

Untersuchungen zur Verjüngung von Waldbeständen in Nordwestdeutschland

Nils Tremer



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

Untersuchungen zur Verjüngung von Waldbeständen in Nordwestdeutschland

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades
der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie
der Georg-August-Universität Göttingen

vorgelegt von
Nils Tremer
geboren in Helmstedt

Göttingen, im April 2008

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2008
Zugl.: Göttingen, Univ., Diss., 2008
978-3-86727-805-8

D7

1. Berichterstatter: Prof. Dr. Dr.h.c. Klaus von Gadow
2. Berichterstatter: Prof. Dr. Jürgen Nagel
3. Berichterstatter: Prof. Dr. Joachim Saborowski

Tag der mündlichen Prüfung: 18.07.2008

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2008
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen
Telefon: 0551-54724-0
Telefax: 0551-54724-21
www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2008
Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86727-805-8

Vorwort

Dieses Vorwort ist denjenigen gewidmet, die mich in den letzten Jahren im Laufe der Entstehung dieser Arbeit in unterschiedlichster Art und Weise unterstützt, ermutigt, gestärkt und gefördert haben. Ohne diese Hilfe wäre mein Erfolg nicht möglich gewesen.

Die vorliegende Arbeit ist das Ergebnis eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) über drei Jahre finanziell geförderten Forschungsprojektes. Ohne die Bereitstellung der finanziellen Mittel wäre eine Realisierung des Forschungsvorhabens und damit verbunden dieser Dissertation nicht möglich gewesen. Hierfür danke ich der DFG sowie dem Antragsteller Herrn Prof. Dr. Dr.h.c. Klaus von Gadow.

Darüber hinaus gilt Herrn Prof. Dr. Dr.h.c. Klaus von Gadow ein besonderer Dank für die wissenschaftliche Betreuung meiner Forschungsarbeit. Er ließ mir einerseits viele Freiräume, in deren Rahmen ich meine Ideen voll entfalten konnte, war aber andererseits stets für mich da, wenn Probleme auftraten, ich inhaltliche Impulse oder einfach nur ein wenig Ermutigung benötigte.

Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Prof. Dr. Jürgen Nagel von der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt für die Bereitschaft, als Gutachter die Arbeit kritisch zu würdigen. Er brachte mich bereits im Rahmen meiner Masterarbeit auf die Idee, mich mit der Thematik der Verjüngungsmodellierung zu beschäftigen. Dieses Thema fesselte mich so sehr, dass ich mich entschloss, die Arbeit auf diesem Feld fortzuführen und in einer Dissertation münden zu lassen.

Mein Dank gilt des Weiteren Herrn Prof. Dr. Joachim Saborowski, Herrn Prof. Dr. Walter Zucchini sowie Dr. Matthias Schmidt für ihre fachliche Unterstützung. Für die unkomplizierte Bereitstellung des umfangreichen Datenmaterials danke ich dem Leiter des Niedersächsischen Forstplanungsamtes Wolfenbüttel, Herrn Dr. Thomas Böckmann.

Eine wichtige Rolle für ein erfolgreiches Arbeiten haben während meiner Tätigkeit in der Abteilung für Waldinventur und Fernerkundung (ehemals Institut für Waldinventur und Waldwachstum) meine Kollegen gespielt: Ein Dank geht an Herrn Prof. Dr. Christoph Kleinn und das wissenschaftliche Personal für die angenehme und fruchtbare Arbeitsatmosphäre. Ein besonderer Dank gilt auch dem technischen Personal sowie dem Verwaltungspersonal unserer Abteilung, ohne deren Einsatz ein wissenschaftliches Arbeiten nicht möglich wäre: vielen

Dank an Reinhard Schlote, Ulrike Dockter, Hendrik Heydecke, Sonja Rüdiger und Margret Krüger.

Ein ganz herzlicher Dank geht an meine Freunde. Ohne sie wäre es ungleich schwerer geworden, die Sorgen und Nöte des Doktorandendaseins aber auch so manch anderweitige Krise zu bewältigen. Besonders hervorheben möchte ich hierbei Jan Hansen für die unzähligen fachlichen Diskussionen und mindestens ebenso wichtigen privaten “Gedankenaustausche“ in den letzten Jahren.

