

Quantifizierung der Kernvolumina von Nadelbäumen mit obligatorischer Farbkernholzbildung

F. Hapla, J. Saborowski

205

Im Rahmen eines umfangreichen Projektes wird am Institut für Forstbenutzung unter anderem die Variabilität der Verkernung bei jungen Douglasien in bezug auf Standort, Standortraum und Baumalter untersucht (Hapla 1992).

Der in dieser Arbeit vorgestellte methodische Ansatz zur Schätzung der Verkernung von Bäumen zeigt, daß mit wenigen Stammscheiben eine Ermittlung der Stammkernvolumina möglich ist. Am Beispiel der Baumart Douglasie werden zwei Verfahren getestet. Beide Methoden erwiesen sich als vergleichbar. Es werden auch einige systematische Fehlerquellen diskutiert, wobei der inneren Ästigkeit eine bedeutende Rolle zukommt.

Beim Vorliegen exakter Meßwerte kann mittels der erläuterten Verfahren außer der Splint- und Kernvolumina auch das Biomassekompartiment "Rinde" quantifiziert werden.

Anstelle der bisher üblichen Beschränkung auf Splint-Kern-Flächenanteile in verschiedenen Stammhöhen soll dieser methodische Ansatz in der Folge beim Vergleich mehrerer Douglasien-Bestandskollektive angewandt werden.

Quantification of heartwood volumes in conifers with obligatory heartwood formation

The determination of the heartwood portion in trees is often the subject of biological research. So far the most frequent methodical starting point was generally limited to the measuring of cross sections in different stem heights.

The aim of the present study was to determine as accurately as possible the volume of heartwood in the stem by means of a small number of disks. In the course of our investigation the rotation volumes of stem and heartwood curves of young Douglas-fir trees were calculated and compared by means of higher grade polynomes as well as spline-functions. The presented mathematical formulation proved as specially suited to conifers with obligatory coloured heartwood, because these species have certain symmetric properties of heartwood formation in contrast to the trees with optional heartwood formation.

F. Hapla

Institut für Forstbenutzung der Georg-August-Universität Göttingen,
Büsgenweg 4, D-37077 Göttingen, Deutschland

J. Saborowski

Abteilung für Forstliche Biometrie und Informatik der Georg-August-Universität Göttingen

Diese Untersuchung wird aus Forschungsmitteln der Länder Rheinland-Pfalz und Niedersachsen gefördert.

Für die freundliche Unterstützung bei der Beschaffung des Untersuchungsmaterials gebührt dem Leiter der Abt. Waldwachstum der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt Göttingen, Herrn Forstdirektor Dr. Spellmann sowie dem Leiter des Staatlichen Forstamtes Hagenbach, Herrn Forstoberrat Leppa ein besonderer Dank.

Herrn H.v. Werder sind wir für die Unterstützung bei der Erhebung und Auswertung der Meßdaten dankbar.

Most of the harvesting activities in Douglas-fir stands in Germany concern young plantations. Therefore, the knowledge about the heartwood proportion as a result of silvicultural treatments and of harvesting strategies could promote the market of this problematic small-sized Douglas-fir grade.

1 Einleitung und Problemstellung

Die Quantifizierung der Kernholzanteile in Bäumen ist häufig Gegenstand der biologischen Holzforschung. Der bisher häufig angewandte Ansatz zur Bestimmung der Kernanteile in Bäumen beschränkt sich in der Regel auf Vermessung von Querschnittsflächen in mehreren Stammhöhen. Weitergehende übliche Hochrechnungen der Kernvolumina mittels der Stammscheibenflächenanteile sind zwangsläufig mit systematischen Fehlern behaftet.

Die Kenntnisse über den Kernumfang bzw. die Kernausscheidung in Waldbäumen tragen maßgeblich zur Beurteilung der Verwendungseignung des Holzes bei. So stehen Begriffe wie Dauerhaftigkeit, Imprägniernotwendigkeit, Witterungsbeständigkeit, Festigkeit und Furniertauglichkeit in einem Zusammenhang mit dem Verkernungsgrad der jeweiligen Baumart.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit bestand darin, mittels einiger weniger Stammscheiben je Baum eine möglichst exakte Ermittlung der Stammkernvolumina zu erreichen. Im Unterschied zu den komplizierten Verzweigungssystemen der Laubbäume ermöglicht das monopodiale Wachstum der Nadelbäume eine zuverlässigere Schätzung der Verkernung im Stamm. Die Douglasie als eine Baumart mit obligatorischer Farbkernholzbildung eignet sich schon wegen der relativ gleichmäßigen Verkernung im Stammquerschnitt hervorragend als Untersuchungsobjekt.

