

**Die relative Kronenlänge als Steuerungsparameter des  
Einzelbaumwachstums der Fichte**

Inaugural-Dissertation zur  
Erlangung der Doktorwürde  
der Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften  
der Albert-Ludwigs-Universität  
Freiburg i. Brsg.

vorgelegt von

Chris Freise

Freiburg im Breisgau  
2005

Dekan: Prof. Dr. E. Hildebrand  
Referent: Prof. Dr. H. Spiecker  
Korreferent: Prof. Dr. G. Becker

Datum der mündlichen Prüfung: 21. Juni 2005

## **Vorwort**

Die Entstehung dieser Arbeit hat von wertvollen Anregungen bis zur tatkräftigen Hilfe bei der Datenaufnahme im Gelände von der Unterstützung durch THÜRINGENFORST, der Thüringer Landesforstverwaltung, profitiert. Bei allen Mitarbeitern und Kollegen, die in irgendeiner Form zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, möchte ich mich an dieser Stelle herzlich bedanken.

Herrn Prof. Dr. Spiecker, dem Direktor des Instituts für Waldwachstum der Universität Freiburg i. Brsg., danke ich für die wissenschaftliche Anleitung und Betreuung sowie die konstruktiven Diskussionen und das Interesse, das er dieser Arbeit entgegen gebracht hat.

Ebenso gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. G. Becker für die freundliche Übernahme des Korreferats.

Meiner Frau Anja und meinen Kindern Emma, Paul und Lilli danke ich für ihr Verständnis und die Zeit, die auch auf ihre Kosten in diese Arbeit geflossen ist.

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung und Ziel.....</b>	<b>1</b>
1.1 Einleitung.....	1
1.2 Problem.....	2
1.4 Ziel.....	5
<b>2 Die relative Kronenlänge als zentraler Wachstumsparameter der Fichte .....</b>	<b>6</b>
2.1 Funktion und Aufbau der Krone.....	6
2.2 Kronenkennwerte in der Waldwachstumsforschung.....	8
2.2.1 Einfluss der relativen Kronenlänge auf den Zuwachs.....	9
2.2.2 Einfluss der relativen Kronenlänge auf Vitalität und Stabilität .....	10
2.2.3 Beziehung zwischen relativer Kronenlänge und Konkurrenz.....	11
2.3 Die relative Kronenlänge als Modellparameter.....	12
<b>3 Material und Methoden .....</b>	<b>14</b>
3.1 Vorüberlegungen .....	14
3.1.1 Untersuchungsansatz.....	14
3.1.2 Rekonstruktion der Wachstumsparameter .....	15
3.1.3 Auswahl des Untersuchungsmaterials.....	17
3.1.4 Auswahl der Konkurrenzparameter .....	18

---

3.2 Nullhypothesen.....	21
3.3 Material.....	22
3.3.1 Untersuchungsstandort.....	22
3.3.2 Untersuchungsbestand.....	24
3.3.3 Praktische Relevanz und Repräsentanz des Untersuchungsmaterials.....	25
3.3.4 Kennwerte der Zentralbäume.....	27
3.4 Außenaufnahmen.....	27
3.4.1 Stichprobendesign.....	27
3.4.2 Messungen am stehenden Baum.....	29
3.4.3 Messungen am liegenden Baum.....	33
3.5 Labormethoden.....	36
3.5.1 Berechnung der Kronenkennwerte der Zentralbäume.....	36
3.5.2 Rekonstruktion der Wachstumsparameter der Zentralbäume.....	38
3.5.3 Rekonstruktion der Wachstumsparameter der Probekreisbäume.....	44
3.5.4. Erfassung und Rekonstruktion der Konkurrenzparameter der Zentralbäume.....	46
3.6 Datenanalyse.....	48
3.6.1 Referenzen.....	49
3.6.2 Beobachtungszeitraum.....	49
3.6.3 Statistische Auswertungen.....	50
3.7 Untersuchte Variablen.....	52

---

<b>4 Ergebnisse .....</b>	<b>53</b>
4.1 Grundsätzliche Beziehungen der Wachstumsparameter zum Aufnahmezeitpunkt.....	54
4.1.1 Kronenparameter .....	55
4.1.2 Dimensionsparameter .....	58
4.1.3 Konkurrenzparameter .....	60
4.2 Reaktion des Durchmesserzuwachses .....	63
4.2.1 Anpassung der Schätzfunktionen des Durchmesserzuwachses .....	63
4.2.2 Plausibilitätsprüfung der Durchmesserzuwachsfunctioen.....	70
4.2.3 Kurzfristige Reaktionen des Durchmesserzuwachses als Störgrößen.....	72
4.3 Reaktion der relativen Kronenlänge .....	76
4.3.1 Anpassung der Schätzfunktionen der relativen Kronenlänge am Ende des Bezugszeitraums (ERKL) .....	77
4.3.2 Anpassung der Schätzfunktionen der durchschnittlichen jährlichen Veränderung der relativen Kronenlänge im Bezugszeitraum ( $\Delta$ RKL).....	83
4.3.3 Plausibilitätsprüfung der relativen Kronenlängenfunktionen .....	86
4.4 Reaktion des h/d-Wertes.....	90
4.4.1 Anpassung der Schätzfunktionen der h/d-Wertentwicklung.....	92
4.4.2 Einfluss des Alters auf den h/d-Wert .....	93
4.4.3 Plausibilitätsprüfung der h/d-Wertfunktionen.....	95

---

<b>5 Diskussion .....</b>	<b>97</b>
5.1 Material- und Methodendiskussion .....	97
5.1.1 Materialdiskussion .....	97
5.1.2 Methodendiskussion.....	99
5.2 Ergebnisdiskussion .....	104
5.2.1 Durchmesserzuwachs .....	105
5.2.2 Entwicklung der relativen Kronenlänge.....	110
5.2.3 h/d-Wertentwicklung.....	115
5.3 Einschränkungen und Grenzen der Übertragbarkeit .....	118
5.4 Waldbauliche Schlussfolgerungen und Ansätze für weitere Untersuchungen.....	120
5.4.1 Einzelbaumebene .....	120
5.4.2 Bestandesebene .....	124
5.4.3 Waldbauliche Strategie .....	127
<b>6 Zusammenfassung.....</b>	<b>130</b>
<b>7 Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>133</b>
<b>8 Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>135</b>
<b>9 Literaturverzeichnis.....</b>	<b>138</b>

---

## 1 Einleitung und Ziel

### 1.1 Einleitung

Ein zentrales Ziel der Forstwirtschaft in Mitteleuropa ist es, stabile und gemischte Waldbestände zu entwickeln. Diese zukünftigen Wälder sollen „... ein hohes Maß an biologischer Vielfalt mit hoher Widerstandskraft gegen Witterungsextreme, Schädlingsbefall und Schadstoffeinträge sowie ein großes Anpassungspotenzial im Hinblick auf Klimaänderungen aufweisen ...“ (BMVEL 2003). Das wichtigste Umsetzungsinstrument hierzu ist die naturnahe Waldbewirtschaftung (OTTO 1994, SCHERZINGER 1996, SCHMITDT-VOGT 1991, SCHÜTZ 1990, 1994, STURM 1995, THOMASIU 1992).

Speziell für THÜRINGENFORST, die thüringische Landesforstverwaltung, ist die naturnahe Waldwirtschaft eine „... Strategie, dem gesellschaftlichen Wertewandel und den vielfältigen gesellschaftlichen Anforderungen an das Ökosystem Wald gerecht zu werden“ (TMLNU 2000). Das Leitbild dieser Wirtschaftsweise ist ein horizontal und vertikal reich strukturierter, gemischter Wald mit insgesamt dauerwaldartigen Beständen aus standortgerechten Baumarten (ECKHARDT 1994, 1996, ARENHÖVEL 1996).

Die Ausgangslage in Thüringen ist allerdings wie in ganz Deutschland aus historischen Gründen von nadelholzdominierten Altersklassenwäldern geprägt (BMVEL 2005, BURSCHEL und HUSS 1997, ELLENBERG 1996, SCHÖLCH 1996). Die Thüringer Wälder sind hier relativ typisch für die bundesweite Situation. Sie bestehen zu 60 % aus Nadel- und zu 40 % aus Laubholz (TMLNU 2004, ZEHNER 2005). Unter natürlichen Bedingungen wäre das Verhältnis in etwa umgekehrt (GASTINGER 1957).

Nach den Ergebnissen der BWI II weisen die Thüringer Wälder mit aktuell 301 Vfm/ha eine beachtliche Vorratsakkumulation auf und liegen damit im Bundesvergleich an fünfter Stelle (BMVEL 2005, SCHLAGHECK & SCHMITZ 2005, ZEHNER 2004). Dies macht sie vor dem Hintergrund eines sich abzeichnenden Klimawandels (ENKE & SCHNEIDER 2003, GERSTENGARBE et al. 2003, SPIECKER 1995, 2003, WELLER 2002) zunehmend risikoanfälliger und erfordert zukunftsorientierte Managementstrategien im Rahmen der Naturnahen Waldbewirtschaftung. Der dominierende Nadelholzanteil ist von eher jungen

Beständen geprägt. Diese Bestände haben zum Großteil altersklassengeprägte Reinbestandsstrukturen, hohe Bestockungsgrade und hohe laufende Zuwächse. Innerhalb des Nadelholzes kommt in Thüringen der Fichte (*Picea abies* [L.] Karst.) bei der Entwicklung zukunftsfähiger Nutzungsstrategien eine ökonomische und ökologische Schlüsselrolle zu<sup>1</sup> (TRAUBOTH & KRAUSS 1996): Fichtenwälder nehmen aktuell rund 70 % der thüringischen Nadelwaldfläche ein (BMVEL 2005, ZEHNER 2004 & 2005). Mit der Pflegenutzung der Fichtenbestände werden rund 60 % der jährlichen Einnahmen von THÜRINGENFORST realisiert (TMLNU 2004).

Bei der Überführung der aktuellen Thüringer Fichtenbestände in den Zielzustand „strukturreiche, gemischte Bestände mit Dauerwaldcharakter“ sind aufgrund des Alterklassencharakters zunächst noch die Bestände neben dem Einzelbaum eine wichtige waldbauliche Betrachtungsebene (ARENHÖVEL 1996, EPP & SPIECKER 2005, SCHÖLCH 1996). Perspektivisch wird der Einzelbaum an Bedeutung gewinnen, je mehr die Thüringer Wälder ihren Altersklassencharakter verlieren (FREISE 2003).

## 1.2 Problem

Neuere Waldbaukonzepte setzen bei der Fichte auf Z-Baum orientierte Auslesedurchforschungen. Sie berücksichtigen zunehmend Einzelbaumparameter<sup>2</sup> und zeichnen insgesamt eine Entwicklung von alterklassengeprägten Bestandesmodellen hin zu ziel- und zustandsorientierten Einzelbaummodellen nach, die sich auch auf die Phase der Überführung erstrecken (ABETZ 1975, 1976 a, b, c, 1979, 1980, 1990, 1992, 1993, ABETZ & OHNEMUS 1994, ABETZ & KLÄDTKE 2000, EPP 2003, GOLZ 1991, HAHNEWINKEL 1996, KLÄDTKE 1992, KRAMER 1988, LETTER 2000, REININGER 1987, SCHOBER 1979, 1980, 1988, SPATHELF 1999, WILHELM et al. 1999). In der waldbaulichen Praxis haben sich vor allem die neueren ziel- und zustandsorientierten Einzelbaummodelle als Steuerungs-

---

<sup>1</sup> Auf die grundsätzliche Gefährdung der Fichtenwälder im Thüringer Wald wiesen schon GASTINGER & SCHWANECKE (1967): „Wenn hier auf bestockungsbedingte Gefahren ... eingegangen werden soll, dann muss besonders auf die einförmige Verfichtung ... hingewiesen werden. Hier wächst in den Hoch- und Kammlagen eine Fichtengeneration mit nur relativ geringen Altersschwankungen in ein für jede Art von Kalamitäten disponiertes Schlusswaldgefüge.“

<sup>2</sup> Die Thüringer Behandlungsrichtlinie für Fichtenbestände formuliert z. B. als operative Einzelbaumziele: h/d-Wert < 80 und relative Kronenlänge mindestens 50 % (TMLNU 2000 a). Diese Vorgaben sind stabilitätsorientiert gesetzt, stützen sich aber nicht auf eigene empirische Untersuchungen vor Ort. Hierdurch könnte die Glaubwürdigkeit „vor Ort“ und in der Folge die Umsetzung in die Praxis verbessert werden.

instrumente bis jetzt nicht durchgesetzt. Hier erfolgt das waldbauliche Management immer noch maßgeblich über die Herleitung eines globalen Nutzungssatzes auf Bestandesebene. Einzelbaumzielgrößen sind z. B. in den Behandlungsrichtlinien der meisten Landesforstverwaltungen zwar verbal formuliert, aber das hierfür erforderliche waldbauliche Management ist für die Praxis nur unzureichend operativ untersetzt. So ist für den Praktiker die zielkonforme Beeinflussung des Einzelbaumwachstums vor Ort subjektiv und immer noch weitgehend dem „forstlichen Götterblick“ überlassen.

Stabile und wertvolle Einzelbäume sind eine der wichtigsten Voraussetzungen für die Überführung fichtendominierter Altersklassenwälder in flexiblere und naturnähere Waldstrukturen (u. a. AMMAN 1999, SCHÜTZ 1999, 2001, SPIECKER 1986, 1991 a, 1999). Die zielkonforme Beeinflussung des Einzelbaumwachstums gewinnt daher bei neuen Waldbaukonzepten und insbesondere bei der Überführung von Altersklassenwäldern in naturnähere Bestände an Bedeutung (EPP 2003, SPATHELF 1999).

Entscheidend sind hierbei Kenntnisse darüber, wie das Einzelbaumwachstum zielkonform gesteuert bzw. beeinflusst werden kann. Um Wirkung zu erzielen, muss die wissenschaftliche Erkenntnis auch an die Ausführungsebene vermittelbar sein. D. h. es werden überzeugende Argumente und möglichst einfache Umsetzungsinstrumente benötigt, die sich an den Bedürfnissen der Praxis orientieren<sup>3</sup> (vgl. HENKEL 1995, SPIECKER 1991 b, 1997).

Am effizientesten lässt sich das (Einzel-) Baumwachstum in jüngeren Beständen beeinflussen (u. a. ASSMANN 1961, KRAMER 1988, MITSCHERLICH 1971, 1978). Das spiegelt sich schon im Durchforstungsgrundsatz „früh, mäßig, oft“, bei dem das „früh“ an erster Stelle steht. Waldwachstumskundliche Forschungsarbeiten zur Frage der Überführung konzentrieren sich vor allem auf die Reaktion des Einzelbaumwachstums in fortgeschritteneren Entwick-

---

<sup>3</sup> Die vorliegende Arbeit ist in das Projekt „Zukunftsorientierte Fichtenwirtschaft“ (ZFW) eingebettet. ZFW ist ein Kooperationsprojekt, das in Zusammenarbeit der Thüringer Landesforstverwaltung und dem Institut für Waldwachstum (IWW) der Universität Freiburg i. Br. entwickelt wurde. Weitere Partner des offenen Kooperationsprojektes sind u. a. die Thüringer Fachhochschule für Forstwirtschaft (TFHS), die Thüringer Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei (TLWJF), das Institut für Forstplanung und Waldmanagement der Universität Göttingen, das Institut für Forstbenutzung und Arbeitswissenschaft der Universität Freiburg i. Br. (FOBAWI) sowie das Institut für Waldwachstum und Forstliche Informatik der TU Dresden. Ziel des Kooperationsprojektes ist die beispielhafte empirische Überprüfung zukunftsfähiger Nutzungsstrategien für die Fichte und die Entwicklung von praxisgerechten Umsetzungsinstrumenten. ZFW wird unterstützt von: Zellstoff- und Papierfabrik Rosenthal GmbH & Co. KG, Zellstoff Stendal GmbH, Rettenmeier Holzindustrie Ullersreuth GmbH & Co. KG, Klausner Holz Thüringen GmbH & Co. KG, Holzvermessungsgesellschaft AG, SCA Holz GmbH Hösbach, Waldbesitzerverband für Thüringen e. V., Gemeinde und Städtebund Thüringen als kommunaler Waldbesitzerverband (FREISE 2003).

lungsphasen und hier vor allem auf die Wachstumsreaktion der Verjüngung oder bisher bedrängter Individuen auf Freistellung (BÖRNER & ROEDER 1994, EPP 2003, KLÄDTKE 1999, ÖRLANDER & KARLSSON 2000, REININGER 1987, SCHMITT 1994 a, b, SCHNEIDER & ROEDER 1993, SPATHELF 1999, STERBA & ZINGG 2001, WEISE 1995). SCHÜTZ (2001, 1999) weist in seinen Arbeiten zur Überführung von einschichtigen Nadelbaumbeständen auf die Bedeutung so genannter „Deckungsträger“ hin. Nach SCHÜTZ handelt es sich hierbei um besonders vitale Individuen, welche die gesamte Überführungsphase überleben müssen, damit durch die Lichtsteuerung des durch sie gebildeten Oberstandes das Nachrücken der nachwachsenden Baumindividuen gelenkt werden kann. So soll verhindert werden, dass aus einem zunächst zweischichtigen Verjüngungsbestand nach Ausfall des Oberstandes wieder ein einschichtiger Bestand erwächst. SCHÜTZ beziffert die erforderliche Anzahl dieser Gerüstbäume mit 40 - 60 St./ha. Um diese „Deckungsträger“ zu erhalten, muss das zielgerichtete Bestandesmanagement schon wesentlich früher als erst in der Verjüngungsphase ansetzen (BIOLLEY 1897).

Nach FAVRE (1956) und BERNASCONI (1984) sind Überführungen in der Praxis nur dann Erfolg versprechend, wenn sie in der ersten Hälfte der möglichen Lebensdauer des Bestandes begonnen werden. Hiermit einher gehen auch eine Reihe anderer positiver Effekte z. B. auf Vitalität und Stabilität der Einzelbäume sowie auf das gesamtbetriebliche Risiko (GERECKE 1988, 1991, KNOKE 1998, SCHÖLCH 1996, SPIECKER 1986, 1991 a). Um optimale Ausgangsbedingungen für eine spätere Überführung zu schaffen, bieten daher vor allem die frühen Durchforstungsphasen die günstigsten Bedingungen für grundlegende Weichenstellungen des Einzelbaumwachstums und eine spätere Überführung. Diese Phasen sind in Thüringen gleichzeitig von hoher ökonomischer und ökologischer Relevanz.

Bei allen Baumarten bestehen enge Beziehungen zwischen Kronenkennwerten und Zuwachs (u. a. BURGER 1939, WECK 1951, HAMILTON 1969). Einer der aussagekräftigsten und vor allem zur Steuerung des Wachstums praktikabelsten Parameter des Einzelbaumwachstums der Fichte ist die relative Kronenlänge (SPATHELF 1999). Bei der Fichte bestehen auf Einzelbaumebene enge Zusammenhänge sowohl zwischen relativer Kronenlänge und Zuwachs (EPP 2003, SPATHELF 1999, SPIECKER 1986, 1991 a, PRETZSCH 1992) als auch Stabilität und Vitalität (ABETZ 1976 b, SEIFERT et al. 2003 a, WILHELM et al. 1999) sowie Holzqualität und Wertleistung (BUES 1996, RECK 2002, SEELING 2001, SEELING et al. 2004, SEIFERT et al. 2003 a, b). Diese Zusammenhänge

bestehen grundsätzlich in gleich- und ungleichaltrigen Bestandesstrukturen sowie in Rein- und Mischbeständen (SPATHELF 1999, SPIECKER 1986, 1991 a, b).

#### 1.4 Ziel

Ziel der vorliegenden Arbeit ist vor dem Hintergrund der aktuellen Thüringer Zielstellungen für die Behandlung von Fichtenbeständen<sup>4</sup>:

- die Entwicklung des Einzelbaumparameters relative Kronenlänge (RKL) in der ersten Hälfte der Durchforstungsphase empirisch zu überprüfen,
- die Entwicklung der relativen Kronenlänge mit Bestandesdaten bzw. der sozialen Situation des Einzelbaumes und seines h/d-Wertes zu verknüpfen
- sowie ein einfaches Modell zur Beeinflussung der Zuwachsreaktion des Einzelbaumes in Abhängigkeit der relativen Kronenlänge und ggf. anderer geeigneter Variablen zu entwickeln.

Abhängige Variablen des Modells sind Durchmesserzuwachs und h/d-Wert. Unabhängige Variablen sind Konkurrenz (Bestandesdichte), Baumdimension und Entwicklungsstadium. Die relative Kronenlänge ist je nach Fragestellung abhängige oder unabhängige Variable.

Im Zentrum der Untersuchung steht die Beantwortung folgender Fragen:

1. Wie reagiert der Durchmesserzuwachs des Einzelbaumes in Abhängigkeit der relativen Kronenlänge und ggf. anderer erklärender Parameter?
2. Wie reagiert der h/d-Wert des Einzelbaumes in Abhängigkeit der relativen Kronenlänge und ggf. anderer erklärender Parameter?
3. Wie reagiert die relative Kronenlänge des Einzelbaums in Abhängigkeit der Konkurrenz und ggf. anderer erklärender Parameter, und welche relative Kronenlänge eines Einzelbaumes ist zu Beginn der Durchforstungsphase (ca. Alter 35) mindestens erforderlich, um bei gegebenen Bestandesdichten im Alter 55 eine relative Kronenlänge von mindestens 50 % zu erreichen?
4. Welche Schlussfolgerungen können hieraus für die waldbauliche Behandlung von jungen Fichtenbeständen und die gesamtbetriebliche Strategie gezogen werden?

---

<sup>4</sup> Die aktuellen Thüringer Waldbaurichtlinien empfehlen für Fichten-Z-Bäume eine relative Kronenlänge von mind. 50 %. Man verspricht sich hiervon eine möglichst optimale Kombination von Einzelbaumstabilität, Wertleistung und Flexibilität auf dem Weg von strukturalternen Alterklassenwäldern hin zu dauerwaldartigen Beständen mit größerer Struktur- und Artenvielfalt.

## **2 Die relative Kronenlänge als zentraler Wachstumsparameter der Fichte**

Die relative Kronenlänge ist einer der am besten geeigneten Parameter zur Beeinflussung des Einzelbaumwachstums der Fichte (SPATHELF 1999). Sowohl Funktion und Aufbau der Krone als auch der Zusammenhang zwischen Kronenkennwerten und Zuwachs sowie Stabilität und Vitalität und die Modellierung des Einzelbaumwachstums mit der relativen Kronenlänge als zentralem Modellparameter waren Gegenstand zahlreicher Untersuchungen im Bereich der Waldwachstumskunde.

### **2.1 Funktion und Aufbau der Krone**

Grundlage für die Wachstumsprozesse eines Baumes ist die Nettophotosynthese seines Assimilationsapparates (KRAMER 1988, KRAMER & KOZLOWSKY 1979). Baumkronen sind Träger der Photosynthese. Der Assimilationsapparat eines Baumes wird durch die Blätter gebildet, die an Lang- und Kurztrieben inserieren. Zwischen Krone und Zuwachs besteht daher ein seit langem bekannter grundsätzlicher Zusammenhang (u. a. ASSMANN 1961, MITSCHERLICH 1971, 1978, WECK 1951).

Unter biomechanischen Gesichtspunkten kommt der Krone eine ambivalente Bedeutung zu. Einerseits bilden große Kronen große Angriffsflächen für mechanische Kräfte wie z. B. Wind und Schneeeauflagen (u. a. METZGER 1893, MITSCHERLICH 1942). Andererseits assimiliert die Krone organische Substanz, mit der der Baum seinen Schaft mit mehrfacher Sicherheit gegen mechanische Beschädigungen absichern kann. Das gilt insbesondere für die Absicherung gegen Bruch (u. a. MATTHECK 1990, MATTHECK et al. 1992, MCMAHON 1975, MÜNCH 1938, WESSOLOY & ERB 1998, WILSON & ARCHER 1979). Im Überlebenswettbewerb hat der Bruch des Baumschaftes die negativsten Auswirkungen auf die Fitness eines Baumindividuums. Die positiven Auswirkungen eines vergrößerten Assimilationsapparates überwiegen die Risiken unter biologischen und biomechanischen Gesichtspunkten bei weitem (vgl. BURSCHEL & HUSS 1997, SEIFERT et al. 2003).

Nach HORN (1971) existiert ein Zusammenhang zwischen der Kronenarchitektur und der evolutiven Strategie von Bäumen. Ähnlich wie ABETZ (1968) sieht HORN (1971) den Baum grundsätzlich als Solitär im Bestand. Nach HORN sollte eine Baumart früher Sukzessionsphasen (wie z. B. die Fichte) ihre Krone in mehreren Schichten („Multilayer“)

anordnen, um ihre Blätter in optimalen Lichtgenuss zu bringen. Die Blätter sollten skleromorph gebaut, das Holz der Baumart eher weich und die Krone insgesamt eher hoch, dünn und konisch geformt sein. Aufbauend auf einem Ansatz von HABERLANDT (1893) stellt auch BRUNIG (1976) eine Beziehung zwischen Kronenstruktur und ökologischem Verhalten einer Baumart her (vgl. ROLOFF 2001).

BURGER (1939) entwickelte ein noch heute gebräuchliches Modell zur Beschreibung der Nadelbaumkrone. Er unterteilt die Krone in eine Lichtkrone im oberen sowie eine Schattenkrone im unteren Teil. Den unbenadelten inneren Kronenteil definiert BURGER als Kronenkern. Den Übergang von Licht- zu Schattenkrone markiert der Bereich der größten Kronenbreite.

In der Lichtkrone werden bis zu 60 % des Strahlungsumsatzes eines Baumes geleistet (BAUMGARTNER 1964). Sie hat die größte Bedeutung für die Assimilation (MITSCHERLICH 1971). Bei den meisten Baumarten ist die Photosyntheseleistung im Bereich der Schattenkrone deutlich geringer als in der Lichtkrone (KÜNSTLE & MITSCHERLICH 1975, SCHULZE et al. 1977). Innerhalb der Lichtkrone weist der untere Teil die höchste Photosyntheseleistung auf (SCHULZE et al. 1977). Nach KÜNSTLE (1972) und MILLER (1959) sind auf Ebene der Nadeljahrgänge die jüngsten ein- und zweijährigen Nadeln in ihrer Nettoassimilation überlegen. GRUBER (1990) beziffert die durchschnittliche Lebensdauer von Fichtennadeln mit 7 Jahren. Sie reicht dabei von 4 Jahren bei gestressten Bäumen bis zu 11 Jahren unter günstigen Wachstumsbedingungen. Ältere Nadeln leisten als so genannte „ineffektive Benadelung“ kaum noch Beiträge zur Assimilation des Baumes (BEYSCHLAG et al. 1994, GRUBER 1990 & 1992, KÖHL 1993). Nach ROLOFF (2001) nutzt sie der Baum nur noch als geringes Nährstoffdepot. Ihre Lebensdauer wird primär über den Wasserhaushalt gesteuert und bei Wasserstress beendet. Die durch Nadelfall entstehenden Benadelungslücken kann die Fichte bereits in der Jugend durch Ersatztriebe aus schlafenden Knospen decken. In höherem Alter und bei Stress können die Nadeln solcher Ersatztriebe einen höheren Anteil an der Gesamtnadelmasse haben als die der regulären Triebe (GRUBER 1992). Diese Reiterationen stellen für das Kronensystem der Fichte eine Reaktionsmöglichkeit auf Umwelteinflüsse dar (ROLOFF 2001). Hierdurch verfügt auch die im Vergleich mit anderen Baumarten wie z. B. Buche und Tanne recht „starre“ Fichtenkrone über ein gewisses Maß an innerer Kronenelastizität (vgl. ASSMANN 1961).

## 2.2 Kronenkennwerte in der Waldwachstumsforschung

Kronenmerkmale und Zuwachsgrößen wurden in der Waldwachstumsforschung schon früh untersucht (u. a. ERTELD & KRÄUTER 1957, LIEBOLD 1962, LOETSCH 1953, TOMA 1940). Als Messgrößen für die Einschätzung der Leistungsfähigkeit von Baumkronen wurden verschiedene Parameter verwendet. In mehr ökophysiologisch orientierten Arbeiten (z. B. BURGER 1953) standen Laub- bzw. Nadelgewichte und baumbezogene Blattflächenindices im Vordergrund. Diese Parameter sind mit einem enormen Erhebungsaufwand verbunden (SCHÖPFER 1961). Praktikabler erwiesen sich die Verwendung der Kronenschirmfläche (bzw. Kronenbreite) und Kronenmantelfläche (u. a. KLÄDTKE 1992, SPIECKER 1991 b, WOHLFARTH 1935). Bei Nadelbäumen hat sich aufgrund ihrer spezifischen Kronenarchitektur die Kronenmantelfläche gegenüber der Kronenschirmfläche als aussagefähigere Größe erwiesen (vgl. HORN 1971). KRAMER (1966, 1971) ermittelte bei Fichte engere Beziehungen zwischen Kronenmantelfläche und Volumenzuwachs als zwischen Kronenschirmfläche und Volumenzuwachs. Der auf die Kronenmantelfläche bezogene Zuwachs hat sich ebenfalls beim Nachweis von Zuwachsverlusten bei Nadelbäumen bewährt (DONG & KRAMER 1986, KRAMER 1986).

In die Herleitung der Kronenmantelfläche und auch des Kronenvolumens geht je nach Methode neben der Kronenschirmfläche die Kronenlänge (bzw. relative Kronenlänge) als bestimmende Größe ein (KRAMER & AKCA 1995, SCHMITT 1994, SPATHELF 1999). Im Vergleich zur Kronenschirmfläche sowie den aus ihr abgeleiteten Größen Kronenbreite und Kronenradius hat die relative Kronenlänge den Vorteil, dass sie ohne größeren Aufwand und Hilfsmittel im Gelände relativ einfach und präzise angesprochen werden kann (vgl. SPIECKER 1986 & 1991 a). Zudem ist die relative Kronenlänge eng mit einer Reihe anderer Kronen- und Wachstumsparameter wie z. B. sozialer Stellung oder Brusthöhendurchmesser korreliert (u. a. BURGER 1939 a, b, KRAMER 1975)<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> Bei einer rein visuellen Schätzung kann es allerdings ohne eichende Messungen zu einer systematischen Unterschätzung der relativen Kronenlänge in der Größenordnung von rund 10 Prozentpunkten kommen (vgl. Kap. 5.1.2 Methodendiskussion).

### 2.2.1 Einfluss der relativen Kronenlänge auf den Zuwachs

Der enge Zusammenhang zwischen relativer Kronenlänge und Zuwachs ist bei Nadelbäumen durch mehrere Untersuchungen belegt.

Bereits HAUFE (1927) weist darauf hin, dass der Lichtungszuwachs des Einzelbaumes neben Alter und Boden auch von dessen Bekronung abhängt.

GERECKE (1986) konnte mit Stammanalysen an herrschenden Bäumen höheren Alters bei der Tanne nachweisen, dass Bäume mit längeren Kronen über 35 % relativer Kronenlänge ein höheres Zuwachsniveau aufweisen als Bäume mit kürzeren Kronen. Auch WEISE (1995) stellt heraus, dass der Lichtungszuwachs bei Fichten und Tannen „... insbesondere vom Bekronungsgrad abhängt ...“.

Als kritischen Grenzwert für eine positive Zuwachsreaktion mitherrschender und zwischenständiger Fichten und Tannen nach Freistellung gibt WEISE (1995) eine relative Kronenlänge von 30 % an. Dieser Wert wird auch von KLÄDTKE (1999) für Fichten und Tannen bestätigt (u. a. auch EPP 2003, SCHMITT 1994 a, b, SPATHELF 1999).

Mit ansteigender relativer Kronenlänge verbessert der Einzelbaum generell seine positive Reaktionsfähigkeit auf Freistellungen und steigert seinen Durchmesserzuwachs bis zum Maximum des konkurrenzfreien Wachstums eines Solitärs (ABETZ 1968, HASENAUER et al. 1994, FREISE & SPIECKER 1999, LÄSSIG 1991). So sind bei der Fichte die höchsten Durchmesserzuwächse für die Bäume mit den jeweils längsten Kronen bzw. größten Kronenprozenten ermittelt worden. Dies geht hervor aus Untersuchungen an Fichtensolitären durch LÄSSIG (1991), an Mittelwaldfichten durch SURBER (1950), an Plenterwaldfichten durch SPIECKER (1986) und LEIBUNDGUT (1989) sowie an kronenspannungsarm und nahezu konkurrenzfrei erwachsenen Fichten des Altersklassenwaldes durch SEIFERT et al. (2003 a, b). Die in diesen Arbeiten untersuchten langkronigen Fichten weisen ebenfalls einen Zuwachsverlauf auf, der stark von dem Muster abweicht, das ASSMANN (1961) für Bestandesfichten mit Aufschwung-, Vollkraft- und Abschwung-Phase als typisch beschreibt. Im Gegensatz hierzu halten die langkronigen Fichten ihren Zuwachs relativ lang und konstant auf hohem Niveau (u. a. LÄSSIG 1991, SEIFERT et al. 2003 a, b).

SPIECKER (1986) stellt bei Untersuchungen zum Wachstum von Fichten und Tannen in Plenterwäldern nahezu lineare Zusammenhänge zwischen Durchmesserzuwachs und relativer Kronenlänge fest.

Neben den Baumvariablen wie der relativen Kronenlänge wird die Zuwachsreaktion vom zur Verfügung stehenden Wuchsraum bestimmt. Je mehr Wuchsraum bei ansonsten gleichen Baumparametern und Umweltbedingungen zur Verfügung steht, desto positiver fällt die Zuwachsreaktion aus (u. a. ABETZ 1968, 1976 c, 1982, ASSMANN 1961, KLÄDTKE 1992, KRAMER 1988, SPIECKER 1991 a). STAEBLER (1965) wies bei Douglasien nach, dass die Freistellungsreaktion der Einzelbäume umso positiver ausfällt, je mehr Konkurrenten entfernt werden.

Umwelteinflüsse wie die Witterung und insbesondere Niederschlagsdefizite können einen überprägenden Einfluss ausüben und eine positive Zuwachsreaktion der freigestellten Bäume hinauszögern, wenn die Freistellung z. B. in eine Phase mit unterdurchschnittlichen Niederschlägen fällt (EPP 2003, KAHLE 1994, MISSON 2000, SPATHELF 1999). Beim Zusammenfall von starken Freistellungen und Trockenphasen kann es auch zu Stress und damit negativen Zuwachsreaktionen nach Freistellungen kommen (SPIECKER 1986, 1991 a).

Bei der Auswertung von Naturverjüngungsversuchen in Baden-Württemberg ermittelt WEISE (1995) an den untersuchten 90 bis 125jährigen Fichten und Tannen statistisch gesicherte Zusammenhänge zwischen Zuwachs und Kronenprozent. Dieser grundsätzliche Zusammenhang wird von SPATHELF (1999) und EPP (2003) auch an Fichten und Tannen in Überführungssituationen bestätigt (vgl. MISSON 2000).

### **2.2.2 Einfluss der relativen Kronenlänge auf Vitalität und Stabilität**

Die relative Kronenlänge ist ebenfalls ein geeigneter Weiser für die Vitalität und Stabilität eines Baumes.

Untersuchungen von SPIECKER (1986) in Plenterwäldern zeigen, dass der Nadelverlust bei kurzkrönigen Bäumen in allen Stärkeklassen höher ist als bei langkrönigen. Fichten und Tannen mit langen Kronen erwiesen sich toleranter gegenüber Trockenstress. Ihr Zuwachs fiel in Trockenperioden zwar ebenfalls stark ab, erholte sich aber schneller und nachhaltiger. Die

Mortalität (Dürzholzanfall) war bei den kurzkrönigen Bäumen höher. Diese Zusammenhänge finden sich ebenfalls in einer Reihe weiterer Arbeiten im Bereich der „Neuartigen Waldschäden“ bestätigt (u. a. KRAMER & DONG 1985, SCHÖPFER 1986, SPEICKER 1983).

Positiv wirkt sich die relative Krönlänge bei der Fichte auch auf die Stabilität des Einzelbaumes vor allem gegenüber Schneebruch aus (u. a. CHROUST 1968, 1980, HEGER 1940, JOHANN 1980, 1981, KRAMER 1975, MERKEL 1975, MÖHRING 1981, ROTTMANN 1983). Diese Wirkung ist vor allem auf zwei Faktoren zurückzuführen: Bei längeren Krönen verlagert sich der Krönenschwerpunkt in tiefere und damit stabilere Bereiche des Schaftes (ROSENFELD 1944). Zudem sinkt der h/d-Wert bei größeren Krönen und damit höherem Zuwachs (ABETZ 1976 b, JOHANN 1980, KLÄDTKE 1993, LÄSSIG 1991, MERKEL 1975, SEIFERT et al. 2003 a). Unter Beachtung einer vergleichbaren kollektiven Stabilität des Einzelbaumes gilt dieser positive Zusammenhang auch für die Stabilität gegen Windwurf und -bruch (vgl. BURSCHEL & HUSS 1997). Anschauliche Beispiele hierfür sind stabile Solitärfitchten sowie die gängige Beobachtung, dass bei Flächenwürfen die tiefbeasteten, großkrönigen Bäume an den Bestandesrändern häufig nicht geworfen werden, selbst wenn dem Schadereignis ansonsten der gesamte Restbestand flächig zum Opfer gefallen ist.

### **2.2.3 Beziehung zwischen relativer Krönlänge und Konkurrenz**

Die relative Krönlänge ist ein Resultat der Konkurrenzsituation des Einzelbaumes (MITCHELL 1975). Sie wird vor allem vom Standraum beeinflusst, der dem Einzelbaum zur Verfügung steht und in der Vergangenheit zur Verfügung gestanden hat (ABETZ 1982, KLÄDTKE 1993, SPATHELF 1999).

Im gleichaltrigen Reinbestand wird die seitliche Krönenexpansion über den zur Verfügung stehenden Wuchsraum gesteuert, der durch die Krönen der Baumnachbarn begrenzt wird. Hierdurch können auch asymmetrische Krönenschirmflächenformen entstehen. Für die Entstehung asymmetrischer Krönenformen wird neben dem gesteigerten Längenwachstum von Seitentrieben in Richtung von Lücken im Krönendach (RUNKLE & YETTER 1987) die „crown shyness“ angeführt. Hierunter wird die Beobachtung verstanden, dass die seitliche Krönenexpansion nicht undifferenziert mit tiefem gegenseitigen Einwachsen der Krönenränder erfolgt, sondern Baumkrönen die Tendenz aufweisen, sich in der Regel seitlich nicht zu berühren. Für die „crown shyness“ werden im Wesentlichen zwei verursachende

Mechanismen beschrieben: Zum einen nachlassendes Längenwachstum der Seitenäste bei zunehmender Annäherung an konkurrierende Kronen (MITCHELL 1969) und zum anderen als Hauptfaktor mechanische Verluste von Knospen und Kronenteilen durch gegenseitiges Aneinanderschlagen der Kronen bei Windbewegungen (PUTZ et al. 1984, SMITH et al. 1990).

Vertikal verkürzt wird die Krone vom Stammfuß her. Die umgebende Biomasse der Konkurrenten beschattet die unteren Äste und führt zu deren Absterben (KELLOMÄKI et al. 1980). Eine Verlängerung der relativen Kronenlänge ist bei der Fichte an das Höhenwachstum gebunden, das hierfür höher ausfallen muss als die gleichzeitig stattfindende Verlagerung des grünen Kronenansatzes in Richtung Baumspitze durch Beschattung und folgendem Aststerben (vgl. SPATHELF 1999).

Der Standraum, der dem Einzelbaum zur Verfügung steht, kann Ergebnis von Durchforstungen oder Selbstdifferenzierungsprozessen sein (HAHN 1995, KLÄDTKE 1993, LEDER 1998, SCHNEIDER & ROEDER 1993, WEIHS et al. 1999). Bei vergleichbarer waldbaulicher Behandlung besteht ein enger Zusammenhang zwischen mittlerer Bestandesdichte und mittlerem Kronenprozent (GUERICKE 2003, HASENAUER 1993, KRAMER & SMITH 1985). In der Jungbestandsphase reagiert die relative Kronenlänge sehr dynamisch auf Änderungen der Konkurrenzsituation, bei nachlassendem Höhenwachstum in älteren Bestandesphasen nur noch schwerfällig und in begrenztem Umfang (BADOUX 1945, EPP 2003, KRAMER 1962, SPATHELF 1999). Die relative Kronenlänge ist dabei nicht nur ein Produkt der Konkurrenzsituation des Einzelbaumes, sondern auch selbst ein Faktor, der die Konkurrenzkraft des Baumes im Wettkampf um Ressourcen bestimmt (vgl. DUNNING 1922, SPATHELF 1999). Weitere bestimmende Faktoren sind die baumartenspezifische Konkurrenzwirkung und jeweilige soziale Stellung im Bestand (KENNEL 1965, PETRI 1966, PRETZSCH 1992, SPATHELF 1999).

### **2.3 Die relative Kronenlänge als Modellparameter**

PRETZSCH (1992) beurteilt die Kronenlänge als geeignete Größe zur Steuerung des Durchmesserzuwachses und interessantes Merkmal zur Beurteilung der Schaftqualität (vgl. SPIECKER 1991 b). In zahlreichen empirisch-mathematischen Wachstums- und Konkurrenzmodellen ist die Kronenlänge bzw. relative Kronenlänge als unabhängige Variable eine

Eingangsgröße für die Modellierung von Zuwachsgrößen wie z. B. der Blattbiomasse von Einzelbäumen und Beständen (u. a. BIGING & DOBBERTIN 1995, BIGING & WENSEL 1992, CLUZEAU et al. 1994, COLE & LORIMER 1994, EK & MONSERUD 1974, HASENAUER 1993, MITCHELL 1967 & 1975, NAGEL 1995, OTTORINI et al. 1996, PRETSCH 1992).

SPATHELF (1999) entwickelte aufbauend auf Arbeiten von SPIECKER (1986) Durchforschungshilfen für Fichte und Tanne, die das Durchmesserwachstum mithilfe der relativen Kronenlänge steuern. Im Gegensatz zu Wachstumssimulatoren geben diese Modelle dem Praktiker vor Ort direkte Hilfen für die zielkonforme Beeinflussung des Einzelbaumwachstums (vgl. KLÄDTKE 1999).

EPP (2003) untersucht Schätzfunktionen, die die Zuwachsreaktion des Durchmessers von Fichten und Tannen nach starker Freistellung in Abhängigkeit der relativen Kronenlänge angeben.

### **3 Material und Methoden**

Nach den methodischen Vorüberlegungen werden vor dem Hintergrund der Zielstellung dieser Arbeit die Nullhypothesen formuliert. Anschließend folgen die Beschreibung des Materials und der angewandten Methoden, mit denen die Nullhypothesen untersucht werden.

#### **3.1 Vorüberlegungen**

Die Vorüberlegungen erläutern mit Blick auf das Ziel der Untersuchung Material- und Methodenwahl. Sie stützen sich insbesondere auf die Analyse der Arbeiten von SPATHELF (1999) und EPP (2003), die ebenfalls die Zuwachsreaktion von Fichten mit dem zentralen Parameter der relativen Kronenlänge untersuchten.

##### **3.1.1 Untersuchungsansatz**

Zur Untersuchung der Fragestellung der vorliegenden Arbeit wären Daten von langfristigen waldbaulichen Versuchsflächen erforderlich gewesen, auf denen Fichten mit einer möglichst großen Variationsbreite von relativen Kronenlängen in ausreichender Zahl vorkommen. Die Standorte hätten für Thüringen möglichst repräsentativ sein müssen. Die Behandlungsperiode hätte die interessierende Bestandesphase der ersten Durchforstungshälfte abdecken und lang genug sein müssen, um Aussagen machen zu können. Derartige Versuchsflächen existieren für Thüringen nicht.

Die vorliegende Arbeit wurde daher auf Einzelbaumbasis als Ex-post-facto-Studie mit temporären Stichprobenpunkten und einem retrospektiven Ansatz durchgeführt.

Ex-post-facto-Studien sind geeignet, um mit empirisch-mathematischen Methoden statistische Zusammenhänge zwischen Einflussgrößen zu identifizieren, ermitteln aber keine Ursache- und Wirkungsbeziehungen (vgl. HAYWOOD 2003). Aus ihnen abgeleitete Modelle orientieren sich daher am „functional approach“ (HUNT 1979 & 1982): Statt ökophysiologische Prozesse in ihrer Realstruktur zu modellieren (SCHÄFER et al. 1992), werden Ersatzgrößen für diese zugrunde liegenden Prozesse empirisch analysiert. Diese Ersatzgrößen sollten physiologisch nachvollziehbar und vor allem einfach zu erheben sein (vgl. SPATHELF 1999).

Einzelbäume statt Bestände zu analysieren bietet den Vorteil, das Spektrum der jeweils interessierenden Werte effizient abdecken zu können. Hierbei kann gezielt ein besonders breites Spektrum mit extremen Varianten erhoben werden. Dies verbessert gerade bei komplexen Faktorenkombinationen die empirische Analyse (HAYWOOD 2003).

### 3.1.2 Rekonstruktion der Wachstumsparameter

Die Stammanalyse ist ein etabliertes Instrument zur retrospektiven Ermittlung des Durchmesser- und Höhenwachstums sowie daraus abgeleiteter Parameter der Einzelbaumentwicklung ( $h/d$ ,  $g$ ,  $h$ ,  $v$ )<sup>6</sup>. Die Methode hat sich in einer Reihe von Untersuchungen als geeignet erwiesen, um Einflüsse des Klimas und verschiedener waldbaulicher Behandlung auf das Baumwachstum zu untersuchen (u. a. ABETZ & UNFRIED 1984, CUTTER et al. 1991, GERECKE 1988, KRAMER 1994, KRAMER & JIMÉNEZ 1991, SPIECKER 1991 b, UNTHEIM 1996).

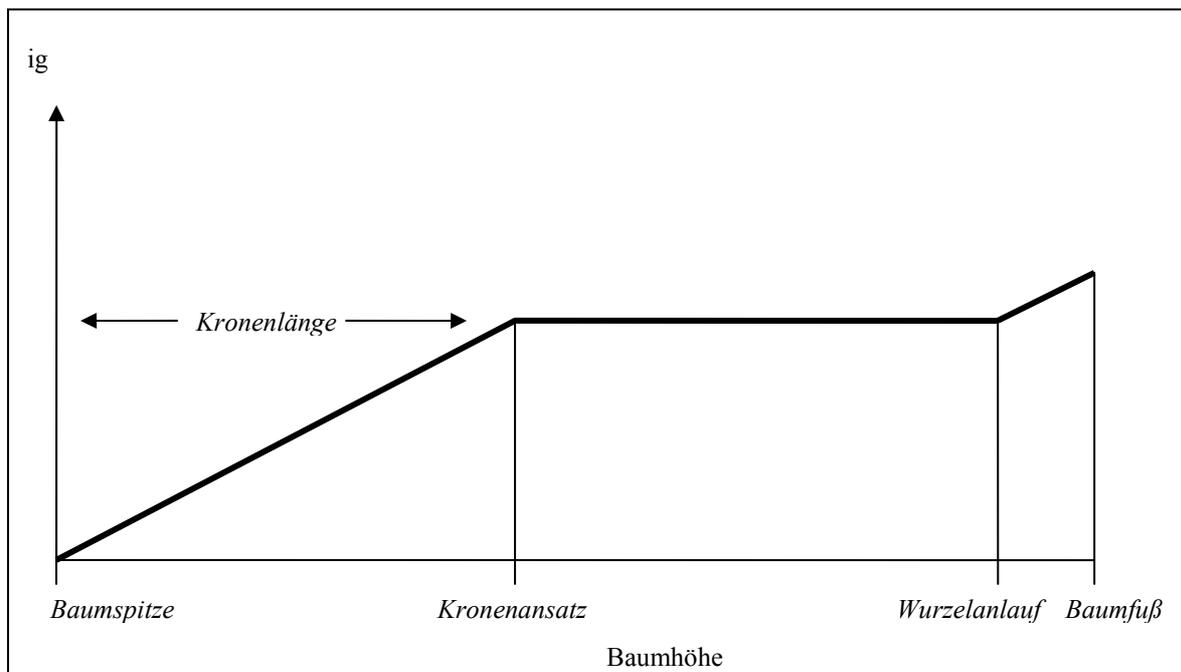
SPATHELF (1999) kombinierte die Stammanalyse mit der Rekonstruktion der relativen Kronenlänge bei Fichten und Tannen, um den in der Vergangenheit geleisteten Zuwachs in Abhängigkeit relevanter Einflussfaktoren zu untersuchen (vgl. EPP 2003). Dabei stützt er sich auf die Rekonstruktion des Absterbezeitpunktes von Ästen entnommener Totastquirle. Nach der Trocknung werden hierbei die Totastquirle mit einer Bandsäge entlang des Marks der abgestorbenen Äste radial aufgetrennt und nach der Präparation der Schnittstelle je Ast die Jahrringe bestimmt, bei denen noch eine Verbindung zwischen Schaft- und Astholz besteht. Mit dieser Technik kann der Absterbezeitpunkt des Astes auf ein bis zwei Jahre genau bestimmt werden (FUJIMORI 1993, MAGUIRE & HANN 1987, RAPRAEGER 1939, SPATHELF 1999). Nach der Analyse aller Äste eines Totastquirls kann je nach Definition des Kronenansatzes der Zeitpunkt bestimmt werden, nach dem der Quirl nicht mehr den Status des Kronenansatzes erfüllte. SPATHELF (1999), der diese Methode ausführlich beschreibt, verwendete bei seinen Untersuchungen bis zu zwei Totastquirle je Baum und stellt fest, dass mit bei Analyse eines Totastquirls, der aus einem Abstand von ca. 2 m zum aktuellen Kronenansatz aus der Totastzone entnommen wird, die Entwicklung der Kronenlänge bei

---

<sup>6</sup> Zur Erläuterung der Abkürzungen siehe Tabelle 6 auf S. 52.

Fichten und Tannen für einen Zeitraum von 20 bis 30 Jahren hinreichend genau hergeleitet werden kann.

Ein anderer Ansatz zur Rekonstruktion der relativen Kronenlänge stützt sich auf das von PRESSLER (1864) formulierte „Gesetz der Konstanz des jährlichen Grundflächenzuwachses am Baumschaft bis zum Kronenansatz“ (vgl. ASSMANN 1961). Danach zeigt die Verteilung des jährlichen Grundflächenzuwachses ( $ig$ ) am Baumschaft ein typisches Verteilungsmuster: Ausgehend von der Baumspitze in Richtung Stammfuß steigt der  $ig$  von einem absoluten Minimum an der Baumspitze innerhalb der grünen Kronen bis zum Kronenansatz an. Dieses Niveau wird innerhalb des Totastbereichs konstant gehalten und steigt nach dem BHD durch den Einfluss der Wurzelanläufe wieder an (siehe Abbildung 1).



**Abbildung 1:** Schematische Darstellung des „Gesetzes der Konstanz des jährlichen Grundflächenzuwachses am Baumschaft bis zum Kronenansatz“ (PRESSLER 1864) nach MITCHELL (1975) leicht verändert

Nach dem typischen PRESSLER'schen Verteilungsmuster steigt der  $ig$  von der Baumspitze aus bis zum Kronenansatz an, hält das Niveau im Totastbereich und steigt erst wieder durch den Einfluss der Wurzelanläufe zum Stammfuß hin an.

Das PRESSLER'sche Verteilungsmuster des jährlichen Grundflächenzuwachses am Baumschaft wird von mehreren Autoren bei verschiedenen Nadel- und Laubbäumen bestätigt (LARSON 1963, MITCHELL 1975, OTTORINI et al. 1996, SATOO et al. 1955 vgl. ASSMANN 1961<sup>7</sup>).

MITCHELL (1975) identifiziert das PRESSLER'sche Verteilungsmuster des Grundflächenzuwachses am Baumschaft bei seinen Untersuchungen zum Wachstum von Douglasienbeständen unabhängig vom Alter und Entwicklungszustand der Bäume. MITCHELL verwendet diesen grundsätzlichen Zusammenhag u. a. zur Modellierung der Schaftformentwicklung von Einzelbäumen.

Den Modellierungsansatz von MITCHELL fortsetzend wird die Methode von OTTORINI et al. (1996) bei der Esche, einer Laubbaumart mit nadelbaumartiger Kronenarchitektur, erfolgreich zur Rekonstruktion des Kronenansatzes auf Basis analysierter Stammscheiben eingesetzt.

### 3.1.3 Auswahl des Untersuchungsmaterials

Die von SPATHELF (1999) und EPP (2003) entwickelten Modelle der Beziehung zwischen relativer Kronenlänge und Zuwachs bei Fichte und Tanne leiden unter vergleichsweise hohen Anteilen nicht durch die ausgewählten Variablen erklärter Reststreuungen. Das trifft insbesondere für die Ergebnisse von EPP zu.