Von ganzem Herzen bedanke ich mich zuletzt und doch an erster Stelle bei meiner Familie, insbesondere bei meinen Großeltern und meinen Eltern, die mich, wenn bei mir Zweifel aufkamen, immer wieder ermutigt und unterstützt haben meinen Weg weiter zu gehen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Arbeitskonzept	2
1.2	Betriebsinventurdaten als Datengrundlage.....	4
1.3	Stand der Forschung.....	6
2	Entwicklung von Modellen zur Generierung eines Initialzustandes der Verjüngung.....	10
2.1	Zielsetzung	10
2.2	Datengrundlage und -analyse	10
2.3	Methodik	20
2.4	Ergebnisse und Diskussion.....	25
3	Untersuchung der Durchmesserzuwächse natürlicher Buchenverjüngungen	34
3.1	Zielsetzung	34
3.2	Datengrundlage	34
3.3	Methodik	37
3.4	Ergebnisse	42
3.4.1	Wurzelhalsdurchmesserzuwachs.....	42
3.4.2	Ausgangsdurchmesser	44
3.4.3	Transformation der Wurzelhalsdurchmesser in Brusthöhendurchmesser.....	46
3.5	Diskussion	46
4	Statische Schätzung des Einwuchses und der Veränderung von Verjüngungsstrukturen	51
4.1	Zielsetzung	51
4.2	Datengrundlage und -analyse	53
4.2.1	Datengrundlage für die Einwuchs- und Dichteveränderungsmodellierung	53
4.2.2	Datengrundlage Altersmodellierung	57
4.3	Methodik – Modellierung des Einwuchses, der Dichteveränderung und des maximalen Verjüngungsalters	61
4.4	Ergebnisse	69
4.4.1	Einwuchsmodelle	69
4.4.2	Modelle zur Beschreibung der Dichteveränderung.....	75
4.4.3	Modelle zur Schätzung des maximalen Alters der Verjüngung.....	80
4.5	Diskussion – Modellierung des Einwuchses, der Dichteveränderung und des maximalen Verjüngungsalters	83
4.5.1	Diskussion der Einwuchsmodelle	84
4.5.2	Diskussion der Modelle zur Beschreibung der Dichteveränderung.....	91
4.5.3	Diskussion der Modelle zur Schätzung des maximalen Verjüngungsalters ..	100
5	Fazit.....	105
6	Zusammenfassung.....	109

7	Literatur	114
8	Anhang	120
8.1	Koeffizienten und Interzepte der Modelle zur Schätzung der baumarten- höhenklassenspezifischen Verjüngungsdichte	120
8.2	Interzepte der Einwuchsmodelle	130
8.3	Koeffizienten der Modelle zur Schätzung der baumarten-höhenklassenspezifischen Dichteveränderung der Verjüngung	131
8.4	Beobachtete und geschätzte Veränderungen der Verjüngungsdichte innerhalb einzelner Baumarten-Höhenklassenkombinationen	139
8.5	Koeffizienten der Modelle zur Schätzung des maximalen Alters der natürlichen Verjüngung	142
8.6	Interzepte der Modelle zur Schätzung des maximalen Alters der Verjüngung	145
8.7	Ergänzende Grafiken zur Schätzung des maximalen Verjüngungsalters	148