Dem derzeitigen Altersklassenaufbau der Douglasienbestände zufolge liegen bundesweit schätzungsweise mehr als 70% des gesamten Douglasienholzeinschlags in Schwachholzbereich. Im Rahmen der laufenden Untersuchungen sollen Nutzungsanweisungen für Durchforstungsmaßnahmen entwickelt werden, definiert mit der Zielsetzung, möglichst maximale bzw. minimale Kernanteile bei den Sortimenten des Durchforstungsmaterials zu erhalten. Die Untersuchungsergebnisse über die Variabilität der Verkernung in repräsentativen Douglasien-Jungbeständen sollen zur Absatzförderung des Problemsortimentes „Douglasien-Schwachholz“ beitragen.

2 Untersuchungsmaterial

Die Versuchsbäume entstammen einer Douglasienversuchsanlage des rheinland-pfälzischen Forstamtes Hagenbach. Die gesamte Versuchsanlage umfaßt mehrere verschiedene Pflanzverbandparzellen. Die Versuchsbäume wuchsen im 2,0 × 2,5 m – Verband auf und waren zum Zeitpunkt der Fällung (März 1992) 20 Jahre alt. Sie stellen eine

Tabelle 1. Verteilungsstatistiken der ertragskundlichen Parameter: Durchmesser in 1, 3 m Höhe mit Rinde, Baumhöhe und Kronenprozent des Douglasien-Durchforstungskollektivs. (FA-Hagenbach, 2000 Dgl./ha, Alter 20 Jahre)

Variable	n	\bar{x}	s	$s_{\bar{x}}$	x_{\min}	x_{\max}
D1,3 (cm)	20	14,2	2,0	0,4	10,7	17,7
H(m)	20	16,1	0,9	0,2	14,0	17,2
KR(%)	20	42,5	3,6	0,8	35,4	48,4

Zufallsstichprobe von $n = 20$ Douglasien einer Durchforstungsmaßnahme dar (Tab. 1). Eine genaue Beschreibung der Douglasienversuchsanlage bezüglich der Standortdaten sowie der waldbaulichen Behandlung ist der Arbeit von Spellmann und Nagel (1989) zu entnehmen.

Von den Probebäumen wurden Stammscheiben in vier Höhen (1,3 m; 4,3 m; 7,3 m und 10,3 m Stammhöhe) entnommen.

3 Methoden zur Ermittlung der Kernvolumina

Wenn ein Stammschaft annähernd symmetrisch gewachsen ist, so kann seine Oberfläche durch Rotation seiner Schaftkurve (Schaftfunktion $y = f(x)$) um die x -Achse erzeugt werden. Das Volumen dieses Rotationskörpers (Bild 1) ist

$$V_x = \pi \int_0^{\text{Höhe}} f^2(x) dx$$

Als Approximation der tatsächlichen Kern- und Schaftholzvolumina der untersuchten Douglasien soll hier für jeden Baum das Rotationsvolumen einer geeigneten Kern- ($f_k(x)$) bzw. Schaftkurve ($f_s(x)$) dienen.

Die Eingangsgrößen für die Bestimmung der beiden Kurven sind in diesem Fall die aus den vier Stammscheiben in den Höhen 1,3 m, 4,3 m, 7,3 m und 10,3 m ermittelten Radien sowie die Scheitelhöhe x_s . Eine entsprechende (Kernholzscheitelhöhe) liegt nicht vor. Sie muß durch eine geschätzte Höhe x_k ersetzt werden. Die Volumina der aus den beiden Schaftformen gebildeten Rotationskörper berechnen sich nach den Formeln

$$V_{\text{Schaft}} = \pi \int_0^{x_s} f_s^2(x) dx \quad V_{\text{Kern}} = \pi \int_0^{x_k} f_k^2(x) dx$$

Enthalten alle Scheiben Kernholz, so wird x_k als Schnittpunkt einer Extrapolation von $f_k(x)$ mit der x -Achse unterstellt (Bild 1). Sonst gilt die erste kernholzfreie Scheibe als oberes Ende x_k des Kernholzschafes. Bei größeren Scheibenabständen müßte auch hier besser mit einer Extrapolation gearbeitet werden. Zur Konstruktion der beiden Schaftkurven wurden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt.