SPATHELF (1999) analysiert 83 und EPP (2003) 113 Fichten verschiedenen Alters von verschiedenen Standorten. Beide Autoren begründen die Einbeziehung verschiedener Standorte und Alter mit einer Verbesserung des räumlichen und sachlichen Geltungsbereichs der aus ihren Untersuchungen abgeleiteten Aussagen. Trotzdem verfolgen beide Arbeiten eine

---

<sup>7</sup> ASSMANN (1961, S. 58) zitiert den von PRESSLER (1865) in seinem „Gesetz der Stammbildung“ aufgestellten Satz: „Der Flächenzuwachs in irgendeinem Stammteil ist proportional dem oberhalb befindlichen Blattvermögen und daher im astfreien Schaftteil fast überall gleich.“ Da das PRESSLER'sche Verteilungsmuster durch verschiedene Faktoren wie z. B. Wassermangel (u. a. TOPCUOGLU 1940), starker Insektenfraß (u. a. HARTIG 1896) und starke Freistellung (u. a. v. GUTTENBERG 1915) modifiziert werden kann, verwirft ASSMANN (1961) die von PRESSLER (1865) aufgestellte Theorie als unzutreffend. Diese Kritik kann entkräftet werden, wenn das PRESSLER'sche Gesetz im Sinne einer Gesetzmäßigkeit interpretiert wird, die eben durch verschiedene Einflüsse variiert werden kann, aber einen grundsätzlichen Zusammenhang trotzdem zutreffend beschreibt. PRESSLER selbst deutete diese Lesart seines „Gesetzes“ schon durch die Formulierung „... *fast* überall gleich“ an.

explorative Datenanalysestrategie ohne den Anspruch auf empirisch abgesicherte Repräsentanz. Statistisch repräsentative Ergebnisse für eine ganze Region, wie z. B. ein Bundesland, können bei derartigen Fragestellungen nur mit einem unverhältnismäßig hohen Aufwand gewonnen werden. Die Repräsentanz der ermittelten Beziehungen ist also von vornherein stark eingeschränkt.

SPATHELF (1999) und EPP (2003) führen Klimateinflüsse als einen Hauptgrund für die durch die ausgewählten Variablen nicht erklärten Reststreuungen in ihren Untersuchungen an.

Aufgrund dieser Erfahrungen wurde in der vorliegenden Arbeit unter den Gesichtspunkten Repräsentanz und empirische Aussagekraft ein modifizierter Ansatz zur Auswahl des Untersuchungsmaterials gewählt.

Statt eine möglichst große Anzahl von Bäumen aus verschiedenen Beständen zu analysieren, wurden Probebäume aus einem für Thüringer Verhältnisse möglichst typischen bzw. repräsentativen Bestand gewählt, in dem ausreichend Bäume mit einer möglichst großen Spreite der interessierenden Merkmale (v. a. relative Kronenlänge und Freistellungsgrad) vorkamen. Hierbei leidet die Übertragbarkeit der erzielten Ergebnisse. Da die statistische Repräsentativität aber von vornherein stark eingeschränkt ist, wird dieser Nachteil in Kauf genommen, weil so das Risiko hoher Reststreuungen durch methodisch nicht zu beherrschende groß- und lokalklimatische Einflüsse minimiert wird.

### **3.1.4 Auswahl der Konkurrenzparameter**

Die Zuwachsreaktion und die Entwicklung der relativen Kronenlänge werden durch den zur Verfügung stehenden Wuchsraum beeinflusst. EPP (2003) verzichtet zunächst darauf, die Konkurrenzsituation seiner Untersuchungsbäume außer durch die relative Kronenlänge selbst zu charakterisieren.

PRETZSCH (1992) weist darauf hin, dass die relative Kronenlänge auf Änderungen des Konkurrenzstatus träger reagiert als z. B. das Durchmesserwachstum. Absterbeprozesse der grünen Äste am Kronenansatz dauern unterschiedlich lange. Dem Absterben geht meist eine mehr oder weniger lange Phase zunehmend gebremsten Wachstums voraus (SCHÖPF 1954). Dahingegen können die Triebspitzen der grünen Krone schon nach einem Jahr z. B. mit der

Bildung von physiologisch leistungsfähigeren Lichtnadeln auf vergrößerte Standräume reagieren (ROLOFF 2001, WEISE 1995). Dies schlägt sich direkt in höheren Durchmesserzuwachsen nach Standraumerweiterungen nieder (ABETZ 1976 c, 1982, KLÄDTKE 1992, 1999, SPIECKER 1991).

SPATHELF (1999) testet für seine Durchforstungshilfe verschiedene Einzelbaumkonkurrenzmodelle (vgl. HAHN 1995). Die straffsten Zusammenhänge mit dem Durchmesserzuwachs stellte er neben der relativen Kronenlänge mit dem nicht geometrischen, distanzabhängigen Einzelbaum-Konkurrenzmodell des Dimensionsquotienten nach HEGY (1974) fest. Der APA-Index (Area Potentially Available) nach BROWN (1965) wurde von SPATHELF (1999) nicht getestet. Mit einem Zwei-Variablen-Modell aus den Parametern relative Kronenlänge und Konkurrenzindex nach HEGY (1974) erzielte SPATHELF (1999) die besten Ergebnisse zur Erklärung der Varianz des Durchmesserzuwachses der von ihm untersuchten Fichten (und Tannen).

KLÄDTKE (1999) stellt den APA-Index bei der Fichte im Vergleich mit dem A-Wert nach JOHANN (1982) als geeigneteres Maß zur Beschreibung des Konkurrenzeinflusses auf das Durchmesserwachstum dar. Bei der Buche wird der APA-Index von mehreren Autoren favorisiert (HAHN 1995, HAYWOOD 2003, vgl. BÖRNER 1997).

Der APA-Index beschreibt eine Standfläche, die dem Zentralbaum zur Ressourcennutzung zur Verfügung steht und durch die Konkurrenzwirkung seiner Baumnachbarn begrenzt wird. Definiert ist der APA-Index als die Fläche eines Polygons, das um einen Zentralbaum konstruiert wird. Die Eckpunkte des Polygons werden durch die Kreuzungspunkte von Linien bestimmt. Diese Linien schneiden jeweils senkrecht eine Verbindungsgerade zwischen dem Zentralbaum und seinen Baumnachbarn. Der jeweilige Schnittpunkt, auf dem die Linien zur Konstruktion der Polygonseiten aufsetzen, ergibt sich aus der Teilung der Verbindungsgeraden zwischen Zentralbaum und Baumnachbar im Verhältnis ihrer Brusthöhen-durchmesser (BROWN 1965, MOORE et al. 1973). NANCE et al. (1988) modifizierten den APA-Index in der Form, dass die Entfernung des Schnittpunktes der Polygonseite mit der Verbindungslinie zwischen Zentralbaum und Konkurrenten vom Zentralbaum nicht größer sein kann als die Kronenbreite eines frei erwachsenen Solitärs mit dem gleichen Brusthöhen-durchmesser.

Für die Herleitung des APA-Index ist ein hoher Erhebungsaufwand erforderlich (KLÄDTKE 1999). Seine Anwendung bleibt daher auf den wissenschaftlichen Bereich beschränkt. Für die Praxis sind vor dem Hintergrund der Steuerung des Einzelbaumwachstums andere Größen zur Charakterisierung der Konkurrenzsituation erforderlich, die sich entweder am Einzelbaum selbst leicht einschätzen lassen oder bei Inventuren sowieso erhoben werden.

Zur zweiten Kategorie gehört z. B. als Dichtemaß die Bestandesgrundfläche bzw. der aus ihr abgeleitete Bestockungsgrad - auch wenn diese Größen nur sehr beschränkt zur zielkonformen Steuerung des Einzelbaumwachstums geeignet sind. Als modifizierte Zielbestockungsgrade werden Grundflächenvorgaben auch bei modernen Behandlungskonzepten des naturnahen Waldbaus im Rahmen der Nutzungsplanung der Forsteinrichtung eingesetzt (TLWJF 2003). Die Konstruktion der Z-Baumertragstafel nach KLÄDTKE (1993) enthält ebenfalls implizit die Grundfläche für die Herleitung von Z-Baum-Zielstandflächen im Endbestand.

HAYWOOD (2003) verwendet zur Definition des Freistellungsgrades von Buchen neben der Differenz des APA-Index vor und nach der Freistellung die Angabe von unbedrängten Kronenquadranten. Im Gegensatz zu HAYWOOD, der die Anzahl der unbedrängten Kronenquadranten aus Kronenablotungen berechnet, kann der Parameter im Gelände auch visuell geschätzt werden (SPIECKER 1986).

### 3.2 Nullhypothesen

Der Untersuchung liegen folgende Nullhypothesen (NH) zugrunde:

- NH 1) Es besteht bei einer statistischen Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 0,05$  auf Einzelbaumebene kein signifikanter Unterschied zwischen dem Durchmesserzuwachs von Fichten mit verschiedenen relativen Kronenlängen.
- NH 2) Es besteht bei einer statistischen Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 0,05$  auf Einzelbaumebene kein signifikanter Unterschied zwischen der relativen Kronenlänge und dem Konkurrenzierungsgrad von Fichten.
- NH 3) Es besteht bei einer statistischen Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 0,05$  auf Einzelbaumebene kein signifikanter Unterschied zwischen dem h/d-Wert von Fichten mit unterschiedlichen relativen Kronenlängen.

### 3.3 Material

#### 3.3.1 Untersuchungsstandort

Der Untersuchungsstandort liegt am Südabfall des Thüringer Waldes, rund 30 Kilometer nordöstlich von Coburg in unmittelbarer Nähe der Ortschaft Lauscha. Die Fläche gehört zum Thüringer Forstamt Theuern, Revier Lauscha (Abt. 34 a<sup>2</sup>).



**Abbildung 2:** Topografische Lage des Untersuchungsstandorts

Der Untersuchungsstandort gehört zur geomorphologischen Großeinheit des Wuchsgebietes „Thüringer Gebirge“ (SCHRAMM 1993). Hier liegt er im südöstlichen Bereich der paläozoischen Gebirgsscholle innerhalb des Wuchsbezirkes „Hohes Schiefergebirge“. Das Klima ist durch die Stauwirkungen des aufragenden südwestlichen Gebirgsrandes geprägt. Die Klimatönung ist subatlantisch montan bis hochmontan. Nach SCHRAMM (1997) beträgt die Jahresdurchschnittstemperatur 5,5° C und der mittlere Jahresniederschlag 1.100 mm. Rund 40 % des Niederschlags entfallen auf die Vegetationsperiode. Kennzeichnende Gesteine sind paläozoische Schiefer. Am Untersuchungsstandort selbst steht der so genannte Griffelschiefer an.

Innerhalb der nach Südwesten stark zertalten Hochfläche liegt der Untersuchungsstandort auf einem nach Nordosten bis Osten schwach geneigten Plateau in Nähe der Kammlagen (850 m üNN) auf 780 m üNN. Die forstliche Standortkartierung weist einen teils skelettreichen, mäßig frischen, ärmeren Silikatgesteins-Standort im Übergang der höheren Berglagen zu den Kammlagen mit sehr feuchtem Klima aus (Hff - Kff, TZG2 - TZGg2). Als Bodenform sind mittel- bis tiefgründige Braunpodsole und Podsole kartiert. Die natürliche Waldgesellschaft ist nach SCHRAMM (1997) ein montaner Hainsimem-Buchenwald (Luzulo-Fagetum) mit größeren Anteilen an Fichte und Tanne im Übergang zu einem Wollreitgras-Fichtenwald (Calamagrostio-Piceetum).

Die Fichte gilt im Wuchsbezirk „Hohes Schiefergebirge“ als autochthone Baumart (GRÜNEBERG & SCHLÜTER 1957)<sup>8</sup>. Das heutige Waldbild wird von Fichtenreinbeständen beherrscht. Nach den Baumartenvorschlägen der Standortkartierung wird die Fichte auch zukünftig bestimmend am Waldaufbau beteiligt sein (LAWUF 2000, TRAUBOTH & KRAUSS 1996). Eine Übersicht der standörtlichen Kennwerte des Untersuchungsstandortes gibt Tabelle 1.

**Tabelle 1:** Kennwerte des Untersuchungsstandortes

Höhe	Böden	Temperatur Jahresmittel	Niederschlag Jahresmittel	Natürliche Waldgesellschaften	Baumartenvorschläge Standortkartierung
780 m üNN	Braunpodsol, Podsol	5,5 ° C	1.100 mm	Luzulo-Fagetum (montan) bis Calamagrostio-Piceetum	Leitbaumart Fichte, bis zu 20 % Tanne, Buche, Eberesche und Birke

Klimatisch bedingt tritt im Hohen Schiefergebirge häufiger Duft- und Schneebruch auf (GÄRTNER 1987, GASTINGER & SCHWANECKE 1967, JAEGER 1951). Das letzte Großereignis dieser Art betraf 1981 den gesamten Thüringer Wald und prägte auch den Untersuchungsbestand. Nach GÄRTNER (1987) führten ab dem 4. Dezember 1981 stärkere Nassschneeaufgaben zunächst zu unbedeutenden Einzelbrüchen. In den nächsten Tagen stiegen die Schneelasten weiter an. Vom 8. bis 10. Dezember kam ein Sturm aus westlicher

<sup>8</sup> Über die Autochthonie der auf dem Untersuchungsbestand stockenden Fichten kann keine Aussage getroffen werden. Der Bestand stammt aus Pflanzung. Die Verwendung autochthonen Vermehrungsgutes erscheint unwahrscheinlich aber nicht ausgeschlossen.

Richtung mit Spitzengeschwindigkeiten von über 130 km/h hinzu. Hierdurch kam es vor allem am 8. Dezember zu großflächigen Bruchschäden in den mittleren und höheren Lagen des Thüringer Waldes. Insgesamt fielen rund 5,4 Mio. Efm Schadh Holz an.

### 3.3.2 Untersuchungsbestand

Die Forsteinrichtungsunterlagen (Stichtag 1.10.2002) klassifizieren den Untersuchungsbestand (Abt. 34 a<sup>2</sup>) zum Zeitpunkt der Außenaufnahmen im Herbst 2003 als 57jährigen<sup>9</sup>, einschichtigen Fichtenreinbestand aus Pflanzung mit einzelnen Birken, Buchen und Ebereschen und mittleren Schäden durch Schnee- bzw. Wipfelbruch<sup>10</sup>. Seine Fläche beträgt 10,86 ha und der Vorrat 324 Vfm/ha. Nach der Ertragstafel von WENK et al. (1985) liegt die Bonität bei I.5 (M 32) und der Bestockungsgrad bei 0,74. Weitere Angaben sind Tabelle 2 zu entnehmen.

**Tabelle 2:** Bestandeskennwerte<sup>11</sup>

Baumart	Alter	Mittelhöhe	Bonität	B°	Vorrat	LJZ	DGZ <sub>100</sub>
Fichte	57 Jahre	22 m	I.5 (M 32)	0,74	324 Vfm/ha	13,7 Vfm/ha*J	13 Vfm/ha*J

Die prägenden Schneebruchschäden des Untersuchungsbestandes stammen von dem Großschadereignis, das 1981 weite Teile des Thüringer Waldes betraf (siehe Kap. 3.3.1 Untersuchungsstandort). Als „Naturexperiment“ wurde der Bestockungsgrad des bis dahin geschlossenen 34jährigen Fichtenbestandes schlagartig auf B° 0,4<sup>12</sup> herabgesetzt. Entsprechend der damaligen Bewirtschaftungsrichtlinien wurde im selben Jahr das stehende

<sup>9</sup> vgl. Fußnote 11

<sup>10</sup> Der Bestand weist keine Schältschäden auf.

<sup>11</sup> Nach Forsteinrichtung zum Stichtag 1.10.2002, das Alter ist auf den Zeitpunkt der Datenaufnahme im Herbst 2003 fortgeschrieben.

<sup>12</sup> Aus der Rekonstruktion des Durchmesserzuwachses in den Probekreisen (vgl. Kap. 3.5.2 und Kap. 3.5.3) ergibt sich für 1982 ein B° von 0,42. Die Hochrechnung der Durchmesser der Probekreise im Aufnahmejahr führt zu einem B° von 0,72. Maßstab ist jeweils die in Thüringen gebräuchliche Fichtenertragstafel von WENK, RÖMISCH & GEROLD (1985). Die Forsteinrichtung gibt für den Zeitpunkt des Aufnahmejahres für den Untersuchungsbestand einen B° von 0,74 an. Die Werte der Forsteinrichtung für den gesamten Untersuchungsbestand und aus den aufgenommenen Probekreisen liegen auf demselben Niveau. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse der Probekreise auf den Gesamtbestand auch im Jahr 1982 (unmittelbar nach dem Schneebruch) erscheint daher gerechtfertigt.

Schadholz eingeschlagen und auf Wälle beräumt. Diese Wälle sind noch heute deutlich zu erkennen. Das Totholz ist nur gering zersetzt. Aufgrund des geringen Bestockungsgrades fanden in den Folgejahren keine planmäßigen Nutzungen statt. Erst 1996 wurden im nördlichen Teil des Bestandes im Alter von 49 Jahren auf 6 ha mit einem Kleinharvester (Reichweite 7,5 m) Rückegassen im 20 m-Abstand angelegt. Die Zwischenfelder der nördlichen Teilfläche blieben weitgehend unberührt. Die Eingriffsstärke lag bei rund 25 Efm/ha. Im südlichen Teil des Bestandes fanden bis auf einen auf wenige Stämme begrenzten Einschlag im Herbst 2001 seit 1981 keine Nutzungen statt.

Das Bestandesbild präsentiert sich 23 Jahre nach dem prägenden Schneebruch zum Zeitpunkt der Außenaufnahmen sehr heterogen. Kleinflächig wechseln sich relativ geschlossene Bestandespartien mit stärker aufgelichteten Bereichen ab. Hierdurch sind über den Gesamtbestand Fichten mit einer großen Spreite von Freistellungsgraden und relativen Kronenlängen zu finden. Auf engstem Raum sind verschiedenste Baumdimensionen vertreten. Der Schneebruch führte insbesondere zu einer starken Freistellung von stabilen, vorherrschenden Individuen. Hierdurch sind heute auf der gesamten Bestandesfläche verteilt sehr vitale Fichten mit auffallend langen Kronen zu finden. Nach Vitalität und Qualität entsprechen sie zum Teil dem Charakter von „natürlichen Z-Bäumen“, wie sie von GERECKE (1988, 1991) als „... wertvolle Ergänzung zu Versuchflächendaten ...“ beschrieben werden.

### **3.3.3 Praktische Relevanz und Repräsentanz des Untersuchungsmaterials**

Der selektierte Untersuchungsbestand repräsentiert einen praxisnahen Schwerpunkt der Fichtenwirtschaft in Thüringen. Er kann hier als charakteristisch für in etwa mittlere Verhältnisse gelten aber keinerlei Anspruch auf statistische Repräsentanz erheben. Dadurch ist der Gültigkeitsbereich der abgeleiteten Ergebnisse prinzipiell begrenzt. Dies muss bei der Ergebnis-Interpretation beachtet werden.

Rund die Hälfte der Fichtenbestände Thüringens sind jünger als 60 Jahre. Innerhalb dieser jungen Bestände stellt die III. Alterklasse (41 bis 60 Jahre) den Schwerpunkt der Durchforschungstätigkeiten dar. Mit insgesamt über 28.000 ha macht sie rund 30 % der Fichtenfläche Thüringens aus. Die Fichtenfläche konzentriert sich in Thüringen vor allem auf das Wuchsgebiet „Thüringer Gebirge“, zu dem der Untersuchungsbestand gehört. Die Standortseinheit des Bestandes fällt etwas kühler und nährstoffärmer als die mittleren

Wuchsbedingungen der Fichtenbetriebsklasse in Thüringen aus. Dafür wird der Untersuchungsstandort auch zukünftig einen Schwerpunkt der Fichte in Thüringen darstellen<sup>13</sup>.

Die Bonität des Bestandes, in der sich letztendlich die Summe der standörtlichen Faktoren in ihrer Wirkung auf das Baumwachstum widerspiegeln, entspricht der mittleren Bonität der III. Altersklasse Fichte im gesamten Thüringer Staatswald.

**Tabelle 3:** Altersklassentabelle Fichte im Landeswald Thüringen<sup>14</sup>

Alters- klasse	Fläche ha	Fläche Anteil %	Vorrat Vfm/ha	B°	Bonität	Zuwachs Vfm/J*ha	Nutzung Efm	Nutzung Efm/J*ha	Nutzung Anteil %
unbest.	209	0,2	-	-	-	-	-	-	-
I	14779	15,3	6	1,00	2,0	1,1	24572	0,2	0,6
II	16453	17,0	159	1,06	1,7	14,0	586984	3,6	15,0
III	28220	29,2	272	0,86	1,7	15,2	1205001	4,3	30,9
IV	15534	16,1	347	0,78	2,2	11,9	580185	3,7	14,9
V	12833	13,3	391	0,75	2,6	9,4	798038	6,2	20,4
VI	5968	6,2	401	0,71	3,1	7,5	482130	8,1	12,3
VII	1906	2,0	397	0,70	3,6	7,1	160807	8,4	4,1
VIII	532	0,5	369	0,72	4,1	7,8	44301	8,3	1,1
IX	76	0,1	353	0,71	4,6	7,9	5757	7,6	0,1
Restv.	-	-	-	-	-	-	11317	-	0,3
UGL	274	0,3	222	0,64	3,2	6,2	5775	2,1	0,1
Σ	96511	100	251	0,87	2,1	10,8	3904867	4,0	100

<sup>13</sup> Dies gilt sowohl für die derzeitigen Baumartenvorschläge der Standortkartierung als auch unter dem Aspekt zukünftiger Klimaveränderungen (LAWUF 2000). Erste Klimauntersuchungen belegen für Thüringen in den letzten 50 Jahren einen Temperaturanstieg von 0,5 bis 1,0 K. Im selben Zeitraum weist der Jahresniederschlag mit einer Zunahme von 10 bis 20 % ebenfalls einen positiven Trend auf (BERNHOFER et al. 2003). Die Prognosen von BERNHOFER et al. (2003) gehen davon aus, dass Regionen mit hohen Jahresniederschlägen zukünftig noch regenreicher werden, während die Niederschläge in Trockengebieten wie dem Thüringer Becken eher abnehmen werden. ENKE & SCHNEIDER (2003) erwarten für Thüringen bis 2050 einen Temperaturanstieg von 2 bis 3 K, der sich jedoch auf die höheren Berglagen schwächer als im Flachland auswirken wird.

<sup>14</sup> Stand der Thüringer Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft zum Stichtag 1. Januar 2001. Die Daten setzen sich rund zur Hälfte aus Fortschreibungen zusammen und unterschätzen die realen Verhältnisse. Nach aktuellen Einrichtungen liegen z. B. die Vorräte und Zuwächse wesentlich höher. Die Bestockungsgrade werden in den Altersklassen II und III deutlich höher liegen. Auch die Angaben zur Nutzungsplanung unterschätzen das aktuelle Bild. Dennoch sind die Tendenzen der Tabelle auch vor dem Hintergrund der aktuellen Ergebnisse der BWI II mit einer beginnenden Verschiebung der Flächenschwerpunkte in höhere Altersklassen weiter gültig (TLWJF 2005).

### 3.3.4 Kennwerte der Zentralbäume

Die Brusthöhendurchmesser der 63 mit Stammanalysen untersuchten Zentralbäume<sup>15</sup> reichen von 14,2 bis 59,3 cm m. R. und liegen im Mittel bei 30,0 cm m. R. Die niedrigste Baumhöhe wurde mit 15,1 m und die höchste mit 27,8 m gemessen. Im Mittel beträgt die Baumhöhe 21,8 m. Die relative Kronenlänge<sup>16</sup> deckt einen Bereich von 29 bis 75 % ab und liegt im Mittel bei 53 %. Die h/d-Werte schwanken zwischen 47 und 106. Der mittlere h/d-Wert beträgt 77.

## 3.4 Außenaufnahmen

Die Außenaufnahmen wurden von August bis November 2003 durchgeführt.

### 3.4.1 Stichprobendesign

Um den Stichprobenumfang möglichst gering zu halten und dennoch möglichst gute Ausgangsbedingungen für die spätere mathematisch-empirische Datenanalyse zu schaffen, wurde in Anlehnung an HAYWOOD (2003) ein zweistufiges Stichprobenkonzept angewandt.

In der ersten Stufe wurde aus dem Untersuchungsbestand eine Zufallsstichprobe von 240 Bäumen bestimmt und temporär markiert. Die Fichten wurden aus dem Kollektiv der vor- bis mitherrschenden Baumklasse nach KRAFT (1884) ausgewählt und durften keine sichtbaren Stammschäden (insbesondere Kronenbrüche) aufweisen. Der Bestandesrand musste mindestens 8 m entfernt sein (Minimierung Randeinflüsse). Innerhalb eines Kreises mit 8 m Radius durften sich um den zentralen Probebaum nur Fichten befinden (Minimierung interspezifischer Konkurrenzwirkung).

Bei diesen 240 zentralen Probebäumen wurden mit einem einfachen Verfahren auf einer jeweils vierstufigen Ordinalskala folgende Merkmale okkular geschätzt: Dimension (BHD), relative Kronenlänge (RKL), aktuelle Konkurrenz (AK) und Konkurrenzänderung durch das

---

<sup>15</sup> Einem Vorschlag von ABETZ (1961) folgend (vgl. HAHN 1995, FRANZ 1981) wird in der vorliegenden Untersuchung der zentrale Messbaum einer Untersuchungsgruppe als Zentralbaum bezeichnet. Die Zentralbäume bilden den Mittelpunkt eines Probekreises mit den Probekreisbäumen. Probekreis- und Zentralbäume werden zusammen als Untersuchungsbäume bezeichnet.

<sup>16</sup> Zur Herleitung der relativen Kronenlänge siehe Kap. 3.5.1 Berechnung der Kronenkennwerte der Zentralbäume.

Schneebruchereignis ( $\Delta K$ ). Tabelle 4 verdeutlicht die Matrix der möglichen Ergebnisse der ersten Stichprobe.

**Tabelle 4:** Matrix der möglichen Ergebnisse der ersten Stichprobe

BHD	RKLV	AK	$\Delta K$
bis 20 cm	kurz	schwach	schwach
21 – 30 cm	eher kurz	eher schwach	eher schwach
31 – 40 cm	eher lang	eher stark	eher stark
ab 41 cm	lang	stark	stark

Im zweiten Schritt wurde aus der ersten Zufallsauswahl eine Unterstichprobe bestimmt ( $n = 63$ ). Der zweite Stichprobenumfang orientiert sich näherungsweise an der Faustformel von COHEN & COHEN (1983)<sup>17</sup>. Die Bäume wurden stehend vermessen und für die destruktive Analyse (Stammanalyse und Kronenrekonstruktion) eingeschlagen. Sie bildeten gleichzeitig den Mittelpunkt eines Probekreises mit 8 m Radius<sup>18</sup>. Innerhalb dieses Probekreises wurden zusätzlich alle Bäume und Stöcke erfasst.

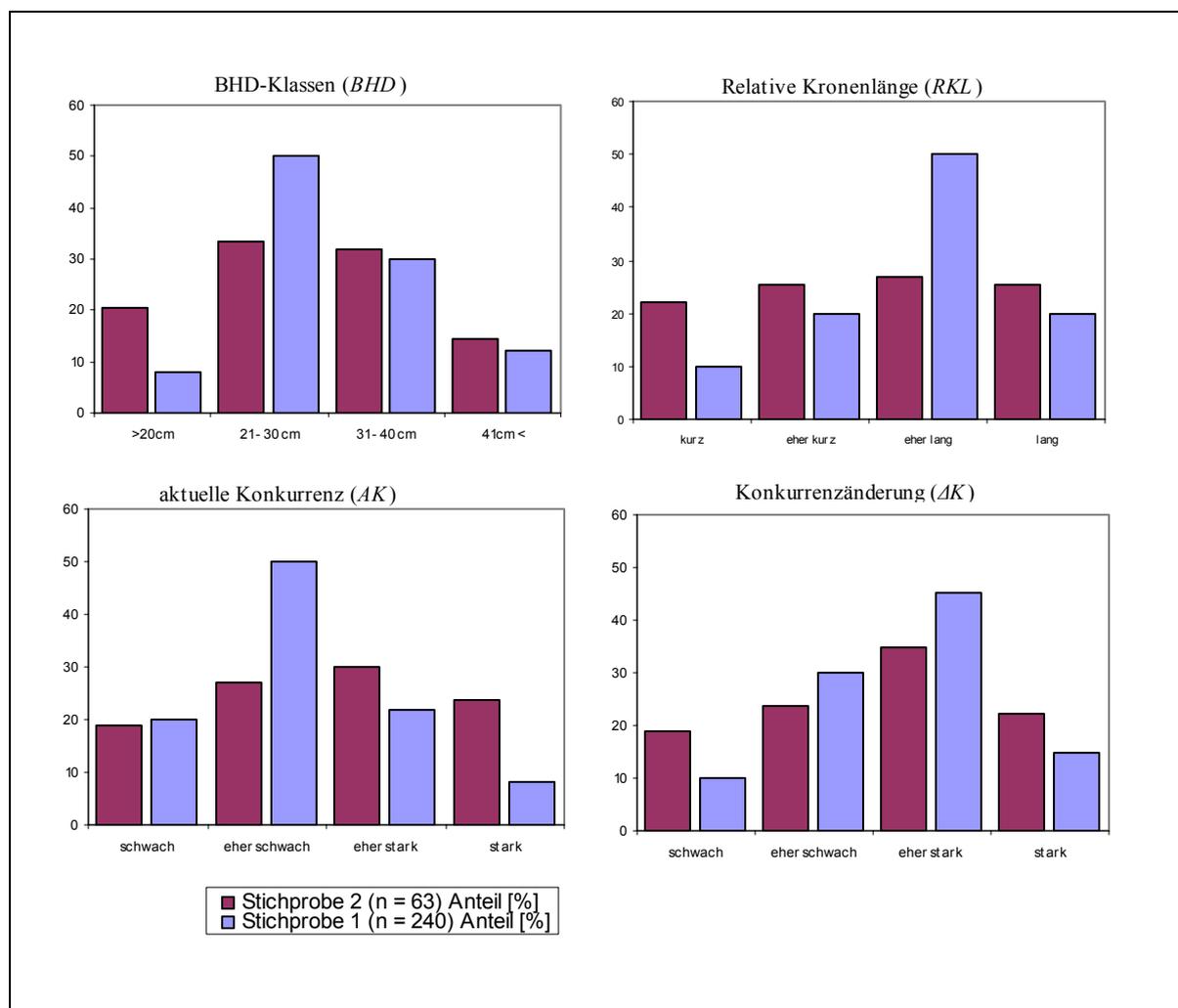
Der 8 m Radius gewährleistete, dass alle potenziellen Konkurrenten des Zentralbaumes zur späteren Berechnung des APA-Index erfasst wurden. Es wurde ein von der Dimension des zentralen Probebaumes unabhängiger fixer Probekreisradius gewählt. Dies war erforderlich, um für den Probekreis als ergänzendes praxisnahes Dichtemaß auch die Grundfläche bzw. den Bestockungsgrad auswerten zu können.

Die Auswahl der Zentralbäume der zweiten Stichprobe erfolgte bewusst nicht nach einem reinen Zufallsansatz. Es wurde vielmehr versucht, die gesamte Merkmalsbreite der o. a. Matrix der ersten Zufallsstichprobe möglichst gleichmäßig abzudecken, um eine breite und optimale Datenbasis für die spätere empirisch-mathematische Analyse zu erhalten. Bei einer reinen Zufallsauswahl wären viele Merkmalsklassen unter- bzw. überrepräsentiert gewesen. Hierunter hätten die Ergebnisse der Regressionsanalyse gelitten (vgl. HAYWOOD 2003).

<sup>17</sup> COHEN & COHEN (1983) schlagen bei der Anwendung multipler Regressionen einen Stichprobenumfang von  $40 \times$  Anzahl der unabhängigen Variablen vor.

<sup>18</sup> Der Kronenbreite der untersuchten Zentralbäume reichte von 1,62 bis 7,18 m und lag im Mittel bei 4,14 m.

Abbildung 3 zeigt, dass durch das zweistufige Stichprobenkonzept die Klassenbelegung im Vergleich zur reinen Zufallsauswahl deutlich verbessert werden konnte.



**Abbildung 3:** Vergleich der ersten Stichprobe (n = 240) mit der zweiten Stichprobe (n = 63)

Mit dem zweistufigen Stichprobenkonzept konnte die Klassenbelegung für die spätere empirisch-mathematische Analyse deutlich verbessert werden.

### 3.4.2 Messungen am stehenden Baum

Vor dem Einschlag wurden an den 63 Zentralbäumen mehrere Kennwerte stehend erfasst. Der Brusthöhendurchmesser mit Rinde (BHD) wurde mit einem Umfangmaßband auf 0,1 cm und die Baumhöhe mit einem FORESTER VERTEX auf 0,1 m genau gemessen.

Die Kronenansatzhöhe wurde an jedem Baum nach zwei unterschiedlichen Definitionen mit einem FORESTER VERTEX auf 0,1 m genau erfasst.

Nach einer in mehreren Arbeiten gebräuchlichen Definition wurde der Kronenansatz als erster grüner Quirl mit mindestens drei grünen Primärästen und höchstens einem Totast, über dem kein Totastquirl mehr folgt, angesprochen und als analytischer Kronenansatz (KAA) bezeichnet (vgl. EPP 2003, GERECKE 1988, KRAMER 1962, KRAMER & DONG 1985, SPATHELF 1999). Einzelne grüne Äste blieben dabei unberücksichtigt, einseitige Bekronung wurde gemittelt. Mit dieser Definition kann die Kronenansatzhöhe am liegenden Stamm durch Vergleichsmessungen überprüft werden. Weiterhin ist diese Definition auch auf die Rekonstruktion des Kronenansatzes über den Absterbezeitpunkt von Ästen entnommener Totastquirle anwendbar (vgl. Kap. 3.1.2 Rekonstruktion der Wachstumsparameter & 3.5.2 Rekonstruktion der Wachstumsparameter der Zentralbäume).

Für die praktische Ansprache im Bestand ist eine visuelle Ausgleichsmethode besser geeignet. In Anlehnung an das Vorgehen von SPIECKER (1983, 1986) und WEISE (1982) wurde als visueller Kronenansatz (KAV) die mittlere Ansatzhöhe der untersten grünen Primäräste als Kronenansatz angesprochen. Einseitige Kronen und einzelne Äste wurden optisch ausgeglichen. Die jeweils aus analytischem (KAA) und visuellem Kronenansatz (KAV) abgeleiteten relativen Kronenlängen werden analog als RKLA und RKLV bezeichnet.

Zusätzlich wurde die relative Kronenlänge je Zentralbaum von zwei Personen unabhängig geschätzt, um diese direkten Schätzungen vor dem Hintergrund einer möglichst einfachen Ansprache der relativen Kronenlänge in der Praxis mit den gemessenen Werten vergleichen zu können.

Der Nadelverlust (NLV) wurde nach dem Verfahren der Waldschadensinventur in Stufen von 5 % eingeschätzt.

Zur praxisgerechten Charakterisierung der Konkurrenzsituation des Zentralbaumes wurde weiterhin der Anteil des freien Kronenumfangs in Stufen von 5 % (FU) und in vollen Quadranten (FQ) visuell angesprochen. Als frei galten dabei Abschnitte des grünen Kronenumfangs der Zentralbäume, in denen sich im horizontalen Abstand von mindestens 2 m keine lebenden Äste eines Konkurrenten befanden (vgl. SPIECKER 1986). Der Abstand von 2 m

(eine Industrieholzlänge) kann im Gelände ohne Hilfsmittel sicher angesprochen werden. Zudem kann er durch das Wachstum der Seitenäste vitaler Fichten in einem Zeitraum von 10 Jahren annähernd geschlossen werden (LÄSSIG 1991, SPATHELF 1999). SPATHELF (1999) ermittelte bei den von ihm untersuchten Fichten relativ ähnliche Kronenformen mit einem mittleren Plumpheitsgrad von ungefähr 0,5 und einem mittleren jährlichen Höhenzuwachs von rund 30 cm. Hieraus ergibt sich ein mittlerer jährlicher Zuwachs des Kronenradius von rund 7,5 cm. LÄSSIG (1991) ermittelt bei Fichtensolitären im Bereich der größten Kronenbreite jährliche Astlängenzuwächse, die bis zu einem Astalter von 50 Jahren je nach Astalter deutlich über 7,5 cm betragen<sup>19</sup>.

In Anlehnung an das Vorgehen von KÄDTKE (1999) galten bei der Erhebung von FU und FQ als Konkurrenten Bäume der Kraft'schen Baumklasse 1 bis 3, deren BHD mindestens 50 % des Probebaumes betrug (vgl. u. a. LORIMER 1983, KRAFT 1884, SPATHELF 1999).

Die Kronenschirmfläche (KSF) der Zentralbäume wurde nach der von SPIECKER (1991 b) ausführlich beschriebenen Methode mit der Ablotung von 8 freien Kroneneckpunkten durchgeführt. Die 8 Kroneneckpunkte werden dabei so gewählt, dass sie den Verlauf des Kronenrandes bestmöglich beschreiben (vgl. LÄSSIG 1991). Ihre genaue Einmessung und Positionierung erfolgte mit Fluchtstäben und einem SUUNTO Gefällmesser. Da bei der Peilung durch das Messgerät das Gesichtsfeld kaum eingeschränkt wird, können Unregelmäßigkeiten des Kronenrandes gutachtlich ausgeglichen werden (SPIECKER 1991). Mit Entfernung zum Zentralbaummittelpunkt und Azimut der abgeloteten Kroneneckpunkte wurde die Kronenschirmfläche nach dem Dreiecksmodell als Summe von 8 Teilflächen berechnet (RÖHLE & HUBER 1985).

In dem temporären Probekreis mit 8 m Radius, dessen Mittelpunkt die Zentralbäume bildeten, wurden alle Probebäume erfasst. Bei den im Untersuchungszeitraum ausgeschiedenen Bäumen wurden die Lagekoordinaten der Stöcke eingemessen. Der BHD wurde mit Umfangmessband auf 0,1 cm genau ermittelt bzw. der Stockdurchmesser o. R. (SD) und die Stockhöhe (SH) durch zweimaliges Messen über Kreuz mit einem Zollstock auf jeweils 0,1 cm ermittelt. Der Stockdurchmesser wurde im Gelände als größtmöglicher Kreis bzw.

---

<sup>19</sup> Die Betrachtung ist stark vereinfachend. Zur Herleitung des Kronenradiuszuwachses aus dem Astlängenzuwachs muss u. a. der Astabgangswinkel beachtet werden.



Daneben wurde bei den Probekreisbäumen als unterster Grünastansatz (UGA) die Ansatzhöhe des untersten einzelnen Grünastes je Baum mit einem FORESTER VERTEX auf 0,1 m genau gemessen.

### 3.4.3 Messungen am liegenden Baum

Nach dem Einschlag wurde bei den Zentralbäumen mit Maßband die Baumlänge auf 0,01 m genau erfasst. Zusätzlich wurden mit Hilfe des Maßbandes auf 0,01 m die Positionen des analytischen Kronenansatzes (KAA)<sup>21</sup>, des untersten Grünastansatzes (UGA)<sup>22</sup> und des Lichtkronenansatzes (LKA) gemessen. Als Lichtkronenansatz galt der Ansatz des ersten grünen Quirls, der mindestens einen Jahrestrieb mit deutlichen Lichtnadeln aufwies (GRUBER 1990, SCHMIDT-VOGT 1987, vgl. u. a. AKCA 1979).

Der jährliche Höhenzuwachs wurde anhand der Astquirle bzw. Knospenbasis-Schuppennarben auf 0,01 m erfasst (GERECKE 1988, ROLOFF 2001). Die Höhenanalyse wurde vom letzten Höhentrieb aus beginnend in Richtung Stammfuß durchgeführt. Offensichtliche oder vermutete Störungen (Brüche, Zwiesel, Krümmungen, Steiläste, ...) wurden ebenfalls festgehalten. Die Höhenanalyse wurde bereits im Gelände durch Jahrringsauszählungen der entnommenen Stammscheiben verifiziert. Sofern dies nicht gelang, wurde der Zentralbaum verworfen.

Der Stockdurchmesser o. R. (SD) und die Stockhöhe (SH) wurden durch zweimaliges Messen über Kreuz mit einem Zollstock auf jeweils 0,1 cm ermittelt (vgl. Kap. 3.4.2 Messungen am stehenden Baum).

Für die spätere Stammanalyse wurden ab 1,3 m internodial Stammscheiben im Regelabstand von 4 bis 5 m entnommen (vgl. u. a. SPATHELF 1999). Bei Scheiben aus höheren Stammpositionen wurde der Abstand in der grünen Krone auf bis zu 2 m reduziert. Im Durchschnitt fielen 5 Stammscheiben je Probebaum an. Auf den Scheiben wurde im Gelände die Nordrichtung markiert, auf der Unterseite wurden sie eindeutig beschriftet. Zur Datierung des Baumalters wurde ein Stockkeil entnommen. Weiterhin erfolgte in Anlehnung an die

---

<sup>21</sup> Der analytische Kronenansatz ist definiert als erster grüner Quirl mit mindestens drei grünen Primärästen und höchstens einem Totast, über dem kein Totastquirl mehr folgt. Einzelne grüne Äste blieben unberücksichtigt, einseitige Bekronung wurde gemittelt (vgl. Kap. 3.4.2 Messungen am stehenden Baum).

<sup>22</sup> Der unterste Grünastansatz ist als der Ansatz des untersten einzelnen grünen Astes am Baum definiert (vgl. Kap. 3.4.2 Messungen am stehenden Baum).

Methodik von SPATHELF (1999) und EPP (2003) unterhalb des aktuellen Kronenansatzes die Entnahme eines Totastquirls zur späteren Kronenrekonstruktion<sup>23</sup>.

Zwischen Astbasisdurchmesser und Astlänge besteht bei der Fichte ein straffer statistischer Zusammenhang (ABETZ & UNFRIED 1983, LÄSSIG 1991, vgl. NUTTO 1999). Die beiden Größen stehen auch in enger Beziehung zum Standraum des Baumes, der wiederum einen maßgeblichen Einfluss auf die relative Kronenlänge hat (ABETZ 1968). Vergleichbare Bäume müssten folglich bei gleicher relativer Kronenlänge auch gleiche Astlängen und demzufolge auch gleiche Astbasisdurchmesser aufweisen.

Wie Abbildung 5 verdeutlicht, können Bäume mit derselben relativen Kronenlänge aber trotzdem morphologisch stark unterschiedlich gebaute Kronen mit vermutlich unterschiedlicher physiologischer Leistungskraft aufweisen<sup>24</sup>. Diese unterschiedlichen Kronenmorphologien müssten sich bei gleicher relativer Kronenlänge in unterschiedlichen Astquerschnittsflächen pro Meter Baumlänge niederschlagen. Es liegt nahe anzunehmen, dass sich die unterschiedliche Kronenstruktur bzw. Kronendichte, die sich in dem Parameter der Astquerschnittsflächen je Meter Baumlänge ausdrückt, ähnlich wie die Benadelungsdichte bei gleicher relativer Kronenlänge auswirkt (vgl. KRAMER 1982, SPIECKER 1983, 1986 & 1991 a).

Für die Erfassung der Astquerschnittsflächen pro Meter Baumlänge schied eine Vollerhebung aller Astdurchmesser aufgrund eines unvermeidbar hohen Messaufwandes aus. Es wurden daher je 4 m-Stamm-Sektion bei einem für die jeweilige Sektion repräsentativen<sup>25</sup> Astquirl alle Astdurchmesser ab 0,8 cm m. R. getrennt nach Grün- und Totästen auf 0,1 cm genau gemessen. Die Messung erfolgte mit einer digitalen Schieblehre unter Ausschluss des Astwulstes durch einmaliges Kluppen in Längsrichtung parallel zur Stammachse (vgl. ABETZ & UNFRIED 1983, LÄSSIG 1991). Internodialäste mit einem Astdurchmesser oberhalb der Messschwelle wurden miterfasst. Hierzu wurden die Quirlabstände des Messquirls zu den benachbarten Quirlen gemittelt. Die Internodialäste der jeweils an den Messquirl angrenzenden Internodialhälften wurden dem Messquirl zugeordnet. In der jeweiligen 4 m-Sektion wurde anhand der Anzahl der Höhentriebe aus der Höhenanalyse sowie der gemessenen Astdurchmesser des repräsentativen Quirls auf die Summe der

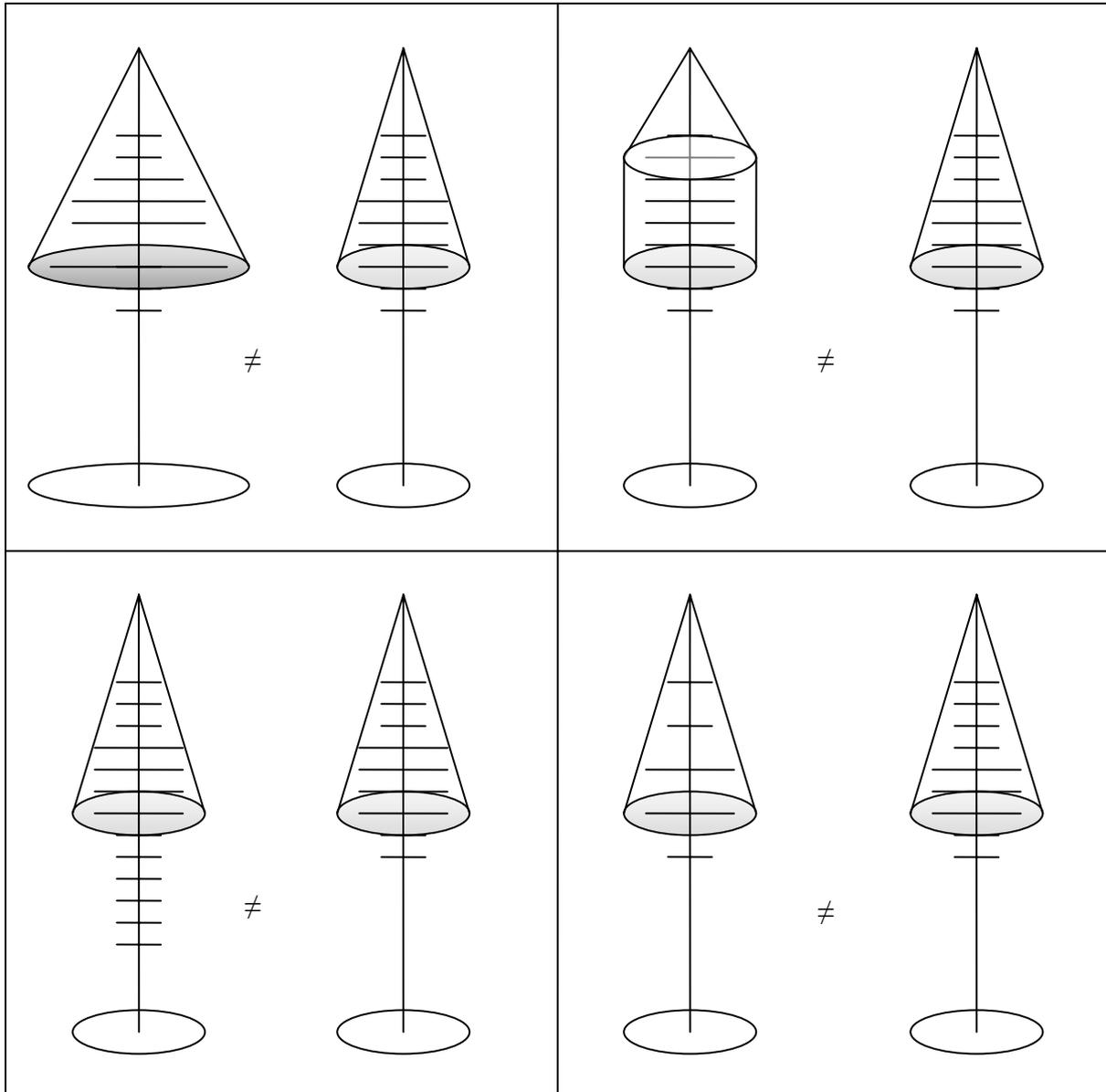
---

<sup>23</sup> siehe Fußnote Nr. 36

<sup>24</sup> Übertragen gilt dies ebenso für den Einfluss inzwischen abgestorbener Kronenteile (Totäste) auf den zurückliegenden Durchmesserzuwachs.

<sup>25</sup> Die Repräsentativität des jeweiligen Quirls wurde je 4 m-Stamm-Sektion visuell geschätzt.

Astquerschnittsflächen in der Stammsektion hochgerechnet. Anschließend wurden die sektionsweise ermittelten Astquerschnittsflächen addiert und durch die Baumlänge geteilt. Die Berechnung erfolgte für alle Äste sowie getrennt nach Grün- und Totästen.



**Abbildung 5:** Unterschiedliche Kronen- und Astmorphologie bei gleicher relativer Kronenlänge

### 3.5 Labormethoden

Nach den Außenaufnahmen wurden anhand des entnommenen Probenmaterials die Wachstumsparameter der Zentralbäume und Probekreisbäume abgeleitet. Anschließend wurde die Konkurrenzsituation der Zentralbäume berechnet und bis zum Freistellungsereignis 1981 rekonstruiert. Soweit nichts anderes vermerkt ist, wurden die aus dem Datenmaterial abgeleiteten Parameter mit üblichen Verfahren nach KRAMER & AKCA (1995) berechnet. Die folgenden Unterkapitel erläutern die einzelnen Schritte näher. Ein besonderer Schwerpunkt wird auf die Rekonstruktion der relativen Kronenlänge gelegt.

#### 3.5.1 Berechnung der Kronenkennwerte der Zentralbäume

Für die Herleitung der jeweiligen relativen Kronenlänge (RKL) ging die als Baumlänge am liegenden Stamm ermittelte Baumhöhe ( $h$ ) sowie die liegend gemessene Position des analytischen Kronenansatzes (KAA) und die am stehenden Stamm gemessene Position des visuellen Kronenansatzes (KAV) ein. Je nachdem, ob die am liegenden Stamm gemessene Position des analytischen Kronenansatzes (KAA) oder die am stehenden Stamm gemessene Position des visuellen Kronenansatzes (KAV) verwendet wurde, werden die abgeleiteten relativen Kronenlängen analog als RKL<sub>A</sub> und RKL<sub>V</sub> bezeichnet.

Der am liegenden Stamm erhobene KAA und der am stehenden Stamm gemessene KAV sind trotz unterschiedlicher Definitionen und Messmethoden eng korreliert ( $r = 0,92$ ); ihre Mittel differieren auf den KAA bezogen um 3 %. Stehend und liegend ermittelte Baumhöhe (bzw. Baumlänge) korrelieren ebenfalls eng ( $r = 0,99$ ); ihre Mittel differieren auf die liegend als Baumlänge gemessene Baumhöhe um 1,3 %.

Bei der Höhe des KAA sind die stehend und liegend ermittelten Werte schwächer korreliert ( $r = 0,81$ ) und es tritt eine systematische Abweichung auf: Bezogen auf die Erfassung am liegenden Stamm unterschätzt der Mittelwert die Stehendvermessung die Position des analytischen Kronenansatzes um 16 %. Als Grund kommt vor allem infrage, dass bei der Stehendvermessung Totastquirle übersehen werden, die zu einer höheren Lage des Kronenansatzes geführt hätten<sup>26</sup>.

---

<sup>26</sup> Ein weiterer Faktor könnte darin liegen, dass bei der Fällung Grünäste abgeschlagen oder durch die Stammlage verdeckt wurden und so leichter übersehen werden.

Daher wurde für den KAA der am liegenden Stamm ermittelte Wert als Eingangsgröße verwendet und darauf verzichtet, einen Korrekturfaktor für den stehend gemessenen KAV herzuleiten, der ihn auf die liegende Messmethode bezieht. Soweit in dieser Arbeit nichts anderes vermerkt ist, bezieht sich die relative Kronenlänge der Zentralbäume (RKL) auf die o. a. RKLA<sup>27</sup> und der Kronenansatz (KA) auf den o. a. KAA.

Der h/d-Wert wurde mit der als Baumlänge am liegenden Stamm ermittelten Baumhöhe (h) sowie dem Brusthöhendurchmesser m. R. aus der Stehendvermessung berechnet.

Kronenmantelfläche (KMF) und Kronenvolumen (KV) wurden nach SCHMITT (1994 a)<sup>28</sup> berechnet:

$$KMF = \pi \cdot \left( KB \cdot (KB^2 + LKL^2)^{0,5} + (SKL^2 + (KB - KBA)^2)^{0,5} \cdot (KB + KBA) \right)$$

(Gleichung 1)

$$KV = \frac{\pi}{3} \left( KB^2 \cdot LKL + SKL \cdot (KB^2 + KB \cdot KBA + KBA^2) \right)$$

(Gleichung 2)

wobei

KB	=	Kronenbreite (m);
LKL	=	Lichtkronenlänge (m);
SKL	=	Schattenkronenlänge (m);
KBA	=	Kronenbreite am Kronenansatz (m).

<sup>27</sup> In der Praxis ist es nicht erforderlich, für die RKLA den Kronenansatz am liegenden Stamm zu erheben. Er kann mit der einfacheren visuellen Ausgleichsmethode (vgl. Kap. 3.4.2 Messungen am stehenden Baum) auch am stehenden Stamm mit ausreichender Genauigkeit (als KAV) geschätzt werden.

<sup>28</sup> SCHMITT (1994 a) verwendet als Rotationskörper für die Lichtkrone ein Kegelspitz und für die Schattenkrone einen Kegelstumpf.

Nach SPATHELF (1999) wurden für die Kronenbreite am Kronenansatz 80 % der aus der Kronenschirmfläche hergeleiteten Kronenbreite angenommen.

### 3.5.2 Rekonstruktion der Wachstumsparameter der Zentralbäume

Für die Zentralbäume wurde der jährliche Radial- und Höhenzuwachs (Stammanalyse) sowie die Kronenlängenentwicklung rekonstruiert.

