

# RBS, ein mehrstufiges Inventurverfahren zur Schätzung von Baummerkmalen

## I. Schätzung von Nadel- und Asttrockenmassen bei 66-jährigen Douglasien

Aus dem Institut für Forstliche Biometrie und Informatik der Universität Göttingen

(Mit 1 Abbildung und 1 Tabelle)

Von D. GAFFREY und J. SABOROWSKI

(Angenommen Januar 1999)

### SCHLAGWÖRTER – KEY WORDS

*Nadelmasseschätzung; Astmasseschätzung RBS; Douglasie.*

*Needle mass estimation; branch mass estimation randomized branch sampling; Douglas-fir.*

### 1. EINLEITUNG

Eine zuverlässige Biomassenschätzung für Bäume oder ganze Ökosysteme (z.B. Göttinger Kalkbuchenwald: PELLINEN, 1986) setzt voraus, dass die Biomassen der einzelnen, unterschiedlich funktionellen Baumkompartimente hinreichend genau erfasst werden bzw. erfassbar sind. Was konkret unter „zuverlässig“ oder „hinreichend genau“ zu verstehen ist, hängt von den individuellen Genauigkeitsvorgaben ab und sei deshalb hier von nachrangigem Interesse. Grundlegend ist vielmehr, dass ein Verfahren zur Schätzung von Biomassen angewandt wird, das sowohl biasfrei ist als auch Angaben über die Varianz der Schätzgrößen erlaubt.

In Hinblick auf physiologische aber auch ertragskundliche Fragestellungen kommt der Schätzung der Nadel- bzw. Blattrockenmasse eine besondere Bedeutung zu. Ihre vollständige Erfassung erfolgt wegen des großen Arbeitsaufwandes i. d. R. nur bei jungen bzw. kleinen Pflanzen (z.B. GRIER und WARING, 1974) und nur selten auch bei großen Bäumen (z.B. 63-jährige Fichten: HESSE, 1990). Aus diesem Grunde wurden zahlreiche Stichprobenverfahren zur Biomassenschätzung entwickelt (s. CATCHPOLE und WHEELER, 1992). Vielen Verfahren ist es aber eigen, dass die Schätzwerte mit einem Bias unbekannter Größe behaftet sind und zudem eine Varianzangabe nicht möglich ist. Das RBS-Verfahren (randomized branch sampling) weist diese Nachteile nicht auf (GREGOIRE et al., 1995).

In dieser Arbeit wird deshalb, neben einer Beschreibung häufig angewandter, „konventioneller“ Schätzverfahren, das RBS methodisch vorgestellt und seine Praktikabilität bei der Schätzung von Nadel- und Asttrockenmassen von (mittel)starkem Nadelholz bewertet.

### 2. MATERIAL

Gegenstand der Untersuchungen sind 4 Bäume aus einem 66-jährigen Douglasienreinbestand in den südlichen Niederlanden bei Esbeek, der im Alter von 19 Jahren als forstliche Versuchsfläche (Kennung ES26) angelegt wurde. (Sie untersteht heute der Sektion Waldbau der Landwirtschaftsuniversität Wageningen.) Dieser Bestand ist von besonderem Interesse, da bereits zu Beginn der Beobachtungen die Koordinaten der Fußpunkte sämtlicher Bäume eingemessen wurden (wie auch bei vielen anderen niederländischen Versuchsflächen). Somit kann die Veränderung der individuellen räumlichen Konkurrenzsituation für eine sehr lange Periode quantifiziert werden (GAFFREY, 1997), was sich in der Wachstumsentwicklung der Baumschäfte wie auch in ihren aktuellen Nadelmasseverteilungen widerspiegeln sollte.

Das Alter der Bäume, 66 Jahre (lt. Dokumentation 64 Jahre) im Winter 1997/1998, wurde anhand von Stammanalysen ermittelt: 13 Stämme wurden bereits für Wachstumsstudien (GAFFREY, 1996) im März 1994 gefällt, 5 weitere, darunter diejenigen 4, für die die Ast-

und Nadelmassen bestimmt wurden, im Dezember 1997. Die Bäume wurden so ausgewählt, dass einerseits eine (große) Differenzierung in der Nadelmasse gegeben sein sollte, andererseits sollten die Stämme frei von (jüngeren wie älteren) Kronenbrüchen sein. Letzteres fand sich nur bei sehr wenigen Bäumen, da für die Douglasie in Regionen mit sehr starken Winden typisch ist, Spitzenbrüche zu erleiden (GÖHRE, 1958). Unter diesen Randbedingungen wurden für die Nadel-, Ast- und Stammanalysen die Bäume Nr. 104, 106, 181 und 231 entnommen.

### 3. METHODEN ZUR SCHÄTZUNG DER NADEL-/BLATTTROCKENMASSE

#### 3.1. Ratio-Schätzer

Zur Schätzung der Nadel-/Blatttrockenmasse eines individuellen Baumes werden sehr häufig Ratio-Schätzer ermittelt und angewandt. Hierzu wird zunächst vor Ort, nach Fällung des Baumes, das Frischgewicht von i. d. R. allen Grünästen bestimmt. Von diesen Ästen werden Stichproben gezogen und ihre Frisch- und Trockenmassen, letztere getrennt nach Astholz und Nadeln, gewogen. Die Gesamtnadel-trockenmasse erhält man, wenn die Gesamtfrischmasse (Astholz und Nadeln) mit dem Verhältnis Proben-Trockenmasse zu Proben-Frischmasse und dem Verhältnis Proben-Nadel-trockenmasse zu Proben-Trockenmasse multipliziert.

Um die vertikale Differenzierung der Nadelmasse zu erfassen, wird die Krone in Straten meist gleicher (absoluter oder relativer) Länge eingeteilt (GRIER und WARING, 1974; KAUFMANN und TROENDLE, 1981; MARCHAND, 1984; JANS et al., 1994) oder die Einteilung erfolgt quirlweise (GRANIER, 1981; WHITEHEAD et al., 1984; DOHRENBUSCH et al., 1993).

Die Auswahl der Ast-/Nadelproben für die Trockenmassebestimmung wird sowohl hinsichtlich der Probenanzahl, ihrer Auswahlart (zufällig, systematisch, subjektiv bzw. Kombinationen hiervon), der Anzahl der Unterstichproben sowie spezieller Kriterien (z.B. Differenzierung nach Nadelalter) sehr unterschiedlich gehandhabt (GREGOIRE et al., 1995).

GRIER und WARING (1974) sowie MARCHAND (1984) wählen z.B. alle Äste in einem Stratum, schneiden diese auf nadeltragende Zweige zurecht und ziehen aus den (stratenbezogenen) Zweighaufen die Stichproben. WHITEHEAD et al. (1984) beschränken sich auf alle Äste jedes zweiten Quirls, differenzieren aber beim Schneiden und Auswählen in drei Altersklassen. Zur Reduktion des Aufwandes werden oft nur ein oder wenige Äste je Stratum erfasst. Dies kann zufällig (WARING et al., 1982; BORMANN, 1990), subjektiv unter visueller Beurteilung der Repräsentativität (GRANIER, 1981; BALDWIN, 1989; DOHRENBUSCH et al., 1993; JANS et al., 1994) oder in Kombination beider Möglichkeiten (AMATEIS et al., 1992) erfolgen.

