sind. Zweitens basieren die vorliegenden Funktionen zumeist auf Untersuchungen, die in Reinbeständen durchgeführt worden sind. Die Frage der Übertragbarkeit solcher Ergebnisse auf gemischte, stärker strukturierte Bestände konnte bisher auf Grund fehlender Vergleichsdaten nicht beantwortet werden. Drittens wird die Masse der Rinde häufig nicht als separates Kompartiment erhoben. Dies ist insbesondere von Bedeutung, wenn außer der Biomasseproduktion auch die Nährstoffinhalte von Interesse sind, da die Rinde eine besonders hohe Nährstoffkonzentration aufweist. In der vorliegenden Arbeit werden die bisherigen Untersuchungen durch Erhebungen in zwei Beständen mittleren Alters, die in Ober- und Unterschicht untergliedert sind (Traubeneiche/Buche und Kiefer/Buche), ergänzt. Dabei steht die Biomasserhebung im Vordergrund, womit eine Voraussetzung für spätere Nährstoffbilanzen geschaffen werden soll, die in diesen Beständen in Abhängigkeit von der Bewirtschaftung durchgeführt werden sollen.

Insgesamt wurden 15 Eichen (10–33 cm Brusthöhendurchmesser), 15 Kiefern (10–30 cm) und 20 Buchen (4–16 cm) gefällt und die holzige Biomasse in den wichtigsten oberirdischen Kompartimenten bestimmt. Die Raumdichte-Messungen zielen auf die Schätzung der Trockenmasse im Kern- und Splintholz. Die Nicht-Derbholzbiomasse wurde auf der Basis von Stichprobenerhebungen durch Trocknen und Wiegen bestimmt. Außerdem wurde die Rindenbiomasse des Derbholzes durch systematische Messung der Rindenstärke im Stamm- und Kronenbereich quantifiziert.

Die Ergebnisse bestätigen im Allgemeinen die allometrischen Zusammenhänge zwischen Grundfläche in 1,3 m Höhe über dem Boden und holziger Biomasse aus älteren Reinbestands-Untersuchungen. Die nicht-linearen Ausgleichskurven weisen hohe Bestimmtheitsmaße zwischen 0,97 und 0,99 auf und lassen keinen Bias erkennen. Die Derbholz- und Rindenanteile lassen sich dabei am besten mit linearen Zusammenhängen zur Gesamtbiomasse bzw. Gesamt-Derbholzbiomasse beschreiben. Durch Anwendung entsprechender Multiplikatoren, in welchen der Nährstoffgehalt pro Trockenmasse steckt, lassen sich die so schätzbaren Biomassen in Nährstoffmengen umrechnen.

Schlagerworte: *Quercus petraea*, *Pinus silvestris*, *Fagus sylvatica*, Biomasse, Derbholz, Rinde.

Summary

Data on the amount of woody biomass within a forest ecosystem are necessary prerequisites for many economical and ecological questions. Because detailed measurements are laborious and thus can not be carried out on a broad scale, equations are used to estimate tree and stand biomass from tree dimensions. However, this approach suffers from a number of uncertainties involved in the equations. The data base on the various tree species, regions and age classes from which the functions are derived is not uniform. Most of these investigations were carried out in homogenous, even-aged forests and it is questionable whether the derived equations are valid as well for mixed and more structured stands. Bark biomass has not often been considered as a separate compartment because its share of the total biomass is relatively small. Nonetheless, it is particularly important if nutrient contents are to be investigated as well. The present paper complements available analyses by investigating two middle aged stands dominated by an upper tier of Sessile oak and Scots pine, respectively, and which contain a well developed understorey of European beech. The study focuses on biomass estimation but shall serve as basis for further investigations of nutrient balances in dependence on management intensity.

15 oaks (with diameter at breast height between 10 and 33 cm), 15 pines (10–30 cm) and 20 beeches (4–16 cm) were harvested and analyzed with respect to the biomass of the major aboveground woody compartments, including bark. The biomass of stem and branch parts with a diameter larger than 7 cm at the smaller end (*DH_{mr}*) were determined separately for heart- and sapwood from volume measures and wood density measures. Bark biomass (*DH_r*) of this fraction was quantified from bark samples taken along the shaft axis (volume and dry weight were measured as well). Other woody crown fractions (*NDH*) were estimated used samples that were dried, weighted, and scaled to the whole crown by the branch basal area.

Results generally confirm literature findings about the relation between basal area at 1.3 m height and total aboveground woody biomass (*BM*). Non-linear regression curves give r^2 -values between 0.97 and 0.99 with no apparent bias. The fraction of *DH_{mr}* and *DH_r* to *BM* was found to be constant over the range of investigated trees. In conclusion, the derived equations are assumed to be suitable for estimation of woody biomass in mixed stands and could be applied in conjunction with nutrient analyses to investigate the impact of different harvesting strategies on nutrient cycling.

Keywords: *Quercus petraea*, *Pinus silvestris*, *Fagus sylvatica*, biomass, woody biomass above 7 cm thickness, bark.

1 Einleitung

Das heutige Verständnis von multifunktionaler Forstwirtschaft spiegelt sich in den sechs gesamteuropäischen Kriterien und Indikatoren für nachhaltige Forstwirtschaft wider (McPFE 2000). Die vereinbarten Kriterien (1) forstliche Ressourcen, (2) Gesundheit und Vitalität, (3) Produktionsfunktionen, (4) biologische Diversität, (5) Schutzfunktionen und (6) sozioökonomische Funktionen werden durch zugeordnete Indikatoren quantitativ fassbar gemacht. Kritische Ein- und Austräge, Eingriffe und Zustände nehmen unter diesen Indikatoren eine prominente Stellung ein (PRETZSCH 2003). Um zu bestimmen, wie hoch die kritische Austragsmenge anzusetzen ist, ist es zunächst einmal notwendig, die Menge an Biomasse und Nährstoffen zu quantifizieren, die sich in einem Wald befinden. Dabei ist nicht nur die Gesamtbiomasse, sondern vor allen Dingen die durch Ernte entzogene Biomasse und die in ihr enthaltene Nährstoffmenge von Bedeutung. Können diese Nährstoffmengen am jeweiligen Standort z.B. durch Mineralverwitterung oder anthropogene Deposition nachhaltig ersetzt werden? Dieser Frage wird im Rahmen des von der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz initialisierten Projektes „Nährstoffzüge durch Holzernte und ihr Einfluss auf den Nährstoffhaushalt armer Standorte in Rheinland-Pfalz“ (unter anderem) in Eichen- und Kiefernbeständen mit Buchenunterbau nachgegangen.