1 Einleitung

Ein wesentliches Merkmal der klassischen Forsteinrichtung ist die Steuerung der Bestandesentwicklung über lange Zeiträume. Die verbindliche Vorgabe langfristiger waldbaulicher Zielvorstellungen und damit oftmals verbunden die Vorgabe festgelegter Handlungsfolgen zum Erreichen dieser Ziele prägten lange Zeit die Forsteinrichtung. Waldbauliche Zielsetzungen können sich jedoch in Reaktion auf ökonomische oder politische Entwicklungen im Laufe eines Bestandeslebens wiederholt ändern, wodurch unterschiedliche Vorstellungen bezüglich einer optimalen Gestaltung der mittel- und langfristigen Waldentwicklung nicht immer eindeutig als "richtig" oder "falsch" einzustufen sind. Der auf solchen Überlegungen basierende, von KÖSTLER und LEIBUNDGUT geprägte Begriff des "freien Stils" im Waldbau (KÖSTLER, 1955; LEIBUNDGUT, 1979) impliziert das Zulassen vieler Lösungen, d.h. eine Erweiterung des forstlichen Handlungsraumes. Für die Forsteinrichtung ergeben sich aufgrund der sich stetig ändernden Bedingungen von Wirtschaft, Politik und Klima neue Zielsetzungen, welche nur mit Hilfe geeigneter Managementmodelle und neuer Planungskonzepte gelöst werden können, die bestimmten realen Anforderungen gerecht werden und damit zur Optimierung forstlicher Handlungsfolgen beitragen können (GADOW, 2005, 2006; HINRICHS, 2006). So ist seit Jahren zu beobachten, dass die mitteleuropäischen Wälder zunehmend ungleichaltriger und gemischter werden (SMALTSCHINSKI, 1990; SCHWENKE und JONQUIERES, 1994; SCHIELER et al., 1995; BRASSEL und BRÄNDLI, 1999; MINISTRY of AGRICULTURE and FISHERIES – COUNTRYSIDE and FORESTRY DEPARTMENT FRANCE, 2000). Dieser Strukturwandel ist ein Ergebnis neuer Waldbauprogramme, die eine selektive Nutzung der Bäume und die natürliche Verjüngung der Waldbestände anstreben. Auf vielen Waldflächen erfolgt die Überführung von homogenen Bestandesstrukturen hin zu strukturreichen, "naturnahen" Wirtschaftswäldern (NIEDERSÄCHSISCHE LANDESREGIERUNG, 1992; BIERMAYER, 1999; BROSINGER und ROTHE, 2002). Bestände, die bereits entsprechende Strukturen aufweisen, sollen so bewirtschaftet werden, dass ihre Heterogenität und Naturnähe erhalten bleibt. Auf den meisten Flächen erfolgt die Verjüngung beim Vorkommen von geeigneten Baumarten im Derbholzbestand auf natürlichem Wege, wobei möglichst auf zusätzliche Pflanzungen verzichtet werden soll (siehe z.B. LÖWE Waldbauprogramm, NIEDERSÄCHSISCHE LANDESREGIERUNG, 1992). Der Überführungserfolg hin zu heterogenen, naturnahen Wirtschaftswäldern bzw. der Erhalt solcher Strukturen hängt nicht zuletzt von einer ausreichenden natürlichen Verjüngung ab (HUSS, 1993; SCHÜTZ, 2003; v. LÜPKE, 2003).

Die natürliche Verjüngung wird maßgeblich durch waldbauliche Eingriffe beeinflusst. Die Kernprobleme im Bereich der Verjüngungsplanung können mit Hilfe der folgenden Fragestellungen spezifiziert werden:

- Ist unter bestimmten waldbaulichen Situationen mit ausreichend natürlicher Verjüngung zu rechnen?
- Welche waldbaulichen Maßnahmen führen zur gewünschten Etablierung natürlicher Verjüngung?
- Wie entwickelt sich die vorhandene Verjüngung innerhalb eines bestimmten Zeitraumes bei verschiedensten Kombinationen von Ausgangssituationen und waldbaulichen Maßnahmenfolgen?
- Wachsen ausreichend Bäume der Verjüngung innerhalb eines bestimmten Zeitraumes in den Derbholzbestand ein?

Die notwendige Beurteilung alternativer Maßnahmenfolgen muss Komponenten zur Verjüngungssimulation beinhalten, um die genannten Fragen beantworten zu können. Nur so können die Auswirkungen unterschiedlicher Behandlungskonzepte umfassend und langfristig abgeschätzt werden, was wiederum eine Basis zur zielgerichteten Optimierung waldbaulicher Entscheidungen schafft. In einigen der in Deutschland verwendeten Waldwachstumssimulatoren wurden zwar bereits Verjüngungs- und Einwuchsmodelle implementiert (PRETZSCH et al., 2002; HERLING, 2005; NAGEL et al., 2006), insbesondere für den norddeutschen Raum können diese Modelle jedoch nur als erste Ansätze eingestuft werden, da eine unzureichende Datengrundlage die Herleitung umfassender Verjüngungsmodelle bisher nicht zuließ. Aufgrund der wachsenden Datenmenge aus Inventuren verbessert sich die Datenlage jedoch stetig. Auf Basis von Inventurdaten soll diese Arbeit einen Beitrag zur Ergänzung vorhandener Waldwachstumssimulatoren um Komponenten zur Prognose der Ergebnisse von Verjüngungsprozessen leisten, bzw. sollen alternative Ansätze zu bereits vorhandenen Komponenten aufgezeigt werden. Hierbei ist die grundlegende Hypothese zu prüfen, dass dies auf Basis der vorliegenden niedersächsischen Inventurdaten möglich ist.

