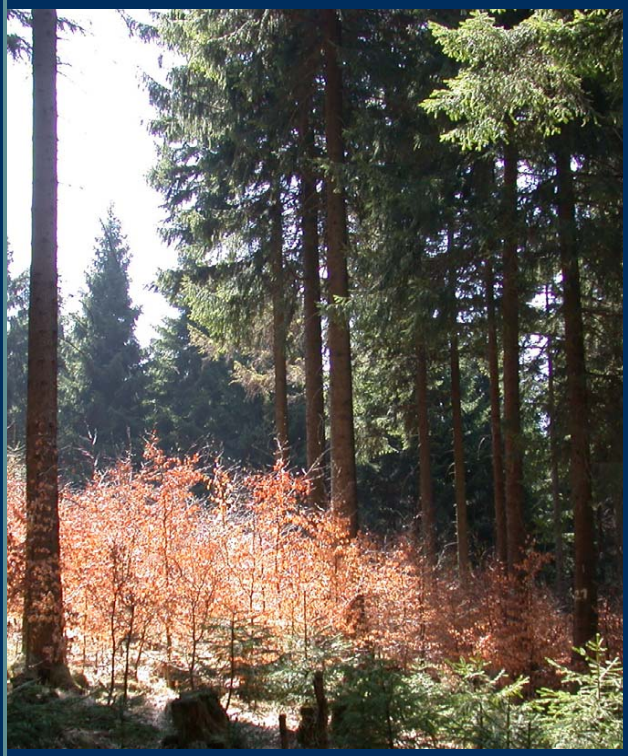
Band 3 Göttinger Forstwissenschaften

Martin Linnert

Wachstum und Qualität junger Buchen in einem unterschiedlich aufgelichteten Fichtenaltbestand



Universitätsverlag Göttingen

Martin Linnert

Wachstum und Qualität junger Buchen
in einem unterschiedlich aufgelichteten Fichtenaltbestand

This work is licensed under the
Creative Commons License 2.0 “by-nd”,
allowing you to download, distribute and print the
document in a few copies for private or educational
use, given that the document stays unchanged
and the creator is mentioned.
You are not allowed to sell copies of the free version.

Erschienen als Band 3 in der Reihe „Göttinger Forstwissenschaften“ im Universitätsverlag Göttingen 2009

Martin Linnert

Wachstum und Qualität junger Buchen in einem unterschiedlich aufgelichteten Fichtenaltbestand

Göttinger Forstwissenschaften
Band 3

Universitätsverlag Göttingen
2009

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Global Forest Decimal Classification GFDC 226, 236.3, 181.6

Herausgeber der Reihe

Prof. Dr. Christian Ammer
Prof. Dr. Hermann Spellmann
Prof. Dr. Friedrich Beese
Prof. Dr. Stefan Schütz

Schriftleiter
Dr. Norbert Bartsch (n.bartsch@forst.uni-goettingen.de)

Anschrift des Autors
Dr. Martin Linnert
Abteilung Waldbau und Waldökologie der gemäßigten Zonen
Büsgenweg 1, 37077 Göttingen

Dissertation Universität Göttingen 2009
Gutachter: Prof. Dr. Burghard von Lüpke
Prof. Dr. Franz Gruber
Tag der mündlichen Prüfung: 10. Juli 2008

Dieses Buch ist auch als freie Onlineversion über die Homepage des Verlags sowie über den OPAC der Niedersächsischen Staats- und Universitätsbibliothek (http://www.sub.uni-goettingen.de) erreichbar und darf gelesen, heruntergeladen sowie als Privatkopie ausgedruckt werden. Es gelten die Lizenzbestimmungen der Onlineversion. Es ist nicht gestattet, Kopien oder gedruckte Fassungen der freien Onlineversion zu veräußern.

Satz und Layout: Martin Linnert, Norbert Bartsch
Umschlaggestaltung: Wolfgang Tambour, Margo Bargheer
Titelabbildung: Buchenvoranbau am Rand des Femelloches auf der Versuchsfläche Clausthal 1100 (Foto M. Linnert)
Rückenabbildung: *Fagus sylvatica* (Foto N. Bartsch)

© 2009 Universitätsverlag Göttingen
http://univerlag.uni-goettingen.de
ISBN: 978-3-941875-25-8
ISSN: 1867-6731

gewidmet meinem Vater,
Herrn Dr. M. Linnert (sen.)

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis IV

1. Einleitung 1

1.1. Einführung in die Thematik 1

1.2. Beispiel Harz – Überblick und Geschichte 2

1.2.1. Erste Bergbauphase 4

1.2.2. Zweite Bergbauphase 6

1.2.3. Dritte Bergbauphase 9

1.2.4. Forstgeschichte nach 1945 14

1.3. Forschungsobjekt Waldumbau 18

Das SUSTMAN-Projekt 20

1.4. Ziele der Untersuchung 21

2. Versuchsfläche 23

2.1. Topographische Lage 23

2.2. Klima 23

2.3. Geologie und Pedologie 24

2.4. Vegetation 26

Bodenvegetation 27

2.5. Strukturelle Eigenschaft des Bestandes und Versuchsdesign 27

3. Methoden 31

3.1. Auswahl der Probebäume 31

3.2. Einflussvariablen 32

3.2.1. Lichtmessung 32

3.2.2. Konkurrenz 38

3.3. Response-Variablen 48

3.3.1. Erfassung von Höhe, Durchmesser und Stammform 48

3.3.2. Messungen des Terminaltriebes 49

3.3.3. Erhebung von Astparametern 50

3.3.4. Messungen zur „Raumeroberung“ – Erfassung von Volumen und Biomasse 50
3.3.5. Blattparameter 54
3.4. Datenauswertung 55

4. Ergebnisse 61
4.1. Strahlung, Wachstum und Qualität 61
4.1.1. Strahlung 61
4.1.2. Wachstum 62
4.1.3. Qualitätsparameter 63
4.1.4. Kronen- und Wurzelbiomasse 68
4.1.5. Kronen- und Wurzelraumvolumen 71
4.1.6. Blattdaten und Wachstumsanalyse 78
4.2. Konkurrenzwerte 86
4.2.1. Relation zum Licht 90
4.2.2. Wachstumsdaten und Konkurrenz 91
4.2.3. Qualitätsparameter und Konkurrenz 93
4.2.4. Biomasse und Konkurrenz 94
4.2.5. Kronen- bzw. Wurzelraumvolumen und Konkurrenz 94

5. Diskussion 97
5.1. Höhen- und Durchmesserwachstum in Abhängigkeit vom Strahlungsangebot 97
5.2. Indikatoren der Apikaldominanz 99
5.3. Oberirdisches Biomassewachstum, Raumeroberung und Strahlungsangebot 100
5.3.1. Methodik der Kronenerfassung 100
5.3.2. Natürliche Kronenarchitektur 101
5.3.3. Kronenvolumen und oberirdische Biomasse 101
5.3.4. Allokationsmuster bei reduzierter Strahlung 102
5.4. Unterirdisches Wachstum 107
5.5. Der Baum als Gesamtsystem 109

5.6. Qualität der Buchen 110
5.6.1. Neigung des Terminaltriebs 110
5.6.2. Proleptische Triebbildung 111
5.6.3. Ästigkeit 113
5.7. Kompromiss zwischen Wachstum und Qualität 114
5.8. Konkurrenz 116
5.9. Schlussbemerkung 117
5.9.1. Bestandesstabilität 117
5.9.2. Mischungssteuerung 118

6. Zusammenfassung 119

Abstract 121

Literatur 123

Anhang 139

Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
Abb.	Abbildung
Abt.	Abteilung
AIC	Akaike information criterion
B°	Bestockungsgrad
BFW	Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (Österreich)
BHD	Brusthöhendurchmesser
BIC	Bayesian information criterion
Biom.	Biomasse
bspw.	beispielsweise
Bu	Buche
bzw.	beziehungsweise
C	Kohlenstoff
ca.	zirka
$CaCl_2$	Kalziumchlorid
$CaCO_3$	Kalziumcarbonat
CI	Competition Index
cm	Zentimeter
ConForest	The question of CONversion of pure secondary Norway spruce FORESTs on sites naturally dominated by broadleaves
CP	competitive power
d	Durchmesser
d. h.	das heißt
DIFFSF	diffuse site factor
DjeBl	Durchschnitt je Blatt
dm	Dezimeter
Durchm.	Durchmesser
E	Ost
EFI	European forest institute
Ekl.	Ertragsklasse
ENE	Ostnordost
et al.	et alii (= und andere)
etc.	et cetera (= und so weiter)
EU	Europäische Union
f.	für
Feinw.	Feinwurzel
Fi	Fichte

fm o. R.	Festmeter ohne Rinde
forstl.	forstlich
forstwiss.	forstwissenschaftlich
g	Gramm
G	Gewicht, Masse
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
gr.	größter
h	Stunde
h	Höhe
ha	Hektar
Hrsg.	Herausgeber
i. d. R.	in der Regel
Inc.	Incorporated
ISF	Indirect site factor
kg	Kilogramm
km	Kilometer
KrMitte	Kronenmitte
kWh	Kilowattstunde
LA	leaf area
LAI	Leaf area index
LAR	leaf area ratio
LWR	leaf weight ratio
m	Meter
M	Molar
Max.	Maximum
mg	Milligramm
min	Minute
Min.	Minimum
Mio.	Millionen
mm	Millimeter
N	Nord
n.s.	nicht signifikant
NAR	Nettoassimilationsrate
NE	Nordost
NFV	Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt
niedersächs.	niedersächsisch
NIR	near infrared radiation
nm	Nanometer
NMfELF	Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten
NNE	Nordnordost
NNW	Nordnordwest

Nr.	Nummer
NW	Nordwest
NW-FVA	Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
ÖNORM	Österreichische Norm
PAR	photosynthetic active radiation
pH	potentia Hydrogenii (= Kraft des Wasserstoffs) Säuremesswert
Proj.	Projektion
PUR	photosynthetic usable radiation
r	Radius
rel.	relativ
rm	Raummeter
RWR	Relative Wachstumsrate
S	Süd
S1-5	Stratum 1-5
schwed.	schwedisch
SE	Südost
sec	Sekunde
SLA	specific leaf area
Std.abw.	Standard-Abweichung
SUSTMAN	Introduction of broadleaf species for SUSTainable forest MANagement
SW	Südwest
system.	systematisch
t	Tonne
u.	und
u. a.	unter anderem
ü. NN	über Normal-Null
UBA	Umwelt-Bundesamt
usw.	und so weiter
vertVolSchw	vertikaler Volumenschwerpunkt
vgl.	vergleiche
Vol.	Volumen
W	West
WHD	Wurzelhalsdurchmesser
WT	Wurzeltiefe
z. B.	zum Beispiel

1. Einleitung

1.1. Einführung in die Thematik

Die Umwandlung von Fichtenreinbeständen ist in den letzten 50 Jahren zur bedeutendsten waldbaulichen Herausforderung auf europäischer Ebene geworden (Diaci 2002, Zerbe 2002). In Europa, so fanden Teuffel et al. (2004) heraus, befinden sich zirka sechs bis sieben Millionen Hektar reine Fichtenbestände außerhalb ihres natürlichen Verbreitungsgebietes (Abb. 1.1). Mindestens vier bis fünf Millionen Hektar davon stocken auf natürlichen Laub- und Laubmischwaldstandorten. Den ersten Schritt zur Reduzierung des Laubholzanteils in diesen ursprünglich gemischten Beständen sehen Johann et al. (2004) im Aufkommen der Glasproduktion vom 16. Jahrhundert an. Holzkohlegewinnung, Bergbau sowie intensivere landwirtschaftliche Nutzung, Streugewinnung, Waldweide und Brennholzgewinnung führten im Weiteren zu einer Übernutzung der Wälder. Zur Zeit der beginnenden Industrialisierung begünstigte der dringende Holzbedarf die Aufforstung weiter Flächen mit der schnell wachsenden Fichte (*Picea abies* [L.] Karst.). Während der letzten 200 Jahre wurde die Fichte wegen ihrer hohen Zuwachsraten und ihrer anspruchslosen waldbaulichen Behandlung anthropogen stark gefördert.

Dementsprechend sind Teile von West- und Zentraleuropa von Fichtenaufforstungen dominiert. Diese Wälder zeigten mit der Zeit jedoch höhere Anfälligkeiten gegenüber Immissionseinwirkung, Schädlingsbefall, Windwurf und Trockenstress. Der prognostizierte Klimawandel mit seinen höheren Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten von klimatischen Extremen, wie zum Beispiel Stürmen, verschärft zunehmend das Problem (Löf und Oleskog 2005).

Zusätzlich sinkt die öffentliche Akzeptanz von Fichtenreinbeständen aus Gründen des Natur- und Landschaftsschutzes. Aus wirtschaftlichen, ökologischen und sozialen Gründen wird daher die Wiederherstellung der ursprünglichen Laubmischwälder als Schritt in Richtung einer nachhaltigen Waldwirtschaft angesehen. Dieser Waldumbau kann sowohl durch eine rasche Bestandesumwandlung als auch durch eine allmähliche Überführung, wie z. B. durch Voranbau mit Buche (*Fagus sylvatica* L.) unter einem Fichtenaltholzschirm, erreicht werden. In den letzten Jahrzehnten ist der Buchenvoranbau in weiten Teilen Europas praktiziert worden.

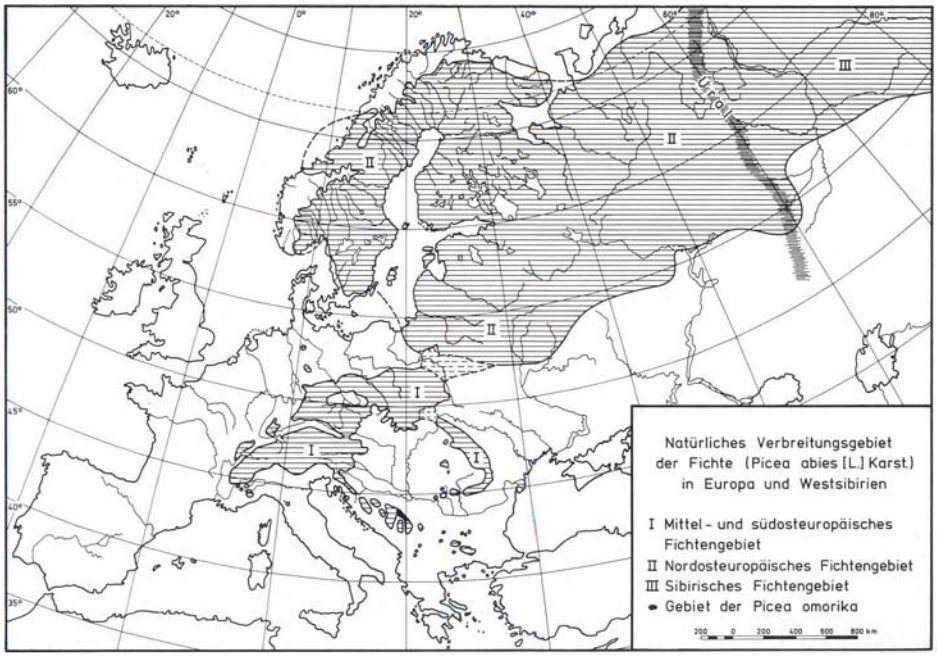


Abb. 1.1. Natürliches Verbreitungsgebiet der Fichte (*Picea abies* [L.]Karst.) in Europa und Westsibirien (aus Schmidt-Vogt 1987).

In Deutschland stellt der Harz, vor allem der niedersächsische Westharz, ein besonders typisches Beispiel für die beschriebene europaweite Ausbreitung der Fichtenforsten dar. Da sich die für die vorliegende Arbeit genutzte Versuchsfläche im Harz befindet, soll an seinem Beispiel die Entwicklung der Fichtenbestockung von deren Anfängen bis in die heutige Zeit detaillierter erläutert werden. Das folgende Kapitel fasst zahlreiche Einzelquellen über die Bergbau- und Forstgeschichte zusammen, zeichnet ein überschaubareres Gesamtbild der Waldentwicklung im Harz und leitet zu den dieser Arbeit zugrunde liegenden Fragestellungen über.

1.2. Beispiel Harz – Überblick und Geschichte

Der Harz befindet sich im Grenzbereich der Bundesländer Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen und ist damit das am weitesten nach Norden vorgeschobene zentral-europäische Mittelgebirge. Er erhebt sich im Norden und Westen steil aus dem Vorland und flacht nach Süden und Osten allmählich ab. Dabei wird der Harz von zahlreichen Tälern durchzogen. Das Schollengebirge ist

ca. 110 km lang und 30-40 km breit und bedeckt eine Fläche von 2.226 km². Ca. 40 % davon entfallen auf den niedersächsischen Westharz.

Der Unterharz erreicht Höhen bis 400 m ü. NN, wogegen der überwiegend bewaldete Oberharz im Nordwesten bis zu 800 m ü. NN erreicht. Der höchste Berg ist der Brocken mit 1.142 m ü. NN. Weitere herausragende Erhebungen sind der Acker-Bruchberg-Höhenzug (927 m ü. NN), die Achtermannshöhe (925 m ü. NN) und der Wurmberg (971 m ü. NN).

Wie in kaum einem anderen Wuchsgebiet Niedersachsens bestehen im Oberharz Diskrepanzen zwischen einem möglichen Waldbau und dem vorherrschenden Waldzustand (Otto 1991). Heute ist dort die Fichte die dominierende Baumart. Von 500-600 m ü. NN bis zur bei 1.050-1.100 m ü. NN gelegenen Waldgrenze am Brocken bestimmt sie das Waldbild. Diese heutige Bedeutung der Fichte ist kaum ohne eine Betrachtung ihrer nacheiszeitlichen Geschichte zu verstehen (Beug et al. 1999), die insbesondere in den letzten 1.000 Jahren sehr eng mit der prägenden Vormachtstellung des Harzer Erzbergbaus und der Siedlungsgeschichte des Harzes verknüpft ist.

Über einen konkreten Zeitpunkt für den Beginn des Bergbaus im Harz herrscht Uneinigkeit zwischen den Autoren. Denecke (1992) und Beug et al. (1999) stellen verschiedene Ansichten vor. Die früheste Datierung reicht bis in das 3. Jahrhundert nach Christi Geburt zurück. Selbst ein urgeschichtlicher Abbau von Erz wird für möglich gehalten.

Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass erst unter Otto I. im Jahr 968 der Bergbau am Rammelsberg bei Goslar in einer Weise begonnen bzw. intensiviert wurde, dass er deutliche Auswirkungen auf die umliegenden Wälder hatte (Meyer 1989). (Der Rammelsberg war mit 30 Mio. t Erzinhalt das weltweit größte zusammenhängende Blei-, Zink- und Kupfererzvorkommen (Roseneck 1992). Es konnten hier des Weiteren auch Eisen, Silber und etwas Gold abgebaut werden.)

Bis zu diesem Zeitpunkt war im Harz noch eine vom Menschen kaum beeinflusste Waldbestockung vorhanden (Meyer 1989). Über ihre Entwicklung und Zusammensetzung geben Pollenanalysen (^{14}C-Datierung von pollenanalytisch untersuchten Torfprofilen) und Radiokohlenstoff-Untersuchungen von Holzkohlen an mittelalterlichen Meilerplätzen recht genaue Auskunft (Meyer 1989; Beug et al. 1999). Demnach sind zu Beginn der Pollenzone X, d. h. vor 1.000-1.100 Jahren, nur an den Rändern der baumlosen Moore Fichtenreinbestände vorgekommen, die mit einigen Moorbirken und Ebereschen durchsetzt waren. Daran schlossen sich mit Fichte und Bergahorn gemischte Buchenbestände an (700-800 m ü. NN). Die größten Flächen nahmen reine Laubmischwälder ein, im Wesentlichen Buchenbestände mit größeren Anteilen an Bergahorn und vereinzelten Bergulmen, Hainbuchen, Linden und Eiben. In den Tälern wuchsen Erlenbruchwälder mit erheblichen Anteilen von Esche. Zum Harzrand hin erhöhte sich der Eichenanteil sehr deutlich (Meyer 1989, NMfELF 1997, Beug et al. 1999).

Die Einwanderung der Fichte (Übergang von Pollenzone VII zu VIIIa) setzte vor etwa 6.000 Jahren ein. Seit ca. 5.000 Jahren hat sie größere Bestände gebildet. Zu diesem Zeitpunkt wanderte jedoch auch die Buche ein und wurde vor ca. 2.000 Jahren die herrschende Baumart im Harz (Pollenzone IX). Zu Beginn der Bergbauzeit war die Buche also schon 1.000 Jahre lang die Hauptbaumart des Harzes (Meyer 1989, Beug et al. 1999).

1.2.1. Erste Bergbauphase

Neben den von Widukind von Corvey 968 für den Rammelsberg beschriebenen Silberadern (Beug et al. 1999, Bartels 2001) wurden zu dieser Zeit wohl auch Eisenerze und silberhaltige Bleierze im Raum Gittelde-Bad Grund verarbeitet (Hauptmeyer 1992).

Am Rammelsberg kam der Bergbau für 54 Jahre zum Erliegen, nachdem Heinrich der Löwe 1181 die Gruben und Hütten zerstören ließ. Es wird angenommen, dass dies auch die Ursache für den Beginn des Bergbaus im Oberharz war, der für diese Zeit angesetzt wird (Hauptmeyer 1992, Beug et al. 1999). Gleichfalls fallen in diese Zeit die Bemühungen der Zisterzienser um eine autonome Wirtschaftsführung auch außerhalb erschlossener Wirtschaftsräume. Nachweislich Ende des 12. Jahrhunderts wurde der Bergbaubetrieb durch die Südharzer Zisterzienserabtei Walkenried aufgenommen (Bartels 2001).

Nach dem letzten Königsbesuch durch Wilhelm von Holland im Jahre 1253 und die Übernahme der verpfändeten landesherrlichen Rechte am Rammelsberg ab 1296 durch den Rat der Stadt Goslar (Bartels 2001) begann die große Zeit Goslars als Bürgerstadt (Roseneck 1992), was sehr eng mit dem raschen Aufblühen der Silber- und Kupferherstellung am Rammelsberg verbunden war. Goslar wurde freie Reichs- und Hansestadt.

Bornhardt (1943), zitiert nach Beug et al. (1999), geht davon aus, dass die natürlichen Waldbestände in der Umgebung von Goslar schon vom 12. Jahrhundert an aufgebraucht waren. Dabei wurde der Harzer Bergbau in seinen geschichtlichen Anfängen weitgehend oberflächennah, in so genannten Pingen betrieben (Beug et al. 1999, Naundorf 2001). Der bergmännische Begriff „Pinge“ bezeichnet eine vergleichsweise primitive, tagebauartige Schürfstätte (www.wikipedia.de). Holz wurde zu dieser Zeit im Wesentlichen für die Verhüttung des Erzes und den Siedlungsausbau gebraucht (Geibel 2001).

Im Zuge der Umstellung von Pingen auf Stollen wurde das Sickerwasser zu einem großen Problem (Gundelwein 2001). Es ließ sich unterirdisch nicht mehr so einfach ableiten wie noch im Tagebaubetrieb. Anfangs waren zahlreiche „Wasserknechte“ mit dieser Aufgabe betraut. Auf schmalen „Fahrten“ (= Leitern) übereinander stehend, reichten sie sich wassergefüllte Ledereimer zu (Harzwasserwerke GmbH 2006). Diese Methode wird kaum auf lange Zeit ausreichenden Erfolg gehabt haben. Eine wirkliche Lösung der Wasserzugänge im

Berg konnte erst ein äquivalenter Wasserabfluss schaffen. So wurden erste Wasserlösungsstollen unter die Gruben getrieben. Bekannt ist der 1.100 m lange Rammelsberger Rathstiefste-Stollen, der 1271 erstmals urkundlich erwähnt wird. Bornhardt (1931) vermutet, dass er bereits aus dem 12. Jahrhundert stammt. Insofern lässt sich die Umstellung von Pingen auf Stollen in etwa zu dieser Zeit vermuten. Mit zunehmender Tiefe der Stollen wurden dann zusätzliche Anstrengungen nötig. Etwa aus dem 14. Jahrhundert stammt das Feuergezäher Gewölbe, eine gemauerte Radkammer. In ihr befand sich ein Wasserrad, mit dem Grubenwasser aus tieferen Bereichen auf das Niveau des Rathstiefste-Stollens gehoben und anschließend durch ihn abgeleitet wurde (Roseneck 1992). Das Prinzip, Wasser durch Wasser zu heben, setzte sich zunehmend durch (Gundelwein 2001).

Unter Tage war das Erz deutlich fester als an der der Verwitterung ausgesetzten Oberfläche. Das Gestein musste durch Feuersetzen spröde gemacht werden (Beug et al. 1999, Naundorf 2001). Für den Schachtausbau benötigte der Bergbau zudem Fichtenholz in größeren Dimensionen (Meyer 1989). Hinzu kam ein Rückgang der Metallausbeute (Beug et al. 1999). Im Vergleich zu den oberirdisch ausstreichenden reichen Erzen musste nun mehr Material gefördert werden, um die gleiche Metallausbeute zu erreichen. Den größten Holzbedarf hatte aber nach wie vor die Erzverhüttung. Für das Entschwefeln von einer Tonne Blei- oder Kupfererz benötigte man 2 rm (Raummeter) Holz und für das anschließende Ausschmelzen derselben Menge eine Tonne Holzkohle, hergestellt aus 7 rm Holz (Meyer 1989). Daher wechselten die Orte der Erzverhüttung anfangs oft. Nachdem die Wälder am Harzrand erschöpft waren, wurde das Erz in die Harzwälder geschafft und dort verhüttet, wobei die Hütten über den ganzen Harz verstreut waren (Naundorf 2001). Im 13. Jahrhundert, mit der Einführung von mit Wasserkraft getriebenen Blasebälgen, verlagerte man die Verhüttung an die Flussläufe. Wenigstens 102 Hütten, die allerdings nicht alle gleichzeitig betrieben worden sind, sind von 1199 bis 1527 im Westharz und im Harzvorland belegt (Hauptmeyer 1992).

Zur Zeit dieser ersten Bergbauperiode wurde der Wald im Westharz nordwestlich des Acker-Bruchberg-Zuges und südöstlich davon in den höheren Lagen vollständig für Bergbau und Hüttenwesen in Anspruch genommen (Meyer 1989).
Die Holznutzung in den Hüttenholzmarken erfolgte im Niederwaldbetrieb mit Umtriebszeiten von 12-30 Jahren (Meyer 1989, Geibel 2001). Da Buchenholzkohle (harte Kohle) mit höherer Temperatur als Fichtenholzkohle (weiche Kohle) verbrennt, wurde bevorzugt Buche für die Holzkohleproduktion verwendet. Deren geringe Fähigkeit zur Bildung von Stockausschlägen führte dabei zu einem zunehmenden Raubbau der Laubwälder. Auch die Fichte konnte bei dieser Wirtschaftsweise kaum Fuß fassen, da sie genutzt wurde, bevor sie blühen und fruktifizieren konnte. Als Folge dieser Übernutzung entstanden große Kahlflächen, auf denen sich Weichlaubhölzer und Heide etablierten.

Den Gruben waren Zechenwälder in ihrer unmittelbaren Nähe zugeteilt, in denen insbesondere starkes und geradschaftiges Fichtenholz begünstigt wurde (Meyer 1989). Dessen Nutzung erfolgte im plenterähnlichen Betrieb, wobei einzelne Fichtensamenbäume für die Verjüngung geschont wurden. Die Samen dieser Fichten konnten auch auf den Kahlflächen und in verlichteten Niederwäldern anfliegen.

Eiben und Linden verschwanden infolge eines gezielten Raubbaus zu dieser Zeit nahezu vollständig aus den Harzwäldern. Das Holz der Eibe war für die damalige Waffenproduktion (Bogenschützen) unerlässlich. Die Linde wurde zunächst als Honigbaum geachtet, dann aber zur Bastgewinnung genutzt. Der aus ihrer Rinde gewonnene Bast wurde zu einem wertvollen Rohstoff bei der Produktion von Transportmitteln im Bergbau (z. B. von Seilen).

Im 14. Jahrhundert brachte eine erhebliche Bergbaukrise den Erzbergbau im Harz nahezu zum Erliegen (Hauptmeyer 1992). Der technische Aufwand zum Brechen des Roherzes im Berg war stetig gestiegen, je tiefer die Stollen in ihn eindrangen. Der planlose Raubbau des Erzes mit seinem dichten Nebeneinander von Stollen führte zu Bergeinstürzen (Beug et al. 1999, Hauptmeyer 1992). In den Hüttenwäldern herrschte Holznot (Meyer 1989).

Die Pestwellen von 1347 und 1349 rafften viele Berg- und Hüttenleute dahin (Hauptmeyer 1992) oder führten zu deren Abwanderung (Meyer 1989). Das Grundwasserproblem konnte aufgrund des daraus entstandenen Arbeitskräftemangels nicht mehr bewältigt werden. 1360 standen die Stollen am Rammelsberg vollständig unter Wasser (Beug et al. 1999, Hauptmeyer 1992). Bergbausiedlungen wie Clausthal, Zellerfeld, Andreasberg und Braunlage, die im 13. Jahrhundert bestanden, wurden während der Krise wieder verlassen (Denecke 1978, zitiert nach Beug et al. 1999).

Diese erste Bergbauepoche hatte der Fichte die Voraussetzungen für die weitgehende Einwanderung in alle Waldbereiche geschaffen, doch konnte sich auch die Buche im Zuge der Bergbaukrise leicht erholen und die Weichhölzer zurückdrängen (Meyer 1989).

1.2.2. Zweite Bergbauphase

Wann die zweite Bergbauphase im Harz einsetzte, ist nicht geklärt. Bemühungen, bspw. der Ratsherren von Goslar, den Betrieb am Rammelsberg wieder aufzunehmen, waren zahlreich (Hauptmeyer 1992, Beug et al. 1999, Bartels 2001). Jedoch werden erst neue technische Hilfsmittel ein Entwässern der Stollen in größerer Tiefe ermöglicht haben (Hauptmeyer 1992). Als Beispiel sei die ab 1445 genutzte „Heinzenkunst“ genannt, bei der mit Wasser gefüllte Lederbälle durch ein eng umschließendes Holzrohr gezogen wurden. Um 1470 begann die zweite große Blütezeit Goslars (Roseneck 1992). Das Silber des Rammelsberges wurde mit großem Gewinn in der städtischen Münze verarbeitet, und die Kaufleute be-

trieben einen regen Handel vor allem mit Blei und Vitriol. Das zwar weniger wertvolle, aber gewerblich nützliche Bleierz gewann nach 1471 zunehmend an Bedeutung. Mit dem Saigerverfahren ließ sich unter Zugabe von Blei nun das Silber aus den silberhaltigen Kupfererzen herauslösen (Bartels 2001). Durch das Interesse am Bleierz stieg die geförderte Groberzmenge im Rammelsberg von 15.900 t im Jahre 1486 innerhalb von knapp zehn Jahren auf 37.500 t (Hauptmeyer 1992, Bartels 2001).

1487 wird für das Gebiet um St. Andreasberg ein neuer Erzfund und die Aufnahme von dessen Förderung berichtet (Niemann und Niemann-Witter 1992). Der eigentliche Durchbruch des Andreasberger Bergbaus erfolgte jedoch erst im Jahre 1520, als man reichere Vorkommen an Gangerz und Erznester anschlug.

Der deutlich höhere Bedarf an Metallen, vor allem an Silber, führte zu einer weit größeren Produktion als im Mittelalter (Meyer 1989). Die dafür benötigten Arbeitskräfte warb man vor allem aus dem Erzgebirge an, wo sich der Bergbau gerade in einer Krisensituation befand. Dabei wurden ihnen bedeutende Privilegien eingeräumt. Um z. B. weitere Siedler nach Andreasberg zu holen, erließ man 1521 die so genannte Bergfreiheit (Beug et al. 1999). Das darin zugesagte Recht auf freies Schlagen und Handeln von Brenn- und Bauholz sorgte für eine enorme zusätzliche Steigerung des Holzbedarfs (Meyer 1989). Das Recht auf Rodungen zugunsten von Ackerbau und Viehzucht (Weiden für das Winterfutter) wurde ebenfalls zugesichert und schuf um die freien Bergstädte große waldfreie Flächen. Die freie und kaum eingeschränkte Viehhaltung und Waldweide im Sommer führte zu starken Schäden am jungen Laubholz (Meyer 1989). Hinzu kamen noch die Viehherden der Bürger aus den Harzrandstädten, die in den Harzwäldern zur Weide „getriftet“ wurden. Für Goslar ist diese Viehtrift von 1552 bis 1872 kontinuierlich belegt (Naundorf 2001). Die zweite Andreasberger Bergfreiheit von 1527 sah zudem den Erlass des Zehnten für fünf Jahre und seine Reduzierung für weitere fünf Jahre vor (Niemann und Niemann-Witter 1992).

Alle Fürsten, die damals Land im Harz besaßen, gewährten nach und nach ähnliche Bergfreiheiten und der Bergbau nahm dadurch einen raschen Aufschwung (Beug et al. 1999). In der Folge kam es zu einem Zuzug einer größeren Zahl von Bergleuten. Die Städteneu- oder -wiedergründungen der sieben Oberharzer Bergstädte Clausthal, Zellerfeld, Wildemann, Grund, Lauthental, Altenau und Andreasberg fallen in diese Zeit.

Das rasante Wachstum der Metallproduktion veranlasste die welfischen Fürsten den Rammelsberg und die dazugehörigen Forsten von der Stadt Goslar 1527 durch Rückzahlung der Pfandsumme wieder zu übernehmen (Steinsiek 1999, Bartels 2001). Die Stadt Goslar versuchte sich zu wehren, unterlag jedoch Herzog Heinrich dem Jüngeren zu Braunschweig in diesem kriegerischen Konflikt. 1552 sicherte der Riechenberger Vertrag den Welfenherzögen Obrigkeit und Jurisdiktion am Rammelsberg (Hauptmeyer 1992) und den dazugehörigen Waldungen (Roseneck 1992). Eine staatliche Wirtschaftspolitik setzte ein und ließ

den Oberharzer Bergbau erblühen. Goslar wurde zu einem Bergbauort unter vielen degradiert (Hauptmeyer 1992).

Technische Neuerungen ermöglichten den Erzabbau jetzt auch in größeren Tiefen. Mit Hilfe des *Krummen Zapfens* ließ sich nun die Drehbewegung eines Wasserrades in eine geradlinige Bewegung, z. B. zum Antrieb von Pumpen und Fahrkünsten umwandeln (Bartels 2001). Eine Welle mit diesen eingelassenen Zapfen diente als eine Art Kurbelwelle. Daneben sorgten wassergetriebene Kolbenpumpen, die Eisenkette und neue Wasserlösungsstollen (z. B. der 2.600 m lange und 45 m unter dem Rathstiefste-Stollen gelegene Julius-Fortunatus-Stollen, 1486-1585 (Roseneck 1992)) für die Entwässerung der Stollen (Gundelwein 2001). Beim Erztransport im Schacht kamen verstärkt wassergetriebene Kehrräder zum Einsatz. Für Frischluft in den Stollen sorgten gleichfalls mit Wasserkraft angetriebene Blasebälge (Meyer 1989). Um all diese Maschinen des Bergbaus und auch die der Hüttenindustrie zuverlässig mit dem sie antreibenden Wasser versorgen zu können, wurde im 16. Jahrhundert damit begonnen, im Harz ein ausgeklügeltes System von Teichen und Gräben anzulegen (Beug et al. 1999), das so genannte „Oberharzer Wasserregal". „Regal" bedeutet dabei soviel wie Königsrecht: Zusammen mit der Verleihung des Rechts, auf einem abgemessenen Abschnitt eines Erzganges Bergbau zu treiben, hat die Landesherrschaft zugleich die Nutzung des Wassers für den Antrieb von Kehrrädern, Künsten usw. mit verliehen (Harzwasserwerke GmbH 2006).

Der intensive Ausbau der Stollen erforderte vermehrt starkes Fichtenholz (Meyer 1989). Im Verhüttungswesen erzeugte man nun durch effizientere wassergetriebene Blasebälge in größeren Öfen deutlich höhere Temperaturen. Für die wichtigsten Schmelzvorgänge reichte jetzt die energieärmere „weiche" Fichtenholzkohle aus, zumal deren Qualität ebenfalls gesteigert werden konnte. Der Transport der Holzkohle wurde auch über größere Entfernungen möglich. Schmale einachsige Wagen mit einem Flechtkorb als Ladebehälter verringerten die Transportverluste deutlich. Die Hütten waren nicht mehr an die Hüttenholzmarken gebunden.

Die geänderten Wirtschaftsweisen ergaben für die Forstwirtschaft eine starke Bevorzugung der raschwüchsigen Fichte. Von den mittelalterlichen Bergbaugebieten ausgehend, breitete sie sich vor allem im Norden und Westen des Gebietes deutlich aus (Meyer 1989). Auch Steinsiek (1999) berichtet für den Harz von einer eindeutigen Verschiebung bei der Baumartenverteilung zugunsten der Fichte. Am markantesten sei diese Entwicklung im nördlich gelegenen Wolfenbüttelschen Harz (dem späteren Kommunionharz) gewesen. Von 1566 bis 1691 stieg der Fichtenanteil hier von knapp 25 % auf über 70 %.

Begünstigt wurde die Fichte durch die „Kleine Eiszeit". Hierunter versteht man eine im 16. Jahrhundert beginnende Periode relativ kühlen Klimas. Besonders kalte Abschnitte waren die Jahre 1570-1630 und 1675-1715 (www.wikipedia.de). Nach Geibel (2001) erlaubte das Klima bis ins 15. Jahrhun-

dert hinein im Raum Goslar noch den Weinanbau. Dann kam es zu einem Temperaturrückgang um etwa zwei bis drei Grad Celsius im Jahresdurchschnitt.

Die Fichtenbestockung selbst führte zusätzlich zu einer deutlichen Verschlechterung des Lokalklimas, da der Boden länger beschattet wird und dadurch der Schnee im Frühjahr später abtaut (Meyer 1989). Als Riegel in den Tälern verhindern dichte Bestände den Kaltluftabfluss. Kälteres Klima benachteiligte die mehr Wärme liebende Buche in rauen Gebirgslagen wie dem Harz gegenüber der Fichte erheblich. Darüber hinaus konnte die Fichte dem Verbiss des Weideviehs besser widerstehen als die Buche.

Auch in dieser zweiten Bergbauperiode wurden durch spezialisierte Handwerker bestimmte Holzarten gezielt aus den Beständen herausgehauen (Meyer 1989). Die Mollenhauer fertigten vor allem aus Bergahorn und Roterle Bergtröge und andere für die Montanindustrie nützliche Gerätschaften. Die letzten Linden waren nicht nur wegen ihres Bastes sehr gesucht, ihre Kohle war zur Herstellung des Schießpulvers besonders geeignet. Stark geplündert wurden auch Esche, Spitzahorn und Hainbuche, die als Produkte der Stellmacher in großen Mengen in Bergbau und Verhüttung nachgefragt wurden. Die Eichen wiederum lieferten die begehrte Gerbrinde.

Eine eigenständige Forstverwaltung im heutigen Sinne gab es zu dem Zeitpunkt im Harz noch nicht (Meyer 1989). Die Förster waren Bedienstete der Bergbauverwaltungen und hatten die Hauptaufgabe, zuverlässig die gewünschten Holz- und Kohlemengen zu liefern. Die Fichte wurde auf kleinen Kahlschlägen natürlich verjüngt, Laubholz auf großen Flächen über Stockausschläge. Beide Verfahren gelangen nicht auf allen Standorten, so dass Blößen und Verlichtungen immer häufiger wurden. Steinsiek (1999) berichtet, dass die Holzvorräte des Harzes seit Mitte des 16. Jahrhunderts „nicht mehr als unerschöpflich angesehen werden konnten".

Im nördlichen Harzgebiet dominierten bereits die reinen oder fast reinen Fichtenwälder. Diese im 16. Jahrhundert beginnende Umstellung auf die ausschließliche Nutzung von Nadelholz bewirkte eine Steigerung des Holzertrages von bisher anderthalb auf vier Festmeter pro Jahr und Hektar (Geibel 2001).

Im Zuge neuer Pestepidemien (1577 und 1625) und vor allem aus wirtschaftlichen Gründen im Zusammenhang mit dem Dreißigjährigen Krieg kam es zu einem neuerlichen Niedergang des Harzer Bergbau- und Hüttenwesens (Niemann und Niemann-Witter 1992).

1.2.3. Dritte Bergbauphase

Nach dem Dreißigjährigen Krieg kam der Bergbau nur schleppend wieder in Gang (Beug et al. 1999). Erst 1674 waren die Zustände z. B. in Andreasberg soweit geordnet, dass erstmals eine gewinnbringende Ausbeute erzielt werden konnte (Niemann und Niemann-Witter 1992). Eine neue Blütezeit des gesamten

Harzer Bergbaus wurde erst nach 1700 durch die Lösung der Wasserprobleme ermöglicht. Wiederholte Trockenperioden in der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts hatten die Notwendigkeit eines durchdachten wasserwirtschaftlichen Systems deutlich erwiesen, mit dessen Hilfe die mit zunehmender Grubentiefe immer zahlreicher werdenden Pumpen und Wasserräder regelmäßig mit Aufschlagwasser versorgt werden konnten (Niemann und Niemann-Witter 1992).

Das bereits im 16. Jahrhundert begonnene „Oberharzer Wasserregal" wurde jetzt sehr intensiv ausgebaut; besonders erwähnt sei der zwischen 1714 und 1721 entstandene Oderteich. Mit einem Fassungsvermögen von 1,7 Mio. m³ Wasser galt er noch bis 1891 als größte Talsperre Deutschlands. Insgesamt entstand zwischen 1530 und 1870 (Hauptbauzeit waren dabei die Jahre 1540-1730) ein System aus 120 Teichen, 500 km Gräben und 20 km Wasserläufen. Davon wird heute nur noch ein Teil (65 Teiche, 70 km Gräben und 20 km Wasserläufe) durch die Harzwasserwerke unterhalten (Harzwasserwerke GmbH 2006).

Das in den Teichen aufgestaute Wasser bildete nun eine Energiereserve für mehrere Monate. Nur in besonders trockenen Sommern kamen Bergbau und Verhüttung noch zum Erliegen (Meyer 1989).

Der Bergbau erfuhr in diesem Zeitraum weitere wesentliche Verbesserungen, z. B. durch die Verwendung von Schießpulver für die Sprengungen in den Bergwerken des Oberharzes. Statt der „Heinzenkunst" fanden übereinander angeordnete Saugpumpen Verwendung (Niemann und Niemann-Witter 1992) und es wurden effektivere Kehrräder mit doppeltem Schaufelkranz installiert, die einen Wechsel der Drehrichtung erlaubten (Bartels 2001).

Ausgehend vom Harzrand wurden in jahrzehntelanger Arbeit lange Wasserlösungsstollen auch unter die Oberharzer Bergwerke getrieben (Meyer 1989). Damit wurde der Bergbau dort gleichfalls in weitaus größeren Tiefen ermöglicht. Die Erfindung des Drahtseils (1834) durch den Harzer Oberbergrat Albert trug ebenso dazu bei.

Desselben erfuhren Verhüttung und Köhlerei technische Verbesserungen, die insbesondere die Ausbeute steigen ließ. Im Aufwind einer ebenfalls günstigen Nachfrageentwicklung kam es seit den letzten beiden Jahrzehnten des 18. Jahrhunderts zur Ausdehnung des Harzer Eisenhüttenwesens durch Ausbau und Verbesserung bestehender Anlagen sowie den Neubau von Werken.

Die technischen Neuerungen gingen erneut mit einer erheblichen Steigerung des Holzbedarfes einher (Meyer 1989). Bereits in den ersten Dekaden dieser Bergbauepoche war die benötigte Holzmenge beachtlich. Basierend auf dem Zeitraum 1723-1726 ermittelte Gerhard (1994) allein für die Silber-, Kupfer- und Eisenhüttenwerke im hannoverschen Teil des Harzes einen jährlichen Bedarf von knapp 399.500 Maltern Kohlholz (= 796.603 m³), was knapp 89.000 Karren Holzkohle entsprach. Rechnet man den weiteren Kohlholzbedarf der Salinen, Brauereien sowie für das Heizen und Kochen in den Harzstädten hinzu, erhält man den Jahresbedarf von 637.360 Maltern Kohlholz (1.270.896 m³). Nach Gerhard (1994) entspricht das der 5-6fachen Menge dessen, was zusätzlich als

Bauholz in Berg-, Poch- und Hüttenwerken oder in den Harzstädten gebraucht wurde.

Für eine der größeren Harzer Eisenhütten, die Rote Hütte, konnte Gerhard (1994) für das Jahr 1750 einen Bedarf von 1.800 Karren Holzkohle im Jahr ermitteln. Der Kohleverbrauch stieg auf 4.496 Karren im Jahr 1757 an und erreichte zum Ende des Jahrhunderts 11.793 Karren Holzkohle.

Abb. 1.2. Nachzeichnung eines Motives auf der Bergkanne des Berghauptmannes von Immenhoff von 1734. Zeichnung: Roessler (aus Meyer 1989)
Es ist die älteste Darstellung der Fichtenwirtschaft im Harz: Im Vordergrund weist ein Förster eine Fichte zum Fällen an. Zwei Waldarbeiter zersägen eine dicke Fichte in Kohlholzstücke. Im Hintergrund einige Holzkohlenmeiler in verschiedenen Stadien. Der Holztransport erfolgt unabhängig von der Jahreszeit mit einem Pferdeschlitten. Die unterschiedlichen Längen des gestapelten Holzes lassen Grubenholz (lang) und Kohlholz (kurz) erkennen. Am Einschlagsort liegt langes Bauholz. Zwei Wasenbinder tragen Fichtenreisig an einen Betriebsgraben, um ihn zum Schutz gegen Zufrieren abzudecken.

Man hatte jedoch die Wälder bereits derart stark beansprucht, dass von 1725 an die Hüttenproduktion gedrosselt werden musste, um die kontinuierliche Holzkohleversorgung der Hütten sicherzustellen (Bartels 2001). Einzelne Hütten wurden auch geschlossen (Meyer 1989). Schließlich konnte der Holzbedarf nur noch durch den Transport von Holzkohle aus dem weiteren Harzumland gedeckt werden. Zwischen Harz und Solling entstand ein regelrechter Pendelverkehr. Von über 1.000 Gespannen pro Tag wird berichtet (Gerhard 1994). Eisenerz aus dem Harz wurde im Solling verhüttet; als Rückfracht wurde Holzkohle in den Harz gebracht (Meyer 1989).

Besonders gravierend waren in diesem Zusammenhang auch die Veränderungen im Verkehrswesen. Noch 1815 war der Westharz nur auf einer Straße, von Goslar nach Osterode, mit zweiachsigen Wagen befahrbar. Mitte des 19. Jahrhunderts hatte die Forstverwaltung das Straßennetz so ausgebaut, wie es noch heute im Wesentlichen als Fernstraßennetz besteht (Meyer 1989).

Politisch war der Harz nun in drei Teile gegliedert: das spätere Königreich Hannover, das Herzogtum Braunschweig und den von beiden gemeinsam verwalteten Kommunionharz. (Die Entwicklung der politischen Gliederung des Harzes als auch die Determinanten der allgemeinen politischen Entwicklung in Deutschland sind bei Steinsiek (1999) detailliert beschrieben.)

Die hannoverschen Forsten waren bis 1868 Teil der Bergwerksverwaltung und hatten deren Ansprüche zu erfüllen.

Im Kommunionharz erfolgte eine besonders intensive Nutzung, da Hannover und Braunschweig die „eigenen" Wälder schonen wollten. Der bekannte Ausspruch, dass sich in der gesamten Kommunion kein einziger Oberständer mehr befände, an dem sich ein frustrierter Förster aufhängen könne, dürfte nicht allzu übertrieben sein. Seine Anwendung auf den ganzen Harz ist aber unzulässig. Auf den gesamten ehemaligen Kommunionharzflächen gibt es heute fast keine Buchenbestände mehr.

Im Braunschweiger Harz war die Abhängigkeit von der Bergbauverwaltung nicht ganz so groß. Den Bedürfnissen der angrenzenden Harzorte entsprechend, wurden hier Brennholz- und Hutewälder geschont, was sich heute in Buchen- und auch Eichenaltbeständen (Walkenried) zeigt. Bereits 1730 legte hier Jägermeister von Langen die Grundlagen für die moderne Forstwirtschaft. Die Hüttenwerke hatten das Holz nachhaltig zu nutzen, und die Umtriebszeiten wurden erhöht, was der Buche in den Braunschweigischen Teilen des Harzes half, sich besser zu behaupten.

Bis 1750 war die Fichtennaturverjüngung im Harz üblich (Meyer 1989). Aufgrund der Größe der Kahlschlagsflächen und des Vieheintriebs gelang dieses Verjüngungsverfahren jedoch nun nicht mehr in ausreichendem Maße. Für den Goslarer Stadtwald wird für diese Zeit ein Freiflächenanteil von einem Drittel an der Gesamtwaldfläche angegeben (Geibel 2001). Das dürfte im übrigen Harz ähnlich gewesen sein. Mit der Einführung der Saat als gängiges Verjüngungsverfahren für die Fichte bzw. ab 1820 der Büschelpflanzung hat sich der Anteil der Blößen dann zunehmend verringert. Ab 1850 setzte sich schließlich die Pflanzung von Einzelpflanzen durch. Die Holzzuwachsrate erhöhte sich bis 1880 auf fast fünf Festmeter je Hektar und Jahr. Die Stammzahlen pro Hektar waren bei diesem Kulturverfahren anfangs sehr hoch, was jedoch bei den kurzen Umtriebszeiten der reinen Fichtenholzkohlenwirtschaft durchaus erwünscht war (Meyer 1989). Der ständig steigende Bedarf an Bau- und Grubenholz ließ bald eine kombinierte Nutzung entstehen. In jedem Schlag richteten Spezialhauer die in den Gruben benötigten Sortimente her, bevor der Köhler den Rest verarbeitete. Der Beginn einer besser geregelten Forstwirtschaft führte so zur Erhöhung der Umtriebszeiten. Durch die häufige Wahl von für das raue Harzklima ungeeigneten breitkronigen Tiefland-Fichtenherkünften in Kombination mit hohen Stammzahlen pro Hektar stiegen die Gefahren der Fichtenwirtschaft. Windwurf, Schnee- und Eisbruch, sowie Borkenkäferkalamitäten begannen weitgehend die Fichtenwirtschaft zu bestimmen (Meyer 1989, Geibel 2001).

Seit dem Ende des 17. Jahrhunderts machte sich der starke Befall durch den „fliegenden Wurm“, wie der Borkenkäfer damals genannt wurde, bemerkbar. Im Zusammenhang mit Windbruch fiel in dieser Zeit mehr Holz an, als geköhlert werden konnte, und es wurden zunächst wieder größere Erzmengen verhüttet (Beug et al. 1999). Als Folge stellte sich jedoch in den 1720er Jahren eine gravierende Holznot ein, die zur Reduzierung der Erzförderung und den bereits beschriebenen Holzkohleimporten führte.

Ziemlich genau ein Jahrhundert nach diesem ersten großen Borkenkäferschadensfall kam es zwischen 1770-1786 zu einem weiteren, der „großen Wurmtrocknis“ (Meyer 1989, Beug et al. 1999). Sie führte zu einem Waldverlust von mehreren zehntausend Hektar (NMfELF 1997). Eine wirksame Bekämpfung der Käfer wurde seitens der Bergbauverwaltung zunächst behindert (Meyer 1989). Wieder bewirkte das vermehrt anfallende Holz nämlich anfangs einen Aufschwung des Bergbaus, der jedoch schnell zu großer Holzknappheit und zu gedrosselten Kapazitäten führte.

Im Jahr 1800 fegte dann der bis dahin heftigste Orkan über den Westharz und führte zu Sturmschäden der fünf- bis zehnfachen Jahreseinschlagsmenge (Geibel 2001).

Erst im 19. Jahrhundert, nach dem Anschluss des Harzes an das Eisenbahnnetz, wurde die immer knappere und teurere Holzkohle durch Steinkohle und Koks ersetzt (Beug et al. 1999). Damit begann der Niedergang dieses in Deutschland bis dahin so bedeutenden Eisenhüttenzentrums Harz (Laufer 1992, Mende 1992). Ende der 1830er Jahre wurde an der Ruhr erstmals die zur Koksbereitung besonders geeignete Fettkohle gefördert. In den folgenden Jahrzehnten setzte sich dieser Brennstoff in der Verhüttungsindustrie zunehmend durch. Das Harzer Umland wurde in den 1850er und 1860er Jahren an das Eisenbahnnetz angeschlossen und konnte mit diesem Steinkohlenkoks versorgt werden. Bedingt durch die Topographie des Harzes dauerte dieser Prozess dort bis in die 1870er Jahre. Die schlechte Verkehrslage in Kombination mit der starken auswärtigen Konkurrenz (Ruhrgebiet, Oberschlesien, Saarland, England), beginnender Erschöpfung der Harzer Gruben und politischen Veränderungen (das Königreich Hannover wurde 1866 preußische Provinz) ließ die Harzer Hüttenindustrie in die Bedeutungslosigkeit versinken. Von den zur Jahrhundertmitte noch bestehenden elf Standorten der staatlichen Eisenhütten im Hannoverschen Harz existierten 1870 nur noch vier in ihrem Umfang geschrumpfte und auf ihren Ursprungsort reduzierte Betriebe. Doch auch 1912 sind in Deutschland noch einige wenige Holzkohlehochöfen in Betrieb, u. a. im Harz.