3.1 Polynomregression

Die vorgegebenen Radien für Schaft- und Kernholz in den vier Baumhöhen können durch Polynome mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate ausgeglichen werden. Versuche am vorliegenden Material zeigten, daß dafür Polynome vierten und häufig auch dritten Grades ausreichend sind. Lediglich die Modellierung des Stammfußes blieb in einigen Fällen unbefriedigend, da sich immer wieder negative Koeffizienten für das lineare Glied des Ausgleichspolynoms im Bereich unterhalb 1 m Höhe so stark durchsetzten, daß dort eine Durchmesserabnahme aufgetreten wäre. Es wurden deshalb Polynome vierten Grades der Form

$$f(x) = a + bx^2 + cx^3 + dx^4$$

verwendet. Diese vierparametrische Form liefert eine exakte *Interpolation* der vier Kernholzradien, aber nur einen *Ausgleich* der vier Schaftholzradien und der Baumhöhe x_s . Eine einzelstammweise graphische Prüfung der Modelle ist deshalb und auch zur Feststellung möglicher Meßfehler bei der Scheibenvermessung notwendig.

3.2 Spline-Interpolation

Eine Alternative, die bereits häufig zur Interpolation von Baumradien verwendet wurde (z.B. Sloboda 1977; Lahtinen u. Laasasenaho 1979; Liu 1980; Hradetzky 1981; Saborowski 1982; Nagel u. Athari 1982), ist die kubische Spline-Interpolation. Hierbei werden die Radien benachbarter Stammscheiben durch Polynome $P_i(x)$ dritten Grades verbunden, die so aneinandergesetzt werden, daß sich eine glatte Schaftkurve ergibt. Sie vermeidet extreme Krümmungen und läuft im Unterschied zur Polynomapproximation auch bei der Schaftholzdarstellung exakt durch alle gemessenen Radien und die Höhe. Bei vier Stammscheiben und der Höhe („Scheibe mit Radius 0“) sind somit die Koeffizienten von vier kubischen Polynomen

$$P_i(x) = y_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3 \quad i = 1, 2, 3, 4$$

zu bestimmen. $P_i(x)$ ist dann der Funktionswert von $f(x)$, wenn x zwischen der i -ten und $(i + 1)$ -ten Scheibe liegt. Dabei bezeichnet x_i die Höhe der i -ten Scheibe am Stamm.

Um diese 16 Koeffizienten eindeutig festlegen zu können sind zwei Zusatzbedingungen zu formulieren. Hier wurde $f''(1,3) = 0$ und $f''(x_k) = 0$ bzw. $f''(x_k) = 0$ gefordert, woraus sich eine sogenannte natürliche kubische Spline-Interpolation ergibt. Ihre Berechnung erfolgte mit dem FORTRAN-Unterprogramm ICSICU (in neueren Versionen: CSDEC) der FORTRAN-Bibliothek IMSL.

Der Stammfuß wurde bei beiden Kurven durch eine lineare Extrapolation der Spline-Funktion $f(x)$ von der 1,3 m-Scheibe bis zur Höhe $x = 0$ m modelliert. Bei älteren, stark abholzigen Stämmen wäre eine zusätzliche Stammscheibe in der Fallschnitthöhe von Vorteil, um den Stammfuß besser modellieren zu können.

In der Praxis empfiehlt sich ein interaktives Arbeiten am Grafik-Terminal, so daß die Kurvenverläufe stammweise überprüft und in Einzelfällen durch Glättung (IMSL-Routinen ICSSCU bzw. CSSMH) verbessert werden können. Parallel kann dabei auch eine optische Kontrolle der Stammscheibenvermessung erfolgen.

4 Rotationsvolumina am Beispiel der Douglasie

Eines der angestrebten Ziele dieser Untersuchung war der Vergleich zweier methodischer Verfahren zur Ermittlung der Rotationsvolumina. Die Ergebnisse der vergleichenden Untersuchung sind Tab. 2 zu entnehmen. Die absoluten Volumenangaben in m^3 je Probestamm wurden mit der Methode der Polynomregression errechnet. Während das durchschnittliche Stammschaftholzvolumen ohne Rinde bei $0,12 m^3$ lag, wurde ein durchschnittliches Rotationsvolumen des Stammkernkörpers mit $0,03 m^3$ ermittelt. Diese bereits gerundeten m^3 -Angaben entsprechen einem mittleren Stammkernvolumen von 25%. Die restlichen 75% des gesamten Schaftvolumens ohne Rinde entfielen auf das Splintholz.