1.1 Arbeitskonzept

Entsprechend der Ausgangsfragestellungen wurde ein Arbeitskonzept erstellt, welches im Kern folgende Punkte enthält:

1. Entwicklung von Modellen zur Generierung eines Initialzustandes der Verjüngung. Die hergeleiteten Modelle sollen eine Schätzung der Dichte sowie der Dimensions- und Artenzusammensetzung der Naturverjüngung in Abhängigkeit von ausgewählten Waldzustandsgrößen, die über Betriebsinventuren erfasst werden können, ermöglichen. Als Ergebnis kann ein umfassendes Modell zur Generierung von Verjüngungsstrukturen vorgelegt werden (TREMÉR et al., 2005, bzw. Kapitel 2). Ein solches Modell liefert Eingangsinformationen für die im weiteren Verlauf der Arbeit entwickelten Modelle zur Beschreibung der Verjüngungsdynamik, sofern keine Verjüngungsinventurinformationen als Startwerte vorliegen.

2. Entwicklung von Modellen zur Fortschreibung eines gegebenen oder generierten Initialzustandes. Die Modelle sollen die Veränderung der Verjüngungsstruktur prognostizieren und die Anzahl an in den Derbholzbestand einwachsenden Bäumen schätzen. Die Verjüngungsstruktur ist durch die Gesamtheit der artspezifischen Verteilungen der Verjüngungshöhenklassen, welche in der Inventurmethodik festgelegt sind, definiert (vgl. Kap. 1.2 bzw. NIEDERSÄCHSISCHES FORSTPLANUNGSAMT, 2001). Der Einwuchs umfasst alle Bäume, die innerhalb eines definierten Zeitintervalls die in Niedersachsen als Brusthöhendurchmesser von 7 cm definierte Grenze zum Derbholzbestand überschreiten (NIEDERSÄCHSISCHES FORSTPLANUNGSAMT, 2001). Hierbei wurden zwei Ansätze verfolgt:

2a) *Herleitung von artspezifischen Modellen zur Schätzung des Wurzelhalsdurchmesserwachstums von Bäumen der Verjüngung.*

Exemplarisch für die Baumart Buche konnte ein empirisches Modell zur Prognose des mittleren jährlichen Wurzelhalsdurchmesserzuwachses innerhalb einer 5-jährigen Wachstumsperiode hergeleitet werden (vgl. TREMER et al., 2007, bzw. Kapitel 3). Durch eine Prognose des Zuwachses am Wurzelhals der Verjüngungsbuchen und der daran anschließenden Transformation des Wurzelhalsdurchmessers in einen Brusthöhendurchmesser am Ende des Zeitintervalls von 5 Jahren kann abgefragt werden, welche Bäume der Verjüngung innerhalb dieses Intervalls den Grenzbrusthöhendurchmesser von 7 cm erreicht bzw. überschritten haben und damit laut Definition in den Derbholzbestand eingewachsen sind. Zu diesem Zweck wurden drei Teilmodelle hergeleitet:

a) Modell zur Schätzung des Ausgangswurzelhalsdurchmessers

- b) Modell zur Prognose des mittleren Wurzelhalsdurchmesserzuwachses einer 5-jährigen Wachstumsperiode
- c) Modell zur Transformation der Wurzelhalsdurchmesser am Ende der fünf Wachstumsperioden in Brusthöhendurchmesser.

2b) Herleitung von statischen Modellen zur direkten Prognose der Veränderung der Baumanzahlen innerhalb der einzelnen Art-Höhenklassen-Kombinationen sowie des artspezifischen Einwuchses. Alternativ zur Beschreibung der Veränderung einer gegebenen Verjüngungsstruktur und des Einwuchses über die Prognose des Durchmesserzuwachses von Bäumen der Verjüngung wurde im dritten Arbeitsabschnitt ein Modellansatz entwickelt, welcher das *Gesamtergebnis* der in einem definierten Zeitintervall stattfindenden Verjüngungsprozesse Ansamung, Keimung, Wachstum und Mortalität schätzt (Kapitel 4). Auch dieser Ansatz machte die Herleitung von mehreren Teilmodellen erforderlich:

- a) Modelle zur Prognose der Anzahlen an aus der Verjüngung in den Derbholzbestand einwachsenden Bäumen der Baumarten (-gruppen) *Buche, Eiche, anderes Laubholz, Fichte, Kiefer*
- b) Modelle zur Prognose der Veränderung der Stammzahlen in den definierten Verjüngungshöhenklassen der Baumarten (-gruppen) *Buche, Eiche, anderes Laubholz, Fichte, Kiefer*
- c) Modelle zur Schätzung des maximalen Alters natürlicher Verjüngungspopulationen für die Baumarten (-gruppen) *Buche, Edellaubholz, Eiche, anderes Laubholz, Fichte, anderes Nadelholz (insb. Kiefer)*.

