

Abschlussbericht
zur 2. Phase des BMBF-Projektes
"Modelluntersuchungen zur Umsetzung des
Kyoto-Protokolls"

E.-D. Schulze

Unter Mitarbeit der
Thüringer Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei

Jena, März 2005

Zuwendungsempfänger:	Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Jena (MPG-BGC)
Förderkennzeichen:	01LK9901
Vorhabenbezeichnung:	Modelluntersuchungen zur Umsetzung des Kyoto-Protokolls
Laufzeit des Auftrages:	01.01.2003-31.03.2004
Berichtszeitraum:	01.01.2003-31.03.2004

Inhaltsverzeichnis

<u>Teil I: Kurze Darstellung der Ziele der 2. Projektphase und ihrer Umsetzung</u>	3
A) Definition der Ziele.....	5
B) Umsetzung der Ziele.....	6
<u>Teil II: Eingehende Darstellung der 2. Projektphase</u>	9
1. Implementierung der in der 1. Projektphase entwickelten Modelle und Algorithmen zur C-Bilanzierung von Waldbeständen in das Datenbanksystem der Thüringer Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei (TLWJF).....	11
1.1 Wissensbasierte Integration und Operationalisierung von Methoden und Daten zur räumlichen Quantifizierung der C-Dynamik in Forsten	11
1.2 Berechnung der aktuellen, mittleren C-Flüsse auf der Ebene forstlicher Teilflächen am Beispiel des Forstamtes Hummelshain.....	31
2. Einrichtung eines fortlaufenden Datenflusses von den Forstämtern hin zur Datenbank der TLWJF und laufende Fortschreibung der Datenbank unter Einbeziehung eines Verfahrens zur Fortschreibung von Zuwächsen und Holzernten im Sinne eines „full carbon accounting“:.....	39
2.1 Neueinrichtung des Walddatenspeichers	39
2.2 Holznutzung und Holzprodukte in Thüringen in Abhängigkeit von der Baumartenzusammensetzung und dem Durchforstungsregime	41
3. Einrichtung eines Netzwerkes von Dauerbeobachtungsflächen und wissenschaftlichen Kooperationen zur Verifikation der Fortschreibung von C-Vorräten.	71
3.1 Einrichtung einer Datenbank zu den Dauerbeobachtungsflächen in Thüringen	71
3.2 Stichprobeninventur im Revier Langula (Forstamt Mühlhausen) zur Quantifizierung von Holzzuwachs und -nutzung in strukturreichen, plenterwaldartig bewirtschafteten Buchenwäldern.....	83
4. Einbindung der bislang erarbeiteten Biomassefunktionen und Erkenntnisse der Validierung der BZE Daten in laufende nationale Inventursysteme (BWI II, BZE II)	101
5. Öffentlichkeitsarbeit.....	103
6. Literaturverzeichnis.....	105
<u>Teil III: Erfolgskontrollbericht zur 2. Projektphase</u>	109
<u>Teil IV: Kurzfassung zum BMBF-Projekt „Modelluntersuchungen zur Umsetzung des Kyoto-Protokolls“</u>	113

Teil I

Kurze Darstellung

der Ziele der 2. Projektphase und ihrer Umsetzung

A) Definition der Ziele

In der ersten Phase des Projektes "Modelluntersuchungen zur Umsetzung des Kyoto-Protokolls" (Wirth *et al.* 2003) standen die Berechnung von C-Vorräten und –Flüssen in Thüringer Wäldern und die Bestimmung der Unsicherheiten dieser Berechnungen im Vordergrund. Hierauf aufbauend ergab sich das Hauptziel der zweiten Phase des Projektes:

Hauptziel: Die in der ersten Projektphase ermittelten Modelle und Algorithmen zur Abschätzung von Kohlenstoffvorräten auf der Basis bestehender forstlicher Inventuren (Forsteinrichtung) sollten mit laufenden Erhebungen verknüpft werden, um zu einer operativen C-Inventur der Staatsforste in Thüringen zu gelangen.

Um dieses Ziel zu erreichen wurden im vorliegenden Projekt drei Teilziele verfolgt. Die Basis für eine operative C-Inventur auf Betriebsebene bildete das erste Teilziel:

Teilziel 1: Implementierung der im Rahmen des Vorläuferprojektes entwickelten Modelle und Algorithmen zur C-Bilanzierung von Waldbeständen in das Datenbanksystem der Thüringer Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei (TLWJF).

Für Thüringen ist ein 10-jähriger Turnus zur Erfassung des gesamten Landeswaldes geplant (Zustandserfassung der Forsteinrichtung). Daher müssen die Bestandes-C-Vorräte zwischen aufeinander folgenden Forsteinrichtungen anhand der jährlichen Holznutzung und jährlichen Bestandeszuwachsabschätzungen auf Betriebsebene fortgeschrieben werden. Diese Notwendigkeit zur Fortschreibung der C-Vorräte begründete die weiteren Teilziele:

Teilziel 2: Einrichtung eines fortlaufenden Datenflusses von den Forstämtern hin zur Datenbank der TLWJF und laufende Fortschreibung der Datenbank unter Einbeziehung eines Verfahrens zur Fortschreibung von Zuwächsen und Holzernten im Sinne eines „full carbon accounting“.

Teilziel 3: Einrichtung eines Netzwerkes von Dauerbeobachtungsflächen und wissenschaftlichen Kooperationen zur Verifikation der Fortschreibung von C-Vorräten.

Mit Blick auf eine überregionale Anwendung der im vorliegenden Gesamtprojekt gewonnenen Daten und Erkenntnisse wurde das vierte Ziel der zweiten Projektphase definiert:

Teilziel 4: Einbindung der bislang erarbeiteten Biomassefunktionen und Erkenntnisse der Validierung der BZE Daten in laufende nationale Inventursysteme (BWI II, BZE II).

Die aufgeführten Ziele wurden im Rahmen von sieben, im folgenden Abschnitt kurz vorgestellten Teilprojekten erreicht.

B) Umsetzung der Ziele

1. Teilziel

Projekt 1.1: Die Modelle und Algorithmen zur C-Bilanzierung von Waldbeständen, die in der ersten Projektphase (Wirth *et al.* 2003) entwickelt wurden, sind mittels einer GIS-basierten Anwendung in das Datenbanksystem der TLWJF implementiert worden. Die Anwendung greift direkt auf die Datenbank der TLWJF zu und erlaubt Berechnungen des C-Vorrats für beliebige Staatswaldbestände in Thüringen. Es steht ein handhabbares, flexibles und erweiterbares Werkzeug zur Verfügung.

Die thüringenweite Anwendung wird jedoch noch durch Inkonsistenzen in den Ausgangsdatenbeständen sehr erschwert. In enger Zusammenarbeit mit der TLWJF wird dieses Problem jedoch in Zukunft gelöst werden können. Es besteht zudem die Möglichkeit, das GIS-basierte Informationssystem mit dem zur Zeit neu zu implementierenden Walddatenspeicher (siehe Ziel 2, Projekt 2.1) zu verknüpfen.

Projekt 1.2: Ursprünglich sollten die Dendromasse-C-Vorräte für das Jahr 2002 unter Fortschreibung der zu diesem Zeitpunkt einmal durchlaufenen Forsteinrichtung und die Vorratsänderungen zwischen 2002 und 2003 berechnet werden. Die Ergebnisse sollten in Abhängigkeit von standörtlichen Gegebenheiten, Grad der standortgerechten Bestockung und vorwiegend angewandten waldbaulichen Maßnahmen unter Berücksichtigung von Änderungen der Boden-C-Vorräte analysiert werden. Da entgegen den Erwartungen die erste vollständige Forsteinrichtung nach der Wende (Beginn 1995) noch nicht für alle Forstämter in Thüringen abgeschlossen ist, wurde bereits zum Ende der vorhergehenden Projektphase (Wirth *et al.* 2003) begonnen, C-Vorratsänderungen in der Dendromasse und daraus abgeleitet mittlere Netto-C-Flüsse anhand ausgewählter Forstämter in Thüringen zu berechnen. Während in der ersten Projektphase die Abschätzungen der aktuellen Netto-C-Flüsse vorrangig auf mittleren Bestandes- und Taxations-Werten der untersuchten sieben Forstämter sowie auf Vollzugsschätzungen beruhten, wurden in der zweiten Projektphase die Ergebnisse am Beispiel des Forstamtes Hummelshain teilflächenweise überprüft. Die Verknüpfung zwischen Bestandesbiomasse und Boden-C-Vorräten wurde über eine GIS-basierte Anwendung realisiert.

2. Teilziel

Projekt 2.1: Auf Initiative und mit Unterstützung des vorliegenden Projektes wurde die Wiedereinrichtung des früheren „Datenspeicher Waldfonds“ (DSWF, kurz: „Walddatenspeicher“) für Thüringen begonnen. Der "Walddatenspeicher" ist eine Inventurdatenbank, die auf der jeweils jüngsten vollständigen Forsteinrichtung basiert und anhand von Bestandeszuwachsabschätzungen und jährlicher Berichterstattung aus den Forstbetrieben zur tatsächlich erfolgten Nutzung laufend fortgeschrieben wird. Die detaillierte

Ausgestaltung und Implementierung des "Walddatenspeichers" wird derzeit von der TLWJF in Zusammenarbeit mit den forstlichen Landesanstalten Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern vorbereitet. Der Wiedereinführungszeitraum beginnt 2005 und wird 2015 vollständig abgeschlossen sein.

Projekt 2.2: Da die aktuelle Forschung zur Bedeutung terrestrischer C-Senken letztendlich auf ein "full carbon accounting" gerichtet ist, wurden erstmalig für Thüringen auch die Holznutzung und die mittlere Lebensdauer der Holzprodukte in Abhängigkeit von der Baumartenzusammensetzung und dem Durchforstungsregime der Waldbestände quantifiziert. Als Datenbasis für diese Berechnungen dienten die Holz-Verkaufszahlen des Thüringer Landesforstes, die in dem EDV-Abrechnungssystem ABIES-FIS geführt werden, und die jüngste Forsteinrichtung des Forstamtes Hummelshain.

3. Teilziel

Um eine zeitlich und räumlich möglichst umfassende Datenbasis zu erhalten wurden zwei Teilprojekte initiiert.

Projekt 3.1: Während die erfolgte Holznutzung über die jährliche Meldung aus den Forstbetrieben relativ genau quantifiziert werden kann, muss der jährliche Bestandeszuwachs zunächst über Zuwachsmodelle geschätzt werden. Erst nach 10 Jahren, wenn eine wiederholte Forsteinrichtung vorliegen wird, kann retrospektiv das tatsächliche Bestandeswachstum und damit die tatsächliche Vorratsentwicklung abgeglichen werden. Da die derzeit verfügbaren, lokalen Ertragstafeln aufgrund von Umweltveränderungen und Änderungen der waldbaulichen Behandlung der Wälder ihre Gültigkeit zunehmend verlieren, werden dringend aktuelle und regionale Bestandeszuwachdaten benötigt. In Kooperation mit der Landesforstanstalt Eberswalde und der TU Dresden wurden die Daten von 24 bereits bestehenden, ertragskundlichen Dauerversuchsflächen in Thüringen neu aktiviert und in eine gemeinsame Datenbank zusammengeführt. Die Datenbank enthält Angaben zur waldbaulichen Behandlung der Bestände, Bestandesholzvorrat, Holzuwachs und Holznutzung der letzten 30-130 Jahre sowie allgemeine Standortseigenschaften. Das Zurückgreifen auf vorhandene, langfristige Versuchsflächen bestehender Institutionen erlaubte eine Abschätzung der jüngsten Bestandeszuwächse und eine Analyse der Ergebnisse in Bezug auf die Bestandesentwicklung und forstliche Behandlung in der Vergangenheit. Dies ist ein großer Vorteil gegenüber neu angelegten Versuchsflächen, die erst in den nächsten Jahrzehnten Ergebnisse liefern würden. In 12 ausgewählten Versuchsflächen wurden zudem Bodenleitprofile angelegt und beprobt. Alle Bodenanalysen werden in den kommenden zwei Jahren im Rahmen des CarboEurope IP fertig gestellt und durch weitere Probenahmen in den noch fehlenden 12 Flächen ergänzt. Die Erhaltung und weitere fachliche Betreuung einer Auswahl der forstlichen Versuchsflächen wird über einen Kooperationsvertrag zwischen der TLWJF und dem MPI-BGC gewährleistet.

Über die ertragskundlichen Versuchsflächen hinaus wurden im Rahmen des CarboEurope IP und mit Unterstützung des vorliegenden Projektes drei Dauerversuchsflächen in den Wäldern

Thüringens neu eingerichtet: Wetzstein (Fichte, Altersklassenwald), Leinefelde (Buche, Altersklassenwald), Nationalpark Hainich (unbewirtschafteter, ungleichaltriger Buchen-Mischwald). Auf den Flächen werden bodenkundliche und meteorologische Messungen sowie direkte Netto-C-Flussmessungen (Eddy-Kovarianz Türme) durchgeführt.

Projekt 3.2: Mittels einer wiederholten Stichprobeninventur wurden die mittleren Holzzuwächse und die Holznutzung in ungleichaltrigen, plenterartig bewirtschafteten Buchenwäldern eines gesamten Revieres quantifiziert. Nach dem Wissen der Autoren ist dies die erste wiederholte Stichprobeninventur auf Betriebsebene für strukturreiche Buchenwälder in Deutschland.

4. Teilziel

Projekt 4: Eine punktgenaue, unmittelbare Vernetzung der BWI- und BZE-Daten in Thüringen, und damit eine Vernetzung von Bestandesdaten und Bodendaten, ist nicht möglich, da die BWI- und BZE-Messpunkte rund 2 km voneinander entfernt sind. Zudem erlaubt die Rasterweite der beiden Inventursysteme (BWI: 4*4 km, z.T. 2.83*2.83 km, BZE: 8*8 km) keine zuverlässige Aussage auf Betriebsebene. Daher wurde ein Promotionsprojekt zur räumlichen Quantifizierung der C-Dynamik in Forsten, Thomas Wutzler (MPI-BGC Jena), initiiert. Das Projekt stellt einen "bottum up"-Ansatz dar, der Punktdaten verschiedener Inventursysteme (Forsteinrichtung, Standorterkundung) über Regressionsmodelle in die Fläche extrapoliert. Der erste Teil der Promotionsprojektes beinhaltet die Implementierung der Modelle und Algorithmen zur C-Bilanzierung aus der ersten Projektphase (Wirth *et al.* 2003) und wurde bereits abgeschlossen (siehe Ziel 1, Projekt 1.1).

Das Promotionsprojekt ist zudem eng mit dem Aufbau eines Netzwerkes zur Datenerhebung und zum Datenaustausch mit den EU-Projekten CarboEurope-IP und CarboInvent verknüpft. Beide Projekte streben die Kopplung von Standortseigenschaften, Bestandes-C-Vorräten und Boden-C-Vorräten an.

Die Ergebnisse der 1. Projektphase wurden der Öffentlichkeit durch eine Reihe von Veröffentlichungen und Vorträgen zugänglich gemacht und werden bereits in anderen wissenschaftlichen Projekten, wie z.B. der BZE II-Planung, genutzt.

Durch das Netzwerk von waldökologischer Prozessforschung, forstlich-administrativen Inventuren und forstlicher Ertragskunde wurden und werden die verfügbaren Daten zu den Wäldern Thüringens zusammengeführt. Damit wird eine Datenbasis geschaffen, die es erlaubt, Änderungen von C-Vorräten auf Betriebsebene in Zukunft zu quantifizieren und mit möglichen Einflussfaktoren wie Bodeneigenschaften oder waldbaulicher Behandlung in Beziehung zu setzen. Unter diesen Voraussetzungen ist eine Implementierung von Artikel 3.4 des Kyoto-Protokolls auch aus ökonomischer Sicht realisierbar.

Die Fortführung der begonnenen Aktivitäten zur C-Bilanz Thüringer Wälder ist durch die unmittelbare Beteiligung der TLWJF und des MPI-BGC am CarboEurope-IP gesichert (<http://www.carboeurope.org/>)

Teil II

Eingehende Darstellung

**der 2. Projektphase des BMBF-Projektes
"Modelluntersuchungen zur Umsetzung des Kyoto-
Protokolls"**

1 Implementierung der in der 1. Projektphase entwickelten Modelle und Algorithmen zur C-Bilanzierung von Waldbeständen in das Datenbanksystem der Thüringer Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei (TLWJF)

1.1 Wissensbasierte Integration und Operationalisierung von Methoden und Daten zur räumlichen Quantifizierung der C-Dynamik in Forsten

1.1.1 Einleitung

Die Basis für eine operative C-Inventur auf Betriebsebene ist eine Software, mit der die im Vorläuferprojekt entwickelten Modellen und Algorithmen zur C-Vorratsbestimmung (im folgenden auch kurz „Berechnungsmethoden“ genannt) direkt und bestandesgenau auf die Datenbank der TLWJF angewendet werden können. Da von Seiten der Staatsforstverwaltung geplant ist, die forstliche Datenbank in Thüringen gemeinsam mit anderen Bundesländern weiter zu entwickeln und umzubauen (Walddatenspeicher, Projekt 2.1), musste die Software flexibel und offen für Erweiterungen und Verknüpfungen sein. Daher wurde eine unabhängige GIS-basierte Anwendung erstellt, die trotz möglicher Änderungen der Informationsflüsse und Strukturen einen direkten Zugriff auf die Datenbank der TLWJF erlaubt.

Die Entwicklung der GIS-basierten Anwendung ist Teil eines Promotionsprojektes zur räumlichen Quantifizierung der C-Dynamik in Forsten, Thomas Wutzler (MPI-BGC Jena) (siehe Kapitel 4).

1.1.2 Methoden

1.1.2.1 Informationsverarbeitung an der Landesanstalt

Die im vorliegenden Projekt verwendeten forstlichen Daten (Bestandesdaten, Standorts- und Bodendaten, forstliche Karten) werden von verschiedenen Abteilungen der Thüringer Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei (TLWJF) erarbeitet und gewartet. Daher mussten die Daten für das vorliegende Projekt zunächst miteinander verknüpft werden.

Informationen über die Bestockung werden von der bestandesbasierten **Forstinventur** gesammelt und in einer relationalen Datenbank gespeichert (FEE). Als Datenbanksystem wird eine aktuelle Version des Herstellers Oracle verwandt. Die Datenbasis enthält:

- administrative Flächengliederung
- Besitzverhältnisse (Forstamt bis Bestand)
- klima- und physiographische Flächengliederung (Wuchsgebiet bis Teilwuchsbezirk)
- Standortsansprache
- biometrische Größen (BHD, Höhe, Grundfläche, Bestandesvorrat etc.) je Baumart und Bestand

- Zuwachsschätzungen je Baumgruppe und Bestand auf Grundlage von Ertragstafeln
- Waldschäden
- geplanten Nutzungen
- gemeldeten Vollzug.

Alle Informationen der Forstinventuren beziehen sich auf administrative Teilflächen.

Die **Standortserkundung** sammelt Informationen zu den Wachstumsverhältnissen des jeweiligen Waldstandortes. Sie beinhaltet unter anderem Klassifikationen zu:

- Klima (Klimabereich)
- Relief
- Ausgangsgestein (Substratgruppe)
- Wasserversorgung (Feuchtebereich, Feuchtestufe)
- Nährstoffversorgung (Trophiestufe)
- Staunässe, Wind, Schutzfunktionen (Zusatzkennzeichen)
- Boden (Lokalbodenform mit zugeordneter geologischer Formation und Bodentyp)

Standorte, "die sich so ähnlich sind, dass sie in ihren waldbaulichen Möglichkeiten und in ihrer Gefährdung nicht wesentlich voneinander abweichen und annähernd die gleiche Ertragsfähigkeit besitzen" (ASSF 1996), werden zu Standortseinheiten zusammengefasst. In der Praxis erfolgt die Feststellung der Standortseinheiten und die Abgrenzung unterschiedlicher Standortseinheiten anhand von Messungen und Ansprachen im Gelände.

Die **Kartographie** verwaltet die Flächeninformationen in digitalen Karten mit einem Geoinformationssystem. Bisher ist ArcView 3.x und Arc/Info 8.x im Einsatz.

Die Karten waren in knapp 90 Geometriedatensätzen (Layer) gespeichert, die teilweise aus umfangreichen Grundkarten abgeleitet sind. Für das vorliegende Projekt wurden fast ausschließlich die Karten der administrativen Waldeinteilung (Teilflächen) im Layer WELFPOLYGON und die Karte der Standortseinheiten STFLPOLYGON genutzt. Während die Standortseinheiten zu jedem Polygon bereits die Standortinformationen gespeichert hatten, wurde für die Teilflächen nur ein Schlüssel (Wefl_KZ) gespeichert, der eine Teilfläche eindeutig bestimmte. Über diesen Schlüssel konnte ein Datenbanknutzer die Informationen verschiedener Tabellen der Einrichtungsdatenbank zuordnen. Bisher war der direkte Zugriff auf die Forsteinrichtungsdatenbank aus dem GIS heraus nicht möglich.

1.1.2.2 Aufarbeitung der Datengrundlagen

Nachdem bekannt war, welche Informationen wo zur Verfügung standen, und wie das Informationssystem in seinen Grundzügen aussehen sollte, mussten die Texttabellen umgeformt werden, damit sie durch Datenbanksoftware verarbeitet werden konnten. So wurden die textlichen Beschreibungen der Lokalbodenformen in einer Access-Datenbanktabelle organisiert und die Schlüssel der Standortbeschreibungen nach ihren einzelnen Informationen aufgetrennt. Für letzteren Arbeitsschritt wurde ein Parser (Software-Werkzeug, welches Zeichenströme in

einzelne Bestandteile trennt) entworfen (Abbildung 1.1), in eine Routine von Microsoft Access implementiert, und der Schlüssel in verschiedene Spalten aufgeteilt.

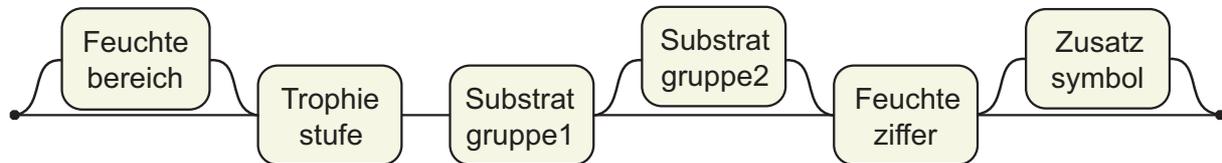


Abbildung 1.1: Syntaxdiagramm des Standorteinheitenschlüssels.

Das Informationssystem sollte mit verschiedenen Kartengrundlagen umgehen können. Um zu gewährleisten, dass in allen Karten die gleiche Information benutzt wird (Redundanzvermeidung), musste die Sachinformation getrennt von der Karte gespeichert werden. Dazu wurde in jeder Karte (jedem Layer) eine Spalte angelegt, die für jedes Polygon eine eindeutige Nummer enthält (Polygonschlüssel). Die Benennung der Spalte folgte der Benennung der Karte: <Thema><Jahr>. Die Sachinformationen wurden dann in eine getrennte relationale Datenbank übertragen, dort mit dem Polygonschlüssel gespeichert, und aus der Karte gelöscht.

In der Forsteinrichtungsdatenbank werden die Grundflächen (= Summe der Stammquerschnittsflächen eines Baumkollektives in 1.3 m Höhe) der einzelnen Baumarten getrennt für die einzelnen Bestandesschichten (Ober-, Mitte-, Unterstand) und normiert auf einen fiktiven Reinbestand der Größe 1 ha angegeben. Jede Datenzeile enthält zudem für jede Bestandesschicht getrennt den Anteil (in %) der durch eine Baumart überschrmteten Bestandesfläche (im Folgenden kurz „Schirmfläche“ genannt). Für die Verschneidung der Bestandesdaten mit den Bodendaten waren aber Angaben zur Summe aller Grundflächen und Schirmflächen der vorkommenden Baumarten je Bestand, ungeachtet ihre Zuordnung zu den Bestandesschichten, notwendig. Die ausführliche Herleitung dieser Größen ist im Dokumentationsverzeichnis der GIS-Anwendung hinterlegt.

Um die Informationen aus den Abteilungen der Forstinventur und der Standortkartierung zusammenzuführen, wurde eine Verschneidung der zugehörigen Kartengrundlagen gebildet. Da in der Verschneidungskarte alle Polygonschlüssel der Ausgangskarten gespeichert waren, konnte auch von den Verschneidungskarten redundanzfrei auf die Sachinformationen zugegriffen werden. Der Themenname der Verschneidungskarte von fgk und stao wurde auf ws (Wald und Standort) festgelegt.

Die Datenorganisation des Projektes erfolgte in einem Verzeichnisbaum. Unterhalb eines Wurzelverzeichnisses, dessen Pfad in der Systemvariable CQUANT_HOME hinterlegt ist, wurden die Verzeichnisse geometry für die Kartengrundlagen in Form von Arc/Info Shape angelegt sowie die Dateien und das Verzeichnis data für die lokalen relationalen Datenbanken. Zu diesen Daten gehörten die Standortinformation der Access-Datenbank stao03d und der Zustand der Forstinventur von 1993 fgk93d bzw. von 2003 fgk03d. Im Verzeichnis data wurde die Access-Datenbank cGeometry angelegt, in der alle abgeleiteten Karten von Teilgebieten und

berechnete Ergebnisse abgelegt wurden. Als Ausgangskarten standen für ganz Thüringen die Forstgrundkarten 1993 und 2003, die Standortkarte 2003 und die Verschneidungen dieser Karten zur Verfügung (fgk93, fgk03, stao03, ws93, ws03). Für die Dokumentation wurde ein eigenes Verzeichnis docu angelegt. Der Programmcode des Informationssystems wurde auf die Verzeichnisse sources, vba und dll aufgeteilt.

1.1.2.3 Entwurf eines Informationssystems

Um die Implementierung der C-Vorratsberechnung unabhängig von Veränderungen in der Datenbasis zu halten, wurde sie als eigenständige Anwendung realisiert, die mit einem direkten Datenzugriff auf die Forstinventurdatenbank ausgestattet ist. Der Datenzugriff wurde in einem möglichst selbstständigen Modul realisiert, um die nötigen Anpassungen an die geplante veränderte Datenbasis gering und übersichtlich zu halten. Auch die C-Vorratsberechnungen werden sich aufgrund neuer Forschungsergebnisse und weiterer Daten noch verbessern lassen. Darum wurden auch die C-Vorratsberechnungen in einem eigenen Modul umgesetzt. Von Anfang an wurde auf eine generelle Architektur geachtet, die auch auf andere räumliche Fragestellungen, ähnlich die der Quantifizierung von Kohlenstoffvorräten, angewandt werden kann.

Abbildung 1.2 zeigt die generelle Architektur des Systems: Über definierte Schnittstellen werden einer Hauptkomponente (GeoClip) nutzergesteuert Module für den Zugang zu Eingangsdaten, für die Berechnungsmethoden und für die Speicherung von Ausgaben zugeordnet. GeoClip unterstützt den Nutzer bei seiner Auswahl des Gebietes im GIS, den Ausgangsdaten, den C-Berechnungen und den Ausgabekarten. Anschließend überprüft es die Einheiten. Daraufhin fragt es für alle Teilflächen die benötigten Datenquellen ab, stellt die Informationen zusammen, übergibt sie dem Berechnungsmodul, nimmt die Ergebnisse wieder entgegen und speichert sie mit dem Flächenbezug ab. Um tiefe Strukturen zu unterstützen, wurde eine Kreuzproduktberechnung (siehe unten) erarbeitet. Weiterhin wurde ein Adapter zur Einbindung von JAVA-Berechnungsroutinen umgesetzt.

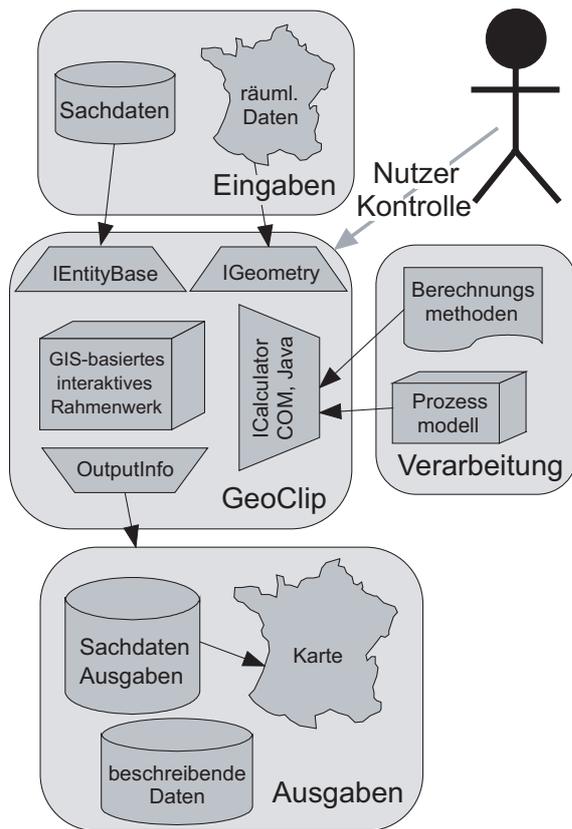


Abbildung 1.2: Architektur des Informationssystems.

1.1.2.4 Integration von Inventurdatenbank und GIS

Als Basis der Implementierung wurde ArcGIS 8.x von ESRI gewählt. Im Gegensatz zu ArcView 3.x konnten hier räumliche Bearbeitungsoperationen (Verschnitt, Auflösen, etc.) durchgeführt werden. Es unterstützte zudem (im Gegensatz zu Arc/Info) mit seiner Scriptsprache Visual Basic for Applications (vba) das Einbinden extern entwickelter Programmteile und Bibliotheken sowie deren Entwicklung auf Basis des GIS-eigenen Objektmodells. Die Programmfunktionalität der C-Quantifizierung wurde in drei Bibliotheken verteilt (Tabelle 1.1). Nähere Informationen finden sich in den sourceDoc Dateien des Dokumentationsverzeichnis.

Tabelle 1.1: Übersicht über die Programmbibliotheken des Informationssystems CQuant2.

Programmbibliothek	Funktionen
tomaschUtils	Generelle Hilfsroutinen zum Datenzugriff, Excel-Automation und Dialoge
geoClip	Algorithmen zur Registrierung der Datenquellen und Verarbeitungskomponenten, Nutzersteuerung, rekursive Zusammenstellung der Information, Berechnungsaufwurf und Speicherung
CQuant2	Realisierungen der Schnittstellen zu Forstdatenbank und Standortdaten, Funktionen zur Auswahl von Revieren und Beständen

Die Datenhaltung baut sich in drei Schichten auf, die von GeoClip und den Realisierungen der Datenschnittstellen verwaltet werden (Abbildung 1.3).

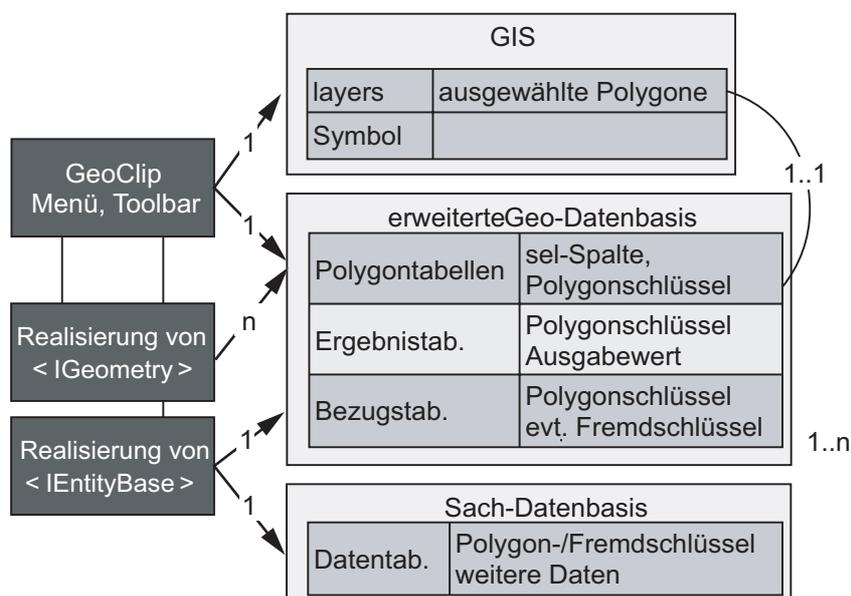


Abbildung 1.3: Dreischichtiger Aufbau des Informationssystems, Nummern bezeichnen die Anzahl der möglichen Zuordnungen (Cardinalitäten).

GeoClip vermittelt zwischen der GIS-Schicht und den Erweiterungen der Geo-Datenbasis. Vor Beginn einer Bearbeitung musste die Flächenauswahl in die Datenbankschicht übertragen werden, nachher die Ergebnisse wieder von der Geo-Datenbasis in die GIS-Schicht. Diese Übermittlung von Daten ist zwar automatisierbar, da sie aber sehr zeitaufwändig ist, wird die Initiierung dieser Schritte dem Nutzer überlassen.

Für den Zugriff auf Eingangs- und Ergebniskarten mussten die entsprechenden Geometrien definiert werden. Sie tragen den Namen der GIS-Layer (fgk93, fgk03, stao03, ws93, ws03). Die Polygonschlüssel sind in je einer Spalte mit dem Namen der Geometrie vermerkt. Die Zuordnung der Sachdaten erfolgt entweder direkt über den Polygonschlüssel oder über zusätzliche Schlüsselattribute (z.B. die Forstadresse).

Im CQuant-System ist nun die Forsteinrichtungsdatenbank als weitere Sachdatenbasis an das GIS direkt angeschlossen. In der Forsteinrichtungsdatenbank wurden geringfügige Anpassungen vorgenommen. Eine Version wurde unabhängig von der Datenbanksoftware auf SQL92 ausgerichtet, in einer weiteren Version wurden Geschwindigkeits-optimierende Anpassungen an das Datenbanksystem Oracle 8 vorgenommen. Weitere Sichten (= vordefinierte Abfragen) und einige wenige temporäre Tabellen wurden in der Forsteinrichtungsdatenbank selbst erzeugt.

1.1.2.5 Integration von Daten Grundlagen mit unterschiedlichen Bezugsflächen

Die Daten der Standortkartierung und der Forstinventur beziehen sich auf unterschiedliche Flächen. Für eine C-Vorratsberechnung sollten diese Daten nicht einfach gemittelt werden,

sondern für unterschiedliche Standortverhältnissen innerhalb einer Teilfläche gesondert berechnet werden. Theoretisch könnten für jede Überschneidung der Karten jeweils Forsteinrichtungsdatenbank und Standortinformationen abgefragt werden und die Ergebnisse kombiniert für die Berechnungen weitergegeben werden. Dabei würden beide Datenbanken für ein Polygon mehrfach abgefragt werden. Diese Prozedur konnte rekursiv, und damit effizienter implementiert werden, indem die Forsteinrichtungsdatenbank für jede Teilfläche nur einmal abgefragt wird und mit der Flächenauswahl der Teilfläche in der nächsten Ebene für alle Standortseinheiten die Datenbasis abgefragt wird. Das Vorgehen ließe sich für weitere Kartengrundlagen fortsetzen, indem z.B. für jede nur einmal abgefragte Standortseinheit in einer weiteren Ebene alle topographisch oder hydrologisch unterschiedlichen Flächen abgefragt werden.

1.1.2.6 Umgang mit tiefen Strukturen

Der benötigte Forsteinrichtungsdatensatz für eine Teilfläche besteht nicht nur aus einer einzigen Datenzeile, sondern aus mehreren Tabellen, die wiederum Informationen zu Alter, Baumart, Bestandesschicht etc. enthalten (im EDV-Jargon „tiefe Struktur“ genannt). Damit im vorliegenden Programm die tiefe Struktur auch für andere Methoden und Algorithmen als die von Wirth *et al.* 2003 genutzt werden kann, wurde die folgende Prozedur implementiert: pro Datenbasis wird eine Folge von Mengen (Datenbankzeilen) angenommen, die als Eingangsparameter für die Berechnung von C-Vorräten mittels beliebiger Modelle und Algorithmen abgerufen werden können. Mit der Kombination verschiedener Sachdatenquellen ergibt sich also eine Menge von Tabellen als Eingabedatensatz. Zusätzlich wurde ein Berechnungsmodul realisiert, das die tiefe Struktur in eine Folge von flachen Strukturen (eine Menge von skalaren Eingabeparametern) überführte, für jede Zeile ein einfaches Berechnungsmodul aufruft und die Ergebnisse nachher integriert.

Die Überführung in eine Folge von flachen Strukturen bedeutete, jede Zeile einer Datenquelle mit jeder anderen Zeile der anderen Datenquellen zu kombinieren. Mathematisch bedeutete dies, das Kreuzprodukt zu bilden. Diese Prozedur wurde wieder rekursiv gelöst. Eine Frage blieb jedoch noch offen: Hat jede flache Menge auch den gleichen Anteil am Gesamtergebnis? In der Forsteinrichtungsdatenbank beziehen sich z.B. die Angaben zu Vorräten pro ha nur auf die bestockte Fläche innerhalb einer Teilfläche, möglichen Bestandeslücken sind keine Baumzeilen zugeordnet. Bei Informationen, die sich auf die gesamte Teilfläche beziehen (z.B. Boden-C-Vorräte), müssen die Bestandeslücken jedoch berücksichtigt werden. Um den Vorrat pro ha Teilflächenpolygon zu errechnen, liefert die Datenbasis den Quotienten aus der überschirmten Fläche einer Baumartenzeile und der Teilflächengröße. Beziehen sich die Informationen verschiedener Zeilen jedoch auf die gleiche Fläche (z.B. Bestandesschichten), muss zusätzlich eine Zeile ausgewählt werden (z.B. Oberstand, andere Schichten Anteil 0). Darüber hinaus muss eine Annahme für die Restfläche ohne Datenzeilen (z.B. Bestandeslücke innerhalb der Teilfläche) getroffen werden, da auch für diese Berechnungen durchgeführt werden (z.B. C-Vorräte im Mineralboden). All dies wird von den Datenschnittstellen und dem Modul berücksichtigt,

welches die tiefen Strukturen in flache Zeilen überführt. Damit liegt ein Programm vor, in welchem die Sachdaten und die Karten integriert werden und der Nutzer beliebige Modelle und Algorithmen zur C-Vorratbestimmung als Berechnungsmodule einbinden kann, die dann die benötigten Eingangsparameter in beliebiger Zahl und Kombination von den tiefen Strukturen abgreifen können.

Im Folgenden wird ein Beispiel für eine C-Vorratsbestimmung mit dem kombinierten Datensatz aus Forsteinrichtung und Standortkarten erläutert. Für die Teilfläche mit der Forstadresse „10,S,1,2,98,a,1“ mit nur einem Bestand und einer Fläche von 2,12 ha liefert die Forsteinrichtungsdatenbank die in Tabelle 1.2 angegebenen Baumzeilen.

Tabelle 1.2: Datenzeilen der Forsteinrichtungsbank für den Beispielbestand 10,S,1,2,98,a,1.

Baumart	Alter [Jahr]	Schicht	Bonität	BHD [cm]	Höhe [m]	Grfl. [m ²]	Vorrat [m ³ ha ⁻¹]	Vorrat_abs [m ³]	Flä_Ant [%]
KI	69	Oberstand	0.6	27	24.5	22	244	444	86
FI	69	Oberstand	2.6	22	21	22	229	69	14
FI	25	Unterstand	2.7	6	6	0	0	0	0
BU	140	Restbestand	2.5	55	0	0	8	18	100

Eine Information über die räumliche Mischung der Arten ist weder aus der Karte noch aus der Einrichtungsdatenbank ersichtlich. Die Lage der Standortseinheiten zeigt Abbildung 1.4.

