

**Waldwachstumskundliche Untersuchungen zur Steigerung
der Dendromasseproduktion im Spannungsfeld
zwischen Plantage und Hochwald**

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor rerum silvaticarum (Dr. rer. silv.)

vorgelegt von

Diplom-Forstwirt Hendrik Horn

geboren am 15.03.1983 in Wiesbaden

Gutachter:

Prof. Dr. habil. Prof. h.c. Heinz Röhle, Technische Universität Dresden

Prof. Dr. habil. Christian Ammer, Georg-August-Universität Göttingen

Prof. Dr. habil. Drs. h.c. Albrecht Bemann, Technische Universität Dresden

Tag der Verteidigung: 14.12.2017

Erklärung des Promovenden

Die Übereinstimmung dieses Exemplars mit dem Original der Dissertation zum Thema:

**Waldwachstumskundliche Untersuchungen
zur Steigerung der Dendromasseproduktion im Spannungsfeld
zwischen Plantage und Hochwald**

wird hiermit bestätigt.

Hendrik Horn

Darmstadt, Februar 2018

Danksagung

Eine alte Weisheit besagt, dass die größte Freude der Wissenschaft nicht in der Findung der Wahrheit besteht, sondern in der Suche selbst. Lange hat diese Suche nun angedauert, um das vorliegende Werk zu erstellen und viele Jahre durfte ich Freude daran haben. Zum Gelingen haben zahlreiche Mitstreiter und Kollegen beigetragen, wovon viele zu Mentoren und Freunden wurden. Für die Unterstützung bei der vorliegenden Arbeit möchte ich deshalb den nachstehenden Personen danken.

Zunächst bedanke ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Heinz Röhle für die hervorragende fachliche Betreuung und die stetige wohlwollende Motivation sowie Herrn Prof. Dr. Christian Ammer für die langjährige Begleitung. Weiterhin danke ich Herrn Dr. Uwe Grütters für viele wertvolle Impulse, die mein wissenschaftliches Wirken entscheidend beeinflusst haben. Für einen regen fachlichen Austausch danke ich meinen Kollegen beim Lehrstuhl für Waldwachstum und Holzmesskunde. Besonders hervorzuheben sind hier Frau Dr. Dorothea Gerold, Frau Dr. Katja Skibbe, Frau Manuela Müller und Herr Dr. Michael Körner. Für die Unterstützung im Bereich Statistik und Mathematik geht großer Dank an die Mitarbeiter der Professur für forstliche Biometrie und forstliche Systemanalyse unter Leitung von Frau Prof. Dr. Uta Berger. Besonders hervorzuheben sind hierbei Herr Dr. Ronny Peters und Herr Dr. Robert Schlicht, welche mich bei meinen ersten Schritten mit dem Statistikprogramm R begleitet haben. Diese Arbeit entstand im Rahmen des BMBF-geförderten Forschungsvorhabens AgroForNet. Mein besonderer Dank gilt deshalb den Projektträgern, Partnern und Koordinatoren, insbesondere Herrn Prof. Dr. Albrecht Bemann, Herrn Dr. Denie Gerold und Herrn Dr. David Butler Manning. Letzterem möchte ich auch für die Durchsicht der englischen Zusammenfassung danken. Die Untersuchung zum Thema Hochwald wäre ohne die Hilfe des Kompetenzzentrums Wald und Forstwirtschaft des Staatsbetriebes Sachsenforst unter Leitung von Herrn Dr. Dirk-Roger Eisenhauer nicht möglich gewesen. Hier möchte ich besonders die Zusammenarbeit mit Herrn Sven Martens und Herrn Dr. Kristian Münder hervorheben, welche mir wertvollen Rat und Unterstützung zuteilwerden ließen. Für die Überlassung von Versuchsflächen-daten sowie die umfangreiche Einführung in die Auswertung dieser möchte ich mich bei den Mitarbeitern des Landeskompetenzzentrums Forst Eberswalde (LFE) bedanken. Besonderer Dank gilt hierbei Herrn Stefan Panka, Herrn Dr. Jens Schröder sowie Frau Dr. Annett Degenhardt. Ein großer Dank gilt auch meiner Familie und meinen Freunden, die mich jederzeit bestärkt haben. Abschließend möchte ich meiner Mutter Frau Irmtraud Horn danken, welche durch ihre Motivation sowie die Überprüfung der Rechtschreibung entscheidend zu dem Erfolg dieser Arbeit beigetragen hat.

„Wenn die Menschen Deutschland verließen, so würde dieses nach 100 Jahren ganz mit Holz bewachsen sein. Da nun letzteres niemand benutzte, so würde es die Erde düngen und die Wälder würden nicht nur größer, sondern auch fruchtbarer werden.kehrten aber nachher die Menschen wieder zurück und machten sie wieder so große Anforderungen an Holz, Waldstreu und Viehweide, wie gegenwärtig, so würden die Wälder bei der besten Forstwirtschaft allemals nicht bloß kleiner, sondern auch unfruchtbarer werden. Die Wälder bilden sich und bestehen also da am besten, wo es gar keine Menschen und folglich auch gar keine Forstwissenschaft gibt; und diejenigen haben demnach vollkommen recht, welche sagen: Sonst hatten wir keine Forstwirtschaft und Holz genug, jetzt haben wir die Wissenschaft, aber kein Holz. Man kann aber auch mit Recht sagen: Die Menschen sind gesünder, die keinen Arzt brauchen, als die, die es tun, ohne dass daraus folgte, die Ärzte wären schuld an den Krankheiten. Es würde keine Ärzte geben, wenn es keine Krankheiten gäbe und keine Forstwissenschaft ohne Holzmangel. Diese Wissenschaft ist nun ein Kind des Mangels und diese ist folglich sein gewöhnlicher Begleiter.“

Heinrich Cotta (1817)

in seinem Werk zur „Anweisung zum Waldbau“

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VIII
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis.....	IX
1 Hintergrund und Motivation der Arbeit	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Ertragssteigerung als Herausforderung der Forstwirtschaft	2
1.2.1 Erschließung neuer Quellen außerhalb des Waldes	3
1.2.2 Erhöhung der Produktionsfläche	4
1.2.3 Erhöhung der Zuwachsleistung der bestehenden Wälder	5
1.2.3.1 Baumartenwahl	7
1.2.3.2 Baumartenmischung.....	8
1.2.3.3 Wahl der Umtriebszeit	9
1.2.3.4 Pflege- und Durchforstungskonzept.....	10
1.3 Ziele und Forschungsfragen	14
1.4 Zum Aufbau dieser Arbeit.....	15
2 Methodik.....	16
2.1 Statistische Basisauswertung.....	16
2.1.1 Korrelation und Regression	16
2.1.2 Multiple lineare Regression	19
2.1.3 Evaluierung biometrischer Modelle.....	22
2.2 Übersicht ertragskundlicher Kenngrößen.....	24
2.3 Modellierung der Dendromasseproduktion.....	26
2.3.1 Trockensubstanz des Baumholzes als Maß der Standortproduktivität	26
2.3.2 Volumenexpansions- und Raumdichtefaktoren	28
2.3.2.1 Herleitung des Volumenexpansionsfaktors.....	29
2.3.2.2 Umrechnung des Baumholzvolumens in Baumholzmasse	32
2.3.3 Allometrische Formelbeziehungen als Grundlage der Dendromassebestimmung	34
3 Szenarien zur Steigerung der Dendromasseproduktion	37
3.1 Modellierung des Produktionspotenzials von Pappel-KUP	38
3.1.1 Standortleistungsschätzung für KUP	38
3.1.2 Ertragsleistung von Pappel im Kurzumtrieb bei Folgerotationen.....	40
3.1.2.1 Methodisches Vorgehen.....	41
3.1.2.2 Versuchsflächen	42
3.1.2.3 Ergebnisdarstellung.....	44
3.1.2.4 Modell zur Leistungsschätzung von Kurzumtriebsplantagen in Folgerotationen.....	52
3.1.3 Abschätzung des Dendromassepotenzials von Pappel-KUP im Freistaat Sachsen	58
3.1.4 Diskussion der Ergebnisse	61
3.2 Ertragsbewertung von Baumarten in altersgleichen Reinbeständen des Schlagweisen Hochwaldes	72
3.2.1 Ertragstafeln – Konstruktion von Bestandeswuchsmodellen.....	73
3.2.1.1 Konstruktion eines Bonitierungsfächers	75
3.2.1.2 Ertragstafeln als Maß für baumartenspezifische Wuchsleistungen in Sachsen	87
3.2.1.3 Ertragstafeln als Maßstab für den Klimawandel.....	89

3.2.2	Standortleistungsmodellierung für die Hochwälder Sachsens.....	96
3.2.2.1	Methodische Ansätze zur Modellierung des Standortleistungsbezuges.....	96
3.2.2.2	Darstellung der Standortleistungsmodelle für den Wuchsraum Sachsen.....	102
3.2.2.3	Diskussion der Ergebnisse	105
3.2.3	Waldbehandlung und Ertrag	114
3.2.3.1	Durchforstungsversuch mit Küsten-Tanne.....	115
3.2.3.2	ASSMANNs Theorie der Grundflächenhaltung und die , $-3/2$ Selbstdifferenzierungsregel nach REINEKE (1933).....	118
4	Schlussbetrachtung	124
4.1	Baumplantagen im Vergleich mit Hochwäldern	124
4.2	Die Holzproduktion der Zukunft – Quo vadis deutsche Forstwirtschaft?.....	130
5	Zusammenfassung.....	134
	Summary.....	137
6	Literaturverzeichnis	140
7	Anhang.....	XI