Die entzogene Nährstoffmenge hängt davon ab, welche Teile eines Baumes geerntet und dann dem Bestand entnommen werden. Mögliche Alternativen wären z.B. die gesamte oberirdische holzige Biomasse, die Derbholzbiomasse, das Stammholz oder lediglich das entrindete Derb- oder Stammholz zu entnehmen. Um diese Alternativen und ihre Konsequenzen gegeneinander abschätzen zu können, müssen sowohl die Größe der einzelnen Kompartimente als auch ihre Nährstoffgehalte bekannt sein. Da sich die Biomasse wie auch die Anteile der Kompartimente nicht-linear zur Baumdimension entwickeln, werden zu ihrer Bestimmung im allgemeinen artspezifische Schätzfunktionen auf der Basis des Brusthöhendurchmessers (BHD) herangezogen, die auf Stichprobenaufnahmen einzelner Bäume basieren. Einige Funktionen dieser Art sind bereits in der Literatur vorhanden (zum Beispiel für Kiefer (FINER 1989, MONSERUD et al. 1996, VANNINEN et al. 1996), Fichte (BURGER 1953, DROSTE 1969, CERNY 1990, JOHANSEN 2000, MUND et al. 2002), Buche und Eiche (BURGER 1947, BURGER 1950)). Bei der Anwendung verfügbarer Funktionen ergeben sich allerdings diverse Probleme. So basieren die meisten dieser Funktionen auf Untersuchungen in Reinbeständen, die zudem meistens gleichaltrig aufgebaut waren (Ausnahme: VANDE WALLE et al. 2001). Die Anwendbarkeit auf strukturierte Mischbestände ist daher zumindest in Frage zu stellen.

Untersuchungen an Fichten aus verschiedenen Regionen weisen darauf hin, dass Schätzfunktionen auch regionale Unterschiede aufweisen können (CERNY 1990). Leider sind Untersuchungen, die zur Erstellung oder Validierung allometrischer Funktionen herangezogen werden können keineswegs gleichmäßig über das Verbreitungsgebiet der Baumart und die Altersklassen verteilt. In einer Literaturübersicht von JACOBSEN et al. (2002) mit 48 Referenzen zu Derbholzbestimmungen zwischen 1958 und 2002 stammen beispielsweise zwei Drittel der Kiefernuntersuchungen aus Schweden, Schottland, der Lüneburger Heide oder der Eifel und nur 2 aller Untersuchungen an Eichen sind in Beständen durchgeführt worden, die jünger als 90 Jahre waren. Die meisten der in der Veröffentlichung aufgeführten Untersuchungen betreffen die Fichte (41 Fälle), gefolgt von der Waldkiefer (23), der Buche (17) und der Eiche (9). Schließlich ist anzumerken, dass veränderte Umweltbedingungen zumindest in einigen Regionen bereits zu veränderten Wachstumsmustern geführt haben (PRETZSCH 1985), die eine Kontrolle älterer Funktionen ratsam erscheinen lassen.

Ziel dieser Arbeit ist die Erstellung von Schätzfunktionen für verschiedene Fraktionen von Biomasse. Durch Multiplikation mit Nährstoffkonzentrationen können diese für die Schätzung der Nährstoffmengen in Baum und Bestand eingesetzt werden. Solche Schätzungen dienen zum einen einer verbesserten Zustandsbeschreibung von Bäumen und Waldbeständen. Zum anderen liefern sie wichtige Basisinformationen für die Beurteilung von Behandlungsalternativen in Rein- und Mischbeständen. Geplant ist der Einbau von Biomassenfunktionen und Nährstoff-Gehaltsangaben in Waldwachstumssimulatoren. Auf diese Weise können Analysen über die Konsequenzen verschiedener waldbaulicher Vorgehensweisen nicht nur mit Blick auf Naturalertrag und Wirtschaftserfolg, sondern auf die Nährstoffbilanzen untersucht werden. Von vorrangigem Interesse ist die Identifikation solcher Behandlungsvarianten, die auf ärmeren Standorten kritische Biomassen- und Nährstoffentzüge auslösen.

2 Bestandesbeschreibungen und Probebaumauswahl

Beide Untersuchungsbestände sind ertragskundliche Versuchsflächen der Abteilung Waldwachstum der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft, über die umfassende Informationen zur Bestandesbegründung und der bisherigen waldbaulichen Behandlung vorliegen. Die Bestände sind in jeweils 0,25 ha große Teilflächen, die sich in der Eingriffsstärke bei Durchforstungen unterscheiden, untergliedert und von einem Umfassungstreifen umgeben.

Bei dem Traubeneichen-Buchenbestand handelt es sich um ein 64 jähriges angehendes lockeres Traubeneichenbaumholz mit Buchenunterstand im Forstrevier Schwarzsohl des Forstamtes Hochspeyer. Der Bestand wurde durch Saat begründet und die Buche später unterbaut. Die herrschenden Eichen zeichnen sich durch hervorragende Schaftqualität, einen bereits starken BHD, hohes Kronenprozent und große Kronenschirmfläche (Z-Bäume $\varnothing 24 \text{ m}^2$) aus (für nähere Angaben siehe Tabelle 1). Die Buchen dienen allein der Schaftpflege. Der Eichenbestand wurde 1991 in das Versuchsprogramm aufgenommen und 1996 ($37,5 \text{ Vfm ha}^{-1}$) und 2001 ($87,8 \text{ Vfm ha}^{-1}$) durchforstet. Alle Angaben stammen aus der Versuchsparzelle (Auslesedurchforstung mit $120 \text{ Z-Bäumen ha}^{-1}$) für die auch die Stammfußkoordinaten erhoben wurden.

Bei dem Kiefern-Buchenbestand handelt es sich um ein 34 jähriges angehendes Kiefernbaumholz mit Buchenunterstand im Forstrevier Wolfsgrube des Forstamtes Elmstein. Der Bestand wurde mit einer sehr hohen Ausgangsstammzahl durch Pflanzung begründet, die Buche wurde später unterbaut (für nähere Angaben siehe Tabelle 2). Dieser Bestand wurde 1989 in das Versuchsprogramm aufgenommen und 1989 ($20,2 \text{ Vfm ha}^{-1}$) und 1999 ($61,4 \text{ Vfm ha}^{-1}$) durchforstet. Alle Angaben stammen aus der Versuchsparzelle ($188 \text{ Z-Bäume ha}^{-1}$) für die auch die Stammfußkoordinaten erhoben wurden.

Tabelle 1. Bestandeskennzahlen des Eichen-Buchen Mischbestandes.

Table 1. Stand characteristics of the oak stand with beech understorey.

Baumarten	Traubeneiche	Buche
Aufnahmejahr	2001	2001
Alter (Jahre)	64	35–40
Z-Baum-(Anzahl ha ⁻¹)	120	
Stammzahl ha ⁻¹	1016	1806
Grundfläche (m ² ha ⁻¹)	19,17	3,04
Vorrat (Vfm ha ⁻¹)	194,5	
dg (cm) Grundflächenmittelstamm	15,5	
hg (m) Grundflächenmittelstamm	18,8	
Grundflächenzuwachs* (m ² ha ⁻¹)	0,65	
Vorratzuwachs* (Vfm ha ⁻¹)	11,04	

* Mittelwert der Periode 1996 bis 2001

Tabelle 2. Bestandeskennzahlen des Kiefern-Buchen Mischbestandes.