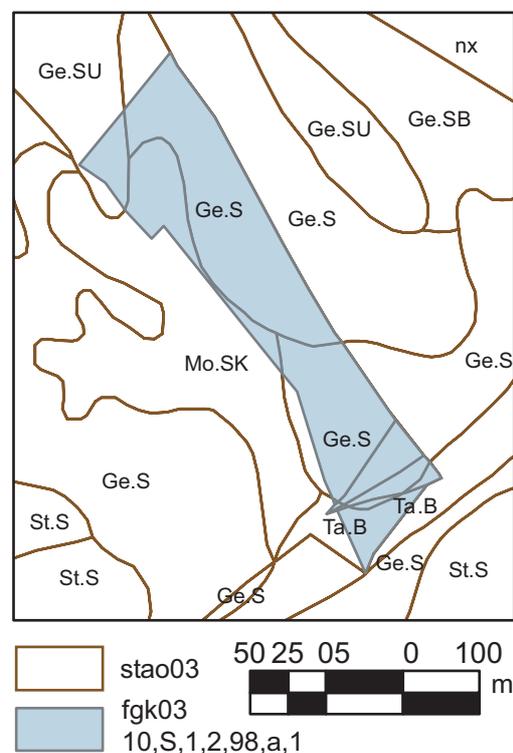


Abbildung 1.4: Lage des Beispielsbestandes in der Standortkarte.

Der Bestand umfasst drei Standortformen. Für jedes Verschneidungspolygon wird nun die Standortsachdatenbank abgefragt. Da in der aktuellen Umsetzung keine gemischten Standortseinheiten berücksichtigt werden, liefert diese Abfrage nur jeweils eine Zeile (Tabelle 1.3).

Tabelle 1.3: Datenzeilen der Standortkarte für den Beispielbestand 10,S,1,2,98,a,1.

lobofo	feu_B	trophie	subst_gr	feu_st	klima_st
Ge.SU	W	M	S	2	Vm
Ge.S	T	M	S	2	Vm
Mo.SK	T	M	S	1	Vm
Ta.B	B	M	S	1	Vm

Jede Baumartenzeile muss nun mit allen Standortzeilen kombiniert werden und für jede Kombination muss die Berechnung aufgerufen werden. In diesem Fall ist die gesamte Fläche bestockt (Summe der Flächenanteile Oberstand = 100 %). Würde ein Teil unbestockt sein, müsste zusätzlich eine Restfläche für die Mineralbodenberechnung mit den Standortformen kombiniert werden. Am Ende werden alle Kombinationsergebnisse, nach den Flächenanteilen gewichtet, summiert. Für verschiedene Problemstellungen sind jedoch unterschiedliche Flächenanteile zu verwenden.

Der Beispielbestand in Tabelle 1.2 verdeutlicht dieses Problem: Die Summe der Flächenanteile ist mit 200 % größer als 100 %, da der Bestand den Buchenrestvorrat enthält. Der Oberstand ist über die gesamte Fläche verteilt, für den Unterstand ist keine Information über BHD oder Vorrat vorhanden, was auch zu dem unbekanntem Flächenanteil (0 %) führt. Für die Berechnung der C-Vorräte in der Biomasse müssen die Anteile aller Baumzeilen berücksichtigt werden. Für die Berechnung der C-Vorräte im Mineralboden werden aber nur die Flächenanteile des Oberstandes und der Bestandeslücken verwendet. Um diese Diskrepanz zu berücksichtigen, muss eine Datenbasisschnittstelle zwei Flächenanteile pro Datenzeile bereit stellen, von denen bisher keiner in der Forsteinrichtungsdatenbank vorhanden ist: (1) der Anteil einer Datenzeile an der Fläche (Biomasseberechnung), und (2) eine Aufteilung der Fläche auf die Datenzeilen (Mineralbodenberechnung). Im ersten Fall werden alle Baumzeilen berücksichtigt, im zweiten Fall werden nur die Anteile der Baumzeilen des Oberstandes berücksichtigt. Im ersten Fall können sich die Anteile zu > 100 % summieren, da auf einer Fläche mehrere Baumschichten vorkommen können. Im zweiten beträgt die Summe der Anteile 1, oder < 100 % mit Bestandeslücken. Von diesen beiden Anteilen, die sich auf die von der Baumgruppe überschirmte Fläche beziehen, ist noch einmal der Grundflächenanteil einer Baumgruppe zu unterscheiden, der sich auf die Summe aller Grundflächen innerhalb eines Bestandes bezieht.

Für die Berechnung der C-Vorräte im Mineralboden, die sowohl Standortdaten als auch Baumarten benötigt, würde die Kreuzproduktberechnung für das kleine Polygon im Nordwesten

des Beispiels folgende zwei Zeilen zusammenstellen, für jede Zeile die Berechnung aufrufen und nach Flächenanteilen aufsummieren (Tabelle 1.4).

Tabelle 1.4: Kombination der Datenzeilen der Forsteinrichtungsbank und Standortskarte für ein Verschneidungspoligon des Beispielbestandes 10,S,1,2,98,a,1.

Art	Alter	Bon.	BHD	Höhe	Grfl.	Vorrat	lobofo	feuB	Troph.	Subst	FeuSt	Klima	Ant
KI	69	0.6	27	24.5	22	244	Ge.SU	W	M	S	2	Vm	86 %
FI	69	2.6	22	21	22	229	Ge.SU	W	M	S	2	Vm	14 %

1.1.2.7 Umsetzung der C-Vorratsberechnungsmodule

In Tabelle 1.5 sind die C-Vorratsberechnungsvorschriften zusammengestellt, die aus dem Vorläuferprojekt umgesetzt wurden.

Tabelle 1.5: Berechnungsmodule zur Quantifizierung der C-Vorräte

Modul	Ausgaben:	Eingangsgrößen
TreeCalculator_Wirth	C-Vorräte in Stamm, Wurzel, Ästen und Blättern von Fichten	Alter, BHD, Höhe, Baumzahl
BEFVorratCalculator("Wirth02")	C-Vorräte und deren Variabilität zwischen Stamm und Gesamtbaum von Fichten	Vorrat, Alter, Bonität
Soil_Wirth03	C-Vorräte und deren Variabilität im Mineralboden in 0-10 / 10-30 / 30-60 cm Tiefe	Substratgruppe, Klimastufe, Neigung
TopSoil_Wirth03	C-Vorräte und deren Variabilität in der organischen Auflage	Hauptbaumart, Nährkraftstufe

Für andere Baumarten als Fichte wurde die Berechnung der Bestandesbiomasse mit Biomasseexpansionsfaktoren nach Burschel *et al.* (1993) realisiert.

Die Berechnungsmodule Soil_Wirth03 und TopSoil_Wirth03 wurden über die ICalculator-Schnittstelle und den JAVA-Adapter als JAVA-Klassen implementiert. Für alle Modelle und Algorithmen, die mit Biomasseexpansionsfaktoren arbeiteten, wurde ein generisches Berechnungsmodul entwickelt, das die Faktoren BEF, Raumdichte und Kohlenstoffkonzentration nach Autor der Methode, Baumart, Alter und Bonität aus einer Datenbank abfragt.

1.1.2.8 Datenbank der Biomasse-Expansions-Faktoren (BEF)

Um eine Aktualisierung der C-Vorrats-Berechnungen über Biomasse-Expansions-Faktoren (BEF) weiter zu vereinfachen, wurde die Möglichkeit gegeben, neue Faktoren in einer Datenbank zu hinterlegen. Neue Faktoren, inklusive möglicherweise neuer Modelle und Algorithmen, können mit nur einer neuen Programmzeile im Konfigurationsteil eingebunden werden.

Im Folgenden wird der Aufbau der BEF-Datenbank beschrieben. Die Holzdichte und deren Variabilität wurde nach Baumart, Alter und Bonität stratifiziert. C-Konzentration, BEF und deren Variabilität wurden zudem getrennt nach Baumkompartimenten (Stamm, Ast, Wurzel, etc) gespeichert.

Ein Stratum setzt sich aus folgenden Dimensionen zusammen:

methode char(16),	Name des Faktorensatzes z.B. „BEF_Wirth02“
baum_gr char(3),	Baumgruppe: Baumart methodenabhängig
alterskl integer,	Altersklasse: 1: 1-20, 2: 21-40, ... 10: > 180
bon_gr byte,	Std/Bonität: 1: gut, 2: mittel, 3: schlecht
kompart varchar(15),	Kompartiment: methodenabhängig

Die relativen Bonitäten wurden zu drei Klassen (Tabelle 1.6) und die Bestandesalter zu Altersklassen einer Breite von 20 Jahren zusammengefasst.

Tabelle 1.6: Zusammenfassung der Bonitäten für die Stratifizierung der Biomasseexpansionsfaktoren.

Bonitätsgruppe x	rel. Bonität		Mittelhöhenbonität
1 (gut)	[0..2)	$x < 2$	$x \geq 34$
2 (mittel)	[2..4)	$2 \leq x < 4$	$25 < x < 34$
3 (schlecht)	[4..oo)	$x \geq 4$	$x \leq 25$

Die Berechnungsmodule unterstützen unterschiedliche Baumkompartimente und unterschiedliche Baumgruppen. Um nicht für jede spezielle Baumart alle Faktoren zu speichern, ist in einer weiteren Tabelle jede Baumart einer Baumartengruppe zugeordnet.

Um C-Vorräte in der Dendromasse zu quantifizieren müssen nun die Faktoren unter einem neuen Methodennamen in die Datenbank eingetragen werden und die Baumartengruppierung festgelegt werden. Im Informationssystem CQuant wird die Methode mit der Anweisung `registerCalculator(BEFVorratCalculator("<MethodenName>"))` eingebunden.

1.1.2.9 Hardware- und Software-Voraussetzungen

Das Informationssystem erfordert einen relativ großen Installationsaufwand. Folgende Software muss installiert sein:

- ArcGIS 8.x. (kommerziell)
- SUNs JAVA in der Version 1.4.2 oder höher (frei verfügbar)
- Java-Plugin 1.4.2 (beinhaltet Active-X-Bridge, frei verfügbar)

Um direkt mit Microsoft Access Abfragen in der Geodatenbank und der Standorts-Sachdatenbank durchzuführen oder den Export von Daten zu Microsoft Excel zu nutzen, sollte Microsoft Office auf dem Rechner des Informationssystems (Hostrechner) installiert sein. Die Hauptfunktionen des Systems arbeiten auch ohne Microsoft Office, wenn zusätzlich folgende Bibliotheken installiert werden:

- Microsoft Scripting Runtime (scrrun.dll)
- Microsoft Active X Data Objects 2.5 (msado25.tlb)
- Microsoft XML v4.0 (msxml4.dll)

Das Informationssystem wird installiert, indem es in das Dateisystem des Hostrechners kopiert wird. Dort wird zum Auffinden der Daten benötigt:

- Pfad des Installationsverzeichnis in der Systemvariablen <CQUANT_HOME>
- Einrichtung einer ODBC-Datenquelle „cGeometry“ auf die Geodatenbank cGeometry.mdb im Unterverzeichnis data.

Das System kann mit einem Auszug der Forsteinrichtungsdatenbank als Access-Datenbank auch außerhalb der Landesforstanstalt betrieben werden. Für die routinemäßige Anwendung wurde jedoch ein Direktzugang zur Forsteinrichtungsdatenbank in Gotha umgesetzt. Dieser Zugang ist bei einer Neuinstallation wieder einzurichten und funktioniert nur im Intranet der Landesforstanstalt.

1.1.2.10 Integration der Berechnung in eine Tabellenkalkulation

Zusätzlich zu dem GIS-basierten Informationssystem CQuant2 wurden Module der Software in eine Tabellenkalkulation CSpread eingebunden. Auch hier können alle Modelle und Algorithmen registriert und verwendet werden. Die Zusammenstellung der Ausgangsdaten erfolgt jedoch nicht aus Karte und GIS, sondern aus Tabellenspalten. Die Zuordnung von Tabellenspalten zu Eingangsparametern wurde über benannte Bereiche innerhalb der Tabellenspalten umgesetzt. Dabei muss der Name des Bereiches innerhalb der Tabellenspalten dem Namen des Eingangsparameters entsprechen.

Die Tabellenspalten müssen im Tabellenblatt „inputs“ im Bereich der Spalten des Bereiches „inputRange“ angelegt werden. Bei der Auswahl einer Berechnungsmethode (Modell oder Algorithmus zur Berechnung der C-Vorräte) legt CSpread entsprechende Ausgabespalten zwischen den Spalten der benannten Bereichen „Ausgaben“ und „AusgabenEnde“ an.

1.1.3 Ergebnisse

Das Informationssystem CQuant und die Tabellenkalkulationsanwendung CSpread wurden auf einem Rechner am MPI-BGC in Jena und auf einem Rechner in der Kartographieabteilung in der TLWJF installiert. Dort stehen auch alle aufbereiteten Sachdaten, die Kartengrundlagen der verschiedenen Zeiten und der Direktzugriff auf die Forsteinrichtungsdatenbank zur Verfügung. Weiterhin wurden eine Benutzerdokumentation, einige Beispielaufgaben mit Lösungen und detaillierte Beschreibungen zu den Quelltexten im Dokumentationsverzeichnis bereitgestellt. Im Folgenden sind einige Beschreibungen der Arbeitsschritte mit Bildschirmfotos dargestellt.

Nach dem Start des Informationssystems werden automatisch Datenquellen und Berechnungsmethoden registriert und die letzten Benutzereinstellungen geladen. Zusätzlich zu den GIS-Funktionen steht dem Nutzer daraufhin folgende Werkzeugleiste zur Verfügung (Abbildung 1.5):

1. Auswahl von forstlichen Revieren
2. Auswahl von forstlichen Teilflächen
3. Laden der Polygonauswahl aus der Datenbank (DB)-Schicht in die GIS-Schicht
4. Speichern der Polygonauswahl des GIS-Layers in die DB-Schicht
5. Aufruf des Dialogs zur Bearbeitung von Sachdatenabfragen
6. Zoom zur aktuellen Polygonauswahl
7. Aufruf des Dialogs zur Bearbeitung von Geometrien
8. Anlegen eines neuen Untersuchungsbereiches
9. Aufruf des Dialogs zu aktuellen Sitzungseinstellungen:
 - a. Untersuchungsbereich
 - b. Sachdatenquellen
 - c. Berechnungsmethoden
10. Start der Berechnung mit Bearbeitung der Sitzungs- und Ausgabeinstellungen und Eingabefehlerprüfungen
11. Start der Berechnung mit letzten Einstellungen und ohne Eingabefehlerprüfungen
12. Anzeige und Bearbeitung von Ausgabeinformationen
13. Laden der Sitzungseinstellungen aus der Konfigurationsdatei
14. Speichern der Sitzungseinstellungen in die Konfigurationsdatei

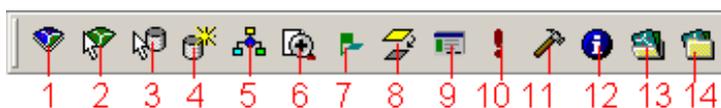


Abbildung 1.5: Werkzeugleiste CQuant2.

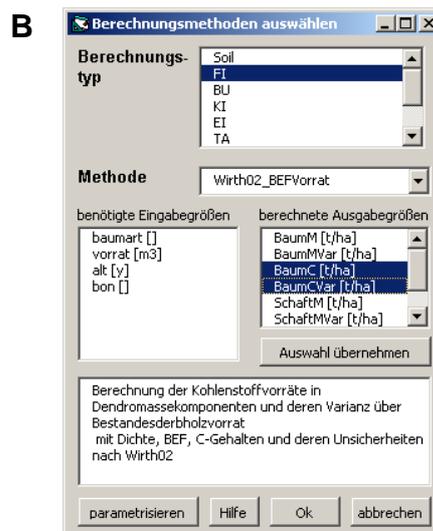
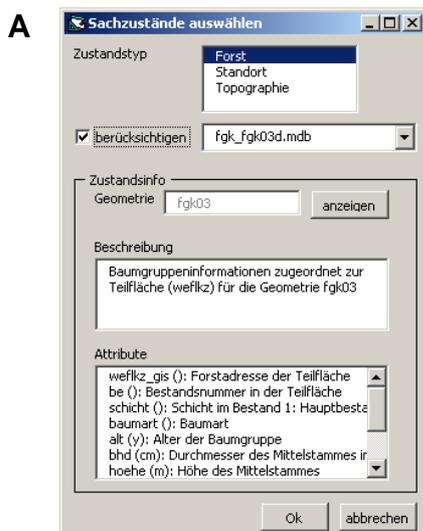
1.1.3.1 Benutzergesteuerte Auswahl der Datenquellen und Berechnungsmethoden

Dem Nutzer wird die Möglichkeit gegeben, aus allen registrierten Datenquellen und Berechnungsmethoden (Modelle und Algorithmen zur C-Vorratsberechnung) auszuwählen. So kann er die C-Vorräte in der Dendromasse von Fichten nach der Einzelbaummethode nach (Wirth *et al.* 2004) berechnen, während er für andere Baumarten die etwas allgemeinere Methode nach (Burschel *et al.* 1993) anwendet. Für die routinemäßige Anwendung braucht an diesen Einstellungen nichts geändert zu werden.

Die Datenquellen sind nach Sachzuständen kategorisiert. Falls ein Sachzustand nicht berücksichtigt werden brauchte (wie z.B. Unabhängigkeit der C-Vorräte in der Dendromasse von Standortdaten), kann dieser ausgelassen werden, um die Berechnung zu beschleunigen. Für jeden berücksichtigten Sachzustand muss eine Datenquelle ausgewählt werden. Für die gewählte Datenquelle wird eine Beschreibung und die standardmäßig verfügbaren Größen samt deren Beschreibung und Einheit angezeigt (Abbildung 1.6 A).

Die Berechnungsmethoden sind nach Typen geordnet, die bei CQuant die verschiedenen Baumartengruppen, Mineralboden und Humusaufgabe repräsentieren. Für jede Methode werden wieder eine Beschreibung und die benötigten Eingabegrößen samt deren Beschreibung und Einheit angezeigt. Zusätzlich hat der Nutzer die Möglichkeit, aus den verfügbaren Ausgabegrößen eine Auswahl zu treffen (Abbildung 1.6 B).

Zusätzlich zu dieser Auswahl muss eine Ausgabebeschreibung bearbeitet werden. In dieser Beschreibung werden automatisch die gewählten Datenquellen und Berechnungsmethoden vermerkt. Zusätzlich können Datum der Berechnung, ausführende Person und ein Kommentar vermerkt werden (Abbildung 1.6 C).



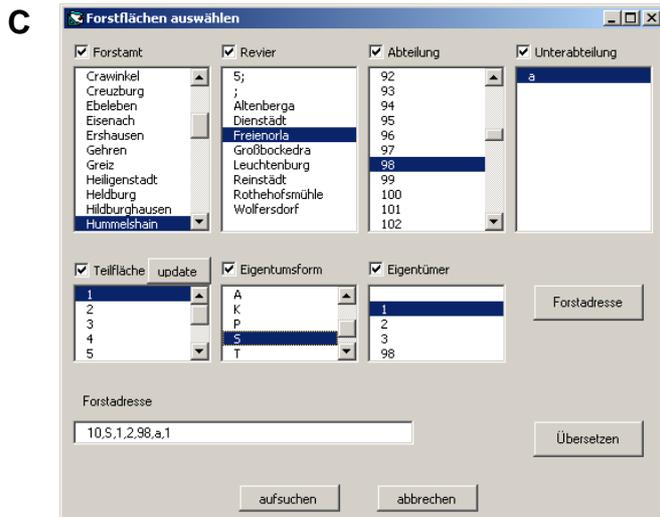


Abbildung 1.6: Auswahl von Sachdatenquellen (A), Berechnungsmethoden (B) und Ausgabekarte (C).

1.1.3.2 Berechnung von C-Vorräten

Nachdem Einstellungen für die Berechnungen getroffen wurden, wird durch das Programmmodul GeoClip geprüft, ob alle notwendigen Kartengrundlagen, Größen der Berechnung und deren Einheiten übereinstimmen. Bei Inkonsistenzen geht das Programm nach einer Warnung zum jeweiligen Einstellungsdialog zurück. Falls keine Inkonsistenzen festgestellt werden oder die Warnungen vom Nutzer übergangen werden, wird die Rechnung gestartet. Die Ausgaben werden in einer Tabelle mit dem Namen der Ausgabebeschreibung in der erweiterten Geometriedatenbasis gespeichert. Von hier können die Ergebnisse über einen Verbund in jeder Karte dargestellt werden, die den entsprechenden Polygonschlüssel enthält. Die Bezugsgeometrie wurde zuvor in der Ausgabebeschreibung angegeben.

1.1.3.3 Lokalisierung von forstlichen Flächen

Obwohl CQuant in der Lage ist, Berechnungen über den gesamten Forst Thüringens anzustellen, liegen die Stärken des Systems jedoch in der bestandesgenauen Berechnung. Der Vergleich von Methoden und das Experimentieren mit unterschiedlichen Einflüssen auf den C-Vorrat werden vor allem an Flächen durchgeführt werden, die der Nutzer kennt.

Unter den Symbolen 1. und 2. können forstliche Reviere oder Teilflächen über die Forstadresse oder einen hierarchischen Dialog ausgewählt werden. Abbildung 1.7 zeigt wie die Bestandesadresse des obigen Beispiels eingegeben wurde. Die Schaltfläche markiert alle entsprechenden Polygone der aktuellen Karte in der Datenbank, welche dann als Auswahl in die GIS-Schicht übernommen und angezeigt werden können. Dabei müssen nicht alle Teile angegeben werden sondern sie können durch Jokerzeichen (*) ersetzt werden bzw. im Kontrollkästchen unmarkiert bleiben.

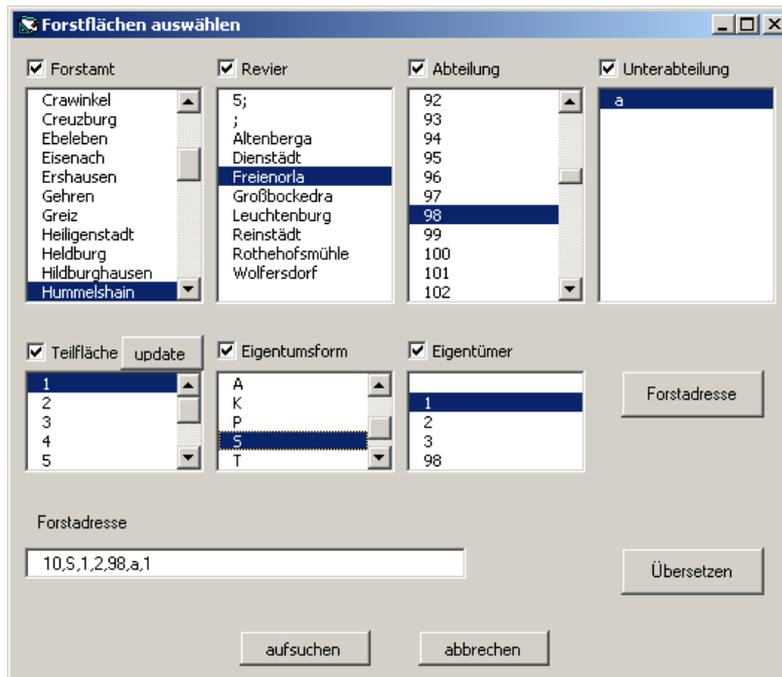


Abbildung 1.7: Bildschirmfoto des Dialogs zur Forstflächenauswahl.

1.1.3.4 Verwaltung von Untersuchungsbereichen

Um dem Nutzer das wiederholte Auffinden von Flächen zu ersparen und die Berechnung für Teilgebiete zu beschleunigen, können Untersuchungsbereiche definiert werden. Ein Untersuchungsbereich ist eine Karte mit einer Teilmenge von Polygonen aus den landesweiten Geometrien, der eine Beschreibung zugeordnet ist. Die Automation des Anlegens von Untersuchungsbereichen ist bisher aufgrund von systeminternen Fehlern im ArcGIS 8.01 Programm noch nicht gelungen. Der Export von Polygonen in eine andere Karte muss vom Nutzer selbst mit den Standardfunktionen des GIS durchgeführt werden. Die Bearbeitung von beschreibenden Informationen und die Auswahl von Untersuchungsbereichen konnten jedoch trotz des Programmfehlers umgesetzt werden.

1.1.3.5 Standardauswahl und komplexe Abfragen

Neben der Berechnung von C-Vorräten stellt das System erstmals die Möglichkeit der nutzerfreundlichen Verknüpfung der Datenquellen der unterschiedlichen Bereiche dar. Für die aktuell ausgewählten Polygone konnten alle registrierten Datenquellen, also auch die aktuelle Einrichtungsdatenbank und die Standortinformationen abgefragt werden. Neben einigen Standardabfragen (Abbildung 1.8 und 1.9), wurde dem Nutzer die Möglichkeit gegeben, auch komplexere Abfragen selbst zu erstellen (Abbildung 1.10). Im linken Teil muss die Datenbasis ausgewählt werden. Für diese werden nochmals beschreibende Informationen der Standardattribute angezeigt. Die SQL-Abfrage wird dann mittels „Bearbeiten“ im rechten Teil des Dialogs erstellt und kann beliebige Tabellen in der Datenbasis verknüpfen.



Abbildung 1.8: Auswahl von gespeicherten Abfragen

Resultat der Datenbankabfrage

wefkz_gis	be	schicht	baumart	alt	bhd	hoehe
10,S,1,2,98,a,1	0	1	FI	69	22	21
10,S,1,2,98,a,1	0	3	FI	25	6	6
10,S,1,2,98,a,1	0	4	BU	140	55	0
10,S,1,2,98,a,1	0	1	KI	69	27	24.5

Abbildung 1.9: Resultat einer Standard Baumgruppenabfrage für eine markierte Teilfläche



Abbildung 1.10: Bearbeitung einer komplexeren Abfrage

Das Resultat der Abfrage kann auch dazu genutzt werden, eine neue Auswahl zu treffen. So könnten Flächen ausgewählt werden, die z.B. mehrere Baumarten im Oberstand enthalten und zusätzlich einen Unterbau besitzen (Auswahl des Beispiels).

1.1.3.6 Tabellenkalkulation

Um die Berechnungsmethoden innerhalb einer Tabellenkalkulation aufrufen zu können, stellt die Microsoft Excel-Anwendung CSpread einen Eingabebereich, einen Ausgabebereich, eine Werkzeugleiste und ein Menü zur Verfügung (Abbildung 1.11). Die Methoden werden ebenso wie in CQuant registriert und über den gleichen Dialog konfiguriert. Im Unterschied zu CQuant wird in CSpread die Methode nicht in Abhängigkeit von der Baumart sondern vom Nutzer

ausgewählt. Im Berechnungsmodus „auto on“ wird bei jeder Änderung im Eingabebereich die Berechnung für diese Zeile aufgerufen und die Ergebnisse aktualisiert.

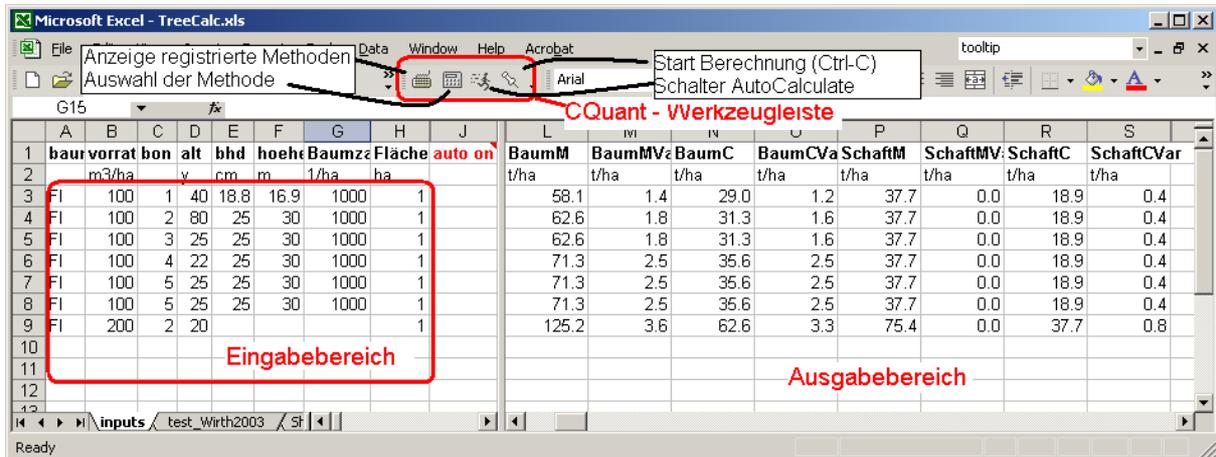


Abbildung 1.11: Bildschirmfoto von CSspread.

1.1.3.7 Konfiguration

Die Konfiguration des Informationssystems und die Speicherung der aktuellen Sitzungseinstellungen erfolgen mit einer auf XML basierten Konfigurationsdatei. Die Registrierung von Datenquellen und Berechnungsmethoden werden in einer Routine im GIS bzw. der Tabellenkalkulation bei jedem Start der Anwendung ausgeführt.

Die Konfigurationsdatei umfasst die Beschreibung der Sachdatentypen (Forst/Standort/Topographie), die Beschreibung der Berechnungstypen (Boden, Auflage, FI, BU, etc.) und die aktuell getroffene Auswahl von Sachdatenquellen und Berechnungsmethoden.

In der Konfigurationsroutine können Berechnungsmethoden und Sachdatenquellen ohne Neuübersetzung des Programms eingebunden werden. Der Nutzer kann so Berechnungsmethoden direkt in VBA umsetzen und zur Laufzeit experimentieren.

1.1.4 Diskussion

Die im Rahmen des Vorläuferprojektes entwickelten Modelle und Algorithmen zur C-Vorratsberechnung wurden in ein Informationssystem integriert, welches mit Direktzugriff auf das Datenbanksystem der TLWJF für den gesamten Landeswald in Thüringen oder für Teilgebiete angewandt werden kann. Durch den direkten Bezug zur Kartengrundlage können C-Vorräte auch dann berechnet werden, wenn sich die Kartengrundlage geändert hat. Das System ist flexibel und erweiterbar, so dass es mit geringem Aufwand an neue Datengrundlagen und genauere Berechnungsmethoden angepasst werden kann. Durch die räumliche Integration von Daten der Standorterkundung und Forsteinrichtung, die räumlich hoch aufgelöste teilflächengenaue Auswertung und die Integration anderer Berechnungsalgorithmen ist es auch für andere Anwendungen interessant.

Bisher wurde das System nur für das Musterforstamt Hummelshain angewandt, da die Anwendung auf den gesamten Staatswald Thüringens sehr rechenintensiv ist und viel Zeit benötigt. Die Anwendung auf den gesamten Staatswald ist zudem erst dann sinnvoll, wenn einige Verbesserungen der Datengrundlagen erfolgt sind.

Eine Quantifizierung der C-Vorratsänderung nach der Delta-Methode (Projekt 1.2) setzt konsistente Karten- und Datenbestände zu zwei Zeitpunkten voraus. Bisher existiert nur ein solcher Zustand, da der Zustand von 1993 große Inkonsistenzen enthält. Die Delta-Methode quantifiziert nach unserem aktuellen Wissen eher die Inkonsistenzen zwischen den Inventuren als die tatsächliche Vorratsänderung. Ein zweite Forsteinrichtung ist für die ersten Forstämter erst ab 2005 und für Gesamt-Thüringen voraussichtlich erst 2015 zu erwarten.

Sollen nur die C-Vorräte in Dendromasse betrachtet werden, könnten die C-Vorratsberechnungen auch ohne die Kartengrundlagen mit dem Datenbanksystem integriert werden. Die räumliche Zuordnung der C-Vorräte über Flächenänderungen hinweg ginge dabei allerdings verloren.

C-Vorräte im Boden werden in größerer räumlicher Auflösung bestimmt als im Vorläuferprojekt. Eine Berechnung von Vorratsänderungen ist mit den erarbeiteten Methoden jedoch nicht möglich. Hier wird in Zukunft ein Bodenmodell, welches die C-Vorratsänderung für jede Fläche simuliert, in das vorliegende Informationssystem integriert werden müssen.

1.1.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

- Die Umsetzung der Methoden zur C-Vorratsberechnung an der TLWJF ist gelungen. Hier steht ein handhabbares, flexibles, erweiterbares GIS-basiertes Werkzeug zur Verfügung, mit dem für jeden beliebigen Bestand in Thüringen die C-Vorräte in der Dendromasse und im Mineralboden berechnet werden können. Damit wurde ein wesentlicher Teil des Projektantrages gelöst.
- Die Anwendung für den gesamten Staatswald in Thüringen wird derzeit noch durch Inkonsistenzen in den Ausgangsdatenbeständen erschwert.
- Die routinemäßige Nutzung der GIS-basierten Anwendung für die jährliche Berechnung der Netto-C-Flüsse nach der Bilanzmethode (Kapitel 1.2) ist grundsätzlich möglich. Die notwendige Datenbasis wird allerdings erst mit dem geplanten „Walddatenspeicher“ (Kapitel 2.1) geschaffen. Unsicherheiten, die mit einer Fortschreibung der Daten mittels Ertragstafeln verbunden sind, werden zunächst bestehen bleiben. Alternativ zu den Ertragstafeln wird die Integration eines gekoppelten Waldwachstums-C-Abrechnungsmodelles (Dissertation T. Wutzler, MPI-BGC, Kapitel 4) in das vorgestellte Informationssystem untersucht.
- Es besteht die Möglichkeit, die GIS-basierte Anwendung mit dem Walddatenspeicher zu verknüpfen.

- Das gesamte Informationssystem ist frei verfügbar und prinzipiell auch auf andere Datenbanken anwendbar. Allerdings ist die Installation derzeit noch sehr aufwendig, und es müssen zahlreiche Anpassungen an die Strukturen der jeweiligen Datenbanken vorgenommen werden.
- Durch Erweiterungen der turnusmäßigen Forstinventuren um die Parameter: Durchmesser-Verteilung, Baumzahlen und Totholzvorräte würde die Bilanzierung von Kohlenstoffvorräten und ihre spätere Fortschreibung vervollständigt und Unsicherheiten reduziert werden.
- Nicht berücksichtigt bleiben Vorratsänderungen im Totholz und der Austrag von Kohlenstoff durch Erosion oder mit der Versickerung von Wasser (DOC-Austrag). Hierzu liegen bisher keine ausreichenden Daten für Thüringen vor.

1.2 Berechnung der aktuellen, mittleren C-Flüsse auf der Ebene forstlicher Teilflächen am Beispiel des Forstamtes Hummelshain

1.2.1 Einleitung

Die erste vollständige Forsteinrichtung nach der Wende (Beginn 1995) ist entgegen den Erwartungen noch nicht für alle Forstämter in Thüringen abgeschlossen. Eine Berechnung der Vorratsänderungen im Laufe des Jahres 2003 auf Grundlage der Forsteinrichtungsdaten 1993 und 2003 ist somit für ganz Thüringen noch nicht möglich. Daher wurde bereits in der vorhergehenden Projektphase (Wirth *et al.* 2003) begonnen, die mittleren Netto-C-Flüsse für ausgewählte Forstämter, in denen die neue Forsteinrichtung bereits abgeschlossen ist, zu berechnen. Während in der ersten Projektphase die Abschätzungen der aktuellen Netto-C-Flüsse auf mittleren Bestandes- und Taxations-Werten und Vollzugsschätzungen der gesamten Forstämter beruhten, wurden in der zweiten Projektphase die Ergebnisse am Beispiel des Forstamtes Hummelshain teilflächenweise überprüft. Das heisst, es wurde geprüft, in wieweit die in der ersten Projektphase getroffenen Trendaussagen auch für detailliert berechnete Teilflächen eines einzelnen Forstamtes Gültigkeit haben.

1.2.2 Methoden

Prinzipiell stehen für eine Abschätzung von C-Flüssen aus Inventurdaten zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Eine Methode besteht darin, die Bilanz aus dem umgerechneten jährlichen Bestandeszuwachs (Z_C) und der Entnahme von Dendromasse, also der Ernte (E_C), zu ermitteln (Gleichung 1). Der Zusatz "C" symbolisiert, dass die Eingangswerte über Konversions-/Expansionsfaktoren in C-Einheiten auf Ganzbaumebene des Bestandes umgerechnet werden müssen. Diese Methode wird als „Bilanz-Methode“ bezeichnet.

Gleichung 1.1 („Bilanz-Methode“) $\text{Netto-C-Fluss} = \text{Bestandeszuwachs}_C - \text{Ernte}_C$

Der größte Nachteil der Bilanz-Methode besteht darin, dass bislang keine aktuellen Zuwachsdaten für Thüringen vorliegen, so dass das Wachstum nur über Ertragstafelmodelle abgeschätzt werden kann (zur Problematik der Ertragstafelmodelle siehe Kapitel 3.1). Die Holzernte des Thüringer Landeswaldes wird zwar seit 1992 alljährlich gebucht (Vollzugsbuchung), die Daten sind aber erst seit 2001 über das EDV-Abrechnungssystem ABIE-FIS digital verfügbar.

Eine andere, direkte Methode zur Abschätzung der Netto-C-Flüsse ist die Quantifizierung der Bestandes-C-Vorräte (C) zu zwei aufeinanderfolgenden Zeitpunkten (t_1 und t_2). Der C-Fluss während des Zeitintervalls $\Delta t = t_2 - t_1$ errechnet sich dann nach der Formel 1.2.

Gleichung 1.2 („Delta-Methode“) $\text{Netto-C-Fluss} = \frac{\Delta C}{\Delta t} = \frac{\text{Vorrat}C_2 - \text{Vorrat}C_1}{t_2 - t_1}$

Diese Art der Berechnung wird als „Delta-Methode“ bezeichnet. Die Eingangswerte werden wie bei der Bilanz-Methode über Konversions-/Expansionsfaktoren in C-Einheiten auf Ganzbaumebene des Bestandes umgerechnet.

Die Delta-Methode setzt mindestens zwei vollständige und verfügbare Forsteinrichtungsdatensätze voraus. Da für Thüringen diese Voraussetzung nicht erfüllt ist (s. o.), wurden in der ersten Projektphase die fortgeschriebene Datenbank von 1993 und die Daten der neuen Forsteinrichtung als Datenbasis für die Bilanzierung nach der Delta-Methode herangezogen (Wirth *et al.* 2003). Es wurden sieben Forstämter ausgewählt, deren Forsteinrichtung bereits abgeschlossen ist und deren Waldfläche zu einem großen Teil aus der Eigentumsform "Staatswald" besteht. Die Analysen zum Vergleich der sieben Forstämter wurden zwar erst zu Beginn des Jahres 2003 abgeschlossen, dennoch konnten sie schon im Endbericht der ersten Projektphase vorgestellt werden (siehe Wirth *et al.* 2003). Hierauf aufbauend, wurden in der 2. Projektphase die Ergebnisse der Delta-Methode am Beispiel des Forstamtes Hummelshain (Stichtag der aktuellen Forsteinrichtung 01.10.1999) teilflächenweise überprüft.

Im Laufe dieser Überprüfung wurden zwei große Probleme bei der Anwendung administrativer, forstlicher Inventurdaten offenkundig, die außerhalb des Einflusses des vorliegenden Projektes liegen und nicht nur das Teilprojekte 1.2 sondern auch das Hauptziel, die Fortschreibung der Kohlenstoffvorräte, betreffen. Diese zum Zeitpunkt der Antragstellung nicht bekannten Probleme sind:

(1) In den aktuellen und zukünftigen Inventurdatenbanken sind nur die Daten des Staatswaldes der Wissenschaft und der Öffentlichkeit zugänglich. Daher kann anhand landesforstlicher Inventurdaten in Gebieten mit einem hohen Anteil an Privat- und Kommunalwald keine gesicherte Aussage über den C-Haushalt der Wälder auf regionaler Ebene gemacht werden. Diese Regelung war auch für die Akteure des vorliegenden Projektes bindend, und die damit verbundenen Einschränkungen für die C-Bilanzierung mußten akzeptiert werden.