Beim Vergleich der Volumina einzelner Stämme wird deutlich, daß die mittels Spline-Interpolation errechneten Kernvolumina sich nur unwesentlich von den aus der Polynomregression hergeleiteten unterscheiden. Sie können also in bezug auf das Prüfkollektiv als gleichwertig bezeichnet werden.

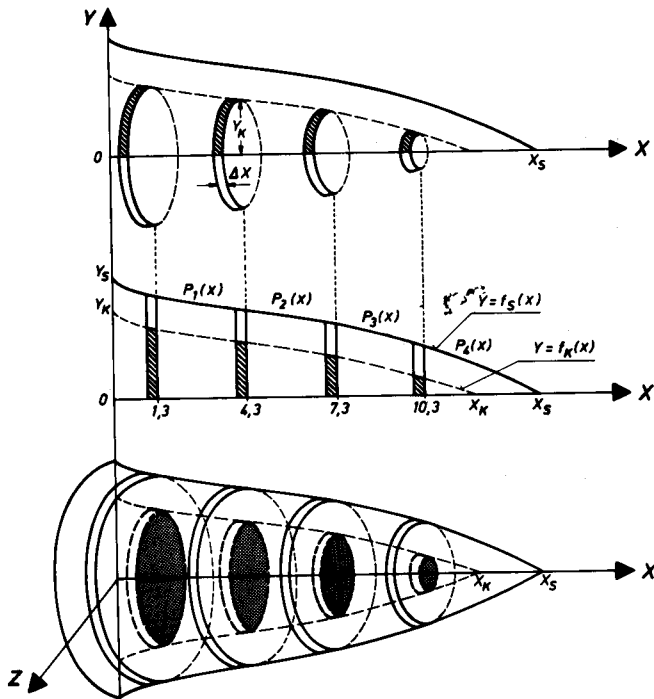


Bild 1. Schematische Darstellung von Rotationskörpern erzeugt durch die Drehung der Schaftkurve ($y = f_s(x)$) bzw. der Kernkurve ($y = f_k(x)$) um die x-Achse

Fig. 1. Schematic representation of the rotated stem curve ($y = f_s(x)$) and heartwood curve ($y = f_k(x)$) respectively

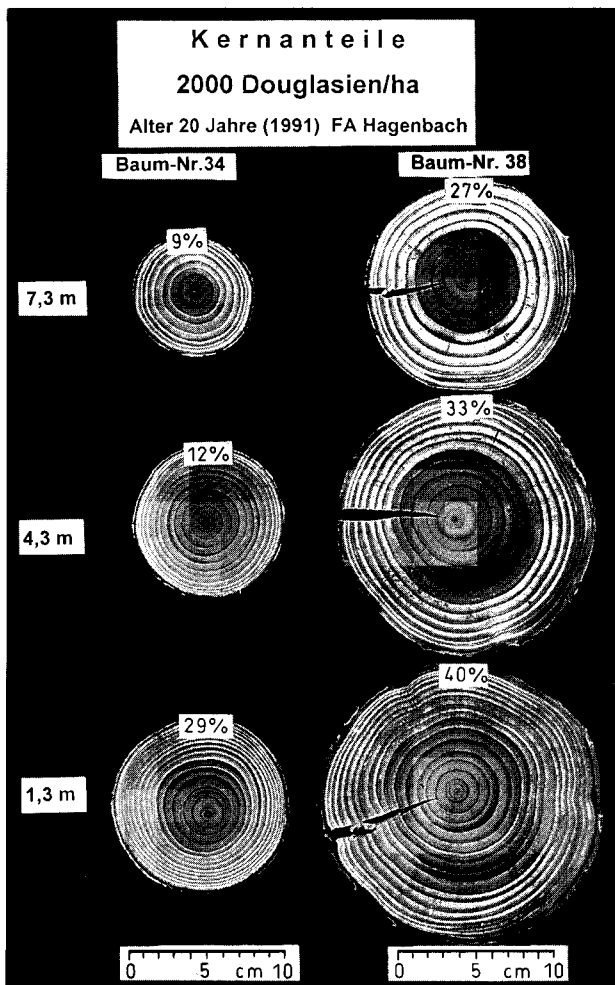


Bild 2. Kernflächenanteile in vergleichbaren Höhen zweier Douglasienstämme eines Reinbestandes