Zur Ermittlung des jährlichen Radialzuwachses wurden bei den in 1,3 m Höhe entnommen Stammscheiben nach Trocknung und mehrmaligem Schleifen die jährlichen Radialzuwächse entlang von 8 Radien mit einem Abstand von jeweils 45 ° vermessen. Bei den Scheiben oberhalb 1,3 m erfolgte die Vermessung entlang von 4 Radien. Der mittlere Radialzuwachs wurde als quadratisches Mittel berechnet (BIGING & WENSEL 1988, WEISE 1982, 1987). Der Stockkeil wurde nur zur Ermittlung des Stockalters in Jahren herangezogen. Die Radialzuwachsmessung erfolgte bildanalysegestützt durch eine am Institut für Waldwachstum der Universität Freiburg entwickelte Jahrringmessanlage mit einer Genauigkeit von 0,01 mm. Zur Synchronisation der Jahrringreihen dienten typische Weiserjahre (SCHWEINGRUBER 2001).

Für die Veranschlagung der Rindenstärke wurden Gleichungen von ALTHERR et al. (1978) und METTE (1972) geprüft. Mit den Gleichungen von ALTHERR et al. (1978) konnte die beste Anpassung an das Datenmaterial der vorliegenden Untersuchung erreicht werden<sup>29</sup>.

Die jährliche Höhenentwicklung wurde auf der Grundlage der im Gelände durchgeführten Höhenanalyse mithilfe der im Labor genau datierten Stammscheiben durchgeführt.

---

<sup>29</sup> Auf eine Korrektur der Dickenwachstumswerte nach BÖRNER (1997) wurde verzichtet. BÖRNER leitete bei Buche aus den Wachstumswerten der Radialzuwachsmessung im lufttrockenen Zustand einen Korrekturfaktor her, der diese Werte auf den am stehenden Baum mit Umfangmaßband ermittelten BHD mit Rinde im waldfrischen Zustand bezieht. Die Differenz der Durchmesserwerte zwischen diesen Methoden kommt durch die Rindenstärke, den Trockenschwund und den geringen systematischen positiven Fehler der Durchmesserermittlung mit dem Umfangmaßband zustande. Die Rindenstärke wurde bei der vorliegenden Untersuchung nach ALTHERR et al. (1978) berücksichtigt. Ein Vergleich der Mittelwerte der mit Umfangmaßband stehend gemessenen Durchmesser mit Rinde und den nach der o. a. Methode rekonstruierten Durchmesser mit Rinde ergibt eine systematische positive Abweichung von lediglich 2,4 %. Dieser Wert liegt unter den Literaturangaben für das durch Trocknung bedingte radiale und tangentielle Schwundverhalten der Fichte (GRAMMEL 1989). Im Folgenden wurden diese Faktoren daher vernachlässigt. Soweit nicht ausdrücklich darauf hingewiesen wird, beziehen sich alle Angaben von Zuwachs- und Wachstumswerten des Durchmessers in der vorliegenden Arbeit auf dieses Niveau, bei dem davon ausgegangen werden kann, dass es in etwa dem waldfrischen Zustand mit Rinde entspricht.

Zur Rekonstruktion der Kronenlängenentwicklung wurden an einer Stichprobe von neun Zentralbäumen je zwei Verfahren als Alternativmethoden getestet: Das eine Verfahren stützt sich auf die Rekonstruktion des Absterbezeitpunktes von Ästen eines Totastquirls (u. a. EPP 2003 & SPATHELF 1999) und erfordert einen vergleichsweise hohen Arbeitsaufwand; das andere Verfahren rekonstruiert den Kronenansatz über das von PRESSLER (1864) formulierte „Gesetz der Konstanz des jährlichen Grundflächenzuwachses am Baumschaft bis zum Kronenansatz“ und arbeitet mit jährlichen Grundflächenzuwächsen, die aus der Stammanalyse abgeleitet werden können (u. a. ASSMANN 1961 & 1970, LARSON 1963, MITCHELL 1975, OTTORINI et al. 1996) (vgl. Kap. 3.1.2).

Zunächst wurden hierzu bei den Zentralbäumen der Stichprobe die getrockneten Totastquirle mit einer Bandsäge entlang des Marks der abgestorbenen Äste radial aufgetrennt. Nach dem Schleifen der Schnittstelle wurden je Ast die Jahrringe ausgezählt, bei denen noch eine Verbindung zwischen Schaft- und Astholz bestand. Nach der Untersuchung aller Äste eines Totastquirls wurde das Jahr bestimmt, nach dem der Quirl nicht mehr zur grünen Krone nach der verwendeten Definition des analytischen Kronenansatzes (KAA) gehörte. In Verbindung mit dem aktuellen Kronenansatz wurde die durchschnittliche Kronenansatzveränderungsrate im Beobachtungszeitraum hergeleitet (SPATHELF 1999). In Beziehung zum Höhenwachstum des Zentralbaumes wurde mit diesem Wert die jährliche RKL für den zurückliegenden Untersuchungszeitraum berechnet.

Danach wurde als Alternativmethode bei den gleichen neun Zentralbäumen eine Methode auf Grundlage des PRESSLER'schen Verteilungsmusters des jährlichen Grundflächenzuwachses am Baumschaft durchgeführt (u. a. OTTORINI et al. 1996) (vgl. Kap. 3.1.2 Rekonstruktion der Wachstumsparameter):

Hierzu wurde je Probebaum eine Tabelle der jährlichen Grundflächenzuwächse je entnommener Stammscheibe mit ihrer Entnahmehöhe aufgestellt (Tabelle 5). Danach wurde auf Basis des jährlichen Grundflächenzuwachses iterativ je Stammscheibe das Jahr identifiziert, das den Wechsel zwischen zuvor kleineren  $ig$ -Werten (grüne Krone) und danach höheren  $ig$ -Werten (Totastbereich) auf dem Niveau der unteren Stammscheiben markiert. Nach Identifizierung des Wechseljahres wurde für den Quirl unterhalb der Stammscheibe für das entsprechende Jahr letztmalig der Status des Kronenansatzes angenommen. Tabelle 5 zeigt dieses Vorgehen

am Beispiel des Zentralbaumes 32<sup>30</sup>. Die Wechseljahre sind gelb markiert. Die folgenden Abschnitte erläutern die Identifizierung der Wechseljahre näher.

**Tabelle 5:** Rekonstruktion des Kronenansatzes im Anhalt an OTTORINI et al. (1996) am Beispiel des Zentralbaumes Nr. 32

Jahr	S1	S2	S3	S4	S5
	1,3 m	5,7 m	9,95 m	13,8 m	15,7 m
	ig (cm <sup>2</sup> *Jahr <sup>-1</sup> )				
2003	3,68	3,05	3,16	3,76	3,26
2002	5,24	4,55	4,24	4,02	3,79
2001	6,03	5,36	5,12	4,79	3,67
2000	4,50	3,80	3,78	3,02	2,87
1999	5,97	5,84	4,98	4,07	2,65
1998	5,97	5,02	4,55	3,70	1,94
1997	5,26	4,56	5,01	3,57	1,15
1996	4,76	3,87	3,99	3,42	0,53
1995	4,19	3,26	2,65	2,40	0,14
1994	4,96	4,20	4,26	2,05	0,00
1993	5,38	4,09	3,91	2,42	0,00
1992	4,50	3,30	2,98	1,80	0,00
1991	5,91	4,45	3,37	2,05	0,00
1990	7,91	6,19	4,18	1,85	0,00
1989	7,41	6,47	4,64	1,07	0,00
1988	7,65	6,47	5,01	0,55	0,00
1987	7,04	5,92	4,25	0,15	0,00
1986	6,20	5,63	4,19	0,00	0,00
1985	6,33	5,28	3,88	0,00	0,00
1984	6,15	4,93	3,31	0,00	0,00
1983	6,48	4,82	3,06	0,00	0,00
1982	5,57	5,36	3,25	0,00	0,00
1981	3,67	4,50	2,80	0,00	0,00
1980	3,27	2,97	2,62	0,00	0,00
1979	3,68	3,36	2,23	0,00	0,00
1978	3,99	4,28	2,77	0,00	0,00
1977	4,04	3,93	3,42	0,00	0,00
1976	3,06	3,70	2,08	0,00	0,00
1975	3,81	4,29	1,72	0,00	0,00
1974	4,60	4,29	0,86	0,00	0,00
1973	4,01	4,95	0,26	0,00	0,00
1972	4,34	3,59	0,00	0,00	0,00
..	..	..	..	..	..

<sup>30</sup> Der Kronenansatz des Zentralbaumes befand sich im Aufnahmejahr 2003 auf einer Höhe von 12,6 m, die Lichtkrone setzte auf 13,35 m an, seine RKL betrug 32 % (Baumhöhe 18,6 m, BHD 17,7 cm, h/d 105). Es wurden insgesamt fünf Stammscheiben (S) und ein Totastquirl (T1 Entnahmehöhe 9,75 m) entnommen.

Der typische Verlauf des Grundflächenzuwachses am Baumschaft kann u. a. durch Witterungseinflüsse gestört werden<sup>31</sup>. Daher sollten zunächst möglichst typische Jahre zur iterativen Identifikation des Wechseljahres herangezogen werden (OTTORINI et al. 1996, MITCHELL 1975).

Nach der Analyse typischer Jahre wurden Extremjahre in Verbindung mit dem Niveauvergleich und dem Verteilungsmuster der ig-Werte unter- und oberhalb des Beurteilungsjahres als Hilfsmittel herangezogen. In Trockenjahren wie z. B. 1976, 1996 und 2003 oder Stresssituationen wie 1982 (nach der starken Bestandesauflichtung durch den 81er Schneebruch<sup>32</sup>) bestehen im unteren Kronendrittel die günstigsten Bedingungen für das Dickenwachstum (u. a. MITSCHERLICH 1978). Der Grundflächenzuwachs fällt in dieser Region daher relativ gesehen am wenigsten zurück. Dies zeichnete sich auch im Verlauf der absoluten ig-Werte der untersuchten Zentralbäume ab. In den o. a. bekannten Extremjahren und anderen Jahren, in denen die Niederschlagssummen in der Vegetationszeit unter dem langjährigen Mittel lagen, zeigten einzelne Stammscheiben deutliche Abweichungen vom ungestörten ig-Muster (vgl. GERECKE 1988). Dies ist in Tabelle 5 z. B. bei S2 u. a. 1981<sup>33</sup> und 1976, bei S3 u. a. 1996 und 1997 sowie bei S4 2003 der Fall<sup>34</sup>. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 5 grau hinterlegt. Wenn ein Wert einer Stammscheibe in diesen Jahren eine derartige Abweichung vom PRESSLER'schen Verteilungsmuster zeigte, wurde dies als Indiz dafür gewertet, dass die Stammscheibe in diesem Jahr noch Teil der grünen Krone des Zentralbaumes war.

Die mit dem ig-Verlauf abgeleiteten Kronenansätze wurden anhand des jeweils in einem Probekreis gemessenen niedrigsten Grünastansatzes<sup>35</sup> und der bereits eindeutig rekonstruierten Kronenansätze anderer vergleichbarer Zentralbäume (BHD, h/d, APAA) in benachbarter räumlicher Lage auf Plausibilität geprüft (vgl. OTTORINI et al. 1996).

<sup>31</sup> Auch biotische Faktoren wie starker Nadelfraß durch Insekten oder extreme Grünästungen können entsprechende Abweichungen herbeiführen (u. a. HARTIG 1896, MITSCHERLICH & v. GADOW 1968, TOPCUOGLU 1940)

<sup>32</sup> Das trifft jedoch nicht auf den Zentralbaum Nr. 32 zu, der durch den 81er Bruch nicht freigestellt wurde.

<sup>33</sup> Das Jahr 1981 zeichnete sich im Wuchsgebiet durch negative Abweichungen der Niederschlagssummen in der Vegetationszeit aus.

<sup>34</sup> MITCHELL (1975) beschreibt derartige Abweichungen auch für stark bedrängte Einzelbäume bei Douglasie.

<sup>35</sup> Es kann davon ausgegangen werden, dass die grüne Krone des Zentralbaumes zum Zeitpunkt des Schneebruchs 1981 aufgrund des damals geschlossenen Bestandes nicht wesentlich tiefer als dieser Grünast ansetzen konnte.

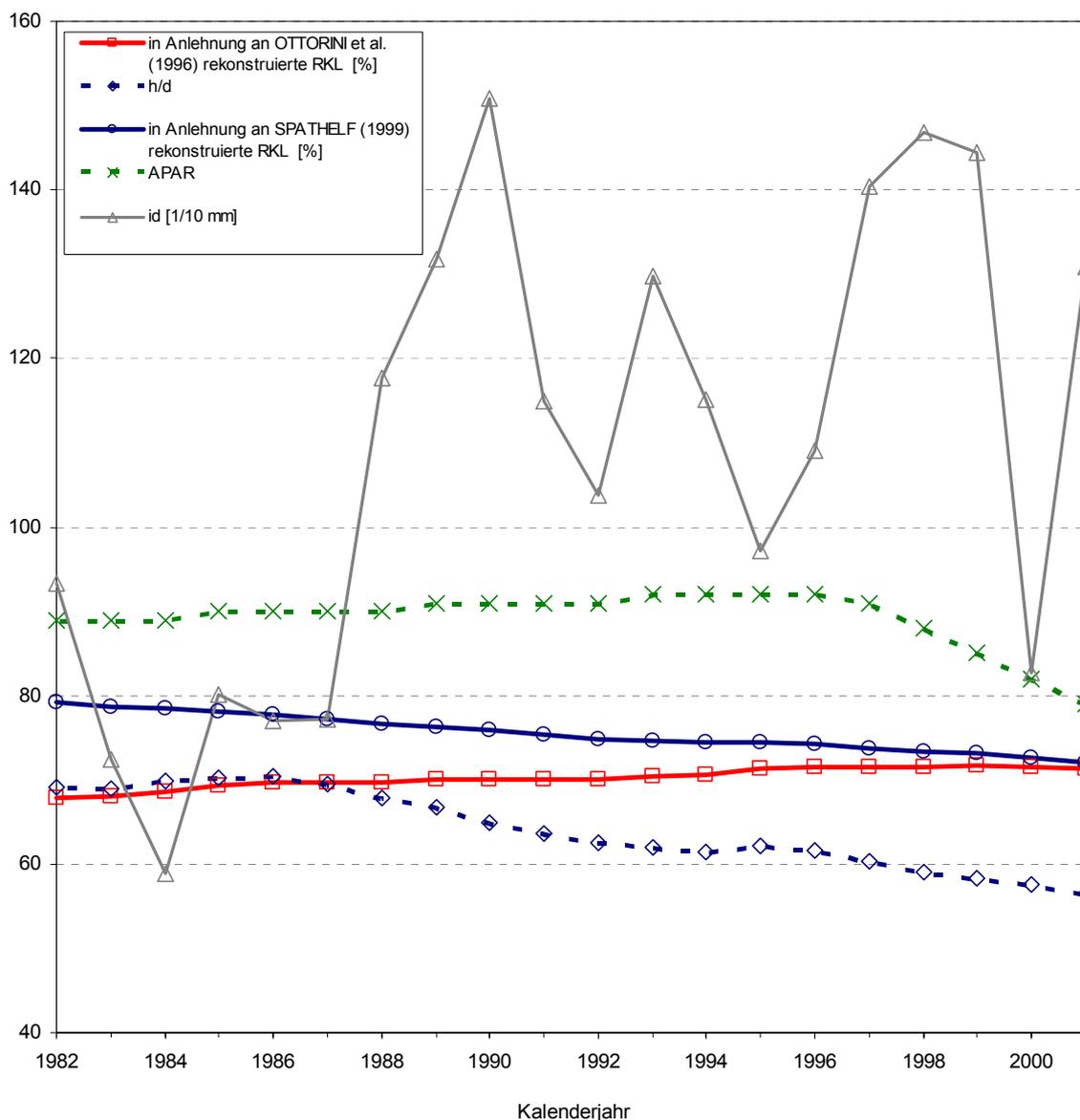
Die Berechnung der jährlichen RKL erfolgte wie bei dem vorigen Verfahren über die durchschnittlichen Kronenansatzveränderungsraten des Zentralbaumes im zurückliegenden Untersuchungszeitraum.

Im Vergleich zur Methode nach SPATHELF (1999), bei der ein Kronenansatz rekonstruiert und daraus die Kronenansatzveränderungsrate für den Beobachtungszeitraum modelliert wird, lieferte die andere Methode bei geringerem Arbeitsaufwand je nach Anzahl und Lage der entnommenen Stammscheiben mindestens ein bis mehrere Kronenansätze<sup>36</sup>. Bei gleicher Länge des Beobachtungszeitraums führen die aus ihnen abgeleiteten RKL-Werte bei erheblich geringerem Erhebungsaufwand zu periodisch feiner aufgelösten und plausibleren Ergebnissen.

Dies unterstreicht Abbildung 6 am Beispiel des Zentralbaumes Nr. 6: Die Methode nach SPATHELF (1999) hätte für Zentralbaum Nr. 6 ein konstantes Absinken der RKL von 79 % im Jahr 1982 bis 72 % im Jahr 2001 ergeben. Im Absinken des h/d-Wertes und der eher konstanten Tendenz des APAR deutet sich bereits ein Widerspruch hierzu an. Obwohl die RKL sinkt, fällt der h/d-Wert des Zentralbaumes von 69 im Jahr 1982 kontinuierlich auf 57 im Jahr 2001. Der Verlauf des APAR deckt sich mit der h/d-Wertentwicklung. Nach dem APAR-Verlauf stehen dem Zentralbaum 1982 als Standfläche 89 % der Kronenschirmfläche eines Solitärs mit dem selben BHD zur Verfügung; der APAR steigt bis 1996 sogar noch auf 92 an und fällt erst dann ab. Bei einem Rückgang der relativen Kronenlänge wäre ein steigender bis konstanter h/d-Wert und gleichzeitig fallender APAR zu erwarten gewesen.

---

<sup>36</sup> Auch bei der Rekonstruktion des Kronenansatzes mit Hilfe von Totastquirlen können grundsätzlich mehrere Quirle je Baum analysiert werden und zusätzliche Stützpunkte liefern. Dies ist allerdings mit einem deutlich höheren Untersuchungsaufwand verbunden. SPATHELF (1999) verwendete bei seiner Untersuchung einen Totastquirl je Probebaum, den er im Anschluss an eine anfallende Stammscheibe aus dem Bereich der Totastzone in einem Abstand von mehreren Quirlen zum aktuellen Kronenansatz entnahm. Bei ausführlichen Vorstudien stellt SPATHELF fest, dass diese Methode für die Rekonstruktion der Kronenansatzveränderungsrate eines Zeitraums von 20 bis 30 Jahren hinreichend genaue Ergebnisse liefert. Weiterhin hebt SPATHELF hervor, dass sich bei dieser Methode der Totastquirlentnahme die Zerstörung des Baumschaftes auf das bei der Stammanalyse übliche Ausmaß beschränkt. Für die Herleitung der rezenten Kronenansatzveränderungsrate empfiehlt SPATHELF die Entnahme eines Totastquirls direkt unterhalb des aktuellen Kronenansatzes. EPP (2003) verwendete ein bis zwei Totastquirl je Probebaum und erhöhte diese Anzahl bei einer vermuteten stärkeren Verschiebung des Kronenansatzes auf bis zu vier Totastquirl je Probebaum.



**Abbildung 6:** Methodenvergleich zur Rekonstruktion der RKL am Beispiel des Zentralbaumes Nr. 6

Die Rekonstruktion der RKL in Anlehnung an OTTORINI et al. (1996) auf Basis des typischen Musters des Grundflächenzuwachses am Baumschaft zeichnet bei Zentralbaum Nr. 6 insgesamt einen plausibleren Verlauf nach als die Herleitung der RKL mithilfe der Datierung des Absterbezeitpunkts von Ästen entnommener Totastquirle in Anlehnung an SPATHELF (1999). Die nach SPATHELF rekonstruierte RKL sinkt im Beobachtungszeitraum von 79 auf 72 %. Gleichzeitig fällt der h/d-Wert von 69 auf 57 bei einem konstanten bis leicht steigenden APAR, der erst wenige Jahre vor dem Einschlag des Zentralbaumes absinkt. Bei einer sinkenden RKL wären ein konstanter bis steigender h/d-Wert und ein fallender APAR zu erwarten gewesen. Bei der nach OTTORINI et al. (1996) rekonstruierten RKL dreht sich der Trend um, und es ergibt sich eine im Beobachtungszeitraum von 68 auf 72 % ansteigende RKL, deren Entwicklung sich mit dem Verlauf von h/d-Wert und APAR deckt.

Dieser Widerspruch wird bei der Betrachtung der nach OTTORINI et al. (1996) hergeleiteten RKL aufgelöst. Der Trend der Entwicklung der RKL dreht sich jetzt um. Statt einer sinkenden

ergibt sich eine von 68 % im Jahr 1982 auf 72 % im Jahr 2001 steigende RKL. Diese Entwicklung passt zu dem Verlauf von h/d-Wert und APAR im Beobachtungszeitraum. Die Mittelwerte der nach den beiden Methoden für die Beobachtungsperiode hergeleiteten RKL betragen 75,2 % (Totastquirl mit  $RKL_{\min}$  71,2 %,  $RKL_{\max}$  79,2 %,  $s_{RKL}$  2,4 %) und 70,3 % (ig-Verlauf,  $RKL_{\min}$  67,8 %,  $RKL_{\max}$  71,6 %,  $s_{RKL}$  1,2 %). Nach einem t-Test für abhängige Stichproben unterscheiden sich die Mittelwerte signifikant<sup>37</sup>.

Für die vorliegende Arbeit wurden die Kronenansätze der Zentralbäume für den Beobachtungszeitraum mit der modifizierten Methode nach OTTORINI et al. (1996) rekonstruiert. Anschließend wurden in Anlehnung an SPATHELF (1999) die durchschnittlichen Kronenansatzveränderungsraten für die zwischen den Messpunkten liegenden Zeiträume jährlich abgeleitet. In Beziehung zum Höhenwachstum, das ebenfalls in jährlicher Auflösung vorlag, ergab sich so die RKL je Jahr.

### 3.5.3 Rekonstruktion der Wachstumsparameter der Probekreisbäume

Für die Probekreisbäume lagen nur Durchmesserwerte aus dem Aufnahmejahr aber keine Radialzuwächse vor. Aus den Stammanalyse-Daten der Untersuchungsbäume wurde daher eine Schätzfunktion abgeleitet, mit der aus dem aktuellen Brusthöhendurchmesser (BHD) der Brusthöhendurchmesser zum Freistellungszeitpunkt<sup>38</sup> geschätzt (BHDR) werden konnte (vgl. Kap. 3.5.2 Rekonstruktion der Wachstumsparameter der Zentralbäume):

---

<sup>37</sup> Zentralbaum Nr. 6 repräsentiert den oberen Bereich der untersuchten Durchmesser mit einer geringen Kronenansatzveränderungsrate über den Beobachtungszeitraum. Er wurde als Beispiel gewählt, weil sich an ihm die unterschiedlichen Ergebnisse der beiden Methoden zur Kronenrekonstruktion besonders anschaulich erläutern lassen. Die beschriebenen methodischen Unterschiede zeigten sich ebenfalls bei Zentralbäumen aus dem mittleren und unteren Durchmesserspektrum mit mittleren bis größeren Kronenansatzveränderungsraten.

<sup>38</sup> Schneebruchereignis von 1981 und in Einzelfällen zusätzlich rekonstruierbare waldbauliche Eingriffe 1996 und 2001.

$$BHDR = 6,9732 + 0,769766 BHD - 0,55745 J \quad r^2 = 0,941 \quad n = 1449$$

(Gleichung 3)

wobei      BHDR      =      rekonstruierter Brusthöhendurchmesser m. R. (cm);  
               BHD        =      Brusthöhendurchmesser m. R. (cm);  
               J            =      Jahre nach Freistellung.

Bei den Probekreisbäumen, die im Beobachtungszeitraum (1982 bis 2001) ausgeschieden waren, konnten nur die Stöcke erfasst werden. Zur Schätzung des Brusthöhendurchmessers m. R. wurde anhand der Daten der eingeschlagenen Bäume folgende Regressionsgleichung abgeleitet:

$$BHD = 2,5206 + 0,73175 SD + 0,069426 SH \quad r^2 = 0,91 \quad n = 63$$

(Gleichung 4)

wobei      BHD        =      Brusthöhendurchmesser m. R. (cm);  
               SD            =      Stockdurchmesser o. R. (cm);  
               SH            =      Stockhöhe (cm).

Für die Schätzung des Brusthöhendurchmessers zum Freistellungszeitpunkt wurde Gleichung 3 verwendet.

### 3.5.4. Erfassung und Rekonstruktion der Konkurrenzparameter der Zentralbäume

Für die Zentralbäume wurden Grundfläche des Probekreises (G), Bestockungsgrad des Probekreises ( $B^\circ$ ), absoluter APA-Index (APAA)<sup>39</sup> nach MOORE et al. (1973) und NANCE et al. (1988) sowie relativer APA-Index (APAR)<sup>40</sup> als Konkurrenzmaße erfasst und für den gesamten Untersuchungszeitraum mit jährlicher Auflösung rekonstruiert.

Die Grundfläche ergibt sich aus der Rekonstruktion des Durchmesserwachstums von Zentralbaum und Probekreisbäumen je Probekreis und Jahr. In Beziehung zum Soll-Wert der Ertragstafel (WENK, RÖMISCH & GEROLD 1985) wurde aus der Grundfläche der Probekreise der  $B^\circ$  abgeleitet.

Zusätzlich wurden als Konkurrenzmaße der Zentralbäume bei den Außenaufnahmen der Anteil des freien Kronenumfangs in Stufen von 5 % (FU) und in vollen Quadranten (FQ) visuell geschätzt (vgl. Kap. 3.4.2 Messungen am stehenden Baum). Diese Konkurrenzparameter wurden auf der Grundlage ihrer Beziehung zum APAR bei den in Kapitel 4 angepassten Regressionsgleichungen in einem einfachen Verfahren zur Erhöhung der Anschaulichkeit der Schätzfunktionen rechnerisch ersetzt<sup>41</sup>.

Für die Berechnung des absoluten APA-Index (APAA)<sup>42</sup> wurde die Formel nach MOORE et al. (1973) verwendet:

<sup>39</sup> Area Potentially Available Absolute.

<sup>40</sup> Area Potentially Available Relative. Der APAR gibt das Verhältnis der Kronenschirmfläche des Untersuchungsbaums zur Kronenschirmfläche eines Solitärs mit demselben BHD an und wurde in dieser Arbeit entwickelt. Seine Herleitung wird in den folgenden Absätzen detailliert beschrieben.

<sup>41</sup> FU und FQ sind eng mit APAR korreliert (vgl. Kap. 4). Über den APAR und der Annahme einer altersunabhängigen Beziehung zwischen APAR und FU bzw. FQ können die beiden Werte ebenfalls mit jährlicher Auflösung rekonstruiert werden. Letztendlich können diese rekonstruierten Variablen aufgrund ihrer engen Korrelation mit dem APAR und der Grundlage ihrer Ermittlung aber nichts anderes als eine ungenauere Form der Variablen APAR zur Erklärung der Wachstumsreaktionen des Zentralbaumes sein. Sie sind aber von hoher Anschaulichkeit und praktischem Wert. Auf ihre Rekonstruktion wurde zunächst verzichtet und dafür der Weg gewählt, über die Beziehung zwischen FU und APAR im Anschluss an die empirische Analyse eine rechnerische Ersetzung von APAR durch FU in den angepassten Regressionsfunktionen vorzunehmen. Dieser Weg ist transparenter und effizienter als eine Rekonstruktion z. B. der jährlichen Werte von FU und deren empirisch-statistische Auswertung, die zu denselben Ergebnissen geführt hätte (vgl. Kap. 4).

<sup>42</sup> Hierbei handelt es sich um die übliche Angabe des APA-Index nach MOORE et al. (1973) als eine Fläche in  $m^2$ , die dem Zentralbaum zur Ressourcennutzung zur Verfügung steht und von seinen Konkurrenten begrenzt wird.

$$a_i = \frac{BHD_z^2}{BHD_z^2 + BHD_i^2} \cdot A_i$$

(Gleichung 5)

wobei	$a_i$	=	Entfernung vom Zentralbaum zur Polygonseite (m);
	$BHD_z$	=	Brusthöhendurchmesser des Zentralbaumes m. R. (cm);
	$BHD_i$	=	Brusthöhendurchmesser des Konkurrenten m. R. (cm);
	$A_i$	=	Entfernung zwischen Zentralbaum und Konkurrent (m).

In Anlehnung an den Modellansatz von NANCE et al. (1988) wurde die maximale Entfernung der Seitenlinien des APA-Standraumpolygons vom Zentralbaum durch den Kronenradius eines Solitärs mit demselben Brusthöhendurchmesser begrenzt. Hinter diesem Ansatz steht die Annahme, dass der Kronenradius eines konkurrenzfrei erwachsenen Solitärs die maximale Ausdehnung des Konkurrenzeinflussbereichs eines Baumes repräsentiert. Zur Schätzung des Kronenradius (KR) einer konkurrenzfrei erwachsenen Fichte wurde eine Regressionsfunktion mit dem Brusthöhendurchmesser als unabhängiger Variable abgeleitet. Hierzu wurden Daten von LÄSSIG (1991) verwendet.

$$KR = 1,4949 + 0,0591(BHD) \quad r^2 = 0,69 \quad n = 139$$

(Gleichung 6)

wobei	KR	=	Kronenradius (m);
	BHD	=	Brusthöhendurchmesser m. R. (cm).

Die Rekonstruktion des absoluten APA-Index für den Freistellungszeitpunkt des Schneebruchereignisses erfolgte über die Rückrechnung der Brusthöhendurchmesser der Nachbarbäume mit Gleichung 3. Der Einfluss zwischenzeitlich ausgeschiedener Bäume wurde zeitlich gewichtet berücksichtigt.

Der APA-Index in seiner üblichen Form wird in dieser Untersuchung als absoluter APA-Index (APAA) bezeichnet, weil er eine absolute Fläche in  $m^2$  angibt. Diese Fläche steht dem Zentralbaum zur Ressourcennutzung zur Verfügung und wird von dem Einflussbereich seiner Konkurrenten begrenzt. Außer durch seine relative Stellung zu seinen Konkurrenten (im Wesentlichen das BHD-Verhältnis) und der räumlichen Entfernung der Konkurrenten wird der APAA wesentlich durch die Dimension des Zentralbaumes selbst beeinflusst. Bei den teils extremen Freistellungen der Zentralbäume dieser Untersuchung befinden sich über lange Zeiträume keine bzw. kaum Konkurrenten im maximalen Einflussbereich der Zentralbäume (Kronenschirmfläche eines Solitärs mit demselben BHD). Ihr APAA, wie auch der APAA der Zentralbäume aus dichteren Bestandespartien steigt von Jahr zu Jahr an. Bei den extrem freigestellten Zentralbäumen wird deutlich, dass diese Entwicklung maßgeblich nur vom eigenen Durchmesserwachstum getrieben wird, während Konkurrenz und Bestandesdichte im Probestraßraum nachweislich ansteigen.

Es wurde daher auf Basis des APAA noch ein zweiter relativer APA-Index abgeleitet, der die Fläche des APAA in Beziehung zur Kronenschirmfläche eines Solitärs mit demselben BHD setzt. Hierdurch wird der Dimensionsaspekt eliminiert. Der APAR (Area Potentially Available Relative) verhält sich zur ansteigenden Bestandesdichte und anderen Konkurrenzmaßen wie FU und FQ gleichsinnig. Ein APAR von 100 bedeutet, dass die Fläche, die dem Zentralbaum zur Ressourcennutzung zur Verfügung steht, 100 % der Kronenschirmfläche eines Solitärs mit demselben BHD beträgt. Der Zentralbaum hat bei diesem Wert also praktisch keine Konkurrenz<sup>43</sup>.

### 3.6 Datenanalyse

Die Datenanalyse erfolgte in der vorliegenden Untersuchung nach einem direkten Ansatz. D. h. es wurden i. d. R. Zusammenhänge zwischen den jeweiligen Wachstumsvariablen selbst analysiert und keine aus der Entwicklung der Wachstumsvariablen hergeleiteten relativen Veränderungsdaten als Eingangsgrößen der Analysen verwendet (vgl. HAYWOOD 2003).

---

<sup>43</sup> Bei extrem freigestellten Zentralbäumen kann der APAR Werte von etwas über 100 annehmen. Dies erscheint auf den ersten Blick unlogisch, erklärt sich aber aus der Berechnung des APAA. Hierbei muss man sich die Kronenschirmfläche eines Solitärs mit demselben Durchmesser wie der Zentralbaum idealer Weise als Kreis in ein mehreckiges APAA-Polygon eingepasst vorstellen. Die Kreislinie der idealen Kronenschirmfläche tangiert dabei im Extremfall der Konkurrenzfreiheit die APAA-Polygonseiten, schneidet sie aber nicht. Daher ist Fläche des APAA-Polygons tendenziell etwas größer als die kreisförmige Kronenschirmfläche. Der Quotient aus beiden kann daher Werte von leicht über 100 einnehmen.

Hierzu wurde bei der Überprüfung aller drei Nullhypothesen generell zweistufig vorgegangen. Nach einer deskriptiven Analyse der grundsätzlichen Zusammenhänge und Einflussgrößen wurden statistisch-mathematische Verfahren der Korrelationsrechnung, Regressionsanalyse und Faktorenanalyse verwendet.

### 3.6.1 Referenzen

Aufgrund der Materialauswahl ist es bei diesem Vorgehen nicht erforderlich, Referenzen zu definieren. Andere Arbeiten verwenden Referenzen, um das Maß der Reaktion der abhängigen Variablen auf Veränderungen der unabhängigen Variablen zu definieren (EPP 2003, GERECKE 1988, HAYWOOD 2003) und hierbei u. a. Witterungs-, Standorts- und Behandlungseinflüsse zu eliminieren. Da diese Einflüsse bei dem Untersuchungsmaterial gleich sind (gleiche Betrachtungsperiode, gleicher Standort, gleiche waldbauliche Behandlung) können sie die Zusammenhänge zwischen der Entwicklung der interessierenden Variablen nicht beeinflussen. Lediglich der jeweilige Beobachtungszeitraum muss lang genug gewählt werden, um Witterungseinflüsse einzelner Extremjahre möglichst zu nivellieren.<sup>44</sup>

### 3.6.2 Beobachtungszeitraum

Ein kurzer Betrachtungszeitraum birgt die Gefahr, dass sich einzelne Jahre mit stark abweichenden Zuwachsmustern (z. B. Trockenjahre) überproportional stark auf die Ergebnisse auswirken (KAHLE 1994, MISSON 2000, SPATHELF 1999). Zudem muss davon ausgegangen werden, dass Wachstumsreaktionen erst mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung auf die bestimmenden Faktoren auftreten. SPIECKER (1991 b) beobachtete die Kulmination des Durchmesserzuwachses freigestellter Stieleichen (*Quercus robur*) und Traubeneichen (*Quercus petraea*) nach acht Jahren. Nach PRETZSCH (1992) reagiert die relative Kronenlänge bei Fichte träger auf Änderungen des Konkurrenzstatus als das Durchmesserwachstum.

Im Untersuchungsbestand sind die jeweiligen Freistellungen der Zentralbäume anhand der vorhandenen Stöcke gut zu datieren und eindeutig den „Eingriffen“ der Jahre 1981, 1996 und 2001 zuzuordnen. Auf rund der Hälfte der Gesamtfläche sind die Freistellungen ausschließlich durch den 81er Schneebruch und die Schadholzaufarbeitung in der

---

<sup>44</sup> Dabei wird vereinfachend unterstellt, dass sich die zeitliche Variation der Wachstumsbedingungen auf das Wachstum der Untersuchungsbäume in gleicher Weise auswirkt (vgl. SPIECKER 1986).

anschließenden Vegetationsperiode verursacht worden. Da nach dem letzten Eingriff im Herbst 2001 lediglich zwei Jahre Reaktionszeit auf die Freistellung verbleiben, kann zwar von einer Reaktion des Durchmesserzuwachses, nicht aber der relativen Kronenlänge ausgegangen werden (vgl. PRETZSCH 1992).

Der Beobachtungszeitraum wurde daher auf die Periode 1982 (erste Vegetationsperiode nach dem 81er Schneebruch) bis 2001 beschränkt. Damit konnte ein Zeitraum von insgesamt 20 Jahren untersucht werden. Er ist lang genug, um von ausreichenden Reaktionszeiträumen des Wachstums von Durchmesser und relativer Kronenlänge ausgehen zu können. Das gilt ebenfalls für die Reaktionszeit nach den rekonstruierbaren Eingriffen. Die bei einem längeren Betrachtungszeitraum auftretenden Nachteile des zunehmenden Einflusses längerfristig wirksamer Wachstumstrends (z. B. Alterstrend und langfristig wirksame Umwelteinflüsse) sind bei einem 20jährigen Zeitraum von vornherein gering und werden darüber hinaus durch die Homogenität des Untersuchungsmaterials ausgeglichen (vgl. SPIECKER et al. 1996).

Der Altersrahmen der Beobachtungsperiode (Alter 36 bis 55 Jahre) deckt die interessierende Phase der ersten Durchforstungshälfte ab. Die prägende Absenkung des Bestockungsgrades durch den Schneebruch fällt zudem genau in die Phase des „optimalen Pflegebereichs“ des Bestandes (TLWJF 2003). Es kann davon ausgegangen werden, dass sich die relative Kronenlänge des Bestandes selbst bei mäßiger Durchforstung im Schneebruchjahr 1981 und auch 1982 in der ersten Vegetationsperiode nach dem Schneebruch im Mittel noch bei rund 50 % bewegte (KRAMER 1962, TMLNU 2000 b).

### **3.6.3 Statistische Auswertungen**

Alle statistischen Auswertungen wurden mit dem Statistik-Programm SPSS, Version 11 durchgeführt (BÜHL & ZÖFEL 2002).

Bei der deskriptiven Statistik wird außer dem arithmetischen Mittel, Minimum, Maximum und Standardabweichung (SD) angegeben.

Soweit nichts anderes vermerkt ist, wurde bei Korrelationsrechnungen der Pearson-Korrelationskoeffizient verwendet ( $r$ ).

---

Einen Schwerpunkt der Auswertungsmethoden bilden einfache und multiple Regressionsanalysen. Alle Korrelationskoeffizienten, t-Werte, Regressionsparameter und f-Werte sind bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 0,05$  signifikant. Bei diesem Niveau nicht signifikante Ergebnisse sind ausdrücklich gekennzeichnet (n. s.). Als Gütekriterium der Regressionsanalysen dienen das Bestimmtheitsmaß  $r^2$  und der Standardfehler des Schätzers bzw. der Root-Mean-Square-Error (RMSE). Bei multiplen Regressionen wird das korrigierte Bestimmtheitsmaß verwendet. Teilweise wurde zur Erstellung der Schätzfunktionen der Kurvenkatalog von SIT & POULIN-COSTELLO (1994) herangezogen.

Als Voraussetzungen der Regressionsanalyse wurden die Residuen auf Linearität, Normalverteilung und Homoskedastizität geprüft. Nicht zu akzeptierende Multikollinearität wurde bei multiplen Regressionsanalysen mit paarweiser Korrelation ausgeschlossen (DRAPER & SMITH 1998, JUDGE et al. 1988). Als Kollinearitätsmaße wurde die Toleranz bzw. als ihr Kehrwert der Variance-Inflation-Factor berechnet (vgl. BROSIUS 1998). Die Prüfung der Residuen auf Autokorrelation erfolgte mit dem Durbin-Watson-Test und dem Durbin-Watson-Koeffizienten als Autokorrelationsmaß (BROSIUS 1998, DURBIN 1970).

Sofern erforderlich wurde bei multiplen Regressionsmodellen eine Faktorenanalyse vorge-schaltet. Mit der Unterstützung durch a-priori-Informationen wurden hierdurch die aussagekräftigsten und am besten geeigneten Variablen selektiert. Die Anzahl der zu extrahierenden Faktoren wurden nach dem Eigenwert-Kriterium vorgenommen: Es wurden so viele Faktoren extrahiert, bis der Eigenwert unter 1 fiel (GUTTMANN 1954). Die Faktorladungsmatrix gibt die Korrelationsstruktur der Einflussvariablen wieder und verdeutlicht, welchen Erklärungsanteil die jeweiligen Faktoren an der beobachteten Streuung haben.

### 3.7 Untersuchte Variablen

Tab. 6 gibt eine Übersicht aller Variablen, die in der Datenanalyse verwendet worden sind.

**Tabelle 6:** Übersicht aller analysierten Variablen

Variable	Bedeutung	Einheit
BHD	Brusthöhendurchmesser m.R.	cm
id	mittlerer jährlicher Durchmesserzuwachs	mm
h	Baumhöhe	m
h/d	h/d-Wert	-
a	absolutes Baumalter	Jahre
KL	absolute Kronenlänge	m
KA	Kronenansatzhöhe	m
LKA	Lichtkronenansatzhöhe	m
RKL	relative Kronenlänge	%
FQ	Anzahl freier Kronenquadranten	0, 1, 2, 3, 4
FU	Anteil des freien Kronenumfangs	%
KSF	Kronenschirmfläche	m <sup>2</sup>
KB	Kronenbreite	m
KMF	Kronenmantelfläche	m <sup>2</sup>
KV	Kronenvolumen	m <sup>3</sup>
APAA	Area Potentially Available Absolut	m <sup>2</sup>
APAR	Area Potentially Available Relative	%
G	Grundfläche eines Probekreises	m <sup>2</sup>
B°	Bestockungsgrad	-
GA	Astquerschnittsflächen aller Äste pro Meter Baumlänge	cm <sup>2</sup> *m <sup>-1</sup>
GAG	Astquerschnittsflächen aller Grünäste pro Meter Baumlänge	cm <sup>2</sup> *m <sup>-1</sup>
GAT	Astquerschnittsflächen aller Totäste pro Meter Baumlänge	cm <sup>2</sup> *m <sup>-1</sup>
NA	Anzahl aller Äste pro Meter Baumlänge	n*m <sup>-1</sup>
NAG	Anzahl aller Grünäste pro Meter Baumlänge	n*m <sup>-1</sup>
NAT	Anzahl aller Totäste pro Meter Baumlänge	n*m <sup>-1</sup>

## **4 Ergebnisse**

Die folgenden Kapitel stellen die Ergebnisse der Datenanalyse dar. Ihr Aufbau orientiert sich an den Nullhypothesen (vgl. Kap. 3.2 Nullhypothesen). Es werden zunächst die grundsätzlichen Beziehungen und die Korrelationsstruktur zwischen den Wachstumsparametern der Zentralbäume zum Aufnahmezeitpunkt dargestellt. Anschließend wird die Herleitung der periodischen Zuwachswerte des rekonstruierten Beobachtungszeitraums erläutert. Auf diesen Grundlagen werden die Input-Variablen der multiplen Regressionsmodelle selektiert, mit denen anschließend entsprechend der Nullhypothesen die Beziehungen zwischen relativer Kronenlänge, Durchmesserzuwachs, h/d-Wert-Entwicklung und Konkurrenz sowie jeweils weiterer erklärender Parameter untersucht werden.

#### **4.1 Grundsätzliche Beziehungen der Wachstumsparameter zum Aufnahmezeitpunkt**

Die Beziehungen der statischen Ist-Werte der untersuchten Wachstumsparameter zum Aufnahmezeitpunkt verdeutlichen die grundsätzlichen Zusammenhänge zwischen dem Durchmesser (BHD) sowie den Faktoren, die das Durchmesserwachstum maßgeblich beeinflussen: Kronenparameter, Dimensionsparameter und Konkurrenzparameter (u. a. HAYWOOD 2003, SPATHELF 1999).

Der BHD dient in den erläuternden Darstellungen als Ordnungsmerkmal. Da die Zentralbäume aus einem gleichaltrigen Bestand stammen, können die Aussagen zu den Abhängigkeiten des (statischen) Wachstumswertes BHD zum Großteil auf den Zuwachswert durchschnittlicher jährlicher Durchmesserzuwachs ( $\dot{d}$ ) im Beobachtungszeitraum übertragen werden. Die ausführlichere Beschreibung der Zusammenhänge auf Basis der Korrelationskoeffizienten und ihrer Visualisierung ist gegenüber einer Faktorenanalyse anschaulicher und informativer. Hiervon profitiert später die Plausibilität der in Kap. 4.2 Reaktion des Durchmesserzuwachses, 4.3 Reaktion der relativen Kronenlänge und 4.4 Reaktion des  $h/d$ -Wertes folgenden Variabelenselektion für die multiplen Regressionsmodelle.

### 4.1.1 Kronenparameter

Alle Kronenkennwerte der Zentralbäume korrelieren eng mit dem BHD. Der straffste Zusammenhang besteht zwischen Kronenmantelfläche (KMF) und BHD ( $r = 0,948$ ). Tabelle 7 listet die Korrelationskoeffizienten auf.

**Tabelle 7:** Korrelation BHD mit Kronenmantelfläche (KMF), Kronenvolumen (KV), Kronenschirmfläche (KSF), Kronenbreite (KB) und relativer Kronenlänge (RKL)

	KMF	KV	KSF	KB	RKL
BHD	0,948	0,942	0,941	0,931	0,825

Die relative Kronenlänge (RKL) ist mit den anderen Kronenparametern ebenfalls eng korreliert (Tabelle 8). Der stärkste Zusammenhang besteht zwischen relativer Kronenlänge und Kronenmantelfläche ( $r = 0,904$ ).

**Tabelle 8:** Korrelation RKL mit Kronenmantelfläche (KMF), Kronenvolumen (KV), Kronenschirmfläche (KSF) und Kronenbreite (KB)

	KMF	KV	KSF	KB
RKL	0,904	0,774	0,847	0,886

Auch die aus den Astmessungen abgeleiteten Kennwerte<sup>45</sup> korrelieren deutlich mit der relativen Kronenlänge wie auch den anderen Kronenparametern und dem BHD (Abbildung 7 und Tabelle 9). Am engsten korreliert dabei die Summe aller Astquerschnittsflächen pro m Baumlänge (GAM) mit dem BHD ( $r = 0,883$ ). Dieser Zusammenhang ist stärker als die

<sup>45</sup> Die aus den Astmessungen abgeleiteten Kennwerte (GAM, GAGM, GATM, NAM, NAGM, NATM) charakterisieren ebenfalls die Krone bzw. deren Leistungsfähigkeit. Sie werden daher in der vorliegenden Untersuchung zu den Kronenparametern gezählt.

Korrelation desselben Kennwertes, der getrennt für Grünäste (GAGM) und Totäste (GATM) hergeleitet wird. Hiermit wird deutlich, dass auch die inzwischen abgestorbenen Äste (bzw. Kronenteile) zur Erklärung des Durchmesserwachstums beitragen.

Die Korrelation zwischen der Summe der Astquerschnittsflächen aller Totäste pro m Baumlänge (GATM) und dem BHD ist bei den untersuchten Zentralbäumen nicht signifikant. Dies kann damit erklärt werden, dass die Summe der Astquerschnittsflächen aller Totäste pro m Baumlänge (GATM) mit im Mittel  $8,2 \text{ cm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$  ( $\text{GATM}_{\text{Min}} 2,0 \text{ cm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $\text{GATM}_{\text{Max}} 20,0 \text{ cm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $\text{GATM}_{\text{SD}} 4,3 \text{ cm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ ) äußerst gering ausfällt. Die Summe der Astquerschnittsflächen aller Grünäste pro m Baumlänge (GAGM) beträgt im Mittel mit  $48,2 \text{ cm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$  das Sechsfache des vorigen Wertes ( $\text{GAGM}_{\text{Min}} 4,8 \text{ cm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $\text{GAGM}_{\text{Max}} 164,0 \text{ cm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $\text{GAGM}_{\text{SD}} 32,6 \text{ cm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ ). Dies ist insbesondere durch die vergleichsweise großen Kronenlängen und das geringe Alter der Zentralbäume bedingt. Hätten die Zentralbäume kürzere relative Kronenlängen sowie entsprechend größere Totastzonen (wie dies bei Fichten aus konventionell erwachsenen Beständen in späten Entwicklungsstadien typisch ist), könnte von einer engeren Korrelation zwischen BHD und GATM ausgegangen werden. Dies belegt die Auswertung eines Teilkollektivs der Zentralbäume mit einer RKL < 40 %. Der Korrelationskoeffizient zwischen BHD und GATM steigt dann von ursprünglich  $r = 0,044$  auf  $r = 0,305$ , ist aber immer noch nicht signifikant.

Mit  $r = 0,874$  ist der BHD etwas enger mit der Summe der Astquerschnittsflächen aller Grünäste pro m Baumlänge (GAGM) korreliert als BHD und RKL ( $r = 0,825$ ). Dies bestätigt die methodischen Vorüberlegungen (Kap. 3.1 Vorüberlegungen), bei denen vermutet wurde, dass sich aufgrund von Abweichungen in der Kronenform und Astdichte in der Krone auch bei gleicher relativer Kronenlänge Abweichungen in der Zuwachsleistung ergeben. Die Anzahl aller Äste pro m Baumlänge (NAM) ist mit im Mittel  $10,7 \cdot \text{m}^{-1}$  ( $\text{NAM}_{\text{Min}} 8,3 \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $\text{NAM}_{\text{Max}} 15,9 \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $\text{NAM}_{\text{SD}} 1,4 \cdot \text{m}^{-1}$ ) nahezu konstant. Das ist zunächst Ausdruck des gleichen Standorts bzw. der Bonität. Weiterhin lässt sich daraus folgern, dass die untersuchten Zentralbäume Standortangebote nicht durch mehr Äste, sondern durch größere Äste (breitere Kronen) bei mehr oder weniger gleichen Astdichten in vermehrtes Durchmesserwachstum umsetzen.

Mit dem BHD ist NAM sogar schwach negativ korreliert ( $r = -0,302$ ). D. h. der BHD ist umso größer, je größer die durch das jährliche Höhenwachstum bedingten Abstände zwischen den

Quirlen sind und je niedriger damit die Anzahl der Äste pro m Baumlänge ausfällt<sup>46</sup>. Oder anders ausgedrückt: Die meisten Äste pro m Baumlänge haben die weniger wüchsigen Bäume mit schwächerem BHD und kürzeren Höhentrieben. Daher sind die physiologischen Leistungsunterschiede (gleiche RKL und Entwicklungsstadium aber unterschiedlicher BHD) nicht durch höhere Astanzahlen in der Krone, sondern durch unterschiedliche Kronenformen bedingt. Die Unterschiede sind allerdings gering.

**Tabelle 9:** Korrelation RKL und BHD mit aus Astmessungen abgeleiteten Kronenparametern

	GAM	GAGM	GATM	NAM	NAGM	NATM
BHD	0,883	0,874	0,044*	-0,302	0,477	-0,623
RKL	0,738	0,774	-0,290*	-0,450	0,510	-0,766

\*n.s.

Die relative Kronenlänge der Zentralbäume ist mit allen anderen Kronenparametern eng korreliert. Im Gegensatz zu diesen teils komplexen Kennwerten wie z. B. der Kronenmantelfläche kann die relative Kronenlänge ohne Hilfsmittel im Gelände leicht angesprochen werden. Das macht sie für die Einbeziehung in praxisnahe Modelle besonders geeignet.

<sup>46</sup> Große Quirlabstände entstehen durch große Höhentriebe und kennzeichnen die wüchsigen Bäume.

### 4.1.2 Dimensionsparameter

Abbildung 7 stellt die Beziehungen zwischen BHD sowie Baumhöhe, h/d-Wert, Kronenansatz, Lichtkronenansatz und relativer Kronenlänge zum Aufnahmezeitpunkt dar. Es wird deutlich, dass die Dimension der Zentralbäume eng mit dem h/d-Wert und der relativen Kronenlänge (RKL) korreliert ist. Die Bäume mit den größten Durchmessern haben auch die größten Baumhöhen ( $r = 0,939$ ) und gehören demnach zur sozialen Spitzengruppe des Bestandes. Gleichzeitig weisen sie auch die größten relativen Kronenlängen ( $r = 0,825$ ) sowie die niedrigsten h/d-Werte ( $r = -0,949$ ) auf.