(2) Der teilflächengenaue Vergleich der Bestandesdaten der aktuellen Forsteinrichtung (1999) mit der Datenbank von 1993 erwies sich als sehr problematisch und zeitaufwändig, da sich durch Änderungen der Eigentumsverhältnisse in den 90er Jahren (Rückübertragungen und Flächenverkauf nach der Wende) die Organisationsstrukturen der Forstwirtschaft und damit die Forstbetriebseinteilung im Vergleich zum Zustand von 1993 stark veränderte hatte. Es wurden nicht nur die Flächenbezeichnungen verändert, sondern zum Großteil auch die Geometrie der Flächen. Viele Teilflächen wurden verkleinert oder vergrößert, weiter aufgeteilt oder zusammengelegt. Ein konkreter Vergleich der Wachstums- und Bestandesentwicklung ist aber nur sinnvoll, wenn entsprechende Flächen in Größe und Form annähernd erhalten geblieben sind und die Bestandesvorräte zu verschiedenen Zeitpunkten einander gegenübergestellt werden können. Da keine digital verfügbare Zuordnung der alten Flächeneinteilung zur neuen Flächeneinteilung zu Verfügung stand und routinemäßig keine älteren Zustände der Datenbank gespeichert wurden, erschien eine Zuordnung der beiden Datenbanken nahezu unmöglich.

Das Problem der neuen Forstbetriebseinteilung wurde auf folgenden Wegen versucht zu lösen:

Zunächst wurde am Beispiel des FoA Hummelshain mit Hilfe der Verschneidung von GIS-Kenndaten und der Forsteinrichtungsdatenbank geprüft, inwieweit noch eine übereinstimmende Flächengeometrie vor Ort vorhanden war. Da es auf diesem Wege nicht möglich war, auch die jeweils alten und neuen Forst-Adressen einander zuzuordnen, wurde dies im Nachgang anhand von Originalkarten manuell für alle Flächen im FoA Hummelshain durchgeführt. Hierbei stellte sich heraus, dass sich die erste digitale Kartengrundlage zwar auf die Forstadressen vom Stand 1993 bezieht, die dazugehörige Digitalisierung wurde jedoch erst 1997/98 durchgeführt. Vermutlich wurde die Digitalisierung von 1997/98 der Datenbank von 1993 zugeordnet, aber die Neuaufteilung spiegelte sich in den Polygonflächen der Bestände kaum wider. Dies bedeutet, dass viele Teilflächen 1999 zwar rein rechnerisch im GIS mit denen von 1993 übereinstimmten, nicht jedoch mit dem realen Erhebungszustand von 1993.

Daher wurden in einem weiteren Schritt nur die Flächen selektiert, die in der Datenbank und den Forstbetriebskarten (Stand jeweils 1993) in ihrer Größe übereinstimmten. Anschließend konnten für diese Flächen die Flächengrößen aus der Datenbank den GIS-Werten gegenübergestellt werden. Alle Flächen, die mehr als 100 m² voneinander abwichen, wurden verworfen. Unter diesen Voraussetzungen konnten von den 4.791 Teilflächen des FoA Hummelshain (~ 10747 ha) rund 4.300 Polygone der alten Kartengrundlage zugeordnet werden. Dies entsprach etwa 2.700 Teilflächen. Die große Übereinstimmung in den Kartengrundlagen reduzierte sich allerdings auf nur 65 Teilflächen, wenn nur der Staatswald (4.170 ha) berücksichtigt wurde und die Inkonsistenzen zwischen Kartengrundlage und Sachdaten zum Ausschluss von Flächen führten. Schon ein Vergleich der Flächengrößen schloss viele Polygone aus. Die Richtigkeit der verbliebenen, übereinstimmenden Flächen wurde anhand der alten gedruckten Karten zur Waldeinteilung von 1993 und der neuen Forstkarten überprüft. Dabei ergab sich eine 100%-ige Übereinstimmung mit den GIS-Ergebnissen. Da allerdings mit der beschriebenen digitalen Methodik aufgrund der Nichtübereinstimmung von Datenbank und GIS 1993 ein Teil der real bis 1999 unverändert gebliebenen Flächen bei der Berechnung nicht als "gleich" identifiziert wurden, musste zudem das gesamte Forstamt manuell durch Gegenüberstellung des umfangreichen Kartenwerkes auf eventuelle Flächenübereinstimmung überprüft werden. Letztendlich wurden für das FoA Hummelshain nur insgesamt 68 übereinstimmende Teilflächen im Staatswald ermittelt (~119 ha, ~2.9% der gesamten Staatswaldfläche des FoA Hummelshain).

Die "Ausbeute" von nur 68 übereinstimmenden Teilflächen war für eine repräsentative Bestimmung der C-Bilanz im FoA Hummelshain viel zu gering. Daher wurde überlegt, ob die geringe Ausbeute eine Folge zu strenger Ausschlusskriterien zwischen digitaler Datengrundlage und Forsteinrichtungsdatenbank 1993 sein könnte. Daher wurde das Problem noch einmal neu, mit anderen Ausschlusskriterien und einer überarbeiteten Version der GIS-basierten Anwendung von Herrn Wutzler (Projekt 1.1) in Angriff genommen. Recherchen an der TLWJF in Gotha ergaben zudem, dass noch einzelne Sicherungskopien älterer Datenbankversionen vorhanden waren, und mit diesen Sicherungskopien lagen unter anderem auch noch die Schlüssel zu den

Teilflächen von 1993 vor. Auch eine Version der ersten Digitalisierung der Flächen von 1997 mit den zugehörigen Schlüsseln war aufgehoben worden. Nun wurden die Forstgrundkarten beider Zustände für das Forstamt Hummelshain verschnitten, die Flächengrößen aller Polygone berechnet und die Größen aller Verschnitt- und Ausgangspolygone verglichen. Es wurde angenommen, dass bei Teilungen, Zusammenlegungen und Änderungen des Umrisses der Flächen sich mit nur geringer Wahrscheinlichkeit wieder die gleiche Flächengröße ergibt. Um geringfügige kartographische Korrekturen vernachlässigen zu können, wurden die Teilflächen mit einer Toleranz (weniger als 0,5 ha absolute Abweichung und weniger als 15 % relative Abweichung) als gleich klassifiziert. Die Verschnittpolygone konnten durch die implementierte Trennung von Geometrie und Sachinformation (Kapitel 1.1) mit den Paaren der Sachinformationen der alten und neuen Forstadresse verbunden werden. Auf diesem Wege wurden die Flächen selektiert, die in beiden Kartengrundlagen übereinstimmten und im Folgenden diskutiert werden.

Um mögliche Inkonsistenzen zwischen der Kartengrundlage und der Sachdatenbasis für die zugeordneten Flächen aufzudecken, wurde die Summe der Flächen aller Polygone einer Teilfläche mit der Flächengröße der Teilfläche in der Sachdatenbasis verglichen. Polygone ohne Zuordnung eines Datensatzes in den Sachdaten, und Sachdatensätze ohne zugeordnete Polygone in der Kartengrundlage erforderten jedoch eine manuelle Durchsicht der Karten auf Flächenübereinstimmungen. In den flächenmäßig übereinstimmenden Teilflächen erfolgte eine stichprobenweise Überprüfung der Zuordnung der Sachdaten.

Mit dem beschriebenen Verfahren konnte die Zuordnung der administrativen Teilflächen von 1993 und 1999 zwar teilweise wiederhergestellt werden, für eine C-Bilanzierung auf Betriebsebene reichten die übereinstimmenden Flächen jedoch nicht aus (siehe Ergebnisteil).

1.2.3 Ergebnisse

Von den 4791 Teilflächen des Forstamtes Hummelshain (~10 746,66 ha) sind 1549 Teilflächen (~4169,87 ha) als Staatsforst angegeben. Von allen Teilflächen stimmten 3344 Flächen (~7826,28 ha) in beiden Zuständen (1993 und 1999) überein.

Für den Zustand 1999 wurden 21 Flächen (~27,62 ha) wegen fehlender Zuordnung und weitere 19 Flächen (~7,8 ha) aufgrund von Flächeninkonsistenzen ausgeschlossen. Dabei handelte es sich allerdings fast ausschließlich um kleine Flächen. Für den Zustand 1993 wurden 243 Flächen (~514,37 ha) wegen fehlender Zuordnung und weitere 90 Flächen (~202,3 ha) aufgrund von Flächeninkonsistenzen zwischen GIS und Einrichtungsbasis ausgeschlossen.

Nach Kombination der beiden Ausschlusskriterien (fehlende Zuordnung und Flächeninkonsistenz) stimmten noch 3134 Flächen (bei 0,5 ha Kriterium noch 3129 Flächen) überein. Dies entspricht einer Fläche von 7399,7 ha, also 69 % der Gesamtfläche. Mit der Einschränkung auf den Staatswald stimmten 832 Teilflächen (~2014,7 ha) überein. Dies entspricht einer Übereinstimmung von 50 % der Staatsforstfläche (4287,87 ha). Für 4163,13 ha dieser Auswahl waren auch Informationen zum Baumbestand vorhanden. Die stichprobenweise

Überprüfung der Baumzeilen zeigte eine Übereinstimmung mit einer Unsicherheit der Baumalter von einem Jahr.

Trotz der erfolgreichen, GIS-basierten Zuordnung der Teilflächen reichte der Anteil identischer Flächen von nur 50 % des Staatswaldes im FoA Hummelshain nicht für eine repräsentative, teilflächengenaue C-Bilanz. Da Abteilungen zumeist konservativer gegenüber administrativen Änderungen sind als einzelne Teilflächen, wurde das Verfahren für alle Abteilungen des FoA Hummelshain wiederholt. Abteilungen von 1993 und neuer Forsteinrichtung galten als identisch, wenn die relative Änderung nicht größer als 15 % und die absolute Änderung nicht größer als 2 ha war (Übereinstimmungskriterium).

Die Forstdatenbank von 1993 beinhaltete 22 791 Abteilungen (490 151,0 ha) im Landeswald von Thüringen, der Inventurzustand 1999 hingegen 26 087 Abteilungen (504 744,3 ha) und die digitale Kartengrundlage 26 000 Abteilungen (517 718,9 ha). Doch auch die Abteilungen wurden zwischen 1993 und 2003 stark verändert, kleine Flächen wurden ausgegliedert oder kamen hinzu (Abbildung 1.12). Auf Abteilungsebene wurde eine Übereinstimmung von 77 % der Forstfläche ermittelt.



Abbildung 1.12: Vergleich der Abteilungsgrenzen zwischen 1993 und 2003. Auszug aus Flächen des Staatswaldes im FoA Hummelshain.

Auch die stichprobenweise Überprüfung der Sachinformation auf Abteilungsebene zeigte Abweichungen. Beispielsweise tauchten einige ältere, vorratsreichere Baumgruppen in der Folgeinventur neu auf. Ein Vergleich der Grundflächensummen ergab relativ große Diskrepanzen, die nicht mit Zuwachs erklärt werden können (Abbildung 1.13).

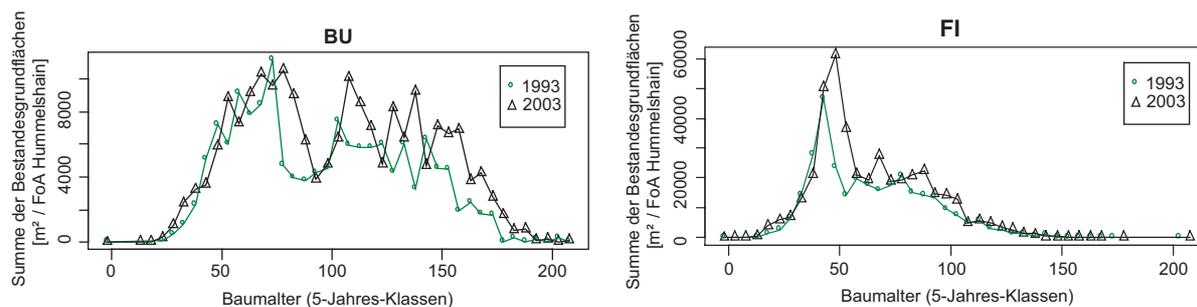


Abbildung 1.13: Grundflächen der Baumarten Buche und Fichte im FoA Hummelshain laut fortgeschriebener Datenbank von 1993 und laut aktueller Forsteinrichtung (01.10.1999).

1.2.4 Diskussion und Schlussfolgerungen

Eine Quantifizierung der C-Vorratsänderung nach der Delta-Methode setzt konsistente Karten- und Datenbestände zu zwei Zeitpunkten voraus. Nach den Analysen und Vergleichen der 2. Projektphase muss man jedoch davon ausgehen, dass bisher nur ein solcher Zustand in Form der aktuellen Forsteinrichtung existiert. Sowohl innerhalb der fortgeschriebenen Datenbank von 1993 als auch zwischen den Datenbanken von 1993 und 1999 sind zu große Inkonsistenzen enthalten, als dass sie für eine Abschätzung der C-Bilanz auf der Ebene von Teilflächen genutzt werden können. Die Inkonsistenzen lassen sich wahrscheinlich folgendermaßen begründen:

(1) Der erste verfügbare und vollständige Inventurdatensatz von 1993 basiert auf einer Datenfortschreibung von Inventurergebnissen, die Anfang bis Ende der 1980-iger Jahre erhoben wurden. Mit der Fortschreibung der Inventurergebnisse war die Anwendung von Ertragstafelmodellen verbunden, die sehr wahrscheinlich das jährliche Stammwachstum systematisch unterschätzten. So zeigen zahlreiche Untersuchungen in Mitteleuropa, dass das Wachstum von Waldbeständen seit etwa 50-60 Jahren im Vergleich zu den ertragstafelbasierten Vorhersagen zugenommen hat (Franz *et al.* 1993, Pretzsch 1999, Spiecker *et al.* 1996, Dittmar *et al.* 2003, Mund *et al.* 2002). Zudem wurde zumindest bei der Baumart Fichte im Fortschreibungsmodell der ostdeutschen Länder eine Zuwachsdepression infolge "neuartiger Waldschäden" in der Größenordnung von rund 20 % unterstellt. Eine derart starke Zuwachsdepression ist wahrscheinlich nicht über längere Zeit auf allen Standorten eingetreten.

(2) Die Forsteinrichtung in den 1980-iger Jahren berücksichtigte nur den Hauptbestand. Holzvorräte im Zwischen- und Unterstand wurden nicht taxiert, da mehrschichtige Bestände nicht angestrebt wurden und damit auch kaum vorhanden waren. Die aktuelle Forsteinrichtung hingegen beinhaltet alle Baumschichten mit einem BHD > 7 cm, so dass beispielsweise auch Holzvorräte des Buchenvoranbaus in einem Kiefernaltbestand taxiert werden. Diese Unterschiede in der Methodik können eine „plötzliche“ Zunahme von Jungbeständen zwischen 1993 und 1999 erklären, nicht jedoch eine „plötzliche“ Zunahme vorratsreicher, älterer Bestände, wie in Abbildung 1.13 dargestellt.

Die Delta-Methode quantifiziert auf Teilflächenebene nach unserem aktuellen Wissen eher die Inkonsistenzen zwischen den Inventuren als eine tatsächliche Vorratsänderung und würde auf einer zu kleinen Datenbasis identischer Teilflächen zum Zustand 1993 und 1999 beruhen. Für eine teilflächengenaue Abschätzung von C-Vorratsänderungen mittels der Delta-Methode muss die zweite Forsteinrichtung in Thüringen (2005-2015) abgewartet werden.

Eine Abschätzung der mittleren C-Vorratsänderung auf Forstamtsebene ist von den genannten Inkonsistenzen und den Änderungen der Forstbetriebseinteilung weitaus weniger betroffen als eine teilflächengenaue Abschätzung. Daher kann man davon ausgehen, dass die Ergebnisse der 1. Projektphase zur C-Bilanz der sieben Forstämter durch die Erkenntnisse des vorliegenden Teilprojektes nicht in Frage gestellt werden. Es muss aber festgehalten werden, dass mit den bislang zur Verfügung stehenden Datensätzen keine Aussage zur C-Vorratsänderung auf einer räumlichen Skala von Teilflächen und Beständen getroffen werden kann.

Das vorliegende Teilprojekt setzte unerwartete Schranken für die Nutzung vorhandener, administrativer Datenbanken für die C-Bilanz von Wäldern. Es ist aber auch ein Beispiel dafür, wie das vom BMBF geförderte Projekt zur C-Bilanz Thüringer Wälder wesentlich dazu beigetragen hat, vorhandene Daten wissenschaftlich aufzuarbeiten.

Nach der zweiten Forsteinrichtung (2005-2015) wird mit Hilfe der GIS-basierten Anwendung (Kapitel 1.2) die jährliche, teilflächengenaue Berechnung der Netto-C-Flüsse gemäß der Bilanzmethode möglich sein.

2 Einrichtung eines fortlaufenden Datenflusses von den Forstämtern hin zur Datenbank der TLWJF und laufende Fortschreibung der Datenbank unter Einbeziehung eines Verfahrens zur Fortschreibung von Zuwächsen und Holzernten im Sinne eines „full carbon accounting“.

2.1 Neueinrichtung des Walddatenspeichers

Auf Initiative und mit Unterstützung des vorliegenden Projektes wurde die Wiedereinrichtung des früheren „Datenspeicher Waldfonds“ (DSWF, kurz: „Walddatenspeicher“) für Thüringen begonnen. Der "Walddatenspeicher" ist eine Inventurdatenbank, die auf der jeweils jüngsten vollständigen Forsteinrichtung basiert und anhand von Bestandeszuwachsabschätzungen und jährlicher Berichterstattung aus den Forstbetrieben zur tatsächlich erfolgten Nutzung laufend fortgeschrieben wird.

Für eine laufende Fortschreibung der Kohlenstoffvorräte im Sinne des Kyoto-Protokolls müssen die Komponenten Holzvorrat, Holzzuwachs und Holznutzung durch gezielten Datenfluss jährlich aktualisiert werden. Der Vorrat, mitsamt seinen beschreibenden Daten Baumart, Alter, Höhe, Durchmesser und Bestandesdichte, soll im Thüringer Landeswald im Rhythmus von 10 Jahren erfasst werden (Zustandserfassung der Forsteinrichtung). Bei der Zustandserfassung wird der Staatswald eines jeweiligen Forstamtes flächendeckend nach den Merkmalen der Arbeitsanweisung für die Forsteinrichtung in Thüringen aufgenommen. Es wird eine enge Einheit von Örtlichkeit und Sachdaten hergestellt. Die Zustandsdaten werden über das Forsteinrichtungsprogramm ABIES-FE erfasst und entsprechend verschiedener Fragestellungen verknüpft. Der Zustand zu einem jeweiligen Stichjahr zum Stichtag 01.10. wird in einer Datenbank abgelegt. Die Bestandesvorräte werden anhand von Zuwachsabschätzungen, die sich aus Ertragstafelmodellen ableiten, und der erfolgten Nutzung jährlich fortgeschrieben. Die Nutzungsdaten zu dieser Aktualisierung werden den laufend abgerechneten Arbeitsaufträgen im Forstlichen Informationssystem (FIS) entnommen. Zudem wird die Datenbank jährlich mit Daten neu eingerichteter Forstämter ergänzt, so dass zum Stichtag 01.10. die Datenbank mit unterschiedlichen Anteilen fortgeschriebener Daten gefüllt sein wird. Nach 10 Jahren ist der Vorgang der Einrichtung eines vollständig aktualisierten "Walddatenspeichers" abgeschlossen.

Die Thüringer Landesforstverwaltung wird mit Beginn des 2. Forsteinrichtungsturnus der Staatswälder Thüringens die Naturaldatenfortschreibung und Aktualisierung wieder einführen. Dieses Prinzip war bereits mit Beginn der 70er Jahre eingeführt und in den 80er Jahren bis 1993 als dann schlüssiges Datenhaltungsverfahren angewandt worden. Der Wiedereinführungszeitraum des neuen Walddatenspeichers wird sich über die Jahre 2005 bis 2015 erstrecken.

Das Ziel eines neuen Walddatenspeichers verfolgen auch die Länder Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern. Ein gemeinsames Forsteinrichtungs-, Fortschreibungs- und

Aktualisierungsprogramm wird derzeit gemeinsam erarbeitet. Auf Betreiben des vorliegenden BMBF-Projektes wird angestrebt, die in Planung befindliche Datenmaske des Walddatenspeichers um die Parameter Bestandesdichte (Anzahl an Stämmen pro Flächeneinheit), Durchmesservertelung und Totholzvorräte zu erweitern. Die Parameter Bestandesdichte und Durchmesservertelung sind für eine Waldwachstumsmodellierung, insbesondere bei strukturreichen Wäldern, und eine Abschätzung der Produktlebenszeit des anfallenden Holzes unerlässlich.

Auf Grundlage des "Walddatenspeichers" in Verbindung mit der oben beschriebenen GIS-basierten Anwendung (Projekt 1.1) wird es voraussichtlich ab 01.10.2015 möglich sein, alljährlich Vorratsänderungen für den gesamten Staatswald (bis 2012 wahrscheinlich für rund 80 % des Staatswaldes) nachzuweisen.

2.2 Holznutzung und Holzprodukte in Thüringen in Abhängigkeit von der Baumartenzusammensetzung und dem Durchforstungsregime

2.2.1 Einleitung

Schutz, Erhaltung und Vergrößerung von Kohlenstoffsinken und -vorräten terrestrischer Ökosysteme sind zentrale Ziele des internationalen und nationalen Klimaschutzes (Artikel 3.3 und 3.4 des Kyoto-Protokolls). Verbunden mit diesen Zielen ergeht der Auftrag an die Forstwirtschaft, Wälder als größten terrestrischen Kohlenstoffspeicher zu erhalten und die Kohlenstoffvorräte bewirtschafteter Wälder zu erhöhen. Gleichzeitig ist das Ziel einer Reduktion von CO₂-Emissionen in den Sektoren Energie, Industrie und Abfallbehandlung (Artikel 2.1 and 3.1 des Kyoto-Protokolls) eng mit der Verwendung von Holz als nahezu CO₂-neutraler Rohstoff verbunden. Abholzungen von Wäldern zur Gewinnung von Acker- oder Bauland sind oft mit der Verbrennung des Holzes vor Ort verbunden, ohne Nutzung des Holzes als Energiequelle oder als Rohstoff für mehr oder weniger langlebige Holzprodukte. Im Gegensatz zu dieser, vor allem in Entwicklungsländern anzutreffenden Situation, werden große Teile der mitteleuropäischen Wälder mit dem Ziel bewirtschaftet, nachhaltig den Rohstoff Holz zu produzieren und für eine breite Palette von Produkten bereit zu stellen. Holz ist zudem, im Gegensatz zu fossilen Energieträgern, ein nahezu CO₂-neutraler Brennstoff. Im Falle einer Substitution fossiler Energieträger durch Holz würde es sogar zu einer Reduktion der Netto-CO₂-Emissionen kommen.

In jedem Holzprodukt ist Kohlenstoff gebunden, der während der Produktlebenszeit, d.h. bis zu seiner Verrottung oder Verbrennung, die Atmosphäre nicht als klimawirksames CO₂ belastet. Zudem bietet die Substitution energieintensiv hergestellter Materialien (z.B. Stahl, Aluminium) durch Holz ein hohes Potential zur Vermeidung von CO₂-Emissionen. Die in diesem Zusammenhang häufig angeführte Erhöhung des jährlichen Zuwachses des verbleibenden Waldbestandes nach mäßigem Holzeinschlag erfolgt jedoch zu Lasten des Bestandesvorrates, verbunden mit C-Verlusten durch erhöhten Streuabbau.

Das Kyoto-Protokoll eröffnet der Forstwirtschaft zwei große Handlungsfelder zur Minderung von CO₂-Emissionen: (1) technische Maßnahmen und (2) biologische Maßnahmen (Abbildung 2.1). Mit diesen Handlungsfeldern ergeben sich zahlreiche Handlungsoptionen, die es mit Blick auf eine Reduktion der atmosphärischen CO₂-Konzentration zu optimieren gilt. Die in Abbildung 2.1 dargestellte Positionierung der Forstwirtschaft im Kontext des Kyoto-Protokolls macht zudem deutlich, dass der häufig geäußerte Vorwurf, die Bedeutung von Holz als Rohstoff sei nicht im Kyoto- Protokoll verankert, nicht zutrifft.

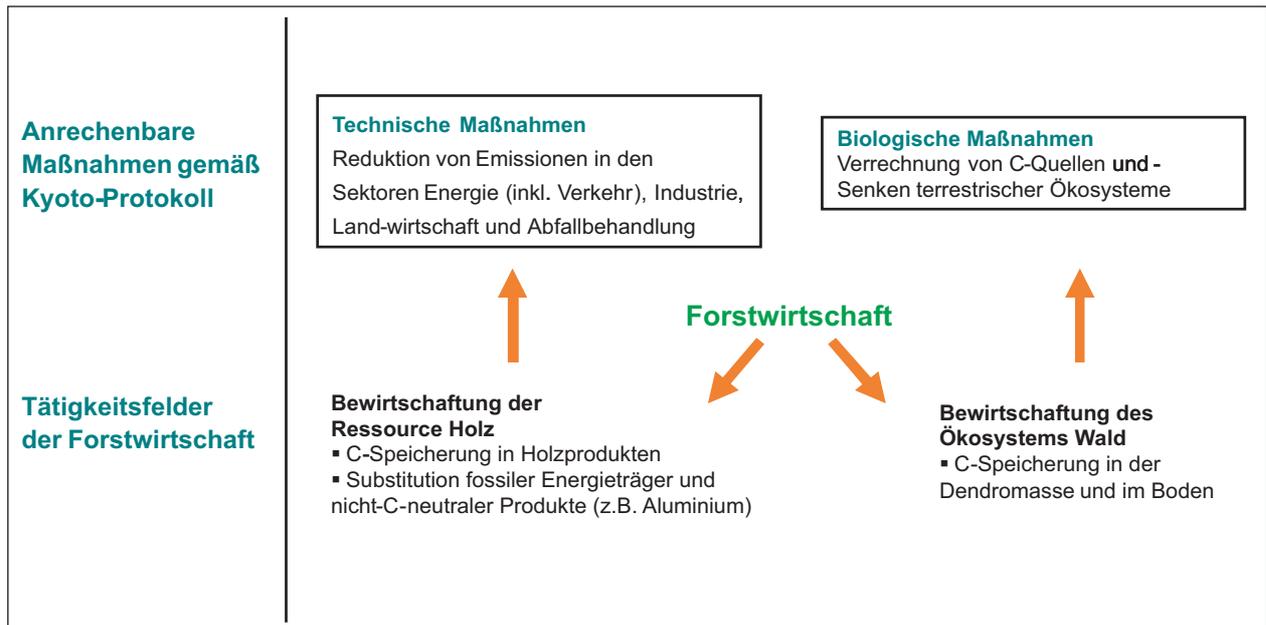


Abbildung 2.1: Positionierung der Forstwirtschaft innerhalb des Kyoto-Protokolls.

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurden erstmals:

1. die Holznutzung im Landeswald des Freistaates Thüringen untersucht und die Kohlenstoffbindung in Produktgruppen unterschiedlicher Lebensdauer quantifiziert,
2. die Auswirkungen unterschiedlicher Durchforstungsregime (Hoch-/Niederdurchforstung) im Altersklassenwald an einem Beispielforstamt analysiert, und
3. zukünftige Nutzungsmengen und deren C-Bindung unter Erhaltung von Zielvorräten in strukturreichen Wäldern an einem Beispielforstamt berechnet.

Diese drei Bereiche bilden zusammen mit der C-Bilanz des Ökosystems Wald in Thüringen (Wirth *et al.* 2003) eine erste Datengrundlage zur Quantifizierung der Effekte unterschiedlicher Handlungsstrategien auf die C-Bilanz der Thüringer Forst- und Holzwirtschaft. Eine Publikation zu den vorliegenden Ergebnissen ist in Bearbeitung (Profft *et al.* in prep.).

Mit Hilfe von Modellen wird es in Zukunft möglich sein, die Bewirtschaftung von Wäldern hinsichtlich der verschiedenen Waldfunktionen (z.B. Kohlenstoff- und Stickstoffhaushalt, Wasserhaushalt, Lebensraum) und Serviceleistungen des Waldes (z.B. Holzproduktion, Erholung) zu optimieren und mögliche Rückkopplungen (z.B. von Klimaveränderungen auf den Waldbau) zu berücksichtigen. Ein erstes Modellierungsprojekt zu dem Komplex von Wald, Holznutzung und Klima ist bereits in Vorbereitung und wird unterstützt vom MPI-BGC, der TLWJF, der FVA Baden-Württemberg und dem CIRED (Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement, France).

2.2.2 Methoden

2.2.2.1 Datenbasis zum jährlichen Holzverkauf in Thüringen

Für die Forstwirtschaft verlieren sich nach dem Verkauf des Holzes dessen Wege. Eine über den Holzverkauf hinausgehende Betrachtung ist jedoch für eine Analyse der Holzverwendung und der Nutzungsdauer der Holzprodukte notwendig. Dabei stellt sich eine Quantifizierung von Holz- und Produktströmen aufgrund der starken Globalisierung des Holz- und Holzprodukthandels als sehr schwierig dar. Erschwerend kommen die Lagerbildung im Holzverarbeitenden und -bearbeitenden Gewerbe und die mögliche Wiederverwendung des Holzes nach seiner ersten Produktlebensphase in verschiedenen weiteren Produktbereichen hinzu. Bereits die Holz-Distributionsanalyse von 1995, welche die aktuellste Untersuchung des Absatzes von Holz und Holzprodukten für Deutschland ist, kam zu dem Schluss, „dass eine umfassende und differenzierte Darstellung der Holzflüsse in Deutschland gegenwärtig nicht möglich ist“ (Becker und Mellinghoff 1997).

Um trotz dieser Hindernisse die Holznutzung und die Art der Holzprodukte aus Thüringer Wäldern zu quantifizieren, wurden im vorliegenden Projekt die Verkaufszahlen des „Primärproduzenten“, dem Thüringer Landesforst (THÜRINGENFORST) in den Kalenderjahren 2001 und 2002 analysiert. Die Beschränkung auf den Staatswald und die Jahre 2001 und 2002 hatte den großen Vorteil, dass die gesamte Datenerfassung und -bereitstellung über das zentrale EDV-Abrechnungssystem ABIES-FIS erfolgen konnte. Die Verkaufsmengen lagen für 14 Verkaufssortimente vor (Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1: Übersicht der in dem vorliegenden Projekt berücksichtigten Verkaufssortimente.

Verkaufssortiment	Abkürzung
Brennholz	BR
Industrieholz lang	IL
Industrieholz lang, das als Sägeholz verkauft wurde	ILHAF
Industrieholz kurz	IS
Stammholz	L
Stammholzabschnitte	LAS und LAR
Masten	M
Stangen	P
Parkettholz	PAK
Palettenholz	PAL
Pfähle	PF
Rammpfähle	R
Schichtholz	S
Schwellenholz	SW

2.2.2.2 Herleitung der Produktlebensdauer

Die Zusammenfassung der einzelnen Sortimenten zu sechs Produktgruppen unterschiedlicher Lebensdauer basiert auf der Klassifizierung von Wirth *et al.* (2003), Umfragen bei den wichtigsten Holzabnehmern in Thüringen (Klausner Holz Thüringen, Saalburg-Ebersdorf; Pollmeier Massivholz GmbH, Creuzburg; Rettenmeier Holzindustrie GmbH, Ullersreuth; Zellstoff- und Papierfabrik Rosenthal GmbH & Co. KG (ZPR), Blankenstein; BHT Bau- und Holztechnik Thüringen GmbH in Ebersdorf), Daten aus Literatur-, Internet- und Telefonrecherche sowie Ableitungen beim Fehlen weiterführender Angaben. In den Abschätzungen zur Lebensdauer der Holzprodukte ist eine mögliche Speicherung von Kohlenstoff in Holzabfällen, die auf Mülldeponien gebracht werden, nicht enthalten, da die Deponierung von Holz in Deutschland seit 2003 verboten ist (Altholzverordnung). Eine mögliche Reduktion von CO₂-Emissionen durch die Substitution fossiler Energieträger oder CO₂-intensiver Werkstoffe und die stoffliche (Sekundärproduktion) und thermische Verwertung von Holzabfällen musste mangels vorhandener Daten unberücksichtigt bleiben.

Trotz der relativ guten Datengrundlage für Thüringen mussten einige grobe Annahmen getroffen werden:

1. Die Quantifizierung der Holzprodukte aus dem Landeswald Thüringens basierte auf den Verkaufszahlen der oben angegebenen Verkaufssortimente (Tabelle 8.1). Nicht erfasst wurden X-Holz (eingeschlagenes, aber nicht verwertetes Stammholz > 7 cm Durchmesser) und nvD-Holz (eingeschlagenes, aber nicht verlohntes Derbholz). Dies sind keine Verkaufssortimente, sondern Sortimente aus der Verlohnung der Waldarbeiter. Das Holz verbleibt in der Regel im Wald, ein potentieller Verkauf, beispielsweise als Brennholz in Selbstwerbung, wird in der Verkaufsstatistik nicht aufgeführt.
2. Aufgrund des Interesses eines jeden Unternehmens, einen optimalen Mittel- und Gütereinsatz zu erreichen, werden höherwertige und daher teurere Verkaufssortimente in der Regel nicht für die Herstellung einfacher, billiger bezahlter Produkte verwendet. Daher kann man davon ausgehen, dass die an ein Holz ver- oder bearbeitendes Werk verkauften Sortimente in die entsprechenden Produktionsbereiche und Produkte fließen. Dies bedeutet zum Beispiel, dass Stammholz (Sortiment L) in den Sägewerksbereich fließt und zu hochwertigen Produkten verarbeitet wird und dass Brennholz auch als solches genutzt wird. Vereinzelt (z.B. bei Nischenprodukten) ist es zwar möglich, dass preiswerte Verkaufssortimente in die Produktion höherwertiger Endprodukte miteingehen, dies dürfte quantitativ jedoch zu vernachlässigen sein.
3. Mit zunehmendem Wert der Verkaufssortimente steigt deren Produktlebensdauer.
4. Die Berechnungen umfassen die erste Verarbeitungsstufe mit der entsprechenden Produktionsausbeute und Reststoffverwendung. Für den ersten Verarbeitungsschritt werden allgemein übliche Kennzahlen für die Ausbeute verwendet sowie Verwertungszweige für die Reststoffe des Produktionsprozesses berücksichtigt.

Beispielsweise wird Nadelstammholz an das Sägewerk geliefert, wo es mit einem gewissen Anteil von Materialverlusten zu Schnittware verarbeitet und anschließend als solche weiterverkauft wird. Die Schnittware wird vom Käufer mehr oder weniger veredelt, wobei wiederum technologiebedingte Materialverluste auftreten. Dieser „zweite“ Materialverlust in der Produktionskette liegt jedoch erheblich unter dem der Primärverarbeitung und wurde in die folgenden Berechnungen nicht miteinbezogen.

5. Die Menge der Verluste im Be- und/oder Verarbeitungsprozess und die Verwendung des Restholzes sind sowohl von der Baumartengruppe als auch von dem Verkaufssortiment abhängig. Ein detaillierter Überblick über die Zuordnung der Verkaufsmengen zu den einzelnen Produktgruppen unter Einbeziehung der Baumartengruppe, der Verkaufsmengenverteilung und der produktionsbedingten Verschiebung innerhalb der Produktgruppen kann bei Herrn Profft, TLWJF, angefragt werden und wird als Teil der Publikation von Profft *et al.* (in prep.) im Internet abrufbar sein.
6. Vielfach beruhen die Angaben der befragten Unternehmen (Sägewerksbereich, Holz verarbeitender Bereich) zur Verwendung des Rohholzes und der Produktionsabfälle auf betriebseigenen, oftmals sehr groben Herleitungen und Annahmen (Schutz betriebsinterner Informationen). In Zweifelsfällen oder bei allzu ungenauen Angaben wurde eine Zuordnung in die kurzlebigeren Produktgruppen gewählt, so dass in Zukunft genauere Informationen wahrscheinlich zu einer Erhöhung der mittleren Produktlebensdauer führen werden.

Die Bezeichnung „Sägeindustrie“ schließt im vorliegenden Projekt die Profilerspaner-Technologie mit ein, da das Endprodukt dieser Technologie ebenfalls Schnittholz ist.

2.2.2.3 Berechnung der Kohlenstoff- und Kohlendioxidäquivalente

Die Umrechnung der verkauften Frischholzvolumina in Kohlenstoff- und Kohlendioxideinheiten erfolgte anhand folgender Abschätzungen:

- 1 Festmeter [fm] Holz wurde 1 Kubikmeter Holz [m³] gleichgesetzt.
- Das Holzvolumen der vier Baumartengruppen wurde anhand von Raumdichten (Tabelle 2.2) in Holzmasse umgerechnet.

Tabelle 2.2: Raumdichten der Baumartengruppen (Burschel *et al.* 1993).

BAG	Raumdichte des Holzes ($\text{kg}_{\text{trocken}} \text{m}_{\text{frisch}}^{-3}$)
Buche	554,3
Eiche	561,1
Fichte	377,1
Kiefer	430,7

- Die Menge des gebundenen Kohlenstoffs bzw. Kohlendioxids ergab sich über Multiplikation der Holzmasse mit der C-Konzentration von $0,504 \text{ kg}_C \text{ kg}_{\text{Holz}}^{-1}$ bzw. dem CO_2 -Äquivalent $1,851 \text{ kg}_{\text{CO}_2} \text{ kg}_{\text{Holz}}^{-1}$.

2.2.2.4 Herleitung der Sortimente des zukünftigen Holzeinschlages im Forstamt Hummelshain

Zukünftige Nutzungsmengen und deren Kohlenstoffbindung unter verschiedenen Bewirtschaftungsszenarien wurden auf Basis der jüngsten Forsteinrichtung (1999) des Forstamtes „Hummelshain“ berechnet. Für die Bewirtschaftungsszenarien wurden zwei Ansätze definiert:

7. Basierend auf den Planungsdaten der aktuellen Forsteinrichtung für die kommenden 10 Jahre wurden die anfallenden Holzsortimente bei flächendeckender Hochdurchforstung und bei flächendeckenden Niederdurchforstung miteinander verglichen. Dieser Ansatz spiegelt die aktuelle Situation in Altersklassenwäldern wider.
8. Ausgehend von der aktuellen Baumarten- und Altersklassenverteilung wurden die Nutzungsmengen berechnet, die bei erreichtem Zielvorrat anfallen würden. Diese modellhafte Betrachtung soll Tendenzen bei der zukünftigen Holznutzung in strukturreichen Wäldern aufzeigen.

Das Thüringer Forstamt Hummelshain war bereits Teil des „Forstamtsvergleiches“ in der 1. Projektphase des vorliegenden BMBF-Projektes (Wirth *et al.* 2003). Das Forstamt Hummelshain liegt im Osten des Freistaates Thüringen, im Wuchsgebiet Ostthüringisches Trias-Hügelland. Laut aktueller Forsteinrichtung (Stichtag 01.10.1999) beträgt die Landeswaldfläche 4 163 ha (Wirth *et al.* 2003). Der durchschnittliche Vorrat liegt bei 276 Vfm ha^{-1} , der Zuwachs bei durchschnittlich $9,7 \text{ Vfm ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ (Tabelle 2.3).

Tabelle 2.3: Flächenanteile, Vorrat und Zuwachs je Alterklasse im Landeswald des Thüringer Forstamtes Hummelshain (Forsteinrichtung 01.10.1999).