Die Nachteile dieser Schätzmethode liegen zum einen in der hohen erforderlichen Arbeitsintensität: In jedem Fall ist von allen Ästen das Frischgewicht zu bestimmen, u.U. sind diese noch zuvor nach bestimmten Kriterien zurechtzuklippen. Erfolgt zudem die Auswahl von Ästen (oder der Unterstichproben) nicht zufällig sondern subjektiv, so sind die geschätzten Nadelmassen mit einem Bias unbekannter

Größe behaftet; eine Varianz für die Schätzgrößen ist dann auch nicht angebar.

### 3.2. Multiplikatoren

Die baumindividuelle Schätzung der Nadelmassen mit Hilfe von Ratio-Schätzern wird wegen des hohen Aufwandes ab einer gewissen Anzahl von Bäumen in der Praxis nicht mehr durchgeführt. Eine mögliche Alternative sind Multiplikatoren, die auf die ermittelten, durchschnittlichen Nadelmassen, differenziert nach Kronenstraten (und u.U. weiter unterschieden nach Astordnung oder Nadelalter), angewendet werden. Die Auswahl von Ästen erster Ordnung sowie von Ästen nachrangiger Ordnung in der (den) Unterstichprobe(n) kann subjektiv-repräsentativ oder zufällig erfolgen. Die einfachsten Multiplikatoren zur Schätzung der Gesamtnadelmassen je Stratum (und/oder Astordnung/Nadelalter) sind Anzahlwerte für die Äste je Ordnung bzw. für die Astabschnitte je Nadelalter. Da i. d. R. keine Zählung von Ästen niedriger Ordnung bzw. von nadelaltersbezogenen Astteilen möglich ist, sind diese Multiplikatoren zu schätzen.

Als Beispiel seien die Untersuchungen von JANS et al. (1994) angeführt, die u. a. die Schätzung der Nadeloberfläche auf Bestandesebene für zwei mittelalte Douglasienflächen zum Ziel haben. Insgesamt wurde von 75 Douglasien, differenziert nach Kronensektionen gleicher relativer Länge, jeweils ein durchschnittlicher (visuelle Einschätzung) Ast erster Ordnung ausgewählt. Für jeweils drei systematisch gezogene Äste zweiter Ordnung erfolgte, differenziert nach Astordnung und Nadelalter, die Messung der Nadeloberflächen. Diese Werte wurden über alle Bäume gemittelt. Anzahl-Multiplikatoren wurden als Durchschnittswerte an 10 anderen, aber vergleichbaren Bäumen geschätzt (Auswahl von je einem Ast erster Ordnung je Kronenstratum und Zählung der Äste je Ordnung bzw. der Astabschnitte je Nadeljahrgang).

### 3.3. Regressionsmodelle

Soll nicht nur die Nadel-/Blatttrockenmasse eines einzelnen Baumes sondern z.B. eines ganzen Bestandes geschätzt werden, so erfolgt dies i. d. R. in zwei Schritten (CATCHPOLE und WHEELER, 1992). An einer kleinen Anzahl repräsentativ ausgewählter Bäume wird z. B. mit Ratio-Schätzern die Nadelmasse bestimmt; zusätzlich werden baumindividuelle Größen, die mit der Nadelmasse hoch korrelieren, gemessen. Letztere dienen der Erklärung in einem geeigneten Regressionsmodell, das mit diesen Mess- und Schätzwerten zu parametrisieren ist. Für diesen Zweck wird oft die enge Beziehung zwischen Astquerschnittsfläche und der Nadelmasse dieses Astes nutzbar gemacht:

Auf der Suche nach einer verbesserten, biologisch begründbaren Methode zur Biomasseschätzung veröffentlichten SHINOZAKI et al. (1964a und b) die Pipe-Modell-Theorie, gemäß der eine „Einheit Nadel-/Blattmasse“ von einer „Einheit Splintfläche“ versorgt werde. Zahlreiche Untersuchungen haben gezeigt (Übersicht z. B. in: GILMORE et al., 1996), dass i. a. die Korrelation zwischen (Gesamt)nadelmasse und Splintquerschnittsfläche in Brusthöhe deutlich höher ist als zwischen Nadelmasse und BHD oder Nadelmasse und Querschnittsfläche in Brusthöhe.

Eine Regressionsschätzung bietet jedoch nur dann deutliche Vorteile, wenn der Regressor leicht zu messen ist. Dies trifft aber für die leitende Querschnittsfläche in 1,3 m Höhe nicht zu. Alternativ wird deshalb oft die Stammquerschnittsfläche am Kronenansatz verwendet, wobei unterstellt wird, dass der Kernholzanteil vernachlässigbar gering ist, so dass der gesamte Querschnitt als leitend angenommen werden kann. Da allerdings auch diese Größe am stehenden Stamm meist nur ungenau zu erfassen ist, wurden neuerdings wieder Regressionsmodelle vorgestellt, die nicht die Splintfläche sondern – in Kombination mit der Kronenlänge (bzw. eines entsprechenden Ausdrucks) – die Querschnittsfläche in Brusthöhe als Erklärungsgröße

haben (VALENTINE et al., 1994). Die zusätzliche Einbeziehung der Kronenlänge in die linearen oder auch nicht-linearen Modelle (Übersicht s. GILMORE et al., 1996) führt meist zu einer signifikanten Verbesserung der Modelle.

Die Genauigkeit der Regressionsmodelle hängt ab von der Genauigkeit der Schätzungen/Messungen für Regressanden und Regressoren, der prinzipiellen Eignung des gewählten Modells und schließlich von der Anzahl der Bäume, die der Parametrisierung zugrunde liegt. Die Regressionsschätzung der Nadelmasse für einen Bestand beinhaltet somit nicht nur diejenigen Schwächen, die bei einer in der Praxis üblichen Ratio-Schätzung mit (teilweise) subjektiven Auswahlkriterien auftreten können (Bias, Varianz nicht angebar), sondern zusätzlich können Ungenauigkeiten durch Fehler der Regressionsschätzung wie auch durch fehlerhafte Regressoren hinzukommen. Die Regressionsmethode hat zur praktikablen (Ab)schätzung der Nadelmasse eines Bestandes sicherlich ihre volle Berechtigung; dort aber, wo ein Bedarf an exakten Werten für einzelne Bäume besteht, wird sie diesem nicht (immer) gerecht werden können.