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Überblick über die Maßnahmen zur Erhöhung von Holzerträgen	3
Abb. 1-2: Übersicht unterschiedlicher Bewirtschaftungsstrategien von Gehölzsystemen	6
Abb. 1-3: Gegenüberstellung von durchschnittlichem Gesamtwuchs (d_{GZ}) und dem Durchmesser des Grundflächenmittelstammes (d_g) für die I-Bonität der Kieferntragsstafel nach LEMBCKE et al. (1975). Durch die schwarz-gestrichelte Linie wird der Kulminationspunkt des d_{GZ} gekennzeichnet.....	10
Abb. 1-4: Gegenüberstellung der Rahmenwerte für die mittlere Bestandesgrundfläche [$m^2 \cdot ha^{-1}$] verschiedenartig behandelter Versuchsflächen (graue Balken) und dem Rahmen der „zuwachsoptimalen Grundflächenhaltung“ (schwarzer Rahmen) für die Baumarten Fichte, Eiche, Buche und Kiefer in Anlehnung an die Arbeiten von WIEDEMANN (1935, 1955).....	13
Abb. 1-5: Schematische Darstellung der Gesetzmäßigkeit der optimalen und kritischen Grundflächenhaltung (verändert nach FABRIKA und PRETZSCH 2013).....	13
Abb. 2-1: Beispiele für einige Punktwolken mit den dazugehörigen Werten des PEARSONSchen Maßkorrelationskoeffizienten: (a) perfekte positive Korrelation ($r_p = 1$), (b) keine Korrelation ($r_p = 0$), (c) stark negative Korrelation ($r_p = -0.9$)	17
Abb. 2-2: (a) Beispiel einer Ausgleichsgeraden zwischen beobachteten ($Daten_{Real}$) und geschätzten Daten ($Daten_{Modell}$) (b) Darstellung der rel. Abweichungen ($Abw. \%$) in einer Boxplotgrafik mit Erläuterung der gezeigten Größen.....	22
Abb. 2-3: Prozentuale Anteile an der oberirdischen Biomasse am Beispiel der Baumarten Kiefer und Buche (abgeleitet aus Untersuchungen von DAUBER und KREUTZER 1979)	27
Abb. 2-4: Übersicht verschiedener Biomassekomponenten von Waldökosystemen (verändert nach THOMASUS 1980)	28
Abb. 2-5: Übersicht über das Vorgehen bei der Herleitung von Massenexpansionsfaktoren	29
Abb. 2-6: Verhältnis von Derbholzvolumen (v_D) und dem Volumen-Expansionsfaktor (VEF), dargestellt am Beispiel der Kiefer (a) nach dem Modell von PISTORIUS (2007) bzw. (c) nach dem neu entwickelten zweistufigen Schätzverfahren. Zusätzlich dargestellt sind die relativen Abweichungen von den als Realwert angenommenen Massentafelwerten nach GRUNDNER et al. (1952), dargestellt (b) für das Modell von PISTORIUS (2007) bzw. (d) nach dem neu entwickelten zweistufigen Schätzverfahren.	31
Abb. 2-7: Gegenüberstellung der Einzelbaumvolumina an Baumholz (v_B), die anhand des zweistufigen Schätzansatzes hergeleitet wurden (rot) und den Volumenmittelstammwerten, die aus der Ertragsstafel nach LEMBCKE et al. (1975) (schwarz) für die Bonitäten M16 – M32 abgeleitet wurden, (a) aufgetragen über dem Alter bzw. (b) der Höhe des Grundflächenmittelstammes (h_g)....	32
Abb. 2-8: Mittel- und Grenzwerte der Raumdichte (R_D) ausgewählter Baumarten	33
Abb. 2-9: Gegenüberstellung der hergeleiteten Einzelbaummassen an Baumholz (rot) und den Tafelwerten nach HEINSDORF und KRAUSS (1990) (schwarz) für die Bonitäten M16 – M32, aufgetragen über der Höhe des Grundflächenmittelstammes (h_g).....	34
Abb. 2-10: Einzelbaummasse (m_B) ausgewählter Biomassefunktionen aus der Sammlung von MUUKKONEN (2007) (rot) und den Tafelwerten nach HEINSDORF und KRAUSS (1990) (schwarz) für die Bonität M28, aufgetragen (a) über dem Durchmesser des Grundflächenmittelstammes (d_g) bzw. (b) der Höhe des Grundflächenmittelstammes (h_g).....	35
Abb. 2-11: Entscheidungsbaum für die Auswahl des Verfahrens zur Herleitung der oberirdischen Dendromasse.....	36
Abb. 3-1: Lage der Versuchsflächen	42
Abb. 3-2: Triebzahl (N_T) für die 1. Rotation (Balken hellgrau) und 2. Rotation (Balken dunkelgrau). Die Versuchsfelder und die beprobten Klone sind namentlich aufgeführt. Das Alter wird in Rotation / Wurzelalter [Jahre] / Triebalter [Jahre] angegeben.	44

Abb. 3-3: Gegenüberstellung (a) der absoluten ($\Delta N_{T,1-2.Rot}$) bzw. (b) relativen Triebzahlsteigerung ($\Delta N_{T\%,1-2.Rot}$) von 1. zur 2. Rotation in Abhängigkeit von der Triebzahl der 1. Rotation ($N_{T,1.Rot}$)	45
Abb. 3-4: Zusammenhang zwischen dem (a) Durchmesser des Grundflächenmittelstammes (d_g) bzw. (b) des Oberdurchmessers (d_o) mit der Höhe des Grundflächenmittelstammes (h_g) bzw. der Oberhöhe (h_o)	46
Abb. 3-5: (a) Nichtlinearer Zusammenhang zwischen dem Durchmesser des Grundflächenmittelstammes (d_g) als Funktion der Triebzahl (N_T), (b) Ergebnis der linearisierenden doppelt-logarithmischen Transformation	47
Abb. 3-6: Zusammenhang zwischen der Höhe des Grundflächenmittelstammes (h_g), dem Durchmesser des Grundflächenmittelstammes (d_g) und der Triebanzahl (N_T)	48
Abb. 3-7: Relative Häufigkeitsverteilung des $d_{1,3}$ bei unterschiedlichem Aufnahmealter des Klons Max 3 der VFL Krummenhennersdorf mit eingezeichnetem d_g (rot) und d_o (grün)	48
Abb. 3-8: (a) Verlauf der Biomassefunktionen für alle aufgenommenen Versuchsflächen, (b) Lage und Formveränderung der Biomassefunktion bei verschiedenen Rotationen am Beispiel des Klons Androscoggin der Versuchsfläche Commichau	49
Abb. 3-9: Gegenüberstellung der Ertragswerte ($dGGZ_B$) von 1. Rotation (Balken hellgrau) und 2. Rotation (Balken dunkelgrau). Die Versuchsfelder und die beprobten Klone sind namentlich aufgeführt. Das Alter wird in Rotation / Wurzelalter [Jahre] / Triebalter [Jahre] angegeben	50
Abb. 3-10: Zusammenhang zwischen dem durchschnittlichen Gesamtwuchs ($dGGZ_B$) und der Triebzahl (N_T), dargestellt am Beispiel der Versuchsfläche Thammenhain	50
Abb. 3-11: Gegenüberstellung der relativen Steigerungsraten des durchschnittlichen Gesamtwuchses ($\Delta dGGZ_{B\%,1-2.Rot}$) von 1. auf die 2. Rotation, (a) über der Ackerzahl als Ausdruck der Bodengüte bzw. (b) dem durchschnittlichen Gesamtwuchs der 1. Rotation ($dGGZ_{B,1.Rot}$)	51
Abb. 3-12: Gegenüberstellung der Ertragssteigerungsfaktoren von 1. auf 2. ($ESF_{1-2.Rot}$) bzw. 2. auf 3. ($ESF_{2-3.Rot}$) Rotation im Verhältnis zum jeweiligen $dGGZ_B$ der Vorrotation (a) ohne bzw. (b) mit linearisierender Transformation	53
Abb. 3-13: Entwicklung des durchschnittlichen Gesamtwuchses ($dGGZ_B$) über der Rotation, dargestellt für die Versuchsflächen Langenwetzendorf, Dornburg und Bad Salzungen	54
Abb. 3-14: Herleitung der Ertragssteigerungsfaktoren (ESF) für die 2. bis 5. Rotation	55
Abb. 3-15: Modell zur Leistungsschätzung von Kurzumtriebsplantagen in Folgerotationen	56
Abb. 3-16: Anpassungsgüte (a - e) und prozentuale Abweichungen (f) zwischen realem und geschätztem durchschnittlichem Gesamtwuchs ($dGGZ_B$), dargestellt für die 2. bis 6. Rotation anhand der zur Parametrisierung verwendeten Datensätze	57
Abb. 3-17: Anpassungsgüte (a - b) und relative Abweichungen (c) zwischen realem und geschätztem durchschnittlichem Gesamtwuchs ($dGGZ_B$), dargestellt für die 2. bis 3. Rotation anhand eines unabhängigen Datensatzes	58
Abb. 3-18: (a) Übersicht der prozentualen Flächenverteilung von landwirtschaftlichen Acker- und Grünlandflächen auf Ebene der sächsischen Landkreise (b - f), modellierte durchschnittliche Gesamtwüchse auf Gemeindeebene an Trockenbiomasse ($dGGZ_B$) für die Klongruppe Max bei 5-jährigem Umtrieb und Steckholzzahl von 10.000 Pflanzen pro ha für 1. – 4. Rotation	60
Abb. 3-19: Vergleich der Entwicklung von (a) Triebzahl, (b) $dGGZ_B$ und (c) Verteilung des $d_{1,3}$ für das 1. bis 3. Standjahr der 3. Rotation am Beispiel der Versuchsfläche Krummenhennersdorf	61
Abb. 3-20: Ertragszuwachs einer schwedischen Weidenplantage im 4-jährigen Umtrieb (verändert nach DANFORS et al. 1998)	62
Abb. 3-21: 13 Jahre alter Wurzelstock mit 4-jährigen Trieben in der 2. Rotation des Klons Androscoggin [2/13/4]	63
Abb. 3-22: Zusammenhang zwischen Triebzahl (N_T) und Durchmesser des Grundflächenmittelstammes (d_g) auf den beprobten Versuchsfeldern. Zusätzlich wurden als Referenzwerte die Funktionsbezüge für die sich aus der REINEKE-Beziehung ergebenden Standortgüten eingetragen.	64