Altersklasse [Jahre]	Fläche		Vorrat [Vfm ha ⁻¹]	Zuwachs [Vfm ha ⁻¹]
	[ha]	[%]		
I (0-20)	552	13,3	13	1,5
II (21-40)	704	16,9	182	13,6
III (41-60)	1.168	28,0	316	13,5
IV (61-80)	621	14,9	379	10,6
V (81-100)	655	15,7	379	7,7
VI (101-120)	239	5,7	348	5,8
VII (121-140)	110	2,6	307	5
VIII (141-160)	76	1,8	315	4,8
IX (> 161)	38	0,9	324	4,6
Summe/Mittel	4.163	100,0	276,0	9,7

Die Baumarten- und Altersklassenverteilung (entsprechend der Hauptbaumart des Oberstandes) des Landeswaldes im Forstamt Hummelshain sind in den Abbildung 2.2 dargestellt.

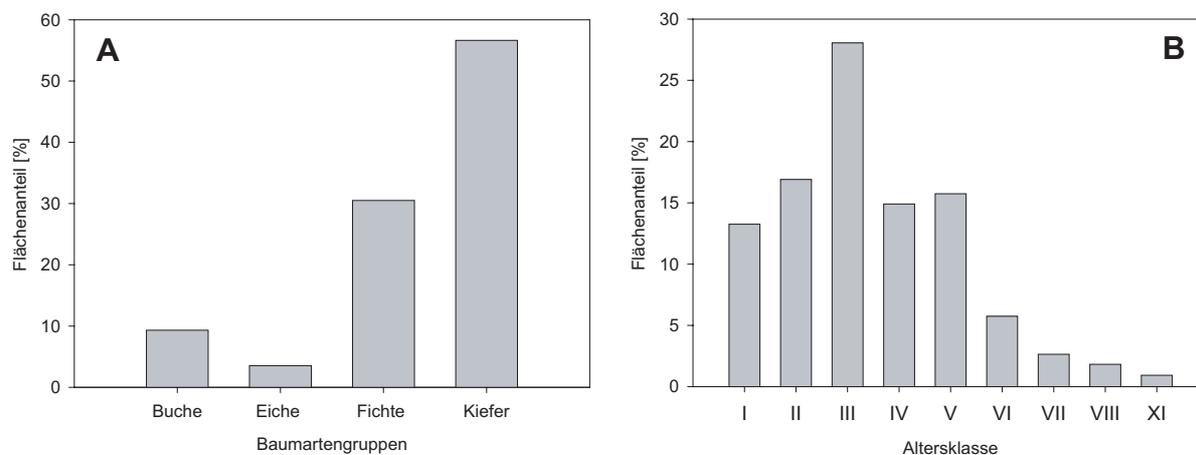


Abbildung 2.2: (A) Baumartenverteilung und (B) Altersklassenverteilung im Landeswald des Thüringer Forstamtes Hummelshain (Forsteinrichtung 01.10.1999).

Die Herleitung der zukünftigen Holzsortimente erfolgte auf Bestandesebene für jede Baumarten-Gruppe. Aufgrund der gegenwärtigen, stark von einschichtigen Beständen geprägten Waldstruktur des Forstamtes Hummelshain wurden der Bestandeszwischenstand und –unterstand nicht berücksichtigt. Eine Holznutzung aus unteren Bestandesschichten findet nur in seltenen Fällen mit dem Ziel der Holzgewinnung statt. Wenn Eingriffe in den unteren Bestandesschichten getätigt werden, so handelt es sich in der Regel um Pflegemaßnahmen. Das Holz verbleibt aufgrund der geringen Dimension in der Regel im Wald.

Tabelle 2.4 verdeutlicht die gegenwärtig geringe Bedeutung von unteren Baumschichten. Erst seit den 1990er Jahren wird im Rahmen der naturnahen Waldbewirtschaftung im Thüringer Landeswald ein mehrschichtiger Bestandaufbau durch das Belassen von Zwischen- und Unterstand angestrebt.

Tabelle 2.4: Vergleich von Vorrat und Zuwachs der Bestandesschichten im FoA Hummelshain.

BAG	Bestandesschicht	Vorrat [m ³]	Zuwachs [m ³ Jahr ⁻¹]
Buche	Oberstand	98.732	2.520,4
Buche	Zwischen- und Unterstand	720	76,1
Buche	Restvorrat/Überhälter	6.542	5,4
Eiche	Oberstand	28.182	806,6
Eiche	Zwischen- und Unterstand	1.336	90,4
Eiche	Restvorrat/Überhälter	1.573	0
Fichte	Oberstand	391.461	15.042,6
Fichte	Zwischen- und Unterstand	8.096	770,1
Fichte	Restvorrat/Überhälter	336	0
Kiefer	Oberstand	609.731	20.907,3
Kiefer	Zwischen- und Unterstand	400	62
Kiefer	Restvorrat/Überhälter	1.109	0

Da die Forsteinrichtungsdaten für jede Baumart eines Bestandes eine anteilige Oberstandsfläche sowie Nutzungsmengen ausweisen, konnten sämtliche Berechnungen für alle Baumarten des Oberstandes separat durchgeführt werden.

Die Szenarien zur Hoch- und Niederdurchforstung basierten auf den geplanten Nutzungsmengen der aktuellen Forsteinrichtung. Dies bedeutet, dass für die beiden Szenarien die gleiche Gesamtnutzungsmengen je Bestand und Planungsperiode (10 Jahre) angenommen wurden. Anhand der Ergebnisse der Dauerversuchsflächen, Stichprobeninventuren und der wiederholten Forsteinrichtung wird es in Zukunft möglich sein, die tendenziell höheren Nutzungsmengen bei der Hochdurchforstung zu berücksichtigen.

Die in der Forsteinrichtung geplante Nutzungsmenge für einen Bestand wurde mit Hilfe des Bestandesdurchmessers aus der Zustandserfassung (BHD_{Bestand}) und der Sortentafeln zunächst den Sortimenten zugeordnet. Für die Nutzung der Sortentafeln wurden die Baumarten den vier Baumartengruppen Buche, Eiche, Fichte und Kiefer zugeordnet. Für die Baumartengruppe Fichte kamen bis zur Durchmesserstufe 25 cm die Sortentafeln von Schöpfer und Stöhr (1991) zur Anwendung, für alle übrigen Durchmesserklassen und die drei Baumartengruppen Kiefer, Eiche und Buche wurden die Sortentafeln von Schöpfer und Dauber (1985) verwendet.

Aus dem Bestandesmittendurchmesser (BHD_{Bestand}) wurde der mittlere Durchmesser des ausscheidenden Bestandes ($BHD_{\text{ausscheidend}}$) abgeleitet. Für die Modellvariante Hochdurchforstung wurden die von der Abteilung Forstplanung der TLWJF erarbeiteten Zieldurchmesser für den ausscheidenden Bestand in Abhängigkeit von Bestandesdurchmesser und Baumartengruppen herangezogen (Profft *et al.* in prep.). Die Zieldurchmesser wurden auf der Basis von Weiser-

flächen in den Thüringer Forstämtern und unter Berücksichtigung von waldbaulichen und forstwirtschaftlichen Zielen der Thüringer Forstverwaltung erarbeitet.

Für die Modellvariante Niederdurchforstung wurden die BHD-Werte des ausscheidenden Bestandes den in Thüringen verwendeten Ertragstafeln entnommen (Fachhochschule für Forstwirtschaft, 1997). In den Ertragstafeln gilt, dass der $BHD_{\text{ausscheidend}}$ kleiner ist als der BHD_{Bestand} , womit die Niederdurchforstung als beabsichtigtes Durchforstungsregime zum Ausdruck kommt. Eine Ausnahme bildet die Baumartengruppe Eiche, für die in den verwendeten Tafelwerken kein $BHD_{\text{ausscheidend}}$ angegeben ist. In Eichenbeständen wurde daher der BHD_{Bestand} dem $BHD_{\text{ausscheidend}}$ gleichgesetzt, um den Charakter der starken Niederdurchforstung zu repräsentieren.

Die Aufschlüsselung der Sortentafel in die sechs Produktgruppen unterschiedlicher Lebensdauer orientierte sich an den gegenwärtigen Verhältnissen auf dem Holzabsatzmarkt in Thüringen, den aktuellen Verkaufstendenzen und den derzeitigen Einsatzbereichen für thüringisches Holz. Die Aufschlüsselung der Einzelmengen auf die Produktgruppen ist identisch mit der Aufschlüsselung der Verkaufstatistik für Thüringen und ist ausführlich in Profft *et al.* (in prep.) dargestellt. Im Gegensatz zur Verkaufstatistik weisen die Sortentafeln nur sechs der in Tabelle 2.1 genannten Sortimente aus (Industrieholz lang, Industrieholz kurz, Stammholz, Stammholzabschnitte), hinzu kommen aber das X- und das nvD-Holz.

2.2.2.5 Definition und Herleitung der Zielvorräte für das Forstamt Hummelshain

Um den gegenwärtigen und zukünftigen hohen Anforderungen an die Nutz-, Schutz- und Erholungsleistungen des Waldes gerecht werden zu können, ist ein Waldbild erforderlich, das die gesetzten Erfordernisse optimal erbringt. Dies bedeutet in erster Linie standortgerechte, gegenüber abiotischen und biotischen Faktoren stabile, zuwachsstarke Bestände mit einer ausgewogenen Baumartenmischung. Insbesondere die Stabilität und die Ausnutzung des Zuwachspotentials kann durch die Bestandesdichte beeinflusst und durch den Bestockungsgrad beschrieben werden. Der Bestockungsgrad ist in Anlehnung an die Ertragstafeln für einschichtige Bestände des Altersklassenwaldes mit wenigen Baumarten eine wichtige Orientierungsgröße. Durch das für Thüringen gültige waldbauliche Ziel, Mischbestände mit ausgewogener Baumarten- und Altersverteilung sowie vertikaler Strukturierung zu schaffen, verliert der Bestockungsgrad jedoch zunehmend an Bedeutung und Aussagekraft. An seine Stelle tritt der Zielvorrat eines Bestandes.

Der Zielvorrat ist laut Definition der IUFRO (1998) eine Größe der praktischen Forsteinrichtung, die den über längere Zeit anzustrebenden Holzvorrat nach Menge und Struktur für eine reale Betriebsklasse oder Nachhaltseinheit beschreibt. Da der Zielvorrat eine dynamische Größe ist, die stark von der natürlichen Baumartenausstattung, den Standortfaktoren und den forstwirtschaftlichen Zielen abhängt, wurde der Begriff praxisorientiert vom Thüringer Landesforst modifiziert. Nach dem Verständnis des Thüringer Landesforstes leitet sich der Zielvorrat aus den Standortverhältnissen, der gegenwärtigen Baumartenverteilung, einer angestrebten stabilen Bestandesstruktur und einer theoretisch angestrebten Bestandesdichte ab.

Eine „theoretisch angestrebte“ Bestandesdichte bedeutet, dass bei der Festlegung der Bestandesdichte eine Reihe von waldbaulichen, ertragskundlichen und forstlichen Annahmen einfließen, und dass die Bestandesdichten nicht als eine abgesicherte Vorhersage der zukünftigen Waldentwicklung interpretiert werden dürfen. Veränderungen der betrieblichen oder wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, wie beispielsweise ein zunehmender Einsatz von Holz im Sägewerksbereich durch Ausbau der Starkholzindustrie oder eine Ausweitung des Energieholzsektors, sind in den folgenden Berechnungen nicht berücksichtigt.

Die von der Abteilung Forstplanung der TLWJF erarbeiteten Zielvorräte liegen für die einzelnen Altersklassen und Bonitäten der vier Hauptbaumarten Buche, Eiche, Fichte und Kiefer vor (detaillierte Angaben zu den Zielvorräten können bei der TLWJF, Ingolf Profft, angefordert werden).

Für die Berechnungen unter Zielvorratsbedingungen wurden folgende Annahmen und Abschätzungen getroffen:

- Die Bestandeszuwächse entsprechen den Angaben der aktuellen Forsteinrichtung.
- Die Bestände haben den für sie ausgewiesenen Zielvorrat entsprechend der aktuellen Altersklasse, der Bonität und Baumartengruppe erreicht. Der erreichte Zielvorrat wird durch eine den Zuwächsen entsprechende Holznutzung erhalten.
- Die Nutzungsmenge unter Zielvorratsbedingungen berechnen sich aus:

$$\begin{array}{r}
 \text{Zielvorrat für die aktuelle Altersklasse} \\
 + \quad \text{Zuwachs für diese Altersklasse} \\
 - \quad \text{Zielvorrat für die folgende Altersklasse} \\
 \hline
 = \quad \text{Nutzungsmenge für die Periode}
 \end{array}$$

Bei dieser Kalkulation der Nutzungsmengen können sich rechnerisch „negative“ Nutzungsmengen ergeben. Dieser Effekt tritt bei jungen Altersklassenwäldern auf, da Zielvorräte und Ertragstafel-Zuwächse in der Regel erst ab der II. Altersklasse angegeben werden. Folgendes Beispiel erläutert die Problematik:

$$\begin{array}{r}
 0 \text{ Vfm (da nicht bestimmbar)} \\
 + \quad 0 \text{ Vfm/a*ha (da nicht bestimmbar)} \\
 - \quad \text{angenommen: 50 Vfm} \\
 \hline
 = \quad \quad \quad \text{- 50 Vfm}
 \end{array}$$

Für solche Bestände wurde die Nutzungsmenge auf 0 gesetzt, was in der forstlichen Praxis einem üblichen Vorratsaufbau junger Bestände entspricht.

- Der Brusthöhendurchmesser des ausscheidenden Bestandes wurde aus den Daten der Forsteinrichtung zum Zeitpunkt der Zustandserfassung (01.10.1999) berechnet. Dabei wurde von einer konsequenten Umsetzung der Hochdurchforstung in allen Beständen ausgegangen, d.h. das Verhältnis BHD_{Bestand} zu $BHD_{\text{ausscheidend}}$ war stets kleiner als 1.
- Die Verteilung der Nutzungsmengen auf die Verkaufssortimente erfolgte nach den Sortentafeln von Schöpfer und Stöhr (1991) für die Baumartengruppe Fichte bis zur Durchmesserstufe 25 cm und von Schöpfer und Dauber (1985) für die verbleibenden Baumartengruppen und größere Fichten-Durchmesserstufen.

Die Berechnung der Nutzungsmengen unter Zielvorratsbedingungen wurde für jeden Bestand in folgenden Teilschritten durchgeführt:

1. Ableitung des BHDausscheidend auf Grundlage des BHDBestand,
2. Zusammenfassung der in der Forsteinrichtung angegebenen Bonitäten in halbe Bonitätsstufen,
3. Berechnung des Zuwachses pro Hektar und Jahr für die kommenden 20 Jahre auf Basis der Forsteinrichtungsdaten,
4. Definition der Zielvorräte je Baumartengruppe und Bonität für die aktuelle und die folgende Altersklasse,
5. Berechnung des Nutzungspotentials für einen Zeitraum von 20 Jahren mit:
6. Zielvorrat aktuelle AKL + Zuwachs 20 Jahre – Zielvorrat folgende AKL

Anschließend wurden die jeweiligen Nutzungsmengen mit Hilfe der Sortentafeln auf die einzelnen Sortimente verteilt, den Produktgruppen zugeordnet und abschließend wurde aus der Holzmenge (Efm) die Menge an gebundenem Kohlenstoff berechnet. Die Nutzungsmengen und die Kohlenstoffbindung in den Holzprodukten wurde stets auf eine Fläche von einem Hektar und einen Zeitraum von einem Jahr normiert ($\text{tC ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$).

2.2.3 Ergebnisse

2.2.3.1 Holznutzung und Kohlenstoffbindung in Holzprodukten des Landeswaldes in Thüringen

2.2.3.1.1 Jährlicher Holzverkauf in Thüringen

Die Thüringer Landesforstverwaltung bewirtschaftet gegenwärtig eine Waldfläche von ca. 195.000 ha. Hauptbaumart ist mit 54 % die Fichte. Die prozentuale Flächenverteilung für die vier Baumartengruppen Buche, Eiche, Fichte und Kiefer ist in Abbildung 2.3 dargestellt. (Die Zuordnung der einzelnen Baumarten zu Baumartengruppen (BAG) ist in Proffitt *et al.* (in prep.) angegeben.)

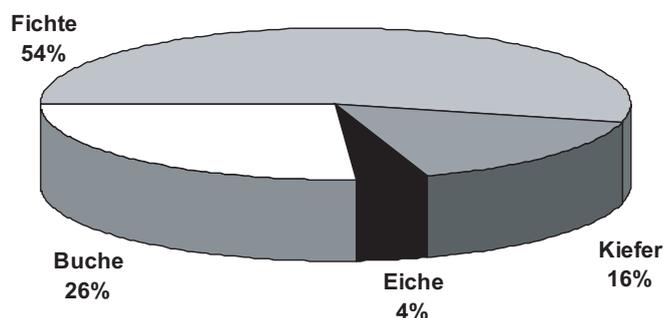


Abbildung 2.3: Flächenverteilung der Baumartengruppen im Thüringer Landeswald (TMLNU 2002).

Die jährlichen Holzverkaufsmengen im Landeswald bewegten sich in den vergangenen Jahren zwischen 620.107 Erntefestmeter (Efm) (1996) und 1.008.568 Efm (2002) (Tabelle 8.5, Abbildung 2.4). Geprägt durch die Baumartenverteilung in Thüringen hat die Baumartengruppe Fichte mit im Mittel 55 % den größten Anteil an der jährlichen Verkaufsmenge. Einen sehr geringen Anteil hat die Baumartengruppe Eiche mit nur 1-2 %.

Tabelle 2.5: Jährlicher Holzverkauf im Thüringer Landeswald nach Baumartengruppen (BAG). Die Daten für die Forsteinrichtungsjahre 01.10.1996-30.09.2000 wurden dem Jahresbericht 2002 der Thüringer Landesforstverwaltung entnommen (TLMNU 2002), die Daten für die Kalenderjahre 2001 und 2002 entstammen dem Abrechnungssystem ABIES-FIS der Thüringer Landesforstverwaltung.

BAG	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
	Efm Jahr ⁻¹ (Anteil in %)						
Buche	175.552 (28)	222.564 (31)	253.756 (35)	229.950 (32)	209.605 (31)	257.976 (30)	266.553 (27)
Eiche	8.809 (1)	8.728 (1)	10.991 (2)	13.609 (2)	15.399 (2)	22.374 (2)	20.998 (2)
Fichte	374.576 (61)	426.275 (58)	365.451 (51)	379.360 (53)	352.824 (53)	473.410 (55)	586.067 (58)
Kiefer	61.170 (10)	75.600 (10)	85.847 (12)	90.056 (13)	92.349 (14)	110.561 (13)	134.950 (13)
Gesamt	620.107 (100)	733.167 (100)	716.045 (100)	712.975 (100)	670.177 (100)	864.321 (100)	1.008.568 (100)

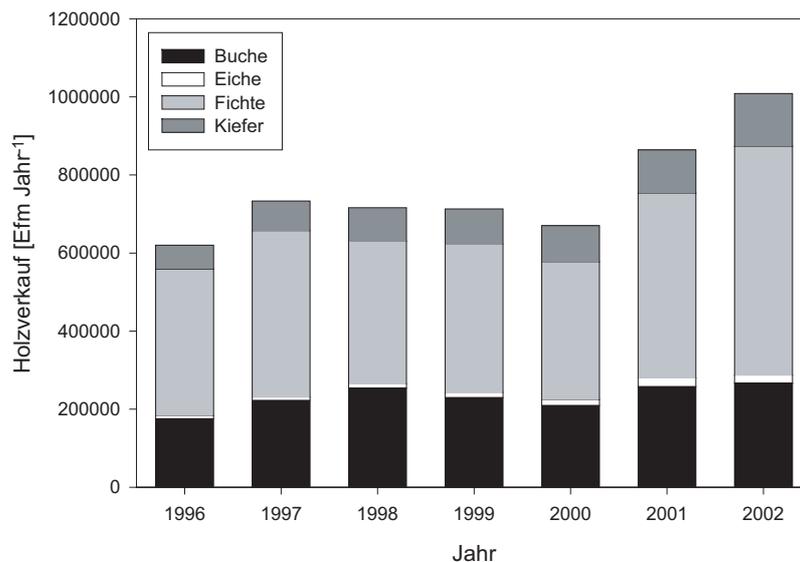


Abbildung 2.4: Jährlicher Holzverkauf im Thüringer Landeswald nach Baumartengruppen. Die Daten für die Forsteinrichtungsjahre 01.10.1996-30.09.2000 wurden dem Jahresbericht 2002 der Thüringer Landesforstverwaltung entnommen (TLMNU 2002), die Daten für die Kalenderjahre 2001 und 2002 entstammen dem Abrechnungssystem ABIES-FIS der Thüringer Landesforstverwaltung.

Bei den genannten Verkaufsmengen handelt es sich um Holz, welches in Eigenregie durch den Thüringer Landesforst eingeschlagen und verkauft wurde oder welches an Selbstwerber veräußert wurde.

2.2.3.1.2 Produktlebensdauer und Kohlenstoffbindung in Holzprodukten des Thüringer Landeswaldes

Entscheidendes Kriterium für eine Betrachtung der Bindungszeiten von Kohlenstoff in Holzprodukten ist die Produktlebensdauer eines entsprechenden Produktes. (Die mögliche Speicherung von Kohlenstoff in Holzabfällen, die auf Mülldeponien gebracht werden, wurde in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt, da dies durch die am 01.03.2003 in Kraft getretene Altholzverordnung nicht mehr zulässig ist). Nur für einen Teil der auf dem Markt erhältlichen Holzprodukte, liegen Daten zur Nutzungsdauer vor. Aufbauend auf den Ergebnissen der 1. Projektphase (Wirth *et al.* 2003) wurde die Vielzahl der Holzprodukte nach ihrer Lebensdauer in sechs Produktgruppen zusammengefasst (Tabelle 2.6). Die Produktgruppen beinhalten zum einen sämtliche Verkaufssortimente und zum anderen zusätzliche, nach der Art der Verwendung charakterisierte Sortimente, die sich nicht direkt aus den Verkaufssortimenten ableiten lassen. Tabelle 8.7 zeigt die sechs Produktgruppen, die zugeordneten Sortimente und die jeweils verwendete mittlere Lebensdauer (= mittlere Verweildauer = "t63", engl.: *mean residence time* (MRT)) der Holzprodukte in Jahren. Die mittlere Lebensdauer entspricht bei einem exponentiellen Abbau der Zeit, nach der 63 % der Ausgangsmenge an organischen Kohlenstoffverbindungen abgebaut wurden (t63). Es gilt:

Gleichung: 2.1:
$$\text{MRT} = - (\ln(0.37))/k \quad \text{mit } k = \text{Abbaurrate [Jahr}^{-1}\text{]}.$$

Zusätzlich wird eine Trennung in kurzlebige und langlebige Produkte ausgewiesen.

Tabelle 2.6: Überarbeitete Klassifikation der Holzprodukte nach ihrer „mean residence time“ (MRT = mittlere Lebensdauer) auf Grundlage der Klassifikation von Wirth *et al.* 2003. Die MRT entspricht bei einem exponentiellen Abbau der Zeit, nach der 63% der Ausgangsmenge an organischen Kohlenstoffverbindungen abgebaut wurden (t_{63}). Es gilt: $MRT = -(\ln(0.37))/k$ mit $k = \text{Abbaurrate [Jahr}^{-1}]$. X-Holz: eingeschlagenes Derbhholz, das nicht regulär verkauft wird, nvD-Holz: nicht verlohntes eingeschlagenes Derbhholz.

Kategorie	Verwendung	MRT [Jahre]	Gruppierung
Produktgruppe 1	Brennholz, X-Holz und nvD-Holz	1	
Produktgruppe 2	Zell- und Holzstofferzeugnisse, Pfähle, Stangen, Verpackungsmaterial, Bauhilfsstoffe	3	kurzlebige Produkte
Produktgruppe 3	Paletten, Masten, Rammfähle	11	
Produktgruppe 4	Möbel, Holzwerkstofferzeugnisse (Spanplatte, Faserplatte u.ä.)	25	
Produktgruppe 5	Parkett	43	langlebige Produkte
Produktgruppe 6	Bauholz	51	

Die Umrechnung der verkauften Frischholzvolumina in Kohlenstoffeinheiten (Kapitel 2.2.2.3) ergab eine mittlere Bindung von 206.730 tC bzw. 758.700 tCO₂ im genutzten Holz des Thüringer Landeswaldes (Tabelle 2.7). Die Baumartengruppe Fichte hatte aufgrund der hohen Nutzungsmengen erwartungsgemäß den höchsten Anteil (49 %) an der jährlichen Kohlenstoffbindung in verkauften Holzprodukten, gefolgt von der Baumartengruppe Buche (35 %). Beim Vergleich von verkauftem Holzvolumen und gebundenem Kohlenstoff (Tabelle 2.8) fallen Verschiebungen zugunsten der Laubhölzer auf, die auf die höhere Holzdicke der Laubhölzer im Vergleich zu den Nadelhölzern zurückzuführen sind (Tabelle 2.2).

Tabelle 2.7: Bindung von Kohlenstoff- und Kohlendioxidäquivalenten im verkauften Holz der vier Baumartengruppen (BAG) im Mittel der Jahre 2001 und 2002.

BAG	C [t Jahr ⁻¹]	CO ₂ [t Jahr ⁻¹]	Anteile [%]
Buche	73.268,1	268.894,1	35
Eiche	6.132,6	22.506,8	3
Fichte	100.681,3	369.500,2	49
Kiefer	26.646,9	97.794,2	13
Gesamt	206.729,0	758.695,3	100

Tabelle 2.8: Anteile der Baumartengruppen (BAG) am jährlich verkauften Holzvolumen und an der jährlichen C-Bindungsmenge.

BAG	Anteile am verkauften Holzvolumen [%]	Anteile an der C-Bindungsmenge [%]
Buche	28,0	35,4
Eiche	2,3	3,0
Fichte	56,6	48,7
Kiefer	13,1	12,9
Gesamt	100	100

Vergleicht man die jährliche Kohlenstoffbindung in Holzprodukten mit den jährlichen, fossilen CO₂-Emissionen Thüringens (inkl. Stromimporte) in Höhe von 24,7 Mio. Tonnen (~ 6,7 Mio. t C, TMLNU 2000), so ergibt sich eine jährliche CO₂-Bindung in verkauftem Holz von rund 3 % der jährlichen fossilen CO₂-Emissionen. Wenn der gesamte Vorrat an Holzprodukten konstant bleibt, d.h. wenn die mittlere jährliche Produktion gleich der mittleren jährlichen Verbrennung und Zersetzung von Holzprodukten ist, darf die genannte jährliche C-Bindung in Holzprodukten jedoch nicht als C-Senke (gemäß dem Kyoto-Protokoll) interpretiert werden. Erst wenn die Holzproduktion die Verbrennung und Zersetzung von Holzprodukten übersteigt, der Produktpool also größer und die Lebensdauer länger wird, entsteht eine C-Senke im Produktsektor (bzw. eine C-Quelle, wenn die Holzproduktion geringer ist als die Verbrennung und Zersetzung). Für den Fall, dass die Menge an jährlich verbrannten und zersetzten Holzprodukten seit 1996 konstant geblieben ist, könnte die Zunahme an verkauftem Holz zwischen 1996 und 2002 (Tabelle 2.1) zu einer Zunahme des Produktsektors und damit zu einer C-Senke von rund 85.072 t C geführt haben (Differenz zwischen C-Bindung von rund 136.013 t C im Jahr 1996 und von 221.085 t C im Jahr 2002). Dies entspräche einer C-Senke von 14.179 t C Jahr⁻¹ oder etwa 0,2 % der jährlichen fossilen CO₂-Emissionen Thüringens. Dieses Szenario ist allerdings unrealistisch, da wahrscheinlich mit dem zunehmenden Verkauf von Holz auch eine zunehmende Entsorgung von Holz verbunden ist. Daten zum Verbrauch bzw. zur Entsorgung von Holzprodukten liegen nicht vor.

Etwa 53 % des jährlich aus dem Thüringer Landeswald verkauften Holzes wurden zu Holzprodukten mit einer mittleren Lebensdauer von mindestens 25 Jahren (Produktgruppen 4 bis 6) verarbeitet (Tabelle 2.9). Dieses Ergebnis wurde in erster Linie durch den hohen Anteil von Bauholz im Nadelholzbereich und von Möbelprodukten, Parkett und Produkten der Holzwerkstoffindustrie bei Laub- und Nadelholz bestimmt. Ausgehend von den Verkaufssortimenten ist im Nadelholzbereich der Anteil, der in die Sägeindustrie abfließt, mit ca. 60 % bei der Baumartengruppe Kiefer und knapp 80 % bei der Baumartengruppe Fichte höher als im Laubholzbereich. Die geringere Ausbeute und der höhere Anteil der in der Zell- und Holzstoffindustrie verwendeten Reststoffe führten jedoch zu einer Verschiebung, die insbesondere bei der Baumartengruppe Fichte erkennbar ist (Tabelle 2.9). Der relativ hohe Anteil kurzlebiger Produkte bei der Baumartengruppe Fichte ist auf den Verkauf frischen Holzes des Verkaufssortiments "Industrieholz kurz (IS)" an die Zell- und Holzstoffindustrie zurückzuführen. Bei den langlebigen Produkten der Buche zeigt sich insbesondere der Einfluss der Holzwerkstoffindustrie (Teil der Produktgruppe 4), die sowohl Buchenfrischholz (IL) als auch Abfälle der Sägeindustrie kauft.

Der hohe Anteil langlebiger Produkte bei der Baumartengruppe Eiche lässt sich folgendermaßen begründen:

- ein hoher Anteil der Baumartengruppe wird als Parkettholz verkauft, ein Sortiment, das bei guter Qualität bereits ab Stärkeklasse 2 möglich ist und für das eine entsprechende Nachfrage besteht,

- o die Eiche kann aufgrund ihrer Inhaltsstoffe nicht in der Holz- und Zellstoffindustrie eingesetzt werden, weshalb Reststoffe der Erstverarbeiter zu höheren Anteilen in die Holzwerkstoffindustrie gehen und nur sehr geringe Anteile in kurzlebige Produkte (einschließlich Verbrennung) fließen.

Tabelle 2.9: Mittlere jährliche Kohlenstoffbindung in Holzprodukte der Kalenderjahre 2001 und 2002 für den Thüringer Landeswald aufgeschlüsselt nach Baumartengruppe (BAG) und Produktgruppe (PG). In Klammern: mittlere Lebensdauer.

BAG	Gesamt Produkte	PG1	PG2	PG3	PG4	PG5	PG6
		(1 Jahr)	(3 Jahre)	(11 Jahre)	(25 Jahre)	(43 Jahre)	(51 Jahre)
		kurzlebige Produkte			langlebige Produkte		
t C Jahr ⁻¹ (Anteile der PG [%])							
Buche	73.268 (100)	8.464 (12)	12.310 (17)	739 (1)	50.425 (69)	1.331 (2)	0 (0)
Eiche	6.133 (100)	1.456 (24)	51 (1)	265 (4)	4.036 (66)	325 (5)	0 (0)
Fichte	100.681 (100)	8.208 (8)	53.382 (53)	43 (<1)	1.461 (1)	0 (0)	37.589 (37)
Kiefer	26.647 (100)	2.105 (8)	8.286 (31)	1 (<1)	7.755 (29)	0 (0)	8.501 (32)
Gesamt	206.729 (100)	20.232 (10)	74.028 (36)	1.047 (1)	63.676 (31)	1.656 (1)	46.090 (22)
	206.729 (100)	95.307 (46)			111.422 (54)		

Insgesamt ist zu berücksichtigen, dass sowohl im Laub- als auch Nadelholzbereich erhebliche Mengen als Industrieholzsortimente verkauft wurden. Bei Nadelholz war dies insbesondere "Industrieholz kurz (IS)" mit ca. 20 % der Gesamtmenge und beim Laubholz vor allem "Industrieholz lang (IL)" mit 55 %. Der Einsatzbereich dieser Sortimente liegt in der Holz- und Zellstoffindustrie (PG 2) sowie der Holzwerkstoffindustrie (PG 4).

Die jeweiligen Anteile dieser Sortimente, einschließlich möglicher Restholzverwertungen aus anderen Bereichen der Holzver- und -bearbeitung, beruhen zum Teil auf direkten Anfragen bei holzverarbeitenden Unternehmen (Kapitel 2.2.2.2) und sind möglicherweise mit großen Unsicherheiten behaftet.

Um die Bedeutung der Holznutzung im Kohlenstoffhaushalt der Wälder Thüringens einschätzen zu können, ist auch die Rolle von Totholz als C-Speicher im Ökosystem (nach Wirth *et al.* 2003) sowie der Einfluss der Holznutzung auf die Boden-C-Vorräte im Ökosystem (Mund 2004, Mund und Schulze 2005) zu berücksichtigen. Eine vollständige Bilanz all dieser Größen des Kohlenstoffhaushaltes ist derzeit noch nicht möglich. Die Gegenüberstellung der ersten Abschätzungen zur mittleren Lebensdauer der Holzprodukte im Vergleich zum Totholz (Tabelle 2.10) lässt jedoch vermuten, dass die C-Speicherung im Ökosystem etwas höher ausfallen könnte als die C-

Speicherung in Holzprodukten, wenn nicht der Substitutionseffekt von Holzprodukten im Vergleich zu energieintensiveren Produkten berücksichtigt wird. Die etwas höhere mittlere Lebensdauer von Laubholzprodukten im Vergleich zur mittleren Lebensdauer von Totholz im Laubwald deutet jedoch an, dass durch eine Überführung von Fichtenmonokulturen in artenreiche Laubmischwälder die Rolle an Holzprodukten im Vergleich zum Totholz zunehmen könnte.

Beim Vergleich der dargestellten Abschätzungen zur mittleren Lebensdauer (*mean residence time*, t_{63}) mit Literaturwerten, muss die genaue Definition des Begriffs „mittlere Lebensdauer“ berücksichtigt werden. Häufig wird unter dem Begriff der mittleren Lebensdauer auch der Mittelwert verschiedener Abschätzungen zur gesamten Lebensdauer (t_{95}) angegeben. Da für den Totholzabbau zumeist ein exponentieller Abbau angenommen wird, ist die gesamte Lebensdauer, d. h. die Zeit, nach der 95 % der Ausgangsmenge an organischen Kohlenstoffverbindungen abgebaut wurden, mehr als doppelt so lang wie die mittlere Lebensdauer (t_{63}). So entspricht beispielsweise die mittlere Lebensdauer (t_{63}) von Totholz im Laubwald mit 14 Jahren einer mittleren, Gesamt-Lebensdauer (t_{95}) (auch Verweildauer genannt) von rund 41 Jahren (Tabelle 2.10). Um hier Verwirrungen zu vermeiden, wird im folgenden der eindeutigere englische Begriff der „*mean residence time*“ (MRT) genutzt.

Tabelle 2.10: Erste Abschätzungen zur „*mean residence time*“ (MRT = mittleren Lebensdauer, t_{63}) und, in Klammern zur Gesamt-Lebensdauer (t_{95}), der aus dem thüringischen Staatswald stammenden Holzprodukte und des Totholzes im Ökosystem. Die mittlere bzw. die Gesamt-Lebensdauer von Totholz wurde über eine Literaturrecherche abgeschätzt, Wirth *et al.* (2003). Die *mean residence time* (mittlere Lebensdauer) entspricht bei einem exponentiellen Abbau der Zeit, nach der 63 % der Ausgangsmenge an organischen Kohlenstoffverbindungen abgebaut wurden (t_{63}). Die Gesamt-Lebensdauer entspricht bei einem exponentiellen Abbau der Zeit, nach der 95 % der Ausgangsmenge an organischen Kohlenstoffverbindungen abgebaut wurden (t_{95}). * Gewichtet mit der Fläche von Laub- und Nadelwald in Thüringen.

Baumartengruppe	MRT (in Klammern: Gesamt-Lebensdauer) [Jahre]	
	Holzprodukte	Totholz im Ökosystem (Wirth <i>et al.</i> 2003)
Buche	19 (57)	Laubhölzer
Eiche	20 (59)	14 (41)
Fichte	21 (64)	Nadelhölzer
Kiefer	25 (74)	34 (103)
Mittel Thüringen*	21 (63)	28 (84)

2.2.3.2 Einfluss der Hoch- und Niederdurchforstung auf die Kohlenstoffbindung in Holzprodukten des Musterforstamtes Hummelshain

Im Laufe der Jahrzehnte und Jahrhunderte nachhaltig betriebener Forstwirtschaft wurden verschiedene Durchforstungsstrategien zur Pflege der Waldbestände entwickelt, die den jeweiligen, an sie gestellten Zielen gerecht werden sollten. Trotz der Vielzahl der Pflegevarianten lassen sich ausgehend von der Kraft'schen Klassifizierung der Bäume im Bestand (Baumklassen) zwei Grundstrategien ableiten (Mayer 1992, Röhrig und Gussone 1990):

- A) Hochdurchforstung: Entnahme von Bäumen der Baumklassen 1 und 2, d.h. von vorherrschenden und herrschenden Bäumen mit gut ausgebildeten Kronen, die den Hauptbestand bilden. Ziele eines Hochdurchforstungseingriffes sind: (1) Schaffung und Erhaltung gestufter Bestände durch die Schonung des Nebenbestandes (beherrschte Baumschichten im Unter- und Zwischenstand), und (2) die gezielte Förderung von Einzelbäumen mit guter Kronen- und Stammqualität (so genannte Haubarkeitsbäume, oder im Zusammenhang mit der Z-Baum-Auslese als Sonderform der Hochdurchforstung auch als Zukunftsbäume bezeichnet).
- B) Niederdurchforstung: Entnahme von Bäumen der Kraft'schen Baumklassen 4 und 5, d.h. von beherrschten und unterständigen Bäumen, die geprägt sind von verkümmerten, unterdrückten, bedrängten oder abgestorbenen Baumkronen, und die nicht mehr zum Hauptbestand gezählt werden. Die Niederdurchforstung zielt auf die Etablierung eines möglichst gleichförmigen Bestandesaufbaus ohne Nebenbestand ab.

Beide Varianten führen zu unterschiedlichen Waldbildern, charakterisiert durch unterschiedliche Bestandesstruktur, Stabilität, Einzelbaum- und Bestandesdimensionen, und zu unterschiedlichen Holznutzungsmengen und Erntedimensionen.

Für das FoA Hummelshain wurde zum Stichtag 01.10.1999 eine Nutzungsmenge von insgesamt 214.956 Efm in den nächsten 10 Jahren geplant (Tabelle 2.11). Die Baumartengruppe Kiefer hatte mit über 53 % den größten Anteil an der geplanten Nutzungsmenge, gefolgt von der Baumartengruppe Fichte mit 37 %. Die Nutzungsanteile entsprechen in etwa den Flächenanteilen der Baumartengruppen im FoA Hummelshain (Abbildung 2.3). Die im Vergleich zur Zuwachsschätzung um 3 fm geringere Nutzung im FoA Hummelshain lässt sich wahrscheinlich durch folgende zwei Eigenarten des Forstamtes erklären: (1) Im Jahr 1999 orientierte sich die Forsteinrichtung noch an einer eher zurückhaltenden, traditionellen Nutzungsplanung. (2) Das FoA Hummelshain ist ein Aufbaubetrieb mit einem hohen Flächenanteil junger und zuwachsstarker aber auch sehr dichter Bestände, die einen deutlichen Pflegerückstand aufweisen. Ein rascher Abbau der hohen Vorräte in den zuwachsstarken Jungbeständen ist aber wegen der Bruch- und Wurfgefahr nicht möglich. Langfristig wird im FoA Hummelshain eine stetige Erhöhung der Nutzung zu erwarten sein.