**Tabelle 10:** Korrelation zwischen BHD, Baumhöhe (h), h/d, Kronenansatzhöhe (KA), Lichtkronenansatzhöhe (LKA) und relativer Kronenlänge (RKL)

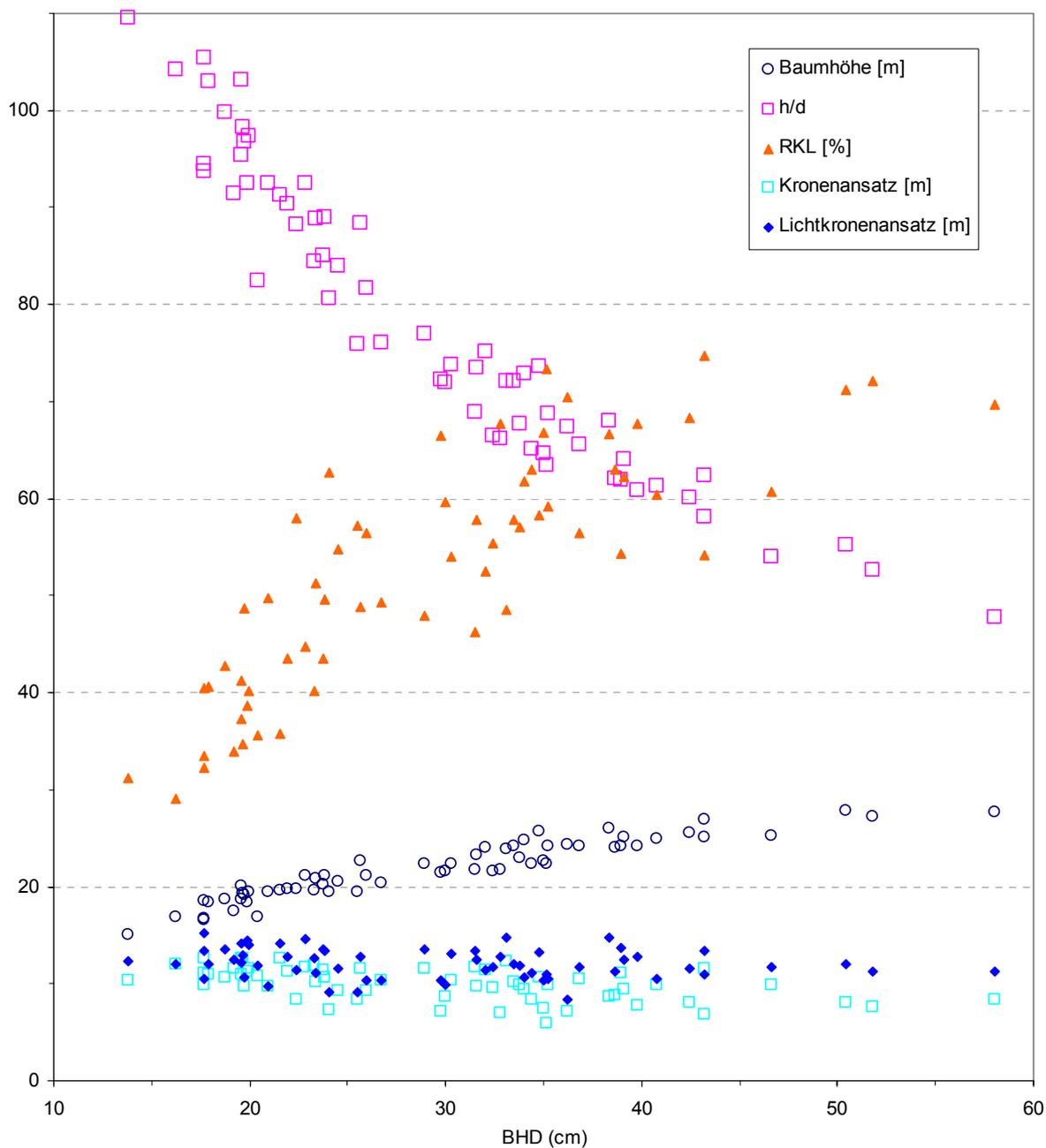
	BHD	h	h/d	KA	LKA	RKL
BHD	.	0,939	0,949	-0,518	-0,194*	0,825
h	0,939	.	-0,862	-0,411	-0,110*	0,808
h/d	0,949	-0,862	.	0,586	0,277	0,850
KA	-0,518	-0,411	0,586	.	0,637	-0,853
LKA	-0,194*	-0,110*	0,277	0,637	.	-0,479
RKL	0,825	0,808	0,850	-0,853	-0,479	.

\*n.s.

Tabelle 10 verdeutlicht die Korrelationsstruktur der Parameter anhand des Pearson-Korrelationskoeffizienten ( $r$ )<sup>47</sup>. Die relative Kronenlänge ist mit allen Parametern eng korreliert. Lediglich der Zusammenhang mit dem Lichtkronenansatz fällt schwächer aber

<sup>47</sup> Bei BHD, h und h/d handelt es sich um keine unabhängigen Variablen. Dies ist bei der Interpretation der korrelativen Zusammenhänge zu beachten. Die Aufnahme der Parameter in die Korrelationsmatrix dient der Vollständigkeit sowie dem schnellen Überblick und hat einen deskriptiven Charakter. In ähnlicher Weise trifft dies auch auf Tabelle 11 bei der Korrelation von BHD und APAA sowie APAR zu.

immer noch signifikant aus. Die Kronenansatzhöhe ist eng mit der relativen Kronenlänge korreliert aber nur schwach mit BHD und Baumhöhe. Dies deutet darauf hin, dass die relative Kronenlänge zwar maßgeblich mit der Dimension eines Baumes zusammenhängt, aber noch von anderen Parametern wesentlich beeinflusst wird.



**Abbildung 7:** Baumhöhe, Kronenansatz, Lichtkronenansatz, relative Kronenlänge und h/d-Wert der Zentralbäume zum Aufnahmezeitpunkt über dem BHD ( $n = 63$ )

Die Dimension der Zentralbäume korreliert eng mit dem h/d-Wert und der relativen Kronenlänge. Die Bäume mit den größten Durchmessern haben auch die größten Baumhöhen ( $r = 0,939$ ) und größten relativen Kronenlängen ( $r = 0,825$ ) sowie die niedrigsten h/d-Werte ( $r = -0,949$ ).

Das gilt noch deutlicher für die Höhe des Lichtkronenansatzes, die außer der Kronendimension selbst maßgeblich den Anteil der Lichtnadeln an der Kronenbiomasse und damit die physiologische Leistungsfähigkeit der Krone beeinflusst. Die Korrelation dieses Parameters mit der relativen Kronenlänge ist nicht so eng wie die Beziehung von relativer Kronenlänge mit der Kronenansatzhöhe und den Dimensionsmaßen, sie ist aber immer noch signifikant. Zwischen Lichtkronenansatzhöhe sowie Baumhöhe und BHD besteht kein signifikanter Zusammenhang.

Bei den weiteren Faktoren, die außer der Baumdimension maßgeblich die relative Kronenlänge und vor allem deren physiologische Leistungsfähigkeit (Lichtkronenansatzhöhe) beeinflussen, handelt es sich um die Konkurrenzsituation des Einzelbaumes.

#### 4.1.3 Konkurrenzparameter

Abbildung 8 und Tabelle 11 veranschaulichen die grundlegenden Zusammenhänge zwischen den reinen Konkurrenz- und aus den Astmessungen abgeleiteten Parameter mit BHD, relativer Kronenlänge (RKL) und Höhe des Lichtkronenansatzes (LKA).

Wie erwartet zeigen nahezu alle Konkurrenzparameter einen deutlichen Zusammenhang mit dem BHD (Tabelle 11). Am stärksten ist der Zusammenhang mit dem APAA ausgebildet ( $r = 0,922$ ). BHD und Grundfläche bzw. Bestockungsgrad korrelieren deutlich schwächer.

Die Anzahl aller Äste pro m Baumlänge (NAM) ist nahezu konstant und wird sogar eher negativ vom Durchmesser beeinflusst ( $r = -0,302$ ). Die Summe der Astquerschnittsflächen aller Äste pro m Baumlänge (GAM) ist dagegen deutlich positiv mit dem BHD ( $r = 0,883$ ) sowie den reinen Konkurrenzmaßen Anteil des Freien Kronenumfanges (FU) ( $r = 0,768$ ) und Area Potentially Available Absolute (APAA) ( $r = 0,922$ )<sup>48</sup> korreliert.

Die engste Beziehung ( $r = 0,866$ ) zeigt die relative Kronenlänge mit dem Anteil des nicht bedrängten Kronenumfanges (FU) sowie der Area Potentially Available Absolute (APAA)

---

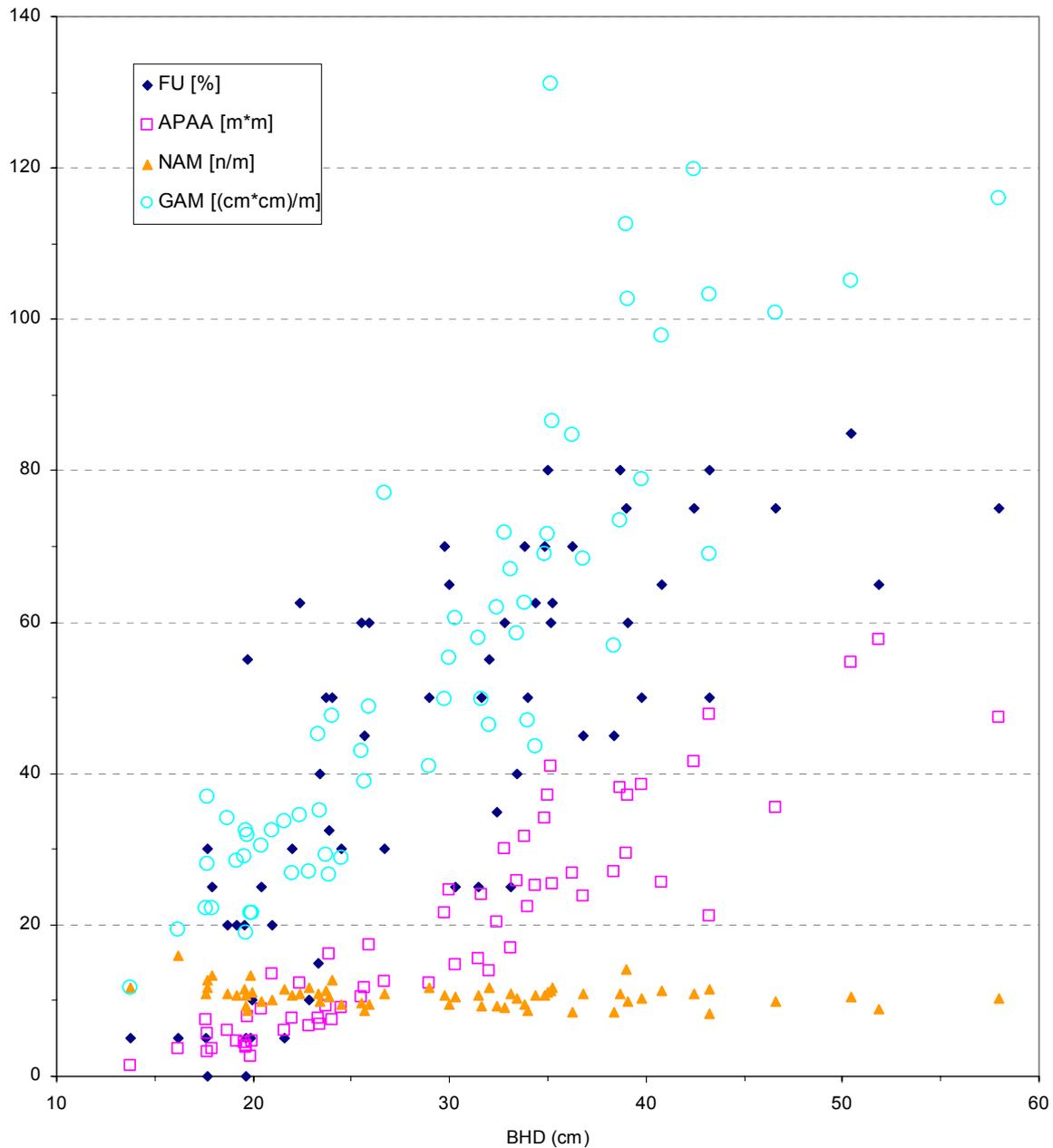
<sup>48</sup> Aufgrund dieser grundlegenden Zusammenhänge sind die aus den Astmessungen abgeleiteten Parameter wie z. B. die Summe der Astquerschnittsflächen aller Äste pro m Baumlänge (GAM) auch zur Charakterisierung der Konkurrenzsituation des Einzelbaumes geeignet. Sie werden daher hier zusammen mit den (reinen) Konkurrenzmaßen aufgeführt.

( $r = 0,860$ ) und Area Potentially Available Relative (APAR) ( $r = 0,860$ ). Der Korrelationskoeffizient von FU und APAR untereinander beträgt 0,810.

Zur Beschreibung des Lichtkronenansatzes sind FU und FQ am besten geeignet. Dieses praxisnahen Konkurrenzmaße zeigen von allen Konkurrenzparametern mit  $r = -0,506$  den engsten Zusammenhang mit der Lichtkronenansatzhöhe. Auf etwa demselben Niveau nur mit umgekehrten Vorzeichen bewegen sich die Zusammenhänge der Höhe des Lichtkronenansatzes (LKA) mit der Grundfläche (G) und dem Bestockungsgrad ( $B^\circ$ ) im Probekreis.

**Tabelle 11:** Korrelation von BHD, relativer Kronenlänge (RKL) und Höhe des Lichtkronenansatzes (LKA) mit Konkurrenzmaßen

	FU	FQ	APAA	APAR	G	$B^\circ$
BHD	0,768	0,766	0,922	0,829	-0,320	-0,320
RKL	0,884	0,875	0,855	0,768	-0,483	-0,485
LKA	-0,506	-0,506	-0,262	-0,334	0,501	0,504



**Abbildung 8:** FU, APAA, NAM und GAM der Zentralbäume zum Aufnahmezeitpunkt über dem BHD ( $n = 63$ )

Die Anzahl aller Äste pro m Baumlänge (NAM) ist nahezu konstant und wird sogar eher negativ vom Durchmesser beeinflusst ( $r = -0,302$ ). Die Summe der Astquerschnittsflächen aller Äste pro m Baumlänge (GAM) ist dagegen deutlich positiv mit dem BHD korreliert ( $r = 0,883$ ). Das gleiche gilt für den Anteil des Freien Kronenumfangs (FU) ( $r = 0,768$ ) und den Konkurrenzparameter Area Potentially Available Absolute (APAA) ( $r = 0,922$ ).

## 4.2 Reaktion des Durchmesserzuwachses

Die Reaktion des Durchmesserzuwachses der Zentralbäume wurde mit der Zielrichtung analysiert, einen größtmöglichen Anteil seiner Streuung durch einfach zu erhebende Variablen zu erklären. In die Untersuchungen wurden insbesondere zwei verschiedene Konkurrenzparameter, Area Potentially Available Absolute (APAA) und Area Potentially Available Relative (APAR), zusammen mit der relativen Kronenlänge (RKL) einbezogen. Basis waren die folgenden allgemeinen Modelle:

$$id = f(RKL, APAA)$$

(Gleichung 7)

$$id = f(RKL, APAR)$$

(Gleichung 8)

### 4.2.1 Anpassung der Schätzfunktionen des Durchmesserzuwachses

Für die allgemeinen Modelle wurden multiple lineare Regressionsgleichungen in einer schrittweisen Prozedur angepasst. Die analysierten Zuwachswerte repräsentieren jeweils Mittelwerte des gleichen Bezugszeitraums. D. h. der mittlere jährliche Durchmesserzuwachs einer 20jährigen Periode wird in Beziehung zur ebenfalls mittleren jährlichen relativen Kronenlänge desselben Bezugszeitraums betrachtet und nicht etwa in Beziehung zum Anfangs- oder Endwert dieses Zeitraums (vgl. SPATHELF 1999).

Es fällt auf, dass die jeweilige relative Kronenlänge am Ende des Bezugsraums mit dem mittleren  $id$  geringfügig enger korreliert als ihr analog zum  $id$  abgeleiteter Mittelwert im jeweiligen Bezugszeitraum (Tabelle 12).

**Tabelle 12:** Korrelation des mittleren Durchmesserzuwachses (id) eines 20jährigen Bezugszeitraums zur mittleren RKL (M) bzw. mittlerem APAR(M) und den entsprechenden Werten am Anfang (A) und Ende (E) des Bezugszeitraums

	RKL (A)	RKL (M)	RKL (E)	APAR (A)	APAR (M)	APAR (E)
id	0,497	0,809	0,888	0,759	0,825	0,851

Diese Beobachtung erscheint auf den ersten Blick widersprüchlich und auf eine fehlerhafte Rekonstruktion der relativen Kronenlänge hinzudeuten. Der Zusammenhang der periodischen Mittel- und Endwerte zeigte sich bei der Betrachtung von 20, 10 und 5jährigen Beobachtungsperioden in gleicher Weise und wies keinerlei Zusammenhang mit der Länge des Zeitraums der Kronenrekonstruktion auf. Ein methodischer Fehler in der Kronenrekonstruktion kann daher ausgeschlossen werden.

Weiterhin zeigte sich auch zwischen dem id und den Konkurrenzindices APAA und APAR<sup>49</sup> zwischen dem Endwert der Indices in der Beobachtungsperiode ein engerer Zusammenhang zum mittleren id als zu ihren jeweiligen Mittelwerten (Tabelle 12).

Auch bei der Auswertung von Unterkollektiven z. B. nach sinkender oder steigender RKL zeigte sich derselbe Zusammenhang: Immer hat die relative Kronenlänge am Ende der Beobachtungsperiode einen engeren Zusammenhang mit dem mittleren Durchmesserzuwachs als die mittlere relative Kronenlänge der Beobachtungsperiode.

Die Erklärung hierfür liegt darin, dass die RKL am Ende des Beobachtungszeitraumes auch den Charakter einer über den Beobachtungszeitraum integrierenden Variablen des Konkurrenzeinflusses hat. Hierin liegt ein weiterer Grund für die engere Korrelation des mittleren id mit der RKL am Ende des Beobachtungszeitraumes als mit der mittleren RKL während des Beobachtungszeitraumes.

<sup>49</sup> Herleitung von APAA und APAR stützen sich auf die Durchmesserentwicklung. Sie sind unabhängig von der Rekonstruktion der relativen Kronenlänge.

---

Hinzu kommen eine zeitverzögerte Wirkung der Konkurrenzmaße auf den Durchmesserzuwachs und der Einfluss der Baumdimension bzw. des Durchmessers selbst auf den  $id$  (PRETZSCH 2002).

Es ist nachvollziehbar, dass ein Baum Zeit benötigt, um auf ein größeres Standraumangebot mit einer größeren bzw. leistungsfähigeren Krone zu reagieren und deren Assimilation dann in eine positive Durchmesserzuwachsreaktion umzusetzen. Bei diesen Beziehungen kann es generell zu Zeitverzögerungen kommen, so dass oftmals die Kronenentwicklung dem Durchmesserwachstum vorausseilt (FREISE & SPIECKER 1999, SPATHELF 1999).

Der Dimensionseinfluss auf den Durchmesser bzw. Durchmesserzuwachs wird schon in den Übersichten in Kap. 4.1 Grundsätzliche Beziehungen der Wachstumsparameter zum Aufnahmezeitpunkt deutlich. Er zeigt sich auch generell darin, dass z. B. der von der Dimension stark abhängige APAA enger mit dem  $id$  korreliert als der dimensionsunabhängige APAR (Tabelle 12). Bei der Betrachtung des Zusammenhangs von  $id$  und relativer Kronenlänge muss also der Einfluss der Baumdimension bzw. des BHD mitbetrachtet werden. Nach dem bekannten Zusammenhang der Bestandeszuwachsgeraden in gleichaltrigen Beständen steigt der Durchmesserzuwachs mit dem BHD. Selbst die zuwachsschwächsten Bäume haben am Ende einer Beobachtungsperiode immer einen größeren Durchmesser als zu Beginn. Somit hat folgerichtig die relative Kronenlänge am Ende einer Beobachtungsperiode einen größeren Einfluss auf den mittleren Durchmesserzuwachs im Beobachtungszeitraum, weil sie immer mit einem größeren Durchmesser kombiniert ist als ihr Mittelwert für den Beobachtungszeitraum. Bei Vernachlässigung des BHD trägt der Zusammenhang zum Teil den Charakter einer Scheinkorrelation.

Aufgrund des gewählten Modellierungsansatzes erscheint es sinnvoller, den Konkurrenzeinfluss möglichst getrennt zu erfassen und den gleichen Bezugszeitraum für relative Kronenlänge und Konkurrenzparameter zugrunde zu legen. In Anbetracht der geringen Unterschiede in den Bestimmtheitsmaßen sowie der Plausibilität und praktischen Nachvollziehbarkeit wurde für die einbezogenen Variablen daher jeweils der gleiche Bezugszeitraum zur Ableitung der analysierten Mittelwerte gewählt.

Für die Regressionsanalysen wurden im Folgenden vier verschiedene zeitliche Auflösungen zur Herleitung der mittleren Zuwachswerte verwendet: 1, 5, 10 und 20 Jahre (vgl. Kap. 3.6.2 Beobachtungszeitraum).

**Tabelle 13:** Regressionsgleichungen zur Schätzung des mittleren jährlichen Durchmesserzuwachses ( $id$ ) von 1, 5, 10 und 20jährigen Perioden als eine Funktion der relativen Kronenlänge (RKL) und Area Potentially Available Absolute (APAA) bzw. Area Potentially Available Relative (APAR)

Gl.-Nr.	zeitliche Auflösung	N	Modell	$r^2$	F
APAA					
9	1	1260	$id = 0,135 (APAA) + 0,063 (RKL) - 0,400^*$	0,608	979
10	5	252	$id = 0,136 (APAA) + 0,062 (RKL) - 0,373^*$	0,682	270
11	10	126	$id = 0,125 (APAA) + 0,074 (RKL) - 0,832^*$	0,718	160
12	20	63	$id = 0,120 (APAA) + 0,080 (RKL) - 1,058^*$	0,750	94
APAR					
13	1	1260	$id = 4,141 (APAR) + 0,103 (RKL) - 2,735$	0,541	744
14	5	252	$id = 4,130 (APAR) + 0,104 (RKL) - 2,765$	0,605	193
15	10	126	$id = 4,424 (APAR) + 0,100 (RKL) - 2,758$	0,673	130
16	20	63	$id = 4,658 (APAR) + 0,100 (RKL) - 2,887$	0,732	86

\*n.s.

Mit den APAA-Gleichungen können höhere Anteile der Streuung der abhängigen Variablen Durchmesserzuwachs erklärt werden als mit den APAR-Gleichungen (Tabelle 13). Die Bestimmtheitsmaße steigen mit der Länge des gewählten Bezugszeitraums. Das höchste Bestimmtheitsmaß zeigt Gleichung 12 mit  $r^2 = 0,750$  und den unabhängigen Variablen APAA und RKL bei einem 20jährigen Bezugszeitraum. Bei dem gewählten Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$  ist die Konstante bei den APAA-Gleichungen bei allen zeitlichen Auflösungen nicht signifikant gegen Null abgesichert.

Der APAA ist von hoher modelltheoretischer Erklärungskraft aber von geringer praktischer Relevanz. Der dimensionsbereinigte APAR ist zwar anschaulicher als der rein abstrakte APAA aber ebenso wenig praktisch anwendbar.

Der APAR zum Aufnahmezeitpunkt korreliert eng mit dem Anteil des freien Kronenumfangs (FU) ( $r = 0,810$ ). Dieser Wert wurde bei den Zentralbäumen ebenfalls zum Aufnahmezeitpunkt erhoben (vgl. Kap. 3.4.2 Messungen am stehenden Baum). Der Zusammenhang ist logisch und biologisch nachvollziehbar.

**Tabelle 14:** Schätzung des Anteils des freien Kronenumfangs (FU) aus der Area Potentially Available Relative (APAR)

Gl.-Nr.	N	Modell	$r^2$	F
17	63	FU = 81,927 (APAR) + 2,042*	0,651	117

\*n.s.

Mit einer linearen Regression kann aus APAR der Anteil des freien Kronenumfangs geschätzt werden (Tabelle 14). In einem zweiten Schritt wird in den Regressionsgleichungen aus Tabelle 13 die unabhängige Variable APAR durch die unabhängige Variable FU rechnerisch ersetzt<sup>50</sup>. Bei gleichen Gütemaßen verändern sich die Koeffizienten der Gleichung. Die neue FU-Gleichung ist anschaulicher und direkt praktisch anwendbar (Tabelle 15).

<sup>50</sup> Bei Unterstellung einer altersunabhängigen Beziehung zwischen APAR und FU, die durch die nicht signifikanten Korrelationen der beiden Variablen zum Alter der Zentralbäume gestützt wird.

**Tabelle 15:** Regressionsgleichungen zur Schätzung des mittleren jährlichen Durchmesserzuwachses (id) von 1, 5, 10 und 20jährigen Perioden als eine Funktion der relativen Kronenlänge (RKL) und des Anteils des freien Kronenumfangs (FU)

Gl.-Nr.	zeitliche Auflösung	N	Modell	r <sup>2</sup>	F
			FU		
18	1	1260	id = 0,051 (FU) + 0,103 (RKL) – 2,839	0,541	744
19	5	252	id = 0,050 (FU) + 0,104 (RKL) – 2,868	0,605	193
20	10	126	id = 0,054 (FU) + 0,100 (RKL) – 2,868	0,673	130
21	20	63	id = 0,057 (FU) + 0,100 (RKL) – 3,003	0,732	86

\*n.s.

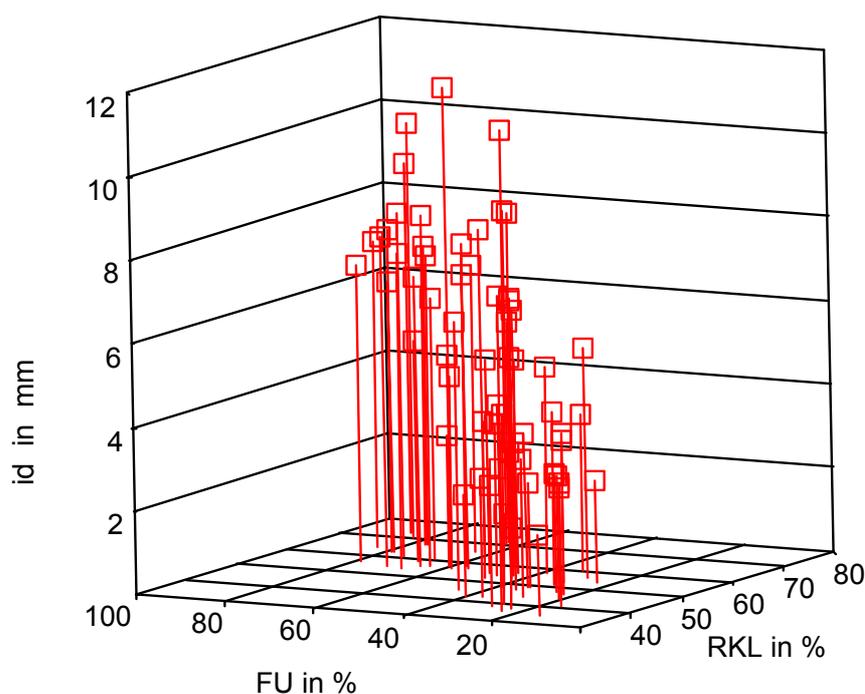
Die APAA und APAR-Regressionen zur Modellierung der Zuwachsreaktion des Brusthöhen-durchmessers (Gleichungen 11 und 15 aus Tabelle 13) wurden exemplarisch für die 10jährige zeitliche Auflösung mit einer Technik in Anhalt an MARTIN & EK (1984) validiert. Hierzu wurde ein Drittel der Beobachtungen (n = 40) als Datensatz zur Validierung zufällig ausgewählt. Mit den verbleibenden 86 Beobachtungen wurden die Modelle kalibriert und anschließend für den Validierungsdatensatz die Abweichung der beobachteten von den mit dem Modell geschätzten Beobachtungen beurteilt. Die Ergebnisse zeigten keine systematischen Abweichungen. Es kann davon ausgegangen werden, dass bezogen auf den Untersuchungsbestand die abgeleiteten Regressionsgleichungen die Durchmesserzuwachsreaktion über alle Dimensionsbereiche ohne systematische Unter- oder Überschätzungen abbilden.

Nach Gleichung 21 (Tabelle 15) hat eine Fichte unabhängig von Dimension und Alter bei 50 % relativer Kronenlänge einen mittleren id von 4,8 mm, wenn sie auf durchschnittlich der Hälfte ihres Kronenumfangs frei von Konkurrenten ist (vgl. Abbildung 9).

Wird der Freistellungsgrad konstant gehalten, steigt der id je 10 % relativer Kronenlänge um 1 mm. Bei 60 % relativer Kronenlänge erreicht der Baum dann einen id von 5,8 mm, bei 70 %

von 6,8 mm und bei 80 % von 7,8mm. Mit 40 % relativer Kronenlänge beträgt der id 3,8 mm und bei 30 % sinkt er auf 2,8 mm.

Wird die relative Kronenlänge konstant gehalten und der Freistellungsgrad variiert, reagiert der id je 10 % Freistellung mit 0,5 bis 0,6 mm. Ist der Baum bei einer relativen Kronenlänge von 50 % auf durchschnittlich einem Viertel seines Kronenumfangs frei von Konkurrenten oder vollständig bedrängt sinkt der id von ursprünglich 4,8 mm um 1,4 auf 3,4 mm bzw. 2,8 auf 2,0 mm. Ist der Baum dagegen auf Dreiviertel seines Kronenumfangs bzw. ganz frei von Konkurrenten, steigt der id um 1,5 auf 6,3 mm bzw. um 2,9 auf 7,7 mm an.



**Abbildung 9:** Beziehung zwischen jährlichem Durchmesserzuwachs (id), relativer Kronenlänge (RKL) und Anteil des freien Kronenumfangs (FU)

Dargestellt ist der Zusammenhang aufgrund der Mittelwerte des 20jährigen Beobachtungszeitraums. Nach der angepassten Regressionsfunktion (Gleichung 21) erklären relative Kronenlänge (RKL) und Anteil des freien Kronenumfangs (FU) 73,2 % der Streuung des jährlichen Durchmesserzuwachses.

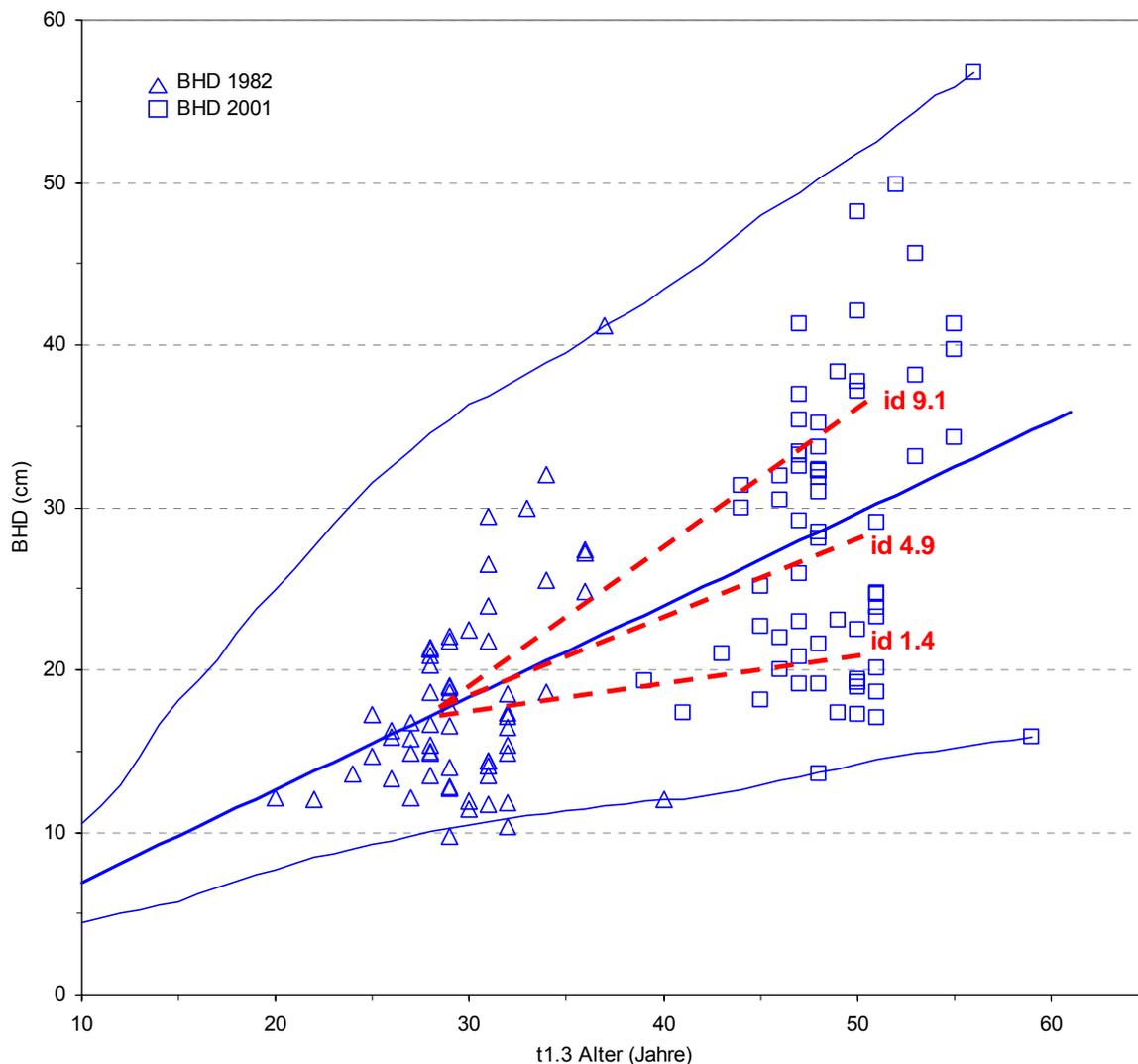
#### 4.2.2 Plausibilitätsprüfung der Durchmesserzuwachsfunctioenen

Die abgeleiteten Schätzfunktionen wurden in der praxisnäheren FU-Form (Gleichung 21) auf Plausibilität geprüft. Dies geschah mit Hilfe von Literaturangaben und einer Projektion des mittleren Durchmesserwachstums mit verschiedenen Szenarien von relativen Kronenlängen und Freistellungsgraden, die mit Gleichung 21 berechnet wurden.

Anhand des Datenmaterials wurde das durchschnittliche Durchmesserwachstum der Zentralbäume für den Beobachtungszeitraum als BHD-Altersbeziehung abgeleitet. Eine einfache lineare Ausgleichsfunktion zeigte die beste Anpassung.

Anschließend wurden für den Gültigkeitsbereich der abgeleiteten Modelle eine minimale und eine maximale Entwicklungsvariante aufgrund der beobachteten Kombinationen von Relativer Kronenlänge (ERKL) und dem durchschnittlichen Anteil des freien Kronenumfangs (FU) der Zentralbäume zum jeweils gleichen Startzeitpunkt am Beginn der Beobachtungsperiode auf die durchschnittliche BHD-Altersbeziehung angewandt (RKL 35 % und FU 15 % sowie RKL 72 % und FU 86 %). Die Minimal- bzw. Maximalvariante korrespondieren jeweils mit einem  $d$  von 1,4 mm bzw. 9,1 mm. Danach wurde die weitere Entwicklung bis zum Ende der Beobachtungsperiode projiziert. Diese Projektionen wurden mit den beobachteten Werten des Datenmaterials verglichen (Abbildung 10). Es zeigte sich eine gute Abdeckung und Übereinstimmung. Mit Übertragung der auf den Durchschnittswert eingezeichneten Steigung auf die einzelnen beobachteten Alters-Durchmesser-Wertepaare zum Zeitpunkt 1982, kann die gesamte Spreite der 20jährigen Entwicklung abgedeckt werden.

Die maximalen Durchmesserzuwächse bewegen sich ebenfalls im Rahmen von Zuwachswerten, die von anderen Untersuchungen vor allem für schwach konkurrenzierte Fichten mitgeteilt werden (u. a. KLÄDTKE 1993, LÄSSIG 1991, SEIFERT et al. 2003). Die minimalen Durchmesserzuwächse sind ebenfalls mit Literaturangaben geprüft und plausibel (u. a. EPP 2003, GERECKE 1991, SPATHELF 1999, WEISE 1995).

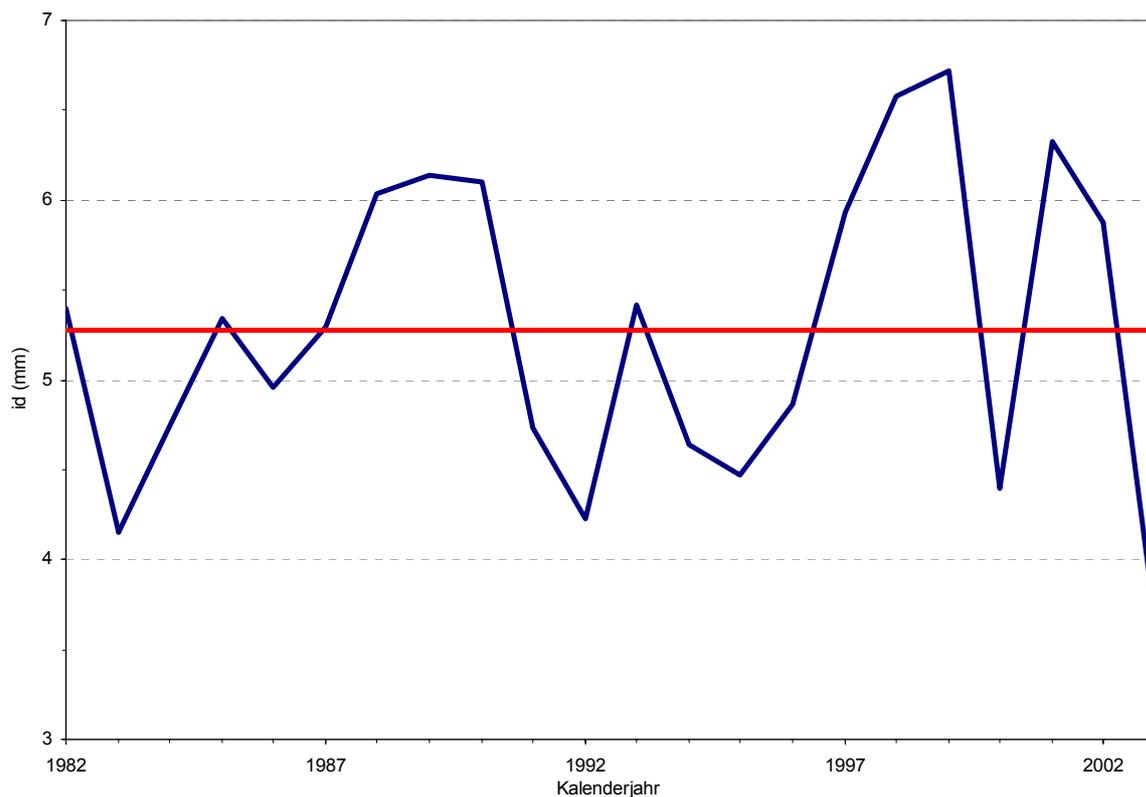


**Abbildung 10:** Vergleich des beobachteten und des projizierten Durchmesserwachstum über dem t1.3-Alter der Zentralbäume

Zum Beginn der Beobachtungsperiode im Kalenderjahr 1982 betrug das durchschnittliche t1.3-Alter der Zentralbäume 30 Jahre, am Ende der Beobachtungsperiode im Kalenderjahr 2001 lag es dementsprechend bei 50 Jahren. Eingezeichnet sind die Punktwolken der 1982 und 2001 beobachteten Wertepaare von BHD und t1.3-Alter. Die mittlere durchgezogene Linie ist die durchschnittliche Durchmesser-Altersbeziehung der Zentralbäume. Ein einfaches lineares Modell in der Form  $BHD = 1,2702 + 0,5673 \cdot \text{Alter}$  zeigte die beste Anpassung. Die ober- und unterhalb eingezeichneten dünnen durchgezogenen Linien stehen für die jeweils maximale und minimale beobachtete Durchmesserentwicklung. Der id von 1,4 mm korrespondiert mit RKL 35 % und FU 15 %, der id 9,1 mm mit RKL 72 % und FU 86 %. Diese Varianten wurden jeweils auf der mittleren Durchmesser-Altersbeziehung am Beginn der 20jährigen Beobachtungsperiode aufgesetzt und mit den unterbrochenen Linien bis zum Ende des Bezugszeitraums projiziert. Die mittlere unterbrochene Linie steht für einen id von 4,8 mm und entspricht je 50 % RKL und FU. Mit Übertragung des auf den Durchschnittswert eingezeichneten Steigungsrahmens auf die einzelnen beobachteten Alters-Durchmesser-Wertepaare zum Zeitpunkt 1982 kann die gesamte Spreite der 20jährigen Entwicklung abgedeckt werden. Bei zwei Beobachtungen die zum t1.3-Alter von 29 und 32 Jahren mit ihrem BHD noch unterhalb der Minimalvariante liegen, handelt es sich um Bäume, die zu diesem Zeitpunkt zwar schwache Durchmesser hatten aber durch den Schneebruch stark freigestellt wurden. So konnten sie ihr Durchmesserwachstum im Vergleich zu Bäumen gleich schwacher Ausgangsdimension stark steigern und überholten diese.

### 4.2.3 Kurzfristige Reaktionen des Durchmesserzuwachses als Störgrößen

Wie Tabelle 13 u. Tabelle 15 zeigen, beeinflusst die zeitliche Auflösung maßgeblich die Erklärungskraft der abgeleiteten Regressionsmodelle. Die höchsten Bestimmtheitsmaße ergeben sich generell bei der längsten zeitlichen Auflösung.

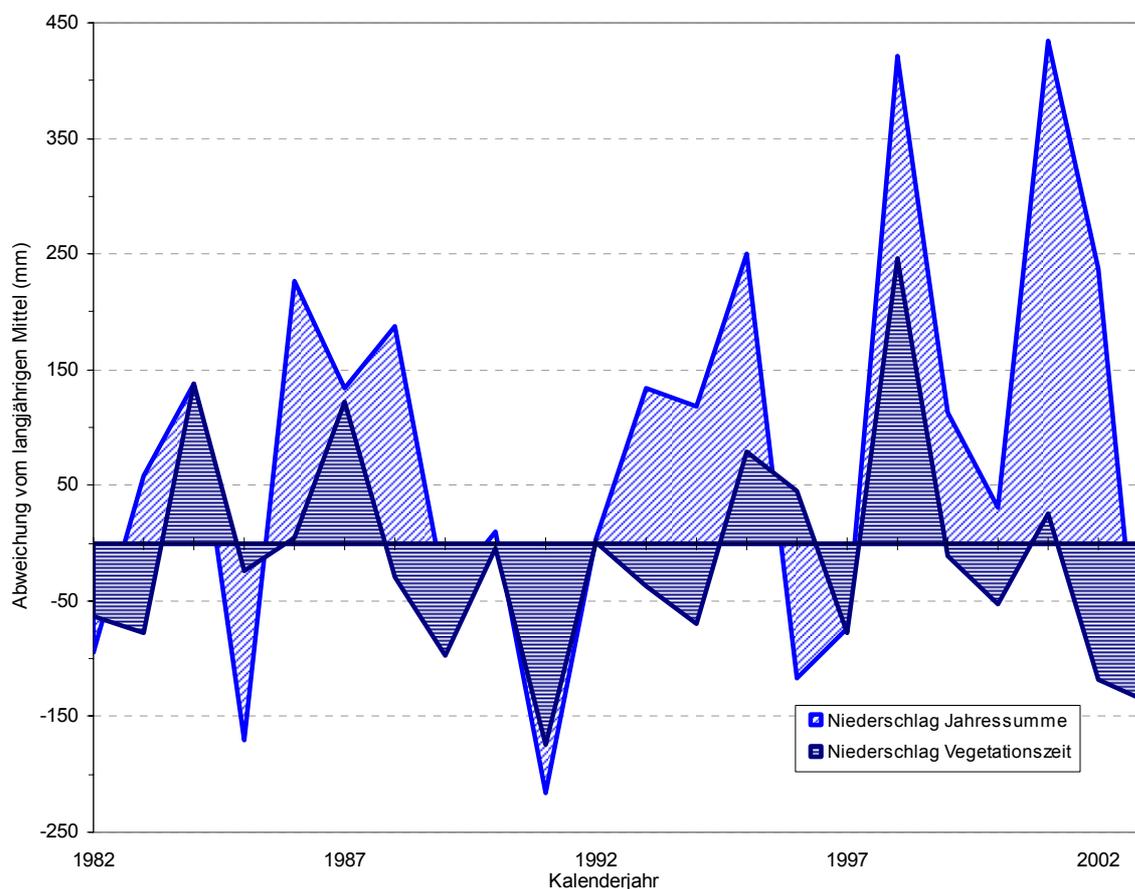


**Abbildung 11:** Chronologie des Durchmesserzuwachses aller Zentralbäume (n = 63)

Die Chronologie verstärkt kurzfristige Signale des Durchmesserzuwachses, die bei allen gleichzeitig und gleichsinnig auftreten. Es zeichnen deutliche Zuwachsendepressionen in den Perioden von 1982 bis 1987 sowie 1991 bis 1997 ab. Phasen höheren Durchmesserwachstums liegen zwischen 1988 bis 1990 sowie von 1998 bis 2002. In 2000 und 2003 zeichnen sich markante Rückgänge ab. Die Verläufe stimmen mit dem Muster der Abweichungen des Niederschlags vom langjährigen Mittel in Abbildung 12 überein.

Nach dem Durbin-Watson-Test sind für die 20jährige Auflösung Autokorrelationsprobleme auszuschließen. Für die 10 und 5jährigen Auflösungen ergeben sich akzeptable Koeffizienten (BROSIUS 1998, JUDGE et al. 1988). Die jährliche Auflösung ist mit erheblicher negativer Autokorrelation belastet (Durbin-Watson-Koeffizient 0,659 bis 0,680). Diese Autokorrelation wird zum einem durch den Zeitreihencharakter der Daten verursacht. Zum anderen kann eine hohe Autokorrelation auch indizieren, dass eine maßgebliche Einflussvariable nicht in das Modell aufgenommen wurde. Bei dieser Variablen muss es sich um ein kurzfristiges Signal

handeln, dass bei entsprechend langfristiger Mittelung der Zuwachswerte gedämpft wird. Alterseinflüsse können ausgeschlossen werden. Das Alter ergibt auch bei den kurzfristigen zeitlichen Auflösungen nur sehr schwache und überwiegend nicht signifikante Korrelationen.



**Abbildung 12:** Schwankungen des Niederschlags (Station Neufang, 626 m ü. NN)

Dargestellt sind die absoluten Abweichungen des Jahresniederschlags und des Niederschlags in der Vegetationszeit (Mai bis September) von ihren langjährigen Mitteln. Das langjährige Mittel (30 Jahre) des Jahresniederschlags beträgt 954 mm, für den Niederschlag während der Vegetationszeit liegt das langjährige Mittel bei 425 mm. Die Station Neufang ist die nächstgelegene Wetterstation zum Untersuchungsstandort. Die Tendenzen sind auf den Untersuchungsstandort übertragbar. Ein Vergleich mit Abb. 10 zeigt, dass Trockenphasen und Durchmesserzuwachsdepressionen kongruent verlaufen. Eine eher trockene Phase mit geringem Durchmesserwachstum bis 1986 wird von einer durchschnittlichen Niederschlagsphase mit höherem Durchmesserwachstum bis 1990 gefolgt. Daran schließt sich eine deutliche negative Abweichung der Niederschläge in der Vegetationszeit an (und eine Depression des Durchmesserzuwachses, Abbildung 11), die bis 1997 andauert. 1998 folgt ein Abschnitt mit hohen positiven Abweichungen des Niederschlags, in dem sich die „Trockenjahre“ 2000 und 2003 markant in Niederschlagsrückgängen und Depressionen des Durchmesserzuwachses abzeichnen.

Abbildung 11 zeigt die Jahrringchronologie aller untersuchten Zentralbäume. Bei dieser Chronologie werden mittel- bis langfristige baumindividuelle Zuwachsunterschiede

(Konkurrenzdynamik) gedämpft und kurzfristige Signale verstärkt, die bei allen Bäumen gleichzeitig und gleichsinnig auftreten (z. B. die Zuwachsreaktion auf die Witterung eines Jahres).

Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen, dass Trockenphasen und Durchmesserzuwachsdepressionen überwiegend kongruent verlaufen. Eine eher trockene Phase mit geringem Durchmesserwachstum bis 1986 wird von einer durchschnittlichen Niederschlagsphase mit höherem Durchmesserwachstum bis 1990 gefolgt. Daran schließt sich eine deutliche negative Abweichung der Niederschläge in der Vegetationszeit und eine Depression des Durchmesserzuwachses an, die bis 1997 andauert. 1998 folgt ein Abschnitt mit hohen positiven Abweichungen des Niederschlags, in dem sich die „Trockenjahre“ 2000 und 2003 markant in Niederschlagsrückgängen und Depressionen des Durchmesserzuwachses abzeichnen. Leichte Störungen dieses Grundmusters werden in einzelnen Jahren wie z. B. 1984 und 1995 durch Massenvermehrungen von Fichtenblattwespen und Fichtengespinntblattwespen verursacht (TLWJF 2004). Durch die Insektenkalamitäten wurde insbesondere der Assimilationsapparat freistehender Fichten mit dementsprechend größeren Kronen geschädigt.

Das Mittel des jährlichen Durchmesserzuwachses aller Zentralbäume unterliegt bedingt durch diese Einflüsse erheblichen Schwankungen. Die abiotischen und biotischen Stressfaktoren führen insbesondere in Trockenphasen zu einer größeren Streuung der Durchmesserzuwachsreaktion. Die Gleichungen der Regressionsmodelle für die verschiedenen zeitlichen Auflösungen gleichen sich trotzdem (Tabelle 13). Die jeweiligen Regressionskoeffizienten und Ordinatenabschnitte sind nahezu identisch.

Aufschlussreich ist der Vergleich der 5jährigen Zuwachsperioden anhand der jeweiligen Korrelationskoeffizienten zwischen Durchmesserzuwachs sowie APAA, APAR und RKL untereinander. Hier ergeben sich für die Perioden von 1982 bis 1987 und 1992 bis 1997 schwächere Zusammenhänge als in den beiden anderen zuwachsstärkeren Perioden. Die schwächeren Perioden fallen mit Zuwachsdepressionen und Trockenjahren zusammen (Abbildung 12). Mit Zuwachsdepressionen einhergehende Trockenjahre können sogar zu einer negativen Zuwachsreaktion auf Freistellung führen (SPIECKER 1986).

Witterungseinflüsse können damit als Ursache der geringeren Bestimmtheitsmaße der Regressionsmodelle mit kürzerer zeitlicher Auflösung identifiziert werden. Um diese kurzfristigen Einflussfaktoren als Störgrößen der Regressionsmodelle zu eliminieren, bieten sich lange Bezugszeiträume an. Am besten geeignet erscheint der Bezugszeitraum von 20 Jahren. Alterseffekte können für diesen Zeitraum vernachlässigt werden.

### 4.3 Reaktion der relativen Kronenlänge

Die Reaktion der relativen Kronenlänge wurde mit zwei unterschiedlichen Zielvariablen untersucht: direkt mit der relative Kronenlänge der Zentralbäume am Ende des Bezugszeitraums (ERKL) sowie indirekt über die dynamische Variable der durchschnittlichen jährlichen Veränderungsrate der relativen Kronenlänge ( $\Delta RKL$ ). Als Bezugszeitraum wurden Beobachtungsperioden mit 5, 10 und 20jähriger Auflösung gewählt.

Ziel der Analysen war, einen größtmöglichen Anteil der Streuung der relativen Kronenlänge am Ende des Bezugszeitraums (ERKL) mit plausiblen und einfach zu erhebenden Variablen zu erklären.

In die Untersuchungen wurden insbesondere zwei verschiedene Konkurrenzparameter, Area Potentially Available Absolute (APAA) und Area Potentially Available Relative (APAR)<sup>51</sup>, zusammen mit der relativen Kronenlänge am Anfang des Bezugszeitraums (ARKL) als unabhängige Variablen einbezogen. Basis waren die folgenden allgemeinen Modelle:

$$ERKL = f(ARKL, APAA)$$

(Gleichung 22)

$$ERKL = f(ARKL, APAR)$$

(Gleichung 23)

$$\Delta RKL = f(ARKL, APAA)$$

(Gleichung 24)

$$\Delta RKL = f(ARKL, APAR)$$

(Gleichung 25)

---

<sup>51</sup> Analog zum Vorgehen in Kap. 4.2.1 Anpassung der Schätzfunktionen jeweils als Mittelwert der jeweiligen Beobachtungsperiode.

### 4.3.1 Anpassung der Schätzfunktionen der relativen Kronenlänge am Ende des Bezugszeitraums (ERKL)

Für die allgemeinen Modelle wurden multiple lineare Regressionsgleichungen in einer schrittweisen Prozedur angepasst. Tabelle 16 listet die Ergebnisse der Schätzfunktionen für die relative Kronenlänge am Ende des Bezugszeitraums (ERKL) auf.

**Tabelle 16:** Regressionsgleichungen zur Schätzung der relativen Kronenlänge am Ende des Bezugszeitraums (ERKL) von 5, 10 und 20jährigen Perioden als eine Funktion der relativen Kronenlänge am Anfang (ARKL) und der Area Potentially Available Absolute (APAA) bzw. Area Potentially Available Relative (APAR)

Gl.-Nr.	zeitliche Auflösung	N	Modell	r <sup>2</sup>	F
APAA					
26	5	252	ERKL = 0,114 (APAA) + 0,962 (ARKL) – 0,782*	0,964	3371
27	10	126	ERKL = 5,282 (APAR) + 0,961 (RKL) – 1,864*	0,879	456
28	20	63	ERKL = 0,712 (APAA) + 0,388 (ARKL) – 18,888	0,715	79
APAR					
29	5	252	ERKL = 5,282 (APAR) + 0,961 (ARKL) – 1,864	0,965	3424
30	10	126	ERKL = 13,741 (APAR) + 0,828 (ARKL) – 0,376*	0,885	483
31	20	63	ERKL = 32,301 (APAR) + 0,445 (ARKL) – 8,778*	0,746	79

\*n.s.

