

Jens Schröder

Zur Modellierung von Wachstum und Konkurrenz in
Kiefern/Buchen-Waldumbaubeständen
Nordwestsachsens

Heft **19**
Juli 2004

Forstwissenschaftliche Beiträge Tharandt /
Contributions to Forest Sciences

Inhalt

1 Hintergrund und Motivation der Arbeit.....	1
1.1 Einführung.....	1
1.2 Waldumbau als Herausforderung für die Waldwachstumskunde	2
1.3 Zielstellung der Arbeit.....	4
2 Überblick: Waldumbau und Waldwachstumsmodellierung.....	7
2.1 Waldumbau in Sachsen	7
2.1.1 Hintergrund und aktueller Stand.....	7
2.1.2 Waldumbau im Forstamt Falkenberg	9
2.1.3 Voranbau als Mittel des Waldumbaus.....	11
2.2 Wachstumsmodelle und Konkurrenz: der Stand der Forschung	14
2.2.1 Modellierung des Waldwachstums im Überblick	14
2.2.1.1 Terminologie	14
2.2.1.2 Aktuelle Entwicklungen	17
2.2.2 Methoden zur Abbildung der Konkurrenzverhältnisse	19
2.2.2.1 Konkurrenz in Waldbeständen	19
2.2.2.2 Konkurrenzindizes.....	20
2.2.2.3 Alternative Verfahren der Konkurrenzschätzung.....	21
2.2.3 Modellierung von Konkurrenz und Wachstum in strukturreichen Beständen	22
3 Material	25
3.1 Charakterisierung des Untersuchungsgebietes	25
3.2 Versuchsflächen.....	26
3.2.1 Der Chronosequenzansatz	26
3.2.2 Ausgewählte Versuchsflächen und Versuchsdesign	27
3.2.2.1 Versuchsflächencharakteristik.....	27
3.2.2.2 Flächendesign	29
3.3 Die Tharandter Versuchsflächendatenbank.....	31
3.3.1 Hintergrund.....	31
3.3.2 Ausgewählte Meßreihen aus dem Datenbankbestand	32
3.3.2.1 Versuchsflächendaten für die Konkurrenzmodellierung.....	32
3.3.2.2 Versuchsflächendaten für die Parametrisierung.....	33
3.4 Das Analyse- und Prognoseprogramm <i>BWINPro</i>	33
4 Methodik	36
4.1 Allgemeines zum methodischen Vorgehen	36
4.1.1 Zur Anwendung von <i>BWINPro</i> in zweischichtigen Beständen.....	36
4.1.2 Wachstum und Konkurrenz in der Verjüngungsschicht.....	37
4.1.2.1 Betrachteter Ausschnitt aus den Konkurrenzverhältnissen	37
4.1.2.2 Untersuchte Wachstumsgrößen	38
4.1.3 Erhobene Datenbasis für die Auswertung der Versuchsflächen	39