Table 2. Stand characteristics of the pine stand with beech understorey.

Baumarten	Kiefer	Buche
Aufnahmejahr	2001	2001
Alter (Jahre)	36	25
Z-Baum-(Anzahl ha ⁻¹)	188	
Stammzahl ha ⁻¹	1704	1984
Grundfläche (m ² ha ⁻¹)	37,6	3,09
Vorrat (Vfm ha ⁻¹)	267,18	
dg (cm) Grundflächenmittelstamm	16,8	
hg (m) Grundflächenmittelstamm	15,4	
Grundflächenzuwachs* (m ² ha ⁻¹)	1,81	
Vorratzuwachs* (Vfm ha ⁻¹)	17,81	

* Mittelwert der Periode 1996 bis 2001

Die Standorte wurden so ausgewählt, dass sie hinsichtlich ihrer Bestockungs- und Standortverhältnisse mit vielen Beständen im Pfälzerwald vergleichbar sind. Die Untersuchungsbestände liegen im Inneren Pfälzerwald auf Hauptbuntsandstein der Rehbergschichten. Es hat sich jeweils eine Braunerde mäßiger Nährstoffversorgung entwickelt, die Humusform wurde für den Traubeneichenbestand als feinhumusarmer Moder und für den Kiefernbestand als feinhumusarmer Rohhumus beschrieben. Der Traubeneichenbestand liegt 390 m über NN in einem Mittelhang mit NNO Exposition und der Kiefernbestand liegt 435 m über NN ebenfalls in einem Mittelhang mit Exposition nach Süden. Der Jahresniederschlag beträgt etwa 750 mm, wovon etwa 53% in der Vegetationsperiode fällt. Die mittlere Jahrestemperatur liegt bei 8 °C und die Temperatur in der Vegetationszeit bei 14,5 °C (alle Klimadaten wurden von einer nahe gelegenen Messstation aufgezeichnet).

In jedem Bestand wurde die Versuchsparzelle (0,25 ha) mit den stärksten Bestandesmitgliedern ausgewählt und der BHD aller Bäume gemessen. Mit dieser Vollkluppung wurde eine Durchmesserverteilung für die Parzelle aufgestellt. Die Probestämme (Hauptbestand 15 Bäume, Unterstand 10 Bäume) wurden dann im Umfangsstreifen der Versuchsanlage so ausgesucht, das sie sich gleichmäßig über die gesamte BHD-Spanne verteilten (Tabelle 3).

Tabelle 3. Stammdurchmesser in 1.3 m (BHD), Kronenansatzhöhe und Baumhöhe der Probeebäume.

Table 3. Diameter at 1.3 m (BHD), crown base height, and tree height of all sample trees.

Baum-Nr	Eiche			Kiefer			Buche (Eichenbestand)			Buche (Kiefernbestand)		
	BHD (cm)	Kronenansatz (m)	Baumhöhe (m)	BHD (cm)	Kronenansatz (m)	Baumhöhe (m)	BHD (cm)	Kronenansatz (m)	Baumhöhe (m)	BHD (cm)	Kronenansatz (m)	Baumhöhe (m)
1	12,9	10,8	16,6	9,9	8,2	12,8	13,4	3,6	18,6	11,0	2,3	13,6
2	9,8	8,0	11,0	23,9	9,9	16,4	12,5	4,8	17,7	8,4	1,4	11,8
3	19,2	10,9	23,3	29,1	10,7	19,3	6,5	5,3	10,5	5,3	1,3	6,7
4	20,7	14,2	24,0	18,0	11,1	15,1	14,6	5,1	19,5	8,0	2,3	12,9
5	16,7	15,9	22,8	25,9	8,7	14,5	5,2	3,2	5,4	4,1	1,8	8,8
6	14,7	12,2	22,0	25,0	10,3	15,8	9,3	7,1	13,8	6,8	2,0	11,7
7	27,9	14,1	24,5	19,8	10,8	17,3	6,0	2,6	9,8	10,3	3,1	14,1
8	31,5	12,5	23,1	13,3	9,8	15,6	15,8	6,6	18,1	9,4	2,2	14,4
9	28,9	7,9	20,3	15,8	11,0	15,2	11,2	5,2	14,6	10,0	2,3	11,3
10	12,0	11,5	15,4	30,3	10,5	17,3	6,8	3,5	9,0	12,3	2,9	14,2
11	25,2	16,8	24,1	28,0	11,3	18,2						
12	23,3	15,4	21,3	21,8	10,6	15,7						
13	30,0	14,5	22,3	14,0	11,6	14,9						
14	33,0	13,7	24,0	11,8	7,4	11,9						
15	30,5	10,4	23,8	27,1	9,1	15,8						

3 Methodik

3.1 Aufnahmen am liegenden Stamm

An den gefällten Probeebäumen wurde die Hauptachse vom Stammfuß bis zur Baumspitze festgelegt. Diese Hauptachse unterteilt sich in den Stamm und Krone, wobei die Krone am ersten grünen Ast beginnt. Alle von der Hauptachse abzweigenden Achsen (außer Klebäste) wurden als Primäräste definiert. Das Derbholz des Stammes und entlang der Kronenhauptachse wurde sektionsweise (Sektionslänge 2 m) vermessen. Das Wipfelstück, oberhalb der Derbholzgrenze (7 cm m.R.) wird dem Kompartiment Äste zugeschlagen. An jeder Sektionsmitte, am Kronansatz und der Kronenderbholzgrenze wurde ein Schnitt geführt und die Rindenstärke (mm) sowie der Kernholzdurchmesser (mm) gemessen. Zusätzlich wurden die gleichen Messungen an folgenden Stellen durchgeführt, an denen Stammscheiben zur weiteren Analyse entnommen wurden: 1 m über dem Stammfuß, Stammmitte, 1 m unterhalb des Kronenansatzes, 1 m oberhalb des Kronenansatzes, Kronenmitte, 1 m unterhalb der Derbholzgrenze.

Von jedem Primärast wurden die Astansatzhöhe, der Astansatzdurchmesser, die Rindenstärke und der Kerndurchmesser gemessen. Um das gesamte Derbholz volumetrisch erfassen zu können, wurde jeder Ast der an seiner Ansatzstelle einen Durchmesser über 7 cm aufwies, in variable Sektionen ohne wesentliche Krümmung eingeteilt und analog der Kronenhauptachse bis zur Derbholzgrenze vermessen.