Im Goslarer Rammelsberg wurde 1859, kurz vor Erschöpfung des „Alten Lagers“, ein neues Erzvorkommen, das „Neue Lager“ entdeckt (Roseneck 1992). Unter preußischer Leitung wurde hier die Erzförderung noch einmal nachhaltig gesteigert. Von unter 15.000 t zum Zeitpunkt der Entdeckung des neuen Lagers steigerte sich die Jahresförderung auf den neuen Rekordwert von 60.000 t im Jahr 1897 (Bartels 2001). Auch die Nationalsozialisten bauten das Bergwerk nochmals

in großem Stil aus. Die Erzförderung verdreifachte sich von 1933 bis 1938 auf knapp 270.000 t.

Das vermutete „Dritte Lager“ wurde jedoch nicht gefunden, so dass am 30. Juni 1988 am Rammelsberg nach über 1.000-jähriger Bergbauaktivität der letzte Förderwagen gehoben wurde. Im Dezember 1992 erfolgte die Aufnahme in die Liste des UNESCO-Weltkulturerbes (Roseneck 1992, Bartels 2001).

Als letztes Erzbergwerk im Harz stellte 1992 die Grube „Hilfe Gottes“ in Bad Grund ihren Betrieb ein. Damit endete vorerst die lange Geschichte des Harzer Bergbaus.

In den Harzwäldern ergaben sich im Zuge dieser dritten Bergbauperiode in der Bewirtschaftung und Holzverwendung von Mischbeständen aus Buche mit Fichte bzw. Fichte mit Buche zunehmend Schwierigkeiten (Meyer 1989). Wurde die Buche vorweg zu Holzkohle verbrannt oder die Fichte vorweg als Grubenholz verwendet, kam es bei größeren Mischungsanteilen der entsprechenden Baumart zu Stabilitätsproblemen des verbleibenden Bestandes. Zudem ließen sich die Buchenanteile häufig nur durch gezielte Begünstigung der Buche erhalten. Die Reinbestandwirtschaft wurde Ziel des Waldbaus. Daher wurden Mischbestände zwischen 1750 und 1830 gezielt entmischt. Für die montanen Lagen entschied man sich für Fichten-, in den niederen Lagen für Buchenbestände (Meyer 1989).

1868 wurde die Forstverwaltung auch im hannoverschen, bzw. nun preußischen Harz selbständig. Das heutige Waldbild des Westharzes war zu dieser Zeit schon weitgehend entstanden. Artenarme Buchenwälder, vor allem in den bergbaufernen Teilen des West- und Südharzes, reine Fichtenwälder, unterbrochen durch Teiche, Bergwiesen um die Städte und Rauchschadensblößen im Umfeld der Hütten bestimmten in den übrigen Teilen das Landschaftsbild. Wirtschaftliche Überlegungen ließen weiterhin die Bevorzugung der Fichte sinnvoll erscheinen. Die Ungunst des Klimas, verbunden mit einer oft zu hohen Stammzahlhaltung pro Hektar bestimmten noch bis in die 80er Jahre des 20. Jahrhunderts die Fichtenwirtschaft: 30-50 % des Einschlages fielen infolge von Katastrophen an (Meyer 1989).

1.2.4. Forstgeschichte nach 1945

Kleinschmit (1989) weist darauf hin, dass auch in der jüngeren Geschichte mit den „Engländerhieben“ und Borkenkäferkalamitäten nach dem zweiten Weltkrieg und den Sturmkatastrophen 1972 und 1976 die Vormachtstellung der Fichte im Harz gefördert wurde.

In seiner Dissertation untersuchte Willmann (1951) Ursache und Ausmaß der Borkenkäferkalamität nach 1945 am Beispiel des Oberharzer Forstamtes Oderhaus. Das Forstamt umfasste nach dem Betriebswerk von 1946 eine Holzbodenfläche von 4.047 ha, die zu 91 % mit Fichte bestockt war. Günstig für die Käferentwicklung gestalteten sich die Sommer in dieser Zeit. Von 1937-1939 und dann

durchgehend von 1942-1949 werden sie als „übernormal warm“ angegeben. Bedingt durch die Einberufung zur Wehrmacht herrschte im Forstamtsbereich ein Arbeitskräftemangel, der insbesondere in den Nachkriegsjahren bis 1949 schwerwiegende Auswirkungen hatte. Anfallendes Schadholz (kleinerer Windwurf im November 1940, 14.000 Festmeter Schneebruch im Winter 1940/41, 12.000 Festmeter Windwurf 1943) konnte nicht in ausreichendem Maße aufgearbeitet werden. So entwickelte sich über die Jahre eine bedeutende Käferpopulation, die in den Jahren 1944/45 zu erstem Befall am stehenden Holz führte. Im Zuge der Kampfhandlungen im April 1945 kam es zu Beschussschäden in den Beständen und auch das Straßen- bzw. Panzersperrenholz bot im anschließenden warmen Sommer 1945 weitere gute Brutbedingungen für die Käfer. Bis in den April 1947 hinein dauerte die Aufarbeitung der befallenen stehenden Stämme, dann erging ein Einschlagverbot durch die britische Besatzungsmacht. Der bislang parallel laufende und nun einzige legale Holzeinschlag durch die Briten nahm keinerlei Rücksicht auf vorhandenen oder potentiellen Käferbefall und das Schälen der Stämme wurde grundsätzlich unterlassen. So kam es im Zuge des warmen Sommers 1947 zu einer neuerlichen Massenvermehrung der Käfer. Erst 1949 führten massive Bekämpfungsmaßnahmen das Ende der Kalamität herbei. Insgesamt umfasste der Käferbefall zwischen 1943 und 1949 allein im Forstamt Oderhaus 93.000 fm o. R.; davon entfielen 50 % auf stehendes Holz.

Zusätzlich kam es durch die Reparationsleistungen an die englische Besatzungsmacht zu einer Nutzungssteigerung in den niedersächsischen Forsten von etwa 150 % der planmäßigen Nutzung während des Krieges auf 343 % im Wirtschaftsjahr 1946, 354 % im Wirtschaftsjahr 1947 (Koss 1994). Die Rate sank erst 1948 auf 235 % ab. Für den Nadelschnittholz- und Nadelstammholzzwangsexport wurden zumeist wertvolle Fichtenstammholzbestände in hiebs- und abfuhrgünstiger Lage eingeschlagen. Nach Angabe des NMfELF (1997) betraf das im niedersächsischen Harz über 10.000 Hektar. Der Einschlag erfolgte als Direktmaßnahme in eigener Regie durch den Besatzer ohne Rücksicht auf das Landschaftsbild oder forstliche Hiebsordnungen (Koss 1994). Mit Ablauf des Forstwirtschaftsjahres 1948 wurde der Holzzwangsexport nach Großbritannien eingestellt. Die Aufforstung der Kahlflächen dauerte bis ins Jahr 1955.

Die durch Käferbefall oder als „Engländerhiebe“ entstandenen riesigen Kahlflächen erforderten aufgrund der drohenden Bodenerosion ein rasches Handeln der Forstverwaltung. Die Aufforstung mit der robusten und schnellwachsenden Fichte stellte seinerzeit die einzige Alternative dar.

Am Vormittag des 13. November 1972 hinterließ ein Sturm aus westlicher Richtung im niedersächsischen Harz auf 4.779 ha Waldfläche schwere Schäden. Mit über 91 % war die Fichte, die im Westharz zu der Zeit auf rund 80 % der Waldfläche wuchs, die hauptgeschädigte Baumart. Fast 60 % der Schadensfläche nahmen zu über 70 % zerstörte Bestände ein. Einschließlich eines weiteren Sturmschadens vom 3. Januar 1976 mussten 3.270 ha neu aufgeforstet werden. Das entsprach dem Siebenfachen der jährlichen Kulturfläche in den Jahren vor

dem Sturm. Trotz erster Walderneuerungsbestrebungen wurden erneut 88,7 % der Kulturflächen, schwerpunktmäßig in den Wuchsbezirken „Hoher Ober- und Mittelharz“ und „Nördlicher und Westlicher Oberharz“ mit reiner Fichte bepflanzt (Heyden-Rynsch 1979).

Das Ausmaß der Schadfläche, insbesondere aus den Nachkriegsjahren, wird bei der Betrachtung der Forsteinrichtungsergebnisse deutlich. Kleinschmit (1989) weist in einer Zusammenstellung dieser Ergebnisse aus den 1980er Jahren darauf hin, dass auf über 40 % der Holzbodenfläche Bestände vorherrschen, die jünger als 40 Jahre sind, also aus Kulturen stammen, die erst nach dem Kriege angelegt wurden.

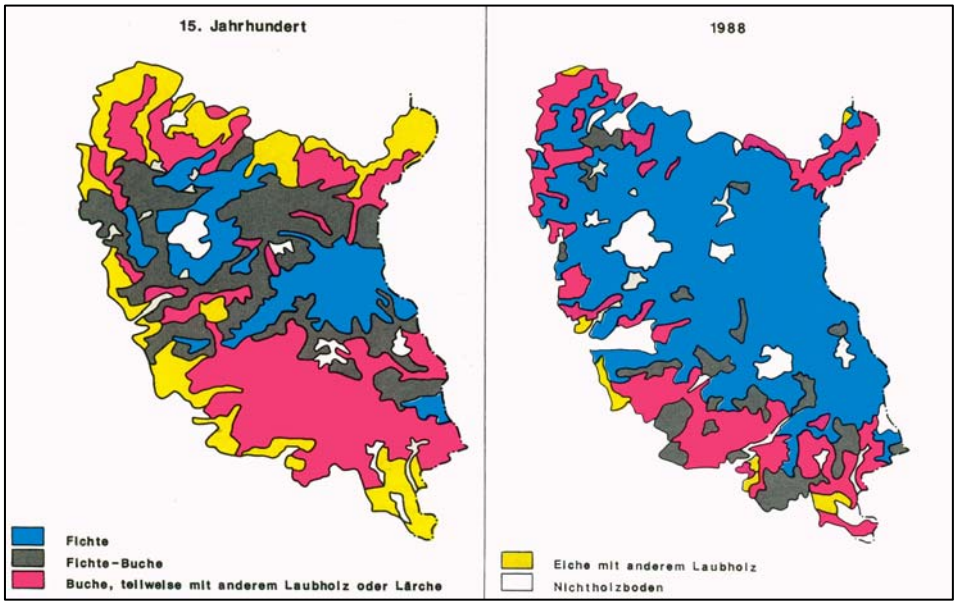


Abb. 1.3. Vergleich der Baumartenanteile im Westharz 1530 und 1988 (aus Kleinschmit 1989).

Ein in den 1980er Jahren immer bedrohlicher gewordenes Risiko, vor allem für die Fichte als den „Brotbaum“ der Forstwirtschaft, stellten die Immissionsschäden dar. Anders als die Rauchschäden, die im Zuge der Bergbauepochen auf den Umkreis der Hüttenstandorte beschränkt blieben, wurden nun über lange Distanzen transportierte Schadstoffe zu einer großen Gefahr für die Wälder. Als hoch aufragende Barriere vor den Industriegebieten der Rheinachse im Westen und Südwesten ebenso wie vor den östlichen Industriegebieten mit ihrer Verbrennung schwefelhaltiger Braunkohle gelegen, empfing der Harz Schadstoffe aus jeder Himmelsrichtung. Massive Versauerungen von Böden und Gewässern, Schwermetallbelastungen und Mangelsituationen in der Pflanzenernährung waren die Folge. Teile des Oberharzer Fichtenwaldes starben ab, alle Kämme, Kuppen

und exponierte Rücken, aber auch Wälder in tieferen Lagen wurden stark beeinträchtigt. Die entstandenen Verlichtungen in vielen Waldbeständen führten zu Vergrasung, Massenvermehrung von Mäusen und anderen zusätzlichen Problemen für die Forstwirtschaft (Otto 1991).

Im Zuge der regelmäßig durchgeführten Waldschadensinventuren galt der Harz als ein Hauptschadensgebiet in Niedersachsen (Lewark 1989, Spellmann und Wagner 1993). 1984-1986 wurde die Hälfte der Waldfläche im Harz als geschädigt eingestuft. 1988 musste eine Zunahme der Fläche aller Schadstufen auf 61 % festgestellt werden. Bei der Fichte hatten vor allem die Nadelvergilbungen, ein spezifisches neuartiges Symptom der immissionsbedingten Waldschäden, deutlich zugenommen. 1997 schreibt das NMfELF, dass fast jeder dritte Baum im Harz deutlich geschädigt sei. Bei den über 60-jährigen Wäldern liege das Schadensprozent über 90 % - und das schon seit Jahren. Auch im Waldzustandsbericht des Jahres 2006 werden die permanent seit Beginn der Waldzustandserhebung registrierten, vergleichsweise hohen Verlichtungswerte bei den älteren Fichten beklagt (NW-FVA 2006).

Als Konsequenz der immissionsbedingten Waldschäden wird seit 1986/87 in den staatlichen Forstämtern des niedersächsischen Harzes das „Walderneuerungsprogramm Harz“ durchgeführt. Es wurde als mittelfristig angelegtes Aufforstungs- und Walderhaltungsprogramm konzipiert mit dem Ziel, die Harzwälder in langfristig stabile Mischwälder umzugestalten.

Hauptaufgabe soll dabei eine Umkehrung der Fichtenausbreitung sein. In großem Umfang sollen die ehemaligen natürlichen Waldgesellschaften wiederhergestellt werden. Die Hauptarbeit, die mehrere Generationen von Forstleuten beschäftigen wird, ist dabei die großflächige Wiedereinführung von Buchen-Fichten- oder Fichten-Buchen-Mischbeständen sowie Fichten-Ebereschen-Mischbeständen in den Hochlagen.

Im kollinen Bereich des Westharzes soll der Anbau der beiden europäischen Eichenarten verstärkt werden. Die Buche soll künftig konsequent vom kollinen bis in den oberen montanen Bereich (ca. 650 bis 700 m ü. NN) eine erheblich größere Fläche als bisher erhalten (Otto 1991).

Damit sind es also auf 4.600 ha die Waldentwicklungstypen Buche/Fichte und Fichte/Buche, die in dem Walderhaltungsprogramm den größten Flächenanteil einnehmen. Entsprechend wurden in den Forstämtern des niedersächsischen Harzes zwischen 1986 und 1994 nach Gralla et al. (1997) bereits rund 2.300 ha Buchenvoranbauten unter Fichtenbaum- bzw. Fichtenalthölzern realisiert, die zum entsprechenden Zeitpunkt meist starke Spuren von Immissionsbelastungen zeigten, d. h. vor allem starke Verlichtungen sowie Vergilbung.

Die Datenbank des Niedersächsischen Forstplanungsamtes weist für diesen Zeitraum für die direkt mit Buchen bepflanzten Teilflächen nur eine Gesamtfläche von ca. 1.000 ha aus. Unter Beibehaltung der Auswahlkriterien ergibt eine Abfrage für den sich anschließenden Zeitraum 1994-2003 eine Steigerung der Buchen-

voranbaufläche um knapp 1.840 ha. Eine der im Rahmen des „Walderneuerungsprogramm Harz“ angelegten Buchenvoranbauflächen wird im Kapitel 2 als Versuchsfläche vorgestellt.

Der steigende Trend zu Buchenanbaufläche unter Fichtenschirm wird sich in den nächsten Jahren vermutlich noch fortsetzen, denn gerade dem Umbau der Fichtenreinbestände zu Mischbeständen wird vor dem aktuellen Hintergrund des Klimawandels eine breite Wirksamkeit zugeschrieben (UBA 2005). Die verschiedenen bereits entwickelten Szenarien und Modelle über die Klimaentwicklung bis zum Jahr 2100 gehen auch für Deutschland von einer raschen Erwärmung aus (UBA 2005, 2006a, 2006b). Ein Anstieg der Jahresmitteltemperatur um 2-3 °C im Vergleich zum Zeitraum 1961-1990 gilt demnach als sehr wahrscheinlich. Bei den Niederschlägen ist im Jahresmittel kein derartiger Trend prognostiziert, allerdings eine jahreszeitliche Umverteilung. Insbesondere die sommerlichen Niederschläge, also während der Vegetationsperiode, könnten sich demnach in Deutschland durchschnittlich um 30 % verringern.

Insofern ist gerade die wenig hitze- und trockenheitstolerante Fichte vom Klimawandel besonders betroffen. Zudem ist sie besonders anfällig gegenüber den indirekten Auswirkungen des Klimawandels wie Kalamitäten (Borkenkäfer) und Schäden durch Extremereignisse (Windwurf).

Gäbe es in Niedersachsen ein dem bayrischen „Waldumbauprogramm Klimawandel im Staatswald“ (WUKS) entsprechendes Vorhaben (vgl. Kölling und Ammer 2006), so wäre der Oberharz zwar sicherlich kein Gebiet der für die Auswirkungen des Klimawandels anfälligsten Kategorie „mit hohem Betriebsrisiko“. Doch halten Kölling und Ammer (2006) ein Grundgerüst aus Buche vor allem aus Stabilitätsgründen für die meisten fichtenreichen Bestände für unumgänglich. Auf der Grundlage der derzeit herrschenden Klimabedingungen im Harz kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Fichte auf absehbare Zeit ein Hauptbestandteil der montanen und hochmontanen Harzwälder bleiben wird.

1.3. Forschungsobjekt Waldumbau

Nachdem Fichten- und Buchenbestände in der Wende vom 18. zum 19. Jahrhundert gezielt entmischt wurden (vgl. Kapitel 1.2.3. Dritte Bergbauphase), rückte die nun 200 Jahre später stattfindende „Walderneuerung“ mit der Einbringung der Buche in die Fichtenforsten, die Problematik der interspezifischen Konkurrenz beider Arten auch wieder in den Fokus der forstlichen Forschung. Pampe (2000) macht deutlich, dass zum Zeitpunkt der Einführung des „Walderneuerungsprogrammes Harz“ aus dieser Region nur wenige Erfahrungen über die Wege der Umwandlung von Fichtenreinbeständen in laubholzreiche Mischbestockungen vorlagen.

Durch die Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt (jetzt Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt) erfolgte daher u. a. auch im Harz parallel zur Begründung der Buchenvoranbauten die Anlage verschiedener Versuchsflächen. Man erhoffte sich durch die Auswertung der dort regelmäßig erhobenen Daten vor allem Antworten zu folgenden vier Schwerpunktthemen (Pampe 2000):

1.) Schattenverträglichkeit der Buche: Unter welchen Belichtungssituationen ist ein Buchenvoranbau überhaupt möglich? Wie schattentolerant ist die Buche? Wann sind Nachlichtungen erforderlich?
2.) Konkurrenzsteuerung: Lässt sich die Konkurrenz zwischen Buchenvoranbau und Fichtennaturverjüngung über den Überschirmungsgrad steuern? Ab welchem Auflichtungsgrad wird die Fichte vorwüchsig?
3.) Wertleistung der Altfichten: Wie lässt sich eine für den Nachwuchs günstige Überschirmungssituation mit einem möglichst hohen Wertzuwachs im Altholzschirm der Fichten vereinbaren?
4.) Qualitative Entwicklung der Buchen: Welche Pflanzenzahlen und Pflanzverbände sind notwendig, um die Entwicklung eines qualitativ befriedigenden Buchenanteils im Folgebestand zu gewährleisten?

Die ersten Veröffentlichungen auf der Grundlage dieser Experimente lieferten vor allem Ergebnisse zu den beiden ersten waldbaulichen Fragekomplexen (z. B. Pampe 2000).

Einfach zu erhebende qualitative Aspekte, wie bspw. die Neigung des Terminaltriebes, wurden zudem bereits von Gralla et al. (1997) und Wagner und Müller-Using (1997) untersucht. Auch außerhalb der Harzer Versuchsflächen beschäftigen sich Untersuchungen zur qualitativen Entwicklung von Buchenvoranbauten unter variierenden Lichtbedingungen nahezu ausschließlich mit der Neigung der Stammachse oder des Terminaltriebes der Buchen (z. B. Richter und Leder 1990, Leder 1993, Schmitt et al. 1995, Weihs und Klaene 2000). Andere wichtige Parameter der Buchenqualität, wie bspw. Astigkeit, Astdurchmesser, Kronenform, Anzahl proleptischer Triebbildungen oder Grad der natürlichen Astreinigung, fehlen nahezu vollständig in den bisherigen wissenschaftlichen Untersuchungen. Die dagegen sehr umfangreiche Untersuchung von Sagheb-Talebi (1996) beschäftigt sich wiederum nur mit der Entwicklung junger Buchen unter einem Buchenaltholzschirm. Vor dem Hintergrund der Umwandlung eines Fichtenaltholzes ist die bisherige Datengrundlage sehr gering.

Die Frage der Überführung von nicht standortgerechten Fichtenreinbeständen in naturnahe laubbaumreiche Mischbestände ist jedoch auch europaweit von zentraler Bedeutung. Unter der Schirmherrschaft des European Forest Institute (EFI) schlossen sich Forstwissenschaftler aus zahlreichen europäischen Ländern zur ConForest-Gruppe zusammen, um 2001-2004 den derzeitigen wissenschaftlichen und forstpraktischen Kenntnisstand zusammenzutragen und zu veröffentlichen (Spiecker et al. 2004).

Doch dieser allgemeine und zahlreiche Waldtypen vergleichende Überblick, so schätzt es der unveröffentlichte „SUSTMAN final report“ ein, konnte konkret den Voranbau von Laubgehölzen unter einem Fichtenaltholzschirm und die damit verknüpften Rahmenbedingungen und Probleme nicht umfassend behandeln. Mit der Absicht, grundlegende Daten zur Standortqualität, Bestandesparametern der Fichtenaltbestände, dem Lichtklima, der Pflanzen-Ökophysiologie und den unterirdischen Wachstumsprozessen zu erfassen und diese neu gewonnenen Erkenntnisse mit dem Ziel einer erfolgreichen Bestandesumwandlung zu vereinen bzw. zu kombinieren, wurde 2002 das EU-SUSTMAN-Projekt initiiert.

Das SUSTMAN-Projekt

SUSTMAN ist die Kurzform für den Titel des durch die Europäische Kommission finanzierten Forschungsprojektes „Introduction of broadleaf species for SUSTainable forest MANagement“, in dessen Rahmen die vorliegende Arbeit weitgehend entstand. Das Projekt untersuchte den Voranbau von Laubbaumarten (hauptsächlich der Buche) unter Fichtenschirm als waldbauliches Werkzeug für die Umwandlung von Fichtenreinbeständen. Im Rahmen des Projektes führte eine Gruppe von zehn europäischen Institutionen aus Forschung und Forstpraxis auf sechs Versuchsflächen (siehe Abb. 1.4) aufeinander abgestimmte Untersuchungen durch. Jeder beteiligten Institution war ein konkretes Aufgabenfeld zugeordnet. Das Göttinger Waldbau-Institut, und damit der Autor der vorliegenden Publikation, war für die Erhebung der Wachstums- und Qualitätsparameter der

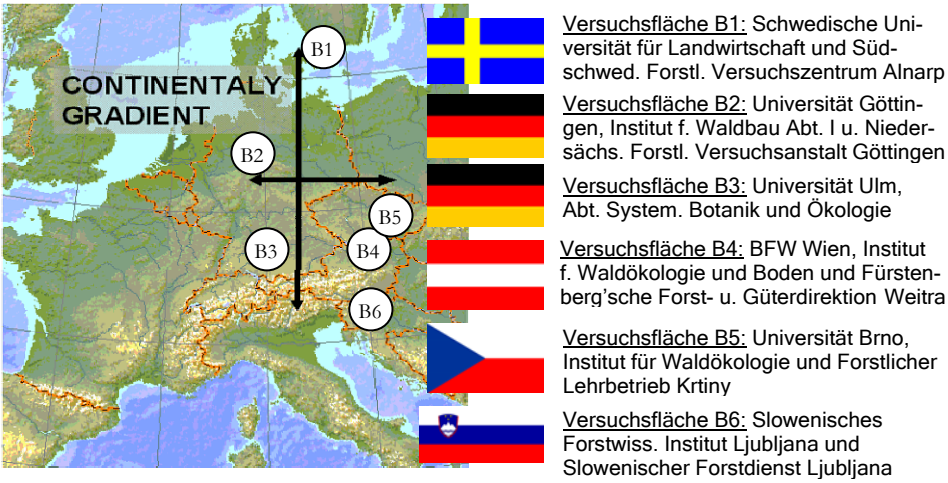


Abb. 1.4. Am SUSTMAN-Projekt beteiligte Partner und die Lage der sechs Versuchsflächen des Projektes. Die vorliegende Arbeit umfasst ausschließlich Ergebnisse der Versuchsfläche B2. Die Karte wurde der Internetseite des SUSTMAN-Projektes entnommen (www.sustman.de).

jungen Bäume verantwortlich, d. h. für die Ausarbeitung eines Messprotokolls und für die Auswertung der durch die Projektpartner erhobenen Daten.

Grundlage für diese Veröffentlichung sind jedoch ausschließlich die Ergebnisse der selbst betreuten Versuchsfläche B2.

1.4. Ziele der Untersuchung

In dieser Studie wurden das Wachstum und die Qualität junger Buchen unter Fichtenschirm untersucht, wobei der Gradient der Überschirmungsdichte möglichst umfangreich sein sollte. Das Hauptinteresse galt der Anpassung der jungen Buchen an die variierenden Lichtbedingungen. Entlang des Gradienten sollte die Veränderung verschiedener Wachstums- und Qualitätsmerkmale beschrieben und nach Möglichkeit ein Überschirmungswert ermittelt werden, der einen Kompromiss zwischen raschem Wachstum und günstiger Qualitätsentwicklung der jungen Buchen darstellt. Die Qualität der Jungbuchen sollte anhand umfangreicher Messungen u. a. durch die Kronenform und zahlreicher Astparameter erfasst werden. Es sollte ein Beitrag geleistet werden, die Lücken des wissenschaftlichen Kenntnisstands in diesem Bereich (vgl. Kap. 1.3.) zu schließen.

Erfasst werden sollten auch verschiedene Wachstumsparameter, um Aussagen über eine potentielle Verlagerung bei der Biomasseakkumulation von Pflanzen unter verschiedenem Lichtklima treffen zu können.

Ein weiteres Augenmerk galt der Analyse des Einflusses der intraspezifischen Konkurrenz zwischen den Buchen auf deren Wachstum und Qualität. Schließlich sollte abgeschätzt werden, inwieweit eine Steuerung der Überschirmungsdichte den Einfluss der Konkurrenz ersetzen kann.

Ein persönliches Anliegen des Autors war die Integration der bereits geschilderten geschichtlichen Hintergründe in diese Arbeit. Es sollte deutlich gemacht werden, wie und über welch langen Zeitraum das derzeitige „Fichtenproblem“ und das daraus resultierende Bestreben der Bestandesumwandlung entstanden sind. Erst der Vergleich der heutigen mit der Situation zu Beginn der menschlichen Einflussnahme auf die Wälder lässt die immense Bedeutung dieses Themas erkennen.

2. Versuchsfläche

2.1. Topographische Lage

Basis dieser wissenschaftlichen Untersuchung ist eine Versuchsfläche der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt (NFV). Sie liegt im Westharz ca. 5 km östlich des Harzer Bergstädtchens Altenau (51° 47' N, 10° 26' E) im Bereich des Niedersächsischen Forstamtes Clausthal in der Abteilung 1100.

LGN

Verwendung der Niedersachsenkarte mit freundlicher Genehmigung der LGN-Landesvermessung und Geobasis-information Niedersachsen

Abb. 2.1. Reliefkarte Niedersachsens mit rot umrandetem Westharz.

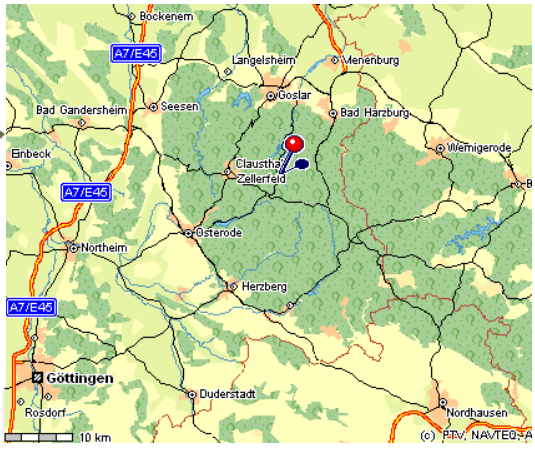


Abb. 2.2. Landkarte des Harzes mit Markierung des Ortes Altenau (rote Nadel) zur Orientierung bezüglich der geografischen Lage der Versuchsfläche.

Die Versuchsfläche ist durch ihre Lage am NW-Hang des 928 m hohen Bruchbergs mit 7 ° leicht geneigt und erstreckt sich im Höhenbereich von 610 m bis 660 m ü. NN. Sie liegt damit in der montanen Höhenstufe des Harzes, im Wuchsbezirk montaner Mittel- und Oberharz.

2.2. Klima

An der Grenze zwischen subozeanisch und subkontinental geprägtem Klimagebiet gelegen, setzt der Harz den sich hier treffenden Luftmassen plötzlich einen erheblichen Widerstand entgegen. Durch die vorherrschenden Nordwest-Wetterlagen ist das Klima insbesondere im West- und Nordwestteil des Harzes im Vergleich zu dem der übrigen deutschen Mittelgebirge daher sehr rau. Ferner ist das

Klima nach Schwietert (1989) – ergänzt durch Daten (langjähriges monatliches Mittel der Jahre 1961-1990) der meteorologischen Station im nahe gelegenen Clausthal-Zellerfeld (Niedersächsisches Umweltministerium 2006) – gekennzeichnet durch hohe Niederschläge (1.326 mm/Jahr), hohe Luftfeuchtigkeit, viele Nebeltage und geringe Sonnenscheindauer (1.338 h/Jahr), lange schneereiche Winter und insgesamt geringe Temperaturwerte (6,2 °C).

Die Versuchsfläche liegt zwischen den bei Otto (1991) beschriebenen Gefährdungszonen durch Nassschnee (400-600 m ü. NN) bzw. durch Eisbruch in der so genannten Nebelfrostzone ab 750 m ü. NN, die aber an Nordwesthangexpositionen durchaus bis 650 m ü. NN herabreichen kann.

Im Zuge des SUSTMAN-Projektes wurde die tatsächliche Länge der Vegetationsperiode 2003 auf den verschiedenen Versuchsflächen anhand phänologischer Beobachtungen dokumentiert. So wurden die Zeitpunkte des Knospenaustriebs und der Blattverfärbung als Beginn bzw. Abschluss der photosynthetisch aktiven Phase festgehalten. Der Zeitpunkt des Austreibens der Knospen eines Baumes wurde für die Kalenderwoche definiert, in der ca. 20 % aller Knospen des Baumes soweit geöffnet waren, dass die Blattfläche klar erkennbar war. Der Moment der Laubverfärbung wurde dagegen für die Kalenderwoche bestimmt, in der 50 % der Blätter eines Baumes ihre farbliche Änderung vorgenommen haben. Als Durchschnittswerte für eine gesamte Versuchsfläche wurden jeweils die Kalenderwochen genommen, in denen mindestens 50 % aller Probebäume die oben angeführten Definitionen erfüllten. Die Vegetationsperiode dauerte entsprechend dieser Methode im Jahr 2003 auf der Versuchsfläche B2 (Harz) 24 Wochen. In der sonst üblichen Darstellungsweise der jährlichen Wachstumsdauer entspricht das 168 Tagen.

2.3. Geologie und Pedologie

Schwietert (1989) bezeichnet die Geologie des Harzes als „wohl vielfältigste und interessanteste aller deutscher Mittelgebirge“. In der Tat grenzen auch im Bereich des Forstamtes Clausthal die verschiedensten geologischen Formationen aneinander.

Den größten Teil nimmt die so genannte Clausthaler Kulmfaltenzone ein. Sie setzt sich aus einer Wechsellagerung von Grauwacken und Tonschiefern zusammen, den häufigsten Gesteinen des Oberharzes. Die Kulmhochfläche wird vom Südwestrand her massiv durch den Oberharzer Diabaszug durchbrochen, der sich als schmaler Sattel entlang der Linie Osterode-Altenau-Harzburg quer durch den Westharz zieht.

In gleicher variskischer Streichrichtung verläuft der markante Bergrücken des Acker-Bruchberg-Zuges. Die Böden, die sich aus seinen Quarziten entwickelt

haben, gehören nicht zuletzt wegen ihrer Basenarmut zu den ärmsten dieses Gebirges.

Im Bestandeslagerbuch ist für die Abteilung 1100a somit als geologischer Untergrund auch „quarzitische Grauwacke" genannt. Des Weiteren findet sich dort für die Standortparameter u. a. der Hinweis, dass im Vergleich der Parzellen untereinander die gesamte Versuchsfläche „Inhomogenität" aufweist. In den besonders skelettreichen Parzellen, wo der Anteil an quarzitischer Grauwacke besonders hoch ist, sei dadurch eine extreme Basenarmut mit typischer Podsolbildung bedingt. Als Bodentyp sind für die Versuchsfläche sowohl podsolierte Braunerde bzw. Braunerden-Podsol, als auch reiner Podsol angegeben. Der aufliegende Humus wird von Graswurzelfilzmoder bis feinhumusreicher Rohhumus charakterisiert.

Zu einem ähnlich variationsreichen Gesamturteil kommt die im Rahmen des SUSTMAN-Projektes durchgeführte Bodenansprache zu Beginn des Projektes. An 12 gleichmäßig über die Versuchsfläche verteilten Probebäumen (die Anzahl wurde im Rahmen des SUSTMAN-Projektes vorgegeben) wurden mit Hilfe eines 7 cm-Stechzylinders Bodenprofile gewonnen und entlang des gesamten Profils Proben für chemische Analysen entnommen. Aus der Ansprache der Profile ergaben sich gleichfalls die Bodentypen Braunerden-Podsol sowie podsolierte Braunerde (teilweise nur schwach podsoliert), für die besonders fichtenreichen Parzellen auch saure Braunerde. Die Humusformen reichen von rohhumusartigem Moder bis zum reinen Rohhumus. Der Skelettanteil erschien bei der abschließenden „Ernte" der Bäume jedoch gleichmäßiger als im Bestandeslagerbuch angegeben. Nur in einem Fall (Baum Nr. 27) war er deutlich erhöht.

Die angesprochene Basenarmut bestätigt sich in den Laborergebnissen, die im Site Report des SUSTMAN-Projektes zusammengefasst wurden (Reiter et al. 2003). Die Basensättigung weist für alle Tiefenstufen niedrige Werte auf, im Bereich von 10-20 cm Bodentiefe sinkt der Wert unter die 5 %-Marke.

Die ermittelten pH-Werte (0,1 M $CaCl_2$) variierten entgegen der etwas missverständlichen Darstellung im Site Report (Reiter et al. 2003) von Parzelle zu Parzelle kaum. Der Durchschnittswert innerhalb des Profils betrug konstant um 3,4 bzw. 3,5 bei alleiniger Betrachtung der Ergebnisse für den Mineralboden. Die Mittelwerte der einzelnen Bodenhorizonte können Tabelle 2.1 entnommen werden.

Als besonders auffällig wurde in den Analyseergebnissen noch die extrem hohe Bleikonzentration in den oberen Bodenschichten hervorgehoben. Die durchschnittliche Konzentration an der Bodenoberfläche beträgt 1.140 mg/kg, in der oberen Mineralbodenschicht (0-5 cm Bodentiefe) betrug sie 1.080 mg/kg. Mit zunehmender Profiltiefe sinkt der Wert bis auf 150 mg/kg in 40-80 cm Bodentiefe. Alle Werte liegen damit deutlich über dem allgemein diskutierten Grenzwert von 100 mg/kg für Blei im Boden (Reiter et al. 2003, ÖNORM 2004). Die an-

geführten Konzentrationen verweisen auf die bekannte bergbauliche Geschichte des Harzes.

Tabelle 2.1. Mittelwerte der pH-Werte aus Bodenproben, die an 12 Probebäumen auf der Versuchsfläche B2 entnommen wurden.

Bodenhorizont	pH-Wert ($0{,}1$ M $CaCl_2$)
Organische Auflage	3,0
Boden Tiefe 0-5 cm	2,9
Boden Tiefe 5-10 cm	3,1
Boden Tiefe 10-20 cm	3,4
Boden Tiefe 20-40 cm	3,9
Boden Tiefe 40-80 cm	4,1

Ein weiterer pedologischer Hinweis auf diese Vergangenheit ergibt sich durch das Vorkommen von Holzkohlepartikeln im Boden, die in einer Parzelle so massiv auftraten, dass dort eine ehemalige Kohlstelle vermutet werden kann. Die Geländestruktur lässt in diesem Bereich gleichfalls auf den Standort eines Meilers schließen. Für die Untersuchungen wurde dieser Bereich jedoch ausgeschlossen.

2.4. Vegetation

Die montane Höhenstufe des Harzes zwischen etwa 475 und 700 (750) m ü. NN umfasst die Hauptwaldflächen des Harzes. Es handelt sich weitestgehend um eine natürliche Vorherrschaft von buchenbestimmten Wäldern (Otto 1991). Die Waldgesellschaften des *Luzulo-* und *Galio-Fagetum* (*Calamagrosti villosae-Piceetum* nur in der hochmontanen Zone) werden als autochthone Bestockungsformen genannt (Reiter et al. 2003).

Zur Erstellung des Biodiversity-Reports (Muhle et al. 2003) wurden im Rahmen des SUSTMAN-Projektes in acht über die Versuchsfläche verteilten 15 x 15 m großen Plots Vegetationsaufnahmen durchgeführt (siehe Anhang). Aus deren Ergebnis leiten Muhle et al. (2003) auch für die Versuchsfläche eine ehemalige Dominanz von Buchen-Habitaten ab.

Die derzeitige Bestockung ist jedoch ein Fichtenforst mit einer vorangebauten Buchenverjüngung. Auf die Baum- und Strauchschicht wird in Kapitel 2.5. näher eingegangen.

Bodenvegetation

Die Krautschicht der Versuchsfläche wurde vor allem durch *Deschampsia flexuosa* (Draht-Schmiele) und *Vaccinium myrtillus* (Heidelbeere) geprägt. Mit geringerer Häufigkeit traten *Dryopteris dilatata* (Breitblättriger Dornfarn) und *Galium harcynicum* (Harzer Labkraut) sowie in den helleren Plots auch *Calamagrostis villosa* (Wolliges Reitgras) auf. Mit abnehmendem Lichtgenuss sank der Deckungsgrad der Krautschicht von 90 % auf 10 % und die Moose bedeckten größere Bereiche des Waldbodens (Deckungsgrad bis 60 %). Als häufigste Arten seien *Plagiothecium undulatum* (Wellenblättriges Schiefbüchsenmoos), *Polytrichum formosum* (Schönes Widertonmoos) und *Dicranum scoparium* (Besen-Gabelzahnmoos) genannt. (Die deutschen Namen der Moose wurden Koperski (1993) entnommen.)

Muhle et al. (2003) weisen anhand des Vorkommens von u. a. *Urtica dioica* (Brennnessel), *Rubus idaeus* (Himbeere) und *Cardamine flexuosa* (Wald-Schaumkraut) darauf hin, dass Störungen im natürlichen Bodengefüge, insbesondere zusätzliche Nährstoffeinträge offensichtlich sind.

2.5. Strukturelle Eigenschaft des Bestandes und Versuchsdesign

Zum Zeitpunkt der Anlage der Versuchsfläche im Herbst 1991 wies der hier stockende 71-jährige Fichtenbestand (h_{100} = 24-25 m; Ekl. II,3) Vergilbung (30 %) und Nadelverluste (40 %) auf. Im Jahr zuvor wurde im Zuge einer vorbereitenden Durchforstungsmaßnahme die Grundfläche des Bestandes in der Hälfte der Fläche von etwa 34 m²/ha (B° = 0,8) auf 25 m²/ha (B° = 0,6) gesenkt, während die zweite Hälfte unbeeinflusst blieb. Auf der so zweigeteilten Fläche wurden 34 Parzellen à 50 x 50 m angelegt. Abzüglich einer Randzone nahm jede Parzelle 0,16 ha ein.

Die Parzellen wurden 1991 ganz oder teilflächig mit Buchen der Provenienz 81006 (Harz, Lagen über 300 m) des Sortiments 1+3 im Verband 1,5 x 1 m oder 3 x 2 m bepflanzt. Dabei erfolgte jeweils eine Pflanzlochkalkung mit 400 g $CaCO_3$. Auf den verbleibenden Teilflächen erfolgte in Vorbereitung sonstiger Forschungsvorhaben die Pflanzung von Fichten der Provenienz 84005 (Harz, Lagen über 600 m) oder die Flächen blieben gänzlich unbepflanzt.

Ziel der Versuchsanlage war derzeit, im Rahmen des Walderneuerungsprogramms Harz aufgetauchte Unsicherheiten in waldbautechnischen Details zu beseitigen. Dazu gehörte unter anderem die Frage der günstigsten Belichtungs-

situation für die gepflanzten Buchen eines Voranbaus und ab welcher Überschirmungsdichte Auflichtungen erforderlich sind. Gleichfalls war die Überschirmungssituation als Werkzeug für die Steuerung der Konkurrenz zwischen Buchen und Fichten von zentralem Interesse. Die verschiedenen Pflanzverbände sollten der Lösungsfindung hinsichtlich der notwendigen Ausgangspflanzenzahlen für die Entwicklung eines qualitativ befriedigenden Buchenanteils dienen. Nicht zuletzt sollte aber auch die Frage geklärt werden, inwieweit sich eine für den Nachwuchs günstige Überschirmungssituation mit einem möglichst hohen Wertzuwachs im Altholzschirm vereinbaren ließe.

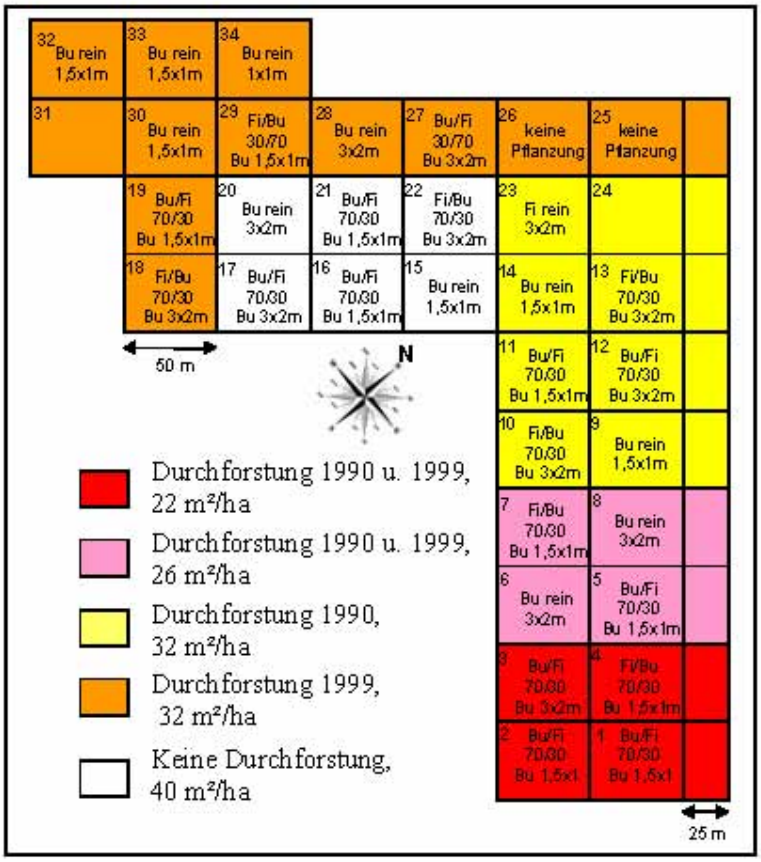


Abb. 2.3. Schematische Darstellung der Versuchsfläche in der Abteilung 1100a des Forstamtes Clausthal. Im Zuge zweier Durchforstungsmaßnahmen sind fünf verschiedene Überschirmungssituationen entstanden.

Da die Überschirmungssituation von so zentraler Bedeutung für den Versuch war, wurde 1999 durch eine weitere, auf Teilflächen durchgeführte Durchforstungsmaßnahme der Gradient in der Beschattung weiter vergrößert. Daraus resultierten folgende fünf verschiedene Durchforstungsvarianten (die prozentuale Grundfläche des verbleibenden Bestandes ist in Klammern angegeben):

1.) seit der Versuchsanlage undurchforstet (= 100 % der Grundfläche)
2.) Durchforstung 1991 (80 %)
3.) Durchforstung 1999 (80 %)
4.) Durchforstung 1991 und 1999 (65 %)
5.) Durchforstung 1991 und 1999 (55 %)

In jeder Durchforstungsvariante waren jeweils zwei oder drei Parzellen in einer der beiden Verbandsweiten mit Buchen bepflanzt worden (vgl. Abb. 2.3).

Im Südosten der Fläche hat sich bereits früh ein Femelloch entwickelt, in dessen Bereich die Jungbuchen unter besonders lichtintensiven Bedingungen aufwuchsen. Auch die gepflanzten Fichten konnten sich hier kräftig entwickeln. Auf der übrigen Versuchsfläche, vor allem aber in den dunkleren Partien, sind letztere bereits größtenteils wieder abgestorben. Mit Ausnahme der dunkelsten Parzellen entwickelte sich dagegen auf ganzer Fläche Fichtennaturverjüngung. An den Parzellengrenzen entwickelt sich diese mitunter truppweise. Vereinzelt findet man auch Verjüngung der Eberesche (*Sorbus aucuparia*).

Die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung erfolgten Freilandarbeiten fanden im Wesentlichen in den Jahren 2003/2004 statt. Zu diesem Zeitpunkt hatte der überschirmende Fichtenbestand ein Alter von 83 Jahren, und die unterbauten Buchen waren 16 Jahre alt.

3. Methoden

3.1. Auswahl der Probebäume

Eine Vorauswahl der für diese Forschungsarbeit infrage kommenden Jungbuchen erfolgte bereits seitens der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt (NFV), wodurch die Gefahr der Subjektivität schon stark eingeschränkt wurde. So kamen für die erste Auswahl nur Bäume in Betracht, die seitens der NFV bereits mehrfach Bestandteil von Untersuchungen waren, jetzt jedoch für weitere Messaktivitäten ausgesondert worden waren.

Des Weiteren wurde versucht, die für die Untersuchung vorgesehenen Buchen gleichmäßig aus den verschiedenen vorhandenen Durchforstungsstufen und Verbandsweiten auszuwählen. Die gutachterlich eingeschätzte Konkurrenzsituation der Jungbuchen sollte von „völlig freistehend" bis „stark bedrängt" reichen. Als weiteres Kriterium wurden bei der Wahl ausschließlich Buchen der Kraft'schen Klassen 1 und 2 berücksichtigt.

Um den Gradienten im Lichtgenuss unter den Untersuchungsbuchen noch zu vergrößern, wurden abschließend bewusst einige zusätzliche Bäume ausgewählt, die unter Extrembedingungen aufgewachsen sind, d. h. zum einen unter unbeschirmten Bedingungen eines Femels, zum anderen zwei Buchen, deren plagiotropes Wachstum bereits auf extrem geringen Lichtgenuss schließen ließ. Insgesamt bildeten so zunächst 50 Buchen die Datengrundlage.

Im Rahmen der Datenauswertung zum Projektende im Jahre 2005 wurde deutlich, dass insbesondere der Lichtbereich zwischen 35 und 70 % relativer Beleuchtungsstärke deutlich unterrepräsentiert war. Um diese Datenlücke zu schließen, erfolgte anhand von Lichtmessungen im Sommer 2005 eine ergänzende Auswahl von weiteren 20 Bäumen.

Alle Probebäume wurden in fünf vertikal übereinander liegende Schichten gleicher relativer Höhe unterteilt (= Baumhöhe dividiert durch fünf). Diese Schichten oder Straten wurden entsprechend dem Wachstum des Baumes von unten nach oben durchnummeriert. Die erste, die bodennahe Schicht ist demnach S1. Die Zählung endet mit dem obersten Kronenstratum S5. Diese Unterteilung in Baum- oder Kronenschichten ist für die Erfassung zahlreicher Wachstumsparameter von Bedeutung gewesen und wird daher bei der Beschreibung der Messmethoden häufig zitiert.

3.2. Einflussvariablen

Zentrale Bedeutung für diese Arbeit haben vor allem die Einflussvariablen Strahlung und Konkurrenzeinwirkung. Daher sei jedem dieser beiden Punkte am Anfang des entsprechenden Kapitels eine etwas ausführlichere Hintergrundbetrachtung gewidmet.

3.2.1. Lichtmessung

3.2.1.1. Theoretischer Hintergrund

Von besonderem Gewicht für diese Studie ist der den einzelnen Jungbuchen zur Verfügung stehende Lichtgenuss. Ammer (1996) macht in seiner Arbeit deutlich, dass die Strahlung im Wellenlängenbereich von 400-700 nm vor allem für junge Holzpflanzen, die unter einem Altholzschirm aufwachsen, der für das Wachstum entscheidende Faktor ist, sofern Wasser und Nährstoffe in ausreichendem Maße zur Verfügung stehen. Zudem ist die Strahlung die bestimmende Ursache vieler anderer ökologischer Faktoren, bspw. der Temperatur oder der Luft- und Bodenfeuchte (Brunner 1993). Die solare Strahlung ist letztlich die Hauptenergiequelle für alle ökologischen Systeme (Biederbick 1992). Die „Bausteine" der elektromagnetischen Strahlung sind die Photonen (griechisch: φως (phos) = Licht).

Aufgrund dieser zentralen Bedeutung der Strahlung und zur Verdeutlichung der Komplexität dieses Themas seien zunächst einige theoretische Grundlagen vorangestellt, wie sie z. B. bei Häckel (1999) zu finden sind.

Üblicherweise wird die solare Strahlung in drei Wellenlängenbereiche eingeteilt: die ultraviolette Strahlung (100-380 nm) transportiert rund 7 % der Sonnenenergie, der für den Menschen sichtbare Spektralbereich (380-780 nm) umfasst 46 % der Sonnenenergie und schließlich die infrarote Strahlung mit einer Wellenlänge von 780-3.000 nm und einem Energieanteil von 47 %. Jenseits von 200 bzw. 3.000 nm ist die Strahlungsleistung der Sonne so schwach, dass auf eine Betrachtung in der Regel verzichtet werden kann.

Der auf die Erdatmosphäre auftreffende Strahlungsstrom beträgt relativ konstante 1.370 Watt m^{-2} (=Solarkonstante). In jeder Sekunde erhält die Erde rund 5 x 10^{10} kWh Strahlungsenergie von der Sonne. Aufgrund der Neigung der Erdachse gegenüber der Ekliptik unterliegt der Strahlungsgenuss der verschiedenen Erdregionen dabei bekanntlich erheblichen jahreszeitlichen Schwankungen. Ebenso variiert die an der Atmosphärengrenze ankommende Strahlungsmenge natürlich im Laufe des Tagesganges.

Mit Eintritt der Strahlung in die Atmosphäre werden erhebliche Strahlungsmengen des infraroten und ultravioletten Spektrums durch Kohlendioxid und Wasserdampf bzw. Ozon absorbiert. Das sichtbare Licht kann die Atmosphäre

dagegen relativ unbeeinflusst passieren. Durch atmosphärische Verunreinigungen und Wolkentröpfchen kommt es jedoch bei allen Wellenlängen zur Streuung der Strahlung. Schließlich wird an jeder Oberfläche ein Anteil der auftreffenden Strahlung reflektiert (= Reflektionsvermögen oder Albedo).

Von der in die Erdatmosphäre eindringenden kurzwelligen Strahlung gelangen nur 26 % direkt zum Erdboden – die *direkte Sonnenstrahlung*. Durch die Reflektion der Wolken und die Streuung in Luft und Wolken gelangen weitere 29 % der Strahlung bis zum Erdboden – *diffuse Himmelsstrahlung*. Direkte und diffuse Strahlung ergeben zusammen die am Erdboden auftreffende *Globalstrahlung*, von der ein Teil wieder reflektiert wird. Trifft die Strahlung auf Pflanzenblätter, so kommt es neben Absorption und Reflektion von Strahlung auch zur Transmission, d. h. ein Teil der Strahlung passiert die Blattschicht. Der von den Pflanzen für die Photosynthese nutzbare Anteil der Globalstrahlung (400-700 nm) wird als *photosynthetisch aktive Strahlung (photosynthetic active radiation, PAR*) bezeichnet. Sie macht nach Häckel (1999) knapp 30 % der Globalstrahlung aus. Der tatsächliche Ausnutzungsgrad der Strahlung ist jedoch sehr gering. Nach Larcher (1994) werden bestenfalls 2-3 % in Kohlenhydraten gebunden.

Von den Pflanzen sind innerhalb des Spektralbereichs der PAR zwar alle Photonen zur Gewinnung der Assimilationsenergie brauchbar, werden dabei aber in unterschiedlicher Intensität genutzt (Wagner et al. 2004). Photonen des roten und des blauen Lichtes sind besonders stark photosynthetisch wirksam, während der grüne Spektralbereich (um 550 nm) kaum ausgenutzt und überwiegend reflektiert wird. Die grüne Blattfärbung ist die Folge der Reflektion bzw. auch der Transmission dieses Spektralbereichs.

Berücksichtigt man die unterschiedliche Ausnutzung der einzelnen Spektralbereiche durch die Pflanzen, so erhält man die *photosynthetisch nutzbare Strahlung (photosynthetic usable radiation, PUR*).