Tabelle 2.11: Geplante Nutzungsmenge je Baumartengruppe (BAG) im FoA Hummelhain für den Planungszeitraum 1999 bis 2009. (Forsteinrichtung FoA Humelshain 01.10.1999)

BAG	Fläche [ha]	geplante Nutzungsmenge [Efm FoA ⁻¹ 10 Jahre ⁻¹]	geplante Nutzungsmenge [Efm ha ⁻¹ Jahr ⁻¹]	Anteile [%]
Buche	364,19	17.398	4,8	8
Eiche	81,29	4.087	5,0	2
Fichte	1207,88	80.293	6,6	37
Kiefer	2375,92	113.178	4,8	53
ohne Nutzung	133,75	-	-	-
Summe/Mittel	4163,0	214.956	5,2	100

Reduziert um die Nutzung aus Unterstand und Zwischenstand, die in der Regel einen pflegenden Charakter für den Oberstand hat und nicht einer gezielten Holznutzung dient, ergaben sich die in Tabelle 2.12 dargestellten Nutzungsmengen.

Tabelle 2.12: Geplante Nutzungsmenge je Baumartengruppe (BAG) im FoA Hummelhain für den Planungszeitraum 1999 bis 2009 aus dem Oberstand. (Forsteinrichtung FoA Humelshain 01.10.1999)

BAG	geplante Nutzungsmenge [Efm FoA ⁻¹ 10 Jahre ⁻¹]	Anteile [%]
Buche	17.063	8
Eiche	3.852	2
Fichte	79.616	37
Kiefer	113.020	53
Summe/Mittel	213.551	100

Bei der Variante Hochdurchforstung entfiel ein höherer Anteil der Nutzungsmenge auf die Sortimente L, LAS, IS und IL als bei der Variante Niederdurchforstung (Tabelle 2.13). Der Grund hierfür ist, dass in den Sortentafeln erst ab einem $BHD_{\text{ausscheidend}}$ von 12 cm (bei Fichte 11 cm) die Sortimente ausgewiesen sind. Bei der Variante Niederdurchforstung war daher eine Sortimentszuordnung in Beständen mit einem geringen $BHD_{\text{ausscheidend}}$ nicht möglich. Bei der Hochdurchforstung hingegen fällt bereits in jungen Beständen Holz an, das einen mittleren $BHD_{\text{ausscheidend}}$ von über 12 cm (bzw. > 11 cm) aufweist und somit Sortimenten zugeordnet werden kann. Dieses zunächst methodische Problem weist auf einen wichtigen Aspekt der Holznutzung und ihre Bedeutung für die Kohlenstoffbindung hin. Solange das geerntete Holz mit einem $BHD_{\text{ausscheidend}}$ unterhalb der durch die Holzabnehmer vorgegebenen Minstdurchmesser liegt, ist das Holz praktisch nicht absetzbar und kann demzufolge nicht zu einer Erhöhung der C-Bindung in Holzprodukten beitragen. Nur eine Vermarktung als Brennholz wäre möglich, beispielsweise an Selbstwerber.

Da bei der Niederdurchforstung der $BHD_{\text{ausscheidend}}$ unterhalb des BHD_{Bestand} liegt, ist erst bei einem vergleichsweise hohen mittleren BHD des Bestandes – in der Regel zwischen 14 und 15 cm – eine Vermarktung des Holzes möglich. Im Gegensatz dazu kann bei der Hochdurchforstung viel zeitiger mit einem nutzbarem Holzanfall gerechnet werden.

Tabelle 2.13: Verteilung der geplanten Holznutzung der nächsten 10 Jahre auf die Holzsortimente. *: Die Spalte „oh. Nutz.“ (= ohne Nutzung) weist den Anteil der Gesamtnutzungsmenge auf, der aufgrund der zu geringen $BHD_{\text{ausscheidend}}$ -Dimensionen nicht den Sortimenten zugeordnet werden kann. Abkürzungen der Holzsortimente siehe Tabelle 2.1. ** Über die Menge an Holzprodukten pro Baumartengruppe gewichtet.

A) Hochdurchforstung

BAG	oh. Nutz.*	nvD-Holz	X-Holz	IS	IL	L und LAS	Summe
	[Efm ha ⁻¹ Jahr ⁻¹]						
Buche	0,05	0,28	0,04	0,50	1,52	2,00	4,39
Eiche	0,03	0,19	0,25	0,27	0,42	0,53	1,69
Fichte	0,13	0,17	0,24	0,23	0,00	5,49	6,27
Kiefer	0,18	0,27	0,05	0,34	1,37	2,59	4,79
Mittel**	0,15	0,24	0,11	0,32	0,93	4,03	5,10
Anteile [%]	2,9	4,6	2,2	6,3	18,3	65,6	100,0

B) Niederdurchforstung

BAG	oh. Nutz.*	nvD-Holz	X-Holz	IS	IL	L und LAS	Summe
	[Efm ha ⁻¹ Jahr ⁻¹]						
Buche	0,27	0,29	0,06	0,73	1,82	1,22	4,39
Eiche	0,03	0,13	0,67	0,19	0,28	0,39	1,69
Fichte	0,29	0,32	0,28	0,95	0,00	4,44	6,29
Kiefer	0,76	0,29	0,07	0,97	1,77	0,94	4,80
Mittel**	0,55	0,29	0,15	0,91	1,18	2,44	5,10
Anteile [%]	10,7	5,7	3,0	17,9	23,2	39,5	100,0

Nahezu die 4fache Menge konnte bei der Modellvariante Niederdurchforstung im Vergleich zur Variante Hochdurchforstung nicht abgesetzt werden. Hochwertige Sortimente, wie beispielsweise Stammholz (L) und Stammholzabschnitte (LAS), fallen mit über 65 % der Gesamtmenge in deutlich höheren Mengen bei der Hochdurchforstung an als bei der Niederdurchforstung (rund 40 %). Im Gegensatz dazu fallen bei der Niederdurchforstung höhere Industrieholzmengen (IS und IL), also eher geringwertige Sortimente, an.

Verteilt man die Mengen der Sortimente auf die Produktgruppen (siehe Profft *et al.* in prep.) und ordnet die schwachen Stämme, für die keine Sortierung vorliegt, der Produktgruppe 1 (Brennholz, X- und nvD-Holz) zu, so ergeben sich die in Tabelle 2.14 dargestellte Nutzungsmengen pro Produktgruppe. Bei der Variante Hochdurchforstung werden rund 54 %

der geplanten Nutzung zu langlebigen Produkten verarbeitet werden können, bei der Variante Niederdurchforstung jedoch nur 46 %.

Tabelle 2.14: Verteilung der geplanten Holznutzung der nächsten 10 Jahre auf die Produktgruppen 1 bis 6.

*: Die Spalte „oh. Nutz.“ (ohne Nutzung) weist den Anteil der Gesamtnutzungsmenge auf, der aufgrund der zu geringen BHD_{auscheidend}-Dimensionen nicht den Sortimenten zugeordnet werden kann. PG: Produktgruppe, k. A.: keine Angaben; Das Verkaufssortiment PG 5 (Parkett) wird nicht in den Sortimenttafeln geführt und ist praktisch auf die PG 4 (fertiges Parkett) und PG 2 (Produktionsabfälle) verteilt. Der Schlüssel für die Zuordnung zu den Produktgruppen findet sich in Profft *et al.* (in prep.). ** Über die Menge an Holzprodukten pro Baumartengruppe gewichtet.

A) Hochdurchforstung

BAG	oh. Nutz.*	PG1 (1 Jahr)	PG2 (3 Jahre)	PG3 (11 Jahre)	PG4 (25 Jahre)	PG5 (43 Jahre)	PG6 (51 Jahre)	Summe
	Kurzlebige Produkte				Langlebige Produkte			
[Efm ha ⁻¹ Jahr ⁻¹]								
Buche	0,05	0,90	0,64	0,07	2,73	k. A.	0,00	4,39
Eiche	0,03	0,74	0,00	0,11	0,82	k. A.	0,00	1,69
Fichte	0,13	0,91	2,66	0,00	0,01	k. A.	2,55	6,27
Kiefer	0,18	0,61	1,04	0,00	1,44	k. A.	1,52	4,79
Mittel**	0,15	0,73	1,46	0,01	1,10	k. A.	1,64	5,10
Anteile [%]	3,0	14,4	28,6	0,2	21,7	k. A.	32,2	100
Anteile [%]		46			54			100

B) Niederdurchforstung

BAG	oh. Nutz.*	PG1 (1 Jahr)	PG2 (3 Jahre)	PG3 (11 Jahre)	PG4 (25 Jahre)	PG5 (43 Jahre)	PG6 (51 Jahre)	Summe
	Kurzlebige Produkte				Langlebige Produkte			
[Efm ha ⁻¹ Jahr ⁻¹]								
Buche	0,27	1,13	0,57	0,04	2,38	k. A.	0,00	4,39
Eiche	0,03	1,01	0,00	0,08	0,58	k. A.	0,00	1,69
Fichte	0,29	0,99	2,88	0,00	0,05	k. A.	2,07	6,29
Kiefer	0,76	0,52	0,97	0,00	1,70	k. A.	0,85	4,79
Mittel**	0,55	0,74	1,48	0,01	1,22	k. A.	1,11	5,10
Anteile [%]	10,7	14,5	29,0	0,1	23,9	k. A.	21,8	100
Anteile [%]		54			46			100

Die Umrechnung der Holznutzungsmengen in Kohlenstoffeinheiten ergibt das in Tabelle 2.15 dargestellte mittlere Kohlenstoffbindungspotential in Holzprodukten des FoA Hummelshain für die nächsten 10 Jahre.

Tabelle 2.15: Kohlenstoffbindung in der durch die Forsteinrichtung geplanten Nutzungsmenge für das FoA Hummelshain im Falle einer Niederdurchforstung und im Falle einer Hochdurchforstung. Die Produkte wurden in kurzlebige Produkte (Produktgruppen 1 bis 3) und langlebige Produkte (Produktgruppen 4 bis 6) zusammengefasst. Nutzungen, die aufgrund geringer Dimensionen keinem Sortiment angehören, wurden zu den kurzlebigen Produkten gestellt. * Über die Menge an Holzprodukten pro Baumarten- bzw. Produktgruppe gewichtet.

BAG	Hochdurchforstung			Niederdurchforstung		
	Kurzlebige Produkte PG 1 – 3	Langlebige Produkte PG 4 – 6	Gesamt	Kurzlebige Produkte PG 1 – 3	Langlebige Produkte PG 4 – 6	Gesamt
[t C ha ⁻¹ Jahr ⁻¹]						
Buche	0,46	0,76	1,23	0,56	0,66	1,23
Eiche	0,25	0,23	0,48	0,31	0,16	0,48
Fichte	0,70	0,49	1,19	0,79	0,40	1,19
Kiefer	0,40	0,64	1,04	0,49	0,55	1,04
Mittel *	0,49	0,59	1,08	0,58	0,50	1,08
[t C FoA ⁻¹ Jahr ⁻¹]						
Summe	2063,4	2488,1	4551,50	2439,6	2117,18	4556,61
[%]						
Anteile	45.3	54.7	100	53.6	46.4	100
[Jahre]						
MRT *	2.4	40.6	23.0	2.3	37.5	18.4

Insgesamt werden aus der Gesamtnutzungsmenge für die Planungsperiode 1999-2009 bei Umsetzung der Hochdurchforstung durchschnittlich 0,49 t C ha⁻¹ Jahr⁻¹ (2.040 t C FoA⁻¹ Jahr⁻¹) in kurzlebigen und 0,59 t C ha⁻¹ Jahr⁻¹ (2.456 t C FoA⁻¹ Jahr⁻¹) in langlebigen Produkten gebunden. Bei der Niederdurchforstung werden durchschnittlich 0,58 t C ha⁻¹ Jahr⁻¹ (2.415 t C FoA⁻¹ Jahr⁻¹) in kurzlebigen und 0,50 t C ha⁻¹ Jahr⁻¹ (2.082 t C FoA⁻¹ Jahr⁻¹) in langlebigen Produkten festgelegt werden. Äquivalent zu den Angaben zum Holzvolumen (Tabelle 2.13) wird bei der Hochdurchforstung die Kohlenstoffbindung in langlebigen Produkten um rund 17 % höher sein als bei der Niederdurchforstung. Der hohe Anteil langlebiger Produkte bei der Hochdurchforstung spiegelt sich auch in der mittleren Lebensdauer der Holzprodukte wider. Die mittlere Lebensdauer der Holzprodukte wird bei der Variante Hochdurchforstung mit 23 Jahren um rund 5 Jahre länger sein als bei der Variante Niederdurchforstung (Tabelle 2.15). Die für den gesamten Thüringer Landeswald berechnete mittlere Lebensdauer der Holzprodukte der Jahre 2001 und 2002 liegt mit 21 Jahren (Tabelle 8.10) zwischen den Abschätzungen der zwei Durchforstungsvarianten für das FoA Hummelshain (Tabelle 2.15).

Aus den bisherigen Ergebnissen kann der Schluss gezogen werden, dass eine konsequente Umsetzung der Hochdurchforstung nicht nur die Einzelbaumstabilität und den Zuwachs gezielt ausgewählter Einzelbäume erhöht, sondern gleichzeitig durch eine Erhöhung der Dimensionen der ausscheidenden Bäume einen entscheidenden Einfluss auf die Sortimente der Holznutzung

haben kann. Dies wirkt sich durch höhere Anteile bei den werthöheren, langlebigeren Produkten, wie beispielsweise Sägeholz, aus. Demzufolge kann in der gegenwärtigen Ausrichtung der Waldbaustrategien hin zur Hochdurchforstung ein Beitrag zur zusätzlichen C-Bindung gesehen werden.

2.2.3.3 Kohlenstoffbindung in Holzprodukten unter Zielvorratsbedingungen im Musterforstamt Hummelshain

Als letzter Teil der Modellberechnungen wird nun die Kohlenstoffbindung in zukünftigen Holzprodukten für den Fall quantifiziert, dass über eine konsequente Hochdurchforstung eine an Zielvorräten (Definition und Herleitung siehe Kapitel 2.2.2.5) orientierte Bewirtschaftung realisiert wird. Die Berechnungen beinhalten kein Überführungsszenario hin zu einem Bestandesvolumen auf Zielvorratsniveau, d.h. in der vorliegenden Kalkulation wird von einem bereits erreichten Zielvorratsniveau ausgegangen, das entsprechend der AKL-Entwicklung erhalten werden soll. Ein Überführungsszenario würde aufgrund der im Vergleich zu den angestrebten Zielvorräten sehr hohen aktuellen Bestandesvorräte sehr hohe Nutzungsmengen ergeben, die in der Realität nicht innerhalb des hier betrachteten Zeitraumes von 10 Jahren abgebaut werden können.

Die gesamte Nutzungsmenge der 10-jährigen Planungsperiode unter Zielvorratsbedingungen würde sich für das FoA Hummelshain bei gegenwärtiger Altersklassenverteilung auf ca. 275.476 Efm ($6,6 \text{ Efm ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$) belaufen. Bei der Fichte wäre mit knapp $8,6 \text{ Efm Jahr}^{-1}$ die höchste Nutzungsmenge zu erwarten, gefolgt von der Kiefer mit rund 6 Efm Jahr^{-1} (Tabelle 2.16). Rund 50 % des Holzeinschlages können bei einer Hochdurchforstung unter Zielvorratsbedingungen im FoA Hummelshain für die Produktion langlebiger Holzprodukte genutzt werden (Tabelle 2.17).

Tabelle 2.16: Verteilung der geplanten, mittleren Holznutzung im Forstamt Hummelshain auf die Holzsortimente bei modellhafter Betrachtung unter Zielvorratsbedingungen. Abkürzungen der Holzsortimente siehe Tabelle 2.1. * Über die Menge an Holzprodukten pro Baumartengruppe gewichtet.

BAG	ohne Nutzg.	nvD-Holz	X-Holz	IS	IL	L und LAS	Summe
	[Efm ha ⁻¹ Jahr ⁻¹]						
Buche	0,11	0,31	0,05	0,54	1,52	2,62	5,16
Eiche	0,06	0,21	0,46	0,30	0,48	0,52	2,04
Fichte	0,14	0,24	0,34	0,33	0,00	7,55	8,59
Kiefer	0,31	0,32	0,06	0,42	1,62	3,28	6,02
Mittel*	0,23	0,29	0,16	0,40	1,08	4,42	6,58
Anteile [%]	3,5	4,5	2,4	6,1	16,3	67,2	100

Tabelle 2.17: Verteilung der geplanten, mittleren Holznutzung im Forstamt Hummelshain auf die Produktgruppen 1 bis 6 unter Zielvorratsbedingungen. Nutzungen, die aufgrund geringer Dimensionen keinem Sortiment angehören, wurden zu den kurzlebigen Produkten gestellt. PG: Produktgruppe, k. A.: keine Angaben; Das Verkaufssortiment PG 5 (Parkett) wird nicht in den Sortentafeln geführt und ist praktisch auf die PG 4 (fertiges Parkett) und PG 2 (Produktionsabfälle) verteilt. Der Schlüssel für die Zuordnung zu den Produktgruppen findet sich in Profft *et al.* (in prep.). * Über die Menge an Holzprodukten pro Produktgruppe gewichtet.

BAG	PG1	PG2	PG3	PG4	PG5	PG6	Summe
	(1 Jahr)	(3 Jahre)	(11 Jahre)	(25 Jahre)	(43 Jahre)	(51 Jahre)	
Kurzlebige Produkte			Langlebige Produkte				
[Efm ha ⁻¹ Jahr ⁻¹]							
Buche	1,12	0,75	0,09	3,20	k. A.	0,00	5,16
Eiche	1,06	0,00	0,10	0,88	k. A.	0,00	2,04
Fichte	1,40	3,67	0,00	0,02	k. A.	3,51	8,59
Kiefer	1,07	1,29	0,00	1,76	k. A.	1,90	6,02
Mittel*	1,17	1,92	0,01	1,33	k. A.	2,15	6,58
Anteile [%]	17,8	29,2	0,2	20,2	k. A.	32,6	100

Aus Tabelle 2.18 ist ersichtlich, dass im FoA Hummelshain unter Zielvorratsbedingungen durchschnittlich 1,4 tC ha⁻¹ Jahr⁻¹ in Holzprodukten gebunden würde. Diese Menge entspräche einer (Brutto-) Entlastung der Atmosphäre von 3,6 tCO₂ ha⁻¹ Jahr⁻¹ durch die Holznutzung. Die MRT der Produkte würde rund 23 Jahre betragen.

Tabelle 2.18 Mittlere Kohlenstoffbindung in Holzprodukten bei Hochdurchforstung und unter Zielvorratsbedingungen im FoA Hummelshain. Die Produkte wurden in kurzlebige Produkte (Produktgruppen 1 bis 3) und langlebige Produkte (Produktgruppen 4 bis 6) zusammengefasst. *Über die Menge an Holzprodukten pro Baumarten- bzw. Produktgruppe gewichtet.

BAG	Hochdurchforstung unter Zielvorratsbedingungen		
	Kurzlebige Produkte PG 1 – 3	Langlebige Produkte PG 4 – 6	Gesamt
[t C ha ⁻¹ Jahr ⁻¹]			
Buche	0,55	0,89	1,44
Eiche	0,33	0,25	0,58
Fichte	0,96	0,67	1,63
Kiefer	0,51	0,79	1,31
Mittel*	0,65	0,75	1,39
[t C FoA ⁻¹ Jahr ⁻¹]			
Summe	2710,1	3128,5	5838,6
[%]			
Anteile	46,4	53,6	100
[Jahre]			
MRT*	2,4	41,1	22,7

2.2.4 Diskussion

Im Vergleich der vorgestellten Szenarien wies das Niederdurchforstungsszenario mit 18,4 Jahren eine geringere MRT der Holzprodukte auf als die Hochdurchforstungsszenarien mit einer MRT von rund 23 Jahren. Berücksichtigt man zudem, dass die Niederdurchforstung in der Regel zu geringeren Nutzungsmengen je Hektar führt als eine Hochdurchforstung, was im vorliegenden Projekt mangels verfügbarer Daten nicht berücksichtigt werden konnte (Kapitel 2.2.2.4), so leistet die Niederdurchforstung einen deutlich geringeren Beitrag zur C-Speicherung in Holzprodukten als die Hochdurchforstung.

Die MRT von Holzprodukten bei Hochdurchforstung gemäß der aktuellen Forsteinrichtung des FoA Hummelshain und bei Hochdurchforstung unter Zielvorratsbedingungen unterschieden sich kaum (Tabelle 2.19). Die jährliche Bindung von Kohlenstoff in Holzprodukten war jedoch unter Zielvorratsbedingungen, und damit in strukturreichen Wäldern, rund 20 % höher als im hochdurchforsteten Altersklassenwald. Dies könnte durch die historisch bedingte Baumartenverteilung und Bestandesstruktur im FoA Hummelshain bedingt sein. So muss die gegenwärtige Nutzungsplanung der Forsteinrichtung erhebliche Pflegerückstände im FoA Hummelshain, insbesondere im Nadelholz, berücksichtigen. Diese Pflegerückstände können heute nicht durch beliebig hohe Nutzungssätze ausgeglichen werden, da dies zu erheblichen Bestandesdestabilisierungen führen kann (z. B. Sturm und Schneebruch). Daher liegen die tatsächlichen Nutzungsmengen im FoA Hummelshain unter den theoretisch möglichen und nachhaltigen Nutzungsmengen.

In Bezug auf eine Kohlenstoffspeicherung gilt jedoch zu berücksichtigen, dass in strukturreichen Wäldern die Zielvorräte bis zu 30 % unter den gegenwärtigen Vorräten im FoA Hummelshain liegen. Damit geht im Zielvorratsszenario eine längere und höhere C-Speicherung in den Holzprodukten mit einer Reduktion der C-Vorräte in der stehenden Bestandesbiomasse einher. Neben der unmittelbaren C-Speicherung in Holzprodukten und im Bestand sollten aber auch waldbauliche Aspekte einer Bewirtschaftung unter Zielvorratsbedingungen in die Diskussion einbezogen werden. Durch die Orientierung an Zielvorräten soll ein Bestandaufbau angestrebt werden, der sich durch Einzelbaumstabilität und mehrschichtigen Bestandaufbau auszeichnet und zugleich einen maximalen Zuwachs für die ausgewählten Zukunfts-Bäume garantiert. Die Konsequenz daraus sind stabile Bestände, die auch im weiteren Bestandesverlauf hohe Nutzungsmengen ermöglichen, ohne das Bestandesgefüge oder die Bestandesstabilität zu gefährden. (Schütz 2001, Ehrhardt *et al.* 2005). Und eine hohe Bestandesstabilität ist stets mit Schutz vor C-Verlusten aus dem Ökosystem durch Störungen verbunden (Schulze *et al.* 2000). Darüber hinaus werden bei einer Bewirtschaftungsweise unter Zielvorratsbedingungen mit früher Freistellung der Z-Bäume die angestrebten Zieldimensionen früher erreicht und damit über eine gesamte Baumgeneration hinweg höhere Anteile an Starkholz je Hektar in einer kürzeren Zeitspanne anfallen als im Altersklassenwald. Zusätzlich wird sich aus der gezielten Förderung der qualitativ besten Bäume über das gesamte Bestandesleben hinweg ein hoher Anteil bessere Holzqualitäten ergeben, was sich wiederum in der Erzeugung höherwertiger Produkte mit

längeren Produktlebenszeiten niederschlägt (Gerold und Biehl 1992, Klädtke 1997, Kenk 1998, Rieder 1998, Wilhelm *et al.* 1999, Abetz und Klädtke 2000, Mildner 2003).

Sollten sich die Annahmen zu den Zielvorräten und den unter diesen Gegebenheiten realisierbaren Nutzungsmengen bestätigen, so sind Nutzungen zu erwarten, die langfristig und nachhaltig realisierbar sind, und gleichzeitig aus waldbaulicher und ökologischer Sicht ein Optimum darstellen. Die Quantifizierung der genannten, zum Teil gegenläufigen Effekte auf die Kohlenstoffspeicherung wird Teil eines Modellierungs-Projektes des MPI-BGC in Kooperation mit der TLWJF, der FVA Baden-Württemberg und dem CIRED (Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement, France) sein.

Ein Vergleich der Szenarien für das Musterforstamt Hummelshain mit den Ergebnissen zum gesamten Staatsforst in Thüringen (Tabelle 2.9, 2.10) ist nur bedingt möglich, da die Aufteilung des eingeschlagenen Holzes auf die Produktgruppen beim FoA Hummelshain anhand von Planungsdaten und Sortentafeln erfolgte, für Gesamthüringen über die Verkaufstatistik von 2001 und 2002. Es kann jedoch festgehalten werden, dass die geringere MRT der Holzprodukte aus Gesamthüringen (21 Jahre, Tabelle 2.10) im wesentlichen auf den hohen Flächen- und Massenanteil an Fichte zurückzuführen ist (Tabelle 2.8). Fichte liefert im Vergleich zu Buche und Kiefer einen deutlich geringen Anteil an sehr langlebigen Produkten (PG 6, Tabelle 2.9).

Tabelle 2.19: Übersicht der Kohlenstoffbindung in Holzprodukten verschiedener Bewirtschaftungskonzepte. *Über die Menge an Holzprodukten pro Baumarten- bzw. Produktgruppe gewichtet.

BAG	Altersklassenwald						Strukturreiche Wälder		
	Modell: Hochdurchforstung (gemäß aktueller Forsteinrichtung)		Modell: Niederdurchforstung		Modell: Hochdurchforstung unter Zielvorratsbedingungen		Kurzlebige Produkte	Langlebige Produkte	Gesamt
	Kurzlebige Produkte	Langlebige Produkte	Gesamt	Kurzlebige Produkte	Langlebige Produkte	Gesamt			
	[t C ha ⁻¹ Jahr ⁻¹]								
Buche	0,46	0,76	1,22	0,56	0,66	1,22	0,55	0,89	1,44
Eiche	0,25	0,23	0,48	0,31	0,16	0,47	0,33	0,25	0,58
Fichte	0,70	0,49	1,19	0,79	0,40	1,19	0,96	0,67	1,63
Kiefer	0,40	0,64	1,04	0,49	0,55	1,04	0,51	0,79	1,31
Mittel*	0,49	0,59	1,08	0,58	0,50	1,08	0,65	0,75	1,39
Anteile	[%]								
	45,3	54,7	100	53,6	46,4	100	46,4	53,6	
MRT*	[Jahre]								
	2,4	40,6	23,0	2,3	37,5	18,4	2,4	41,1	22,7

Bei einem Vergleich der C-Speicherung in Holzprodukten mit der C-Speicherung im Totholz (Wirth *et al.* 2003, Tabelle 2.10) sollten stets die folgenden drei Aspekte berücksichtigt werden:

- Daten zur Produktlebensdauer von verschiedenen Holzprodukten sind nur sehr begrenzt verfügbar.
- Die Holzver- und –bearbeitung sowie der Handel mit Rohholz und Holzprodukten sind sehr stark von der Globalisierung und von marktwirtschaftlichen Konkurrenzverhältnissen geprägt. Die Recherchen zu Produktionsausbeuten, zum Verbleib und zur Verwendung des Holzes lieferten bislang nur sehr allgemeine Daten, so dass die vorgestellten Ergebnisse eher als Tendenzen interpretiert werden sollten.
- In den letzten Dekaden hat sich das Konsumentenverhalten, das letztendlich die Dauerhaftigkeit eines Produktes bestimmt, in den Industriestaaten stark verändert. Waren bis in die 1970er Jahre aufgrund wirtschaftlicher Verhältnisse die tatsächliche Nutzbarkeit eines Produktes ausschlaggebend für die Dauer seiner Verwendung, so spielen heute in immer stärkerem Maße Modetrends die entscheidende Rolle bei der Dauer der Nutzung eines Produktes. Das hat zur Folge, dass ein Produkt, das trotz seiner noch vollen Funktionsfähigkeit bereits ersetzt wird. Die daraus resultierende Schnelllebigkeit des Konsumentenverhaltens erschwert die fundierte Modellierung und Erarbeitung von Daten zur Produktlebensdauer.

Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass in der vorliegenden Studie keine Substitutionseffekte von Holz, weder für den Energie- noch für den Materialeinsatz, in die Berechnungen einbezogen wurden.

Der im zweiten Teil der Studie aufgezeigte Vergleich zwischen verschiedenen Nutzungsstrategien für die Bestände eines Musterforstamtes basierte ausschließlich auf den Planungsdaten der Forsteinrichtung für die kommenden 10 Jahre. Demzufolge standen keine Nutzungsmengen nach Verkaufssortimenten zur Verfügung. Stattdessen wurden die zukünftigen Produktgruppen mit Hilfe von Sortentafeln aus gegebenen Bestandes- und Nutzungskennzahlen abgeleitet. Die verwendeten Sortentafeln wurden in den 1980er Jahren aufgestellt. Seitdem haben gravierende Veränderungen auf der technologischen Ebene der Holzbe- und –verarbeitung und bei der Klassifizierung und Aushaltung des Verkaufsholzes in Deutschland zu einer neuen Marktsituation geführt. Neben Verschiebungen der Anteile für die einzelnen Stärkeklassen haben sich in den letzten 20 Jahren neue Verkaufssortimente auf dem Markt etabliert. Beispiele hierfür sind das Profilerspanerholz (PZ-Holz) bei Nadelbaumarten und das Verkaufssortiment Parkettholz im Laubholzbereich. Durch den Einsatz der Zerspanertechnologie bei Nadelholz kann aus geringen Durchmesserdimensionen bereits Schnittholz für langlebige Produkte produziert werden. Gleichzeitig muss jedoch berücksichtigt werden, dass die PZ-Technologie mit Schnittholzausbeuten zwischen 50 und 60 % unterhalb der Ausbeute der konventionellen Säge-technologie liegt. Die schwachen Holzdimensionen sind entsprechend der Sortentafeln bis Mitte der 1980er Jahre zum überwiegenden Anteil den Sortimenten IS und IL zugewiesen worden, mit der Folge, dass sie in erster Linie zu Produkten mit kurzer Produktlebensdauer

verarbeitet wurden. Anfang der 1990er Jahre entwickelten Schöpfer und Stöhr für die Baumart Fichte eine neue Sortentafel, bei der die PZ-Sortimente berücksichtigt wurden. Dadurch bildet diese Sortentafel ein realitätsgetreueres Bild hinsichtlich der Sortenverteilung ab. Für die BAG Kiefer existiert jedoch noch keine angepasste Sortentafel.

Unter das Verkaufssortiment Parkettholz fällt Laubstammholz ab der Stärkeklasse 2a (Stammmittendurchmesser 20 cm), das gezielt für die Produktion von Echtholzparkett verwendet wird. Bei Verwendung der Sortentafeln wird dieses Holz in erster Linie den geringwertigen Sortimenten IS und IL zugeordnet. Daraus resultiert ein Verteilungsschlüssel, der verstärkt Mengen den Produktgruppen 1 bis 3 mit kurzen Produktlebenszeiten zuweist. Das Verkaufssortiment Parkett wird jedoch zu 40 % (BAG Eiche) bzw. 35 % (Buche) den Produktgruppen 4 und 5 zugewiesen - mit einer durchschnittlichen Produktlebensdauer (MRT) von 25 bzw. 43 Jahren. Unberücksichtigt musste auch das Kriterium „Holzgüte“ bleiben, da die Sortentafeln nur die Baumart und den BHD als Klassifizierungsgrößen beinhalten. In der Realität wird die Verwendung des Holzes jedoch sehr stark von der Holzgüte beeinflusst.

Die waldbauliche Behandlung hat auf die Produktgruppenverteilung eine indirekte und langfristige Wirkung. Pflege von Beständen und Baumarten kann eine Verbesserung der Holzqualitäten bewirken mit der Folge, daraus hochwertige Holzsortimente zu. Darüber hinaus kann eine auf Baumartenvielfalt basierende Waldbewirtschaftung eine Vielzahl unterschiedlichster Kundenwünsche erfüllen, was die Holznutzung allgemein fördert. Insgesamt ist zu berücksichtigen, dass Absatzmärkte und wirtschaftliche Gesichtspunkte einem schnelleren Wandel unterliegen als waldbauliche Zyklen bei der Erzeugung des Holzes. Demzufolge sollte die Waldbewirtschaftung nicht gezielt auf die Maximierung eines einzelnen Produktpools ausgerichtet sein.

2.2.5 Schlussfolgerungen

- Im vorliegenden Projekt wurde erstmals eine Holznutzungsanalyse unter dem Gesichtspunkt der Bindungsdauer von Kohlenstoff für den Freistaat Thüringen und für unterschiedliche Durchforstungsszenarien durchgeführt.
- Bei dem Vergleich unterschiedlicher Nutzungsansätze zeigte sich, dass über die Wahl des Durchforstungsregimes gezielt die Verwendung des Holzes zugunsten einer höheren Produktlebensdauer gesteuert werden kann. Die Hochdurchforstung liefert bei gleicher Nutzungsmenge je Hektar einen höheren Anteil an Holz, das zu Produkten mit einer längeren Lebensdauer verarbeitet werden kann, als die Niederdurchforstung.
- Struktureiche Wälder, welche unter Zielvorratsbedingungen einer Hochdurchforstung unterliegen, können hohe Anteile an langlebigen Produkten bei gleichzeitig höheren Nutzungsmengen als im Altersklassenwald liefern. Die Netto-C-Bilanz aus höherer und längerfristiger C-Speicherung in Holzprodukten und geringeren C-Vorräten im Bestand unter Zielvorratsbedingungen ist jedoch noch unklar. Aufgrund der Abhängigkeit des Zielvorrates von Standortsverhältnissen, aktueller Baumart- und Altersklassenverteilung

wird die Netto-C-Bilanz dieser Bewirtschaftungsweise nur mit Hilfe von Modellen berechnet werden können.

- Die Berechnungen zu den Verarbeitungs- und Verwendungsbereichen des eingeschlagenen bzw. verkauften Holzes mussten anhand grober Angaben der befragten Unternehmen erfolgen. Die Informationsweitergabe seitens der Unternehmer könnte in Zukunft durch eine engere, institutionalisierte Zusammenarbeit zwischen Forst- und Holzwirtschaft verbessert werden.
- Auf Grundlage der derzeit verfügbaren Daten zur C-Bindung in Holzprodukten im Vergleich zur C-Bindung im Totholz (Wirth *et al.* 2003, Tabelle 2. 10) ergeben sich drei Schlussfolgerungen :
 - (1) Totholz bindet Kohlenstoff über längere Zeiträume als kurzlebige Holzprodukte
 - (2) Holzprodukte der Produktgruppen 5 (Parkett) und 6 (Bauholz) können Kohlenstoff über längere Zeiträume binden als im Wald liegendes Totholz.
 - (3) Die Menge und die Verweilzeit des Kohlenstoffs in dem einen oder anderen Speicher hängt im hohen Maße von der Baumart bzw. dem Vegetationstyp ab. Totholz in Nadelwäldern hat tendenziell eine höhere MRT als Nadelholzprodukte. Die MRT von Totholz in Laubwäldern und Laubholzprodukte ist tendenziell so ähnlich, dass eine auf hochwertige, langlebige Holzprodukte gerichtete Laubholz-Bewirtschaftung die C-Bilanz zugunsten der Produkte möglicherweise verändern könnte.

Hier muss allerdings betont werden, dass die Abschätzungen zur Lebensdauer der Holzprodukte und des Totholzes im Wald mit sehr grossen Unsicherheiten behaftet sind. Für ein „full carbon accounting“ der Forst- und Holzwirtschaft sind weitere, intensive Studien zur Holzverarbeitung und -nutzung bzw. -verbrauch und zum Totholzabbau im Wald erforderlich.

3 Einrichtung eines Netzwerkes von Dauerbeobachtungsflächen und wissenschaftlichen Kooperationen zur Verifikation der Fortschreibung von C-Vorräten.

3.1 Einrichtung einer Datenbank zu den Dauerbeobachtungsflächen in Thüringen

3.1.1 Wissenschaftlicher Hintergrund

Während die erfolgte Holznutzung über die jährliche Meldung aus den Forstbetrieben relativ genau quantifiziert werden kann, muss der jährliche Bestandeszuwachs zunächst über Zuwachsmodelle geschätzt werden. Erst nach 10 Jahren, wenn eine wiederholte Forsteinrichtung vorliegen wird, kann retrospektiv das tatsächliche Bestandeswachstum und damit die tatsächliche Vorratsentwicklung abgeglichen werden.

Zahlreiche Untersuchungen konnten zeigen, dass sich das Bestandeswachstum in Europa seit den letzten 50 - 60 Jahren deutlich verändert hat. Häufig haben die Bestandeszuwächse im Vergleich zu früheren Beobachtungen deutlich zugenommen (Franz *et al.* 1993, Pretzsch 1999, Spiecker *et al.* 1996, Dittmar *et al.* 2003, Mund *et al.* 2002). Die zweite Bundeswaldinventur (BWI II) bestätigte diesen Trend für die alten Bundesländer (BMVEL 2004). Aber auch Zuwachsrückgänge oder ein Wechsel von Perioden mit erhöhtem und Perioden mit geringerem Wachstum im Vergleich zu gängigen Wachstumsmodellen wie den Ertragstafeln wurden beobachtet (Gerold und Gerold 2001, Mund *et al.* 2002, Dittmar *et al.* 2003).

Als Ursache für diese Wachstumsveränderung werden insbesondere erhöhte atmosphärische Schwefel- und Stickstoff-Depositionen, hohe Ozonkonzentrationen und erhöhte CO₂-Konzentrationen der Atmosphäre, Klimaveränderungen, Erholung der Waldbestände von früheren, sehr intensiven Nutzungsformen wie Streunutzung und Waldweide und verbesserte forstliche Bewirtschaftungsverfahren angeführt. Während erhöhte atmosphärische CO₂-Konzentrationen, eine längere Vegetationsperiode und eine bessere Bewirtschaftung eine Erhöhung der Zuwächse erwarten lassen, führen hohe Schwefel-Depositionen und Ozonkonzentrationen sowie Trockenheit zu einem Zuwachsrückgang. Die Auswirkungen der Trockenheit im Jahr 2003 auf das Wachstum und die Netto-C-Flüsse von Wäldern werden derzeit intensiv untersucht (z. B. Skomarkova, M.V. *et al.* (in prep.), Ciais (2004), Knohl *et al.* (2005)). Die Wirkungen von Stickstoff (N)-Depositionen sind ambivalent. Mäßige N-Depositionen wirken bei guter Kationenversorgung der Waldstandorte wachstumsfördernd. Hohe N-Depositionen bewirken eine verstärkte Auswaschung von Kationen aus dem Boden (Bodenversauerung) und damit ein zunehmendes Ungleichgewicht zwischen N-Verfügbarkeit, Baumwachstum und Kationenversorgung (Prozess der N-Sättigung; Schulze *et al.* 1989, Aber 2002). Dieser Prozess führt insbesondere auf basenarmen Standorten und in Kombination mit hohen Schwefel-Depositionen zu einem Rückgang des Waldwachstums bis hin zum Absterben einzelner Bäume oder gar ganzer Waldbestände (Schulze *et al.* 1989). Je nach Region und

Bestandeseigenschaften wird das Waldwachstum durch ein komplexes Zusammenwirken all dieser Faktoren beeinflusst, was eine verlässliche Vorhersage des Wachstums auf Betriebsebene sehr erschwert. Die Vielzahl anthropogener, oftmals nicht standortsspezifischer Einflüsse könnte auch ein Grund dafür sein, dass sich bei jüngeren, derzeit noch laufenden Studien nur ein schwacher oder kein Zusammenhang zwischen aktuellem Bestandeszuwachs und Parametern der Standortkartierung findet (Vorträge von H. Röhle, TU Dresden, und M. Jansen, Universität Göttingen, auf der Forstwissenschaftlichen Tagung 2004 in Freising/Weihenstephan).