Abb. 3-23: (a) „Stand-Density-Rule“ nach REINEKE (1933) am Beispiel der Versuchsfläche Thammenhain II (b) „-3/2-Selbstdifferenzierungsregel“ nach YODA et al. (1963) am Beispiel aller beprobten Kurzumtriebsplantagen	65
Abb. 3-24: Die Dichteabnahme durch Selbstdifferenzierung in Waldbeständen kann aus den stereometrischen Zusammenhängen von Kugeln auf einer konstant großen Fläche veranschaulicht werden. Die räumliche Allometrie zwischen Volumen- und Dichteveränderung ist bei Pflanzen ähnlich wie bei Kugeln und folgt der -1,5ten Potenz (verändert nach PRETZSCH 2000).	66
Abb. 3-25: Absinken des Einzelbaumgewichtes (bm) bei gleichem Brusthöhendurchmesser ($d_{1,3}$) aufgrund des konkurrenzbedingten Verschiebens von Schaft- und Astholz	68
Abb. 3-26: Schematische Darstellung der durch Störereignisse hervorgerufenen Zuwachsverluste auf KUP, bezogen auf die „Stand-Density-Rule“ nach REINEKE (1933)	70
Abb. 3-27: Modellierter jährlicher Ernteausfall von 1 – 2 % am Beispiel des Freistaates Sachsen	71
Abb. 3-28: (a) Mit der SLOBODA-Funktion (1971) modellierter Höhenzuwachsflächen auf Basis der untersuchten Küsten-Tannen-Versuchsflächen ($n = 100$). Dargestellt sind die ausgeglichenen Höhenbonitäten (Höhe im Alter 50 Jahre) 20 bis 40 m in 2 m-Stufen. Die Lage der Kulminationspunkte ist durch eine rote Linie kenntlich gemacht. (b) Aus den Höhenzuwachskurven abgeleiteter Alters-Höhenfächer für die Baumart Küsten-Tanne (Bonitäten 20 bis 40, Altersbereich bis 55 Jahre). Das Bezugsalter 50 Jahre ist durch strichlierte Signaturen besonders hervorgehoben. Zusätzlich wurden die zugrunde liegenden Versuchsflächendaten dargestellt (rote Punkte).	78
Abb. 3-29: (a) Mit der SLOBODA-Funktion (1971) modellierter Höhenzuwachsflächen auf Basis der untersuchten Fichten-Versuchsflächen ($n = 2094$). Dargestellt sind die ausgeglichenen Höhenbonitäten (Höhe im Alter 100 Jahre) 22 bis 40 m in 2 m-Stufen. Die Lage der Kulminationspunkte ist durch eine rote Linie kenntlich gemacht. (b) Aus den Höhenzuwachskurven abgeleiteter Alters-Höhenfächer für die Baumart Fichte (Bonitäten 22 bis 40, Altersbereich bis 140 Jahre). Das Bezugsalter 100 ist durch strichlierte Signaturen besonders hervorgehoben. Zusätzlich wurden die zugrunde liegenden Versuchsflächendaten dargestellt (rote Punkte).	79
Abb. 3-30: (a) Oberhöhenzuwachs- bzw. (b) Alters-Oberhöhenfächer nach SLOBODA (1971) für die Fichten- Versuchsflächen der höheren Lagen des Erzgebirges ($n = 602$)	81
Abb. 3-31: Schematische Darstellung des Höhenwachstums, bezogen (a, c, d) auf die abgeleitete Zuwachsfunktion bzw. (b) auf die Wachstumsfunktion nach MICHAÏLOV und TERASAKI (vgl. WENK et al. 1990, S. 38)	83
Abb. 3-32: Systemverhalten der Funktion nach SLOBODA (1971) für (a) $a_3 > 1$ bzw. (b) $a_3 < 1$	84
Abb. 3-33: (a) Auszug aus dem Oberhöhenbonitätsfächer für die Gemeine Fichte. (b) Gegenüberstellung der relativen Beziehung [%] der Kulminationshöhe (h_K) in Bezug zur Endhöhe (h_E) für unterschiedliche Umtriebszeiten (80 bis 160 Jahre), bezogen auf den zuvor dargestellten Oberhöhenbonitätsfächer der Gemeinen Fichte.	85
Abb. 3-34: Vergleich der durch die sächsische Forsteinrichtung erhobenen Alters-Höhen-Werte mit (a) dem konstruierten Oberhöhenbonitätsfächer für die Gemeine Fichte bzw. (b) dem Oberhöhenfächer der Tafel nach WENK et al. (1985). Zusätzlich dargestellt wurden die (nicht-parametrische) Glättungskurve (rot strichliert) sowie die darauf aufbauende lokale Gewichtung der einzelnen Wertepaare.	86
Abb. 3-35: Vergleich der $dGZ_{50/100}$ -Bonitäten, bezogen (a) auf das Derbholzvolumen [$m^3 \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$] bzw. (b) auf die Derbholzmasse [$t_{atro} \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$]. Die Daten beziehen sich auf die in der Forsteinrichtung für den sächsischen Staatswald erfassten Reinbestände, bezogen auf das Stichjahr 2013.	88
Abb. 3-36: Vergleich der maximalen durchschnittlichen Gesamtwuchsleistung an Baumholzmasse (dGZ_{max}) unterschiedlicher Baumarten anhand der für Sachsen gültigen Ertragstabellen. Neben den Säulen sind die jeweiligen relativen Bonitäten (links) bzw. das Kulminationsalter des dGZ_{max} (rechts) angegeben. Für eine bessere Vergleichbarkeit wurde die I relative Bonität rot markiert.	89
Abb. 3-37: Gegenüberstellung der dGZ_{100} -Bonitätsverteilungen aller Bestände aus den Begründungsjahren 1961 bis 1990 mit den Beständen aus den Begründungsjahren (a) 1861 bis 1960 bzw. (b) 1931 bis 1960. Die Daten beziehen sich auf die in der Forsteinrichtung für den sächsischen Staatswald erfassten Reinbestände, bezogen auf das Stichjahr 2013.	90

Abb. 3-38: Darstellung der Bonitätsverteilung für die Begründungsjahre 1861 bis 1990 (gestaffelt in 10-Jahresperioden) für ausgewählte Baumarten. Die Daten beziehen sich auf die in der Forsteinrichtung für den sächsischen Staatswald erfassten Reinbestände, bezogen auf das Stichjahr 2013.	91
Abb. 3-39: (a) Gegenüberstellung der berechneten Bonitäten zum Zeitpunkt der Datenaufnahme (rel. Bonität) gegen die relativen Bonitäten, welche sich auf das Begründungsjahr der Versuchsfläche beziehen (rel. Ausgangsbonität). Die Bonität der verwendeten Fichten-Versuchsflächen wurde nach der Tafel WENK et al. (1985) hergeleitet. (b) Darstellung der relativen Häufigkeitsdichte der Differenzen aus relativer Ausgangsbonität und der relativen Bonität zum Zeitpunkt der Datenaufnahme.	93
Abb. 3-40: (a) Gegenüberstellung der Mittelhöhe (h_g) über dem Alter der sechs Versuchsparzellen des Durchforstungsversuchs Wermsdorf und der Eichen-ertragstafel nach ERTELD (1962). (b) Darstellung der Differenz zwischen der Ausgangsbonität, die der Bestand im Jahr 1902/14 innehatte, und der Bonität zum Zeitpunkt der jeweiligen Datenaufnahme in Bezug zum Kalenderjahr.	95
Abb. 3-41: MARS-Schätzung für den simulierten Datensatz	101
Abb. 3-42: Einfluss der Prädiktorvariablen auf das Gütekriterium ($GRSq$) für die mittels MARS-Algorithmus hergeleiteten baumartenspezifischen Standortleistungsmodelle. Gezeigt wird, inwieweit durch die Hinzunahme der entsprechenden Variablen das Gütekriterium ($GRSq$) verbessert wird. Die Kreisflächengröße ist proportional zum prozentualen Einfluss der entsprechenden Variablen auf die Verbesserung der Modellgüte. Die Erläuterung verwendeter Abkürzungen kann in Tab. 3-16 nachgelesen werden.	102
Abb. 3-43: (a-e) Relative Häufigkeitsverteilung [%] der Differenzen zwischen realen und modellierten dGZ_{100} -Bonitäten, getrennt nach Baumarten. (f) Vergleich der Differenzen [%] zwischen realen und modellierten dGZ_{100} -Bonitäten in der Zusammenschau für alle Baumarten.	103
Abb. 3-44: (a) Übersicht der prozentualen Flächenverteilung von Wald auf Ebene der sächsischen Landkreise, (b - f) modellierte dGZ_{100} -Bonitäten für ausgewählte Baumarten. Dargestellt ist der flächengewogene Mittelwert aller modellierten dGZ_{100} -Bonitäten einer Gemeinde.	104
Abb. 3-45: Vergleich der dGZ_{100} -Bonitäten, bezogen (a) auf das Derbholzvolumen [$m^3 \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$] bzw. (b) auf die Derbholzmasse [$t_{atro} \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$]. Die Darstellung erfolgt unter Verwendung der mittels des MARS-Algorithmus modellierten dGZ_{100} -Bonitäten. Modelliert wurde das baumartenspezifische Leistungsspektrum, bezogen auf alle Waldbestände des sächsischen Staatswaldes.	105
Abb. 3-46: Ökogramme forstwirtschaftlich bedeutungsvoller Baumarten für Mitteleuropa (verändert nach THOMASIIUS 1991)	106
Abb. 3-47: Gegenüberstellung der Variablen N_{Jahr} und T_{Jahr} den in der sächsischen Forsteinrichtung angegebenen dGZ_{100} -Bonitäten in einem zweifaktoriellen Ökogramm	107
Abb. 3-48: Darstellung der modellierten dGZ_{100} -Bonitäten für die Baumart Gemeine Kiefer bei aktueller Jahresmitteltemperatur (a) bzw. bei erhöhter Jahresmitteltemperatur (b). Dargestellt ist der flächengewogene Mittelwert aller modellierten dGZ_{100} -Bonitäten für die Waldbestände einer Gemeinde.	111
Abb. 3-49: Simulation der dGZ_{100} -Bonität bei Veränderung der Jahresmitteltemperatur unter ceteris paribus-Bedingungen am Beispiel Sachsens. Dargestellt ist die prozentuale Verschiebung des flächengewichteten Mittelwertes.	112
Abb. 3-50: Die Toleranzkurve gibt die Beziehung zwischen dem Gradienten einer Ressource (z. B. eines Standort- oder Klimafaktors) und dem Wachstum (Vitalität) grafisch wieder.	113
Abb. 3-51: Küsten-Tannen-Durchforstungsversuch Freienwalde 168: Darstellung (a) Volumenentwicklung (V_D) bzw. (b) Gesamtwuchsleistung an Derbholzvolumen ($GW_{L_{VD}}$) unterschiedlicher Durchforstungsarten im Vergleich zur Douglasien-Ertragstafel nach BERGEL (1985) und der Küsten-Tannen-Ertragstafel nach BRADLEY et al. (1971). (c) Darstellung des jährlichen Derbholzzuwachses (iV_D) bzw. (d) der mittleren Grundflächenhaltung (mGH) über dem Kalenderjahr.	116