Wagner et al. (2004) weisen schließlich darauf hin, dass auch der Wellenlängenbereich von 700-800 nm (*near infrared radiation, NIR*) für Pflanzenbestände von Bedeutung ist. Bestimmte morphologische Pflanzenreaktionen werden speziell bei schattentoleranten Arten unabhängig von der PAR vom Verhältnis der Photonenflussdichte zwischen 655 und 665 nm (*R-red*) und der Photonendichte zwischen 725 und 735 nm (*FR-far red*) beeinflusst (Smith 1994). Neben der PAR wird daher häufig auch das als Lichtqualität bezeichnete, dimensionslose R/FR-Verhältnis (Verhältnis hellrotes zu dunkelrotem Licht) der Strahlung erfasst (Turnbull 1991, Ammer 2000, Diaci und Thormann 2002).

Doch nicht nur die vielfältigen spektralen Möglichkeiten machen eine vergleichbare Erhebung von Strahlungsparametern in Wäldern schwierig. Das Lichtklima im Wald weist zudem eine große räumliche, zeitliche, spektrale und qualitative Variabilität auf (Diaci und Thormann 2002). Parallel zu den bereits erwähnten jahreszeitlichen und regionalen Unterschieden im Strahlungsgenuss eines Waldes bestehen auch Schwankungen im Tagesverlauf. Neben dem veränderlichen Sonnenstand über dem Horizont führen dabei vor allem meteoro-

logische Veränderungen, insbesondere der Wolkenzug, zu kurzfristig stark schwankenden Einstrahlungen.

Innerhalb des Bestandes werden diese Schwankungen unter dem Einfluss der Bäume noch deutlich vergrößert. Durch verschieden große Lücken im Kronendach (*gap fraction*) dringt direkte Strahlung in den Bestand ein und bildet auf dem Boden bzw. der Vegetation so genannte Sonnenflecken (*sunfleck*). Diese wandern im Tagesverlauf und kommen und gehen im Zuge der Wolkenbewegung. Weitere sehr kurzfristige Schwankungen im Strahlungsgenuss werden durch die windbedingte Bewegung der Vegetation verursacht.

Die spektrale Zusammensetzung der Strahlung und die Anteile direkter und diffuser Strahlung verändern sich im Zuge der selektiven Absorption und Transmission beim Eintritt der Strahlung in Baumbestände (Brunner 1994). Vor allem die Lichtdurchlässigkeit der Blätter ist dabei in ihrer Wirksamkeit artenspezifisch verschieden. Der Winkel zwischen einfallender Strahlung und empfangender Oberfläche ist gleichfalls von Bedeutung. Und schließlich tragen auch Strahlungsreflektionen an Stämmen, Blättern und der Bodenoberfläche zum Gesamtlichtgenuss einer Pflanze bei. Detaillierte Erläuterungen zu all diesen Zusammenhängen finden sich z. B. bei Brunner (1994) und Wagner et al. (2004).

Den Strahlungsgenuss eines Pflanzenbestandes oder einer einzelnen Pflanze möglichst genau zu bestimmen, ist vor diesem Hintergrund ein schwieriges Unterfangen (Ammer 1996, Wagner et al. 2004). Spätestens seit Hartig (1877), zitiert nach Ammer (1996), weiß man zwar, dass das Licht „das wichtigste Agens im Pflanzenleben" ist, jedoch lieferten bis etwa 1960 alle Versuche der Lichtmessung nur ungenaue und kaum miteinander vergleichbare Ergebnisse, die nur einen „*illustrative character*" hatten (Ross 1981).

Weil bei ökologischen Untersuchungen im Wald häufig die Photosynthese im Mittelpunkt steht, sollte nach Meinung von Brunner (1994) in der Regel der entsprechende Strahlungsbereich (PAR) gemessen werden. Da dessen Wellenlängenbereich mit dem des für uns sichtbaren Lichtes in etwa identisch ist, hat sich der Begriff der *Lichtmessung* durchgesetzt, wobei der Begriff der *Strahlungsmessung* meist zutreffender wäre. Brunner (1994) weist darauf hin, dass einige der Strahlungsmessgeräte die gesamte eintreffende Globalstrahlung messen. Weiterhin muss darauf geachtet werden, ob ein Verfahren die auftreffende Strahlung pro Flächeneinheit bestimmt (Watt m^{-2}) oder die Zahl der Photonen pro Flächen- und Zeiteinheit ermittelt wird (µEinstein m^{-2} sec^{-1}).

Da die Messergebnisse räumlich und zeitlich repräsentativ und untereinander vergleichbar sein sollen, Messungen aber nur punktuell vorgenommen werden können, ist eine ausreichend hohe Stichprobenzahl erforderlich (Wagner et al. 2004). Technischer und personeller Aufwand bei flächendeckender Erhebung von Messwerten stehen dieser Anforderung entgegen.

Auch Diaci und Thormann (2002) heben hervor, dass es bei verjüngungsökologischen Untersuchungen zudem notwendig ist, eine repräsentative Waldfläche zu analysieren, die in der Regel relativ groß ist. Aus diesem Grunde sind wir zu-

meist an der langfristigen, durchschnittlichen Strahlung bspw. einer Vegetationsperiode interessiert. Dafür sind Methoden, die mit momentanen Messungen arbeiten und Schätzungen für Strahlungsdurchschnittswerte liefern, am besten geeignet und in der waldbaulichen Forschung verbreitet. Einen Überblick über die in ihrer Genauigkeit, Arbeits- und Kostenintensität sehr unterschiedlichen Methoden der Strahlungsmessung geben u. a. Brunner (1993), Dohrenbusch (1995), Diaci und Thormann (2002), Wagner et al. (2004).

Ob jedoch Momentan-Messungen oder mit Hilfe von Data-Loggern permanente Messungen über einen längeren Zeitraum durchgeführt werden, ob Quantum-Sensoren oder Fototechnik zum Einsatz kommen: Strahlungsmessungen in Wäldern sind ohne Bezug zu einer Referenzmessung außerhalb des Waldes nicht interpretierbar (Wagner et al. 2004), da - wie bereits erläutert - durch den Einfluss der Bäume und Bestände die starken zeitlichen Schwankungen der Strahlungsmessung noch deutlich erhöht werden. So werden die ermittelten Strahlungsmengen in Prozent von der auf der Freifläche oder über dem Kronendach herrschenden Strahlungsangebot angegeben (Brunner 1994). Durch die Bildung dieser dimensionslosen Relativwerte (*Site Factors*) lassen sich bereits auch einige der oben angeführten Probleme insbesondere hinsichtlich der Vergleichbarkeit der Daten lösen.

Heutzutage entwickeln sich die Methoden der Strahlungsmessung rasch (Diaci und Thormann 2002). Als derzeit erfolgversprechendste Methode sieht Ammer (1996) das Verfahren der computergestützten Auswertung von hemisphärischen Fotografien zur Einschätzung des Strahlungsangebotes im Bestand. Es bietet die Möglichkeit, den direkten und den diffusen Beitrag zur Globalstrahlung für beliebige Zeitpunkte oder -perioden getrennt und in absoluten Energieeinheiten anzugeben (Wagner 1994), führte aber in einigen Untersuchungen im geringen Lichtbereich, Marchado und Reich (1999) nennen einen prozentualen Strahlungswert von < 6 %, zu einer systematischen Überschätzung (Diaci und Thormann 2002). Letzteres überrascht etwas. Lässt doch die fehlende Erfassung von Licht-Transmission oder Reflektion (z. B. an Stämmen oder der Bodenvegetation) eher eine Unterschätzung des tatsächlichen Strahlungsgenusses erwarten.

Die Einschätzung der Überschirmungsstruktur mit Hilfe einer Kamera wurde erstmals 1948 praktiziert (Evans und Coombe 1959). Anderson (1964b, c) entwickelte diese Methode weiter. Digitale Anlagen zur Verarbeitung der Bilder nutzten erstmals Olsson et al. (1982). Die computergestützte Auswertung von *Fisheye*-Fotos lässt eine solidere Einschätzung des langfristigen mittleren Lichtgenusses einer Pflanze zu (Canham et al. 1993). In Deutschland setzte sich insbesondere die computergestützte Bildauswertung nach Wagner und Nagel (1992) durch.

Ein *Fisheye*-Foto liefert ein kreisrundes Abbild der halbkugelförmigen Hemisphäre, die sich oberhalb der Kameraebene erstreckt. In Abb. 3.2 auf Seite 38 ist ein solches Foto beispielhaft wiedergegeben. Entsprechend eines bestimmten Algorithmus (anhand von Graustufen oder Farben) wird das Bild in die beiden

Bereiche „Kronendach/überschirmter Bereich“ und „freier Himmel“ unterteilt. Bei der computergestützten Auswertung der Bilder werden anhand der Informationen u. a. über die geografische Lage des Fotopunktes und der Ausrichtung der Kamera die Sonnenbahnen für die verschiedenen Tage innerhalb der Vegetationsperiode in das Bild projiziert. Auf der Grundlage eines hinterlegten klimatologischen Modells ermittelt die Auswertungssoftware aus der Position der Sonne im Tages- bzw. Jahreslauf unter Verschneidung mit der Lage des überschirmten Bereiches den absoluten oder relativen Strahlungsgenuss am Fotopunkt. Eine detaillierte und zusammenfassende Beschreibung der Methode findet sich bei Anderson (1964b), Lüpke (1982) oder Rich (1990).

Die rasante Entwicklung der digitalen Kameratechnik revolutioniert derzeit auch die Strahlungsschätzung, bei der hemisphärische Fotos Verwendung finden.

3.2.1.2. Erfassung der Strahlungssituation mit Hilfe von hemisphärischen Fotos

Erstellen der *Fisheye*-Fotos auf der Versuchsfläche

Für die vorliegende Arbeit kam eine NIKON Coolpix 995 Digitalkamera mit *Fisheye*-Linse in Verbindung mit weiterer Hardware der Firma Régent Instruments Inc., dem so genannten „*O-Mount*“, zum Einsatz. Durch diese kardanische Kameraaufhängung entfiel das zeitaufwendige horizontale Ausrichten der Kamera im Gelände. Durch den gleichfalls in die Halterung integrierten elektronischen Kompass wurde die Orientierung der Kamera nach Norden ebenfalls überflüssig. Die Nordrichtung wird durch eine Leuchtdiode angezeigt, die am Rand des entstandenen digitalen Bildes als roter Punkt erscheint. Die Auslösung der Kamera erfolgte mit Hilfe einer Fernbedienung.

Die Hardware wurde durch ein Stativ der Firma Manfrotto (High Super Alu MA 269 HDU) ergänzt, das das Fotografieren auch über den höchsten Buchen ermöglichte. Das Stativ erreicht eine Maximalhöhe von 7,3 m.

Die Lichtverhältnisse wurden für jede untersuchte Jungbuche mit zwölf *Fisheye*-Fotos entlang ihrer Kronenperipherie erfasst. Jeweils zwei Aufnahmen erfolgten an der oberen Grenze jeder Baumschicht (vgl. Kapitel 3.1.), je eine am östlichen und eine am westlichen Kronenrand. Für die höchste Kronenschicht lieferte nur das einzelne Bild unmittelbar oberhalb der Baumspitze die Referenzwerte. Ein weiteres Bildpaar entstand unterhalb des Kronenansatzes, um einen eventuellen Grenzwert des Lichtgenusses zu bestimmen, ab dem Astreinigung einsetzt. Das zwölfte Foto entstand schließlich aus Überlegungen der Konkurrenzbestimmung im Bereich der Kronenmitte.

Alle Fotos wurden während der Vegetationsperiode gemacht, nach deren Ende die morphometrischen Messungen durchgeführt wurden, d. h. im Sommer 2003 bzw. Sommer 2005. Bei den Belichtungseinstellungen der Kamera lieferten

die automatische Belichtung und die Matrix-Belichtungsmessung im Zuge verschiedener Testläufe unter verschiedenen Beleuchtungssituationen die vergleichbarsten Ergebnisse.

Auswertung der Fisheye-Fotos

Die Auswertung der hemisphärischen Fotos erfolgte mit der Software WINScanopy Pro 2003d (Régent Instruments Inc. 2003). Die Unterscheidung, ob einzelne Pixel des Bildes der überschirmenden Krone oder dem Himmel zuzuordnen sind, erfolgt bei diesem Programm nicht mehr zwingend anhand eines bestimmten Grenzgrauwertes (vgl. Wagner und Nagel 1992). Das ist zwar nach wie vor möglich, jedoch besteht ebenso die Möglichkeit, diese Zuordnung anhand der verschiedenen im Bild vorkommenden Farben vorzunehmen. Somit ist man beim Fotografieren weniger von der derzeitigen Bewölkungssituation abhängig. Auch tiefblauer Himmel mit einzelnen Wolken kann so eindeutig erfasst werden.

Das Programm liefert bei jeder Bildauswertung eine Fülle von verschiedenen Strahlungsparametern, bietet aber auch zahlreiche Möglichkeiten der Einflussnahme auf die verschiedenen Berechnungen an. Die bereits von Diaci und Thormann (2002) beklagte fehlende Standardisierung der Bildauswertung bzw. der dafür erforderlichen Programmeinstellungen wird mit zunehmender Komplexität bei der Bedienung von Kamera und Software immer dringender. Im Rahmen des SUSTMAN-Projektes konnte diese Arbeit nicht geleistet werden und die verschiedenen Testläufe zu Projektbeginn reichten nicht aus, alle Möglichkeiten des Programmes ausreichend zu optimieren. Daher wurde bei der vorliegenden Arbeit ausschließlich der *Indirect Site Factor* (entspricht dem *Diffuse Site Factor*) als Maß für die relative Beleuchtungsstärke verwendet. Gelegentlich fand auch die *Gap Fraction* zur Beschreibung der Überschirmungssituation Anwendung. Auf die Nutzung der absoluten Strahlenwerte wurde jedoch bewusst verzichtet.

Zudem fand Hauskeller-Bullerjahn (1995) heraus, dass der *Diffuse Site Factor* unter Überschirmungsbedingungen wie sie auf der Versuchsfläche vorherrschten, die engste Korrelation zu Wachstumsparametern hatte. Sie zog zu diesem Vergleich neben dem *Diffuse Site Factor* auch den *Direct Site Factor*, den *Total Site Factor* und den prozentualen Kronenschlussgrad heran. Es bestand weiterhin eine enge Korrelation zwischen *Diffuse Site Factor* und den absoluten Strahlungswerten.

Neben den Strahlungsinformationen für ein gesamtes Bild, also die ganze Hemisphäre, bietet das Programm auch die Möglichkeit, nur Teilbereiche davon zu analysieren. Um bspw. die Wachstumsrichtung der Hauptäste mit der Verteilung der Lücken im Kronendach in Zusammenhang zu bringen, wurden auch für die acht Richtungssektoren (N, NE, E, ..., NW) einzelne Analysen durchgeführt.

Ein weiterer Versuch galt der Unterscheidung zwischen senkrecht einfallendem Licht und Seitenlicht. Dafür wurde die Hemisphäre für die Analyse in einen Horizont-Bereich (0-45°) und einen Zenit-Bereich (45-90°) unterteilt (Abb. 3.2).

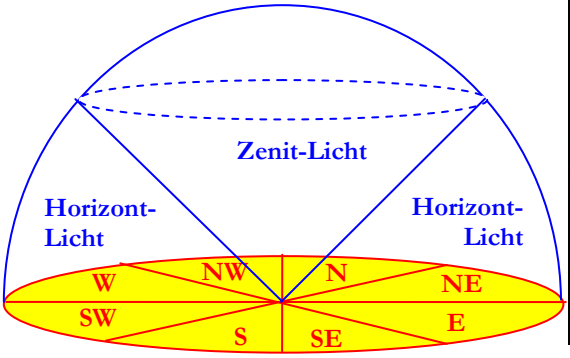


Abb. 3.1. Schematische Darstellung des Hemisphärenmodells, das der Projektion einer *Fisheye*-Linse zugrunde liegt. Die Kamera befände sich dabei im Mittelpunkt des gelben Kreises.
Die horizontale (rot) und vertikale (blau) Unterteilung der Hemisphäre im Zuge der Bildauswertung sollte die Frage beantworten helfen, inwieweit das Astwachstum durch die Richtung des Lichtgenusses beeinflusst wird.

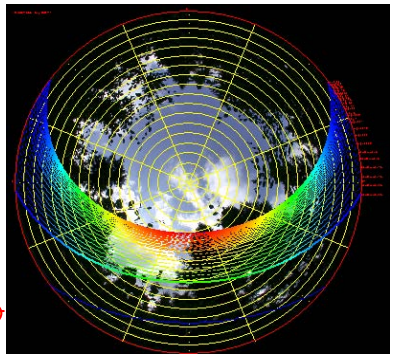


Abb. 3.2. Beispiel eines *Fisheye*-Fotos aus dem Bereich des Femellochs auf der Harzer Versuchsfläche. Die gelben „Tortenstücke" markieren die acht Richtungssektoren mit dem Nordsektor am oberen Bildrand. Die 18 gelben Kreise geben die vertikale Unterteilung der Hemisphäre in 5°-Schritten wieder. Die farbigen Linien repräsentieren die Sonnenbahnen für die verschiedenen Tage einer Vegetationsperiode.

3.2.2. Konkurrenz

3.2.2.1. Theoretischer Hintergrund

Nachdem bereits die Möglichkeiten der Lichtmessung als „*extremely complicated*" (Anderson 1964a) eingeschätzt werden müssen, erscheint die Aufgabe, den auf die Untersuchungsbäume wirkenden Konkurrenzdruck zu ermitteln, als nahezu unlösbar.

Vielschichtig und zahlreich sind die Überlegungen zu diesem Thema, ebenso wie die Versuche, die damit verbundenen Probleme zu lösen (vgl. u. a. Holmes und Reed 1991, Biging und Dobbertin 1992, Burton 1993, Ammer 1996, Bachmann 1998, Pretzsch 2002).

Konkurrenz entsteht aus der Begrenztheit der zum Wachsen und Gedeihen erforderlichen Ressourcen und den gemeinsamen Ansprüchen auf diese Ressourcen durch verschiedene Individuen. Röhrig et al. (2006) verstehen unter

Konkurrenz die Erscheinung, dass ein Individuum ein anderes durch die Einschränkung dieser Ressourcen beeinträchtigt oder gar dessen Überleben verhindert. Die Intensität der Konkurrenz wird dabei am Ausmaß der Beeinträchtigung im Vergleich zum unbehinderten Wachstum auf gleichem Standort gemessen.

Klassischerweise wird zwischen der Konkurrenz unter Individuen derselben Art (*intraspezifische* Konkurrenz) und der unter Individuen verschiedener Arten (*interspezifische* Konkurrenz) unterschieden. Dabei verweisen Begon et al. (2006) auf die Tatsache, dass die intraspezifische Konkurrenz als härtere Form der Konkurrenz anzusehen sei, da die im Wettstreit miteinander stehenden Individuen dieselbe ökologische Nische beanspruchen.

Otto (1994) unterscheidet zudem die Konkurrenz nach der räumlichen Verteilung der Konkurrenten. Neben die *horizontal* (im Kronengleichschluss) wirkende Interaktion tritt die *vertikale* Konkurrenz zwischen Mitgliedern der verschiedenen Bestandesschichten.

> Im vorliegenden Fall konkurrieren Fichten-Altbestand, Jungbuchen und Bodenvegetation in erster Linie um die Ressourcen Licht und Wasser (mit den darin gelösten Nährstoffen). Da Wasser und Nährstoffe über die Wurzeln aufgenommen werden, kann der Wettkampf um diese Stoffe zusammenfassend als Wurzelkonkurrenz bezeichnet werden. Sie wurde jedoch aufgrund der Wasserverfügbarkeit und der hohen Niederschläge im Westharz (vgl. Kapitel 2.2.) als weniger bedeutsam eingeschätzt. Insofern wurde bei der vorliegenden Arbeit auf die Betrachtung der Konkurrenzwirkung durch die Bodenvegetation vollständig verzichtet. (Aufgrund der Größe der Jungbuchen hätte die Bodenvegetation noch allein durch die Wurzelkonkurrenz Einflussmöglichkeiten auf das Wachstum der Buchen gehabt.)
>
> Neben der vertikalen Konkurrenzwirkung der Altfichten auf die Jungbuchen war demnach *nur* noch die horizontale intraspezifische Konkurrenz der Jungbuchen untereinander Gegenstand der Untersuchungen.

Bei der Erfassung der Konkurrenzsituation sind verschiedene Probleme zu beachten. Zum einen ist die Konkurrenz naturgemäß ein dynamischer Prozess (Tilman 1994). Das insgesamt verfügbare Ressourcenpotential variiert ebenso, wie sich die Intensität der Konkurrenz durch den Wandel in Gestalt und Anzahl der Konkurrenten verändert (Ammer 1996). Dieses dynamische System kann eigentlich nicht durch eine einmalige Messung repräsentiert werden (Burton 1993).

Des Weiteren darf nicht vergessen werden, dass die zu einem bestimmten Zeitpunkt herrschende Konkurrenzwirkung erst zur Ausbildung zukünftiger morphologischer Merkmale führen wird. Die Reaktion im Pflanzenwachstum auf die Konkurrenzeinwirkung findet also zeitversetzt statt, wohingegen die

Messungen zur Erfassung der gegenseitigen Beeinflussung und verschiedener Wachstumsparameter in der Regel zum selben Zeitpunkt erfolgen. Das ist aus messtechnischen Gründen häufig nicht anders möglich. Man sollte sich dabei jedoch bewusst sein, dass in der Vergangenheit ganz andere Faktoren zur Ausprägung der jetzigen Wachstumsparameter geführt haben können als die momentan ermittelbaren.

Darüber hinaus kann auch eine intensive Konkurrenz messbar sein, obwohl sie für das Pflanzenwachstum von geringer oder sogar ganz ohne jegliche Bedeutung ist. Burton (1993) nennt als Grund dafür andere mögliche Belastungen der Pflanze (z. B. klimatische oder Bodenbedingungen, Verbiss), die in ihrer Wirkung relativ gesehen entscheidendere Auswirkungen haben können.

Der schwierige, wenn nicht gar unmögliche (Biging und Dobbertin 1992) Versuch, das individuelle Baumwachstum als Funktion der Störung durch andere Pflanzen zu beschreiben, ist Aufgabe der Konkurrenzindizes (Burton 1993, Ammer 1996). Unter einem Konkurrenzindex versteht man demnach einen dimensionslosen, individuellen Wert, der die derzeitige Konkurrenzsituation bzw. die gemessene Beeinträchtigung in der Morphologie eines Baumes zusammenfassend beschreibt und numerisch wiedergibt (Martin und Ek 1984, Bachmann 1996). Die sehr komplexe Wuchssituation wird in nur einer einfachen Zahl ausgedrückt (Burton 1993).

Zur Beschreibung der dichtebedingten Konkurrenzsituation von Einzelbäumen sind diverse solcher Maßzahlen entwickelt worden, die meist auf dem Abstand zwischen Zentralbaum und Konkurrent bzw. den Dimensionsverhältnissen beider Bäume zueinander aufbauen (Röhrig et al. 2006).

Je nachdem, welche Parameter in die Berechnung der einzelnen Indizes einfließen, werden in der Literatur verschiedene Gruppen von Konkurrenzindizes unterschieden. Zunächst erfolgt eine Unterteilung in die beiden Hauptgruppen der entfernungs- bzw. positionsabhängigen und -unabhängigen Konkurrenzindizes (*distance-dependent/distance-independent*), je nachdem ob Abstandswerte zu den Bestandesnachbarn berücksichtigt werden oder nicht (Munro 1974, zitiert nach Biging und Dobbertin 1992, Pretzsch 2002).

Die positionsabhängigen Indizes werden weiterhin in folgende drei Gruppen gegliedert (Biging und Dobbertin 1992, Ammer 1996, Bachmann 1996):

1.) *Size-ratio-indices*. Diese Indizes setzen Wachstumsparameter (z. B. häufig Durchmesser, Höhe oder Grundfläche) des Zentralbaumes denen der Konkurrenten gegenüber. Häufig werden diese Verhältnisse mit der Entfernung der Bäume gewichtet.
2.) *Crown or influence-zone overlap indices*. Bei diesen Indizes wird eine der Größe des Baumes angepasste, hypothetische Kronenprojektionsfläche oder Einflusszone für jeden Baum berechnet. Dies ist in der Regel ein Kreis mit dem mittleren Kronenradius. Das Verhältnis des durch

Bestandesnachbarn überlappten Bereichs dieser Fläche zur gesamten Einflusszone des Zentralbaumes gilt hierbei als Maßzahl für die Konkurrenz.

3.) *Growing-space-indices*. Diese Gruppe wird oft auch als *area-potentially-available-indices* bezeichnet. Hierbei wird der Bestand in Polygone aufgeteilt, die jeweils um einen Baum liegen und seinen potentiell verfügbaren Wuchsraum widerspiegeln. Dazu werden die Distanzen eines Baumes zu seinen Nachbarn halbiert oder entsprechend der Baumdimension unterteilt und diese Punkte miteinander verbunden.

Die Konkurrenzindizes sind in der Regel aus Analysen in Altbeständen entwickelt worden, sind aber nach den Ergebnissen von Ammer et al. (2005) auch für die Abschätzung der Konkurrenzsituation in Jungbeständen geeignet. In Jungbeständen sind am sinnvollsten *Size-Ratio*-Indizes einzusetzen.

Bei der Auswahl der Konkurrenten, also welcher der benachbarten Bäume als Konkurrent fungiert und welcher nicht, unterscheidet Pretzsch (2002) folgende vier Methoden:

- **Verfahren mit festem Suchradius**
  Alle Bäume innerhalb eines um den Probebaum gezogenen Kreises definierter Größe werden als Konkurrenten erfasst. Dadurch kann vor allem auch die Konkurrenzwirkung durch Individuen berücksichtigt werden, die kleiner als der jeweilige Probebaum sind (Ammer et al. 2005).

- **Verfahren der Kronenüberlappung**
  Sobald sich die Kronen oder theoretische Einflusszonen von Zentralbaum und Nachbar überschneiden, ist die Konkurrenz definiert.

- **Horizontale Winkelzählprobe**
  Eine Winkelzählprobe definiert die Konkurrenten.

- **Verfahren mit vertikalem Suchkegel**
  Bei diesem Verfahren wird sich ein nach oben geöffneter Kegel über dem Zentralbaum gedacht. Wächst ein Nachbarbaum in diesen Kegel hinein, so wird er als Konkurrent erfasst. Das Verfahren ist auf Seite 47 in Abb. 3.6 grafisch dargestellt.

3.2.2.2. Messungen und Berechnungen zur Quantifizierung der Konkurrenz

Zur Quantifizierung der herrschenden Konkurrenzsituation erfolgte die Ermittlung von sieben im Folgenden beschriebenen Konkurrenzindizes (CI). Dabei wurden zunächst, ähnlich wie bei Ammer et al. (2005) alle Bäume als Konkurrenten erfasst, deren Standpunkt innerhalb eines Radius von 3,47 m um den jeweiligen Probebaum lag. Der gewählte Radius entsprach dabei der durch-

schnittlichen Höhe aller Probebäume. Dieses Verfahren musste auch angewendet werden, um eine Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der anderen SUSTMAN-Versuchsflächen zu erreichen. Anders als bei diesen Versuchsflächen ist jedoch die Harzer Versuchsanlage besonders durch die stark variierenden Baumhöhen charakterisiert gewesen. Aus diesem Grunde wurde in einem zweiten Verfahren der Radius um den jeweiligen Probebaum variabel gehalten. Er wurde nun der Höhe des jeweiligen Zentralbaumes gleichgesetzt. Damit sollte den innerhalb der Versuchsfläche stark variierenden Wachstumsbedingungen (vor allem des variierenden Lichtgenusses) stärker Rechnung getragen werden. Bei beiden Verfahren musste jedoch ein potentieller Konkurrent im Höhenwachstum mindestens die halbe Baumhöhe des Zentralbaumes erreicht haben. Kleinere Bäume wurden nicht berücksichtigt.

CI_1 – Anzahl der Konkurrenten innerhalb des festen Probekreises mit $r = 3{,}47$ m; umgerechnet auf Anzahl je 10 m² Fläche

CI_2 – Anzahl der Konkurrenten im variablen Probekreis mit $r = h$, wobei h die Höhe der Zentralbuche ist; umgerechnet auf Anzahl je 10-m²-Fläche

Für die Berechnung der weiteren Konkurrenzindizes wurde aus dem so ermittelten Konkurrentenkontingent für jede der acht Himmelsrichtungen der Hauptkonkurrent zu der Zentralbuche ermittelt. Das dafür angewandte Auswahlverfahren ähnelt dem bereits bei Ammer (1996) beschriebenen bzw. der Ermittlung des Überragungswinkels, die bei Hartkopf (1994) und Linnert (2001) erläutert wird. Anders als in den erwähnten Quellen wird jedoch der Bezugspunkt auf die Höhe der halben Baumhöhe gelegt. Somit können auch benachbarte Bäume, die kleiner als die Untersuchungsbuche sind, in ihrer Konkurrenzwirkung erfasst werden. Statt der Bezeichnung des Überragungswinkels ist daher nun der Begriff des Beeinflussungs- oder besser des Konkurrenzwinkels richtigerweise zu verwenden. Hauptkonkurrent ist in der jeweiligen Himmelsrichtung demnach der Baum, der den größten Beeinflussungswinkel zum Zentralbaum hat. Der Beeinflussungswinkel ist dabei umso größer, je näher oder je höher der potentielle Konkurrent im Verhältnis zur betrachteten Buche ist. Auf diese Weise wurden bis zu acht Hauptkonkurrenten pro untersuchter Buche ausgewählt.

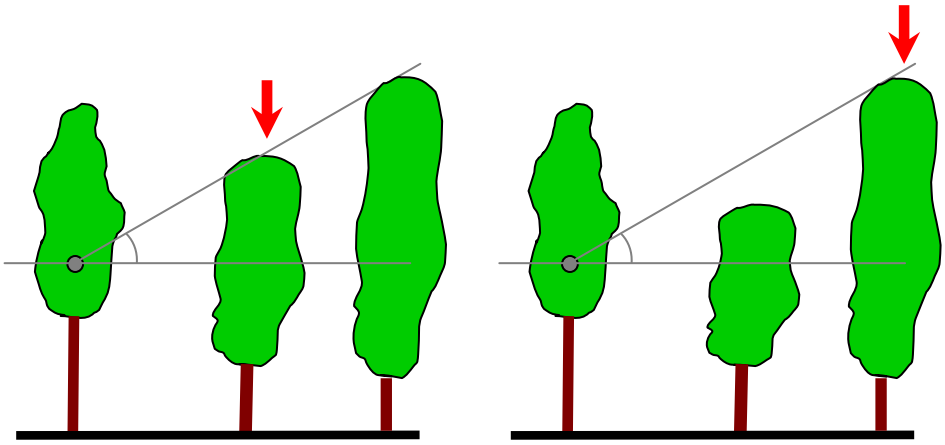
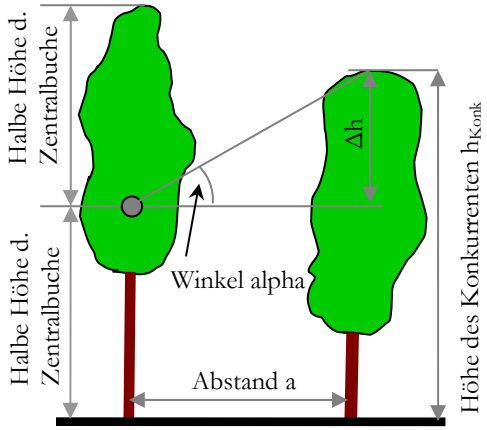


Abb. 3.3. Bestimmung eines Hauptkonkurrenten (mit Pfeil gekennzeichnet). In der ersten Grafik ist der Konkurrenzwinkel zu beiden potentiellen Konkurrenten identisch. Dort wurde das näher stehende Bäumchen als Hauptkonkurrent angesprochen. In der zweiten Skizze unterscheiden sich die Konkurrenzwinkel. Dort wurde das Bäumchen mit dem größeren Winkel als Hauptkonkurrent definiert. Seine Konkurrenzwirkung überlagert gewissermaßen diejenige des näher stehenden Bäumchens.

Für die Berechnung der folgenden vier Konkurrenzindizes wurden zunächst die Höhen der Hauptkonkurrenten ermittelt, sowie deren Abstand zur Zentralbuche, gemessen von Stammfußpunkt zu Stammfußpunkt.

CI_3 – Konkurrenzwinkel

Neben der Auswahl der Hauptkonkurrenten ist der Konkurrenzwinkel auch schon gut als eigenständiger Konkurrenzindex geeignet, insbesondere beim Vorhandensein mehrerer Konkurrenten. Bei den meisten Konkurrenzindizes summiert sich die Konkurrenzwirkung einzelner Bäume linear immer weiter auf. Der Konkurrenzwinkel nimmt auch bei mehreren Konkurrenten grundsätzlich Werte zwischen 0° (keine Konkurrenten vorhanden) und 90° (erhebliche Höhenüberlegenheit und Nähe des Konkurrenten) an. Je größer dabei die Konkurrenzwirkung eines Baumes auf die Zentralbuche ist (α nahe 90°), desto geringer ist die Auswirkung weiterer potentieller Konkurrenten. Das Aufsummieren ergibt hier den Konkurrenzwinkel eines imaginären Baumes, dessen Konkurrenzwirkung auf die untersuchte Buche genauso groß ist wie diejenige aller tatsächlich vorhandenen Konkurrenten zusammen.



Konkurrenzwinkel

[1] $$\alpha_i = \arctan \sum_{j=1}^{n} \frac{\Delta h_j}{a_{ij}}$$

a_{ij} – Abstand zwischen Konkurrent und Zentralbuche
Δh – Differenz zwischen Höhe des Konkurrenten und der halben Baumhöhe der Zentralbuche
n – Anzahl der Konkurrenten (1 – max. 8)

Abb. 3.4. Herleitung des Konkurrenzwinkels. Der Bezugspunkt liegt auf der halben Höhe der Zentralbuche.

CI_4 – Konkurrenzindex nach Hegyi

Als klassischer Konkurrenzindex wurde der Hegyi-Index (zitiert nach Bachmann 1998) verwendet, auch wenn dessen Berechnung mathematisch nicht exakt ist (Addition der Entfernung mit einem dimensionslosen Wert im Nenner). Allerdings wurde statt der Durchmesserrelationen das Verhältnis der Baumhöhen verwendet, da die Höhen die direktere Einflussgröße bei der Konkurrenzwirkung sind.

[2] $$H_i = \sum_{j=1}^{n} \frac{h_j}{h_i \cdot (Dist_{ij} + 1)}$$

n - Anzahl der Konkurrenten
h_i - Höhe des Zentralbaums
h_j - Höhe des Konkurrenten
$Dist_{ij}$ - Entfernung zwischen beiden Bäumen

CI_5 – Konkurrenzindex nach Ammer (1996)

Ammer (1996) hat in seiner Arbeit über die Konkurrenz um Licht in der Naturverjüngung eines Bergmischwaldes bereits zahlreiche Konkurrenzindizes auf ihre Praktikabilität hin untersucht. Für Buchen der Altersklasse I (12-jährig und älter) ergaben sich in Korrelation zum Höhenzuwachs die höchsten Korrelationskoeffizienten für seine Konkurrenzindizes V_9, V_{24} und V_{15}. Da in der vorliegenden Arbeit keine Durchmesserdaten der Konkurrenten vorliegen, lässt sich von diesen Indizes nur letzterer ermitteln.

[3] $$V_{15} = \sum_{j=1}^{n} \frac{h_j}{h_i}$$

n - Anzahl der Konkurrenten
h_i - Höhe des Zentralbaums
h_j - Höhe des Konkurrenten

CI_6 – Konkurrenzindex nach eigenen Überlegungen des Autors

Aufgrund der Tatsache, dass neben dem Größenverhältnis von Konkurrent und Zentralbaum eigentlich der Abstand der Kronenränder beider Bäume das Wachstum der untersuchten Buche viel direkter beeinflusst als die Entfernung der Stämme, wurde versuchsweise ein eigener Konkurrenzindex abgeleitet. Dabei wurde auch die Überlegung berücksichtigt, dass durch verschiedene mögliche Kronenformen auch die Höhe des geringsten Kronenabstands beider Bäume eine Rolle spielen müsste. Ebenso sollte die Himmelsrichtung des Konkurrentenstandortes zum Tragen kommen.

1.) In einem ersten Berechnungsschritt wurde für jeden potentiellen Konkurrenten aus dem gemessenen kleinsten Kronenabstand beider Bäume und den relativen Höhenverhältnissen der Gesamthöhe des Konkurrenten und der Höhe des geringsten Kronenabstands zur Gesamthöhe der untersuchten Buche ein Wert für die Konkurrenzkraft des Konkurrenten ermittelt.

[4] $$CP_j = \frac{H_C + H_{KrA_{\min}} + A_{\min}}{3}$$

CP_j berechnete Konkurrenzkraft (*competitive power*) eines Konkurrenten

H_C Faktor für die relative Höhe des Konkurrenten entsprechend Tabelle 3.1

$H_{KrA_{\min}}$ Faktor für die relative Höhe des kleinsten Kronenabstandes zwischen Konkurrent und Zentralbaum entsprechend Tabelle 3.2

$A_{\min}$ Faktor für den geringsten Kronenabstand zwischen Konkurrent und Zentralbaum entsprechend Tabelle 3.3

h_{Konk} Höhe des Konkurrenten in cm

h_z Höhe der Zentralbuche in cm

$h_{KrA_{\min}}$ Höhe, in der der Abstand zwischen den Kronenrändern von Konkurrent und Zentralbuche minimal ist in cm

KrA_{min}	Geringster Abstand zwischen den Kronenrändern von Konkurrent und Zentralbuche in cm. Negative Werte spiegeln dabei ein Ineinanderwachsen der Kronen wieder
KrD_{max}	Größter Kronendurchmesser der Zentralbuche in cm

Tabellen 3.1 bis 3.3. Herleitung der Faktoren für die Höhenrelation des Konkurrenten (3.1 links), die relative Höhe des geringsten Kronenabstandes (3.2 Mitte) und des geringsten Kronenabstandes (3.3 rechts), die in die Berechnung der Konkurrenzkraft eingehen (vgl. Formel [4]).

$\frac{h_{Konk}}{h_z}$ [%]	Faktor H_C
> 100 %	4
75-100 %	3
50-75 %	1

$\frac{h_{KrA_{min}}}{h_z}$ [%]	Faktor $H_{KrA_{min}}$
> 75 %	4
50-75 %	3
< 50 %	1

KrA_{min} [cm]	Faktor A_{min}
$< -1/3\, KrD_{max}$	5
-5 bis -1/3 KrD_{max}	4
+5 bis -5	3
+1/3 KrD_{max} bis +5	2
$> +1/3\, KrD_{max}$	1

2.) Für jede der acht Himmelsrichtungen wurde der Konkurrent mit der höchsten berechneten Konkurrenzkraft (CP_j) für die weitere Berechnung des Konkurrenzindizes ausgewählt. Um den Einfluss der einzelnen Himmelsrichtungen zu berücksichtigen, wurden die acht Werte mit den entsprechenden Korrekturwerten gewichtet, wie sie durch Guericke (2001) für die Bezugsbaumart Buche ermittelt wurden (Tabelle 3.4).

[5] $$CI = \frac{\sum d_j * CP_j}{8}$$

CP_j – Konkurrenzkraft eines Konkurrenten, berechnet über Formel [4]

d_j – Korrekturwert für den Einfluss der Himmelsrichtung (vgl. Tabelle 3.4)

j - Richtung des Konkurrenten (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW)

Je höher der berechnete Konkurrenzindex ist, desto stärker ist der Konkurrenzdruck für den betrachteten Zentralbaum.

Tabelle 3.4. Korrekturfaktoren nach Guericke (2001) zur Gewichtung der Konkurrenzwirkung für die Bezugsbaumart Buche entsprechend der Himmelsrichtung des Konkurrentenstandortes vom Zentralbaum aus. Da Guericke (2001) in seiner Arbeit über die Wuchsdynamik in Mischbeständen aus Buche und Lärche abweichend die Richtungssektoren NNW, NNE, ENE usw. benutzte, wurden dessen Gewichtungswerte gemittelt, um die Werte für die Richtungen N, NE, E, usw. zu erhalten. Aus seinen Werten für die Sektoren NNW und NNE wurde bspw. der Wert für Sektor N bestimmt.

Himmelsrichtung	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Gewichtungsfaktor	1,014	1,098	1,123	1,013	0,902	0,906	0,961	0,983

CI_7 – Konkurrenzwert aus dem Vergleich von *Fisheye*-Fotos

Neben den hemisphärischen Aufnahmen an der Baumspitze und entlang der Kronenperipherie wurde ein weiteres *Fisheye*-Foto aus der Position der Kronenmitte aufgenommen. Für diese Fotoaufnahme wurde die Kamera in der Höhe der halben Kronenlänge positioniert und der Untersuchungsbaum komplett unter die Aufnahmeebene gebogen. Unter Freilandbedingungen wären ausschließlich die konkurrierenden Buchen fotografisch erfasst worden und die ermittelte *Gap Fraction* ließe sich direkt als Maß für die intraspezifische Konkurrenz verwenden. Unter homogenen

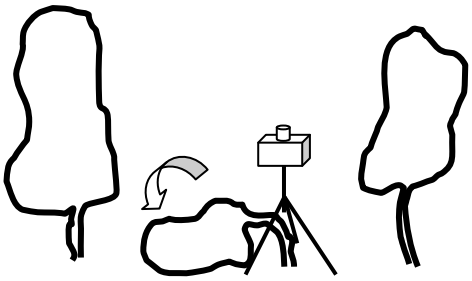


Abb. 3.5. Erfassung der Konkurrenzsituation mittels hemisphärischer Fotografie. Der Zentralbaum wurde bei der Aufnahme unter die Kameraebene gebogen.

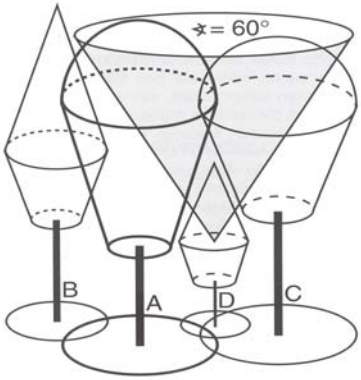


Abb. 3.6. Nach Pretzsch (2002) haben nur benachbarte Bäume, deren Kronen in einen über dem Zentralbaum vorgestellten Wachstumskegel hineinwachsen (A und C), eine Konkurrenzwirkung auf den Zentralbaum (D).

Überschirmungsbedingungen wäre zumindest eine adäquate Schätzgröße für die Konkurrenz zu erwarten gewesen. Da die Überschirmungsbedingungen in der vorliegenden Studie jedoch recht variabel sind, wurde der Quotient aus der *Gap Fraction*, ermittelt an der Baumspitze, und der, aus dem Kronenmittenbild berechnet. Beide Bilder wurden dabei nur für den 60°-Winkel ausgewertet, der auch dem Konkurrenzindex von Pretzsch (2002) zugrunde liegt.

3.3. Response-Variablen

Nachdem die verschiedenen Methoden zur Erfassung der beiden Einflussgrößen vorgestellt wurden, widmen sich die folgenden Unterkapitel den verschiedenen *Response*-Variablen und deren Messung.

3.3.1. Erfassung von Höhe, Durchmesser und Stammform

Die Baumhöhen wurden für alle Buchen als vertikaler Abstand des höchsten Punktes, den der jeweilige Baum nach der Vegetationsperiode 2003 erreicht hatte, zum Boden mit Hilfe einer Teleskopmessstange erfasst. Diese kam auch bei der Ermittlung der Baumlänge zum Einsatz, wobei die Messung hierbei entlang der Stammachse erfolgte.

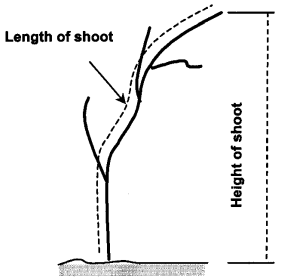


Abb. 3.7. Messung von Baumlänge zu Baumhöhe als Basis zur Beschreibung der Stammform. Das Länge/Höhe-Verhältnis wird umso weiter, je stärker das Stammwachstum von der vertikalen Richtung abweicht. Es ist daher ein Weiser für die Neigung der Jungbäume (aus Huss in Lüpke et al. (2004)).

Für die 20 nachträglich erfassten Bäume erfolgte 2005 die Messung anhand der Triebbasisnarben (vgl. Kapitel 3.3.2.) ebenfalls für den Zeitpunkt nach der Vegetationsperiode 2003.

Die Stammdurchmesser wurden zum einen in Brusthöhe (BHD, in 1,3 m Höhe) und am Wurzelhals (WHD, in 10 cm Höhe) mithilfe eines Messschiebers kreuzweise gekluppt.

Für das spätere ergänzende Kontingent von Bäumen wurde der Wurzelhalsdurchmesser anhand von Jahrringanalysen an Bäumen, die im vergleichbaren

Lichtspektrum wuchsen, geschätzt. Über die gemittelte Jahrringbreite (2,9 mm) wurde der 2005 gemessene Durchmesser auf das Jahr 2003 zurückgerechnet.

Bei der Berechnung der h/d-Werte wurde jedoch auf die direkten Messwerte zurückgegriffen, d. h., die Quotienten für die nachträglich erfassten Buchen wurden aus den 2005 ermittelten Höhen- und Durchmesserwerten berechnet.

Zur Erfassung der Stammform wurden die Bäume in drei Klassen eingeteilt: gerade, bogig oder krumm. Dazu wurden zwei imaginäre Zylinder mit einem Radius von 15 cm bzw. 7,5 cm um den Stamm gelegt. In der praktischen Durchführung dienten zwei Fluchtstangen als Hilfsmittel. Verlässt der Stamm den gedachten Zylinder nicht, so wurde er als „gerade" definiert. Kreuzt der Stammverlauf die Zylinderwand zu einer Seite, wurde er als „bogig" klassifiziert. Windet sich der Stamm hingegen mindestens zu zwei Seiten über die Zylinderbegrenzung hinaus, so galt er als „krumm". Dieses Modell geht auf Gaertner (2002) zurück.

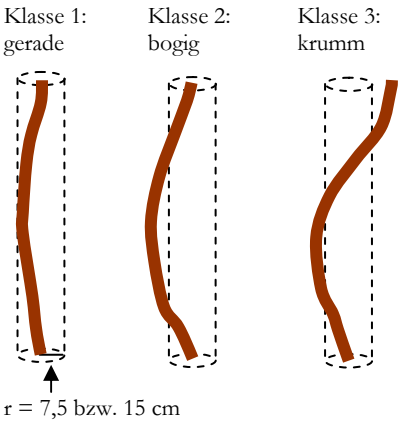


Abb. 3.8. Erfassung der Stammform der Buchen anhand eines Modells nach Gaertner (2002).

3.3.2. Messungen des Terminaltriebes

An der Baumspitze wurden die Längen der regulären Jahrestriebe aus den Vegetationsperioden 2002 und 2003 gemessen und – sofern vorhanden – auch vom Johannistrieb 2003. Auch für die nachträglich im Jahr 2005 erfassten Buchen wurden zugunsten der Datenvergleichbarkeit ebenfalls die Trieblängen aus den Jahren 2002 und 2003 ermittelt. Diese Messungen orientierten sich an den Triebbasisnarben, wobei die Erkenntnisse von Gruber (1998) beachtet wurden. Die Grenze zwischen den Jahrestrieben 2001 und 2002 und deren Unterteilung in reguläre Triebe und potentielle Johannistriebe konnte dabei teilweise bereits nur noch mit Schwierigkeiten definiert werden.

Mit Hilfe eines Winkelmessers und eines Lots erfolgte zugleich die Erfassung der Neigung des letztjährigen Jahrestriebes, d. h. dem der Vegetationsperiode 2002. Es wurden hierfür nicht die diesjährigen Jahrestriebe gewählt, weil sich diese erst sekundär aufrichten (Roloff 2001). Aus diesem Grunde wurde auch bei den im Jahr 2005 nachträglich erfassten Jungbuchen für die Messung des Winkels auf den Jahrestrieb 2004 zurückgegriffen.

Schließlich erfolgte die Erfassung der Anzahl an Terminalknospen und das Messen der Länge des höchsten Internodiums als Indikatoren für den Grad der apikalen Dominanz.

3.3.3. Erhebung von Astparametern

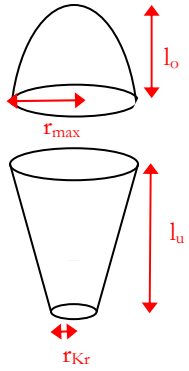
Zunächst wurden die Ansatzhöhen der niedrigsten toten, wie auch lebenden Äste gemessen. Die weiteren Parameter wurden stratenweise erfasst. So wurde die Anzahl aller Äste in jedem Stratum bestimmt. Die Anzahl der dicken Äste, also Äste, deren Durchmesser mindestens die Hälfte des Stammdurchmessers an der Astansatzstelle erreichten, wurde dabei für die unteren drei Straten separat festgehalten. In den beiden oberen Straten waren die Äste dazu noch nicht ausreichend differenziert. Zur Ermittlung der relativen Durchmesser wurden Ast- und Stammdurchmesser jeweils 5 cm oberhalb der Astabgangsstelle durch Kreuzkluppung gemessen. Die jeweiligen Durchschnittswerte wurden zueinander ins Verhältnis gesetzt. Zur besseren Vergleichbarkeit erfolgte abschließend noch eine Normierung auf Anzahl je 1 m Stammlänge.

Für den stärksten Ast jedes Stratums wurden neben dem relativen Astdurchmesser auch der Astabgangswinkel und der Azimut des Astwachstums (Richtung vom Astansatz zur Astspitze) gemessen.

3.3.4. Messungen zur „Raumeroberung" – Erfassung von Volumen und Biomasse

3.3.4.1. Oberirdischer Pflanzenteil

Die Schätzung des Kronenvolumens erfolgte auf zwei unterschiedlichen Wegen. Eine Methode folgte dabei dem Kronenmodell, wie es bei Pretzsch (2001) und Ammer (2005) beschrieben ist. Danach teilt der größte Kronendurchmesser (r_{max}) die Kronen in die beiden Teile Licht- und Schattenkrone. Beide Teile haben ihre ganz bestimmte, baumartenspezifische geometrische Form. Unter Einbeziehung der Baumhöhe und der Höhe des Kronenansatzes sowie der zusätzlich gemessenen Größen des maximalen Kronendurchmessers und dessen vertikaler Lage ließ sich, dem Modell folgend, für die Baumart Buche das Kronenvolumen nach den folgenden mathematisch hergeleiteten Formeln berechnen:



Lichtkrone - kubischer Paraboloid

$$[6]\ \text{Volumen} = \Pi \cdot \int_0^{lo} \left(\frac{r_{\max}}{l_o^{\frac{1}{3}}} \cdot E^{\frac{1}{3}} \right)^2 dE$$

E – Abstand von der Baumspitze

Schattenkrone - Kegelstumpf

$$[7]\ \text{Volumen} = \frac{1}{3} \cdot \Pi \cdot l_u \cdot \left(r_{Kr}^2 + r_{\max}^2 + r_{Kr} \cdot r_{\max} \right)$$

$$r_{Kr} \approx \frac{1}{3} r_{\max}$$

Das Modell geht ursprünglich davon aus, dass der größte Kronendurchmesser bei Buche bei 40 % der Kronenlänge, gemessen von der Baumspitze aus, zu finden ist. Da die wahre Position der weitesten Kronenausdehnung jedoch bekannt ist, wurde das Modell an diesem Punkt variiert. Diese Methode wird im Folgenden als 2-Körper-Modell bezeichnet.

Der zweiten, deutlich aufwändigeren Methode zur näherungsweisen Bestimmung des Kronenvolumens ging die bereits erwähnte Unterteilung der Probebäumchen in fünf Schichten oder Straten gleicher relativer Höhe voraus. Für jede der fünf Schichten erfolgte in Anlehnung an Hagemeier (2002) eine Projektion der durchschnittlichen Kronenausdehnung innerhalb der Schicht in acht Himmelsrichtungen (Nord, Nordost, Ost, usw.) auf den Boden und die Bestimmung der Entfernung dieses Punktes zum Stammfuß. Diese acht Entfernungen galten als „Radien“ der Kronensegmente, die vereinfachend als Kreissegmente aufgefasst wurden. Im dreidimensionalen Raum ergibt sich für jedes Stratum also aus den acht Radien und der Stratenstärke ein Gebilde aus acht zusammengesetzten Zylinderachteln.

Vollzieht man diese Methode für alle fünf Straten, so setzt sich die Baumkrone rechnerisch aus 40 zusammengesetzten und übereinander gestapelten Zylindersegmenten verschiedener Ausdehnung (aber jeweils gleicher Höhe) zusammen. Das Ergebnis dieser Messungen wurde zur Veranschaulichung auch graphisch dargestellt (siehe Abb. 4.23 auf Seite 76 und Abb. 4.46 auf Seite 96). Dabei kam die Software Matlab V.6 zum Einsatz. Um dieses Modell, das nur bei den ersten 50 Buchen angewandt werden konnte, von dem vorherigen zu unterscheiden, wird es im weiteren Verlauf als Schichten-Modell bezeichnet.

Für jede Himmelsrichtung wurde der maximale Wert der Kronenausdehnung gleichzeitig zur Ermittlung der Kronenprojektionsfläche genutzt.