Für eine Anrechnung der C-Senken im Rahmen des Kyoto-Protokolls sind neben der Feststellung einer Wachstumsveränderung durch sich verändernde Umweltfaktoren auch die Anteile der unterschiedlichen Faktoren an den Wachstumsveränderungen von Bedeutung. Eine Trennung zwischen anthropogenen und natürlichen Faktoren wurde bereits in der 1. Projektphase mit Hilfe des BIOME-BGC- Modells beispielhaft ermittelt (Wirth *et al.* 2003, Vetter *et al.* in press). In der zweiten Projektphase standen der Zusammenhang von Standortseigenschaften, Bewirtschaftung und Waldwachstum in Thüringen im Vordergrund, (1) um die Randbedingungen zur Verifikation von C-Vorratsfortschreibungen festlegen zu können (z.B. für welche Standorte ist das Wachstum der ausgewählten Versuchsflächen repräsentativ), und (2) um mögliche Prädiktoren zur Vorhersage des Waldwachstum zu identifizieren.

Insbesondere mit Blick auf das Kyoto-Protokoll stellen die derzeit verfügbaren Ertragstafeln kein ausreichend genaues Modell zur fortlaufenden Abschätzung der Kohlenstoffakkumulation in der Dendromasse von Wäldern auf lokaler Ebene dar. Da die Zuwachsabschätzung der gesamten Forsteinrichtung und bislang auch des geplanten Forsteinrichtungssystems "Walddatenspeicher" für Thüringen auf Ertragstafeln beruhen, ist diese Feststellung von großer Relevanz für die Fortschreibung von C-Vorräten in der Dendromasse.

3.1.2 Aufbau der Datenbank und Bodenuntersuchungen

Als ein erster Schritt zu einer besseren Abschätzung des jährlichen Bestandeswachstums in Thüringen wurde eine Datenbank der langfristigen ertragskundlichen Versuchsflächen in Thüringen zusammengestellt. Hierzu mussten zunächst der Zustand und die Verantwortlichkeiten der bestehenden ertragskundlichen Dauerversuchsflächen in Thüringen aufgefunden gemacht werden. Die Betreuung der langfristigen ertragskundlichen Flächen in Thüringen obliegt historisch bedingt der Landesforstanstalt Eberswalde und dem Lehrstuhl für Waldwachstum- und Holzmesskunde, TU Dresden/Tharandt. Nach zahlreichen Gesprächen und Treffen mit den verantwortlichen Mitarbeitern der Landesforstanstalt Eberswalde und der TU Dresden konnte eine wissenschaftliche Kooperation aufgebaut werden, die eine Bereitstellung der ertragskundlichen Daten ausgewählter Versuchsflächen in aggregierter Form (Mittelwerte pro Fläche und Aufnahmezeitpunkt) beinhaltet. Da die Daten im vorliegenden Projekt nicht ertragskundlich sondern ausschließlich mit Blick auf die C-Bilanz von Waldbeständen ausgewertet werden sollten, haben die Autoren des vorliegenden Berichtes zunächst auf die Verwendung von Einzelbaumdaten verzichtet und sich auf Versuchsflächen von Buchen- und

Fichten- (misch-) wäldern, die unterschiedlicher waldbaulicher Behandlung unterliegen, beschränkt (Tabelle 3.1). Für das vorliegende Projekt erwies es sich als sehr günstig, dass die Zeitreihen der Dauerversuchsflächen lückenlos und z.T. über mehr als 100 Jahre vorliegen. Allerdings war ein Teil der Datensätze noch nicht elektronisch erfasst und musste manuell aus den handgeschriebenen Papierbögen in den Computer eingegeben werden. Die bereitgestellten Datentabellen hatten zudem aufgrund ihrer unterschiedlichen Herkunft verschiedene Formate, so dass sie manuell in eine einheitliche Datenbank zusammengeführt werden mussten.

Wie oben bereits beschrieben, ist durch die Verwendung von Ertragstafeln zur Fortschreibung des Walddatenspeichers und damit auch der C-Vorräte ein großer systematischer Fehler zu erwarten. Um diesen Fehler zumindest grob quantifizieren zu können, wurden die ertragskundlichen Daten der Dauerversuchsflächen um Abschätzungen des Zuwachses, der Bonität und des Bestockungsgrades gemäß des Forsteinrichtungsprogrammes ABIES-FE ergänzt (Tabelle 3.2). Das ABIES-FE Programm wird voraussichtlich Bestandteil des zukünftigen Walddatenspeichers werden, und es basiert auf Ertragstafeln, die üblicherweise in Thüringen verwendet werden. Da für strukturreiche Wälder (Plenterwälder) keine Ertragstafeln vorliegen, kann der Vergleich mit den Wachstumsprognosen nur für die Altersklassenwälder durchgeführt werden. Bei der Interpretation der Differenzen zwischen realem Wachstum in den Versuchsflächen und vorhergesagtem Wachstum muss berücksichtigt werden, dass die älteren Versuchsflächen in die Erstellung der in Thüringen gebräuchlichen Ertragstafeln eingegangen sind. Möglicherweise werden die Zuwächse dieser Flächen mit zunehmendem Bestandesalter zunehmend von den Ertragstafelmodellen abweichen.

Für keine der ertragskundlichen Dauerversuchsflächen standen detaillierte Bodendaten zur Verfügung. Eine systematische Benennung der Standortseigenschaften lag nicht oder nur für einige allgemeine Standortparameter vor. Daher wurden in Zusammenarbeit mit dem Referat für Waldbau und dem Referat für Standortkunde der TLWJF jeder Versuchsfläche zunächst all die Standortseigenschaften zugeordnet, die sich aus den allgemeinen forstlichen Datenbanken und Karten ableiten lassen (z.B. Klimastufe, Geologie, Trophiestufe, Standortseinheit etc., Tabelle 3.2) Auch hier erschwerten Änderungen der administrativen Flächenbezeichnungen (siehe Kapitel 1.2) die Zusammenstellung der Daten.

Vor Beginn der Bodenuntersuchungen wurden die Versuchsflächen besichtigt und hinsichtlich ihres allgemeinen Bestandeszustandes (einschließlich der benachbarten Bestände) und der Bodenverhältnisse gutachterlich bewertet. Die bodenkundliche Bewertung erfolgte anhand der Geomorphologie, der Bodenvegetation, kleiner Bodenprofile, einzelner Pürkhauereinschläge und der Erfassung offenkundlicher Störungen des Oberbodens. Nach dieser ersten Begehung der Flächen wurde die Versuchsfläche Röthengrund wegen sehr starker Rotfäule des Bestandes und starker Störung des Oberbodens (überdecktes Profil) vollständig aus dem Netzwerk von Versuchsflächen zur Verifikation von C-Bilanzen herausgenommen. Bestände, die angesichts ihrer Struktur und der historischen Datensätze als besonders wertvoll einzustufen sind, aber für wachstumsspezifische und/oder bodenkundliche Untersuchungen nicht repräsentativ oder sehr

aufwendig sind, wurden in die Datenbank aufgenommen, intensive bodenkundliche Untersuchungen wurden jedoch zunächst zurückgestellt. Dies betraf Bestände an steilen Hängen (z.B. Neues Haus 479), Bestände, deren Oberboden großflächigere Störungen aufwiesen (z.B. parallele Bodenwellen in Wegscheide 107) und Bestände, bei denen durch eine starke Störung des Nachbarbestandes Randeffekte zu erwarten sind (z.B. große Lichtung neben der Versuchsfläche Neues Haus 605, verbunden mit einer starken Vergrasung des Bestandes). Ein Teil der Versuchsflächen besteht aus mehreren Parzellen, die einem unterschiedlichen Durchforstungsregime unterliegen. Da die einzelnen Parzellen oftmals direkt aneinander anschließen und relativ klein sind (z.T. $< 2000 \text{ m}^2$), können bei den Boden-C-Vorräten keine behandlungsspezifischen Effekte erwartet werden. Daher werden die Bodenuntersuchungen nicht für die einzelnen Parzellen durchgeführt, sondern beziehen sich stets auf die gesamte Versuchsfläche.

Die Bodenuntersuchungen in 12 ausgewählten Beständen (Tabelle 3.1) begannen mit einem Bodenscreening zur Beschreibung der räumlichen Verteilung von Bodentypen und zur Identifizierung von Störungen bzw. Besonderheiten im Unterboden. Hierzu wurde je nach Heterogenität, Größe, Form und Lage der Versuchsflächen an 5 - 12 Punkten ein Pürkhauer eingeschlagen und der Boden anhand der Pürkhauerprobe bodenkundlich klassifiziert (Abbildung 3.1). In unmittelbarer Nachbarschaft der für die gesamte Versuchsfläche repräsentativsten Stelle wurde das Leitprofil gegraben. Wenn innerhalb einer Fläche klar getrennte Bodentypen zu finden waren, wurden entsprechend mehrere Profile gegraben. Jedes Profil wurde nach Tiefenstufen und mittels der Entnahme gestörter Monolithe („*Excavation method*“; siehe Wirth *et al.* 2003) beprobt. Die Proben werden derzeit im Labor aufbereitet und analysiert (C_{org} - und N_{ges} -Konzentration, Karbonatgehalt, pH, KAK, Korngrößenverteilung). Die Fertigstellung der Analysen, weitere flächenrepräsentative Probennahmen mittels Bohrkernen und die Ausweitung der Analysen auf die noch fehlenden 12 Standorte werden im Rahmen des CarboEurope-IP erfolgen. Für die Versuchsflächen Langula 536_1 und 512_1 stehen bereits umfangreiche Bodendatensätze aus der Dissertation von Mund (2004) zur Verfügung.

Tabelle 3.1: Übersicht der ausgewählten ertragskundlichen Versuchsfelder in Thüringen. Ref.: Referenz, E: Landesforstanstalt Eberswalde, T: Lehrstuhl für Waldwachstums- und Holzmesskunde, Universität Dresden (Tharandt); Df.: Durchforstung; AK: Altersklassenwald, PW: Plenterwald, FE: Forsteinrichtung; B: detaillierte Bodenuntersuchungen

Versuchsfläche / Parzelle	Forst- adresse	Revier	Forstamt	Größe [m ²]	Baumarten	Bewirtschaftung	Anlage / Boden	Ref.
Scharfenstein 249								
Parzelle 249/1	249a2	Scharfenstein	Leinefelde	2501	Bu, Es	Mäßige Df.; 5jähriger Vorgriff bei Einhaltung BG=1,1; AK	1971	E
Parzelle 249/2	249a2	Scharfenstein	Leinefelde	2500	Bu, Es	Starke Df.; 10jähr. Vorgriff bei Einhaltung BG=0,9; AK	1971 / B	E
Parzelle 249/3	249a2	Scharfenstein	Leinefelde	2500	Bu, Es	Starke Df.; 10jähr. Vorgriff bei Einhaltung BG=1,0; AK	1971	E
Parzelle 249/4	249a2	Scharfenstein	Leinefelde	1375	Bu, Es	A-Grad; AK	1971	E
Parzelle 249/5	249a2	Scharfenstein	Leinefelde	2125	Bu, Es	Mäßige Df.; 5jähr. Vorgriff bei Einhaltung BG = 1,0; AK	1971	E
Parzelle 249/6	249a2	Scharfenstein	Leinefelde	2800	Bu, Es	Starke Df.; 10jähr. Vorgriff bei Einhaltung BG = 1,0; AK	1971	E
Leinefelde 12								
Parzelle 12/ 1 (Hang)	112a	Geney	Leinefelde	4200	Bu + Edell.	Ertrag (Mischbestand); AK	1908	E
Parzelle 12/ 2 (Plateau)	112a	Geney	Leinefelde	3266	Bu + Edell.	Ertrag (Mischbestand); AK	1908	E
Leinefelde 13								
Parzelle 13/1	113b	Geney	Leinefelde	5000	Bu + Edell.	Hochdf. zugunsten der Edellaubhölzer; AK	1897 / B	E
Parzelle 13/2	113b	Geney	Leinefelde	3600	Bu, Es, Ah	Mäßige Hochdf. ohne besondere Pflege der Edellaubhölzer; AK	1897	E
Parzelle 13/3	113b	Geney	Leinefelde	1680	Bu + Edell.	A - Grad; AK	1897	E
Leinefelde 37								
	1137a4	Geney	Leinefelde	2500	Bu, Hbu TrEi u.a.	Ertrag; AK	1884 / B	E
Leinefelde 245								
	404a1	Worbis	Leinefelde	2500	Bu	Ertrag (Hochdf. im Reinbestand) ; AK	1884	E
Bleicherode 104								
Parzelle 104/1	288a	Utterode	Bleicherode	6000	Bu, Ah, Es, Rü	Mischbestand, sehr starke Hochdf. zugunsten der Edellaubhölzer; AK	1908	E
Parzelle 104/2	288a	Utterode	Bleicherode	4000	Bu, Ah, Es, Rü	Mischbestand, starke Niederdf.; AK	1908	E
Parzelle 104/3	288a	Utterode	Bleicherode	3672	Bu, Ah, Es, Rü	Mäßige Hochdf.; AK	1908	E

Tabelle 3.1 (Fortsetzung)

Versuchsfläche / Parzelle	Forst- adresse	Revier	Forstamt	Größe [m²]	Baumarten	Bewirtschaftung	Anlage / Boden	Ref.
Parzelle 104/4	288a	Utterode	Bleicherode	3125	Bu (Ah, Ei)	bis 1979 A-Grad, ab 1986 Weiterführung als mäßige Df.; AK	1908 / B	E
Bleicherode 293								
Parzelle 293/2	2659b	Burghagen	Ebeleben	5000	Bu (Es, Ah u.a.)	Mäßige Df.; AK	1874 / B	E
Parzelle 293/3	2659b	Burghagen	Ebeleben	5000	Bu (Es, Ah u.a.)	Starke Df.; AK	1874	E
Glasbach 4076/4077								
Parzelle 4076/1	235a6	Windsberg	Bad Liebenstein	2400	Bu	Starke Hochdf. (0,7 n.B.G.); AK	1971	E
Parzelle 4076/2	235a6	Windsberg	Bad Liebenstein	2400	Bu	Starke Hochdf. (0,8 n.B.G.); AK	1971	E
Parzelle 4077/1	233 a4	Windsberg	Bad Liebenstein	2000	Bu	Mäßige Hochdf. (0,9 n.B.G.); AK	1971	E
Parzelle 4077/2	233 a4	Windsberg	Bad Liebenstein	1680	Bu	A-Grad; AK	1971	E
Oelze								
Parzelle 11	15 a12	Oelze	Neuhaus	2500	Bu	Mäßige Hochdf.; AK	1958	T
Parzelle 13	15 a12	Oelze	Neuhaus	2500	Bu	Starke Hochdf.; AK	1958 / B	T
Hasenthal 11333								
Parzelle 11333_1	162a2	Hasenthal	Sonneberg	2500	Fi	Nullfläche	1969	T
Parzelle 11333_2	162a2	Hasenthal	Sonneberg	2500	Fi	Mäßige Df., 10-jähriger Vorgriff; AK	1969	T
Parzelle 11333_3	162a2	Hasenthal	Sonneberg	2500	Fi	Starke Df., 20-jähriger Vorgriff; AK	1969	T
Hasenthal 11334								
Parzelle 11334_1	162a1	Hasenthal	Sonneberg	2500	Fi	Nullfläche; AK	1969	T
Parzelle 11334_2	162a1	Hasenthal	Sonneberg	2500	Fi	Mäßige Df., 10-jähriger Vorgriff; AK	1969	T
Parzelle 11334_3	162a1	Hasenthal	Sonneberg	2500	Fi	Starke Df., 20-jähriger Vorgriff; AK	1969	T
Parzelle 11335_1	163a3	Hasenthal	Sonneberg	2500	Fi	Nullfläche; AK	1969	T
Hasenthal 11335								
Parzelle 11335_2	163a3	Hasenthal	Sonneberg	2500	Fi	Mäßige Df., 10-jähriger Vorgriff; AK	1969	T
Parzelle 11335_3	163a3	Hasenthal	Sonneberg	2500	Fi	Starke Df., 20-jähriger Vorgriff; AK	1969	T

Tabelle 3.1 (Fortsetzung)

Versuchsfläche / Parzelle	Forst- adresse	Revier	Forstamt	Größe [m ²]	Baumarten	Bewirtschaftung	Anlage / Boden	Ref.
Wegscheide 49_2	49b2	Crawinkel	Crawinkel	2505	Fi	Mäßige Df. 10-jähriger Vorgriff; AK	1968 / B	T
Wegscheide 107_2	107b3	Wegscheide	Crawinkel	2500	Fi	Mäßige Df. 10-jähriger Vorgriff; AK	1968	T
Neues Haus 479_2	479a11	Spitter	Crawinkel	2500	Fi	Mäßige Df. 10-jähriger Vorgriff; AK	1968	T
Neues Haus 605_2	605a4	Neues Haus	Crawinkel	2500	Fi	Mäßige Df. 10-jähriger Vorgriff; AK	1968	T
Arlesberg Parz._3	761a6	Arlesberg	Ilmenau	2000	Fi	Mäßige Df. 10-jähriger Vorgriff; AK	1968 / B	T
Schmiedefeld Parz._1	131a1	Schmiedefeld	Neuhaus	2500	Fi	Starke Df. 15-jähriger Vorgriff; AK	1969 / B	T
Albrechts Parz._1	97a5	Albrechts	Schwarza	2000	Fi	Nullfläche, aber starker Schneebruch 1973, 1981; AK	1968 / B	T
Cursdorf Parz._2	30b1	Cursdorf	Neuhaus	2500	Fi	Mäßige Df. 10-jähriger Vorgriff; AK	1969	T
Stützenbach 182	872a1	Rosenkopf	Schmiedefeld	10000	Fi, Ta, Bu, Eb	Ertragsversuch, PW	1952 / B	E
Keula 19/20	2686 a2	Keula	Ebeleben	10000	Bu	Ertragsversuch, PW	1952 / B	E
Langula 518._1	518 a2	Langula	Mühlhausen	6800	Bu, Es, Ah, Hbu	Ertragsversuch, PW	1961	T
Langula 536								
Parzelle 536_1	536 a3	Langula	Mühlhausen	10000	Bu, Es, Ah, Hbu, Ul	Ertragsversuch, PW	1961 / B	T
Parzelle 536_2	536 a2	Langula	Mühlhausen	9350	Bu, Ah, Ul	Ertragsversuch, PW	1961	T
Langula 512_1	512 b2	Langula	Mühlhausen	10000	Bu, Ah, Es	Ertragsversuch, PW	1961	T
Lei-T	103 b	Geney	Leinefelde	2500	Bu	Reguläre Bewirtschaftung nach FE; AK	2000 / B	MPI- BGC
Wet-T	3389, 3348, 3345	Wetzstein	Lehesten	700 (+ 14137 in Vorbet.)	Fi	Reguläre Bewirtschaftung nach FE; AK	2004 / B (2005)	MPI- BGC
Hai-T	49, 41,47, 51	Weberstedter Holz	NP Hainich	8500 (+ 14137 in Vorbet.)	Bu, Es, Ah u.a.	Unbewirtschaftet, ungleichaltrig	2000 / B (2004/05)	MPI- BGC

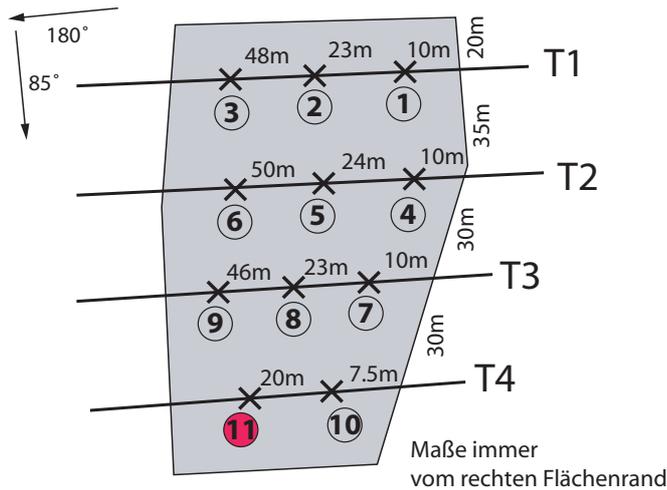


Abbildung 3.1: Schema des Bodenscreenings in der Versuchsfläche Bleicherode 293. Der markierte Punkt Nr. 11 entspricht der repräsentativsten Probestelle, die für ein Leitbodenprofil geeignet ist.

Tabelle 3.2: Auswahl von Parametern der neuen Datenbank zu den Versuchsflächen in Thüringen.

Allgemeine Daten	
◦ Bestand	◦ Bodentyp
◦ Aktuelle Forstadresse 09/2004	◦ Trockenraumdichte
◦ Inventurdatum	◦ Steingehalt
◦ Flächengröße	◦ C- und N-Konzentration
◦ Baumarten	◦ Boden-C- und -N-Vorräte
◦ Bewirtschaftungssystem	◦ Karbonatgehalt
◦ Durchforstungsart	◦ pH _{KCl} und pH _{H2O}
◦ Höhe (üNN)	◦ KAK und Basensättigung
◦ Hangneigung	Bestand
◦ Wuchsbezirk	◦ Bestandescharakter (Beschreibung)
◦ Klimastufe	◦ Mittlerer BHD und mittlere Baumhöhe
◦ Geologie	◦ C-Vorräte in der Dendromasse
◦ Geomorphology	◦ Laufende NPP
	◦ Mittlere NPP
	◦ C-Export durch Ernte
	◦ Gesamt-C-Akkumulation in der Dendromasse
	◦ SG index
	◦ BHD des stehenden Bestandes / BHD des ausscheidenden Bestandes
Boden	Bestandesparameter nach ABIES-FE
◦ Standortsform	◦ Bonität_Buche
◦ Trophiestufe	◦ Bestockungsgrad
◦ Standortseinheit	◦ Vorhergesagter laufender Zuwachs
◦ Humusform	
◦ Substrattyp	
◦ Horizont	
◦ Bodentiefe	

Zusätzlich zu den ertragskundlichen Versuchsflächen wurden im Rahmen des europäischen Forschungsverbund CarboEurope IP und mit Unterstützung des vorliegenden Projektes drei Dauerversuchsflächen in Thüringen eingerichtet. Hauptziel dieser Flächen ist die langfristige Bilanzierung der Netto-C-Flüsse unterschiedlich bewirtschafteter Wälder. Die Versuchsflächen sind: (1) Wetzstein (Wet-T, Fichte, Altersklassenwald), (2) Leinefelde (Lei-T, Buche, Altersklassenwald) und (3) Nationalpark Hainich (Hai-T, unbewirtschafteter, ungleichaltriger Buchen-Mischwald) (Tabelle 3.1). In den Versuchsflächen werden bodenkundliche und meteorologische Standardmessungen sowie direkte Netto-C-Flussmessungen (Eddy-Kovarianz Türme) durchgeführt. Zudem sind im Turnus von 5 Jahren Wiederholungsinventuren des Waldbestandes geplant. Am Wetzstein und im Nationalpark Hainich wird auch eine Wiederholungsinventur der Boden-C-Vorräte (2004 und 2008, jeweils 100 Proben pro Standort) durchgeführt werden.

3.1.3 Auswertung der Daten

Die Daten der Dauerversuchsflächen werden derzeit nach folgendem Schema ausgewertet (Abbildung 3.2):

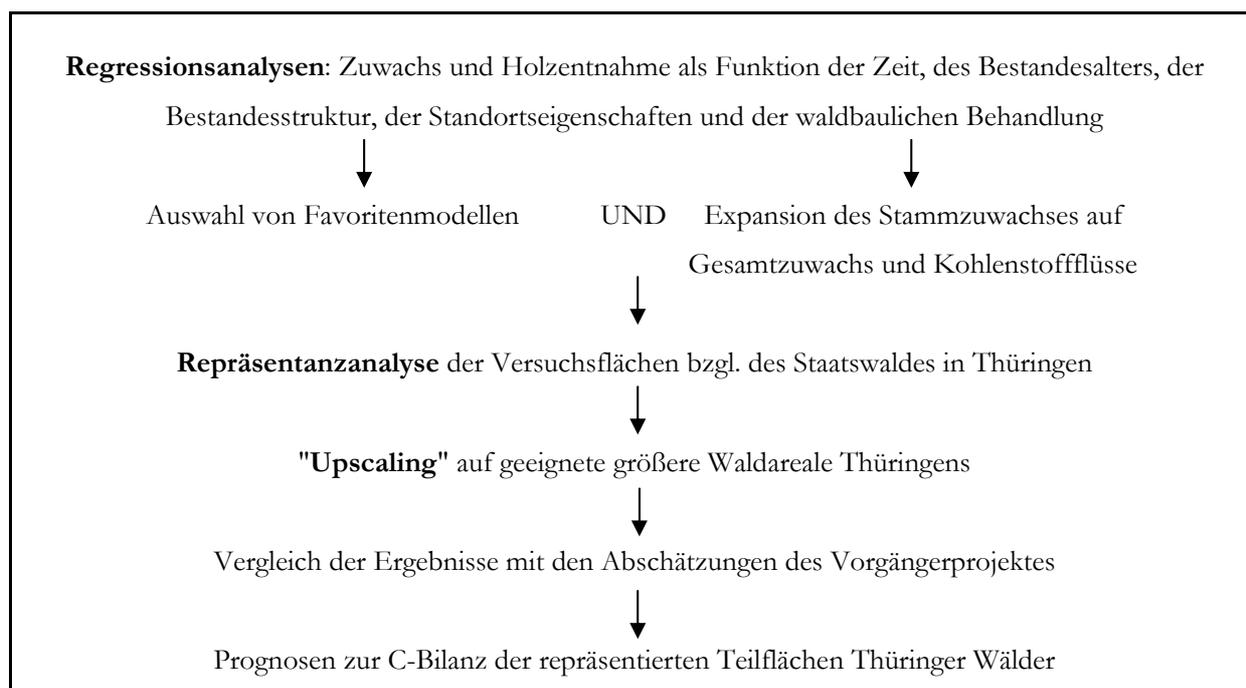


Abbildung 3.2: Schema der Auswertung der Daten der langfristigen ertragskundlichen Versuchsflächen in Thüringen.

Darüber hinaus werden die Differenzen zwischen tatsächlich gemessenem Zuwachs und Zuwachsprognose des ABIES–FE Programmes bzgl. der Effekte von Standortseigenschaften und Durchforstungsregime ausgewertet. Nach einer Repräsentanzanalyse kann dann abgeschätzt werden, welche Abweichungen zwischen tatsächlichem Bestandeswachstum und ertragstafelbasierten Prognosen für die repräsentierten Wälder zu erwarten sind.

Da die Daten der ertragskundlichen Dauerversuchsflächen erst seit dem Frühjahr 2004 vollständig vorliegen und, wie oben beschrieben, die Digitalisierung und Zusammenstellung der Datenbank sehr zeitaufwendig war, ist die Auswertung der Daten noch nicht abgeschlossen. Bei den ersten statistischen Analysen ergaben sich zudem unerwartete ertragskundliche Erkenntnisse, die zunächst mit der Forstanstalt Eberswalde und dem Lehrstuhl für Waldwachstum und Holzmesskunde (Tharandt) geklärt werden müssen (Wahrung der Eigeninteressen der Institutionen).

Erste Berechnungen deuten für Buchen-Altersklassenwälder einen Trend zur Unterschätzung des realen Zuwachses in den 1980/90-iger Jahren durch die Ertragstafelmodelle der Forsteinrichtung an (Abbildung 3.3). So lag die Ertragstafelprognose der Baumartengruppe Buche rund 25 % unter dem tatsächlichen Wachstum dieser Baumartengruppe. Das Wachstum der Fichtenbestände hingegen zeigte nur relativ geringe Abweichungen vom Ertragstafelmodell und lag in einigen Beständen sogar über der Ertragstafelprognose. Das jährliche Wachstum in den Dauerversuchsflächen wurde jedoch im hohen Maße durch das Durchforstungsregime und durch Schadereignisse (z.B. Trocknischebe 1964) beeinflusst, was, in Kombination mit der relativ geringen Anzahl an Standorten, die statistische Auswertung sehr erschwert. Die Auswertung der Daten der Dauerversuchsflächen wird im Rahmen des CarboEurope IP (DEMO Project) fortgesetzt werden und voraussichtlich Anfang 2006 abgeschlossen sein.

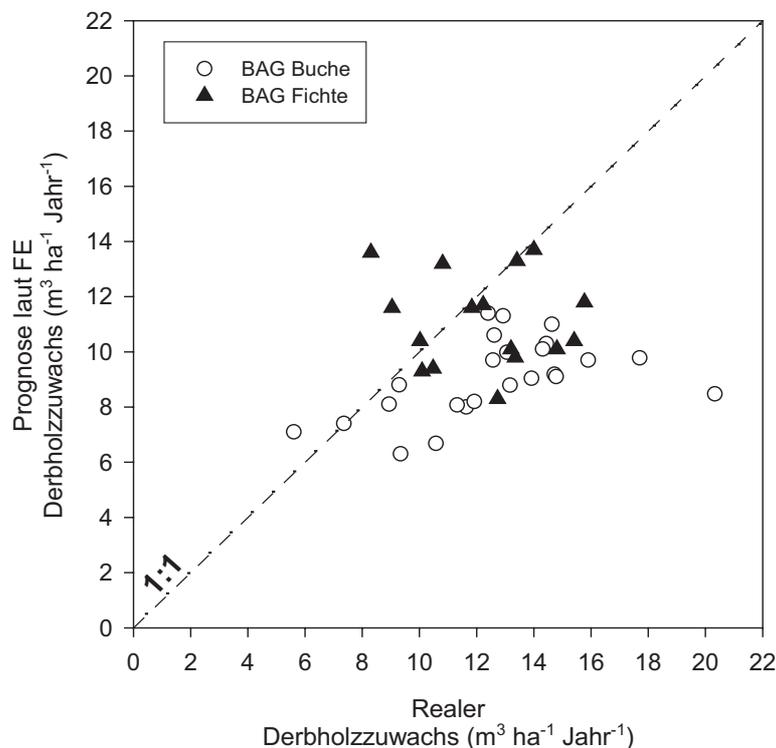


Abbildung 3.3: Vergleich der Derbolzzuwächse in den ertragskundlichen Versuchsflächen (Altersklassenwald) im Vergleich zu den Prognosen des Forsteinrichtungsprogrammes ABIES-FE. Die realen Zuwächse entsprechen den mittleren jährlichen Zuwächsen in den 1980-iger oder 1990-iger Jahren (letzte verfügbare Aufnahmeperiode). Die gestrichelte Linie entspricht einem Verhältnis von 1:1.

3.1.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

- In Kooperation mit der Landesforstanstalt Eberswalde und der TU Dresden wurden die Daten von 24 bereits bestehenden, ertragskundlichen Dauerversuchsflächen in Thüringen neu aktiviert und in eine gemeinsame Datenbank zusammengeführt. Hinzu kamen drei Dauerversuchsflächen, die im Rahmen des CarboEurope-IP und mit Unterstützung des vorliegenden Projektes eingerichtet wurden.
- Das Zurückgreifen auf vorhandene, langfristige Versuchsflächen bestehender Institutionen erlaubte eine Abschätzung der jüngsten Bestandeszuwächse und eine Analyse der Ergebnisse in Bezug auf die Bestandesentwicklung und forstliche Behandlung in der Vergangenheit. Dies ist ein großer Vorteil gegenüber neu angelegten Versuchsflächen, die erst in den nächsten Jahrzehnten Ergebnisse liefern würden.
- In 12 ausgewählten ertragskundlichen Versuchsflächen wurden Bodenleitprofile angelegt und beprobt. Alle Bodenanalysen werden in den kommenden zwei Jahren fertig gestellt und durch weitere Probenahmen in den noch fehlenden 12 Flächen ergänzt. Die Erhaltung und weitere fachliche Betreuung einer Auswahl der ertragskundlichen Versuchsflächen wird über einen Kooperationsvertrag zwischen der TLWJF und dem MPI-BGC gewährleistet.
- Die langfristigen ertragskundlichen Versuchsflächen in Thüringen decken noch nicht alle in Thüringen vorkommenden Waldstandorte ab. So sind die sehr armen (oligotrophen) Standorte, und die Substratgruppen „Silikatgestein (skelettarm)“ und „Sand/Sandstein“ unterrepräsentiert. Standorte der unteren Lagen und Kiefern- und Eichenwälder sind im Versuchsflächennetzwerk nicht vertreten. Aufgrund des hohen Betreuungsaufwandes und in Verbindung mit der Notwendigkeit, die Versuchsflächen langfristig zu sichern, wird eine Ausweitung des Versuchsflächennetzes nicht möglich sein. Hier wird man auf Daten und Modelle anderer Versuchsanstalten und Forschungsinstitute zurückgreifen müssen.
- Die Ergebnisse aller bisherigen Untersuchungen stehen zur Verfügung (Datenbank, Kontakt: M. Mund, MPI-BGC) und werden in das Promotionsprojekt von Herrn Wutzler (Kapitel 4) einfließen. Die Fortführung der im vorliegenden Projekt begonnenen Aktivitäten zur C-Bilanz Thüringer Wälder ist durch die Beteiligung der TLWJF und des MPI-BGC am CarboEurope-IP gesichert. So bilden die TLWJF und das MPI-BGC ein "Work package" mit dem Ziel, die Durchführbarkeit der Identifizierung anthropogen-induzierter Änderungen der C-Vorräte für einen möglichen C - Handel gemäß dem Kyoto-Protokoll auf Landesebene zu demonstrieren (<http://www.carboeurope.org/>, „DEMO“ project).

3.2 Stichprobeninventur im Revier Langula (Forstamt Mühlhausen) zur Quantifizierung von Holzzuwachs und -nutzung in strukturreichen, plenterwaldartig bewirtschafteten Buchenwäldern

3.2.1 Einleitung

Bislang stehen keine Daten und verlässlichen Modelle zur Abschätzung des aktuellen, jährlichen Zuwachses strukturreicher, ungleichaltriger (Misch-) Wälder zur Verfügung. Ohne diese Datenbasis ist jedoch eine laufende Fortschreibung der C-Vorräte strukturreicher Wälder, die durch die Überführung von Altersklassenwäldern in naturnahe Wälder in Thüringen und in Deutschland eine immer größer werdende Bedeutung erlangen werden, nicht möglich. Daher wurde im Rahmen des vorliegenden Projektes eine wiederholte Stichprobeninventur (permanente Kontrollstichprobe) in plenterartig bewirtschafteten Buchenwäldern des Hainichs, Revier Langula, durchgeführt. Mit der Wiederholung der Stichprobeninventur nach 10 Jahren an genau den gleichen Messpunkten und Bäumen mit der gleichen Methode und einem sehr dichten Stichprobennetz von 100 x 100 m (insgesamt 1119 Punkte, Probekreisgröße zwischen 25 m² (2,8 m Radius für Bäume mit BHD 7-19 cm) und 500 m² (12,6 m Radius für Bäume mit BHD ≥ 30 cm) war es möglich, die mittleren Zuwächse und die Holznutzung der strukturreichen Buchenwälder über die letzten 10 Jahre zu quantifizieren.

Die Erstaufnahme des Revieres erfolgte 1994 im Auftrag der TLWJF durch Frau B. Winterhoff und Herrn M. Storch (Winterhoff und Storch 1994). Die Planung und Durchführung der Geländeaufnahmen der zweiten Inventur im Frühjahr 2004 und die Dateneingabe leitete Herr T. Erteld (TLWJF, Referat Forsteinrichtung). Mitarbeiter der TLWJF, des MPI-BGC und des Forstamtes Mühlhausen führten die Messungen im Gelände durch. Unter Leitung von Herrn Gleichmar (TLWJF, Referat EDV-Entwicklung) wurden die Daten der zweiten Inventur auf Plausibilität geprüft, und es wurde speziell für die Stichprobeninventur eine ACCESS-Datenbank entwickelt. Die ertragskundliche Auswertung des zweiten Inventurdatensatzes und die Neuberechnung der ersten Inventur zwecks Harmonisierung erfolgten durch die OGF GmbH (Ostdeutsche Gesellschaft für Forstplanung, NL Sachsen) unter Leitung von Herrn D. Gerold und Herrn S. Richter.

Im Folgenden werden die für eine Quantifizierung und Fortschreibung von C-Vorräten in strukturreichen Wäldern relevanten Ergebnisse der Stichprobeninventur vorgestellt. Weitere ertragskundliche Details finden sich im Abschlussbericht zur Auswertung der Inventur (Gerold und Richter 2004), der bei Herrn T. Erteld (TLWJF) angefragt werden kann. Publikationen in international anerkannten Fachzeitschriften sind für die ertragskundlichen und waldbaulichen Aspekte und für die waldwachstums- und standortkundlichen Aspekte der Stichprobeninventur Langula in Vorbereitung.

3.2.2 Inventurgebiet

3.2.2.1 Naturraum und Standorte

Im Revier Langula kommen auf großer Fläche plenterartig bewirtschaftete Buchenwälder (*Fagus sylvatica*) vor. Neben dem Strukturreichtum sind diese Wälder durch die Beimischung anderer Laubbaumarten wie Gemeine Esche (*Fraxinus excelsior*), Bergahorn (*Acer pseudoplatanus*), Spitzahorn (*A. platanooides*), Rüster (*Ulmus glabra*), Hainbuche (*Carpinus betulus*), Wilde Kirsche (*Prunus avium*) und Elsbeere (*Sorbus torminalis*) gekennzeichnet. Vor ca. 140 Jahren ist damit begonnen worden, die Wälder von Mittelwald in Hochwald zu überführen (Mund 2004). Nicht alle Forstabteilungen (Waldbestände) weisen eine Durchmesservertelung auf, die für einen idealen Plenterwald gewünscht wird (Schütz 2001, Biehl und Fritzlär 2003). Es kommen vielmehr alle Entwicklungsstadien von einem nahezu einschichtigen Bestand bis hin zu struktur- und artenreichen Plenterwäldern vor.

Das Revier Langula liegt im zentralen Teil des Höhenzuges Hainich. Der Hainich bildet den westlichen Teil des Muschelkalkringes um das Thüringer Becken. Er verläuft in nordwestlich-südöstlicher Richtung und erreicht Höhen zwischen 250 m im Nordosten und 450 m im Südwesten.

Das Grundgestein aller Waldstandorte des Untersuchungsgebietes ist Muschelkalk, der mit Ausnahme von einigen stark exponierten Bereichen von verlehnten Löß überdeckt ist. Die Mächtigkeit der pleistozänen Lößdecken beträgt zwischen 10 und 100 cm.

Braunerden, Parabraunerden, Terra fuscen und Rendzinen sind die am häufigsten anzutreffenden Bodentypen. Die Humusformen sind Mull und mullartiger Moder.

Das Klima ist subatlantisch mit schwacher kontinentaler Ausprägung. Es sind die Klimastufen „mittlere“ bis „sehr feuchte“ untere Berglagen und Hügelland vertreten (Tabelle 3.3).

Tabelle 3.3: Im Untersuchungsgebiet vorkommende Klimastufen. (U: untere Berglagen und Hügelland, ff: sehr feucht, f: feucht, m: mäßig feucht bis mäßig trocken)

Klimastufe	Flächenanteil (%)
Uff	48
Uf	50
Um	2

Die häufigsten Standortseinheiten sind „Mäßig frische reiche Karbonatgesteins-Standorte“ (RC2; 48 %), „Mäßig frische reichere Schlufflehm-Standorte“ (RLI2; 32 %) und „Mäßig frische reiche Kalkton-Standorte“ (RCT2; 10 %) (siehe auch Tabelle 3.7). Weitere 9 Standortseinheiten nehmen Flächenanteile von jeweils unter 5 % ein.

