

# **Verfahrens- und Programmbeschreibung**

**zum**

## **BWI-Unterprogramm BDAT**

von E. Kublin und G. Scharnagl

Abschlußbericht zum Forschungsauftrag:

„Biometrische Lösungen für die Berechnung des Volumens,  
der Sortierung, der Rindenabzüge und der Ernteverluste  
im Rahmen der Bundeswaldinventur“

gemäß Vertrag zwischen dem BML Bonn und FVA Freiburg  
vom 18. 03. 1985

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt

Baden-Württemberg

7800 Freiburg i. Br., Wonnhaldestr. 4

1988

# Inhaltsverzeichnis

Seite:

## **Vorwort**

I

## **1.0 Herleitung von Formgleichungen zur Volumen- und Sortenermittlung am stehenden Holz**

### 1.2 Problemstellung Modellformulierung

#### 1.2 Modellanpassung – praktische Aspekte

##### 1.2.1 Standardisierte Ausbauchungsreihen für den Einzelbaum

##### 1.2.2 Mittelwertpolygone für echte Ausbauchungsreihen – Datenreduktion

##### 1.2.3 Zwischenstation – Grundmodell mit relativen Bezugsdurchmessern

##### 1.2.4 Modifikationen bei absoluten Bezugsdurchmessern

### 1.3 Modellüberprüfung

## **2.0 Programmvorgaben, Definitionen und Problemlösungen**

### 2.1 Baumindividuelle Voluminierung

#### 2.1.1 Voluminierung von schwachem Stangenholz

#### 2.1.2 Massenermittlung bei fehlendem oberem Durchmesser

#### 2.1.3 Derbholzvolumen bei Laubbäumen

### 2.2 Baumartenspezifische Schätzung der Rindenstärke – Ernteverluste

#### 2.2.1 Herleitung von Rindengleichungen

#### 2.2.2 Sonstige Ernteverluste

### 2.3 Nicht verwertete Derbholzmasse/Aufarbeitungszopf

### 2.4 Sortenaushaltung im Unterprogramm BADAT

## **3.0 Unterprogramm BDAT – Modulübersicht, Parameterliste**

## **Literatur**

## V o r w o r t

Die folgende Dokumentation enthält in Form einer Verfahrens- und Programmbeschreibung die Ergebnisse eines auf drei Jahre angelegten Forschungsauftrags des BML im Zusammenhang mit der ersten Bundeswaldinventur. Ziel dieses 1985 in Angriff genommenen Forschungsprojekts war die praxisreife Entwicklung eines Systems baumartenspezifischer Schafftfunktionen zur Voluminierung und Sortierung aufgrund der drei Eingangsgrößen Baumhöhe, Brusthöhendurchmesser und Durchmesser in 7 m Höhe. Darüber hinaus sollte das Verfahren durch Verwendung baumartenspezifischer Rindenabzugswerte eine Kalkulation realistischer Ernteverluste für praxisübliche Sortiervarianten ermöglichen. Die Arbeiten an diesem personalintensiven Forschungsauftrag konnten termingerecht Ende 1987 mit der Vorlage der ersten Version des Anwenderprogramms BDAT abgeschlossen werden. Da in dieser Phase der Programmentwicklung noch keine geprüfte Daten aus der BWI vorlagen, wurden für den Ersttest ausschließlich Messwerte der Probebäume der Versuchsflächen verwendet. In Absprache mit dem BML und der Gutachterkommission wurde der Abschlusstest erst 1988/89 mit den von der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft überlassenen rd. 50.000 geprüften Probebäumen aus der BWI durchgeführt. Dieser mit allen sinnvollen Sortiervarianten gefahrene Abschlusstest lieferte wichtige Hinweise, die zu einer Reihe kleinerer Änderungen gegenüber der ersten Programmversion führten. Außerdem wies die intensive graphisch-numerische Durchleuchtung des Datenmaterials in definierten Randbereichen auf die Notwendigkeit einer Erweiterung der Plausibilitätsprüfungen der Probebäume hin.

Um das für ein so komplexes Programmpaket wie BDAT zwingend erforderliche Maß an Sicherheit zu gewinnen, wurden alle Abschlusstests mit zwei in wichtigen Bereichen unabhängig voneinander erstellten Programmen durchgeführt: Der in HP-BASIC erstellten Entwicklungsversion (G. SCHARNAGL) und dem in FORTRAN V geschriebenen Anwenderprogramm (D. STÖHR). Das hier vorgestellte Unterprogramm BDAT kann sowohl als Baustein für großräumige Holzvorratsinventuren, als auch für Betriebsinventuren auf Stichprobenbasis Verwendung finden. Interessenten

für das Anwenderprogramm werden an das BML in Bonn verwiesen, welches die ausschließlichen Verwertungsrechte besitzt.

Von den für das gesamte Forschungsprojekt aufgewendeten Kosten entfielen rd. 30 % auf Datenerfassung und –prüfung (rd. 30.000 sektionsweise vermessene Probe-stämme), Programmentwicklung und Abschlusstests sowie rd. 70 % auf die eigentli-che Verfahrensentwicklung, die Konstruktion der Schafffunktionen sowie die erforder-lichen Genauigkeitsuntersuchungen.

Abschließend sei auch an dieser Stelle nochmals ausdrücklich darauf hingewiesen, dass ohne die Bereitstellung des in langen Jahrzehnten selbstlosen Forschereinsatzes gesammelten Datenmaterials durch die waldwachstumskundlichen Institutionen der Bundesrepublik Deutschland dieses Projekt nicht zu realisieren gewesen wäre. Den einschlägigen Abteilungen der Forstlichen Versuchsanstalten der Länder Ba-den-Württemberg, Bayern und Niedersachsen gebührt für diese uneigennützige Un-terstützung besonderer Dank.

W. Schöpfer

## **1.0 Herleitung von Formgleichungen zur Volumen- und Sortenermittlung am stehenden Holz**

### **1.1 Problemstellung und Modellformulierung**

Für die forst- und holzwirtschaftliche Planung sind, nach Baumarten getrennt, Informationen über Holzvorräte und deren Verteilung auf einzelne Alters- und Stärkeklassen notwendig.

Zur Ermittlung der Stammvolumina stehen alternativ zwei Vorgehensweisen zur Auswahl. Bei dem einen Verfahren wird der Stamm in mehrere Teile zerlegt, der Mitten- bzw. der Enddurchmesser der Stammsektionen mit Hilfe von optischen Messgeräten erfasst, und das Gesamtvolumen durch sektionsweise Kubierung mit Hilfe der Mitten- oder Endflächenformel bestimmt. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass neben der Massenbestimmung näherungsweise die Rekonstruktion der Schaftform mit Hilfe von Interpolationsformeln oder Approximationsalgorithmen möglich ist. Der mit der sektionsweisen Voluminierung verbundene hohe Messaufwand steht einem Einsatz dieses Verfahrens im Rahmen von großräumig angelegten Inventuren entgegen.

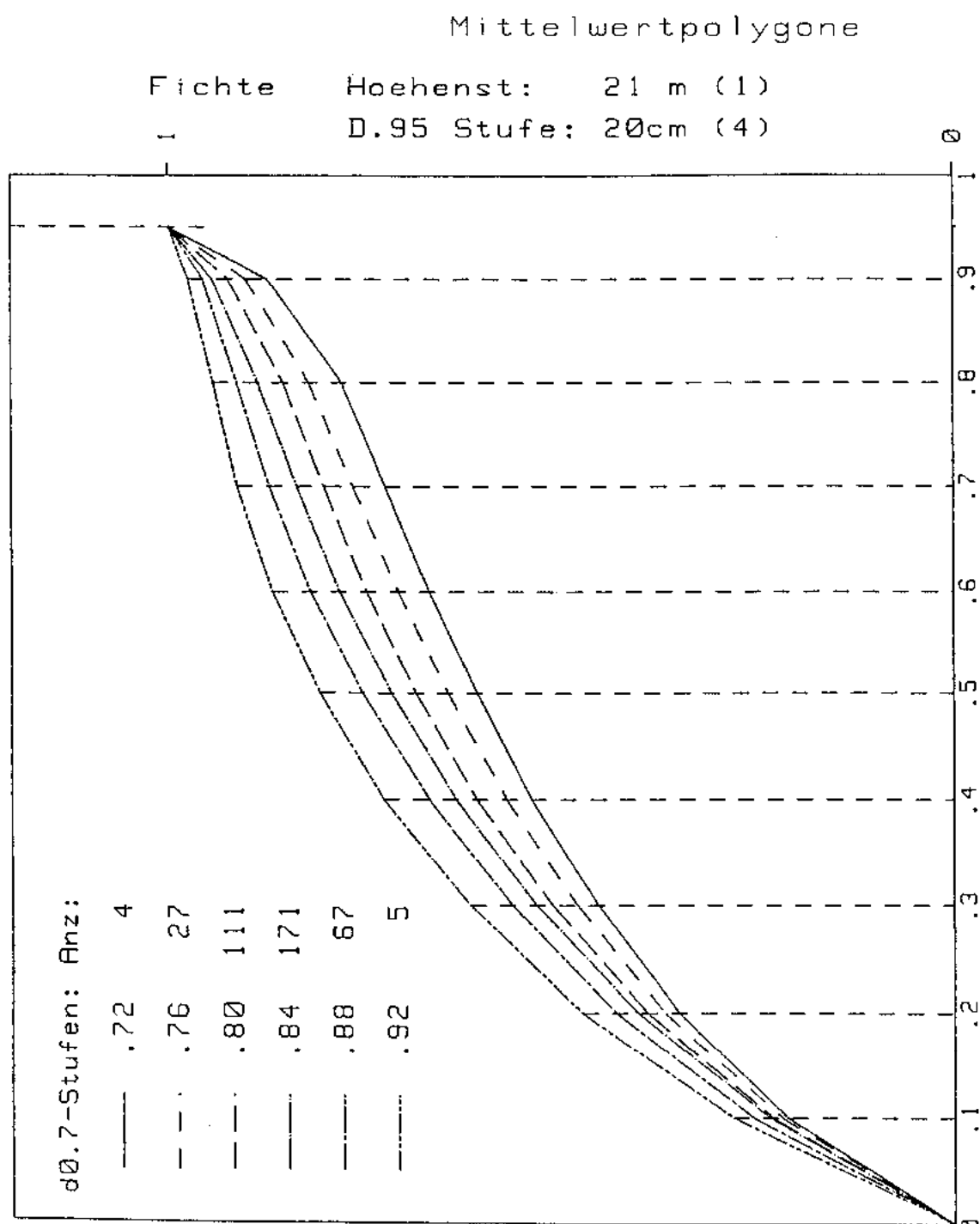
Rationeller und damit kostengünstiger, bei hinreichender Genauigkeit, lässt sich das Stammvolumen über relativ einfach zu messende Größen wie BHD ( $D_{1.3m}$ ) und Höhe (H) mit Hilfe geeigneter Volumenfunktionen bzw. Massentafeln bestimmen. Die Vorzüge dieses Verfahrens sind offensichtlich. Ebenso klar treten die Nachteile zu Tage, wenn neben der Bestimmung des Gesamtvolumens noch eine Zerlegung der Stämme in einzelne Sortimenten verlangt wird. Für die ideelle Ausformung des einzelnen Schaftes in Sortimenten und für die Berechnung der Sortenvolumina sind Informationen über die Durchmesser an unterschiedlichen Stellen im Schaft notwendig. Es werden also Modelle bzw. Gleichungen benötigt, mit denen sich die Stammform, d.h. der Stammdurchmesser an einer beliebigen Stelle im Schaft, mit hinreichender Genauigkeit vorhersagen lässt.

Schaftformmodelle, die lediglich auf zwei Messwerten, BHD und Höhe, basieren, sind zu ungenau, um das große Formenspektrum einzelner Baumarten in unterschiedlichen Wuchsräumen mit hinreichender Genauigkeit zu beschreiben. Dies wird durch die Abbildung 1 verdeutlicht. In dieser Graphik wurden für echte Ausbaureihen von Fichten mit einer Höhe von 21 m und einem Durchmesser von 20 cm in 95 % der Stammhöhe, gerechnet von der Spitze ( $D_{0.95}$ ), nach  $d_{0.7}$ -Stufen getrennt ( $d_{0.7} = D_{0.7}/D_{0.95}$ ) mittlere Ausbauchungszahlen  $d_{0.1}, \dots, d_{0.9}$  berechnet und durch Geraden interpoliert.

Die Mittelwertpolygone verdeutlichen zweierlei: Erstens das extrem breite Formenspektrum innerhalb einer Durchmesser- / Höhenklasse und zweitens eine gewisse Anordnung bzw. Staffelung innerhalb eines durch Höhe und Stärke definierten Stratum. Bäume mit einer überdurchschnittlichen Ausbauchungszahl  $d_{0.7}$  weisen auch an anderen Positionen im Schaft ein überdurchschnittliches Durchmesser Verhältnis auf; entsprechendes gilt auch bei niedrigen Formquotienten.

Hieraus ergibt sich folgende Konsequenz: Bei der baumweisen Volumenschätzung auf der Basis von Massentafeln bzw. mit Hilfe von mittleren Formfunktionen, die lediglich nach der Höhe und der Stärke abgestuft sind, muss mit systematischen Verzerrungen gerechnet werden. Diese Aussage gilt auch für die Massenschätzung eines Bestandes, wenn sich das Formenspektrum, das zur Herleitung der Massentafel bzw. zur Berechnung der Volumenfunktion verwendet wurde, wesentlich von dem des zu schätzenden Bestandes unterscheidet; eine bereits hinlänglich bekannte Tatsache.

Die in der Abbildung 1 beobachtete Staffelung bedeutet außerdem, dass sich mit einem Durchmesser Verhältnis an einer bestimmten Lage eine Aufgliederung des Formenspektrums über den gesamten Schaftbereich erreichen lässt. Die Spreitung ist zwischen 20-50 % der Schafthöhe über dem Stammfuß am größten, d.h. eine Differenzierung des Formenspektrums mit einem Durchmesser Verhältnis aus diesem Bereich ist am wirksamsten.



**Abbildung 1**

Mittelwertpolygone - Fichte

Höhenst:            21 m (1)

D.95 Stufe:        20 cm (4)

Wie genau sich die Schaftform durch eine Ausbauchungszahl definieren lässt, verdeutlicht Abbildung 2. Dort sind für die Höhenklasse 25 m und ein Durchmesser Verhältnis  $d_{0.7} = 0.85$  Mittelwertpolygone für die Stärkeklassen  $D_{0.95} = 15, 20, 25$  und 30 cm dargestellt. Abgesehen vom oberen Schaftdrittel, ist keine weitere Differenzierung der Schaftform nach den Stärkeklassen zu beobachten. Da sich bei den unteren beiden Schaftdritteln bereits über 80 % der Gesamtmasse bzw. über 90 % des Gesamtwertes eines Stammes konzentrieren, folgt aus dieser Grafik, dass sich das Formenspektrum für die Voluminierung und Sortierung hinreichend genau durch ein Durchmesser Verhältnis außerhalb des Wurzelbereichs und durch die Schafthöhe definieren lässt, d.h. insgesamt werden drei Formparameter, die Schafthöhe, die Stärke und ein weiterer Durchmesser zur Berechnung der Ausbauchungszahl benötigt.

Diese Schlussfolgerungen stehen im Einklang mit den Untersuchungen von POL-LANSCHÜTZ (1965) und ROIKO-JOKELA (1976). Weiter zurückliegend aber sinn gemäß gleich zu interpretieren sind die Untersuchungen von SCHIFFEL (1905). Er schlägt vor, Massentafeln nach dem unechten Formquotienten  $q_{0.5} = D_{0.5}/D_{1.3m}$  aufzufächern. PRODAN (1965) plädiert für die Verwendung des echten Formquotienten  $d_{0.5} = D_{0.5}/D_{0.9}$ .

Unter dem Aspekt einer rationellen Durchmessererhebung bei der BWI wurde der unechte Formquotient  $q_{7m} = D_{7m}/D_{1.3m}$  zur Aufgliederung des Formenspektrums gewählt und ein Schaftkurvenmodell, bei dem der mittlere Stammdurchmesser als Funktion seiner relativen Lage im Schaft, der Schafthöhe, der Stärke und der Ausbauchungszahl  $q_{7m}$  angegeben wird:

$$Ed = F(h, H, D_{1.3}, q_{7m}) \quad (1)$$

abgeleitet.

Für die Beschreibung der Durchmesser- / Höhenrelation innerhalb eines Schaftes werden Splinefunktionen verwendet:

$$Ed(h) = \text{Spline}(h).$$



## Fichte - Schaftform

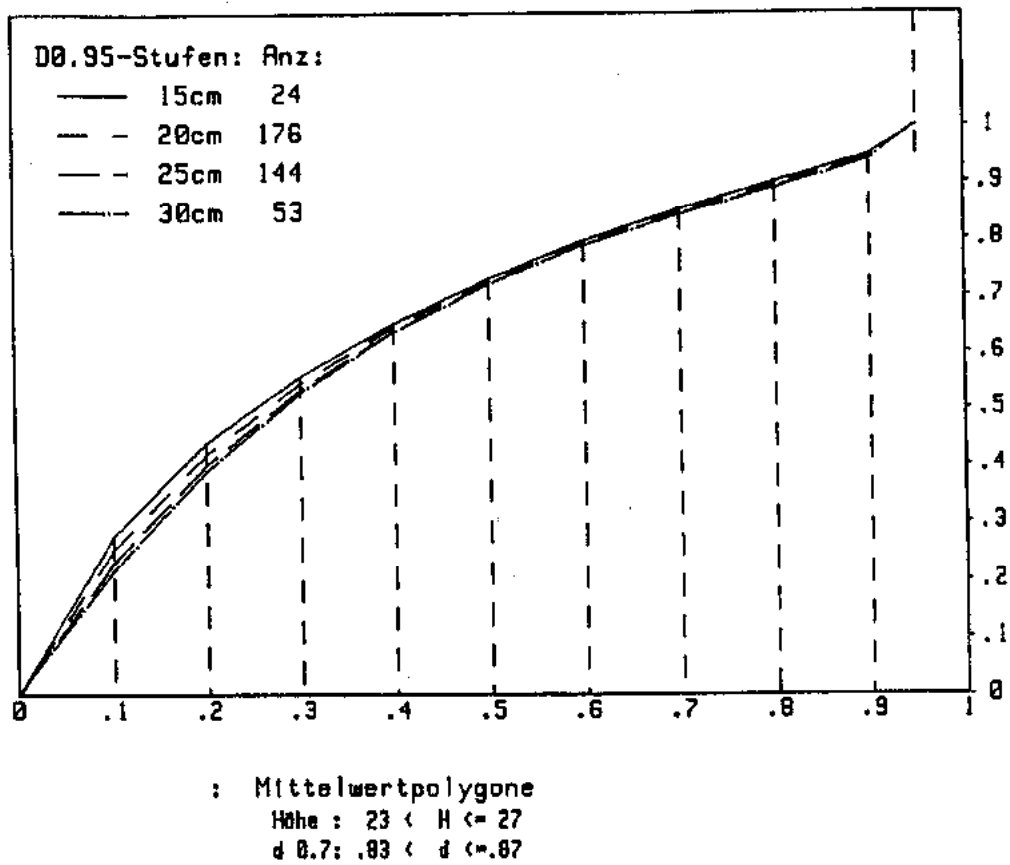


Abbildung 2

Fichte - Schaftform

Splinefunktionen sind stückweise zusammengesetzte Funktionen mit stetig differenzierbaren Übergängen an den Intervallgrenzen. Diese werden schon seit geraumer Zeit mit Erfolg zur baumweisen Beschreibung der Schaftform eingesetzt (vgl. LAHTINEN und LAASASENAHO, 1979 sowie SABOROWSKI, SLOBODA und JUNGE, 1981). In HRADETZKY (1981) werden mittlere Schaftformen für eng abgegrenzte Durchmesser- / Höhenstraten mit Hilfe von Splinefunktionen nach der Methode der kleinsten Quadrate (KQ-) berechnet und für eine automatisierte Sortenaushaltung verwendet. Anstatt zu stratifizieren und für jedes Stratum eine separate Formgleichung abzuleiten, werden beim Modellansatz (1) die Formparameter als erklärende Variablen in das Regressionsmodell aufgenommen und das Formenspektrum einer Baumart durch ein einheitliches Gesamtmodell beschrieben. Für die Aufgliederung des Formenspektrums bezüglich der Formparameter Höhe, Stärke und  $q_{7m}$  wurden einfache Funktionen verwendet; hierauf soll im folgenden noch näher eingegangen werden.

Ein einheitliches Gesamtmodell hat gegenüber einer stratenweise Berechnung von Formgleichungen den Vorzug, dass man ein stabiles und in sich abgestimmtes Gleichungssystem für eine Baumart erhält. Die Verwendung von einfachen Funktionen zur Aufgliederung des Formenspektrums garantiert darüber hinaus, dass das Modell auch in den Randbereichen, für Schäfte mit extremen Formen, vernünftige Schätzungen für die Mantellinie liefert.

Die Stabilität des Systems lässt sich beispielsweise durch die Anzahl der freien Parameter im Regressionsmodell verdeutlichen. Für die Beschreibung der Schaftform im Regressionsmodell (1) werden 20 freie Parameter je Baumart verwendet. Für die nach Durchmesser- und Höhenstufen separat hergeleiteten Formgleichungen werden in HRADETZKY (1981) für die Tanne 92 Gleichungen  $\times$  10, also insgesamt 920 freie Regressionsparameter eingesetzt; eine weitere Stratifizierung nach dem  $q_{7m}$  würde diese Zahl weiter erhöhen.

Auf eine weitergehende Erörterung der modelltheoretischen und mathematisch-statistischen Aspekte soll an dieser Stelle verzichtet werden, detaillierte Ausführungen zu diesem Problemkreis findet man beispielsweise in KUBLIN (1985). Statt dessen sollen im folgenden praktische Aspekte der Modellanpassung etwas ausführlicher beleuchtet werden.

## 1.2 Modellanpassung – praktische Aspekte

Um ein möglichst breites Formenspektrum abdecken zu können, war es notwendig, die Anpassung des Gesamtmodells auf ein möglichst breites Datenspektrum unterschiedlichster Formen sektionsweise vermessener Einzelbäume zu stützen. Insbesondere war dafür Sorge zu tragen, dass genügend Messreihen von Bäumen mit extremen Dimensionen zur Verfügung standen.

In diesem Zusammenhang erwiesen sich die in über hundertjähriger Arbeit forstlicher Versuchsanstalten auf dem ganzen Gebiet der Bundesrepublik Deutschland, schwerpunktmäßig auf dem südwestdeutschen Raum, aber auch Niedersachsen und Bayern, zusammengetragenen Datenbestände als sehr wertvoll. Ergänzt wurden diese Daten durch Zusatzerhebungen vor allem im Starkholzbereich. Diese wurden über mehrere Bundesländer verteilt durchgeführt.

### 1.2.1 Standardisierte Ausbauchungsreihen für den Einzelbaum

Die erste Hürde, die es bei der Analyse der Messdaten zu überwinden galt, war die sehr heterogene Datenstruktur der Ausbauchungsreihen. Dabei unterschieden sich die einzelnen Messvarianten nach der Art:

- der Sektionierung (Relativ- bzw. Absolutsektion),
- der Länge der Absolutsektion (1, 2, 3m)
- der Ausbauchungsreihe (Relativ- bzw. Absolutdurchmesser),
- des Bezugsdurchmessers bei Relativedurchmessern  
( $D_{1.3m}$ ,  $D_{1m}$ ,  $D_{0.9}$ ),
- der Durchmessererhebung (einfach/doppelt).

Um das gesamte Grundlagenmaterial optimal nutzen zu können, war es notwendig, die verschiedenen Messvarianten zu standardisieren und für die automatische Datenanalyse in leicht zugänglicher Art abzuspeichern.

Für die ca. 30.000 Messreihen, deren Verteilung aus der Tabelle 1 hervorgeht, wurden einzelbaumweise approximierende Schaftkurven berechnet. Die Daten der

Messreihe und die geglättete Schaftkurve wurden am graphischen Terminal gesichtet, bei offensichtlichen Messfehlern oder bei einer unbefriedigenden Ausgleichungskurve bestand die Möglichkeit unmittelbar korrigierend in den Anpassungsprozeß einzugreifen. Diese Kombination numerischer Datenglättung verbunden mit einer visuellen Kontrolle der Messreihen und der Schaftkurvenanpassung hatte den Vorteil, dass neben der Standardisierung eine Qualitätskontrolle für die Grunddaten durchgeführt wurde, sodass abschließend ein einheitliches und zuverlässiges Grundlagenmaterial für weiterführende Untersuchungen zur Verfügung stand.

Tabelle 1: Anzahl der sektionsweise vermessenen Probestämme

Fichte	5.100	Buche	5.900
Tanne	3.900	Eiche	4.000
Douglasie	1.200	Roteiche	3.400
Kiefer	3.500		
Lärche	2.600		

Für die Ermittlung der baumindividuellen Schaftkurve wurden Splinefunktionen verwendet, die mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate den einzelnen Messreihen angepasst wurden. Hierzu wurde der Schaft in zwei bis drei Sektionen unterteilt, und den Messwerten der einzelnen Stammsektionen eine Polynomfunktion 3. Grades derart angepasst, dass sich die sektionsweise ermittelten Ausgleichspolynome glatt, d.h. stetig differenzierbar, zu einer den ganzen Schaft beschreibenden Regressionskurve zusammensetzen lassen. Die Schaftkurvenapproximation mit Hilfe der Splineregression hat den Vorzug, dass zufällige Schwankungen in den Messwerten, bedingt durch Unebenheiten am Schaft oder verursacht durch Messfehler, ausgeglichen werden können. Bei der reinen Interpolation der Messwerte – die bei weitem am häufigsten verwendete Methode – kommt es zu unruhigen Verläufen der Formkurve bis hin zu Oszillationen bei Messungen im Wurzelbereich, auf Ausbauchungen des Schaftes oder bei Messfehlern; ein Fehlerausgleich findet nicht statt.

# SPLINE - REGRESSION

Standardisierte Ausbauchungsreihen

Knotenwahl - K Q S

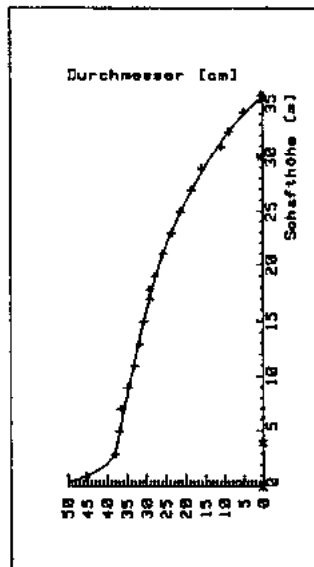


Abbildung 3b

Fichte :  $H = 35.5 \text{ m}$  /  $\text{Dia} = 45.3 \text{ cm}$   
Knoten :  $z_1 = 4.0 \text{ m}$  /  $z_2 = 30.0 \text{ m}$

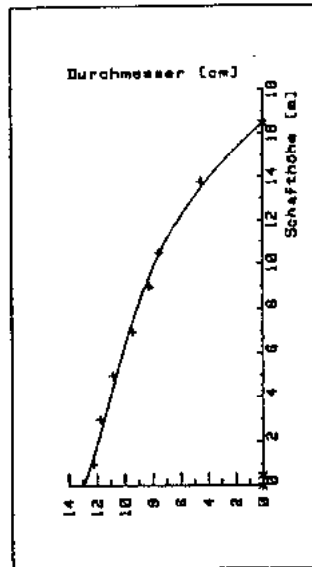


Abbildung 3d

Fichte :  $H = 16.5 \text{ m}$  /  $\text{Dia} = 12.2 \text{ cm}$   
Knoten :  $z_1 = 0.5 \text{ m}$  /  $z_2 = 0$

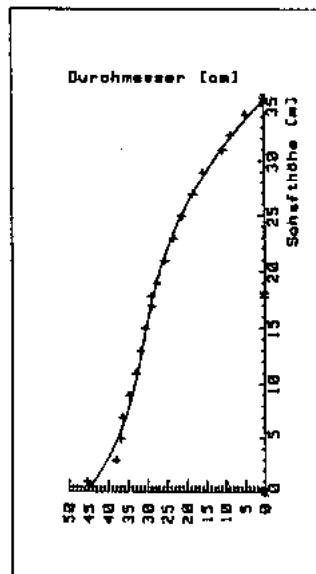


Abbildung 3a

Fichte :  $H = 35.5 \text{ m}$  /  $\text{Dia} = 45.3 \text{ cm}$   
Knoten :  $z_1 = 10.0 \text{ m}$

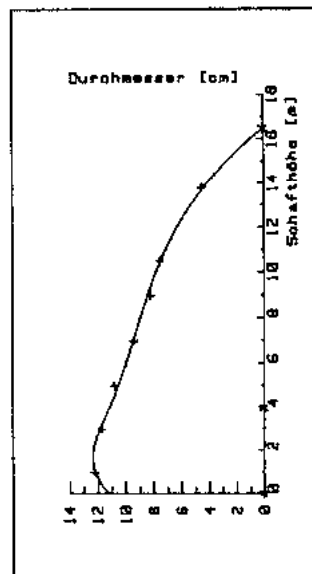


Abbildung 3c

Fichte :  $H = 16.5 \text{ m}$  /  $\text{Dia} = 12.2 \text{ cm}$   
Knoten :  $z_1 = 4.0 \text{ m}$

Abbildung 3

Bei der Splineregression hängt die Güte der Anpassung vor allem von der Wahl der Stammsektionen ab, für die separate Ausgleichskurven zu berechnen sind. In Abbildung 3 wird der Effekt einer günstigen (vgl. Abb. 3b, d) bzw. ungünstigen Schaftaufteilung (vgl. Abb. 3a, c) am Beispiel von zwei in 2m-Sektionen vermessenen Fichten demonstriert. Die jeweilige Sektionswahl ist auf der Abszisse markiert. In KUBLIN (1987) werden Faustregeln für die Stammaufteilung formuliert, die sich leicht in Form eines Rechenalgorithmus umsetzen lassen. Die Berücksichtigung dieser Regeln führte bei der Standardisierung der Ausbauchungsreihen von wipfelschäftigen Bäumen insbesondere bei Nadelholz in über 90% der Fälle zu akzeptablen Schaftkurven. Durch Veränderung der vom Rechner vorgeschlagenen Stammaufteilung seitens des Programmbenutzers konnten für die übrigen Messreihen schnell befriedigende Ausgleichskurven erzeugt werden. Nach kurzer Einarbeitungszeit konnten so bis zu 1500 Messreihen von Einzelbäumen an einem Tag gesichtet und geglättet werden, was die Effizienz und die Praktikabilität der Splineregression im Zusammenhang mit der Schaftformbeschreibung eindeutig unter Beweis stellen dürfte.

Die eben angegebenen Spitzenwerte ließen sich bei Laubhölzern nicht realisieren. Hier erschweren abgehende starke Äste bzw. die vollständige Auflösung des Schaftes in Äste eine automatisierte Beschreibung der Stammkontur und machen häufige Eingriffe des Programmbenutzers notwendig. Die Probleme bei der modellmäßigen Beschreibung der Schaftform und der Derbholzmasse von Laubbäumen werden in HRADETZKY, KUBLIN, SCHARNAGL und SCHÖPFER (1986) ausführlich dargestellt. Lösungen, die eine einheitliche Beschreibung der Derbholzmasse für Nadel- und Laubbäume zulassen, werden dort diskutiert.