Neben einer weiteren Möglichkeit zur Volumenschätzung sollten diese Messungen vor allem Aufschluss über eine eventuelle vertikale Verlagerung des Kronenwachstums bei variierendem Konkurrenzdruck geben und auch die Frage beantworten helfen, ob sich das Kronenwachstum z. B. gezielt in Lichtschächte hinein entwickelt. Das Augenmerk lag also auf der horizontalen und vertikalen Verteilung der Kronenmasse unter den verschiedenen Lichtbedingungen. Es wurde beispielsweise erwartet, dass sich der größere Volumenanteil der Krone unter geringen Lichtbedingungen im oberen Bereich des Baumes befindet, während sich bei stärkerer Beleuchtung eher eine zylindrische oder pyramidale Baumform herausbildet. Zur objektiven Einschätzung dieser Frage wurde neben dem prozentualen Anteil, den jedes Stratum vom gesamten Kronenvolumen einnimmt, auch der vertikale Volumenschwerpunkt ($C_{CrVolVert}$) bestimmt.

$$[8]\quad C_{CrVolVert} = \frac{100 \cdot \sum_{n=1}^{5} (hmS_n \cdot VS_n)}{V \cdot h} [\%]$$

V - gesamtes Kronenvolumen des Baumes
h - Baumhöhe
VS - Volumen eines Stratums
hmS - Höhe des vertikalen Mittelpunktes eines Stratums

Das Verhältnis der prozentualen Anteile der Straten S2-S4 am gesamten Kronenvolumen bildete die Grundlage bei der Definition der verschiedenen Kronenformen (vgl. Tabelle 3.5).

Tabelle 3.5. Definition der verschiedenen Kronenformen anhand des Verhältnisses der prozentualen Anteile der drei mittleren Baumschichten am Kronenvolumen. Die Nummerierung der Schichten erfolgt von der bodennahen Schicht (S1) zur Baumspitze (S5).

Verhältnis der Straten (S)	Kronenform
S2 < S3 < S4	trichterförmig
S2 < S3 = S4	zylindrisch
S2 = S3 = S4	zylindrisch
S2 < S3 > S4	bauchig
S2 = S3 > S4	zylindrisch
S2 > S3 > S4	pyramidal

Nach Abschluss der letzten Messungen wurden die Bäume im März 2004 entnommen und zur Bestimmung der Biomasse bei 105 °C getrocknet. Stamm- und Astbiomasse wurden dabei für jedes Stratum getrennt erfasst.

3.3.4.2. Unterirdischer Pflanzenteil

Nachdem die oberirdische Biomasse geerntet war, erfolgte ebenfalls im Frühjahr 2004 die Gewinnung der unterirdischen Biomasse bei gleichzeitiger Messung der Wurzelausdehnung in acht Himmelsrichtungen. Zu diesem Zweck wurde das Wurzelsystem der Jungbuchen unter Verwendung der bei Nadezhdina und Čermák (2003) beschriebenen *Air-Spade*-Technik freigelegt.

Abb. 3.9. Freilegen des Wurzelsystems einer Untersuchungsbuche mit Hilfe des *Air-spade*-Verfahrens. Der oberirdische Pflanzenteil wurde bereits „geerntet". Durch einen Kompressor verdichtete Luft (10,5 m^3 min^{-1}) entfernt den Boden, während feste Materialien wie Wurzeln und Steine verbleiben.

Herzstück dieser auch *supersonic air stream technique* genannten Methode ist ein besonders leistungsstarker Kompressor. Im vorliegenden Fall kam ein Atlas Copco XAHS 186DD mit einer Luftliefermenge von 10,5 m^3/min und einem Druckbereich von bis zu 12 bar (genutzt wurden um 10 bar) zum Einsatz. Ein Strahlrohr, auch Luftlanze genannt, wird an den Kompressor angeschlossen und auf das Erdreich aufgesetzt. Die Luft strömt vom Kompressor in die Luftlanze und wird in ihr auf 2-fache Schallgeschwindigkeit (Mach 2) beschleunigt (= Düsentechnik: Umwandlung von Druckenergie in Bewegungsenergie bzw. Umwandlung von Druck in gerichteten Schub). Die derart beschleunigte Luft dringt in die Bodenporen ein und „sprengt" sie auseinander. Feste Körper, wie z. B. Steine oder auch Wurzeln bleiben übrig. Selbst Feinwurzeln können so zerstörungsfrei freigelegt werden.

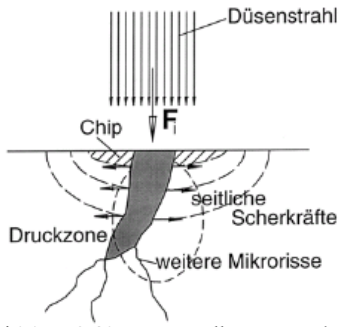


Abb. 3.10. Vorstellungen über den Lösevorgang im Erdstoff durch Einwirkung eines Luftdruckstrahls. (aus Kunze und Rodewald 2003)

Im Bauwesen wird diese Methode zur zerstörungsfreien Freilegung von Kabeln, Rohren und sonstigen Leitungen, beim Aushub im Wurzelbereich von Bäumen oder der Unterquerung von Fundamenten gelegentlich angewandt („magazin“ – Mietprogramm der Fa. MVS Zeppelin). Die physikalischen Grundlagen dieser Erdlösungstechnik werden detailliert durch Kunze und Rodewald (2003) erläutert.

Da die Probebäume auf der Versuchsfläche weit verstreut standen, war es nötig, den Kompressor auf eigens dafür vorbereiteten Gassen mehrfach umzusetzen bzw. die Schlauchlänge stellenweise auf bis zu 60 m zu verlängern. Trotzdem konnten einige Buchen nicht erreicht werden, so dass von den 50 Probebäumen nur bei 44 Buchen das Wurzelsystem gewonnen werden konnte. Auch bei den nachträglich ausgewählten 20 Zusatzbäumen unterblieben das Freilegen des Wurzelsystems und die Entnahme der Biomasse aus zeitlichen und Kostengründen.

Ähnlich wie beim Kronenvolumen wurde auch das durch die Wurzeln eines Baumes erschlossene Erdvolumen ermittelt. Dazu wurde das Wurzelsystem eines Probebäumchens zunächst bis zu einer Tiefe von 20 cm freigelegt. Alle in diesem Bereich vorkommenden Wurzeln benachbarter Buchen, aber auch die Fichtenwurzeln mit einem Durchmesser von < 1 cm, wurden zwecks Bestimmung der Wurzelkonkurrenz entnommen. Die Ausdehnung des Wurzelsystems der untersuchten Buche in die acht Himmelsrichtungen wurde für die erste Tiefenschicht gemessen und die Tiefe von 20 cm an den in die nächsttiefere Schicht reichenden Wurzeln markiert. Anschließend erfolgte das weitere Freilegen der Wurzeln im Tiefenbereich T2 = 20-40 cm Bodentiefe. Dieses Verfahren setzte sich in weiteren 20-cm-Stufen fort, bis das gesamte Wurzelsystem freigelegt war. Die Bestimmung der Wurzelbiomasse erfolgte anschließend im Labor der Abteilung Waldbau und Waldökologie der gemäßigten Zonen. Dort wurden alle Wurzeln zunächst gewaschen und anschließend entsprechend der Tiefenstufen zerschnitten. Nach einer weiteren Unterteilung anhand des Wurzeldurchmessers (Feinwurzeln < 2 mm, Starkwurzeln > 1 cm) wurde auch dieses Material bei 105 °C getrocknet.

3.3.5. Blattparameter

Während der Vegetationsperiode 2003 wurden von den 50 Bäumen alle Blätter gezählt, separat für die jeweiligen Straten. Anschließend wurde aus jedem Stratum eine zufällige Stichprobe von 30 Blättern entnommen. Diese Blätter wurden gescannt und der Scan zur Ermittlung u. a. der Blattfläche mit der Software WinFolia analysiert. Die Blattstichproben wurden anschließend zur Ermittlung des Trockengewichtes bei 105 °C getrocknet. Für die zusätzlichen 20 Buchen konnten die Blattparameter aus zeitlichen und finanziellen Gründen nicht mehr erhoben werden.

Abb. 3.11. Mit *Air-spade*-Methode freigelegte Wurzelsysteme:
Links: Oberflächennahes Geflecht von Fichtenwurzeln umgibt den zu erntenden Buchen-Wurzelstock.
Mitte: Bereits nahezu vollständig freigelegtes Wurzelsystem einer Jungbuche, die in unmittelbarer Nähe einer Altfichte aufwuchs.
Rechts: Wurzelsystem einer Buche, die unter besonders hellen Bedingungen aufwuchs, nach dem Waschen.

3.4. Datenauswertung

Die Software Microsoft Access und Excel kamen für die Datenverwaltung und -auswertung zum Einsatz.

Die statistische Untersuchung erfolgte mit dem Programm Statistica Version 7.1. Da der Korrelationszusammenhang zwischen den Daten selten linearer Natur war, wurde für die Korrelationen der Spearman-Rangkorrelationskoeffizient (R_S) berechnet. Da dieser Koeffizient aber ebenfalls nur bei monotonen Zusammenhängen (nur steigend oder nur fallend) eine Aussage über die Stärke des Zusammenhanges erlaubt (Köhler et al. 2002), wurde bei Funktionen mit Extremwerten für den fallenden und den steigenden Funktionsteil jeweils ein separater Koeffizient ermittelt.

Für die Regressionsanalysen (*fitting-process*) und die graphische Darstellung kam neben Statistica noch das Programm Xact der Firma SciLab GmbH zum Einsatz. Die Einstellungen für diese Software wurden so gewählt, dass die Methode der kleinsten Quadrate beim Fitting-Prozess Anwendung fand und bei der Berechnung der Fehlerwahrscheinlichkeit ein zweiseitiger, bzw. bei linearen Regressionen ein einseitiger t-Test ausgeführt wurde.

Sehr häufig wird für die Beschreibung der Wachstumsparameter in Abhängigkeit von der Strahlungsintensität das Modell der Michaelis-Menten-Funktion herangezogen (z. B. Coates und Burton 1999, Drever und Lertzman 2001). Diese Funktion ist ein einfaches Modell für die Substratabhängigkeit des Wachstums (Thornley 1976). Mathematisch gesehen ist diese Hyperbel eine Kombination aus

einer linear wachsenden und einer reziproken Funktion, die den für das Pflanzenwachstum fördernden bzw. beschränkenden Charakter des betrachteten Substrats beschreiben. Doch selbst wenn es eine vergleichsweise einfache und üblicherweise angewandte Formel ist, die mathematische Parameterschätzung (Ausgleichsrechnung/*fitting*) sollte auch die beste Anpassung anstreben. Daher wurde der fördernde Teil der Gleichung um eine Exponentialfunktion erweitert und der limitierende Teil durch eine logarithmische Funktion ersetzt. (In der Natur sind derartige Abhängigkeiten i. d. R. wohl kaum durch lineare Funktionen beschreibbar.) Dieser Schritt mag die Funktion der Wachstumsparameter gegenüber den sich verändernden Lichtbedingungen verkompliziert und auch die Interpretation der Gleichung erschwert haben, jedoch beschreibt die neu entstandene Funktion die Abhängigkeit nun genauer. Der Korrelationskoeffizient erhöhte sich dadurch. Er hätte bspw. für die Baumhöhen in Abhängigkeit von den Lichtbedingungen bei Anwendung der sogar bereits erweiterten Michaelis-Menten-Funktion, wie sie von Drever und Lertzman (2001) verwendet wurde, nur 0,70 betragen. Der Anteil der erklärten Varianz hätte nur $r^2 = 0{,}494$ ausgemacht. Bei Verwendung der eigenen Funktionserweiterung (vgl. Abb. 4.2 auf Seite 62) betrugen diese Werte $R = 0{,}76$ bzw. $r^2 = 0{,}581$. Ein weiterer Richtwert für die Güte der Anpassung eines bestimmten Regressionsmodells ist z. B. das modifizierte *Akaike information criterion* (AIC_c), das im Gegensatz zum einfachen AIC auch für einen geringen Stichprobenumfang Gültigkeit besitzt. Je geringer der berechnete AIC-Wert ausfällt, desto besser ist die Anpassung des gewählten Modells (Anderson et al. 2000, Burnham und Anderson 2004, Petriţan et al. 2009). Dabei ist für das *Akaike information criterion* (AIC) – im Gegensatz bspw. zum *Bayesian information criterion* (BIC) – gemäß Kuha (2004) „die Vorhersagbarkeit zukünftiger Daten das Schlüsselkriterium für die Eignung eines Modells“. In der Reihenfolge der unten angegebenen Formeln 9-11 betrugen die berechneten AIC_c-Werte im bereits angeführten Datenbeispiel aus Abb. 4.2: 574,4 bei der einfachen Michaelis-Menten-Funktion, 571,4 bei deren Erweiterung gemäß Formel 10 und schließlich 569,6 bei der eigenen Funktionserweiterung (Formel 11). Die Differenzen zwischen diesen Werten sind zugegebenermaßen gering, aber dennoch ergibt auch dieser Test eine Bestätigung der besten Anpassung durch das eigene Funktionsmodell. In ähnlicher Weise wurde auch bei allen anderen Regressionen die beste Anpassung angestrebt.

Einfache Michaelis-Menten-Funktion

[9] $$f(x) = \frac{a \cdot x}{b + x}$$

Erweiterte Michaelis-Menten-Funktion aus Drever und Lertzman (2001)

$$[10] \qquad f(x) = \frac{a \cdot x}{(a/b) + x} + c$$

Eigene Funktionserweiterung

$$[11] \qquad f(x) = a \cdot x + b \cdot \ln(x - c) + d \cdot \exp^{-x} + e$$

Häufig konnte auf den Koeffizienten c auch verzichtet werden. In allen anderen Fällen betrug er stets $c = 0{,}12$.

Aufgrund der Tatsache, dass Biomassedaten nur für ein Teilkontingent der Bäume erhoben werden konnten, und, um eine einheitliche Ermittlung des Biomassezuwachses durchführen zu können, wurde auf die Proxy-Variable des Volumenindizes ($d^2 \cdot h$) zurückgegriffen. Nach den Ergebnissen von Byrne und Wentworth (1988) und Shainsky und Radosevich (1992) korreliert dieser Wert mit der tatsächlichen Biomasse sehr eng (zitiert nach Ammer 1996).

Ausgehend von diesem sehr deutlichen Zusammenhang wurde überlegt, ob eine ähnlich strenge Beziehung nicht auch für die unterirdische Biomasse bestehen könnte. Der Wurzelhalsdurchmesser verbindet beide Pflanzenteile miteinander und sollte somit einen vergleichbaren Einfluss auf die Biomasse beider Pflanzenkompartimente verursachen. Statt der Baumhöhe wurde für den unterirdischen Teil die maximale Wurzeltiefe verwendet.

Die Reihenfolge der einzelnen Berechnungsschritte hatte einen bedeutenden Einfluss auf die ermittelten Jahreszuwächse. Daher sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass nach der Biomassenschätzung mittels der Proxy-Variablen zunächst unter Verwendung der ermittelten Regression die Umrechnung in Trockensubstanz für die Jahre 2002 bzw. 2003 erfolgte. Erst anschließend wurden für die Ermittlung des Gesamtbiomassezuwachses die Differenzbildung beider Werte und die Addition der Blatttrockensubstanz durchgeführt. Die Abfolge der Schritte wurde gewählt, da die erwähnten Regressionen für den Zusammenhang mit der Gesamtbiomasse erstellt wurden und nicht mit den Zuwachswerten.

Die Ursachen unterschiedlicher Wachstumsgeschwindigkeiten können mit der Wachstumsanalyse untersucht werden. Hierbei wird die Wachstumseffizienz in Komponenten zerlegt, die jeweils einen eigenen Erklärungswert besitzen. Dazu erfolgt eine Unterteilung in produktive (Blattmasse) und unproduktive Pflanzenteile.

Es darf in diesem Zusammenhang jedoch nicht vergessen werden, dass das Wachstum in jeder höheren Pflanze untrennbar mit den ontogenetischen Veränderungen in Form und Funktionsweise, allgemein bekannt als ontogenetische Drift, verbunden ist (Evans 1972).

Diesem Umstand konnte in der vorliegenden Arbeit nur bedingt Rechnung getragen werden. Alle untersuchten Buchen haben zwar das gleiche Alter; die durch die variierenden Lichtbedingungen verursachten unterschiedlichen Größen der Bäume bedingen aber ebenfalls abweichende Entwicklungsbedingungen für die Buchen (z. B. durch Selbstbeschattung).

Die verschiedensten Berechnungen zur Wachstumsanalyse finden sich im Ergebnisteil. Der Übersichtlichkeit halber seien sie an dieser Stelle schon in einer zusammenfassenden Formelsammlung dargestellt, wie sie bspw. Liebig und Zühlke (2006) entnommen werden kann.

Das **Blattgewichtsverhältnis** (*leaf weight ratio*, LWR) beschreibt, welcher Gewichtsanteil der Trockensubstanz (G) für die Blätter (als Repräsentant für die Photosynthese) verwendet wird:

[12] $$LWR = \frac{G_{Blatt}}{G_{Gesamt}}$$

Die **spezifische Blattfläche** (*specific leaf area*, SLA) gibt dagegen an, wie groß das Blatt ist, das mit einer bestimmten Masse an Blatttrockensubstanz hergestellt wurde (LA – Blattfläche):

[13] $$SLA = \frac{LA}{G_{Blatt}}$$

Wachstumskapazität: Ausgehend von der Blattfläche (LA) und der Pflanzenmasse (G), bzw. als Produkt von LWR und SLA berechnet sich das Blattflächenverhältnis (*leaf area ratio*) als:

[14] $$LAR = \frac{G_{Blatt}}{G_{Gesamt}} \cdot \frac{LA}{G_{Blatt}} = \frac{LA}{G_{Gesamt}}$$

Wachstumsintensität: Die Intensität des Wachstums wird über die Nettoassimilationsrate (NAR) wiedergegeben. Sie berechnet sich über den Zuwachs an Pflanzenmasse (dG) innerhalb einer Zeitperiode (dt), der zur Blattfläche (LA) ins Verhältnis gesetzt wird:

[15] $$NAR = \frac{dG}{dt} \cdot \frac{1}{LA}$$

Wachstumseffizienz: Das Produkt aus Wachstumskapazität und Wachstumsintensität ergibt schließlich die Wachstumseffizienz oder relative Wachstumsrate (RWR) einer einzelnen Pflanze:

$$[16] \qquad RWR = NAR \cdot LAR = \frac{dG}{dt} \cdot \frac{1}{LA} \cdot \frac{LA}{G} = \frac{dG}{dt \cdot G}$$

In der Forstwissenschaft, die in der Regel das Wachstum über längere Zeiträume beobachtet, ist auch die folgende, aus Lüpke (1973) entnommene Formel gebräuchlich:

$$[17] \quad \overline{RWR} = \frac{\ln(G_2) - \ln(G_1)}{t}$$

G1 – Trockengewicht zum Zeitpunkt der Pflanzung
G2 – Trockengewicht zum Zeitpunkt der Ernte

4. Ergebnisse

4.1. Strahlung, Wachstum und Qualität

4.1.1. Strahlung

Die oberhalb der untersuchten Buchen gemessenen Strahlungswerte ergaben einen Gradienten von 0,129 bis 0,714 ISF.

> Zum Verständnis: Ein ISF-Faktorwert von 0,129 ist gleichbedeutend mit 12,9 % relativer Freilandhelligkeit. Beide Schreibweisen finden im Folgenden synonym Verwendung.

Betrachtet man die entlang der Kronenperipherie ermittelten Lichtdaten, so wird deutlich, dass mit zunehmender Lichtintensität prozentual weniger Licht die unteren Straten, bzw. den Bereich unterhalb der Kronenbasis erreicht. Das lässt auf eine größere Kronendichte schließen (vgl. *leaf area index* in Kapitel 4.1.6.).

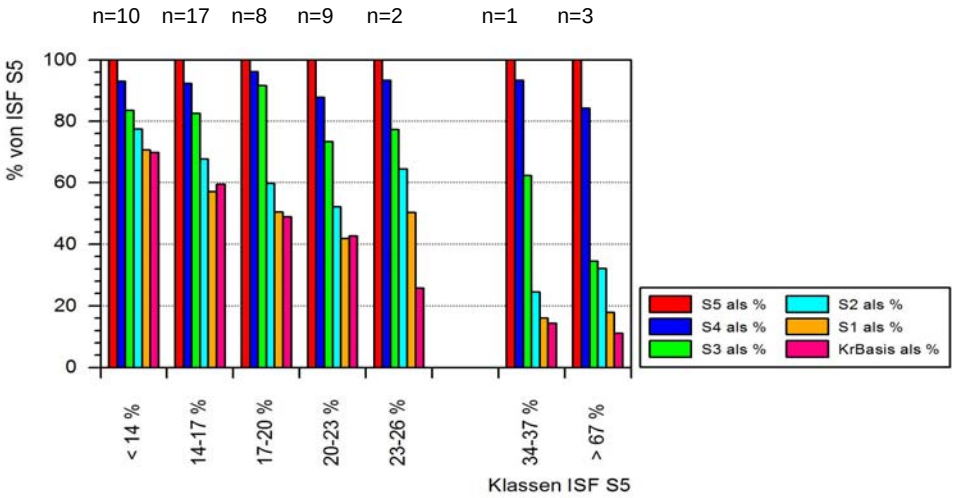


Abb. 4.1. Abstufung der relativen Beleuchtungsstärke entlang der Kronenperipherie als prozentualer Wert von ISF S5. Die Buchen wurden nach Klassen anhand des Lichtgenusses an ihrer Baumspitze (ISF S5) geordnet.

Die Lichtwerte, die unterhalb der Kronenbasis gemessen wurden, erreichten Werte zwischen minimal 5,1 % und maximal 15,5 %. Der Mittelwert beträgt 8,9 % ISF. In Relation zum Strahlungswert an der Baumspitze sind die Daten in Abb. 4.1 dargestellt.

4.1.2. Wachstum

Die Höhen der Buchen variierten zwischen einem Minimum von 182 cm bis zu einem Maximalwert von 555 cm. Der Jahreslängenzuwachs der Buchen lag im Jahr 2003 zwischen 0,5 cm und 70 cm. In Korrelation mit den Lichtwerten zeigt die Regressionskurve bei beiden Parametern einen steilen Anstieg bis zu einem ISF-Wert von ungefähren 15-20 %, und darüber setzt ein deutliches Sättigungsverhalten ein (Abb. 4.2 und 4.3).

Johannistriebe konnten nur an 11 Buchen festgestellt werden, wobei weder deren Auftreten noch deren Länge eine ausreichend gesicherte signifikante Korrelation mit der relativen Beleuchtungsstärke ergaben.

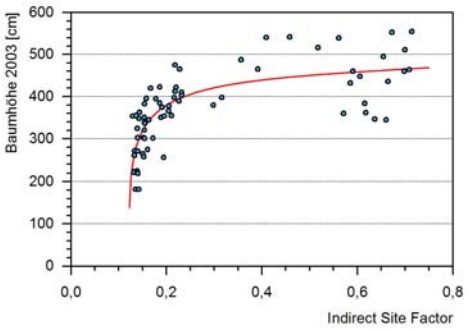


Abb. 4.2. Höhe der Buchen im Jahr 2003 in Korrelation mit dem Lichtgenuss (ISF S5).

$$f(x) = 243 + 121 \cdot x + 70 \cdot \ln(x - 0.12) + 353 \cdot e^{-x}$$

$R_S = 0.767$
$R = 0.762$ $r^2 = 0.581$
$df = 67$ $p \leq 0.00001$

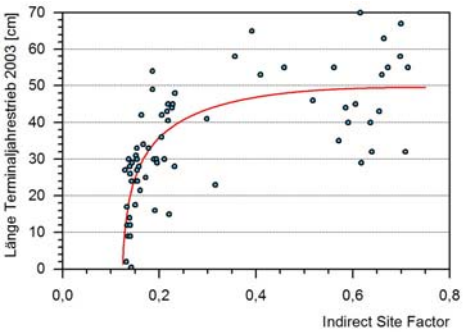


Abb. 4.3. Längenzuwachs des Terminaltriebes im Jahr 2003 in Abhängigkeit vom ISF S5.

$$f(x) = 66 - 18 \cdot x + 12.3 \cdot \ln(x - 0.12) + 5.5 \cdot e^{-x}$$

$R_S = 0.746$
$R = 0.746$ $r^2 = 0.556$
$df = 67$ $p \leq 0.00001$

Die Beziehung zwischen dem Durchmesserwachstum und dem ISF kann mit einer vergleichbaren Sättigungskurve dargestellt werden. Insbesondere beim Wurzelhalsdurchmesser (WHD) ergibt sich zusammen mit den 20 zusätzlichen geschätzten Werten (vgl. Kapitel 3.3.1.) ein deutlicher Zusammenhang mit dem Lichtgenuss (R_S = 0,854, R = 0,805, r^2 = 0,647). Eine ähnlich enge Korrelation besteht auch zwischen Brusthöhendurchmesser (BHD) und ISF (R_S = 0,82). Die gewählte Regressionskurve entspricht in ihrem Erscheinungsbild gleichfalls dem bereits beschriebenen Kurvenverlauf und bietet sogar einen größeren Anteil an erklärter Varianz (R = 0,872, r^2 = 0,76). Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass im Lichtbereich zwischen ISF 0,3-0,7 für den BHD keine Daten für die 20 nachträglich erfassten Bäume vorliegen und der Datenpool somit nur 50 Werte umfasst. Der BHD betrug dabei zwischen 8 mm und 48,5 mm, und in

10 cm Höhe erreichten die Stämme Dimensionen zwischen minimal 17,5 mm und maximal 67,5 mm.

Die Analyse der Stammovalität ergab keinerlei signifikante Korrelation mit dem ISF (R_S = 0,100 n.s.). Zu einem ähnlich unbefriedigenden Ergebnis (R_S = 0,257 n.s.) kam die Regression der Länge des höchsten Internodiums mit dem Lichtwert, gemessen an der Baumspitze (ISF S5). Da nur sechs Buchen mehr als eine Terminalknospe aufwiesen, wurde auch auf eine weitere Analyse der Anzahl dieser Knospen verzichtet.

Mit der Betrachtung der Quotienten aus Höhe und Durchmesser, den h/d-Werten, in Abhängigkeit von der Lichtintensität kommt man bereits zu den Ergebnissen der ersten Qualitätsparameter.

4.1.3. Qualitätsparameter

Anders als bei den Wachstumskurven zeigt die Regressionsfunktion zwischen den h/d-Werten und der relativen Beleuchtungsstärke (ISF) den eindeutigen Verlauf einer fallenden Exponentialfunktion. Ähnlich wie bei dem Quotienten aus Höhe und BHD (siehe Abb. 4.4) ergibt auch die Verwendung des WHD eine ähnlich enge Korrelation (R_S = -0,722; R = 0,727; r^2 = 0,528).

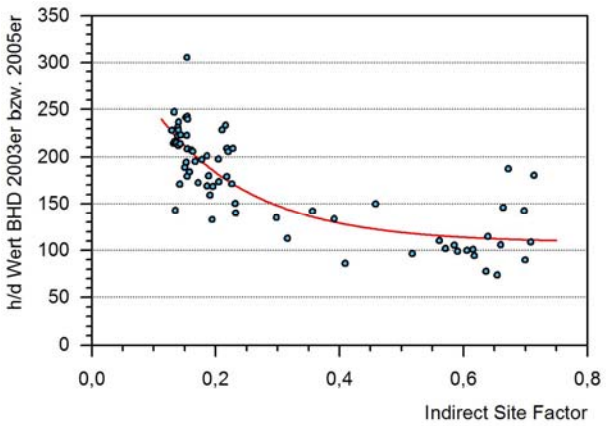


Abb. 4.4. Korrelation zwischen h/d-Wert und der relativen Beleuchtungsstärke (ISF S5). Der Quotient wurde aus den 2003 bzw. 2005 gemessenen Höhen und BHD-Werten berechnet.

$$f(x) = 108 + e^{-6.4 \cdot (x - 0.88)}$$

R_S = -0.763 R = 0.816 r^2 = 0.666 df = 69 $p \leq 0.00001$

Auf eine weitergehende Analyse des Längen-Höhen-Verhältnisses (Neigung des Baumes) wurde bewusst verzichtet, da der Quotient aus beiden Größen nur

bei sechs Bäumen den Wert von 1,05 überstieg. Dabei erreichte er maximal den Wert 1,47. Für alle sechs Bäume wurde ein Lichtwert (ISF S5) < 14,2 % ermittelt. Auch das Ergebnis der Klassifizierung in die drei Stammformen konnte nicht mit dem Licht-*Input* in Zusammenhang gebracht werden. Beim Zylinderradius von 15 cm wurden fast alle Stämme als „gerade" erfasst und für den Zylinderradius von 7,5 cm ergab die Korrelation mit dem ISF S5 nur $R_S = 0{,}18$ und war damit nicht signifikant.

Ein deutlicherer Zusammenhang konnte dagegen für die Funktion der Neigung des Terminaltriebes über den ISF festgestellt werden. Die Regressionsanalyse ergibt eine Kurve mit einem eindeutigen mathematischen Extremwert, einem Minimum (Abb. 4.5). Das heißt, dass die Neigung des letztjährigen Jahrestriebes unter sehr niedrigen Lichtbedingungen ein nahezu horizontales Wachstum aufweist (Maximalwert von 80°) und der Kurvenverlauf bei einem ISF-Wert von ca. 0,3 sein Minimum passiert. Der höchste Wert in diesem Lichtbereich liegt bei 10°. Bei höheren Lichtwerten streuen die Werte wieder über einen größeren Wertebereich; das Maximum liegt hier bei 35°.

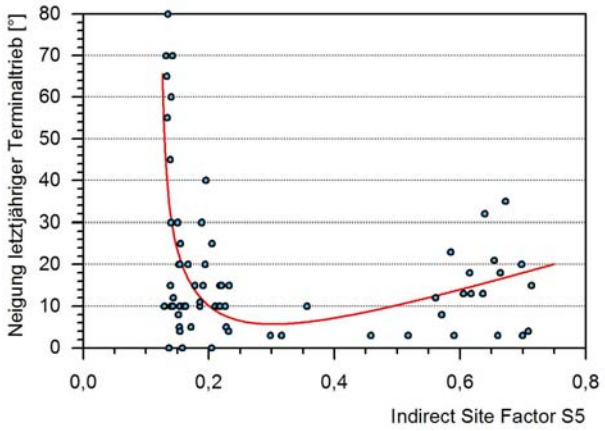


Abb. 4.5. Die Regression zwischen dem Neigungswinkel des letztjährigen terminalen Jahrestriebes und der relativen Beleuchtungsstärke (ISF) ergibt eine Extremwertfunktion mit einem Minimum bei ISF = 0,3.

$$f(x) = -15 + 45 \cdot x + \frac{0.27}{x - 0.12} + \frac{0.51}{x^2}$$

$R_{S1} = -0.398$ $R_{S2} = 0.425$ $R = 0.536$ $r^2 = 0.287$ $df = 68$ $p = 0.00003$

Auch wenn sich mit knapp 30 % nur ein vergleichsweise geringer Anteil der Varianz durch die gewählte Regressionsfunktion erklären lässt, ist doch die Signifikanz des Zusammenhanges eindeutig gegeben.

Ähnlich verhält es sich mit der Regressionsanalyse der Astanzahl in den unteren drei Straten in Korrelation mit dem Lichtgenuss des Baumes. Dicke Äste, also Äste deren Durchmesser mindestens die Hälfte des Stammdurchmessers am Astansatz erreichten, kamen im untersten Stratum zwar an keinem der Bäume vor. Im Mittel über alle drei Straten traten sie an Bäumen mit niedriger und hoher Beleuchtungsintensität aber häufiger auf als im mittleren Bereich der ISF-Skala (Abb. 4.6). Unter niedrigen Lichtbedingungen waren die Äste zwar dünner, aber der Stammdurchmesser nahm gleichfalls ab, so dass der relative Astdurchmesser ähnlich hohe Werte ergab wie bei den starken Ästen, die im Bereich des Femelloches auftraten. Die geringste Häufigkeit an dicken Ästen konnte bei einem ISF-Wert von etwa 0,4 festgestellt werden. Als Bezugswert diente hierbei der an der Baumspitze gemessene Lichtwert ISF S5.

Für die Häufigkeit von Ästen bei Bäumen im helleren Bereich der Probefläche konnte kein gesicherter Zusammenhang festgestellt werden. R_{S2} ist mit 0,09 nicht signifikant.

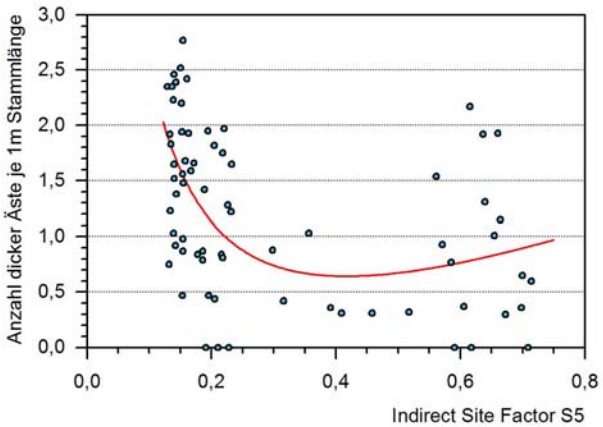


Abb. 4.6. Korrelation zwischen der Anzahl an dicken Ästen (Astdurchmesser ≥ halber Stammdurchmesser am Astansatz) und dem ISF S5. Die Anzahl der Äste wurde nur in den unteren drei Straten der Buchen erfasst und dann auf die Stammlänge von 1 m normiert.

$$f(x) = -1.3 + 2.28 \cdot x + \frac{0.43}{x} - \frac{0.007}{x^2}$$

R_{S1} = -0,505 R_{S2} = 0,09 n.s. r = 0.5312 r^2 = 0,282 df = 70 p = 0.00003

Die Regression der Astanzahl mit dem Lichtwert der Kronenschicht S3, also direkt oberhalb der drei Schichten gemessen, aus denen die Astanzahl stammt, ergab zwar ebenfalls einen signifikanten, aber doch nur sehr schwachen Zusammenhang (R_S = -0,348).

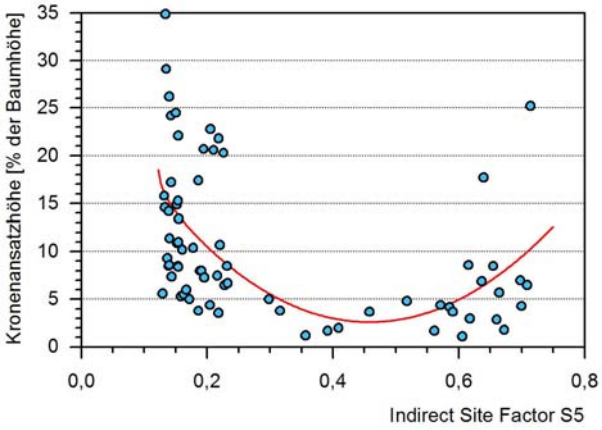


Abb. 4.7. Regression der Ansatzhöhe des ersten lebenden Astes zur relativen Beleuchtungsstärke (ISF S5). Die Astansatzhöhe ist als Prozentwert der gesamten Baumhöhe angegeben.

$$f(x) = 27 - 107 \cdot x + 117 \cdot x^2 \frac{0.02}{x - 0.115}$$

$R_{S1} = -0.512$ $R_{S2} = 0.506$ $R = 0.530$ $r^2 = 0.281$ $df = 70$ $p = 0.00003$

Einen ähnlichen Regressionsverlauf wie bei der Astanzahl ergab auch die Analyse der Ansatzhöhe des ersten lebenden Astes (Abb. 4.7). Um den unterschiedlichen Baumgrößen gerecht zu werden, wurde dieser Wert als relative Ansatzhöhe zur gesamten Baumhöhe wiedergegeben. Auch hier sind im niedrigen und hohen Lichtbereich größere Werte festzustellen als im mittleren Lichtbereich. Die Regressionskurve weist ebenfalls ein Minimum auf, das etwas über ISF = 0,4 liegt.

Um einen eventuellen unterschiedlichen Einfluss des seitlich bzw. vertikal einfallenden Lichtes zu erfassen, wurde die *gap fraction* aus dem *Fisheye*-Foto, aufgenommen in der Kronenmitte, vertikal aufgeteilt. Die Korrelation der Anzahl an dicken Ästen mit der horizontalen *gap fraction* ergab $R_S = 0{,}505$. Der Zusammenhang mit der *gap fraction* im Zenit-Bereich ergab dagegen nur einen Korrelationskoeffizienten von $R_S = 0{,}319$. Bei der Analyse des relativen Astdurchmessers (Astdurchmesser/Stammdurchmesser am Astansatz) konnte jedoch in Relation zur *gap fraction* aus beiden Bereichen kein signifikanter Zusammenhang festgestellt werden.

Ebenfalls keine Präferenz konnte bei der Analyse der Astwuchsrichtung ermittelt werden. Auch die Verschneidung dieser Daten mit der potentiellen Einfallsrichtung des Lichtes (Aufteilung der *gap fraction* nach Richtungssektoren) ergab keine Zusammenhänge (vgl. Abb. 4.8 und 4.9).

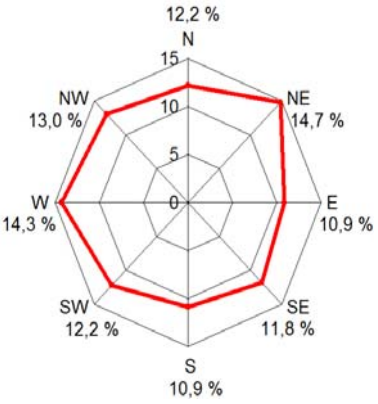


Abb. 4.8. Prozentualer Anteil von Ästen mit bestimmter Wuchsrichtung (Azimut vom Astansatz zur Astspitze). Es wurden die jeweils längsten Äste je Stratum erfasst (S1-S4). Insgesamt wurde von 238 Ästen eine eindeutige Wuchsrichtung ermittelt. Der Anteil der verschiedenen Himmelsrichtungen liegt einheitlich zwischen 10 % und 15 %. Es konnte keine präferierte Wachstumsrichtung festgestellt werden.

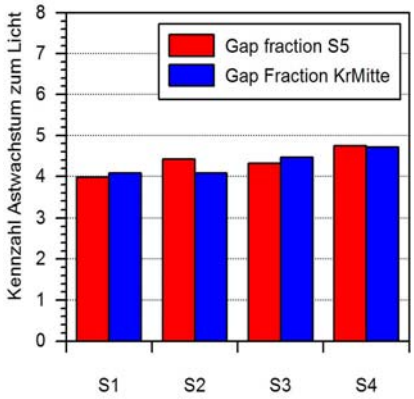


Abb. 4.9. Wuchsrichtung der Äste im Vergleich mit der Richtung des Lichteinfalls. Für diese Darstellung wurde die Richtung des Astwachstums mit der nach Richtungssektoren aufgeteilten *gap fraction* aus den *Fisheye*-Fotos, aufgenommen an der Baumspitze (S5) bzw. in der Kronenmitte, verglichen. Wuchs ein Ast in Richtung des Sektors mit der höchsten *gap fraction*, erhielt er die Kennziffer 1, beim Sektor mit der zweithöchsten *gap fraction* wurde die Kennziffer 2 vergeben, usw.. Die Kennziffer 8 symbolisiert schließlich das Wachstum eines Astes in Richtung des Sektors mit der geringsten *gap fraction*. Die stratenweise bestimmten Mittelwerte der Kennzahlen lagen einheitlich im mittleren Bereich zwischen 4 und 5. Somit konnte auch im Vergleich zur potentiellen Lichteinfallsrichtung keine bevorzugte Wuchsrichtung der Äste festgestellt werden.

Keine Signifikanz ergab auch die Korrelation zwischen den Astabgangswinkeln und den Lichtwerten für den gesamten Baum (ISF S5) bzw. für die entsprechenden Straten, aus denen die Winkeldaten stammen (ISF S1, S2, S3, S1-3). Auch die Analyse der relativen Astdurchmesser führte zu keinerlei Signifikanz.

Die absoluten Astdurchmesserwerte (Mittelwert der jeweils stärksten Äste aus S2 und S3) sind dagegen sehr eng mit dem Lichtgenuss des gesamten Baumes korreliert (Abb. 4.10). Die Regressionsanalyse führt zu einer vergleichbaren Wachstumskurve, wie sie bereits aus Kapitel 4.1.2. bekannt sind.

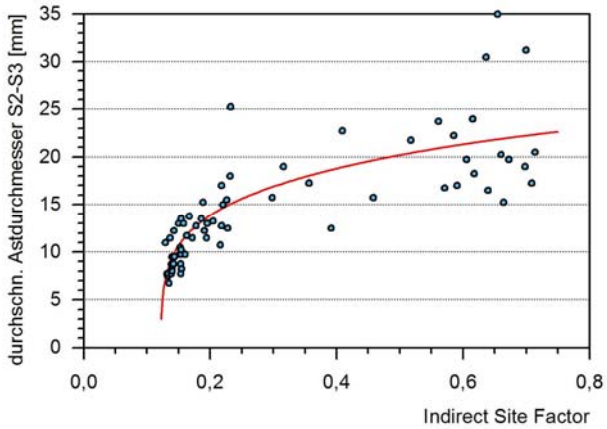


Abb. 4.10. Astdurchmesser des stärksten Astes aus S2 und S3 (gemittelt) in Abhängigkeit vom Lichtgenuss (ISF S5).

$$f(x) = 34 - 4 \cdot x + 2.8 \cdot \ln(x - 0.12) - 15 \cdot e^{-x}$$

$R_S = 0.881$ $R = 0.811$ $r^2 = 0.657$ $df = 68$ $p \leq 0.00001$

4.1.4. Kronen- und Wurzelbiomasse

Sowohl die oberirdischen als auch die unterirdischen Holz-Biomassen sind eng mit dem Wurzelhalsdurchmesser (WHD) korreliert, der beide Pflanzenteile miteinander verbindet (Abb. 4.11). Die Korrelation hat bei beiden Maßen einen leicht parabolischen steigenden Verlauf.

Tabelle 4.1. Zusammenfassung der deskriptiven Statistik der Biomasse-Variablen. Die Korrelation der einzelnen Werte mit der relativen Beleuchtungsstärke (ISF S5) und den Wachstumskennwerten Höhe und Stammdurchmesser ist mit dem Spearman'schen Korrelationskoeffizienten (R_S) angegeben. Signifikante Korrelationen ab $p < 0,05$ sind rot markiert. Die Zuwachswerte bezeichnen den jährlichen Zuwachs, ermittelt aus der Schätzung des Biomassevolumens für die Jahre 2002 und 2003. (Abkürzungen: Biom. – Biomasse, Feinw.Biom. – Feinwurzel-Biomasse)

	Anzahl	Mittel-wert	Min.	Max.	Std.-abw.	Rs zu ISF S5	Rs zu Höhe	Rs zu BHD	Rs zu WHD
Biom. Wurzel [g]	44	481,4	72,8	1988,3	464,4	0,876	0,894	0,956	0,964
Biom. Feinwurzel [g]	44	45,6	5,7	237,9	58,2	0,850	0,795	0,846	0,869
Anteil Feinw.Biom. [%]	44	0,1	0,0	0,2	0,0	0,099	-0,049	-0,080	-0,046
Biom. Krone [g]	50	1433,1	199,7	5127,9	1236,9	0,835	0,893	0,976	0,978
Biom. Krone/Wurzel	44	3,5	2,2	5,2	0,7	-0,357	-0,176	-0,153	-0,195
Zuwachs Krone [g]	50	300,9	-1,0	1284,2	309,6	0,827	0,872	0,954	0,965
Zuwachs Wurzel [g]	44	78,7	2,9	298,2	72,6	0,751	0,710	0,877	0,924

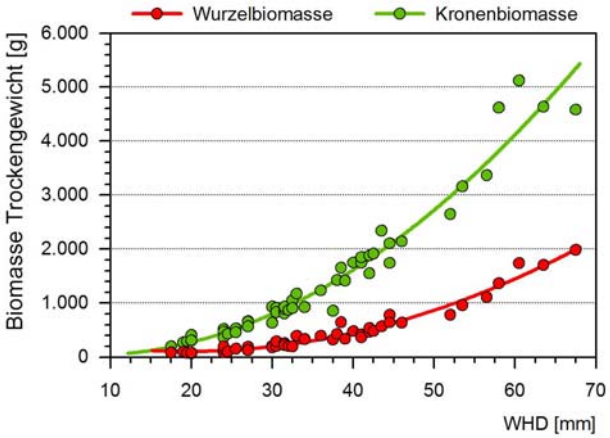


Abb. 4.11. Die Regression der Kronen- bzw. Wurzelbiomasse über den WHD ergibt eine leicht parabolische Abhängigkeit.

Krone: $f(x) = 97 - 20 \cdot x + 1.45 \cdot x^2$

R = 0.979 r^2 = 0.958 df = 50 $p \leq 0.00001$

Wurzel: $f(x) = 418 - 32 \cdot x + 0.82 \cdot x^2$

R = 0.984 r^2 = 0.967 df = 44 $p \leq 0.00001$

Da die vorhandene Biomasse das unmittelbarste Ergebnis des Wachstumsprozesses einer Pflanze ist, überrascht es nicht, dass eine enge Korrelation mit den bereits untersuchten Wachstumsgrößen (Baumhöhe, Durchmesser, etc.) vorhanden ist (vgl. Spearman-Korrelationskoeffizienten in Tabelle 4.1). Auch die Korrelation der verschiedenen Biomassegrößen mit dem Lichtgenuss der einzelnen Pflanze ergibt somit erwartungsgemäß einen signifikanten Zusammenhang. Die Regression wird jedoch durch das Fehlen der Daten der 20 Bäume aus dem mittleren Lichtspektrum erschwert (Abb. 4.12 und 4.13).

Signifikant, wenn auch nicht sehr stark, ist auch die Abnahme der anteiligen Astbiomasse mit zunehmendem Licht (Abb. 4.14). Der genaue Verlauf der Regressionskurve im mittleren Lichtbereich ist auch hier infolge fehlender Daten nur schwer abzuschätzen.

Aufgrund des sehr engen linearen Zusammenhanges der gemessenen Biomassemenge (Trockengewicht) mit dem über die Formel d^2*h bzw. d^2*WT_{max} (maximale Wurzeltiefe) geschätzten ober- und unterirdischen Biomassevolumens (vgl. Kapitel 3.4. und Abb. 4.15-16) wurde der Biomassezuwachs aus den geschätzten Biomassegrößen für 2002 und 2003 abgeleitet. Der unterirdische Biomassezuwachs beschränkt sich dabei allerdings auf die Zunahme des Durchmessers, da die Differenz in der maximalen Wurzeltiefe nicht bestimmt werden konnte. Die graphische Darstellung des ermittelten Biomassezuwachses und dessen Gegenüberstellung zum ISF S5 ergibt ein vergleichbares Bild wie die Dar-

stellung der Biomasse (Abb. 4.12). Auch die Problematik der fehlenden Daten für eine aussagekräftige Regression ist vergleichbar. Die deskriptive Statistik für die Zuwachswerte ist Tabelle 4.1 zu entnehmen.

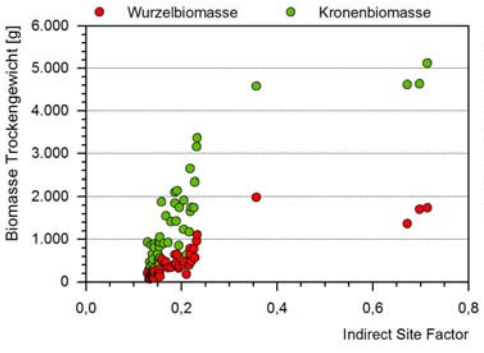


Abb. 4.12. Die Regression der Kronen- bzw. Wurzelbiomasse über den ISF wird durch das Fehlen der Daten aus dem mittleren ISF-Spektrum sehr erschwert. Ein Regressionsverlauf wie bei den Wachstumsgrößen aus Kapitel 4.1.1. liegt nahe, konnte mit dem gewählten Modell jedoch nicht dargestellt werden.

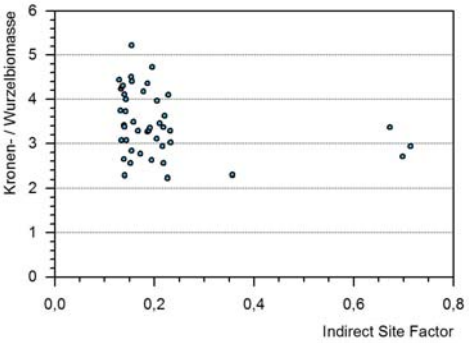


Abb. 4.13. Die Regression für die Abhängigkeit des Quotienten aus Kronen- und Wurzelbiomasse vom Licht (ISF S5) erweist sich gleichfalls durch die fehlenden Daten als sehr schwierig. Der Korrelationskoeffizient (R_S = -0,357) verweist auf einen signifikanten fallenden Zusammenhang (vgl. Modell aus Abb. 4.4). Die Anordnung der Datenpunkte könnte gleichfalls auf eine Extremwertfunktion (vgl. Modell aus Abb. 4.5) hindeuten.

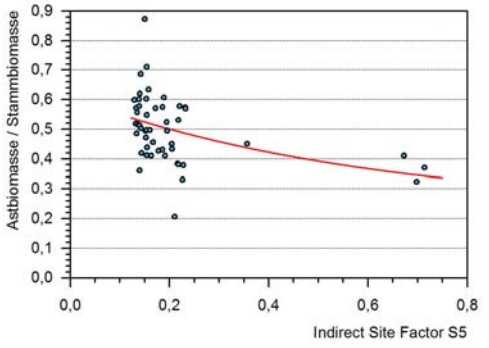


Abb. 4.14. Der Quotient aus Astbiomasse und Stammbiomasse sinkt mit zunehmender Strahlungsintensität. Bei starker Überschirmung wird demnach anteilig mehr Astbiomasse produziert als unter lichten Wuchsbedingungen.

$$f(x) = 0.23 + e^{-1.7\cdot(x+0.6)}$$

R_S = -0.359
R = 0.400 r^2 = 0.161
df = 50 p = 0.0035

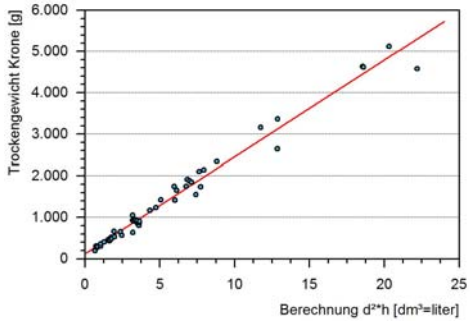


Abb. 4.15. Sehr enge Korrelation zwischen der gemessenen und der über die Formel d^2*h geschätzten oberirdischen Biomasse.

$$f(x) = 119 + 233.6 \cdot x$$

R = 0.989 r^2 = 0.979
df = 50 p ≤ 0.00001

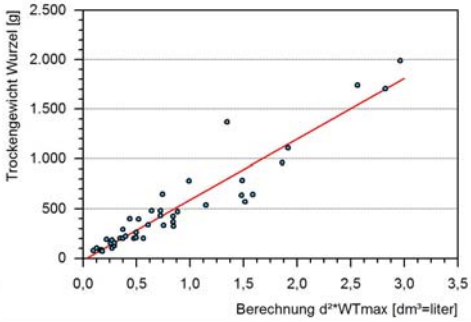


Abb. 4.16. Auch die unterirdische Biomasse lässt sich auf ähnliche Weise schätzen. Statt der Höhe wurde jedoch die max. Wurzeltiefe zur Berechnung genutzt.

$$f(x) = -21 + 609.8 \cdot x$$

R = 0.946 r^2 = 0.896
df = 44 p ≤ 0.00001

4.1.5. Kronen- und Wurzelraumvolumen

Der Vergleich der nach den beiden verschiedenen Methoden ermittelten Kronenvolumina zeigt eine sehr enge Korrelation (Abb. 4.17). Es wurde jedoch deutlich, dass das Volumen mit dem 2-Körper-Modell stets überschätzt wurde. Der von den Buchenkronen eingenommene Raum umfasste nach dem mit deutlich intensiveren Messungen verbundenen Straten-Model ein Spektrum zwischen 0,5 m³ und 7 m³. Die Überschätzung des 2-Körper-Modells ergab 1,3- bis 4,8-mal so hohe Werte und betrug im Durchschnitt das 2,9fache. Dabei konnte keinerlei Einfluss der Baumhöhe, der Höhe des größten Kronendurchmessers (Verhältnis zwischen Licht- und Schattenkrone) oder des Lichtwertes auf den Grad der Überschätzung festgestellt werden. Aufgrund der Überschätzung wurde im weiteren Verlauf auf die Verwendung der Ergebnisse aus dem 2-Körper-Modell verzichtet und es kamen ausschließlich die Daten des Stratenmodells zur Anwendung.

Das Kronen- und auch das Wurzelraumvolumen sind wie schon die Biomassewerte eng mit dem Wurzelhalsdurchmesser korreliert (Abb. 4.18). Die Regression hat bei beiden Maßen einen fast linearen, aber doch leicht parabolisch steigenden Verlauf.