Der Hainich liegt im Verbreitungsgebiet der anspruchsvollen Buchenwälder des Hügellandes und des mittleren Berglandes. Danach dominiert im Revier Langula das Lathyro-Fagetum. Auf den

höchsten Erhebungen wird durch Zwiebelzahnwurz und Waldschwingel der Grenzbereich zu den montanen Buchenwäldern angezeigt. Wärmebegünstigte Hangpartien bilden den Übergang zum Orchideen-Buchenwald.

3.2.2.2 Waldgenossenschaften

Das „Revier Langula“, nachfolgend als Gesamtbetrieb bezeichnet, beinhaltet die Waldflächen von drei Waldgenossenschaften (auch Laubgenossenschaften genannt): (1) Oppershausen, (2) Grossengottern und (3) Langula. Laut Auskunft des Forstamtes Mühlhausen vom 14.06.2004 ergaben sich zum 01.01.2001 die in Tabelle 3.4 dargestellten Flächen der drei Waldgenossenschaften.

Tabelle 3.4: Fläche der Waldgenossenschaften zum Stand 01.01.2001.

Waldgenossenschaft	Gesamtfläche [ha]	Holzbodenfläche [ha]
Oppershausen	254,05	253,87
Grossengottern	281,97	277,97
Langula	611,42	605,76
Gesamtbetrieb	1147,44	1137,60

Um die Vergleichbarkeit der ersten und zweiten Stichprobeninventur zu gewährleisten, wurde ausgehend von einem 100 m x 100 m - Gitternetz eine Holzbodenfläche des Gesamtbetriebes mit 1119 Stichproben bzw. von 1119 Hektar festgelegt. Die Stichprobenpunkte wurden nur dann aufgenommen, wenn das Zentrum des Punktes innerhalb des Waldes lag. Die resultierenden Holzbodenflächen der Waldgenossenschaften, die allen folgenden Berechnungen zugrunde liegen, sind in Tabelle 3.5 aufgelistet.

Tabelle 3.5: Holzbodenflächen der Waldgenossenschaften gemäß des 100 m x 100 m – Gitternetzes der Stichprobeninventur.

Waldgenossenschaft	Holzbodenfläche [ha]
Oppershausen	250
Grossengottern	270
Langula	599
Gesamtbetrieb	1119

3.2.3 Aufnahmeanweisung

Nach mehreren Vorabsprachen zwischen der TLWJF, dem MPI-BGC, der OGF und Frau Winterhoff (Verantwortliche der 1. Stichprobeninventur) im November und Dezember 2003 wurde im Januar 2004 von der TLWJF (Referat Forsteinrichtung) eine Aufnahmeanweisung mit

Stichtag 01.01.2004 erarbeitet. Die Außenaufnahmen wurden von Februar bis April 2004 mit Einverständnis der Waldbesitzer für Forschungszwecke durchgeführt. Die ausführliche Aufnahmeanweisung 2004 und das Aufnahmeformular können bei der TLWJF, Herr T. Erteld, angefragt werden. Im Folgenden werden nur die wichtigsten Anweisungen kurz vorgestellt.

Die Stichprobeninventuren erfassten in konzentrischen Kreisen alle Bäume über 20 cm Höhe in Abhängigkeit von ihrem Brusthöhendurchmesser (BHD) (Tabelle 3.6). In den Formularen für die Aufnahmen 2004 waren Informationen aus der Inventur 1994, wie z.B. Baumnummer, Baumart, Azimut, Entfernung, BHD, Höhe bereits vorgedruckt. Dies erleichterte das Auffinden der Stichprobenpunkte und Erkennung der Probebäume im Gelände erheblich.

Tabelle 3.6: Probekreisgrößen im Revier Langula 1994 und 2004.

BHD [cm]	Probekreisgröße [m ²]	Radius [m]
≥ 30,0	500	12,62
20,0 – 29,9	200	7,98
7,0 – 19,9	100	5,64
Verjüngung: BHD ≤ 6,9 und Höhe > 20	25	2,82

Der Abstand der Stichprobenpunkte betrug bei einem quadratischem Gitternetz jeweils 100 m x 100 m. Stichprobenpunkte wurden nach Norden bzw. Süden verschoben, wenn sie auf einem befestigten Weg lagen. Bei der zweiten Inventur mit Stichtag 01.01.2004 wurden alle Probekreise erfasst, die bereits 1994 aufgenommen wurden. Insgesamt wurden 1119 Stichprobenpunkte auf Holzboden erfasst, wobei sich während der Auswertung der Punkt Nr. 177 als nicht auswertbar herausstellte, so dass 1118 Punkte zur Auswertung herangezogen wurden. Das Gitternetz und die Stichprobenpunkte wurden vor der Außenaufnahmen auf einer Karte dargestellt. Zusätzlich wurde die Position aller Punkte im Revier mittels GPS Messungen bestimmt (Kartenmaterial liegt in der TLWJF, Ansprechpartner Herr T. Erteld, vor).

Bei der Wiederholungsinventur 2004 wurden die Parameter Kronenansatz, Kronenform, Schaftform, Astigkeit und Güteerkmale, die 1994 erfasst wurden, nicht mehr aufgenommen. An ihre Stelle trat die Messung des Durchmessers in 7 m Höhe (D7) und eine Inventur des Totholzes. Baumschäden wurden 2004 in Anlehnung an die Arbeitsanweisung für die Forsteinrichtung in Thüringen (AFT 98) erfasst.

Eine wesentliche Erweiterung der zweiten Inventur bestand darin, dass die Höhen aller Probebäume mit einem BHD von ≥ 7 cm gemessen wurden (9280 Höhenmessungen). Bei der Erstinventur 1994 wurden repräsentativ an jedem Punkt nur 2 bis 3 Höhen (3586 Messungen) gemessen. Diese umfangreichen Höhenmessungen wurden durchgeführt, (1) um in Zukunft eine mögliche Änderung des Höhenwachstums, welche im Vergleich zur Streuung der

Baumhöhen relativ klein sein wird, nachweisen zu können, und (2) um einen umfassenden Datensatz zur Parametrisierung von Waldwachstumsmodellen für strukturreiche Wälder bereit zu stellen.

3.2.4 Datenkontrolle

Die Datenkontrolle umfasste folgende Teilschritte:

- Die Brusthöhendurchmesser der Einzelbäume von 1994 und 2004 wurden auf „negative Durchmesserzuwächse“ überprüft. Im Falle größerer negativer Abweichungen wurden die Messungen 2004 im Gelände überprüft.
- Die Höhen von Probebäumen, die außerhalb der dreifachen Streuung um die Höhenkurve von 1994 lagen, wurden vor Ort ebenfalls nachgemessen.
- An diese Überprüfungen vor Ort schloss sich eine Plausibilitätsüberprüfung mit dem Auswerteprogramm für Betriebsinventuren der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Abteilung Biometrie und Informatik (Stand: 21.05.2002) an. Gravierende Inkonsistenzen wurden nicht festgestellt.

3.2.5 Methodik der Auswertung

3.2.5.1 Auswertungsprogramm der Betriebsinventur

Die ertragskundliche Auswertung der Stichprobeninventuren erfolgte mit dem Auswertungsprogramm für Betriebsinventuren der Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Abteilung Biometrie und Informatik. Die gesamte Auswertung erfolgte mit der Programmversion vom 21.05.2002. Diese Version arbeitet noch mit dem Betriebssystem DOS. Die neue WINDOWS-Version lag im Frühjahr 2004 noch nicht vor. Das Programm stellt für den Anwender eine Reihe von Wahlmöglichkeiten hinsichtlich Inventurverfahren sowie Höhen- und Volumenberechnung zur Verfügung und erlaubt die Dokumentation der verwendeten Schlüssel.

Folgende Berechnungsverfahren wurden für die Stichprobeninventur Langula definiert:

- **Baumhöhen:** Die Höhen der 1994 nicht gemessenen Probebäume wurden mit dem im Programm hinterlegten Einheitshöhenkurven-Modell berechnet. Alle gemessenen und berechneten Höhen waren Grundlage der Volumenberechnungen.
- **Volumenberechnung:** Für alle Probebäume wurde auf der Grundlage der gemessenen Durchmesser sowie der gemessenen oder berechneten Baumhöhen das Einzelbaumvolumen berechnet. Grundlage dazu sind die im Auswertungsprogramm hinterlegten baumartenspezifischen „Schaftkurvengleichungen“. Diese wurden 1988 von der FVA in Freiburg für die Bundeswaldinventur entwickelt („Verfahrens- und Programmbeschreibung zum BWI- Unterprogramm BDAT“; Hradetzky *et al.* 1986). Beim Laubholz ist das Astderbholz in die „Schaftkurve“ integriert, so dass in der vorliegenden Studie das Holzvolumen dem Vorratsfestmeter an Derbholz mit Rinde (= Derbholzvolumen mit

Rinde; Dh m. R.) entspricht. Obwohl die Durchmesser in 7 m Schafthöhe (D7) an jedem 4. Probepunkt in Langula erhoben wurden, wurden sie zunächst nicht zur Spezifizierung der Schaftkurvengleichungen für das Inventurgebiet verwendet.

- **Bestandesschichten:** Obwohl in Plenterwäldern keine klare vertikale Schichtung vorliegt, verlangt das Auswerteprogramm der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg eine Zuordnung der Probebäume zu Bestandesschichten. Bei der Auswertung 1994 wurden deshalb alle Bäume mit einer Höhe über 20 cm dem „Hauptbestand“ zugeordnet und mit der Betriebsart „PW“ für Plenterwald gekennzeichnet. Dieses, für strukturreiche Wälder plausible Vorgehen führte jedoch dazu, dass keine Analyse der Verjüngung erfolgen konnte. Hinzu kam, dass Schichten- und Baumartenanteile im Auswertungsprogramm als Überschirmungsgrade aufgefasst und über Standflächen ermittelt werden. Die Standfläche ist eine Funktion der Kreisfläche eines Baumes in Brusthöhe. Standflächen werden aber nur für den Hauptbestand berechnet. Da 1994 alle Bäume als Hauptbestand definiert wurden, ergeben sich sehr hohe Überschirmungsgrade (z.B. 1,5 bis 2,5) und die Baumartenanteile nach Fläche und Vorrat sowie die flächenbezogenen Vorräte usw. sind schwer interpretierbar. Um den „Zwang“ zur Definition von Schichten für die Plenterwälder konstruktiv zu lösen, wurden bei der aktuellen Auswertung dem Hauptbestand alle Bäume mit einem BHD ≥ 7 cm zugeordnet. Die Kennung erfolgte mit der Betriebsart „PW“. Für den Hauptbestand wurden Standflächen, Baumartenanteile und Vorräte berechnet. Der Nebenbestand („NV“) umfasste alle Bäume von 20 cm Höhe bis zu einem BHD von 6,9 cm und wurde als überschirmt angenommen. Unter Beachtung dieser Vorgaben wurde die Inventur von 1994 neu berechnet. Die wichtigsten, quantitativen Ergebnisse der ersten Inventur, wie zum Beispiel der Gesamtvorrat des Revieres Langula von 391 m³ Derbholz ha⁻¹ im Jahr 1994, haben sich durch die Neuberechnung nicht verändert.

Weitere Details zur Dateneingabe, Festlegung von Betriebsverzeichnissen, Schlüsseln, und länderspezifischen Einstellungen und zur Erzeugung von Berechnungsgrundlagen können dem Abschlussbericht von Gerold und Richter (2004) entnommen werden.

3.2.5.2 Bildung von Auswertungseinheiten und Auswertemasken

Für die Auswertung der zweiten Stichprobeninventur wurde der Gesamtbetrieb in zwei Gruppen von Befundeinheiten unterteilt: (1) Waldgenossenschaften (Besitzverhältnisse) (Tabelle 3.4) und (2) Standortskategorien (forstliche Standortverhältnisse) (Tabelle 3.7). Die im Revier Langula vorkommenden Standortseinheiten wurden zu Standortskategorien zusammengefasst, da neun der 12 Standortseinheiten Flächenanteile von unter 5 % aufwiesen und somit nicht durch eine Stichprobeninventur im Raster von 100 m x 100 m repräsentiert werden konnten.

Tabelle 3.7: Standortseinheiten und Standortskategorien im Revier Langula.

Standortseinheiten			Standortskategorien	
Bezeichnung	Abk.	Anzahl an Stichprobenpkt. (Flächenanteil [%])	Bezeichnung	Flächenanteil [%]
FrISChe reichere Tal-Standorte	BRL3	8 (< 1)	Reicherer Lehm / Lösslehm	36,5
FrISChe reichere Schlufflehm-Standorte	RLL1	32 (3)		
Mäßig frISChe reichere Schlufflehm-Standorte	RLL2	362 (32)		
FrISChe reichere Lehm-Standorte	RL1	4 (< 1)		
Mäßig frISChe reichere Lehm-Standorte	RL2	2 (< 1)		
Mäßig frISChe reiche Kalkton-Standorte	RCT2	108 (10)	Reicherer Kalkton	9,9
Mäßig trockene reiche Kalkton-Standorte	RCT3	3 (< 1)		
FrISChe reiche Karbonatgesteins-Standorte	RC1	11 (< 1)	Reicheres Karbonatgestein	53,6
Mäßig frISChe reiche Karbonatgesteins-Standorte	RC2	533 (48)		
Schutzwaldartige mäßig frISChe reiche Karbonatgesteins-Standorte	RC2U	3 (< 1)		
Mäßig trockene reiche Karbonatgesteins-Standorte	RC3	50 (5)		
Schutzwaldartige mäßig trockene Karbonatgesteins-Standorte	RC3U	2 (< 1)		

Folgende Baumartengruppen wurden unterschieden: Fichte, Tanne, Douglasie, Kiefer/Lärche, sonstige Nadelbäume, Buche, Ahorn/Esche, Eiche, Pappel/Erle/Weide, sonstige Laubbäume. Die Durchmesserklassen sind in Tabelle 3.8 angegeben. Da es sich bei den untersuchten Wäldern um ungleichaltrige Bestände handelte, stellten Altersklassen keine Auswerteeinheiten dar.

Tabelle 3.8: Grenzen der Durchmesserklassen.

Durchmesserklasse	Grenzen [cm]	Holzstärkeklasse
I	7,0-9,9	Schwachholz
II	10,0-14,9	
III	15,0-19,9	
IV	20,0-24,9	
V	25,0-29,9	Mittelholz
VI	30,0-34,9	
VII	35,0-39,9	
VIII	40,0-44,9	
IX	45,0-49,9	Starkholz
X	50,0-54,9	
XI	55,0-59,9	
XII	60,0-64,9	
XIII	≥ 65,0	

3.2.5.3 Abschätzung der Kohlenstoffbilanz

Zur Umrechnung des Bestandes-Derbholzvolumens mit Rinde in Kohlenstoffvorräte der Dendromasse wurde ein mittlerer Biomasse-Expansions-Konversions-Faktor von 0,39 verwendet (Gleichung 7.1). Dieser Faktor ergab sich aus Biomasseabschätzungen für drei Versuchsflächen im Revier Langula, die über Biomasseregressionen für Buche auf Einzelbaumebene nach Wirth *et al.* 2003 berechnet wurden, und anhand von holz-, blatt- und feinwurzelspezifischen C-Konzentrationen (Mund 2004). Die Regressionen für die Biomasse beinhalteten u. a. das Baumalter als unabhängige Variable. Daher wurde das Alter der Bäume in den drei Versuchsflächen über eine Beziehung zwischen Baumalter und Baumvolumen von Erntebäumen im Revier Langula abgeleitet (Mund 2004).

Gleichung 7.1:
$$C_{\text{Bestand}} = V_{\text{Dh}} * 0,39$$

mit: C_{Bestand} = C-Vorrat in der Dendromasse des Bestandes [tC ha⁻¹]
 V_{Dh} = stehendes Derbholzvolumen m.R. [m³ ha⁻¹]

Die Netto-Vorratsänderung ergab sich aus der Differenz zwischen den Vorräten der 1. Inventur 1994 und den Vorräten der 2. Inventur 2004. Da sich die erste Inventur bis zum Sommer 1994 erstreckte, und die 2. Inventur bereits im April 2004 abgeschlossen werden konnte, betrug der mittlere Zeitraum zwischen den Inventuren rund 9,5 Jahre. Die Nutzung ergab sich aus dem Vorrat der 1014 ausgeschiedenen Bäume zum Zeitpunkt 1994, ergänzt um einen durchschnittlichen, 5-jährigen Zuwachs von 42,5 m³ ha⁻¹ (Gleichung 7.2).

Gleichung 7.2:
$$N_{Dh} = V_{Dh,aussch.} + 5 * I_{Dh}$$

mit: N_{Dh} = Nutzung Derbholzvolumen m.R. [$m^3 ha^{-1} 9,5 Jahre^{-1}$]

$V_{Dh,aussch.}$ = Derbholzvolumen m.R. des ausscheidenden Baumes im Jahr 1994 [$m^3 ha^{-1}$]

I_{Dh} = jährlicher Zuwachs an Derbholz m. R. [$m^3 ha^{-1} Jahr^{-1}$]

Der laufende Zuwachs ergab sich aus der Vorratsdifferenz zwischen 1994 und 2004 und dem Nutzungsvolumen (Gleichung 7.3).

Gleichung 7.3:
$$I_{Dh} = (V_{Dh,1994} - V_{Dh,2004}) / t + N_{Dh} / t$$

mit: I_{Dh} = jährlicher Zuwachs an Derbholz m.R. [$m^3 ha^{-1} Jahr^{-1}$]

V_{Dh} = stehendes Derbholzvolumen m.R. [$m^3 ha^{-1}$]

t = Zeitraum zwischen den Inventuren [9,5 Jahre]

N_{Dh} = Nutzung Derbholzvolumen m.R. [$m^3 ha^{-1} 9,5 Jahre^{-1}$]

Die Umrechnung von Volumeneinheiten der Nutzung, des Zuwachses und des akkumulierten Derbholzvorrates in C-Mengen der Dendromasse erfolgte wie in Gleichung 7.1 über den Biomasse-Expansions-Konversions-Faktor 0,39.

Die Netto-Akkumulation von Biomasse-C-Vorräten und der Bestandeszuwachs beinhalten gemäß dieser Umrechnung und auch in der Realität Ast-, Blatt- und Wurzelbiomasse. Die Nutzung beinhaltet in der Realität jedoch nur das ausscheidende Derbholz. Eine Abschätzung der ausscheidenden, nutzbaren C-Mengen im Derbholz ergibt sich aus Gleichung 7.4.

Gleichung 7.4:
$$C_{Dh,aussch.} = N_{Dh} * Dichte * C_{conc.} / 1000$$

mit: $C_{Dh,aussch.}$ = C-Menge des ausscheidenden Derbholzes [$tC ha^{-1} Jahr^{-1}$]

N_{Dh} = Nutzung Derbholzvolumen m.R. [$m^3 ha^{-1} Jahr^{-1}$]

Dichte = Raumdichte des Holzes [$558 kg m^{-3}$]

$C_{conc.}$ = Holz-C-Konzentration [$0,5 g g^{-1}$]

Die Differenz zwischen „ausscheidender Dendromasse“ und „ausscheidendem Derbholz“ entspricht den Wurzeln, Blättern und Ästen < 7 cm, die als Totholz und Streu im Wald verbleiben. Der Teil des Derbholzes, der zwar eingeschlagen wurde, aber aus Rentabilitätgründen weder vom Forst noch von Selbstwerbern abtransportiert wird und damit ebenfalls im Wald verbleibt, kann nur anhand der Vollzugsbuchung des Forstamtes abgeschätzt werden (Kapitel 3.2.6.3).

Die Umrechnung des Totholzvolumens erfolgte unter der Annahme, dass das Holz eine mittlere Holzdichte von $310 kg m^{-3}$ und eine mittlere C-Konzentration von $0,50 g g^{-1}$ aufwies (Mund 2004).

3.2.6 Ergebnisse

3.2.6.1 Baumartenanteile

Von 1994 bis 2004 ist der Flächenanteil der Buche im Gesamtbetrieb von 88,5 % auf 86,9 % zurückgegangen. Bezogen auf den Vorrat zeigte sich ein ähnlicher Trend (Rückgang von 92,1 % auf 90,2 %). Demgegenüber stieg der Anteil von Esche und Ahorn flächenbezogen von 6,6 % auf 7,8 % und vorratsbezogen von 4,8 % auf 5,8 % an. Die Entwicklung der Baumartenverteilung war bei den einzelnen Waldgenossenschaften ähnlich. Nadelhölzer nahmen nur einen Flächenanteil von unter 2 % ein.

3.2.6.2 Stammzahlverteilung und Bestandesgrundfläche

Die Häufigkeitsverteilung der Durchmesser (= Stammzahlverteilung) zeigt den für Plenterwälder üblichen exponentiell abklingenden Verlauf (Abbildung 3.4). Sie hat sich zwischen 1994 und 2004 kaum verändert. Der geringere Wert in der Durchmesserklasse 7,5 cm im Jahr 2004 hängt damit zusammen, dass 1994 alle Bäume über einem BHD von 5 cm zum Hauptbestand gezählt wurden, während 2004 alle Bäume kleiner als 7 cm dem Nebenbestand zugeordnet wurden (Kapitel 3.2.5). Die Stammzahlverteilung der einzelnen Waldgenossenschaften und der drei Standortskategorien waren ähnlich.

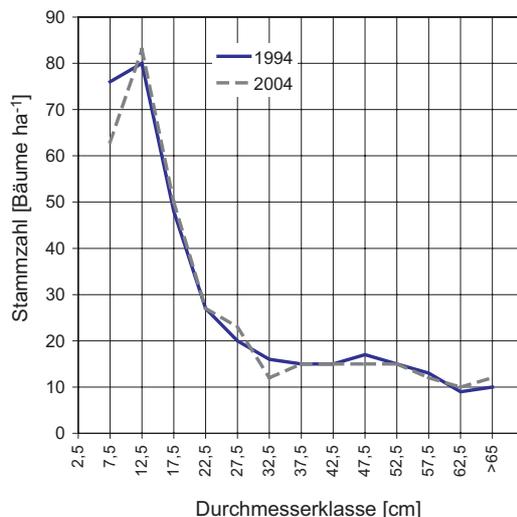


Abbildung 3.4: Stammzahlverteilung (alle Baumarten im Hauptbestand) des Gesamtbetriebes Langula.

Die forstlichen Bestandeskennziffern Grundfläche und Stammzahl pro Hektar haben sich zwischen 1994 und 2004 ebenfalls kaum geändert (Tabelle 3.9). Diese Konstanz der Bestandesstruktur über die Zeit ist typisch für plenterartig bewirtschaftete Wälder.

Tabelle 3.9: Bestandesgrundfläche und Stammzahl des Gesamtbetriebes Langula 1994 und 2004.

Bestandeskennziffer	1994	2004
Grundfläche [m ² ha ⁻¹]	25,5	26,9
Stammzahl [Bäume ha ⁻¹]	360	353

B) Zuwachs, Nutzung und Netto-C-Akkumulation im Bestand.

Befundeinheit	Zuwachs	Nutzung	Netto-C-Akkumulation
	Derbholz m.R. [$\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{Jahr}^{-1}$]		
LG Oppershausen	9,6	7,8	1,8
LG Grossengottern	8,7	6,7	2,0
LG Langula	8,4	6,8	1,6
Reicherer Lehm/Lösslehm	9,2	7,1	2,1
Reicheres Carbonatgestein	8,5	6,9	1,6
Reicherer Kalkton	8,6	7,4	1,3
Mittel Gesamtbetrieb	$8,7 \pm 0,14$ (3,2 %)	7,0	1,7
	Dendromasse (in Klammern: nur Derbholz m.R.) [$\text{tC ha}^{-1} \text{Jahr}^{-1}$]		
LG Oppershausen	3,8	3,1 (2,2)	0,7
LG Grossengottern	3,4	2,6 (1,9)	0,8
LG Langula	3,3	2,6 (1,9)	0,6
Reicherer Lehm/Lösslehm	3,6	2,8 (2,0)	0,8
Reicheres Carbonatgestein	3,3	2,7 (1,9)	0,6
Reicherer Kalkton	3,4	2,9 (1,9)	0,5
Mittel Gesamtbetrieb Langula	3,4	2,7 (2,1)	0,7
Thüringen, 1993-1999 (Wirth <i>et al.</i> 2003)	2,5-3,2	2,2	0,3-1,0

Die geringen Totholzvorräte von nur $6 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ bzw. $0,9 \text{ tC ha}^{-1}$ ($\sim 1,5 \%$ des stehenden Holzes) entsprechen den mittleren Vorräten bewirtschafteter Buchenwälder Europas (Mund 2004), und zeigen, dass ein Großteil des Schlagabraumes genutzt und abgefahren wird. Der Zusammenhang zwischen Restholzverwertung (Brennholznutzung) durch Selbstwerber und den geringen Totholzvorräte in Thüringen wurde bereits von Wirth *et al.* 2003 diskutiert.

Für die WG Oppershausen wurden die höchsten Zuwächse ($9,6 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{Jahr}^{-1}$) und die höchste Nutzungsmenge ($7,8 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{Jahr}^{-1}$) verzeichnet. Zuwachs und Nutzung der beiden anderen Waldgenossenschaften unterschieden sich kaum ($\sim 8,6 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{Jahr}^{-1}$ bzw. $6,8 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{Jahr}^{-1}$, Tabelle 3.10).

Im Vergleich zu den Unterschieden zwischen den Waldgenossenschaften sind die Differenzen zwischen Zuwachs oder Nutzung der verschiedenen Standorte gering ($\leq 0,7 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$). Diese Beobachtung läßt sich nur durch mehrere, interagierende Faktoren erklären. So weisen die ähnlichen absoluten Werte von Zuwachs und Nutzung der einzelnen Standortskategorien im Vergleich zu den drei Waldgenossenschaften (Tabelle 3.10) darauf hin, dass die reicheren Lehm/Lösslehm-Standorte (relative hohe Wasserverfügbarkeit) in der WG Oppershausen, die reicheren Kalktone (mittlere Wasserverfügbarkeit) in der WG Grossengottern und die reicheren

Carbonatgesteine (geringe Wasserverfügbarkeit) in der WG Langula überwiegen. Ein Vergleich der Anteile der Standortseinheiten innerhalb der Waldgenossenschaften bestätigt diese ungleiche Verteilung zwischen den Waldgenossenschaften (Abbildung 3.5). Wenn allein die Verteilung der Standortseinheiten die Wachstumsunterschiede zwischen den Waldgenossenschaften erklären würde, dürften die Unterschiede zwischen den Waldgenossenschaften nicht höher sein als die zwischen den Standortseinheiten. Wahrscheinlich verstärken unterschiedliche Bewirtschaftungsweisen der Waldgenossenschaften die Standortsunterschiede. So könnte in der WG Oppershausen das relativ hohe Wachstum auf den reicheren Lehm/Lößlehmstandorten durch eine hohe Nutzung besonders gefördert werden, während auf den ungünstigeren Standorten des Carbonatgesteins und der Kalktone aus Stabilitäts- und Kostengründen eher eine zurückhaltende Nutzung erfolgt. Es wäre zudem aber auch möglich, dass die ausgewählten Standortseinheiten/-kategorien die wachstumlimitierenden Faktoren, wie Wasserhaushalt oder aktuelle Stickstoffversorgung, nicht ausreichend widerspiegeln.

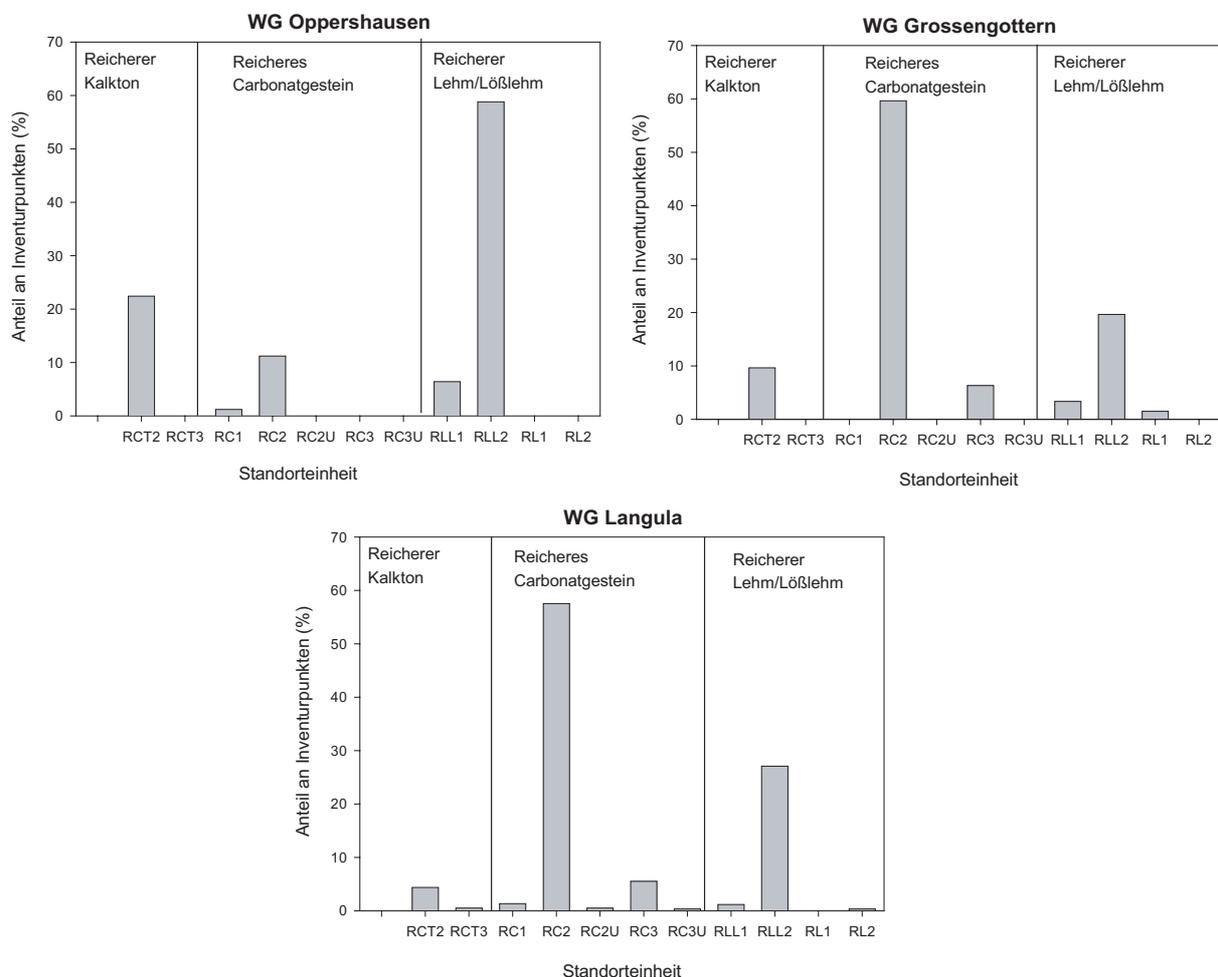


Abbildung: 3.5: Flächenanteile der Standortseinheiten in den Waldgenossenschaften.

Die für den Gesamtbetrieb Langula beobachtete Netto-C-Akkumulation von $0,7 \text{ tC ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ liegt im mittleren Bereich der Abschätzungen für ganz Thüringen (Wirth *et al.* 2003); Bilanz-Methode $0,3 \text{ tC ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$, Deltamethode $1,0 \text{ tC ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$). Der mittlere jährliche Entzug von

Kohlenstoff aus dem Ökosystem Wald durch die Entnahme von Derbholz lag bei rund $2,1 \text{ tC ha}^{-1}$.

Der Vergleich von laufendem Zuwachs und Nutzung (inkl. nicht verlohntes Derbholz (nvD-Holz) und nicht verwertbares Stammholz $> 7 \text{ cm}$ Durchmesser (X-Holz)) je Durchmesserklasse bestätigt die für Plenterwälder übliche Nutzungsstrategie (Abbildung 3.6). Der Zuwachs ist über alle Durchmesserklassen gleichmäßig verteilt, während die Nutzung auf die stärksten Stämme (BHD $> 55 \text{ cm}$) konzentriert ist. Diese Verteilung von Zuwachs und Nutzung bedingt die aus betrieblicher Sicht gewünschte, langfristige Konstanz der Erntemengen und Qualitäten und verhindert letztendlich auch die starken Schwankung der C-Bilanz von Wäldern, wie sie für Altersklassenwälder typisch ist (Altersklasseneffekt, Wirth *et al.* 2003, Mund 2004).

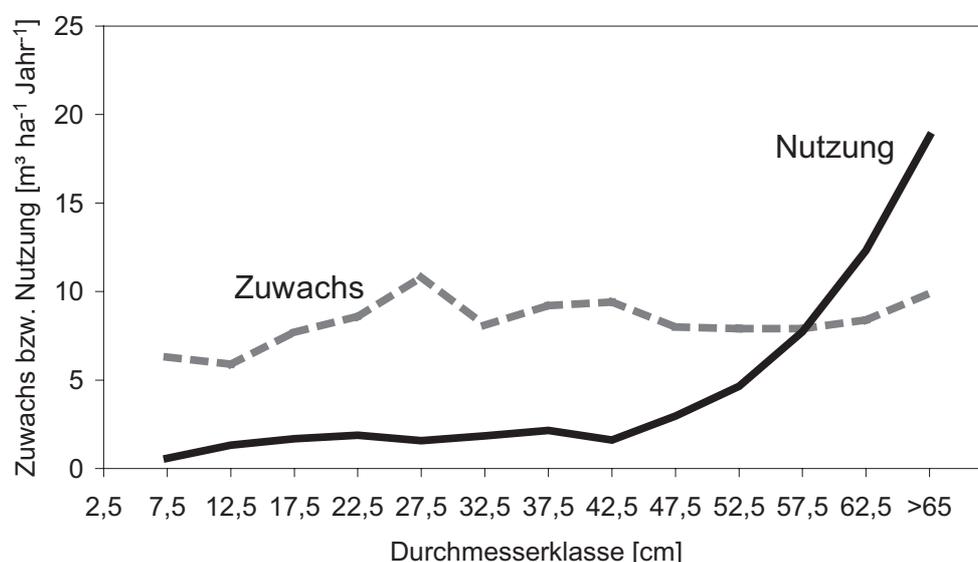


Abbildung 3.6: Gegenüberstellung von Zuwachs und Nutzung 1994 bis 2003 für den Gesamtbetrieb Langula.

Eine Verifizierung der Ergebnisse zur Holznutzung zwischen 1994 und 2004 ist durch einen Vergleich mit der Vollzugsbuchung aus dem forstlichen Informationssystem (FIS) des Forstamtes Mühlhausen möglich. Es zeigte sich, dass aus der wiederholten Stichprobeninventur etwas höhere Nutzungsmengen (zwischen 4 und 14 %) resultierten als in der amtlichen Statistik aufgeführt (Tabelle 3.11).

Die Differenz zwischen der Nutzungsmenge Derbholz ermittelt über die Stichprobeninventur, und dem gebuchten Holzeinschlag mit nvD- und X-Holz von $538 \text{ Efm Betrieb}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ ($\sim 10 \%$) spiegelt wahrscheinlich Rinden- und Schnittverluste wider, die durch die vereinfachte Umrechnung von Vfm m.R. in Efm m.R. (Annahme: 15,4 % Ernteverluste; Wiedemann 1931) nicht berücksichtigt sind (Tabelle 3.11). Die Differenz zwischen Einschlag mit und ohne nvD- und X-Holz (rund $900 \text{ Efm Betrieb}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$, $\sim 16 \%$) entspricht zudem der Menge an Derbholz, die zunächst als unverkäufliches Holz im Wald verbleibt. Die geringen Totholz mengen ($6684 \text{ m}^3 \text{ Dh m.R. Betrieb}^{-1}$) zeigen jedoch, dass das Restholz größtenteils durch Brennholzseltwerber

genutzt wird (Kapitel 3.2.6.3). Eine genaue Quantifizierung der Brennholznutzung ist anhand der verfügbaren Daten nicht möglich.

Tabelle 3.11: Vergleich der mittleren Nutzungsmengen zwischen 1994 und 2004 gemäß vorliegender Stichprobeninventur und laut Forstamtsstatistik (Forstamt Mühlhausen, D. Fritzlar, mündliche Mitteilung).

nvD-Holz: nicht verlohntes Derbholz; X-Holz: nicht verwertbares Stammholz > 7cm Durchmesser. Die Umrechnung von Vfm Derbholz mit Rinde (Stichprobeninventur) in Efm Derbholz ohne Rinde (Einheit der Forstbücher) erfolgte über den Faktor 0,846 (Wiedemann 1931).

Befundeinheit	Vorliegende Stichprobeninventur	Forstamtsstatistik <u>inklusive</u> nvD- und X-Holz	Forstamtsstatistik <u>ohne</u> nvD- und X-Holz
		[Efm Jahr ⁻¹]	
WG Oppershausen	1.575	1.518	1.280
WG Grossengottern	1.448	1.267	1.074
WG Langula	3.266	2.965	2.489
Gesamtbetrieb	6.288	5.750	4.842

Durch die hohe Stichprobendichte konnten die Bestandesvorräte mit einer sehr hohen Präzision (Genauigkeit) bestimmt werden (Tabelle 3.10). Der Stichprobenfehler der Bestandesvorräte des Gesamtbetriebes, ausgedrückt als 95 %-Konfidenzintervall der Schätzung, lag bei $\pm 2,5$ %. Auch für die relativ kleinen Waldgenossenschaften Oppershausen und Grossengottern lag der Stichprobenfehler bei nur ± 5 %. Die C-Vorräte in der Dendromasse, bei deren Berechnung der Fehler des Biomasse-Expansions-Konversions-Faktors (95 %-Konfidenzintervall ± 27 %, Wirth *et al.* 2003) mittels Fehlerfortpflanzung berücksichtigt werden musste, wiesen einen Stichprobenfehler von ± 26 % auf.

Die Volumenzuwächse des Gesamtbetriebes Langula konnten mit einem Stichprobenfehler von $\pm 3,2$ % ermittelt werden. Weiterführende Fehlerabschätzungen zum Zuwachs der einzelnen Befundeinheiten, des Totholzes sowie der C-Akkumulation werden Bestandteil zukünftiger statistischer Analysen sein.

3.2.7 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die wiederholte Stichprobeninventur in Langula ist die erste wiederholte Stichprobeninventur in Thüringen, und die erste, den Autoren bekannte, wiederholte Stichprobeninventur auf Betriebsebene in strukturreichen, plenterartigen Laubwäldern in Deutschland. Sie stellt zusammen mit den Dauerversuchsflächen (Kapitel 3.1) aktuelle Zuwachsdaten für eine Fortschreibung von C-Vorräten in strukturreichen Buchenwäldern zur Verfügung.

Aufgrund einer im Vergleich zum Stammwachstum geringeren Nutzung nahmen die C-Vorräte in der Dendromasse des Revieres Langula um rund $0,7 \text{ tC ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ zu. Im Vergleich zu Zielwerten für Buchenplenterwälder mit einer Oberhöhen von $\geq 32 \text{ m}$ (Gerold und Gerold 2001, Biehl und Fritzlar 2003) wurde das Nutzungspotenzial nur zu zwei Dritteln (66 %) ausgeschöpft

(Tabelle 3.12). Nach den Zielwertvorgaben sollte vor allem im Starkholz, nicht jedoch im Mittelholz, mehr geerntet werden (Abbildung 3.7; Gerold und Richter 2004).