Als Stichprobenäste wurde jeder dritte Primärast (gezählt ab dem zweiten Ast von unten) ausgewählt. Diese Probeäste wurden unterhalb der Derbholzgrenze nochmals in eine Zweig und Astfraktion unterteilt. Die Schnittstelle zwischen den Fraktionen liegt zwischen den belaubten „Blattwolken“ und den nicht belaubten Bereichen. Bei der Kiefer war die Grenze gut erkennbar, bei den Laubbäumen wurden dazu die Knospen zur Hilfe genommen. Nachdem die Frischgewichtsbestimmung erfolgt war, wurden Proben aus den beiden Fraktionen für die Gewichtsbestimmung gewonnen, um die Nährstoffverteilung der Fraktionen repräsentativ widerzuspiegeln. Alle Proben wurden im Wald frisch gewogen.

3.2 Laboranalysen

Zur Bestimmung der Rindendichte wurde von den Derbholzscheiben, die zur Analyse ausgewählt worden waren, im Labor Rindenproben entnommen und die Rindenstärke sowie die entrindete Oberfläche gemessen. Rindenproben wie auch alle Holzproben wurden bei 60 °C im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und anschließend gewogen. Aus den entrindeten Holzscheiben wurden dann in Nord-Süd und in Ost-West-Richtung Riegel ausgeschnitten. Bei Eiche und Kiefer wurden diese Riegel in Splint- und Kernholz getrennt. Alle Splint- bzw. Kernholzteile des Stammes bzw. der Krone wurden zusammengefasst und für die chemische Analyse getrocknet.

Um die Trockenbiomasse der volumetrisch vermessenen Baumteile bestimmen zu können, wird die Raumdichte in den unterschiedlichen Baumteilen jedes Baumes benötigt. Die Raumdichte wurde daher nach Kern und Splintholz getrennt an zwei Analysescheiben des Schaftbereiches (1 m über dem Stammfuß und 1 m unterhalb des Kronenansatzes) und zwei Scheiben des Kronenbereiches (1 m oberhalb des Kronenansatzes und 1 m unterhalb der Derbholzgrenze) nach folgender Formel ermittelt (siehe Tabelle 4 und 5):

$$\delta = \frac{M}{V} \quad (1)$$

(δ = Raumdichte, M = Trockenmasse (atro), V = Frischvolumen)

Die Raumdichtemessungen erfolgten in Zusammenarbeit mit der Alberts-Ludwigs-Universität Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft.

Tabelle 4. An den gefällten Eichen ermittelte Raumdichten (g cm^{-3}). (Jeder Wert ist aus 1–3 Einzelmessungen gemittelt).

Table 4. Wood density ($\text{g dry weight per cm}^{-3}$ fresh volume) of the harvested oaks. Each value is derived from 1 to 3 single measurements.

Baum-Nr.	Stamm		Krone	
	Kern	Splint	Kern	Splint
1	0,623	0,540	0,590	0,510
2*	0,590	0,520	0,000	0,000
3	0,614	0,571	0,613	0,636
4	0,682	0,642	0,691	0,683
5	0,706	0,655	0,655	0,639
6	0,617	0,612	0,584	0,585
7	0,639	0,651	0,616	0,629
8	0,640	0,633	0,620	0,633
9	0,638	0,644	0,619	0,638
10	0,617	0,546	0,630	0,528
11	0,630	0,659	0,616	0,635
12	0,695	0,636	0,696	0,656
13	0,660	0,641	0,659	0,665
14	0,611	0,576	0,626	0,602
15	0,632	0,611	0,629	0,645

* Krone ohne Derbholz

3.3 Berechnungen

Zunächst wurde mit Hilfe aller gemessenen Stammdurchmesser der Derbholzinhalt des Baumes mit Rinde V_{mr} (cm^3) ermittelt. Dafür wurden die jeweils oberen und unteren Stammradien (r_o und r_u in cm) jedes Teilstückes sowie der Abstand zwischen beiden (b in cm) in die Kegelstumpf-Gleichung (2) eingesetzt und alle Teilstücke (bis $r_o = 7$ cm) addiert.

Tabelle 5. Rechnerisch ermittelte Raumdichte der Derbhohlrinde (g cm⁻³).

Table 5. Calculated bark density (g dry weight per cm⁻³ fresh volume) of coarse woody fractions.

Baum-Nr.	Eiche	Kiefer
1	0,450	0,512
2	0,423	0,639
3	0,537	0,523
4	0,545	0,276
5	0,628	0,496
6	0,532	0,435
7	0,458	0,382
8	0,512	0,518
9	0,497	0,626
10	0,538	0,360
11	0,575	0,579
12	0,576	0,345
13	0,469	0,374
14	0,440	0,656
15	0,417	0,557
Mittelwert	0,507	0,500
Standard-Abweichung	0,094	0,201
Standard-Fehler	0,185	0,403

$$V_{mr} = (ru^2 + ru \cdot ro + ro^2) \cdot b \cdot \frac{\pi}{3} \tag{2}$$

Da die Rindenstärke *rr* sowie der Radius eines eventuell ausgeprägten Kerns *rku* und *rko* für jedes Teilstück bekannt sind, wird der Volumeninhalt ohne Rinde (*V_{or}*) auf die gleiche Art berechnet indem *ru* und *ro* um *rr* reduziert, beziehungsweise durch *rku* und *rko* ersetzt werden. Die Derbholzvolumen werden für Stamm und Primäräste getrennt ausgewiesen.

Die Derbholz-Trockenbiomasse ohne Rinde für jedes Teilstück wird entsprechend der Raumdichte des Kern- und Splintholzes aus dem Volumen von Kern (*V_k*) und Splint (*V_s*) ermittelt. Dabei werden im Fall von Buche und Eiche alle Proben im Stamm-, bzw. Kronenbereich und dort jeweils getrennt nach Kern (*δ_k*) und Splint (*δ_s*) für jeden Baum separat gemittelt. Im Falle des Stammholzes bei der Kiefer wird die Holzdicke im Kern und Splint mit der Entnahmehöhen-abhängigen Funktion in Abbildung 1 für jedes Teilstück berechnet. Die Rindenbiomasse des Derbholzes wird ebenfalls aus Volumen und Dichte abgeschätzt. Dabei wird die Rindendichte (*δ_r*) einer Probe zuvor aus der entrindeten Fläche, der Rindenstärke und dem gemessenen Trockengewicht berechnet. Damit ergibt sich die Derbholzbiomasse mit Rinde aus der Summe der Einzelteile Kern-, Splint- und Rindenbiomasse nach folgender Gleichung:

$$DH_{mr} = V_k \cdot \delta_k + V_s \cdot \delta_s + (V_{mr} - V_{or}) \cdot \delta_r \tag{3}$$

Bei der Buche streuten die Messungen für die Rindendichte stark und ergaben häufig unrealistisch hohe Werte, die vermutlich durch Rindenquetschungen bei der Messung zurückzuführen sind. In Ermangelung geeigneter Literaturwerte, wurde daher ersatzweise der Mittelwert aller bei der Buche gemessenen Holz-Raumdichten (584 kg m⁻³) verwendet.