1.2 Betriebsinventurdaten als Datengrundlage

Detaillierte Angaben zu den jeweils als Datengrundlage genutzten Inventurdaten der niedersächsischen Betriebsinventur werden in den jeweiligen Kapiteln der drei Hauptarbeitsabschnitte gemacht (Kapitel 2.2; 3.2; 4.2). Dort wird auch explizit auf Besonderheiten der Strukturen der Inventurdaten und den damit verbundenen Restriktionen bei der Modellentwicklung eingegangen. An dieser Stelle sollen zunächst einige allgemeine Informationen zu den Inventurdaten gegeben werden. Insbesondere soll verdeutlicht werden,

aus welchem Grund die Modellentwicklung trotz damit verbundener Schwierigkeiten auf Basis von Betriebsinventurdaten erfolgte.

Im Rahmen des von BÖCKMANN et al. (1998) entwickelten Inventurkonzeptes der niedersächsischen Betriebsinventur werden auf konzentrischen Probekreisen Informationen zur Bestandessituation erfasst. Die Verwendung von Inventurdaten unterscheidet sich von den üblicherweise zur Entwicklung von Verjüngungsmodellen verwendeten Versuchsflächendaten (HERLING, 2005) durch eine größere Repräsentativität für unterschiedlichste Standorte, Bestandessituationen etc., sie weist jedoch den Nachteil relativ geringer Flächengrößen zur Erfassung der Struktur des Derbholzbestandes und der Verjüngung auf. Abbildung 1 zeigt das Probekreisdesign der niedersächsischen Betriebsinventur.

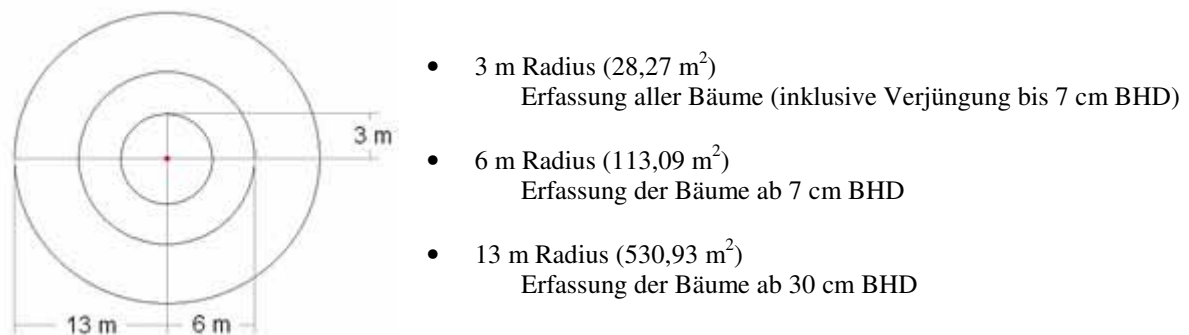


Abb. 1

Probekreisdesign der niedersächsischen Betriebsinventur.

Die geringe Flächengröße führt zu einer höheren Varianz der erhobenen Größen, wobei jedoch bei der zur Verfügung stehenden großen Stichprobenanzahl erwartet werden kann, dass die Mittelwerte und aus ihnen abgeleitete Zusammenhänge mit ausreichender Genauigkeit geschätzt werden können und sich somit eine derartige Datengrundlage für die Modellbildung eignet. Die Erfassung von Häufigkeitsverteilungen über Verjüngungsmerkmalskombinationen anstelle von Einzelbaumparametern muss modelltechnisch berücksichtigt werden, ist jedoch kein Hindernis für die Entwicklung von Managementmodellen.