Fig. 2. Proportion of heartwood at comparable stem heights of two Douglas-fir sample trees taken from a pure stand

Tabelle 2. Schaft- und Kernvolumina eines Douglasien-Durchforstungskollektivs erzeugt durch die Rotation der Schaft- und Kernfunktionen mittels Polynomregression bzw. Spline-Interpolation. (FA-Hagenbach, 2000 Dgl./ha, Alter 20 Jahre)

Baum-Nr.	Schaftvolumen ohne Rinde m^3	Kernvolumen m^3	Kernvolumen(%)	
			Polynom ¹⁾	Spline ²⁾
21	0,11676	0,02958	25,33	25,4
22	0,12020	0,03190	26,54	26,7
23	0,07583	0,01226	16,17	16,9
24	0,09164	0,01780	19,42	19,7
25	0,05448	0,01339	24,58	25,4
26	0,11376	0,02708	23,80	23,9
27	0,09061	0,01867	20,60	20,8
28	0,15977	0,07199	45,06	45,1
29	0,14302	0,03855	26,95	27,2
30	0,14088	0,03070	21,79	21,5
31	0,15128	0,03206	21,19	21,6
32	0,15753	0,04819	30,59	30,7
33	0,14366	0,03205	22,31	22,8
34	0,06570	0,01146	17,44	17,5
35	0,13736	0,03080	22,42	22,7
36	0,10733	0,02109	19,65	19,5
37	0,14323	0,04555	31,80	32,0
38	0,18557	0,05511	29,70	29,8
39	0,08120	0,01899	23,39	23,7
40	0,09131	0,02020	22,12	22,1
\bar{x}	0,12 m^3	0,03 m^3	24,54%	24,80%

¹⁾ $f(x) = a + bx^2 + cx^3 + dx^4$

²⁾ Polynome $P_i(x)$ dritten Grades

Sollte insbesondere bei Bäumen größerer Dimension eine höhere Anzahl von Stammscheiben oder Bohrkernen sinnvoll sein, so ist die Spline-Interpolation vorzuziehen, da dann eine Polynominterpolation nur mit Polynomen entsprechend hoher Grade möglich ist.

Die Ergebnisse des untersuchten Stichprobenkollektivs (homogener Standort, gleiches Alter) verdeutlichen die große Variabilität der Kernvolumina der Douglasien. Ob hierbei allein die Stammdimension als Einflußfaktor bestimmend ist, wird an weiteren Kollektiven noch zu prüfen sein. Zusätzliche Informationen über den Umfang der Verkernung sowohl in der Radial- als auch in der Längsrichtung vermittelt Tab. 3.

Während 19 Douglasien in 7,3 m Stammhöhe verkernt waren, wiesen in 10,3 m Höhe lediglich 8 Probabäume eine Verkernung auf. Die möglichen Schwankungsbereiche der Kernflächenanteile geben die Minima und Maxima in verschiedenen Stammhöhen wieder.

5

Genauigkeit der Kernvolumenbestimmung

Für die Schäfte der Nadelbäume können mit größerer Wahrscheinlichkeit gewisse Symmetrieeigenschaften angenommen werden als für die Schäfte der Laubbäume. Diese Feststellung läßt sich auch auf die Symmetrieeigenschaften des Kernholzes übertragen.

Tabelle 3. Mittlere Kernflächenanteile (%) in verschiedenen Stammhöhen von Douglasien (FA-Hagenbach, 2000 Dgl./ha, Alter 20 Jahre)

Stammhöhe (m)	n	\bar{x} (%)	s (%)	x_{\min} (%)	x_{\max} (%)
10,3	8	6,7	2,8	2,5	12,0
7,3	19	17,7	9,5	3,8	32,8
4,3	20	26,0	9,3	5,5	47,1
1,3	20	34,4	7,0	22,4	53,5