Das sehr umfang- und formenreiche Datenmaterial kontrollierter und geglätteter Ausbauchungsreihen war die Basis für die weiteren Untersuchungen zur Analyse der Zusammenhänge zwischen dem Schaftdurchmesser auf der einen und den Formparametern Höhe, BHD und der Ausbauchungszahl  $q_{7m}$  auf der anderen Seite.

### 1.2.2 Mittelwertpolygone für echte Ausbauchungsreihen – Datenreduktion

Für den Vergleich von Stämmen unterschiedlicher Dimension, Höhe und Stärke, sind echte Ausbauchungsreihen besonders geeignet, da sie die geometrischen Formver-

hältnisse besser zum Ausdruck bringen als Ausbauchungsreihen auf der Basis von Sektionen mit festen absoluten Längen.

Um einen ersten Einblick in das Formenspektrum einzelner Baumarten zu erhalten, wurden aus den standardisierten Messreihen klassenweise mittlere Formquotienten für die relativen Lagen 0.1, ..., 0.9 berechnet und durch Geraden zu Mittelwertpolygonen zusammengesetzt. Die Normierung der Formquotienten erfolgte bezüglich des  $D_{0.95}$ . Innerhalb einer Durchmesser- / Höhenklasse wurden noch nach  $d_{0.7}$ -Stufen differenziert. Durchschnittliche Schaftformen für die Fichte bei einer Höhe von 21 m und einer Stärke ( $D_{0.95}$ ) von 20 cm sind der in Abbildung 1 wiedergegeben. Für Buchen mit einer Höhe von 29 m und einer Stärke von 20 cm sind die entsprechenden Ergebnisse in Abbildung 4 dargestellt.

Die Wahl des  $D_{0.95}$  und des  $d_{0.7}$  zur Aufgliederung des Formenspektrums ist zum einen damit begründet, dass diese Durchmesser für die stark vertretenen Höhenklassen nicht allzu weit von den bei der Inventur gemessenen Durchmesserwerten in 1.3 m Höhe bzw. 7 m über dem Stock liegen und zum anderen die stärkste Formdifferenzierung im Bereich des  $d_{0.7}$  zu finden ist.

Durch die Zusammenfassung der einzelnen Messreihen zu Mittelwertpolygonen lässt sich das Formenspektrum des Grundlagenmaterials leichter überschauen. Insbesondere erhält man Hinweise auf schwach belegte Formigkeitsstufen, die ggf. durch Zusatzerhebungen weiter abzusichern sind. Neben Informationen über die Aufgliederung und Verteilung der Stammformen lassen sich aus den komprimierten Daten die wichtigsten Gesetzmäßigkeiten zwischen dem Schaftdurchmesser auf der einen, der Schafthöhe, der Stärke und dem  $d_{0.7}$  auf der anderen Seite ablesen.

# Mittelwertpolygone

Buche

Hoehenst: 29 m (1)

D.95 Stufe: 20cm (4)

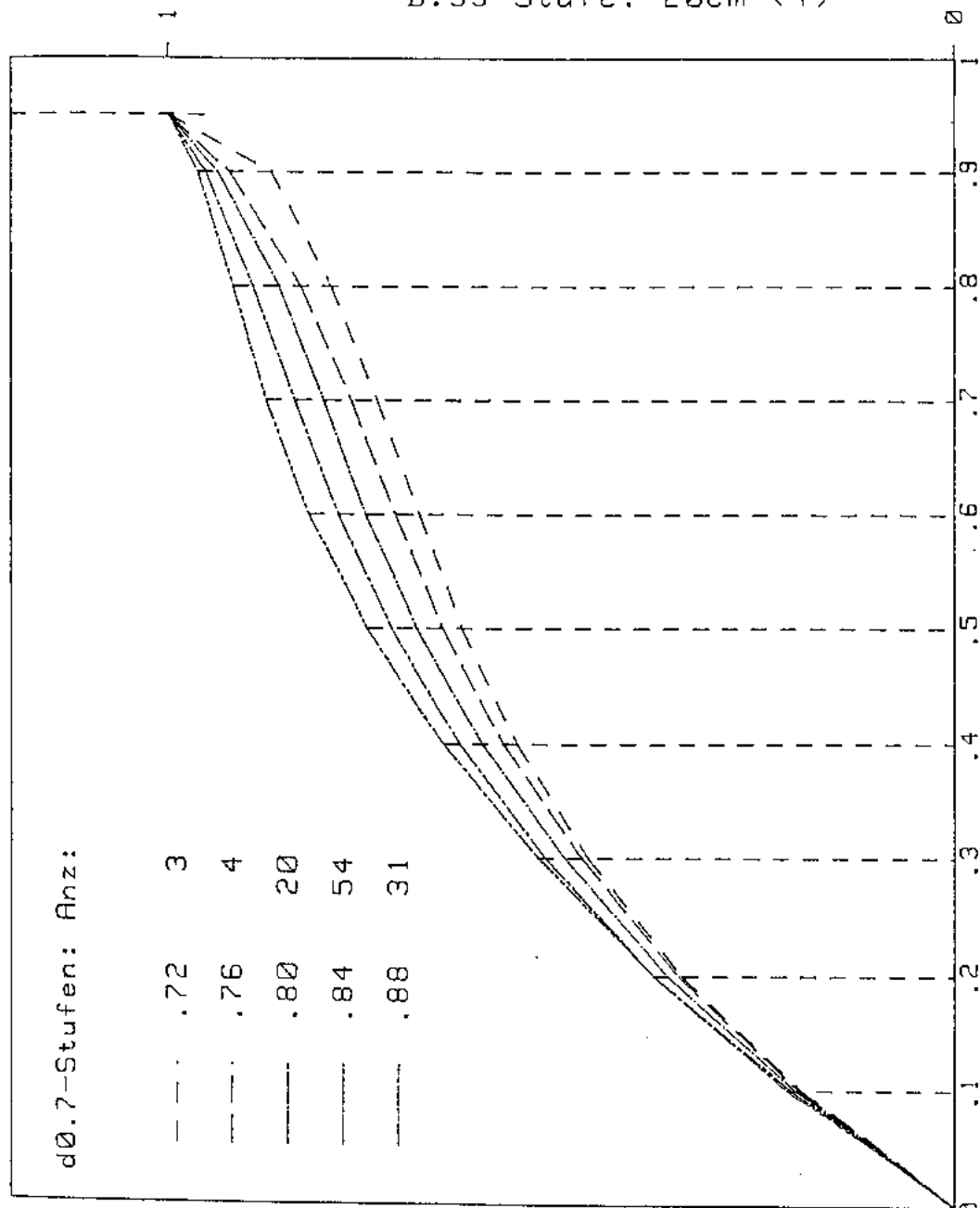


Abbildung 4



### 1.2.3 Zwischenstation – Grundmodell mit relativen Bezugsdurchmessern

Wegen der Überschaubarkeit der Formverhältnisse bei der Verwendung von relativen Bezugsdurchmessern für die Aufgliederung des Formenspektrums wurde zunächst ein Modell von der Form

$$E_d = F(h, H, D_{0.95}, d_{0.7}) \quad (2)$$

für den Erwartungswert der Ausbauchungszahl  $d=D/D_{0.95}$  angestrebt. Im Hintergrund stand dabei der Gedanke, die Erfahrungen bei der Herleitung des relativen Modells gewinnbringend bei der Formulierung eines Modells mit absoluten Bezugsgrößen einsetzen zu können.

Die bereits im ersten Abschnitt formulierten Grundsätze für die Modellbildung:

- (\*) Beschreibung der Durchmesser Höhenbeziehung durch einen Regressionsspline und die
- (\*) Verwendung von einfachen Funktionen für die Aufgliederung des Formenspektrums

zusammen mit der linearen Staffelung des Formenfächers bezüglich der Höhe, des  $D_{0.95}$  und des  $d_{0.7}$  (vgl. Abbildung 5) führten auf einen Modellansatz von der folgenden Form:

$$E_d = S_h(h) + S_H(h) \cdot H + S_D(h) \cdot D_{0.95} + S_d(h) \cdot d_{0.7} \quad (3)$$

mit Splinefunktionen  $S_h(h)$ ,  $S_H(h)$ ,  $S_D(h)$ ,  $S_d(h)$  zu einer gemeinsamen Zerlegung des Definitionsintervalls  $0 \leq h \leq 1$  mit den Zerlegungspunkten 0.3, 0.5, 0.7 und 0.9.

# Schaftform - F i c h t e

## Relativdurchmesser - Formmerkmale

Abbildung 5

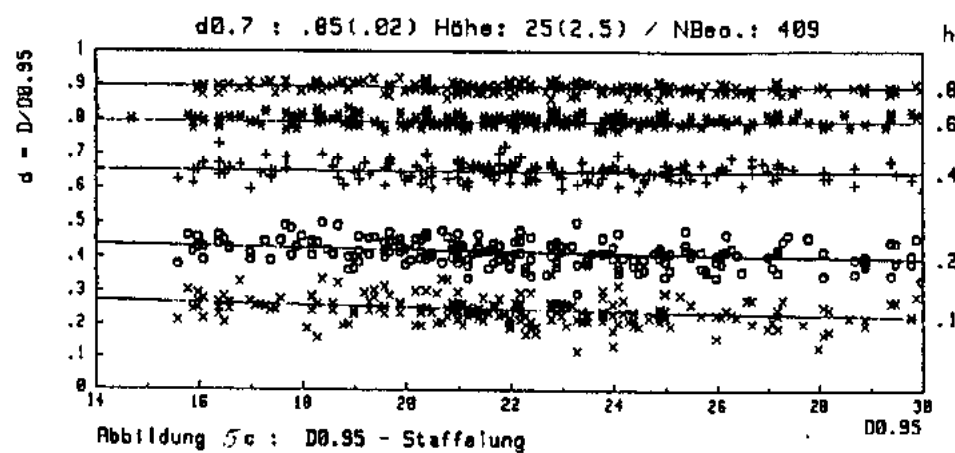
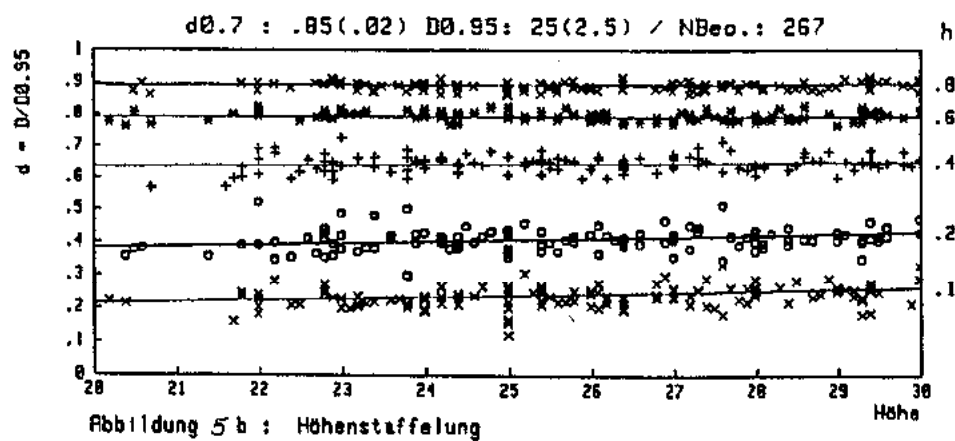
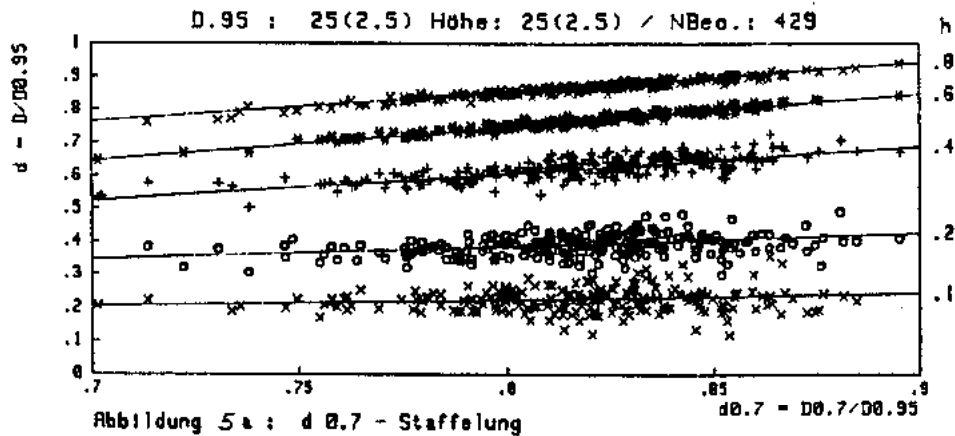


Abbildung 5

Der Modellansatz (3) kann für eine feste relative Lage im Schaft  $h$  als multiple lineare Regression mit der echten Ausbauchungszahl  $d=D/D_{0.95}$  als Zielgröße und der Schafthöhe, der Stärke und dem  $d_{0.7}$  als Einflussgröße interpretiert werden. Dabei wird die partielle Abhängigkeit zwischen der Ausbauchungszahl und einer der drei Einflussvariablen bei gleichzeitiger Fixierung der beiden komplementären Regressoren durch eine Regressionsgerade beschrieben, deren Steigung – Stärke der Formdifferenzierung bezüglich dieses Parameters – mit der jeweiligen Lage im Schaft variiert. Damit wird den in Abbildung 5 dargestellten Abhängigkeitsverhältnissen voll Rechnung getragen. Aus dieser Grafik geht auch hervor, dass Geraden zur Beschreibung des Formenfächers vollkommen ausreichend sind.

Die mittleren Ausbauchungszahlen dienten nicht nur zur Verdeutlichung der Abhängigkeitsstrukturen, sie waren auch Grundlage für die Modellanpassung. Die Regressionsparameter (Splinekoeffizienten) wurden nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate unter Beachtung der folgenden Restriktionen, die sich als lineare Nebenbedingungen formulieren lassen, bestimmt:

(1) Die resultierende Schätzfunktion ist in den Nahtstellen zweimal stetig differenzierbar und

(2) erfüllt die Normierungsbedingungen:

$$\mathbf{E}d(h=0) = 0, \mathbf{E}d(h=0.95) = 1 \text{ und } \mathbf{E}d(h=0.7) = d_{0.7}.$$

Bei der Berechnung der KQ-Schätzung wurden die mittleren Formquotienten entsprechend der Anzahl der Bäume, über die gemittelt wurde, gewichtet. Durch die Verwendung der Mittelwertpolygone mit der entsprechenden Gewichtung zur Parameterschätzung an Stelle der ursprünglichen, in Absolutsektionen vermessenen Ausbauchungsreihen konnte der numerische Aufwand bei gleichbleibender Schätzgenauigkeit erheblich reduziert werden. Zur Verdeutlichung: Bei Verwendung der Originaldaten wäre für die Fichte ein Regressionsproblem mit 80 Parametern – 20 freie, 60 durch Stetigkeits- und Normierungsbedingungen gebunden – mit ca. 50.000 – 75.000 Datensätzen (5.000 Messreihen mit durchschnittlich 10 – 15 Einzelmessungen) zu lösen gewesen; ein sehr aufwendiges und kostspieliges Verfahren vor allem in der Modellbildungsphase. Bei der Verwendung der Mittelwertpolygone verringert sich demgegenüber die Anzahl der Datensätze auf ca. 1000 (125 Formig-

keitsstufen zu je 8 Mittelwerten an den Stellen 0.1, ...0.6, 0.8, 0.9), d.h. der numerische Aufwand wird um einen Faktor 1:50 – 1:75 reduziert.

Die Gegenüberstellung von Messdaten und deren Schätzungen aus dem Regressionsmodell (3) zeigte, dass eine gute Beschreibung der Stammkontur auf der Basis der drei Formparameter  $H$ ,  $D_{0.95}$  und  $d_{0.7}$  möglich ist und im Mittel nicht mit systematischen Verzerrungen gerechnet werden muss. Ein Ausschnitt aus dem geschätzten Formenspektrum für die Baumart Fichte ist in der Abbildung 6a wiedergegeben. Dort ist für Fichten mit einer Höhe von 25 m und einer Stärke von 25 cm die Variation der Stammformen in Abhängigkeit von  $d_{0.7}$  dargestellt. Die lineare Staffelung des Formenfächers bezüglich des echten Formquotienten ist offensichtlich. Abbildung 6b, eine Ausschnittsvergrößerung aus dem Wurzelbereich, verdeutlicht die bereits erwähnten Normierungsbedingungen mit einer Steigung der  $d_{0.7}$ -Geraden von eins an der Stelle  $h=0.7$  und null an der Position des Normierungsdurchmessers,  $h=0.95$  ( $Ed(h=0.95)=1$ ).

#### 1.2.4 Modifikation bei absoluten Bezugsdurchmessern

Beim Übergang zu den absoluten Bezugsdurchmessern  $D_{1.3m}$  und  $D_{7m}$  erweist sich die Wahl des Durchmesser  $D_{0.95}$  und  $D_{0.7}$  als Eingangsgrößen für das Grundmodell als besonders günstig. Diese liegen für mittlere Stammhöhen nicht allzu weit von den entsprechenden absoluten Größen entfernt, d.h. es können enge Korrelationen zwischen den relativ bzw. den absolut positionierten Eingangsgrößen unterstellt werden, so dass über die Regressionen

$$Ed_{0.95} = f_D(D_{1.3m}; H)$$

und

$$Ed_{0.7} = f_d(q_{7m}; H)$$

aus (3) unmittelbar ein Schaftkurvenmodell von der folgenden Form:

$$\begin{aligned} Ed &= S_h(h) + S_H(h) \cdot H + S_D(h) \cdot ED_{0.95} + S_d(h) \cdot Ed_{0.7} \\ &= S_h(h) + S_H(h) \cdot H + S_D(h) \cdot f_D(D_{1.3m}, H) + S_d(h) \cdot f_d(q_{7m}, H) \end{aligned} \quad (4)$$

für die absoluten Bezugsdurchmesser abgeleitet werden kann.

# Formenspektrum - F i c h t e

$$E_d = F(h, d_{0.7})$$

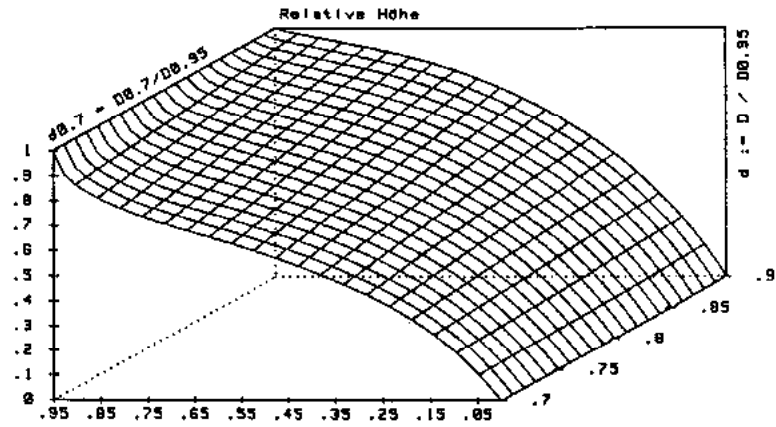


Abbildung 6a: Lineare  $d_{0.7}$  - Staffelung

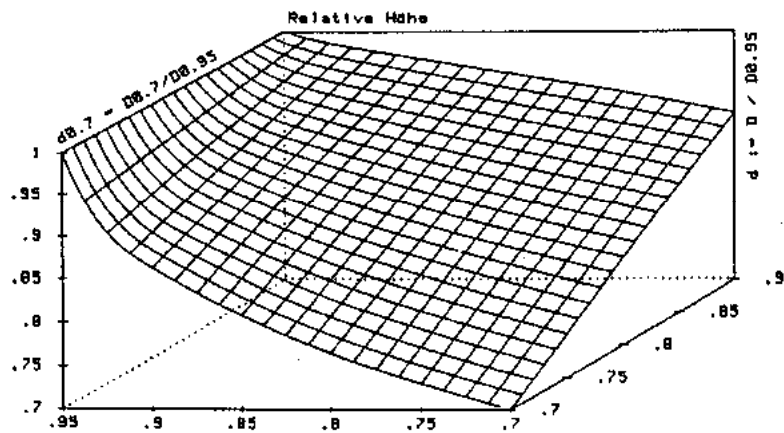


Abbildung 6b: Lineare  $d_{0.7}$  - Staffelung  
Normierungsbedingungen:  $h = 0.7$  bzw.  $.95$

Abbildung 6

Innerhalb fester Höhenstufen verdeutlicht ein Streudiagramm die enge Beziehung zwischen dem  $D_{0.95}$  und dem  $D_{1.3m}$ . Darüber hinaus wird deutlich, dass die Abhängigkeit zwischen den beiden Durchmessern für eine feste Höhenstufe durch eine Regressionsgerade beschrieben werden kann (Abbildung 7), d.h. es gilt näherungsweise

$$f_D(D_{1.3m}; H=\text{konstant}) = a_H + b_H \cdot D_{1.3m},$$

wobei die Steigerung der Regressionsgeraden ( $b_H$ ) und der Schnittpunkt auf der Ordinatenachse ( $a_H$ ) von Höhenklasse zu Höhenklasse variieren. Ähnliche Überlegungen wie bei der Herleitung der Formgleichungen (3) führen schließlich auf ein Gesamtmodell für die  $D_{0.95}$ -Schätzung der Gestalt

$$ED_{0.95} = a_D(H) + b_D(H) \cdot D_{1.3m}$$

mit Splinefunktionen  $a_D(H)$  und  $b_D(H)$ . Diese sind in den Abbildungen 8a, b graphisch dargestellt.

Die Beziehung zwischen der echten Ausbauchungszahl  $d_{0.7}$  und dem unechten Formquotienten  $q_{7m}$  kann für eine feste Höhenstufe ebenfalls mit Hilfe einer Geraden beschrieben werden, was aus der Abbildung 9 ersichtlich ist. Deshalb wird auch in diesem Fall die relative Eingangsgröße für das Grundmodell über ein Regressionsmodell in der folgenden Form geschätzt:

$$Ed_{0.7} = a_d(H) + b_d(H) \cdot q_{7m},$$

wobei die Regressionskoeffizienten wiederum mit der Schafthöhe variieren, und daher durch Splinefunktionen approximiert werden (vgl. Abbildungen 10a, b).

Wie bereits zuvor beim Grundmodell werden die Formgleichungen dahingehend modifiziert, dass der gemessene Durchmesser und dessen Prognose in 1.30 und 7m Höhe übereinstimmen, hierzu wird ein iteratives Verfahren verwendet, vgl. KUBLIN, HRADETZKY u. HANNAK (1984).

# Schaftform - F i c h t e

Absolute Bezugsdurchmesser D 1.3m u. D7m

D0.95 - Schätzung

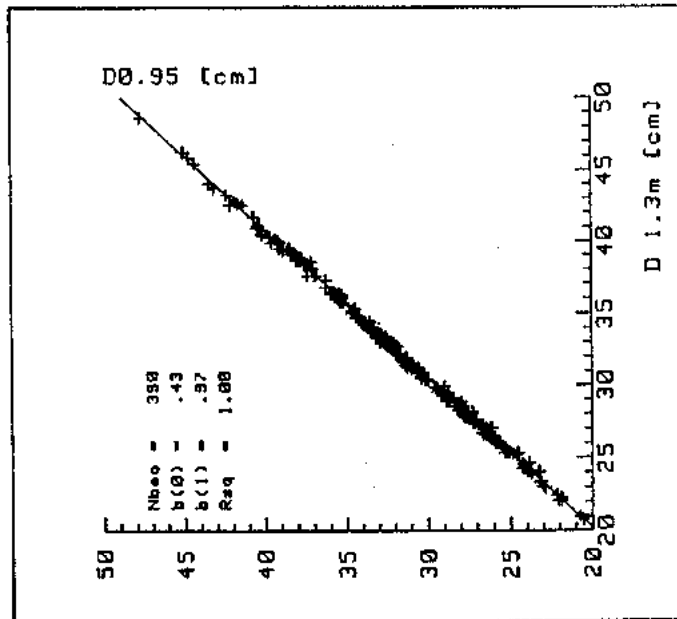


Abbildung 7b: Höhenstufe 30 (1) [m]

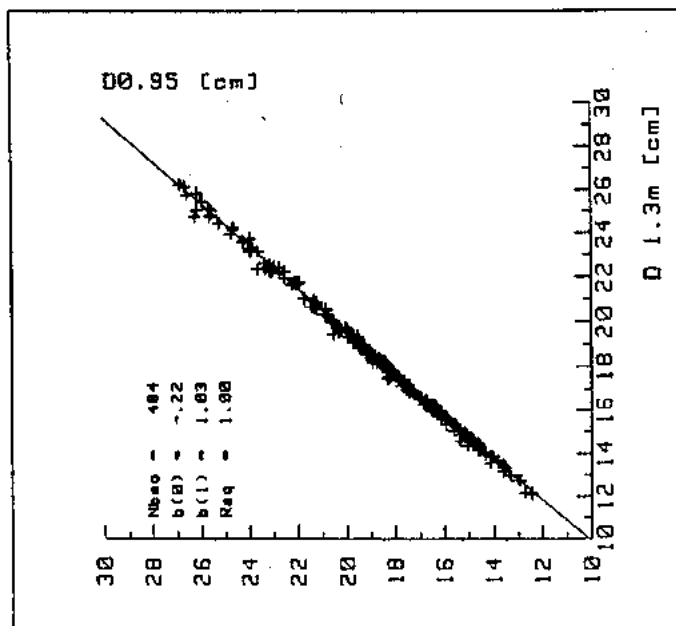
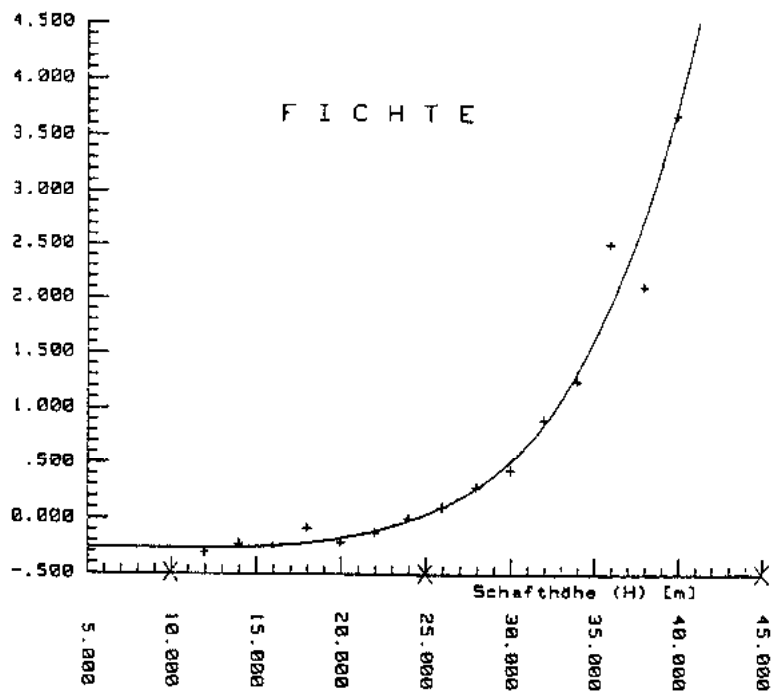
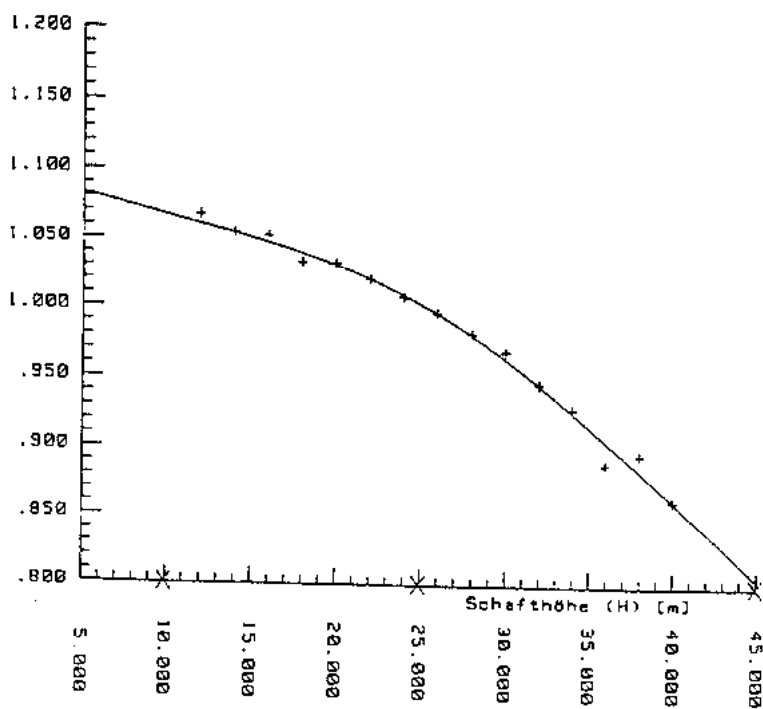


Abbildung 7a: Höhenstufe 20 (1) [m]



$$a(H; D0.95) = \text{Spline}(H)$$

D0.95-Schätzung /  $a(H) = \text{Spline}(H)$  /  $b(H) = \text{Spline}(H)$



$$b(H; D0.95) = \text{Spline}(H)$$

Abbildung 8



# Schaftform - F i c h t e

Absolute Bezugsdurchmesser D 1.3m u. D7m

d0.7 - Schätzung

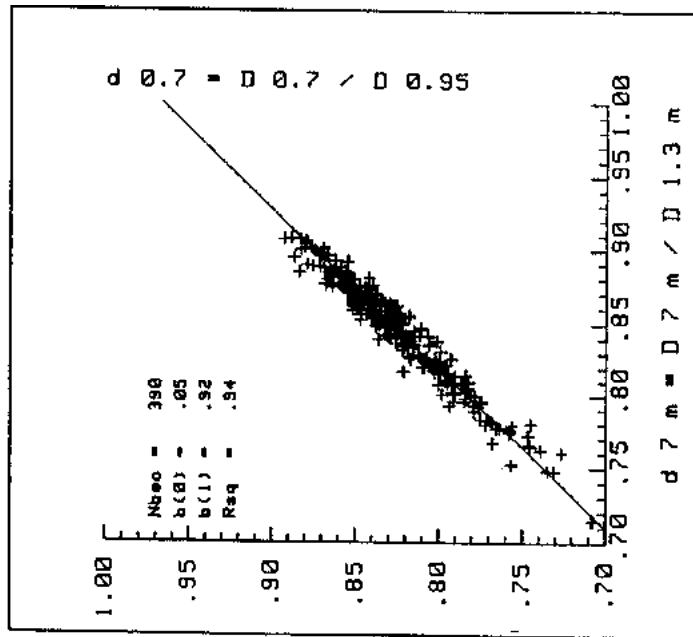


Abbildung 9b: Höhenstufe 30 (1) [m]