Eine Verwendung von Inventurdaten für die Modellentwicklung erscheint in mehrfacher Hinsicht vorteilhaft. Zu nennen sind die im Vergleich zu detaillierten Verjüngungserhebungen auf Versuchsflächen geringeren Kosten. Des Weiteren steht mit den Inventurdaten eine extrem umfangreiche sich ständig erweiternde Datenbasis zur Verfügung, die sofern dies nicht schon jetzt der Fall ist, zukünftig auch eine lokale Kalibrierung der Modelle zulassen wird. Zusätzlich ergibt sich der Vorteil, dass die Datenstrukturen in der

Parametrisierungsgrundlage mit denen der Initialisierungsgrundlage von Wachstumssimulatoren übereinstimmen, wenn zum Beispiel waldbauliche Szenarien auf der Basis von Betriebsinventuren berechnet werden.

Die genannten Vorteile beziehen sich in erster Linie auf die Entwicklung von Verjüngungs-Managementmodellen. Modelle für tiefergehende Untersuchungen spezieller Aspekte der Verjüngungsökologie können dagegen nur anhand von Versuchsflächendaten parametrisiert und entwickelt werden (WAGNER, 1999). Diese sind jedoch nicht Ziel der Untersuchungen.

Die genutzten Stichprobendaten lassen sich in drei unterschiedliche Informationsbereiche gliedern. Zum einen liegen allgemeine Angaben zum Stichprobenpunkt vor. Erfasst werden u.a. Gauß-Krüger-Koordinaten, die Hangneigung, die Seehöhe über NN, der Bestandestyp und Bodenzustand (Nährstoffversorgung, Wasserhaushalt). Zusätzlich werden für den Derbholzbestand (alle Bäume ab 7 cm BHD) u.a. die Attribute Polarkoordinaten, BHD, Baumart, -alter und -höhe erfasst. Der dritte Bereich umfasst Verjüngungsinformationen in Form von Anzahlen an Verjüngungspflanzen je vorkommender Art-Höhenklassen-Kombination, mittleres Alter je vorkommender Art-Höhenklassenkombination, der Entstehung, Konkurrenz durch Bodenvegetation, sowie dem Verbiss. Bei eventuell vorkommenden unterschiedlichen Altern innerhalb einer Höhenklasse wird das Alter der Verjüngung als nach Anzahl gewogenes Mittel geschätzt (NIEDERSÄCHSISCHES FORSTPLANUNGSAMT, 2001). Innerhalb der Verjüngung werden drei Höhenklassen (HKL) ausgewiesen:

- HKL 1 < 50 cm
- HKL 2 50-130 cm
- HKL 3 > 130 cm bis 7 cm BHD (Grenze zum Derbholzbestand)

1.3 Stand der Forschung

Verfügbare Wachstumssimulatoren im deutschsprachigen Raum wie z.B. BWINPro oder das auf BWIN Basis entwickelte Managementtool WALDPLANER 1.0 (NAGEL et al., 1999; DÖBBELER et al., 2003; HANSEN, 2006; ALBERT und HANSEN, 2007), SILVA (PRETZSCH, 1992; HERLING, 2005), MOSES (HASENAUER, 1994) und PROGNAUS (MONSERUD und STERBA, 1996) verfügen zwar über erste Modellansätze zur Schätzung der Verjüngungsstruktur und ihrer Entwicklung, allerdings besteht weiterhin erheblicher Forschungsbedarf. Insbesondere die Simulatoren für den norddeutschen Raum bedürfen einer Verbesserung vorhandener bzw. einer Ergänzung um entsprechende Module. Probleme bei