Zur Bestimmung der holzigen Nicht-Derbholzbiomassen wird zunächst eine Beziehung zwischen Biomasse und Querschnittsfläche des Primärastes am Astansatz separat für jeden Baum bestimmt. Dazu werden lineare Regressionsfunktionen (ordinary least square)

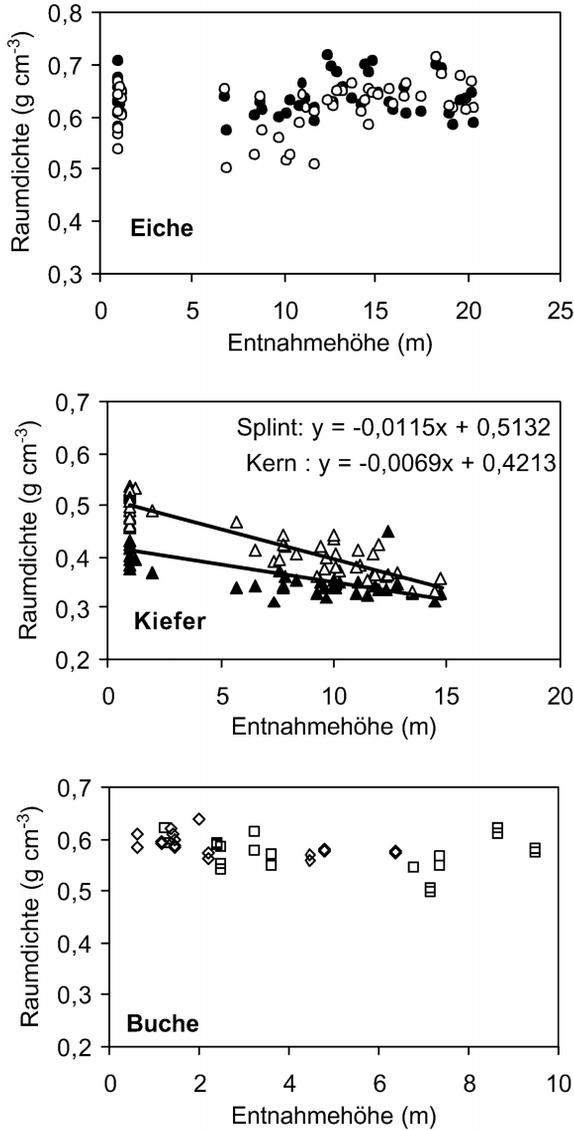


Abb. 1. Raumdichte des Holzes von Kern-(gefüllte Symbole) und Splintholz (leere Symbole) für Eiche (Kreise), Kiefer (Dreiecke) und Buche (Quadrate für den Eichenbestand und Rauten für den Kiefernbestand) in Abhängigkeit von der Entnahmehöhe.

Fig. 1. Wood density (dry weight to fresh volume) of heartwood (filled symbols) and sapwood (open symbols) for oak (points), pine (triangles), and beech (squares for the oak stand and diamonds for the pine stand) in relation to sampling height.

erstellt, die durch den Nullpunkt gezwungen wurden. Für Fälle, in denen sich negative Steigungen oder Bestimmtheitsmaße ergeben (eine Kiefer, drei Buchen) wurde die Steigung verwendet, die sich bei Zusammenfassung aller Bäume einer Baumart ergibt. Mit den so gefundenen Beziehungen wird die Nicht-Derbholtzbiomasse jedes Primärastes auf

der Basis seiner Querschnittsfläche am Astansatz berechnet. Aufsummiert ergibt sich die entsprechende Masse pro Baum.

Mit den so gefundenen Einzelbaumwerten werden Funktionen erstellt, die die Biomasse der einzelnen Kompartimente in Abhängigkeit zum BHD beschreiben. Um sicherzustellen, dass die Summe der einzelnen Biomassekompartimente für einen bestimmten BHD der berechneten Gesamtbiomasse entspricht, wird bei der Skalierung auf die Bestandesebene nur die Funktion verwendet, die die Gesamtbiomasse (*BM*) beschreibt (Gleichung 4a, baumartspezifische Parameter in Abbildung 2). Derbholz- und Rindenanteile werden dann als Teil von *BM* beschrieben (Gleichung 4b und 4c, Parameter in den Abbildungen 3 und 4). Bei der Derbholzfraktion wird Parameter *b2* so bestimmt, dass die

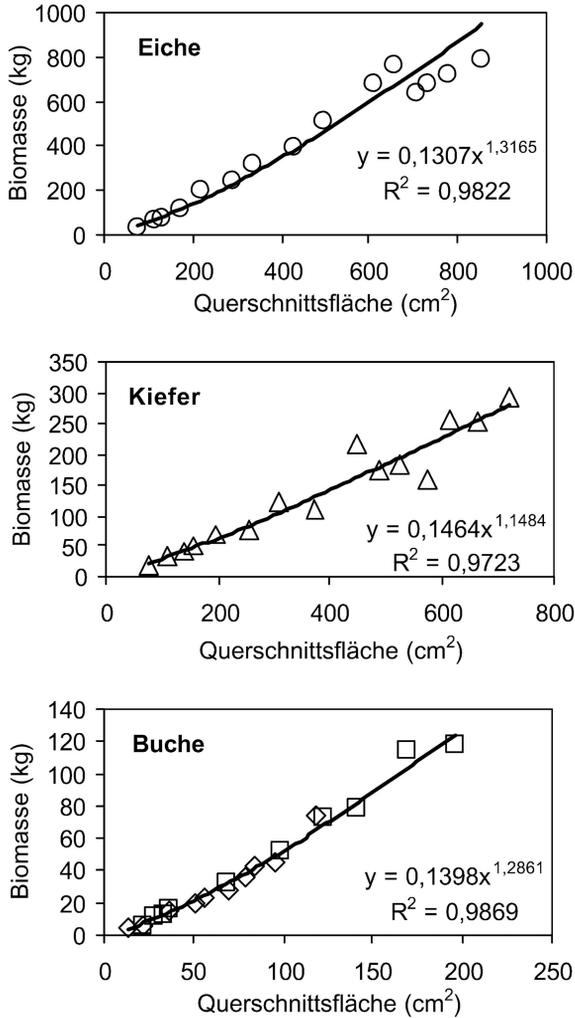


Abb. 2. Oberirdische holzige (Trocken)biomasse für Eiche, Kiefer und Buche in Abhängigkeit von der Stammquerschnittsfläche in 1,3m Höhe (gleiche Symbole wie in Abbildung 1).

Fig. 2. Total aboveground dry weight in relation to basal area at 1.3 m height for oak, pine, and beech (same symbols as in Fig. 1).