### 3.4. 3P-Sampling

Das 3P-Sampling (PPP, probability proportional to predictor) ist ein Verfahren, bei dem die Auswahlwahrscheinlichkeit eines Stichprobenelementes proportional ist zur geschätzten Zielgröße oder zu einer mit dieser eng korrelierenden Hilfsgröße. Zur Nadelmassenschätzung wurde es bereits von GROSENBAUGH (1964) eingesetzt. Als Hilfsgröße, die mit der Nadelmasse eng korreliert, bedient man sich oft des quadrierten Astbasisquerschnitts. 3P-Sampling ist ein einstufiges Stichprobenverfahren, d. h., es erfolgt eine Auswahl von Ästen erster Ordnung, für die die Nadelmasse vollständig zu erfassen ist. Sollen aber in großem Umfang Nadel trockenmassen bestimmt werden (z. B. ECKMÜLLNER (1988): 316 Fichten), so ist zur Reduzierung des Arbeitsaufwandes eine Erweiterung zu einem zweiphasigen Ratioschätzer-Verfahren erforderlich: Im ersten Schritt wählt ECKMÜLLNER Äste zur Schätzung der Nadel frischmasse mittels 3P-Sampling aus, wobei die Krone in drei Sektionen stratifiziert wurde. Danach wird für jede Sektion ein repräsentativer Ast gezogen, um Ratio-Schätzer zwischen Nadel frisch- und -trockenmasse herzuleiten.

Neben den bereits angesprochenen Schwierigkeiten mit Ratio-Schätzern beinhaltet das 3P-Sampling das grundsätzliche Problem, dass der Schätzer nur annähernd erwartungstreu ist, die Varianz nur approximiert angegeben werden kann und der Stichprobenumfang nicht von vornherein festlegbar ist (SCHREUDER et al., 1968, 1971). Eine sinnvolle Alternative, die diese Schwächen nicht aufweist, ist das RBS-Verfahren. Hinsichtlich des Auswahlmodus der Äste ist es dem 3P-Sampling ähnlich, und als mehrstufiges Verfahren erlaubt es, mit vertretbarem Arbeitsaufwand Nadel trockenmassen auch für eine große Anzahl von Bäumen zu schätzen.

### 3.5. Randomized branch sampling (RBS)

Sucht man nach einem Verfahren zur Schätzung der Nadel trockenmasse, das einerseits biasfrei ist, andererseits bei einer Steigerung des Arbeitsaufwandes sehr effektiv zur Reduktion der Varianz beiträgt, so bietet sich das RBS-Verfahren an (GREGOIRE et al., 1995). RBS (randomized branch sampling) ist ein mehrstufiges Stichprobenverfahren, bei dem die Wahrscheinlichkeitsauswahl proportional zu einer mit der Zielgröße eng korrelierten Hilfsgröße ist. In dieser Untersuchung ist die Zielgröße die Nadel trockenmasse (sowie die Ast trockenmasse) eines Astes; als Hilfsgröße dient die Querschnittsfläche bzw. der quadrierte Durchmesser des Astes an seiner Basis.

Vorgestellt wurde das RBS-Verfahren erstmalig von JESSEN (1955) zur Fruchtzählung an Obstbäumen, VALENTIN und HILTON (1977) und VALENTINE et al. (1984) wandten es zur Schätzung von Blattmassen von Waldbäumen an. Zur Beschreibung des RBS werden

gemäß GREGOIRE et al. (1995) die Begriffe „Ast“ (branch), „Segment“ (segment), „Knoten“ (node) und „Pfad“ (path) definiert (s. Abb. 1).

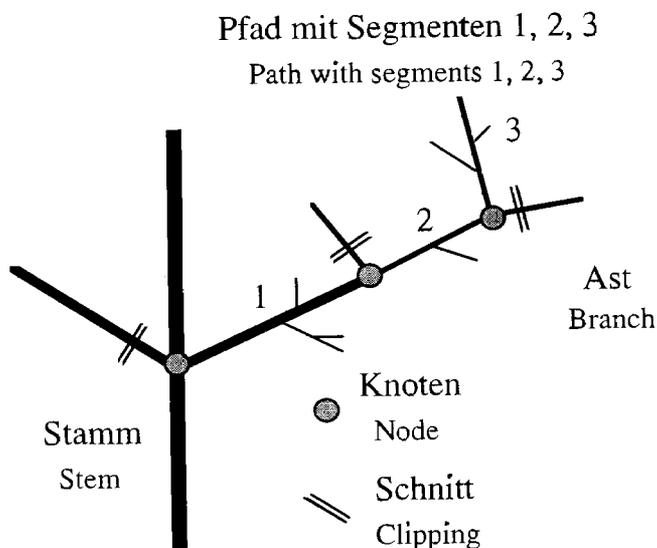


Abb. 1

Verzweigungsschema zur Erklärung von RBS-Begriffen  
Branching diagram explaining RBS-terms

Als *Ast* wird der gesamte Pflanzenteil, der sich aus einer (lateralen wie terminalen) Knospe entwickelt, bezeichnet. Ein *Segment* ist ein Teil eines lebenden Astes zwischen zwei aufeinander folgenden *Knoten* (Verzweigungspunkt). Ein Segment braucht nicht immer einem Jahrestrieb zu entsprechen, denn ein Knoten kann auch dort definiert werden, wo proleptische Triebe abzweigen. Andererseits brauchen nicht alle Verzweigungsstellen als Knoten definiert zu werden, da Triebe (auch mehrjährige), die von einem Segment abzweigen, zu diesem dazu gerechnet werden können. Insbesondere ist oft eine Zusammenfassung letztjähriger Triebe mit ihren Seitentrieben zu einem Segment sinnvoll. Die Definition der Knoten orientiert sich einerseits am Untersuchungsziel und andererseits an praktischen Gesichtspunkten (s. Kap. 4). Ein *Pfad* ist schließlich eine bestimmte Abfolge aufeinander folgender Segmente eines Astes.

Bei der Anwendung des RBS ist im ersten Arbeitsschritt festzulegen, ob die Auswahl von lebenden Ästen (tote bleiben unberücksichtigt) getrennt nach Kronenstraten gleicher oder unterschiedlicher Länge oder aber quirlweise erfolgen soll. Das Stratum oder der Quirl, an dem die Äste erster Ordnung (Hauptäste, Primäräste) ansetzen, sei der erste Knoten. Anschließend ist eine Entscheidung über den Modus der Auswahl der Hauptäste im Stratum zu treffen (ob zufällig mit gleicher Auswahlwahrscheinlichkeit oder proportional zur zu schätzenden Größe).

Gegenüber einer zufälligen Auswahl mit gleicher Auswahlwahrscheinlichkeit hat die Auswahl mit einer Wahrscheinlichkeit, die proportional zur Zielgröße (also hier der Nadelmasse) ist, den Vorteil, dass bei gleichem Stichprobenumfang die Varianz der Schätzgröße geringer ausfällt. Da aber die Nadelmasse unbekannt ist, bedient man sich z. B. der Querschnittsfläche oder – gleichwertig – des quadrierten Durchmessers  $d^2$  an der Basis des Astsegmentes als einer zweckmäßigen, d. h. einfach zu messenden Hilfsgröße. Dann ergibt sich die Wahrscheinlichkeit  $q_{1j}$ , dass (in einem Stratum) das erste Segment des  $j$ -ten Astes von  $n_1$  Hauptästen ausgewählt wird, aus dem Verhältnis des quadrierten (Basis)durchmessers zur Summe der quadrierten Durchmesser der ersten Segmente aller Äste.

$$q_{1j} = d_{1j}^2 / \sum_{i=1}^{n_1} d_{1i}^2$$

(Für den Sonderfall, dass alle Hauptäste gezogen werden sollen, gilt für die Auswahlwahrscheinlichkeit der ersten Segmente  $q_{1j} = 1$ .)