4.2 Konkurrenzquantifizierung durch geometrische Indizes	41
4.2.1 Verwendete Indizes und ihre Berechnung	41
4.2.2 Zusätzliche Optionen der Konkurrenzquantifizierung	45
4.2.2.1 Südgewichtung	46
4.2.2.2 Abstandsgewichtung	47
4.2.2.3 Kronendurchlässigkeits- und Belaubungsfaktoren (KDF / BLF)	47
4.3 Konkurrenzquantifizierung mit Hilfe hemisphärischer Fotos.....	49
4.3.1 Theorie	49
4.3.2 Praktisches Vorgehen zur Fotoaufnahme und Strahlungsmessung.....	50
4.3.3 Herleitung der Ergebnisse	52
4.3.3.1 <i>Diffuse site factor</i> (DIFFSF) und 10°-Zenith-Überschirmung.....	52
4.3.3.2 <i>Direct site factor</i> (DIRSF) und <i>total site factor</i> (TOTSF)	54
4.3.3.3 <i>Photosynthetically active radiation</i> (PAR)	55
4.4 Statistische Methoden	57
4.4.1 Allgemeines und EDV	57
4.4.2 Einfache und partielle Korrelationsanalyse.....	57
4.4.3 Regressionsanalysen.....	60
4.4.4 Mittelwertvergleiche und Verteilungstests.....	61
4.4.5 Evaluierungskenngrößen	63
4.5 Modellierung des Jugendwachstums unter Schirm	64
4.5.1 Definition von Anspruch, Form und Inhalt eines Jugendwachstumsmoduls.....	64
4.5.1.1 Konzeptionelle Eingrenzung des Modellansatzes.....	64
4.5.1.2 Programmtechnische Umsetzung.....	65
4.5.2 Etablierung der Verjüngung: Pflanzen einer Verteilung.....	66
4.5.3 Modellentwicklung für die Jugendwachstumsphase.....	67
4.5.3.1 Höhenwachstum	68
4.5.3.2 Konkurrenzindizes	79
4.5.3.3 Durchmesserentwicklung	80
4.5.3.4 Kronenbreite und Kronenansatzhöhe	83
4.5.3.5 Pflegemaßnahmen und Mortalität	84
4.5.3.6 Datenergänzung und Übergang in das "reife" Wachstum.....	90
4.6 Das Wachstumsmodell für den Gesamtbestand.....	91
4.6.1 <i>BWINPro</i> : Wachstumsmodell und steuernde Größen.....	91
4.6.2 Die Einzelkomponenten und ihre Parametrisierung.....	92
4.6.3 Modifizierter Ansatz zur Mortalitätsmodellierung	95
4.6.4 Flexibilisierung des Ansatzes zur Konkurrenzquantifizierung	96
4.7 Methodik der Evaluierung des Gesamtwuchsmodells	96
4.7.1 Vergleich von <i>BWINPro-S</i> mit <i>BWINPro-N</i>	97
4.7.2 Vergleich der Modelle mit realen Wachstumsverläufen und Ertragstafeln	97

5 Ergebnisse	99
5.1 Erfassung der Konkurrenzbeziehungen.....	99
5.1.1 Konkurrenzschätzung über meßbare Baumparameter (geometrische Methode)	99
5.1.1.1 Konkurrenz und Zuwachs auf den Chronosequenzflächen	99
5.1.1.2 Flächenübergreifende Analysen	109
5.1.1.3 Weitere Versuchsflächen.....	112
5.1.2 Strahlungs- und Konkurrenzschätzung über die Fotomethode.....	114
5.1.2.1 Auswahl der Strahlungsinformationen	115
5.1.2.2 Mittelwertbetrachtungen für DIFFSF, Z10 und PAR_W.....	116
5.1.2.3 Korrelationen zwischen Zuwachs und Strahlungsgrößen	118
5.1.2.4 Geometrische Konkurrenzindizes und Fotoinformationen.....	123
5.2 Modifizierung und Erweiterung eines Wachstumssimulators für Sachsen.....	126
5.2.1 Anpassung und Neuparametrisierung von Wachstumsfunktionen.....	126
5.2.1.1 Kronenbreite bzw. Kronendurchmesser	126
5.2.1.2 Veränderung der Kronenansatzhöhe	128
5.2.1.3 Durchmesserzuwachs	129
5.2.1.4 Höhenzuwachs.....	131
5.2.2 Datenergänzung	133
5.2.3 Mortalitätsmodellierung	135
5.2.4 Überarbeitung des Modells zur Konkurrenzquantifizierung	137
5.3 Ein Modell für das Wachstum der Verjüngung.....	141
5.3.1 Pflanzen einer Verteilung	142
5.3.2 Höhenentwicklung.....	144
5.3.2.1 Ausgangsverteilung	144
5.3.2.2 Höhenwachstum	146
5.3.3 Durchmesserentwicklung	155
5.3.4 Kronendimensionen.....	161
5.3.4.1 Kronenbreite	162
5.3.4.2 Kronenansatzhöhe	164
5.3.5 Pflegemaßnahmen und Mortalität	166
5.4 Synthese: Ein Wachstumsmodell für Umbaubestände.....	172
5.4.1 Ausgangszustand und modellierte Entwicklung im Beispiel	172
5.4.2 Schema der Jugendwachstumsmodellierung in <i>BWINPro-S</i>	179
5.4.3 Anwendung von <i>BWINPro-S</i> im Vergleich mit <i>BWINPro-N</i> und Ertragstafeln...	181
6 Diskussion.....	186
6.1 Anwendungsbereich des Simulators.....	186
6.1.1 Standörtlicher Bezug und Datengrundlage.....	186
6.1.2 Waldbauliche Bedeutung.....	187