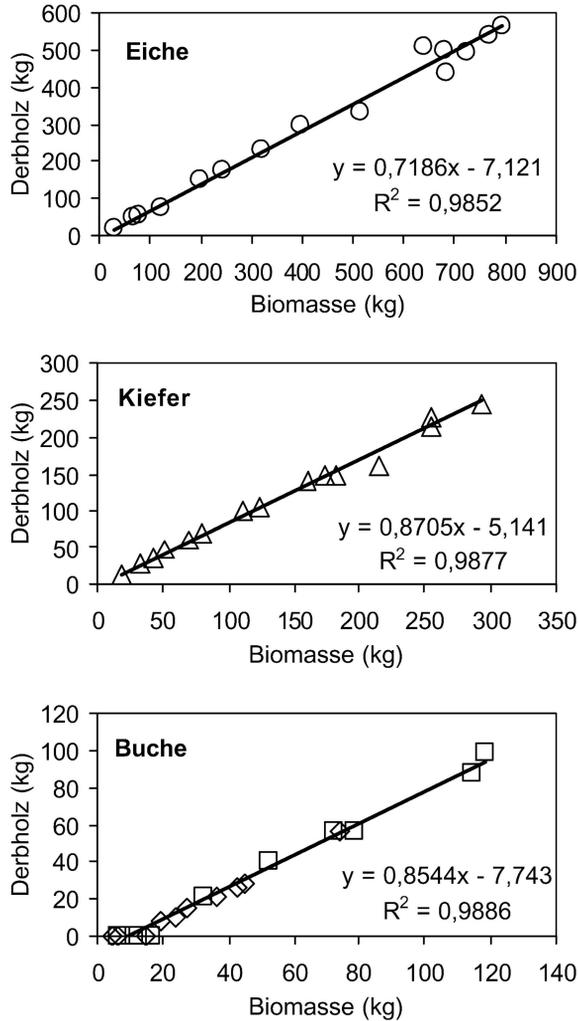


Abb. 3. Derbholzbiomasse mit Rinde für Eiche, Kiefer und Buche in Abhängigkeit von der gesamten oberirdischen holzigen Biomasse (gleiche Symbole wie in Abbildung 1).

Fig. 3. Dry weight of the coarse woody fraction with bark in relation to total dry weight for oak, pine, and beech (same symbols as in Fig. 1).

Ausgleichsgrade die Ordinate an der Stelle schneidet, an der laut Gleichung 4a die Derbholzbiomasse beginnt (eingesetzt wurde BHD 5.7 cm, da dies unter der Annahme von 1cm Dickenabnahme pro Meter einem Durchmesser von 7 cm am Stammfuß entspricht). Mit Hilfe dieser Gleichungen und den Probeflächenaufnahmen aus den Beständen wurde anschließend die Bestandesbiomasse hochgerechnet.

$$BM = a1 \cdot \left(BHD^2 \cdot \frac{\pi}{4} \right)^{b1} \quad (4a)$$

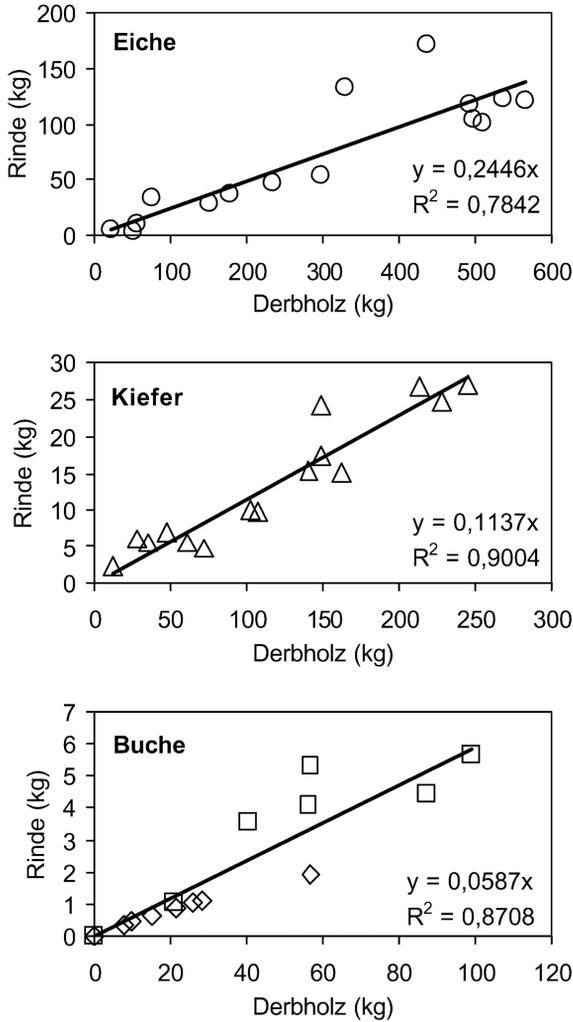


Abb. 4. Rindenbiomasse des Derbholzes für Eiche, Kiefer und Buche in Abhängigkeit von der Derbholzbiomasse mit Rinde (gleiche Symbole wie in Abbildung 1).

Fig. 4. Dry weight of the bark in relation to the dry weight of the coarse woody fraction with bark for oak, pine, and beech (same symbols as in Fig. 1).

$$DHmr = a_2 \cdot BM + b_2 \quad (4b)$$

$$DHr = a_3 \cdot DHmr \quad (4c)$$

$$DHor = DHmr - DHr \quad (4d)$$

$$NDH = BM - DHmr \quad (4e)$$

(*BM* = Gesamtbiomasse, *BHD* = Stammdurchmesser in 1,3 m Höhe, *DHmr* = Derbholz mit Rinde, *DHr* = Rindenbiomasse am Derbholz, *DHor* = Derbholz ohne Rinde, *NDH* = Biomasse des Nicht-Derbholzes)

4 Ergebnisse und Diskussion

Mit Bestimmtheitsmaßen zwischen 0,97 und 0,99 ergeben sich für alle drei Baumarten sehr enge Beziehungen zwischen oberirdischer holziger Gesamtbiomasse und Stammquerschnittsfläche in Brusthöhe (Abbildung 2). Bei der Buche zeigt sich darüber hinaus kein Unterschied zwischen den beiden untersuchten Beständen, so dass von einem ähnlichen Wachstum im Unterstand, unabhängig von der Hauptbaumart ausgegangen werden kann. Beim Vergleich der Standardfehler der ermittelten Funktionen für die Gesamtbiomassen (70,7/22,6/4,3 für Eiche, Kiefer und Buche) mit den mittleren Abweichungen zwischen den in Abbildung 5 gezeigten Funktionen (56,6/26,8/2,9) zeigt sich außerdem, dass die