Soll für ein Stratum nicht nur die Nadelmasse sondern auch ihre Varianz geschätzt werden, so müssen mindestens zwei Äste ausgewählt werden. Damit die Schätzer des RBS-Verfahrens (s. u.) angewendet werden können, muss es sich um eine Stichprobe mit Zurücklegen (ZmZ: Ziehen mit Zurücklegen) handeln. Wird ein Hauptast mehrfach gezogen, so sind dementsprechend mehrere Pfade an diesem Ast aufzunehmen, was eine gewisse Erschwernis bei der realen Durchführung bedeutet. Zu bevorzugen wäre es, wenn einmal gewählte Äste nicht mehr zurückgelegt werden müssten (ZoZ: Ziehen ohne Zurücklegen). Wird ZoZ praktiziert, so können die RBS-Schätzer lediglich als Näherung verwendet werden, die umso eher akzeptiert werden kann, je kleiner das Verhältnis von ausgewählten zu vorhandenen Ästen ist.

Nach der Auswahl eines Hauptastes erfolgt am nächsten (zweiten) Knoten die Wahl des zweiten Segmentes, – ebenfalls zufällig und wieder mit einer Wahrscheinlichkeit proportional zum quadrierten Durchmesser an der Basis dieses Segments. Allgemein kann die Wahrscheinlichkeit  $q_{rj}$ , daß am  $r$ -ten Knoten unter  $n_r$  abzweigenden Segmenten das  $j$ -te Segment mit dem quadrierten Durchmesser  $d_{rj}^2$  gewählt wird, mit

$$q_{rj} = d_{rj}^2 / \sum_{i=1}^{n_r} d_{ri}^2$$

angegeben werden.

Zur praktischen Durchführung der Auswahl eines Segmentes (am  $r$ -ten Knoten) ist das Intervall  $[0, 1]$  gemäß

$$\left[ 0, \sum_{j=1}^1 q_{rj} \right], \left[ \sum_{j=1}^1 q_{rj}, \sum_{j=1}^2 q_{rj} \right], \dots, \left[ \sum_{j=1}^{n_r-1} q_{rj}, \sum_{j=1}^{n_r} q_{rj} \right]$$

in  $n_r$  Teilintervalle zu zerlegen und eine  $[0, 1]$ -gleichverteilte Zufallszahl zu ziehen. Dasjenige Segment ist gewählt, in dessen zugehöriges Teilintervall die Zufallszahl fällt.

Besteht ein Pfad aus  $R$  Astsegmenten, und sei  $q_{rl}$ ,  $l = 1, \dots, R$  die bedingte Auswahlwahrscheinlichkeit des jeweilig gezogenen,  $l$ -ten Segmentes, so gilt für die unbedingten Wahrscheinlichkeiten der  $r$ -ten Astsegmente

$$Q_r = \prod_{l=1}^r q_{rl}, \quad r = 1, \dots, R.$$

Ist  $f_r$  die Nadelmasse des  $r$ -ten Segments des ausgewählten Pfades, so kann die gesamte Nadelmasse  $F(r)$  auf der  $r$ -ten Stufe des Stratums mit

$$\hat{F}(r) = \frac{f_r}{Q_r}$$

und die Nadelmasse  $F$  des gesamten Stratums über alle Stufen biasfrei mit

$$\hat{F} = \sum_{l=1}^R \hat{F}(l) = \sum_{l=1}^R \frac{f_l}{Q_l}$$

geschätzt werden. Wird mehr als ein Pfad je Stratum ausgewählt (mehr als ein Ast erster Ordnung), so kann bei  $n$  Pfaden die durchschnittliche Nadelmasse des Stratums biasfrei mit

$$\bar{F} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \hat{F}_i$$

und ihre Varianz mit

$$\text{Var } \bar{F} = \frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (\hat{F}_i - \bar{F})^2$$

geschätzt werden. Durch Addition der Mittelwerte sowie der Varianzen über alle Straten erhält man für den Baum eine Schätzung seiner Gesamtnadelmasse und der Gesamtvarianz.

Die Anwendung des RBS-Verfahrens bietet auch große praktische Vorteile: Für die Bestimmung der Nadel trockenmasse wird einzig der ausgewählte Pfad verwendet. Alle anderen an den Knoten sitzenden Segmente, die nicht in die Wahl kommen, werden an der Basis weggeschnitten und verbleiben im Wald. (Kommt ein Ast mehrfach in die Auswahl, so ist darauf zu achten, dass ein Wegklippen von Segmenten an einem Knoten erst erfolgen darf, nachdem alle auszuwählenden Segmente dieses Knotens bestimmt sind.) Es brauchen keine Frischgewichte im Feld ermittelt zu werden, – weder vom Gesamtast (wie bei der Ratio-Schätzung) noch vom ausgewählten Pfad.

#### 4. ERFAHRUNGEN BEI DER ANWENDUNG DES RBS-VERFAHRENS

Hinsichtlich der Anwendung des RBS-Verfahrens lagen bisher keinerlei eigene Erfahrungen vor, doch die äußeren Umstände der Beprobung der Douglasien in Holland ließen von vornherein keine andere Methodik zu. Es bestand die Notwendigkeit, in relativ kurzer Zeit (ca. eine Woche) bei hohem Risiko ungünstigen Wetters (Dezember), einer kleinen Anzahl von Arbeitskräften (drei), einer eingeschränkten Transportkapazität (kleiner PKW-Anhänger) und schließlich wegen der beschränkten zeitlichen und personellen Kapazitäten für die Nadelmassenanalyse von mindestens drei Douglasien Proben zu nehmen. Dank RBS-Verfahren konnten Frischmassewiegungen im Feld – die vom Niederschlag beeinflusst gewesen wären – entfallen. Zu transportieren und zu analysieren waren lediglich die auf einen Bruchteil des ursprünglichen Volumens zurechtgeklippten Astpfade. Bei Mitnahme kompletter Äste wäre eine Beprobung nur von ein bis zwei Bäumen möglich gewesen.

Die Feldarbeiten erfordern zur Berechnung der Auswahlwahrscheinlichkeiten sowie zur Datenspeicherung einen tragbaren Computer. Der Auswahl von Astpfaden und der Messung der Segmentdurchmesser geht die Stratifizierung der Krone voran. Die Entscheidung, ob diese Quirl- oder sektionsweise erfolgen soll, hängt nicht nur von der Vorgabe, wie genau die vertikale Nadelmasseverteilung aufgelöst werden soll, ab, sondern wird auch von praktischen Erfordernissen bestimmt.