6.2 Abbildung der Konkurrenzbeziehungen	189
6.2.1 Konkurrenzzielgrößen	189
6.2.2 Geometrische Konkurrenzindizes	191
6.2.3 Konkurrenzquantifizierung mit Hilfe hemisphärischer Fotos.....	196
6.3 Neuparametrisierung des Simulators <i>BWINPro</i>	204
6.3.1 Wachstumsfunktionen	204
6.3.2 Das Konkurrenzmodell	213
6.3.3 Mortalität.....	215
6.4 Die Modellierung des Jugendwachstums	218
6.4.1 Versuchsdesign und Ausgangsdaten	218
6.4.2 Modelleigenschaften	219
6.4.3 Entwicklung der Baumparameter in der Jugendphase	220
7 Schlußfolgerungen und Ausblick	226
7.1 Modelltheorie	226
7.2 Übertragbarkeit.....	228
7.3 Ansatzpunkte zukünftiger Forschungen.....	229
7.3.1 Modelltheoretische Optimierung.....	229
7.3.2 Einsatzfähigkeit in der Waldbewirtschaftung und Forstverwaltung	230
8 Zusammenfassung.....	232
9 Literatur	240
10 Anhang	250

8 Zusammenfassung

- Zielstellung -

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der modellhaften Nachbildung und konkurrenzsensitiven Prognose des Einzelbaumwachstums in Voranbaubeständen aus Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) und Buche (*Fagus sylvatica* L.) in Nordwestsachsen. Dazu wird ein praxiserprobtes Computerprogramm zur Bestandesanalyse und Wachstumsprognose (*BWINPro*) genutzt. Die Hauptziele der Arbeit lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- *Regionalisierung* des Simulators *BWINPro*, d.h. Anpassung an die Wuchsbedingungen, die für die Wälder im Bundesland Sachsen typisch sind;
- *Ergänzung* des in *BWINPro* enthaltenen Wachstumsmodells z.B. durch die flexiblere Gestaltung des Konkurrenzermittlungsmodells und durch die Integration spezieller SchätZRoutinen für die natürliche Mortalität;
- *Spezialisierung* bzw. Erweiterung des Programmes für den Einsatz zur unterstützenden Begleitung des ökologischen Waldumbaus. Schwerpunkt dabei ist die konkurrenzbeeinflusste Entwicklung der Individuen in der Voranbau- bzw. Unterschicht.

- Stand der Forschung -

Das Wissen bezüglich der Modellierung des Baum- und Bestandeswachstums wurde in jüngster Vergangenheit bedeutend durch die Entwicklung und Einführung einzelbaumorientierter, rechnergestützter Wachstumsmodelle (Simulatoren), die im deutschsprachigen Raum vor allem durch die Programme *MOSES*, *PROGNAUS*, *SILVA* und *BWINPro* repräsentiert werden. Kennzeichnend für jeden Simulator ist dabei u.a. seine regionalbezogene Datenbasis, die als Grundlage der Parametrisierung bzw. Kalibrierung den Gültigkeitsbereich der Programme bestimmt.

Mit dem Waldumbau von gleichaltrigen Nadelholzreinbeständen in strukturreichere Mischbestände sind besondere Herausforderungen für die Wachstumsmodellierung verbunden, besonders hinsichtlich der Abbildung vielfältiger verschiedener Wuchskonstellationen, Bestandesstrukturen und Konkurrenzbeziehungen. Gerade für die Jugendentwicklung und für mehrschichtige Mischbestände sind dabei bisher nur unzureichende Grundlagen für die rechnerbasierte Wachstumsmodellierung gegeben. Dieses methodische und praktische Defizit wird zur Zeit im Rahmen mehrerer Arbeitsgruppen für die einzelnen Simulatoren reduziert. Für *BWINPro* tragen dazu die in den nachfolgenden Kapiteln beschriebenen Ansätze bei.

- Material und Methoden -

Entsprechend der Zielsetzung sowie der herausgearbeiteten Kenntnislücken ergaben sich für die Modellierung der Entwicklung von Waldumbaubeständen zwei Hauptarbeitsfelder:

- Anpassung des aus Niedersachsen übernommenen *BWINPro-N* hinsichtlich seines Wachstumsmodells und der zugrundeliegenden Funktionen und Koeffizienten für die Baumarten Kiefer und Buche an die Wuchsverhältnisse in Sachsen und dadurch Schaffung der sächsischen Programmversion *BWINPro-S*;
- Erarbeitung eines Basismodells der konkurrenzbeeinflussten Entwicklung in der Jugendphase als integraler Bestandteil von *BWINPro-S*.