Im Gegensatz zur Modellierung des id zeigen die Regressionsgleichungen jetzt bei Verwendung des APAR durchgängig leicht höhere Bestimmtheitsmaße. Das weist auf die bessere Eignung dieses von der Baumdimension bereinigten Index zur Charakterisierung der Kronenkonkurrenz hin.

Auch der Einfluss der zeitlichen Auflösung weicht deutlich von dem Muster der id-Gleichungen ab. Je kürzer der Betrachtungszeitraum, desto höher fallen jetzt die Bestimmtheitsmaße aus. Gleichung 29 zeigt mit den unabhängigen Variablen APAR und ARKL bei einer 5jährigen zeitlichen Auflösung mit  $r^2 = 0,965$  das höchste Bestimmtheitsmaß. Der Durbin-

Watson-Test ergibt bei allen Gleichungen unabhängig von der Länge des Betrachtungszeitraums keine Hinweise auf problematische Autokorrelation (BROSIUS 1998). Bei vier Schätzfunktionen ist die Konstante nicht signifikant von Null verschieden (Gleichungen 26, 27, 30 u. 31). Ansonsten zeigen die Korrelationskoeffizienten der verschiedenen Gleichungen gleiche Tendenzen, unterscheiden sich aber deutlich je nach Länge des Bezugszeitraums.

Um die Anschaulichkeit zu erhöhen, wird in Anlehnung an das Vorgehen in Kap. 4.3 über Gleichung 17 die Area Potentially Available Relative (APAR) in den Anteil des freien Kronenumfangs (FU) rechnerisch umgeformt. Bei gleichen Gütemaßen und Tendenzen ergeben sich nach dem obigen Muster die in Tabelle 17 aufgeführten Regressionskoeffizienten.

**Tabelle 17:** Regressionsgleichungen zur Schätzung der relativen Kronenlänge am Ende des Bezugszeitraums (ERKL) von 5, 10 und 20jährigen Perioden als eine Funktion der relativen Kronenlänge am Anfang (ARKL) und des Anteils des freien Kronenumfangs (FU)

Gl.-Nr.	zeitliche Auflösung	N	Modell	r <sup>2</sup>	F
			FU		
32	5	252	ERKL = 0,067 (FU) + 0,961 (ARKL) – 1,996	0,965	3424
33	10	126	ERKL = 0,168 (FU) + 0,828 (ARKL) – 0,719*	0,885	483
34	20	63	ERKL = 0,394 (FU) + 0,445 (ARKL) – 7,974*	0,746	79

\*n.s.

Bei dieser Umformung wird noch deutlicher, wie entscheidend je nach zeitlicher Auflösung der Unterschied zwischen den Koeffizienten ausfällt. D. h. dass bei den Gleichungen in Tabelle 16 und Tabelle 17 nicht nur die Enge des statistischen Zusammenhangs durch die zeitliche Auflösung beeinflusst wird, sondern auch die Art des Zusammenhangs selbst. Je nach zeitlicher Auflösung üben die unabhängigen Variablen nach den abgeleiteten Regressionsgleichungen also einen abweichenden Einfluss auf die unabhängige Variable ERKL aus. Die Regressionskoeffizienten zeigen, dass bei den kürzeren Betrachtungszeiträumen der Einfluss der relativen Kronenlänge am Anfang der Periode

(ARKL) steigt. Bei den längeren Betrachtungszeiträumen nimmt der Einfluss des Freistellungsgrades (FU) zu.

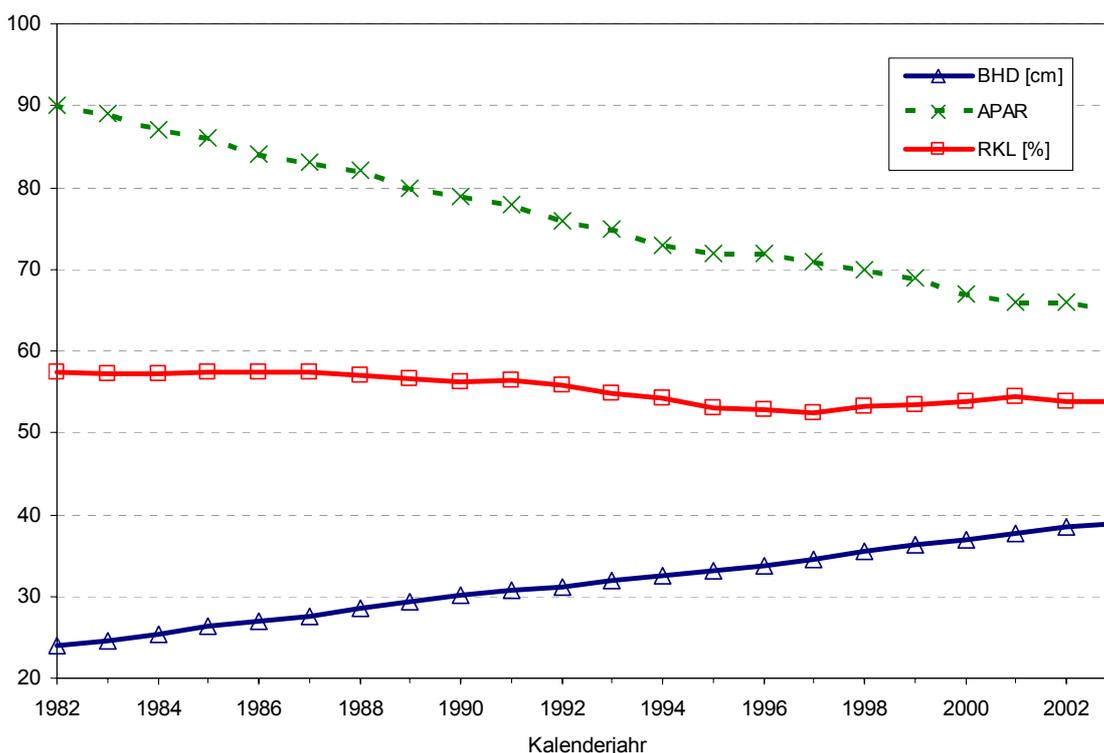
Dies schlägt sich in abweichenden Ergebnissen der Schätzfunktionen nieder. Im Vergleich zur 10jährigen Auflösung führt die 5jährige Auflösung zu leichten und die 20jährige Auflösung zu extremen Unterschätzungen der relativen Kronenlänge am Ende des jeweiligen Bezugszeitraums. So hätte ein Baum mit 50 % relativer Kronenlänge und einem durchschnittlichen freien Kronenumfang von 50 % nach 20 Jahren nach Gleichung (Nr. 33) 48,3 % relative Kronenlänge, nach Gleichung (Nr. 32) 47,9 % und nach Gleichung (Nr. 34) nur 34,0 %. Es fragt sich, welches Modell hier abseits von statischen Gütemaßen die biologisch sinnvollsten Werte liefern kann. Obwohl die statistischen Gütemaße auf den ersten Blick nicht für Gleichung 33 zu sprechen scheinen, erweist sich die 10jährige Auflösung nach eingehender Prüfung als am besten geeignet.

Die Verschiebung des Kronenansatzes ist im Wesentlichen eine Funktion der Konkurrenz (vgl. SPATHELF 1999). In der Realität vollzieht sich die Verlagerung des Kronenansatzes nicht kontinuierlich in jährlich gleichen Raten. Aufgrund der biologischen Zusammenhänge verläuft der Prozess diskontinuierlich in Sprüngen (PRETZSCH 2002). Immer wenn ein Quirl durch zunehmendes Aststerben den Status des Kronenansatzes verliert, springt der Kronenansatz eine Quirldistanz weiter nach oben. Der Absterbeprozess eines Astes kann mehrere Jahre umfassen. Weiterhin benötigen Bäume eine Reaktionszeit, um mit ihrer Krone auf Veränderungen im Standraumangebot reagieren zu können. 5 Jahre erscheinen hier zu kurz (vgl. EPP 2003, MEADOWS & GOELZ 2001, SPATHELF 1999, SPIECKER 1991 a, b).

Das drückt sich auch in Gleichung 32 aus. Die relative Kronenlänge am Ende (ERKL) wird hier nahezu ausschließlich durch ihren Ausgangswert am Beginn der 5jährigen Periode (ARKL) bestimmt. Der Regressionskoeffizient des Konkurrenzmaßes FU ist in Gleichung 32 um den Faktor 14 kleiner als der Koeffizient von ARKL. Bei 10jähriger zeitlicher Auflösung liegt der Faktor 5 zwischen den entsprechenden Koeffizienten (Gleichung 33).

Die 20jährige Auflösung ist unzweifelhaft lang genug für eine nachweisbare Reaktion der relativen Kronenlänge. Allerdings ist der Zeitraum für das Datenmaterial dieser Untersuchung zu lang, um zuverlässige Schätzfunktionen ableiten zu können. Dies wird vor allem durch die ersten Jahre nach dem Schneebruch mit extrem geringer Konkurrenz verursacht.

Wie Abbildung 13 am Beispiel des Zentralbaumes Nr. 71 zeigt, war die Konkurrenz in den Jahren nach dem Schneebruch so gering, dass der APAR zwar kontinuierlich sinkt (die Bestandesdichte nimmt wieder zu), das Niveau des APAR sich aber erst nach 8 - 10 Jahren in einem Rückgang der relativen Kronenlänge niederschlägt, nachdem sich der APAR auf einem Niveau von deutlich unter 80 % bewegt. Im Mittelwert der gesamten Periode werden diese „Nullkonkurrenzphasen“ nicht angemessen abgebildet. Es kommt zu einer systematischen Überschätzung der Konkurrenzwirkung auf die Entwicklung der relativen Kronenlänge.



**Abbildung 13:** „Nullkonkurrenzphasen“ am Beispiel des Zentralbaumes Nr. 71

Durch das Schneebruchereignis wurde der Baum stark freigestellt. In den folgenden 20 Jahren schließt sich der Bestand. Der Konkurrenzdruck auf den Zentralbaum steigt in der Folge. Das zeigt der APAR, der von 90 % im Jahr 1982 auf zuletzt 65 % sinkt. Die relative Kronenlänge (RKL) bleibt mit rund 58 % bis 1988 nahezu konstant, obwohl der APAR im selben Zeitraum um rund 10 Prozentpunkte sinkt. Erst ab 1993 zeigt auch die RKL einen deutlichen Rückgang. Der APAR hat zu diesem Zeitpunkt schon 15 Prozentpunkte zu seinem Ausgangswert verloren. Der mittlere APAR dieses Zeitraums beträgt 82 % und führte zu keinem Rückgang der RKL. Wird der gesamte 20jährige Zeitraum als Bezug gewählt kommt es durch die nicht angemessene Berücksichtigung dieser „Nullkonkurrenzphasen“ zu einer systematischen Überschätzung des Konkurrenzinflusses auf die Entwicklung der relativen Kronenlänge.

Dies wird noch anschaulicher, wenn zwei je 10jährige Unterkollektive gebildet und für sie getrennt Schätzfunktionen nach Gleichung 22 bzw. 23 angepasst werden. Beide Funktionen

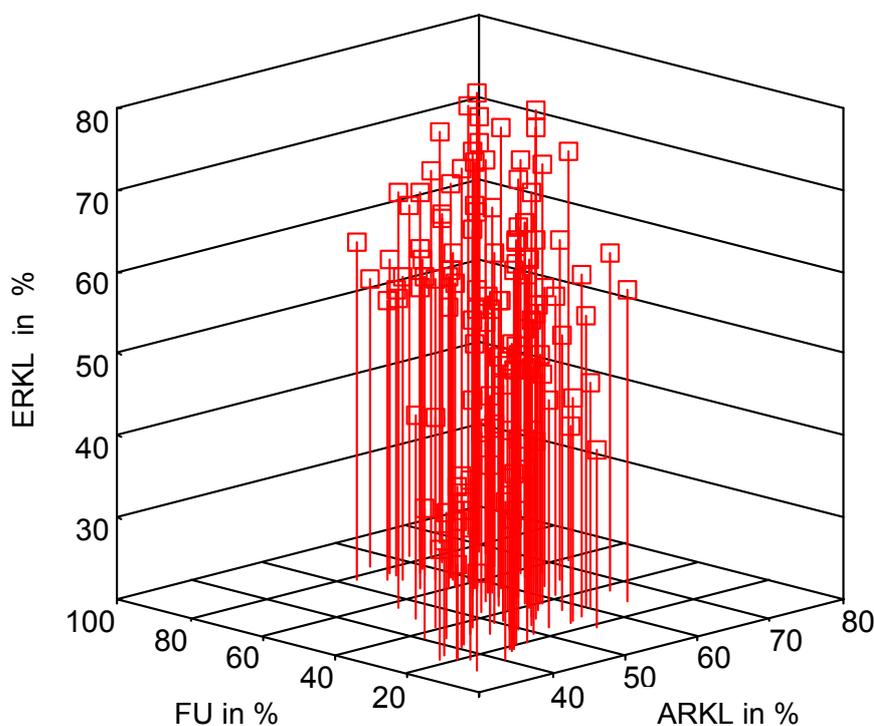
weisen ähnliche statische Gütemaße aus. Allerdings führt die Regressionsgleichung, die ausschließlich an die erste 10-Jahres-Periode (mit einem höheren Anteil von „Nullkonkurrenzphasen“) angepasst wurde, im Vergleich zur Regressionsgleichung der zweiten 10-Jahres-Periode (mit einem geringeren Anteil von „Nullkonkurrenzphasen“) zu einer gleich gerichteten starken Unterschätzung der relativen Kronenlänge am Ende der jeweiligen Periode wie bei Verwendung der Mittelwerte eines 20jährigen Bezugszeitraums. Die nicht adäquate Abbildung der „Nullkonkurrenzphasen“ erklärt die deutliche Unterschätzung der relativen Kronenlänge am Ende des Bezugszeitraums durch Gleichung 34.

Die FU-Regressionen zur Modellierung der Zuwachsreaktion des Durchmessers (Tabelle 17) wurden mit der in Kap. 4.2.1 Anpassung der Schätzfunktionen beschriebenen Technik in Anhalt an MARTIN & EK (1984) validiert (vgl. HAYWOOD 2003). Für die 20jährige Auflösung ergab sich eine systematische Abweichung der beobachteten von den berechneten Werten. Im Vergleich zu den beobachteten Werten unterschätzten die berechneten Werte die Kronenlängen am Ende des Untersuchungszeitraums bei kurzen Ausgangskronen und überschätzten sie bei langen Ausgangskronen. Bei den anderen Gleichungen (Nr. 32 und 33) ergab die Validierung befriedigende Ergebnisse. Es kann davon ausgegangen werden, dass die abgeleiteten Regressionsgleichungen die Reaktion der relativen Kronenlänge für das hier untersuchte Material über alle Dimensionsbereiche ohne systematische Unter- oder Überschätzungen angemessen abbilden.

Die Regressionsgleichungen, die sich auf eine 10jährige zeitliche Auflösung stützen, weisen insgesamt gute bis sehr gute statistische Gütemaße auf. Gleichzeitig kann von der 10jährigen zeitlichen Auflösung angenommen werden, dass sie fein genug ist, um konkurrenzärmere Phasen angemessen zu berücksichtigen und der Baumkrone trotzdem ausreichend Zeit zu gewähren, um auf veränderte Standraumbedingungen zu reagieren. Ein weiteres gewichtiges Argument für 10jährige Betrachtungsperioden ist der in der forstlichen Praxis übliche Planungshorizont für die Bestandesbehandlung von ebenfalls 10 Jahren. Daher konzentrieren sich die folgenden Ausführungen ausschließlich auf diese Gleichungstypen (Gleichungen 27 und 30 aus Tabelle 16).

Nach Gleichung Nr. 33 erreicht ein Baum mit ursprünglich 35 % relativer Kronenlänge nach 10 Jahren 37 % RKL, wenn er durchschnittlich auf der Hälfte seines Kronenumfangs von Konkurrenten frei war (vgl. Abbildung 14). Sind durchschnittlich Dreiviertel seines Kronen-

umfangs frei erreicht er in 10 Jahren 41 % RKL. Wenn er durchschnittlich auf dem ganzen Kronenumfang frei von Konkurrenten ist, erreicht er 45 % RKL – ist er es nur auf einem Viertel, sinkt seine RKL von ursprünglich 35 auf 33 %.



**Abbildung 14:** Beziehung zwischen Relativer Kronenlänge am Ende (ERKL) sowie Relativer Kronenlänge am Anfang (ARKL) einer 10jährigen Beobachtungsperiode und Anteil des freien Kronenumfangs (FU)

Mit der angepassten Regressionsfunktion (Gleichung Nr. 33) können 88,5 % der Streuung der relativen Kronenlänge am Ende einer 10jährigen Beobachtungsperiode (ERKL) mit der relativen Kronenlänge am Anfang der Periode (ARKL) und dem Anteil des freien Kronenumfangs (FU) erklärt werden.

Bei einem Baum mit 50 % relativer Kronenlänge bleibt die RKL in 10 Jahren nahezu konstant, wenn er durchschnittlich auf der Hälfte seines Kronenumfangs frei von Konkurrenten ist. Ist er nur auf einem Viertel frei, sinkt die RKL in 10 Jahren von 50 auf 45 %. Ist er auf Dreiviertel frei, steigt sie auf 53 %. Wenn durchschnittlich der gesamte Kronenumfang frei von Konkurrenten ist, erreicht er nach 10 Jahren 58 % relative Kronenlänge.

### 4.3.2 Anpassung der Schätzfunktionen der durchschnittlichen jährlichen Veränderung der relativen Kronenlänge im Bezugszeitraum ( $\Delta$ RKL)

Wie zuvor bei der Zielvariablen ERKL wurden für die allgemeinen Modelle zur Schätzung der durchschnittlichen jährlichen Veränderung der relativen Kronenlänge im Bezugszeitraum ( $\Delta$ RKL) multiple lineare Regressionsgleichungen in einer schrittweisen Prozedur angepasst. Tabelle 18 stellt die Ergebnisse direkt in der anschaulicheren Form mit Ersetzung der unabhängigen Variable APAR durch FU dar.

**Tabelle 18:** Regressionsgleichungen zur Schätzung der durchschnittlichen jährlichen Veränderungsrate der relativen Kronenlänge ( $\Delta$ RKL) im Bezugszeitraum durch die relative Kronenlänge am Anfang (ARKL) und den mittleren Anteil des freien Kronenumfangs (FU)

Gl.-Nr.	zeitliche Auflösung	N	Modell	$r^2$	F
			FU		
35	5	252	$\Delta$ RKL = 0,013 (FU) – 0,008 (ARKL)* – 0,399*	0,514	34
36	10	126	$\Delta$ RKL = 0,017 (FU) – 0,017 (ARKL) – 0,075*	0,316	25
37	20	63	$\Delta$ RKL = 0,020 (FU) – 0,028 (ARKL) – 0,398	0,228	38

\*n.s.

Aufgrund der abweichenden Form der unabhängigen Variablen fallen die Bestimmtheitsmaße deutlich niedriger aus. Sie steigen jetzt wieder mit der Länge des Bezugszeitraums, da sich mit der Länge des Bezugszeitraums tendenziell die größeren Reaktionen ergeben. Die Konstanten sind bei 20 und 10jähriger Auflösung nicht signifikant von Null verschieden. Bei 5jähriger Auflösung ist zwar die Konstante, nicht aber die unabhängige Variable relative Kronenlänge am Anfang des Bezugszeitraums (ARKL) signifikant. Hinsichtlich der Eignung der Modelle und Bezugszeiträume gelten sinngemäß dieselben Aussagen wie zu den vorigen Gleichungstypen. Die Ergebnisse der direkten und indirekten Schätzfunktionen entsprechen sich bei jeweils gleicher zeitlicher Auflösung.

Die Gleichungen in Tabelle 17 weisen deutlich bessere statistische Gütemaße auf, so dass die Gleichungen aus Tabelle 18 im Wesentlichen nur zur Veranschaulichung aufgeführt sind. Besonders deutlich wird bei dieser Darstellungsform, dass die relative Kronenlänge am Anfang (ARKL) immer einen negativen Einfluss auf  $\Delta$ RKL hat. Die Vorzeichen der entsprechenden Regressionskoeffizienten sind durchgängig negativ. Also müssen Bäume mit größeren relativen Kronenlängen stärker freigestellt werden müssen, um ihre RKL zu halten, als dies bei Bäumen mit kürzeren Kronen der Fall ist. Dieses Ergebnis zeichnete sich bereits bei der direkten Analyse der Reaktion der relativen Kronenlänge in Kap. 4.3.1 Anpassung der Schätzfunktionen der relativen Kronenlänge am Ende des Bezugszeitraums (ERKL) ab.

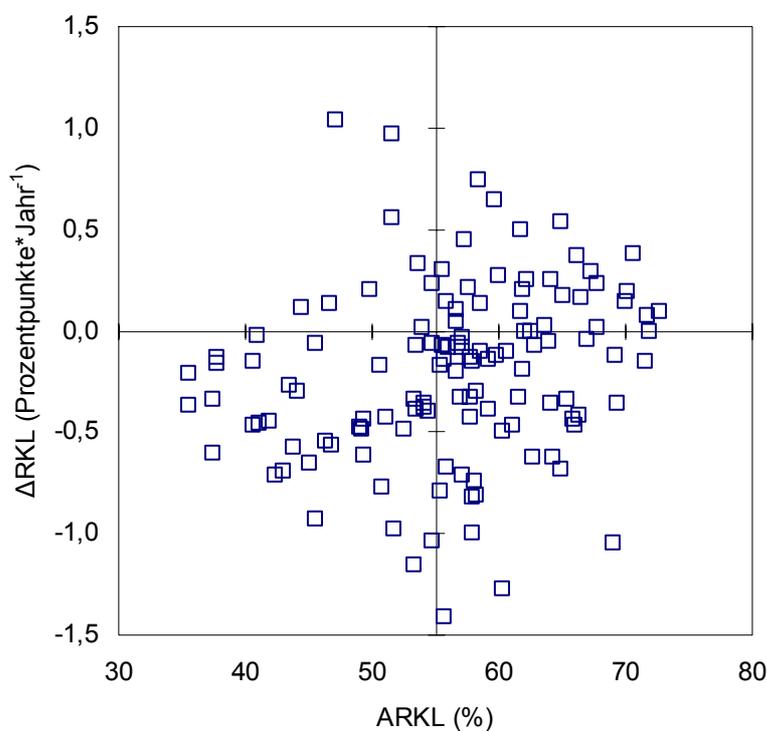
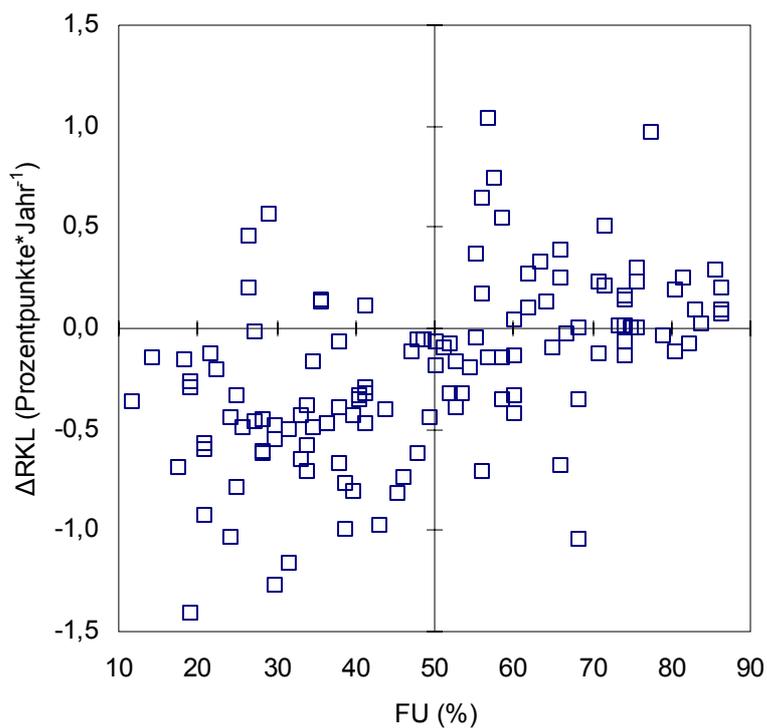
Anhand des Korrelationskoeffizienten kann am Beispiel der 10jährigen Auflösung gezeigt werden, dass der Freistellungsgrad den maßgeblichen Einfluss auf die Entwicklung der relativen Kronenlänge ausübt. Die durchschnittliche jährliche Veränderung der relativen Kronenlänge ( $\Delta$ RKL) ist straffer mit dem Anteil des freien Kronenumfangs (FU) ( $r$  0,518) als mit der relativen Kronenlänge am Anfang des Bezugszeitraums (ARKL) ( $r$  0,206) korreliert (Abbildung 15).

Vor dem Hintergrund der biologischen Zusammenhänge ist es nachvollziehbar, dass Bäume mit größeren relativen Kronenlängen stärker freigestellt werden müssen, um ihre relative Kronenlänge aufrecht zu erhalten als Bäume mit kürzeren Kronen<sup>52</sup>. Der selbe Zusammenhang wird bei der Wirkungsweise von dreidimensionalen Konkurrenzmodellen unterstellt, wie sie z. B. von SPATHELF (1999) aufbauend auf dem Konzept der beschatteten Biomasse (KELLOMÄKI et al. 1980) verwendet werden (vgl. SLOBODA & PFREUNDT 1989).

Die von SPATHELF (1999) entwickelte Orientierungshilfe zur Wachstumssteuerung von Fichten und Tannen mithilfe der relativen Kronenlänge spiegelt diese Beziehung ebenfalls wieder (vgl. PRETZSCH 1992).

---

<sup>52</sup> Methodisch verstärkt wird dieser Zusammenhang durch den (bei allen Kronendimensionen) festen Definitionsrahmen des Anteils des freien Kronenumfangs (FU) in dieser Arbeit.



**Abbildung 15:** Beziehung zwischen  $\Delta RKL$  und FU sowie  $\Delta RKL$  und ARKL

Der Freistellungsgrad der Zentralbäume bestimmt maßgeblich die Entwicklung der relativen Kronlänge. Die durchschnittliche jährliche Veränderung der relativen Kronlänge ( $\Delta RKL$ ) und der Anteil des freien Kronenumfangs (FU) korrelieren mit  $r = 0,518$ .  $\Delta RKL$  und die relative Kronlänge am Anfang des Bezugszeitraums (ARKL) korrelieren ebenfalls signifikant aber mit  $r = 0,206$  deutlich schwächer.

### 4.3.3 Plausibilitätsprüfung der relativen Kronenlängenfunktionen

Die Plausibilität der selektierten Schätzfunktionen mit 10jähriger Auflösung wurde über die maximal mögliche Steigerung der relativen Kronenlänge in Vergleich mit dem Höhenwachstum der Zentralbäume geprüft. Weiterhin wurden einfache Schätzfunktionen für den Freistellungsgrad abgeleitet, der für die Aufrechterhaltung einer bestimmten relativen Kronenlänge erforderlich ist. Die Ergebnisse wurden kreuzweise auf Basis der verwendeten Gleichungen 33 und 36 geprüft.

Die durchschnittliche Höhe der Zentralbäume lag in der Mitte des Beobachtungszeitraums 1992 bei 17,58 m ( $h_{\text{Min}}$  13,60 m,  $h_{\text{Max}}$  23,15 m), das mittlere jährliche Höhenwachstum der Zentralbäume betrug im Beobachtungszeitraum  $0,35 \text{ m} \cdot \text{Jahr}^{-1}$ . Daraus ergibt sich bei 50 % RKL für denselben Zeitpunkt 8,79 m als mittlerer Kronenansatz. Geht man davon aus, dass dieser Kronensatz bei vollständiger Freistellung gehalten werden kann, kann der Baum in 10 Jahren bei durchschnittlichem Höhenwachstum eine Höhe von 21,02 m und eine relative Kronenlänge von 58 % erreichen. Bei 35 % relativer Kronenlänge ergibt sich auf der Basis des durchschnittlichen Höhenwachstums bei vollständiger Freistellung nach 10 Jahren eine relative Kronenlänge von 46 %<sup>53</sup>.

Vereinfachend ausgedrückt liegt das Maximum der möglichen Veränderung der RKL in 10 Jahren bei 50 % Ausgangskronenlänge bei 8 Prozentpunkten, unter 50 bis 35 % Ausgangskronenlänge bei rund 10 Prozentpunkten und über 50 bis 65 % Ausgangskronenlänge bei rund 5.

Nach einem ähnlichen Ansatz können die Gleichungen 33 und 36 zu Schätzfunktionen für einen erforderlichen Freistellungsgrad zur Erhaltung einer bestimmten Ausgangskronenlänge umgeformt werden.

Abbildung 15 zeigt, dass ab einem Anteil des freien Kronenumfangs von 60 bis 70 % positive  $\Delta\text{RKL}$ -Werte überwiegen. Mit Gleichung 33 kann für verschiedene Ausgangskronenlängen geschätzt werden, wie stark sie freigestellt werden müssen, damit die relative Kronenlänge für die nächsten 10 Jahre gehalten wird.

---

<sup>53</sup> Wird 1982 als Startpunkt der Vergleichsrechnung gewählt, ergeben sich aufgrund des geringen absoluten Ausgangsniveaus bei gleicher absoluter Konkurrenz um bis zu 2 Prozentpunkte höhere relative Kronenlängen nach 10 Jahren. Bei Beachtung der Toleranzgrenzen unterstreichen die Werte trotzdem die Plausibilität der für das Untersuchungsmaterial abgeleiteten Schätzfunktionen.

Wenn die Ausgangskronenlänge gehalten wird ist  $ARKL = ERKL$ . Die Gleichung wird nach  $FU$  in die folgende Form aufgelöst:

$$FU = \frac{0,719 + ERKL - (0,828 \cdot ARKL)}{0,168}$$

(Gleichung 38)

Um zu berechnen wie stark ein Baum mit beliebiger relativer Kronenlänge freigestellt werden muss, damit er diesen Wert für die nächsten 10 Jahre hält (isometrisches Wachstum der relativen Kronenlänge), müssen in Gleichung 38 für  $ARKL$  und  $ERKL$  die gleichen Werte (der zu haltenden Ausgangskronenlänge) eingesetzt werden.

Über Gleichung 36 kann eine zusätzliche Plausibilitätsrechnung des direkten Gleichungstyps über den indirekten Gleichungstyp mit der dynamischen Zielvariable der durchschnittlichen jährlichen Veränderung der relativen Kronenlänge ( $\Delta RKL$ ) geführt werden. Dazu wird  $\Delta RKL = 0$  gesetzt und der Term wieder nach  $FU$  aufgelöst:

$$FU = \frac{0,075 + (0,017 \cdot ARKL)}{0,017}$$

(Gleichung 39)

Die Ergebnisse der beiden Funktionen sind in Tabelle 19 für verschiedene relative Kronenlängen aufgelistet.

**Tabelle 19:** Freistellungsgrade als Anteil des freien Kronenumfangs (FU) zur Aufrechterhaltung eines isometrischen Wachstums der relativen Kronenlänge über eine 10jährige Periode nach Gleichung 38 und 39

ARKL = ERKL	FU	FU
	nach Gleichung Nr. 38 auf Basis ERKL	nach Gleichung Nr. 39 auf Basis $\Delta$ ARKL
	(%)	
30	35,0	34,4
35	40,1	39,4
40	45,2	44,4
50	55,5	54,4
60	65,7	69,4
70	75,9	70,4
75	81,1	75,4
80	86,2	84,4

Die aus der Regression für die relative Kronenlänge am Ende des Bezugszeitraums (Gleichung 38) abgeleitete Schätzfunktion führt zu einem leicht überproportionalen Anstieg des Freistellungsanspruches mit zunehmender relativer Kronenlänge. Gleichung 39 zeigt diese Tendenz nicht. Bei ihrer Ausgangsfunktion sind die Regressionskoeffizienten von FU und ARKL gleich. Bei dem 20jährigen Bezugszeitraum ist bei diesen Funktionstypen die ARKL sogar als unabhängige Variable nicht signifikant. Die direkten ERKL-Schätzfunktionen zeichnen sich durch bessere statistische Gütemaße aus (vor allem höhere  $r^2$ ).

Die Ergebnisse der direkten und indirekten Gleichungstypen bestätigen sich insgesamt. Sie können zu einer kurzen Faustformel verdichtet werden. Der durchschnittliche Anteil des freien Kronenumfangs einer Fichte beliebiger RKL, der erforderlich ist, um die RKL für 10 Jahre konstant zu halten (isometrisches Wachstum der relativen Kronenlänge) ergibt sich dann vereinfachend als:

$$FU = RKL + 5$$

(Gleichung 40)

Eine Fichte mit 50 % relativer Kronenlänge muss nach der Schätzformel z. B. durchschnittlich auf 55 % ihres Kronenumfangs frei von Konkurrenten sein, um ihre RKL für die nächsten 10 Jahre zu halten.

#### 4.4 Reaktion des h/d-Wertes

Im Gegensatz zu den Zielvariablen Durchmesserzuwachs (id) und relative Kronenlänge (ERKL bzw.  $\Delta$ RKL) korreliert der h/d-Wert zwar schwach aber signifikant mit dem Alter ( $r = -0,276$ ).

Vor der Formulierung des allgemeinen Modells zur Untersuchung der Reaktion des h/d-Wertes wurde eine Faktorenanalyse durchgeführt (vgl. Kap. 3.6.3 Statistische Auswertungen). Ziel dieses Schrittes war, die Variablen auf maßgebende Faktoren zu reduzieren, die die beobachteten Zusammenhänge bestmöglich erklären und gleichzeitig die Rolle des Alters einzuordnen.

Zur Extraktion der Faktoren wurde eine Hauptachsenanalyse durchgeführt. Die Faktoren wurden bis zum Eigenwert 1 selektiert (Tabelle 20). Auf diese Weise konnten zwei Faktoren selektiert werden, deren kumulierte Varianzaufklärung 82,1 % beträgt. Auf Faktor 1 laden die Dimensions- und Freistellungsvariablen am höchsten. Bei Faktor 2 sind es die Entwicklungs- bzw. Altersvariablen, die die höchsten Ladungen zeigen. Die beiden Faktoren lassen sich als Durchmesserwachstum (Faktor 1, Varianzaufklärung 70,1 %) und Alter bzw. Entwicklungszustand (Faktor 2, Varianzaufklärung 12,1 %) deuten.

**Tabelle 20:** Faktorladungsmatrix der Hauptachsenanalyse

Variable	Faktor 1	Faktor 2
Alter	0,310	0,794
B°	-0,451	0,523
KL	0,965	0,053
RKL	0,917	-0,133
APAR	0,887	-0,130
APAA	0,968	0,086
BHD	0,924	0,245
id	0,899	-0,260

In die Analyse der h/d-Wert-Reaktion wurden insbesondere auf Basis der bisherigen Ergebnisse die relative Kronenlänge (RKL) als Weiser des Durchmesserwachstums und das t1.3-Alter der Zentralbäume einbezogen.

Die Datierung der entnommenen Stockkeile weist für die Untersuchungsbäume ein durchschnittliches Alter von 61 Jahren bei einer Spreitung von 30 Jahren auf (Stockalter<sub>Min</sub> 48 Jahre, Stockalter<sub>Max</sub> 78 Jahre, Stockalter<sub>SD</sub> 5,3 Jahre). Das t1.3-Alter bietet insbesondere den Vorteil, dass es exakter erfasst werden kann als das Stockalter und weniger Verzerrungen durch Störfaktoren unterliegt (ABETZ 1988). Bei diesen Störfaktoren kommen insbesondere Verbiss, Konkurrenzvegetation und starker Schirmdruck während der Etablierung von Naturverjüngungen infrage. Der längste Zeitraum, den einer der Zentralbäume dieser Untersuchung von der Stockhöhe bis 1,3 m benötigte, beträgt immerhin 25 Jahre, der kürzeste 6 Jahre. Im Vergleich zu den Stockdatierungen streuen die t1.3-Alter zudem enger um ihren Mittelwert von 49 Jahren (t1.3-Alter<sub>Min</sub> 39 Jahre, t1.3-Alter<sub>Max</sub> 59 Jahre, t1.3-Alter<sub>SD</sub> 3,5 Jahre). Aber auch hier liegt die absolute Altersspanne des „gleichaltrigen“ Bestandes (vgl. Kap. 3.3.2 Untersuchungsbestand) immer noch bei 20 Jahren<sup>54</sup>.

In Anlehnung an das Vorgehen von ABETZ (1988) und EICHKORN (1992) kann mit einem durchschnittlichen Zuschlag von 12 Jahren bei Eliminierung der Extreme von dem t1.3-Alter der Zentralbäume auf das Stockalter geschlossen werden<sup>55</sup>.

Basis der Untersuchungen war das folgende allgemeine Modell:

$$hd = f(RKL, \text{Alter})$$

(Gleichung 41)

<sup>54</sup> Diese Altersspanne ist für „gleichaltrige Bestände“ nicht ungewöhnlich. Vermutlich sind in den gepflanzten Bestand Vorausverjüngungen integriert worden. Nach der Pflanzung werden sich noch weitere Fichten zwischen den Reihen angesamt haben.

<sup>55</sup> ABETZ (1988) empfiehlt generell, mit dem t1.3-Alter zu arbeiten. Das Stockalter leitet er mit bonitätsspezifischen Zuschlägen auf das t1.3-Alter her (vgl. LÄSSIG 1991). In Anlehnung an LÄSSIG (1991) wurde das Stockalter auf eine einheitliche Stockhöhe von 0,05 m mit einem Alterszuschlag von 1 Jahr je 0,05 m Stockhöhe berechnet. Dieses Alter entspricht ungefähr dem Sämlingsalter der Zentralbäume. Als Bestandesalter wird üblicherweise in der Thüringer Forsteinrichtung das Jahr der Begründung einer Kultur bzw. der Abdeckung einer Naturverjüngung betrachtet. Um das Bestandesalter zu erhalten, müssen auf das t1.3-Alter der Zentralbäume durchschnittlich 6 Jahre aufgeschlagen werden.

#### 4.4.1 Anpassung der Schätzfunktionen der h/d-Wertentwicklung

Für das allgemeine Modell (Gleichung 41) wurden multiple lineare Regressionsgleichungen in einer schrittweisen Prozedur angepasst. Die analysierten Zuwachswerte repräsentieren jeweils Mittelwerte des gleichen Bezugszeitraums (vgl. Kap. 4.2.1 Anpassung der Schätzfunktionen des Durchmesserzuwachses). Tabelle 21 listet die Ergebnisse der Schätzfunktionen auf.

**Tabelle 21:** Regressionsgleichungen zur Schätzung des h/d-Wertes (hd) von 1, 5, 10 und 20jährigen Perioden als eine Funktion der relativen Kronenlänge (RKL) und des Alters<sup>56</sup>

Gl.-Nr.	zeitliche Auflösung	N	Modell	r <sup>2</sup>	F
42	1	1260	hd = 153,350 – 1,010 (RKL) – 0,473 (Alter)	0,628	1065
43	5	252	hd = 153,764 – 1,016 (RKL) – 0,474 (Alter)	0,633	217
44	10	126	hd = 154,972 – 1,026 (RKL) – 0,486 (Alter)	0,638	111
45	20	63	hd = 157,420 – 1,056 (RKL) – 0,505 (Alter)*	0,646	58

\*n.s.

Die Bestimmtheitsmaße steigen mit der Länge des Bezugszeitraums. Das höchste Bestimmtheitsmaß wird bei 20jähriger zeitlicher Auflösung mit Gleichung 45 erzielt ( $r^2 = 0,646$ ).

Der Durbin-Watson-Test ergab für die Schätzfunktionen mit 1, 5 und 10jähriger zeitlicher Auflösung kritische negative Autokorrelationen (BROSIUS 1998). Ihre Gütemaße sind daher nur beschränkt aussagefähig. Für den 20jährigen Bezugszeitraum ergibt der Durbin-Watson-Koeffizient mit 2,030 einen befriedigenden Wert, mit dem Autokorrelationsprobleme auszuschließen sind. Gleichung 45 liefert daher für den untersuchten Zusammenhang die einzig akzeptable Anpassung.

Die unabhängige Variable Alter ist in Gleichung 45 zum zweiseitigen Testniveau mit der Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 0,05$  nicht signifikant. Allerdings liegt ihre Signifikanzschwelle

<sup>56</sup> t1.3-Alter

mit  $\hat{\alpha} = 0,076$  nur gering höher und liefert für das Modell insgesamt einen wesentlichen Beitrag zur Erklärung der beobachteten Streuung.

Die Validierung des Regressionsmodells mit der 20jährigen Auflösung erfolgte im Anhalt an MARTIN & EK (1984) mit befriedigenden Ergebnissen (vgl. Kap. 4.2.1 Anpassung der Schätzfunktionen des Durchmesserzuwachses und HAYWOOD 2003).

Bei konstantem Alter von durchschnittlich 40 Jahren ergibt nach Gleichung 45 eine relative Kronenlänge von 50 % einen h/d-Wert von 84,4, bei 40 % RKL steigt der h/d-Wert auf 95 und sinkt bei 60 % RKL auf 73,9 (vgl. Abbildung 17). Vereinfachend kann davon ausgegangen werden, dass bei einem konstanten Alter von 40 Jahren eine Erhöhung der relativen Kronenlänge um 10 % eine Absenkung des h/d-Wertes um ebenfalls rund 10 Punkte bewirkt. Geht die Kronenlänge um 10 % zurück, steigt der h/d-Wert um 10 Punkte.

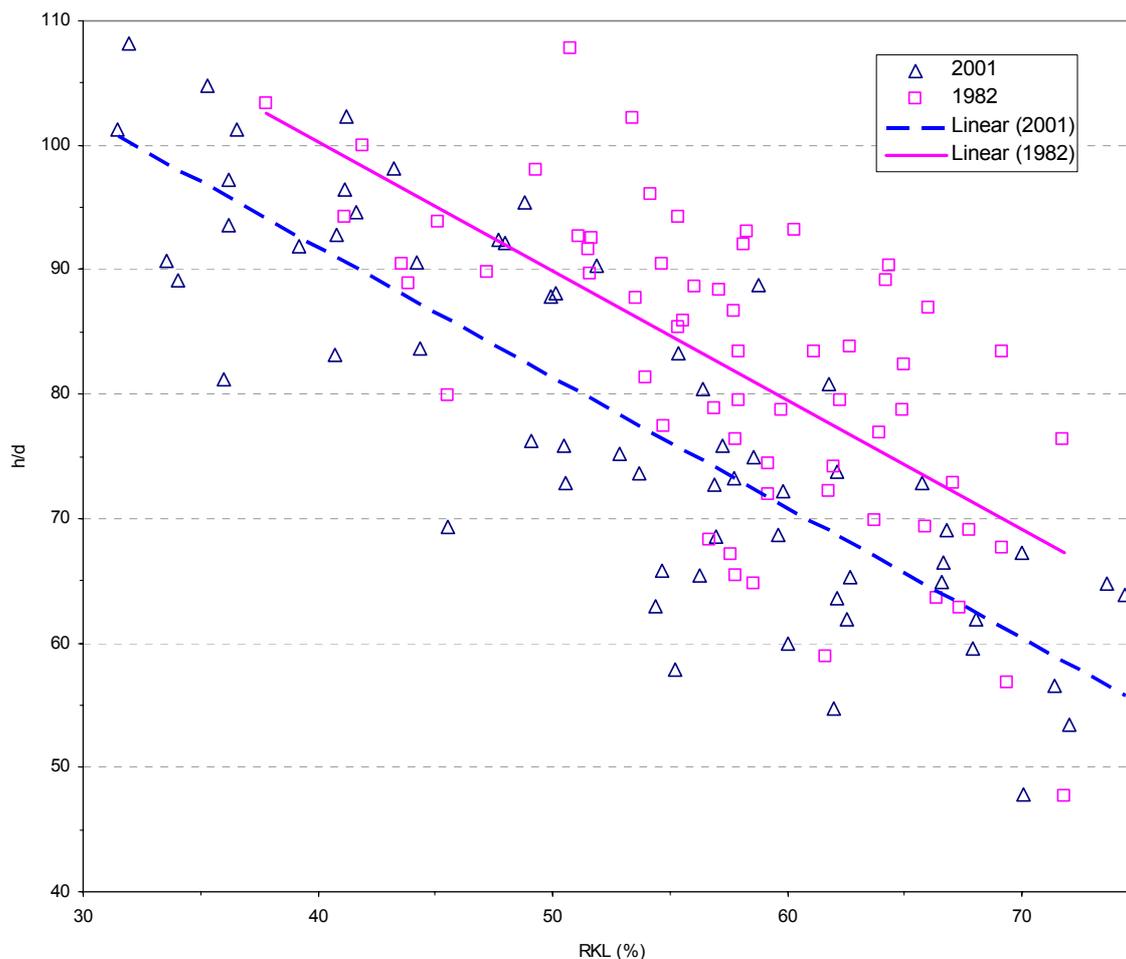
#### 4.4.2 Einfluss des Alters auf den h/d-Wert

Die Regressionskoeffizienten der verschiedenen zeitlichen Auflösungen in Tab. 21 haben konstant negative Vorzeichen und bewegen sich auf ähnlichem Absolut-Niveau<sup>57</sup>. Relative Kronenlänge und Alter haben danach generell einen negativen Einfluss auf den h/d-Wert. D. h. der h/d-Wert eines Baumes ist umso niedriger, je größer seine Krone bzw. je höher sein Alter ist. Für den gleichen h/d-Wert braucht ein jüngerer Baum demnach tendenziell eine größere relative Kronenlänge als ein älterer Baum und umgekehrt.

Abbildung 16 zeigt diesen Zusammenhang anhand der beobachteten Wertepaare (RKL und h/d) der Jahre 1982 und 2001. Der mittlere Altersunterschied zwischen diesen beiden Zeitpunkten beträgt 20 Jahre. Relative Kronenlänge und h/d-Wert sind jeweils negativ mit  $r = -0,837$  (2001) und  $r = -0,661$  (1982) korreliert. Grafisch ergibt sich für 1982 bei einer relativen Kronenlänge von 50 % ein h/d-Wert von 90. 20 Jahre später hat ein Baum mit der gleichen relativen Kronenlänge einen h/d-Wert von 81.

---

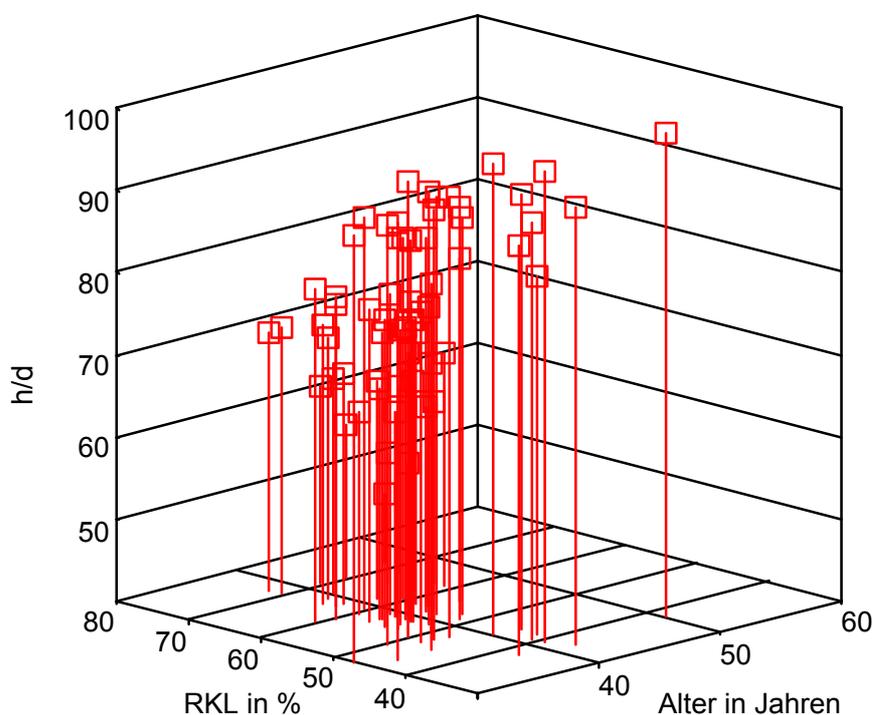
<sup>57</sup> Der Altersrahmen, der mit den Untersuchungsbäumen dieser Arbeit abgedeckt werden kann, ist gering, so dass es zunächst nicht auf der Hand liegt, dem Alterseinfluss näher nachzugehen. Trotzdem lassen sich eindeutige Tendenzen ableiten, die einen wesentlichen Erklärungsanteil an der beobachteten Streuung der h/d-Werte haben und zum Gesamtverständnis der Zusammenhänge beitragen.



**Abbildung 16:** Alterseinfluss auf die Beziehung zwischen h/d-Wert und relativer Kronenlänge anhand der beobachteten Wertepaare der Jahre 1982 und 2001

Dargestellt sind die beobachteten Wertepaare (RKL und h/d) der Jahre 1982 und 2001. Der mittlere Altersunterschied zwischen diesen beiden Zeitpunkten beträgt 20 Jahre. Relative Kronenlänge und h/d-Wert sind jeweils negativ mit  $r = -0,837$  (2001) und  $r = -0,661$  (1982) korreliert. Die Punktwolken wurden mit einfachen linearen Modellen in der Form  $h/d (1982) = 141,86 - 1,0381 \cdot RKL$  und  $h/d (2001) = 133,68 - 1,0486 \cdot RKL$  ausgeglichen. Die Ausgleichsgeraden verlaufen mit nahezu identischer Steigung. Ein jüngerer Baum benötigt danach für denselben h/d-Wert eine größere relative Kronenlänge als ein älterer Baum.

Wird die relative Kronenlänge nach Gleichung Nr. 45 bei 50 % konstant gehalten und das Alter von 40 auf 30 herabgesetzt, steigt der h/d-Wert von 84,4 auf 89,9 (vgl. Abbildung 17). Bei einer Erhöhung des Alters von 40 auf 50 sinkt der h/d-Wert von 84,4 auf 79,3. Vereinfachend kann davon ausgegangen werden, dass bei einer konstanten relativen Kronenlänge von 50 % der h/d-Wert um rund 5 Punkte sinkt, wenn das Alter um 10 Jahre erhöht wird und umgekehrt.



**Abbildung 17:** Beziehung zwischen h/d-Wert (h/d), relativer Kronenlänge (RKL) und Alter

Mit der an Mittelwerte der 20jährigen Beobachtungsperiode angepassten Regressionsfunktion (Gleichung 45) können 64,6 % der Streuung des h/d-Wertes mit der relativen Kronenlänge (RKL) und dem Alter<sup>58</sup> erklärt werden.

#### 4.4.3 Plausibilitätsprüfung der h/d-Wertfunktionen

Die angepasste Regressionsgleichung wurde mit den aus Abb. 14 grafisch abgeleiteten mittleren Beobachtungen der Jahre 1982 und 2001 sowie über die maximal beobachteten h/d-Wert-Veränderungen im 20jährigen Beobachtungszeitraum geprüft.

Mit Gleichung 45 ergibt sich für einen Baum mit 50 % relativer Kronenlänge zum Zeitpunkt 1982 ( $t_{1.3}$ -Alter = 29) ein h/d-Wert von 89,5. Zum Zeitpunkt 2001 ( $t_{1.3}$ -Alter = 49) weist die Gleichung bei konstant 50 % relativer Kronenlänge einen h/d-Wert von 79,4 aus. Die aus Abbildung 15 grafisch abgeleiteten Beobachtungswerte bestätigen die Ergebnisse der Schätz-

<sup>58</sup>  $t_{1.3}$ -Alter

funktion. Sie betragen bei jeweils 50 % relativer Kronenlänge für 1982 h/d 90 und für 2001 h/d 81.

Nach den Ergebnissen aus Kap. 4.3 Reaktion der relativen Kronenlänge kann bei einer Ausgangskronenlänge von 50 % in 20 Jahren bei maximaler Freistellung mit einem Anstieg der relativen Kronenlänge auf 66 % bzw. bei maximaler Konkurrenzierung mit einem Rückgang auf 31 % gerechnet werden. Werden diese Werte mit jeweils durchschnittlichen Altersangaben in Gleichung 45 eingesetzt, ergeben sich für einen 20jährigen Zeitraum maximal mögliche h/d-Wertveränderungen von -26,5 bzw. +11,2. Die aus dem für das Untersuchungsmaterial angepassten Regressionsmodell abgeleiteten Veränderungsrate werden in Tabelle 22 mit den beobachteten maximalen h/d-Wertveränderungen der Zentralbäume verglichen. Die Beobachtungen stammen von Zentralbaum Nr. 20 (von h/d 89,7 auf 66,5) und 79 (von h/d 85,3 auf 96,5). Beobachtungen und Projektionen weichen nur gering voneinander ab und decken den Rahmen der beobachteten Entwicklungen ab.

**Tabelle 22:** Vergleich der beobachteten und projizierten maximalen Veränderungsrate des h/d-Wertes über einen Zeitraum von 20 Jahren

maximale Veränderungsrate (beobachtet)	maximale Veränderungsrate (mit Gleichung Nr. 45 projiziert)
-23,2	-26,5
+11,2	+11,0

## **5 Diskussion**

Die Diskussion folgt der Gliederung der vorangegangenen Kapitel. Zunächst werden Material und Methoden kritisch reflektiert. Anschließend werden die erzielten Ergebnisse entsprechend der drei Nullhypothesen diskutiert, die sich auf die Durchmesserzuwachsreaktion in Abhängigkeit der relativen Kronenlänge, die Reaktion der Kronenlängenentwicklung in Abhängigkeit des Freistellungsgrades und die Reaktion der h/d-Wertentwicklung in Abhängigkeit der relativen Kronenlänge beziehen. Hierauf aufbauend wird auf die Grenzen der Aussagekraft und Übertragbarkeit der Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung hingewiesen. Am Ende werden Schlussfolgerungen für die waldbauliche Praxis sowie weitere wissenschaftliche Untersuchungen gezogen.