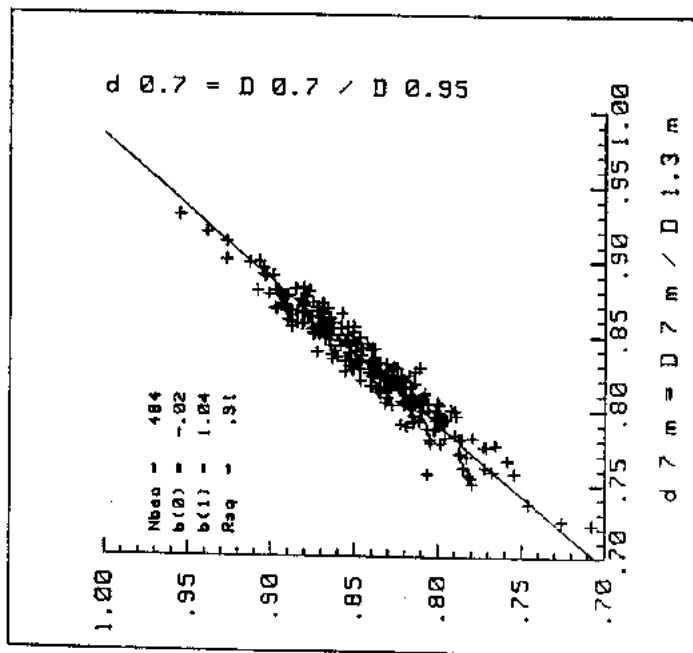
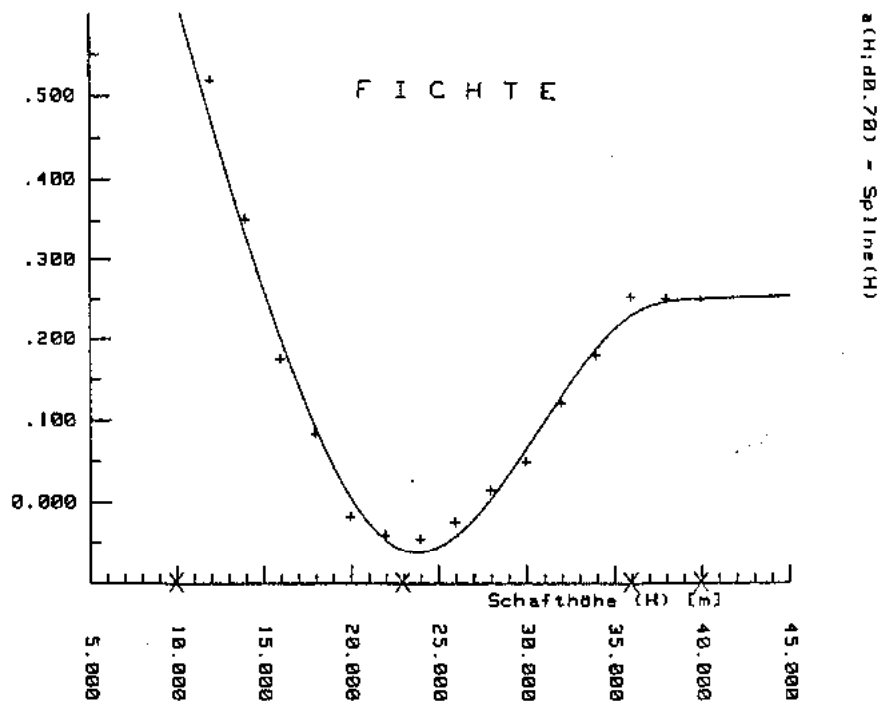


Abbildung 9a: Höhenstufe 20 (1) [m]



d0.7-Schätzung /  $a(H) = \text{Spline}(H)$  /  $b(H) = \text{Spline}(H)$

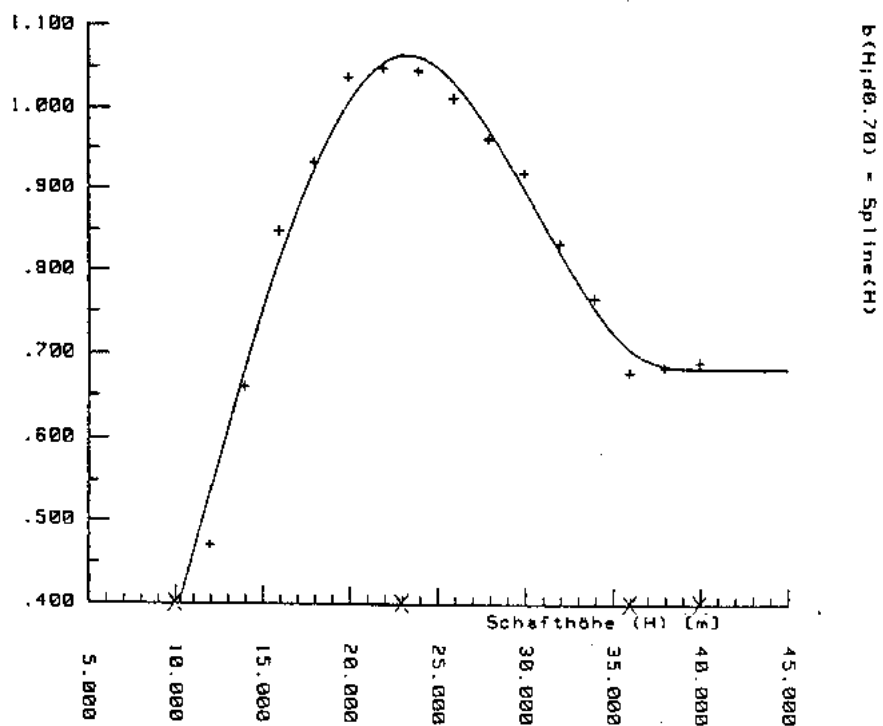


Abbildung 10

### 1.3 Modellüberprüfung

Zur Überprüfung der Modellanpassung und zur Kontrolle, ob für bestimmte Formigkeitsbereiche systematische Abweichungen zu beobachten sind, wurden die Ausbauchungsreihen der Einzelbäume ihren aus dem Modellansatz (4) ermittelten Durchmesserschätzungen gegenübergestellt. Für die relativen Durchmesserabweichungen  $(E_d - d)/E_d$  wurden, nach  $d_{0.7}$ - und Höhenstufen getrennt, und innerhalb dieser Stufen noch differenziert nach der relativen Lage der Durchmesser innerhalb des Schaftes, 0.1-0.2-0.3, ..., 0.9-1.0, Mittelwerte gebildet. Für die Nadelhölzer Fichte, Tanne, Douglasie, Kiefer, und Lärche und für die Laubbaumarten Buche, Eiche und Roteiche sind die Modellabweichungen in den Abbildungen 11a-h wiedergegeben. Als Maß für den Fehler am Einzelschaft wurden für die oben angegebenen Straten Standardabweichungen berechnet und in analoger Form dargestellt (vgl. Abbildung 12a-h). Die Zahlen unter den einzelnen Säulen geben Auskunft über die Anzahl der Messwerte, die zur Mittelbildung innerhalb einer bestimmten Stammsektion zur Verfügung standen. Die Zahl an der linken Seite der Diagramme für eine bestimmte  $d_{0.7}$  - / Höhenstufe gibt an, wie viel Einzelbäume innerhalb dieser Klasse bei den Berechnungen berücksichtigt worden sind. Beispielsweise standen bei den Fichten insgesamt 477 Messreihen von Stämmen mit einer mittleren Höhe von 30 m und einem mittleren  $d_{0.7}$  von .80 zur Überprüfung des Modells zur Verfügung, davon fielen insgesamt 788 Einzelmesswerte in die Relativsektion 0.2-0.3 an der Stammspitze.

Über alle Baumarten hinweg kann für die mittleren, gut mit Daten abgedeckten Straten eine gute bis sehr gute Anpassung konstatiert werden. In den Randbereichen, für Schäfte mit überdurchschnittlich hohen bzw. niedrigen Formquotienten  $d_{0.7}$  sind höhere Abweichungen zu beobachten, die in Einzelfällen an der Schaftspitze die 5% Marke überschreiten.

Die vergleichsweise großen Abweichungen in der Schaftspitze, die auch bei den mittleren Fehlern wiederzufinden sind, spiegeln die tatsächlichen Varianzverhältnisse in den Urdaten wieder (vgl. Abbildung 5). Die tatsächlichen Messwerte weisen nämlich, bei festen Werten für die Höhe, die Stärke und den  $d_{0.7}$  und einem Durchmesser Verhältnis aus der unmittelbaren Umgebung enger als mit einem Durchmesser aus der Schaftspitze. Eine zweite Ursache für die größeren Abweichungen im Wipfelbereich ist das Berechnungsverfahren. Bei der Schätzung der Modellparameter nach der Me-

thode der kleinsten Quadrate werden die absoluten Abweichungen und nicht die relativen minimiert. Gleiche absolute Abweichungen werden aber beim Übergang zu relativierten Durchmesserabweichung im Bereich der Schaftspitze gegenüber den entsprechenden Werten aus dem unteren Schaftbereich vergrößert wiedergegeben.

Eine Möglichkeit, die Anpassungsergebnisse an der Schaftspitze zu verbessern, bestünde darin, die Messwerte aus dem Wipfelbereich bei der Modellanpassung mit einem hohen Gewicht zu versehen. Insbesondere würden durch die Verwendung von Gewichten, die umgekehrt proportional zum beobachteten Durchmesser Verhältnis sind, die relativen Abweichungen minimiert werden. Ist eine solche Gewichtung aber sinnvoll? Nein. Zwei Gründe sprechen dagegen. Erstens müsste eine verbesserte Anpassung im Wipfelbereich durch Einbußen an Genauigkeit im unteren und mittleren Schaftbereich erkauft werden. Selbst eine nur geringfügige Verschlechterung der Durchmesserschätzungen im unteren Schaftbereich hätte aber aufgrund der Tatsache, dass sich über 80% der Holzmasse in den beiden unteren Schaftdritteln konzentriert, einen beträchtlichen Genauigkeitsverlust bei der Volumenschätzung zur Folge.

Ein zweites, aus der statistischen Theorie entlehntes Argument spricht gegen eine höhere Gewichtung der Messwerte aus dem Wipfelbereich. Vom Standpunkt der statistischen Theorie betrachtet, wird die unterschiedliche Gewichtung von Messwerten im Zusammenhang mit der Regressionsrechnung ausschließlich zur Homogenisierung der Fehlervarianzen, d.h. zur Beseitigung eventuell vorhandener Heteroskedastie, eingesetzt. Dabei sind genauere Messwerte, d.h. solche mit einer geringeren Fehlervarianz, mit einem höheren und weniger genaue Messungen mit einem geringeren Gewicht zu versehen; d.h. bei der Berücksichtigung statistischer Grundsätze hätte man Durchmesserwerte aus dem Wipfelbereich nicht mit einem höheren sondern mit einem geringeren Gewicht zu versehen. Da im unteren Schaftbereich auch ohne Gewichtung gute Anpassungsergebnisse beobachtet werden konnten, wurde, um die Abweichungen in der Schaftspitze nicht noch weiter zu vergrößern, auf eine Gewichtung der Messwerte nach statistischen Grundsätzen verzichtet. Die gewöhnliche KQ-Schätzung garantiert auch bei Heteroskedastie unverzernte Schätzungen, wobei die Minimum-Varianzeigenschaft i.a. verloren geht. Die theoretischen Aspekte zu diesem Problemkreis sollen an dieser Stelle nicht weiter vertieft werden. Nähere Ausführungen hierzu findet man in KUBLIN (1987).

In Ergänzung zu den Durchmesserabweichungen und zur Überprüfung der Formgleichungen im Zusammenhang mit der Volumenermittlung wurden einzelbaumweise Derbholzformzahlen aus den Schaftkurven berechnet, den über die sektionsweise Kubierung berechneten Formzahlen gegenübergestellt und summarisch nach Höhen-, Durchmesser- und  $d_{0.7}$ -Stufen ausgewertet und dargestellt (vgl. Abbildung 13a-h).

Die Problematik bei der Berechnung des Derbholzvolumens bei Laubbäumen wird in HRADETZKY, KUBLIN, SCHARNAGL und SCHÖPFER (1986) ausführlich dargestellt und diskutiert. Insbesondere wird darauf hingewiesen, dass es bei schwachen Hölzern im Falle eines überproportionalen Anteils wipfelschäftiger Bäume in den Grunddaten zur Überschätzung der mittleren Schaftform kommen kann. Ein solcher Effekt ist beispielsweise bei der Buche in den Höhenstufen 15 und 20 m mit überwiegend positiven Formzahlabweichungen zu beobachten, d.h. die Formzahlen des Modells sind größer als die mittleren Formzahlen der Probestämme in diesem Bereich. Bei der Anwendung der Gleichungen kann diesem Trend durch die Heraufsetzung der Derbholzgrenze auf einen Wert größer als 7 cm entgegengewirkt werden.

Abbildung 11a

Mittlere Abweichung der Durchmesser [%] - Fichte

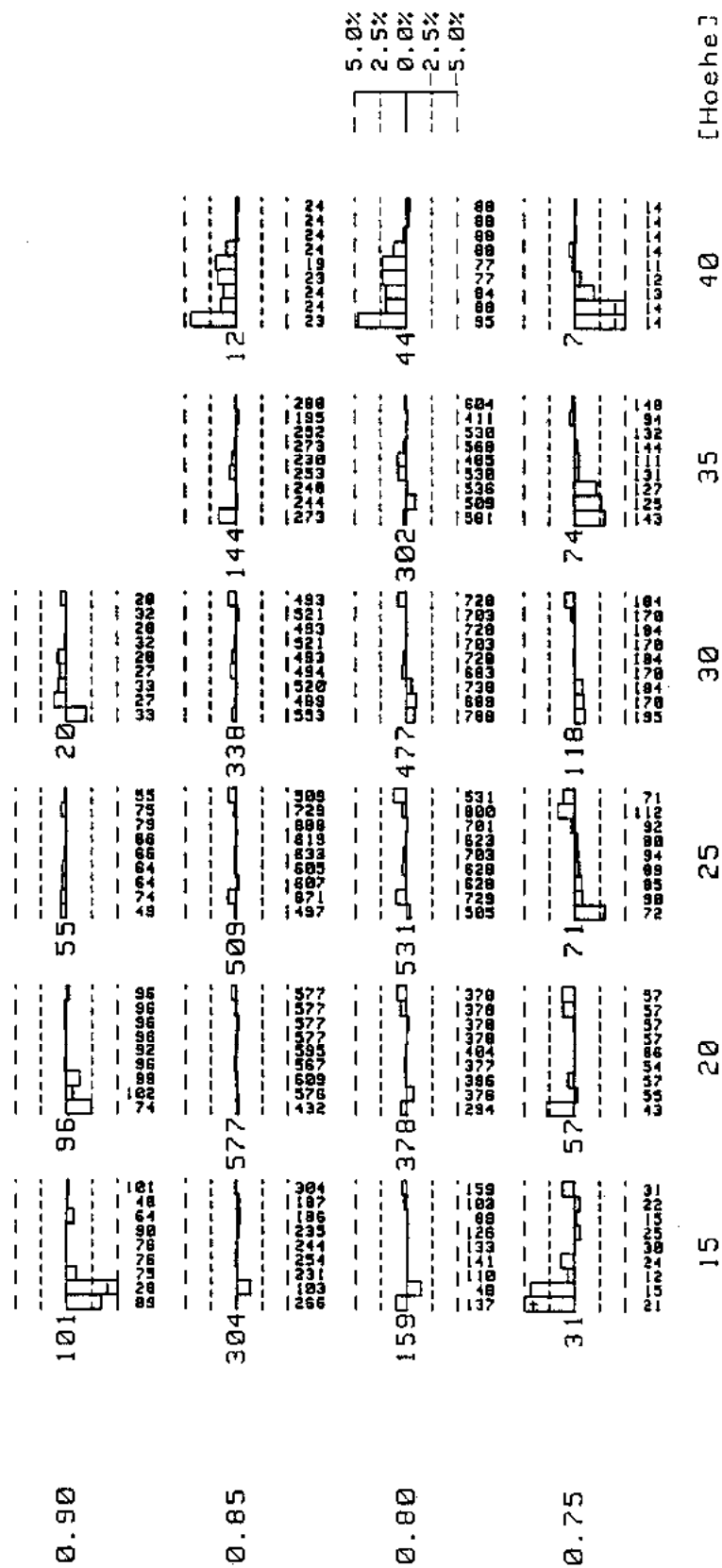


Abbildung 12a

# Mittlerer Fehler der Durchmesser [%] - Fichte

Abbildung

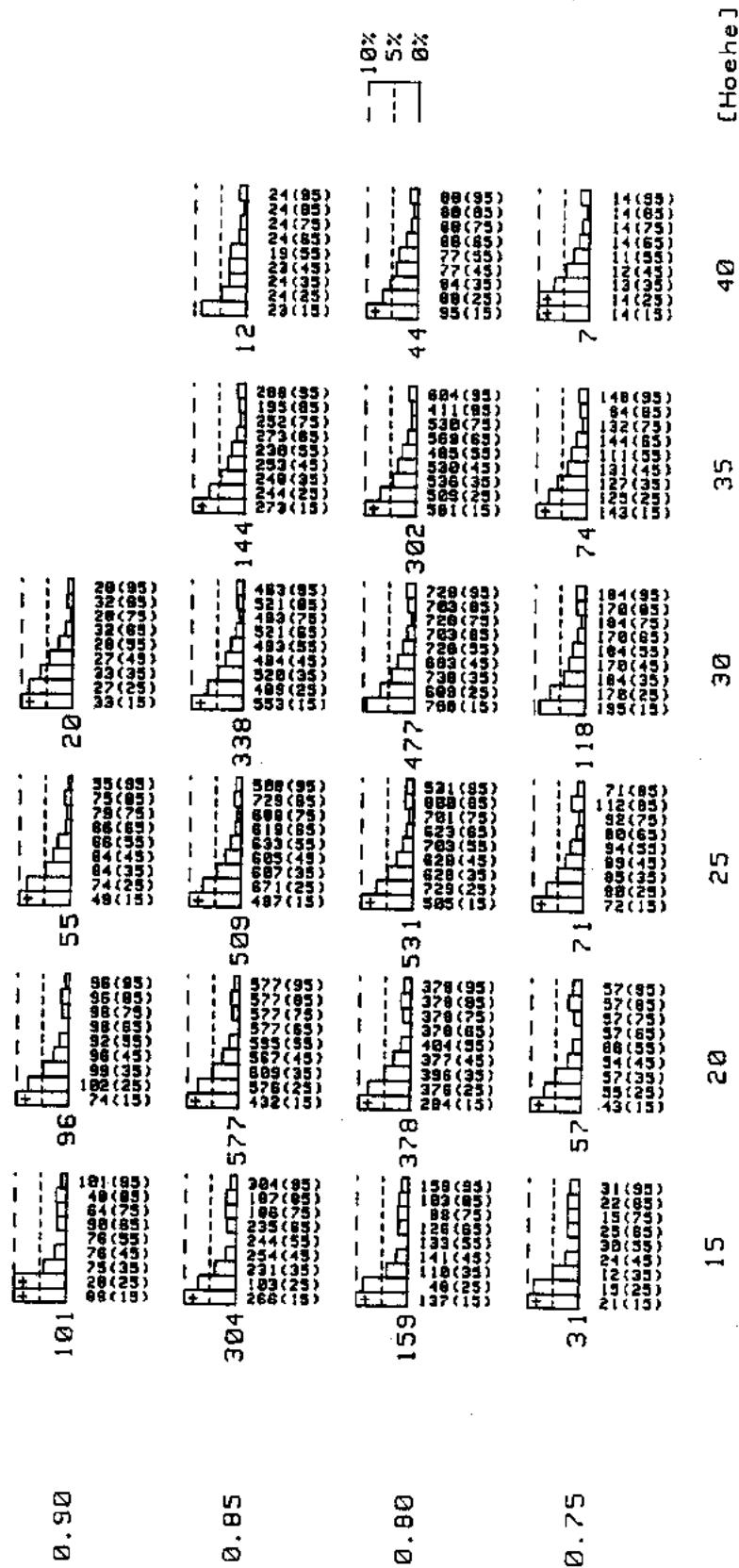


Abbildung 13a

# Mittlere Abweichung der Formzahl [%] - Fichte

Durchmesserstufen: 11,13,15,17,19,22,26,30,34,38,>40 [cm]

Abbildung 1

[d 0.7]

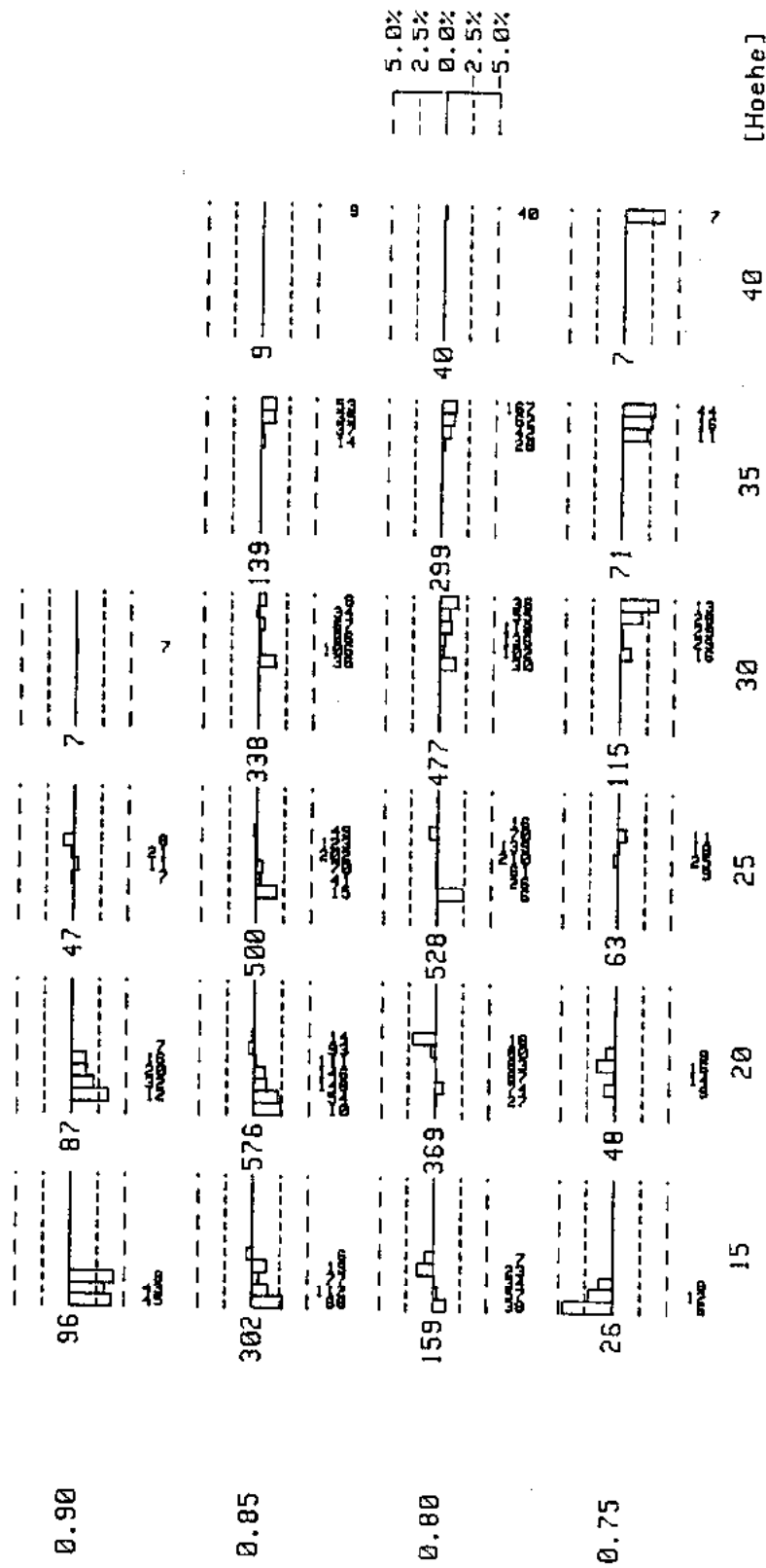




Abbildung 11b

# Mittlere Abweichung der Durchmesser [%] - Tanne

Abbildung

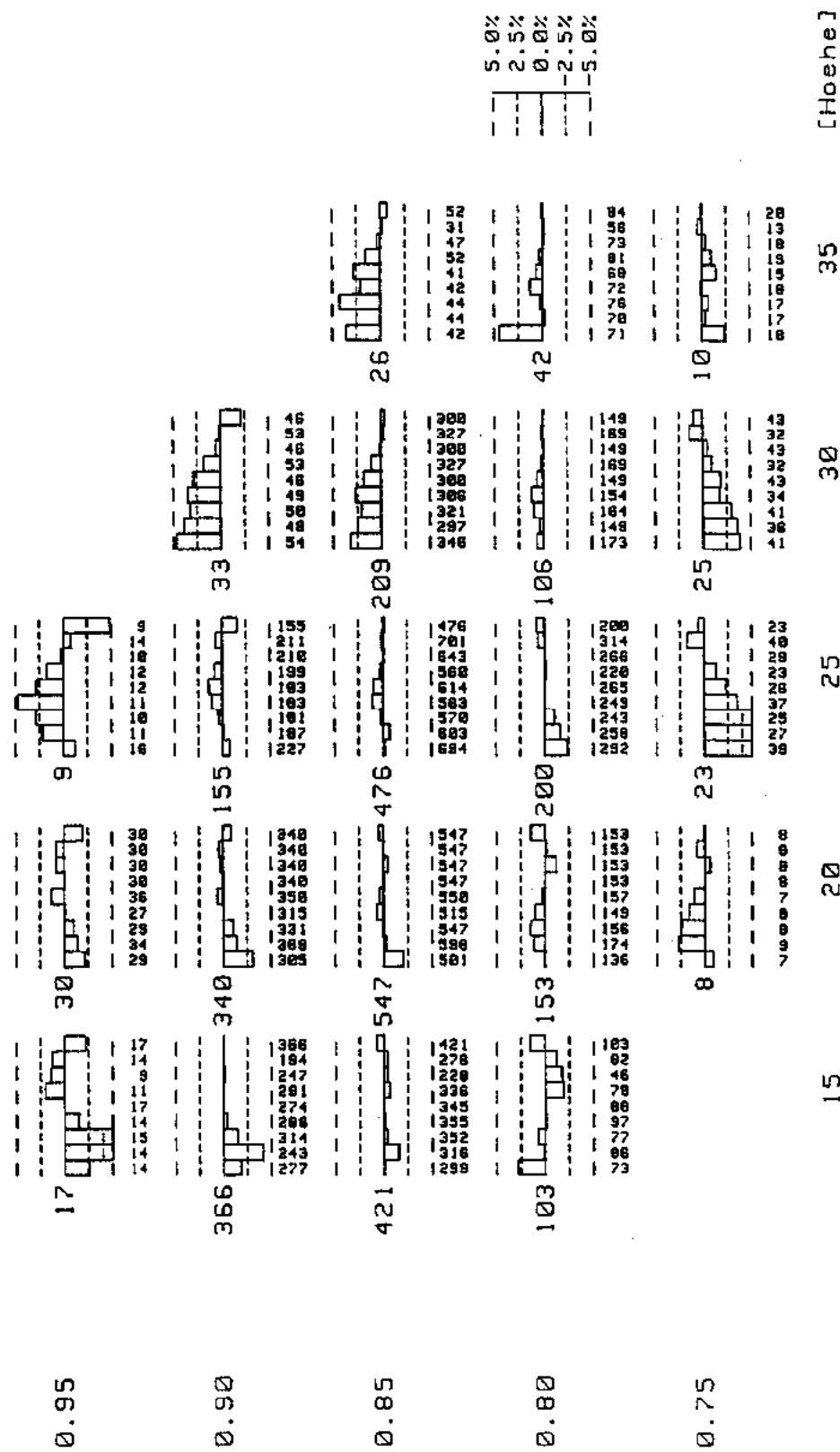


Abbildung 12b

## Mittlerer Fehler der Durchmesser [%] - Tanne

Abbildung

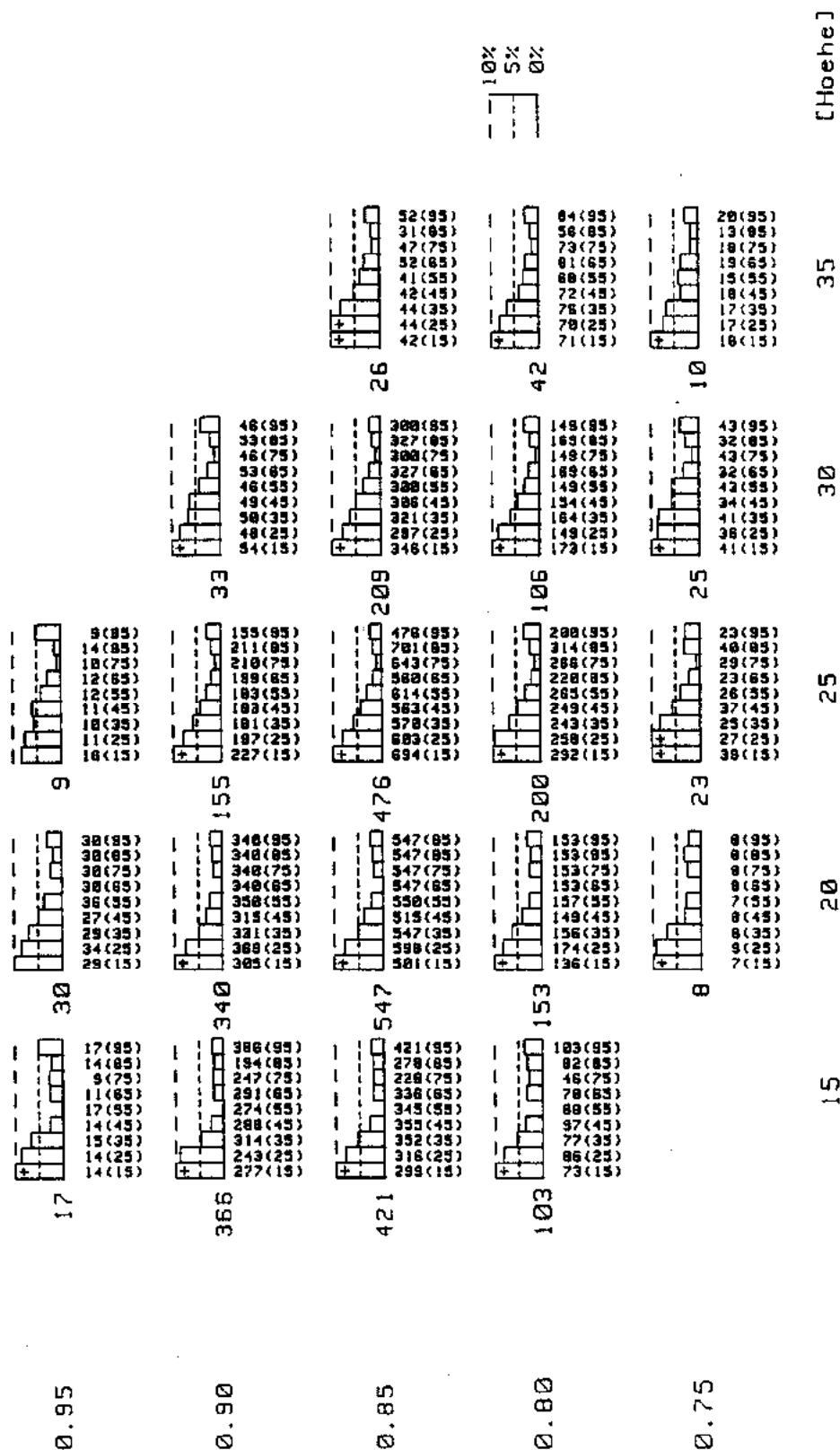


Abbildung 13b

# Mittlere Abweichung der Formzahl [%] - Tanne

Durchmesserstufen: 11,13,15,17,19,22,26,30,34,38,>40 [cm]