Die Grundlage für die Erarbeitung von *BWINPro-S* bestand im wesentlichen aus geeigneten Rein- und Mischbeständen der Tharandter Versuchsflächendatenbank, die in Sachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt seit teilweise mehr als 140 Jahren beobachtet werden. Zusätzlich wurde im Forstamt Falkenberg in Nordwestsachsen eine Wuchsreihe von Kiefern/Buchen-Versuchsflächen angelegt. Sie deckt typische Stadien der Entwicklung von zweischichtigen Waldumbaubeständen ab, die aus der Pflanzung einer Buchenunterschicht in Kiefernbeständen entstanden sind. Zu Beginn der Beobachtungen im Jahr 2000 betrug das Alter der Voranbauschichten 9, 22 und 39 Jahre, das Alter des Kiefernschirmes lag bei 55, 86 bzw. 96 Jahren. Auf diesen drei Flächen erfolgten intensive Erhebungen aller wesentlichen Einzelbaumparameter, die im Anschluß sowohl für die Charakterisierung der individuellen Wuchsbedingungen als auch zur Modellierung des Zusammenhanges zwischen Wachstum und Konkurrenz für den Einzelbaum genutzt wurden.

Zur Quantifizierung der Konkurrenzwirkungen auf das Einzelbaumwuchsverhalten in der Unter- bzw. Voranbauschicht wurde auf eine Auswahl von Konkurrenzindizes (CIs) zurückgegriffen, die sich vorrangig auf die Abbildung der Strahlungsverhältnisse richten. Diese gingen in mehrstufige Tests ihrer Beziehung zum Einzelbaumhöhen- und BHD-Zuwachs ein. Die Analysen erfolgten sowohl getrennt für die einzelnen Altersstufen als auch zusammenfassend für alle drei Flächen. Als zweiter Ansatz, um den Konkurrenz einfluß auf das Einzelbaumwachstum vor allem hinsichtlich der wuchsrelevanten Strahlung zu schätzen, wurden auf den Versuchsflächen der Wuchsreihe hemisphärische Fotos des Kronenraums für eine Anzahl von Prohebäumen aufgenommen. Ihre Auswertung erfolgte computergestützt für die Strahlungsparameter *diffuse site factor* (DIFFSF), 10° -Zenith-Überschirmung (Z10) und witterungsbeeinflusster PAR (PAR_W).

Das Wachstum der vorangebauten Buchen in der Jugendphase wurde mit einem einzelbaumorientierten Ansatz modelliert. Zentrale Wachstumsgröße ist die Baumhöhe, da für den Höhenzuwachs altersübergreifend eine straffere Beziehung zu den CIs nachgewiesen werden konnte als für den BHD-Zuwachs. Die Schätzung des Einzelbaumzuwachses erfolgt direkt durch eine lineare Funktion mit Hilfe der Parameter Ausgangshöhe, Alter und Konkurrenz einfluß. Die Konkurrenz wird durch zwei CIs getrennt für den Schirmschicht einfluß und für den Einfluß der Konkurrenten in der Voranbauschicht abgebildet. Da sich die Funktion, die für höhere Altersstadien über 30 Jahren das Höhenwachstum steuert, nicht zur Extrapolation "nach unten" eignet, wurde zur Begrenzung des Höhenwachstums eine Wurzelfunktion in das Modell integriert. Ihr Graph verläuft ab dem Altersbereich

25-30 synchron zur Oberhöhenbonität 36 der Buchen-Ertragstafel, die dem Höhenwachstum dieser Baumart im Altbestandsbereich von *BWINPro-S* zugrunde liegt. Der BHD der Voranbau-Buchen wird als Funktion der Höhe modelliert, wobei sich die Koeffizienten dieses funktionalen Zusammenhanges altersabhängig verändern. Kronenbreite und Kronenansatzhöhe entwickeln sich nach nichtlinearen Funktionen, die im ersten Fall den BHD und das Alter und im zweiten Fall die Baumhöhe, den BHD und die Bestandesspitzenhöhe miteinander verknüpfen. Zur Abbildung der natürlichen Mortalität und pflegeorientierter Stammzahlreduktionen enthält das Jugendwachstumsmodul einfache Modelle, die anhand mittelhöhenabhängiger maximaler Dichten automatisch Bäume entnehmen. Die Wahrscheinlichkeit, zum ausscheidenden Bestand zu gehören, bestimmt sich anhand des Verhältnisses des individuellen Höhenzuwachses zum maximal in der betrachteten Voranbauschicht geleisteten Höhenzuwachs.