### **5.1 Material- und Methodendiskussion**

#### **5.1.1 Materialdiskussion**

Das Untersuchungsmaterial wurde aus einem Bestand am Südabfall des Thüringer Waldes entnommen. Der Untersuchungsstandort repräsentiert im Wesentlichen typische mittlere Verhältnisse der abiotischen Umweltfaktoren, die den Großteil der standortgerechten Fichtenfläche Thüringens prägen. Das gilt ebenfalls für die Bonität des Bestandes, in der sich letztendlich die Wachstumsreaktion des Baumes auf die Summe der Standortfaktoren widerspiegelt (vgl. Kap. 3.3.2 Untersuchungsbestand und 3.3.3 Praktische Relevanz und Repräsentanz).

Die geomorphologischen Voraussetzungen des Untersuchungsstandortes erwiesen sich für die vorliegende Arbeit ebenfalls als günstig. Die Geländeausformung war nahezu eben. Einseitige Kronenausformungen, wie sie vor allem für Fichten in starker Hanglage typisch sind, erschwerten Datenaufnahme und Analyse nur in Einzelfällen (vgl. BACHMANN 1996). Wenn einseitige Kronen auftraten, waren sie eindeutig durch asymmetrische räumliche Konkurrenz bedingt.

Der Untersuchungsbestand wurde von der Forsteinrichtung als 57jähriger<sup>59</sup> gleichaltriger Reinbestand aus Pflanzung klassifiziert. Die Einzelbaumanalysen deckten auf, dass sich hinter dieser anscheinend sehr homogenen Bestandesgenese ein Altersrahmen der datieren Stöcke von 30 Jahren verbarg. Dies deutet auf die Integration einiger Vorausverjüngungen und nachträglicher Pflanzung bzw. Naturverjüngung hin.

Durch das Großschadereignis des Schneebruchs von 1981 und den wenigen Folgeeingriffen, die nur Teile der Fläche betrafen, konnte die Konkurrenz der selektierten Einzelbäume für den Beobachtungszeitraum gut rekonstruiert werden. Dabei bot der Bestand die Chance, an Einzelbäumen auf kleinem Raum eine große Bandbreite verschiedener Konkurrenzdynamiken und vor allem relativer Kronenlängen des oberen Spektrums mit nachvollziehbaren Eingriffen für einen 20jährigen Zeitraum in einem „Quasi-Experiment“ untersuchen zu können (vgl. GERECKE 1988, 1991).

Der Schneebruch wirkte als Strukturinitial<sup>60</sup> und führte vor allem zu einer Freistellung stabiler Bäume (mit großen Kronen). Bäume mit hohen h/d-Werten und dementsprechend kurzen Kronen sind durch den Schneebruch negativ ausgelesen worden. Sie sind im Untersuchungsmaterial daher trotz des zweistufigen Stichprobenkonzeptes immer noch leicht unterrepräsentiert<sup>61</sup>. Die kürzeste relative Kronenlänge liegt im Mittel des Untersuchungszeitraums bei 35 % und zum Aufnahmezeitpunkt bei 29 %. Eine relative Kronenlänge von 30 % wird in der Literatur für Fichten als Mindestlänge für positive Zuwachsreaktionen auf Freistellungen angegeben (u. a. KLÄDTKE 1999, SCHMITT 1994 a, b, SPATHELF 1999, WEISE 1995). Die Spannweite der relativen Kronenlängen zum „Versuchsende“ betrug im Jahr der Datenaufnahme immerhin 46 % und reichte von 29 bis 75 %. (Diese Voraussetzungen wären auf keiner der in Thüringen vorhandenen langfristig beobachteten Fichten-Versuchsflächen erfüllt gewesen.)

Trotz der günstigen Voraussetzungen muss folgendes betont werden: Standort, Bestand und Altersrahmen des Untersuchungsmaterials repräsentieren zwar einen typischen Schwerpunkt

<sup>59</sup> Fortgeschrieben auf den Zeitpunkt der Datenaufnahme im Herbst 2003.

<sup>60</sup> Selbst bei Vernachlässigung der inzwischen teilweise etablierten Naturverjüngung zeigt z. B. der Variationskoeffizient der relativen Kronenlängen der Zentralbäume eine Zunahme der strukturellen Diversität: 1982, direkt nach dem Schneebruch lag er bei 13,5 % und verdoppelte sich nahezu bis zum Zeitpunkt der Datenaufnahme im Herbst 2003 auf 22,1 %.

<sup>61</sup> Vgl.

Abbildung 3, das zweistufige Stichprobenkonzept wurde gerade wegen des Überwiegens der langkronigen Bäume mit entsprechend niedrigen h/d-Werten bei der ersten reinen Zufallsauswahl angewandt.

des waldbaulichen Managements der Baumart Fichte in Thüringen, die Materialauswahl kann aber nicht als statistisch repräsentativ für alle Fichtenwälder Thüringens gelten (vgl. Kap. 5.3 Einschränkungen und Grenzen der Übertragbarkeit).

Weiterhin können die Wirkung verschiedener Standortfaktoren und genetischer Effekte nicht aus dem Material hergeleitet werden. Das war auch nicht Ziel der vorliegenden Untersuchung. Es kann auch nicht ausgeschlossen werden, dass die mit der Materialauswahl koinzidierenden Effekte die untersuchten Beziehungen selbst beeinflussen<sup>62</sup>. Dies wäre - wenn es angesichts der Vielzahl der möglichen Faktoren überhaupt möglich sein sollte - nur mit einem deutlich höheren Untersuchungsaufwand auszuschließen gewesen und war im Rahmen dieser Arbeit nicht zu leisten.

### 5.1.2 Methodendiskussion

Die vorliegende Untersuchung trägt insgesamt den Charakter einer Fallstudie. Die Erkenntnisse sollten unter Beachtung der methodischen Grenzen vom Punkt auf die Fläche und vom Einzelfall zum Allgemeinen übertragen werden. Materialauswahl und Methodik zielen darauf ab, die Streuung der interessierenden Parameter (vor allem relative Kronenlänge und Konkurrenzdynamik) so groß wie möglich und die Streuung anderer beeinflussender Faktoren (Standort, Alter, Provinienz, ...) so gering wie möglich zu halten, und hier im weitesten Sinn „ceteris paribus“ bzw. möglichst homogene Randbedingungen zu erreichen (vgl. HAYWOOD 2003). Hiervon profitiert die Klarheit der analysierten Beziehungen (Kap. 3.4.1 Stichprobendesign und 3.6.3 Statistische Auswertungen). Gleichzeitig leiden Geltungsbereich und Übertragbarkeit der Ergebnisse (Kap. 5.3 Einschränkungen und Grenzen der Übertragbarkeit). Diese Nachteile können durch die praxisrelevante Repräsentanz des Materials (z. B. der wichtigste Altersbereich mit denn typischsten Standortbedingungen) sowie eine vorsichtige und angepasste Interpretation der Ergebnisse (Kap. 3.1.1 Untersuchungsansatz und 3.1.3 Auswahl des Untersuchungsmaterials ) gemildert werden.

SPIECKER (1986) leitet an Fichten und Tannen in Plenterwaldversuchsflächen des Schwarzwaldes nahezu lineare Beziehungen zwischen relativer Kronenlänge und mittlerem

---

<sup>62</sup> Dies gilt z. B. für die speziellen Witterungsbedingungen im Beobachtungszeitraum. Besonderes Gewicht dürfte hier der Periode unmittelbar nach dem Schneebruch zukommen. Bei ungünstigen Witterungsbedingungen für das Baumwachstum wie z. B. starken Niederschlagsdefiziten in der Vegetationsperiode hätte es auch zu negativen Zuwachsreaktionen auf Freistellungen kommen können (EPP 2003, SPIECKER 1986).

Durchmesserzuwachs der letzten 5 Jahre her. SPATHELF (1999) und EPP (2002) setzten sich in ihren Untersuchungen ebenfalls mit der relativen Kronenlänge als zentralem Steuerungsparameter des Durchmesserwachstums von Fichten (und Tannen) auseinander. Die von ihnen entwickelten multiplen Modelle werden im Vergleich zu SPIECKER (1986) mit deutlich geringeren Stichprobenumfängen von  $n = 84$  bzw.  $n = 113$  entwickelt. SPATHELF (1999) und EPP (2002) können damit nur einen geringen Anteil der beobachteten Streuung des Durchmesserzuwachses erklären. Die Bestimmtheitsmaße der abgeleiteten Schätzfunktionen bewegen sich zwischen 0,5 (SPATHELF 1999) und weniger als 0,1 (EPP 2003). Im Vergleich zur vorliegenden Untersuchung beziehen SPATHELF (1999) und EPP (2003) fast doppelt so viele Zentralbäume von verschiedenen Standorten und Beständen in ihre Analysen ein. Außer methodischen Unsicherheiten geben die Autoren als mögliche Erklärungen für die hohen Reststreuungen an:

- Witterungseinflüsse;
- Fruktifikation;
- zu weites Standortspektrum;
- Insektenfraß;
- Genetik.

Die mit 63 untersuchten Zentralbäumen vergleichsweise hohen Bestimmtheitsmaße der aufgedeckten statistischen Beziehungen der vorliegenden Untersuchung von im Mittel rund  $r^2 = 0,7$  und mehr bestätigen den entwickelten Ansatz und die Auswahl der in die Modelle einbezogenen unabhängigen Variablen.

Die von SPATHELF (1999) und EPP (2003) angeführten Störgrößen zeichnen sich auch in dieser Arbeit ab. Das gilt vor allem für die Witterungseinflüsse (vgl. Kap. 4.2.3 Kurzfristige Reaktionen des Durchmesserzuwachses als Störgrößen). Sie können allerdings durch die „homogenen Randbedingungen“ des Untersuchungsmaterials weitgehend beherrscht werden (vgl. Kap. 3.1.1 Untersuchungsansatz und Kap. 4.2.3 Kurzfristige Reaktionen des Durchmesserzuwachses als Störgrößen). Bei SPIECKER (1986) gelten durch den gleichen 5jährigen Bezugszeitraum ebenfalls hinsichtlich des Witterungseinflusses (vor allem Trockenjahre) weitgehend homogene Randbedingungen. Hinzu kommt bei SPIECKER (1986) der hohe Stichprobenumfang, der mit aufwändigen destruktiven Verfahren wie der Stammanalyse i. d. R. nicht zu gewährleisten ist.

Die Verwendung möglichst einfacher und praxisnaher Parameter wie z. B. die Ansprache des Kronenansatzes am stehenden Stamm als mittlerer Ansatz der unteren grünen Äste mit einfachem visuellen Ausgleich hat sich insgesamt bewährt (vgl. SPIECKER 1983, 1986, WEISE 1982). Das gilt auch für den aus dem APA-Index abgeleiteten Parameter der Area Potentially Available Relative (APAR) sowie der zum Aufnahmezeitpunkt erhobenen Variablen des Anteils des freien Kronenumfangs (FU).

HAYWOOD (2003) verwendet bei der Untersuchung der Wachstumsreaktionen von Buchen auf Freistellung mit der Anzahl unbedrängter Kronenquadranten eine ähnlich einfache Freistellungsvariable wie FU. Allerdings berechnet HAYWOOD die von ihm verwendete Variable der unbedrängten Kronenquadranten aus Kronenablotungen und setzt sie nicht in Beziehung zu anderen Konkurrenzparametern.

Bei der Einbeziehung von FU in die Schätzfunktionen wurde über Gleichung Nr. 17 eine alters- und dimensionsunabhängige Beziehung zwischen FU und APAR unterstellt. Diese Annahme ist durch die Daten der vorliegenden Untersuchung gerechtfertigt. Vor einer weitergehenden Übertragung empfiehlt es sich allerdings, diese Annahme aufgrund ihrer zentralen Bedeutung weiter empirisch abzusichern.

Die relative Kronenlänge sollte jedoch nicht ohne Hilfsmessungen direkt geschätzt werden. Neben den Messungen wurde die relative Kronenlänge der Zentralbäume dieser Untersuchung durch zwei Personen unabhängig voneinander mit derselben Definition des visuellen Kronensatzes direkt ohne weitere Hilfsmittel optisch geschätzt. Dabei ergab sich ein systematischer Fehler. Mit der direkten Schätzung wird die relative Kronenlänge deutlich unterschätzt. Ohne vorherige Eichung über Hilfsmessungen unterschätzt die direkte Schätzung die relative Kronenlänge um rund 10 Prozentpunkte. Es konnten keine signifikanten Zusammenhänge des Schätzfehlers mit der Baumhöhe oder der Kronendimension festgestellt werden. Der einzig signifikante Zusammenhang besteht zwischen Bestockungsgrad und Schätzfehler. Der Korrelationskoeffizient dieser Beziehung beträgt  $r = -0,291$  bei einem mittleren Bestockungsgrad von 0,74. Je dichter der Bestand ist, desto eher wird die relative Kronenlänge in der Praxis also unterschätzt.

Die Rekonstruktion der Wachstumsparameter der Probekreisbäume lieferte für den Untersuchungszeitraum plausible Ergebnisse. Das gilt ebenso für die Stammanalysen der Zentralbäume.

Für die Rekonstruktion der Kronenlängenentwicklung wurde im Anhalt an OTTORINI et al. (1996) ein modifiziertes Verfahren angewandt, das den Kronenansatz über das typische Verteilungsmuster des Grundflächenzuwachses entlang der Stammachse identifiziert. Das Verteilungsmuster folgt dem von PRESSLER (1864) formulierten „Gesetz der Konstanz des jährlichen Grundflächenzuwachses am Baumschaft bis zum Kronenansatz“ (u. a. LARSON 1963, MITCHELL 1975, OTTORINI et al. 1996) (vgl. Kap. 3.1.2 u. ASSMANN 1961). Hierzu wurde anhand des Zuwachsmusters der Stammscheiben, das Jahr identifiziert, in dem die Stammscheibe vom Grundflächenzuwachsmuster den Wechsel von der grünen Krone zum Trockenastbereich anzeigt.

Im Vergleich zur Methode nach SPATHELF (1999), die sich auf die Rekonstruktion des Absterbezeitpunktes von Ästen entnommener Totastquirle (u. a. EPP 2003, SPATHELF 1999) stützt, lieferte das Verfahren auf Basis des Verteilungsmuster des Grundflächenzuwachses in der vorliegenden Untersuchung nach exemplarischen Einzelvergleichen bei einer begrenzten Unterstichprobe von 9 Zentralbäumen bei geringerem Aufwand zeitlich feiner aufgelöste und plausiblere Ergebnisse. Insgesamt bietet die beschriebene modifizierte Methode nach OTTORINI et al. (1996) eine effiziente Alternative zum Verfahren nach SPATHELF (1999). Das Verfahren steht und fällt allerdings mit der Anzahl der entnommenen Stammscheiben im Bereich unterhalb der grünen Krone und zusätzlichen Angaben, die zur Rekonstruktion des Kronenansatzes heran gezogen werden können, wenn das Verteilungsmuster keine einwandfreie Beurteilung zulässt. Bei durchschnittlich 5 Stammscheiben je Zentralbaum erwies sich die Methode als noch durchführbar.

Aufgrund der Unregelmäßigkeiten des Grundflächenzuwachsmusters ist das Verfahren iterativ und hat letztendlich eine subjektive Komponente (vgl. MITCHELL 1975). Das wird ebenfalls von OTTORINI et al. (1996) betont. In der vorliegenden Arbeit wäre die Rekonstruktion des Kronenansatzes ohne zusätzliche Angaben nicht befriedigend möglich gewesen. Genutzt wurden hierzu: Abweichungen des Zuwachsmusters in Extremjahren, Höhe des untersten Grünastansatzes im Probekreis und eindeutig rekonstruierte Kronenansätze vergleich-

barer Zentralbäume in benachbarter räumlicher Lage. (vgl. Kap. 3.5.2 Rekonstruktion der Wachstumsparameter der Zentralbäume).

Bei zukünftigen Anwendungen dieses Verfahrens sollten daher vor allem im Trockenastbereich unmittelbar unterhalb des aktuellen Kronenansatzes der Entnahmeabstand der Stammscheiben verkürzt werden, um zusätzliche Stützpunkte für die Rekonstruktion der Kronenlängenentwicklung abzuleiten, die die Identifizierung des Zuwachsmusters erleichtern. In der grünen Krone selbst können die Abstände zwischen den Scheiben vergrößert werden.

## 5.2 Ergebnisdiskussion

Die drei der Untersuchung zugrunde liegenden Nullhypothesen werden bei einer statistischen Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 0,05$  abgelehnt.

Die erste Nullhypothese bezieht sich auf die Reaktion des Durchmesserzuwachses in Abhängigkeit der relativen Kronenlänge. Die f-Tests der angepassten Regressionsgleichungen zeigen, dass sich bei einer statistischen Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 0,05$  Fichten mit verschiedenen relativen Kronenlängen im Durchmesserzuwachs signifikant unterscheiden. Die Datenanalyse ergab ansteigende mittlere Durchmesserzuwächse bei sinkender Konkurrenz und steigender relativer Kronenlänge. 75,0 bzw. 73,3 % der beobachteten Streuung des mittleren Durchmesserzuwachses der untersuchten Fichten konnte durch die relative Kronenlänge und die Konkurrenzvariablen APAA bzw. FU erklärt werden (Ablehnung der Nullhypothese).

Mit der zweiten Nullhypothese wird die Reaktion der relativen Kronenlänge auf den Konkurrenzierungsgrad untersucht. Es ergab sich eine enge Korrelation der Entwicklung der relativen Kronenlänge mit den Konkurrenzvariablen APAA und FU. Die Untersuchungen zeigten bei einer statistischen Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 0,05$  signifikante Unterschiede in der Kronenlängenentwicklung unterschiedlich stark konkurrenzierter Fichten. Nach den Ergebnissen steigt die relative Kronenlänge mit sinkender Konkurrenz. Die angepassten Schätzfunktionen für die relative Kronenlänge am Ende des Beobachtungszeitraums erklären in Abhängigkeit der Konkurrenzvariablen APAA und FU sowie der jeweiligen relativen Kronenlänge am Beginn des Beobachtungszeitraums 87,9 bis 88,5 % der beobachteten Streuung der Zielvariablen (Ablehnung der Nullhypothese).

Die dritte Nullhypothese beschäftigt sich mit der Reaktion des h/d-Wertes auf die relative Kronenlänge. Die angepassten Schätzfunktionen ergeben bei einer statistischen Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 0,05$  signifikante Unterschiede des h/d-Wertes von Fichten mit unterschiedlicher relativer Kronenlängen. Der h/d-Wert der untersuchten Fichten sinkt mit steigender relativer Kronenlänge. Die angepassten Regressionsgleichungen erklären in Abhängigkeit der relativen Kronenlänge und des Alters 64,6 % der beobachteten Streuung des h/d-Wertes (Ablehnung der Nullhypothese).

### 5.2.1 Durchmesserzuwachs

Der mittlere Durchmesserzuwachs ( $d$ ) der untersuchten Zentralbäume schwankt in seinem 20jährigen Mittel zwischen  $1,9 \text{ mm} \cdot \text{Jahr}^{-1}$  und  $11,0 \text{ mm} \cdot \text{Jahr}^{-1}$ . Die relative Kronenlänge konnte als zentrale beeinflussende Variable des Durchmesserzuwachses identifiziert werden. In einem Zwei-Variablen-Modell aus relativer Kronenlänge und Konkurrenz (APAA bzw. FU) beeinflusst die relative Kronenlänge die Schätzung im Vergleich mit der (reinen) Konkurrenzvariablen rund 20mal stärker (Tabelle 15, Gleichung 9 bis 16). Nach den angepassten Regressionsgleichungen haben die Bäume mit den größten relativen Kronenlängen und der geringsten Konkurrenz die höchsten mittleren Durchmesserzuwächse.

KLÄDTKE (1999) ermittelte bei Fichten von baden-württembergischen Versuchsflächen dieselbe plausible Grundaussage, die sich ebenfalls in einer Reihe anderer Untersuchungen widerspiegelt (vgl. u. a. EPP 2003, HAUFE 1957, SPATHELF 1999, SPIECKER 1986, WEISE 1995).

Der hier denkbare Extrempunkt ist das konkurrenzfreie Wachstum eines Solitärs. Diese Konkurrenzsituation ist nicht im erhobenen Datenspektrum der vorliegenden Arbeit enthalten. In Untersuchungen anderer Autoren ist das Zuwachsmuster von Fichtensolitären allerdings beschrieben worden (u. a. HASENAUER et al. 1994, LÄSSIG 1991). Es bestätigt die in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse und deckt sich mit Ansätzen, die Bestandesbäume als Solitär im Bestand sehen. Vor allem das Durchmesserwachstum wird bei diesen Ansätzen hergeleitet, in dem der Solitär im Bestand zunehmender Konkurrenz ausgesetzt wird (ABETZ 1968, EK & MONSERUD 1974, FREISE & SPEICKER 1999, LÄSSIG 1991).

Die Konkurrenzvariable trägt nach den Ergebnissen dieser Arbeit signifikant zur Erklärung des Durchmesserzuwachses bei. Auch WEISE (1995) schlussfolgert, dass neben der relativen Kronenlänge selbst der Grad der Freistellung die Bildung von physiologisch leistungsfähigeren Lichtnadeln bestimmt. MISSON (2000) stellt bei den von ihm untersuchten Fichten einen positiven Zusammenhang zwischen der Reaktion des Radialzuwachses und dem Freistellungsgrad fest.

EPP (2003) verzichtet bei seiner Untersuchung zur Durchmesserzuwachsreaktion von Fichten auf starke Freistellungen darauf, den Freistellungsgrad außer über die relative Kronenlänge

selbst mit zusätzlichen Variablen zu quantifizieren<sup>63</sup>. Dieses Verfahren erscheint zunächst zulässig, da die relative Kronenlänge auch ein kumulatives Maß für das Niveau der Konkurrenz eines Einzelbaumes über dem Zeitablauf darstellt (MITCHELL 1975). Dies wird auch durch die engere Korrelation des mittleren Durchmesserzuwachses mit der relativen Kronenlänge am Ende des Bezugszeitraums als zum Mittelwert der relativen Kronenlänge im Bezugszeitraum in der vorliegenden Untersuchung deutlich. Beim Endwert kommt der relativen Kronenlänge außer dem Maß für das physiologische Leistungsniveau auch die Bedeutung einer über den Zeitablauf integrierenden Konkurrenzvariablen zu (Kap. 4.2.1 Anpassung der Schätzfunktionen). Allerdings kann das (statische) Niveau der relativen Kronenlänge zum Aufnahmezeitpunkt Ausdruck einer durchaus gegensätzlichen Konkurrenzdynamik sein. So können 50 % relative Kronenlänge aus zunächst 100 % relativer Kronenlänge oder auch aus 30 % hervorgegangen sein. Je nachdem ob der Baum zunächst sehr konkurrenzfrei aufgewachsen und dann unter zunehmenden Druck geraten ist, oder ob seine Entwicklung umgekehrt verlaufen ist. Weiterhin erscheint es leicht nachvollziehbar, dass zwei Bäume mit gleicher relativer Kronenlänge aber unterschiedlichen Freistellungsgraden auch unterschiedlichen Lichtgenuss und damit verschiedene Durchmesserzuwachsreaktionen aufweisen werden (u. a. BIGING & DOBBERTIN 1995, SPATHELF 1999).

STERBA (1983) greift in seinen Einzelbaummodellen zur Herleitung der Durchmesserentwicklung auf ein Verfahren von EK & MONSERUD (1974) zurück, nachdem sich der Durchmesserzuwachs aus dem standörtlich ohne Konkurrenzeinfluss maximal möglichen Zuwachs, der relativen Kronenlänge und einem Konkurrenzindex ergibt. Die Abhängigkeit des Durchmesser- bzw. Grundflächenzuwachses bei Nadelbäumen von den zwei wesentlichen Faktorenkomplexen Kronendimension (relative Kronenlänge) und Konkurrenz spiegelt sich in Ansätzen zahlreicher Einzelbaummodelle in der Waldwachstumskunde (u. a. BIGING & WENSEL 1992, MITCHELL 1969, 1975, PRETZSCH 1992, SPATHELF 1999, VAN LAAR 1969, WYKOFF 1990) und deckt sich mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit.

Als praxisnahe Dichtemaße sind ebenfalls die Grundfläche (G) sowie der aus ihr abgeleitete Bestockungsgrad ( $B^\circ$ ) in die Analysen einbezogen worden. Die beiden Maße waren zwar durchweg signifikant negativ mit dem mittleren Durchmesserzuwachs aber in etwa nur halb so eng wie die übrigen Konkurrenzindices korreliert. Damit sind Grundfläche und Besto-

---

<sup>63</sup> EPP (2003) bezieht erst später die Winkelsumme der konkurrenzfreien Kronenseiten in Anlehnung an HAYWOOD (2003) in seine Modelle ein, kann den Anteil der beobachteten Streuung der Durchmesserzuwachsreaktion aber dadurch nicht verbessern.

ckungsgrad zwar grundsätzlich als Konkurrenzmaße zur Erklärung des Einzelbaumwachstums geeignet. Area Potentially Available Absolute (APAA), Area Potentially Available Relative (APAR) und der Anteil des freien Kronenumfangs (FU) liefern bei der Erklärung der Durchmesserzuwachsreaktionen aber deutlich bessere Ergebnisse.

KLÄDTKE (1999) fand den APA-Index bei Fichte ebenfalls als geeigneten Konkurrenzweiser mit im Vergleich zum A-Wert nach JOHANN (1983) strafferen Beziehungen zum Durchmesserzuwachs. Bei SPATHELF (1999) stellte sich der Konkurrenzindex nach HEGY (1974), bei dem wie beim APA-Index ebenfalls der BHD des Zentralbaumes und dessen relative Stellung zu seinen Konkurrenten eingeht, als geeignetes Konkurrenzmaß heraus.

Das Alter der Zentralbäume dieser Untersuchung hat keinen signifikanten Einfluss auf den Durchmesserzuwachs<sup>64</sup>. Dies deckt sich mit Ergebnissen von SPATHELF (1999), dessen Untersuchungsbäume bei der Fichte einen Altersrahmen von 59 bis 190<sup>65</sup> abdecken.

EPP (2003) erfasste den Entwicklungszustand von Fichten als Höhenindex (Quotient aus erreichter Baumhöhe und standörtlich maximaler Baumhöhe). In seinem Material ist eine Altersspannbreite von 48 bis 132<sup>66</sup> vertreten. Nach EPP benötigen Fichten mit zunehmendem Höhenindex (bzw. Alter) größere relative Kronenlängen, um auf Freistellungen mit einem gleich bleibend hohen Durchmesserzuwachsanstieg zu reagieren. Allerdings erklären die von EPP entwickelten Modelle nur etwa 10 % der beobachteten Streuung und zeigen erst nach Ausschluss eines Teilkollektivs seiner Untersuchungsbäume einen eindeutigen Trend. Weiterhin wird diese Aussage dadurch relativiert, dass nach EPP die von ihm untersuchten Fichten bei höheren Bäumen (mit größerem Höhenindex) ein Trend hin zu kürzeren Kronen zeigten.

BRÄKER & BAUMANN (2002) berichten von 100jährigen Fichten, die ihren Radialzuwachs nach einer Freistellung auf 120 % des Ausgangsniveaus steigerten. Auch LOIDL & REIMOSER (1980) beschreiben eine deutliche Steigerung des Radialzuwachses 80jähriger Fichten nach Freistellung (vgl. SPIECKER 1986, WEISE 1995).

---

<sup>64</sup> Diese Aussage ist vor dem Hintergrund der vergleichsweise geringen Altersspreite des Untersuchungsmaterials zu betrachten.

<sup>65</sup> Durchschnittliche t1.3-Alter je Probestfläche.

<sup>66</sup> Siehe Fußnote Nr. 56.

Der Altersrahmen der in diese Untersuchung einbezogenen Zentralbäume war begrenzt und reichte bis max. 74 Jahre. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich ein signifikanter Einfluss des Alters auf die Durchmesserzuwachsreaktion abzeichnet, wenn ein größeres Altersspektrum mit extrem jungen und extrem alten Bäumen einbezogen oder der Entwicklungszustand der Bäume in Anlehnung an EPP (2003) als Höhenindex erfasst wird. Insgesamt betrachtet liegt allerdings der Schluss nahe, dass die relative Kronenlänge im Vergleich zum Alter bzw. Entwicklungszustand des Baumes einen weitaus dominanteren Einfluss auf die Durchmesserzuwachsreaktion von Fichten nach Freistellung ausübt.

Witterungssignale können sich markant im Durchmesserzuwachs einzelner Jahre und Perioden abzeichnen (u. a. KAHLE 1994, SCHWEINGRUBER 2001, SPIECKER 1986, 1992). KLÄDTKE (1999) und SPATHELF (1999) empfehlen vor diesem Hintergrund bei der Untersuchung des Durchmesserzuwachses in Abhängigkeit von Kronendimension und Konkurrenz 10 bis 20jährige Bezugszeiträume. Nach KLÄDTKE (1999) steigt bei der Untersuchung des relativen Durchmesserzuwachses und den Parametern relativer Durchmesser, h/d-Wert, relative Kronenlänge und Konkurrenz mit der Länge des Beobachtungszeitraums die Straffheit der statistischen Zusammenhänge. Dieselbe Tendenz bestätigte sich bei der vorliegenden Untersuchung und konnte mit dem Witterungsverlauf erklärt werden (vgl. BÖRNER & ROEDER 1994).

Tabelle 23 stellt die Angaben anderer Untersuchungen zum Durchmesserzuwachs in Abhängigkeit der relativen Kronenlängen den Ergebnissen dieser Arbeit gegenüber. Zur einfacheren Darstellung der in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse wurde Gleichung 21 gewählt. Sie schätzt den mittleren Durchmesserzuwachs in Abhängigkeit der relativen Kronenlänge (RKL) und des Anteils des freien Kronenumfangs (FU). Für FU wurden dabei mit Gleichung 38 die Werte berechnet und die Schätzfunktion eingesetzt, die jeweils für die Aufrechterhaltung der angegebenen RKL erforderlich sind.

Die zum Vergleich in Tabelle 23 aufgeführten Angaben können nicht 1:1 mit den Ergebnissen dieser Untersuchung verglichen werden. Zum einen sind die aufgeführten Daten überwiegend an älteren Fichten von ca. 80 bis 130 Jahren erhoben worden (KLÄDTKE 1999, SEIFERT et al. 2003 a, b SPATHELF 1999). Zum anderen sind verschiedene destruktive und nicht destruktive Erhebungsmethoden angewandt worden. Entscheidend ist aber, dass es sich bei den relativen Kronenlängen der Literaturangaben nicht um Mittelwerte des

Beobachtungszeitraums, sondern ausschließlich um die relativen Kronenlängen zum Ende des Beobachtungszeitraums handelt. Aufgrund der Ergebnisse dieser Arbeit ist bei sozial absteigenden Bäumen, deren relative Kronenlänge im Beobachtungszeitraum zurück gegangen ist, davon auszugehen, dass die mittlere relative Kronenlänge bei gleichem Durchmesserzuwachs höher ausfällt als die relative Kronenlänge am Ende des Beobachtungszeitraums. Wird die relative Kronenlänge am Ende des Beobachtungszeitraums in die für den Mittelwert angepassten Schätzfunktionen eingesetzt, fallen die Durchmesserzuwachswerte zu niedrig aus. Vor allem SPIECKER (1986) und SPATHELF (1999) weisen darauf hin, dass die von ihnen untersuchten Fichten überwiegend deutlich unter Konkurrenzdruck standen und ihre relativen Kronenlängen eine negative Tendenz aufwiesen. Bei KLÄDTKE (1999) kann davon ausgegangen werden, dass dies ebenfalls auf die kurzkrönigen Bäume zutrifft. Die Angaben von SPIECKER (1986), die generell um rund 10 Prozentpunkte geringer als in dieser Arbeit ausfallen, aber ansonsten in der Tendenz gleichsinnig verlaufen, könnten hiermit erklärt werden.

Für SPATHELF (1999) trifft in den unteren Kronenlängen dieselbe Beobachtung zu. Seine Angaben für größere relative Kronenlängen weichen extrem von den Ergebnissen dieser Untersuchung aber auch von anderen Literaturangaben ab. Bei 70 % relativer Kronenlänge ergibt sich nach seinem Modell ein mittlerer jährlicher Durchmesserzuwachs von über 16 mm. Das sind 180 % des Zuwachsniveaus, das für Solitäre angegeben wird (LÄSSIG 1991, HASENAUER et al. 1994). In Anbetracht des Bestimmtheitsmaßes der von SPATHELF (1999) zugrunde gelegten Schätzfunktion ( $r^2 = 0,43$ ) könnte neben dem o. a. Dynamikproblem eine nicht befriedigende Kalibrierung des Modells die extremen Abweichungen erklären.

Die mittleren jährlichen Durchmesserzuwächse der von SEIFERT et al. (2003 a) untersuchten Fichten beziehen sich auf das gesamte Baumalter, die relative Kronenlänge jedoch auf den Aufnahmezeitpunkt. Wie von SEIFERT et al. auch erwähnt, waren diese Bäume vor ihrer „Freistellung“ i. d. R. durch mehr oder weniger lange Dichtstandsphasen geprägt, die den mittleren Durchmesserzuwachs dementsprechend beeinflussen. Das erklärt die etwas niedriger ausfallenden Werte.

**Tabelle 23:** Literaturangaben<sup>67</sup> des mittleren Durchmesserzuwachses (id) und der relativen Kronenlänge (RKL) im Vergleich mit der Schätzfunktion aus Kap. 4.2.1 Anpassung der Schätzfunktionen des Durchmesserzuwachses (Gleichung 21)

RKL	Gleichung (Nr. 21)	SPIECKER (1986)	SPATHELF (1999) id (mm*Jahr <sup>-1</sup> )	KLÄDTKE (1999)	SEIFERT et al. (2003)
(%)					
30	1.9	3.5	-	-	-
35	2.8	4.3	3.2	3.8	-
40	3.6	5.1	5.1	-	-
45	4.4	5.7	7.1	4.2	-
50	5.1	6.5	9.0	-	-
60	6.7	8.1	12.8	-	-
65	7.5	-	14.7	5.9	-
70	8.3	-	16.7	-	7.2

Nach der Z-Baum-Ertragstafel für Fichte (KLÄDTKE 1992) ergeben sich für stabile Z-Bäume mit h/d-Werten zwischen 60 und 70 (und dementsprechend großen Kronen) je nach Bonität über den gesamten Produktionszeitraum durchschnittliche mittlere Durchmesserzuwächse von 4,2 bis 5,7 mm\*Jahr<sup>-1</sup>.

### 5.2.2 Entwicklung der relativen Kronenlänge

Die direkte Analyse der relativen Kronenlänge am Ende des Bezugszeitraums und die indirekte Untersuchung über die Dynamik-Variable der durchschnittlichen jährlichen Veränderungsrate zeigen eine klare Abhängigkeit der Kronenlängenentwicklung von der Konkurrenz. Die

<sup>67</sup> Die Werte sind aus Veröffentlichungen teilweise grafisch abgeleitet und dementsprechend zu interpretieren.

Konkurrenzvariablen wie z. B. der Anteil des freien Kronenumfangs (FU) sind ihrerseits wiederum mit der Bestandesdichte wie z. B. dem Bestockungsgrad korreliert ( $r = -0.448$ ).

Die höheren Bestimmtheitsmaße ergeben sich in den Schätzfunktionen bei Verwendung der einzelbaumorientierten Konkurrenzvariablen. Sie bilden die Konkurrenzsituation des einzelnen Baumes besser ab, als die Bestandeskennwerte Grundfläche oder Bestockungsgrad. Trotzdem sind auch diese Bestandeskennwerte signifikant mit der relativen Kronenlänge korreliert. Die Abhängigkeit des mittleren Kronenprozentes von der Bestandesdichte wird bei Nadelbäumen von mehreren Autoren beschrieben (u. a. BRYNDUM 1978, GUERICKE 2003, HASENAUER 1993, KRAMER & SMITH 1985).

Mit Zwei-Variablen-Modellen aus der relativen Kronenlänge am Anfang des Bezugszeitraums und einer Konkurrenzvariable (APAA bzw. FU) können 87,9 bzw. 88,5 % der Streuung der relativen Kronenlängen am Ende des Bezugszeitraums erklärt werden. Bei der Schätzung der durchschnittlichen jährlichen Veränderungsrate der relativen Kronenlänge können mit demselben Funktionstyp bei Verwendung der Konkurrenzvariablen FU 31,6 % der Streuung der Zielvariablen erklärt werden. Die Konkurrenzvariablen sind die maßgeblich beeinflussenden Regressoren der Schätzfunktionen. Die Ergebnisse decken sich mit denjenigen von SPATHELF (1999) und bestätigen, dass die relative Kronenlänge eines Einzelbaumes in erster Linie eine Funktion der Konkurrenz ist (MITCHELL 1975).

Dieselbe Grundbeziehung findet sich ebenfalls in Kronenansatzveränderungsmodellen als Teilmodulen von Einzelbaum-Wachstumssimulatoren (HASENAUER 1993, MAGUIERE & HANN 1990, MONSERUD 1975, PRETZSCH 1992, STERBA 1982). SHORT & BURKHART (1992) zeigten an Kiefernbeständen, dass sich Freistellung auf die Veränderung der Kronenansatzhöhe auswirkt und integrierten diesen Effekt in ihr Kronenansatzveränderungsmodell (vgl. HASENAUER 1993).

Die Reaktion der relativen Kronenlänge auf Änderungen des Konkurrenzstatus erfolgt nicht zeitgleich, sondern aufgrund der mit dem Kronenausbau (Höhenwachstum) bzw. Kronenrückgang (Aststerben) verbundenen biologischen Prozesse mit zeitlicher Verzögerung. Nach PRETZSCH (1992) reagiert die relative Kronenlänge auf Änderungen der Konkurrenzsituation träger als z. B. der Durchmesserzuwachs. In der vorliegenden Arbeit erwiesen sich 10 Jahre als ausreichend, um Reaktionen der Kronenlängenentwicklung in Abhängigkeit der

Konkurrenz des Einzelbaumes zu untersuchen (vgl. EPP 2003, MEADOWS & GOELZ 2001, SPATHELF 1999, SPIECKER 1991 a, b).

MAGUIRE & HANN (1990) stellen an Douglasien fest, dass die Verschiebung des Kronenansatzes in größere Baumhöhen positiv mit Höhenzuwachs und Bestandesdichte korreliert. SPATHELF (1999) bestätigt diese Ergebnisse an Fichte. KRAMER (1962) untersuche die für mäßig (nieder)durchforstete<sup>68</sup> Fichtenreinbestände Nordwestdeutschlands typische Kronenentwicklung. Er zeigt, dass innerhalb von zwei Jahrzehnten, im Alter 20 bis 40, die relative Kronenlänge des Bestandesmittelstammes von 89 auf 39 % sinkt. In dieser Bestandesphase ist auch der relative Volumenzuwachs und der damit verbundene Anstieg der Bestandesdichte bzw. die auf den Einzelbaum wirkende Konkurrenz am größten. Ab Alter 80 beschreibt KRAMER für die konservativ behandelten Fichtenbestände eine relative Kronenlänge von 33 %, die durch Durchforstungen nur noch unwesentlich beeinflusst wird (BADOUX 1945, KRAMER & SMITH 1985).

SPATHELF (1999) stellt bei den von ihm untersuchten Fichten im Alter von 59 bis 190<sup>69</sup> Jahren fest, dass sich die relativen Kronenlängen trotz Standraumerweiterungen im Durchschnitt nicht vergrößern. Bei den freigestellten Bäumen war im Vergleich zu den nicht freigestellten lediglich ein geringerer Rückgang der relativen Kronenlänge zu beobachten. SPATHELF führt dies auf noch vorhandene Konkurrenz (zu geringe Freistellungsgrade), Selbstbeschattungseffekte und zu kurze Reaktionszeiträume zurück<sup>70</sup>. Das teils hohe Alter des Untersuchungskollektives ist sicherlich mitzubeachten.

Im Durchschnitt zeigten auch die in dieser Arbeit untersuchten Bäume über den 20jährigen Beobachtungszeitraum einen Rückgang der relativen Kronenlänge um 4,6 Prozentpunkte. Das Ergebnis ist logisch und mit dem generellen Anstieg der Bestandesdichte bzw. der Konkurrenz im Beobachtungszeitraum verbunden. Der Großteil der Bäume wurde ausschließlich durch den 1981er Schneebruch am Anfang des Beobachtungszeitraums freigestellt. Auch wenn die Freistellungen teils extrem waren, zeigen doch alle Probestellen über den 20jährigen Zeitraum hinweg einen Anstieg der Bestandesdichte. Bei andauernden Freistellungen wären andere Ergebnisse zu erwarten gewesen.

---

<sup>68</sup> WIEDEMANN (1936/42), I. EKL, mäßige Durchforstung.

<sup>69</sup> Spannbreite der durchschnittlichen t1.3-Alter je Probestelle.

<sup>70</sup> In der von SPATHELF (1999) angewandeten Rekonstruktionstechnik der Kronenlängenentwicklung kann ein weiterer Faktor liegen (vgl. Kap. 5.1.2 Methodendiskussion und 5.2.1 Durchmesserzuwachs).

Insgesamt waren Spektrum<sup>71</sup> und Dynamik der in dieser Arbeit untersuchten Konkurrenz bei vergleichsweise jungen (und reaktionsfreudigen) Probebäumen (49 Jahre<sup>72</sup>) groß genug, um im Gegensatz zu SPATHELF (1999) und KRAMER (1962) positive *und* negative Reaktionen der Kronenlängenentwicklung zu untersuchen. Die Spannbreite der untersuchten Kronenlängenentwicklung der Zentralbäume reicht im Beobachtungszeitraum von +18,6 % bis -24,1 %.

Weiterhin konnte in dieser Arbeit gezeigt werden, dass größere Kronen stärker freigestellt werden müssen, um ihre relative Kronenlänge aufrecht zu erhalten, als dies bei kleineren Kronen der Fall ist. Bei dreidimensionalen Konkurrenzmodellen, die auf dem Konzept der beschatteten Biomasse (KELLOMÄKI et al. 1980) aufbauen, findet sich dieselbe Beziehung (SLOBODA & PFREUNDT 1989).

SPATHELF (1999) verwendet bei seinen Überlegungen einen „Standraumtrichter“, der mit festem Öffnungswinkel als umgedrehter Kegelstumpf am Kronenansatz des Zentralbaumes inseriert (Abbildung 18). Je stärker dieser Trichter von beschattender Konkurrenzbiomasse ausgefüllt wird, desto größer ist die Konkurrenzwirkung auf den Zentralbaum. Der Ansatz ähnelt dem Kronenkonkurrenzwert KKL (BACHMANN 1998, PRETZSCH 1995). Beim KKL wird jedoch ein Suchtrichter verwendet, der in einer festen relativen Höhe des jeweiligen Bezugbaums ansetzt.

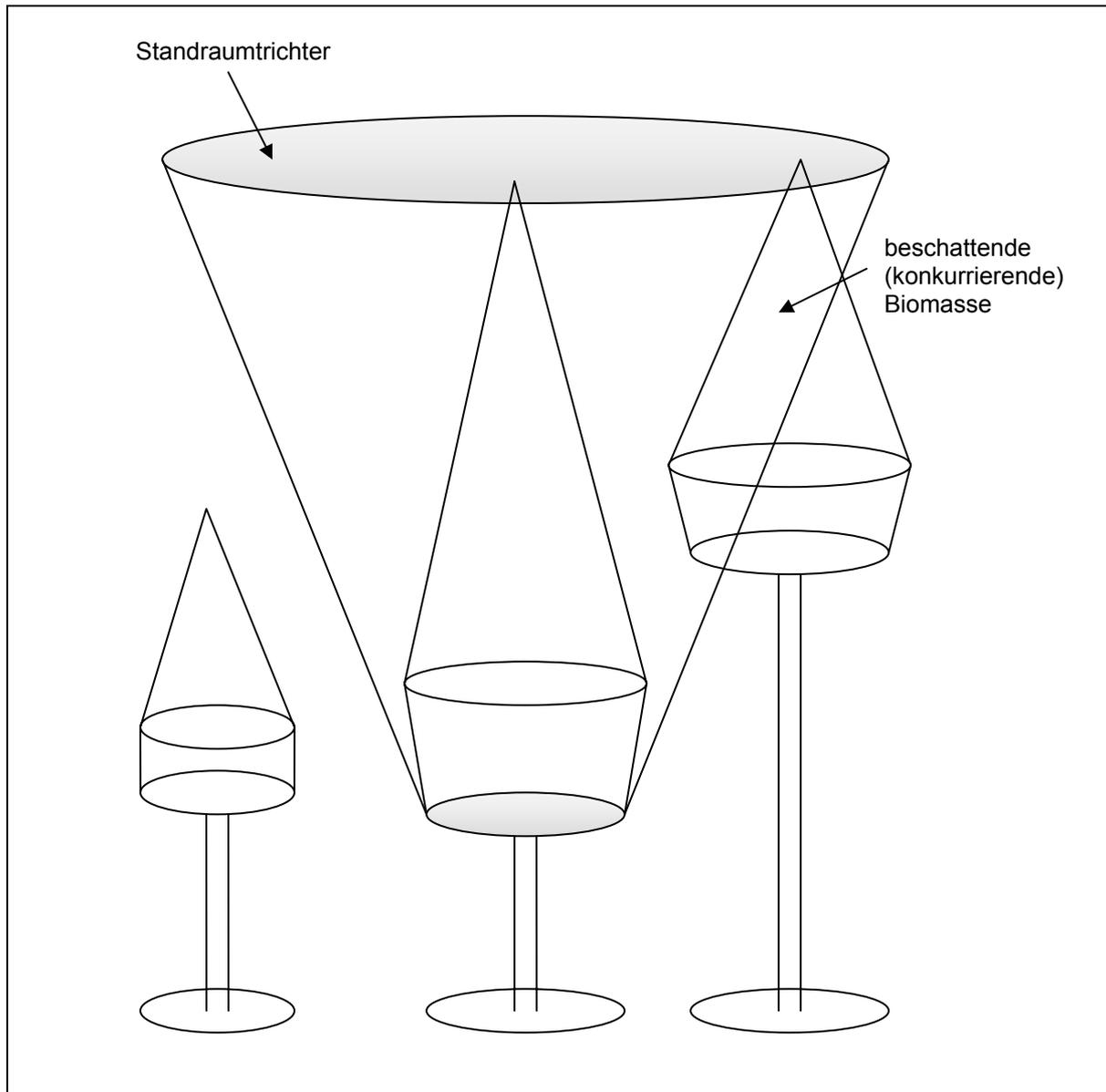
Größere relative Kronenlängen sind mit tieferen Kronenansätzen positiv korreliert (vgl. Kap. 4.1.1 Kronenparameter). Werden gedanklich die Baumnachbarn konstant gehalten und die relative Kronenlänge des Zentralbaumes erhöht, verlagert sich der Kronenansatz in Richtung Stammfuß. Der Konkurrenztrichter setzt dann tiefer am Stamm an. Von seinem Öffnungswinkel wird dementsprechend mehr „Konkurrenzbiomasse“ als vorher erfasst.

Soll die Konkurrenzwirkung (Füllung des Trichters mit beschattender Biomasse) auf die größere Krone gleich gehalten werden, muss der Baum stärker freigestellt werden (vgl. PRETZSCH 1992).

---

<sup>71</sup> Die mittleren Bestockungsgrade des Beobachtungsreitraums reichen nach der Fichtenertragstafel von WENK et al. (1985) von 0,19 bis 0,91.

<sup>72</sup> Durchschnittliches t1.3-Alter am Ende des Beobachtungszeitraums.



**Abbildung 18:** Dreidimensionales Konkurrenzmodell auf Basis des Konzeptes der beschattenden Biomasse (verändert nach SPATHELF 1999)

Der Standraumtrichter setzt als umgekehrter Kegelstumpf am Kronenansatz des Zentralbaumes mit einem definierten Öffnungswinkel an. Je stärker der Trichter von beschattender (Konkurrenz)Biomasse ausgefüllt wird, desto stärker ist die Konkurrenzwirkung auf den Zentralbaum (KELLOMÄKI et al. 1980, PFREUNDT 1988, SLOBODA & PFREUNDT 1989, SPATHELF 1999). Bei gleicher Höhe von Zentralbaum und Konkurrent dringt mit tiefer ansetzender Krone (größere relative Kronenlänge) zunehmend mehr beschattende Biomasse in den Standraumtrichter ein. Soll die Konkurrenzwirkung daher gleich gehalten werden – z. B. zur Aufrechterhaltung einer bestimmten relativen Kronenlänge – müssen Bäume mit größeren relativen Kronen stärker als Bäume mit kleineren relativen Kronenlängen freigestellt werden. Die Wirkungsweise des Konkurrenzmodells deckt sich mit den Ergebnissen dieser Arbeit (Kap. 4.3 Reaktion der relativen Kronenlänge).

Ähnliche Zusammenhänge ergeben sich auch aus der Z-Baum-Ertragstafel für Fichte (KLÄDTKE 1992). Für einen konstanten Durchmesserzuwachs müssen hier bei Bäumen mit niedrigeren  $h/d$ -Werten (und dementsprechend größeren Kronen) verhältnismäßig mehr Konkurrenten entnommen werden.

### 5.2.3 h/d-Wertentwicklung

Die Ergebnisse dieser Arbeit belegen einen engen Zusammenhang zwischen relativer Kronenlänge und h/d-Wert auf Einzelbaumebene. Die größten und zuwachsstärksten Bäume mit den dementsprechenden Kronen haben die niedrigsten h/d-Werte. Mit einem Zwei-Variablen-Modell aus relativer Kronenlänge und Alter können 65 % der Streuung des h/d-Wertes erklärt werden. Die relative Kronenlänge geht in die angepassten Schätzfunktionen als Weiser für die Zuwachspotenz eines Baumes ein (vgl. Kap. 4.4 Reaktion des h/d-Wertes).

Die Abhängigkeit des h/d-Wertes von der Kronengröße wird bei Fichte von mehreren Untersuchungen bestätigt und insbesondere im Zusammenhang mit der Stabilität gegenüber Schnee- oder Sturmbruch hervorgehoben (CHROUST 1980, JOHANN 1980, 1981, KRAMER 1980, MERKEL 1975).

Die Kronengröße ist abhängig vom Standraum eines Baumes (u. a. ABETZ 1976). Diese Beziehung wird für die Beeinflussung des h/d-Wertes durch die Standraumzuweisung genutzt (ABETZ 1975, 1980, 1982, ABETZ & KLÄDTKE 2000, KLÄDTKE 1992, PRIEN et al. 1985). Von sinkenden h/d-Werten nach starken Freistellungen berichten ebenfalls KENK (1988) und SPATHELF (1994) bei Tanne sowie ZIMMERLE (1939) und ABETZ (1976) bei Fichte (JOHANN 1977, LEIBUNDGUT 1989, SEELING 2001, SEIBT 1977, 1980).

EK (1974) entwickelte ein statisches Kronenansatzveränderungsmodell, das den Kronenansatz aus einer nicht linearen Funktion mit den Eingangsparametern Höhe und Durchmesser schätzt (vgl. EK & MONSERUD 1974, HASENAUER 1993). Hierin spiegelt sich dieselbe Grundbeziehung des h/d-Wertes zur relativen Kronenlänge wieder, wie sie auch in dieser Arbeit gefunden wurde.

Die h/d-Werte der untersuchten Zentralbäume der vorliegenden Arbeit bewegen sich im Mittel des Beobachtungszeitraums zwischen 48,6 und 105,3, ihr arithmetisches Mittel beträgt 79,3. Sie liegen damit in etwa innerhalb der Bandbreite, die von KRAMER (1988) für gleichaltrige durchforstete Fichtenbestände mit >100 bis 50 angegeben wird (vgl. ABETZ 1976, KLÄDTKE 1993, SCHOBER 1988). SEIFERT et al. (2003 a, b) stellten bei der Untersuchung von Fichten des Altersklassenwaldes, die nach einer Dichtstandsphase stark freigestellt wurden und bei einem mittleren Alter von 89 bis 131 Jahren im Mittel eine relative Kronenlänge von 64 % aufwiesen, h/d-Werte von 50 fest. h/d-Werte von 60 bis zu 40 werden

auch für zuwachsstarke Fichten aus Mittel- und Plenterwaldstrukturen beschrieben (u. a. LEIBUNDGUT 1989, SPIECKER 1986, SURBER 1950). Die niedrigsten h/d-Werte der in dieser Arbeit untersuchten Zentralbäume entsprechen diesem Niveau<sup>73</sup>. Noch niedriger liegen die h/d-Werte von Fichtensolitären, die LÄSSIG (1991) bei einem mittleren Alter von 90 mit ca. 40 und weiter abnehmender Tendenz mit Extremwerten von bis zu 24 angibt.