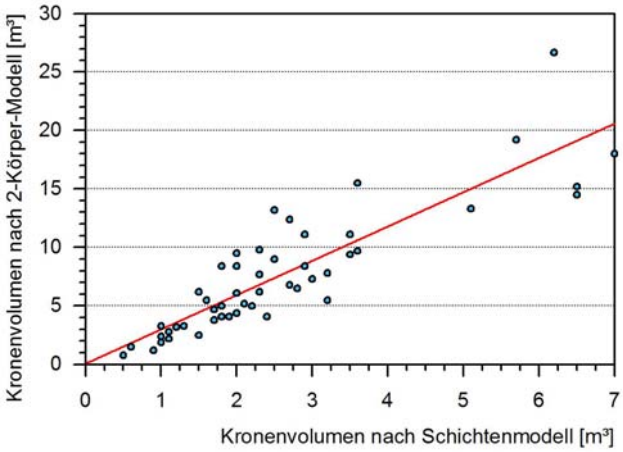


Abb. 4.17. Die Korrelation der beiden angewandten Modelle für die Schätzung des eingenommenen Kronenvolumens ergab für das 2-Körper-Modell im Durchschnitt 2,9fach höhere Werte als das Schichtenmodell, dem deutlich intensivere Messungen zugrunde liegen.

$$f(x) = 0.063 + 2.93 \cdot x$$

$R_S = 0.895$ $R = 0.878$ $r^2 = 0.771$ $df = 48$ $p \leq 0.00001$

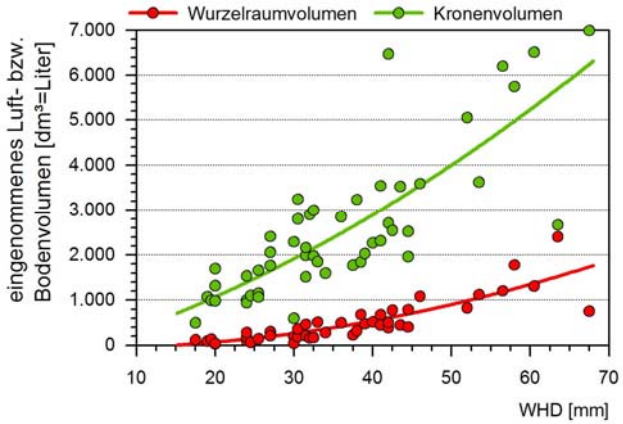


Abb. 4.18. Die Regression des „eroberten" Boden- bzw. Luftraumes über den WHD ergibt eine leicht parabolische Abhängigkeit.

Krone:

$$f(x) = -228 + 52 \cdot x + 0.65 \cdot x^2$$

$R = 0.81$ $r^2 = 0.656$ $df = 50$ $p \leq 0.00001$

Wurzel:

$$f(x) = -68.4 - 1.6 \cdot x + 0.42 \cdot x^2$$

$R = 0.851$ $r^2 = 0.724$ $df = 44$ $p \leq 0.00001$

Da bereits für den WHD eine Abhängigkeit von der Intensität des Lichtgenusses des jeweiligen Baumes nachgewiesen werden konnte, überrascht es nicht, auch für die dimensionsabhängigen Variablen Kronen- bzw. Wurzelraumvolumen, Kronenprojektionsfläche und die maximale Wurzeltiefe bzw. Wurzellänge einen entsprechenden Zusammenhang zu finden (siehe Korrelationskoeffizient R_S in Tabelle 4.2).

Tabelle 4.2. Zusammenfassung der deskriptiven Statistik der Variablen zum Kronen- bzw. Wurzelraumvolumen. Die Korrelation der einzelnen Werte mit der relativen Beleuchtungsstärke (ISF S5) und den Wachstumskennwerten Höhe und Stammdurchmesser ist mit dem Spearman'schen Korrelationskoeffizienten (R_S) angegeben. Signifikante Korrelationen ab $p < 0,05$ sind rot markiert. Gelb hinterlegte Felder verweisen auf eine nicht monotone Beziehung zwischen den Daten, so dass R_S in diesem Fall keine Aussage über die Stärke des Zusammenhanges wiedergibt. (Abkürzungen: vertVolSchw – vertikaler Volumenschwerpunkt; Vol. – Volumen, proj.fläche - Projektionsfläche)

	An-zahl	Mittel-wert	Min.	Max.	Std.-abw.	Rs zu ISF S5	Rs zu Höhe	Rs zu BHD	Rs zu WHD
vertVolSchw [%Höhe]	50	55,1%	40,1%	80,7%	9,0%	-0,342	-0,433	-0,443	-0,483
Vol. Baumkrone [dm³]	50	2.543,3	497,6	6.995,7	1.582,5	0,574	0,765	0,832	0,811
Vol. Wurzelsystem [dm³]	44	499,3	33,8	2.403,5	483,4	0,825	0,859	0,908	0,894
max. Wurzeltiefe [cm]	44	49,9	25,0	80,0	13,3	0,394	0,401	0,546	0,572
max. Wurzellänge [cm]	43	131,6	60,0	240,0	49,9	0,633	0,757	0,806	0,789
Kronenproj.fläche [m²]	50	1,6	0,4	3,7	0,7	0,286	0,334	0,477	0,519

Unter Annahme eines vergleichbaren Regressionsmodells, wie es bereits bei den Wachstumsgrößen im ersten Unterkapitel der Ergebnisdarstellung bei der Abhängigkeit von der relativen Beleuchtungsstärke angewandt wurde, lassen sich auch für die nun betrachteten Variablen ausreichend hohe Bestimmtheitsmaße erreichen. Dennoch bleibt dieser Ansatz statistisch fragwürdig, da die Daten der 20 zusätzlichen Bäume des mittleren und hohen ISF-Spektrums mir hierfür nicht vorliegen. Somit ist keine vergleichbare kontinuierliche Betrachtung des gesamten ISF-Spektrums möglich.

In Abb. 4.19 wurde dennoch die Relation zwischen Wurzelraumvolumen und ISF sowie die angenommene Regressionsfunktion beispielhaft wiedergegeben. Auf die Darstellung der weiteren in diesem Unterkapitel betrachteten Wachstumsgrößen wird hier verzichtet und stattdessen auf die statistischen Kennwerte in Tabelle 4.2 verwiesen.

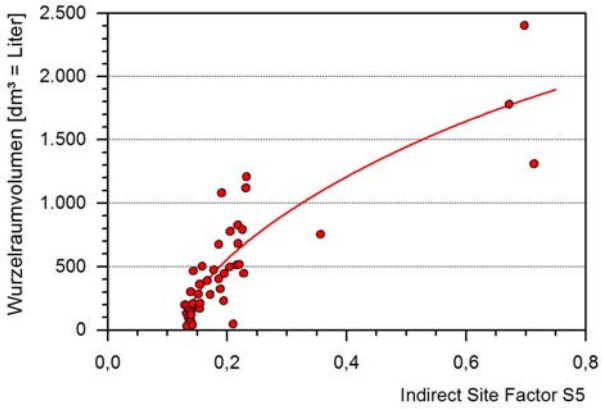


Abb. 4.19. Regression des von dem jeweiligen Untersuchungsbaum durchwurzelten Bodenvolumens mit der relativen Beleuchtungsstärke (ISF S5).

$$f(x) = 4425 - 696 \cdot x + 143 \cdot \ln(x - 0.12) - 4112 \cdot e^{-x}$$

$R_S = 0.825$ $R = 0.87$ $r^2 = 0.757$ $df = 43$ $p \leq 0.00001$

Stellt man die Daten des ermittelten Kronenraumvolumens denen des durch die Wurzeln eingenommenen Bodenvolumens gegenüber, so erhält man eine Markerverteilung, wie sie in Abb. 4.20 dargestellt ist. Die Regression mittels einer Sättigungskurve erscheint in diesem Zusammenhang fragwürdig und wurde einzig

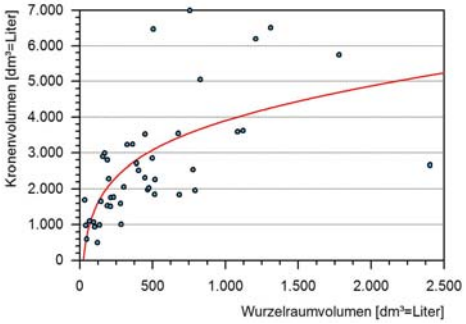


Abb. 4.20. Regression des eingenommenen Kronenvolumens mit dem durch die Wurzeln eroberten Bodenvolumen.

$$f(x) = -3089 + 0.3 \cdot x + 968 \cdot \ln(x) + e^{-x}$$

$R_S = 0.728$
$R = 0.659$ $r^2 = 0.435$
$df = 44$ $p = 0.00001$

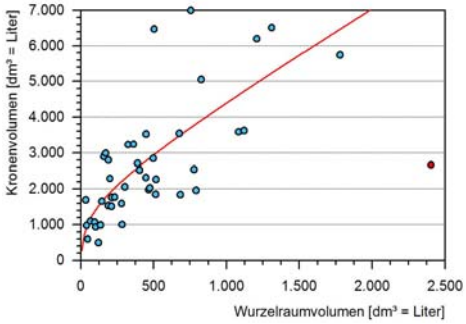


Abb. 4.21. Entsprechend Abb. 4.20. jedoch mit der Definition eines Messpunktes (rot) als Ausreißer.

$$f(x) = -497 + 2.4 \cdot x + 360 \cdot \ln(x) + e^{-x}$$

$R_S = 0.746$
$R = 0.741$ $r^2 = 0.549$
$df = 43$ $p \leq 0.00001$

und alleine aus dem Grunde des höheren Bestimmtheitsmaßes ($r^2 = 0{,}435$) im Vergleich zur erwarteten linearen Regression ($r^2 = 0{,}340$) gewählt. Definiert man den Messpunkt mit dem ermittelten Wurzelraumvolumen von 2.412 dm³ jedoch als Ausreißer und vernachlässigt ihn beim fitting-Prozess, so nimmt das gewählte Funktionsmodell einen nahezu linearen Verlauf an (Abb. 4.21) und der Anteil an erklärter Varianz steigt auf $r^2 = 0{,}549$. Die rein lineare Regression führt nun zu einem vergleichbaren Bestimmtheitsmaß ($r^2 = 0{,}539$), die Funktion schneidet die y-Achse jedoch nach wie vor deutlich über dem Nullpunkt, was in diesem Zusammenhang nicht als logisch angesehen werden kann.

Die fehlenden Daten im ISF-Bereich zwischen 0,3 und 0,7 erschweren gleichfalls die Regressionsanalyse für die vertikale Verteilung des Kronenvolumens bei variierendem Lichteinfall. Die Verknüpfung der Höhe des vertikalen (Kronen-) Volumenschwerpunktes mit dem ISF ergab zwar einen signifikanten Korrelationskoeffizienten ($R_S = -0{,}416$ für den ersten, den fallenden Teil des Zusammenhanges). Das in Abb. 4.22 in Anlehnung an die Qualitätsparameter gewählte Regressionsmodell (Extremwertfunktion) muss jedoch gleichfalls als sehr gewagte Hypothese angesehen werden.

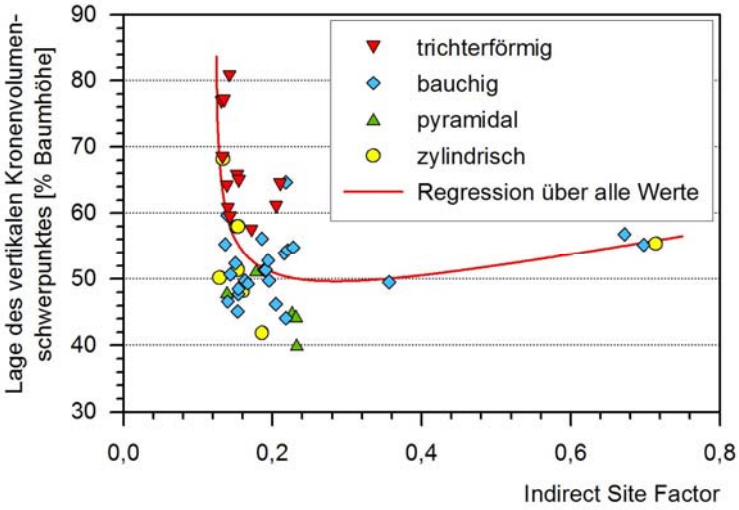


Abb. 4.22. Vertikale Verteilung des Kronenvolumens in Abhängigkeit vom Lichtgenuss anhand der Lage des vertikalen Volumenschwerpunktes. Die unterschiedlichen Formen der Marker symbolisieren dabei die verschiedenen Kronenformen.

$$f(x) = 41 + 20 \cdot x + \frac{0.12}{x - 0.12} - \frac{0.18}{x^2}$$

$R_{S1} = -0.416$ R = 0.463 $r^2 = 0.215$ df = 50 p = 0.00084

Der vertikale Volumenschwerpunkt der untersuchten Bäume liegt bei 40-81 % der Baumhöhe. Definitionsbedingt kann er bei Bäumen mit einer trichterförmigen Krone in höheren Kronenbereichen (60-80 % der Baumhöhe) ausgemacht werden. Bei Bäumen mit einer pyramidalen Kronenform befindet er sich eher im unteren Teil der Krone (40-50 % der Baumhöhe). Bei zylindrischen oder bauchigen Kronenformen liegt der vertikale Schwerpunkt hingegen im Bereich zwischen 40 und 70 % der Baumhöhe.

Trichterförmige Kronen, also Bäume, deren größter Kronendurchmesser in der obersten Kronenschicht (S5) liegt (vgl. Abb. 4.23), kommen ausschließlich nur bei einem ISF von unter 0,15 vor. Diese Information bestätigt auch die Erkenntnisse aus Abb. 4.5 auf Seite 64. Dass die größte Kronenausdehnung an der Baumspitze vorkommt, ist in der Regel gleichbedeutend mit einem hohen Neigungswinkel der Terminaltriebe.

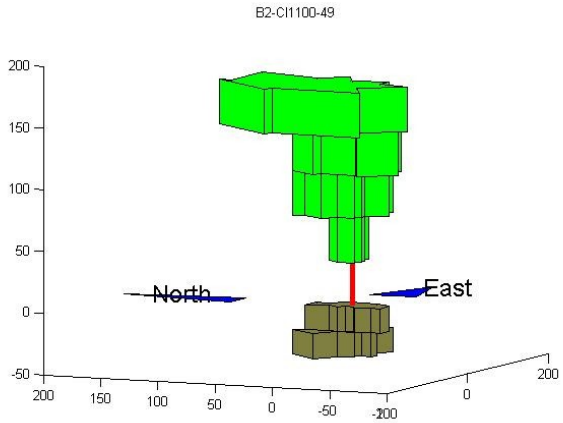


Abb. 4.23. Buche Nr. 49 ist ein Beispiel für das Wachstum unter Lichtbedingungen von weniger als 0,15 ISF S5. Aufgrund des geringen Strahlungsgenusses erreicht dieser Baum nur eine Höhe von 182 cm. Der größte Kronendurchmesser befindet sich in der obersten Kronenschicht, was durch die starke Neigung des Terminaltriebes bedingt ist (horizontales Wachstum). Die intraspezifische Konkurrenzsituation dieser Buche bewegt sich auf einem mittleren Level ($Hegyi_{49}$=1,79).

Stellt man die Lage des vertikalen Volumenschwerpunktes der Größe der Bäume gegenüber (in Abb. 4.24 repräsentiert durch den WHD), so wird deutlich, dass bei geringer dimensionierten Bäumen die Krone deutlich in Richtung Baumspitze verlagert ist. Mit zunehmender Lichtintensität nähert sich der Schwerpunkt der Baumkrone der vertikalen Baummitte bis er sich im Mittel bei nahezu 50 % der Baumhöhe einer Asymptote nähert.

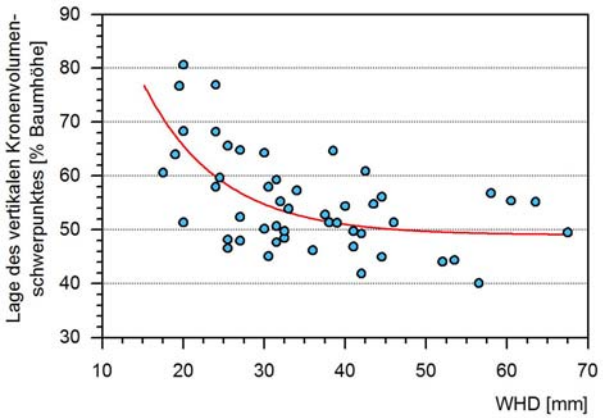


Abb. 4.24. Vertikale Verteilung des Kronenvolumens in Abhängigkeit von der Dimension des Baumes, hier dem WHD, anhand der Lage des vertikalen Volumenschwerpunktes. Mit zunehmender Größe des Baumes verlagert sich beim vorliegenden Datenpool die Krone weiter nach unten bis zur Baummitte (50 %).

$$f(x) = 49 + e^{-0.106 \cdot (x - 46.5)}$$

R_S = -0.483 R = 0.594 r^2 = 0.353 df = 49 p = 0.00004

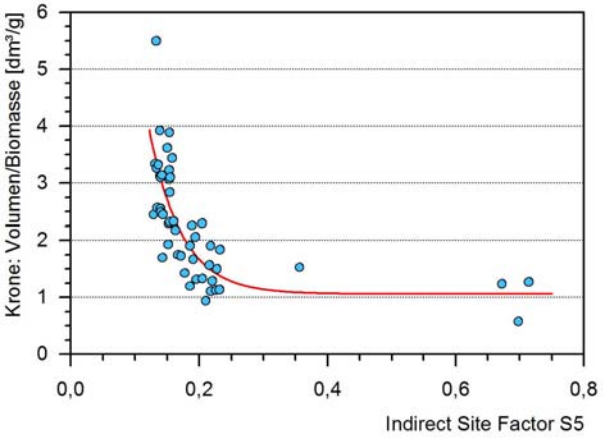


Abb. 4.25. Regression zwischen dem je eingesetzter Einheit Biomasse eingenommenem Kronenvolumen und der relativen Beleuchtungsstärke (ISF S5).

$$f(x) = 1.06 + e^{-19.88 \cdot (x - 0.18)}$$

R_S = -0.716 R = 0.774 r^2 = 0.599 df = 48 p ≤ 0.00001

Die Veränderung des Verhältnisses von eingenommenem Kronenvolumen je eingesetzter Einheit Biomasse entlang des Lichtgradienten ist in Abb. 4.25 dargestellt. Die Regressionsfunktion zeigt zunächst einen steilen Abfall, der aber bei

einem ISF von ca. 0,3 in die Sättigung (ca. 1 Liter Kronenvolumen je eingesetztem Gramm Trockensubstanz) ausläuft. Im Umkehrschluss wird deutlich, dass Bäume unter stark beschatteten Konditionen weniger Biomasse pro Einheit Kronenvolumen einsetzen. Die Kronenstruktur lockert sich auf.

4.1.6. Blattdaten und Wachstumsanalyse

Auch die Untersuchung der Blattparameter erfolgte nur für das ursprüngliche Kontingent von 50 Bäumen. Die deskriptive Statistik sowie die Korrelation mit den Lichtwerten aus den verschiedenen Kronenschichten sind in Tabelle 4.3 wiedergegeben. Bei sieben Bäumen waren im untersten Stratum S1 keine Blätter vorhanden, daher beträgt die Anzahl der Fälle für dieses Stratum nur 43. Auffallend ist, dass alle Blattparameter relativ einheitlich mit den Lichtwerten der obersten drei Kronenstraten (Lichtkrone) korrelieren. Das gilt selbst für die Blattparameter der unteren beiden Baumschichten.

Tabelle 4.3. Zusammenfassung der deskriptiven Statistik ausgewählter Blattparameter. Die Korrelation der einzelnen Variablen mit der relativen Beleuchtungsstärke der einzelnen Kronenschichten (S1-S5) ist mit dem Spearman-Rangkorrelationskoeffizienten (R_S) wiedergegeben. Signifikante Korrelationen ab $p < 0,05$ sind rot markiert. Die ersten drei Variablen stellen Summen für den gesamten Baum dar. Die übrigen Werte geben dagegen durchschnittliche Einzelblattwerte für die entsprechende Baumschicht wieder (DjeBl – Durchschnitt je Blatt).

	An-zahl	Mittel-wert	Min.	Max.	Std.-abw.	Rs zu ISF S5	Rs zu ISF S4	Rs zu ISF S3	Rs zu ISF S2	Rs zu ISF S1
Blattanzahl gesamt	50	3934	1.064	9.617	2.155	0,704	0,731	0,676	0,147	-0,055
Blattmasse gesamt [g]	50	184,8	26,1	595,2	145,3	0,865	0,863	0,796	0,193	-0,107
Blattfläche gesamt [m²]	50	5,76	1,10	15,19	3,44	0,805	0,808	0,748	0,111	-0,175
Blattfläche S1 DjeBl [cm²]	43	8,85	4,04	14,69	2,43	0,310	0,374	0,346	0,279	0,128
Blattfläche S2 DjeBl [cm²]	50	12,26	7,22	25,82	2,99	0,488	0,461	0,439	0,034	-0,198
Blattfläche S3 DjeBl [cm²]	50	14,53	7,64	24,39	3,32	0,506	0,534	0,571	0,003	-0,275
Blattfläche S4 DjeBl [cm²]	50	16,19	9,99	28,93	4,06	0,543	0,562	0,492	-0,084	-0,362
Blattfläche S5 DjeBl [cm²]	50	19,09	11,26	40,63	5,79	0,628	0,632	0,659	0,076	-0,306
Blattmasse S1 DjeBl [g]	43	0,021	0,002	0,044	0,009	0,482	0,503	0,478	0,453	0,268
Blattmasse S2 DjeBl [g]	50	0,032	0,017	0,084	0,012	0,792	0,773	0,744	0,256	0,029
Blattmasse S3 DjeBl [g]	50	0,043	0,015	0,087	0,016	0,777	0,812	0,802	0,256	-0,041
Blattmasse S4 DjeBl [g]	50	0,054	0,024	0,147	0,025	0,870	0,863	0,778	0,125	-0,186
Blattmasse S5 DjeBl [g]	50	0,073	0,028	0,233	0,042	0,852	0,853	0,839	0,218	-0,184

Die Regressionsanalysen der Blattparameter in Korrelation mit der relativen Beleuchtungsstärke ISF S5 ergeben ein vergleichbares Bild, wie die bereits vorgestellten Biomasse- oder sonstige wachstumsbeschreibende Parameter: eine zunächst rasch steigende, dann aber abflachende Regressionsfunktion. Beispielhaft ist sie für die Gesamtblattfläche der Bäume wiedergegeben (Abb. 4.26).

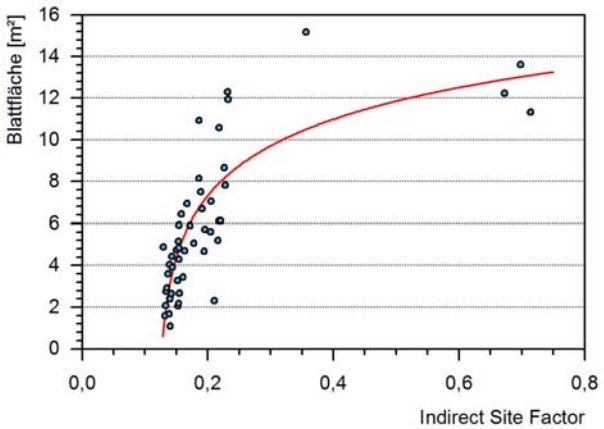


Abb. 4.26. Darstellung der Gesamtblattfläche eines Baumes in m² in Korrelation mit dem Lichtgenuss (ISF S5).

$$f(x) = 15 - 0.5 \cdot x + 3 \cdot \ln(x - 0.12)$$

$R_S = 0.805$ $R = 0.815$ $r^2 = 0.663$ $df = 50$ $p \leq 0.00001$

Ähnlich wie die Gesamtblattdaten verhalten sich auch die Einzelblattparameter im Verhältnis zum Licht. Mit zunehmendem Lichtgenuss steigen Blattfläche und Blattgewicht an. Eine besonders enge Korrelation erhält man bei der alleinigen Betrachtung der Daten aus den oberen Kronenstraten. In Abb. 4.27 ist beispielhaft der Zusammenhang zwischen dem durchschnittlichen Trockengewicht der Blätter aus dem Stratum S5 mit dem Lichtwert ISF S5 wiedergegeben. Die Zunahme von Blattfläche und Blattgewicht konnte auch bei drei Unterstichproben entlang eines Astes desselben Baumes vom Kroneninneren zur Kronenperipherie beobachtet werden.

Die Verteilung der Blattfläche auf die einzelnen Straten in Abhängigkeit vom Lichtgenuss des Baumes ist statt in graphischer Form tabellarisch wiedergegeben (Tabelle 4.4). Die Aufteilung der Lichtklassen entspricht dabei der aus Abb. 4.1 bekannten Weise. Bei der Analyse der Ergebnisse sollte beachtet werden, dass die Daten für Lichtintensitäten über ISF = 26 % für diese Analyse zu lückenhaft sind. Doch schon bei der Betrachtung des Gradienten von ISF < 14 % bis 26 % kann festgestellt werden, dass die anteilige Blattfläche an der Baumspitze (S5) von 18 % auf 2 % sinkt. Gegenläufig ist der Trend im unteren Kronenbereich. In der Schicht S2 steigt die Blattfläche von 19 % auf 31 %.

Tabelle 4.4. Prozentuale Blattflächenverteilung (% der Gesamtblattfläche) auf die einzelnen Kronenstraten entlang des nach Klassen eingeteilten Lichtgradienten (ISF S5). Abkürzung: LA – Blattfläche (*leaf area*)

ISF-Klassen	Anzahl der Fälle	Anteil LA S1	Anteil LA S2	Anteil LA S3	Anteil LA S4	Anteil LA S5
< 14 %	10	3,4%	19,3%	30,1%	28,8%	18,4%
14-17 %	17	3,1%	23,2%	35,7%	27,0%	10,9%
17-20 %	8	4,8%	29,7%	37,5%	20,6%	7,5%
20-23 %	9	3,5%	25,6%	36,7%	26,5%	7,6%
23-26 %	2	12,5%	31,4%	33,2%	21,0%	1,9%
34-37 %	1	4,7%	36,8%	35,1%	15,2%	8,2%
> 67 %	3	7,1%	19,2%	30,6%	33,3%	9,8%

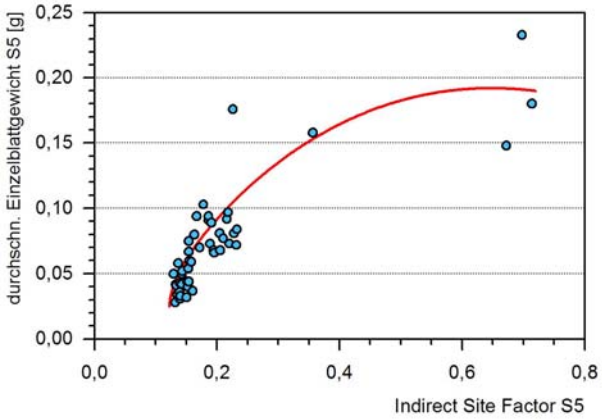


Abb. 4.27. Zusammenhang zwischen dem durchschnittlichen Einzelblatttrockengewicht des obersten Stratums S5 und dem Lichtwert ISF S5.

$$f(x) = 1.5 - 0.8 \cdot x + 0.008 \cdot \ln(x - 0.12) - 1.5 \cdot e^{-x}$$

R = 0.884 r^2 = 0.782 df = 50 $p \leq 0.00001$

Setzt man die Gesamtblattfläche eines Baumes in Bezug zur Kronenprojektionsfläche, so erhält man den Blattflächenindex (LAI - *leaf area index*). Dessen Regression mit dem Lichtwert ISF S5 ist in Abb. 4.28 dargestellt und folgt dem gleichen Modell wie die absoluten Blattflächenwerte in Abb. 4.26.

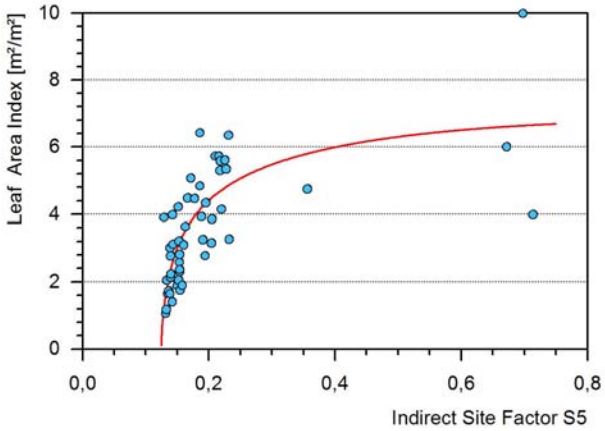


Abb. 4.28. Regression des Blattflächenindexes in m² Blattfläche je m² Kronenprojektionsfläche mit der relativen Beleuchtungsstärke ISF S5.

$$f(x) = 8.5 - 1.5 \cdot x + 1.5 \cdot \ln(x - 0.12)$$

$R_S = 0.763$ $R = 0.742$ $r^2 = 0.550$ $df = 50$ $p \leq 0.00001$

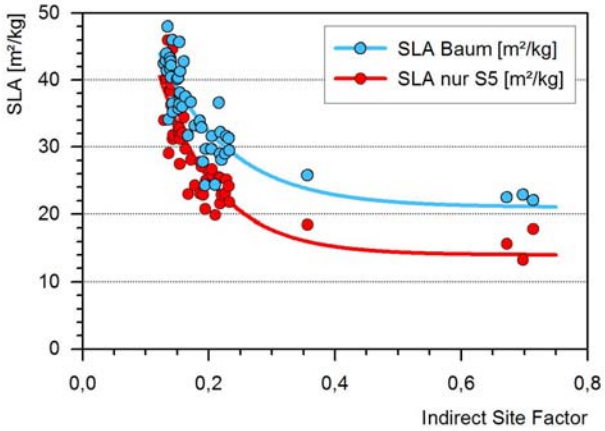


Abb. 4.29. Regression der *specific leaf area* (SLA) mit dem ISF S5. Diese Analyse erfolgte sowohl für den ganzen Baum, als auch separat nur für die oberste Kronenschicht S5.

SLA Baum: $f(x) = 21 + e^{-9 \cdot (x - 0.47)}$

$R = 0.865$ $r^2 = 0.748$ $df = 50$ $p \leq 0.00001$

SLA S5: $f(x) = 14 + e^{-11 \cdot (x - 0.42)}$

$R = 0.888$ $r^2 = 0.789$ $df = 50$ $p \leq 0.00001$

Der Quotient aus Blattfläche und Blatttrockenmasse wird als *specific leaf area* oder kurz SLA bezeichnet. Dessen Zusammenhang mit dem Lichtgenuss wird sowohl für den gesamten Baum als auch separat für die Kronenschicht S5 in Abb. 4.29 dargestellt. Beide Funktionen zeigen einen eindeutig fallenden Verlauf mit Sättigungsverhalten.

Ein ähnlicher Quotient wie SLA ist auch das Blattflächenverhältnis (LAR = *leaf area ratio*), bei dem die Gesamtblattfläche eines Baumes im Verhältnis zur Gesamtbiomasse (Trockengewicht) des Baumes steht. In der Wachstumsanalyse wird dieser Wert auch als Wachstumskapazität bezeichnet. Die Regression mit dem ISF S5 wird in Abb. 4.30 dargestellt. Trotz der fehlenden Daten im mittleren Helligkeitsbereich wird der exponentiell fallende Kurvenverlauf sehr deutlich.

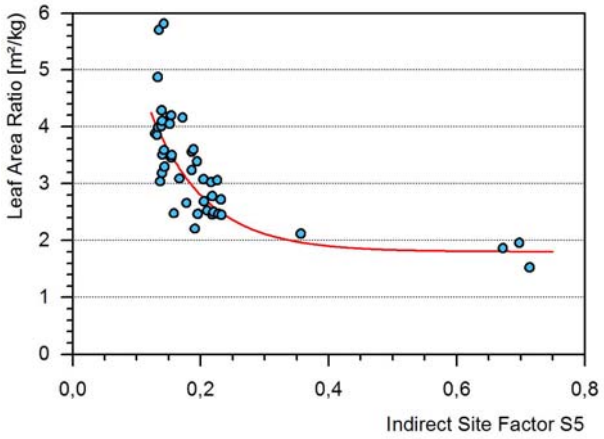


Abb. 4.30. Regression zwischen Leaf Area Ratio (LAR) und der relativen Beleuchtungsstärke (ISF S5). LAR berechnet sich aus der Gesamtblattfläche eines Baumes dividiert durch dessen Gesamtbiomasse (inklusive Blattbiomasse).

$$f(x) = 1.8 + e^{-11.5\cdot(x-0.2)}$$

R_S = -0.803 R = 0.773 r^2 = 0.597 df = 44 $p \leq 0.00001$

Für die verschiedenen Variablen der Wachstumsanalyse ist die Stärke der Korrelationen mit den Lichtwerten in Tabelle 4.5 anhand des Spearman-Rangkorrelationskoeffizienten (R_S) dargestellt. Bei der Erstellung dieser Tabelle fiel auf, dass die Variablen häufig stärker mit dem ISF S4 korrelierten als mit dem ISF S5. Es entstand die Vermutung, dass dieser Zusammenhang weniger durch den absoluten Lichtwert bedingt ist als vielmehr durch die Umsetzung des Lichtgenusses dieser Schicht in das Wachstum, also durch die Kombination von einstrahlender Lichtmenge und der die Lichtenergie umsetzenden Blattfläche. In der Tat ist die Blattfläche der Kronenschicht S4 in der Regel deutlich größer als in der Schicht

S5. So wurde zusätzlich zu den Lichtwerten auch die Korrelation zu den Produkten aus Lichtwert (ISF) und Blattfläche (LA) einer Schicht getestet. Schließlich erfolgte noch ein Aufsummieren der Werte der Schichten S1-S3 (als Synonym für die Lichtkrone) bzw. S1-S5 (gesamter Baum).

Tabelle 4.5. Spearman-Rangkorrelationskoeffizient zwischen den Variablen der Wachstumsanalyse und den Lichtwerten der verschiedenen Kronenschichten (ISF S1-S5), der Kronenmitte (ISF KrMitte) bzw. den Produkten von Lichtwert und Blattfläche (ISF*LA) aus der entsprechenden Schicht. Für die letzten beiden Spalten wurden die Werte der einzelnen Schichten aufsummiert. Signifikante Korrelationen ab $p < 0,05$ sind rot markiert. Die zugrunde liegende Zuwachsperiode beträgt ein Jahr (2003).

	ISF S5	ISF S4	ISF S3	ISF S2	ISF S1	ISF KrMitte	ISF*LA S4	ISF*LA S5	ISF*LA S3-S5	ISF*LA S1-S5
NAR oberirdisch	0,773	0,796	0,736	0,283	0,008	0,780	0,710	0,240	0,761	0,795
NAR gesamt	0,736	0,777	0,701	0,302	0,025	0,733	0,687	0,221	0,756	0,792
SLA Baum	-0,861	-0,848	-0,773	-0,305	-0,097	-0,860	-0,705	-0,339	-0,751	-0,776
SLA S5	-0,894	-0,900	-0,826	-0,311	-0,001	-0,901	-0,759	-0,345	-0,811	-0,838
LAI	0,763	0,739	0,696	0,180	-0,186	0,767	0,751	0,438	0,742	0,762
LAR	-0,803	-0,766	-0,686	-0,302	0,033	-0,822	-0,679	-0,316	-0,680	-0,693
RWR oberirdisch	0,473	0,512	0,474	0,105	0,020	0,424	0,499	-0,017	0,586	0,629
RWR oberird./gesamt	0,421	0,499	0,461	0,071	-0,034	0,392	0,436	-0,051	0,545	0,578
RWR gesamt	0,389	0,467	0,433	0,061	-0,016	0,368	0,409	-0,061	0,522	0,556

Tabelle 4.5 macht deutlich, dass Wachstumsintensität (NAR) und Wachstumseffizienz (RWR) am stärksten mit dem für den gesamten Baum aufsummierten Produkt aus Lichtwert und Blattfläche korrelieren. Daher werden auch die Regressionen beider Größen in Verbindung mit diesem Licht-Blattflächen-Produkt grafisch dargestellt (Abb. 4.31 und 4.32).

Ähnlich wie bei den Wachstumsgrößen aus Kapitel 4.1.2. und den Biomasseparametern in Kapitel 4.1.4. kann auch für die Wachstumsintensität und Wachstumseffizienz eine Zunahme der Werte bei Steigen der Einflussvariable festgestellt werden, wobei ein deutliches Sättigungsverhalten zu beobachten ist.

Für die Regression der relativen Wachstumsrate (Abb. 4.32) wurde auf die Michaelis-Menten-Funktion zurückgegriffen. Das sonst stets verwendete komplexere Funktionsmodell führt zwar auch in diesem Fall zu einem etwas strafferen Zusammenhang ($R = 0,681$; $r^2 = 0,464$), weist jedoch bei einem Licht-Blattflächen-Produkt von etwas über zwei ein Maximum auf. Die Kurve sinkt im weiteren Verlauf wieder deutlich ab. Welches der beiden Modelle richtigerweise anzuwenden ist, kann aufgrund der geringen Datenmenge im mittleren bis hohen Bereich des Licht-Blattflächen-Produktes nicht eindeutig beantwortet werden.

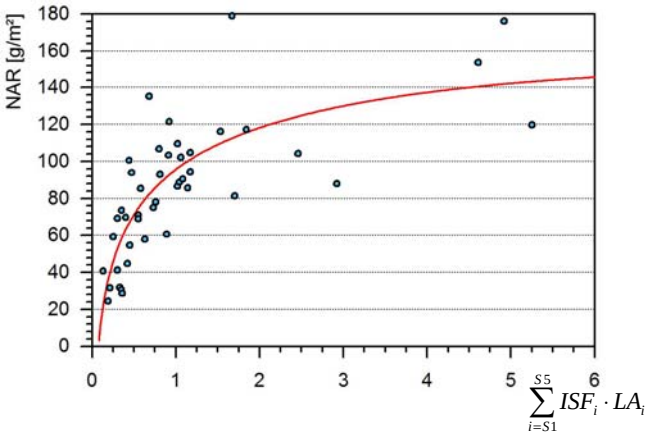


Abb. 4.31. Regression der Netto-Assimilationsrate (NAR) für die Gesamtbiomasse (ober- und unterirdisch, sowie inklusive der Blattbiomasse) mit dem aufsummierten Produkt aus Lichtwert und Blattfläche der Straten S1-S5.

$$f(x) = 99 - 3.6 \cdot x + 38 \cdot \ln(x) + 0.6 \cdot e^{-x}$$

$R_S = 0.792$ $R = 0.783$ $r^2 = 0.614$ $df = 44$ $p \leq 0.00001$

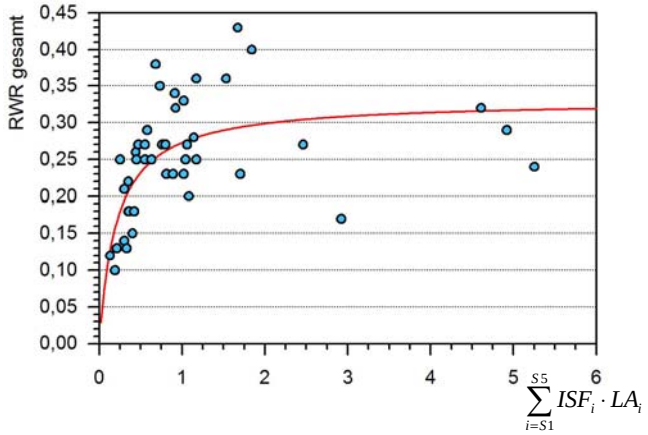


Abb. 4.32. Regression der relativen Wachstumsrate (RWR) für den gesamten Baum (ober- und unterirdische Biomasse, sowie inklusive der Blattbiomasse) mit dem aufsummierten Produkt aus Lichtwert und Blattfläche der Straten S1-S5.

$$f(x) = \frac{0.33 \cdot x}{x + 0.21}$$

$R_S = 0.556$ $R = 0.636$ $r^2 = 0.404$ $df = 44$ $p = 0.00003$

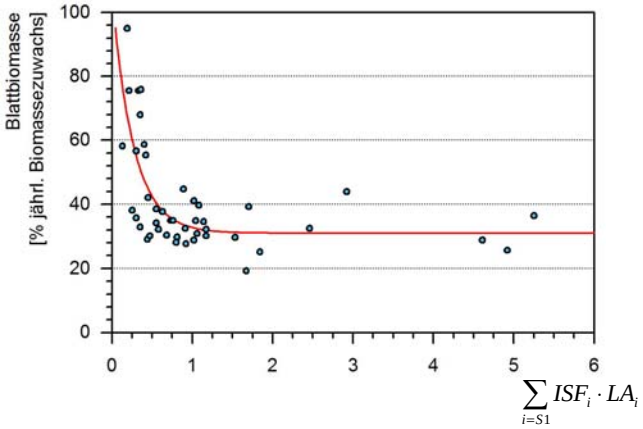


Abb. 4.33. Anteil der Blattbiomasse am gesamten jährlichen Biomassezuwachs in Regression mit dem aufsummierten Produkt aus Lichtwert und Blattfläche der Straten S1-S5.

$$f(x) = 31 + e^{-3.75\cdot(x-1.15)}$$

R_S = -0.468 R = 0.718 r^2 = 0.516 df = 44 $p \leq 0.00001$

Untersucht man, wie hoch der Anteil der Blätter an der jährlichen Biomasseproduktion ist und wie sich dieser Prozentsatz im Verhältnis zum Lichtgenuss verändert, so stellt man fest, dass der Blattanteil relativ konstant bei 30 % liegt. Bei Bäumen, die unter sehr niedrigen Lichtbedingungen aufwachsen, steigt der Anteil jedoch deutlich an. Abb. 4.33 stellt diesen Zusammenhang in Korrelation zum Licht-Blattflächen-Produkt dar. Die Darstellung mit dem ISF S5 ergibt jedoch ein ganz ähnliches Bild. Ausgehend von einem recht konstanten Blattmassenanteil von ca. 30 % steigt dieser Wert, beginnend bei einem ISF-Wert von knapp über 0,2, rapide an. Bei nahezu identischer Korrelation der Daten (R_S = -0,446) kann die Güte der Anpassung dabei aber nicht das gleiche hohe Niveau erreichen (R = 0,568; r^2 = 0,323).

Abschließend soll noch auf das Verhältnis zwischen der produzierten Blattfläche und der sie versorgenden Feinwurzelbiomasse eingegangen werden (Abb. 4.34). Nachdem ab einer bestimmten Grundmenge an Feinwurzelmasse die Blattfläche mit steigendem Feinwurzelgewicht zunächst sehr intensiv zunimmt, flacht dieser Zusammenhang mit der Zeit etwas ab. Die Blattfläche steigt dann aber kontinuierlich gleichbleibend stark an.

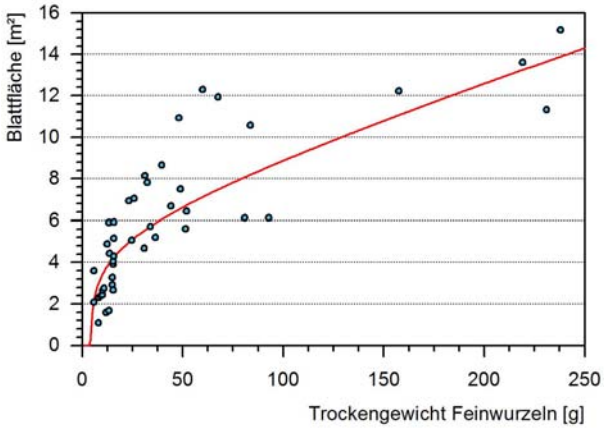


Abb. 4.34. Regression zwischen der gesamten Blattfläche und der gesamten Trockenmasse an Feinwurzeln eines Baumes.

$$f(x) = 1.3 + 0.03 \cdot x + \ln(x - 3.86)$$

$R_S = 0.883$ $R = 0.854$ $r^2 = 0.729$ $df = 43$ $p \leq 0.00001$

4.2. Konkurrenzwerte

In Tabelle 4.6 ist ein Überblick über die Korrelationen der für diese Arbeit ausgewählten Konkurrenzindizes zu den verschiedenen untersuchten Parametern wiedergegeben. Da der Hegyi-Index (C_4) als klassischer Konkurrenzindex gilt und in der forstlichen Praxis seit langem angewandt wird, werden alle weiteren Konkurrenzindizes, die nicht signifikant mit dem Hegyi-Index korreliert sind, im Zuge dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. Von den verbleibenden Indizes erreichen der Konkurrenzwinkel (C_3), der Hegyi-Index (C_4) und der Index nach Ammer (C_5) die höchsten Korrelationswerte mit den Response-Variablen. Daher finden nur diese drei Indizes im folgenden Verwendung. Für die Regressionsanalysen kommt dabei jeweils der Index mit der höchsten Korrelation zum Einsatz, d. h. der Konkurrenzwinkel oder der Ammer-Index (vgl. Tabelle 4.6). Die Regression mit dem Hegyi-Index lieferte stets etwas schlechtere Korrelationen.

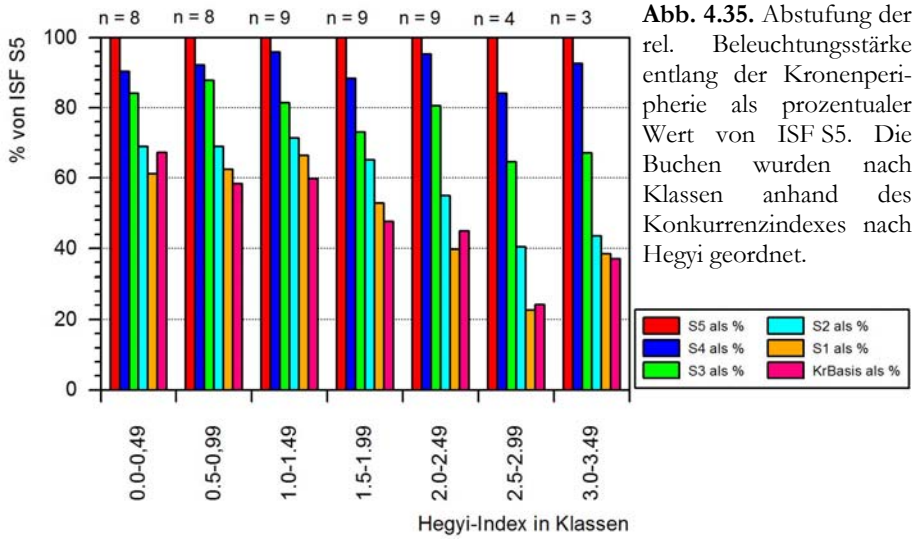


Abb. 4.35. Abstufung der rel. Beleuchtungsstärke entlang der Kronenperipherie als prozentualer Wert von ISF S5. Die Buchen wurden nach Klassen anhand des Konkurrenzindexes nach Hegyi geordnet.

Grundsätzlich bleibt festzuhalten, dass ein signifikanter Einfluss der Konkurrenz auf die gemessenen Parameter vergleichsweise selten festgestellt werden kann oder zumeist gering ist (R_S erreicht kaum Werte über 0,4). Das macht die Entscheidung für ein bestimmtes Modell bei der Regressionsanalyse mitunter fragwürdig.

Betrachtet man die entlang der Kronenperipherie ermittelten Lichtdaten, so wird deutlich, dass mit zunehmender Verschärfung der Konkurrenzsituation prozentual weniger Licht die unteren Straten, bzw. den Bereich unterhalb der Kronenbasis erreicht (Abb. 4.35).

Während die Indizes nach Hegyi, Ammer und Linnert in einem sehr engen linearen Verhältnis zueinander stehen (Abb. 4.36), wird die Besonderheit des Konkurrenzwinkels bei dessen Regression mit dem Hegyi-Index deutlich (Abb. 4.37). Die Regressionskurve weist ein eindeutiges Sättigungsverhalten auf, was auf die Berechnung dieses Indexes zurückzuführen ist (vgl. Kap. 3.2.2.2). Bei einer hohen Konkurrenzsituation wirkt sich ein weiterer zusätzlicher Konkurrent nicht mehr so stark aus; es gibt keinen ins Unendliche steigenden Konkurrenzwert.

Tabelle 4.6. Korrelation der untersuchten Konkurrenzindizes mit den verschiedenen Parametern des Pflanzenwachstums. Angegeben ist der jeweilige Spearman'sche Korrelationskoeffizient (R_S). Signifikante Korrelationen ab $p < 0{,}05$ sind rot markiert.

			C1 Anz fest	C2 Anz=h	C3 Winkel	C4 Hegyi	C5 Ammer	C6 Linnert	C7 Fish 180	C8 Fish 60
Lichtdaten	Konkurrenzindices	C1 Anzahl fest	1,000	0,956	0,743	0,740	0,626	0,720	0,201	0,094
		C2 Anzahl = h	0,956	1,000	0,710	0,732	0,619	0,711	0,190	0,061
		C3 Konk.Winkel	0,743	0,710	1,000	0,948	0,862	0,912	0,175	-0,046
		C4 Hegyi	0,740	0,732	0,948	1,000	0,920	0,926	0,160	-0,064
		C5 Ammer	0,626	0,619	0,862	0,920	1,000	0,885	0,161	-0,131
		C6 Linnert	0,720	0,711	0,912	0,926	0,885	1,000	0,270	-0,063
		C7 Fish 180	0,201	0,190	0,175	0,160	0,161	0,270	1,000	0,347
		C8 Fish 60	0,094	0,061	-0,046	-0,064	-0,131	-0,063	0,347	1,000
		ISF S1	-0,378	-0,356	-0,469	-0,500	-0,445	-0,461	-0,105	-0,004
		ISF KrMitte	0,035	-0,016	0,340	0,286	0,328	0,202	-0,099	-0,349
		ISF S5	0,327	0,248	0,477	0,364	0,385	0,330	0,159	-0,164
Qualitätsparameter	Wachstums-parameter	Höhe 2003	0,374	0,233	0,519	0,388	0,369	0,358	0,059	-0,263
		Länge Joh.Trieb 03	-0,164	-0,281	-0,361	-0,324	-0,183	-0,068	0,400	0,400
		Länge Trieb 03	0,342	0,238	0,464	0,367	0,412	0,347	0,228	-0,147
		Trieb 03 %	0,231	0,185	0,314	0,268	0,325	0,237	0,249	-0,042
		BHD	0,070	-0,005	0,375	0,290	0,380	0,274	0,073	-0,336
		WHD	0,254	0,142	0,383	0,268	0,343	0,300	0,065	-0,349
		h/whd 03/05	-0,010	0,013	-0,089	-0,002	-0,106	-0,061	-0,041	0,296
		h/bhd 03/05	-0,094	-0,052	-0,181	-0,066	-0,129	-0,117	-0,056	0,267
		Ovalität WHD	0,077	0,038	-0,040	-0,064	-0,103	-0,058	0,168	0,121
		Stammform	-0,111	-0,084	0,014	0,008	0,084	0,044	0,163	-0,162
		Länge Internodium	-0,148	-0,170	0,085	0,108	0,180	0,106	0,182	-0,253
		Anzahl Knospen	-0,150	-0,128	-0,132	-0,146	-0,116	-0,124	0,184	0,153
		Inclination	-0,235	-0,186	-0,333	-0,278	-0,327	-0,281	0,118	0,104
		Anzahl dicke Äste	-0,256	-0,198	-0,450	-0,358	-0,317	-0,327	0,039	0,173
		Ansatzhöhe 1. Ast	-0,213	-0,147	-0,161	-0,054	-0,119	-0,060	0,033	0,022
		Höhe 1. Ast %	-0,298	-0,205	-0,310	-0,176	-0,233	-0,178	0,069	0,154
		Astdurchm. S2-3	0,221	0,115	0,310	0,192	0,272	0,233	0,183	-0,141
		Astdurchm. rel S2-3	-0,149	-0,149	-0,219	-0,167	-0,117	-0,134	0,239	0,370
		Astwinkel S2-3	-0,104	-0,181	-0,033	-0,102	-0,160	-0,103	-0,097	0,059
	eingenommenes Volumen	vertVolSchw%	0,023	0,053	-0,043	-0,024	-0,145	-0,017	-0,003	0,177
		gr. Kronendurchm.	0,153	0,040	0,289	0,180	0,214	0,275	0,151	-0,239
		Höhe gr. Kr.Durchm	0,417	0,353	0,463	0,353	0,325	0,376	-0,096	-0,274
		KronenVolumen	0,149	0,059	0,286	0,218	0,319	0,248	0,115	-0,310
		WurzelraumVolum.	0,119	0,058	0,365	0,299	0,344	0,233	0,256	-0,227
		max. Wurzeltiefe	0,002	-0,051	0,086	0,021	0,189	0,038	0,069	-0,123
		max. Wurzellänge	0,008	-0,051	0,235	0,165	0,256	0,123	0,198	-0,218
		KrProjektionsfläche	0,046	0,005	0,066	0,050	0,093	0,147	0,187	-0,207
	Biomasse-parameter	Wurzel Biomasse	0,066	-0,013	0,333	0,237	0,321	0,217	0,233	-0,239
		Biom Feinwurz	0,138	0,088	0,357	0,274	0,297	0,253	0,319	-0,238
		HolzBiom Krone	0,038	-0,036	0,350	0,263	0,354	0,252	0,086	-0,310
		Biom Krone/Wurzel	0,007	0,031	0,010	-0,018	-0,108	0,024	-0,248	-0,022
		Zuwachs Krone	-0,032	-0,105	0,312	0,242	0,352	0,230	0,130	-0,306
		Zuwachs gesamt	-0,015	-0,088	0,301	0,206	0,309	0,202	0,254	-0,245
	Blattdaten und Wachstumsanalyse	NAR nur oberird.	-0,166	-0,226	0,215	0,160	0,272	0,147	0,079	-0,350
		NAR gesamt	-0,196	-0,260	0,203	0,123	0,231	0,114	0,158	-0,317
		Blattmasse	-0,002	-0,065	0,312	0,228	0,321	0,215	0,109	-0,292
		Blattanzahl	-0,032	-0,097	0,225	0,137	0,249	0,137	0,050	-0,254
		Blattfläche	0,043	-0,021	0,333	0,246	0,337	0,245	0,137	-0,251
		SLA Baum	0,110	0,176	-0,187	-0,123	-0,200	-0,093	-0,057	0,280
		SLA S5	0,004	0,074	-0,305	-0,240	-0,324	-0,189	-0,019	0,257
		Blattfläche/KrVolum.	0,000	-0,009	0,103	0,159	0,073	0,189	0,111	0,132
		LAI	0,006	-0,037	0,354	0,272	0,336	0,197	-0,006	-0,057
		LAR	-0,071	0,012	-0,265	-0,202	-0,255	-0,151	-0,065	0,269
		RWR nur oberird.	-0,232	-0,279	0,109	0,065	0,146	0,051	0,134	-0,057
		RWR ober. zu total	-0,175	-0,220	0,185	0,138	0,197	0,124	0,187	-0,061
		RWR total	-0,205	-0,248	0,169	0,121	0,192	0,110	0,146	-0,091

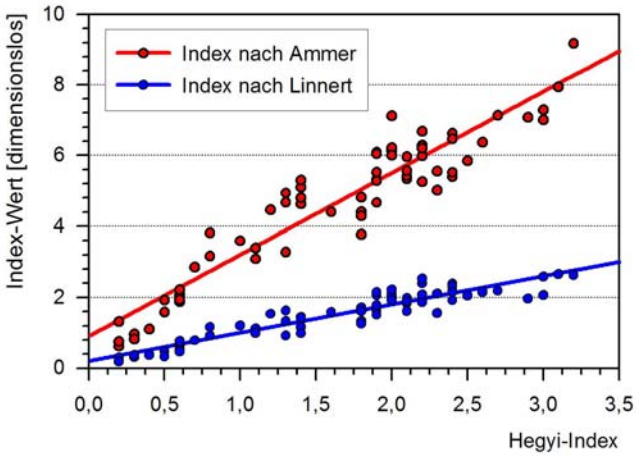


Abb. 4.36. Lineare Regressionen zwischen den Konkurrenzindizes nach Ammer, Linnert und Hegyi.