Da die Nadelmasseverteilung der Douglasien mit hoher Genauigkeit erfasst werden sollte, war ursprünglich geplant, je Quirl mindestens zwei Äste auszuwählen. Dies hätte jedoch die Transportkapazität bald ausgeschöpft, so dass eine Reduktion auf einen Ast je Quirl erfolgte (Nr. 231). Da damit eine Varianzschätzung aber nicht mehr möglich ist, wurden bei den Folgebäumen Nr. 104, 106 und 181 mehrere Quirle zu Straten zusammengefasst. Es zeigte sich, dass es wichtig ist, die Länge dieser Kronensektionen variabel zu halten, damit – zur Reduktion der Varianz – möglichst nur diejenigen Quirle gemeinsam in eine Sektion gelangen, deren Hauptäste eine vergleichbar große Nadelmasse tragen.

Ein (stichprobentheoretisches) Problem ergab sich bei der Aufnahme mehrerer Äste in einem Stratum, wenn Äste wiederholt für die Auswahl vorgeschlagen wurden: Die in der Literatur beschriebene praktische Durchführung des RBS klammert dieses Ereignis aus, da davon ausgegangen wird, dass die Auswahl aus einer sehr großen Anzahl von Ästen erfolgt und daher ein Ziehen identischer Äste faktisch nicht vorkommt. Grundsätzlich kann RBS auch für den Fall mehrfachen Ziehens eines Astes angewandt werden; es sind dann aber entsprechend viele Pfade für diesen Ast aufzunehmen. Diese Option

war jedoch in der im Institut entwickelten RBS-Software noch nicht vorgesehen und konnte auch vor Ort nicht eingebaut werden. Der – notgedrungenerweise – praktizierte Ausschluss wiederholter Auswahl von Ästen (ZoZ), bedeutet aber, dass die RBS-Schätzer für Nadelmasse und Varianz mit einem (unbekannten) Bias behaftet sind. Die Wahrscheinlichkeit, dass dieser Fehler auftritt, nimmt mit zunehmender Relation von gezogenen zu vorhandenen Ästen und mit zunehmender Variation der Basisdurchmesser zu. Letzteres ist hauptsächlich in den unteren Kronenstraten der Fall, da dort die Kronen wegen der Lichtkonkurrenz sehr häufig asymmetrisch sind.

Ein weiteres (in diesem Maße) nicht erwartetes Problem ergab sich bei der Fällung: Etliche Äste waren, meist in den unteren Kronensektionen massiert, bei der Berührung mit anderen Bäumen oder beim Aufprall abgebrochen. Oft konnten die Äste den Abbruchstellen eindeutig zugeordnet werden, häufig war das jedoch nicht der Fall, oder die Äste waren vollständig zerstört, gänzlich unauffindbar oder wurden erst nach der Aufnahme der betreffenden Kronensektion unter dem restlichen Kronenteil liegend gefunden. In den Fällen, wo zu einer Abbruchstelle am Stamm kein Ast zugeordnet werden konnte, musste sich die RBS-Auswahl auf die verbleibenden  $n_v$  Äste beschränken. Die Auswahlwahrscheinlichkeit

$$q_{vj} = d_{vj}^2 / \sum_{i=1}^{n_v} d_{vi}^2$$

für den  $j$ -ten gezogenen Ast ist nun natürlich zu hoch, was zu einer Unterschätzung der Nadelmasse führen würde. Deshalb wurden für die  $n_a$  Stummel der Abbrüche die quadrierten Durchmesser bestimmt und die Wahrscheinlichkeiten  $q_{ali}$  berechnet, um nachträglich die Auswahlwahrscheinlichkeiten gemäß

$$q_{lj} = q_{vj} / \left[ \sum_{i=1}^{n_v} q_{vi} + \sum_{i=1}^{n_a} q_{ali} \right]$$

zu reduzieren. Man schätzt dadurch ein Vielfaches der Nadelmasse der vorhandenen Äste  $c \cdot F_v$ , wobei der Vergrößerungsfaktor  $c$  durch das Verhältnis der Summe aller Querschnittsflächen zur Summe der Querschnittsflächen der vorhandenen Äste gegeben ist. Auch dieses Vorgehen führt dazu, dass für die RBS-Schätzer keine völlige Biasfreiheit mehr garantiert werden kann, denn die hier praktizierte Schätzung der Nadelmasse von vorhandenen und abgebrochenen Ästen ist nur dann erwartungstreu, wenn die Annahme der Proportionalität zwischen Querschnittsfläche und Nadelmasse tatsächlich erfüllt ist.

Neben Ästen erster Ordnung brechen auch Äste höherer Ordnung oder einzelne Astteile ab. Liegen die Bruchstellen innerhalb von ausgewählten Astpfaden und sind die entsprechenden Abbrüche nicht auffindbar, so ist die fehlende Nadelmasse zu schätzen und dem entsprechenden Segment hinzuzurechnen. Dies gilt auch für die zahlreichen Abbrüche meist einjähriger Proventivtriebe in den oberen Kronenbereichen. Bei der Aufbereitung der Astpfade im Labor sind die Abbrüche den Segmenten, an denen sie sitzen, zuzuordnen. Im Falle größerer Abbrüche (z. B. ab 0,5 cm Durchmesser) wurde der Basisdurchmesser gemessen, bei den kleineren (i. d. R. den Proventivtrieb-abbrüchen) wurde nur ihre Anzahl bestimmt. Wenn möglich sind dann von vergleichbaren Ästen/Proventivtrieben des gleichen Segments die Nadelmassen separat zu ermitteln, so dass – korrigiert über das Querschnitts- bzw. Anzahlverhältnis – die fehlenden Nadelmassen geschätzt werden können. Trägt das Segment mit den Abbrüchen keine hinsichtlich der Benadelung vergleichbaren Äste, so sollten entsprechende Zweige von benachbarten Segmenten oder ggf. auch von Segmenten anderer Astpfade herangezogen werden.

Der Aufwand für eine RBS-Aufnahme hängt von der Anzahl der Straten, der Anzahl auszuwählender Primäräste und der Anzahl der Knoten der Astpfade ab.

Konkrete Empfehlungen zur vertikalen Stratifizierung der Krone und der Anzahl der je Stratum zu wählenden Äste sind nur möglich unter Vorgabe gewünschter Genauigkeiten und unter Kenntnis der räumlichen Varianz der Benadelung. Die Varianz ist aber immer unbekannt; ihre Schätzung war mangels Erfahrung bzw. wegen fehlender, vergleichbarer Literaturangaben nicht möglich. Deshalb wurde die Anzahl der Äste ganz pragmatisch unter visueller Beurteilung der Varianz der Nadelmasse festgelegt, wobei das übergeordnete Ziel war, die Transportkapazität voll auszuschöpfen. Im Durchschnitt wurden je Sektion etwa ein Viertel bis ein Drittel der Äste erfasst (s. Tab. 1).