LÄSSIG (1991) vergleicht die h/d-Wertentwicklung der von ihm untersuchten Fichtensolitäre mit Bestandesbäumen gleichen Alters und gleicher Bonität (EICKORN 1986). LÄSSIG (1991) stellt bei beiden einen Alterstrend mit einem Verlauf fest, der einer fallenden Exponentialfunktion über dem Alter entspricht: Bis zum t1.3-Alter von 8 Jahren verläuft nach LÄSSIG die Entwicklung der Fichtensolitäre und Bestandesbäume mit einem sehr steilen Abfall der h/d-Werte auf einem Niveau von ungefähr 100 gleich. (Die Fichten aus Pflanzung wachsen bis zum Erreichen des Bestandesschlusses wie ein Solitär.) Danach sinken die h/d-Werte der Solitäre langsam weiter ab und nähern sich einem Niveau von 40 bis 30. Durch den eintretenden Kronenschluss bleibt der h/d-Wert der Bestandesbäume zunächst bei einem Niveau von 100 bis 80 und sinkt bis zum t1.3-Alter von 100 Jahren auf ungefähr 60 (vgl. PRETZSCH 2002). Nach LÄSSIG (1991) liegt der h/d-Wert der Bestandesbäume ständig rund 60 bis 100 % über dem der Solitäre.

Auch in der vorliegenden Untersuchung deutet sich ein Alterstrend der h/d-Wertentwicklung an, allerdings auf geringem Niveau (Kap. 4.4.2 Einfluss des Alters auf den h/d-Wert). Bei einem größeren Alterspektrum bzw. einem längeren Beobachtungszeitraum hätte sich dieser Trend klarer abgezeichnet. Trotzdem reicht die Beobachtungsperiode von 20 Jahren aus, um bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 0,05$  einen signifikanten Einfluss des Alters in der Beziehung zwischen relativer Kronenlänge und h/d-Wert nachzuweisen. Jüngere Fichten brauchen demnach für den gleichen h/d-Wert eine größere relative Kronenlänge als ältere Fichten. Im biologischen Gesamtzusammenhang ist diese Beziehung schlüssig.

---

<sup>73</sup> Bei einem Vergleich der h/d-Werte muss die jeweilige Messmethode beachtet werden. Um die Vergleichbarkeit der rekonstruierten Werte über den gesamten Beobachtungszeitraum zu gewährleisten, wurden die Höhen- und Durchmesserentwicklung aus der Stammanalyse für die Ableitung des h/d-Wertes verwendet. Die Rindenstärke wurde dabei einheitlich mit angepassten Rindenfunktionen berücksichtigt (vgl. Kap. 3.5.2 Rekonstruktion der Wachstumsparameter der Zentralbäume). Gegenüber den stehend aus Höhenmessung und Durchmesserermittlung mit Maßband abgeleiteten h/d-Werten weisen die aus der Stammanalyse abgeleiteten h/d-Werte aufgrund des geringen positiven Fehlers der Umfangmessung mit Maßband eine geringe negative Abweichung auf. Mit dem Korrekturfaktor 1,0236 können sie auf die stehend abgeleiteten h/d-Werte umgerechnet werden.

Der Höhenwachstumsgang von Fichten wird in einem weiten Rahmen nicht von der Konkurrenz beeinflusst (ASSMANN 1961, BRYNDUM 1980, EPP 2003, KENK 1990, STERBA 1983). LÄSSIG (1991) beschreibt für Fichtensolitäre annähernd gleiche Verläufe des Höhenwachstums, aber eine Überlegenheit der Solitäre im Dickenwachstum mit in der Folge generell niedrigerer h/d-Werte der Solitäre.

Der h/d-Wert hat sich bei der Fichte insbesondere als Weiser der mechanischen Stabilität des Baumschaftes erwiesen (u. a. ABETZ 1976). Bäume sichern ihre Struktur unter biomechanischen Gesichtspunkten vor allem gegenüber Bruch durch möglichst schnellen Stabilisierungszuwachs an spannungsbelasteten Stellen ab (MATTHECK 1990, MATTHECK et al. 1992). Je größer das Zuwachspotenzial (relative Kronenlänge) eines Baumes bei gleicher biomechanischer Beanspruchung ist, desto eher ist er in der Lage, den erforderlichen Stabilisierungszuwachs zu leisten, d. h. seinen h/d-Wert abzusenken.

Solitäre wachsen unbeeinflusst von Konkurrenz. Ihr Wachstumsgang ist alleine ein Resultat von Standort und Genetik (ABETZ 1976). Wenn die Genetik eines Baumes als Programm zur Fitness-Optimierung aufgefasst wird, erscheint es sinnvoll, bis zu einer gewissen Lebensphase das Standortpotenzial vorrangig in das Höhenwachstum bzw. den Kronenausbau zu investieren, um nicht überwachsen und ausgedunkelt zu werden. Wenn die herrschende Schicht des Bestandes erreicht ist und das Höhenwachstum nachlässt (SLOBODA 1989, GERECKE 1988, 1991) sollte die Struktur so gut wie möglich abgesichert werden, um möglichst lange zu fruktifizieren. HORN (1971) beschreibt dieses Verhalten unter photoenergetischen Gesichtspunkten als optimale Strategie einer stresstoleranten Baumart früher Sukzessionsphasen („Multilayer“). Vor diesem biologischen Hintergrund erscheint es schlüssig, dass jüngere Fichten bei gleicher relativer Kronenlänge geringere h/d-Werte als ältere Fichten haben.

Nach den Ergebnissen dieser Arbeit können die Untersuchungsbäume ihren h/d-Wert über zwei Wege absenken – schnell über eine möglichst große relative Kronenlänge mit dementsprechendem Zuwachspotenzial oder etwas langsamer über die Zeit, wenn sie lang genug überleben können. Die kritische Überlebensgrenze wird in der Jugend vor allem durch den Faktor Schneebruch bestimmt und korrespondiert mit einem h/d-Wert von 80 (u. a. ABETZ & KLÄDTKE 2002, MERKEL 1975, PRIEN et al. 1985, ROTTMANN 1983).

### 5.3 Einschränkungen und Grenzen der Übertragbarkeit

Der Ansatz der vorliegenden Untersuchung entspricht einer Fallstudie (vgl. Kap. 3.1.1 Untersuchungsansatz und 3.1.3 Auswahl des Untersuchungsmaterials ). Die Ergebnisse haben daher generell einen vorläufigen und exemplarischen Charakter. Sie sind dementsprechend vorsichtig als Tendenzen bzw. Orientierungshilfen zu interpretieren.

Bei der Ergebnisinterpretation sind insbesondere zwei Faktoren zu beachten, die die Aussagekraft und Übertragbarkeit der Ergebnisse grundsätzlich einschränken: Es kann aus mehreren Gründen nicht ausgeschlossen werden, dass die untersuchten Variablen nicht die einzigen Faktoren sind, die die Ergebnisse beeinflussen (interne Validität). Weiterhin können die Ergebnisse aufgrund des Untersuchungsmaterials und Ansatzes der Datenerhebung nur eingeschränkt generalisiert und übertragen werden (externe Validität).

Das Untersuchungsmaterial wurde nach einem zweistufigen Stichprobenkonzept ausgewählt. Das Verfahren entspricht keiner rein zufälligen Auswahl. Die angewandten statistisch-mathematischen Verfahren der Regressionsanalyse setzten diese reine Zufallsauswahl aber voraus. Diese Voraussetzung ist nicht uneingeschränkt erfüllt und begrenzt die interne Validität der erzielten Ergebnisse.

Das Baumwachstum kann von einer enormen Vielzahl von Umweltfaktoren beeinflusst werden. Der Ex-post-facto Ansatz macht es unmöglich, alle Umweltfaktoren zu kontrollieren und nur die jeweils interessierenden Variablen bei ansonsten gleichen Bedingungen zu analysieren. Das schränkt die interne Validität sowie die unterstellten Wirkungsbeziehungen ein.

Die zentralen Ergebnisse dieser Arbeit wurden mit der Untersuchung der aufgestellten Nullhypothesen durch multiple Regressionen formuliert. In diesem Zusammenhang muss herausgestellt werden, dass es sich bei diesen Modellen nicht um kausale Prozessmodelle, sondern empirische Modelle handelt. Sie sind nur für den Datenbereich gültig, mit dem sie aufgestellt wurden. Der Geltungsbereich der für die Durchmesserzuwachsreaktion angepassten Regressionen liegt für die Eingangsvariablen z. B. zwischen 35 % RKL und 15 % FU sowie 72 % RKL und 86 % FU. Extrapolationen über diesen Bereich hinaus sind unzulässig und können unplausible Werte liefern (vgl. Kap. 5.2.1 Durchmesserzuwachs). Das zugrunde liegende Datenmaterial repräsentiert einen Altersrahmen von 35 bis 55 Jahren<sup>74</sup> und eine mittlere

---

<sup>74</sup> Bestandesalter, der entsprechende Rahmen des t1.3-Alters reicht von 29 bis 49 Jahren.

---

Bonität von I.5 nach WENK et al. (1985). Auch das ist bei der „Extrapolation“ bzw. der Übertragung der Ergebnisse auf andere Bereiche zu beachten. Die Analyse von deutlich jüngeren und älteren Bäumen sowie die Einbeziehung von anderen Standorten mit z. B. deutlich niedrigerer oder höherer Bonität können zu anderen Beziehungen führen (vgl. Kap. 5.1.1 Materialdiskussion).

Im übertragenen Sinn gelten die Begrenzungen der Eingangsvariablen auch für die externe Validität der Untersuchung durch die nicht oder nicht vollständig kontrollierbaren koinzidierenden Effekte während des 20jährigen Untersuchungszeitraums wie z. B. den speziellen Witterungsverlauf nach dem Schneebruch von 1981 und in den folgenden Jahren sowie die zeitliche Verkettung von Einflussvariablen. Hier liegt eine Restriktion für die Wiederholbarkeit der Ergebnisse. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass in einer zukünftigen Wiederholungsperiode diese Effekte in anderen Kombinationen mit anderen Auswirkungen auf das Baumwachstum auftreten.

Durch die Auswahl eines „typischen“ Standorts und eines „typischen“ Altersrahmens können die Ergebnisse unter Beachtung der generellen Beschränkungen auf einen großen Bereich der Fichtenfläche Thüringens direkt angewendet werden (vgl. Kap. 3.3.3 Praktische Relevanz und Repräsentanz). Bei dem Altersrahmen handelt es sich zudem um eine ökonomisch und ökologisch wichtige Phase der Bestandesentwicklung (erste Hälfte Durchforstungsphase), die günstige Voraussetzungen für eine effiziente Beeinflussung des Baumwachstums bietet. Das ist ein wesentlicher Vorteil des gewählten Untersuchungsansatzes. Zur Erhöhung der externen Validität müsste die Untersuchung auf einem größeren Standortsspektrum und einem weiteren Altersrahmen wiederholt werden.

## 5.4 Waldbauliche Schlussfolgerungen und Ansätze für weitere Untersuchungen

Aus den Ergebnissen dieser Untersuchung können Hinweise für das waldbauliche Management von Fichtenbeständen in der ersten Hälfte der Durchforstungsphase mit dem zentralen Parameter der relativen Kronenlänge abgeleitet werden. Die folgenden Schlussfolgerungen sind vor dem Hintergrund der methodischen Grenzen der Studie (vgl. Kap. 5.3 Einschränkungen und Grenzen der Übertragbarkeit) als vorläufige Orientierungshilfen zu sehen. Es können Hinweise gegeben werden, welche Fichten am Beginn der Durchforstungsphase als Z-Bäume ausgewählt werden sollten, wie stark diese Bäume für die Erhaltung einer bestimmten relativen Kronenlänge freigestellt werden müssen, welche h/d-Werte zu erwarten sind und welcher Durchmesserzuwachs hiermit verbunden ist. Darauf aufbauend kann auf Nutzungsansätze geschlossen werden, die für die gewünschte Entwicklung auf Bestandesebene erforderlich sind. Weiterhin können Hinweise zur waldbaulichen Gesamtstrategie abgeleitet werden.

### 5.4.1 Einzelbaumebene

Tabelle 24 stellt die h/d-Wertentwicklung über dem Alter<sup>75</sup> für verschiedene Varianten konstanter Kronenlängenentwicklungen dar. Für die Einzelbaumstabilität gegenüber Schneebruch, dem Hauptrisikofaktor für Fichtenjungbestände, kann ein Grenzbereich von h/d 80 bis 90 gezogen werden (u. a. ABETZ 1976 a, b, ABETZ & KLÄDTKE 2002, GÄRTNER 1987, JOHANN 1980, 1981, MEKREL 1975, PRIEN et al. 1985, ROTTMANN 1983). Orange hinterlegt sind in Tabelle 24 stabile h/d-Werte von  $\leq 80$ . Der Übergangsbereich bis zu noch akzeptablen h/d-Werten von  $\leq 90$  ist gelb hinterlegt. Hellgelb markiert sind unter dem Aspekt der Einzelbaumstabilität kritische h/d-Werte von  $\geq 90$ . Aufgrund der Altersabhängigkeit des Zusammenhangs zwischen relativer Kronenlänge und h/d-Wert ergibt sich ein treppenartiges Bild.

In der für Schneebruch besonders anfälligen Entwicklungsphase sollten h/d-Werte von 80 bis 90 möglichst nicht überschritten werden. Nach JOHANN (1981) reicht diese Phase bei der

---

<sup>75</sup> Angegeben ist das absolute Alter der Bäume für eine I.5 Bonität (WENK et al. 1985). Der Altersbereich basiert auf dem mittleren Alter der Untersuchungsbäume im Beobachtungszeitraum und wurde zum Alter 35 geringfügig extrapoliert, um die Anschaulichkeit der Tabellen zu verbessern. Die jeweiligen Durchmesser wurden auf Basis des mittleren Durchmesserzuwachses in Abhängigkeit der relativen Kronenlänge modelliert und mit den Untersuchungsdaten auf Plausibilität geprüft.

Fichte insbesondere bis zu einem Höhenbereich von 15 m Bestandesmittelhöhe<sup>76</sup>. Der Schwerpunkt des 1981er Schneebruchs im Thüringer Wald lag in der II. Altersklasse (GÄRNTER 1987).

**Tabelle 24:** h/d-Wertentwicklung über dem Alter<sup>77</sup> für verschiedene Kronenlängenvarianten bei isometrischem Wachstum der relativen Kronenlänge

RKL (%)	id (mm*Jahr <sup>-1</sup> )	h/d (35 Jahre)	h/d (40 Jahre)	h/d (45 Jahre)	h/d (50 Jahre)	h/d (55 Jahre)	h/d 60 (60 Jahre)
35	2,8	108	105	103	100	98	95
40	3,6	103	100	98	95	92	90
45	4,3	97	95	92	90	87	85
50	5,1	92	89	87	84	82	79
55	5,9	87	84	82	79	77	74
60	6,7	81	79	76	74	71	69
70	8,3	71	68	66	63	61	58
75	9,1	66	63	61	58	55	53

Tabelle 25 gibt Varianten des Durchmesserwachstums für dieselben konstanten Kronenlängenentwicklungen (isometrisches Wachstum der relativen Kronenlänge) wie in Tabelle 24 an. Mit hohem Durchmesserzuwachs ist in der Regel ein schneller Wertzuwachs verbunden. Allerdings setzt u. a. die mit zunehmender Jahrringbreite abnehmende Holzqualität hier Grenzen (GRAMMEL 1990, SEELING 2001, SEELING et al. 2004). Nach

<sup>76</sup> Dieser Höhenbereich fällt bei den Wuchsbedingungen Thüringens mit der zweiten Hälfte der II. AKL zusammen.

<sup>77</sup> Siehe Fußnote Nr. 75.

dem neuesten Stand der Sortierkriterien der DIN 4074<sup>78</sup> für die visuelle Sortierung von Kanthölzern nach der Tragfähigkeit schließen Jahrringbreiten von über 4 mm die höchstmöglichen Verwendungsmöglichkeiten für Fichtenrundholz im Bausektor aus (GLOS & RICHTER 2002). Die mittleren Durchmesserzuwächse sollten daher im Interesse der resultierenden Schnittholzqualität 8 mm nicht überschreiten (vgl. SEIFERT et al. 2003 b).

**Tabelle 25:** Projektion des Durchmesserwachstums verschiedener Kronenlängenvarianten über dem Alter<sup>79</sup> bei isometrischem Wachstum der relativen Kronenlänge

RKL (%)	id (mm*Jahr <sup>-1</sup> )	BHD (35 Jahre)	BHD (40 Jahre)	BHD (45 Jahre)	BHD (50 Jahre)	BHD (55 Jahre)	BHD (60 Jahre)
35	2,8	9,7	11,1	12,5	13,9	15,3	16,7
40	3,6	12,5	14,2	16,0	17,8	19,6	21,4
45	4,3	15,2	17,4	19,6	21,7	23,9	26,1
50	5,1	18,0	20,5	23,1	25,7	28,2	30,8
55	5,9	20,7	23,7	26,6	29,6	32,5	35,5
60	6,7	23,5	26,8	30,2	33,5	36,9	40,2
70	8,3	29,0	33,1	37,2	41,4	45,5	49,6
75	9,1	31,7	36,2	40,8	45,3	49,8	54,3

Orange hinterlegt sind in Tabelle 25 Bereiche, bei denen eine Qualitätsabstufung des produzierten Schnittholzes aufgrund zu großer Jahrringbreite mit großer Sicherheit ausgeschlossen werden kann. Gelb hinterlegt ist ein Bereich, bei dem ein Ausschluss der höchstmöglichen Verwendungsmöglichkeit nach DIN 4074 wahrscheinlich erscheint und der

<sup>78</sup> Die DIN 4074 wurde herangezogen, da sich die EU-Rundholznormen zur Qualitätssortierung immer noch in der Entwurfsphase befinden.

<sup>79</sup> Siehe Fußnote Nr. 75.

zu einem kritischen Bereich mit hellgelber Hinterlegung überleitet, bei dem die höchste Sortierklasse sicher ausgeschlossen werden kann<sup>80</sup>.

Die Z-Baum Auswahl erfolgt nach den allgemeinen Kriterien Vitalität (Stabilität), Qualität und Verteilung (SCHÄDELIN 1936, ABETZ 1975, TMLNU 2000 b). Bei Vernachlässigung der Verteilung besteht vor allem ein Zielkonflikt zwischen Vitalität und Qualität<sup>81</sup>. Zur Lösung dieses Zielkonflikts können anhand der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit und der o. a. Zusammenhänge und auf Einzelbaumebene folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

1. Als Kompromiss zwischen Vitalität (Stabilität) und Qualität erscheint für Fichten-Z-Bäume eine relative Kronenlänge von 50 bis 60 % geeignet.

Zu Beginn der Durchforstungsphase sollte die relative Kronenlänge 60 % betragen, um eine ausreichende Einzelbaumstabilität zu erzielen. Dies kann durch eine entsprechende Z-Baumauswahl gewährleistet werden. Z-Bäume mit weniger als 50 % RKL bergen zu Beginn der Durchforstungsphase ein hohes Schneebruchrisiko (Tabelle 24) und sollten nicht ausgewählt werden. Mit über 70 % relativer Kronenlänge sind jüngere Fichten zwar individuell sehr stabil, allerdings können zu große Jahrringbreiten zu Abstufungen der resultierenden Schnittholzqualität führen (Tabelle 24 und Tabelle 25).

Gegen Ende der ersten Hälfte der Durchforstungsphase ist für eine ausreichende Einzelbaumstabilität der Z-Bäume auch eine relative Kronenlänge von 50 % ausreichend (Tabelle 24). Hiermit ist allerdings ein Verlust an Durchmesserwachstum verbunden (Tabelle 25). Die relative Kronenlänge der Z-Bäume sollte daher generell nicht unter 50 % sinken.

Abstriche in der Holzqualität nach DIN 4074 aufgrund zu großer Jahrringbreiten sind erst bei relativen Kronenlängen von deutlich über 65 bis 70 % zu erwarten (Tabelle 25). Die relative Kronenlänge der Z-Bäume sollte daher 65 bis 70 % generell nicht übersteigen.

2. Bei einer reinen Schätzung der relativen Kronenlänge ist in Abhängigkeit der Bestandesdichte mit einer systematischen Unterschätzung von rund 10 Prozentpunkten zu rechnen. Die Schätzung sollte daher vor allem in dichten Beständen durch eichende Messungen unterstützt werden.

<sup>80</sup> Rundholz- und Schnittholzqualität sind nicht Gegenstand dieser Arbeit. Im Rahmen des Projektes „Zukunftsorientierte Fichtenwirtschaft“ (ZFW) werden diese Aspekte für die 63 Zentralbäume der vorliegenden Untersuchung in Teilprojekten am Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft der Universität Freiburg und der Thüringer Fachhochschule für Forstwirtschaft Schwarzburg eingehend untersucht (FREISE 2003).

<sup>81</sup> Ein weiterer wichtiger Faktor der Qualität von Fichtenrundholz ist die Astigkeit, die mit Bezug zur Holzqualität nicht Gegenstand dieser Untersuchung aber im Gesamtprojekt ZFW eingehend untersucht wird (vgl. Fußnote Nr. 80).

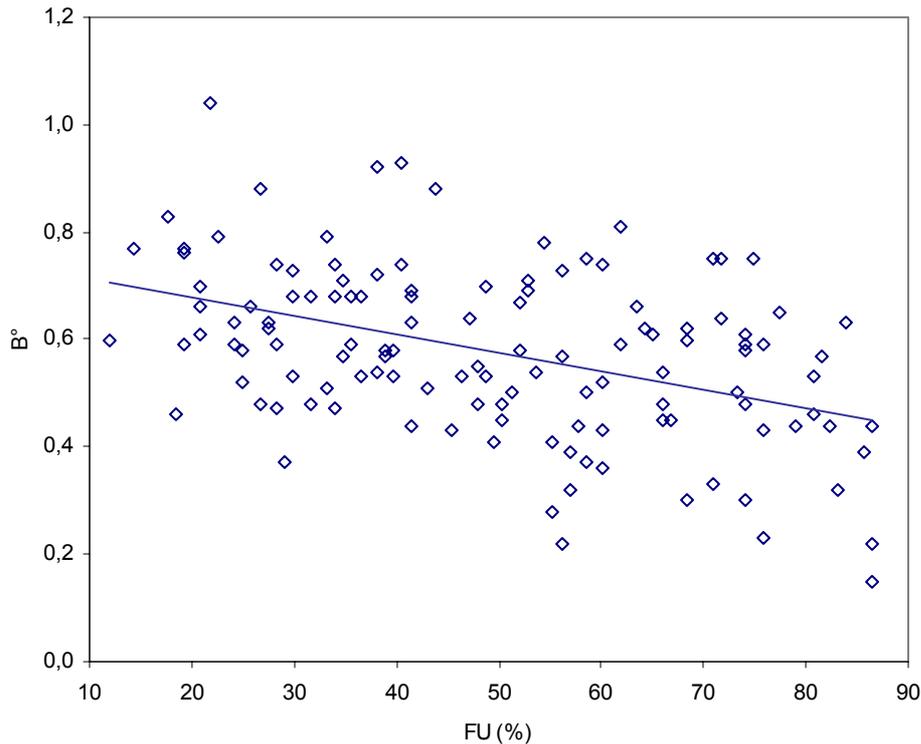
3. Für die Aufrechterhaltung einer konstanten relativen Kronenlänge (isometrisches Wachstum der relativen Kronenlänge) müssen Fichten im Durchschnitt auf dem Anteil ihres Kronenumfangs freigestellt werden, der der gewünschten konstanten relativen Kronenlänge + 5 entspricht ( $FU = RKL + 5$ ). Bei einer relativen Kronenlänge von 50 % müssen Fichten-Z-Bäume also im Mittel auf mindestens der Hälfte ihres Kronenumfangs frei von Konkurrenten sein.

Es ist zwar möglich, die relative Kronenlänge von Z-Bäumen durch Freistellung in 10 Jahren um bis zu 10 Prozentpunkte auszubauen (vgl. Kap. 4.3 Reaktion der relativen Kronenlänge). Damit kann theoretisch auch ein Baum von 35 % RKL am Beginn der Durchforstungsphase in zwei Jahrzehnten über 50 % erreichen. Dafür ist allerdings eine vollständige Freistellung erforderlich. Es ist fraglich, ob ein Baum mit niedriger individueller Stabilität diesen Risikoanstieg mit vertretbarer Wahrscheinlichkeit überleben würde bzw. ob ein Baum oder ein ganzer Bestand einem derartigen Risiko überhaupt ausgesetzt werden sollte. Eine schwächere Freistellung mit geringerem Risiko würde nicht zur gewünschten Kronenlängenentwicklung führen.

Im Untersuchungsbestand hat keine Fichte mit einer relativen Kronenlänge von weniger als rund 40 % den 1981er Schneebruch ohne erhebliche Schäden überstanden. Im Mittel lag die relative Kronenlänge der Fichten des Untersuchungskollektivs, die bis heute überlebt haben, im Jahr 1981 (40 Jahre) bei 58 % mit einer Standardabweichung von 7,8 Prozentpunkten.

#### **5.4.2 Bestandesebene**

Freistellungsgrad der Zentralbäume (FU) und Bestockungsgrad ( $B^\circ$ ) sind signifikant negativ korreliert, der Zusammenhang fällt allerdings nicht besonders eng aus (Abbildung 19). Mit einer einfachen linearen Regression können mit dem Anteil des freien Kronenumfangs der Zentralbäume (FU) nur 18 % der Streuung des Bestockungsgrades erklärt werden. Der Bestockungsgrad beschreibt als typischer Bestandesparameter die mittleren Verhältnisse des gesamten Probekreises, die aber nur zum Teil die Konkurrenzsituation des Zentralbaumes erklären, die durch feiner aufgelöste räumliche Beziehungen bestimmt wird (vgl. Kap. 4.1.3 Konkurrenzparameter).



**Abbildung 19:** Beziehung zwischen Bestockungsgrad ( $B^\circ$ ) und Anteil des freien Kronenumfanges der Zentralbäume (FU)

Die beiden Größen korrelieren signifikant mit  $r = -0,430$ . Eine einfache lineare Regression ergibt sich in der Form  $B^\circ = 0,745 - 0,003 \cdot (FU)$  mit  $r^2 = 0,178$ . Trotz des geringen Bestimmtheitsmaßes deutet sich an, dass bei einem Freistellungsgrad von 50 % ein Bestockungsgrad von  $B^\circ = 0,6$  im Anhalt an die Fichtenertragstafel von WENK et al. (1985) erforderlich ist, wenn der gesamte Bestand aus Z-Bäumen mit entsprechender Freistellung besteht. Dies ist in der Realität nicht der Fall und wird konzeptionell auch nicht angestrebt (vgl. TMLNU 2000). Es kann davon ausgegangen werden, dass der angegebene Bestockungsgrad in der Realität höher liegen kann. Geht man davon aus, dass die Hälfte des Bestandes von Z-Bäumen geprägt wird und setzt für die andere Hälfte einen Zielbestockungsgrad von 0,9 an, ergibt sich ein Gesamtbestockungsgrad von 0,75.

Trotzdem deutet sich in Abbildung 19 an, dass für einen Freistellungsgrad von  $FU = 50\%$  Bestandesdichten von rund  $B^\circ 0,6$  erforderlich sind<sup>82</sup>. Dabei wird davon ausgegangen, dass der gesamte Bestand flächig von Z-Bäumen gebildet wird. Das wird in der Realität nicht angestrebt. Geht man davon aus, dass die Hälfte des Bestandes von Z-Bäumen geprägt wird und setzt für die andere Hälfte einen Zielbestockungsgrad von 0,9 an, ergibt sich ein Gesamtbestockungsgrad von 0,75. Werden zwei Drittel der Bestandesfläche von Z-Bäumen geprägt, liegt der Gesamtbestockungsgrad bei 0,7. Liegt der Zielbestockungsgrad für die Restfläche bei 1,0 betragen die Gesamtbestockungsgrade 0,8 bzw. 0,73 (vgl. TLWJF 2003).

<sup>82</sup> Bei diesen Werten muss beachtet werden, dass sie aufgrund des zur Verfügung stehenden Datenmaterials und des Einflusses von „Nullkonkurrenzphasen“ die Bestandesdichte tendenziell unterschätzen (vgl. Kap. 4.3.1 Anpassung der Schätzfunktionen der relativen Kronenlänge am Ende des Bezugszeitraums (ERKL)).

Nach dem derzeitigen Erkenntnisstand sind negative Auswirkungen auf die Gesamtwuchsleistung der Bestände bei richtiger Z-Baumauswahl und rechtzeitigen Eingriffen nicht zu befürchten (KRAMER 1988). Die gleiche Bestandesbehandlung kann sich in verschiedenen Altern sehr unterschiedlich auf den periodischen Zuwachs auswirken. Junge Fichtenbestände reagieren auf starke Absenkungen des Bestockungsgrades mit positiver Zuwachsdynamik (ASSMANN 1961, SCHOBER 1980, WIEDEMANN 1951, vgl. THOMASIIUS & BUTTER 1984). Das geht ebenfalls aus der Auswertung der in Südthüringen liegenden Versuchsreihe „Dietzhausen“ zum Fichtenschnellwuchsbetrieb hervor (DITTMAR 1959, 1961). Nach BRYNDUM (1978) wird die Gesamtwuchsleistung in einem sehr weiten Rahmen von einer mittleren relativen Grundflächenhaltung von 100 bis 55 % bei allen Bonitäten der Baumart Fichte kaum von der Durchforstungsstärke beeinflusst (MITSCHERLICH 1952, SPIECKER 1986, 1991 a, WEISE 1995).

**Tabelle 26:** Zeiträume<sup>83</sup> zur Erreichung von üblichen Zieldurchmessern für verschiedene Kronenlängenvarianten bei isometrischem Wachstum der relativen Kronenlänge

RKL	id	Ziel-BHD 40 cm	Ziel-BHD 50 cm	Ziel-BHD 60 cm
(%)	(mm*Jahr <sup>-1</sup> )	Alter (Jahre)	Alter (Jahre)	Alter (Jahre)
35	2,8	144	180	216
40	3,6	112	140	168
45	4,3	92	115	138
50	5,1	78	97	117
55	5,9	68	85	101
60	6,7	60	75	90
70	8,3	48	60	73
75	9,1	44	55	66

<sup>83</sup> Siehe Fußnote Nr. 75.

Tabelle 26<sup>84</sup> zeigt anhand der Durchmesserentwicklung verschiedener Kronenlängenvarianten, wie schnell gebräuchliche Zieldurchmesser von 40 bis 60 cm BHD erreicht werden können (vgl. TMLNU 2000 b). Ohne Qualitätseinbußen der resultierenden Schnittholzprodukte aufgrund zu großer Jahrringbreiten nach DIN 4074 sind bei durchschnittlich 60 % relativer Kronenlänge Zieldurchmesser von 40 cm bereits mit 60 Jahren und 50 bis 60 cm mit 75 bis 90 Jahren möglich. Mit größeren relativen Kronenlängen von 70 % und mehr können die Zieldurchmesser noch früher erreicht werden. Allerdings ist dann aufgrund zu großer Jahrringbreiten nicht mehr die höchste Sortierklasse für das produzierte Schnittholz möglich.

Auf Bestandesebene können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

1. Die für die Z-Baumentwicklung mit 50 bis 60 % relativer Kronenlänge erforderlichen Freistellungsgrade müssen auf Bestandesebene mit entsprechenden Nutzungsansätzen untersetzt werden. Ein Bestockungsgrad von 0,8 bis 0,7 kann hierbei als Orientierung dienen.
2. Bei durchgängig 60 % relativer Kronenlänge können 40 bis 60 cm Zieldurchmesser bereits in einem Alter von 60 bis 90 Jahren erreicht werden.

### 5.4.3 Waldbauliche Strategie

Individuelle und kollektive Stabilität können in Z-Baum orientierte Waldbaukonzepte durch eine grundsätzlich differenzierte Behandlung der Bestände integriert werden. Ausreichend starke Eingriffe am Z-Baum sorgen für ein Gerüst an individuell stabilen Bäumen<sup>85</sup>. Je nach Zustand des einzelnen Bestandes können sie mit Eingriffen in den Zwischenfeldern kombiniert werden. Hier kann unter stärkerer Beachtung der kollektiven Stabilität also mit evtl. geringerer Eingriffsstärke aber immer im Herrschenden eingegriffen werden. Mit diesem

<sup>84</sup> Die Farbliche Markierung erfolgte analog zu Tabelle 25. Orange – höchste Sortierklasse des resultierenden Schnittholzes aufgrund der Jahrringbreite nach DIN 4074 möglich; gelb (Übergangsbereich) – höchste Sortierung nicht sicher; hellgelb – höchste Sortierung ausgeschlossen.

<sup>85</sup> Die Z-Baumzahlen dürfen dabei nicht zu hoch liegen. SCHÜTZ (1989) empfiehlt für das Lichtmanagement im Rahmen der Überführung in dauerwaldartige Strukturen, die auch für die Fichtenbestände Thüringens angestrebt werden, eine Anzahl von 40 bis 60 Gerüstbäumen pro ha. Diese Gerüstbäume sollten so stabil sein, dass sie den Verjüngungszeitraum sicher überleben, bis die nachwachsende Verjüngung in die herrschende Bestandesschicht eingewachsen ist. Die Thüringer Walbaurichtlinie für Fichtenbestände gibt 150 bis 200 Z-Bäume pro ha als Obergrenze vor (TMLNU 2000 b).

einfachen Konzept, das auf Bestandesebene mit ausreichenden Gesamteingriffsstärken unter-  
setzt sein muss, kann flexibel und zielorientiert auf nahezu jede Bestandessituation eingegan-  
gen werden (ERHARDT et al. 2005).

Diese Prinzipien ergeben sich auch aus den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung: je  
kürzer die Kronen der Fichten zum Zeitpunkt des Schneebruchs 1981 waren, desto mehr  
waren sie auf den kollektiven Deckungsschutz des Bestandes angewiesen, um den Bruch zu  
überleben. Bestockungsgrad und Freistellungsgrad korrelieren unmittelbar nach dem Schnee-  
bruch signifikant mit  $r = -0,317$ . D. h. je größer die Krone, desto stärker wurde sie durch den  
Schneebruch freigestellt und umgekehrt.

WEISE (1995) unterstreicht, dass Bestände aus langkronigen Bäumen auch in höherem Alter  
auf Auflichtungen mit positivem Zuwachs reagieren und sich dadurch von herkömmlich  
behandelten Fichten des Altersklassenwaldes unterscheiden (vgl. SEIFERT et al. 2003 a,  
SPIECKER 1986). WEISE (1995) empfiehlt eine früh einsetzende Pflegephase<sup>86</sup>, die mit  
starken Eingriffen ausreichende Kronendimensionen erhält und ohne nachlassende  
Durchforstungsintensität fließend in die Verjüngungsphase überleitet (vgl. FREISE 2003).

Über die relative Kronenlänge kann das Durchmesserwachstum der untersuchten Fichten  
deutlich gesteigert werden. Das höhere Durchmesserwachstum bietet unter Beachtung von  
Qualitätsgrenzen die Möglichkeit, Produktionszeiträume zu verkürzen (Durchmesser-  
zuwachs), das Risiko zu minimieren (Stabilität und Vitalität) und die Flexibilität der Bestände  
zu erhöhen (Durchmesserspreite, auflaufende Verjüngungsvorräte).

Ökonomisch wirken sich nicht nur das geringere Risiko und die höhere Flexibilität, sondern  
auch die mit den höheren Durchforstungsansätzen anfallenden Nutzungsmengen positiv aus  
(KNOKE 1998). Insgesamt kann damit ein Beitrag zur Verbesserung der Voraussetzungen für  
die Überführung in naturnähere und flexiblere Waldaufbauformen geleistet werden  
(ARENHÖVEL 1996, EPP & SPIECKER 2005, ECKHARDT 1994, 1996,  
HAHNEWINKEL 1996, KYNAST 1995, SCHÜTZ 1999, 2001, TMLNU 2000 a, b)

---

<sup>86</sup> Dem richtigen Zeitpunkt der Erstdurchforstung mit Z-Baum-Auswahl und ausreichender Freistellung kommt  
vor diesem Hintergrund eine besondere Bedeutung zu. Die Erstdurchforstung darf nicht zu spät einsetzen, um nicht  
die Phase zu verpassen, in der die relative Kronenlänge der vorherrschenden Fichten noch deutlich über 50 % liegt.  
Sie sollte aber auch nicht zu früh einsetzen, da sich ansonsten die relativen Kronenlängen noch auf zu hohem  
Niveau bewegen. Aufgrund der hohen Dynamik der Entwicklung der relativen Kronenlänge in dieser Phase  
(KRAMER 1962) ergibt sich für jeden Fichtenbestand je nach Bonität und Bestandesbegründung für die  
Erstdurchforstung ein optimales Zeitfenster von deutlich unter einem Jahrzehnt bis hin zu wenigen Jahren.

Für die waldbauliche Gesamtstrategie können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

1. Die Prinzipien der individuellen und kollektiven Stabilität können über ausreichend starke Eingriffe an den Z-Bäumen und variable Eingriffe in den Zwischenfeldern integriert werden.
2. Die Pflegephase sollte möglichst früh einsetzen und mit ausreichend starken Eingriffen fließend in die Verjüngungsphase überleiten.

## 6 Zusammenfassung

Mit der Untersuchung der einfach anzusprechenden relativen Kronenlänge als Steuerungsparameter des Einzelbaumwachstums der Fichte (*Picea abies* [L.] Karst.) soll ein Beitrag zur praktischen Umsetzung moderner Waldbaukonzepte geleistet werden. Diese Konzepte streben über stabile Einzelbäume die Überführung bisheriger altersklassengeprägter Reinbestände in strukturreichere Bestände mit höherer gesamtbetrieblicher Stabilität und Flexibilität an. Die aktuellen Thüringer Waldbaurichtlinien geben vor diesem Hintergrund als zentrales Kriterium für Z-Bäume bei der Fichte relative Kronenlängen von 50 % und h/d-Werte unter 80.<sup>87</sup>

Auf Einzelbaumebene wurde insbesondere Durchmesserzuwachs und h/d-Wert-Entwicklung in Abhängigkeit der relativen Kronenlänge und der Konkurrenz untersucht sowie die Entwicklung der relativen Kronenlänge selbst in Abhängigkeit ihrer Ausgangsgröße und der Konkurrenz analysiert. Die Untersuchung wurde als praxisnahe Fallstudie nach einem retrospektiven Ansatz durchgeführt. Die Materialauswahl zielte darauf ab, die Streuung der interessierenden Parameter (vor allem der relative Kronenlänge) möglichst groß und die Streuung der übrigen Parameter möglichst klein zu halten.

Das Untersuchungsmaterial wurde aus einem 57jährigen Fichtenbestand am Südfall des Thüringer Waldes gewonnen. Der Bestand entspricht in etwa mittleren Thüringer Verhältnissen und repräsentiert aufgrund seiner Altersklasse und Dimensionsstruktur einen Schwerpunkt der aktuellen Durchforstungstätigkeit. Als Besonderheit weist er als Folge eines massiven Schneebruchereignisses aus dem Jahr 1981 hohe Spannweiten an Einzelbaumparameter wie z. B. der relativen Kronenlänge auf.

Mit einem zweistufigen Stichprobenkonzept wurden 63 Fichten mit einer relativen Kronenlänge von 29 bis 75 % (im Mittel 53 %) und Brusthöhendurchmessern zwischen 14,2 und 59,3 cm (im Mittel 30,0 cm) ausgewählt. Die Fichten wurden stehend vermessen und anschließend für die Durchführung einer Stammanalyse und Rekonstruktion der Kronenlängenentwicklung eingeschlagen. Gleichzeitig bildeten die 63 Fichten als Zentralbäume jeweils den Mittelpunkt eines Probekreises bei dem in einem Radius von 8 m alle weiteren Bäume zur Quantifizierung der Konkurrenz stehend vermessen wurden. Als Konkurrenzindices wurden u. a. auf Basis des

---

<sup>87</sup> Die vorliegende Arbeit ist thematisch in das Kooperationsprojekt „Zukunftsorientierte Fichtenwirtschaft“ (ZFW) eingebunden.

APA-Index<sup>88</sup> (Area Potentially Available) nach MOORE et al. (1973) u. NANCE et al. (1988) eine dimensionsbereinigte Form des APA als APAR (Area Potentially Available Relative) abgeleitet und der prozentuale Anteil des nicht durch Konkurrenten bedrängten Kronenumfangs (FU) als Konkurrenzparameter entwickelt.

Das Wachstum und die Konkurrenzsituation der 63 Fichten konnten für einen 20jährigen Untersuchungszeitraum rekonstruiert werden. Ein besonderer methodischer Schwerpunkt bildete die Rekonstruktion der relativen Kronenlänge. Hierzu wurde neben der Rekonstruktion des Absterbezeitpunkts von Ästen entnommener Totastquirle ein Verfahren auf Grundlage des PRESSLER'schen Gesetzes angewandt, mit dem der Kronenansatz anhand des typischen Verteilungsmusters des jährlichen Grundflächenzuwachses am Baumschaft identifiziert werden kann. Nach einer deskriptiven Analyse der grundsätzlichen Zusammenhänge und Einflussgrößen wurden die der Datenanalyse zugrunde liegenden Nullhypothesen insbesondere mit statistisch-mathematischen Verfahren der multiplen Regressionsanalyse getestet.

Der mittlere jährliche Durchmesserzuwachs im Beobachtungszeitraum der untersuchten Zentralbäume beträgt 1,9 bis 11,0 mm\*Jahr<sup>-1</sup>. Die höchsten Durchmesserzuwächse haben die Bäume mit den größten relativen Kronenlängen und der geringsten Konkurrenz. Mit einem Zwei-Variablen-Modell aus relativer Kronenlänge und Konkurrenz (APAA bzw. FU) können 75 bzw. 73 % der Streuung des mittleren jährlichen Durchmesserzuwachses erklärt werden. Nach den angepassten Regressionsfunktionen ist die relative Kronenlänge die zentrale Variable dieses Zusammenhangs und beeinflusst den Durchmesserzuwachs stärker als die Konkurrenz.

Die mittlere relative Kronenlänge der Zentralbäume fällt im Beobachtungszeitraum aufgrund überwiegend ansteigender Bestandesdichten in den Probekreisen von 58 auf 53 %. Die Spannbreite der rekonstruierten Kronenlängenentwicklung reicht bei einzelnen Bäumen von +19 bis -24 Prozentpunkten. Die relative Kronenlänge steigt mit sinkender Konkurrenz. Mit einem Zwei-Variablen-Modell aus der relativen Kronenlänge am Anfang eines 10jährigen Beobachtungszeitraums und der mittleren Konkurrenz (APAA, FU) können 88 bzw. 89 % der Streuung des Endwertes der relativen Kronenlänge erklärt werden. Die maßgeblich

---

<sup>88</sup> Die „klassische“ Form des APA-Index in der Herleitung nach MOORE et al. (1973) und NANCE et al. (1988) wird in dieser Arbeit als APAA (Area Potentially Available Absolute) bezeichnet. Diese Bezeichnung dient der Abgrenzung zu dem Konkurrenzindex APAR (Area Potentially Available Relative), der als dimensionsbereinigte Form aus dem APAA abgeleitet wurde.

beeinflussenden Regressoren dieser Schätzfunktionen sind die Konkurrenzvariablen. Die Ergebnisse können auf eine Faustformel für isometrisches Wachstum der relativen Kronenlänge verdichtet werden: Für die Aufrechterhaltung einer konstanten relativen Kronenlänge müssen Fichten im Durchschnitt auf dem Anteil ihres Kronenumfangs von Konkurrenten freigestellt werden, der der gewünschten konstanten relativen Kronenlänge + 5 entspricht.

Die mittleren h/d-Werte der Zentralbäume im Beobachtungszeitraum liegen zwischen 49 und 105 (im Mittel 79). Zwischen relativer Kronenlänge und h/d-Wert zeigt sich auf Einzelbaumebene ein signifikanter Zusammenhang. Die größten und zuwachsstärksten Bäume mit den dementsprechenden Kronen haben die niedrigsten h/d-Werte. Einen weiteren Erklärungsbeitrag liefert das Alter. Jüngere Fichten benötigen für den gleichen h/d-Wert größere relative Kronenlängen als ältere Bäume. Mit einem Zwei-Variablen-Modell aus relativer Kronenlänge und Alter können 65 % der Streuung des mittleren h/d-Wertes im Beobachtungszeitraum erklärt werden.

Die Untersuchung trägt den Charakter einer Fallstudie. Die Materialauswahl ist nicht statistisch repräsentativ. Die Ergebnisse sollten daher unter Beachtung der methodischen Grenzen mit entsprechender Vorsicht verallgemeinert werden. Vor einer generellen Übertragung bedürfen sie einer weiteren empirischen Absicherung auf breiterer Datenbasis. Bis dahin können sie mit Einschränkungen als Orientierungshilfe für das waldbauliche Management von Fichtenbeständen in der Durchforstungsphase dienen.

Für die waldbauliche Praxis zeichnet sich vor diesem Hintergrund als Kompromiss zwischen Vitalität (Stabilität,  $h/d \leq 80$ ) und Qualität ( $ir \leq 4$  mm für die höchstmögliche Verwendung nach DIN 4074) für Fichten-Z-Bäume eine relative Kronenlänge von 50 bis 60 % als geeignet ab. Die für die Z-Baumentwicklung mit 50 bis 60 % relativer Kronenlänge erforderlichen Freistellungsgrade müssen auf Bestandesebene mit ausreichenden Nutzungsansätzen unteretzt werden. Bei 60 % relativer Kronenlänge (isometrisches Wachstum) können 40 bis 60 cm Zieldurchmesser ohne Qualitätseinbußen aufgrund zu großer Jahrringbreiten bereits in einem Alter von 60 bis 90 Jahren erreicht werden. Die waldbauliche Gesamtstrategie sollte daher darauf abzielen, mit der Durchforstungsphase zu einem (frühen) Zeitpunkt einzusetzen, bei dem sich die relative Kronenlänge noch auf einem Niveau von 50 bis 60 % bewegt und anschließend mit ausreichend starken Eingriffen fließend in die Verjüngungsphase überzuleiten.

## 7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung des „Gesetzes der Konstanz des jährlichen Grundflächenzuwachses am Baumschaft bis zum Kronenansatz“ (PRESSLER 1864) nach MITCHELL (1975) leicht verändert.....	16
Abbildung 2: Topografische Lage des Untersuchungsstandorts.....	22
Abbildung 3: Vergleich der ersten Stichprobe (n = 240) mit der zweiten Stichprobe (n = 63) .....	29
Abbildung 4: Charakterisierung der Konkurrenzsituation der Zentralbäume durch den Anteil des freien Kronenumfangs (FU).....	32
Abbildung 5: Unterschiedliche Kronen- und Astmorphologie bei gleicher relativer Kronenlänge.....	35
Abbildung 6: Methodenvergleich zur Rekonstruktion der RKL am Beispiel des Zentralbaumes Nr. 6 .....	43
Abbildung 7: Baumhöhe, Kronenansatz, Lichtkronenansatz, relative Kronenlänge und h/d-Wert der Zentralbäume zum Aufnahmezeitpunkt über dem BHD (n=63).....	59
Abbildung 8: FU, APAA, NAM und GAM der Zentralbäume zum Aufnahmezeitpunkt über dem BHD (n = 63).....	62
Abbildung 9: Beziehung zwischen jährlichem Durchmesserzuwachs (id), relativer Kronenlänge (RKL) und Anteil des freien Kronenumfangs (FU).....	69
Abbildung 10: Vergleich des beobachteten und des projizierten Durchmesserwachstum über dem t1.3-Alter der Zentralbäume .....	71
Abbildung 11: Chronologie des Durchmesserzuwachses aller Zentralbäume (n = 63).....	72
Abbildung 12: Schwankungen des Niederschlags (Station Neufang, 626 m ü. NN).....	73
Abbildung 13: „Nullkonkurrenzphasen“ am Beispiel Zentralbaum Nr. 71 .....	80
Abbildung 14: Beziehung zwischen Relativer Kronenlänge am Ende (ERKL) sowie Relativer Kronenlänge am Anfang einer 10jährigen Beobachtungsperiode (ARKL) und Anteil des freien Kronenumfangs (FU) .....	82
Abbildung 15: Korrelation $\Delta$ RKL mit FU und ARKL .....	85

---

Abbildung 16: Alterseinfluss auf die Beziehung zwischen h/d-Wert und relativer Kronenlänge anhand der beobachteten Wertepaare der Jahre 1982 und 2001.....	94
Abbildung 17: Beziehung zwischen h/d-Wert (h/d), relativer Kronenlänge (RKL) und Alter .....	95
Abbildung 18: Dreidimensionales Konkurrenzmodell auf Basis des Konzeptes der beschattenden Biomasse (verändert nach SPATHELF 1999).....	114
Abbildung 19: Beziehung zwischen Bestockungsgrad ( $B^\circ$ ) und Anteil des freien Kronenumfangs der Zentralbäume (FU) .....	125

## 8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Kennwerte des Untersuchungsstandortes.....	23
Tabelle 2:	Bestandeskennwerte .....	24
Tabelle 3:	Altersklassentabelle Fichte im Landeswald Thüringen .....	26
Tabelle 4:	Matrix der möglichen Ergebnisse der ersten Stichprobe .....	28
Tabelle 5:	Rekonstruktion des Kronenansatzes im Anhalt an OTTORINI et al. (1996) am Beispiel des Zentralbaumes Nr. 32.....	40
Tabelle 6:	Übersicht aller analysierten Variablen .....	52
Tabelle 7:	Korrelation BHD mit Kronenmantelfläche (KMF), Kronenvolumen (KV), Kronenschirmfläche (KSF), Kronenbreite (KB) und relativer Kronenlänge (RKL) .....	55
Tabelle 8:	Korrelation RKL mit Kronenmantelfläche (KMF), Kronenvolumen (KV), Kronenschirmfläche (KSF) und Kronenbreite (KB).....	55
Tabelle 9:	Korrelation RKL und BHD mit aus Astmessungen abgeleiteten Kronenparametern.....	57
Tabelle 10:	Korrelation zwischen BHD, Baumhöhe (h), h/d, Kronenansatzhöhe (KA), Lichtkronenansatzhöhe (LKA) und relativer Kronenlänge (RKL).....	58
Tabelle 11:	Korrelation von BHD, relativer Kronenlänge (RKL) und Höhe des Lichtkronenansatzes (LKA) mit Konkurrenzmaßen.....	61
Tabelle 12:	Korrelation des mittleren Durchmesserzuwachses (id) eines 20jährigen Bezugszeitraums zur mittleren RKL (M) bzw. mittlerem APAR(M) und den entsprechenden Werten am Anfang (A) und Ende (E) des Bezugszeitraums.....	64
Tabelle 13:	Regressionsgleichungen zur Schätzung des mittleren jährlichen Durchmesserzuwachses (id) von 1, 5, 10 und 20jährigen Perioden als eine Funktion der relativen Kronenlänge (RKL) und Area Potentially Available Absolute (APPA) bzw. Area Potentially Available Relative (APAR).....	66

Tabelle 14:	Schätzung des Anteils des freien Kronenumfangs (FU) aus der Area Potentially Available Relative (APAR) .....	67
Tabelle 15:	Regressionsgleichungen zur Schätzung des mittleren jährlichen Durchmesserzuwachses ( $id$ ) von 1, 5, 10 und 20jährigen Perioden als eine Funktion der relativen Kronenlänge (RKL) und des Anteils des freien Kronenumfangs (FU) .....	68
Tabelle 16:	Regressionsgleichungen zur Schätzung der relativen Kronenlänge am Ende des Bezugszeitraums (ERKL) von 5, 10 und 20jährigen Perioden als eine Funktion der relativen Kronenlänge am Anfang (ARKL) und der Area Potentially Available Absolute (APPA) bzw. Area Potentially Available Relative (APAR) .....	77
Tabelle 17:	Regressionsgleichungen zur Schätzung der relativen Kronenlänge am Ende des Bezugszeitraums (ERKL) von 5, 10 und 20jährigen Perioden als eine Funktion der relativen Kronenlänge am Anfang (ARKL) und des Anteils des freien Kronenumfangs (FU) .....	78
Tabelle 18:	Regressionsgleichungen zur Schätzung der durchschnittlichen jährlichen Veränderungsrate der relativen Kronenlänge ( $\Delta RKL$ ) im Bezugszeitraum durch die relative Kronenlänge am Anfang (ARKL) und den mittleren Anteil des freien Kronenumfangs (FU) .....	83
Tabelle 19:	Freistellungsgrade als Anteil des freien Kronenumfangs (FU) zur Aufrechterhaltung eines isometrischen Wachstums der relativen Kronenlänge über eine 10jährige Periode nach Gleichung 38 und 39.....	88
Tabelle 20:	Faktorladungsmatrix der Hauptachsenanalyse.....	90
Tabelle 21:	Regressionsgleichungen zur Schätzung des h/d-Wertes ( $hd$ ) von 1, 5, 10 und 20jährigen Perioden als eine Funktion der relativen Kronenlänge (RKL) und des Alters.....	92
Tabelle 22:	Vergleich der beobachteten und projizierten maximalen Veränderungsrate des h/d-Wertes über einen Zeitraum von 20 Jahren.....	96
Tabelle 23:	Literaturangaben des mittleren Durchmesserzuwachses ( $id$ ) und der relativen Kronenlänge (RKL) im Vergleich mit der Schätzfunktion aus Kap. 4.2.1 Anpassung der Schätzfunktionen des Durchmesserzuwachses (Gleichung 21).....	110

- Tabelle 24: h/d-Wertentwicklung über dem Alter für verschiedene Kronenlängenvarianten bei isometrischem Wachstum der relativen Kronenlänge..... 121
- Tabelle 25: Projektion des Durchmesserwachstums verschiedener Kronenlängenvarianten über dem Alter bei isometrischem Wachstum der relativen Kronenlänge..... 122
- Tabelle 26: Zeiträume zur Erreichung von üblichen Zieldurchmessern für verschiedene Kronenlängenvarianten bei isometrischem Wachstum der relativen Kronenlänge ..... 126

---

## 9 Literaturverzeichnis

ABETZ, P. (1968): Vom Solitär zum Bestand: Denkmodelle als Hilfsmittel in der ertragskundlichen Forschung. Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde, Jahrestagung Münster 1968: S. 28 - 33.