- Ergebnisse -

Bei der Analyse und Modellierung des Jugendwachstums zeigte sich, daß kein CI-Modell eine herausragende Stellung gegenüber anderen einnimmt. Leichte Vorteile hinsichtlich ihrer Eignung zur Zuwachsmodellierung sind jedoch festzustellen einerseits für Auswahlverfahren, die dem Lichtkegelmodell zuzuordnen sind, und andererseits für Quantifizierungsmodelle, die sich auf Kronenparameter des Zentralbaums und der Konkurrenten stützen. Die Hinzunahme der Konkurrenzinformation in Zuwachsmodelle reduziert den Standardfehler der Schätzung im Fall des Höhenzuwachses deutlich stärker (um bis zu 40 %) als im Fall des BHD-Zuwachses (um bis zu 26 %). Zur Integration in das Jugend-Höhenzuwachsmodell von *BWINPro-S* wurde schließlich ein CI ausgewählt, der die Konkurrentenauswahl durch ein Licht- bzw. Suchkegelmodell mit 80°-Öffnungswinkel auf Kronenansatzhöhe realisiert. Die Konkurrenzquantifizierung erfolgt durch ein speziell entwickeltes Modell, das die vertikalen Kronenprojektionen von Konkurrenten und Zentralbaum gegenüberstellt.

Die Auswertung der hemisphärischen Fotos hinsichtlich DIFFSF, Z10 und PAR_W ergab kaum signifikante Zusammenhänge zwischen den Strahlungsgrößen und dem Einzelbaumzuwachs, wofür aber auch der relativ geringe Stichprobenumfang verantwortlich ist. In einer parallel durchgeführten Aufnahmeserie in Fichten/Buchen-Beständen konnten die Beziehungen zwischen Fotoinformationen zur Strahlungsverfügbarkeit und Zuwachswerten wesentlich deutlicher nachgewiesen werden. Zur Modellierung des Einzelbaumwachstums sind die Strahlungsparameter, wie sie nach der hier angewandten Methodik mit hemisphärischen Fotos erhoben und abgeleitet wurden, jedoch insgesamt als unzureichend zu bezeichnen.

Testläufe des in *BWINPro-S* integrierten Jugendwachstumsmoduls ergaben biologisch plausible Entwicklungen der Wachstumsgrößen in Abhängigkeit von der Wuchskonstellation über einen Zeitraum von 20 Jahren. Ab einer Höhenschwelle von 15 Metern werden

die Vorkultur-Buchen als Altbestand identifiziert und ihr Wachstum nach den dafür gültigen Modellen simuliert.

Das Modul für das Altbestandswachstum wurde zum größten Teil aus *BWINPro-N* übernommen und auf Basis eigener Versuchsflächendaten für die Baumarten Kiefer und Buche neu parametrisiert. Jeder Bestandteil des Wachstumsmodells, das die Veränderung der Kronenansatzhöhe und Kronenbreite, den Grundflächenzuwachs und den Höhenzuwachs schätzt, wurde auf seine Fähigkeit zur Abbildung der veränderten Ausgangsdatenlage geprüft und gegebenenfalls modifiziert. Dies schließt auch die Programmelemente zur Datenergänzung und Strukturgenerierung für die Erzeugung ganzer Bestände aus unvollständigen Ausgangsinformationen ein. Die resultierenden Veränderungen im Vergleich zu *BWINPro-N* umfassen im wesentlichen folgende Punkte:

- Verwendung eines neuen Konkurrenzindex auf Lichtkegelbasis mit Vergleich der Kronenschirmflächen zur positionsabhängigen Schätzung des Grundflächenzuwachses. Dadurch stieg besonders für die Buche die Abbildungsgüte in Bezug auf die sächsische Datenbasis;
- Einführung eines zusätzlichen Terms mit der dritten Potenz des Alters in die Funktion zur Bestimmung des potentiellen Höhenzuwachses. Die neue Funktion ermöglicht eine straffere Anpassung an die in Sachsen genutzten Ertragstafeln;
- Flexibilisierung der Kronenbreitenfunktion für Buche durch Nutzung des Alters als zusätzliche Einflußvariable. Damit können verschiedene Wachstumsverläufe als Reaktion auf unterschiedliche Waldaufbauformen besser wiedergespiegelt werden;
- Programmierung und Integration eines neuen Mortalitätsmodells für die Baumarten Buche, Kiefer und Fichte. Dieses nutzt ein dreistufiges Verfahren einschließlich einer LOGIT-Funktion, einer Mortalitätswahrscheinlichkeitsfunktion und stochastischer Komponenten, das mit Daten sächsischer Versuchsflächen parametrisiert wurde;
- Integration der in Sachsen verwendeten Schaftform- und Volumenfunktionen in Ergänzung zu den enthaltenen niedersächsischen Modellen, Erweiterung des Spektrums nutzbarer Bestandeshöhenkurven durch die Funktion nach MICHAÏLOFF.

In abschließenden Vergleichen von Simulationsläufen in *BWINPro-S* und *BWINPro-N* mit Ertragstafelprognosen für eine Auswahl an Versuchsflächen zeigte sich, daß die Simulatoren im Durchschnitt deutlich genauere Schätzungen der realen Entwicklung ermöglichen als die Ertragstafeln. Dies gilt sowohl hinsichtlich des Höhen- als auch des Durchmesserwachstums. Der höchste relative Fehler der Simulatorschätzungen, bezogen auf einen Prognosezeitraum von 10 Jahren, betrug 2.6 %. Speziell für die Prognose der BHD-Entwicklung ist dabei ein Trend zur höheren Abbildungsgenauigkeit der sächsischen Programmversion zu beobachten.

Sämtliche Änderungen und Ergänzungen, die in dieser Arbeit theoretisch hergeleitet, getestet und bewertet wurden, sind in das Computerprogramm *BWINPro-S* eingearbeitet worden. Im Zusammenwirken mit den parallel durchgeführten Analysen und Modellierungen für Fichten/Buchen-Waldumbaubestände entstand so ein lauffähiges Programmpaket, das für vielfältige Zwecke einsetzbar ist. Als regionale Variante seines Vorbildes *BWINPro-N* wird es in Kürze auch im Internet als Shareware verfügbar sein.

Modeling growth and competition in mixed stands of Scots pine and European beech with special respect to forest conversion in Northwestern Saxony

Summary

- Objectives -

The main subjects of this thesis are the analysis and modeling of growth processes in mixed stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) in Northwestern Saxony. Special emphasis is put on the modifying effects of inter- and intraspecific competition. The most important tool used for these purposes is *BWINPro*, a computer program designed for analyzing and predicting growth and yield in forest stands on a single-tree basis¹. The overall objectives of the thesis may be summarized as follows:

- Adjustment of *BWINPro* to the specific growth conditions and site characteristics in Saxony;
- Completion of *BWINPro*'s growth model routines by implementing a modified competition index and a new module for the estimation of mortality rates;
- Adaptation of the program to the particular silvicultural and management needs in two-storeyed stands evolved from advanced-planting measures, focusing primarily on growth and competition mechanisms of individual trees in understorey layers.

- Current approaches to modeling tree and stand growth -

One of the most influential trends in Growth and Yield Science over the past few decades has been the development and introduction of computer-based, single-tree oriented growth simulators. Models of this type allow for the competitive interactions which modify a tree's growth and the development of whole stands. The most important growth simulators that have been developed and tested in practice in German-speaking countries are *MOSES*, *PROGNAUS*, *SILVA* and *BWINPro*. Each model is characterized by its regional database which formed the foundation for calibrating the basic growth functions and therefore defines its geographic applicability limits.

The conversion of pure even-aged conifer stands to structurally diverse mixed stands poses a number of challenges for modeling growth and yield. Any reliable model has to include routines for the adequate representation of a variety of spatial growth constellations and resulting types of competitive interactions. However, the scientific basis for modeling the development of very young trees in multi-storeyed uneven-aged stands is still insufficient. Several projects are carried out at the moment that concentrate on closing this theoretical and practical gap. This thesis is contributing to these attempts, focusing on the application

¹ *BWINPro* was created by a team of forest growth specialists led by Prof. Dr. J. Nagel at the Forest Research Station of Lower Saxony in Göttingen.

of *BWINPro* to pine/beech conversion stands in the Northwestern region of Saxony.