Index nach Ammer: $f(x) = 0.9 + 2.3 \cdot x$

R = 0.945 r^2 = 0.893 df = 67 $p \leq 0.00001$

Index nach Linnert: $f(x) = 0.2 + 0.8 \cdot x$

R = 0.941 r^2 = 0.886 df = 67 $p \leq 0.00001$

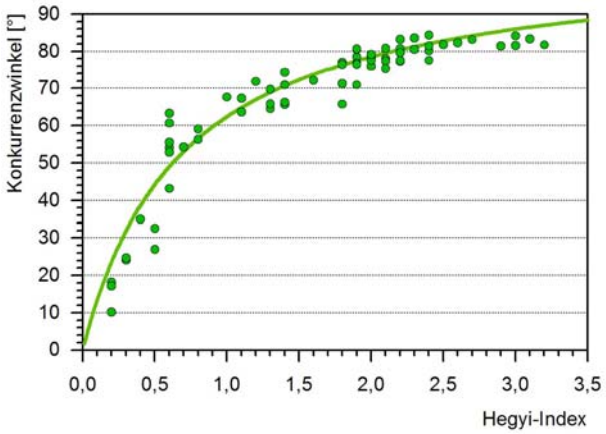


Abb. 4.37. Regression zwischen dem Konkurrenzwinkel und dem Hegyi-Konkurrenzindex.

$$f(x) = \frac{106 \cdot x}{x + 0.7}$$

R_S = 0.948 R = 0.963 r^2 = 0.928 df = 67 $p \leq 0.00001$

4.2.1. Relation zum Licht

Aus Tabelle 4.6 ist bereits deutlich geworden, dass zwischen den Konkurrenzwerten und dem Lichtgenuss der Versuchspflanzen ein zwar schwacher aber doch signifikanter Zusammenhang besteht. Diese Zusammenhänge sind in den Abb. 4.38 und 4.39 dargestellt.

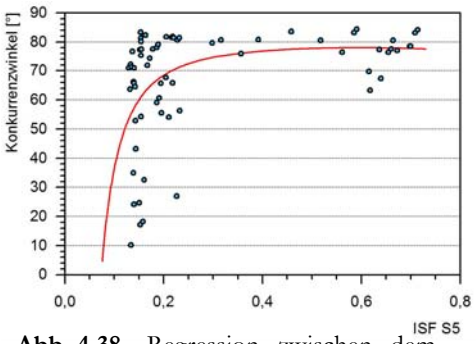


Abb. 4.38. Regression zwischen dem Konkurrenzwinkel und der relativen Beleuchtungsstärke (ISF S5).

$$f(x) = 88 + 12 \cdot x + \frac{16}{x - 1.6} + \frac{0.42}{x^2}$$

$R_S = 0.477$ $R = 0.442$ $r^2 = 0.195$
$df = 67$ $p = 0.00033$

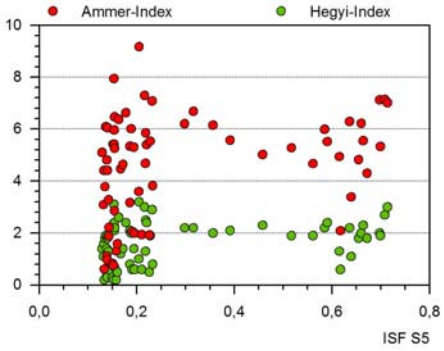


Abb. 4.39. Verknüpfung der Konkurrenzindizes nach Ammer und Hegyi mit dem Lichtgenuss der Pflanzen (ISF S5). Auf die Festlegung eines bestimmten Regressionsmodells wurde bewusst verzichtet.

Aus dem vorangegangenen Kapitel über die Ergebnisse in Abhängigkeit vom Lichtgenuss der Pflanzen wissen wir, dass insbesondere im unteren ISF-Spektrum das Wachstum sehr stark auf das Licht reagiert. Um eine Überlagerung des Einflusses der Konkurrenz durch den Einfluss der Lichtintensität auszuschließen, wäre in diesem Kapitel die alleinige Betrachtung der Bäume mit ISF > 0,4 sinnvoll (gesättigtes Wachstum in Korrelation mit dem Licht; geringer Einfluss des Lichtes).

Mehr als 40 % der Freilandhelligkeit (= ISF > 0,4) genossen ausschließlich die Bäume Nr. 1, 47-48, 51-61 und 65-70. Das sind 20 Bäume bei Betrachtung des gesamten Kontingents von 70 untersuchten Buchen. Bei den Messgrößen, die nur für 50 oder weniger Bäume vorlagen, sind lediglich noch die Daten dreier Bäume aus dem ISF-Spektrum oberhalb von 0,4 verfügbar. Eine statistische Analyse dieser Größen kann zu keinem signifikanten Ergebnis führen.

Erstellt man eine vergleichbare Tabelle wie Tabelle 4.6 nur für die Bäume mit einem ISF > 0,4 so ergibt sich allein für den h/d-Wert (Höhe/WHD) in Korrelation mit dem Konkurrenzwinkel oder dem Hegyi-Index noch ein signi-

fikanter Korrelationskoeffizient (R_S = 0,637 bzw. 0,554). Der h/d-Wert wird in Abb. 4.44 wiedergegeben.

4.2.2. Wachstumsdaten und Konkurrenz

Abb. 4.41 ist eine Wiederholung der bereits bekannten Darstellung des Höhenwachstums in Abhängigkeit vom Lichtgenuss (Abb. 4.2 auf Seite 62). Allerdings erfolgte nun eine Aufteilung der einzelnen Bäume auf vier verschiedene Gruppen entsprechend der vorherrschenden Konkurrenzsituation. Daraus wird ersichtlich, dass Bäume einer Konkurrenzstufe im gesamten Lichtspektrum vorkommen, bzw. in einem definierten Lichtbereich kommen alle Konkurrenzstufen vor. Insofern erscheint die Betrachtung nur eines bestimmten Kontingents von Bäumen (bspw. nur Bäume aus dem Lichtbereich ISF > 0,4) zunächst als nicht erforderlich. Trotz der anders lautenden Vorüberlegung aus Kapitel 4.2.1 erfolgten daher die Regressionsanalysen zunächst mit allen verfügbaren Daten, d. h. für alle 70 Bäume.

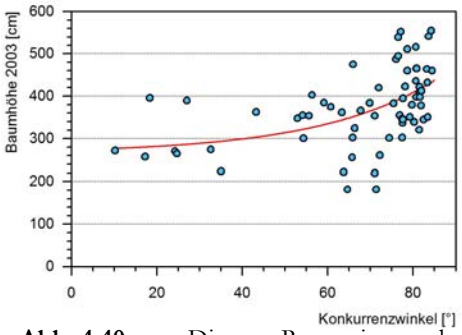


Abb. 4.40. Die Regressionsanalyse zwischen der Baumhöhe und dem Konkurrenzwinkel ergibt einen mit zunehmender Verschärfung der Konkurrenz stärker steigenden Zusammenhang.

$$f(x) = 265 + e^{(0.036 \cdot (x + 58))}$$

R_S = 0.519 R = 0.52 r^2 = 0.27
df = 67 p = 0.00005

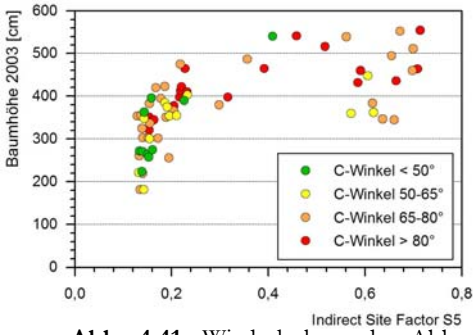


Abb. 4.41. Wiederholung der Abb. 4.1.2, aber mit einer Unterteilung der Bäume in verschiedene Konkurrenzklassen anhand des Konkurrenzwinkels (C-Winkel).
Es wird erkennbar, dass Bäume der einzelnen Konkurrenzklassen über den gesamten Lichtbereich verteilt vorkommen. Eine kleine Ausnahme stellt die Kategorie „C-Winkel < 50“ dar.

Zwischen Höhenwachstum und Konkurrenzsituation der einzelnen Bäume besteht ein schwach positiver Zusammenhang (Abb. 4.40). Die Regressionsfunktion zeigt dabei einen leicht konvexen Verlauf. Ein vergleichbares Bild ergibt in Abb. 4.42 die Regressionsanalyse des jährlichen Längenzuwachses (Länge des Terminaltriebes 2003) mit dem Konkurrenzwinkel.

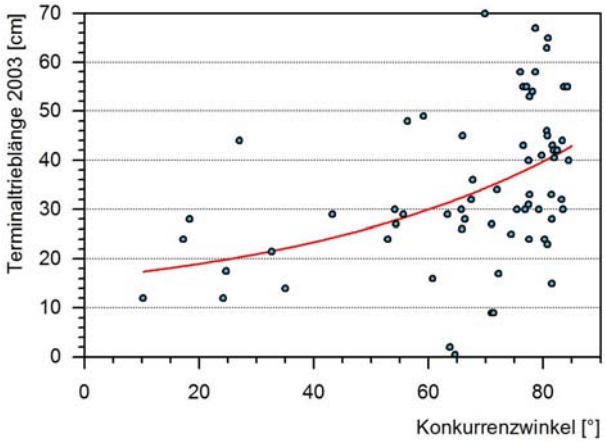


Abb. 4.42. Regression der Terminaltrieblänge aus dem Jahr 2003 mit der Konkurrenzsituation des einzelnen Baumes. Die Regressionskurve zeigt ebenfalls einen leicht konvexen Verlauf.

$$f(x) = 10 + 0.7 \cdot e^{(0.02 \cdot (x + 107.5))}$$

$R_S = 0.464$ $R = 0.435$ $r^2 = 0.189$ $df = 66$ $p = 0.00043$

Ein ähnlicher Zusammenhang besteht zwischen allen Wachstumsparametern und dem Konkurrenzwinkel. Selbst der Wurzelhalsdurchmesser nimmt demnach mit zunehmender Verschärfung der Konkurrenz zu. Auch hier erhält man eine konvex steigende Regressionskurve, wenn auch das Bestimmtheitsmaß geringer ausfällt als beim Höhenwachstum ($R = 0{,}374$; $r^2 = 0{,}14$).

Dass entsprechend der Daten selbst das Durchmesserwachstum durch eine intensive Konkurrenzsituation gefördert werden soll, macht deutlich, dass eine Überlagerung mit dem Einfluss des Lichtes vorliegen muss. Analysiert man als Quintessenz nur die verfügbaren Daten für Bäume mit ISF > 0,4, so ist kein signifikanter Zusammenhang mehr nachweisbar. Auf eine weitere Analyse der Wachstumsdaten im Vergleich zur Konkurrenz wird daher verzichtet.

4.2.3. Qualitätsparameter und Konkurrenz

Bei den Qualitätsparametern soll nur auf die Astanzahl und den h/d-Wert eingegangen werden. Bei allen anderen Parametern ergab sich kein oder nur ein sehr schwacher signifikanter Zusammenhang, ähnlich wie beim Durchmesserwachstum.

Die Anzahl der starken Äste korrelierte zum Licht deutlich schwächer als die Wachstumsparameter und ergibt in Korrelation mit dem Konkurrenzwinkel einen fast ähnlich hohen Korrelationskoeffizienten wie mit dem ISF (R_S = -0,45). Die Regressionskurve zeigt einen konkav fallenden Verlauf (Abb. 4.43). Mit intensiverem Konkurrenzdruck würde demnach die Anzahl der Starkäste sinken. Es muss jedoch beachtet werden, dass das Bestimmtheitsmaß bei dieser Regression nur bei 0,18 liegt. Die Analyse der gesamten Astanzahl in den unteren Straten, unabhängig von deren Durchmesser, ergab keinerlei verwertbare Zusammenhänge.

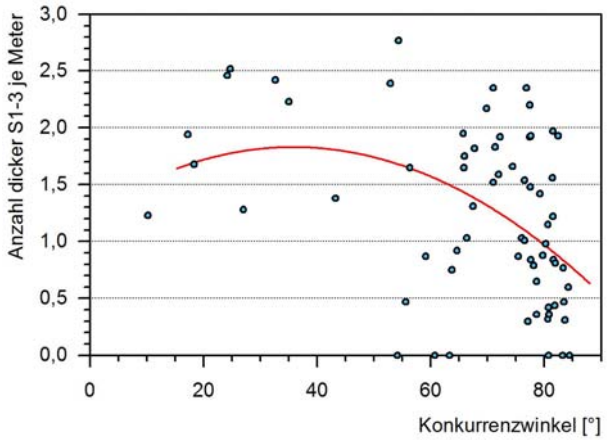


Abb. 4.43. Regression der Anzahl an starken Ästen (d.h. der Astdurchmesser erreicht mindestens die Hälfte des Stammdurchmessers am Astansatz) mit dem Konkurrenzwinkel.

$$f(x) = 1.3 + 0.03 \cdot x - 0.0004 \cdot x^2 + \frac{0.05}{x}$$

R_S = -0.45 R = 0.425 r^2 = 0.18 df = 68 p = 0.00076

Der h/d-Wert, oder genauer gesagt die Relation zwischen Baumhöhe und Wurzelhalsdurchmesser steht bei der Betrachtung aller Bäume in keinerlei signifikantem Zusammenhang zur Konkurrenzsituation (R_S = 0,021 n.s.). Es ist jedoch der einzige Parameter, der bei der alleinigen Betrachtung der Bäume mit einem ISF > 0,4 eine signifikante Korrelation zum Konkurrenzwinkel aufweist

(R_S = 0,637). Die Regressionskurve mit dem höchsten Bestimmtheitsmaß hat dabei einen konvex steigenden Verlauf (Abb. 4.44).

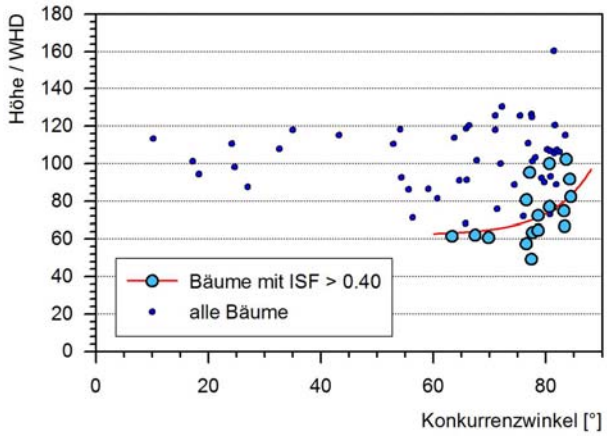


Abb. 4.44. Nur die Betrachtung der h/d-Werte der Bäume mit einem ISF > 0,4 führt zu einer signifikanten Regression mit dem Konkurrenzwinkel.

$$f(x) = 62 + 2.8 \cdot e^{0.14 \cdot (x - 70)}$$

R_S = 0.686 R = 0.534 r^2 = 0.285 df = 17 p = 0.0177

4.2.4. Biomasse und Konkurrenz

Auf eine tiefergehende Analyse der Korrelation zwischen den einzelnen Biomasseparametern mit der Konkurrenzsituation musste leider verzichtet werden. Wie eingangs des Kapitels 4.2. dargestellt, bestehen nur vereinzelte und recht schwache Zusammenhänge (Tabelle 4.6), deren Aussagekraft, bedingt durch den starken Zusammenhang dieser Parameter mit dem Licht, eher fragwürdig erscheint. Für die Betrachtung von Bäumen mit ISF > 0,4 sind jedoch nicht genügend Daten vorhanden.

4.2.5. Kronen- bzw. Wurzelraumvolumen und Konkurrenz

Beispielhaft für die Daten dieses Kapitels ist die Relation zwischen dem Kronvolumen und dem Konkurrenzindex nach Ammer wiedergegeben (Abb. 4.45). Neben dem niedrigen Korrelationskoeffizienten (R_S = 0,319) liefert auch die lineare Regression nur einen sehr unzulänglichen Erklärungsansatz für die Varianz der Daten (r^2 = 0,04). Vor dem Hintergrund der Überlagerung mit dem Lichtwert erscheint auch in diesem Kapitel eine weitere Analyse der Konkurrenzwerte wenig zielführend.

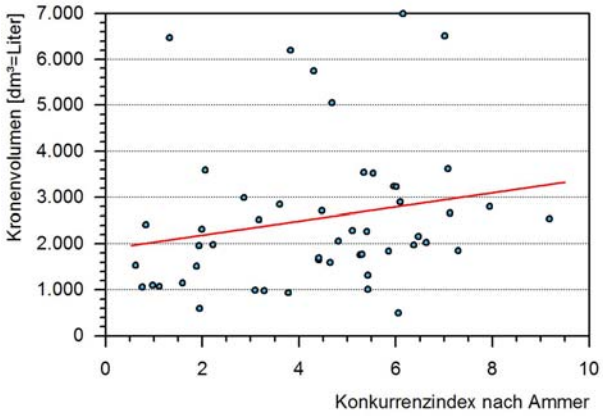


Abb. 4.45. Lineare Regression des eingenommenen Kronenvolumens mit dem Konkurrenzindex nach Ammer.

$$f(x) = 1879 + 152 \cdot x$$

$R_S = 0.319$ $R = 0.206$ $r^2 = 0.042$ $df = 49$ $p = 0.1444$

Auch bei der Betrachtung der Kronenform bzw. der Lage des vertikalen Volumenschwerpunktes wird rasch deutlich, dass keinerlei Beziehung zur Konkurrenzintensität nachgewiesen werden kann, sofern wir alle Buchen entlang des gesamten Lichtgradienten betrachten.

Zu einem etwas anderen Ergebnis kommt man, wenn man nur Buchen berücksichtigt, die unter vergleichbaren Lichtbedingungen aufgewachsen sind und damit ein ähnliches Höhenwachstum haben. Die Datenmenge ist dann zwar statistisch unzureichend und somit nur bedingt aussagefähig (Fallstudien), doch erhält man zumindest den Indikator für einen Einfluss durch die Konkurrenzsituation. Die Kronenform der ausgewählten Beispielbäume (Abb. 4.46 a-d) verändert sich mit zunehmendem Konkurrenzdruck von einer pyramidalen Form über eine bauchige und zylindrische Kronenform hin zu einer trichterförmigen Krone.

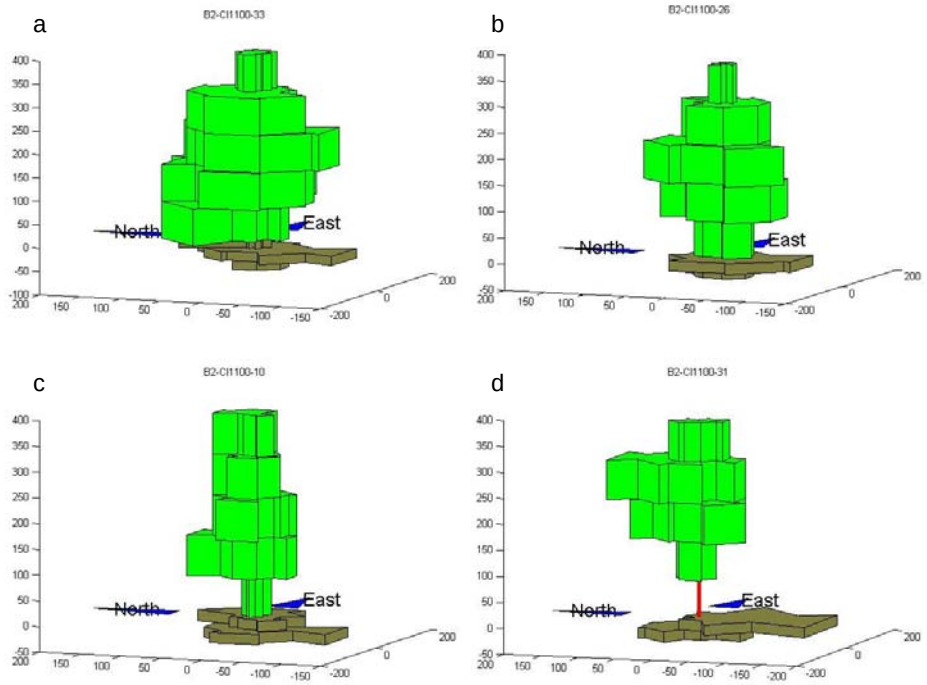


Abb. 4.46 a-d. Schematische Darstellung der Buchen 33 (a), 26 (b), 10 (c) und 31 (d), die unter ähnlichen Lichtbedingungen aufgewachsen sind (0.16-0.2 ISF S5) und ein vergleichbares Höhenwachstum aufweisen (396 cm, 395 cm, 378 cm und 366 cm). Die Kronenform der vier Bäume variiert von einem pyramidalen über den bauchigen und zylinderförmigen zu einem trichterförmigen Habitus. Der Konkurrenzindex (Hegyi-Index) steigt dabei von Baum a bis d (H_a = 0.2; H_b = 1.0; H_c = 2.35; H_d = 3.22).

5. Diskussion

5.1. Höhen- und Durchmesserwachstum in Abhängigkeit vom Strahlungsangebot

Es ist unbestritten und bereits in den einleitenden Ausführungen in Kapitel 3.2.1. dargestellt worden, dass ein zunehmendes Strahlungsangebot fördernd auf das Wachstum von Pflanzen wirkt. Vor allem für das Höhenwachstum wird oft über diese positive Korrelation und deren Sättigungsverhalten berichtet (z. B. Mosandl 1984, Brunner 1993, Schmitt et al. 1995, Sagheb-Talebi 1996).

Gralla et al. (1997) analysierten das Wachstum von 7- bis 13-jährigen Buchen aus Voranbau in sieben Fichtenbeständen im Harz. Regressionsanalysen ergaben vergleichbare Lichtsättigungen bei den Pflanzenhöhen und den Terminaltrieblängen.

Für eine Untersuchung, die gleichfalls auf der Versuchsfläche Clausthal 1100 erfolgte, definierte Pampe (2000) vier Klassen für den Diffuse Site Factor (DIFFSF), die er entsprechend den Angaben von Wagner und Nagel (1992) einteilte: < 10 %, 10-20 %, 20-30 % und 30-45 %. Für die ersten drei Klassen stellte er eine stete Zunahme des jährlichen Höhenzuwachses fest und erst bei der Lichtklasse DIFFSF > 30 % näherten sich die Werte denen der vorherigen Klasse an. Hieraus folgerte er, dass eine Auflichtung des Bestandes über 30 % DIFFSF hinaus keine weitere Förderung des Höhenwachstums der Buchen bewirkt. (Der Diffuse Site Factor ist mit dem Indirect Site Factor ISF vergleichbar.)

Die Ergebnisse aus Abb. 4.2 und 4.3 (Seite 62) bestätigen diese Feststellung. Die zunehmende Streuung der Daten im Bereich des besonders intensiven Lichtgenusses (ISF zwischen 0,6-0,7) kann z. B. durch Spätfrostschäden (Lüpke 1998, Lüpke 2005), eine geringere Wasserverfügbarkeit (Madsen 1995) oder andere das Wachstum in den letzten Jahren beeinträchtigende Parameter bedingt sein, deren Bedeutung unter den limitierteren Lichtbedingungen kaum zum Tragen kommt (Löf et al. 2005). Auch Ammer (2000) erwähnt, dass die oben angeführten Einflussgrößen die Strahlungsabhängigkeit des Wachstums überlagern können, sobald das Licht nicht mehr der begrenzende Faktor ist. Er sieht darin auch die Ursache, dass in manchen Untersuchungen das größte Höhenwachstum nicht unter dem höchsten Strahlungsangebot erreicht wurde (z. B. Lüpke 1987).

Der Kurvenverlauf der Regressionsfunktionen erinnert an die Form der Lichtkompensationskurve, und natürlich sind die Wachstumsparameter eng mit diesen ökophysiologischen Grundlagen verknüpft, da das Pflanzenwachstum eine Folge der Kohlenstoffgewinnung durch die Pflanze ist. Kazda et al. (2005) weisen darauf hin, dass durch die geringe Lichtintensität am Waldboden die Kohlenstoffgewinnung und damit das gesamte Pflanzenwachstum auf sehr geringem Niveau

stattfindet. Sinkt das Strahlungsangebot für längere Zeit unter den Kompensationspunkt der Photosynthese, so können die Pflanzen im Schatten nicht überleben.

Lüpke und Hauskeller-Bullerjahn (2004) verwendeten in ihrer Arbeit die photosynthetisch aktive Strahlung (PAR) und extrapolierten die Kurve bis zu deren Schnittpunkt mit der x-Achse, um die Lichtintensität zu bestimmen, bei der kein Höhenzuwachs mehr erfolgt. Diesen Wert bezeichneten sie als Kompensationspunkt des Höhenwachstums. Er betrug bei Buche 5,3 % des Freilandlichtes. Dieser Wert wurde allerdings für achtjährige Buchen unter einem Buchenschirm bestimmt. Lüpke und Hauskeller-Bullerjahn (2004) machen aber deutlich, dass sich der Kompensationspunkt mit dem Alter der Pflanzen verschiebt. Als Vergleich dienten fünfjährige Pflanzen. Allein der dreijährige Altersunterschied ergab, dass der Lichtbedarf für das Wachstum bei den älteren Bäumen ansteigt. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass eher die zunehmende Größe als das Alter der Bäume für diesen Sachverhalt maßgebend ist (ontogenetische Drift).

Anstelle des Höhenzuwachses wurde in dieser Studie die Länge des jährlichen Terminaltriebes untersucht, da dieser in einem engeren Zusammenhang mit dem Kohlenstoffumsatz (*carbon gain*) steht. Doch auch wenn Höhenzuwachs und Trieblänge nicht in allen Fällen vollständig miteinander vergleichbar sind, die Ergebnisse zeigen einen ähnlichen Trend. Der „Wachstumskompensationspunkt", abgelesen als Schnittpunkt der Regressionskurve mit der x-Achse, liegt in der vorliegenden Studie unter Fichtenschirm bei ca. 12 % ISF.

Häufig wird darauf hingewiesen, dass der Höhenzuwachs jüngerer Pflanzen von abnehmenden Strahlungsverhältnissen weniger beeinflusst wird als der Durchmesserzuwachs (Suner und Röhrig 1980, Lüpke 1987, Ammer 1996, Collet et al. 1998, Ammer 2000, Leder und Weihs 2000, Roloff 2001, Collet et al. 2002, Lüpke und Hauskeller-Bullerjahn 2004). In der vorliegenden Arbeit konnte mit dem gewählten Regressionsmodell für die Durchmesserwerte ebenfalls ein größerer Anteil an erklärter Varianz festgestellt werden: r^2 betrug 0,76 (BHD) bzw. 0,65 (WHD) gegenüber 0,58 (Baumhöhe) bzw. 0,56 (Terminaltrieblänge).
Leder und Weihs (2000) stellten fest, dass die Durchmesserentwicklung der vorangebauten Buchen (1+2-jährig unter Kiefernschirm) in ihrer Untersuchung mit steigender Überschirmungsdichte ab einem Überschirmungsgrad von 40 % signifikant nachließ.

Betrachtet man jedoch den reinen Höhen- oder Durchmesserzuwachs in Abhängigkeit vom Lichtgenuss, so machen die an Naturverjüngungen gewonnenen Ergebnisse von Petriţan et al. (2007) deutlich, dass die Regression durch eine logistische Funktion erfolgen muss. Unter extrem dunklen Wuchsbedingungen, wie sie in einer Pflanzung kaum anzutreffen sein werden, beginnt der Kurvenverlauf mit einer konvexen Krümmung, bevor er in den auch mit den Daten dieser Studie belegbaren konkaven Krümmungsbereich wechselt. Die logistische Funktion mit ihrem S-förmigen Funktionsverlauf, bzw. deren Weiter-

entwicklungen (Gombertz-, Richards- oder Feldmann-Funktion) sind typische Wachstumsfunktionen der landwirtschaftlichen Ertragskunde (Liebig und Zühlke 2006).

Das Verhältnis von Baumhöhe zu Stammdurchmesser wird bei jungen Bäumen oft als Maß der Vitalität des Baumes angesehen (Hagemann 2005). Da es aber bei zunehmender Freistellung der Bäume sinkt, ist es eher ein Indikator für den vertikal wie horizontal verfügbaren Wuchsraum als ein Vitalitätsmaß (Kramer 1988, Hagemann 2005).

Die vorliegenden Daten ergeben gleichfalls einen steigenden h/d-Wert mit zunehmender Überschirmung. Schon aus diesem Zusammenhang lässt sich auf die veränderte Biomasseallokation bei zunehmend limitierten Lichtbedingungen schließen. Doch auf die verschiedenen Strategien der Anpassung soll an späterer Stelle (Kapitel 5.3.4.) detaillierter eingegangen werden.

5.2. Indikatoren der Apikaldominanz

Unter Apikaldominanz wird die Unterdrückung des Wachstums von Seitentrieben durch den Haupttrieb verstanden. Steuerungsorgan der Apikalkontrolle ist die Terminalknospe, die mittels des Pflanzenhormons Auxin die Entwicklung der Seitenknospen und -triebe beeinflusst. Eine starke Apikaldominanz bewirkt ein horizontales Wachstum dieser Äste, was wiederum einen aufrechten Wuchs des Terminaltriebs und damit der zukünftigen Stammachse fördert. Bei einer geringen Apikaldominanz wachsen die Seitenäste meist in einer deutlich vertikaleren Richtung, was zu einer aufgelösten Kronenstruktur mit mehreren Stammachsen führt (Bartels 1993). Als Indikator für den Grad der Apikaldominanz gilt die Länge des höchsten Internodiums eines Baumes. Dieser Wert wird daher in der Literatur als maßgebliches Kriterium für die Stammform von Baumarten mit rhythmischem Wachstum beschrieben (Sagheb-Talebi 1996). In Verbindung mit der relativen Beleuchtungsstärke wies Sagheb-Talebi (1996) eine negative Korrelation nach. Ebenso stellte er mit zunehmendem Lichtangebot eine verstärkte Knospenhäufung fest, die ebenfalls auf eine sinkende Apikaldominanz hindeutet.

Die Ergebnisse dieser Studie können keinen Beitrag zu dieser Diskussion liefern. Es war keine Signifikanz zum Lichtgenuss feststellbar.

5.3. Oberirdisches Biomassewachstum, Raumeroberung und Strahlungsangebot

5.3.1. Methodik der Kronenerfassung

Die Untersuchung von Kronenform und Kronenvolumen stellt sich oft als sehr schwierig heraus (Hagemeier 2002). Fehlschätzungen speziell des Kronenvolumens sind häufig, da die unregelmäßige Form der Kronen kaum Berücksichtigung findet (Fisher 1986, Tucker et al. 1993). Während Hagemeier (2002) bei Altbäumen die Anwendung einfacher Kegelmodelle zur Ermittlung des Kronenvolumens noch als ausreichend empfand, stellt Ross (1981) klar, dass geometrische Figuren das tatsächliche Volumen einer Baumkrone nur bis zu einem gewissen Grad ausdrücken können. Sicherlich spielt das Alter der Bäume in diesem Zusammenhang eine nicht zu unterschätzende Rolle. Gerade junge Bäume sind in ihrer Kronenstruktur sehr variabel.

In ihrer Untersuchung über 7- bis 10-jährige Traubeneichen fand Voss (2005), dass die Verwendung einfacher Kegelmodelle das wahre Kronenvolumen deutlich unterschätzt.

In der vorliegenden Arbeit mit Buchen bewirkt die Anwendung des Kronenmodells nach Pretzsch (2001) und Ammer (2005), also die Addition eines kubischen Paraboloids und eines Kegelstumpfes, allerdings bereits eine Überschätzung des Kronenvolumens, sofern das nach dem Schichtenmodell geschätzte Kronenvolumen als Referenzgröße genutzt wird. Es muss aber erneut ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass auch die Erfassung mittels des Schichtenmodells nur eine Schätzung sein kann. Ein noch detaillierter auf die Kronenform eingehendes Verfahren mag eventuell ein noch geringeres Kronenvolumen für den einzelnen Baum ergeben.

Die exakte Erfassung einer Baumkrone würde die Bestimmung von Größe, Lage und Ausrichtung eines jeden Teilelements der Krone erfordern, und derart aufwändige händische Messungen sind nicht zu rechtfertigen. Campbell und Norman (1989) weisen daraufhin, dass die gewonnene Information auch nur für einen bestimmten Zeitpunkt Gültigkeit besäße, da gerade das Kronenwachstum ein sehr dynamischer Prozess ist und auf die verschiedensten Umwelteinflüsse zu reagieren hat.

Technische Entwicklungen, wie bspw. Laserscanner zur Strukturerfassung von Baumkronen (Fleck et al. 2004) werden der Forstwissenschaft in Zukunft ganz neue Möglichkeiten erschließen und sind teilweise bereits im Einsatz.

5.3.2. Natürliche Kronenarchitektur

Bei wissenschaftlichen Untersuchungen darf jedoch nicht vergessen werden, dass der bspw. durch eine vom Optimalzustand abweichende Ressourcenverfügbarkeit bedingte *reale* Phänotyp eines Baumes auf dem ungestörten *idealen* Phänotyp basiert (Gruber 1992). Jede Art verfolgt im Wachstum ihr spezifisches genetisch determiniertes Allokationsmuster (Voss 2005), wodurch sich eine Vielzahl von Baumkronenformen ergibt. Bereits anhand weniger Bauelemente lassen sich verschiedene Kronenarchitekturmodelle aufstellen, denen die Gehölzarten zugeordnet werden können (Gruber 1992). Diese Modelle gehen auf Hallé et al. (1978) zurück und sind nach bedeutenden Botanikern benannt. Die Rotbuche mit ihrem monopodialen Längenwachstum und plagiotropen Zweigen ist dem Architekturmodell von Troll (Crabbe 1987) zuzuordnen. Dieses nach dem Mainzer Botaniker Wilhelm Troll (1897-1978) benannte Modell beschreibt Baumarten, die primär lediglich plagiotrope Achsen aufweisen. Diese werden fortwährend übereinander gesetzt und richten sich im Gipfelbereich sekundär auf (sekundär gemischte Achsen). Das Aufeinandersetzen der Achsen und die sekundäre Orthotropie ermöglichen das baumförmige Wachstum. Das Modell Troll zeichnet sich durch eine außerordentliche, individuelle Plastizität aus (Bartels 1993).

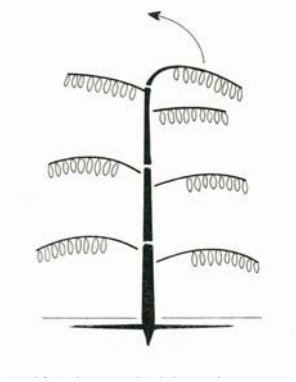


Abb. 5.1. Architekturmodell TROLL: Übereinandergesetzte, plagiotrope Achsen, die im Gipfelbereich sekundär orthotrop werden. Entnommen aus Bartels (1993).

Erst wenn die gehölzmorphologischen Baupläne einer Art bekannt sind, können die durch Umwelteinflüsse bedingten Modifikationen erfasst und analysiert werden (Gruber 1992). Die Darstellung der verschiedenen gehölzmorphologischen Grundlagen kann an dieser Stelle jedoch nicht geleistet werden. Es sei dazu auf die umfassenden Arbeiten von Gruber (1992), Bartels (1993) und Roloff (2001) verwiesen.

5.3.3. Kronenvolumen und oberirdische Biomasse

Ammer (2005) identifizierte eine positive Korrelation zwischen dem jährlichen Zuwachs an Kronenvolumen und der relativen Beleuchtungsstärke. Voss (2005) stellte auch an Eichen eine Zunahme der Biomasseproduktion und des Kronenvolumens mit steigendem Lichtgenuss fest, wobei bei beiden Variablen ab einem

bestimmten Lichtwert eine Sättigung der Zunahme erfolgte. Unter einer dichten Überschirmung waren ein Großteil des Kronenvolumens und die größte Kronenausdehnung im oberen Bereich der Jungbäume konzentriert. Oberhalb von 22 % PAR befand sich der größte Durchmesser der Krone in der vertikalen Baummitte. Mit zunehmender Beschattung verlagert er sich jedoch nach oben.
Auch in diesem Punkt decken sich die Ergebnisse dieser Studie mit denen von Voss (2005). Unterhalb eines ISF von 20 % steigt die relative Höhe des vertikalen Kronenvolumenschwerpunktes rapide an (Abb. 4.22, Seite 75), bis unterhalb einer relativen Beleuchtungsstärke von 15 % auch Bäume existieren, deren größter Kronendurchmesser im obersten Kronenstratum vorkommt.

Auch hinsichtlich des Biomassewachstums decken sich die aktuellen Ergebnisse mit denen der Literatur. Das Biomassewachstum wird besonders vom Lichtregime beeinflusst (Suner und Röhrig 1980, Minotta und Pinzauti 1996, Einhorn et al. 2004). Höchste Biomassezuwächse werden stets bei maximalem Lichtgenuss geleistet, wobei die Korrelationen nach der Kulmination degressiv steigenden Sättigungsfunktionen folgen (Larcher 1994, Ammer 2000). Dabei, so hat Voss (2005) ebenfalls festgestellt, sind die Kurvenverläufe der Regressionen für die verschiedenen Pflanzenkompartimente einander ähnlich. Ammer (2000) weist jedoch darauf hin, dass sich die Kurvenverläufe hinsichtlich des Punktes maximaler Steigung erheblich unterscheiden können. Während Voss an Eichen über ein Steigen des Biomassezuwachses ab 20 % PAR und von einer Stagnation der Zunahme zwischen 30-40 % PAR berichtet, beginnt die Biomassezunahme an den Buchen in der vorliegenden Studie bereits zwischen 10-15 %. Die Stagnation kann trotz der geringen Datenmenge in diesem Lichtbereich jedoch ebenfalls zwischen 30-40 % angesetzt werden.

Die Ergebnisse von Petriţan et al. (2007) an Naturverjüngungen stellen klar, dass der Kurvenverlauf bei den Biomassezuwächsen wie schon bei Höhen- und Durchmesserzuwachs eher einem logistischen Funktionsmodell folgt.

Collet et al. (2002) bestätigten in ihrer Untersuchung von Buchennaturverjüngung unter wechselnden Überschirmungsbedingungen, dass der Kronenschlussgrad die Menge an akkumulierter Biomasse genauso beeinflusst wie die Biomasseverteilung unter den verschiedenen Bereichen des Baumes.

5.3.4. Allokationsmuster bei reduzierter Strahlung

Angesichts der Fülle der Untersuchungen zum Einfluss der Strahlung auf die verschiedenen Wachstumsparameter beklagt Ammer (2000), dass Informationen zu den Auswirkungen eines unterschiedlichen Strahlungsangebots auf die Allokation der Holzmasse praktisch fehlen. Einzig für das Verhältnis von Spross- zu Wurzelmasse lägen verschiedene Ergebnisse vor. Das Verhältnis zwischen Ast- und Stammbiomasse sei hingegen bislang vernachlässigt worden.

Unter Angabe verschiedener Quellen und mit Blick auf ihre eigenen Daten weisen Ammer (2000) und Voss (2005) auf ein steigendes Spross/Wurzel-Verhältnis bei abnehmendem Strahlungsangebot hin. Die vorliegenden Ergebnisse deuten ebenfalls auf diesen negativ gerichteten Zusammenhang hin (R_S = -0,357), wenngleich die ungleiche Verteilung der Daten die Entscheidung für ein bestimmtes Regressionsmodell nicht zuließen (Abb. 4.13, Seite 70).

Eine nahezu identische Korrelation (R_S = -0,359) besteht für das Verhältnis aus Ast- und Stammbiomasse (Abb. 4.14). Das steht jedoch im Widerspruch zu der Aussage der wenigen Quellen zu diesem Sachverhalt (Cornelissen 1993, Ammer 2000), die über eine Zunahme der anteiligen Asttrockenmasse mit steigender Lichtverfügbarkeit berichten. Ammer argumentiert: Ist das Licht der limitierende Faktor, so ist es für die Pflanze notwendig, den Photosyntheseertrag so einzusetzen, dass strahlungsreichere Räume besetzt werden können. Eine Zunahme des Höhenzuwachses sei bei abnehmender Strahlung für den Ressourcenerwerb entscheidend.

In diesem Punkt ist bei den eigenen Daten trotz gegebener Signifikanz des negativen Zusammenhanges der Anteil an erklärter Varianz sehr gering (r^2 = 0,161) und die Verteilung der Datenpunkte recht ungünstig.

Klarer wird der Zusammenhang bei der Allokation der Blattbiomasse. Abb. 4.33 (Seite 85) zeigt zwar den deutlicheren Zusammenhang zum Produkt aus Blattfläche und Lichtgenuss, doch hat die Regressionskurve bei der Korrelation zum ISF S5 einen sehr ähnlichen Verlauf. Ausgehend von einem Blattanteil von ca. 30 % des jährlichen Biomassezuwachses, steigt diese Rate, beginnend bei einer relativen Beleuchtungsstärke von knapp über 0,2 (ISF S5), mit abnehmender Lichtverfügbarkeit rapide an und erreicht in einem Einzelfall 95 %.

Bei einem stark limitierten Strahlungsangebot investieren die Buchen also deutlich stärker in die Organe, die für die Umsetzung der Lichtenergie in Biomasse verantwortlich sind - im erwähnten Extremfall sogar nahezu die gesamte jährlich produzierte Biomasse.

Die festgestellte negative Korrelation bestätigt somit auch für Buche die Beobachtung, die King (1991) an tropischen Baumarten machte. Er stellte ebenfalls fest, dass schattentolerante Jungbäume den größten Anteil ihres oberirdischen Wachstums in die Blattproduktion verlagern, sobald sie extrem beschattet sind. An Buchensämlingen stellten Burschel und Huss (1964) sowie Tognetti et al. (1995) eine Zunahme der relativen Blattbiomasse mit abnehmender Strahlung fest.

Auch Ammer (2000) postuliert, dass Pflanzen einem verringerten Strahlungsangebot am ehesten dadurch begegnen, dass sie die knappen Assimilate zur Sicherung der Produktion einsetzen. Nur so besteht für sie die Möglichkeit, diesen Lichtmangel auszugleichen bzw. ihn überhaupt zu überleben. Ammer erklärt damit das veränderte Spross/Wurzel-Verhältnis.

Die verstärkte Allokation in die Astbiomasse ist vor diesem Hintergrund gut erklärbar, denn die Äste sind das Trägerorgan für die Blätter. Ebenso weist die bereits erwähnte höhere Empfindlichkeit des Durchmesserwachstums gegenüber

reduziertem Lichtangebot nicht auf eine Verstärkung der Allokation in die Stammbiomasse hin.

Es kann jedoch vermutet werden, dass ein Baum, dessen potentieller zukünftiger Wuchsraum durch Konkurrenten reduziert zu werden droht, eher in die vertikale Eroberung zusätzlichen Kronenraums und damit in die Stammbiomasse als in die Astbiomasse investiert. Die Frage der bevorzugten Biomasseallokation in Stamm- oder Astbiomasse könnte somit durch den Grad der lateralen Beschattung determiniert sein. Auch Collet et al. (1998) nehmen dies an. Diese Studie liefert jedoch keinen Hinweis auf einen derartigen Zusammenhang. Festgehalten werden kann nur, dass die Bäume mit einem ISF-Wert unter 0,2 im Durchschnitt einem mittleren bis eher geringen intraspezifischen Konkurrenzdruck ausgesetzt waren. Der Mittelwert des Hegyi-Indizes betrug 1,4 und der mittlere Konkurrenzwinkel 60,4°. Das mag als Anhaltspunkt für zukünftige vergleichende Studien dienen.

Hinweise bestehen auf unterschiedliche Allokationsmuster verschiedener Baumarten. Lichtbedürftige Arten investieren demnach eher in das Höhen- und damit das Stammwachstum als schattentolerante Arten. Belege dafür finden sich bei King (1991) für tropische Arten, Bonosi (2006) für die Esche gegenüber der Buche und Petriţan et al. (2007) für Esche und Ahorn gegenüber der Buche.

Ein anderer Weiser für die vermehrte Investition in die Assimilationsorgane bei verstärkter Beschattung ist z. B. die *Leaf Area Ratio*. Deren Analyse entlang des Lichtgradienten orientiert sich an der Veränderung der Blattfläche in Relation zur Trockenmasse der Pflanze.

Bonosi (2006), der eine natürliche, maximal 220 cm hohe Verjüngung aus Buche, Esche und Bergahorn untersuchte, beschrieb den Zusammenhang von *Leaf Area Ratio* der Buchen und dem Strahlungsangebot mit einer Parabel zweiter Ordnung. Bei ca. 55 % der Strahlung fand er ein Minimum, nach dessen Erreichen die *Leaf Area Ratio* wieder leicht anstieg. Ein solcher Kurvenverlauf wäre auch für die eigenen Ergebnisse (Abb. 4.30, Seite 82) vorstellbar gewesen ($R = 0{,}707$; $r^2 = 0{,}500$). Da jedoch nur wenige Werte im entscheidenden mittleren Lichtbereich lagen, wurde das Modell nicht verwendet. Dennoch wird deutlich, dass mit zunehmender Beschattung die Biomasse zur Vergrößerung der Blattfläche eingesetzt wird. Stancioiu und O'Hara (2006b) berichten ebenfalls von einer Abnahme der *Leaf Area Ratio* bei steigendem Lichtgenuss.

Die Buchen vergrößern zudem unter geringeren Lichtbedingungen ihre Effizienz bei der oberirdischen Raumeroberung. Der Anteil an eingenommenem Kronenraum unter Einsatz einer Einheit Biomasse ist im geringen Lichtbereich am höchsten (Abb. 4.25). Das Regressionsmodell beschreibt auch hier mit abnehmendem ISF zunächst ein recht konstantes Verhältnis, das allerdings schon bei Strahlungsverhältnissen von etwas über 30 % der Freilandbedingungen den deutlichen Anstieg aufweist. Kozovits et al. (2005) berechneten die oberirdische Raumeroberung als Ertrag (in Form des eingenommenen Kronenvolumens) geteilt durch die Kosten in Form der investierten Biomasse in Stamm-, Ast- und

Blattmasse. Ihre Ergebnisse, wie auch die von Voss (2005), verdeutlichen, dass die Fähigkeit, unter minimalem Einsatz von Energie einen größtmöglichen Wuchsraum zu erschließen, insbesondere für junge Bäume in intraspezifischer Konkurrenz ein entscheidender Vorteil ist.

Die Relation zwischen einem bestimmten Maß an Kronenvolumen und einem minimalen Biomasseeinsatz impliziert aber auch eine geringe Kronendichte. Für Bonosi (2006) ist dies jedoch auf Baumebene nur ein weiterer Mechanismus der Anpassung an herrschende Lichtbedingungen. Er zitiert Givnish (1988), wenn er zwei verschiedene Kronentypen beschreibt: (a) dichte und enge Krone mit einem hohen Grad an Überlappungen von Blättern und (b) offene und weite Krone mit weniger Blattüberlagerungen. Horn (1971) prägte dafür die Begriffe Mono- und Multilayer. Ein Architekturmodell mit nur einer einzigen Lage an Blättern (Monolayer) würde das Minimum an Selbstbeschattung erreichen und damit die Lichtausnutzung im Schatten maximieren. Der Rotbuche wird nachgesagt, als junger Baum unter Altholzschirm die typischen Strukturen eines Monolayers aufzuweisen und erst bei Freistellung oder zunehmender Einstrahlung zu beginnen, die Blätter vielschichtig anzuordnen (Roloff 2001). Als Messwert für die Vielschichtigkeit bei der Blattanordnung dient der *Leaf Area Index* (LAI). Larcher (1994) gibt ihn für sommergrüne Laubwälder mit durchschnittlich LAI = 5 an. Damit wäre die Gesamtblattfläche des Baumes fünfmal so groß wie die von der Krone überspannte Grundfläche. Die Daten dieser Studie bestätigen die Aussage von Roloff (2001). Der LAI steigt ausgehend von einem fast perfekten Monolayer (LAI_{Min} = 1,06) im gering beleuchteten Bereich bis zu einem durchschnittlichen LAI-Wert > 6 (Regressionsfunktion) im Bereich des Femelloches, wobei auch beim LAI ein Sättigungsverhalten zu beobachten ist (Abb. 4.28).

Blattanzahl, Blattmasse und Blattfläche, die die photosynthetische Kapazität eines Baumes repräsentieren (Stancioiu und O'Hara 2006a), nehmen in der vorliegenden Untersuchung wie alle wachstumsbezogenen Parameter mit zunehmender Strahlungsstärke zu. Zahlreiche Autoren haben vergleichbare Beobachtungen gemacht (Suner und Röhrig 1980, Bonosi 2006, Stancioiu und O'Hara 2006b). Abb. 4.26 zeigt auch einen deutlichen Sättigungsverlauf für die Gesamtblattfläche in Abhängigkeit vom Lichtangebot.

Umgekehrt steigt die spezifische Blattfläche (SLA) mit abnehmender Strahlungsintensität ab einem Grenzwert von etwa 30 % ISF S5 sehr steil an (Abb. 4.29). Diese Beobachtung machen u. a. auch Suner und Röhrig (1980). Hier zeigt sich erneut, diesmal auf Blattebene, die Anpassungsfähigkeit der Buchen an ungünstige Lichtbedingungen. Zur Assimilatgewinnung ist die Blattfläche unabdingbar. Statt bei begrenzter Biomasseproduktion weniger Blätter zu produzieren, ändert sich nur der anatomische Blattaufbau. Unter größtmöglicher Wahrung der Blattfläche reduziert sich die Blattstärke. Das Palisadenparenchym wird kürzer und besteht nur noch aus einer Zellschicht (Sitte et al. 1998). Ebenso reduziert sich das Schwammparenchym. Die Blätter werden dünner.

Eine weitere Anpassungsstrategie an reduzierte Lichtbedingungen ist die Verlagerung der Blattfläche. Wie schon Voss (2005) feststellte, steigt der Anteil der an der Baumspitze konzentrierten prozentualen Blattfläche mit zunehmender Beschattung deutlich an. Tabelle 4.4 auf Seite 80 gibt für die dunkelste Lichtklasse ebenfalls den höchsten Anteil an der Gesamtblattfläche im Stratum S5 an.

Tragendes Element für die Blätter und damit hauptsächlich verantwortlich für deren Anordnung und Verteilung sind die Äste. Deren Anzahl, Anordnung und Wuchsrichtung bestimmen letzten Endes auch die Kronenform. Dennoch soll auf die Astparameter ausführlicher erst an späterer Stelle im Zusammenhang mit der Qualität der jungen Buchen eingegangen werden.

Hier sei nur kurz erwähnt, dass bei der Ausrichtung der Äste keine bevorzugte Himmelsrichtung festgestellt worden ist; auch nicht im Zusammenhang mit der aus den verschiedenen Richtungssektoren der *Fisheye*-Fotos ermittelten *Gap Fraction*. Zu einem vergleichbaren Ergebnis kommt auch Voss (2005), die in der gleichmäßigen Verteilung der Äste in die verschiedenen Kompassrichtungen eine weitere Strategie zur Vermeidung von Selbstbeschattung sieht.

Für den Astabgangswinkel konnte gleichfalls kein signifikanter Zusammenhang mit dem Lichtgenuss (ISF S5) festgestellt werden, wobei nur die Werte des jeweils stärksten Astes aus dem zweiten und dritten Kronenstratum in diese Analyse eingingen. Voss (2005), die an ihren jungen Eichen die Astabgangswinkel aller Äste 1. Ordnung erfasste, kam zu einem vergleichbaren Ergebnis. Nur für Bäume, die auf der Freifläche wuchsen, notierte sie an der Baumspitze signifikant steilere Äste. Auch Leder (1993) konnte an achtjährigen Buchen unter lockerem bzw. dichtem Weichlaubholzschirm für die Häufigkeit von Steilästen keine Abhängigkeit vom Lichtangebot feststellen.

Honda und Fisher (1978) fanden heraus, dass gemessene Astwinkel nahezu identisch mit dem theoretischen Astwinkel sind, der zu einer maximal effektiven Blattfläche führen würde.