ABETZ, P. (1975): Eine Entscheidungshilfe für die Durchforstung von Fichtenbeständen. Allgemeine Forstzeitschrift (30): S. 666 - 667.

ABETZ, P. (1976 a): Kann und soll die Standraumregulierung in Fichtenbeständen programmiert werden? Der Forst- und Holzwirt (31): S. 117 - 119.

ABETZ, P. (1976 b): Beiträge zum Baumwachstum: Der h/d-Wert - mehr als ein Schlankheitsgrad. Der Forst- und Holzwirt (31): S. 389 - 393.

ABETZ, P. (1976 c): Reaktionen auf Standraumerweiterungen und Folgeerscheinungen für die Auslesedurchforstung bei Fichte. Allgemeine Forst und Jagdzeitung (147): S. 72 - 75.

ABETZ, P. (1979): Zur Problematik der Anwendung von Durchforstungshilfen. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung (150): S. 234 - 242.

ABETZ, P. (1980): Zum Konzept einer Z-Baum-orientierten Kontrollmethode. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung (151): S. 65 - 68.

ABETZ, P. (1982): Zuwachsreaktionen von Z-Bäumen und Durchforstungsansätze bei Auslesedurchforstung in Fichtenbeständen. Allgemeine Forstzeitschrift (37): S. 1444 - 1450.

ABETZ, P. (1988): Untersuchungen zum Wachstum von Buchen auf der Schwäbischen Alb. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung (159): S. 215 - 223.

ABETZ, P. (1990): Müssen wir in der waldbaulichen Behandlung der Fichte wieder umdenken? Forstwissenschaftliches Centralblatt (109): S. 79 - 85.

ABETZ, P. (1992): Zur Z-Baum-Kontrollmethode im Rahmen der Forsteinrichtung. Forst und Holz (47): S. 171 - 174.

---

ABETZ, P. (1993): Ein Plädoyer für den Z-Baum. Argumente gegen die Kritik an der Z-Baum-orientierten Auslesedurchforstung. Holz-Zentralblatt (119): S. 305 - 308, 310.

ABETZ, P., KLÄDTKE, J. (2000): Die Df-2000. Allgemeine Forstzeitschrift / Der Wald (55): S. 454 - 455.

ABETZ, P., KLÄDTKE, J. (2002): The Target Tree Management System – Die Z-Baum-Kontrollmethode. Forstwissenschaftliches Centralblatt (121): S. 73 – 82.

ABETZ, P., OHNEMUS, K. (1994): Der Z-Baum-Bestockungsgrad: Definition, Herleitung, Anwendung. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung (165): S. 177 - 185.

ABETZ, P., UNFRIED, P. (1983): Aststärken an Z-Bäumen in einem Fichten-Standraumversuch im Forstbezirk Riedlingen/Donau. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung (155): S. 189 - 197.

ABETZ, P., UNFRIED, P. (1984): Fichtenstandraumversuche im Forstbezirk Riedlingen/Donau. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung (155): S. 89 - 110.

AKCA, A. (1979): Aerophotogrammetrische Messung der Baumkrone. Bericht der Jahrestagung des Deutschen Verbandes Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde. Mehring: S. 79 – 91.

ALTHERR, E., UNFRIED, P., HRAHETZKY, J., HRADETZKY, V. (1978): Statistische Rindenbeziehungen als Hilfsmittel zur Ausformung und Aufmessung unentrinteten Stammholzes. Mitteilungen der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (90): 294 S.

AMMAN, P. (1999): Die Analyse unbehandelter Jungwaldbestände als Grundlage für neue Pflegekonzepte. Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen (150): S. 460 - 470.

ARENHÖVEL, W. (1996): Waldumbauprogramm für ganz Thüringen: Waldumbau als Bestandteil des naturnahen Waldbaus. Allgemeine Forstzeitschrift / Der Wald (51): S. 486 – 488.

ASSMANN, E. (1961): Waldertragskunde. BLV, München, Bonn, Wien: 490 S.

ASSMANN, E. (1970): The principles of forest yield study. Pergamon Press, New York: 506 p.

- 
- BACHMANN, M. (1996): Indizes zur Erfassung der Konkurrenz im Bergmischwald - eine Methodenstudie. Bericht Jahrestagung Sektion Ertragskunde im DVFFA: S. 249 – 265.
- BACHMANN, M. (1998): Indizes zur Erfassung der Konkurrenz von Einzelbäumen. Methodische Untersuchung in Bergmischwäldern. Forstliche Forschungsberichte München (171): 271 S.
- BADOUX, E. (1945): Relations entre le developpement de la cime et l' accroissement chez le pin sylvestre. Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das Forstliche Versuchswesen (24): p. 405 - 516.
- BAUMGARTNER, A. (1964): Klimatologische Abgrenzung forstlicher Standorte im Mittelgebirge. Mitteilungen der Bayerischen Staatsforstverwaltung (34): S. 142 – 153.
- BERNASCONI, G. (1984): Etude de l'évolution des structure de futaies dans la phase de conversion vers le type jardiné au Val-de-Travers et et caractérisation des types d'éclaircies jardinatoires. Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen (135): S. 793 - 800.
- BERNHOFER, C., GOLDBERG, V. & FRANKE, J. (2003): REKLI - Aufbau einer Klimadatenbank und Regionale Klimadiagnose für Thüringen. Vortrag Statuskonferenz zweites Thüringer Klimaforum am 26. Juni 2003 in Erfurt.
- BEYSCHLAG, W., RYEL, R. J., DIESCH, C. (1994): Shedding of older needle age classes does not necessarily reduce photosynthetic primary production of Norway spruce . Trees (9): p. 51 - 59.
- BIGING, G., DOBBERTIN, M. (1995): Evaluation of Competition Indices in Individual Tree Growth Models. Forest Science (41): p. 360 - 377.
- BIGING, G., WENSEL, L. C. (1988): The effect of eccentricity on the estimation of basal area and basal area increment of coniferous trees. Forest Science (34): p. 621 - 633.
- BIGING, G., WENSEL, L. (1992): Modelling Mixed Species, Multipleged Conifer Forests in California. Proceedings of IUFRO Centennial Meeting, Berlin-Eberswalde: p. 163 - 186.
- BIOLLEY, H. (1897): L'aménagement des forêts d'après la méthode du Contrôle. Couvet, (unveröffentlicht).

- 
- BMVEL (2003): Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft: Bericht über den Zustand des Waldes: Ergebnisse des forstlichen Umweltmonitorings. 132 S.
- BMVEL (2005): Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft: Bundeswaldinventur<sup>2</sup>: Alle Ergebnisse und Berichte. <http://www.bundeswaldinventur.de> [25.03.2005].
- BÖRNER, M. (1997): Zu Wachstum und Wachstumsreaktion der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) nach Freistellung im fortgeschrittenen Alter: Eine einzelbaumorientierte Untersuchung waldwachstumkundlicher und betriebswirtschaftlicher Aspekte der so genannten Zieldurchmesserernte. Dissertation, Universität Freiburg im Breisgau: 197 S.
- BOERNER, R., ROEDER, A. (1994): Zuwachs und wirtschaftliche Leistung eines 124jährigen Fichtenbestandes. Allgemeine Forstzeitschrift (49): S. 1382 - 1385.
- BRÄKER, O., BAUMANN, E. (2002): Zuwachsreaktionen von Gebirgsfichten nach einseitiger Freistellung. Informationsblatt Forschungsbereich Wald, 5-5.
- BROSIUS, F. (1998): SPSS 8: Professionelle Statistik unter Windows. MITP-Verlag, Bonn: 1001 S.
- BROWN, G. S. (1965): Point density in stems per acre. New Zealand Forest Research Notes (38): 11 p.
- BRUNIG, E. F. (1976): Tree forms in relation to environmental conditions: an ecological viewpoint. IN: CANNEL, M. G. R. and LAST, F. T. (editors): Tree physiology and yield improvement. London, New York, San Francisco: p. 139 - 156.
- BRYNDUM, H. (1978): Der Einfluss verschiedener Durchforstungsstärken auf Massen- und Wertleistung der Fichte am Beispiel der dänischen Versuchsflächen. Forstwissenschaftliches Centralblatt (97): S. 302 – 313.
- BUES, C. T. (1996): Zur Holzqualität weitständig gepflanzter und „geschneitelter“ Fichten aus dem Frankenwald. Forst und Holz (51): S. 45 - 49.
- BÜHL, A., ZÖFEL, P. (2002): SPSS 11: Einführung in die moderne Datenanalyse unter Windows. 8. überarbeitete Auflage. Pearson Studium, München: 757 S.
- BURGER, H. (1939 a): Kronenaufbau gleichaltriger Nadelholzbestände. Mitteilung der Schweizerischen Anstalt für das Forstliche Versuchswesen (21): S. 5 - 58.

- 
- BURGER, H. (1939 b): Baumkrone und Zuwachs in zwei hiebsreifen Fichtenbeständen. Mitteilung der Schweizerischen Anstalt für das Forstliche Versuchswesen (21): S. 147 - 176.
- BURGER, H. (1953): Fichten im gleichaltrigen Hochwald. Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen (29): S. 38 - 130.
- BURSCHEL, P., HUSS, J. (1997): Grundriß des Waldbaus: Ein Leitfaden für Studium und Praxis. 2. überarbeitete Auflage. Verlag Paul Parey, Berlin: 487 S.
- CHROUST, L. (1968): Die Bedeutung starker Lichtungshiebe zwecks Erhöhung der Widerstandsfähigkeit der Fichtenbestände gegen Schneeschäden. Sborn. Lens. Fak. Vysoke Fkoly Zemed., Práha (14): 943 - 968.
- CHROUST, L. (1980): Erziehung von Fichtenbeständen in durch Schnee und Wind gefährdeten Lagen. Schriften der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen (67): S. 206 - 213.
- CLUZEAU, C.; LE GOFF, N., OTTORINI, J.-M. (1994): Development of primary branches and crown profile of *Fraxinus excelsior*. Canadian Journal for Forest Research (24): p. 2315 – 2323.
- COHEN, J., COHEN, P. (1983): Applied Multiple Regression/Correlation Analysis for the Behavioral Sciences. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey: 490 p.
- COLE, W., LORIMER, C. G. (1994): Predicting tree growth from variables in managed northern hardwood stands. Forest Ecology and Management (67): p. 159 - 175.
- CUTTER, B. E., LOWELL, K. E., DWYER, J. P. (1991): Thinning effects on diameter growth in black scarlet oaks as shown by tree ring analysis. Forst Ecology and Management (43): p. 1 - 13.
- DITTMAR, O. (1959): Zur Frage des „Wuchsbeschleunigungseffektes“ durch starke Durchforstungen im jungen Fichtenbestand. Archiv für Forstwesen (8): S. 923 – 945.
- DITTMAR, O. (1961): Zuwachs und Ertrag langfristiger Fichten-Durchforstungsversuchsreihen des Thüringer Waldes und des Harzes in Abhängigkeit von Bestockungsdichte und Standort. Archiv für Forstwesen (10): S. 458 – 476.

- 
- DONG, P. H., KRAMER, H. (1986): Auswirkungen von Umweltbelastungen auf das Wuchsverhalten verschiedener Nadelbaumarten im nordwestdeutschen Küstenraum. *Forst und Holz* (41): S. 286 - 290.
- DRAPER, N. R., SMITH, H. (1998): *Applied Regression Analysis*. 3rd Edition, John Wiley & Sons, New York: 706 p.
- DUNNING, D. (1922): Relation of crown size and character to rate of growth and response to cutting in western yellow pine. *Journal of Forestry* (20): p. 377 - 389.
- DURBIN, P. (1970): Testing for Serial Correlation in Least Squares Regression when some of the Regressors are Lagged Dependent Variables. *Econometrica* (38): p. 410 - 421.
- ECKHARDT, L. (1994): Waldbaugrundsätze in Thüringen. *Allgemeine Forstzeitschrift / Der Wald* (49) 15: S. 834 - 835.
- ECKHARDT, L. (1996): Naturnaher Waldbau in Thüringen. *Allgemeine Forstzeitschrift / Der Wald* (51): S. 476 - 478.
- EHRHARDT, H., FREISE, C., NICKE, A. (2005): Schneebruch: Naturexperiment für die Entwicklung zukunftsfähiger Strategien. *Allgemeine Forstzeitschrift / Der Wald* (55): S. 89 - 92.
- EICKHORN, T. (1992): Höhenanalysen an herrschenden Fichten aus Südwestdeutschland. Dissertation Universität Freiburg i. Br.: 127 S.
- EK, A. R. (1974): Dimensional relationships of forest and open-grown stems in Wisconsin. *University Wisconsin Forestry Research Note* (181): 7 p.
- EK, A. R., MONSERUD, R. A. (1974): Trials with programme FOREST: Growth and production simulation for mixed species even- or uneven-aged forest stands. IN: FRIES, J. (ed.): *Growth models for tree and stand simulation*. Royal College of Forestry, Research Notes No. 30: p. 56 - 76.
- ELLENBERG, H. (1996): *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen*. 5. überarbeitete Auflage. Ulmer, Stuttgart: 1095 S.
- ENKE, W., SCHNEIDER, F. (2003): Eine regionale Klimaprognose für Thüringen und andere Bundesländer. Vortrag Statuskonferenz zweites Thüringer Klimaforum am 26. Juni 2003 in Erfurt.

- EPP, P. (2003): Zur Abschätzung des Zuwachspotenzials von Fichten und Tannen nach starker Freistellung in Plenterüberführungsbeständen. Dissertation Universität Freiburg i. Br.: 138 S.
- EPP, P., SPIECKER, H. (2005): Das Zuwachspotenzial von Fichten (*Picea abies* [L.] Karst.) und Tannen (*Abies alba* Mill.) und deren Eignung für Überführungsvorhaben. In: TEUFFEL, K. v.; BAUMGARTEN, M.; HANEWINKEL, M.; KONOLD, W.; SAUTER, U.H.; SPIECKER, H.; WILPERT, K. v. (Hrsg.): Waldumbau für eine zukunftsorientierte Waldwirtschaft: Ergebnisse aus dem Südschwarzwald. Springer-Verlag: S. 216-226.
- FAVRE, E. (1956): L'évolution forestière dans le Canton de Neuchâtel. Canton de Neuchâtel, Département de l'Agriculture, La Chaux-de-Fonds.
- FREISE, C. (2003): Future oriented Spruce Management. IN: HANSEN, J.; SPIECKER, H. and VON TEUFFEL, K. [eds.]: The Question of Conversion of Coniferous Forests. Abstracts of the International Conference September 27th to October 2nd 2003, Freiburg im Breisgau, Germany, Freiburger Forstliche Forschung, Berichte (47): 85 S.
- FREISE, C., SPIECKER, H. (1999): Konkurrenzfreies Wachstum der Buche: Wie weit lässt sich das Dickenwachstum mit zunehmender Kronenexpansion steigern? Allgemeine Forstzeitschrift / Der Wald (54): S. 1346 - 1349.
- FUJIMORI, T. (1993): Dynamics of crown structure and stem growth based on knot analysis of a hinoki cypress. Forest Ecology and Management (56): p. 57 - 58.
- GÄRTNER, S. (1987): Untersuchungen zur Schneebruchgefährdung der Fichtenbestände des Thüringer Waldes in Abhängigkeit vom Standort. Dissertation Technische Universität Dresden: 144 S.
- GASTINGER, W. (1957): Ergebnisse der Standortkartierung im Staatlichen Forstwirtschaftsbetrieb Eisfeld: 2. Band: Der Mittlere Thüringer Wald im Bereich der Staatlichen Forstwirtschaftsbetriebe Eisfeld und Suhl. Institut für Forsteinrichtung und Standorterkundung, Potsdam: 216 S.
- GASTINGER, W., SCHWANECKE, W. (1967): Erläuterungen zu den Standortkarten der Staatlichen Forstwirtschaftsbetriebe Neuhaus und Sonneberg. VEB Forstprojektierung, Potsdam, Betriebsteil Weimar: 515 S.
- GERECKE, K.-L. (1988): Herleitung und Anwendung von „Referenzbäumen“ zur Beschreibung des Wachstumsganges vorherrschender Tannen. Dissertation Universität Freiburg i. Br.: 141 S.

- 
- GERECKE, K.-L. (1991): Standraum - Bonität - Jahrringbreite. Allgemeine Forstzeitschrift (46): S. 1064 - 1066.
- GERSTENGARBE, F.-W., BADECK, F., HATTERMANN, F., KRYSANOVA, V., LAHMER, W., LASCH, P., STOCK, M., SUCKOW, F., WECHSUNG, F., WERNER, P. C. (2003): Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, PIK Report (83), Potsdam: 79 S.
- GLOS, P., RICHTER, C. (2002): Sortierhilfen und Erläuterungen zur Anwendung der DIN 4074 in der Praxis. Holzforchung München, Bericht Nr. 02502, Technische Universität München: 79 S.
- GOLZ, H. v. d. (1991): Strukturdurchforstung der Fichte. Allgemeine Forstzeitschrift (46): S. 677 - 679.
- GRAMMEL, R. (1990): Zusammenhänge zwischen Wachstumsbedingungen und holztechnologischen Eigenschaften der Fichte. Forstwissenschaftliches Centralblatt (109): S. 120 - 129.
- GRUBER, F. (1990): Verzweigungssystem, Benadelung und Nadelfall der Fichte (*Picea abies*). Contr. Biol. Arbor. (3): S. 1 - 136.
- GRUBER, F. (1992): Dynamik und Regeneration der Gehölze. Bericht des Forschungszentrums für Waldökosysteme Göttingen, A 86: S. 1 - 420.
- GUERICKE, M. (2003): Entwicklung ungleichaltriger Fichten-Femelwaldstrukturen im Oberharz. Forst und Holz (58): S. 395 - 400.
- GUTTENBERG, A. v. (1915): Wachstum und Ertrag der Fichte im Hochgebirge. Österreichische Vierteljahresschrift für Forstwesen, Wien u. Leipzig (33): S. 217
- GUTTMANN, L. (1954): Some Necessary Conditions for Common Factor Analysis. Psychometrika (19): p. 149 - 161.
- HABERLANDT, G. (1893): Eine botanische Tropenreise. Leipzig.
- HAHN, D. (1995): Entscheidungshilfe für die Steuerung des Dickenwachstums von Buche (*Fagus sylvatica* L.). Entwicklung und Aufbau auf der Grundlage eines distanzabhängigen Einzelbaum-Konkurrenzmodells. Dissertation Universität Freiburg i. Br.: 225 S.

- 
- HAHNEWINKEL, M. (1996): Konzept zur Überführung einschichtiger Fichtenwälder in stufige Dauerwälder. Arbeitsbericht aus dem Institut für Forstökonomie der Universität Freiburg i. Br.(22) 96: 60 S.
- HAMILTON, G. J. (1969): The dependence of volume increment of individual trees on dominance, crown dimensions and competition. *Forestry* (42): S. 133 - 144.
- HARTIG, R. (1896): *Forstlich naturwissenschaftliche Zeitschrift* (5): S. 33.
- HASENAUER, H. (1993): Zur Modellierung der Kronenlängenveränderung in verschiedenen dichten Fichtenbeständen. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* (165): S. 88 - 93.
- HASENAUER, H., STAMPFER, E., ROHRMOSER, C., STERBA, H. (1994): Solitärdimensionen der wichtigsten Baumarten Österreichs. *Österreichische Forstzeitung* (3): S. 28 - 29.
- HAUFE, H. (1927): Fichtennaturverjüngung im Blendersaumschlag in Gaildorf. *Mitteilungen an der Sächsischen Forstlichen Versuchsanstalt* (3), 2.
- HAYWOOD, A. (2003): Growth of advanced European beech trees in the transformation phase in the southern Black Forest. Dissertation Universität Freiburg i. Br.: 144 p.
- HEGER, R. (1940): Beeinflussung der Fichtenwirtschaft der Erzgebirgshochlagen durch Rauhreif- und Eisbruch. *Tharandter Forstliche Jahrbücher* (91): S. 139 - 202.
- HEGY, J. (1974): A simulation model for managing jack-pine stands. IN: FRIES, J. (ed.): Growth models for tree and stand simulation. Royal College of Forestry Stockholm, Department of Forest Yield Research, Research Notes (30): p. 74 - 90.
- HENKEL, W. (1995): Zur Situation der Baumart Weißtanne (*Abies alba* Mill.) an ihrer nördlichen Arealgrenze im Freistaat Thüringen. IN: LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT [Hrsg.]: *Mitteilungen der Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft* (8), Gotha: 87 S.
- HORN, H. S. (1971). *The Adaptive Geometry of Trees*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey: 144 p.
- HUNT, R. (1979): Plant Growth Analysis: The rationale behind the use of the fitted mathematical function. *Annals of Botany* (43): p. 245 - 249.

- 
- HUNT, R. (1982): Plant Growth Curves: The functional approach to plant growth analysis. Edward Arnold, London: 248 p.
- JAEGER, H. (1951): Die Schnee-, Duft- und Sturmschäden im Wuchsbezirk des Mittleren Thüringer Waldes. Forstwirtschaft und Holzwirtschaft (3): S. 66 - 71.
- JOHANN, K. (1977): Der Grundflächenzuwachs in verschiedenen Schaffhöhen nach Bestandesdüngung bei Fichte. Mitteilungen der Bundesversuchsanstalt Wien (120): S. 25 - 42.
- JOHANN, K. (1980): Bestandesbehandlung und Schneebruchgefährdung. Schriften der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen (67): S. 269 - 286.
- JOAHANN, K. (1981): Nicht Schnee, sondern falsche Bestandesbehandlung verursacht Katastrophen. Informationsdienst der Bundesversuchsanstalt Wien Nr. 200.
- JOHANN, K. (1982): Der „A-Wert“ – ein objektiver Parameter zur Bestimmung der Freistellungsstärke von Zentralbäumen. Tagungsberichte der Sektion Ertragskunde im Deutschen Verband Forstlicher Forschungsanstalten: S. 146 - 158.
- JUDGE, G. G., HILL, R. C., GRIFFITH, W. E., LÜTKEPOHL, H., LEE, T. S. (1988): Introduction for the theory and practice of econometrics. Wiley, New York: 1024 p.
- KAHLE, H.-P. (1994): Modellierung der Zusammenhänge zwischen der Variation von klimatischen Elementen des Wasserhaushalts und dem Radialzuwachs von Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.) aus Hochlagen des Südschwarzwaldes. Dissertation Universität Freiburg i. Br.: 184 S.
- KELLOMÄKI, S., HARI, P., KANNINEN, M., ILONEN, P. (1980): Ecophysiological studies on young Scots pine stands: II. Distribution of needle biomass and its application in approximating light conditions inside the canopy. *Silva Fennica* (14): p. 243 - 257.
- KENK, G. (1988): Der Volumen- und Wertzuwachs im Stadium der natürlichen Verjüngung eines Kiefern-Tannen-Bestandes durch Schirmkeilschlag in Langenbrand/Nordschwarzwald. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* (159): S. 154 - 164.
- KENNEL, R. (1965): Untersuchungen über die Leistungen von Fichte und Buche im Rein- und Mischbestand. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* (136): S. 149 - 161 & 173 - 189.

- 
- KLÄDTKE, J. (1992): Konstruktion einer Z-Baum-Ertragstafel am Beispiel der Fichte. Dissertation Freiburg i. Br.: 111 S.
- KLÄDTKE, J. (1999): Zuwachsreaktion schwächerer Bäume. Jahresbericht der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg: S. 22 - 28.
- KNOKE, T. (1998): Die Stabilisierung junger Fichtenbestände durch starke Durchforstungseingriffe: Versuch einer ökonomischen Bewertung. Forstarchiv (69): S. 219 - 226.
- KÖHL, M. (1993): Quantifizierung der Beobachtungsfehler bei Nadel-/Blattverlustschätzung. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung (164): S. 83 - 92.
- KRAFT, G. (1884): Beiträge zur Lehre von den Durchforstungen, Schlagstellungen und Lichtungshieben. Hannover: 147 S.
- KRAMER, H. (1962): Kronenaufbau und Kronenentwicklung gleichalter Fichtenpflanzbestände. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung (133): S. 249 - 256.
- KRAMER, H. (1966): Crown Development in Conifer Stands in Scotland as Influenced by Initial Spacing and Subsequent Thinning Treatment. Forestry 19: p. 40 - 58.
- KRAMER, H. (1971): Durchforstung in Nadelholzbeständen. Forstarchiv (42): S. 22 - 33.
- KRAMER, H. (1975): Erhöhung der Produktionssicherheit zur Förderung einer nachhaltigen Fichtenwirtschaft. Forstarchiv, Hannover (46): S. 9 - 13.
- KRAMER, H. (1980): Einfluss verschiedenartiger Durchforstungen auf Bestandessicherheit und Zuwachs in einem weitständig begründeten Fichtenbestand. Schriften der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen (67): S. 224 - 246.
- KRAMER, H. (1986): Relation between Crown Parameters and Volume Increment of *Picea abies* Stands Damaged by Environment Pollution. Scandinavian Journal for Forest Research, 1: p. 251 - 263.
- KRAMER, H. (1988): Waldwachstumslehre. Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin: 374 S. .
- KRAMER, H. (1994): Untersuchungen über den Wachstumsgang von Einzelbäumen in ungleichaltrigen Mischbeständen mit Hilfe der Stammanalyse. Forst und Holz 49 (11): S. 283 - 287.

- 
- KRAMER, H., AKCA, A. (1995): Leitfaden zur Waldmeßlehre. 3. Erweiterte Auflage, Sauerländer Verlag, Frankfurt a. M.: 266 S.
- KRAMER, H., DONG, P. H. (1985): Kronenanalyse für Zuwachsuntersuchungen in immissionsgeschädigten Nadelholzbeständen. Forst und Holz (40): S. 115 - 118.
- KRAMER, H., JIMÉNEZ, J. (1991): Analyse von Bestandesentwicklung und Wachstum in ungleichalten Nadelbaummischbeständen mit Hilfe von Stammanalysen. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 162 (11/12): 221 - 228.
- KRAMER, H., SMITH, J. H. G. (1985): Bestandesbegründung der Douglasie in Britisch-Kolumbien, Kanada. Forstarchiv, Hannover (56): S. 9 - 13.
- KRAMER, P. J., KOZLOWSKY, T. T. (1979): Physiology of woody plants. Academic Press, New York: 237 p.
- KÜNSTLE, E. (1972): CO<sub>2</sub>-Gaswechsel und Transpiration von verschieden alten Douglasientrieben in einem Stangenholz während der Vegetationsperiode. Angewandte Botanik (46): S. 49 - 58.
- KÜNSTLE, E., MITSCHERLICH, G. (1975): Photosynthese, Transpiration und Atmung in einem Mischbestand im Schwarzwald: I. Photosynthese. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung (146): S. 45 - 63.
- KYNAST, R. (1995): Vom Fichtenbestand zum Bergmischwald im FA St. Blasien: Mit der Überführungsdurchforstung zur Einzelstammnutzung? Allgemeine Forstzeitschrift (50): S. 1038 - 1041.
- LARSON, P. R. (1963): Stem form development of forest trees. Forest Science Monography (5): 42 p.
- LÄSSIG, R. (1991): Zum Wachstum von Fichtensolitären (*Picea abies* (L.) Karst.) in Südwestdeutschland. Dissertation Universität Freiburg i. Br.: 136 S.
- LAWUF (2000): Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Legende zu den forstlichen Standortskarten Wuchsbezirk „Hohes Schiefergebirge“ und Teilwuchsbezirk „Westlicher Frankenwald“: 51 S.
- LEDER, B. (1998): Beobachtungen zur Bestandesstruktur undurchforsteter Fichtenbestände. Allgemeine Forstzeitschrift / Der Wald (53): 793 - 796.

- 
- LEIBUNDGUT, H. (1989): Über die waldbauliche Bedeutung des Wachstumsverlaufs und Schlankheitsgrades von Bäumen. Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen (140): S. 791 - 800.
- LETTER, H.-A. (2000): Wert – nicht Masse ist das Ziel, dargestellt am Beispiel der Richtlinie für die Bewirtschaftung des Staatswaldes im Saarland vom Februar 1999. Der Dauerwald (22): S. 4 - 20.
- LOETSCH, F. (1953): Die Bedeutung des Merkmals „Kronengüteklasse“ bei Holzvorrats- und Zuwachsinventuren. Proceedings of IUFRO Congress, Rom: p. 820 - 826.
- LOIDL, W., REIMOSER, F. (1980): Waldbaulich-betriebswirtschaftliche Beurteilung des alternativen Kunst- und Verjüngungsbetriebes in einem fichtenreichen Gebirgsrevier. Centralblatt für das gesamte Forstwesen (97): S. 151 - 171.
- LORIMER, C. G. (1983): Tests of age-independent competition indices for individual trees in natural hardwood stands. Forest Ecology and Management (6): p. 343 - 360.
- MATTHECK, C. (1990): Why They Grow, How They Grow: The Mechanics of Trees. Arboricultural Journal 14: p. 1 - 17.
- MATTHECK, C., BETHGE, K., SCHÄFER, J (1992): Safety Factors in Trees. Primärbericht, Kernforschungszentrum Karlsruhe.
- MAGUIRE, D. A., HANN, D. W. (1987): A stem dissection technique for dating branch mortality and reconstructing past crown recession. Forest Science (33): p. 858 - 871.
- MAGUIRE, D. A., HANN, D. W. (1990): Constructing models for direct prediction of 5-year crown recession in south western Oregon Douglas-fir. Canadian Journal of Forest Research (20): p. 549 - 563.
- MARTIN, G. L., EK, A. R. (1984): A comparison of competition measures and growth models for predicting plantation red pine diameter and height growth. Forest Science (30): p. 731 - 743.
- MCMAHON, T. A. (1975): The mechanical design of trees. Sci. Amer. (233): p. 93 - 102.
- MEADOWS, J. S., GOELZ, J. C. G. (2001): Fith-year response to thinning in a water oak plantation in North Louisina. Southern Journal of Applied Forestry (25): p. 31 - 39.

- 
- MERKEL, O. (1975): Schneebruch im Fichtenbestand bei 40jähriger Auslesedurchforstung. Allgemeine Forstzeitschrift (30): S. 663 - 664.
- METTE, H.-J. (1972): Richtzahlen und Tabellen für die Forstwirtschaft. Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin: 867 S.
- METZGER, K. (1893): Der Wind als massgebender Faktor für das Wachstum der Bäume. Mündener forstliche Hefte (3): S. 35 - 86.
- MILLER, R. (1959): Assimilationsuntersuchungen an Tannen und Fichten einer Naturverjüngung im Bayerischen Wald. Forstwissenschaftliches Centralblatt (78): S. 297 - 317.
- MISSON, L. (2000): Approche d'écologie de l'influence du climat et de l'intensité d'éclaircie sur la croissance radiale de l'épicéa commun (*Picea abies* (L.) Karst.). Dissertation Universität Cath. De Louvain: 170 p.
- MITCHELL, K. J. (1967): Simulation of the growth of uneven-aged stands of white spruce. Ph. D. thesis, Yale University, New Haven, Conn.: 135 p.
- MITCHELL, K. J. (1969): Simulation of the growth of even-aged stands of white spruce. Bulletin 75, School of Forestry, Yale University: 48 p.
- MITCHELL, K. J. (1975): Dynamics and simulated yield of Douglas-Fir. Forest Science Monogr. (17): 39 p.
- MITSCHERLICH, G. (1942): Der Einfluss des Seewindes auf das Wachstum von Kiefer, Fichte, Buche, Birke und Erle. Tharandter Forstliche Jahrbücher 93: S. 246 - 373.
- MITSCHERLICH, G. (1952): Der Tannen-Fichten-(Buchen)-Plenterwald. Schriftenreihe Badische Forstliche Versuchsanstalt (8).
- MITSCHERLICH, G. (1971): Wald, Wachstum und Umwelt, Band 2: Waldklima und Wasserhaushalt. Sauerländer, Frankfurt a. M.: 365 S.
- MITSCHERLICH, G. (1978): Wald, Wachstum und Umwelt, Band 1: Form und Wachstum von Baum und Bestand. 2. überarbeitete Auflage. Sauerländer, Frankfurt a. M.: 144 S.
- MITSCHERLICH, G. & v. GADOW, K. (1968): Über den Zuwachsverlust bei der Ästung von Nadelbäumen. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung (139): S. 175 - 184.

- 
- MÖHRING, B. (1981): Über den Zusammenhang zwischen Baumform und Schneebruchanfälligkeit bei Fichte. Forstarchiv, Hannover (52): S. 130 - 134.
- MONSERUD, R. A. (1975): Methodology for simulating Wisconsin Northern hard-wood stand dynamics. Ph. D. thesis. University of Wisconsin, Madison: 156 p.
- MOORE, J. A.; DUDELSKY, C. A., SCHLESINGER, R. C. (1973): A new index representing individual tree competition status. Canadian Journal of Forest Research (3): p. 495 - 500.
- MÜNCH, E. (1938): Untersuchungen über die Harmonie der Baumgestalt. Jahrb. Wiss. Bot. (86): S. 581 - 673.
- NAGEL, J. (1995): BWIN: Bestandesbewertung und Prognose, Version 1.0. Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt: Programmbeschreibung.
- NANCE, W. L.; GRISSOM, J. E., SMITH, W. R. (1988): A new competition index based on weighted and constrained area potentially available. IN: EK, A. R.; SHIFLEY, S. R. and BURK, T. E. (eds.): Forest growth modelling and prediction. General Technical Report NC-120, USDA Forest Service, North Central Experiment Station: p. 134 - 142.
- OERLANDER, G., KARLSSON, C. (2000): Influence of shelter wood density on survival and height growth of *Picea abies* advance growth. Scandinavian Journal for Forest Research (15): S. 20 - 29.
- OTTO, H.-J. (1994): Waldökologie. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart: 391 S.
- OTTORINI, J.-M., LE GOFF, N., CLUZEAU, C. (1996): Relationships between crown dimensions and stem development in *Fraxinus excelsior*. Canadian Journal of Forest Research (26): p. 394 - 401.
- PETRI, H. (1966): Versuch eine standortgerechten, waldbaulichen und wirtschaftlichen Standraumregelung von Buchen-Fichten-Mischbeständen. Mitteilungen aus der Landesforstverwaltung Rheinland-Pfalz (13): 145 S.
- PFREUNDT, J. (1988): Modellierung der räumlichen Verteilung von Strahlung, Photosynthesekapazität und Produktion in einem Fichtenbestand und ihre Beziehung zur Bestandesstruktur. Dissertation, Göttingen: 163 S.

- 
- PRETZSCH, H. (1992): Konzeption und Konstruktion von Wuchsmodellen für Rein- und Mischbestände. Schriftenreihe der Forstlichen Fakultät München und der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft 115: 332 S.
- PRETZSCH, H. (1995): Zum Einfluss des Baumverteilungsmusters auf den Bestandeszuwachs. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung (166): S. 190 – 201.
- PRESSLER, M. R. (1864): Das Gesetz der Stammbildung. Arnoldische Buchhandlung, Leipzig.
- PRIEN, S., GÄRTNER, G., WENK, G., OTTO, L.-F. (1985): Dispositionsfaktoren für Schneeschäden – Erkenntnisstand, Probleme, Folgerungen. Sozialistische Forstwirtschaft (35): S. 146 - 152.
- PUTZ, F. E.; PARKER, G., ARCHIBALD, M. (1984): Mechanical abraision and intercrown spacing. American Midland Naturalist (112): p. 24 - 28.
- RAPRAEGER, E. F. (1939): Development of branches and knots in western white pine. Journal of Forestry (37): p. 239 - 245.
- RECK, P. (2002) Das Baumwachstum von kronenspannungsfrei gewachsenen Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.) unter besonderer Berücksichtigung der holztechnologischen Eigenschaften. Dissertation, Universität Freiburg i. Br.: 136 S.
- REININGER, H. (1987): Zielstärkennutzung oder die Plenterung des Altersklassenwaldes. Österreichischer Agrarverlag, Wien: 163 S.
- RÖHLE, H., HUBER, W. (1985): Untersuchungen zur Methode der Ablotung von Kronenradien und der Berechnung von Kronengrundflächen. Forstarchiv (56): S. 238 - 243
- ROLOFF, A. (2001): Baumkronen: Verständnis und praktische Bedeutung eines komplexen Naturphänomens. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart: 164 S.
- ROSENFELD, W. (1944): Erforschung der Bruchkatastrophen in den ostschlesischen Beskiden in der Zeit von 1875 – 1942. Forstwissenschaftliches Centralblatt (66): S. 1 - 25.
- ROTTMANN, M. (1983): Schneebruchschäden bei Fichten. Dissertation, München.

- 
- RUNKLE, J. R., YETTER, T. C. (1987): Treefall revisited: gap dynamics in the southern Appalachians. *Ecology* (68): p. 417 - 424.
- SATOO, T.; NAKAMURA, K., SENDA, M. (1955): Materials for the studies of growth in stands. I: Young stands of Japanese red pine of various density. *Tokio University, Forestry Bulletin* (48): p. 65 – 90.
- SCHÄDELIN, W. (1936): Die Auslesedurchforstung als Erziehungsbetrieb höchster Wertleistung. 3. Auflage, Bern.
- SCHÄFER, H., BOSSEL, H., KRIEGER, H. (1992): Aktuelle Trends bei der Modellierung von Baumwachstum und Bestandesentwicklung. *Forstarchiv, Hannover*: (63): S. 59 - 66.
- SCHERZINGER, W. (1996): Naturschutz im Wald: Qualitätsziele einer dynamischen Waldentwicklung. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart: 447 S.
- SCHLAGHECK, H., SCHMITZ, F. (2005): Wald im Spiegel der Bundeswaldinventur. *Allgemeine Forstzeitschrift / Der Wald* (60): S. 108 - 110
- SCHMIDT-VOGT, H. (1987): Die Fichte. Band I: Taxonomie-Verbreitung-Morphologie-Ökologie-Waldgesellschaften (2. Auflage). Verlag Paul Parey, Hamburg/Berlin: 647 S.
- SCHMIDT-VOGT, H. (1991): Naturnahe Fichtenwirtschaft. Wilhelm-Münker-Stiftung 31: 55 S.
- SCHMITT, M. (1994 a): Waldwachstumskundliche Untersuchungen zur Überführung fichtenreicher Baumhölzer in naturnahe Mischbestände mit Dauerwaldcharakter. *Forstliche Forschungsberichte München* 31: 223 S.
- SCHMITT, M. (1994 b): Von faulen Gesellen und Spätberufenen: Neue Ergebnisse aus der Waldwachstumsforschung zum Thema „Zielstärkennutzung und Umsetzungsverhalten der Fichte. *Der Dauerwald* 11: S. 4 - 28.
- SCHNEIDER, B., ROEDER, A. (1993): Dynamik der Fichtennaturverjüngung unter Altholzschirm. *Allgemeine Forstzeitschrift* (48): S. 57 - 60.
- SCHOBER, R. (1979): Massen-, Sorten- und Wertertrag der Fichte bei verschiedener Durchforstung (Teil I). *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* (150): S. 129 - 152.

- 
- SCHOBBER, R. (1980): Massen-, Sorten- und Wertertrag der Fichte bei verschiedener Durchforstung (Teil II). Allgemeine Forst- und Jagdzeitung (151): S. 1 - 21.
- SCHOBBER, R. (1988): Von der Niederdurchforstung zur Auslesedurchforstung im Herrschenden. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung (159): S. 208 - 212.
- SCHÖLCH, M. (1996): Konzeption zur Umsetzung des Thüringer Waldumbauprogramms: Teil 3 – Beispiel Forstamt Stadtroda für Untere Berglagen des Ostthüringischen Trias-Hügellandes sowie analogen Wuchsbezirken. Landesforstdirektion Oberhof: 139 S.
- SCHÖPF, J. (1954): Untersuchungen über Astbildung und Astreinigung der Selber Kiefer. Forstwissenschaftliches Centralblatt (73): S. 275 - 290.
- SCHÖPFER, W. (1961): Beiträge zur Erfassung des Assimilationsapparates der Fichte. Schriftenreihe der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg, 10.
- SCHÖPFER, W. (1986): Zusammenhang zwischen Wuchsraum und Zuwachs in erkrankten Fichten- und Tannen-Beständen. Forst und Holz (41): S. 315 - 319.
- SCHRAMM, H.-J. (1993): Die forstlichen Wuchsgebiete Thüringens. Mitteilungshefte der Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft Gotha (3): S. 1 - 43.
- SCHRAMM, H.-J. (1997): Die forstlichen Wuchsbezirke Thüringens: Kurzbeschreibung. Mitteilungshefte der Thüringer Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (13): S. 122 - 124.
- SCHULZE, E. D., FUCHS, M. I., FUCHS, M. (1977): Spatial distribution of photosynthetic capacity and performance in a mountain spruce forest in northern Germany: I. Biomass distribution and daily CO<sub>2</sub> uptake in different crown layers. Oecologia (29): p. 43 – 61.
- SCHÜTZ, J.-P. (1990): Heutige Bedeutung und Charakterisierung des naturnahen Waldbaus. Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen (141): S. 879 - 882.
- SCHÜTZ, J.-P. (1994): Der naturnahe Waldbau Leibundguts: Befreiung von Schemen und Berücksichtigung der Naturgesetze. Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen (145): S. 449 - 462.
- SCHÜTZ, J.-P. (1999): Praktische Bedeutung der Überführung für die Umsetzung der Plenteridee. Forst und Holz (54): S. 104 - 108.

- 
- SCHÜTZ, J.-P. (2001): Der Plenterwald und weitere Formen strukturierter und gemischter Wälder. Verlag Paul Parey, Berlin: 207 S.
- SCHNEIDER, B., ROEDER, A. (1993): Dynamik der Fichten-Naturverjüngung unter Altholzschirm. Allgemeine Forstzeitschrift (2): S. 57 - 60.
- SCHWEINGRUBER, F. (2001): Dendroökologische Grundlagen der Holzanatomie: anatomische Grundlagen der Dendrochronologie. Haupt-Verlag, Bern, Stuttgart, Wien: 472 S.
- SEELING, U. (2001): Merkmale und verwendungsbezogene Eigenschaften des Holzes der Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) bei Überführung von einschichtigen Reinbeständen in strukturierte Mischbestände. Habilitationsschrift, Universität Freiburg: 402 S.
- SEELING, U., RECK, P., BECKER, G., BÜCKING, M. (2004): Zur Qualität von Furnieren und Schnitthölzern, hergestellt aus geasteten, langkronigen und stark dimensionierten Fichten. Forst und Holz (59): S. 63 - 67.
- SEIBT, G. (1977): Zur Frage des Zuwachses in verschiedenen Schafthöhen. Mitteilungen der Bundesversuchsanstalt Wien (120): S. 43 - 51.
- SEIBT, G. (1980): Zuwachs- und Schaffformunterschiede in verschiedener Baumhöhe bei Fichten unterschiedlicher Düngung und Durchforstung. Mitteilungen der Bundesversuchsanstalt Wien (130): S. 221 - 232.
- SEIFERT, T., PRETZSCH, H., BÜCKING, M. (2003 a): „Mittelwaldfichten“ aus dem Hochwald? Teil I: Gestalt und Wachstum langkroniger Fichten. Forst und Holz (58): S. 420 - 426.
- SEIFERT, T., PRETZSCH, H., BÜCKING, M. (2003 b): „Mittelwaldfichten“ aus dem Hochwald? Teil II: Jahrringbreiten, Abholzigkeit und Ästigkeit langkroniger Fichten. Forst und Holz (58): S. 473 - 477.
- SHORT, E. A., BURKHART, H. E. (1992): Predicting crown-height increment for thinned and unthinned loblolly pine plantations. Forest Science (3): p. 594 - 610.
- SIT, V., POULIN-COSTELLO, M. (1994): Catalogue of Curves for Curve Fitting. Biometrics Information Province of British Columbia (4): 110 p.
- SLOBODA, B., PFREUNDT, J. (1989): Baum- und Bestandeswachstum. Ein systemanalytischer Ansatz mit Versuchsplanungskonsequenzen für die Durchforstung. DVFFA, Sektion Ertragskunde, Bericht der Jahrestagung Attendorn: S. 17/1 - 17/25.

- 
- SMITH, F. W., LONG, J. N., SAMPSON, D. A. (1990): The mechanical abrasion hypothesis of crown shyness: a direct test in *Pinus contorta* forests. *Bulletin of the Ecological Society of America* (71): p. 327 - 328.
- SPATHELF, P. (1994): Zur Rekonstruktion von Standraumveränderungen mithilfe baumindividueller Parameter, dargestellt am Beispiel der Tanne – ein Methodenvergleich. Bericht Sektion Ertragskunde im DVFF: S. 195 - 206.
- SPATHELF, P. (1999): Orientierungshilfe zur Prognose und Steuerung des Wachstums von Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.) und Tannen (*Abies alba* Mill.) in Überführungswäldern mit Hilfe der relativen Kronenlänge. Dissertation Universität Freiburg, Freiburger Forstliche Forschung (4): 192 S.
- SPIECKER, H. (1983): Zusammenhänge zwischen sozialer Stellung, Kronenlänge, Kronenschluss und der Gesundheit von Weißtannen. *Allgemeine Forstzeitschrift* (154): S. 442 - 443.
- SPIECKER, H. (1986): Das Wachstum von Tannen und Fichten auf Plenterwaldversuchsflächen des Schwarzwaldes in der Zeit von 1950 - 1984. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 157, (8): S. 152 – 164.
- SPIECKER, H. (1991 a): Zur Dynamik des Wachstums von Tannen und Fichten auf Plenterwaldversuchsflächen im Schwarzwald. *Allgemeine Forstzeitschrift* (46): S. 1076 - 1080.
- SPIECKER, H. (1991 b): Zur Steuerung des Dickenwachstums und der Astreinigung von Trauben- und Stieleichen (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl. und *Quercus robur* L.). Schriftenreihe der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg 72: 155 S.
- SPIECKER, H. (1995): Der Wald stirbt – die Holzvorräte steigen. *Forst und Holz* 50: S. 53 - 54.
- SPIECKER, H. (1997): Erziehung von Kirschenwertholz. Exkursionsführer des Instituts für Waldwachstum der Universität Freiburg i. Br.: 9 S.
- SPIECKER, H. (1999): Sind Überführungen planbar? IN: HAHNEWINKEL, M. (Hrsg.): Überführung von Altersklassenwäldern in Dauerwälder. *Berichte Freiburger Forstliche Forschung* 8: S. 72 – 91.

- SPIECKER, H. (2003): Silvicultural management in maintaining biodiversity and resistance of forests in Europe - temperate zone. *Journal of Environmental Management* (67): p. 55-65.
- SPIECKER, H., MIELKAINEN, K., KÖHL, M., SKOVSGAARD, J.-P. (1996): *Growth Trends in European Forests – Studies from 12 Countries*. Springer Verlag, Berlin: 372 p.
- STERBA, H., ZINGG, A. (2001): Target diameter harvesting - a strategy to convert even-aged forests. *Forest Ecology and Management* (14): S. 877 - 880.
- STURM, K. (1995): Naturnahe Waldnutzung in Mitteleuropa. *Der Dauerwald* 12: S. 6 - 21.
- SURBER, E. (1950): Untersuchungen an Mittelwaldfichten im nordostschweizerischen Laubmischwaldgebiet. *Mitteilungen der Schweizerischen Centralanstalt* (26): S. 635 - 681.
- THOMASIUS, H. (1992) Prinzipien eines ökologisch orientierten Waldbaus. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* (111): S. 141 - 155.
- THOMASIUS, H., BUTTER, D. (1984): Studie zu einigen Relationen zwischen Wuchsfläche, Zuwachs und individueller Stabilität von Waldbäumen, dargestellt an der Baumart Fichte. *Beiträge für die Forstwissenschaft*, Berlin (18): S. 25 - 28.
- TLWJF (2003): Thüringer Landeanstalt für Wald, Jagd und Fischerei. *Hilfstafeln zur naturalen Betriebssteuerung*: 107 S.
- TMLNU (2000 a): Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt. *Naturnahe Waldwirtschaft: Wir übernehmen Verantwortung für den Wald*: 34 S.
- TMLNU (2000 b): Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt. *Pflegerichtlinien für Fichtenbestände, Grundsatzlerlass 2/2000*: 9 S.
- TMLNU (2004): Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt. *Forstbericht 2004*: 80 S.
- TOMA, G. (1940): Kronenuntersuchungen in langfristigen Kieferndurchforstungsflächen. *Zeitschrift für das Forst- und Jagdwesen* (70): S. 305 - 340.
- TOPCUOGLU, A. (1940): Die Verteilung des Zuwachses auf die Schaftlänge der Bäume. *Tharandter Forstliches Jahrbuch* (91): S. 485 - 554.

- 
- TRAUBOTH, V., KRAUSS, W. (1996): Weiterbehandlung der Fichte in den Wäldern Thüringens. Allgemeine Forstzeitschrift / Der Wald (51): S. 489 - 491.
- UNTHEIM, H. (1996): Zur Veränderung der Produktivität von Waldstandorten. Untersuchungen zum Höhen- und Volumenwachstum von Fichte (*Picea abies* [L.] Karst.) und Buche (*Fagus sylvatica* L.) auf Standortseinheiten der Ostalb und des Flächenschwarzwaldes. Mitteilungen der Forstlichen Versuchsanstalt Baden-Württemberg 198: 239 + 8 S.
- VAN LAAR, A. (1969): Influence of tree parameters and stand density on diameter growth of *Pinus radiata*. South African Forestry Journal (70): p. 5 - 14.
- WECK, J. (1951): Über die Eignung von Kronenmesswerten als Weiser für die Zuwachspotenz von Bäumen und Beständen im Wirtschaftswald. Allgemeine Forstzeitschrift (6): S. 469 - 473.
- WEIHS, U., WILHELM, G.-J., ROOS, R. (1999): Wie sich unbehandelte Fichtenbestände aus Naturverjüngung entwickeln. Allgemeine Forstzeitschrift / Der Wald (4): S. 172 - 175.
- WEISE, U. (1982): Zur Aufnahmemethodik bei Stammanalysen. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung (153): S. 201 - 205.
- WEISE, U. (1987): Beiträge zur Methode und Genauigkeit von Stammscheiben-, Bohrkern- und Stammanalysen an Fichte und Tanne. Mitteilungen der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (130): 133 S.
- WEISE, U. (1995): Zuwachs- und Jungwuchsentwicklung in Versuchen zur natürlichen Verjüngung von Fichten-Tannen(Buchen)-Beständen in Baden-Württemberg: Ergebnisse nach 10jähriger Laufzeit der Versuche. Mitteilungen der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, 192: 75 S.
- WELLER, E. (2002): Klimaschutz Kernaussagen – Thesen zum Beitrag des Waldes und der Forstwirtschaft. Vortrag zum ersten Thüringer Klimaforum am 16. April 2002 in Erfurt.
- WENK, G.; RÖMISCH, K., GEROLD, D. (1985): DDR-Fichtenertragstafel 1984. Technische Universität Dresden, Sektion Forstwirtschaft, Tharandt: 64 S.
- WESSOLY, L., ERB, M. (1998): Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle. Patzerverlag. Berlin, Hannover.

---

WIEDEMANN, E. (1936/42): Fichten-Ertragstafel. IN: SCHOBER, R. (1975): Ertragstafeln wichtiger Baumarten. Sauerländer`s Verlag. Frankfurt am Main.

WIEDEMANN, E. (1951): Ertragskundliche und waldbauliche Grundlagen der Forstwirtschaft. Sauerländer`s Verlag. Frankfurt/Main.

WILHELM, G., LETTER, H.-A., EDER, W. (1999): Konzeption einer naturnahen Erzeugung von Wertholz (4 aufeinander folgende Artikel). Allgemeine Forstzeitschrift / Der wald (54): S 232 - 240.

WILSON, B. F., ARCHER, R. R. (1979): Tree design: Some biological solutions to mechanical problems. Biology Science (29): p. 292 - 298.

WOHLFAHRT, E. (1935): Auswirkungen langjähriger Kronenpflege in mitteldeutschen Fichtenbeständen. Zeitschrift für das Forst- und Jagdwesen (67): S. 289 - 310, 344 - 360.

WYKOFF, W. R. (1990): A basal area increment model for individual conifers in the Northern Rocky Mountains. Forest Science (36): p. 1077 - 1104.

ZEHNER, T. (2004): Der Wald im Freistaat Thüringen – Ergebnisse der zweiten Bundeswaldinventur (BWI II) und der Waldentwicklungs- und Holzaufkommensprognose (WEHAM): Vortrag anlässlich des Kolloquiums der Thüringer Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei zur Auswertung der Bundeswaldinventur II am 30.09.2004 in Gotha.

ZEHNER, T. (2005): Zweite Bundeswaldinventur im Freistaat Thüringen: Ergebnisse und Prognosen bis zum Jahr 2012. Allgemeine Forstzeitschrift / Der Wald (60): S. 422 - 425.

ZIMMERLE, H. (1939): Zuwachsuntersuchungen bei der Fichte und Weißtanne im Gräfl. v. Pückler und Limpurg`schen Forstbezirk Gaildorf. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung (115): S. 305 - 318 u. 323 - 331.