[d 0.7]

Abbildung

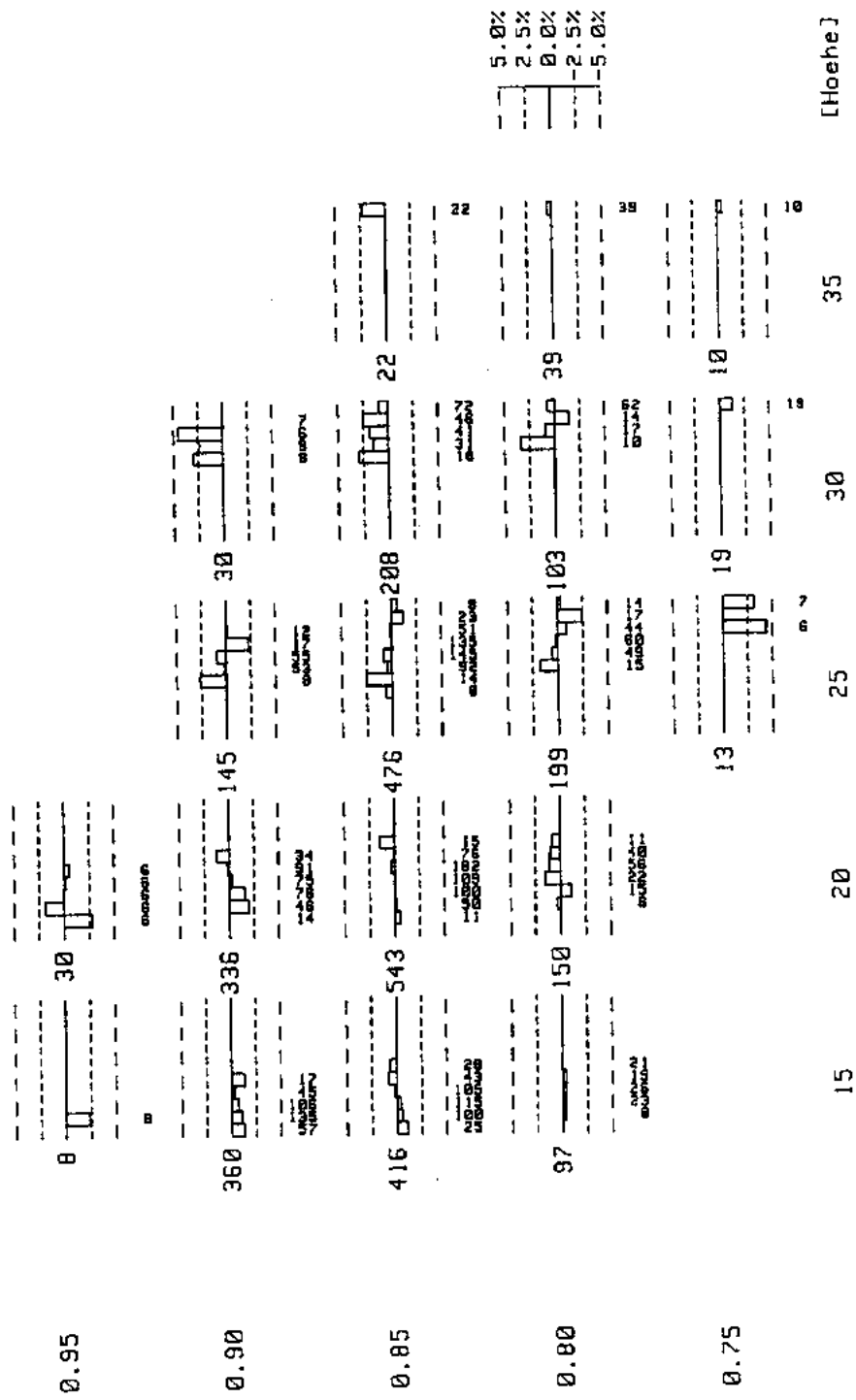
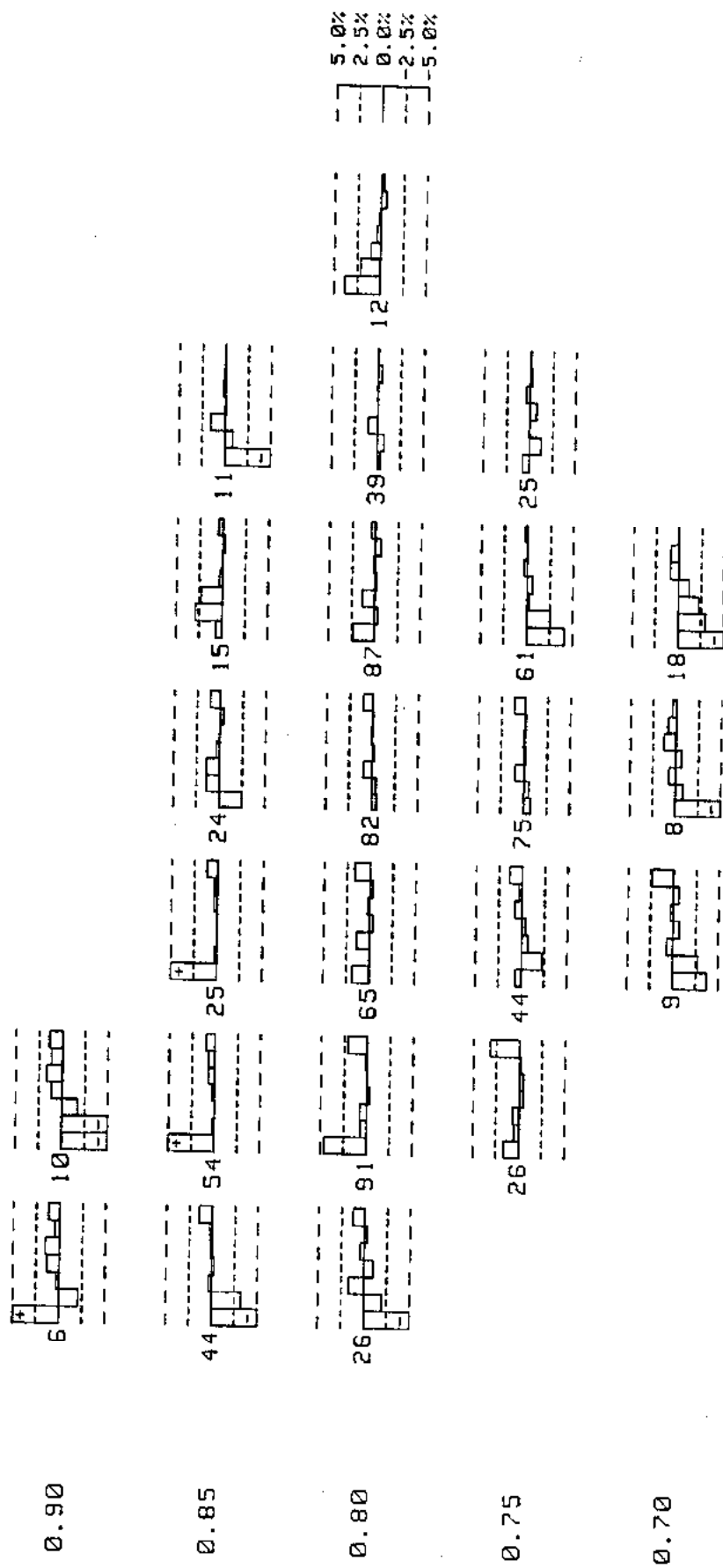


Abbildung 11c

Mittlere Abweichung der Durchmesser [%] - Douglasie

Abbildung

[d 0.7]



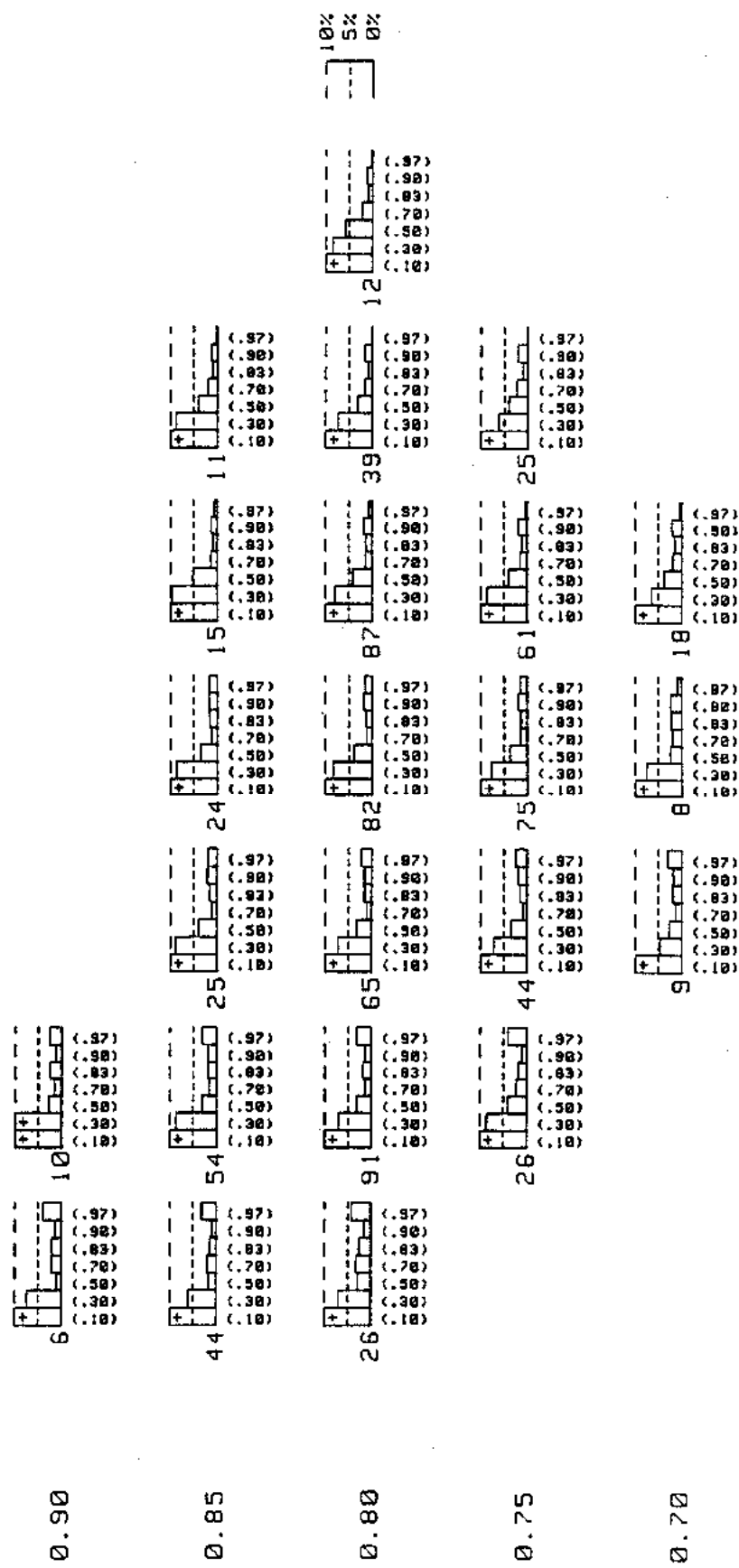
15 20 25 30 35 40 45 [Höhe]

Abbildung 12c

# Mittlerer Fehler der Durchmesser [%] - Douglasie

Abbildung

[d 0.7]



[Höhe]

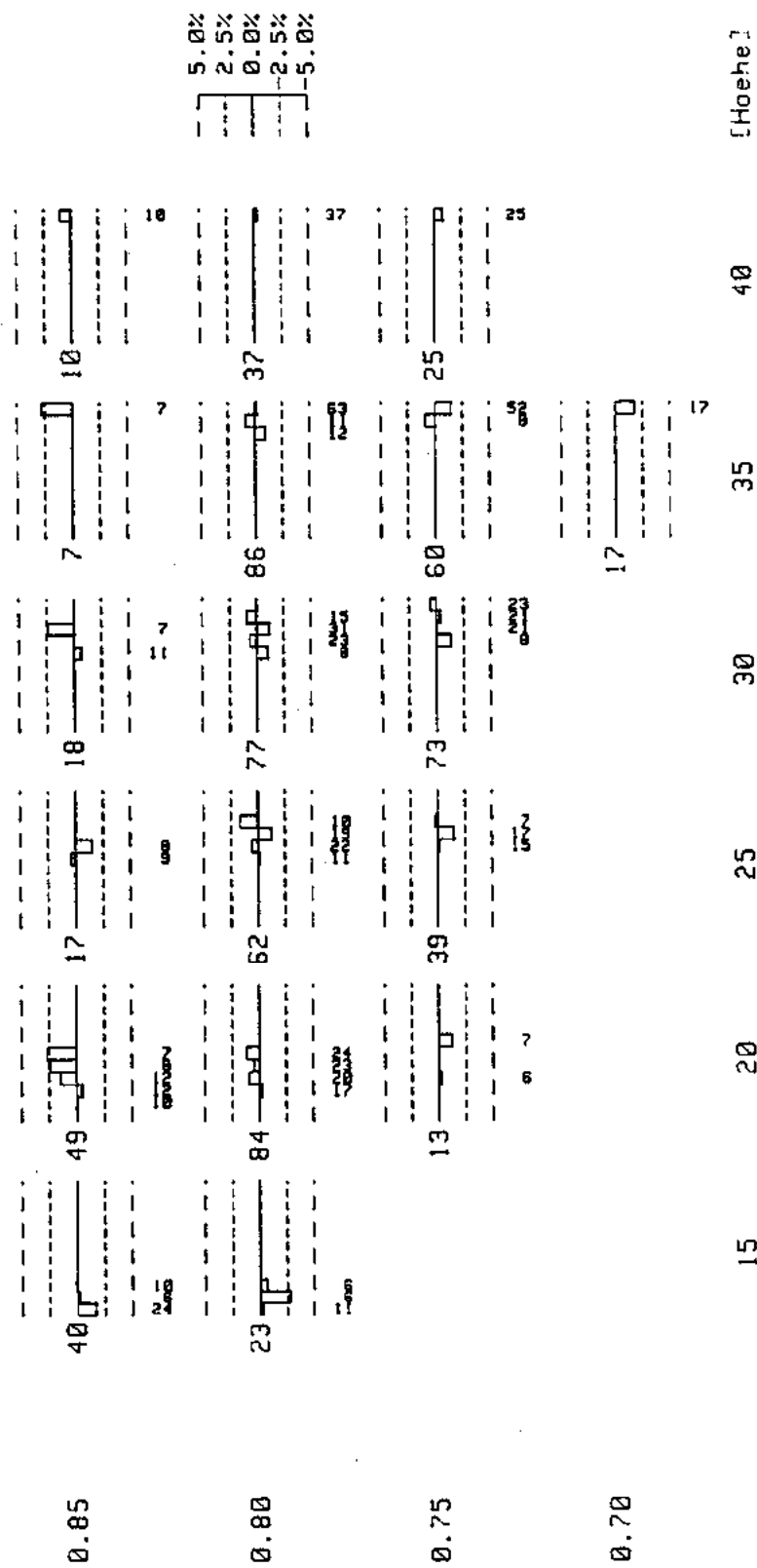
Abbildung 13c

# Mittlere Abweichung der Formzahl [%] - Douglasie

Durchmesserstufen: 11, 13, 15, 17, 19, 22, 26, 30, 34, 38, >40 [cm]

Abbildung

[d 0.7]



ប្រែសម្រួល ១១ កញ្ញា

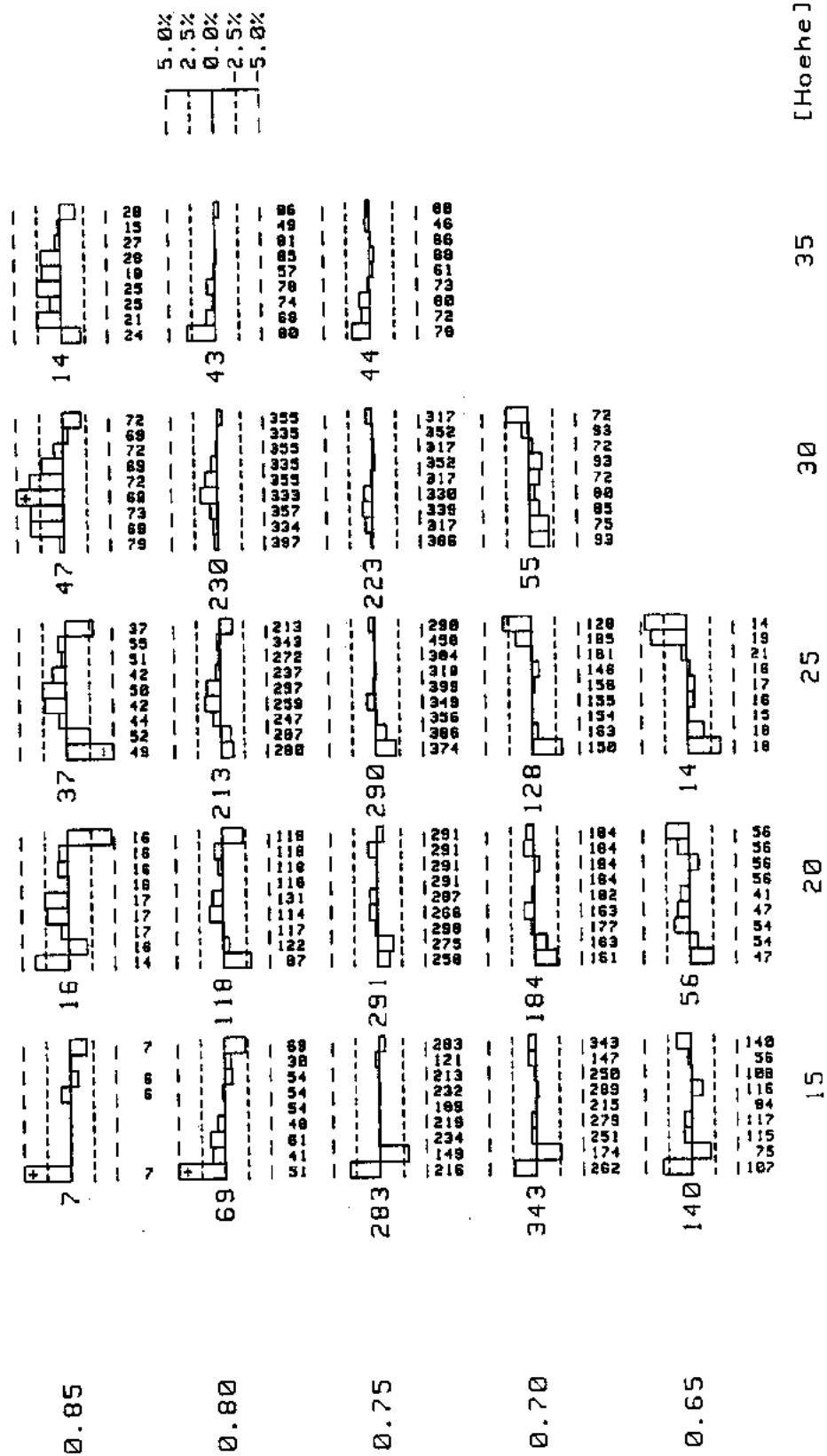


Abbildung 12d

## Mittlerer Fehler der Durchmesser [%] - Kiefer

Abbildung

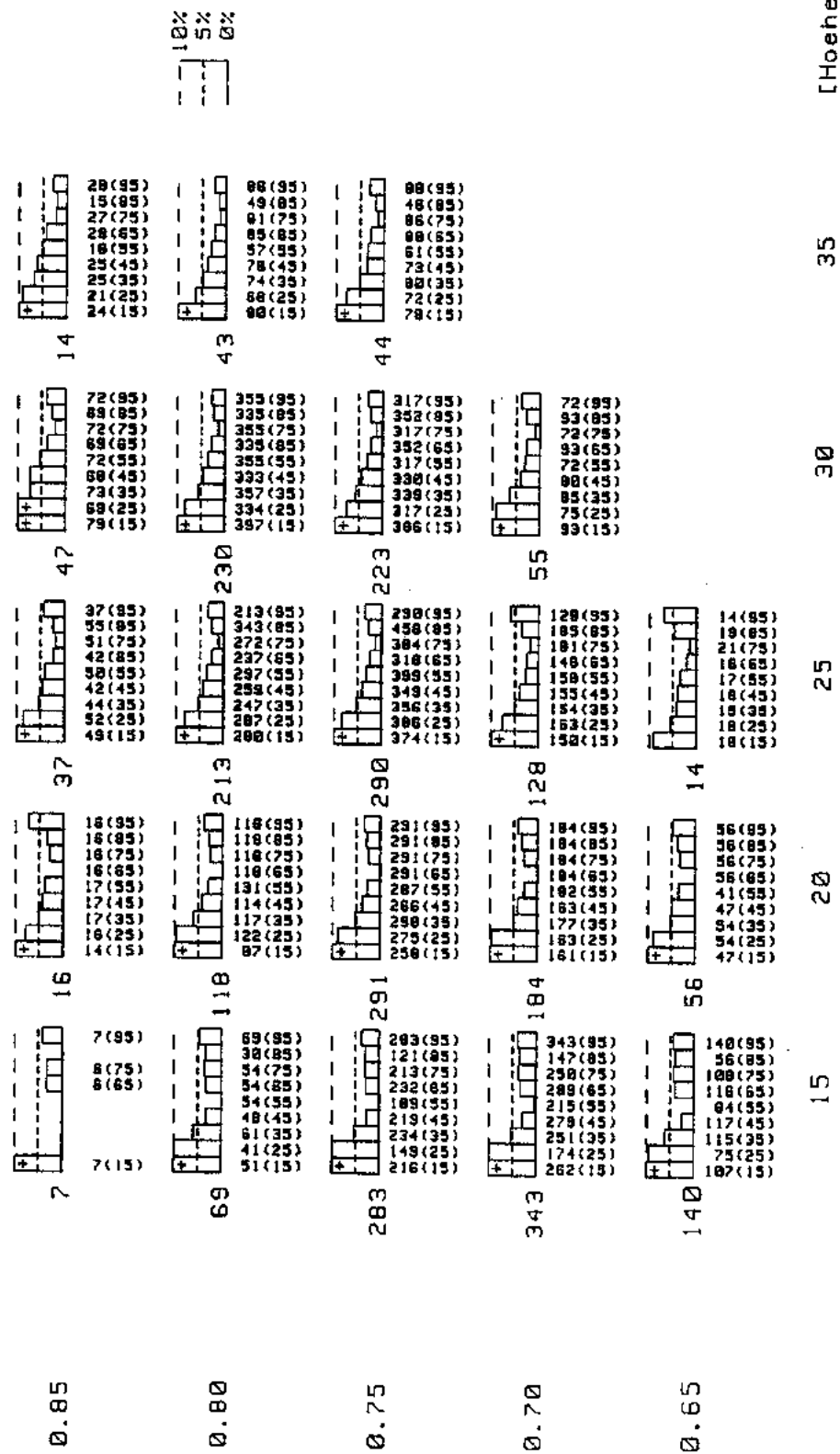




Abbildung 13d

# Mittlere Abweichung der Formzahl [%] - Kiefer

Durchmesserstufen: 11,13,15,17,19,22,26,30,34,38,40 [cm]

[d 0.7]

Abbildung

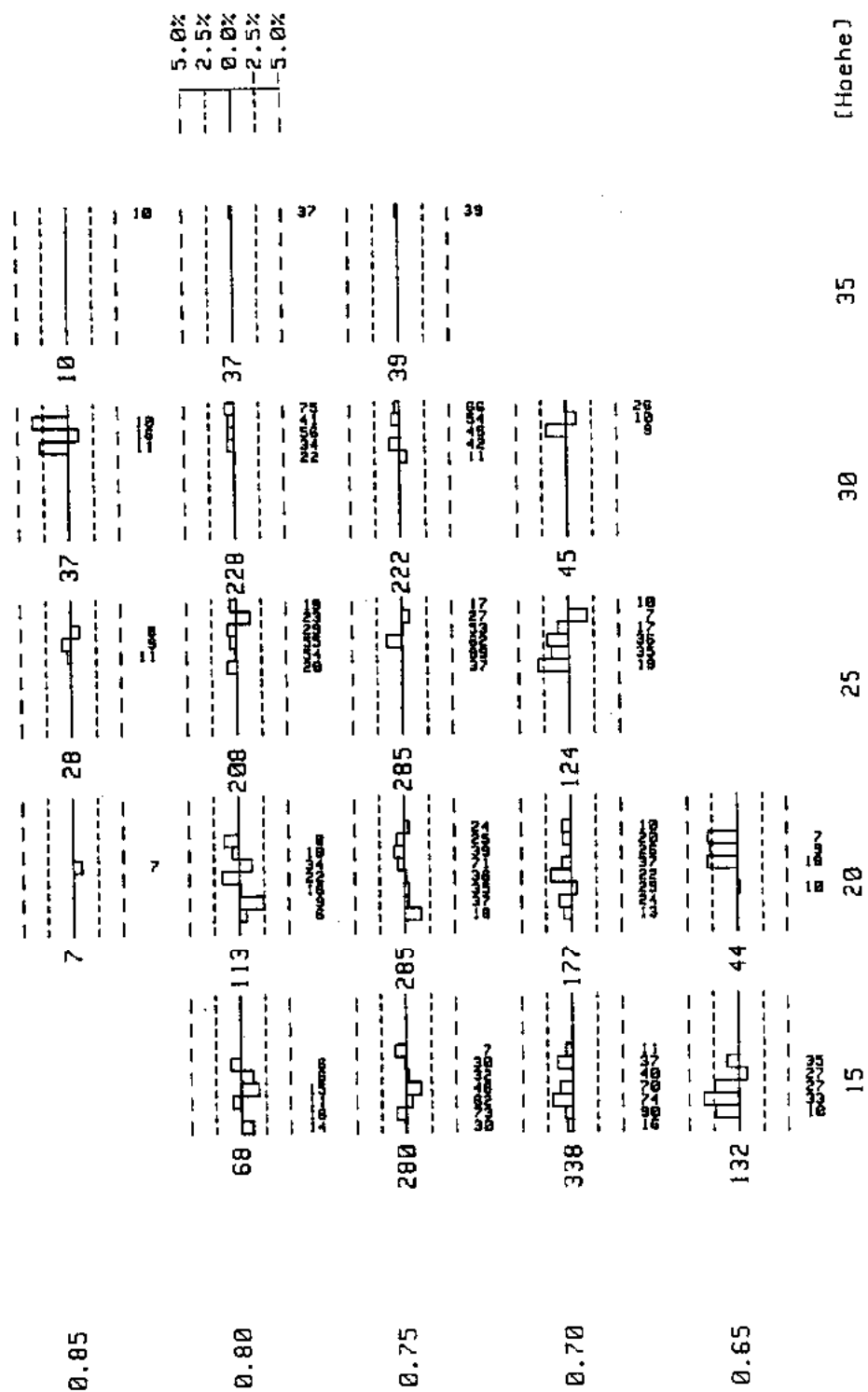


Abbildung 11e

# Mittlere Abweichung der Durchmesser [%] - Lärche

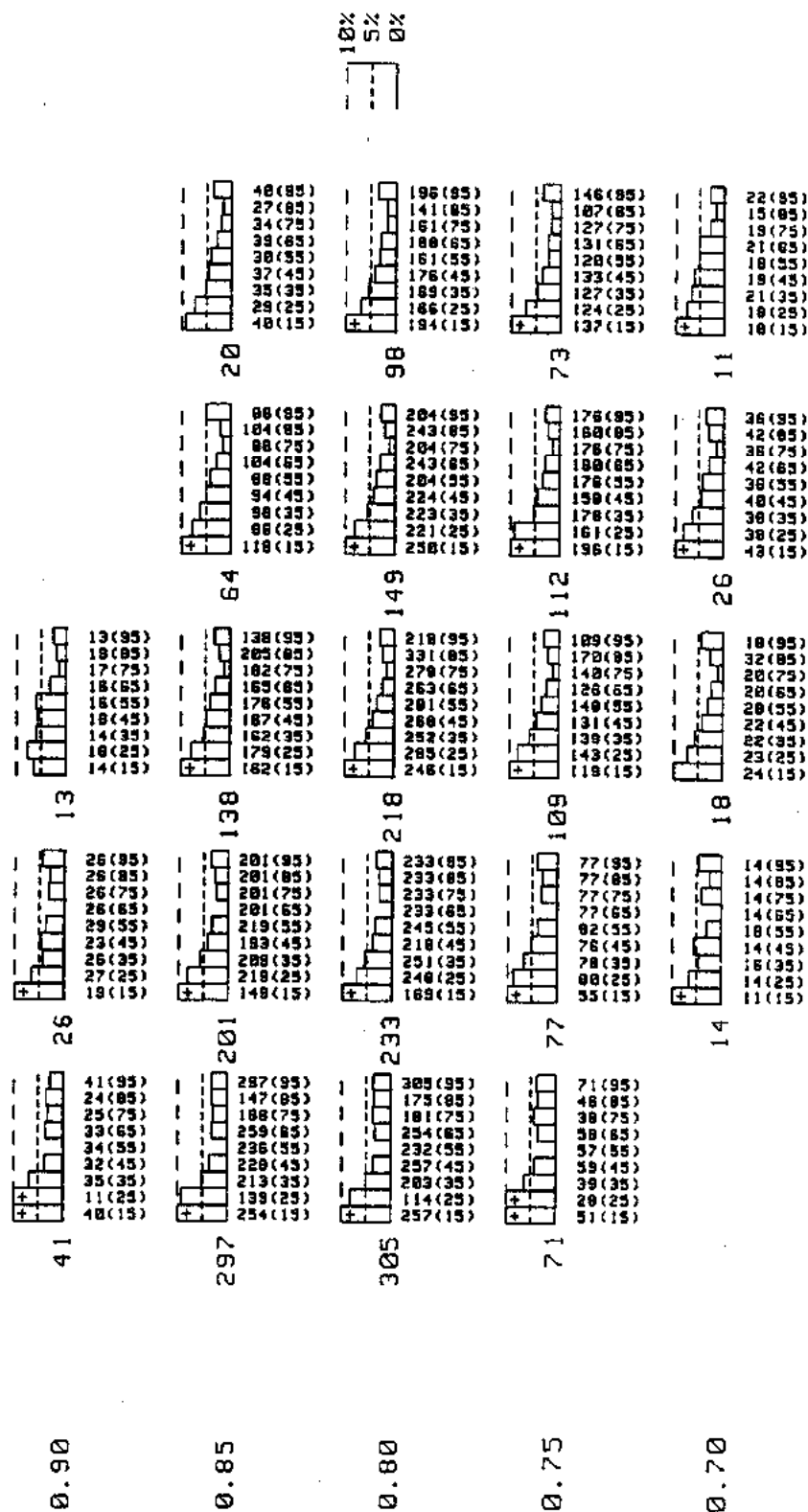
Abbildung



Abbildung 12e

# Mittlerer Fehler der Durchmesser [%] - Lärche

Abbildung



[Höhe]