der Modellierung resultieren aus dem im Vergleich zu Derbholzbestandessdatenbeständen kleinen Datenfundus und den insbesondere in der Etablierungsphase komplexen ökologischen Zusammenhängen (HASENAUER et al., 2000). Die meisten Managementmodelle zur Prognose der Verjüngungsstruktur bzw. ihrer Veränderung basieren auf statistischen Ansätzen. Verjüngungsökologische Zusammenhänge sollen zwar auch durch Managementmodelle biologisch plausibel abgebildet werden, aber der Modelltyp der statistischen Modelle zielt in erster Linie auf eine möglichst genaue Reproduktion der Beobachtungsmuster und weniger auf eine Kausalanalyse der Zusammenhänge ab. Die Abbildung von Erklärungsmustern wird dagegen durch Prozessmodelle, oder im Fall der Beschreibung von Langzeitdynamiken (z.B. hinsichtlich von Fragestellungen zum Thema Klimawandel) auch durch Kleinflächen-Modelle geleistet (LINDNER et al., 1997; BUGMAN et al., 2000; BUGMAN, 2001; PRICE et al., 2001). Ein wesentlicher Vorteil guter empirischer Modelle gegenüber prozessorientierten Ansätzen liegt in ihrer hohen Genauigkeit innerhalb des Parametrisierungsbereiches. Außerhalb des durch die Parametrisierungsdaten abgedeckten Bereiches können ökophysiologische Prozessmodelle qualitativ wertvolle Erkenntnisse liefern. Mit Hilfe von Prozessmodellen können ökophysiologische Grundprozesse wie etwa die Strahlungsabsorption, Interzeption, Photosynthese, sowie C-Allokation in stark abstrahierter Form abgebildet werden, was die Untersuchung sowie das Verständnis von Prozessen und der sie bestimmenden Bedingungen wie beispielsweise die Auswirkungen von bestimmten Strahlungs-, Temperatur- und Wasserhaushaltsbedingungen auf die physiologische Leistung von Pflanzen ermöglicht (BOSSEL, 1996; MÄKELÄ et al., 2000; PRETZSCH, 2001; HAUHS et al., 2001; LANDSBERG et al., 2003). Die hohe Sensitivität gegenüber einer Vielzahl von Eingangsvariablen, die teilweise nur über Annahmen bestimmt werden können, sowie die Komplexität der Systeme erschweren jedoch die quantitativ exakte Reproduktion beobachteter Datenstrukturen und damit den Einsatz in Managementmodellen der Forsteinrichtung.

Empirische, zumeist regressionsanalytische Ansätze zur Beschreibung von Verjüngungsprozessen bzw. der Prognose der Ergebnisse von Prozessen wie *Ansamung*, *Keimung*, *Etablierung*, *Wachstum* (und *Einwuchs* in den Derbholzbestand) sowie *Mortalität* basieren auf Daten, die aus großräumigen Verjüngungsinventuren stammen oder aus Versuchsflächen, die für spezielle Fragestellungen angelegt wurden.

Als Beispiele für Modelle zur Prognose der Ergebnisse von *Ansamungs*prozessen sind die Arbeiten von PUKKALA u. KOLSTRÖM (1992), RIBBENS et al. (1994; 1996) und WAGNER (1997) zu nennen. BIBER u. HERLING (2002) sehen die umfassende Modellierung von Samenausbreitungsprozessen allerdings nicht als zwingend notwendig für die Schätzung des

Ankommens und des Einwuchses von Naturverjüngung an. Vielmehr scheint die Struktur des Derbholzbestandes der entscheidende Faktor für die räumliche und quantitative Artenverteilung zu sein. Als Grund wird die relativ geringe Größe der Bestandesausschnitte genannt, mit denen die gängigen Einzelbaumwachstumssimulatoren arbeiten. Dies führt dazu, dass auch wenige Bäume ihre Samen auf der ganzen Fläche in ausreichender Dichte verteilen können. Werden die zu simulierenden Flächen jedoch größer, erscheint auch die Simulation der Samenausbreitung sinnvoll.

Ansätze zur Beschreibung des **An- und Aufkommens** von Naturverjüngung finden sich in den Arbeiten von FERGUSON et al. (1986; 1993; 1996), der in einem mehrstufigen regressionsanalytischen Ansatz schätzt, ob Verjüngung zu erwarten ist und wenn ja, ihre Dichte, sowie ihre Arten- und Dimensionszusammensetzung. Ähnliche Ansätze verwenden KINDERMANN et al. (2002) und LARSEN et al. (1997). Die Dichte der Verjüngung, sofern vorhanden, wird bei KINDERMANN et al. (2002) mittels eines loglinearen Modells geschätzt.

STERBA et al. (1997) sowie SCHWEIGER u. STERBA (1997) berechnen auf der Basis von Regionalinventuren und mit Hilfe von logistischen Funktionen die Wahrscheinlichkeiten a) mit der Verjüngung vorkommt, b) mit der eine bestimmte Baumart vorkommt und c) mit der eine Pflanze der Verjüngung verbissen wird.