- Material and methods -

Considering the main objectives of the thesis and the lack of knowledge about individual tree growth in structurally diverse mixed stands, the following two basic research fields evolved:

- Adaptation of *BWINPro* as it has been developed in Lower Saxony to the specific growing conditions in Saxony, thus creating an additional version labelled *BWINPro-S*. This has to be done for Scots pine and European beech;
- Creation of a basic approach to modeling initial growth of beech under pine canopies and implementation of this component as an additional module in *BWINPro-S*.

The database for *BWINPro-S* consisted mainly of experimental plots and research stands in Saxony and adjacent regions which were compiled and analyzed by means of a special databank located at the Chair of Forest Growth and Yield in Tharandt. Three additional sample plots of varying age composition were established in mixed pine/beech-stands in the Falkenberg forest district in Northwestern Saxony. The derived data were used to (i) characterize the individual growth situation of each tree, particularly in the understorey beech layer, and (ii) to model the relation of growth and competition for these trees.

The effects of competition on individual growth and increment were evaluated and quantified by means of competition indices (CIs) which were chosen for their ability to represent spatial growing constellations with special respect to the amount of solar radiation accessible for an individual tree. As a second approach to quantify the influence of competition on growth performances, hemispherical (fish-eye) photographs of the canopy were taken for a number of points in each sample plot. Further analysis of these photographs included the diffuse site factor (DIFFSF), the sky obscuration factor in a 10°-zenith angle (Z10), and the point-selected photosynthetically active radiation as influenced by real weather conditions (PAR_W).

A single-tree oriented approach was used to model the development of beech in understorey layers in *BWINPro-S*. As a consequence of higher average correlation coefficients for the relation of height increment and CIs than for DBH increment and CIs, height and its increment form the central parameters of the understorey growth model. Height increment is estimated by a linear function including initial height, age, and two CIs (for vertical and for horizontal competition, respectively) as independent variables. DBH and crown parameters depend on the height of the subject tree. Mortality and thinning are represented in the program by simple, user-directed procedures which eliminate trees in accordance to variable threshold levels.

- Results -

Analysis of a number of CI-models revealed that no single index was generally superior to all the others in terms of their suitability for modeling juvenile height and DBH increment in beech. There were, however, slight advantages for CIs containing a three-dimensional light-cone model for identifying competitors and models incorporating crown parameters in estimating individual competition effects. Consequently, *BWINPro-S* uses a 80°-angle light cone for identifying competitors and a sub-model to quantify competition which relates the vertical crown projections of the subject tree to those of its competitors. Tests of *BWINPro-S* including the new module for predicting juvenile growth resulted in biologically sensible and stable estimations for a period of 20 years, covering a height range from 1.3 m up to 15 m. Computer-based processing of fish-eye photo information yielded little significant correlations of radiation parameters and individual increment measures for beech under pine canopies. Additional series of photographs in beech layers under canopies of Norway spruce, however, showed that height and DHB increment of beech correlated much stronger with DIFFSF and PAR_W than in pine/beech-stands.

The main part of the module for predicting the development of mature trees (height > 15 m) was transferred from the original program of *BWINPro* to its Saxon version (*BWINPro-S*) with a number of necessary adjustments, e.g. in yield tables and stem volume functions as used by basic program algorithms. New coefficients were determined for all essential growth functions in adaptation to the new regional database, concentrating on beech and pine. Further modifications include:

- The introduction of a new additional competition index into the sub-model for estimating basal area increment;
- An alternative function for calculating potential height increment involving height raised to the power of three as an additional independent variable;
- A new flexible sub-model for predicting crown width in beech;
- The integration of an alternative individual tree mortality module for beech, pine and Norway spruce (*Picea abies* (L.) KARST.), predicting the natural elimination of trees from a logistic regression model and a function that estimates specific mortality probabilities depending on a tree's dimension and its increment.

Trials with *BWINPro* and *BWINPro-S* in comparison with yield table predictions showed that the single-tree oriented computer models have a much greater flexibility in reflecting variable species and age composition as well as different types of stand structure. Height and DBH increment were estimated with higher precision by the computer models. The maximum relative error was 2.6 % referring to a 10-year prognosis for *BWINPro-S* (in predicting average height development). All adaptations, modifications and new modules have been included in a *BWINPro-S* computer program that will be accessible on the internet shortly.