Zahlreiche Autoren (z. B. Ehleringer und Werk 1986, King 1997, Hagemeier 2002, Voss 2005) machen deutlich, dass neben der Anordnung und Orientierung der Äste für eine optimale Lichtausnutzung und der daraus resultierenden Photosyntheseleistung selbst die Ausrichtung und Winkelstellung der einzelnen Blätter eine entscheidende Rolle spielen. Auf diesen Aspekt geht diese Studie nicht ein.

Entsprechend der oben angeführten Kronentypen nach Givnish (1988) ermöglicht Typ (b) aufgrund seiner spärlicheren Verzweigungen ein tieferes Eindringen der Lichtstrahlen in die Krone (Russel et al. 1989). Diesen Sachverhalt bestätigt Abb. 4.1 (Seite 61). Im Umkehrschluss erklärt sich dadurch auch die signifikante negative Korrelation zwischen der durchschnittlichen Blattfläche in den Straten S4 und S5 mit dem Lichtwert aus S1 (Tabelle 4.3, Seite 78). Hier hat nicht der Strahlungswert Einfluss auf die Blattgröße, sondern je größer die Blätter an der Baumspitze sind, desto geringer ist die Strahlungsintensität, die an der Kronenbasis gemessen werden kann.

Durch die aufgelockerte Kronenstruktur reduziert sich gleichfalls das Potential an Selbstbeschattung, was ebenfalls als Anpassung an schattige Bedingungen angesehen werden kann (Cornelissen 1993). In dieser Studie entsprechen vor allem Buchen mit einem Lichtgenuss von unter 15 % ISF S5 diesem Kronentyp (vgl. Abb. 4.23).

Bonosi (2006) fasst diesen Zusammenhang allgemeiner, indem er klarstellt, dass eine veränderte Ressourcenverfügbarkeit stets zu einer proportionalen Zunahme bei der Anreicherung von Trockensubstanz des Teils der Pflanze führt, der für die Eroberung der wachstumslimitierenden Ressource verantwortlich ist. Somit kann die strahlungsabhängige Biomasseverteilung zu Lasten der Wurzel leicht kompensiert werden, sobald eine wurzelspezifische Ressource limitierender für das Wachstum wird als das Licht.

So stellen Tilman und Wedin (1991) fest, dass Grasarten auf stickstoffarmen Böden der unbeeinflussten Prärie Minnesotas einen größeren Anteil des Biomassezuwachses in das Wurzelwachstum investierten, wobei allerdings Unterschiede zwischen den Arten bestanden. Arten, die diese Fähigkeit der veränderten Allokationsstruktur nur in geringem Maße besaßen, waren konkurrenzschwächer und wurden mit der Zeit verdrängt. In verschiedenen früheren Studien hatte Tilman festgestellt, dass in seinem Untersuchungsgebiet (Cedar Creek Natural History Area) Stickstoff die einzige limitierte Ressource der Gräser war (zitiert nach Tilman 1994).

Hunt und Lloyd (1987) berichten gleichfalls, dass in der Nährstoffversorgung limitierte Pflanzen vermehrt in das Wachstum der unterirdischen Organe investierten.

5.4. Unterirdisches Wachstum

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit erhobenen Daten über die Verteilung der Wurzeln in den verschiedenen Tiefen sind teilweise bereits durch Schmid et al. (2005) veröffentlicht worden. Sie weisen darauf hin, dass das Herzwurzelsystem der Buchen deutlich tiefere Bodenschichten erreicht als die oberflächennahen konkurrierenden Wurzeln der überschirmenden Altfichten.

Nach Kreutzer (1961) bilden Buchen im Jungwuchsstadium häufig eine Pfahlwurzel aus. Erst durch die nachträgliche Bildung und das stärkere Wachstum von Seitenwurzeln entwickelt sich das Herzwurzelsystem und die ursprüngliche Pfahlwurzel ist später morphologisch kaum noch zu erkennen. Die einzelne besonders tief reichende Wurzel fand sich auch in dieser Studie. Die Buchen erreichten Tiefen bis maximal 80 cm. Schmid und Kazda (2001) fanden heraus, dass Buchen ein schnelleres Grobwurzelwachstum als die Fichten aufweisen. Dadurch erschließen sie sich die tieferen Bodenschichten vergleichsweise zügig.

Die Altfichten, so beobachtete es auch Kreutzer (1961), bildeten im Unterboden hingegen keine Wurzeln aus. Nach Kalela (1950) und Wittkopf (1995) – beide zitiert nach Ammer (2002) – konzentrieren Fichten ungefähr 75 % ihrer Feinwurzelbiomasse auf die oberen 30 cm des Bodens.

Bolte und Villanueva (2006) machen bei Buchen und Fichten gleichfalls eine derartige zweiteilig geschichtete Trennung der Durchwurzelungsräume aus.

Bereits Ladefoged (1946b, zitiert nach Kreutzer 1961) hat festgestellt, dass das Wurzelwachstum der Buchen ein besonders hohes Reaktionsvermögen in Bezug auf sich ändernde Standortbedingungen (z. B. Bodentemperatur, Bodenfeuchte) aufweist. Die Fichte sei dagegen benachteiligt, da ihr Wuchsrhythmus sich deutlich weniger an die Umweltgegebenheiten anpasst. Auch Bolte und Villanueva (2006) beobachteten an Buchen eine deutlich flexiblere Strategie bei der Erschließung neuer Bodenbereiche, insbesondere in Bodenschichten, die in geringerem Maße durch Konkurrenten besetzt sind.

Insofern wird die Wurzelkonkurrenz durch die Schirmfichten schwerpunktmäßig in den ersten Jahren nach der Pflanzung der Buchen von Bedeutung sein, also wenn deren Wurzelsystem noch auf den oberen Bodenhorizont beschränkt ist. Dass sie dann aber einen deutlichen, nachteiligen Einfluss auf das Wachstum der jungen Bäume hat, konnte Ammer (2002) für Buchensämlinge unter Fichtenschirm durch das Anlegen von Trenngräben nachweisen. Nach dem Ausschalten der Wurzelkonkurrenz konnte er einen wachstumssteigernden Effekt für die Verjüngung beobachten. Lüpke und Hauskeller-Bullerjahn (2004) machten für Buchen und Eichen auch unter einem Buchenaltholzschirm ähnliche Feststellungen.

Bonosi (2006) berichtet – wenn auch mit Verweis auf seinen geringen Datenumfang – über eine schwach signifikante parabolische Korrelation der Wurzelbiomasse mit der relativen Beleuchtungsstärke. Auch Burschel und Huss (1964) stellen eine deutliche Abnahme der Wurzeltrockensubstanz bei zunehmender Beschattung fest. Sie streichen besonders heraus, dass diese Abnahme sehr viel stärker erfolgt als beim Sprossgewicht.

Das entspricht den bereits diskutierten Ergebnissen des Quotienten aus ober- und unterirdischer Biomasse. Ein mit abnehmendem Lichtangebot steigendes Spross/Wurzel-Verhältnis bedeutet im Umkehrschluss eine Abnahme der anteiligen Wurzelbiomasse.

5.5. Der Baum als Gesamtsystem

Zwischen nahezu allen Wachstums- und Biomasseparametern der verschiedenen Pflanzenteile bestehen hohe signifikante Zusammenhänge. Auch Roloff (1989) stellte bei seiner Vollbaumanalyse an 2 m hohen Buchen hochsignifikante Korrelationen zwischen sämtlichen Kronen- und Wurzelparametern fest. Seine Schlussfolgerung, dass der gesamte Baum als eine Einheit und ein gesteuertes System angesehen werden muss, kann ausdrücklich bekräftigt werden. Untersuchungen zum Wachstum eines Astes in Relation zum Lichtgenuss dieses Astes werden wenig zielführend sein. In der vorliegenden Arbeit waren es bspw. die Blattflächen der unteren beiden Kronenschichten, die deutlich höhere Korrelationen mit dem Lichtgenuss der obersten Kronenschichten aufwiesen, als mit dem, der in derselben Kronenschicht ermittelt wurde (Tabelle 4.3, Seite 78). Die Ursache für die teilweise höhere Korrelation zum ISF der zweithöchsten Schicht S4 als zum ISF S5 wird in der größeren Blattfläche von S4 und dem damit größeren Produkt aus ISF und Blattfläche vermutet. So weist dann auch der Spearman-Korrelationskoeffizient für alle Parameter der Wachstumsanalyse (Tabelle 4.5, Seite 83) gegenüber dem Licht-Blattflächenprodukt der Schicht S4 stets höhere Werte auf als mit demjenigen von S5. Am höchsten ist die Korrelation jedoch zur Summe des Licht-Blattflächen-Produkts für den gesamten Baum. Für die Wachstumsintensität (NAR) und die Wachstumseffizienz (RWR) erreicht diese Korrelation den höchsten Wert. Somit wird deutlich, dass nicht nur der Lichtgenuss der Lichtkrone entscheidend ist, der Baum als Gesamtheit ist Empfänger der Strahlungsenergie und setzt sie in der Biomasseproduktion aller Kompartimente um. Dass er dabei, unabhängig vom Standort, nur einen optimalen Gleichgewichtszustand anstrebt, wie Roloff (1989) vermutet, ist zu bezweifeln. Wahrscheinlicher ist, dass die Versorgung mit den für ein optimales Wachstum erforderlichen Ressourcen das Biomasseallokationsmuster entscheidend beeinflusst. Das Kompartiment, das für die „Beschaffung" der derzeit am stärksten limitierten Ressource „verantwortlich" ist, wird vermutlich im Wachstum stärker gefördert (vgl. Kapitel 5.3.4. und Bonosi 2006).

Häufig wird insbesondere von Forstwissenschaftlern die Relative Wachstumsrate (RWR) oder Wachstumseffizienz verwendet, wenn das Wachstum von Pflanzen unterschiedlicher Ausgangsgröße miteinander verglichen werden soll (z. B. Brand 1990, Hunt und Cornelissen 1997). Nach Stancioiu und O'Hara (2006a) nimmt die gesamte Wachstumseffizienz mit dem Licht zu. South (1995) weist aber darauf hin, dass die mit dieser Größe implizierte Annahme, dass das Baumwachstum einen konstanten Prozentsatz von der Ausgangsgröße ausmacht, nicht zutreffend ist. Vielmehr verändert sich der Prozentsatz mit zunehmender Größe des Baumes. Vergleiche, welcher Baum effizienter im Wachstum ist, führen demnach mit der RWR nach Meinung von South zu missverständlichen Ergebnissen.

Nach Evans (1972) stellt die Relative Wachstumsrate zwar einen sehr wertvollen Gesamt-Index des Pflanzenwachstums dar. Er weist jedoch ebenfalls darauf hin, dass es in der Natur der Sache liegt, dass die komplexe Herleitung unvermeidlich die nicht minder komplexe ontogenetische Drift mit all den daraus folgenden Problemen der „Entwirrung" der Wirkungsweise der zahlreichen beeinflussenden Faktoren beinhaltet.

Insofern erscheint ein Vergleich dieser Daten höchstens mit denen gleich großer Pflanzen sinnvoll. Es sind jedoch aus der Literatur keine Daten über ähnlich hohe Bäume bekannt.

5.6. Qualität der Buchen

5.6.1. Neigung des Terminaltriebs

Schulz machte bereits 1961 deutlich, dass zur qualitativen Einschätzung so genannter Zukunftsbäume die Stämme mindestens eine Stärke von einem Drittel ihres zukünftigen Mindestzieldurchmessers erreicht haben müssen. Auf mindestens 4 m Länge sollen die Stämme mit 15 cm BHD (im Laubholz) ihre Äste überwallt haben. Von diesem Wuchsstadium sind die Buchen dieser Untersuchung noch weit entfernt. Matthes (1998) weist darauf hin, dass die zukünftige qualitative Entwicklung junger Buchen kaum vorhergesagt werden kann. Die Qualitätserfassung in Jungbeständen kann daher nur einen Hinweis auf das qualitative Potential eines Bestandes geben.

Praktische Beobachtungen, die darauf hindeuten, dass die Überschirmungsdichte die Wuchsform der jungen Bäume unter dem Kronendach beeinträchtigt, sind zahlreich. Doch die wissenschaftlichen Belege dafür sind rar (Lüpke 2005). Insbesondere Analysen über einen weiten Lichtgradienten sind selten. Die meisten Untersuchungen eines bestimmten Qualitätsparameters finden ausschließlich im geringen Lichtbereich des Waldes oder nur auf Freiflächen statt.

Bei besonders dichter Überschirmung berichten Autoren häufig und seit langem über das plagiotrope Wachstum junger Buchen (Burschel und Huss 1964, Burschel und Schmaltz 1965, Weihs und Klaene 2000, Mountford et al. 2006).

Die Reaktion junger Buchen auf zunehmende Beschattung war auch das Thema der Arbeit von Gralla et al. (1997). Ihre Untersuchung fand ebenfalls im Harz statt und deckte einen Lichtgradienten von 1-40 % Diffuse Site Factor ab. Sie stellten einen sehr deutlichen Zusammenhang der Neigung des letztjährigen Terminaltriebs mit dem Strahlungsangebot fest. Die von ihnen berechnete Regression nähert sich mit zunehmender Strahlungsintensität bei 20-30 % DIFFSF einem minimalen Abweichungswinkel von ca. 10°. Für ihre höchste Strahlungsklasse (der maximale DIFFSF-Wert betrug 38,6 %) konnten sie bereits wieder einen leichten Anstieg des durchschnittlichen Abweichungswinkels feststellen. Damit ähnelt der von ihnen festgestellte Kurvenverlauf überraschend

deutlich dem der Regressionskurve in Abb. 4.5 (Seite 64). Nur Abweichungswinkel > 40° haben Gralla et al. (1997) nicht gemessen. Aufgrund der vergleichsweise einfachen Ermittlung und der sehr strengen Korrelation mit der Strahlungsintensität empfehlen Gralla et al. den Forstpraktikern die Verwendung der Neigung des letztjährigen Terminaltriebs als Indikator für die Beschattung.

Lüpke (2005) fasst die Ergebnisse zahlreicher Publikationen zusammen (z. B. Richter und Leder 1990, Leder 1993, Schmitt et al. 1995, Wagner und Müller-Using 1997, Weihs und Klaene 2000) und stellt ebenfalls fest, dass die Beziehung zwischen dem Ausmaß der Sprossneigung bei Zunahme des Strahlungsangebots nicht linear ist. Der Abweichungswinkel des Sprosses bzw. des Terminaltriebs von der Vertikalen nimmt immer stärker zu, sobald die Lichtintensität unter 10 % (Wagner und Müller-Using 1997) oder unter 15 % sinkt (Schmitt et al. 1995). Nach Lüpke gibt es einen Grenzwert, der zwischen diesen beiden Werten liegt. Das entspricht den Ergebnissen der aktuellen Untersuchung, nach denen Abweichungswinkel von über 40° nur unterhalb von 15 % ISF auftreten (Abb. 4.5).

Auch bezüglich der Terminaltriebneigung kann die bereits in Zusammenhang mit dem Kronenvolumen und der Biomasseverlagerung formulierte Aussage ausdrücklich wiederholt werden: Der Terminaltrieb ist das Haupt"bauteil", mit dem die Anpassung an ungünstige Lichtbedingungen im Wachstum umgesetzt wird. Die Tatsache, dass der größte Kronendurchmesser in der obersten Baumschicht nur unterhalb dieses ISF-Wertes auftritt, ist gleichfalls in der Terminaltriebneigung begründet.

Das Vermögen der Buchen, ihren Terminaltrieb horizontal wachsen zu lassen, macht den Großteil ihrer Schattentoleranz aus (Kazda et al. 2005). Erst dadurch können sie ihre Blattfläche bei gleichzeitiger Vermeidung von Selbstbeschattung erweitern. Sie optimieren so die Lichtausnutzung und können auch unter extrem niedrigen Lichtbedingungen überleben. Aber Kazda et al. (2005) betonen, dass sich unter derartigen Bedingungen Kronenform und Pflanzenqualität nachteilig entwickeln.

5.6.2. Proleptische Triebbildung

Für relative Lichtintensitäten oberhalb von 60 % stellte Sagheb-Talebi (1996) eine klare Zunahme von unerwünschtem Astwachstum fest, z. B. Verzwieselungen und besenförmige Baumspitzen. Le Tacon beklagte bereits 1985 die geringe Qualität von Buchen, die auf der Freifläche gepflanzt wurden. 80 % von ihnen wiesen ein erhöhtes Astvorkommen, geringe Apikaldominanz und Verbuschungstendenzen auf. Den Grund dafür fand er im Austrieb von Herbsttrieben bzw. deren frostbedingtem Absterben.

Neben den regulären Jahrestrieben beobachtete Le Tacon (1985) auf einer Versuchsfläche im Nordosten Frankreichs sowohl einen schwächeren Trieb gegen Ende des Sommers, als auch einen dritten, „verspäteten" Herbsttrieb. Häufiger

wird neben dem regulären Frühjahrstrieb zumindest ein zusätzlicher Trieb registriert, der in der Regel aufgrund seines Auftretens um den 24. Juni (= Johanni) herum als Johannistrieb bezeichnet wird.

Gruber (1987) weist darauf hin, dass es sich bei diesen keineswegs um verspätete, sondern vielmehr um verfrühte Triebbildungen handelt. Während bei regulären Trieben alle Blattanlagen bereits in der Winterknospe zahlenmäßig prädeterminiert sind, entstehen die richtigerweise als proleptische Triebe (griechisch: προληπτικός (proleptikos) = vorgezogen) bezeichneten Sprosse noch in der gleichen Vegetationsperiode der Regulärtriebstreckung. Meist entwickeln sie sich aus terminalen oder zumindest subapikalen Knospenanlagen.

Ursächlich für die Entstehung der Johannistriebe ist nach Gruber (1987) die klimatische Entwicklung zu Jahresbeginn. Ein kühles Frühjahr hemmt das reguläre Wachstum und verlagert das Längenwachstum zugunsten der Johannistriebe. Mitunter ist die Verlagerung sogar so stark, dass selbst die Johannistriebe zur sylleptischen Verzweigung angeregt werden. So mag es auch klimatisch bedingt sein, dass für 2003 nur sehr vereinzelte Johannistriebe erfasst wurden.

Häufig bleibt nach Le Tacon (1985) den proleptischen Trieben vor Ende der Vegetationsperiode jedoch nicht ausreichend Zeit, ihre Entwicklung abzuschließen. Das Meristem der noch unvollständig verholzten Triebe wird durch die ersten Fröste geschädigt und der Trieb stirbt ab. Als Konsequenz daraus entwickeln sich im kommenden Jahr mitunter mehrere neue Terminaltriebe aus den höchstgelegenen lebenden Seitenknospen, was zu den erwähnten Verbuschungen führt.

Die Fähigkeit proleptische Triebe auszubilden, kann insofern sowohl ein Vor- als auch ein Nachteil für den jungen Baum sein. Ein zusätzliches Spitzentriebwachstum im selben Jahr ermöglicht eine schnellere Eroberung des umkämpften Wuchsraums und erhöht die mögliche Biomasseproduktion durch zusätzliche Blattfläche. Stirbt der Trieb infolge früher Fröste oder aus sonstigen Gründen jedoch ab, ist das reguläre rhythmische Kronenwachstum zumindest zwischenzeitlich unterbrochen (Gruber 1992), und der Baum gerät im Kampf um zusätzlichen Wuchsraum gegenüber potentiellen Konkurrenten ins Hintertreffen. Aufgrund der vermehrten Bildung neuer Terminaltriebe entstehen gegeneinander konkurrierende Zwieseläste. Im Konkurrenzkampf gegen benachbarte Bäume kann diese Eigenkonkurrenz als fehlgeleitete Biomasseinvestition angesehen werden. Qualitätsmindernd ist zu bewerten, dass aus diesem Wachstumsverhalten ein großer Anteil von Tiefzwieseln entsteht (Leder 1993).

Neben Le Tacon (1985) führt auch Verdu, zitiert nach Richter (1993), die geringe Qualität junger Buchen auf Freiflächen in Spanien auf die Schädigung unzureichend entwickelter proleptischer Triebe zurück. Roloff (1986) widerspricht Le Tacon (1985) jedoch deutlich. Er unterscheidet zwischen sich vollständig und sich unvollständig entwickelnden proleptischen Trieben. Infolge der geringfügigen Internodienstreckung weisen Letztere Knospenhäufungen auf, wobei die Seitenknospen sehr kräftig entwickelt sind. Die Triebanlage der Terminalknospe der

unvollständig gestreckten Sprosse ist hingegen nur durch eine geringe Zahl von Knospenschuppen geschützt und daher sehr empfindlich gegen Austrocknung oder biotische Schaderreger. Die Gipfelknospen sterben häufig bereits während des Spätsommers ab. Im Folgejahr kommt es dann zu den erwähnten Verbuschungen und zur Zwieselbildung.

Für die vorliegenden Ergebnisse kann das beschriebene Wachstumsverhalten auch als mögliche Erklärung für die festgestellte leichte Zunahme der Neigung des letztjährigen Terminaltriebes bei Lichtwerten über 50 % ISF dienen. Ein sich aus einer Seitenknospe oder einem zunächst plagiotropen Seitenspross entwickelnder Terminaltrieb wird in den ersten Jahren seines Wachstums keine vollständig lotrechte Wuchsrichtung aufweisen können. Auch wenn damit nicht die Neigung der gesamten derzeitigen oder gar zukünftigen Stammachse verursacht sein wird, wird die Stammqualität aufgrund des Zickzack-Wuchses zumindest für einige Jahre beeinträchtigt sein. Ursächlich für die Terminalsprossneigung unter Freilandbedingungen könnte die Johannistriebbildung in zurückliegenden Jahren sein.

5.6.3. Ästigkeit

Auch wenn Bonosi (2005) keinerlei signifikante Beziehung zwischen der Asthäufigkeit (Astanzahl pro Einheit Stammhöhe) und der Strahlung feststellen konnte, berichten andere Autoren (z. B. Kurth 1946, Le Tacon 1985, Leder und Weihs 2000, Leder und Hillebrand 2001) von einer erhöhten Häufigkeit dicker Äste mit zunehmender Lichtstärke. Doch auch für das andere Extrem, die stärker beschatteten Bestände, wird von geringer Qualität berichtet: Stancioiu und O'Hara (2006b) stellten eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für Stammgabelungen an Buchen bei einem Lichtangebot von weniger als 20 % der Freilandhelligkeit fest.

Die aktuellen Daten ergeben auch für diesen Parameter eine Funktion mit einem Minimumwert. Der relative Astdurchmesser weist mit zunehmender Lichtstärke eine größere Variation auf, da die Äste vereinzelt im Durchmesser zunehmen (Abb. 4.6 auf Seite 65: keine Signifikanz für die steigende Kurvenhälfte). Unter geringen Lichtbedingungen sind Äste zwar dünner, doch da der Stammdurchmesser sich ebenfalls kaum entwickelt, ergibt sich aus dem Quotienten beider Werte gleichfalls ein ebenso hoher relativer Astdurchmesser wie bei den besonders stark dimensionierten Ästen im Bereich des Femellochs.

5.7. Kompromiss zwischen Wachstum und Qualität

Um den Forstpraktikern die Frage nach dem optimalen Überschirmungsgrad (= Lichtbedingungen) zu beantworten, muss nach dem besten Kompromiss zwischen raschem Höhenwachstum und günstiger Qualitätsentwicklung gesucht werden.

Mountford et al. (2006) kombinieren bereits Wachstums- und Qualitätsparameter, wenn sie berichten, dass junge Buchen abgeflachte Baumspitzen und langsames Wachstum aufweisen, solange sie mit einer Strahlungsintensität von 20 % der Freilandhelligkeit oder weniger auskommen müssen.

Aus den eigenen Ergebnissen ergibt sich, dass für das Pflanzenwachstum beim ISF ein Mindestwert von 30 % anzusetzen ist. Die Regressionen aller Wachstumsparameter weisen bei dieser Lichtintensität bereits die Sättigung auf. Auch der Grenzwert für ein stark verändertes Allokationsmuster bei der Biomasseproduktion liegt zumindest knapp unter diesem Lichtwert. Eine intensivere Strahlung wäre für das Pflanzenwachstum allerdings kein Nachteil. Deswegen wird der Wert von 30 % als Mindestmaß für ein optimales Wachstum junger Buchen bezeichnet. Ein ISF-Wert von 15 % kann hingegen als allgemeiner Grenzwert des Wachstums angesehen werden. Bäume, die weniger als 15 % des Freilandlichtes konsumierten, wuchsen kaum noch. Diese Bäume investieren ihre Biomasse nahezu vollständig in den Erhalt ihrer Lebensfunktionen. Sie überleben, harren aus und "hoffen" auf den Ausfall eines Schirmbaumes. Collet et al. (2001) berichten über derart stark beschattete Buchenjungwüchse. Unmittelbar nach Öffnung des Kronendaches stiegen deren Zuwachsraten deutlich an.

Ein dritter Grenzwert der Strahlung, der des Existenzminimums für junge Buchen, ließ sich anhand der eigenen Daten nicht ausweisen. Er liegt unterhalb des gemessenen Minimalwertes von 12,9 % ISF. Collet et al. (2001) geben ihn mit 3-5 % relativer Beleuchtungsstärke an. Petriţan et al. (2007) untersuchten unter einem Buchenschirm ebenfalls die Mortalität von Buchennaturverjüngungen in Abhängigkeit vom Lichtgenuss. Ein ISF-Wert größer als 15 % sicherte allen Jungbuchen das Überleben. Bei ISF = 10 % betrug die Mortalitätswahrscheinlichkeit innerhalb von drei Jahren ebenfalls nur 0,03. Erst ein ISF von 5 % führte zu einer deutlich gestiegenen Absterberate. Ein Drittel aller untersuchten Buchen konnte unter derart dunklen Bedingungen nicht überleben.

Der optimale ISF-Wert für ein aufrechtes Wachstum des Terminaltriebes wurde in Abb. 4.5 (Seite 64) bei 30 % ermittelt und die geringste Häufigkeit von dicken Ästen wurde bei 40 % ISF festgestellt (Abb. 4.6). Bei beiden Parametern ist der Anstieg der Regressionsfunktion, und damit eine raschere Qualitätsabnahme, in Richtung hellerer Bedingungen weniger stark ausgeprägt als in Richtung der abnehmenden Strahlungsintensität. In Kombination mit dem Wachstum kann daher ein ISF von 40 % als optimaler Kompromiss zwischen raschem Wachstum und günstiger Qualitätsentwicklung angesehen werden (vgl. Abb. 5.2).

Abb. 5.2. Buchen der Versuchsfläche Clausthal 1100 (von links nach rechts):
Buche bei ISF S5 ≈ 70 %: kräftiges Wachstum, starke Äste, Verbuschung an der Baumspitze, Tendenz zur Zwieselbildung, Zickzack-Wuchs
Buche bei ISF S5 ≈ 40 %: schlanker und gerader Stamm, feinastig – „Qualitäts-Buche"
Buche bei ISF S5 ≈ 15 %: schwaches Wachstum, Tendenz zur trichterförmigen Krone, plagiotropes Wachstum

Ausgerechnet für einen waldbaulich interessanten Parameter, die Ansatzhöhe des ersten lebenden Astes, die der Länge des astfreien Schaftes entspricht, wurde nahe 40 % ISF ebenfalls ein Minimum ermittelt. Ein hoher Anteil der Krone an der Pflanzenhöhe fördert zwar das Wachstum, die dadurch bedingte verzögerte Astreinigung aber nicht die Qualitätsentwicklung eines Baumes.

Konkurrenz lässt sich jedoch als Resultat des Durchsetzungsvermögens der Einzelbäume im Kronenraum erfassen. Das Wuchspotential eines Baumes hängt im Wesentlichen von der Größe seiner photosynthetisch aktiven Lichtkrone ab. Entscheidend ist auch der Bedrängungsgrad durch Nachbarn, welche die Entwicklung der Krone einengen oder gar derart beeinflussen, dass sie sich zurückbildet (Schütz 1989). Untersuchungen der Kronenentwicklung junger Lärchen unter verschieden intensiver Beeinflussung durch Nachbarn haben gezeigt, dass die Entwicklung der Seitenäste sich schon deutlich reduziert, wenn der Abstand

der Äste zum Nachbarn 40 cm unterschreitet (Schönbächler 1982, zitiert nach Schütz 1989).

Der größte Anteil der Photosynthese wird an der Peripherie der Assimilationsorgane der Lichtkrone gebildet (Schütz 1989). Nach Ladefoged (1946a) leisten die zwei letzten Jahrestriebe der Fichte einen Beitrag von 80 % an der Photosyntheserate.

Bei den schattentoleranteren Arten Buche und Fichte setzt eine merkliche Reduktion des Kronenradienzuwachses erst bei einer Verzahnung von 1 m bis 2 m ein und eine Rückbildung der Krone erst ab Kronenüberlappungen von 1,2-2,7 m (Pretzsch 1992). Guericke (2001) konnte bei Buchen bis zu einer Kronenüberlappung von 80 cm positive Kronenbreitenzuwächse registrieren. Pretzsch (1992) beobachtete in seiner Untersuchung an 80jährigen Buchen, dass der Toleranzabstand, mit dem die Rückbildung der Krone bzw. der Äste einsetzt, in Reinbeständen deutlich höher war als in Mischbeständen. Daraus resultierte eine schnellere Verschiebung des Kronenansatzes im Mischbestand gegenüber dem Reinbestand. Die mittlere Geschwindigkeit der Astreinigung der Buche betrug dabei 10-40 cm/Jahr, wobei der stammaufwärts gerichtete Vorschub des Kronenansatzes nicht stetig, sondern schrittweise verlief.

Von einer qualitativen Verbesserung der Kronenmorphologie allein durch den Effekt der Konkurrenz berichten auch Fisher (1986), Bartelink (1997), Fischer (2000). Auch Sagheb-Talebi (1996) stellte einen reduzierten Kronendurchmesser bei erhöhtem Dichtstand der Buchen fest.

5.8. Konkurrenz

Es ist überraschend, dass kein signifikanter Einfluss der intraspezifischen Konkurrenz auf das Wachstum der Buchen festgestellt wurde. Oft wird berichtet, dass zumindest ein negativer Zusammenhang zwischen dem Konkurrenzdruck und dem Durchmesserwachstum besteht, selbst wenn ein Einfluss auf den Höhenzuwachs nicht nachweisbar ist (Lüpke 1991, Leder und Weihs 2000, Ammer et al. 2005). Das Höhenwachstum soll eine Förderung durch eine Verschärfung der Konkurrenz erfahren (Huss 1972). Bewirkt der Konkurrenzdruck hingegen bereits eine negative Beeinträchtigung des Höhenwachstums, so ist das ein erstes Kennzeichen dafür, dass das Überleben des Baumes gefährdet ist (Ammer et al. 2005).

Auf den Einfluss der unterirdischen Konkurrenz durch die Schirmbäume wurde bereits eingegangen. Eine Schwäche dieser Studie ist jedoch die bislang ausgebliebene Analyse der Wurzelkonkurrenz zwischen den Buchen, die unterirdische intraspezifische Konkurrenz. Gerade auf geringer nährstoffversorgten Böden ist nach Coomes und Grubb (2000) der Einfluss der Wurzelkonkurrenz beachtlich. Ammer (2002) bestätigt diese Feststellung, beschränkt ihre Gültigkeit

aber gleichzeitig auf Wachstumsbedingungen, unter denen das Licht nicht mehr die am stärksten limitierende Ressource für das Pflanzenwachstum ist. Daher kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Streuung der Wachstumsdaten bei besonders hohen Strahlungswerten auf Einflüsse der Wurzelkonkurrenz zurückzuführen ist.

In Hinblick auf die Methodik der Konkurrenzerfassung ist festzustellen, dass Holmes und Reed (1991) recht haben: Einfache *Size-Ratio*-Indizes beschreiben herrschende Konkurrenzbedingungen genauso gut oder gar besser als die komplexeren Indizes. Von den verwendeten Indizes war der selbst entwickelte Index C_6 besonders aufwendig in der Berechnung. Das einfache Höhenverhältnis der konkurrierenden Bäume (C_5 – Index nach Ammer) oder der Konkurrenzwinkel (C_3) führten aber durchgehend zu strengeren Korrelationen mit den verschiedenen Wachstumsparametern. Der Konkurrenzwinkel erwies sich einmal mehr als ein besonders „anwenderfreundlicher" Index (Linnert 2001). Er ist relativ einfach zu ermitteln und weist auch im Rahmen dieses Forschungsvorhabens die höchsten, in manchen Fällen die zweithöchsten Korrelationen mit den Wachstumsparametern auf. Der Grundsatz, dass die Konkurrenz nicht unendlich steigen kann, sondern sich maximal dem Winkel von 90° annähert, ist überzeugend. Darüber hinaus ist der Konkurrenzwinkel im Gegensatz zu den meisten anderen Indizes nicht dimensionslos. Das macht ihn praktikabler, da man sich unter einem konkreten Winkel eher etwas vorstellen kann als unter einer dimensionslosen Zahl.

5.9. Schlussbemerkung

5.9.1. Bestandesstabilität

Abschließend soll darauf hingewiesen werden, dass bei der Wahl der optimalen Überschirmungsdichte mindestens noch zwei weitere Aspekte zu berücksichtigen sind. So darf zum einen, bei aller Konzentration auf das Wachstum der Buchen, vor allem die Stabilität des Fichtenaltbestandes über den Buchen nicht unbeachtet bleiben.

Buchen mit einem ISF von 40 % weisen auf der Versuchsfläche Clausthal 1100 zwar ein gutes Höhenwachstum und einen schlanken und geraden Stamm auf, sie haben ihren Standort aber bereits am Rande des größeren Femellochs. Nach Lüpke (2005) entspricht eine relative Lichtstärke von fast 40 % einer Bestandesgrundfläche von 15 m²/ha. Dieser Wert kann nur durch einen starken Durchforstungseingriff erreicht werden. Bisher lassen sich allerdings standorts- und bestandesspezifische Grenzwerte, bei deren Unterschreitung die Bestandesstabilität gefährdet ist, nicht vorhersagen. Hier ist die Forstpraxis auf empirische Kenntnisse und Erfahrungen angewiesen.

Es kann daher nur empfohlen werden, nicht zu versuchen, die optimalen Überschirmungsbedingungen in einem einzigen Durchforstungseingriff herzustellen, sondern diesen Wert vielmehr vorsichtig und in mehreren Eingriffen mit einem zeitlichen Intervall von 4-8 Jahren anzustreben.

5.9.2. Mischungssteuerung

Durch die Wahl eines bestimmten Überschirmungsgrades lässt sich auch die Konkurrenz zwischen den gepflanzten Buchen und der oft in solchen Beständen auftretenden Fichten-Naturverjüngung steuern. Hauptziel des Buchenvoranbaus ist i. d. R. ein zukünftiger Buchen-Fichten- oder Fichten-Buchen-Mischbestand. Daher soll dieser Sachverhalt zum Abschluss zumindest erwähnt werden, selbst wenn er im Rahmen dieser Arbeit nicht erschöpfend behandelt werden kann.

Pampe (2000) fand heraus, dass die Überlegenheit der Buche im Höhenwachstum nur bis zur Strahlungsklasse von 30 % DIFFSF reicht. Oberhalb dieses Wertes fällt der jährliche Höhenzuwachs der Buchen hinter dem der Fichten zurück. Seine Ergebnisse widersprachen denen von Wagner und Müller-Using (1997), die bereits für einen DIFFSF > 15 % eine zu große Förderung der Fichtenverjüngung beklagten. Lüpke und Spellmann (1997) wiederum dokumentierten, dass die Fichten die Buchen beim jährlichen Höhenzuwachs im Lichtbereich zwischen 15-30 % relativer Strahlung zu überbieten begannen. Stancioiu und O'Hara (2006c) schlossen sich dieser Aussage an. Nach ihren Beobachtungen konnte die Buche die Fichte nur bis zu einem relativen Strahlungsangebot von bis zu 20-35 % im Höhenwettkampf übertreffen.

Kühne und Bartsch (2003) stellten in Buchen-Fichten-Mischbeständen im Solling fest, dass die Fichte in der Naturverjüngung ab einem PAR-*Site Factor* > 20 % den Höhenzuwachs der Buche erreicht. Drößler et al. (2005) fanden hingegen noch in der höchsten Strahlungsklasse (PARSF > 40 %), die in Fichtenbeständen des Hunsrücks gemessen wurden, signifikante Unterschiede im Höhenwachstum zugunsten der Buche aus Voranbau gegenüber der Fichte aus Naturverjüngung.

Die Vielfältigkeit der dargestellten Ergebnisse zum Grenzwert der Strahlung zur Mischungssteuerung macht deutlich, dass weitere Standortfaktoren (z. B. Temperatur, Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit) einen Einfluss auf diese Zusammenhänge haben.

Entsprechend aller aufgelisteten Annahmen über einen Grenzwert kann jedoch zusammenfassend davon ausgegangen werden, dass bei der empfohlenen relativen Beleuchtungsstärke von 40 % ISF die Fichte im Wachstum eindeutig bevorzugt wäre.

6. Zusammenfassung

In Europa stocken sechs bis sieben Millionen Hektar Fichtenreinbestände außerhalb des natürlichen Verbreitungsgebietes der Fichte. Die Wiederherstellung der ursprünglichen Laubmischwälder ist daher in den letzten Jahrzehnten zur bedeutendsten waldbaulichen Herausforderung auf europäischer Ebene geworden. In Deutschland stellt der niedersächsische Westharz ein typisches Beispiel für diese Entwicklung dar. An seinem Beispiel wird die historische Entwicklung der Fichten- und Buchenbestockung von der nacheiszeitlichen Einwanderung beider Arten über die 1.000-jährige Siedlungs- und Bergbaugeschichte bis zur heutigen, daraus resultierenden flächendeckenden Dominanz der Fichte ausführlich nachgezeichnet. Der Umbau dieser Fichtenforste begann mit dem 1986 initiierten „Walderneuerungsprogramm Harz", in dessen Rahmen zahlreiche Buchenvoranbauten angelegt wurden. Auf einer dieser Voranbauflächen (Clausthal 1100) wurde die vorliegende Studie durchgeführt.

Zum Zeitpunkt der Datenerhebung, d. h. nach Abschluss der Vegetationsperiode 2003, waren die überschirmenden Fichten 83 Jahre alt, die untersuchten Buchen einheitlich 16-jährig. Insgesamt wurden Daten an 70 Buchen erhoben; bei manchen Messungen bildeten nur 50 Bäume die Datengrundlage. Alle Bäume wurden in fünf Straten gleicher Höhe unterteilt und zahlreiche Messungen separat für die einzelnen Baumschichten durchgeführt.

Strahlungsmessungen erfolgten am oberen Rand jeder Schicht mithilfe hemisphärischer Fotos. Bei der Auswertung der digitalen Bilder kam die Software WinScanopy zum Einsatz. Dabei ergab sich für die Messungen an der Baumspitze ein Gradient im Strahlungsangebot von 13-71 % ISF (*Indirect Site Factor*).

Die intraspezifische Konkurrenz der Buchen wurde anhand von sieben verschiedenen Konkurrenzindizes erfasst, wobei der Konkurrenzwinkel bzw. die einfache Höhenrelation zwischen Konkurrent und Probebaum die jeweils engsten Korrelationen zu den Wachstumsparametern ergaben.

Neben der Baumhöhe, Baumlänge und dem Stammdurchmesser wurden u. a. die Längen der terminalen Jahrestriebe und die Neigung des letztjährigen Triebes gemessen. Die Erhebung der Astparameter erfolgte stratenweise. Neben der Astanzahl wurden für den jeweils stärksten Ast eines Stratums der relative Astdurchmesser, der Astabgangswinkel und das Azimut der Astwuchsrichtung festgehalten. Die Ermittlung des Kronenvolumens anhand eines Modells lieferte im Durchschnitt dreimal größere Werte als die stärker auf die individuelle Kronenform eingehenden, aber aufwändigeren Messungen. Weiterhin wurde die oberirdische Trockensubstanz, ebenfalls nach Straten getrennt sowie separat für die Ast- und die Stammbiomasse, erfasst.

Das Wurzelsystem konnte unter Einsatz der *supersonic airstream technology* zerstörungsfrei geöffnet werden. Die Erfassung des eingenommenen Bodenraumes

erfolgte äquivalent zur Ermittlung des Kronenvolumens. Auch das Wurzelsystem wurde für die Bestimmung des Trockengewichtes geerntet, wobei eine Unterscheidung in Tiefenschichten und anhand des Wurzeldurchmessers vorgenommen wurde.

Die Erhebung der Blattparameter erfolgte bereits im Sommer 2003 und ebenfalls stratenweise. Alle Blätter wurden gezählt und eine Stichprobe von 30 Blättern je Stratum zur Ermittlung der Blattflächen (WinFolia) und der Trockensubstanz entnommen.

Bei der Analyse der Ergebnisse fällt zunächst auf, dass lineare Zusammenhänge, wie sie gelegentlich bei Arbeiten unter deutlich kleinerem Lichtgradienten dargestellt werden, bei Betrachtung eines stärker variierenden Strahlungsangebots praktisch nie vorkommen.

Deutlich erkennbar war der Einfluss der verschiedenen Überschirmungsdichten auf das Wachstum der Buchen. Die Höhen variierten bspw. zwischen 182 cm und 555 cm. Auch für alle weiteren wachstumsbeschreibenden Parameter wurde eine deutliche positive Korrelation mit der Strahlungsintensität festgestellt. Die Regressionen wiesen dabei stets eine sättigende Zunahme auf.
Die Qualitätsparameter dagegen folgen in der Regression dem Verlauf einer Extremwertkurve mit einem Minimum zwischen ca. 30 % und 45 % ISF. Deutlich auffallend war das bekannte plagiotrope Wachstum der Buchen unter intensiver Überschirmung. Als Extremwert konnte hier für die Abweichung von der Lotrechten ein Winkel von 80° bestimmt werden.

Eine signifikante Zunahme der Anzahl an dicken Ästen unter geringer Überschirmung konnte nicht nachgewiesen werden, jedoch streuen die Werte hier über einen weitaus größeren Bereich als unter mittleren Lichtbedingungen. Bei der Ausrichtung der Äste konnte ebenfalls keine bevorzugte Himmelsrichtung festgestellt werden. Auch die Verschneidung der Wuchsrichtung mit der aus den verschiedenen Richtungssektoren der *Fisheye*-Fotos ermittelten *Gap Fraction* führte zu diesem Ergebnis. In der gleichmäßigen Verteilung der Äste kann eine weitere Strategie zur Vermeidung von Selbstbeschattung gesehen werden.

Auffallend war der Zusammenhang der Kronenansatzhöhe mit dem Strahlungsangebot. Auch hierfür ergab die Regressionsanalyse eine Funktion mit einem lokalen Minimum. Im nahezu unbeschirmten Bereich wird das auf die geringere Lichtdurchlässigkeit der Baumkronen zurückgeführt. Bei den stark überschirmten Bäumen war die genossene Strahlungsmenge hingegen insgesamt bereits so gering, dass sich die Krone stammaufwärts verlagerte.

Zu diesem Ergebnis kam auch die Analyse der Kronenvolumina und der Biomasseverteilung auf die verschiedenen Pflanzenkompartimente. Der vertikale Schwerpunkt des Kronenvolumens verlagert sich mit zunehmender Beschattung nach oben. Bäume, die ihren größten Kronendurchmesser in der obersten Kronenschicht haben, kommen ausschließlich bei einem ISF unter 15 % vor. Das Verhältnis von Kronenvolumen zu Kronenbiomasse wird weiter, das heißt, mit

abnehmender Lichtintensität lockert die Krone der Jungbuchen auf. Darin begründet ist auch ein tieferes Eindringen der Strahlung in die Kronen.

Mit zunehmender Beschattung reduziert sich zudem die Biomasseallokation der Wurzel zugunsten des oberirdischen Wachstums, insbesondere des Astwachstums. Die Korrelationen hierfür sind zwar sehr schwach, aber signifikant. Deutlicher fällt die erhöhte Investition in die Blattbiomasse bei zunehmender Beschattung aus. Der Anteil der Blatttrockensubstanz an der gesamten jährlichen Biomasseproduktion nähert sich dem Wert von 100 % deutlich. Auch die Analyse der *Leaf Area Ratio* bestätigt dieses Allokationsverhalten. Die Anordnung der Blätter erfolgt in nahezu nur einer Schicht (der minimale Wert für den *Leaf Area Index* beträgt 1,06), wodurch sich der Grad der Selbstbeschattung reduziert. Auch die spezifische Blattfläche (SLA) nimmt ab einem Grenzwert von etwa 30 % ISF mit zunehmender Überschirmung deutlich zu.

Das reduzierte Strahlungsangebot führt somit zu einer proportionalen Zunahme bei der Anreicherung von Trockensubstanz des Teils der Pflanze, der für die Eroberung der wachstumslimitierenden Ressource verantwortlich ist. Dabei reagiert der Baum als Gesamtsystem auf die veränderlichen Wuchsbedingungen. Auch die Einzelblattflächen und -gewichte der unteren Kronenschichten korrelieren stärker mit den Strahlungswerten der Lichtkrone als mit denen, die in derselben Schicht gemessen wurden, in der die Blätter wuchsen.
Für die Wachstumsintensität (NAR) und die Wachstumseffizienz (RWR) konnte die höchste Korrelation zu einem Wert erreicht werden, der den Energiegewinn des Baumes durch die Photosynthese ausdrückt, dem für alle Baumschichten aufsummierten Produkt aus Blattfläche und Strahlungsinput (ISF).

Der Versuch, bei der Wahl der optimalen Lichtstärke einen Kompromiss zwischen bestmöglichem Wachstum und günstiger Qualitätsentwicklung zu finden, führt zu einem ISF-Wert von ca. 40 %. Eine solche Auflichtung, die eine Bestandesgrundfläche von etwa 15 m^2 ha^{-1} bedeuten würde, wird nur infolge eines starken Durchforstungseingriffes erreicht. Aus Gründen der Bestandesstabilität kann jedoch nur empfohlen werden, die optimalen Überschirmungsbedingungen vorsichtig und in mehreren Eingriffen anzustreben.

Abstract

Growth and quality of a 16-year-old beech underplanting were investigated under varying spruce canopy densities in the northernmost mountain range of central Europe. The gradient of relative radiation was estimated by analysis of hemispherical photographies and amounted 13% to 71% of diffuse light. Due to the large gradient in radiation the regression slopes vs. irradiance were never linear as sometimes claimed in literature if investigations took place only under limited-

light conditions. In the current study the correlation between growth parameters (height, terminal shoot length, diameter) and light conditions could be expressed by a saturation curve, while the regression of the selected quality parameters (inclination of last year's terminal shoot and occurrence of thick branches) produces a minimum curve. The curve progression of leave area ratio and space sequestration vs. irradiance showed a steep decrease which soon levelled out.
Almost no influence of the intraspecific competitive situation could be found, which might have been caused by the selection of dominant beeches only. But there is at least a hint that the crown shape is changing by increasing competition from pyramidal over cylindrical and bulbous up to funnel-shaped crown types. Regarding the light conditions it could be determined that 100% of beeches, whose largest crown diameter could be found at the top of the tree, occur only under low light conditions (less than 15% relative irradiance).

A clear indication for the shift in biomass allocation could be found under limited light conditions. The share of leaf biomass increased to almost 100 %. Trees invest into those parts, which are responsible for capturing the limited resource.

An optimal shelterwood density, for a compromise between fast height growth and good quality, is achieved by finally linking the results. 30-40% of indirect light would be consistent with optimal growth conditions, but stand stability has to be kept in mind too.

Literatur

Ammer C. 2005. Untersuchungen zur Raumbesetzung junger Buchen und Fichten. In: Bauhus J., Csapek G. (Hrsg.): Beiträge zur Tagung 2004 der Sektion Waldbau im Deutschen Verband Forstlicher Forschungsanstalten. Berichte Freiburger Forstliche Forschung 60, 1-19

Ammer C. 2003. Growth and biomass partitioning of *Fagus sylvativa* L. and *Quercus robur* L. seedlings in response to shading and small changes in the R/FR-ratio of radiation. Annals of Forest Science 60, 163-171

Ammer C. 2002. Response of *Fagus sylvatica* seedlings to root trenching of overstorey *Picea abies*. Scandinavian Journal of Forest Research 17, 408-416

Ammer C. 2000. Untersuchungen zum Einfluss von Fichtenaltbeständen auf die Entwicklung junger Buchen. Berichte aus der Holz- und Forstwirtschaft. Shaker Verlag, Aachen

Ammer C. 1996. Konkurrenz um Licht – zur Entwicklung der Naturverjüngung im Bergmischwald. Schriftenreihe der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Universität München und der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft 158

Ammer C., Ziegler C., Knoke T. 2005. Zur Beurteilung von intra- und interspezifischer Konkurrenz von Laubbaumbeständen im Dickungsstadium. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 176, 85-94

Anderson M.C. 1964a. Light relations of terrestrial plant communities and their measurements. Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society 39, 425-486

Anderson M.C. 1964b. Studies of the woodland light climate: I. The photographic computation of light conditions. Journal of Ecology 52, 27-41

Anderson M.C. 1964c. Studies of the woodland light climate: II. Seasonal variation in the light climate. Journal of Ecology 52, 643-663

Anderson D.R., Burnham K.P., Thompson W.L. 2000. Null hypothesis testing: problems, prevalence, and an alternative. Journal of Wildlife Management 64, 912-923

Bachmann M. 1998. Indizes zur Erfassung der Konkurrenz von Einzelbäumen – Methodische Untersuchung in Bergmischwäldern. Schriftenreihe der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Universität München und der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft 171

Bachmann M. 1996. Indizes zur Erfassung der Konkurrenz im Bergmischwald – eine Methodenstudie. Tagungsband des Deutschen Verbandes Forstlicher Versuchsanstalten – Sektion Ertragskunde, Jahrestagung 1996 in Neresheim, 249-265

Bartelink H.H. 1997. Allometric relationships for biomass and leaf area of beech (*Fagus sylvatica* L.). Annals of Forest Science 54, 39-50

Bartels C. 2001. Die Geschichte des Bergbaus am Rammelsberg – Ein Überblick. In: Roseneck R. (Hrsg.): Der Rammelsberg – Tausend Jahre Mensch-Natur-Technik. Bergbau als Kulturträger, Band 1. Verlag Goslarsche Zeitung, 44-83

Bartels H. 1993. Gehölzkunde. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.