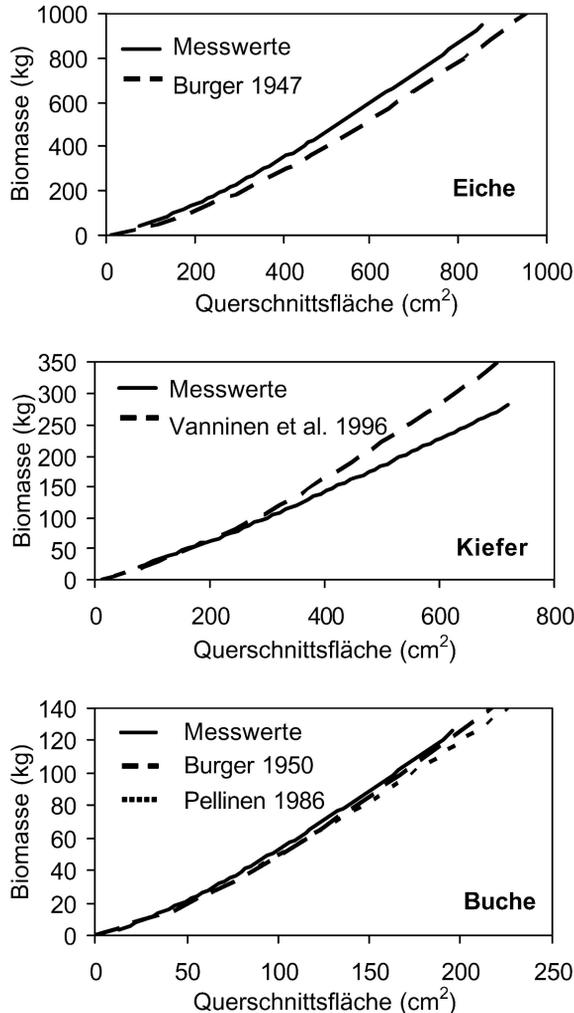


Abb. 5. Relation zwischen oberirdischer holziger Biomasse und Stammquerschnittsfläche in 1,3 m Höhe für Eiche, Kiefer und Buche aus Abbildung 2 (durchgezogene Linien) im Vergleich zu Funktionen, die auf der Basis von veröffentlichten Trockenbiomassedaten erstellt wurden.

Fig. 5. Relation between aboveground woody biomass and basal area measured at 1.3 m height for oak, pine, and beech (regression lines from Fig. 2) in comparison with published relations.

gefundenen Beziehungen zumindest für Eiche und Buche gegenüber den ausgewählten Literaturergebnissen nicht wesentlich unterschiedlich sind. Dies ist zu betonen, weil es sich bei den Vergleichsdaten um Untersuchungen aus der Schweiz (BURGER 1947 und 1950) beziehungsweise um eine Studie auf kalkhaltigem Boden (PELLINEN 1986) handelt. Bei der Kiefer scheint sich dagegen eine Abweichung gegenüber dem Vergleichsdatensatz aus Finnland in Richtung niedrigerer Biomassen abzuzeichnen. Insgesamt ist bei den Vergleichen zu berücksichtigen, dass die Abweichungen mit den Durchmesser steigen, weshalb Vorsicht bei der Anwendung der Funktionen geboten ist, wenn sie für größere Bäume benutzt werden sollen als die, die Grundlage dieser Untersuchung sind.

Interessant ist, dass der Zusammenhang zwischen Derbholz- und Gesamtbiomasse für alle Baumarten linear und mit ebenfalls hohen Bestimmtheitsmaßen (r^2 zwischen 0,98 und 0,99) ausgeglichen werden konnte (Abbildung 3). Die Größe des Anteils der Derbholzbiomasse ist dabei bei der Eiche am kleinsten, was auf einen höheren Verzweigungsgrad und ein längeres Überleben kleinerer Astteile in der Krone hindeutet. Auch hier sind keine Unterschiede zwischen den Buchen aus den beiden Beständen zu erkennen, weshalb eine gemeinsame Ausgleichsgrade gerechtfertigt erscheint.

Auch die prozentualen Anteile der Rindenbiomasse an der Derbholzbiomasse bleiben über den Untersuchungsbereich hinweg bei allen Baumarten konstant (Abbildung 4). Die Bestimmtheitsmaße liegen zwar nur noch bei 0,78 (Eiche), 0,90 (Kiefer) und 0,87 (Buche), was sich aber im Wesentlichen auf die Unsicherheiten bei der Ermittlung von Rindenstärke und -dichte zurückführen lässt. Dies steht im Einklang mit der Beobachtung, dass die Rindenanteile am Derbholz von ca. 6% (Buche) über 11% (Kiefer) bis hin zu 24% (Eiche) steigen. Die Rindenanteile liegen damit im Vergleich zu anderen Untersuchungen (BURGER 1947, BURGER 1950, VANNINEN et al. 1996) relativ hoch, was zum Teil darauf zurückzuführen ist, dass sie nur das Verhältnis zwischen Derbholzrinde zu Derbholz und nicht die Relation zwischen Gesamtrinde und holziger Gesamtbiomasse widerspiegeln.

Zudem gibt es einzelne Ausreißerwerte nach oben, insbesondere bei Eiche und Buche, die den Geradenverlauf beeinträchtigen. Ein mit steigender Baumdimension abnehmender Rindenanteil, wie er eigentlich zu erwarten wäre (BURGER 1947) lässt sich aus den Daten nicht erkennen, was vielleicht auf fehlende Werte in stärkeren Durchmesserklassen zurückzuführen ist. Die auf der Basis der vorgestellten Funktionen ermittelten Bestandesbiomassen zeigen, dass das Derbholz ohne Rinde etwa 51%, die Derbholzrinde 17% und das Nichtderbholz 32% der gesamten oberirdischen Holzbiomasse bei der Eiche ausmacht (Tabelle 6). Die Kiefer weist dagegen einen deutlich höheren Derbholzanteil auf (68%, 12% und 20%) wohingegen sich für die Buche in beiden Beständen nur geringe Derbholzprozentage ergeben (im Mittel 29%, 2% und 69%).

Tabelle 6. Bestandesbiomassen in $t\ ha^{-1}$ für die untersuchten Bestände (BM = holzige oberirdische Gesamtbiomasse, DHor = Derbholzbiomasse ohne Rinde, DHr = Rindenbiomasse des Derbholzes, NDH = Nicht-Derbholzbiomasse einschließlich Rinde).

Table 6. Stand biomass in $t\ ha^{-1}$ for both investigated stands (BM = total aboveground woody biomass, DHor = coarse woody biomass without bark, DHr = bark biomass of the coarse woody fraction, NDH = biomass of the residual woody compartments).