Abbildung 13e

# Mittlere Abweichung der Formzahl [%] - Lärche

Durchmesserstufen: 11,13,15,17,19,22,26,30,34,38,40 [cm]

[d 0.7]

Abbildung

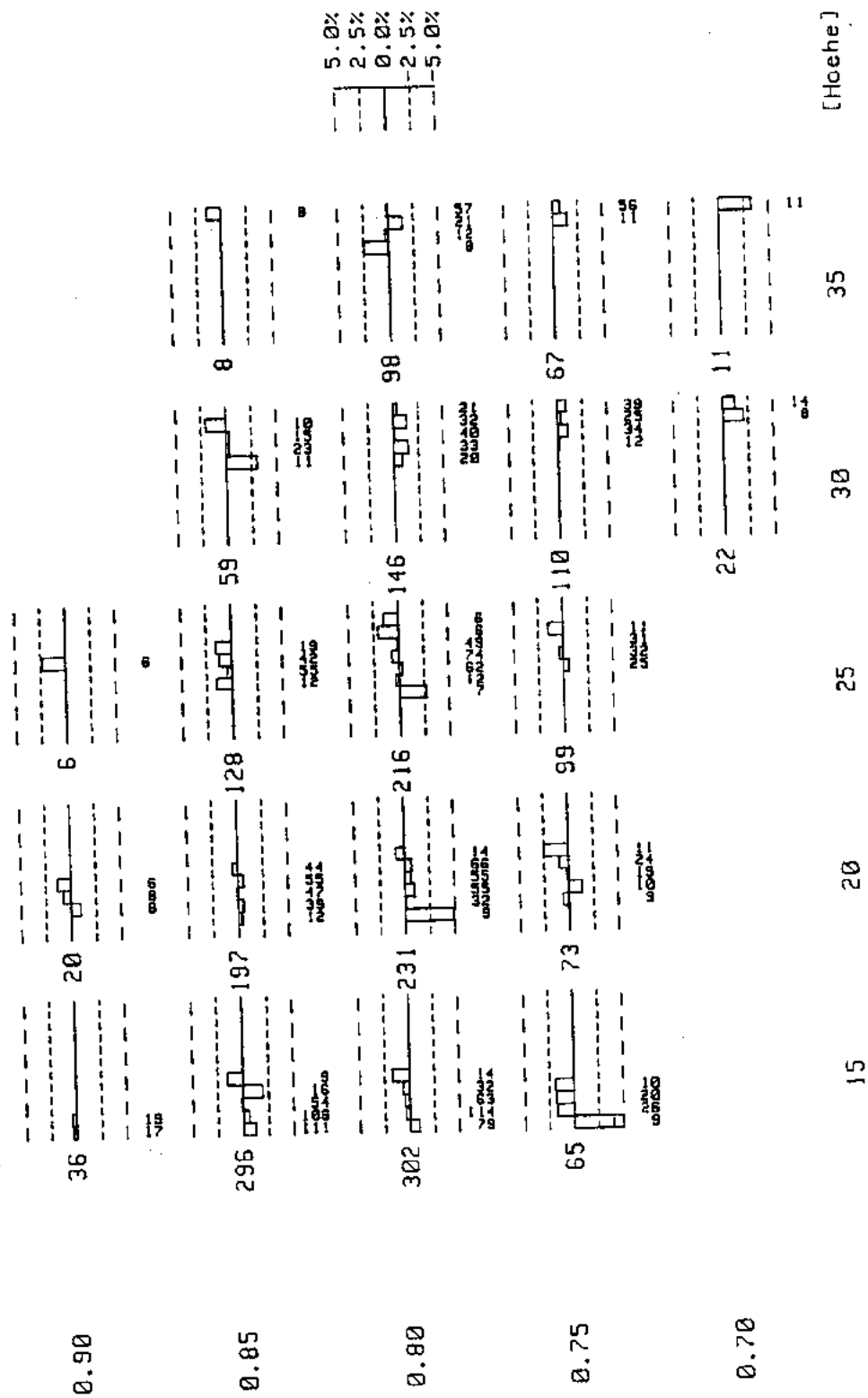


Abbildung 11f

# Mittlere Abweichung der Durchmesser [%] - Buche

Abbildung

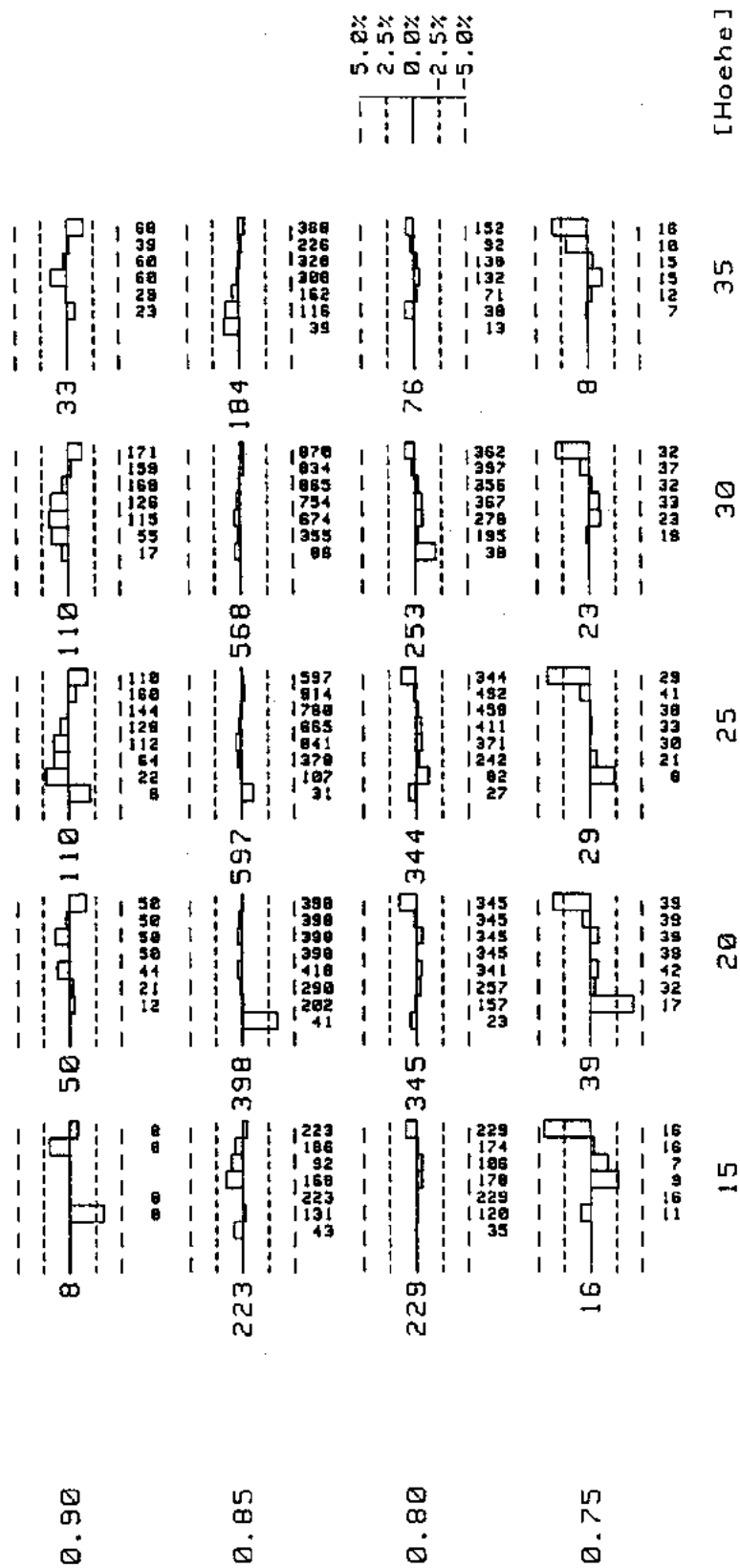


Abbildung 12f

# Mittlerer Fehler der Durchmesser [%] - Buche

Abbildung

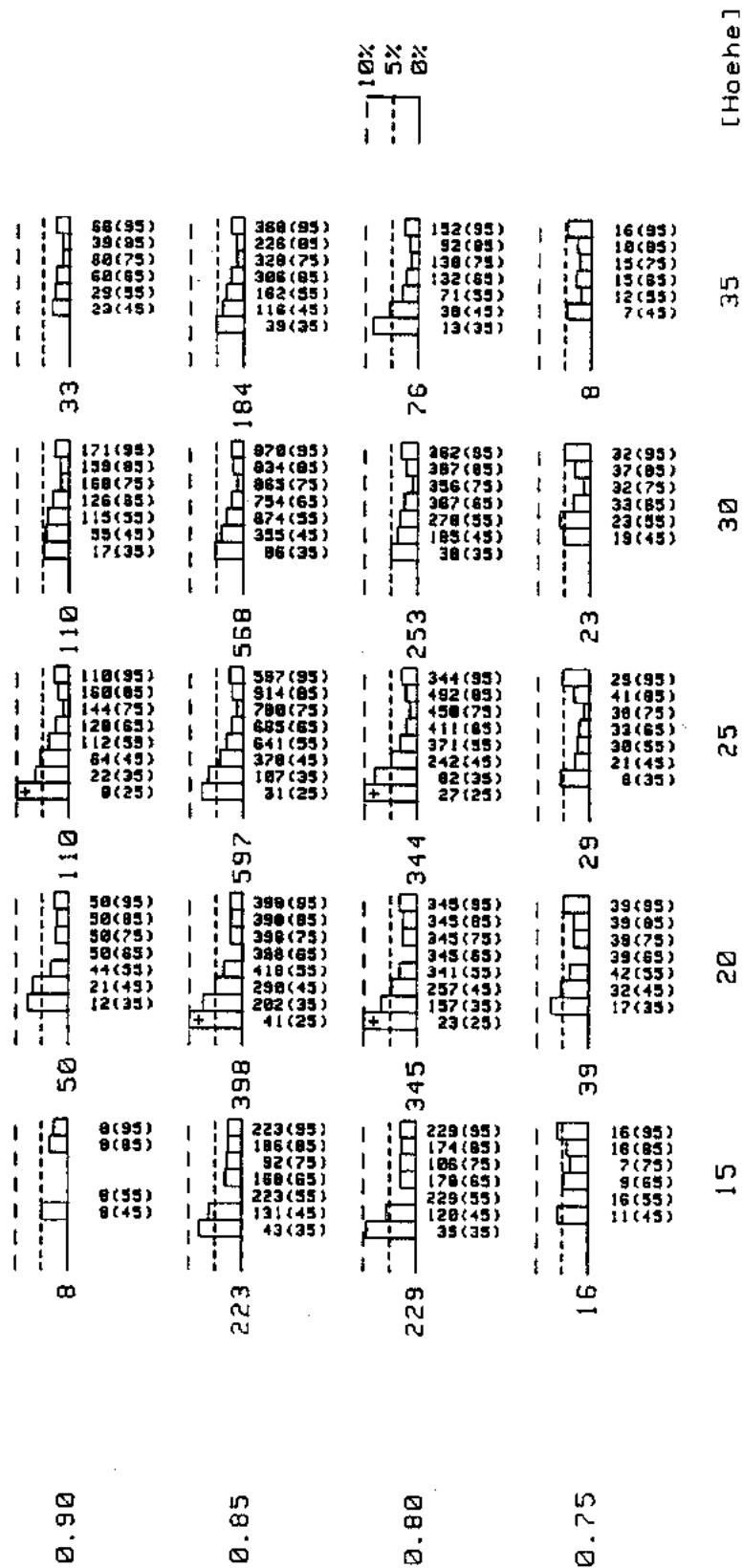


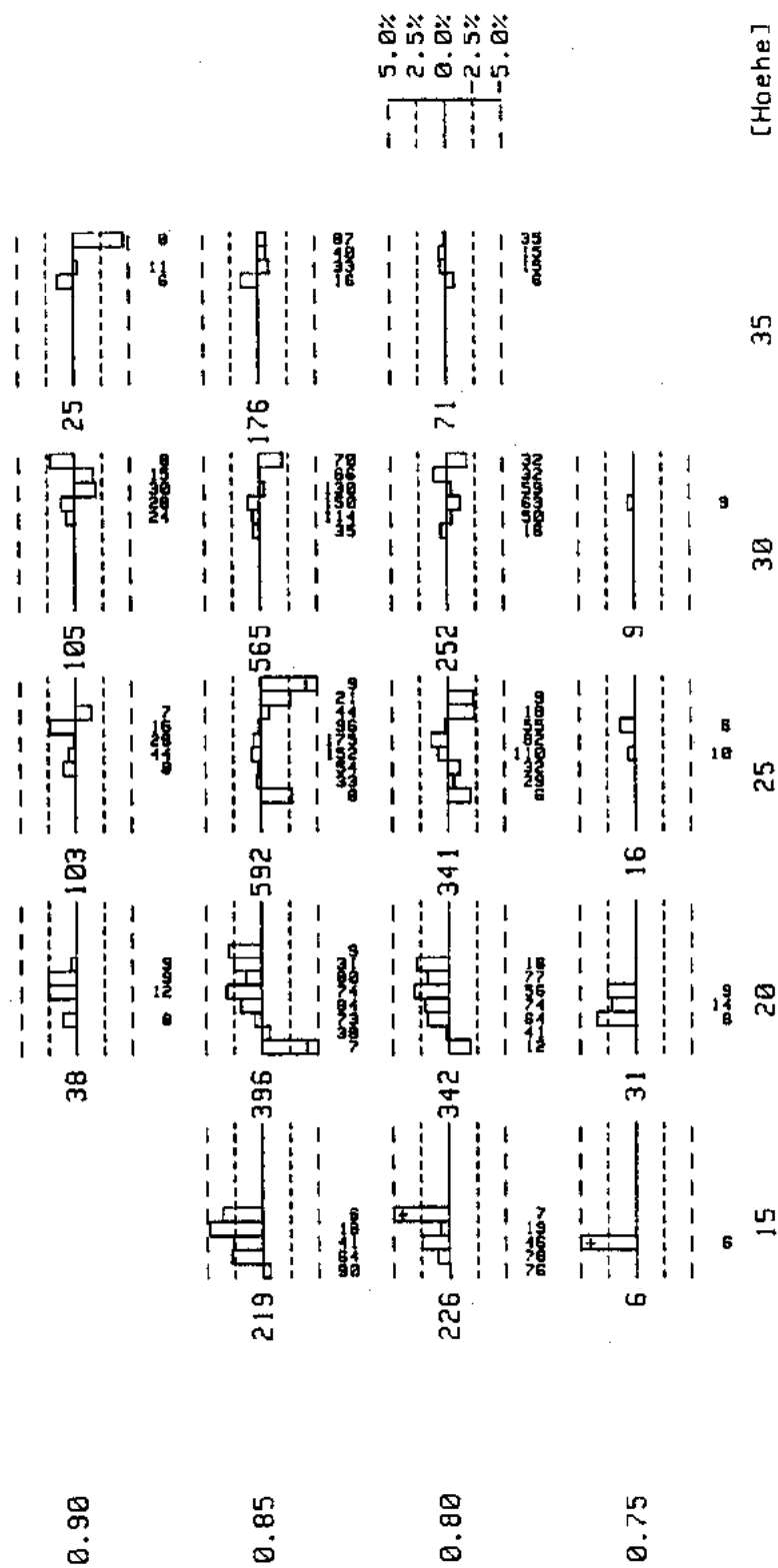
Abbildung 13f

# Mittlere Abweichung der Formzahl [%] - Buche

Durchmesserstufen: 11,13,15,17,19,22,26,30,34,38,>40 [cm]

Abbildung

[d 0.7]



## Abbildung

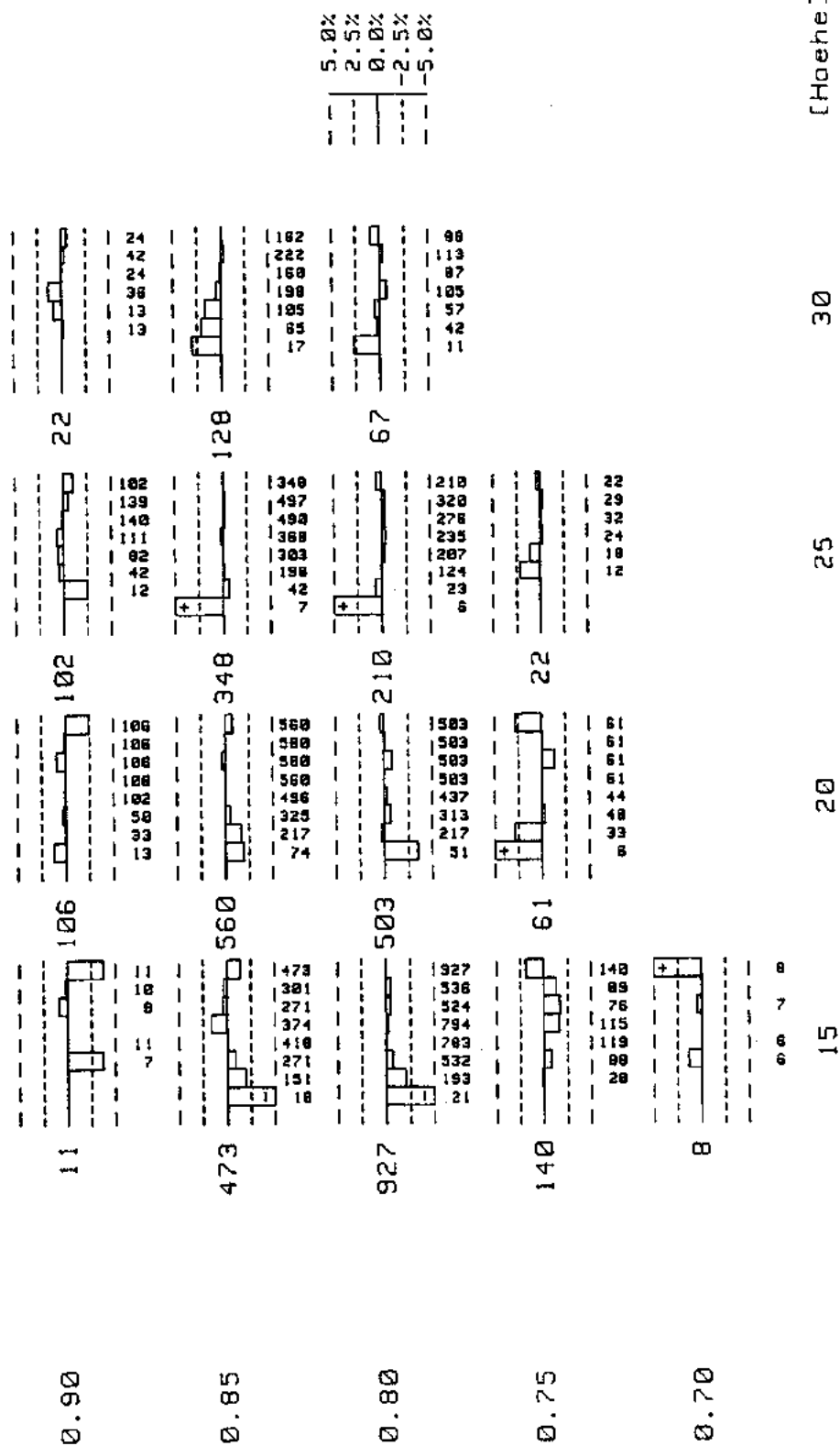




Abbildung 12g

# Mittlerer Fehler der Durchmesser [%] - Eiche

Abbildung

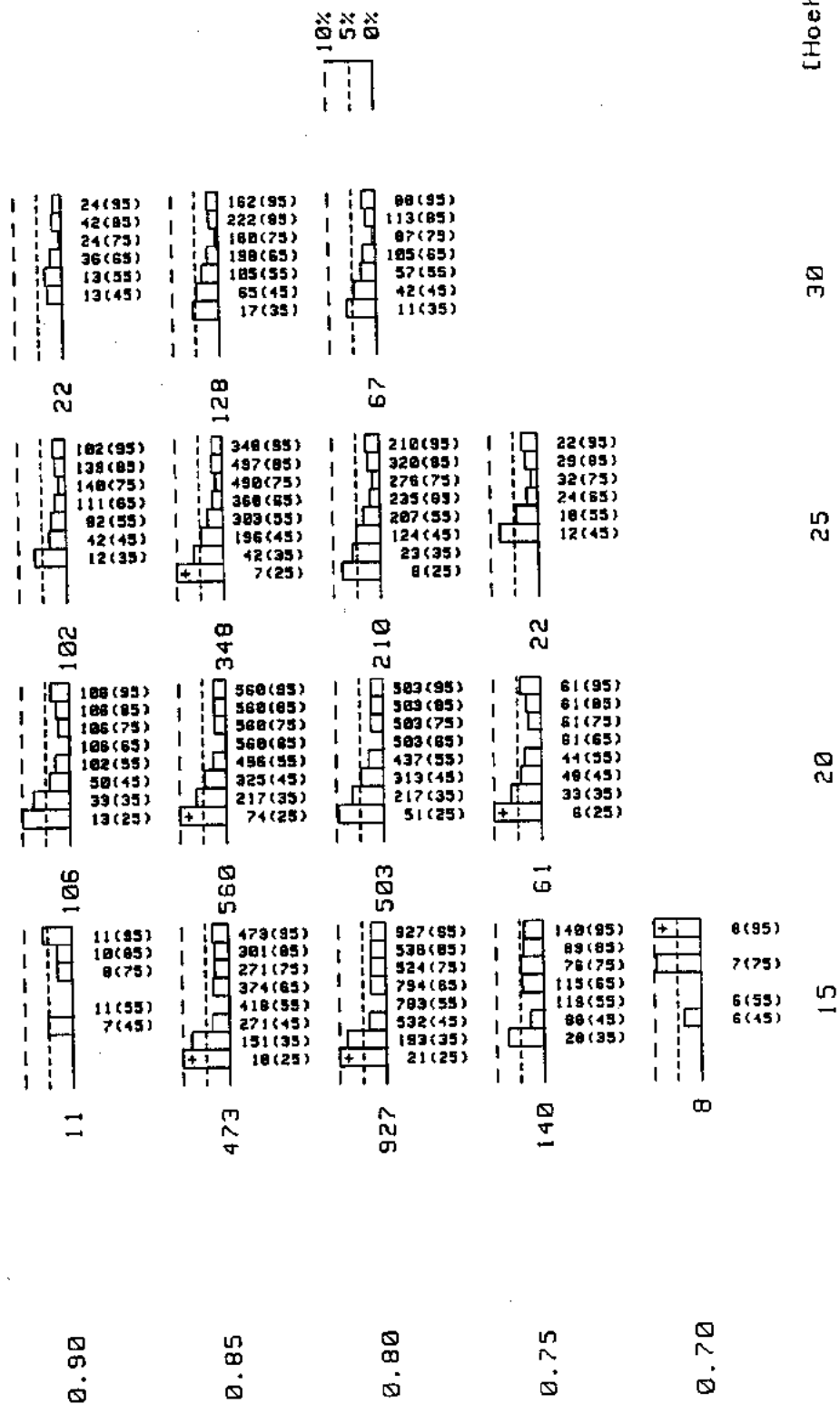


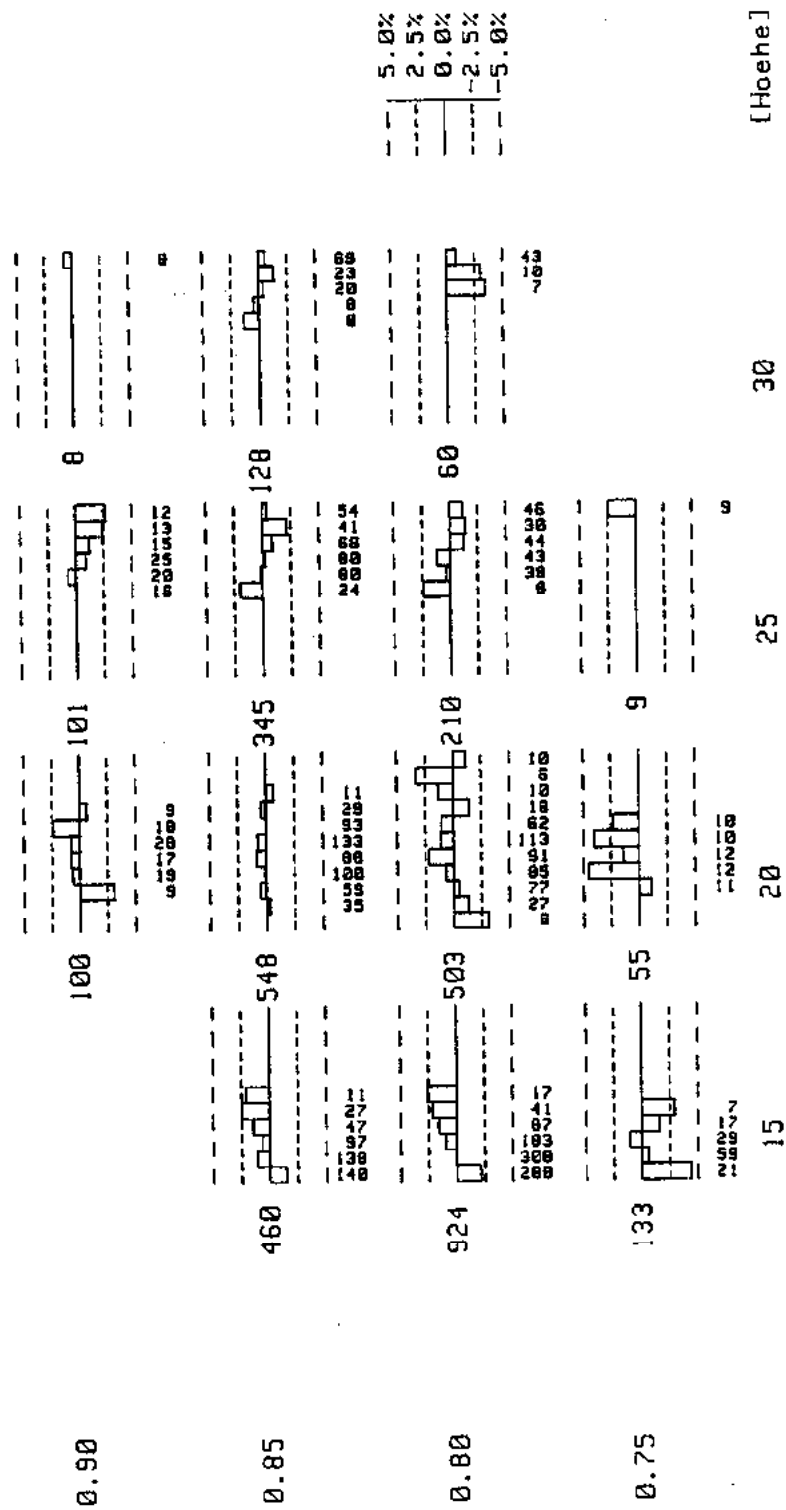
Abbildung 13g

# Mittlere Abweichung der Formzahl [%] - Eiche

Durchmesserstufen: 11, 13, 15, 17, 19, 22, 26, 30, 34, 38, >40 [cm]

Abbildung

[d 0.7]



[Hoehe]