Tabelle 3.12: Gegenüberstellung waldbaulicher Kennziffern des Gesamtbetrieb Langulas im Vergleich zu Zielwerten nach Gerold und Gerold (2001) und Biehl und Fritzlär (2003). Dh m.R.: Derbholz mit Rinde

Kennziffer	1994	2004	Ziel
Stammzahl [Bäume ha ⁻¹]	360	353	435
Vorrat [m ³ Dh m.R. ha ⁻¹]	391	408	350
Zuwachs [m ³ Dh m.R. ha ⁻¹ Jahr ⁻¹]	8,7		10
Nutzung [m ³ Dh m.R. ha ⁻¹ Jahr ⁻¹]	7,0		10
Zuwachsprozent [% Jahr ⁻¹]	2,4		2,9
Nutzungsprozent [% Jahr ⁻¹]	1,8		2,9

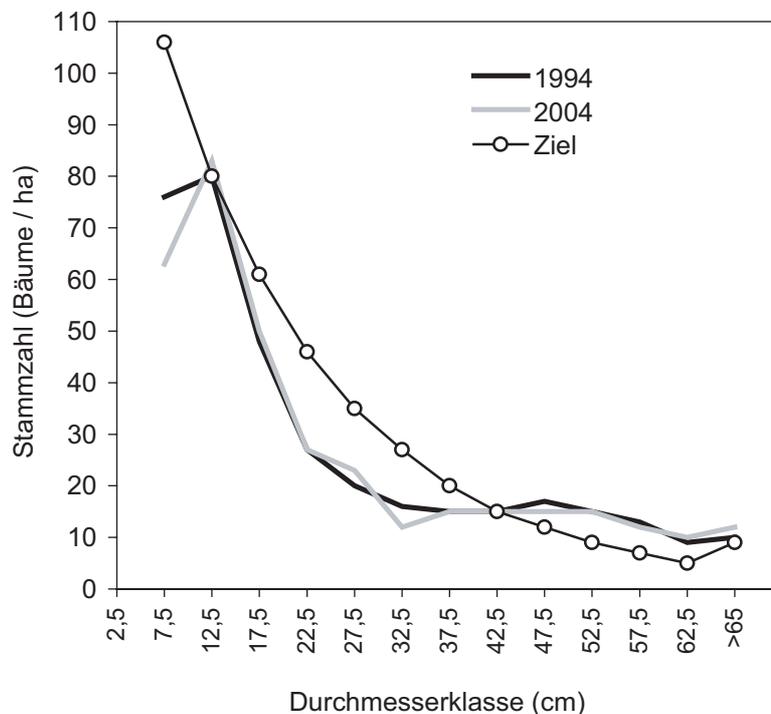


Abbildung 3.7: Stammzahlverteilung des Gesamtbetriebes Langula in den Jahren 1994 und 2004 im Vergleich zu Zielwerten für Buchenplenterwälder mit einer Oberhöhe von ≥ 32 m (Gerold und Richter 2004).

Sowohl die Zuwachs- als auch die Nutzungsprozente lagen in den letzten 10 Jahren mit 2,4 % bzw. 1,8 % unter dem Zielwert von jeweils 2,9 % für Buchenplenterwälder reicher Standorte. Es wäre möglich, dass die zurückhaltende Nutzung und die damit verbundene hohe Bestandesdichte eine negative Rückkopplung auf den Stammzuwachs bewirkt. Dann wären die relativ geringen Bestandeszuwächse (Tabelle 3.12) nicht eine Folge von Standort und Witterung sondern der forstlichen Bewirtschaftung. Da durch zu hohe Holzvorräte auch die Gefahr besteht, dass die plenterartige Struktur und damit die Stabilität und die betrieblichen Vorteile der Wälder verloren

gehen, ist eine erhöhte Nutzung in den kommenden Jahren zu planen. Dies bedeutet langfristig eine Reduktion der C-Vorräte in der Bestandesbiomasse. Wenn die Holzqualität nicht durch Holzfäule und Farbkerne beeinträchtigt ist, kann aufgrund der zum Teil hohen Stammdurchmesser des zu erwartenden Ernteholzes jedoch mit einer relativ langen Speicherung des Kohlenstoffs in den Holzprodukten gerechnet werden.

Aufgrund der hohen Stichprobendichte konnten Holzwachstum, Holznutzung und die Netto-C-Akkumulation im Bestand sehr genau bestimmt werden. Die Vorräte des Gesamtbetriebes wurden mit einem Stichprobenfehler von rund $\pm 2,5\%$ (95 %-iges Konfidenzintervall) ermittelt. Bis hin zu Befundeinheiten der Größe von 250 ha konnte eine Genauigkeit des stehenden Bestandesvorrates von $\pm 5\%$ erreicht werden. Die Abschätzung der C-Vorräte erreichte eine Genauigkeit von 26 %. Damit stellt die wiederholte Stichprobeninventur eine geeignete Methode zur Quantifizierung der C-Vorräte in der Baumbiomasse strukturreicher Wälder dar. Wenn nur die Bestandesvorräte auf der gesamten Forstamtsebene (rund 1120 ha) mit einem Stichprobenfehler von rund $\pm 5\%$ bestimmt werden sollen, würde ein Stichprobennetz von 200*200 m (280 Stichproben) genügen. Weiterführende Fehlerabschätzungen für die Bestimmung von Zuwachs und Nutzung werden Teil zukünftiger Analysen im Rahmen des CarboEurope IP sein.

Im Gegensatz zu C-Bilanzen auf Basis der regulären Forsteinrichtung ist die Stichprobeninventur unabhängig von Verwaltungseinheiten und ihren Änderungen (Kapitel 1.2), und sie erlaubt aufgrund der Einzelbaummessungen prozessorientierte Aussagen bzw. eine Verwendung in einzelbaumbasierten Wachstumsmodellen. Es bleibt jedoch zu klären, ob die Stichprobeninventur auch für die C-Bilanz von Altersklassenwäldern gleichwertige Daten liefern kann. Altersklassenwälder weisen zwar auf kleiner Fläche (innerhalb des Bestandes) homogene Strukturen und Bestandesvorräte auf, größere Flächeneinheiten (Abteilungen, Reviere, Forstämter) sind aufgrund der Altersklassenstruktur jedoch oft durch eine sehr heterogene Verteilung der Bestandesvorräte gekennzeichnet. Ein betriebswirtschaftlicher Vergleich zwischen Stichprobeninventur und Forsteinrichtung wird Teil zukünftiger forstwirtschaftlicher Analysen sein.

4 Einbindung der bislang erarbeiteten Biomassefunktionen und Erkenntnisse der Validierung der BZE I-Daten in laufende nationale Inventursysteme (BWI II, BZE II)

Eine unmittelbare, punktgenaue Vernetzung der BWI- und BZE-Daten in Thüringen, und damit eine Vernetzung von Bestandesdaten und Bodendaten, ist nicht möglich, da die BWI- und BZE-Messpunkte rund 2 km voneinander entfernt sind. Zudem erlaubt die Rasterweite der beiden Inventursysteme (BWI: 4x4 km, z.T. 2,3x2,3 km, BZE: 8x8 km) keine zuverlässige Aussage auf Betriebsebene. Daher wurde ein Promotionsprojekt zur räumlichen Quantifizierung der C-Dynamik in Forsten, Thomas Wutzler (MPI-BGC Jena), initiiert. Das Projekt stellt einen "bottum up"-Ansatz dar, der Punktdaten verschiedener Inventursysteme (Forsteinrichtung, Standorterkundung) über Regressionsmodelle in die Fläche extrapoliert. Herr Wutzler verfolgt aber nicht nur eine Quantifizierung der C-Vorräte auf Betriebsebene, sondern er wird auch die Änderung der C-Vorräte über die Zeit modellieren. Hierzu wird Herr Wutzler aus verschiedenen Waldwachstumsmodellen die für Thüringen geeigneten Komponenten zu einem neuen Waldwachstumsmodell zusammenfügen und an sein System zur räumlichen Quantifizierung der C-Vorräte ankoppeln. Der erste Teil des Promotionsprojektes beinhaltete die Implementierung der Modelle und Algorithmen zur C-Bilanzierung aus der ersten Projektphase (Wirth *et al.* 2003) in das Datenbanksystem der TLWJF und wurde bereits abgeschlossen (Projekt 1.1). Das gesamte Promotionsprojekt (finanziert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt) wird voraussichtlich Mitte 2006 abgeschlossen werden.

Das Promotionsprojekt ist eng mit dem Aufbau eines Netzwerkes zur Datenerhebung und zum Datenaustausch mit den internationalen wissenschaftlichen Projekten CarboEurope-IP und CarboInvent verknüpft. Beide Projekte haben die Kopplung von Waldbestockung und Boden-C-Vorräten zum Ziel. So wurde ein Rahmenvertrag zur wissenschaftlichen Kooperation zwischen der TLWJF, dem MPI-BGC und dem CarboInvent-Projekt, vertreten durch Herrn Prof. Dr. Köhl (Leiter des Instituts für Weltforstwirtschaft, Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Hamburg) geschlossen. Durch die enge wissenschaftliche Zusammenarbeit wird es möglich sein, den "bottum up"-Ansatz von Herrn Wutzer unmittelbar mit dem "top down"-Ansatz des CarboInvent-Projektes, welches u.a. über Satellitenaufnahmen die Information der BWI in die Fläche bringt, zu vergleichen.

Das vorliegende BMBF-Projekt war Auslöser für die Aktivitäten des europäischen CarboInvent-Projektes in Thüringen. So wurde Thüringen im Frühjahr 2003 als eine Musterregion (test area) innerhalb des CarboInvent-Projektes ausgewählt. Im Vorgängerprojekt (Wirth *et al.* 2003) erarbeitete Daten wurden der Boden-Gruppe des CarboInvent-Projektes (Leitung: Dr. Rainer Baritz) mit dem Ziel zur Verfügung gestellt, (1) eine umfangreiche Repräsentanzanalyse der Boden-C-Daten auf Basis von Höhenmodellen durchzuführen, (2) die vorliegenden BZE- und ÖWK-Daten durch weitere Probenahmen (rund 25 Standorte) bzgl. der Netzdichte und Repräsentativität zu optimieren, und (3) diese mit BWI-Messpunkten zu verknüpfen. Die neuen

Standorte wurden innerhalb des BWI-Netzes ausgewählt, so dass in den weiteren CarboInvent-Auswertungen eine Inventurkombination (Boden – Waldbestockung) stattfinden kann. Die Probenahme durch das CarboInvent-Projekt wurde mit logistischer Unterstützung der TLWJF von Juni bis Juli 2004 durchgeführt. Erste Ergebnisse sind im Forschungsbericht von Baritz *et al.* 2005 zu finden.

5 Öffentlichkeitsarbeit

Die Ergebnisse der 1. Projektphase wurden der Öffentlichkeit durch eine Reihe von Veröffentlichungen und Vorträgen zugänglich gemacht. Im März 2004 wurde der Abschlussbericht von Wirth *et al.* "Dynamik der Kohlenstoffvorräte in den Wäldern Thüringens" in der Buchreihe der Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei, Mitteilungen 23/24, veröffentlicht. Die englische Übersetzung des Berichtes wird voraussichtlich im Laufe des Jahres 2005 publiziert werden.

Die Quantifizierung der C-Flüsse von Fichtenwäldern und ihre Trennung in "direkt" und "indirekt" anthropogen beeinflusste C-Flüsse wurde zur Publikation in dem internationalen Wissenschaftsjournal "Global Change Biology" angenommen (Vetter M, Wirth C, Böttcher H, Churkina G, Schulze E-D, Schwalbe G, Weber G: Partitioning direct and indirect human-induced effects on carbon sequestration of managed coniferous forests using model simulations and forest inventories). Die Regressionsmodelle zur Abschätzung der Biomasse von Fichtenwäldern, einschließlich einer umfangreichen Fehleranalyse, wurden in dem internationalen Wissenschaftsjournal "Tree Physiology" veröffentlicht (Wirth C, Schumacher J, Schulze, E-D: Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe - a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation. *Tree Physiology*, 24, 121-139). Die entsprechende Publikation zur Biomasse von Buchenwäldern ist in Bearbeitung.

Die Methodik und die Ergebnisse der C-Bilanz Thüringer Wälder stellte Herr Wirth einem renommierten, internationalen Fachpublikum im Rahmen des German National IPCC Workshops zum Thema "Present Greenhouse Gas Budget and Mitigation in the German Biosphere", in Dornburg (07.-09. März 2003) vor.

Die in der 1. Projektphase erstellten Biomasse-/Expansionsfaktoren fanden großes Interesse auf dem FAO-Workshop „Harmonization of Terrestrial Carbon Measurements in CEE Countries“, am 22.-25. Juni 2004 in Prag. Frau Mund präsentierte hier in Vertretung von Herrn Wirth die Ergebnisse der 1. Projektphase unter dem Titel „Use of Data from Different Sources for Regional Estimates of Forest Carbon Stocks: the Thuringia study“.

Bei einem Workshop zur Vorbereitung der BZE II in Eberswalde (25.-27.10.2004), an dem Frau Mund teilnahm, zeigte sich, dass die Erkenntnisse zur Bedeutung der Trockenraumdichte, des Skelettgehaltes und der räumlichen Variabilität der Boden-C-Vorräte bereits Eingang in die Planungen für die BZE II gefunden haben.

6 Literaturverzeichnis

- Aber, J. D. (2002) Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems: current theory, remaining questions and recent advances. In: Horst WJ, Bürkert A, Claassen N, Flessa H, Frommer WB, Goldbach HE, Merbach W, Olf H-W, Römheld V, Sattelmacher B, Schmidhalter U, Schenk MK, and von Wirén N (Hrsg.). Progress in Plant Nutrition. Plenary Lectures of the XIV International Plant Nutrition Colloquium. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 179-188.
- Abetz, P. und Klädtke, J. (2000) Die DF-2000. AFZ/Der Wald, 55. Jg. Heft 9, 454-455.
- ASSF (Arbeitskreis Standortkartierung in der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung) (1996) Forstliche Standortaufnahme. 5. Auflage. IHW-Verlag und Verlagsbuchhandlung.
- Becker, M. und Mellinghoff, S. (1997) Distribution des Holzes in Deutschland 1995 (Holz-Distributionsanalyse). Holzabsatzfonds. Freiburg
- Biehl, H. und Fritzlar, D. (2003) Die Buchenplenterwälder im Forstamt Mühlhausen. Forst und Holz 58, Heft 7, 190 – 193.
- BMVEL (Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft) (2005) Die zweite Bundeswaldinventur – BWI 2. Das Wichtigste in Kürze, <http://www.bundeswaldinventur.de/enid/0ffaca95e3e5242ba1097ad8a9a6e95d,0/31.html>.
- Burschel, P., Kürsten, E. und Larson, B. C. (1993). Die Rolle von Wald und Forstwirtschaft im Kohlenstoffhaushalt - Eine Betrachtung für die Bundesrepublik Deutschland-. München, Forstwissenschaftliche Fakultät der Universität München und Bayerische Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt.
- Ciais, Ph. (2005) Immediate effects of the 2003 summer drought on C cycling. Vortrag, 2nd CarboEurope IP Meeting, Dublin, 10-13. Januar 2005.
- Dittmar C., Zech W. und Elling W. (2003) Growth variations of Common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe - a dendroecological study. Forest Ecology and Management 173, 63-78.
- Ehrhardt, H., Freise, C. und Nicke, A. (2005) Naturexperiment für die Entwicklung zukunftsfähiger Strategien. AFZ/DerWald 60, Heft 3, 144-146.
- Fachhochschule für Forstwirtschaft Schwarzburg (1997) Ertragstafelauszüge, zusammengestellt von Prof. Dr. Anka Nicke. Fachhochschule für Forstwirtschaft, Schwarzburg.
- Franz F., Röhle H. und Meyer F. (1993) Wachstumsgang und Ertragsleistung der Buche (120jährige Beobachtung des Durchforstungsversuches Fabrikschleichenach 15). Allgemeine Forst Zeitschrift 6, 262-267.

- Freibauer, A., Höhne, N., Herold, A. und Schulze, E.-D. (2004) A proposal to integrate biospheric emissions/removals into future climate policy regimes. The Promise of Carbon Sinks in Future Commitment Periods: New Scientific Findings in Europe. Side event of the European Commission, COP10, Buenos Aires, Argentina, 15 December 2004, http://www.bgc-jena.mpg.de/bgc-processes/ceip/policy/policy_fr.htm.
- Gerold, De. und Gerold Do. (2001) Zuwachs- und Holzertragsanalysen als Basis moderner Forsteinrichtung. *Forst und Holz* 56, Heft 20, 643-648.
- Gerold, De. und Richter, S. (2004) Auswertung der permanenten Stichprobeninventur im „Revier Langula“. Abschlussbericht.
- Gerold, Do. und Biehl, R (1992) Vergleich zwischen Buchenplenterwald und Buchenbetriebsklasse. *Allgemeine Forstzeitschrift* 2, 91-94.
- Hradetzky, J., Kublin, E., Scharnagel, G. und Schöpfer, W. (1986) Volumen- und Sortenermittlung bei der Bundeswaldinventur, *AFZ* 32, 804-807.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2004) Good Practice Guidance for Land Use, Land Use Change and Forestry. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme. http://www.ipcc-ggip.iges.or.jp/public/gpglulucf/gpglulucf_contents.htm.
- IUFRO (International Union of Forestry Research Organizations) (Hrsg) (1998): Terminologie der Forsteinrichtung – Begriffe und Definitionen in deutscher Sprache. IUFRO World Series Vol. 9-de, Wien.
- Kenk, G. (1998) Behandlung von Fichten und Durchforstungsergebnisse. *AFZ/DerWald* 53, Heft 8, 420-421.
- Klädtker, J. (1997) Buchen-Lichtwuchsdurchforstung. *AFZ/DerWald* 52, Heft 19, 1019-1021.
- Knohl, A., Kutsch, W., Mund, M., Anthoni, P., Kolle, O., Rebmann, C., Ziegler, W., Buchmann, N. und Schulze, E.-D. (2005) Drought effects on ecosystem carbon and energy fluxes in beech forests in Central Europe. Eingereichter Vortrag zur Tagung der European Geosciences Union (EGU), April 2005, Wien.
- Mayer, H. (1992) *Waldbau auf soziologisch-ökologischer Grundlage*. Stuttgart, Jena, New York, Gustav Fischer.
- Mildner, H. (2003) Modifizierter Fichtenschnellwuchsbetrieb. *AFZ/DerWald*, 58. Jg. Heft 11, 539-542.
- Mund M (2004) Carbon pools of European beech forests (*Fagus sylvatica*) under different silvicultural management. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, Band 189*. Forschungszentrums Waldökosysteme, Göttingen.

- Mund M., Kummetz E., Hein M., Bauer G. A. und Schulze E.-D. (2002) Growth and carbon stocks of a spruce forest chronosequence in central Europe. *Forest Ecology and Management* 171, 275-296.
- Mund, M. und Schulze, E.-D. (2005) Silviculture and its interactions with biodiversity and the carbon balance of forest soils. In: Scherer-Lorenzen M., Körner, C. und Schulze, E.-D. (Hrsg.) *The functional significance of forest diversity*. Ecological Studies Vol. 176, Heidelberg, Springer, 185-208.
- Pretzsch, H. (1999) Waldwachstum im Wandel. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 118, 228-250.
- Profft, I., Weber, G.-E., Mund, M., Schulze, E.-D. und Weller, E. (in prep.) Impacts of tree species composition and the thinning regime on life time and carbon storage potential of wood products.
- Rieder, A. (1998) Ahorn-Wertholzproduktion. *AFZ/DerWald* 53, Heft 15, 776-779.
- Röhrig, E. und Gussone, H. A. (1990). *Waldbau auf ökologischer Grundlage*. Zweiter Band: Baumartenwahl, Bestandesbegründung und Bestandespflege. Hamburg, Berlin, Paul Parey.
- Schöpfer, W. und Dauber, E. (1985) Bestandessortentafeln 1982/85. In: *Forst-, Holz- und Jagd-Taschenbuch 1986*, M. u. H. Schaper, Hannover.
- Schöpfer, W. und Stöhr, D. (1991) Variable Bestandessortentafeln für Fichten-Schwachholzhiebe. *Mitteilungen der FVA Baden-Württemberg*, Heft 162. FVA Baden-Württemberg.
- Schulze, E.-D., Lange, O. L. und Oren, R. (Hrsg.) (1989) *Forest decline and air pollution. A study of spruce (*Picea abies*) on acid soils*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Schulze, E.-D., Wirth, C. und Heimann, M. (2000) Managing forests after Kyoto. *Science* 289, 2058-2059.
- Schütz, J.-P. (2001). *Der Plenterwald und weitere Formen strukturierter und gemischter Wälder*. Berlin, Parey.
- Skomarkova, M.V., Vaganov E. A., Mund, M., Knohl, A., Linke, P. und Schulze E.-D. (in prep.) Inter-annual and seasonal variability of radial growth, wood density and carbon isotope ratios $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ in tree rings of beech (*Fagus sylvatica*).
- Spiecker H., Mielikäinen K., Köhl M. und Skovsgaard J. P. (eds) (1996) *Growth trends in European forests*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- TMLNU (Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt) (2000) *Klimaschutz in Thüringen - Analysen, Potenziale, Handlungsfelder*. Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt. Erfurt.

- TMLNU (Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt) (2002) Jahresbericht 2002 der Thüringer Landesforstverwaltung. Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt. Erfurt.
- Vetter M., Wirth C., Böttcher H., Churkina G., Schulze E.-D., Schwalbe G. und Weber G. (in press) Partitioning direct and indirect human-induced effects on carbon sequestration of managed coniferous forests using model simulations and forest inventories. *Global Change Biology*.
- Wiedemann (1931) Ertragstafel Buche. In: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (1990). *Hilfstafeln für die Forsteinrichtung*. Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, München.
- Wilhelm, G. J., Letter, H.-A. und Eder, W. (1999) Zielsetzung und waldbauliche Prinzipien. *AFZ/DerWald* 54, Heft 5, 232-233.
- Winterhoff B and Storch M (1994) Erstaufnahme und Auswertung einer permanenten Betriebsinventur im Revier Langula. Kleinsassen.
- Wirth C., Schulze E.-D., Schwalbe G., Tomczyk S., Weber G. und Weller E. (2003) Dynamik der Kohlenstoffvorräte in den Wäldern Thüringens. Abschlussbericht zur 1. Phase des BMBF-Projektes "Modelluntersuchungen zur Umsetzung des Kyoto-Protokolls", Gotha.
- Wirth, C., Schumacher, J. und Schulze, E.-D. (2004) Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe - a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation. *Tree Physiology* 24 (2), 121-139.

Teil III

Erfolgskontrollbericht

zur 2. Phase des BMBF-Projektes

"Modelluntersuchungen zur Umsetzung des Kyoto-Protokolls"

1 Beitrag der erzielten Ergebnisse zu den förderpolitischen Zielen

Die Ergebnisse des vorliegenden BMBF-Projekt betreffen das Klimaforschungsprogramm.

2 Übersicht zu den wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnissen und andere wesentliche Ereignisse

Siehe Teil I und Teil IV des Abschlussberichtes.

3 Verwertungsplan

3.1 Erfindungs/Schutzrechtsanmeldungen

Aufgrund der Natur des Projektes stehen keine Erfindungen oder Schutzrechtsanmeldungen in Aussicht.

3.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Da das Projekt nicht der Entwicklung eines kommerziellisierbaren Produktes dient, sind mit ihm keine unmittelbaren wirtschaftlichen Erfolgsaussichten verbunden. Durch die Unterstützung der Einrichtung eines laufend fortgeschriebenen "Walddatenspeichers", die Entwicklung eines GIS-basierten Informationssystems und durch die Untersuchungen zum aktuellen Waldwachstum werden der Forstwirtschaft jedoch Instrumente und Daten zur Verfügung gestellt, die helfen werden, die Planungssicherheit und die Wirtschaftlichkeit der Forstbetriebe zu erhöhen.

3.3 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Auf Grundlage des vorliegenden Projektes kann eine Fortschreibung der C-Vorräte im Thüringer Landeswald auf der zeitlichen Skala der Berichtszeiträume des Kyoto-Protokolls erfolgen. Das Netzwerk von Dauerversuchsflächen wird der bestandesbasierten Verifikation von C-Senken dienen.

3.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Siehe Teil IV des Abschlussberichtes.

4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Erst zum Ende der ersten Projektphase (Wirth *et al.* 2003) und mit Beginn der zweiten Projektphase zeigten sich zwei Problemfelder bei der Anwendung administrativer, forstlicher Inventurdaten, die nicht nur einzelne Teilprojekte sondern generell das Hauptziel, die Fortschreibung der Kohlenstoffvorräte, betreffen und außerhalb des Einflusses des vorliegenden Projektes liegen. Diese zum Zeitpunkt der Antragstellung nicht bekannten Problemfelder sind:

1. Problemfeld: Der erste verfügbare und vollständige Inventurdatensatz von 1993 basiert auf einer Datenfortschreibung von Inventurergebnissen, die in den 1980er Jahren erhoben wurden. Mit der Fortschreibung der Inventurergebnisse ist die Anwendung von Ertragstafelmodellen zur Abschätzung des jährlichen Stammzuwachses verbunden. Diese Abschätzung muss aus folgenden Gründen als fehlerbehaftet angenommen werden: (1) Zahlreiche Untersuchungen in Mitteleuropa zeigen, dass das Wachstum von Waldbeständen seit etwa 50 - 60 Jahren im Vergleich zu den ertragstafelbasierten Vorhersagen zugenommen hat (Teil II, Kapitel 3.1) (2) Zumindest bei der Baumart Fichte wurde im Fortschreibungsmodell der ostdeutschen Länder eine Zuwachsdepression infolge "neuartiger Waldschäden" in der Größenordnung von rund 20 % unterstellt. Eine derart starke Zuwachsdepression ist wahrscheinlich nicht über längere Zeit auf allen Standorten eingetreten. Aufgrund dieser systematischen Unterschätzung des jährlichen Stammwachstums ist der stehende Bestandesvorrat zum Stichtag 01.10.1993, der sich aus der Fortschreibung ergibt, sehr wahrscheinlich unterschätzt. Wenn die C-Vorräte von 1993 unterschätzt sind, werden die mittleren C-Flüsse, die sich aus der Differenz von aktuellem Bestandes-C-Vorrat und dem Bestandes-C-Vorrat von 1993 ergeben ("Delta-Methode" zur Abschätzung der Netto-C-Flüsse, Teil II, Kapitel 1.2), überschätzt sein. Dieses Problem ist erst mit dem Abschluss einer zweiten Forsteinrichtung in Thüringen (voraussichtlich 2015) zu lösen. Die mit den Ertragstafeln verbundenen Unsicherheiten werden solange bestehen bleiben, bis diese durch neue Waldwachstumsmodelle für Thüringen abgelöst werden können.

2. Problemfeld: In den aktuellen und zukünftigen Inventurdatenbanken werden nur die Daten des Staatswaldes der Wissenschaft und der Öffentlichkeit zugänglich sein. Daher kann anhand landesforstlicher Inventurdaten in Gebieten mit einem hohen Anteil an Privat- und Kommunalwald keine gesicherte Aussage über den C-Haushalt der Wälder auf regionaler Ebene gemacht werden.

5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Siehe Teil II, Kapitel 5.

6 Die Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

Die Ausgaben- und Zeitplanung wurden eingehalten.

Teil IV

Kurzfassung

zum BMBF-Projekt

"Modelluntersuchungen zur Umsetzung des Kyoto-Protokolls"

In der ersten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls (2008-2012) kommt der Artikel 3.4. des Kyoto-Protokolls (Anrechnung „zusätzlicher“ Aktivitäten in Land- und Forstwirtschaft zur Erfüllung der Reduktionsverpflichtungen) in Deutschland wahrscheinlich nicht zur Anwendung. Für die zweite Verrechnungsperiode 2012 - 2016 steht die Anwendung des Artikels 3.4 und damit die Einbeziehung der regulären Forstwirtschaft in die deutsche Klimaschutzpolitik jedoch noch zur Disposition. Hinzu kommen Bemühungen von wissenschaftlicher und politischer Seite, das Kyoto-Protokoll um den Schutz bestehender C-Vorräte zu erweitern (Freibauer *et al.* 2004). Damit die Forstwirtschaft dieser potentiellen Rolle in der Klimapolitik gerecht werden kann, ist eine Quantifizierung der C- Vorräte und der C-Vorratsänderungen in Wäldern gemäß den Empfehlungen des IPCC (IPCC Good Practice Guidance for Land Use, Land Use Change and Forestry, 2004) notwendig.

Das BMBF-Projekt „Modelluntersuchungen zur Umsetzung des Kyoto-Protokolls“ hat am Beispiel des Bundeslandes Thüringen die Möglichkeiten und die Grenzen der Anwendung forstlich administrativer Daten für eine C-Bilanz auf regionaler und betrieblicher (Forstamt) Ebene aufgezeigt.

Durch die wissenschaftliche Aufarbeitung bestehender forstlicher Datensätze ergänzt um eigene Feld- und Literaturstudien wurden in der 1. und 2. Projektphase die folgenden Komponenten einer laufenden C-Bilanzierung der Wälder Thüringens erarbeitet:

- C-Vorräte zum Stichjahr 1993 („baseline“) in der Dendromasse, im Totholz, in der Bodenvegetation und im Boden (einschließlich organischer Auflage)
- Fehlerabschätzung der C-Vorratsberechnungen
- Änderung von C-Vorräten (Netto-C-Flüsse) auf Forstamtsebene
- Abschätzung der Anteile direkter und indirekter anthropogener Effekte auf die Netto-C-Flüsse von Wäldern in Thüringen
- Implementierung der Modelle und Algorithmen zur C-Bilanzierung von Wäldern in das Datenbanksystem der TLWJF
- Initiierung des Walddatenspeichers als Basis für eine laufende Fortschreibung der C-Vorräte zwischen aufeinander folgenden Forstinventuren
- Modellberechnungen zum Einfluss der forstlichen Bewirtschaftung auf die C-Speicherung im Produktsektor der Forstwirtschaft
- Aufbau eines Netzwerkes von Dauerversuchsflächen und wissenschaftlichen Projekten zur Verifizierung der Fortschreibung von C-Vorräten auf Betriebsebene unter besonderer Berücksichtigung strukturreicher Wälder.

Durch das vorliegende BMBF-Projekt stehen somit eine umfassende Datenbasis und operationalisierbare Verfahren für eine den Anforderungen des Kyoto-Protokolls (Artikel 3.4) gerecht werdenden Verrechnung von C-Senken im Bereich der Forst- und Holzwirtschaft in Thüringen zur Verfügung.

Das BMBF-Projekt hat aber auch Grenzen bei der Anwendung forstlich-administrativer Daten aufgezeigt, die durch ergänzende Untersuchungen Projekte beseitigt werden könnten.

- Die Berechnung von Expansions-/ Konversionsfaktoren für Buche und Fichte erfolgte in dem vorliegenden Projekt und ist abgeschlossen. Für die Quantifizierung von C-Vorräten in der Dendromasse von Kiefern- und Eichenwäldern stehen noch Regressionsmodelle bzw. Expansions-/ Konversionsfaktoren aus. Die bislang in der Literatur publizierten Daten sind für eine statistische Bearbeitung nicht ausreichend.
- Bei unveränderter Flächeneinteilung ist die Bestimmung von C-Vorratsänderungen in der Dendromasse anhand wiederholter Forsteinrichtungen bis hin zur forstlichen Teilfläche möglich. In Thüringen können infolge der veränderten Forstbetriebs-einteilung und infolge von Inkonsistenzen zwischen der fortgeschriebenen Datenbank von 1993 und der ersten Forsteinrichtung nach der Wende die C-Vorratsänderungen in der Dendromasse allerdings erst nach Abschluss der zweiten vollständigen Forst-einrichtung (voraussichtlich 2015) teilflächengenau bestimmt werden. Das vorliegende Projekt gibt dazu eine umfassende Anleitung.
- Die wiederholte Stichprobeninventur in den Plenterwäldern des Hainichs ergab einen mittleren Bestandesvorrat von 159 t C ha^{-1} und eine Vorratszunahme zwischen 1994 und 2004 von im Mittel $0,7 \text{ t C ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$. Die Nutzung in diesem Zeitraum von durchschnittlich $2,7 \text{ t C ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ war somit niedriger als der Zuwachs von rund $3,4 \text{ t C ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$. In strukturreichen Wäldern wären wiederholte Stichprobeninventuren für die Erstellung von C-Bilanzen genauer als eine ertragstafelbasierte Forsteinrichtung. Dieser Punkt ist wichtig in Hinblick auf die derzeitige Umwandlung von Altersklassenwäldern in strukturreiche Wälder.
- Mit dem vorliegenden Projekt wurden in Thüringen erstmals Daten über die C-Vorräte im Baumbestand und im Boden am gleichen Standort erhoben bzw. zusammengetragen (Dauerversuchsflächen, CarboInvent-Projekt, CarboEurope, Projekte des MPI-BGC) oder über ein GIS-basiertes Informationssystem teilflächengenau einander zugeordnet. Damit wird die begrenzte Interpretation von BZE und BWI, deren Erhebungen auf einem um rund 2 km verschobenen Gitternetz beruhen, für Thüringen teilweise aufgehoben.
- Die C-Vorräte in den Wäldern Thüringens wurden mit den dazugehörigen Fehlerabschätzungen quantifiziert. So waren 1993 in der lebenden Dendromasse rund $82 \pm 10 (15) \text{ t C ha}^{-1}$, in der Bodenvegetation rund $0,7 \pm 0,7 \text{ t C ha}^{-1}$, im Totholz rund $9 \pm 3 \text{ t C ha}^{-1}$, in der organischen Auflage rund $27 \pm 8 \text{ t C ha}^{-1}$ und im Mineralboden rund $70 \pm 10 \text{ t C ha}^{-1}$ gespeichert. Die Vorräte in der Dendromasse des Waldes in Thüringen nahmen zwischen Anfang und Ende der 1990iger Jahre um etwa $1 \text{ t C ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ zu. Die Quantifizierung von C-Vorratsänderungen im Boden ist noch

nicht abgeschlossen, da die Wiederholung der Aufnahmen erst in 5 Jahren erfolgen kann.

- Das vorliegende BMBF-Projekt hat mit dem neuen Netzwerk von Dauer-versuchsflächen eine Datenbasis für die Abschätzung des aktuellen Waldwachstums in Thüringen geschaffen, die wie die BWI eine Tendenz zu erhöhtem Bestandeswachstum zeigt, die in Bezug auf prozessorientierte Standorts- und Bewirtschaftungseffekte aber über die Daten der BWI hinausgeht. In Kooperation mit anderen forstlichen Landesanstalten und wissenschaftlichen Instituten wäre eine Erweiterung des Netzwerkes um weitere Standorte, Bestandesstrukturen und Baumarten wünschenswert. Die aktuellen Wachstumsdaten werden zur Zeit für eine Verbesserung regionaler Waldwachstumsmodelle und damit für eine genauere Fortschreibung der C-Vorräte in Wäldern genutzt.
- Das vorliegende Projekt hat gezeigt, dass eine Operationalisierung der jährlichen Fortschreibung der Bestandes-C-Vorräte in Thüringen mit der Neueinrichtung des Walddatenspeichers erreicht werden kann. Die mit den Ertragstafeln verbundenen Unsicherheiten werden jedoch so lange bestehen bleiben, bis diese durch neue Waldwachstumsmodelle für Thüringen abgelöst werden können. Die vorliegenden Modelle werden zur Zeit in das Forsteinrichtungssystem "Walddatenspeicher" integriert. Eine Verknüpfung des Walddatenspeichers mit dem vorgestellten GIS basierten Informationssystem und einem C-Modell, welches Vorratsänderungen im Boden berechnet, kann zu einem nutzerfreundlichen und operativen Kohlenstoffinventarisierungsprogramm führen. Das Programm hätte die Genauigkeit und würde die Anforderungen erfüllen, die für eine C-Anrechnung nach Artikel 3.4 notwendig wären. Hier gilt jedoch zu berücksichtigen, dass in den aktuellen und zukünftigen Inventurdatenbanken nur die Daten des Staatswaldes verfügbar sind. Daher kann anhand landesforstlicher Inventurdaten in Gebieten mit einem hohen Anteil an Privat- und Kommunalwald keine gesicherte Aussage über den C-Haushalt der Wälder auf regionaler Ebene gemacht werden.
- Für ökonomische Anwendungen und planerische Zwecke sollte der neue Walddatenspeicher zusätzlich zu den Bestandesdaten des früheren Datenspeichers Waldfonds auch die Bestandesdichte, die Durchmesser- und die Totholz-vorräte beinhalten.
- Trotz der Fortschritte auf dem Gebiet der Quantifizierung von C-Vorräten und – Vorratsänderungen sind für ein „full carbon accounting“ der Wälder Thüringens immer noch einige weiterführende Untersuchungen auf den folgenden Gebieten notwendig:
 - Menge und Qualität der jährlich produzierten Holzprodukte
 - Bedarf, Verbrauch und Lebensdauer von Holzprodukten
 - Substitutionseffekte von Holz als Energieträger

- Abbauraten von Totholz
- Totholzanfall in nicht-bewirtschafteten Wäldern
- Bestandeswachstum in strukturreichen Wäldern und in nicht-bewirtschafteten Wäldern
- Sensibilität von Boden-C-Vorräten gegenüber mäßigen Störungen wie Durchforstung, Femelschlag oder Einzelbaumnutzung

Auf Basis der vorgestellten Untersuchungen zur C-Bilanz der Wälder Thüringens lassen sich für die Forstwirtschaft folgende Strategien als Beitrag zum Klimaschutz ableiten:

- Die derzeit bestehenden Waldflächen sollten erhalten bleiben und nach Möglichkeit durch Aufforstungen vermehrt werden.
- Die Bewirtschaftung von Wäldern sollte auf hohe und stabile Vorräte bei nachhaltiger Nutzung des natürlichen Zuwachspotentials der jeweiligen Standorte ausgerichtet sein (hoher Zieldurchmesser zur Förderung langlebiger Holzprodukte).
- Störungen des Waldes, die zu einer verstärkten Freisetzung von C aus der organischen Auflage und dem Mineralboden führen (z. B. Kahlschläge, häufiges Befahren der Bestände, Bodenbearbeitung), sollten weitestgehend vermieden werden. Voraussetzung dafür ist eine engmaschige Erschließung der Waldbestände.
- Die Holzproduktion sollte auf möglichst langlebige Produkte ausgerichtet sein, wobei die Klimarelevanz von Holz als Energiequelle und Substitut fossiler Energieträger nicht abschließend bearbeitet ist.
- Waldstandorte, die keine wirtschaftliche Holzproduktion erlauben, sollten aus der Nutzung genommen werden und so durch die Anreicherung von C im Bestand, im Totholz und im Boden als C-Speicher dienen. Diese Flächen sollten nach Artikel 3.4 anrechenbar gemacht werden.

Um mittelfristig zu einer C-ökologischen Bewirtschaftung zu gelangen, müssen Modelle entwickelt werden, die die C-Speicherung im Ökosystem Wald (Bestand und Boden), die C-Speicherung in Holzprodukten, den Energiebedarf zur Holzproduktion und –verarbeitung, die energetische Nutzung des Holzes und die Substitution fossiler Energieträger berücksichtigen. Derartige Modelle würden nicht nur helfen, die C-Speicherung durch die Forstwirtschaft zu optimieren, sondern würden letztendlich die Basis für eine Monetarisierung der C-Speicherung sein.

Das vorliegende BMBF-Projekt „Modelluntersuchungen zur Umsetzung des Kyoto-Protokolls“ hat gezeigt, dass eine Bestimmung der C-Vorräte auf großer Fläche bestandesweise möglich ist, und dass Vorratsänderungen mit vertretbarem Aufwand und hoher Präzision nachweisbar sind. Damit wären die Voraussetzungen für die Implementierung von Artikel 3.4 geschaffen.