Abb. 3-52: Zusammenhang zwischen rel. mittlerer Grundflächenhaltung (<i>rel. mGH</i>) und rel. laufendem Volumenzuwachs an Derbholz (<i>rel. iV</i>) am Beispiel des Küsten-Tannen-Durchforstungsversuchs Freienwalde 168. Zusätzlich wurden mittels Teststatistik Gruppen identifiziert (lateinische Buchstaben).....	117
Abb. 3-53: (a) Dargestellt ist der durchschnittliche Gesamtwuchs an Derbholz in Bezug zur mittleren Grundflächenhaltung bzw. (b) der Zusammenhang zwischen Stammzahl (<i>N</i>) und Mitteldurchmesser (<i>d_g</i>). Zusätzlich wurden die Funktionsbezüge für die sich aus der REINEKE-Regel ergebenden Standortgüten eingetragen. Als Datengrundlage dient der Küsten-Tannen-Durchforstungsversuch Freienwalde 168.....	119
Abb. 3-54: Vergleich von Kronenbreiten und Lichtraumausnutzung 49-jähriger Küsten-Tannen bei unterschiedlichen Durchforstungsstärken	120
Abb. 3-55: Auswirkungen unterschiedlicher Durchforstungsstärken und damit verbundener Stammzahlhaltung auf den durchschnittlichen Gesamtwuchs (<i>dGZ</i>), bezogen auf die von REINEKE (1933) formulierte Regel.....	121
Abb. 3-56: Darstellung der Konkurrenzverhältnisse entlang der -3/2 Selbstdifferenzierungslinie: Gezeigt wird das Verhältnis zwischen Stammzahl, Durchmesser des Grundflächenmittelstammes (<i>d_g</i>) und dem Kronenkonkurrenzfaktor (<i>CCF</i>). Die Färbung gibt die Stärke des <i>CCF</i> wieder. Die -3/2 Selbstdifferenzierungslinie wurde für unterschiedliche <i>a₁</i> dargestellt (schwarze Linien).	122
Abb. 4-1: Vergleich der Dendromasseproduktion von Plantagenforstwirtschaft mit den zu erwartenden Erträgen ausgewählter Wirtschaftsbaumarten der sächsischen Hochwälder.....	126
Abb. 4-2: Schematischer Wachstumsverlauf von Waldbeständen nach Störungen unterschiedlicher Stärke (verändert nach BURSCHEL und HUSS 1997).....	129
Abb. 4-3: Flächenverlust in Waldbeständen durch die Anlage von Rückegassen, dargestellt für unterschiedliche Gassenbreiten (4 bis 6 m) und verschiedene Rückegassenabstände (15 bis 50 m) 132	
Abb. 4-4: (a) Schematische Darstellung der Einbringung von Pappeln auf Rückegassen. (b) Einbringung von schnellwachsenden Baumarten in Erntetaschen. Die Erstellung der Grafiken erfolgte mit dem Programm BWINPro-S (DÖBBELER et al. 2011).	133

Tabellenverzeichnis

Tab. 1-1: Vergleich des durchschnittlichen Gesamtzuwachses an Derbholz (dGZ) von Mischbeständen mit Reinbeständen nach der Ertragstafel von WIEDEMANN (1949). In dem aufgeführten Beispiel hat die Hauptholzart die Bonität I.	9
Tab. 1-2: Rahmenwerte für die mittlere Bestandesgrundfläche [$m^2 \cdot ha^{-1}$] unterschiedlicher Durchforstungsarten und -stärken nach WIEDEMANN (1955)	11
Tab. 2-1: Beispielesdatensatz	19
Tab. 2-2: Korrelationsmatrix der Prädiktoren Niederschlag, Temperatur und Höhenlage	20
Tab. 2-3: Darstellung der Toleranz und dem daraus abgeleiteten Varianzinflationsfaktor (VIF)	20
Tab. 2-4: Vergleich unterschiedlicher Modelle	21
Tab. 2-5: Darstellung des Standardpartialregressionskoeffizienten (SPC)	21
Tab. 3-1: Minimale und maximale Werte von Standort- und Klimavariablen der von ALI (2009) untersuchten Versuchsflächen	39
Tab. 3-2: Koeffizienten der Funktion zur Berechnung der Oberhöhe für verschiedene Pappelhybride nach ALI (2009)	39
Tab. 3-3: Standortliche und klimatische Daten zu den Versuchsfeldern	43
Tab. 3-4: Ergebnisse der Korrelationsanalyse zwischen den absoluten ($\Delta N_{T_{1-2.Rot}}$) bzw. relativen Triebzahlsteigerungen ($\Delta N_{T\%_{1-2.Rot}}$) von 1. zur 2. Rotation und verschiedenen ertragsbildenden Variablen ($n = 28$)	45
Tab. 3-5: Ergebnisse der Korrelationsanalyse zwischen dem Durchmesser des Grundflächenmittelstammes (d_g) bzw. dem Oberdurchmesser (d_o) und verschiedenen ertragsbildenden Variablen ($n = 28$)	46
Tab. 3-6: Ergebnisse der Korrelationsanalyse zwischen der absoluten ($\Delta dGZ_{B_{1-2.Rot}}$) bzw. relativen Steigerung des durchschnittlichen Gesamtzuwachses ($\Delta dGZ_{B\%_{1-2.Rot}}$) von 1. zur 2. Rotation und verschiedenen ertragsbildenden Variablen ($n = 10$)	51
Tab. 3-7: Statistische Kennwerte der linearen Regression für die Ertragssteigerungsfaktoren von 1. auf 2. bzw. 2. auf 3. Rotation im Verhältnis zum jeweiligen dGZ_B der Vorrotation	52
Tab. 3-8: Statistische Kennwerte der linearen Regression zur Herleitung der modellierten dGZ_B -Werte	54
Tab. 3-9: Evaluierungsgrößen Bias (Verzerrung), Präzision (Prognosestreuung) und Treffgenauigkeit der Modelle bei Anwendung auf das für die Parametrisierung verwendete Datenmaterial	57
Tab. 3-10: Evaluierungsgrößen Bias (Verzerrung), Präzision (Prognosestreuung) und Treffgenauigkeit der Modelle bei Anwendung auf einen unabhängigen Datensatz	58
Tab. 3-11: Festgelegte Eingangsgröße für die Standortleistungsschätzung nach ALI (2009)	59
Tab. 3-12: Darstellung Toleranz und Varianzinflationsfaktor (VIF)	93
Tab. 3-13: Statistische Kennwerte der Regressionsfunktion zur Schätzung der Bonitätsentwicklung	94
Tab. 3-14: Statistische Kennwerte der Regressionsfunktion zur Schätzung der Bonitätsentwicklung	95
Tab. 3-15: Darstellung der für die Standortleistungsmodellierung verwendeten Geodatenbasis sowie der extrahierten und für die Modellerstellung verwendeten Umweltvariablen	98
Tab. 3-16: Erläuterung der aus den Geodaten extrahierten Umweltvariablen	99
Tab. 3-17: Ergebnis des MARS-Algorithmus, bezogen auf einen einfachen Beispielesdatensatz	101
Tab. 3-18: Statistische Kennwerte der mittels MARS-Algorithmus hergeleiteten baumartenspezifischen Standortleistungsmodelle	102
Tab. 3-19: Küsten-Tannen-Durchforstungsversuch Freienwalde 168: Übersicht der klimatischen und standörtlichen Bedingungen der Versuchsfläche	115
Tab. 3-20: Küsten-Tannen-Durchforstungsversuch Freienwalde 168: Übersicht der Versuchsparzellen	115

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

%	Prozent
°C	Grad Celsius
a	Jahr
A	Bezugsfläche
Abb.	Abbildung
Abs.	Absatz
<i>Abw.</i> %	prozentuale Abweichung
<i>AIC</i>	Akaike Informationskriterium
<i>Az</i>	Ackerzahl
<i>BG</i>	Begründungsjahr
<i>BM</i>	Biomasse
<i>bm</i>	Biomasse des Einzeltriebs bzw. Einzelbaumes
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
<i>BT</i>	Bodentiefe
BWaldG	Gesetz zur Erhaltung des Waldes und zur Förderung der Forstwirtschaft (Bundeswaldgesetz)
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
<i>CCF</i>	Kronenkonkurrenzfaktor
cm	Zentimeter
$d_{1,3}$	Brusthöhendurchmesser
d_g	Durchmesser des Grundflächenmittelstammes
d_o	Oberdurchmesser
<i>dGZ</i>	durchschnittlicher Gesamtwuchs
<i>dGZ</i> _{50/100}	durchschnittlicher Gesamtwuchs im Alter 50 bzw. 100
<i>dGZ_B</i>	durchschnittlicher Gesamtwuchs an Dendromasse
<i>dGZ_{max}</i>	durchschnittlicher Gesamtwuchs zum Zeitpunkt seiner Kulmination
$\bar{e}$	Verzerrung/ Bias
<i>ESF</i>	Ertragssteigerungsfaktor
et al.	und andere
etc.	et cetera
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
<i>G</i>	Grundfläche
gest. DF	gestaffelte Durchforstung
GIS	Geoinformationssystem
grup. DF	Gruppen-Durchforstung
<i>GWL</i>	Gesamtwuchsleistung
<i>h</i>	Höhe des Einzelbaumes
h_g	Höhe des Grundflächenmittelstammes
h_o	Oberhöhe
ha	Hektar
<i>Höhe_{NN}</i>	Höhenlage über NN
i. d. R.	in der Regel
<i>iV</i>	jährlicher Volumenzuwachs
<i>KAK_{WE}</i>	Potenzielle Kationenaustauschkapazität im effektiven Wurzelraum
Kap.	Kapitel
kg	Kilogramm
<i>kg</i>	Kronengrundfläche des Einzelbaumes
KUP	Kurzumtriebsplantage

LFA-MV	Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern
LFE	Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde
m	Meter
m_x	Treffgenauigkeit
m^3	Kubikmeter
mGH	mittlere Grundflächenhaltung
Mio.	Millionen
mm	Millimeter
Mrd.	Milliarde
n	Anzahl
N_{5-6}	Niederschlagssumme der Monate Mai bis Juni
N_{Jahr}	Durchschnittliche Jahresniederschläge für den Zeitraum von 1961 bis 1990
N_{Stock}	Ausgangspflanzzahl an Steckhölzern
N_T	Triebzahl
nFK_{WE}	Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum
r_0	Darrdichte
R_D	Raumdichte
r_p	PEARSONScher Maßkorrelationskoeffizient
R^2_{adj}	korrigiertes Bestimmtheitsmaß
rel.	relativ
$rel. mGH$	relative mittlere Grundflächenhaltung
Rot	Rotation
S.	Seite
s_e	Präzision oder Prognosestreuung
SPC	Standardpartialregressionskoeffizient
spec.	Spezies, Art
t	Tonne
T_{4-7}	Durchschnittstemperatur der Monate April bis Juli
T_{Jahr}	Durchschnittliche Jahresmitteltemperatur für den Zeitraum von 1961 bis 1990
Tab.	Tabelle
TLL	Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft
TU	Technische Universität
u. a.	unter anderem
UN	United Nations
V_B	Baumholzvolumen
V_D	Derbholzvolumen
VEF	Volumenexpansionsfaktor
vgl.	vergleiche
VIF	Varianzinflationsfaktor
z. B.	zum Beispiel