Zur Erhöhung der Effektivität des RBS ist eine sinnvolle Festlegung der Knoten nötig. Ist die Nadelmasse jahrgangsweise zu erfassen, so müssen die Knotenpunkte den Verzweigungsstellen an den ehemaligen Terminalknospen entsprechen. Auf eine derartige Differenzierung wurde hier verzichtet, da eine Unterscheidung der Jahrestriebe in den unteren Kronenbereichen (nahezu) unmöglich

war bzw. in den oberen nur unter erheblichem Mehraufwand möglich gewesen wäre. Bei einer Differenzierung nach Jahrgängen sollten dann auch proleptische Verzweigungen Knoten darstellen. Zu bedenken ist aber, dass dies insbesondere bei vielen und/oder sehr kleinen Seitentrieben zu einer wesentlichen Vergrößerung der Varianz führen kann. Soll auf eine jahrgangsweise Analyse verzichtet werden, so sind sinnvollerweise Knoten nur dort zu definieren, wo stärkere Äste abzweigen. Die kleinen Triebe, deren Abzweigstellen dann keine Knoten sind, sind – um einen Bias zu vermeiden – dem Segment, an dem sie hängen, zuzurechnen. Zur Arbeitersparnis können meist die letzten, aufeinander folgenden Jahrestriebe zu einem Segment zusammengefasst werden.

Abschließend kann zusammengefasst werden, dass das RBS ein brauchbares Verfahren ist, auch Nadel- und Astmassen von sehr großen Bäumen mit relativ geringem Aufwand zu schätzen. Um zu gewährleisten, dass tatsächlich biasfreie Schätzgrößen geliefert werden, muss ZmZ garantiert werden, d. h. es müssen – wenn erforder-

Tab. 1  
Nadel- und Asttrockenmassen 66-jähriger Douglasien, differenziert nach Kronenstraten  
Dry masses of needles and branches of 66 year old Douglas-fir, differentiated by crown sections

Nr. 104: D = 35,5 cm, H = 29,6 m										
M_H	L_H	U_H	n	N	M_FM (g)	SE	CV %	M_BM (g)	SE	CV %
14,0			1	1	148,7			1105,2		
17,1	16,6	17,6	1	3	955,8			3497,7		
18,1	17,6	18,6	2	4	1170,8	927,25	79,2	2487,7	461,67	18,6
19,1	18,6	19,6	3	9	3097,0	885,87	28,6	7583,6	2406,58	31,7
20,1	19,6	20,6	2	6	2495,4	1891,24	75,8	4297,2	2048,53	47,7
21,1	20,6	21,6	2	7	5918,1	424,23	7,2	12081,8	5544,68	45,9
22,1	21,6	22,6	3	13	11004,7	1968,63	17,9	13061,3	2420,30	18,5
23,1	22,6	23,6	3	8	3678,9	716,20	19,5	7766,4	2011,36	25,9
24,6	23,6	24,6	4	13	6180,1	1173,60	19,0	7351,4	1612,58	21,9
25,1	24,6	25,6	2	7	2108,0	396,32	18,8	2849,1	795,60	27,9
26,1	25,6	26,6	3	15	2933,0	160,83	5,5	4355,0	499,50	11,5
27,2	26,6	27,7	4	17	1322,5	152,09	11,5	1390,3	192,06	13,8
28,7	27,7	29,6	1	1	350,7			447,7		
Sum			31	104	41363,7			68274,4		
Nr. 106: D = 43,9 cm, H = 31,9 m										
20,0	18,7	21,2	2	6	1567,9	463,25	29,5	9331,4	378,08	4,1
21,8	21,2	22,3	2	7	4109,9	404,05	9,8	10485,4	1141,48	10,9
22,9	22,3	23,5	3	10	6674,2	2013,41	30,2	13706,7	2928,17	21,4
24,0	23,5	24,5	3	11	5238,4	903,63	17,3	12871,3	4427,07	34,4
25,0	24,5	25,5	3	14	10234,3	319,95	3,1	13337,6	2937,13	22,0
26,1	25,5	26,7	4	19	6685,6	727,74	10,9	7110,0	1939,39	27,3
27,3	26,7	27,8	4	31	4473,1	361,04	8,1	5572,6	625,34	11,2
28,3	27,8	28,8	3	11	1314,7	67,67	5,1	1218,0	166,40	13,7
29,3	28,8	29,8	3	9	538,3	133,48	24,8	523,4	140,22	26,8
30,9	29,8	31,9	1	1	349,4			536,9		
Sum			28	119	41185,8			74693,3		
Nr. 181: D = 44,1 cm, H = 30,5 m										
19,1	18,2	20,0	2	9	11825,1	1680,38	14,2	31995,8	3400,53	10,6
20,5	20,0	21,0	3	12	6636,3	1743,34	26,3	23913,5	5504,98	23,0
21,5	21,0	22,0	2	9	3314,1	2640,57	79,7	16998,0	391,67	2,3
22,5	22,0	23,0	3	12	5770,0	758,62	13,1	12001,6	2371,57	19,8
23,5	23,0	24,0	3	10	10818,8	2622,03	24,2	21387,4	4747,33	22,2
24,5	24,0	25,0	4	14	3008,8	125,56	4,2	3680,3	1121,62	30,5
25,3	25,0	25,5	3	10	1252,2	128,28	10,2	1238,2	286,19	23,1
25,8	25,5	26,0	3	12	3412,6	111,03	3,3	3728,7	1069,40	28,7
26,5	26,0	27,0	4	18	3628,2	796,77	22,0	4720,2	937,70	19,9
27,5	27,0	28,0	3	11	664,5	23,42	3,5	1070,7	87,12	8,1
29,3	28,0	30,5	1	1	445,9			924,3		
Sum			31	118	50776,5			121658,7		

Nr. 231: D = 31,9 cm, H = 26,9 m

13,9			1	1	234,7				1153,2		
16,2			1	1	81,1				794,1		
16,6			1	1	197,7				763,9		
18,2	17,6	18,8	1	5	1633,1				9488,0		
19,4	19,0	19,7	1	6	3639,3				4899,1		
20,2			1	4	899,6				1615,5		
20,5			1	1	64,9				1036,0		
20,7			1	1	22,4				131,2		
21,0			1	3	1305,6				2245,5		
21,3	21,1	21,4	1	5	4395,7				5515,3		
21,8			1	4	2291,9				3530,9		
22,2			1	3	1191,8				2475,1		
22,6			1	3	2876,2				3016,0		
22,8			1	4	2626,0				3302,1		
23,0			1	3	741,6				916,6		
23,4	23,2	23,5	2	6	1376,3	292,03	21,2		1716,1	126,03	7,3
23,9			1	5	887,2				709,3		
24,1			1	2	594,1				589,8		
24,4			3	6	1452,3	280,01	19,3		946,8	79,19	8,4
25,5	24,4	26,5	1	1	537,9				514,3		
Sum			23	65	27049,4				45358,8		

Definition of symbols: diameter at breast height  $D$ , total height  $H$ , mean height of crown section  $M_H$ , its lower boundary  $L_H$  and upper boundary  $U_H$  (no values for  $L_H$  and  $U_H$ : section is represented by single whirl in height  $M_H$ ; last section is the top of the crown), number of selected branches  $n$  of total number  $N$ , (mean) foliar dry mass  $M_{FM}$  in g, its standard error  $SE$  and coefficient of variation  $CV\%$  and the (mean) branch dry mass  $M_{BM}$  in g.

lich – auch mehrere Pfade an einem Ast aufgenommen werden. Da eine wiederholte Auswahl einzelner Äste und u. U. sogar Pfade die Effizienz des RBS-Verfahrens ungünstig beeinflussen kann, wäre zu prüfen, ob ggf. andere mehrstufige, vom RBS abgeleitete Stichprobenverfahren (SABOROWSKI und GAFFREY, im Druck) günstiger sind.