Abbildung 11h

Mittlere Abweichung der Durchmesser [%] - Roteiche

Abbildung

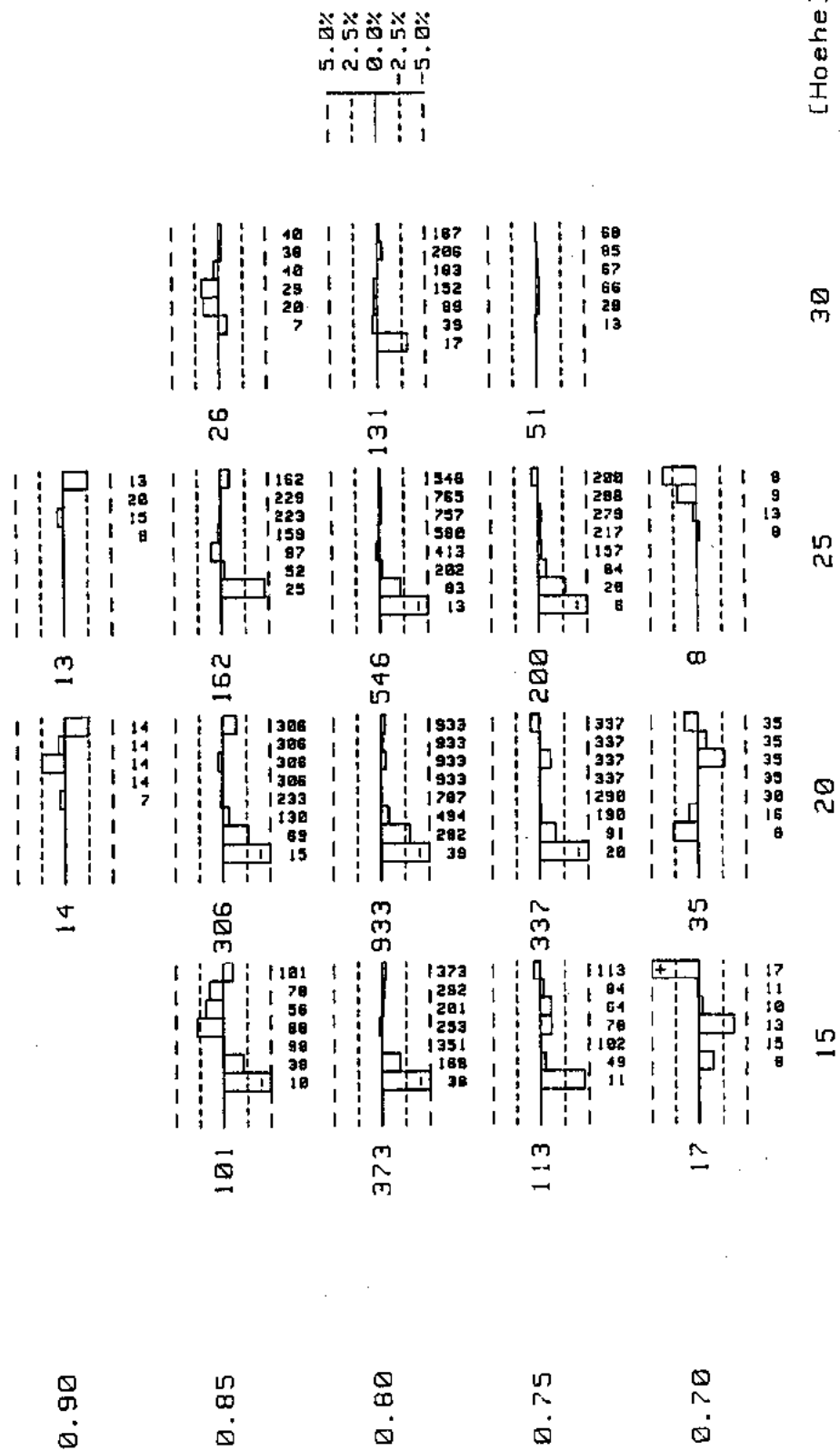


Abbildung 12h

# Mittlerer Fehler der Durchmesser [%] - Roteiche

Abbildung

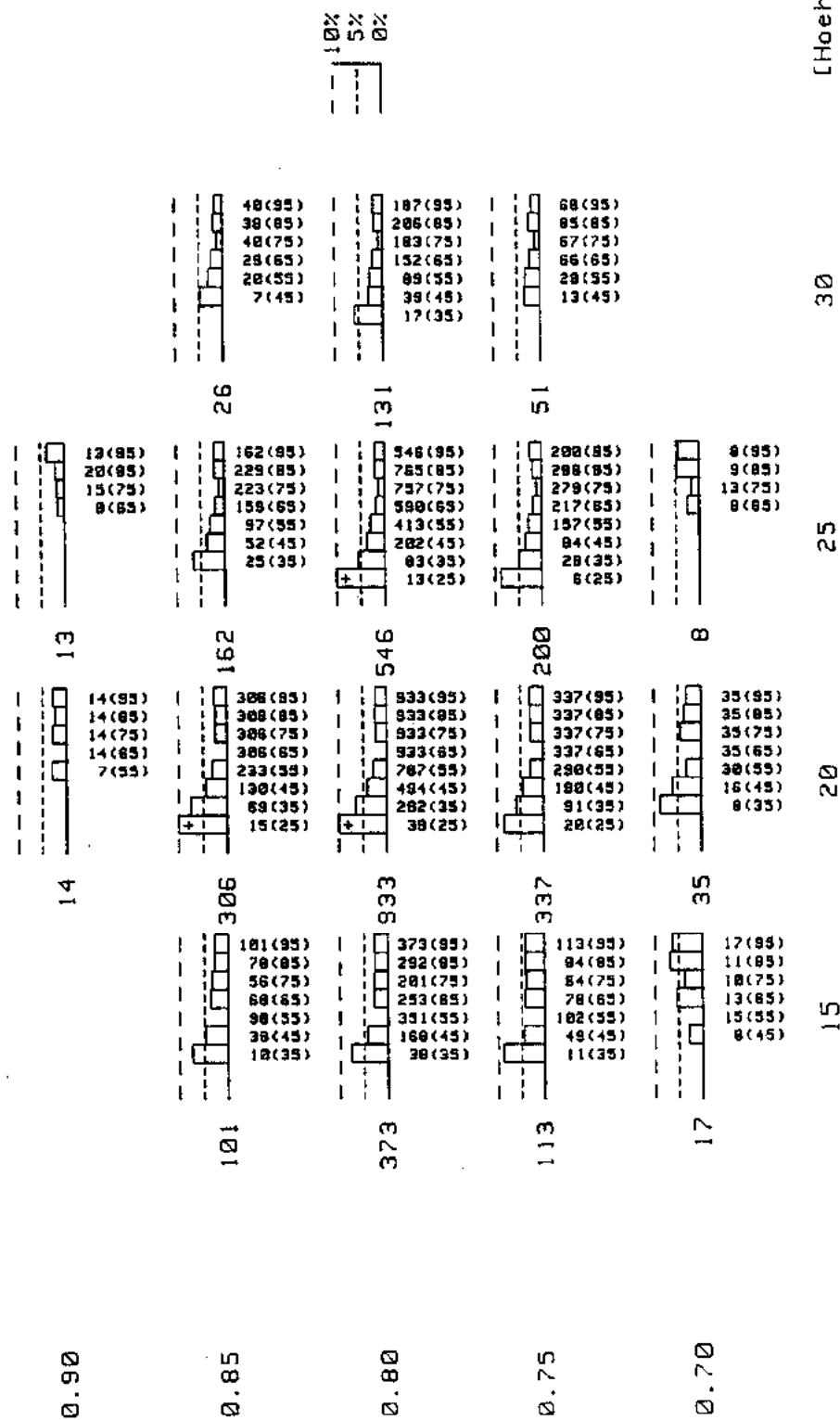


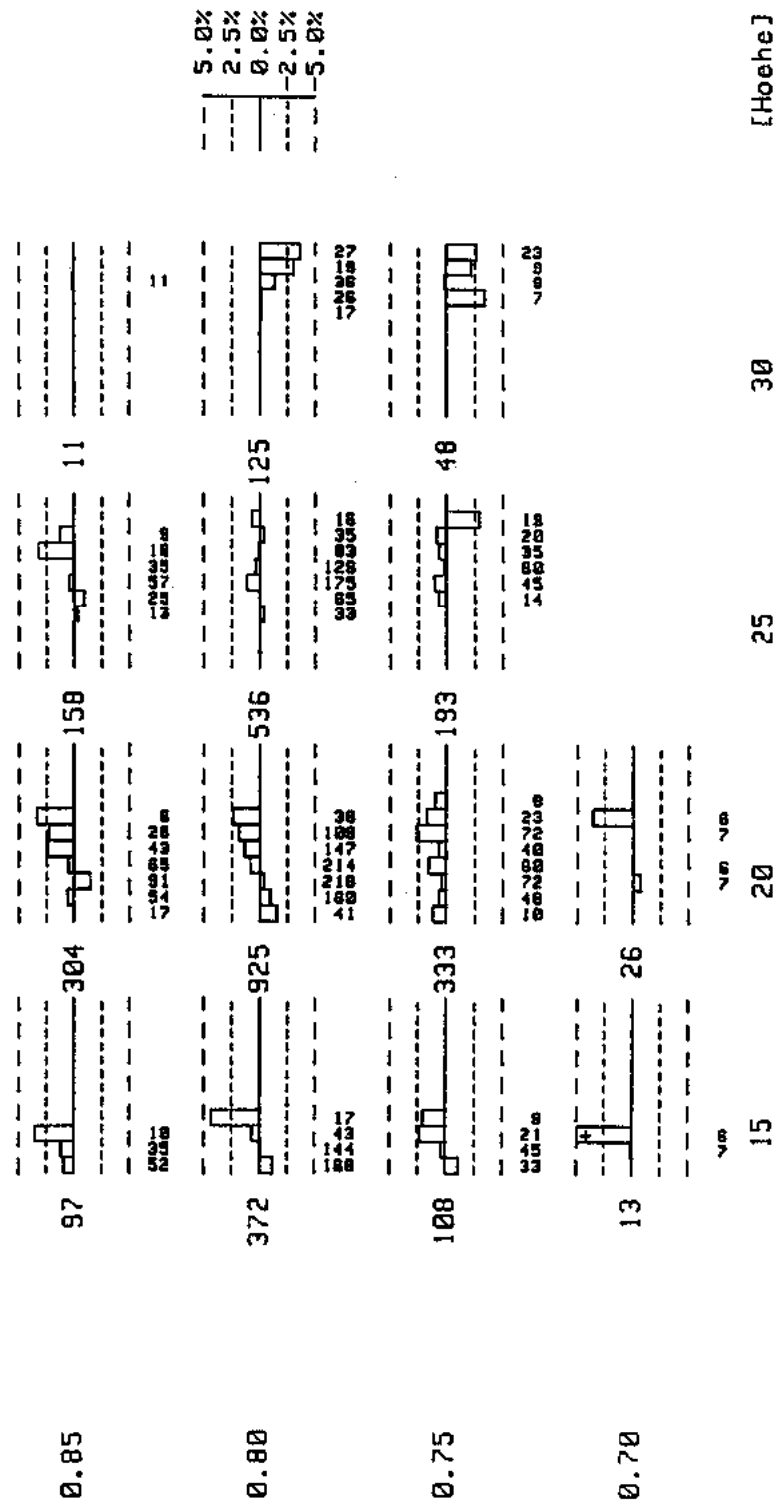
Abbildung 13h

# Mittlere Abweichung der Formzahl [%] - Roteiche

Durchmesserstufen: 11, 13, 15, 17, 19, 22, 26, 30, 34, 38, >40 [cm]

Abbildung

[d 0.7]



## 2.0 Programmvorgaben, Definitionen und Problemlösungen

Die im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Schaftformgleichungen sind das Fundament für die Implementierung eines Programmpakets zur Berechnung der Volumina, der Sortierung und der Ernteverluste für die im Rahmen der Bundeswaldinventur (BWI) gemessenen Probestämme, entsprechend der Vorgaben des BML. Die aus diesen Vorgaben im einzelnen für die biometrische Lösung erwachsenden Anforderungen zusammen mit deren modell- und softwaremäßigen Umsetzung werden im folgenden dargestellt. Um Missverständnisse zu vermeiden und zur Verdeutlichung werden einzelne Begriffsbildungen in der im Unterprogramm „BDAT“ verwendeten Form präzisiert. Dies gilt beispielsweise für die Sortenaushaltung im allgemeinen, wie für die Definition einzelner Sortimente im speziellen; dies gilt darüber hinaus auch für die verwendeten Kubierungsverfahren zur Ermittlung der Stamm- und Sortenvolumina.

### 2.1 Baumindividuelle Voluminierung

Für die Ermittlung des Stamm- bzw. Derbholzvolumens war die Genauigkeit des klassischen Massentafelverfahrens als unterer Richtwert vorgegeben. Über die Verwendung eines oberen Schaftdurchmessers neben BHD und Höhe war für das neue Verfahren eine höhere Schätzgenauigkeit anzustreben.

Dieses Ziel wird durch die Verwendung des im ersten Abschnitt präsentierten Systems baumartenspezifischer Formgleichungen erreicht. Die Berechnung des Volumens des ganzen Schaftes oder Teile davon als Integral über den durch die Schaftkurve definierten Rotationskörper garantiert genauere Volumenschätzung als die Massentafel, was durch umfangreiche Formzahluntersuchungen überprüft und bestätigt wurde (vgl. z.B. Abb. 13 a-h und HRADETZKY, KUBLIN, SCHARNAGL und SCHÖPFER, 1986).

Numerisch wird das Integral durch sektionsweise Kubierung mit Hilfe der Mittenflächenformel berechnet, wobei der Schaft in 2 m-Sektionen aufgeteilt wird, vgl. Abbildung 14.

#### 2.1.1 Voluminierung von schwachem Stangenholz

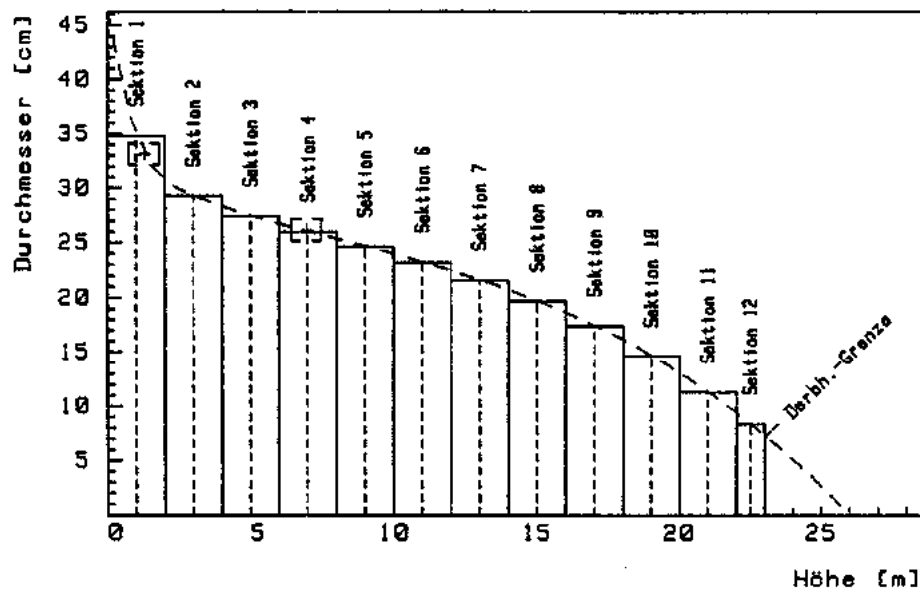
Für die Massenberechnung bei schwachem Stangenholz ( $BHD < 10 \text{ cm}$ ) sind die oben angegebenen Formgleichungen nicht geeignet. Dieses Volumen wird daher im Unterprogramm BDAT mit Hilfe des mittleren KRENNschen Tarifs bestimmt. In Abbildung 15 sind diese Tarife nach Höhenstufen getrennt für die Baumarten Fi, Ta, Ki, Bu, Ei und Es wiedergegeben. Die Volumenberechnung bei anderen Baumarten erfolgt über die in der Zuordnungstabelle (vgl. Tabelle 2, Spalte 7) festgelegten Tarife. Entsprechende Zuordnungen für die Schaftform, Rindenabzüge u.a. findet man ebenfalls in dieser Tabelle.

### 2.1.2 Massenermittlung bei fehlendem oberem Durchmesser

Bei der Bundeswaldinventur wird ein oberer Schaftdurchmesser nur für Probestämme mit einem BHD über 20 cm und einer Schaftlänge von mehr als 7 m erhoben. Bei Unterschreitung dieser Grenzwerte können die Formgleichungen in ihrer ursprünglichen Form nicht mehr zur Beschreibung der baumindividuellen Schaftform herangezogen werden. Als Ausweg hat man den Erwartungswert des  $d_{0.7}$  als Eingangsgröße in das Grundmodell in Abhängigkeit vom BHD und der Höhe zu schätzen, d. h. anstelle der Schätzfunktion  $E d_{0.7} = f_d(q_{7m}, H)$  (vgl. Abschnitt 1.2.4) wird eine Schätzung des oberen Durchmessers gemäß

$$E d_{0.7} = f_d(D_{1.3m}; H)$$

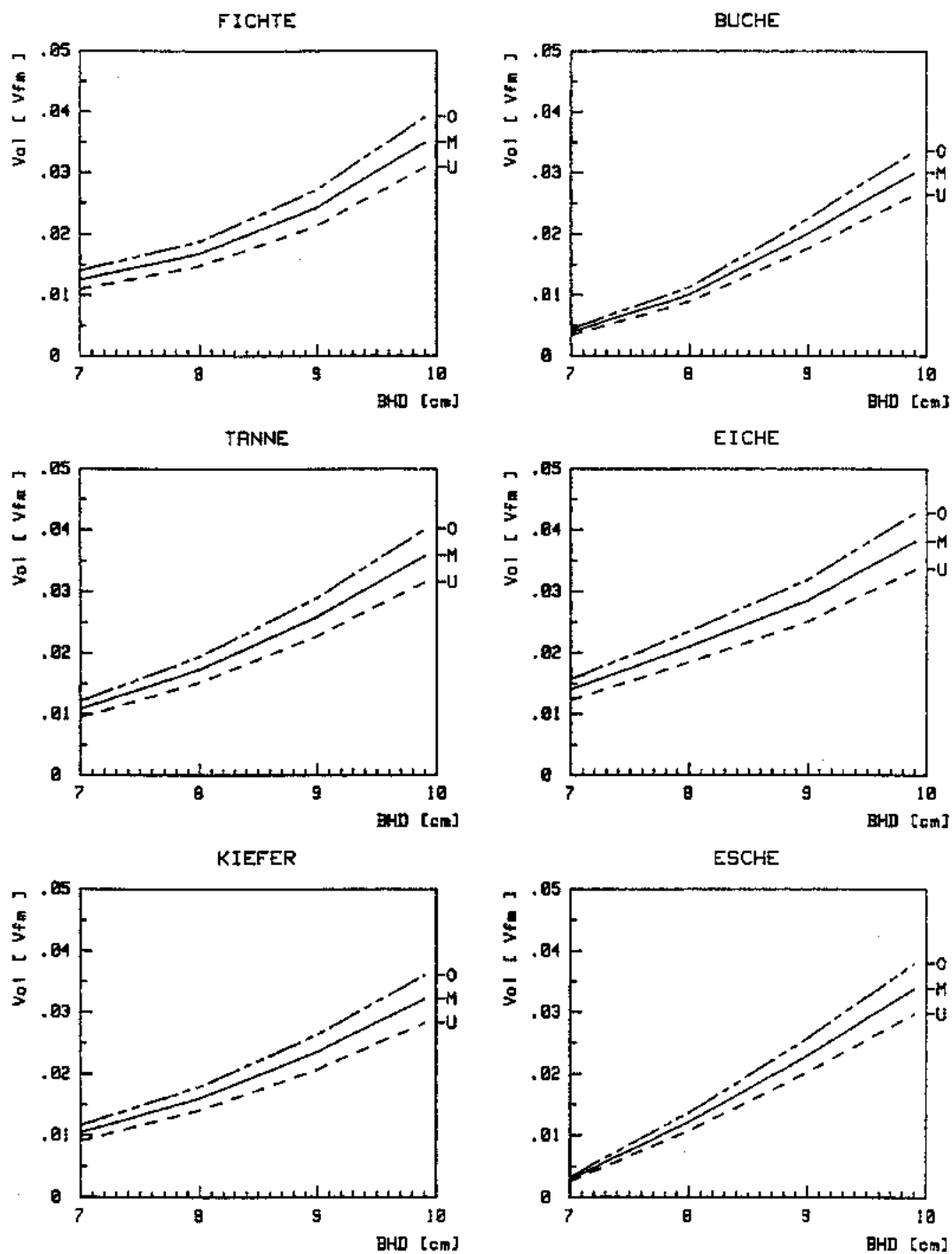
vorgenommen und als Eingangsparameter für die Formgleichungen verwendet. Die Erwartungswertschätzung für den oberen Durchmesser in 30 % der Stammhöhe wurde mit Hilfe eines iterativen Verfahrens so bestimmt, dass die aus den Massentafeln bzw. über die gesamte Durchmesser-/Höhenspektrum hinweg übereinstimmen (= Massentafeläquivalenz). Die so ermittelten  $d_{0.7}$ -Schätzungen sind in BDAT in Form einer nach BHD und Höhe abgestuften Tabelle implementiert. Für extreme Stammformen, die im Randbereich bzw. außerhalb der Massentafel liegen, wird ein mittlerer  $d_{0.7}$  in Abhängigkeit von der Schafthöhe geschätzt:  $Ed_{07} = \text{Spline}(H)$ .



Volumenermittlung (Vfm m.R.) durch 2m Sektionierung  
Eingangswerte BHD und D7m in Klammern ( [+ ] )

Abbildung 14





Massenttarife Durchmesserbereich 7 - 9,9 cm  
für den oberen (O) mittleren (M) und unteren (U) Höhentarif

Abbildung 15

Tab.2: Zuordnungstabelle

Funktionen / Tabellen :	Schaffform	Rinde	durchs. Refarb.G.	UV-Jerholz	durchschn. Rstdm.	Massentarif 7-Bom	Massentafel
vorhanden für Baumarten:	Fi Ta Dg Ki La Bu Ei RE	Fi Ta Dg Ki SF EL JL SK May Bu SEI TEIB TEIV RE 391 Li Es HB Ru BU BH RoP RoP Ki REr	Fi Ta Ki La Bu Ei	Bu Ei	Bu Ei	Fi Ta Ki Bu Ei Es	Fi Ta Dg Ki May EL JL Bu Ei Rei Es Er Bi RoP
Baumarten:							
1 Fi Fichte	1 Fi	1 Fi	1 FIS			1 Fi	1 Fi
2 SF Sitka-Fichte	1 Fi	1 Fi	1 FIS			1 Fi	1 Fi
3 Ta Tanne	2 Ta	2 Ta	3 Ta			2 Ta	2 Ta
4 KT Küstentanne	2 Ta	2 Ta	3 Ta			2 Ta	2 Ta
5 Ki Kiefer	4 Ki	4 Ki	4 Ki			3 Ki	4 Ki
6 SK Schwarzkiefer	4 Ki	8 SK	4 Ki			3 Ki	4 Ki
7 WK Nymphenkiefer	4 Ki	9 WK	4 Ki			3 Ki	5 May
8 BG Douglasie	3 Bu	3 Bu	1 FIS			1 Fi	3 Dg
9 La Lärche	5 La	6 EL	5 La			1 Fi	6 EL
10 EL Europ.Lärche	5 La	6 EL	5 La			1 Fi	6 EL
11 JL Jap.Lärche	5 La	7 JL	5 La			1 Fi	7 JL
12 Th Thuja	1 Fi	1 Fi	1 FIS			1 Fi	1 Fi
13 Ts Tsuga	1 Fi	1 Fi	1 FIS			1 Fi	1 Fi
14 SN sNB	1 Fi	2 Ta	1 FIS			1 Fi	1 Fi
15 Bu Buche	6 Bu	10 Bu	6 Bu	1 Bu	1 Bu	4 Bu	8 Bu
16 HB Hainbuche	6 Bu	10 HB	6 Bu	1 Bu	1 Bu	4 Bu	13 Bi
17 Ei Eiche	7 Ei	11 SEI	7 Ei	2 Ei	2 Ei	5 Ei	9 Ei
18 RE Rotaleiche	8 RE	14 RE	7 Ei	2 Ei	2 Ei	5 Ei	10 Rei
19 Pa Pappel	8 RE	25 RoP	6 Bu	2 Ei	2 Ei	6 Es	14 RoP
20 BP Balsampappel	8 RE	25 RoP	6 Bu	2 Ei	2 Ei	6 Es	14 RoP
21 Es Esche	6 Bu	17 Es	6 Bu	2 Ei	2 Ei	6 Es	11 Es
22 Ah Ahorn	6 Bu	15 BH	6 Bu	1 Bu	1 Bu	4 Bu	11 Es
23 BA Bergahorn	6 Bu	15 BH	6 Bu	1 Bu	1 Bu	4 Bu	11 Es
24 SA Spitzahorn	6 Bu	15 BH	6 Bu	1 Bu	1 Bu	4 Bu	11 Es
25 FA Faldahorn	6 Bu	21 Bi	6 Bu	1 Bu	1 Bu	4 Bu	9 Ei
26 Bi Birke	6 Bu	21 Bi	6 Bu	1 Bu	1 Bu	6 Es	13 Bi
27 Li Linde	6 Bu	16 Li	6 Bu	1 Bu	1 Bu	4 Bu	8 Bu
28 Er Erle	6 Bu	28 REr	6 Bu	1 Bu	1 Bu	4 Bu	12 Er
29 Ki Kirsche	6 Bu	26 Ki	6 Bu	1 Bu	1 Bu	4 Bu	9 Ei
30 Ul Ulme	6 Bu	20 BU	6 Bu	1 Bu	1 Bu	4 Bu	11 Es
31 Ro Robinie	6 Bu	19 Ro	7 Ei	2 Ei	2 Ei	5 Ei	13 Bi
32 El Eisbeere	6 Bu	23 RoP	6 Bu	1 Bu	1 Bu	4 Bu	9 Ei
33 Ka Kastanie	7 Ei	11 SEI	6 Bu	1 Bu	1 Bu	4 Bu	9 Ei
34 He Heide	6 Bu	12 TEIB	6 Bu	1 Bu	1 Bu	6 Es	11 Es
35 LB sLB	6 Bu	12 TEIB	6 Bu	1 Bu	1 Bu	6 Es	11 Es
36 VB Vogelbeere	6 Bu	26 Ki	7 Ei	2 Ei	1 Bu	4 Bu	9 Ei

Tab. 2: Zuordnungstabelle

Die Vorzüge dieser Vorgehensweise sind offensichtlich: Zum einen sind mit dem so modifizierten Schaftkurvensystem auch bei Vorliegen von nur zwei Messwerten ( $D_{1.3m}$ ,  $H$ ) je Schaft Schätzungen des Stammvolumens möglich, die bis auf extreme Stammdimensionen mit den Massentafelwerten übereinstimmen. Zum anderen gestattet dieses System die funktionale Beschreibung der Schaftform auf der Basis von zwei Formparametern, BHD und Höhe, d.h. es besteht auch bei fehlendem oberem Durchmesser die Möglichkeit, einen Probebaum ideell zu sortieren und die Volumen der dabei anfallenden Sortimente zu bestimmen. Ein weiterer, unter praktischen Aspekten nicht zu vernachlässigender Aspekt sei an dieser Stelle vermerkt: Mit der hier beschriebenen Modelladaption ist es nicht notwendig, von Grund auf neue Formgleichungen abzuleiten, was im Vergleich zur Berechnung der massentafeläquivalenten  $d_{0.7}$ -Werte einen beträchtlichen Mehraufwand bedeutete und außerdem der grundsätzlich angestrebten Einheitlichkeit des Modellansatzes zuwiderlaufen würde. Die Wahrung dieses Grundsatzes spielte auch bei der in BDAT realisierten Lösung zur Berechnung des Kronenderbholzes bei Laubbäumen eine gewichtige Rolle.

### 2.1.3 Derbholzvolumen bei Laubbäumen

Im Gegensatz zu den Nadelbäumen, bei denen Derbholzmasse in den Ästen nur in Ausnahmefällen vorkommt, bereiten beim Laubholz vom Stamm abgehende starke Äste oder sich vollständig in Äste auflösende Kronen bei der Schaftformbeschreibung von Laubbäumen Probleme. Zwar wurden auch für Laubholz Schaftformgleichungen bis zum Wipfel hergeleitet, diese eignen sich jedoch nur für die Beschreibung der Mantellinie der unterhalb des ersten starken Astes liegenden Stammteile, oberhalb ist eine detaillierte Beschreibung der Stammkontur mit diesen Gleichungen nicht möglich.

Mit der Verlängerung der Schaftkurven über den Stammholzbereich hinaus in die Krone bis hin zum Wipfel wurde aber auch weniger das Ziel einer – wie auch immer zu interpretierenden – Beschreibung der Schaftform verfolgt; vielmehr rangierte bei diesen Überlegungen der Wunsch nach einer einheitlichen Berechnung der Derbholzmasse an vorderster Stelle. Deshalb wurden die Schaftkurven so konstruiert, dass das gesamte Derbholzvolumen bzw. die im Stammholz- und im Kronenbereich verfügbare Derbholzmasse wie beim Nadelholz über das Integral des durch die Schaftkurve definierten Rotationskörpers berechnet werden kann. Auf die separate

Herleitung eines Tabellenansatzes zur Schätzung des Kronenderbholzes bei den wichtigsten Laubbaumarten konnte dadurch verzichtet werden. Weiterführende Details zu diesem Problemkreis findet man in dem Artikel HRADETZKY, KUBLIN, SCHARNAGL und SCHÖPFER (1986). Während die Formgleichungen also eine für Laub- und Nadelhölzer einheitliche Berechnung des Derbholzvolumens gestatten, ist die Umrechnung der Vorrats- in Erntefestmeter nicht so ohne weiteres möglich.

## 2.2 Baumartenspezifische Schätzung der Rindenstärke – Ernteverluste

Formgleichungen beschreiben die Durchmesser-/Höhenrelationen innerhalb eines Schaftes in Rinde. Für die Aushaltung einzelner Sortimente und deren Voluminierung sind jedoch die Durchmesserverhältnisse am entrindeten Schaft maßgebend. Um eine gute Übereinstimmung zwischen theoretischer und praktischer Sortierung zu erzielen, werden baumartenspezifische Gleichungen für die Berechnung der Rindenabzüge und sonstiger Ernteverluste benötigt.

### 2.2.1 Herleitung von Rindengleichungen

Als Ausgangspunkt für die Herleitung bundeseinheitlicher Rindengleichungen diente das umfangreiche Datenmaterial der FVA Baden-Württemberg mit Rindenmessungen von über 20.000 Stämmen verschiedener Baumarten, vgl. ALTHERR, UNFRIED, HRADETZKY, J. und HRADETZKY, V. (1974 bis 79). Zur Überprüfung regionaler Unterschiede in der Durchmesser-/Rindenbeziehung wurden von der FVA zusätzliche Rindenmessungen in anderen Bundesländern, beispielsweise Bayern, Hessen und Nordrhein-Westfalen, vorgenommen und analysiert, dabei konnten keine signifikanten Unterschiede mit der Notwendigkeit regional differenzierter Rindengleichungen festgestellt werden. Deshalb wird im Rückgriff auf die bereits oben zitierte Arbeit von ALTHERR et. al. in BDAT die doppelte Rindenstärke in Abhängigkeit von der Stammstärke (forstüblich gerundeter Durchmesser in cm), nach Baumarten getrennt, mit Hilfe einer Regressionsgeraden, in Ausnahmefällen durch ein Polynom zweiten Grades, beschrieben.

Für die Mittenstärkesortierung kommen je nach Stammabschnitt, Erd-, Mittel- bzw. Gipfelstammstück, unterschiedliche Regressionsfunktionen zur Anwendung. Bei der Heilbronner Sortierung wird ein nach Aushaltungsvarianten gestaffeltes System von

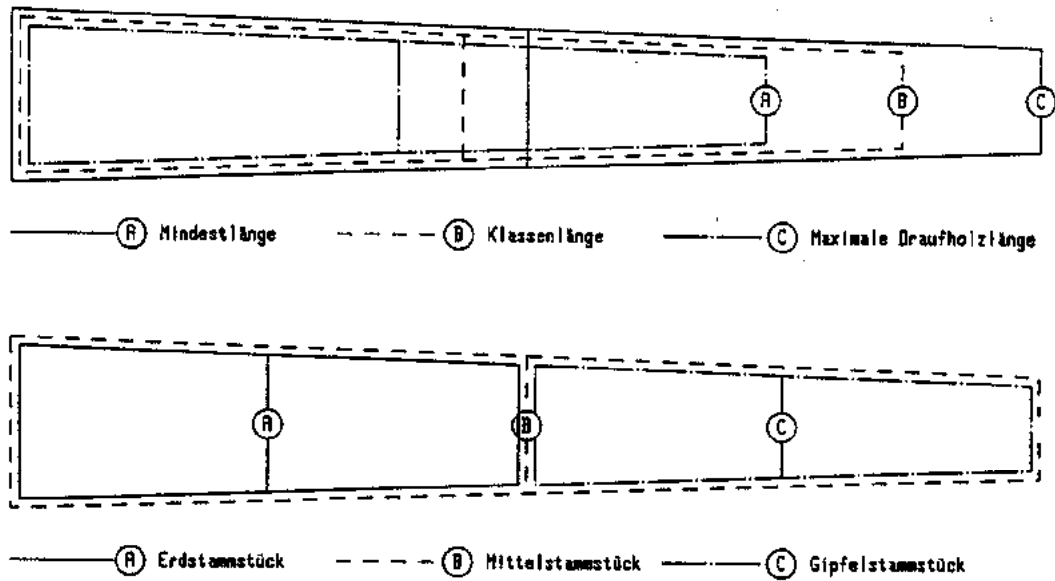
Rindengleichungen verwendet, wobei zwischen folgenden Varianten unterschieden wird: Aushaltung von Stammholz bis zur Mindest- bzw. Maximallänge des Klassenzopfes sowie Aushaltung bis zur maximalen Draufholzlänge. Die Gültigkeitsbereiche der einzelnen Rindengleichungen bei Heilbronner – bzw. bei Mittenstärkesortierung sind in der Abbildung 16 skizziert. Für Mittenstärkesortierung entspricht die Schaftaufteilung einer Drittelung des gesamten Stammholzbereiches.