1 Hintergrund und Motivation der Arbeit

1.1 Einleitung

Die Nutzung von Wald reicht zurück bis zum Beginn der Menschheitsgeschichte. Vor der großtechnischen Nutzung von Kohle, Erdöl und Erdgas wurde mit Brennholz der Energiebedarf gedeckt. Noch um 1800 wurden ca. 90 % des geernteten Holzes energetisch genutzt. Gewerbe wie Bergbau, Köhlerei, Glashütten etc. deckten damals ihren gesamten Energiebedarf fast ausschließlich über Holz (KALTSCHMITT 2009). Daneben war Holz das wichtigste Basismaterial für Haus- und Schiffsbau sowie für die Herstellung unzähliger Gebrauchsgegenstände. Der enorme Holzbedarf führte zu einer starken Übernutzung und vielerorts verschwanden Wälder völlig. Holzmangel und Holzteuerung waren in ganz Europa noch vor zwei Jahrhunderten die wichtigsten Themen in Politik und Gesellschaft und wurden zu Trittstufen auf dem Weg zur Begründung einer modernen nachhaltigen Forstwirtschaft. Heute erinnert in Deutschland an diese Zeit nur noch sehr wenig. Holznot sowie auch die Leistungen von Generationen von Forstleuten geraten in der öffentlichen Wahrnehmung zunehmend in Vergessenheit. Zudem ist die Tendenz zu beobachten, dass unter dem Blickwinkel von Naturschutz und Biodiversität die Holznutzung zunehmend als gesellschaftlich unverträglich dargestellt und in der Stilllegung von Waldflächen das „politische Heil“ gesucht wird (MÖHRING und HATZFELD 2016). Dies geschieht auch im guten Glauben daran, dass Holz in den deutschen Wäldern im Überfluss vorhanden sei. Oberflächlich betrachtet, kann dies durch die aktuellen Statistiken der Bundeswaldinventur (BMEL 2016) sogar belegt werden: Deutschlands Wälder bedecken 32 % der Gesamtlandesfläche und die Waldfläche ist deutschlandweit zwischen 2002 und 2012 sogar um ca. 50.000 ha gestiegen. Mit einem stehenden Holzvorrat von 3,7 Mrd. m³ (336 m³·ha⁻¹) zählt Deutschland somit zu den Ländern mit den höchsten Holzvorräten Europas. Löst man sich von der rein nationalen Ebene und betrachtet die Problematik im weltweiten Maßstab, erkennt man den Trugschluss der zuvor dargestellten Argumentation: Zurzeit steigt die Weltbevölkerung alle 14 Jahre um eine weitere Milliarde an. Nach Prognosen der UN (2015) werden im Jahre 2050 etwa 9,7 Milliarden Menschen auf der Erde leben. Durch das Ansteigen der Weltbevölkerung und das wirtschaftliche Aufstreben insbesondere der Entwicklungs- und Schwellenländer wird die Nachfrage nach dem Rohstoff beträchtlich steigen. Gleichzeitig ist die Entwicklung der weltweiten Waldfläche rückläufig. Dem aktuellen Waldbericht der FAO (2016) folgend, hat sich der Rückgang der Waldfläche zwar verlangsamt, schreitet jedoch jährlich um 0,08 % voran. Mit hoher Wahrscheinlichkeit kann demnach davon ausgegangen werden, dass die Waldflächen nicht ausreichen, um die Rohholzversorgung zukünftig sicherzustellen. Nach

einer Hochrechnung von SUTTON (1999) werden bereits Mitte des 21. Jahrhunderts ca. 6 Milliarden m³ Rohholz jährlich benötigt. Das bedeutet eine geschätzte Steigerung von ca. 50 % gegenüber der aktuellen weltweiten Holzbereitstellung. Auch wenn in Europa und Deutschland gegenwärtig nur erste Anzeichen auf die Rohstoffknappheit hinweisen, zeichnet sich auch hier ein zunehmend deutlicher werdender Trend ab. So wird bereits für das Jahr 2020 nach Arbeiten von HETSCH et al. (2008), MANTAU (2010) und THRÄN et al. (2011) für Europa eine Holzlücke von 430 Millionen m³ bzw. für Deutschland zwischen 20 bis 30 Millionen m³ vorausgesagt. Als Hauptgrund für diese bereits beginnende Entwicklung ist die zunehmende Verknappung und die daraus resultierende Preissteigerung fossiler Rohstoffe (Erdöl, Erdgas etc.) am internationalen Markt zu nennen (SPELLMANN 2013). Als Folge davon werden im Rahmen einer Rohstoffersatzwirtschaft fossile Energieträger zunehmend durch die Ressource Holz substituiert und der Nutzungsdruck auf die Wälder nimmt zu (BEMMANN und BUTLER MANNING 2013). Angesichts der großen Abhängigkeit Deutschlands von Erdöl-, Erdgas- und Kohleimporten und der gestiegenen geopolitischen Risiken wird das Ziel „Versorgungssicherung“ zweifellos auch hier noch erheblich an Bedeutung gewinnen (SCHULTE 2007). Eine wesentliche Frage für die nationalen Volkswirtschaften wird in der Zukunft sein, den bereits jetzt knapp werdenden Rohstoff Holz in ausreichendem Maße zur Verfügung stellen zu können. Der globale Waldbericht der FAO (2016) sieht deshalb eine der wichtigsten zukünftigen Herausforderungen darin, auf immer weniger Flächen mehr Holz zu produzieren, ohne dabei die Produktionsgrundlagen zu zerstören. Es stellt sich demnach die Frage, inwieweit mit nachhaltigen bzw. ökologisch vertretbaren Maßnahmen die Dendromasse gesteigert werden kann. Wälder als „Holzfabrik“ und ihre ertragstechnische Bewertung stehen deshalb im Fokus dieser Arbeit.

1.2 Ertragssteigerung als Herausforderung der Forstwirtschaft

Heute besteht in Deutschland ein übereinstimmender Konsens darin, dass die wirtschaftliche Nutzung der Wälder nicht alleiniges Ziel der Forstwirtschaft sein darf, sondern sich in möglichst sinnvoller Art und Weise den Zielen des Waldbesitzers als auch den gesellschaftlichen Ansprüchen und Restriktionen unterwerfen muss. Neben der Nutzfunktion, zu der u. a. die Rohstoff-, Einkommens- und Arbeitsplatzfunktion zählen, müssen auch Schutz- (Klima-, Boden-, Wasser-, Immissions-, Lärm-, Sichtschutz etc.) und Erholungsfunktion (Freizeit- und Erholungsnutzung) Beachtung finden (ROSENKRANZ 2003). Diese vielseitigen gesellschaftlichen Ansprüche an den Wald konkurrieren miteinander und es bedarf eines politischen Prozesses, um Kompromisse zu erzielen. Im Optimalfall mündet der dabei entstehende Konsens zwischen den Interessengruppen in multifunktionalen Waldnutzungsprogrammen. Die gegenwärtige

Waldstruktur ist somit das Spiegelbild der im ständigen Wechsel begriffenen Bedürfnisse und Zielsetzungen von Menschen (GADOW 2005). Unter Beachtung all dieser Ziele, Ansprüche und Einschränkungen stellt sich die Frage, ob und vor allem wie es möglich ist, Strategien zur Ertragssteigerung von Dendromasse unter Beachtung bisheriger Konzepte zu entwickeln. Optionen der Produktionssteigerung, die gegenwärtig einen gesellschaftlichen Konsens unmöglich erscheinen lassen, sind dabei stets zu verwerfen und werden in dieser Arbeit auch nicht beachtet. Einen ersten Überblick möglicher Ansatzpunkte für die Beantwortung dieser Frage vermittelt Abb. 1-1.

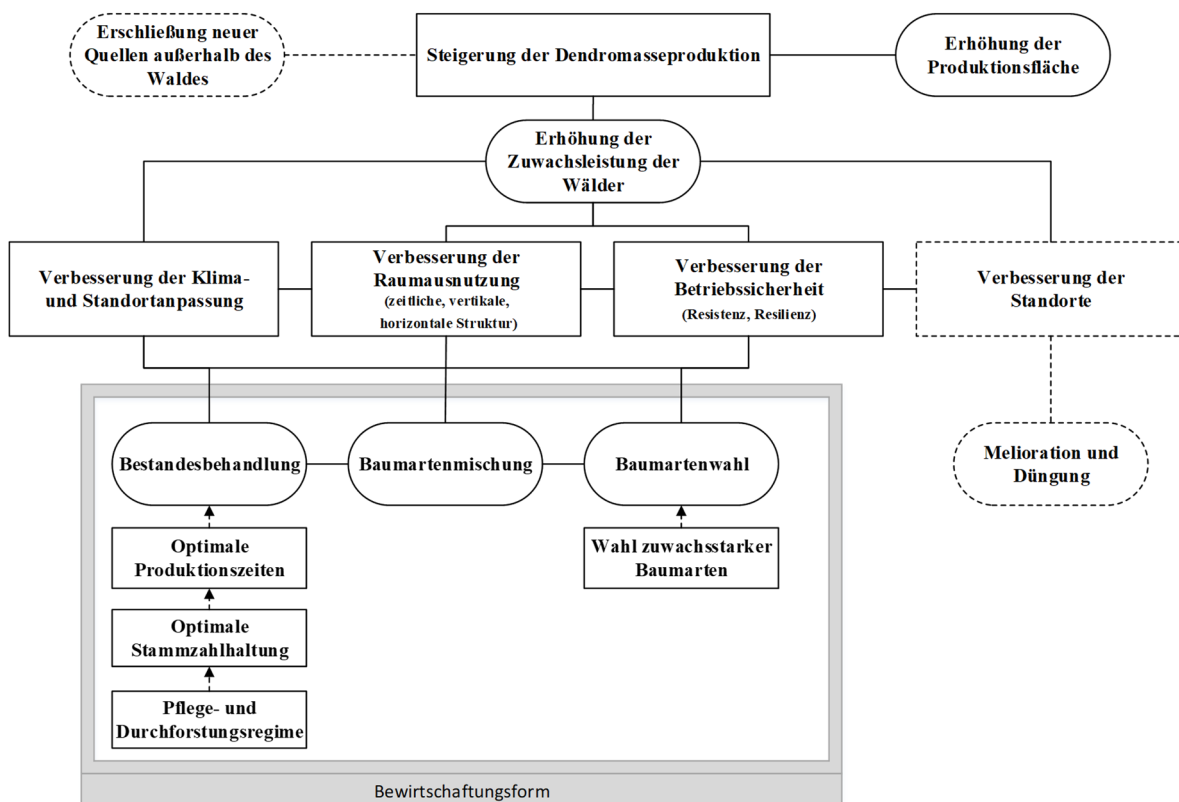


Abb. 1-1: Überblick über die Maßnahmen zur Erhöhung von Holzerträgen

Die in der Abbildung dargestellten Optionen für die Erhöhung der Holzerträge bilden die Grundlage für die sich anschließenden Kapitel und werden dort eingehend erläutert.