## 5. ERGEBNISSE

In Tabelle 1 sind für die 4 Douglasien, differenziert nach Kronenstraten, die Nadel- und Astrockenmassen ( $M_{FM}$  bzw.  $M_{BM}$ ) wiedergegeben. Sofern je Stratum mehr als ein Ast gewählt wurde (Anzahl  $n$ ), wurden für die geschätzten mittleren Massen der Standardfehler ( $SE$ ) und, in Prozent, der Variationskoeffizient ( $CV\%$ ) berechnet.

Wie in Kapitel 4. erläutert, sei darauf hingewiesen, dass die Schätzwerte für einzelne Straten mit einem unbekanntem Bias behaftet sein können. Dieser sollte aber für die Größenordnung der Werte sowie für die nachfolgenden generellen Aussagen unerheblich sein.

Vergleicht man Bäume mit übereinstimmenden BHD- und Höhenwerten, so stellt man fest, dass daraus nicht automatisch eine Übereinstimmung der Nadel- und Ast(gesamt)massen folgt. Umgekehrt können trotz abweichender Durchmesser- und Höhenwerte die Massen ähnlich sein. (Nr. 104 vs. 106: unterschiedlicher BHD, gleich große Nadelmassen; Nr. 106 vs. 181: BHD und Höhe vergleichbar, unterschiedliche Nadel- und vor allem Astmassen). Eine weiterführende Untersuchung der Entwicklung der baumindividuellen Konkurrenzsituation in Verbindung mit den Stammanalysen muss zeigen, wie diese Beobachtung erklärt werden kann.

Bei der Auswahl von einem Viertel bis einem Drittel der Äste der ersten Stufe für das RBS zeigt sich, dass die Variation des Standardfehlers bei der Nadelmasse 20 % und bei der Astmasse 30 % selten überschreitet. In Ausnahmefällen können zwar deutlich höhere Werte vorkommen (80 % bzw. 50 %), andererseits liegen vielfach die Werte auch um oder unter 10 %. Eine geringe (hohe) Variation bei den Nadelmassen lässt keine Folgerung auf eine ebenfalls geringe (hohe) Variation bei den Astmassen zu. Da bezüglich der Nadelmasse die Tendenz erkennbar ist, dass in den unteren Kronenstraten die Abweichungen größer sind (dies ließ sich den Ästen auch ansehen), sollten dort mehr Äste als in den oberen Kronenpartien ausgewählt werden.

## 6. DANKSAGUNG

Ausdrücklich danken möchten wir Herrn JANSEN und Herrn GOUDZWARD von der Landwirtschaftsuniversität Wageningen, Sektion Waldbau, die durch ihre Zustimmung zur Entnahme von Bäumen aus der Versuchsfläche diese Untersuchungen erst ermöglichen, ertragskundliche Daten bereitstellten und auch die Feldarbeiten unterstützten. In gleicher Weise gedankt sei Herrn MAILLÉ, dem Eigentümer des Waldes, für seine großzügige Erlaubnis, unentgeltlich beliebige Bäume fällen und zerstören zu dürfen. Schließlich danken wir herzlich der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt für die Bereitstellung eines Feldcomputers, ohne den die Durchführung des RBS nicht möglich gewesen wäre.

## 7. ZUSAMMENFASSUNG

Zur Schätzung der Nadel- und Astrockenmasse bei 66-jährigen Douglasien wurde aufgrund seiner Effizienz das RBS-Verfahren (randomized branch sampling) angewandt. Die Möglichkeit, die Zielgrößen und ihre Varianzen ohne Bias schätzen zu können, ist aufgrund von Problemen bei der praktischen Durchführung nicht immer gegeben. Der Arbeitsaufwand ist bei diesem Verfahren sehr gering, da keine Frischgewichte ermittelt werden müssen und die Trockenmassebestimmung lediglich für einen Verzweigungspfad des jeweils ausgewählten Astes erfolgt.

Die Ergebnisse für vier Bäume zeigten, dass bei einer Auswahl von einem Viertel bis Drittel der Äste je Sektion die Variation des Standardfehlers für die Nadelmasse i. d. R. 20 % nicht überschreitet; die Werte für die Astmassen liegen i. a. etwas höher. Überraschend war, dass Bäume mit vergleichbaren Durchmesser- und Höhenwerten große Unterschiede in der Nadelmasse aufweisen können.

## 8. Summary

Title of the paper: *RBS, a multistage inventory method for estimating tree characteristics. I. Estimating needle and branch dry mass of 66 years old Douglas-fir trees.*

The RBS-method (randomized branch sampling) was applied to 66 years old Douglas-firs for estimating needle and branch dry mass, on account of its efficiency. The possibility of an unbiased estimation for

the masses and their variances cannot be always granted, because of problems occurring during the practical realization of RBS. The effort of this method is very low because fresh weights are no longer needed and dry mass is to be measured only along a ramification path of each selected branch.

The analyses for four trees show that the selection of a quarter up to a third of the branches per section results in a variation of the standard error for the needle mass of, in general, not more than 20 %. The values for branch masses are a little higher. It was surprising that trees with comparable diameter and height values can differ noticeably in their needle mass.

## 9. Résumé

Titre de l'article: *R.B.S., méthode d'inventaire à plusieurs phases pour la détermination des caractéristiques des arbres. I. Estimation de la masse des aiguilles et des branches sèches chez des Douglas âgés de 66 ans.*

Pour l'estimation de la masse des aiguilles et des branches sèches chez des Douglas âgés de 66 ans, on a utilisé, en raison de son efficacité, la méthode R.B.S. (randomized branch sampling). Compte tenu des problèmes que pose sa mise en œuvre dans la pratique, la possibilité n'est pas toujours donnée d'obtenir sans biais les valeurs que l'on recherche avec leur variance. Les dépenses de main d'œuvre sont très faibles avec cette méthode car elle ne requiert aucune pesée de produits à l'état frais; la détermination de la masse sèche a lieu uniquement pour une longueur de ramification déterminée de chaque branche choisie.

Les résultats pour quatre arbres ont montré qu'en choisissant entre le quart et le tiers des branches par section, la variation de l'erreur standard pour la masse des aiguilles ne dépassait pas 20 % en règle générale; les valeurs relatives à la masse des branches sont le plus souvent sensiblement plus élevées. Il a été surprenant que des arbres de diamètres et de hauteurs comparables puissent présenter des différences importantes pour les masses d'aiguilles.