Das **Wachstum** der Bäume der Verjüngung wird von MONSERUD u. EK (1977), GOLSER u. HASENAUER (1997), bzw. STERBA et al. (1997), KINDERMANN et al. (2002) und HASENAUER u. KINDERMANN (2002), BIBER u. HERLING (2002) bzw. Herling (2005) als potentieller Zuwachs geschätzt, der durch Konkurrenz verkleinert wird. Der potentielle Zuwachs wird aus der absoluten Höhenbonität abgeleitet oder mittels einer Chapman-Richards-Funktion geschätzt (BIBER u. HERLING, 2002; HERLING, 2005). WAGNER (1999) entwickelte ein Einzelbaumwachstumsmodell für Bäumchen, welches das Wachstum in Abhängigkeit von der Verfügbarkeit bestimmter Ressourcen (unterirdische Ressourcen und Strahlung) simuliert. AMMER (2000) entwickelte dieses Modell weiter.

Beispiele für Modelle zur **Einwuchsschätzung** finden sich in den Arbeiten von SOLOMON et al. (1995), LIN et al. (1998) oder LOOTENS et al. (1999). Zur Anwendung kommen in diesen Modellen zur Einwuchsschätzung lineare Funktionen innerhalb von Matrixmodellen, mit Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen einzelnen Dimensionsklassen, in die die Verjüngungsbäume eingeteilt wurden. VANCLAY (1992) entwickelte ein zweistufiges Modell zur Schätzung des Einwuchses. In der ersten Stufe wird die Wahrscheinlichkeit des Einwuchses berechnet und in der zweiten Stufe auf Basis einer

multiplen linearen Regression die Anzahl der Einwachser. Ein ähnliches Modell entwickelte LEDERMANN (2002). SHIFLEY (1993) sieht den Einwuchs als Funktion des maximal möglichen Einwuchses und der zur Anwendung kommenden Durchmessergröße zum Derbholzbestand an.

Wie die genauere Betrachtung relevanter aktueller Modellansätze zeigt, basieren viele der genannten statistischen, regressionsanalytischen Ansätze zur Schätzung der waldbaulich relevanten Zielvariablen der Verjüngungsstruktur und ihrer Entwicklung auf *verallgemeinerten linearen Modellen* (FAHRMEIR et al., 1996), wobei überwiegend *logistische Regressionsmodelle* mit dichotomer Zielvariable verwendet werden. Mit Hilfe dieser Modelle lassen sich Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten definierter Zustände in Abhängigkeit von Inventurparametern oder aus ihnen abgeleiteten Variablen schätzen, wobei die Parameter als Abstraktionen der eigentlichen verjüngungsbestimmenden Faktoren aufgefasst werden können.

Als Alternative zu den oftmals verwendeten regressionsanalytischen Modellen können neuronale Netze (vgl. HASENAUER und KINDERMANN, 2002) angeführt werden. Wobei es bei komplexen Netzen nahezu unmöglich ist, das Modellverhalten in biologischer Hinsicht zu interpretieren. Ebenfalls von KINDERMANN et al. (2002) stammt ein regelbasierter Ansatz zur Schätzung des Ankommens von Verjüngung auf Basis von Entscheidungsbäumen.

Ältere Modellansätze stammen von LEAK (1968), der einen Markov-Ketten-Ansatz zur Prognose wählte. Ein ähnliches Modell zur großräumigen Entwicklungsprognose entwickelten SHUGART et al. (1973). Im Unterschied zum Markov-Ketten-Ansatz wird in diesem Fall allerdings mit Veränderungsraten in einem Differentialgleichungssystem und nicht mit Übergangswahrscheinlichkeiten gerechnet. 1970 entwickelte LEAK zwei Modelle, die auf Basis von Reproduktions- und Mortalitätsraten die Anzahl der zur Verjüngung dazukommenden und absterbenden Bäume der Verjüngung schätzen können.

In den Ansätzen von HETT u. LOUCKS (1968) und HETT (1971) werden so genannte „Life-Tables“ für die Berechnung der Anzahl nachwachsender Bäume genutzt. Die Mortalitätsrate wird in diesem Ansatz als Funktion des Alters angesehen. Erste Ansätze zur Prognose des Einwuchses von Verjüngungsbäumen in den Derbholzbestand mittels Einwuchsmodellen stammen z.B. von MOSER (1972), der ein System von linearen Differentialgleichungen zur Einwuchsabschätzung nutzt oder von EK (1974), der ein nicht lineares Gleichungssystem nutzt. EK u. MONSERUD (1974) entwickelten ein dem Markov-Ketten-Ansatz ähnelndes Modell.