1.2.1 Erschließung neuer Quellen außerhalb des Waldes

Eine Erschließung neuer Quellen außerhalb des Waldes fokussiert die Nutzung von Landschaftspflegematerial sowie Konzepte zur Holzproduktion auf landwirtschaftlicher Fläche. Landschaftspflegematerial fällt bei Baum-, Strauch-, Heckenschnitt sowie im Zuge von Pflege des Straßenbegleitgrüns, Windschutzstreifen, Feldgehölzen etc. an. Systeme zur Holzproduk-

tion auf landwirtschaftlichen Flächen beschäftigen sich mit der Anlage von Kurzumtriebsplantagen (KUP)¹. Bei dieser Produktionsform werden schnell wachsende, ausschlagsfähige Baumarten angepflanzt, mit dem Ziel, innerhalb kurzer Umtriebszeiten (Rotationen) Dendromasse zu produzieren. In Deutschland sind dies in erster Linie Pappel- (*Populus spec.*) und Weidenarten (*Salicaceae spec.*) sowie auf trockenen Standorten die Robinie (*Robinieae spec.*). Grundsätzlich findet der Anbau dieser Baumarten in 2- bis 20-jährigen Umtrieben (Rotationen) statt (RÖHRICH und RUSCHER 2010). Nach der Ernte der oberirdischen Sprossmasse („Auf-Stock-Setzen“) regenerieren sich die Baumarten aufgrund ihrer Stockausschlagsfähigkeit bzw. in begrenztem Umfang aufgrund der Fähigkeit zur Wurzelbrut schnell und neue Triebe wachsen aus den verbliebenen Stöcken. Die Umtriebszeit wird hierbei nach Rotationslänge in Mini-, Midi- und Maxi-Rotationen gegliedert (LÖFFLER et al. 1988). Die Mini-Rotation sieht einen Rotationszyklus von 2 bis 3 Jahren vor. Dieser Rotationstyp eignet sich u. a. für die sehr stockausschlagsfreudigen Weiden-Klone. Bei der Midi-Rotation erfolgt eine Ernte alle 4 bis 6 Jahre. Ziel der Mini- und Midi-Rotation ist die Produktion von Energieholz. Im Gegensatz hierzu steht die Maxi-Rotation mit einem Zyklus von 8 bis 20 Jahren. Durch die verlängerte Rotation wird die Dimensionierung des Einzelbaumes gefördert und es können Brusthöhendurchmesser ($d_{1,3}$) von über 30 cm erreicht werden. Die hierbei entstehenden Sortimente finden stoffliche Verwendung und werden z. B. zu Furniersperrhölzern weiter verarbeitet (HORN et al. 2013). Nach PETZOLD et al. (2009) bieten sich für die Anlage von KUP Ackerstandorte mit mittlerer bis guter Nährstoffausstattung und durchschnittlichen Jahresmitteltemperaturen von über 7 °C an. Von entscheidender Bedeutung ist jedoch die Wasserverfügbarkeit (Niederschläge von mindestens 300 mm in der Vegetationsperiode und eine hohe nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum). Die genannten Optionen bieten eine Möglichkeit, kurzfristig Dendromasse zu akquirieren. Die erzeugten Sortimente eignen sich dabei primär zur energetischen Verwendung.

1.2.2 Erhöhung der Produktionsfläche

Mit der Erschließung neuer Flächen für den Wald kann die Holzproduktion auf einfache Art und Weise gesteigert werden. In stark besiedelten Ländern ist Boden jedoch ein knappes Gut und steht nur begrenzt zur Verfügung. Ob neue Flächen für eine traditionelle Forstwirtschaft zur Verfügung gestellt werden, hängt neben den politischen Rahmenbedingungen von dem zu erwartenden finanziellen Ertrag der Waldwirtschaft ab. SCHULTE (2007) weist darauf hin, dass

¹ Nach §2 Abs. 2 Nr. 1 BWaldG sind Grundflächen, auf denen Baumarten mit dem Ziel baldiger Holzentnahme angepflanzt werden und deren Bestände eine Umtriebszeit von nicht länger als 20 Jahren haben (Kurzumtriebsplantagen), kein Wald.

bei einem lang anhaltenden Anstieg des Erdöl- und Erdgaspreises auch die Holzpreise signifikant steigen werden und es in diesem Zusammenhang im globalen Maßstab zu einer erheblichen Umwidmung von Agrarfläche zu Waldfläche kommen wird. In Deutschland, welches für ein Industrieland bereits ein bemerkenswert hohes Bewaldungsprozent besitzt, ist nicht zu erwarten, dass zukünftig umfangreiche zusätzliche Flächen für die Neubegründung von Wald zur Verfügung gestellt werden können.

1.2.3 Erhöhung der Zuwachsleistung der bestehenden Wälder

ASSMANN (1968) warf die Frage auf, warum es in der industriellen Produktion durch Rationalisierung und Fortschritte möglich war, die Ergiebigkeit von Produktionsprozessen in kürzester Zeit stark zu steigern, nicht jedoch in der Forstwirtschaft. Er begründete diese Tatsache dadurch, dass Urproduktionen ganz bzw. überwiegend von natürlichen Produktionsbedingungen, also vor allem Klima- und Bodenverhältnissen, abhängig sind. Diese können im Garten- und Feldbau in eingeschränkter Art und Weise modifiziert werden, was jedoch in der Forstwirtschaft aufgrund der Größe und der Langlebigkeit von Bäumen bzw. Waldbeständen als ein schwieriges Unternehmen anzusehen ist. Der Vollständigkeit halber soll erwähnt werden, dass durch die Zugabe von Mineralstoffen (Düngung) insbesondere auf „armen Standorten“ die Wuchsleistung von Wäldern verbessert werden kann (NEBE 1976, 1978a, 1978b, KLÄDTKE 2003). Diese Option verbietet sich aber vor allem aus Gründen der Ökologie und des Naturschutzes². Zudem wurden, insbesondere durch anthropogen bedingte Stickstoffemissionen, viele Waldstandorte ohnedies bereits aufgewertet, wodurch das Wachstum unserer Wälder insgesamt beschleunigt ist (PRETZSCH et al. 2014a, 2015a, PRETZSCH 2015). Ein wesentliches Ziel einer modernen Forstwirtschaft kann demnach nicht die Modifizierung der Produktionsfaktoren sein, sondern sollte sich damit beschäftigen, die Wirtschaftsweise „optimal“ an diese anzupassen. Der wichtigste Mechanismus für eine Erhöhung der Zuwachsleistung von Wäldern begründet sich deshalb in der optimalen Ausnutzung des vorhandenen Raum- und Standortpotenzials (vgl. Abb. 1-1). Die hierfür zur Verfügung stehenden Steuergrößen sind abhängig von der Wahl des Bewirtschaftungssystems sowie den daraus resultierenden waldbaulichen Handlungsoptionen. Dieses leitet sich wiederum aus gesellschaftlichen Rahmenbedingungen bzw. den Zielen des Waldbesitzers ab. Die Zielstellung reicht von einem natürlichen, sich in einem eigendynamischen, selbstregulierenden Gleichgewichtszustand befindlichen Waldökosystem bis hin zu

² Aktive Walddüngung mit dem Ziel der Wuchsleistungsverbesserung von Wäldern sollte nicht verwechselt werden mit kompensierenden Meliorationsmaßnahmen, welche versuchen, anthropogen bedingten Nährstoffentzügen bzw. Säureeinträgen entgegenzuwirken (KNUST 2016).

künstlichen von Menschen regulierten Forstplantagensystemen mit dem reinen Fokus auf die Holzproduktion. In Abb. 1-2 werden in einfacher Art und Weise die für Deutschland wichtigsten Bewirtschaftungsstrategien von Gehölzökosystemen gegeneinander abgegrenzt und hinsichtlich ihrer Bewirtschaftungsintensität gegliedert: Extensiv bewirtschaftete und sich mehr oder weniger im ökologischen Gleichgewicht befindliche Ökosysteme sind Natur-³ und Plenterwälder (THOMASIIUS 1980). Die übrigen in Abb. 1-2 dargestellten Fälle (c bis f) sind zunehmend unbalancierte Forstsysteme. Diese werden über waldbauliche Eingriffe reguliert. Zwischen den unterschiedlichen Waldbausystemen gibt es mannigfaltige Übergänge.

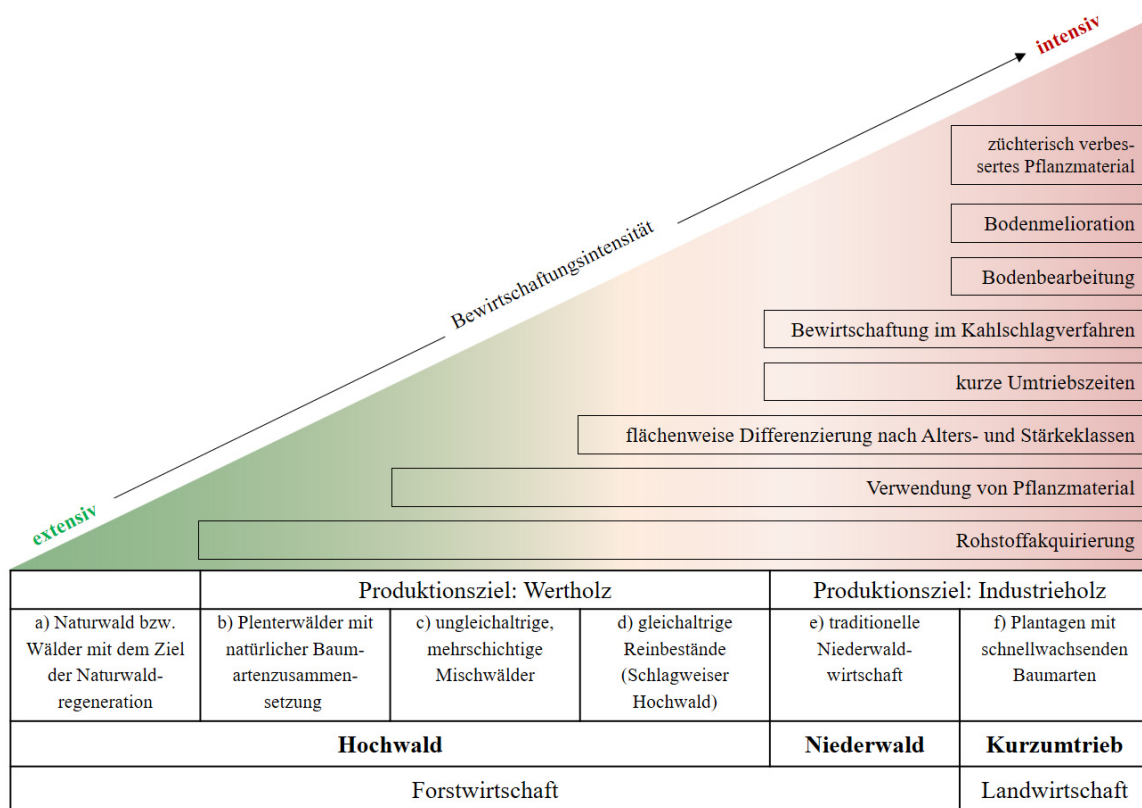


Abb. 1-2: Übersicht unterschiedlicher Bewirtschaftungsstrategien von Gehölzsystemen

In Deutschland überwiegen gleichaltrige Reinbestände des Schlagweisen Hochwaldes⁴, die zunehmend in ungleichaltrige, zwei- bzw. mehrschichtige Bestände überführt werden (SPELLMANN 2013). Das Produktionsziel bewirtschafteter Hochwälder ist die Erzeugung von stofflich

³ Naturwälder: Vom Menschen unbeeinflusste (ahemerobe) Naturwälder unterliegen keiner planmäßigen Bewirtschaftung und folgen somit keinem Produktionsziel. Baumartenzusammensetzung, Ausformung und Gesundheitszustand wurden ihrer eigenen Dynamik überlassen. In Deutschland kommen Naturwälder nur rudimentär vor. Fälschlicherweise wird diese Bezeichnung auch für Wälder verwendet, die aus der Bewirtschaftung genommen wurden mit dem Ziel der Naturwaldregeneration.