J. M.

## 10. Literatur

AMATEIS, R. L., BURKHART, H. E. and DUNHAM, P. H.: Estimating dry weight of dormant-season foliage of loblolly pine. *Biomass and Bioenergy* 3, 319-322, 1992

BALDWIN JR., V. C.: Is sapwood area a better predictor of loblolly pine crown biomass than bole diameter? *Biomass* 20, 177-185, 1989

BORMANN, B. T.: Diameter-based biomass regression models ignore large sapwood-related variation in Sitka spruce. *Can. J. For. Res.* 20, 1098-1104, 1990

CATCHPOLE, W. R. and WHEELER, C. J.: Estimating plant biomass: A review of techniques. *Austr. J. of Ecol.* 17, 121-131, 1992

DOHRENBUSCH, A., GROTE, R. und FRITZ, H.-W.: Struktur und Wachstum eines Fichtenbestandes unter experimenteller Manipulation der Stoffeinträge. *Forstarchiv* 64, 172-177, 1993

ECKMÜLLNER, O.: Zuwachsstudien an Fichte im Zusammenhang mit neuartigen Waldschäden. Diss., Univ. f. Bodenkultur, Wien. 129 S., 1988

GAFFREY, D.: Sortenorientiertes Bestandeswachstums-Simulationsmodell auf

der Basis intraspezifischen, konkurrenzbedingten Einzelbaumwachstums – insbesondere hinsichtlich des Durchmesser – am Beispiel der Douglasie. *Ber. d. Forschungszentr. Waldökosysteme, Reihe A, Bd. 133*, 413 S., 1996

GAFFREY, D.: Spatial effects on single tree growth in Douglas-fir stands. Conference on Effects of Environmental Factors on Tree and Stand Growth. IUFRO Conference, Berggießhübel bei Dresden, Sept. 23 to 27, 1996. TU Dresden, Inst. f. Waldwachstum u. forstl. Informatik, 45-54, 1997

GILMORE, D. W., SEYMOUR, R. S. and MAGUIRE, D. A.: Foliage-sapwood area relationships for *Abies balsamea* in central Maine, U.S.A. *Can. J. For. Res.* 26, 2071-2079, 1996

GÖHRE, K.: Die Douglasie und ihr Holz. Akademie-Verlag, Berlin. 595 S., 1958

GRANIER, A.: Etude des relations entre la section du bois d'aubier et la masse foliaire chez le Douglas (*Pseudotsuga menziesii* MIRB. FRANCO). *Ann. Sci. For.* 38, 503-512, 1981

GREGOIRE, T. G., VALENTINE, H. T. and FURNIVAL, G. M.: Sampling methods to estimate foliage and other characteristics of individual trees. *Ecol.* 76 (4), 1181-1194, 1995

GRIER, C. C. and WARING, R. H.: Conifer foliage mass related to sapwood area. *For. Sci.* 20, 205-206, 1974

GROSENBAUGH, L. R.: STX-Fortran 4 program for estimates of tree populations from 3P sampling tree measurements. USDA For. Serv. Res. Pap. PSW-13. Berkeley, Calif., 1964

HESSE, C.: Inventur der Bestandesbiomasse und ausgewählter chemischer Elemente in einem 63-jährigen Fichtenbestand im Sauerland. Dipl.-Arb., Univ. Göttingen, Forstwiss. Fachber. 229 S., 1990

JANS, W. P., VAN ROEKEL, G. M., VAN ORDEN, W. H. Q. and STEINGRÖVER, E. G.: Above ground biomass of adult Douglas fir. IBN Research Report 94/1, Inst. for Forestry and Nature Research, Wageningen, 1994

JESSEN, R. J.: Determining the fruit count on a tree by randomized branch sampling. *Biometrics* 11, 99-109, 1955

KAUFMANN, M. R. and TROENDLE, C. A.: The relationship of leaf area and foliage biomass to sapwood conducting area in four subalpine forest tree species. *For. Sci.* 27, 477-482, 1981

MARCHAND, P. J.: Sapwood area as an estimator of foliage biomass and projected leaf area for *Abies balsamea* and *Picea rubens*. *Can. J. For. Res.* 14, 85-87, 1984

PELLINEN, P.: Biomasseuntersuchungen im Kalkbuchenwald. Diss., Univ. Göttingen, Forstwiss. Fachber. 145 S., 1986

SABOROWSKI, J. und GAFFREY, D.: RBS, ein mehrstufiges Inventurverfahren zur Schätzung von Baummerkmalen. II. Modifizierte RBS-Verfahren. AFJZ, im Druck, 1999

SCHREUDER, H. T., SEDRANSK, J. and WARE, K. D.: 3-P sampling and some alternatives. I. *For. Sci.* 14, 429-454, 1968

SCHREUDER, H. T., SEDRANSK, J. and WARE, K. D.: 3-P sampling and some alternatives. II. *For. Sci.* 17, 103-118, 1971

SHINOZAKI, K., YODA, K., HOZUMI, K. and KIRA, T.: A quantitative analysis of plant form – the pipe model theory. I. Basic analyses. *Jap. J. Ecol.* 14, 97-105, 1964a

SHINOZAKI, K., YODA, K., HOZUMI, K. and KIRA, T.: A quantitative analysis of plant form – the pipe model theory. II. Further evidence of the theory and its application in forest ecology. *Jap. J. Ecol.* 14, 133-139, 1964b

VALENTINE, H. T., BALWIN, V. C., GREGOIRE, T. G. and BURKHART, H. E.: Surrogates for foliar dry matter in loblolly pine. *For. Sci.* 40, 576-585, 1994

VALENTINE, H. T. and HILTON, S. J.: Sampling oak foliage by the randomized-branch method. *Can. J. For. Res.* 7, 295-298, 1977

VALENTINE, H. T., TRITTON, L. M. and FURNIVAL, G. M.: Subsampling trees for biomass, volume, or mineral content. *For. Sci.* 30, 673-681, 1984

WARING, R. H., SCHROEDER, P. E. and OREN, R.: Application of the pipe model theory to predict canopy leaf area. *Can. J. For. Res.* 12, 556-560, 1982

WHITEHEAD, D., EDWARDS, W. R. N. and JARVIS, P. G.: Conducting sapwood area, foliage area, and permeability in mature trees of *Picea sitchensis* and *Pinus contorta*. *Can. J. For. Res.* 14, 940-947, 1984

# Genetische Differenzierung der Eiche (*Quercus robur*) in Nordrhein-Westfalen

Aus dem Institut für Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung,  
GEORG-AUGUST-Universität Göttingen, Büsingenweg 2, D-37077 Göttingen

(Mit 4 Abbildungen und 2 Tabellen)

Von TH. GEHLE

(Angenommen November 1998)

## SCHLAGWÖRTER – KEY WORDS

*Quercus robur*; genetische Differenzierung; Enzym-Genloci.

*Quercus robur*; genetic differentiation; enzyme gene loci.

## 1. EINLEITUNG

Die Eiche ist in Nordrhein-Westfalen mit einem Baumartenanteil von etwa 14 % (rund 123000 ha) an der Gesamtwaldfläche vertreten