5.1

Kernflächenanteile

Die Bestimmung der Kern- und Splintanteile der Stammscheiben erfolgt in der Regel mit der Papiergewichtsmethode. In Bild 2 sind die prozentualen Kernflächenanteile zweier unterschiedlich dimensionierter Douglasien dargestellt. Es fällt auf, daß die Verkernung der jungen Douglasien mit geringen Abweichungen dem Jahrringsverlauf folgt. Allerdings weichen die Jahrringe von einer idealen Kreisform ab. Dabei stellt sich die Frage, wie groß die Abweichung ist zwischen der wahren Kernfläche und der Fläche eines Kreises, dessen Radius durch einen Mittelwert von unendlich vielen Kernradien derselben Stammscheibe repräsentiert wird. Die Papiergewichtsmethode erwies sich als exakt und zuverlässig (Rommerskirchen 1986; Hapla 1986).

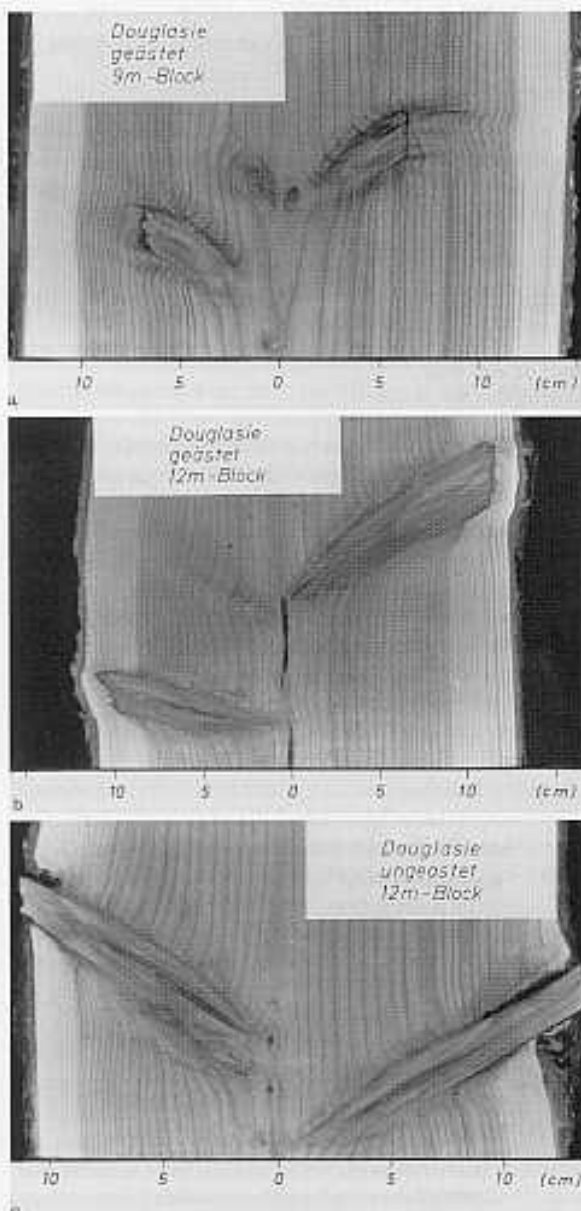


Bild 3a-c. Blocklängsschnitte in verschiedenen Stammhöhen von 52jährigen Douglasien (Verband: 1,5 m²). a nach der Ästung im Kernholzbereich überwallte Äste; b nach der Ästung im Splintholzbereich überwallte Äste; c teilweise verwachsene Flügelläste

Fig. 3a-c. Longitudinal cut sections at different stem heights of Douglas-fir tree-blocks (age 52 years; spacing: 1,5 m²). a intergrown sound knots within the heartwood zone after pruning; b intergrown sound knots in the sapwood zone after pruning; c partially intergrown spike knots

5.2

Ästigkeit

Bei der hier beschriebenen Quantifizierung der Kernvolumina der Douglasienstämme werden die Astkernanteile nicht erfaßt. In Bild 3a-c sind für die Baumart Douglasie exemplarisch verschiedene Astzonen dargestellt. Bild 3a zeigt eine vollkommen gesunde Überwallung von Ästen nach rechtzeitiger Ästungsmaßnahme. Die beiden Äste liegen im Kernholzbereich. Eine zeitlich spätere Ästungsmaßnahme bewirkte die Überwallungssituation in Bild 3b. Die Äste sind mit dem Stammholz festverwachsen und ragen aus dem Kernholz in den Splintbereich hinein. Bild 3c zeigt teilweise verwachsene und teilweise bereits abgestorbene Astbereiche. Durch mechanische Einwirkung (Fällungs- und Rückarbeiten) brachen die beiden Äste an der Stammoberfläche ab.