Für die wichtigsten Baumarten sind die Rindenfunktionen zusammen mit den Regressionskoeffizienten in den Abbildungen 17a-d wiedergegeben. In Ergänzung hierzu wurde eine mittlere Rindenfunktion für den gesamten Schaft berechnet und in die Grafiken eingefügt. Rindengleichungen für Baumarten, die nicht in diesen Grafiken vertreten sind, werden in BDAT über die in der Tabelle 2, zweite Spalte, definierten Zuordnungen festgelegt, wodurch für sämtliche bei der BWI angesprochenen Baumarten eine zuverlässige Schätzung des durch die Rinde bedingten Ernteverlustes gewährleistet ist.

### 2.2.2 Sonstige Ernteverluste

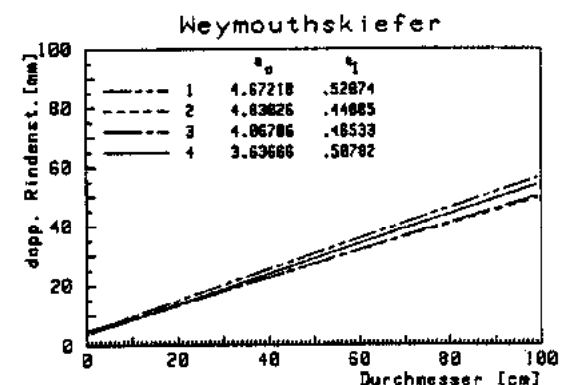
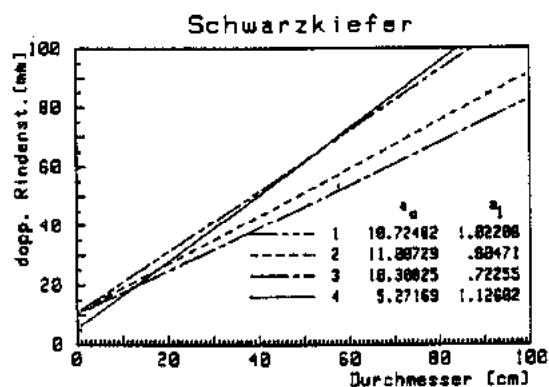
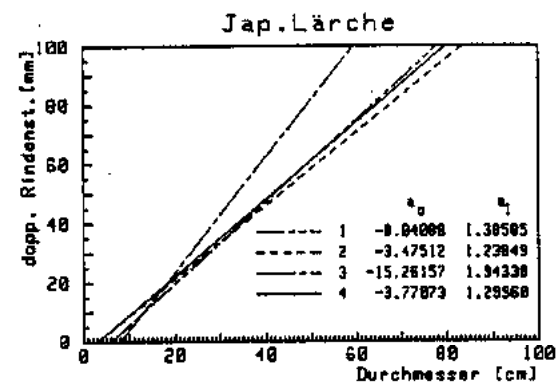
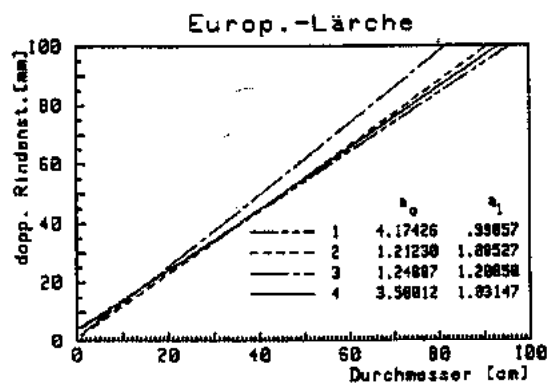
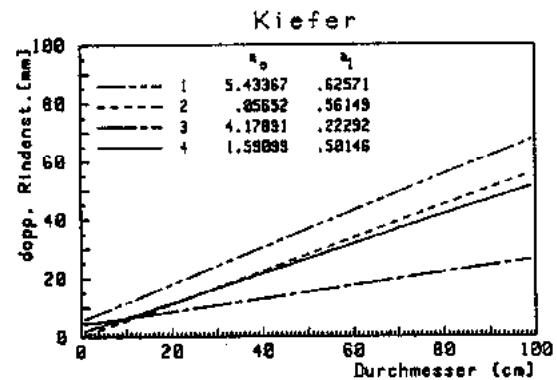
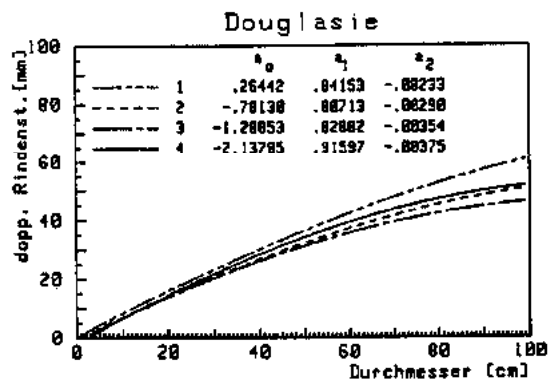
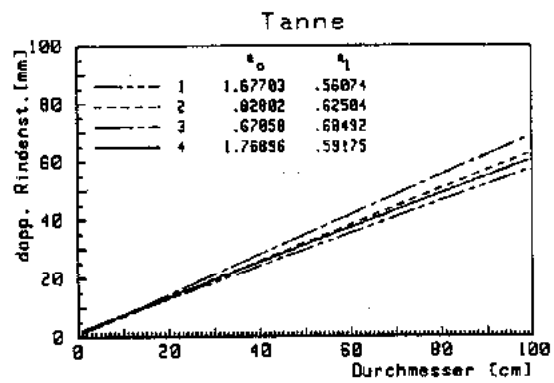
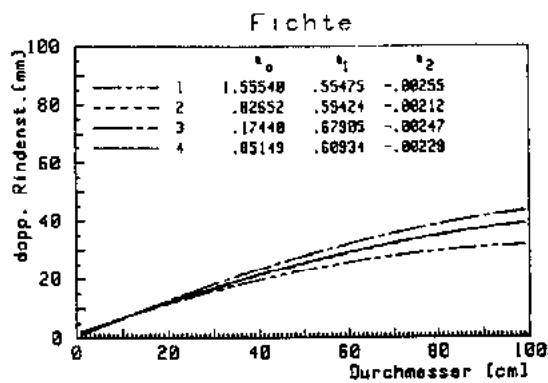
Als Ernteverlust im allgemeinen gilt neben der Rindenmasse jede weitere Minderung der stehenden Holzmasse, bedingt durch

- (\*) Fällung und Aufarbeitung: Holzmasse bis Stockhöhe, Abfall an Gipfel-, Ast- und Faulholz, Bruch und Sägeverluste;
- (\*) Messung: halber Fallkerb, Übermaß, Kubierungsverfahren, Schichtholz- und Gewichtsholzumrechnung;
- (\*) Nichteinhalten der Derbholzgrenze;
- (\*) Holzbringung, Unterlagen und Stützen für Holzstöße, u.a..



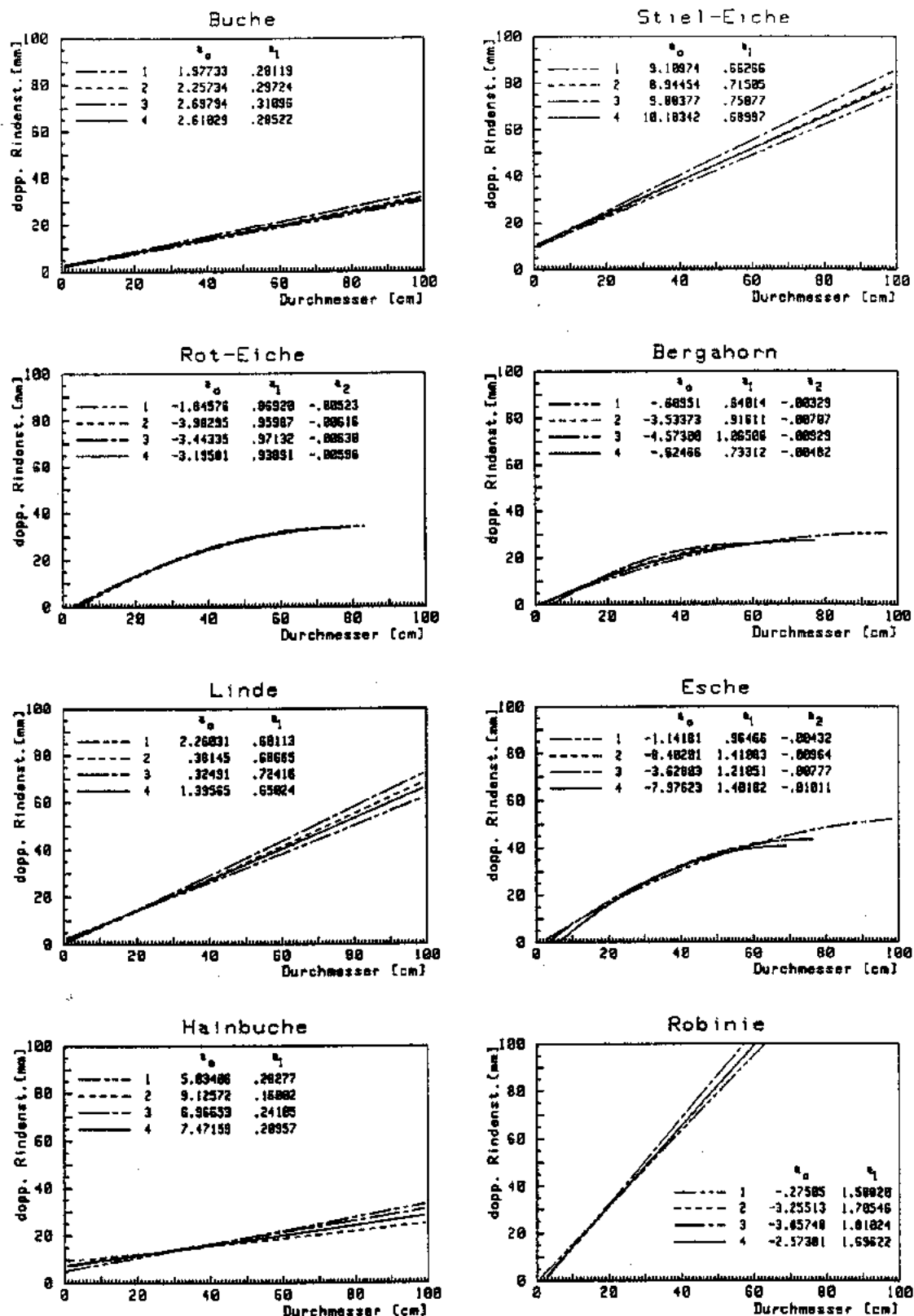
Gültigkeitsbereiche der Rindenbeziehungen für Heilbronner-Sortierung (oben) und Mittenstärken-Sortierung (unten).

Abbildung 16



Statistische Rindenbeziehungen für die Mittenstärkensortierung  
 1: Erd- 2: Mittel- 3: Gipfelstammstück 4: Gesamtstamm

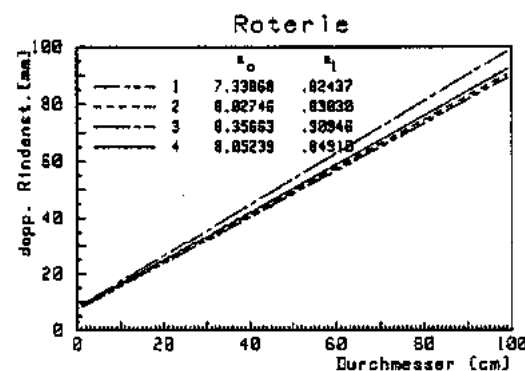
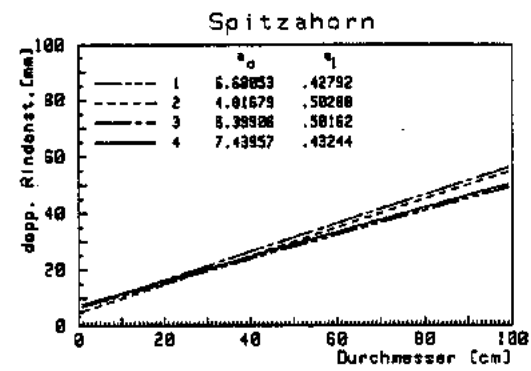
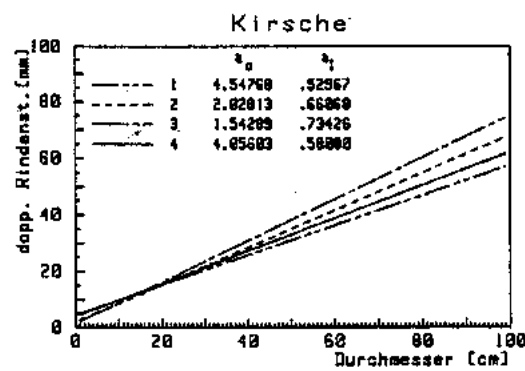
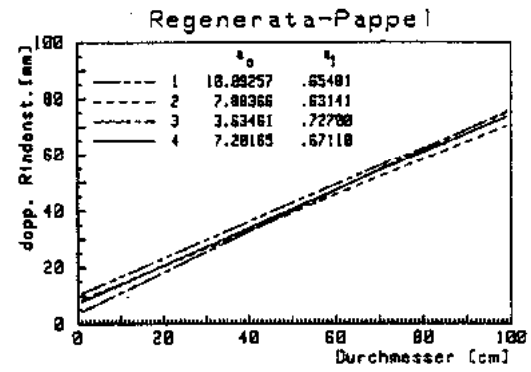
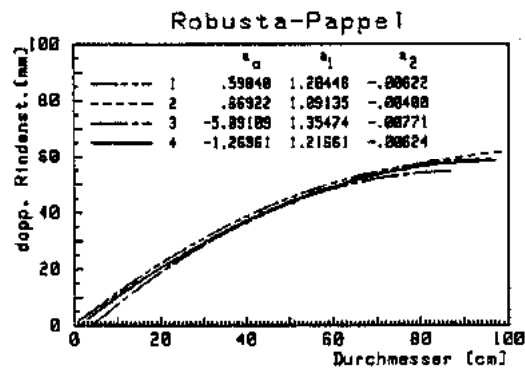
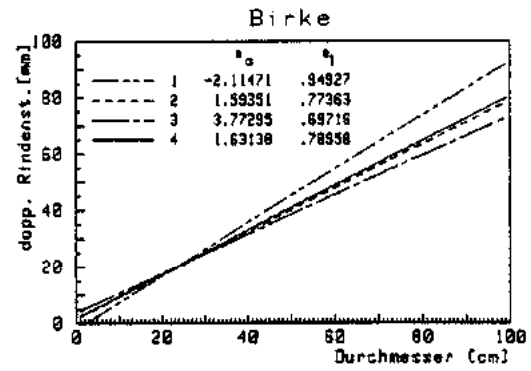
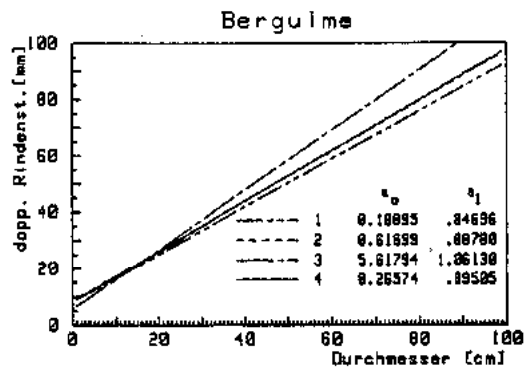
Abbildung 17a



Statistische Rindenbeziehungen für die Mittenstärkensortierung  
 1: Erd- 2: Mittel- 3: Gipfelstammstück 4: Gesamtstamm

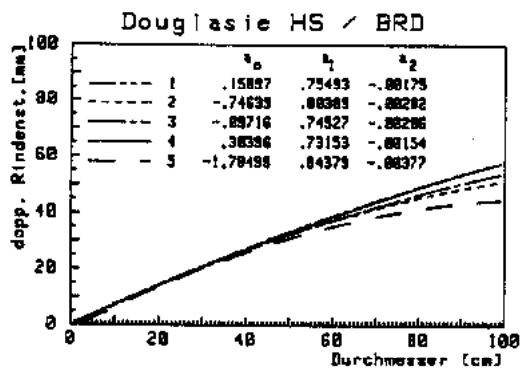
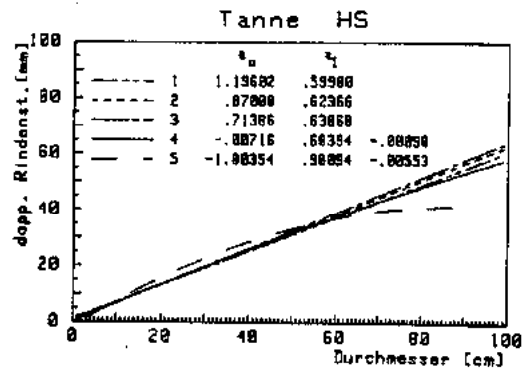
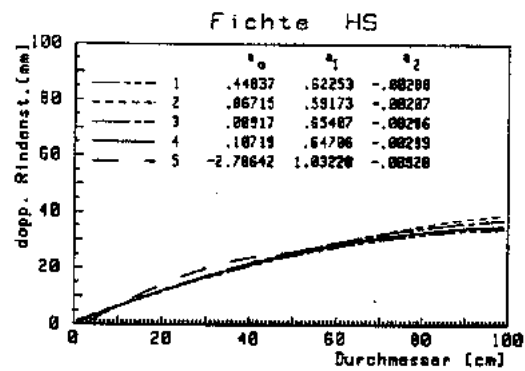
Abbildung 17b





Statistische Rindenbeziehungen für die Mittenstärkensortierung  
 1: Erd- 2: Mittel- 3: Gipfelstammstück 4: Gesamtstamm

Abbildung 17c



Statistische Rindenbeziehungen für die Heilbronner Sortierung  
 1: Minimale 2: Maximale Klassenlänge 3: Maximale Draufholzlänge  
 4: Durchschnittsfunktion 5: Zopffunktion

Abbildung 17d

Eine detaillierte Schätzung der einzelnen Verlustquellen ist wegen derer großer Vielfalt nur schwer möglich. Einzelstammbezogen können allerdings die wichtigsten Verlustquellen berücksichtigt werden, dazu zählen beispielsweise Übermaß bei der Sortierung, Volumendifferenzen bedingt durch die Anwendung der Mittenflächenformel, sowie rechnerisch durch Durchmesserabrundung verursachte Massenverluste. Insgesamt wird in BDAT der einzelstammbezogene Ernteverlust als Differenz in der nachfolgenden Form berechnet:

	Volumen	$V_{fm_D}$	m. R.
-	Volumen	X-Holz	o. R.
-	Volumen	Stammholz	o. R.
-	Volumen	Stammholzabschnitt	o. R.
-	Volumen	Industrieholz	o. R.
-	Volumen	unverw. Derbholz	o. R.
<hr/>			
=	Volumen	Ernteverlust / Stamm	o. R.

Die bei der Berechnung des stammbezogenen Ernteverlustes beteiligten Einzelvolumina hängen in hohem Maße von der Aushaltungsstrategie bei der Sortierung ab, dies gilt insbesondere für das dabei anfallende nicht verwertete Derbholz. Für den Ernteverlust bei schwachem Stangenholz (7-9cm BHD) werden global 30 % der Derbholzmasse in Rechnung gestellt, die verbleibenden 70 % des Gesamtvolumens werden als unverwertbares Derbholz klassifiziert.

### 2.3 Nicht verwertete Derbholzmasse/Aufarbeitungszopf

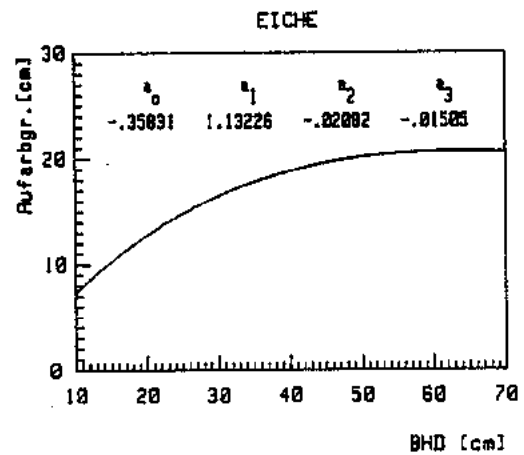
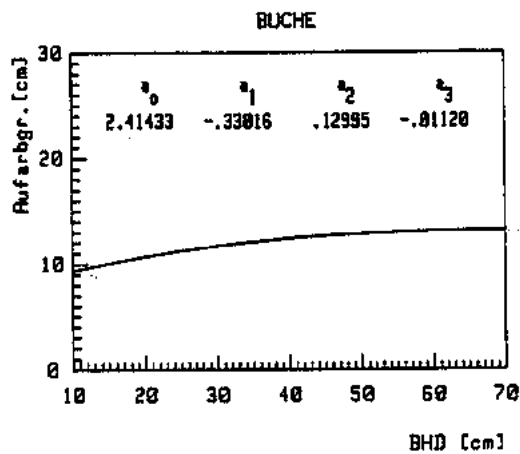
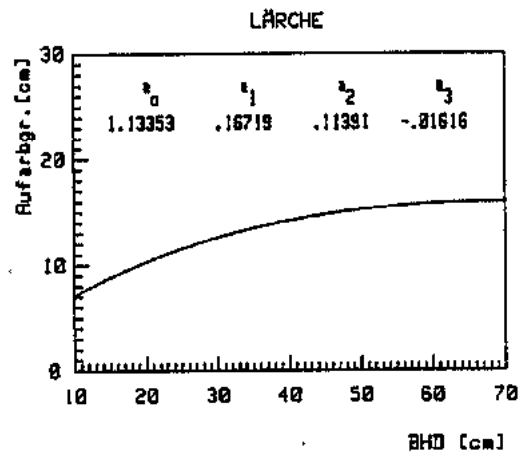
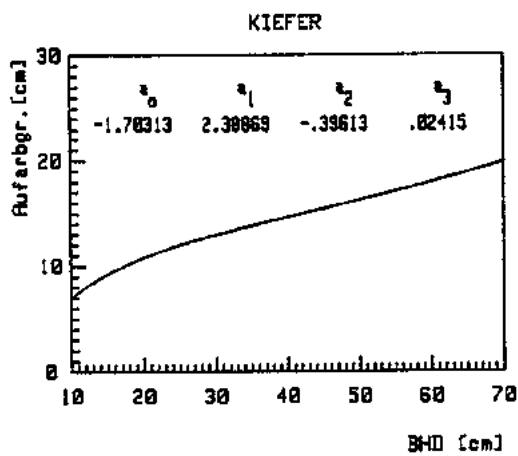
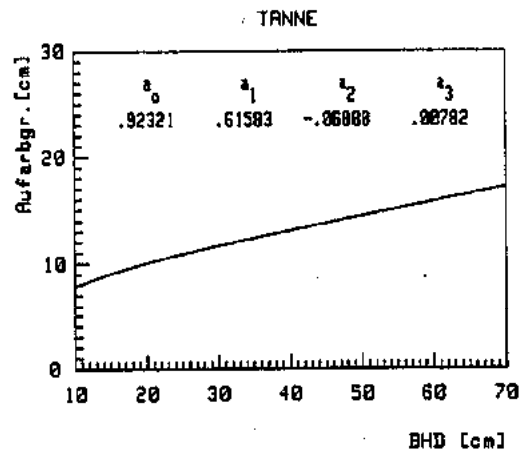
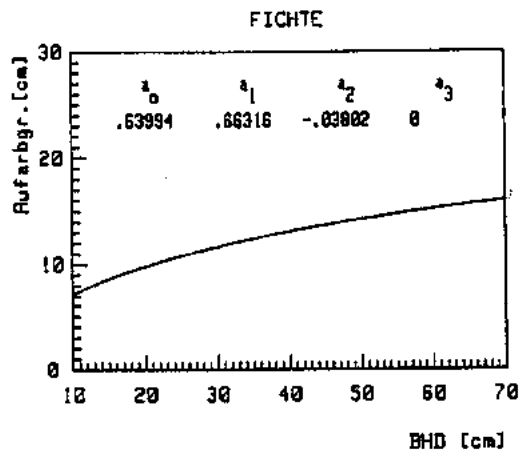
Hohe Aufarbeitungskosten auf der einen und niedriger Marktwert für schwächere Industrie- und Brennholzsortimente auf der anderen Seite zwingen die Forstwirtschaft dazu, einen Teil des erntefähigen Holzes unaufbereitet im Bestand zu belassen. Die Menge dieses ökonomisch nicht verwertbaren Derbholzes hängt eng mit dem tatsächlichen Aufarbeitungszopf zusammen. Über einen Parameter kann in BDAT die Aufarbeitungsgrenze für die automatische Sortierung vom Benutzer frei definiert werden, für eine maximale Sortenaufbereitung ist der Aufarbeitungszopf der Derbholzgrenze gleichzusetzen. Aufarbeitungszöpfe werden generell in cm m. R. ange-

geben. Alternativ zu der benutzerdefinierten Aufarbeitungsgrenze können mittlere Aufarbeitungszöpfe, die von BDAT in Abhängigkeit vom BHD des jeweiligen Rohstammes festgelegt sind, verwendet werden. Zur Herleitung einer Schätzfunktion für den mittleren Aufarbeitungszopf konnte auf Erfahrungen aus EST-Sonderuntersuchungen mit Daten aus ca. 7.000 über das gesamte Bundesgebiet verteilte Hiebe zurückgegriffen werden. Mit diesen Daten wurden, nach Baumarten getrennt, für Fichte, Tanne, Kiefer, Lärche, Buche und Eiche Regressionen der Form

$$E(AZopf) = \text{EXP}(a_0 + a_1 \text{ LOG (BHD)} + a_2 \text{ LOG}^2(\text{BHD}) + a_3 \text{ BHD})$$

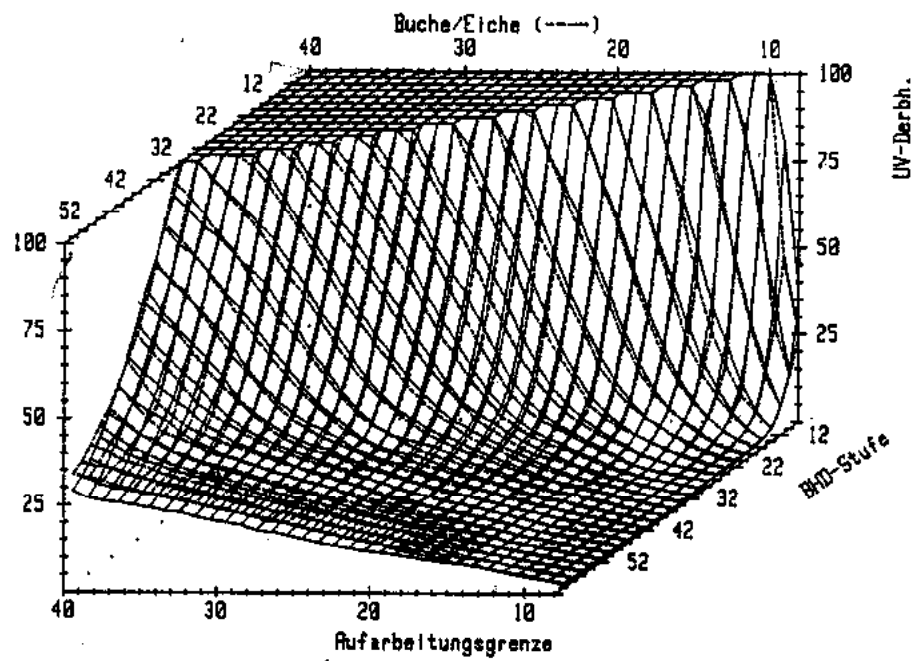
aufgestellt und nach der Methode der kleinsten Quadrate den Daten angepasst. Die resultierenden Erwartungswertfunktionen mit den entsprechenden Schätzungen für die Regressionskoeffizienten sind in der Abbildung 18 dargestellt. Für fehlende Baumarten ergeben sich die entsprechenden Zuordnungen aus Tabelle 2.

Für Nadelbäume kann die im Bestand verbleibende Derbholzmasse unmittelbar aus den Schaftkurven über das Integral des Stammabschnittes zwischen Aufarbeitungs- und Derbholzgrenze berechnet werden. Dies ist bei Laubbäumen aus den bereits diskutierten Gründen nicht möglich. Eine Differenzierung der Derbholzmasse in aufgearbeitetes bzw. nicht verwertetes Kronenderbholz bei variablen Aufarbeitungsgrenzen setzt eine genaue Kenntnis der Massenverteilung im Kronenbereich voraus. Zur Schätzung des unverwerteten Derbholzes wurden bei Buche und Eiche an jeweils ca. 500 Probestämmen der gesamte Derbholzbereich in 2 m-Sektionen aufgemessen. Aus diesen Messwerten wurde dann zu unterschiedlichen Aufarbeitungsgrenzen die Masse (in Prozent) des nicht verwerteten Derbholzes bestimmt und tabellarisch aufbereitet. Die mit Hilfe von Splinefunktionen geglätteten Tabellenwerte sind als 3-D-Grafik in der Abbildung 19 wiedergegeben.



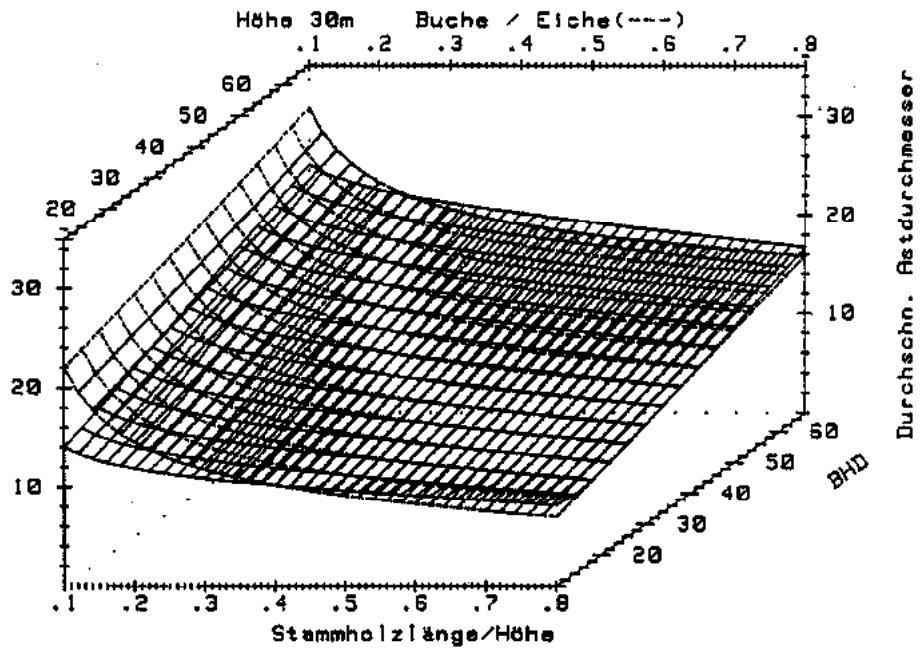
Durchschnittlicher Aufarbeitungszopf über BHD (aus EST-Daten)  
 $A.-Zopf = F ( \text{EXP}(a_0 + a_1 * \text{LOG}(\text{BHD}) + a_2 * (\text{LOG}(\text{BHD})^2) + a_3 * \text{BHD})$

Abbildung 18



Nicht verwertetes Derbholz in Prozent in Abhängigkeit von  
BHD und Aufarbeitungsgrenze

Abbildung 19



Durchschnittliche Astdurchmesser in Abhängigkeit von Stammholzlänge, Höhe und BHD bei Höhe 30m.