⁴ Wenn ein Waldgebiet in Schläge unterteilt ist, auf denen der Baumbestand, besonders im Hinblick auf das Alter, einheitlich zusammengesetzt ist und die waldbaulichen Maßnahmen Verjüngung, Pflege, Durchforstung und Ernte räumlich voneinander isoliert stattfinden, so wird dies als Schlagweiser Hochwald bezeichnet.

verwertbaren Holzsortimenten (Wertholz). Demgegenüber stehen waldbauliche Konzepte der Plantagenforstwirtschaft mit dem primären Ziel der Industrieholzproduktion⁵. Die wichtigsten Eigenschaften von Baumplantagen wurden in einer Definition von THOMASIU 1981, S.13) zusammengefasst: Danach sind Baumplantagen „... *der industriemäßigen Produktion spezieller Forsterzeugnisse dienende, nach geometrischen Prinzipien geordnete Anpflanzungen besonders dafür geeigneter Baumarten, Rassen oder Sorten auf Standorten, die dank ihrer Naturausstattung oder züchterischen Verbesserung bei steter anthropogener Steuerung in kurzen Produktionszeiträumen Erträge liefern, die über dem natürlichen Produktionsniveau liegen*“. Als ein Konzept, welches der genannten Definition am nächsten kommt, kann die Niederwaldwirtschaft genannt werden. Hier werden in kurzen Produktionszeiträumen (15 bis 30 Jahre) überdurchschnittliche Massenerträge generiert. Jedoch wird i. d. R. kein züchterisch verbessertes Pflanzmaterial verwendet. Die moderne Kurzumtriebswirtschaft erfüllt zwar alle genannten Kriterien, darf aber auf Waldflächen in Deutschland nicht betrieben werden (§2 Abs. 2 Nr. 1 BWaldG) und ist somit Landwirtschaft (vgl. Kap. 1.2.1). Der Definition folgend, kennt die klassische Forstwirtschaft in Deutschland demnach keinen Plantagenbetrieb. Mit den zuvor beschriebenen Bewirtschaftungsstrategien sind unterschiedliche waldbauliche Handlungsoptionen verbunden. Für die Ertragsleistung eines forstlichen Ökosystems sind die wichtigsten ertragsbestimmenden Steuerungsgrößen in der Wahl von Baumart und Mischungsstruktur, in Umtriebszeit sowie Pflege und Durchforstungskonzepten zu finden. Weil die zuvor genannten Steuergrößen eine besondere Wichtigkeit im weiteren Kontext dieser Arbeit darstellen, werden sie nachfolgend ausführlich erläutert, bevor auf die Forschungsfragen und Ziele der vorliegenden Arbeit eingegangen wird.

1.2.3.1 Baumartenwahl

Nur wenige waldbauliche Entscheidungen beeinflussen die zu erwartenden Erträge eines Waldbestandes so tiefgreifend wie die Wahl der Baumart. Hierbei muss erwähnt werden, dass durch den Zustand des zu verjüngenden Bestandes (z. B. bereits vorhandene Naturverjüngung etc.) sowie der finanziellen Ausstattung des Forstbetriebes der Spielraum bei der Baumartenwahl oftmals erheblich eingegrenzt wird (RÖHRIG et al. 2006). Für die optimale Wahl der Baumart stellt die spezifische Anpassungsfähigkeit an Boden und Klima (Standortansprüche) das wichtigste Kriterium dar. Nur optimal angepasste Arten können eine Betriebssicherheit gewähren,

⁵ Industrieholz ist Rohholz, das mechanisch oder chemisch aufgeschlossen wird und beispielsweise für die Herstellung von Holzschliff, Span- und Faserplatten etc. verwendet wird (JOSTEN et al. 2009).

welche langfristig die Produktionsfunktion des Waldes garantiert. Die wichtigsten standortheimischen Wirtschaftsbaumarten in Deutschland sind Gemeine Fichte (*Picea abies* (L.) KARST), Gemeine Kiefer (*Pinus sylvestris* L.), Europäische Lärche (*Larix decidua* MILL.), Rot-Buche (*Fagus sylvatica* L.) sowie Trauben- (*Quercus petraea* (Mat.) LIEBL.) und Stiel-Eiche (*Quercus robur* L.). Standortgerecht bzw. standortangepasst können auch fremdländische Baumarten⁶ sein. Ein Großteil der Naturschutzexperten befürwortet die Einbringung fremdländischer Baumarten nicht (REIF 2010). Als Hauptbedenken in der Diskussion um Neophyten wird vorgebracht, dass „eingeschleppte Arten“ die einheimische Flora verfälschen. Hierbei wird übersehen, dass Kulturpflanzen von anderen Kontinenten bereits einen Großteil unserer Landschaften und Landeskultur bilden (RÖHRIG et al. 2006). Nur einige wenige durch die Forstwirtschaft eingeführte Holzgewächse haben tatsächlich unerwünschte Nebenwirkungen. Zu nennen ist hier beispielweise die spätblühende Traubenkirsche, welche aufgrund ihrer invasiven Eigenschaften Dominanzbestände bildet und einheimische Arten verdrängt (SCHÖCKER et al. 2013, HAMM et al. 2017). Weil die mitteleuropäische Gehölzflora im Vergleich zu Südeuropa, Nordamerika oder Südostasien sehr artenarm ist (FISCHER 1995), können fremdländische Baumarten aber auch zu einer artendiversitären Aufwertung europäischer Waldökosysteme beitragen. RÖHRIG et al. (2006) weisen darauf hin, dass gebietsfremde Baumarten, wie z. B. die Küstentanne (*Abies grandis* (DOUGLAS ex D. DON) LINDL.) eine hervorragende Wurzelbildung zeigen oder Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (MIRB.) FRANCO) und Rot-Eiche (*Quercus rubra* L.) eine reichliche und gut zersetzbare Streu besitzen und den meisten einheimischen Arten auf geeigneten Standorten im Wachstum deutlich überlegen sind. Eine Rekonstruktion ertragschwacher Bestockungen mit den zuvor genannten Baumarten bietet daher die Möglichkeit, die Holzerträge zu erhöhen.

1.2.3.2 Baumartenmischung

Bereits WIEDEMANN (1942, 1943) erkannte, dass durch intelligente Kombinationen von Licht- und Schattenbaumarten sowie schnell und langsam wachsende Spezies der Wuchsraum und damit standörtliches Potenzial effektiver genutzt werden (vgl. Tab. 1-1). Grund hierfür ist, dass Reinbestände von Lichtbaumarten altersbedingt bzw. aufgrund von biotischen und abiotischen Stressoren oftmals stark aufgelichtet werden (JUNACK 1978, 1980, KREMSER 1978). Um die damit einhergehenden Zuwachsverluste zu verhindern, bietet sich ein Unter- oder Voranbau

⁶Unter gebietsfremden bzw. fremdländischen Baumarten (Neophyten) werden im Folgenden Arten verstanden, deren heutiges natürliches Areal außerhalb Europas liegt (vgl. RÖHRIG et al. 2006, S. 52).

mit schattenverträglichen Baumarten an. Durch die verbesserte Ausnutzung des Standortes (insbesondere der Ressource Licht) kommt es zu einer Erhöhung der Assimilationsleistung und somit zu einem „additiven Zuwachs“ gegenüber einem Reinbestand.

Tab. 1-1: Vergleich des durchschnittlichen Gesamtwachses an Derbholz (dGZ) von Mischbeständen mit Reinbeständen nach der Ertragstafel von WIEDEMANN (1949). In dem aufgeführten Beispiel hat die Hauptholzart die Bonität I.

Umtriebszeit	Mischbestand Leistung (dGZ)				Reinbestand	
	Holzarten	Hauptholzart [m ³ ·ha ⁻¹ ·a ⁻¹]	Mischholzart [m ³ ·ha ⁻¹ ·a ⁻¹]	Summe [m ³ ·ha ⁻¹ ·a ⁻¹]	Holzart	dGZ [m ³ ·ha ⁻¹ ·a ⁻¹]
140	Ei - RBu	3,0	5,0	8,0	Ei	6,8
120	GKi - GFi	4,2	4,3	8,5	GKi	7,4
140	GKi - RBu	5,7	2,5	8,2	GKi	7,0
120	GFi - RBu	8,0	3,6	11,6	GFi	11,9

Ei = Trauben- und Stiel-Eiche, GFi = Gemeine Fichte, GKi = Gemeine Kiefer, RBu = Rot-Buche

Nach ASSMANN (1961, S. 337) ist dieses waldbauliche Vorgehen in „Lichtholzbeständen von Kiefer oder Lärche“ besonders interessant, weil durch das Einbringen einer Unterstandsschicht die „*üppig entwickelte Bodenvegetation ... in Holz überführt*“ wird. Nach aktuellen Untersuchungen von PRETZSCH (2011) leisten Eichen-Buchen-Mischbestände durchschnittlich 30 % mehr gegenüber vergleichbaren Reinbeständen, wobei auf armen Standorten die Produktivitätsgewinne noch höher ausfallen können. Für Mischbestände aus Kiefer und Buche konnten PRETZSCH et al. (2015b) einen Mehrzuwachs an Volumen von 15 % herleiten.