Begon M., Townsend C.R., Harper J.L. 2006. Ecology – From individuals to ecosystems. 4. Auflage. Blackwell Verlag, Oxford

Beug H.-J., Henrion I., Schmüser, A. 1999. Landschaftsgeschichte im Hochharz: Die Entwicklung der Wälder und Moore seit dem Ende der letzten Eiszeit. Hrsg.: Gesellschaft zur Förderung des Nationalparks Harz e.V. Papierflieger Verlag, Clausthal-Zellerfeld

Biederbick K.-H. 1992. Die direkte Sonnenstrahlung als Standortfaktor. Forstarchiv 63, 131-136

Biging G.S., Dobbertin M. 1992. A comparison of distance-dependent competition measures for height and basal area growth of individual conifer trees. Forest Science 38, 695-720

Bolte A., Villanueva I. 2006. Interspecific competition impact on the morphology and distribution of fine roots in European beech (*Fagus sylvatica* L.) and Norway spruce (*Picea abies* (L.)Karst.). European Journal of Forest Research 125, 15-26

Bonosi L. 2006. The influence of light and size on photosynthetic performance, light interception, biomass partitioning and tree architecture in open grown *Acer pseudoplatanus*, *Fraxinus excelsior* and *Fagus sylvatica* seedlings. Schriftenreihe Freiburger Forstliche Forschung 34

Bornhardt W. 1943. Der Oberharzer Bergbau im Mittelalter. Archiv für Landeskunde Niedersachsens 2, 449-502

Bornhardt W. 1931. Geschichte des Rammelsberger Bergbaues von seiner Aufnahme bis zur Neuzeit. Preußische Geologische Landesanstalt, Archiv für Lagerstättenforschung 52, Berlin

Brand D.G. 1990. Growth analysis of responses by planted white pine and white spruce to changes in soil temperature, fertility and brush competition. Forest Ecology and Management 30, 125-138

Brunner A. 1994. Ökologische Lichtmessung im Wald. Forstarchiv 65, 133-138

Brunner A. 1993. Die Entwicklung von Bergmischwaldkulturen in den Chiemgauer Alpen und eine Methodenstudie zur ökologischen Lichtmessung im Wald. Forstliche Forschungsberichte München 128

Burnham K.P., Anderson D.R. 2004. Multimodel inference: understanding AIC and BIC in Model Selection. Amsterdam Workshop on Model Selection. http://www2.fmg.uva.nl/modelselection/presentations/awms2004-burnham.pdf

Burschel P., Huss J. 1964. Die Reaktion von Buchensämlingen auf Beschattung. Forstarchiv 35, 225-233

Burschel P., Schmaltz J. 1965. Die Bedeutung des Lichtes für die Entwicklung junger Buchen. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 136, 193-210

Burton P.J. 1993. Some limitations inherent to static indices of plant competition. Canadian Journal of Forest Research 23, 2141-2152

Byrne S.V., Wentworth T.R. 1988. Relationship between volume and biomass of early successional vegetation and the prediction of loblolly pine seedling growth. Forest Science 34, 939-947

Campbell G.S., Norman J.M. 1989. The description and measurement of plant canopy structure. In: Russel G., Marshall B., Jarvis P.G. (Eds.): Plant canopies – Their growth, form and function. Cambridge University Press, Cambridge, 1-19

Canham C.D., Finzi A.C., Pacala S.W., Burbank D.H. 1993. Causes and consequences of resource heterogenity in forests: intraspecific variation in light transmission by canopy trees. Canadian Journal of Forest Research 24, 337-349

Coates K.C., Burton P.J. 1999. Growth of planted tree seedlings in response to ambient light levels in northwestern interior cedar-hemlock forests of British Columbia. Canadian Journal of Forest Research 29, 1374-1382

Collet C., Lanter O., Pardos M. 2002. Effects of canopy opening on the morphology and anatomy of naturally regenerated beech seedlings. Trees 16, 291-298

Collet C., Lanter O., Pardos M. 2001. Effects of canopy opening on height and diameter growth in naturally regenerated beech seedlings. Annals of Forest Science 58, 127-134

Collet C., Ningre F., Frochot H. 1998. Modifying the microclimate around young oaks through vegetation manipulation: effects on seedling growth and branching. Forest Ecology and Management 110, 249-262

Coomes D.A., Grubb P.J. 2000. Impacts of root competition in forests and woodlands: a theoretical framework and review of experiments. Ecological Monographs 70, 171-207

Cornelissen J.H.C. 1993. Aboveground morphology of shade-tolerant *Castanopsis fargesii* saplings in response to the light environment. International Journal of Plant Science 154, 481-495

Crabbe J. 1987. Aspects particuliers de la morphogènés caulinaire des végétaux ligneux et introduction à leur étude quantitative. I.R.S.I.A. Presses Université de Bruxelles

Denecke D. 1992. Zum Stand der Kartierung und Untersuchung von Relikten des Bergbaus und Hüttenwesens im Harz für das Mittelalter und die frühe Neuzeit. In: Kaufhold K.H. (Hrsg.): Bergbau und Hüttenwesen im und am Harz. Veröffentlichungen der historischen Kommission für Niedersachsen und Bremen 34: Quellen und Untersuchungen zur Wirtschafts- und Sozialgeschichte Niedersachsens in der Neuzeit 14. Hahnsche Buchhandlung, Hannover, 21-29

Denecke, D. 1978. Erzgewinnung und Hüttenwesen des Mittelalters im Oberharz und im Harzvorland. Archäologisches Korrespondenzblatt 8, 77-84

Diaci J. 2002. Regeneration dynamics in a Norway spruce plantation on a silver fir-beech forest site in the Slovenian Alps. Forest Ecology and Management 161, 27-38

Diaci J., Thormann J.-J. 2002. Ein Vergleich verschiedener Lichtmessmethoden in Buchennaturwäldern Sloweniens aus verjüngungsökologischer Sicht. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 153, 39-50

Dohrenbusch A. 1995. Überlegungen zur Optimierung der Strahlungsmessung im Wald. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 166, 109-114

Drever C.R., Lertzman K.P. 2001. Light-growth responses of coastal Douglas-fir and western redcedar saplings under different regimes of soil moisture and nutrients. Canadian Journal of Forest Research 31, 2124-2133

Drößler L., Kühne C., Lüpke B. v., Dong P.H. 2005. Buchenvoranbau unter Fichtenaltholz im Hunsrück. AFZ/DerWald 60, 712-715

Ehleringer J.R., Werk K.S. 1986. Modifications of solar-radiation absorption patterns and implications for carbon gain at the leaf level. In: Givnish T.J.(Ed.) On the economy of plant form and function. Cambridge University Press, Cambridge, 57-82

Einhorn K.S., Rosenqvist E., Leverenz J.W. 2004. Photoinhibition in seedlings of *Fraxinus* and *Fagus* under natural light conditions: implications for forest regeneration? Oecologia 140, 241-251

Evans G.C. 1972. The quantitative analysis of plant growth. Blackwell Verlag, Oxford

Evans G.C., Coombe D.E. 1959. Hemispherical and Woodland Canopy Photography and the Light Climate. Journal of Ecology 47, 103-113

Fischer, H. 2000. Qualitätsverbesserung bei jungen Traubeneichen (*Quercus petraea* LIEBL.) allein durch innerartliche Konkurrenz. Forst und Holz 55, 377-382

Fisher J.B. 1986. Branching patterns and angles in trees. In: Givnish T.J. (Ed.) On the economy of plant form and function. Cambridge University Press, Cambridge, 493-523

Fleck S., van der Zande D., Coppin P. 2004. Einsatz eines Laserscanners zur Strukturerfassung und physiologischen Bewertung von Anbausystemen im Obstbau. Erwerbs-Obstbau 46, 97-102

Gaertner U. 2002. Beitrag zu SUSTMAN - Final Report: Work package 3 – broadleaf growth and quality, shade tolerance (unveröffentlicht)

Geibel R. 2001. Forstwirtschaft am Rammelsberg seit 1500 – „... die Höltzungen sein der Bergwercke Hertze". In: Roseneck R. (Hrsg.): Der Rammelsberg – Tausend Jahre Mensch-Natur-Technik. Bergbau als Kulturträger Band 2. Verlag Goslarsche Zeitung, 474-491

Gerhard H.-J. 1994. Holz im Harz. Probleme im Spannungsfeld zwischen Holzbedarf und Holzversorgung im hannoverschen Montanwesen des 18. Jahr-

hunderts. Niedersächsisches Jahrbuch für Landesgeschichte 66, Verlag Hahnsche Buchhandlung, Hannover, 47-77

Givnish T.J. 1988. Adaptation to sun and shade: a whole-plant perspective. Australian Journal of Plant Physiology 15, 63-92

Gralla T., Müller-Using B., Unden T., Wagner S. 1997. Über die Lichtbedürfnisse von Buchenvoranbauten in Fichtenbaumhölzern des Westharzes. Forstarchiv 68, 51-58

Gruber F. 1998. Kombinierte Altersbestimmung und Altersentwicklung von Jungbuchen – *Fagus sylvatica* L. – nach morphologischen und anatomischen Merkmalen. Flora 193, 59-73

Gruber F. 1992. Dynamik und Regeneration der Gehölze. Baumarchitektur auf ökologisch-dynamischer Grundlage und zur Bioindikation am Beispiele der Europäischen Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.), Weißtanne (*Abies alba* Mill.), Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* Franco) und Europäischen Lärche (*Larix decidua* Mill.). Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, A 86, Teil I

Gruber F. 1987. Über die sylleptische Verzweigung der Johannistriebe von Rotbuche und Stieleiche. Allgemeine Forstzeitschrift 49, 1283-1285

Guericke M. 2001. Untersuchungen zur Wuchsdynamik von Mischbeständen aus Buche und Europ. Lärche (*Larix decidua* Mill.) als Grundlage für ein abstandsabhängiges Einzelbaumwachstumsmodell. Dissertation Universität Göttingen. Cuvillier Verlag, Göttingen

Gundelwein A. 2001. Feuer und Wasser – Bergbautechnik zur Zeit Agricolas. In: Roseneck R. (Hrsg.): Der Rammelsberg – Tausend Jahre Mensch-Natur-Technik. Bergbau als Kulturträger, Band 2. Verlag Goslarsche Zeitung, 160-171

Häckel H. 1999. Meteorologie. 4. Auflage. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart

Hagemann U. 2005. Quality aspects of natural regeneration in gaps in two sugar maple – yellow birch forest stands in Quebec, Canada. Masterarbeit am Institut für Waldbau und Forstschutz der Technischen Universität Dresden (unveröffentlicht)

Hagemeier M. 2002. Funktionale Kronenarchitektur mitteleuropäischer Baumarten am Beispiel von Hängebirke, Waldkiefer, Traubeneiche, Hainbuche, Winterlinde und Rotbuche. Dissertationes Botanicae, Band 361. J. Cramer in der Gebrüder Borntraeger Verlagsbuchhandlung, Berlin

Hallé F., Oldemann R.A., Tomlinson P.B. 1978. Tropical trees and forests – an architectural analysis. Springer Verlag, Berlin

Hartig T. 1877. Photometrisches. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 53, 35-36

Hartkopf A. 1994. Zur Konkurrenzwirkung von Weichlaubhölzern in einem Fichtenjungwuchs. Diplomarbeit am Institut für Waldbau der Georg-August-Universität Göttingen (unveröffentlicht)

Harzwasserwerke GmbH 2006. Kulturdenkmal Oberharzer Wasserregal. http://www.harzwasserwerke.de/ohwr/ohwr.htm

Hauptmeyer C.-H. 1992. Bergbau und Hüttenwesen im Harz während des Mittelalters. In: Kaufhold K.H. (Hrsg.): Bergbau und Hüttenwesen im und am Harz. Veröffentlichungen der historischen Kommission für Niedersachsen und Bremen 34: Quellen und Untersuchungen zur Wirtschafts- und Sozialgeschichte Niedersachsens in der Neuzeit, Band 14. Hahnsche Buchhandlung, Hannover, 11-20

Hauskeller-Bullerjahn K. 1995. Ein Versuch zur natürlichen Verjüngung der Traubeneiche (*Quercus petraea* LIEBL.) im Pfälzer Wald. Bericht des Instituts für Waldbau des Forstlichen Fachbereiches der Universität Göttingen (unveröffentlicht)

Heyden-Rynsch B.v.d. 1979. Aufforstungsmaßnahmen im Harz. In: Dokumentation der Sturmkatastrophe vom 13. November 1972. Teil IV: Die Walderneuerung in den sturmgeschädigten Forsten. Aus dem Walde – Mitteilungen aus der Niedersächsischen Landesforstverwaltung 30, 249-252

Holmes J.M., Reed D.D. 1991. Competition Indices for Mixed Species Northern Hardwoods. Forest Science 37, 1338-1349

Honda H., Fisher J.B. 1978. Tree branch angle: maximizing effective leaf area. Science 199, 888-890

Horn H.S. 1971. The adaptive geometry of trees. Monographs in population biology No. 3. Princeton University Press, Princeton/New Jersey

Hunt R., Cornelissen J.H.C. 1997. Components of relative growth rate and their interrelation in 59 temperate plant species. New Phytologist 135, 395-417

Hunt R., Lloyd P.S. (1987): Growth and partitioning. New Phytologist 106, 235-249

Huss J. 1972. Die Entwicklung von Buchenjungwüchsen auf einer Naturverjüngungsfläche. Der Forst- und Holzwirt 27, 56-58

Johann E., Agnoletti M., Axelsson A.L., Bürgi M., Östlund L., Rochel X., Schmidt U.E., Schuler A., Skoovsgaard J.P., Winiwarter V. 2004. History of secondary Norway spruce forests in Europe. In: Spiecker H., Hansen J., Klimo E., Sterba H., Skoovsgaard J.-P., Teuffel K.v. (Eds.) Norway spruce conversion – options and consequences. EFI Research Report 18. S. Brill Academic Publishers, Leiden, 25-62

Kalela E.K. 1950. On the horizontal roots in pine and spruce stands. Acta forestalia Fennica 57, 1-79

Kazda M., Čater M., Čermák J., Linnert M., Lüpke B. v., Nadezhdina N., Salzer J., Schmid I. 2005. Light climate, canopy influence and plant reaction. In: Oleskog G., Löf M. (Eds.) The ecological and silvicultural bases for underplanting beech (*Fagus sylvatica* L.) below Norway spruce shelterwood (*Picea abies* L. Karst.). Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt 139. J.D.Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main, 40-47

King D.A. 1997. The functional significance of leaf angle in *Eucalyptus*. Australian Journal of Botany 45, 619-636

King D.A. 1991. Correlations between biomass allocation, relative growth rate and light environment in tropical forest saplings. Functional Ecology 5, 485-492

Kleinschmit H. 1989. Forsteinrichtungsergebnisse aus dem niedersächsischen Harz. Allgemeine Forstzeitschrift 44, 454-455

Köhler W., Schachtel G., Voleske P. (2002). Biostatistik – Eine Einführung für Biologen und Agrarwissenschaftler. Springer Verlag, Berlin

Kölling C., Ammer C. 2006. Waldumbau unter den Vorzeichen des Klimawandels. AFZ/DerWald 61, 1086-1089

Koperski M. 1993. Florenliste der Moose in Niedersachsen und Bremen. Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen 13, 73-128

Koss H. 1994. Die Zeit nach 1945 – Die Entwicklung des Nordwestdeutschen Forstvereins (NWDFV) in den Jahren 1948-1991. In: Quitt H. (Hrsg.) 150 Jahre Harzer Forstverein und seine Nachfolge 1844 bis 1994. Salzland Druck, Staßfurt, 30-39

Kozovits A.R., Matyssek R., Winkler J.B., Göttlein A., Blaschke H., Grams T.E.E. 2005. Above-ground space sequestration determines competitive success in juvenile beech and spruce trees. New Phytologist 167, 181-196

Kramer H. 1988. Waldwachstumslehre. Verlag Paul Parey, Hamburg

Kreutzer K. 1961. Wurzelbildung junger Waldbäume auf Pseudogleyböden. Forstwissenschaftliches Centralblatt 80, 356-392

Kühne C., Bartsch N. 2003. Zur Naturverjüngung von Fichten-Buchen-Mischbeständen im Solling. Forst und Holz 58, 3-7

Kuha J. 2004. AIC and BIC: Comparisons of assumptions and performance. Sociological Methods and Research 33, 188-229

Kunze G., Rodewald B. 2003. Der Saugbagger, ein pneumatischer Förderer und Bagger. Teil 2: Entwicklung einer Düsenbatterie als Erdstofflösehilfe. Wissensportal Baumaschinen.de, Web-Seite des Lehrstuhls für Baumaschinentechnik der TU Dresden. http://www.baumaschine.de/Portal/Archive/3_2003/Wissenschaft/saugbagger/saugbagger.pdf

Kurth A. 1946. Untersuchungen über Aufbau und Qualität von Buchendickungen. Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für forstliches Versuchswesen 24, 581-658

Ladefoged K. 1946a. De enkelte Kronedelers produktionsmæssige Betydning hos Rødgran (The productive importance of the individual parts of the crown in spruce, picea excelsa. Det forstlige Forsøgsvæsen i Danmark 16, 365-400

Ladefoged K. 1946b. Untersuchungen über die Periodizität im Ausbruch und Längenwachstum der Wurzeln bei einigen unserer gewöhnlichsten Waldbäume. Det forstlige Forsøgsvæsen i Danmark 16, 1-256

Larcher W. 1994. Ökophysiologie der Pflanzen – Leben, Leistung und Stressbewältigung der Pflanzen in ihrer Umwelt. 5. Auflage. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart

Laufer J. 1992. Das Eisenhüttenwesen des hannoverschen Harzes zwischen Anpassung und Verdrängung in der Zeit des ersten allgemeinen Aufschwungs der Metallindustrie (1835-1871). In: Kaufhold K.H. (Hrsg.) Bergbau und Hüttenwesen im und am Harz. Veröffentlichungen der historischen Kommission für Niedersachsen und Bremen 34: Quellen und Untersuchungen zur Wirtschafts- und Sozialgeschichte Niedersachsens in der Neuzeit 14. Hahnsche Buchhandlung Hannover, 97-118

Leder B. 1993. Über das Wachstum junger Buchen im vorwaldartigen Gefüge. Schriftenreihe der Landesanstalt für Forstwirtschaft Nordrhein-Westfalen 7, 63-71

Leder B., Hillebrand K. 2001. Überlegungen zur Charakterisierung der Qualitätsentwicklung in Buchen-Jungwüchsen. Forst und Holz 56, 44-49

Leder B., Weihs U. 2000. Wachstum und qualitative Entwicklung eines acht Jahre alten Buchen-Verbandsversuches unter Kiefernschirm im Nordrheinischen Tiefland. Forst und Holz 55, 172-176

Le Tacon F. 1985. Die Pflanzung auf der Freifläche: Einer der Gründe für die schlechte Form der Buche im Nordosten von Frankreich. Der Forst- und Holzwirt 40, 339-342

Lewark S. 1989. Ergebnisse der Waldschadenserhebungen 1984 bis 1988 im Harz. Allgemeine Forstzeitschrift 44, 471

Liebig H.-P., Zühlke G. 2006. Produktionsphysiologie - Kinetik und Komponenten der Ertragsbildung. Skript des Institutes für Sonderkulturen und Produktionsphysiologie, Fakultät der Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim. www.uni-hohenheim.de/lehre370/gemueseb/b01021/st_05.htm

Linnert M. 2001. Eichen-Nesterpflanzung in Rheinland-Pfalz. Bericht des Instituts für Waldbau der Universität Göttingen im Auftrag der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz (unveröffentlicht)

Löf M., Bolte A., Welander T. 2005. Interacting effects of irradiance and water stress on dry weight and biomass partitioning in *Fagus sylvatica* seedlings. Scandinavian Journal of Forest Research 20, 322-328

Löf M., Oleskog G. 2005. Background, scope and context of the guideline. In: Oleskog G., Löf M. (Eds.) The ecological and silvicultural bases for underplanting beech (*Fagus sylvatica* L.) below Norway spruce shelterwood (*Picea abies* L. Karst.). Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt 139. J.D.Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main, 5-8

Lüpke B. v. 2005. Canopy management, plant quality and harvesting regime. In: Oleskog G., Löf M. (Eds.) The ecological and silvicultural bases for underplanting beech (*Fagus sylvatica* L.) below Norway spruce shelterwood (*Picea abies* L. Karst.). Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt 139. J.D.Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main, 59-73

Lüpke B. v. 1998. Silvicultural methods of oak regeneration with special respect to shade tolerant mixed species. Forest Ecology and Management 106, 19-26

Lüpke B. v. 1991. Einfluß der Konkurrenz von Weichlaubhölzern auf das Wachstum junger Traubeneichen. Forst und Holz 46, 166-171

Lüpke B. v. 1987. Einflüsse von Altholzüberschirmung und Bodenvegetation auf das Wachstum junger Buchen und Traubeneichen. Forstarchiv 58, 18-24

Lüpke B. v. 1982. Versuche zur Einbringung von Lärche und Eiche in Buchenbestände. Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt 74, J.D.Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main

Lüpke B. v. 1973. Wachstum junger Fichten in Abhängigkeit von ihrem Frischezustand vor der Pflanzung. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 144, 141-146

Lüpke B. v., Hauskeller-Bullerjahn K. 2004. Beitrag zur Modellierung der Jungwuchsentwicklung am Beispiel von Traubeneichen-Buchen-Mischverjüngungen. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 175, 61-69

Lüpke B. v., Spellmann H. 1997. Aspekte der Stabilität und des Wachstums von Mischbeständen aus Fichte und Buche als Grundlage für waldbauliche Entscheidungen. Forstarchiv 68, 167-179

Lüpke B. v., Ammer C., Bruciamacchie M., Brunner A., Ceitel J., Collet C., Deleuze C., Di Placido J., Huss J., Jankovic J., Kantor B., Larsen J.B., Lexer M., Löf M., Longauer R., Madsen P., Modrzynski J., Mosandl R., Pampe A., Pommerening A., Stefancik I., Tesar V., Thompson R., Zientarski J. 2004. Silvicultural strategies for conversion. In: Spiecker H., Hansen J., Klimo E., Sterba H., Skoovsgaard J.-P., Teuffel K.v. (Eds.) Norway spruce conversion – options and consequences. EFI Research Report 18. S. Brill Academic Publishers, Leiden, 121-164

Machado J.-L., Reich P.B. 1999. Evaluation of several measures of canopy openness as predictors of photosynthetic photon flux density in deeply shaded conifer-dominated forest understorey. Canadian Journal of Forest Research 29, 1438-1444

Madsen P. 1995. Effects of soil water content, fertilization, light, weed competition and seedbed type on natural regeneration of beech (*Fagus sylvatica*). Forest Ecology and Management 72, 251-264

Martin G.L., Ek A.R. 1984. A comparison of competition measures and growth models for predicting plantation red pine diameter and height growth. Forest Science 30, 731-743

Matthes U. 1998. Waldökologische Analyse und Bewertung von Umbaumaßnahmen im bayrischen Staatswald als Beitrag für eine naturnahe Forstwirtschaft, Dissertation Forstwissenschaftlichen Fakultät der Ludwig-Maximilian-Universität München. Herbert Utz Verlag, München

Mende M. 1992. Aus der Blüte ein Sturz in relative Bedeutungslosigkeit: Die Eisenhütten des Harzes und Weserberglandes im 19. Jh.. In: Kaufhold K.H. (Hrsg.) Bergbau und Hüttenwesen im und am Harz. Veröffentlichungen der

historischen Kommission für Niedersachsen und Bremen 34: Quellen und Untersuchungen zur Wirtschafts- und Sozialgeschichte Niedersachsens in der Neuzeit 14. Hahnsche Buchhandlung Hannover, 56-96

Meyer U. 1989. Bewaldung des Westharzes unter dem Einfluss von Bergbau und Hüttenwesen. Allgemeine Forstzeitschrift 44, 458-461

Minotta G., Pinzauti S. 1996. Effects of light and soil fertility on growth, leaf chlorophyll content and nutrient use efficiency of beech (*Fagus sylvatica* L.) seedlings. Forest Ecology and Management 86, 61-71

Mosandl R. 1984. Löcherhiebe im Bergmischwald. Ein waldbauökologischer Beitrag zur Femelschlagverjüngung in den Chiemgauer Alpen. Forstliche Forschungsberichte München 61

Mountford E.P., Savill P.S., Bebber D.P. 2006. Patterns of regeneration and ground vegetation associated with canopy gaps in a managed beechwood in southern England. Forestry 79, 389-408

Muhle H., Linnert M., Starlinger F., Štykar J., Mauer P., Kutnar L., Batic F. 2003. SUSTMAN-Biodiversity report (unveröffentlicht)

Munro D.D. 1974. Forest growth models – a prognosis. In: Fries J. (Ed.) Growth models for tree and stand simulation. Royal Coll. of For., Stockholm

Nadezhdina N., Čermák J. 2003. Instrumental methods for studies of structure and function of root systems of large trees. Journal of Experimental Botany 54, 1511-1521

Naundorf L. 2001. Goslar und sein Wald bis 1552 – Eine wirtschafts- und sozialgeschichtliche Betrachtung. In: Roseneck R. (Hrsg.) Der Rammelsberg – Tausend Jahre Mensch-Natur-Technik. Bergbau als Kulturträger, Band 2. Verlag Goslarsche Zeitung, 462-473

Niedersächsisches Umweltministerium 2006. Umweltbericht 2006. http://www.umwelt.niedersachsen.de/master/C23221144_N22890573_L20_D0_I598.html

Niemann H.-W., Niemann-Witter D. 1992. Die Geschichte des St. Andreasberger Bergbaus – ein Überblick. In: Kaufhold K.H. (Hrsg.): Bergbau und Hüttenwesen im und am Harz. Veröffentlichungen der historischen Kommission für Niedersachsen und Bremen 34: Quellen und Untersuchungen zur Wirtschafts- und Sozialgeschichte Niedersachsens in der Neuzeit 14. Hahnsche Buchhandlung, Hannover, 154-175

NMfELF – Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 1997. Wälder für Morgen – Das Walderneuerungsprogramm Harz. Schriftenreihe Waldinformation Heft 7. Niedersächsisches Forstplanungsamt Wolfenbüttel

NW-FVA – NordWestdeutsche Forstliche VersuchsAnstalt 2006. Waldzustandsbericht 2006. www.nw-fva.de oder www.ml.niedersachsen.de => Themenbereich „Wald, Holz und Jagd“

ÖNORM 2004. ÖNORM L 1075 – Grundlagen für die Bewertung der Gehalte ausgewählter Elemente in Böden. Österreichisches Normungsinstitut, Wien

Olsson L., Carlsson K., Grip H., Perttu K. 1982. Evaluation of forest canopy photographs with diode-array scanner OSIRIS. Canadian Journal of Forest Research 12, 822-828

Otto H.-J. 1994. Waldökologie. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart

Otto, H.-J. 1991. Langfristige, ökologische Waldbauplanung für die Niedersächsischen Landesforsten, Band 2: Teil C – Spezieller Teil: Das niedersächsische Bergland, Teil D – Gesamtauswertung. Aus dem Walde – Mitteilungen aus der Niedersächsischen Landesforstverwaltung 43

Pampe A. 2000. Zur Konkurrenz von Buche und Fichte in der montanen Stufe des Harzes. Tagungsbericht der Sektion Waldbau 2000 in Dessau/Klieken, 95-105

Petriţan A.M., Lüpke B. v., Petriţan I.C. 2007. Effects of shade on growth and mortality of maple (*Acer pseudoplanus*), ash (*Fraxinus excelsior*) and beech (*Fagus sylvatica*) saplings. Forestry 80, 397-412

Petriţan A.M., Lüpke B. v., Petriţan I.C. 2009. Influence of light availability on growth, leaf morphology and plant architecture of beech (*Fagus sylvatica* L.), maple (*Acer pseudoplatanus* L.) and ash (*Fraxinus excelsior* L.) saplings. European Journal of Forest Research 128, 61-74

Pretzsch H. 2002. Grundlagen der Waldwachstumsforschung. Parey Buchverlag im Blackwell Verlag, Berlin

Pretzsch H. 2001. Modellierung des Waldwachstums. Parey Buchverlag im Blackwell Verlag , Berlin

Pretzsch H. 1992. Modellierung der Kronenkonkurrenz von Fichte und Buche in Rein- und Mischbeständen. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 163, 203-213

Régent Instruments Inc. 2003. WinScanopy 2003b - For Hemispherical Image Analysis. Manual. Régent Instrument Inc. Canada

Reiter R., Leitgeb E., Mutsch F., Englisch M., Herzberger E. 2003. Sustman – Site Report (unveröffentlicht)

Rich P.M. 1990. Characterizing plant canopies with hemispherical photographs. Remote Sensing Reviews 5, 13-29

Richter J. 1993. Die Buche in Europa. Zusammenfassender Bericht vom Internationalen IUFRO-Symposium über die Buche in Pamplona 1992. Schriftenreihe der LAFO 6

Richter J., Leder B. 1990. Buchenvoranbauten unter Fichtenschirm. Schriftenreihe der Landesanstalt für Forstwirtschaft Nordrhein-Westfalen 1, 5-33

Röhrig E., Bartsch N., Lüpke B. v. 2006. Waldbau auf ökologischer Grundlage. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart

Roloff A. 2001. Baumkronen – Verständnis und praktische Bedeutung eines komplexen Naturphänomens. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart

Roloff A. 1989. Beziehungen zwischen Krone und Wurzel bei der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.). Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 160, 200-205

Roloff A. 1986. Morphologie der Kronenentwicklung von *Fagus sylvatica* L. (Rotbuche) unter besonderer Berücksichtigung möglicherweise neuartiger Ver-

änderungen. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme Universität Göttingen 18

Roseneck R. 1992. Der Rammelsberg in Goslar – Bedeutung und Zukunftsperspektiven. In: Kaufhold K.H. (Hrsg.): Bergbau und Hüttenwesen im und am Harz. Veröffentlichungen der historischen Kommission für Niedersachsen und Bremen 34: Quellen und Untersuchungen zur Wirtschafts- und Sozialgeschichte Niedersachsens in der Neuzeit 14. Hahnsche Buchhandlung Hannover, 119-153

Ross J. 1981. The radiation regime and architecture of plant stands. Dr.W.Junk Publishers, The Hague

Russel G., Jarvis P.G., Moneith J.L. 1989. Absorption of radiation by canopies and stand growth. In: Russel G., Marshall B., Jarvis P.G. (Eds.) Plant canopies – their growth, form and function. Cambridge University Press, Cambridge, 21-39

Sagheb-Talebi K. 1996. Quantitative und qualitative Merkmale von Buchenjungwüchsen (*Fagus sylvatica* L.) unter dem Einfluss des Lichtes und anderer Standortsfaktoren. Beiheft zur Schweizerischen Zeitschrift für Forstwesen 78

Schmid I., Kazda M. 2001. Vertical distribution and radial growth of coarse roots in pure and mixed stands of *Fagus sylvatica* and *Picea abies*. Canadian Journal of Forest Research 31, 539-548

Schmid I., Nadezhdina N., Čermák J. 2005. Root distribution and competition. In: Oleskog G., Löf M. (Eds.) The ecological and silvicultural bases for underplanting beech (*Fagus sylvatica* L.) below Norway spruce shelterwood (*Picea abies* L. Karst.). Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt 139, J.D.Sauerländer's Verlag Frankfurt am Main, 28-39

Schmidt-Vogt H. 1987. Die Fichte – Ein Handbuch in zwei Bänden. Band I: Taxonomie, Verbreitung, Morphologie, Ökologie, Waldgesellschaften. Verlag Paul Parey, Hamburg

Schmitt H.P., Mertens B., Lüpke B. v. 1995. Buchenvoranbau im Stadtwald Meschede. Allgemeine Forstzeitschrift 50, 1071-1075

Schönbächler D. 1982. Kronenregeneration von Junglärchen in verschiedenen Dichtesituationen nach unterschiedlichen waldbaulichen Eingriffen. Diplomarbeit Abteilung für Forstwirtschaft der ETHZ (Eidgenössische Technische Hochschule Zürich) (unveröffentlicht)

Schütz J.-P. 1989. Zum Problem der Konkurrenz in Mischbeständen. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 140, 1069-1083

Schulz H. 1961. Die Beurteilung der Qualitätsentwicklung junger Buchen. Forstarchiv 32, 89-99

Schwietert B. 1989. Geologie, Klima und Forststandorte des Harzes. Allgemeine Forstzeitschrift, 449-453

Shainsky L.J., Radosevich S.R. 1992. Mechanisms of competition between Douglas-fir and red alder seedlings. Ecology 73, 30-45

Sitte P., Ziegler H., Ehrendorfer F., Bresinsky A. 1998. Lehrbuch der Botanik für Hochschulen (begründet von E. Strasburger). 34. Auflage. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart

Smith H. 1994. Sensing the light environment: the function of the phytocrome family. In: Kendrick R.E., Kronenberg G.H.M., (Eds.) Photomorphogenesis in plants. 2. Auflage. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 377-416

South D.B. 1995. Relative growth rates: a critique. South African Forestry Journal, 43-48

Spellmann H., Wagner S. 1993. Entscheidungshilfen für die Verjüngungsplanung in Fichtenbeständen zum Voranbau der Buche im Harz. Forst und Holz 48, 483-490

Spiecker H., Hansen J., Klimo E., Sterba H., Skoovsgaard J.-P., Teuffel, K.v. 2004. Norway spruce conversion – Options and Consequences. EFI Research Report 18, S. Brill Academic Publishers, Leiden

Stancioiu P.T., O'Hara K.L. 2006a. Leaf area and growth efficiency of regeneration in mixed species, multiaged forests of Romanian Carpathians. Forest Ecology and Management 222, 55-66

Stancioiu P.T., O'Hara K.L. 2006b. Morphological plasticity of regeneration subject to different level of canopy cover in mixed-species, multiaged forests of the Romanian Carpathians. Trees 20, 196-209

Stancioiu P.T., O'Hara K.L. 2006c. Regeneration growth in different light environments of mixed species, multiaged, mountainous forests of Romania. European Journal of Forest Research 125, 151-162

Steinsiek P.-M. 1999. Nachhaltigkeit auf Zeit – Waldschutz im Westharz vor 1800. Cottbuser Studien zur Geschichte von Technik, Arbeit und Umwelt 11. Waxmann Verlag, Münster

Suner A., Röhrig E. 1980. Die Entwicklung der Buchennaturverjüngung in Abhängigkeit von der Auflichtung des Altbestandes. Forstarchiv 51, 145-149

Teuffel K. v., Heinrich B., Baumgarten M. 2004. Present distributions of secondary Norway spruce in Europe. In: Spiecker H., Hansen J., Klimo E., Sterba H., Skoovsgaard J.-P., Teuffel K. v. (Eds.) Norway spruce conversion – options and consequences. EFI Research Report 18. S. Brill Academic Publishers, Leiden, 63-69

Thornley J.H.M. 1976. Mathematical models in plant physiology – a quantitative approach to problems in plant and crop physiology. Experimental botany 8. Academic Press London, New York, San Francisco

Tilman D. 1994. Competition and biodiversity in spatially structured habitats. Ecology 75, 2-16

Tilman D., Wedin D. 1991. Plant traits and resource reduction for five grasses growing on a nitrogen gradient. Ecology 72, 685-700

Tognetti R., Johnson J.D., Michelozzi M. 1995. The response of European beech (*Fagus sylvatica* L.) seedlings from two Italian populations to drought and recovery. Trees 9, 348-354

Tucker G.F., Lassoie J.P., Fahey T.J. 1993. Crown architecture of stand-grown sugar maple (*Acer saccharinum* Marsh.) in the Adirondack Mountains. Tree Physiology 13, 297-310

Turnbull M.H. 1991. The effect of light quantity and quality during development on the photosynthetic characteristics of six Australian rainforest tree species. Oecologia 87, 110-117

UBA - UmweltBundesAmt 2005. Klimawandel in Deutschland – Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Forschungsbericht des Potsdam-Institutes für Klimafolgenforschung im Auftrag des Umweltbundesamtes. Climate Change 08/05, www.umweltbundesamt.de

UBA - UmweltBundesAmt 2006a. Künftige Klimaänderungen in Deutschland – Regionale Projektionen für das 21. Jahrhundert. Hintergrundpapier des Max-Planck-Instituts für Meteorologie für das Umweltbundesamt, www.umweltbundesamt.de

UBA - UmweltBundesAmt 2006b. Anpassung an Klimaänderungen in Deutschland – Regionale Szenarien und nationale Aufgaben. Hintergrundpapier des Umweltbundesamtes, www.umweltbundesamt.de

Voss S. 2005. Biomasseproduktion und morphologische Plastizität junger Eichen bei Konkurrenzbelastung durch unterschiedlich dichte Altholzschirme. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme Universität Göttingen A194

Wagner S. 1994. Strahlungsschätzung in Wäldern durch hemisphärische Fotos – Methode und Anwendung. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme A123

Wagner S., Küßner R., Ammer C., Dohrenbusch A. 2004. Hinweise zur Erfassung von Strahlung und Kronenraumstruktur in Waldbeständen im Rahmen waldbaulicher Untersuchungen. Forstarchiv 75, 110-121

Wagner S., Müller-Using B. 1997. Ergebnisse der Buchen-Voranbauversuche im Harz unter besonderer Berücksichtigung der lichtökologischen Verhältnisse. In: Waldumbau von Nadelholzreinbeständen in Mischbestände. Schriftenreihe der Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten/Landesamt für Agrarordnung Nordrhein-Westfalen 13, 17-30

Wagner S., Nagel J. 1992. Ein Verfahren zur PC-gesteuerten Auswertung von Fisheye-Negativfotos für Strahlungsschätzungen. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 163, 110-116

Weihs U., Klaene K. 2000. Wuchsdynamik und Qualität von Buchenvoranbauten unter Fichtenaltholz auf Basaltstandorten im Hessischen Forstamt Kassel. Forst und Holz 55, 177-181

Willmann H. 1951. Studien über die durch den großen Fichtenborkenkäfer (*Ips typographus* L.) im Forstamt Oderhaus/Harz von 1943 bis 1949 hervorgerufene Kalamität. Dissertation Albrecht-Ludwig-Universität Freiburg

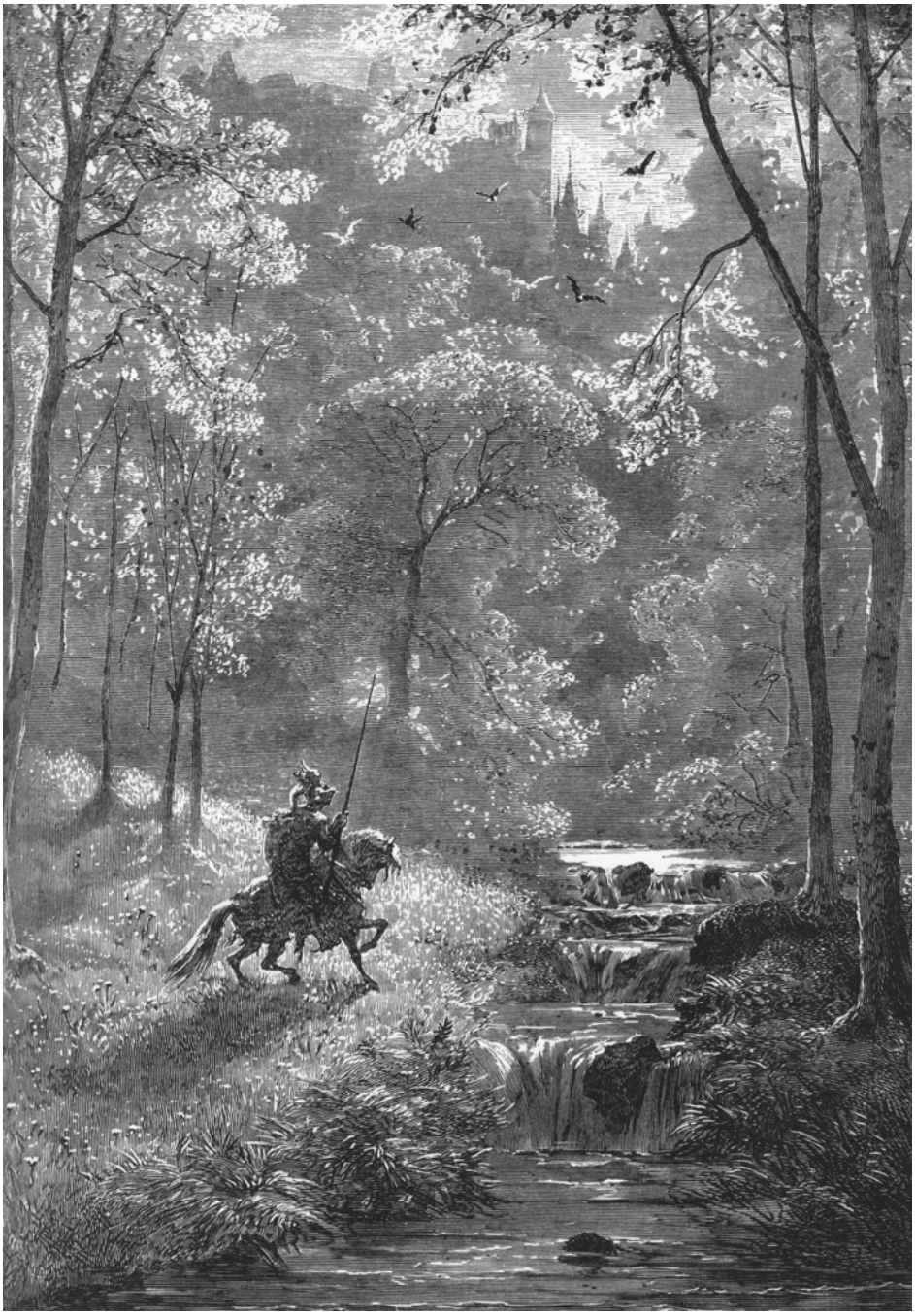
Wittkopf S. 1995. Wurzelintensität im Fichten-Buchen-Mischbestand im Vergleich zum Reinbestand. Untersuchungen zur Wurzelintensität im Fichtenreinbestand, Buchenreinbestand und Mischbestand mittels Bohrkernmethode unter Berücksichtigung bodenchemischer Parameter. Diplomarbeit Fakultät für Forstwissenschaften der Ludwig-Maximilian-Universität München (unveröffentlicht)

Zerbe S. 2002. Restoration of natural broad-leaved woodland in Central Europe on sites with coniferous forest plantations. Forest Ecology and Management 167, 27-42

Anhang

Ergebnis der Vegetationsaufnahmen

Layer		1 (subplot 2)	2 (subplot 3)	3 (subplot 5)	4 (subplot 8)	5 (subplot 9)	6 (subplot 13)	7 (subplot 17)	8 (subplot 21)
Cover tree layer [%]		50	40	60	60	75	65	80	80
Cover shrub layer [%]		55	20	80	30	80	20	20	75
Cover herb layer [%]		80	90	60	80	15	30	10	30
Cover moss layer [%]		5	< 5	< 5	5	50	60	60	60
Trees and shrubs									
Picea abies	B	4	3	4	4	4	4	5	5
	S	.	r	+	1	1	2m	1	.
	K	+	r	+	+	2a	1	+	1
Fagus sylvatica	S	4	2b	5	3	5	2b	2b	5
	K	+	+	.	1	.	.	.	r
Sorbus aucuparia	S	.	.	+	r	.	+	.	r
	K	r	r	+	.	.	.	r	.
Herb layer									
Deschampsia flexuosa		3	5	4	5	2m	2b	2a	2m
Vaccinium myrtillus		1	2m	2m	2a	+	2a	1	1
Dryopteris dilatata		1	1	2m	+	+	+	+	+
Carex pilulifera		+	+	r	+	+	+	.	+
Galium harcynicum		1	1	+	+	+	+	+	.
Rubus idaeus		1	+	+	+	+	1	+	+
Dryopteris carthusiana		+	.	+	+	.	1	+	+
Calamagrostis villosa		2a	2a	1	.	+	.	+	1
Athyrium filix-femina		+	+	+	+	.	.	+	.
Digitalis purpurea		+	+	+	.	.	.	.	.
Trientalis europaea		+	+	.	.	.	.	.	.
Festuca altissima		r	+	.	.	.	.	.	.
Epilobium montanum		.	+	r	.	.	.	.	.
Oxalis acetosella		.	+	.	+	.	.	1	3
Anthoxanthum odoratum		+	.	.	.	.	.	.	.
Urtica dioica		+	.	.	.	.	.	.	.
Cardamine flexuosa		.	+	.	.	.	.	.	.
Carex ovalis		.	+	.	.	.	.	.	.
Cerastium holosteoides		.	+	.	.	.	.	.	.
Veronica officinalis		.	+	.	.	.	.	.	.
Epilobium angustifolium		.	r	.	.	.	.	.	.
Juncus effusus		.	r	.	.	.	.	.	.
Carex muricata		.	.	r	.	.	.	.	.
Carex remota		.	.	.	.	.	.	+	.
Bryophytes									
Polytrichum formosum		1	1	1	2m	2b	2m	2m	2b
Lophocolea bidentata		1	1	2m	1	+	+	.	+
Eurhynchium praelongum		.	+	+	.	+	+	.	+
Brachythecium rutabulum		1	1	+	+	.	.		+
Rhytidiadelphus squarrosus		1	1	.	.	.	1	.	+
Plagiothecium undulatum		1	.	1	2m	2b	4	4	4
Dicranum scoparium		.	.	+	2m	2b	1	1	1
Plagiothecium curvifolium		.	.	.	1	.	+	.	+
Pleurozium schreberi		.	.	.	+	.	.	+	+
Mnium hornum		.	.	.	.	.	.	+	+
Lophocolea heterophylla		+	.	.	.	.	.	.	.
Scleropodium purum		.	.	+	.	.	.	.	.
Lepidozia reptans		.	.	.	.	+	.	.	.
Sphagnum girgensohnii		.	.	.	.	.	+	.	.



Xylographie von Gustave Doré (1863) aus „Don Quichote“ von Miguel de Cervantes (1615)

Danksagung

„Das Schreiben einer Doktorarbeit ist wie der Kampf gegen einen Drachen!“ – diese Erkenntnis verdanke ich Almut Schneider. Wie recht sie doch damit hat! Leider habe ich das erst in der zweiten Hälfte *meines* „Drachenkampfes“ realisiert….

Wie Illustrationen (z. B. von Doré) und Geschichten (bspw. von Cervantes) belegen, ziehen seit Jahrhunderten junge Recken in dererlei Gefechte. Irrtümlicherweise ist in diesem Zusammenhang über die Jahrhunderte das Bild der einsamen Streiter überliefert worden. Aber gerade den Sieg über einen Drachen erreicht man nur in den allerseltensten Fällen im Alleingang! Viele unterstützende und helfende Hände haben so auch mir erst zum finalen Erfolg verholfen. Ihnen allen – ob im Folgenden namentlich erwähnt oder nicht – spreche ich an dieser Stelle meinen aufrichtigsten Dank aus!

Mein erster Dank gilt Herrn Prof. Dr. Burghard von Lüpke, der mir „meinen Drachen“ quasi zugeteilt hat und mir damit das große Vertrauen entgegengebracht hat, dass ich dieses Untier auch wirklich zur Strecke bringen könne. Dieses Vertrauen hat ihn selbst dann nicht ganz verlassen, als ich meinen Drachen zwischenzeitlich längere Zeit nur abschätzend (und Kräfte sammelnd) umkreist habe. Stets war Prof. von Lüpke bereit, mir bei Fragen mit hilfreichen Ratschlägen zur Seite zu stehen und hat mir damit auch das nötige Rüstzeug für den Kampf mitgegeben. In seiner ruhigen und sympathischen Art ließ er mir stets viel Freiheit zum selbstbestimmten Kämpfen (= Forschen). Für all das danke ich ihm sehr!

Der Niedersächsischen (bzw. jetzt Nordwestdeutschen) Forstlichen Versuchsanstalt, vertreten durch Herrn Prof. Hermann Spellmann danke ich für die Bereitstellung der Versuchsfläche und damit den Hinweis, in welcher Ecke der Harzwaldungen sich mein gesuchter Lindwurm aufzuhalten pflegt. Dass mein Kampf unter Einsatz von schwerem Gerät zudem auch so manchen Krater und andere Kampfesspuren auf der Fläche hinterlassen durfte, ist nicht selbstverständlich. Diese Toleranz verdient ebenfalls meinen Dank!

Aufrichtigen Respekt und ebensolchen Dank zolle ich dem großen Heer an studentischen, wissenschaftlichen und weiteren freiwilligen Hilfskräften (sozusagen den „Knappen“), die mich beim unmittelbaren Kampf im Gelände so heldenhaft unterstützt haben. An erster Stelle sei Stefan Kral genannt. Nur dessen Unterstützung hat mich das Gefecht, das wir unter Einsatz schwerer Technik im Gelände geschlagen haben, gewinnen lassen. Benjamin Bartmer hat mich ebenfalls intensiv beim unmittelbaren Fronteinsatz unterstützt. Weiteren Dank schulde ich

Michaela Dölle, Sylvia Voß, Ulrike Westphal, Hubertus Rölleke, Barbara und Mathias Linnert, …

Kein erfolgreicher Drachenkampf ohne die notwendigen Erholungspausen! Für das gemütliche Standquartier/Feldlager in Altenau und das stets sehr schmackhafte und umfangreiche Frühstück danke ich Frau Erika Dunkelberg von der Pension „Haus Stephanie“ besonders herzlich!

So manches im Kampf errungene „Artefakt“ lieferte erst Dank der Laborunterstützung durch Ulrike Westphal die gesuchten Erkenntnisse. Auch Catalin Petriţan hat mich in dieser Hinsicht sehr unterstützt (Jahrringanalysen). Euch beiden ein herzliches Dankeschön dafür!

Gleichsam als „Waffenschmiede“ haben mich mit der Ausgabe (auch zu Unzeiten) und Pflege der (Kampf-)Geräte Michael Unger und Andreas Parth zuverlässig unterstützt. Dank auch dafür!

Doch so ein Drachen hat bekanntlich mehrere Leben. Kaum hat er den ersten Kopf verloren, wächst ein zweiter nach, scheußlicher und schwieriger zu meistern als der erste. Und so folgte nach dem harten Kampf im Gelände die ungleich schwerere und langwierigere Schlacht am Schreibtisch. Dass meine Hauptwaffe in diesem Gefecht (der Computer) stets einsatzbereit war, obwohl sie immer wieder durch Updatefehler, Viren, Trojaner und anderes „Gesindel“ sabotiert wurde, verdanke ich ebenfalls Andreas Parth. Wie oft war er Helfer in größter Not und hat es dabei in seiner bescheidenen Art als „selbstverständlich“ und „Kleinigkeit“ abgetan. Lieber Andreas, ohne Dich wäre es nie etwas geworden!
Dank in diesem Zusammenhang auch an Karl-Heinz Heine!

Danken möchte ich auch meinem Vater: Zum einen für seine ständige Anteilnahme am Projekt und seine kritischen und damit oft fruchtbaren Fragen. Zum anderen danke ich ihm sehr für seine Unterstützung und Unterweisung in die mathematischen (Kampf-)Methoden (Statistik, MathLab-Software).

Es gibt nahezu nichts auf dieser Welt, was nicht schon einmal (zumindest in ähnlicher Weise) gemacht wurde und über das nicht schon in einem Buch berichtet worden wäre. So ist es auch bei meinem „Drachenkampf“ gewesen. Umfangreich sind die Quellen, denen Tipps und Hinweise zu entnehmen waren. Dass ich diese Bücher, Manuskripte und Schriftrollen jeweils relativ zügig studieren konnte, selbst wenn sie erst aus weiter Ferne kommen mussten, verdanke ich den Mitarbeitern unserer Bereichsbibliothek Forst. Ihnen ebenfalls meinen aufrichtigsten Dank!

Damit auch zukünftige Drachenkämpfer von meinen Erfahrungen profitieren können, habe ich gleichfalls so einen, den vorliegenden Bericht verfasst. Dass darin deutlich weniger Schreibfehler an die Nachwelt überliefert werden als ursprünglich vorhanden, verdanke ich den Korrekturlesern Magdalene Leimkühler, Annegret Schmidt, Stefan und Ludwig Kordes. Großer Dank auch an Margo Friederike Bargheer und Jutta Pabst vom Göttinger Universitätsverlag und Norbert Bartsch, dem Leiter dieser Schriftenreihe, für die sympathische Zusammenarbeit bei allen vorbereitenden Arbeiten für die Drucklegung der Dissertation. Ihre sehr entgegenkommende Art hat mir gerade die „letzten Meter" enorm erleichtert. Das war besonders wohltuend, weil die für die Schlussphase notwendigen Kräfte bereits in den zurückliegenden Scharmützeln verbraucht waren und ich andererseits gedanklich auch schon mit weiteren Gefechten zu tun hatte.

Schließlich gilt mein innigster Dank all den Freunden, die geholfen haben, die seelischen Brandblasen, die man beim Kampf gegen feuerspeiende Echsen zwangsläufig davonträgt, zu heilen und die mir Mut gemacht haben, den Kampf auch bei Rückschlägen immer wieder aufs neue aufzunehmen. Teilweise selbst kampferprobt waren mir Eure Ratschläge stets eine große Hilfe: Sylvia Voß, Michaela Dölle, Magdalene Leimkühler, Ulrike Westphal,… - wie gut, dass es Euch gibt!

Xylographie von Gustave Doré (1879) aus „Orlando Furioso" von Lodovico Ariosto (1532)

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name:	Martin Linnert
Geburtsdatum:	9. November 1975
Geburtsort:	Rostock (Mecklenburg-Vorpommern)
Nationalität:	Deutsch

Ausbildung und bisherige Tätigkeiten

12/2007	Beginn einer selbständigen Unternehmertätigkeit im Bereich Baumpflege und Garten- und Landschaftsbau (Fa. Baum & Borke e.K.)
05/2002-12/2006	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Waldbau, Universität Göttingen
	Parallel dazu beginnt das Anfertigen der Dissertation
10/2001-03/2002	Sechsmonatiger Aufenthalt in Südafrika in Verbindung mit einem Praktikum beim dortigen Department of Water Affairs and Forestry
04/2001-09/2001	Ergänzende Studien in den Bereichen GPS/GIS (ArcView), Planungs- und Bodenrecht und Abfallwirtschaft an der Fakultät für Landeskultur und Umweltschutz, Universität Rostock
	Eigenständiges Kartierungsprojekt am Institut für Geodäsie in Zusammenarbeit mit dem Stadtforstamt Rostock
	Praktikum bei der IGA Rostock 2003 GmbH (IGA = Internationale Gartenbauausstellung)
2000-04/2001	Werkvertrag mit dem Institut für Waldbau, Universität Göttingen: Untersuchungen und Auswertung zur Thematik "Eichennesterpflanzung" in Rheinland-Pfalz

1995-2000	Forstwissenschaftsstudium an der Universität Göttingen Abschluss: Diplom
	Tätigkeiten als Studentische Hilfskraft am Institut für Forstbotanik (07/98-12/00) und Werkvertrag bei der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt (07-08/97)
07/1994-09/1995	Zivildienst bei der Umweltaufsicht des Senats der Hansestadt Rostock (Einsatz überwiegend im Stadtforstamt Rostock)
1982-1994	Schulausbildung in Rostock Abschluss: Abitur
	Praktikum im Stadtforstamt Rostock (07-08/93)

In Europa befinden sich sechs bis sieben Millionen Hektar reine Fichtenbestände außerhalb des natürlichen Verbreitungsgebietes der Fichte, ein großer Teil davon stockt auf natürlichen Laub- und Laubmischwaldstandorten. Die Umwandlung der Fichtenreinbestände, die vor allem im Zuge der frühen Industrialisierung angelegt wurden, ist in den letzten 50 Jahren zur bedeutendsten waldbaulichen Herausforderung auf europäischer Ebene geworden, denn diese Wälder sind anfälliger gegenüber Immissionen, Schädlingsbefall, Windwurf und Trockenstress. Der prognostizierte Klimawandel wird das Problem voraussichtlich weiter verschärfen, zusätzlich sinkt die öffentliche Akzeptanz von Fichtenreinbeständen aus Gründen des Natur- und Landschaftsschutzes. Deshalb wird die Wiederherstellung der ursprünglichen Laubmischwälder als Schritt in Richtung einer nachhaltigen Waldwirtschaft angesehen. Dieser Waldumbau kann sowohl durch eine rasche Bestandesumwandlung als auch durch eine allmähliche Überführung, z. B. durch Voranbau mit Buche (*Fagus sylvatica* L.) unter einem Fichtenaltholzschirm, erreicht werden.

In Deutschland ist der niedersächsische Westharz ein typisches Beispiel für die europaweite Ausbreitung der Fichtenforsten in der Vergangenheit und für den aktuellen Waldumbau. Die vorliegende Arbeit beschreibt die Waldgeschichte dieses Gebietes und analysiert das Wachstum junger Buchen in einem Voranbau im Westharz.

GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT
GÖTTINGEN

ISBN: 978-3-941875-25-8
ISSN: 1867-6731

Universitätsverlag Göttingen