		BM	DHor	DHr	NDH
Bestand 1	Eiche	161,33	82,91	26,85	51,58
	Buche	11,52	3,62	0,23	7,67
Bestand 2	Kiefer	125,38	85,52	14,69	25,17
	Buche	11,37	3,08	0,19	8,09

Die Funktionen sollten nicht über den Durchmesserbereich, der zur Parameterisierung herangezogen worden ist, hinaus verwendet werden. Dies wird auch bei dem Vergleich mit den aus der Literatur abgeleiteten Funktionen deutlich, bei denen zumindest im Fall der Kiefer die Funktionen mit zunehmendem Durchmesser stärker voneinander abweichen. Besondere Unsicherheiten bei der Übertragbarkeit auf andere Bestände liegen bei der Verwendung der „richtigen“ Raumdichte für das Holz eines Baumes. Während die Höhe über dem Boden eine für die Kiefer verwendbare unabhängige Größe zur Beschreibung der Raumdichteentwicklung zu sein scheint, konnte eine solche Beziehung für Eiche und Buche nicht gefunden werden. Eine mögliche Größe, die die mittlere Holzdichte dieser Baumarten beschreiben könnte, könnte zum Beispiel der Lichtgenuss oder die Konkurrenzstellung des Einzelbaumes sein, worauf Vergleiche mit hier nicht gezeigten Daten hindeuten.

5 Ausblick

Um den Geltungsbereich der Untersuchungen zu vergrößern, wurden im Winter 2002 / 2003 im Rahmen des FAWF-Projektes ein 198 jähriger Traubeneichenbestand mit Buchenunterstand und ein 128 jähriger Kiefernbestand mit Buchenunterstand nach dem selben Verfahren beprobt. Die Funktionen des erweiterten Datensatzes sollen in Verbindung mit einem Waldwachstumsmodell, das Baumdurchmesser, -höhe und -anzahl unter Berücksichtigung von Durchforstungseingriffen dynamisch fortschreibt, zur Beschreibung der Entwicklung von holziger Biomasse in Rein- und Mischbeständen dienen. Damit ist es möglich die Kohlenstoff- und Nährstoffmengen in stehendem Bestand und den Nährstoffentzug bei Entnahme des ganzen Holzes oder des Derbholzes mit und ohne Rinde zu bestimmen, wenn die Elementgehalte der betreffenden Kompartimente bekannt sind.

Die Biomassen-, Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte in Beständen liefern eine wichtige Informationsgrundlage für die Zustandsbeschreibung von Waldökosystemen. Beispielsweise ebnet die Berechnung der Kohlenstoffgehalte den Weg zu einer quantitativen Analyse des Waldes als Kohlenstoffspeicher, als Quelle oder Senke, je nach Bestandesentwicklungsphase, Bestandesbehandlung, Baumart, Standort, Struktur. Die Implementierung entsprechender Schätzfunktionen in Wachstumsmodellen (vgl. u. a. PRETZSCH 2001) bietet die Möglichkeit, Szenariorechnungen durchzuführen, mit denen z. B. kritische Entnahmemengen identifiziert werden können.

6 Literatur

- BURGER, H., 1947. Holz, Blattmenge und Zuwachs – Die Eiche. In: H. Burger (Editor), Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das Forstliche Versuchswesen. Kommissionsverlag von Beer & CIE, Zürich, pp. 211–279.
- BURGER, H., 1950. Holz, Blattmenge und Zuwachs – Die Buche. In: H. Burger (Editor), Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das Forstliche Versuchswesen. Kommissionsverlag von Beer & CIE, Zürich, pp. 419–468.
- BURGER, H., 1953. Holz, Blattmenge und Zuwachs – Fichten im gleichalterigen Hochwald. In: H. Burger (Editor), Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das Forstliche Versuchswesen. Kommissionsverlag von Beer & CIE, Zürich, pp. 38–130.
- CERNY, M., 1990. Biomass of *Picea abies* (L.) Karst. in Midwestern Bohemia. Scand. J. For. Res. 5: 83–95.
- DROSTE, B. von zu HÜLSHOFF, 1969: Struktur und Biomasse eines Fichtenbestandes auf Grund einer Dimensionsanalyse an oberirdischen Baumorganen, Diss. Univ. München, 209 S.
- FINER, L., 1989. Biomass and nutrient cycle in fertilized and unfertilized pine, mixed birch and spruce stands on a drained mire. Acta Forestalia Fennica 208: 6–54.
- JACOBSEN, C., RADEMACHER, P., MEESENBURG, H., MEIWES, K.J., 2002. Gehalte chemischer Elemente in Baumkompartimenten. Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt, Göttingen. 80p.
- JOHANSSON, T., 2000. Biomass Production of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) Grown on Abandoned Farmland. Silva Fennica 33(4): 261–280.

- McPHE, 2000. General declarations and resolutions adopted at the Ministerial Conferences on the protection of forests in Europe. Strasbourg 1990-Helsinki 1993-Lisbon 1998. Ministerial Conference on the protection of forests in Europe. Liaison Unit Vienna, 88.
- MONSERUD, R.A., ONUCHIN, A.A., TCHEBAKOVA, N.M., 1996. Needle, crown, stem, and root phytomass of *Pinus sylvestris* stands in Russia. *Forest Ecology and Management* 82: 59–67.
- MUND, M., KUMMETZ, E., HEIN, M., BAUER, G.A., SCHULZE, E.-D., 2002. Growth and carbon stocks of a spruce forest chronosequence in central Europe. *Forest Ecology and Management* 171:275–296.
- PELLINEN, P., 1986. Biomasseuntersuchungen im Kalkbuchenwald. Dissertation Thesis, Georg-August-Universität, Göttingen, 145 pp.
- PRETZSCH, H., 1985: Wachstumsmerkmale süddeutscher Kiefernbestände in den letzten 25 Jahren, Forstl. Forschungsberichte München, Nr. 65, 183 S.
- PRETZSCH, H., 2001: Modellierung des Waldwachstums, Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin, Wien, 341 S.
- PRETZSCH, H., 2003: Strategische Planung der Nachhaltigkeit auf Forstbetriebsebene. Beitrag der Waldwachstumforschung. *Forstw. Cbl.*, 122. Jg., H. 4, 233–250.
- VANDE WALLE, I., MUSSCHE, S., SAMSON, R., LUST, N., LEMEUR, R., 2001. The above- and belowground carbon pools of two mixed deciduous forest stands located in East-Flanders (Belgium). *Annals of Forest Science* 58: 507–517.
- VANNINEN, P., YLITALO, H., SIEVÄNEN, R., MÄKELÄ, A., 1996. Effects of age and site quality on the distribution of biomass in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Trees* 10: 231–238.

Anschrift der Verfasser: R. GROTE, Institut für Umweltforschung (IMK-IFU) des Forschungszentrums Karlsruhe, Kreuzackbahnstraße 19, D-82467 Garmisch-Partenkirchen; J. SCHUCK und J. BLOCK, Struktur- und Genehmigungsdirektion Süd, Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, Hauptstrasse 16, D-67705 Trippstadt; H. PRETZSCH, Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, TU-München, Am Hochanger 13, D-85354 Freising.