Abbildung 20

Die Kalkulation der Rindenanteile am Kronenderbholz bzw. bei Bäumen ohne Stammholz erfolgt in BDAT in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird eine mittlere Aststärke in Abhängigkeit von Kronenansatz und BHD mit Hilfe der in der Abbildung 20 grafisch dargestellten Tabellenwerte ermittelt – der Kronenansatz von Laubbäumen mit einem BHD von mindestens 20 cm und einer Mindesthöhe von 7 m wird bei der BWI in Form der Stammhöhe als zusätzlicher Baumparameter erfasst ( vgl. Instruktion für die Traktaufnahme, Abschnitt 6.4.11). Im zweiten Schritt wird für den tabellarisch bestimmten mittleren Astdurchmesser die doppelte Rindenstärke mit Hilfe der im Abschnitt 2.1 besprochenen Rindengleichungen ermittelt und der Rindenanteil an der unverwerteten Derbholzmasse geschätzt. Das gleiche Verfahren wird bei der Berechnung des Rindenanteils von Industrieholzsortimenten aus dem Kronenbereich angewandt. Auf die in BDAT im einzelnen realisierten Grundsätze der Sortenaushaltung soll im folgenden noch näher eingegangen werden.

## 2.4 Sortenaushaltung im Unterprogramm BDAT

Im Hinblick auf spätere Holzaufkommensprognosen auf der Basis der Inventurdaten war eine biometrische Lösung zu konzipieren, die eine realistische Sortierung entsprechend der Bestimmungen der HKS ermöglicht, variable Stammholzzöpfe und Aufarbeitungsgrenzen für Industrieholz zulässt und Besonderheiten bei der Ausformung von Fichte, Tanne und Douglasie – optional Heilbronner – oder Mittenstärke-sortierung – berücksichtigt.

Die in den vorangegangenen Abschnitten präsentierten Schaftkurven und Rindenfunktionen sind das theoretische Gerüst für eine praxisnahe Abbildung der Sortenaushaltung im Rechner. Auf der Basis der drei Formparameter, BHD, Höhe und oberer Durchmesser, ist mit dem in BDAT implementierten Algorithmus eine ideelle Sortenaushaltung am einzelnen Probebaum entsprechend den Bestimmungen der HKS möglich. Über zusätzliche Parameter können unterschiedliche Aushaltungsvarianten simuliert werden, beispielsweise unterschiedliche Aufarbeitungszöpfe, Abtrennen von Faulholz oder Aushaltung eines Abschnitts mit qualitativ hochwertigem Holz am Stammfuß, etc.. Die Angaben sollten je nach BA und BHD bzw. Höhe gestaffelt eingegeben werden.



Stärkeklassen und Volumen einzelner Sortimente werden über die aus den Schaftkurven und den Rindengleichungen geschätzten Durchmesser des Holzkörpers (o. R.) in Anlehnung an die HKS (Anlage zu §1, Abschnitt 1) bestimmt. Forstübliche Rundungen werden als Mittelwerte, mit 0,75 cm bei Überkreuzmessung von Durchmessern über 20 cm bzw. mit 0,5 bei schwächerem Holz, bei der Voluminierung ebenso berücksichtigt, wie ein einprozentiges Übermaß bei der Längenmessung für die Mittenstärke- und Heilbronner Sortierung. Die Sortenaushaltung beginnt am Fällschnitt. Für die Stockhöhe inklusive Fäll- und Trennschnitte sowie der halben Fallkerblänge wird generell 1 % der Baumhöhe angesetzt.

Bei Nadelholz werden bei der Heilbronner Sortierung bis zu vier Sortimente ausgehalten:

(1) X-Holz Abschnitt (HL) am Stammfuß:

Schadhaftes Holz am Stammfuß kann über eine Längenangabe (Eingabeparameter: 'X-Holzlänge' s. u.) vom übrigen Derbholz, jedoch höchstens bis zur Aufarbeitungsgrenze, abgetrennt werden. Für Abschnitte mit einer Länge von 3 m und mehr wird die Heilbronner Klasse (HL) bestimmt. Die 'X-Holzlängen'-Eingabe sollte gestaffelt – nach Baumart, BHD usw. – erfolgen.

(2) Stammholz (H):

Stammholz wird, entsprechend den forstüblichen Aushaltungsgewohnheiten, mit maximalem Draufholz bis zum Zopf der nächst niederen Klasse, ab der Stärkeklasse H 5 jedoch bis höchstens 4 m, ausgehalten.

(3) Abschnitt (HL) im oberen Schaftbereich:

Bei stärkeren Schäften kann im oberen Schaftbereich zusätzlich zum Stammholz ein Abschnitt (HL) ausgehalten werden, wenn dieser Abschnitt eine Mindestlänge von 3 m und einen vorgebbaren Mindestzopf (gestaffelt), der standardmäßig 14 cm o. R. beträgt, aufweist.

(4) Industrieholz:

Das restliche Stammholz bis zur Aufarbeitungsgrenze wird in Abstufungen von ganzen Metern als Industrieholz ausgeformt.

HKS-konforme Sortierung bedeutet bei Heilbronner Sortierung Aushaltung auf ganze Meter (Langholz und Abschnitte) und bei Sortierung nach Mittenstärken Ablängung der Sortimente auf 1/10 Meter. Die in BDAT realisierte Heilbronner Sortierung zusammen mit den entsprechenden Grenzzöpfen ist zur besseren Übersicht noch einmal in den Abbildungen 21 a und b graphisch dargestellt.

Im Gegensatz zur Heilbronner Sortierung sind die einzelnen Aushaltungslängen bei Mittenstärkesortierung, insbesondere bei der Kiefer, eher an Qualitätskriterien gebunden. Um die Stärkeklasse und das entsprechende Sortimentsvolumen auch hier bestimmen zu können, ohne dabei zusätzliche Qualitätsmerkmale erfassen zu müssen, wird in Anlehnung an die Heilbronner Sortierung die Stammholzlänge über einen Mindestzopf in einer bestimmten Höhe im Schaft vorgegeben. Alternativ zur Verwendung eines Mindestzopfes zur Bestimmung der Stammholzlänge besteht bei BDAT die Möglichkeit einer baumindividuellen Festlegung der Stammholzlänge über die Eingangsparameter 'Stammhöhe' bzw. 'Stammholzgrenze' als maximale Länge bzw. als untere Grenze für den Zopfdurchmesser des Stammholzes. Für die Aushaltung eines oberen Abschnitts, i.d.R. ein Abschnitt minderer Qualität, kann ebenfalls eine Aushaltungsgrenze – vgl. Eingabeparameter: 'Stammholzabschnittsgrenze', nächster Abschnitt – vorgegeben werden.

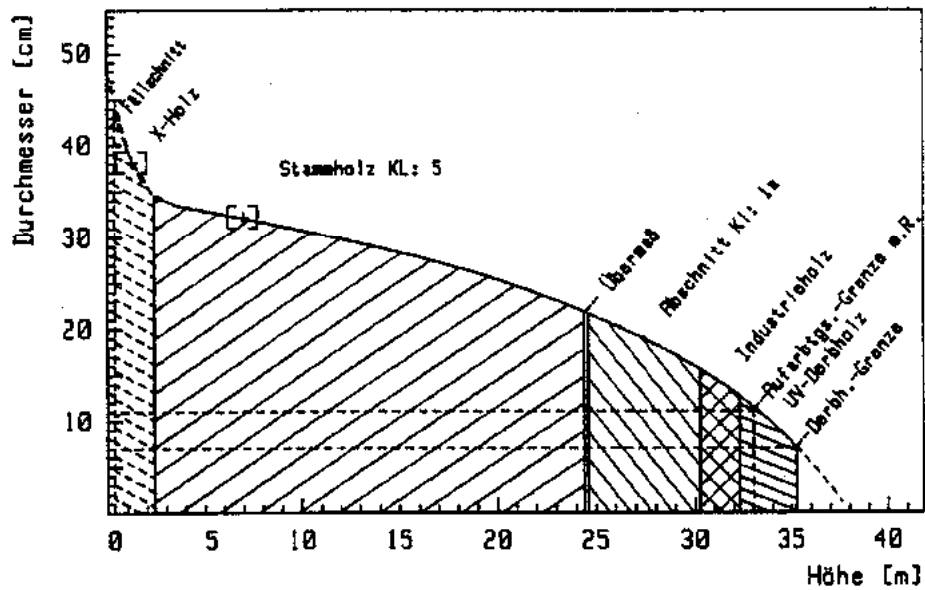
Die Stammholzsortierung bei Laubholz erfolgt über die am Probebaum ermittelte Stammhöhe. Das Derbholzvolumen oberhalb der Stammholzgrenze wird generell als Industrie- bzw. unverwertbares Derbholz ausgehalten (vgl. Abbildung 22).

Abweichend von diesen allgemeinen Aushaltungsregeln wird bei Laub- und Nadelbäumen mit einer

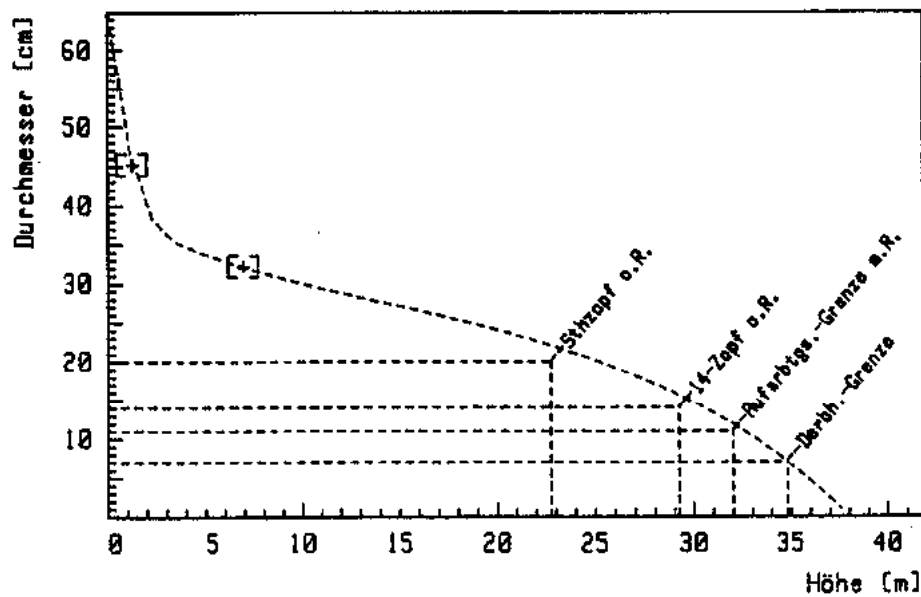
(\*) Zwieselung zwischen 1.30 und 7 m (Skz = 2) Stammholz nur bis 5 m, sofern eine Stammhöhe nicht angegeben wurde, ausgehalten.

(\*) werden Probebäume ohne merklich ausgeprägten Stamm (Skz = 3), d.h. mit einem Kronenansatz unterhalb von 3 m über dem Stammfuß, lediglich als Industrie- bzw. unverwertbares Derbholz sortiert,

Fichte Höhe: 38m, BHD: 38cm, D7m: 32cm

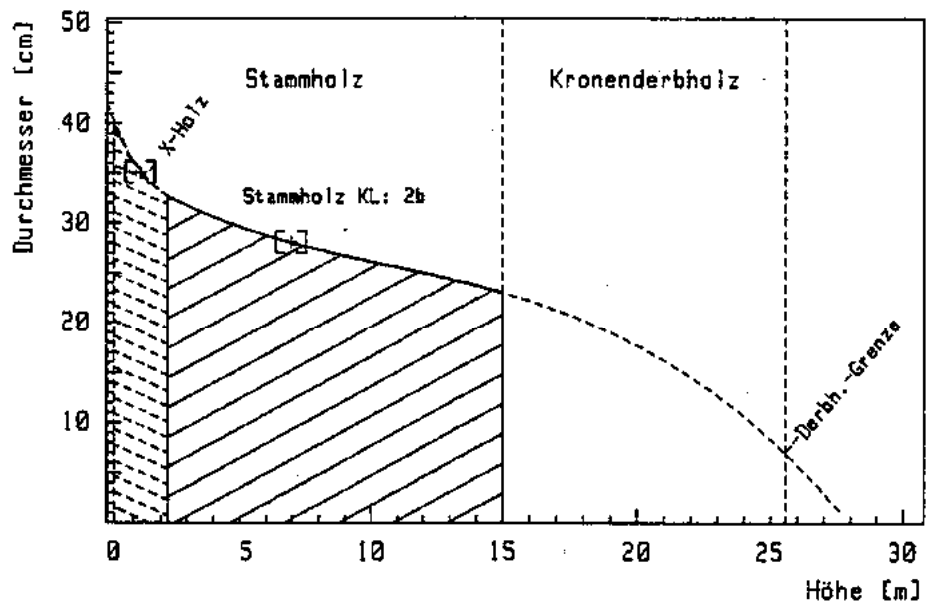


Heilbronner Sortierung mit X-Holz(2m), Stammholz, Abschnitt Kl 1a, Industrieholz, nicht verwertetes Derbhholz



Iteration der Zöpfe - Derbhholzgrenze m.R./ Aufarbeitungsgrenze  
Abschnittszopf o.R./ Stammholzzopf o.R. (Mittenst.Sortierung)

Abbildung 21b



Stammholzsartierung beim Laubholz

Abbildung 22

(\*) wird bei Bäumen mit abgestorbenem oder gebrochenem Stamm, deren Holz über mindestens 2/3 der Gesamtbaumhöhe verwertbar ist ( $Skz = 4$ ), das Volumen und die Sortenaushaltung lediglich bis zu einer Höhe von 70 % der gesamten Schafthöhe ermittelt

(\*) und bei abgestorbenen Bäumen mit verwertbarem Stammholz von weniger als 2/3 der gesamten Baumhöhe auf eine Voluminierung und Sortierung verzichtet.

Trifft bei einem Probebaum einer der hier aufgeführten Sonderfälle zu, werden beim Unterprogramm BDAT über den Eingabeparameter 'Stammkennziffer' z. T. die allgemeinen Sortierungsregeln außer Kraft gesetzt und alternativ eine der oben beschriebenen Aushaltungsregel aktiviert. Eine vollständige Auflistung der Ein- und Ausgabeparameter von BDAT wird im folgenden Abschnitt gegeben.

### **3.0 Unterprogramm BDAT – Modulübersicht, Parameterliste**

Für eine automatisierte Aufbereitung der bei der BWI aufgenommenen Messdaten war die Umsetzung der zuvor diskutierten biometrischen Problemlösungen in Form eines weitgehend rechnerunabhängigen Unterprogramms verlangt, das aufgrund der in der Aufnahmeanweisung definierten Stammparameter als Eingabedaten für jeden Probebaum die Größen:

(\*) Volumen in  $V_{fmD}$  m. R.,

(\*) Stammholz in  $E_{fm}$  o. R.,

(\*) Industrieholz in  $E_{fmD}$  o. R.,

(\*) nicht verwertete Derbholzmasse, sowie

(\*) Volumen in  $E_{fmD}$  m. R.

als Ausgabeparameter für die weitere Datenaufbereitung und –analyse bereitstellt.

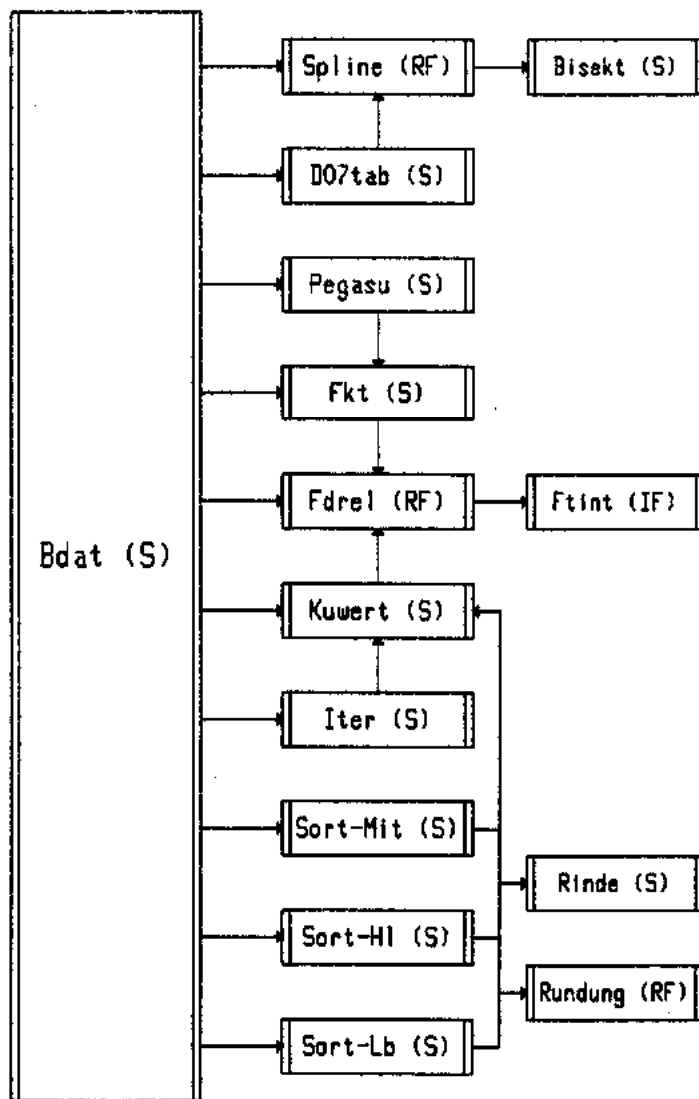
Eine umfassende algorithmische Lösung dieser Problemstellung ist in der

#### **SUBROUTINE BDAT**

**(Iba, Du, Hu, Do, H, Hx, Hkz, Skz, Az, Hsh, Zsh, Zab, Sokz, Skl, Vol, Bhd, Ier)**

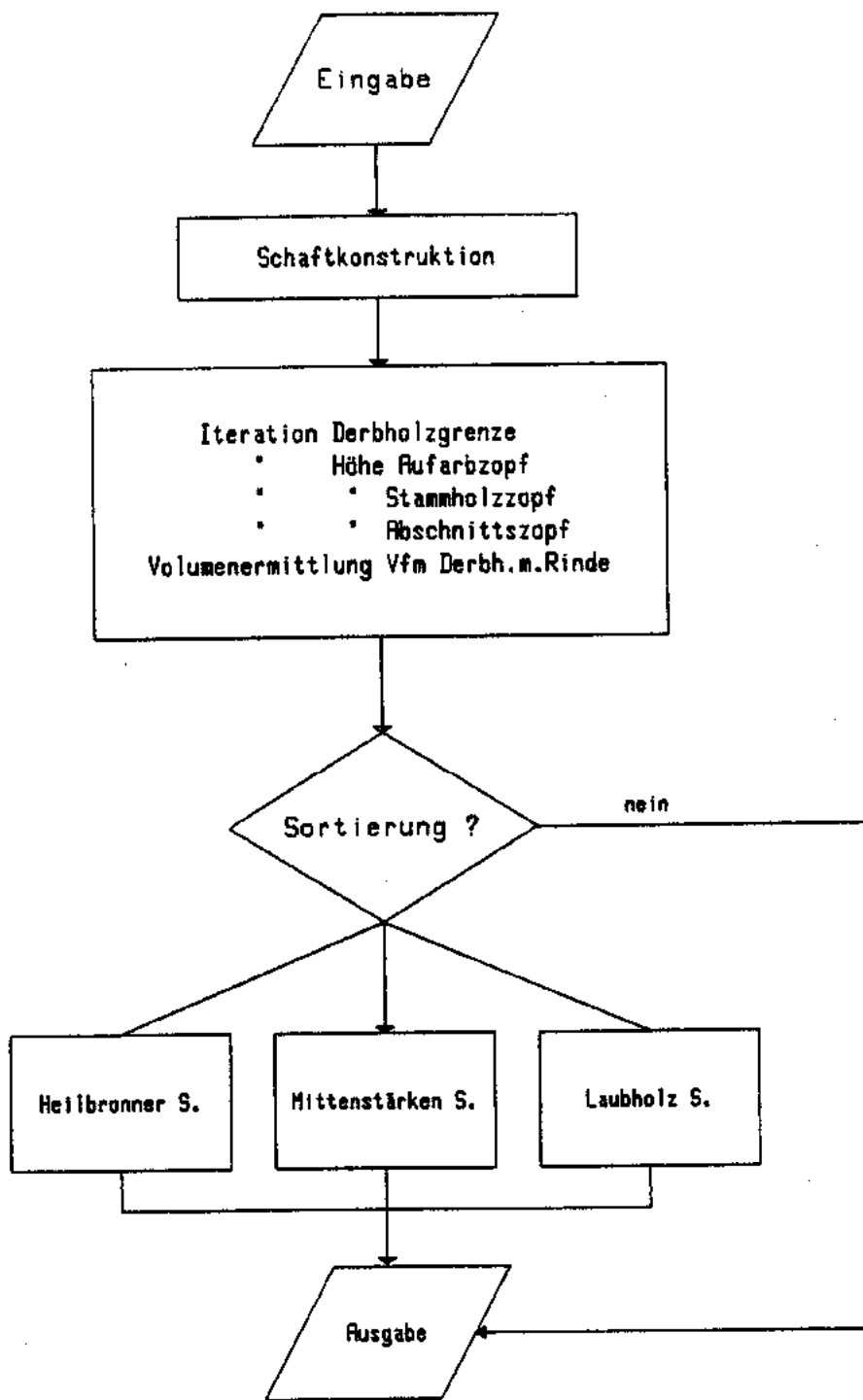
implementiert. Das Unterprogramm ist entsprechend der einzelnen Teilprobleme, Wiedergabe der Schaftform, Rindenabzüge, Sortenaushaltung etc., modular aufgebaut. Die einzelnen Programm-Module sind in der Programmiersprache FORTRAN,

Standard 77 abgefasst, ihre Verflechtung untereinander geht aus der Abbildung 23 hervor. Eine grobe Übersicht über die einzelnen Ablaufschritte bei der Verarbeitung der Messdaten eines Probebaumes vermittelt Abbildung 24.



: Verknüpfung der Unterprogramme  
 S=Subroutine, RF=REAL FUNCTION, IF=INTEGER FN

Abbildung 23



Programmablaufplan

Abbildung 24



## Formale Parameter von BDAT

Typ (I=Integer; R=Real/E=Eingabe; A=Ausgabe)

Iba	I/E	Baumart: 1 – 14 Nadelholz 15 – 36 Laubholz
Du	R/E	Unterer Durchmesser in cm m. R.
Hu	R/E	Höhe unterer Durchmesser in m $0 \rightarrow Hu = 1.3 \text{ m}$
Do	R/E	Oberer Durchmesser (7 m) in cm m. R.
H	R/E	Baumhöhe in m
Hx	R/E	Länge X-Holz am Stammfuß in m
Hkz	I/E	Höhenkennziffer: 1 - Wipfelbruch; $H = H + 2 \text{ m}$ 2 - Gipfelbruch; $BHD < 30 \text{ m} \rightarrow H = Du$ $BHD > 30 \text{ m} \rightarrow H = 30 + (Du-30) * .3$
Skz	I/E	Stammkennziffer : 1 - Wipfelschäftigkeit bei Laubbäumen Höhe Stammholz ( $Hsh$ ) = $H * .7$ 2 - Zwieselung zwischen Brusthöhe und 7 m $Hsh = 0 \rightarrow Hsh = 5 \text{ m}$ Nadelholz: Grenzhöhe für Stammholzzopf ( $Hshz$ ) = 5 m Abschnittszopf ( $Habz$ ) = 5 m 3 - kein ausgeprägter Stamm; Fußpunkt bis Kronenansatz < 3 m Nadelholz: $Hsh = 0.1 \text{ m}$ $Hshz = 0.1 \text{ m}$ $Habz = 0.1 \text{ m}$ 4 - abgestorbener oder gebrochener Stamm; Holz noch verwertbar; Stammlänge bei Bruch

mindestens 2/3 der gesamten Baumhöhe. Festlegung  
der Grenzhöhe für den Aufarbeitungszopf mit  $H \cdot 0.7$

5 - Baum abgestorben, Holz nicht mehr verwertbar oder  
Stammlänge < 2/3 der gesamten Baumhöhe: keine Sortierung

Az	R/E	Grenzzopf für die Aufarbeitung in cm m. R. 0 – Verwendung von Tabellenwerten
Hsh	R/E	Stammhöhe in m
Zsh	R/E	Mindestzopf für Stammholz in cm o. R. 0 - Tabellenwerte
Zab	R/E	Mindestzopf für oberen Stammholzabschnitt in cm o. R. 0 – 14 cm
Sokz	I/E	Sortierkennziffer 0 – keine Sortierung 1 – Mittenstärke 2 - Heilbronner
SkI	I/A	Klassen der Stärkesortierung
(1)		Stärkeklasse X-Holzabschnitt
(2)		Unterklasse 0-a, 1-b
(3)		Stärkeklasse Stammholz
(4)		Unterklasse 0-a, 1-b
(5)		Stärkeklasse oberer Abschnitt
(6)		Unterklasse 0-a, 1-b
Vol	R/A	Volumen
(1)		Vfm m. R.
(2)		X-Holz Efm o. R.
(3)		Stammholz Efm o. R.
(4)		oberer Abschnitt Efm o. R.
(5)		Industrieholz Efm o. R.

(6)		nicht verwertetes Derbholz o. R.
(7)		Ernteverlust Efm o. R.
BHD	R/A	gemessener oder geschätzter Brusthöhendurchmesser in cm m. R. BHD = Du falls Hu = 1.3 m
Ier	I/A	Fehlerindikator <ul style="list-style-type: none"> <li>1 - Unzulässiger Baumartenschlüssel Iba &lt; 1 oder Iba &gt; 36</li> <li>2 - fehlende Baumhöhe: H &lt; 0</li> <li>3 - unterer Durchmesser fehlt: Du &lt; 0</li> <li>4 - Höhe unterer Durchmesser falsch: Hu &gt; 2.5 m</li> <li>5 - (nicht verwendet)</li> <li>6 - Stammhöhe &gt; 0 bei wipfelschäftigem Laubholz: Skz = 1 und Hsh &gt; 0; Iba &gt; 14</li> <li>7 - Zwieselung unterhalb 7 m und Stammhöhe &gt; 7 m bei Laubholz: Skz = 2 und Hsh &gt; 7; Iba &gt; 14</li> <li>8 - Laubbäume ohne erkennbaren Stamm aber mit Angabe einer Stammhöhe: Skz = 3 und (Hsh &gt; 3 m oder Hsh &lt; 1.3 m); Iba &lt; 14</li> <li>9 - Falsche Stammhöhe bei gebrochenem oder abgestorbenem Laubbaum: Skz = 4 und H &lt; Hsh; Iba &gt; 14</li> <li>10 - Wipfelschäftiges Nadelholz mit pos. Stammhöhe: Skz = 0, 1 und Hsh &gt; 0; Iba &lt; 15</li> <li>11 - Abgestorbenes oder gebrochenes Nadelholz ohne Angabe eines Wipfel- oder Gipfelbruchs: Skz = 4 und Hkz = 0; Iba &lt; 15</li> </ul>

12 - Zu vorgegebenen Stammdimensionen H, BHD; keine  $d_{0.7}$ -  
Schätzung möglich ( $D_0 = 0$ )

13 - Zu vorgegebenen Stammdimensionen H, BHD; kein Massen-  
tafelwert vorhanden ( $D_0 = 0$ )

14 -  $d_{0.7}$  ungenau, Iteration geht nicht durch D7 ??????

15 - Dimensionen zu klein (H, BHD) keine Massentafeln

## L i t e r a t u r

- ALTHERR, E., UNFRIED, P., HRADETZKY, J., HRADETZKY, VI  
(1974-79) : Statistische Rindenuntersuchungen als Hilfsmittel zur Ausformung und Aufmessung unentrindeten Stammholzes, Mitt. d. FVA Baden-Württemberg, Heft 61, 68, 78, 90 und 93
- HRADETZKY, J. (1981) : Spline Funktionen und ihre Anwendung in der forstlichen Forschung, Forstwiss. Centralblatt, 100, 45-59.
- HRADETZKY, J., KUBLIN, E., SCHARNAGL, G., SCHÖPFER, W.  
(1986) : Volumen- und Sortenermittlung bei der Bundeswaldinventur, AFZ, Heft 32, 804-807.
- KUBLIN, E. (1985) : Das Konzept der Volumenermittlung für die Bundeswaldinventur, in PELZ, D.R., CUNIA, T. (Hrsg.) : Forstliche Nationalinventuren in Europa, Mitt. der Abt. Forstl. Biometrie, Universität Freiburg.
- KUBLIN, E. (1987) : Grenzen der klassischen Regressionsmodelle – Modellalternativen für aktuelle Fragestellungen in der forstlichen Biometrie, im Druck.
- KUBLIN, E., HRADETZKY, J., HANNAK, C. (1984) : Ein einheitliches Modell zur Beschreibung der Schaftform mit Spline-Funktionen, Mitt. der FVA Baden-Württemberg, Heft 108, 293-302.
- LAHTINEN, A., LAASASENAHO, J. (1979) : On the construction for taper curves by using spline functions, Commun. Inst. For. Fenn. 95, 8, 1-63.
- POLLANSCHÜTZ, J. (1965) : Eine neue Methode der Formzahl- und Massenbestimmung stehender Stämme, Mitt. der FVA Mariabrunn, 68.
- PRODAN, M. (1965) : Holzmesslehre, Sauerländer, Frankfurt/Main.

ROIKO-JOKELA, P. (1976) : Die Schaftformfunktion der Fichte und die Bestimmung der Sortimentsanteile am stehenden Baum, Mitt. d. Eidgen. Anstalt für das forstl. Versuchswesen, Heft 52, 1-84.

SABOROWSKI, J., SLOBODA, B., JUNGE, A. (1981) : Darstellung von Schaftformen durch kubische Spline-Interpolation und Reduktion der Stützstellenanzahl, Forstarchiv Heft 4, 127-130.

SCHIFFEL, A. (1905) : Form und Inhalt der Lärche, Mitt. a.d. forstl. Versuchswesen Österreichs, Heft 32.