Bezogen jedoch auf junge Douglasienreinbestände mit geregelter waldbaulicher Bewirtschaftung kann folgendes festgestellt werden:

- Die Douglasie wird bereits ab etwa dem Alter von 12 Jahren bis auf 2-3 m Stammhöhe geästet. Dadurch kommt es zu einer rechtzeitigen Astüberwallung. An ausgewählten Z-Bäumen folgt später eine zweite Ästungsmaßnahme, die in der Regel zwischen 6 und 10 m Stammhöhe erreicht.
- Die stärksten Äste befinden sich im Kronenbereich der Bäume. Bei jungen Douglasien (bis ca. 30 Jahre Alter) ist ein Teil des oberen Schaftes und somit der Äste nur unwesentlich bzw. noch nicht verkern.

Der systematische Fehler bei der Kernvolumenschätzung wird infolge einer unzureichenden Erfassung der Ästigkeit im Stamm zumindest bei jungen Douglasien aufgrund der Ästungsmaßnahmen doch weitgehend reduziert.

5.3

Sonstige Fehlerquellen

Bei der Schätzung der Kernvolumina wirken sich beispielsweise der Exzenterwuchs im Stammquerschnitt mit Reaktionsholzbildung störend aus. Eine starke Krümmung in der Längsachse eines Stammes beeinträchtigt ebenfalls die Schätzungsgenauigkeit. Bäume mit derartigen Wuchsabweichungen sollten im Zweifelsfall als Ausreißer betrachtet werden.

Eine Anwendung des in Kapitel 3 beschriebenen methodischen Ansatzes ist bei fakultativen Kernholzbildnern (z.B. Buche, Esche, Ahorn, Birke) nicht empfehlenswert. Ein gutes Beispiel für räumlich heterogene Ausprägungen von Kernholz liefert die Baumart Buche. Die verschiedenen Kerntypen der Rotbuche wurden jüngst von Sachsse (1991) untersucht und beschrieben.

6

Literatur

- Hapla, F. 1986: Splint- und Kernanteile an Kiefern unterschiedlicher Immissionsstadiumen. Holz Roh- Werkstoff 44, Nr. 9, 301
- Hapla, F. 1992: Proportion of heartwood in Douglas-fir and its variation with site, age and spacing - experimental design and first results - IUFRO Congress, All-Division 5 Conference "Forest Products", Nancy/France, Proceedings Vol. 1, p. 305-306
- Hradetzky, J. 1981: Spline-Funktionen und ihre Anwendung in der Forstlichen Forschung. Forstwissenschaftliches Centralblatt 1, 45-59
- Lahtinen, A.; Laasasenaho, J. 1979: On the Construction of Taper Curves by Using Spline Functions. Commun. Inst. For. Fenn. 95 (8), 1-63
- Liu, C. J. 1980: Log Volume Estimation with Spline Approximation Forest Science vol. 26, No. 3, 361-369
- Nagel, J.; Athori, S. 1982: Die Stammanalyse und ihre Durchführung. Tagungsberichte der Tagung der Sektion Ertragskunde des Deutschen Verbandes der Forstlichen Forschungsanstalten in Weibersbrunn
- Rommerskirchen, A. 1986: Untersuchung der Jahrringbreiten sowie des

Splint-Kern-Verhältnisses an Kiefern unterschiedlicher Schadstufen.

Diplomarbeit, Forstw. Fachbereich, Universität Göttingen, 53S.

Saborowski, J. 1982: Entwicklung biometrischer Modelle zur

Sortimentenprognose. Dissertation, Forstl. Fakultät, Universität Göttingen, 146S.

Sachsse, H. 1991: Kerntypen der Rotbuche. Forstarchiv, 62. Jg., Nr. 6,

238-242

Sloboda, B. 1977: Spline und Bitterlichsche Interpolation bei der Wieder-
gabe der Baumschaftform. Mitt. der forstl. Bundesversuchsanstalt Wien 120,
61-70

Spellmann, H.; Nagel, J. 1989: Zum Einfluß von Ausgangspflanzenzahl und
Pflanzverband auf die Jugendentwicklung von Douglasienbeständen. Forst
und Holz, 44. Jg., Nr. 17. 455-459