1.2.3.3 Wahl der Umtriebszeit

Die Umtriebszeit stellt insbesondere im Schlagweisen Hochwald eine zentrale Steuergröße der forstlichen Produktion dar. Als Umtriebszeit wird hier der Zeitraum zwischen Begründung und Endnutzung eines Bestandes definiert (KURTH et al. 1994). Die optimale Umtriebszeit richtet sich an den Zielen des Waldbesitzers aus. Ist das Primärziel die Massenoptimierung eines Waldbestandes, befindet sich die optimale Umtriebszeit im Zeitpunkt der Kulmination des durchschnittlichen Gesamtwachses (dGZ , vgl. Kap. 2.2). Wenn hingegen das Produktionsziel höherwertige Säge- und Wertholzsortimente vorsieht, richtet sich die Umtriebszeit am Erreichen des hierfür benötigten Zieldurchmessers (i. d. R. Stammdurchmesser > 40 cm) aus. In Abb. 1-3 wird der Zusammenhang am Beispiel der Baumart Gemeine Kiefer gezeigt. Dargestellt ist der Verlauf des dGZ sowie des Durchmessers des Grundflächenmittelstammes (d_g) über dem Alter für die I-Bonität nach der Ertragstafel von LEMBCKE et al. (1975). Demnach beträgt der d_g zum Zeitpunkt der Kulmination des dGZ 22,2 cm. Hierbei wird deutlich, dass die Produktionsziele „höchste Massenleistung“ und „höchste Wertleistung“ sich nicht kombinieren lassen, weil die

Eigenschaften von Säge- und Wertholz erst erreicht werden, wenn der durchschnittliche Gesamtzuwachs des Waldbestandes bereits erheblich abgesunken ist (KREMSER 1978).

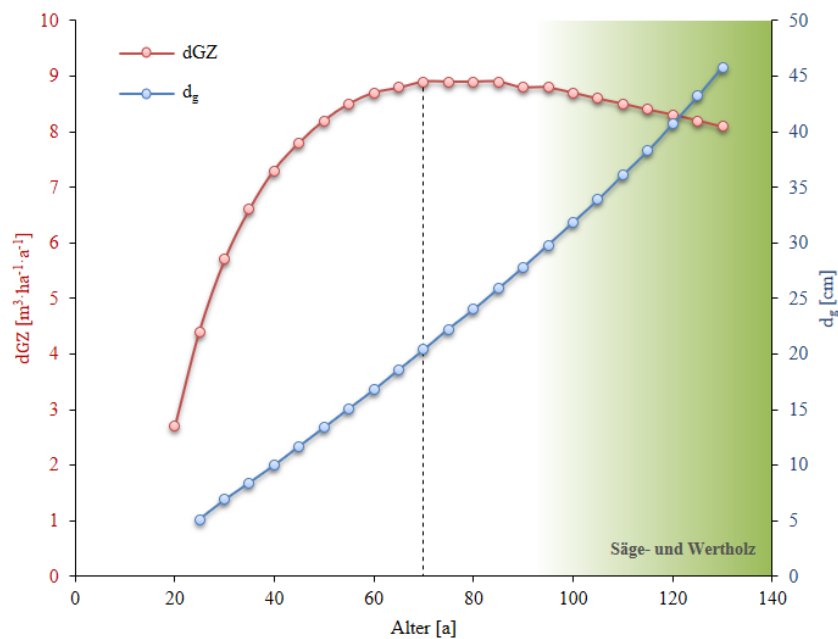


Abb. 1-3: Gegenüberstellung von durchschnittlichem Gesamtzuwachs (dGZ) und dem Durchmesser des Grundflächenmittelstammes (d_g) für die I-Bonität der Kieferntragsstafel nach LEMBCKE et al. (1975). Durch die schwarzgestrichelte Linie wird der Kulminationspunkt des dGZ gekennzeichnet.

1.2.3.4 Pflege- und Durchforstungskonzept

Grundsätzlich ist man sich in der forstlichen Welt einig, dass der Volumenzuwachs sowie die Sortimentsverteilung bei Schlagweisen Hochwäldern in verhältnismäßig weiten Grenzen von der Durchforstungsart (Hoch-, Niederdurchforstung, Lichtung) und Durchforstungsstärke (schwach, mäßig, stark) abhängig sind (VANSELOW 1943, ASSMANN 1961, BRYNDUM 1978, DENGLER et al. 1990, WENK et al. 1990). Die Beschreibung der unterschiedlichen Durchforstungsarten und -stärken können im Arbeitsplan des Vereins Deutscher Forstlicher Versuchsanstalten (1902) nachgelesen werden. Wesentliche Auszüge aus dem Arbeitsplan befinden sich in Anhang 1. Die anfangs „beschreibenden Kennzeichnungen“ der Durchforstungsstärken wurden erst später auf einen Vorschlag von WIEDEMANN (1935) durch die mittlere Grundflächenhaltung (mGH) ersetzt. Diese stellt einen mit der Länge einer Zuwachsperiode gewichteten Durchschnitt der Bestandesgrundfläche zu Beginn und am Ende der jeweiligen Zuwachsperiode dar (Formel 1-1). Die mittlere Grundflächenhaltung ist somit ein geeignetes Maß für die Beschreibung der Dichte eines Bestandes.

$$mGH = \frac{\frac{GA_1 + GE_1}{2} \cdot per_1 + \frac{GA_2 + GE_2}{2} \cdot per_2 + \dots + \frac{GA_n + GE_n}{2} \cdot per_n}{per_1 + per_2 + \dots + per_n} \quad \text{Formel 1-1}$$

Mit: mGH = mittlere Grundflächenhaltung
 GA = Grundfläche zu Beginn einer Zuwachsperiode
 GE = Grundfläche am Ende einer Zuwachsperiode
 per = Anzahl der Jahre einer Periodenlänge

Eine Übersicht der von WIEDEMANN (1955) mitgeteilten Rahmenwerte der mittleren Grundflächenhaltung, getrennt nach Durchforstungsart und -stärke, wird in Tab. 1-2 gegeben. Diese Werte sind jedoch nicht als absolut zu verstehen, sondern stellen vielmehr eine grobe Orientierung dar.

Tab. 1-2: Rahmenwerte für die mittlere Bestandesgrundfläche [$\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$] unterschiedlicher Durchforstungsarten und -stärken nach WIEDEMANN (1955)

	Niederdurchforstung			Lichtung	Hochdurchforstung	
	schwach	mäßig	stark		mäßig	stark
	A-Grad	B-Grad	C-Grad		D-Grad	E-Grad
Eiche	28 - 37	24 - 30	17 - 23	14 - 18	20 - 25	17 - 23
Buche	37 - 47	26 - 35	20 - 26	17 - 24	20 - 27	18 - 24
Fichte	53 - 60	43 - 55	33 - 45	25 - 35	34 - 43	
Kiefer	33 - 43	28 - 35	24 - 29	18 - 23	24 - 29	

Um die Wirkungsweise einer Durchforstung zu verstehen, muss zunächst die Zuwachssteu-
 rung eines Baumes sowie der leistungsmindernde Einfluss von Beschirmung erläutert werden.
 Als wichtigster Prozess für alle Wachstumsvorgänge ist die CO_2 -Assimilation zu sehen, welche
 bei grünen Pflanzen wegen ihrer Abhängigkeit zum Sonnenlicht als Photosynthese bezeichnet
 wird (KRAMER 1988). Neben der Assimilation findet in den Blättern sowie in allen nicht grünen
 Pflanzenorganen die Respiration (Atmung) statt, wo erzeugte Energie wieder verbraucht wird.
 Der dänische Pflanzenphysiologe BOYSEN-JENSEN untersuchte als einer der ersten diesen Zu-
 sammenhang bei Waldbeständen. Er kam zu dem Schluss, dass die Biomasseproduktion bei
 Bäumen nur einen Bruchteil der gesamten Assimilationsleistung ausmacht und ein Großteil der
 erzeugten Energie, bedingt durch Respiration sowie den Verlust von Blättern, Ästen etc., wie-
 der verloren geht (BOYSEN-JENSEN 1932). Bei seinen Untersuchungen kam er zu folgendem
 Zusammenhang, welcher damals wie heute Gültigkeit besitzt:

$Z + S = Na - R - B_v - A_v - W_v$	Formel 1-2 Mit: Z = Zuwachs S = Samenproduktion Na = Nettoassimilation R = Respiration B_v = Blattverlust durch Laubfall A_v = Astverlust durch Abwerfen W_v = Wurzelverlust
------------------------------------	---

Des Weiteren konnte BOYSEN-JENSEN in seinen Untersuchungen nachweisen, dass beherrschte unterständige Bäume aufgrund einer sehr großen Respiration nur einen geringen Zuwachs haben. VANSELOW (1943) schlussfolgerte daraus, dass, die Waldhygiene außer Acht gelassen, sich in stammzahlreichen Reinbeständen, wo möglichst viele Bäume an der herrschenden Schicht beteiligt sind, die höchsten Zuwächse einstellen. Werden demnach die „unökonomisch arbeitenden“ Bäume des Zwischen- und Unterstandes entfernt, kommt es zu einer Verbesserung der Versorgungslage des verbleibenden Bestandes und einem Wuchsbeschleunigungseffekt. Vereinfacht dargestellt, überkompensieren die verbleibenden herrschenden Baumindividuen den Ausfall der produktionsschwachen, unterständigen Bäume. Demzufolge findet vor allem bei einer mäßigen Niederdurchforstung (B-Grad), wo in die beherrschten Baumklassen eingegriffen wird, eine Maximierung des Zuwachses bei gleichzeitiger Grundflächenabsenkung statt.

Der Rahmen der „zuwachsoptimalen Grundfläche“ wurde von WIEDEMANN (1955) sehr weit gesteckt. Er liegt bei Fichte zwischen 40 bis 55 m²·ha⁻¹, bei Kiefer zwischen 25 bis 40 m²·ha⁻¹, bei Eiche zwischen 23 bis 30 m²·ha⁻¹ und bei Buche sogar zwischen 20 bis 40 m²·ha⁻¹. Innerhalb dieser weiten Grenzen kann demnach die mittlere Grundflächenhaltung verschoben werden, ohne den Bereich optimalen Volumenzuwachses je ha zu verlassen (vgl. Abb. 1-4). WIEDEMANN (1955) vertrat zudem die Auffassung, dass der Rahmen der „zuwachsoptimalen Grundflächenhaltung“ in allen Altersstufen eines Bestandes etwa unverändert bleibt.

Aus den zuvor genannten Erläuterungen leitete ASSMANN (1961) sein Gesetz der „optimalen und kritischen Grundflächenhaltung“ ab. Dieses Gesetz erweitert den statischen Ansatz von WIEDEMANN und beschreibt eine optimale Dosis-Wirkungs-Funktion zwischen der Bestandesdichte, quantifiziert durch die Grundflächenhaltung und den periodischen Zuwachs. Dabei unterscheidet ASSMANN (1961) zwischen der maximalen Grundfläche, der optimalen Grundfläche und der kritischen Grundfläche, welche wie folgt definiert sind:

1. Die maximale Grundfläche ist die standörtlich bedingte, höchstmögliche Grundfläche, welche sich bei gegebenem Alter auf einem undurchforsteten Bestand einstellt.
2. Die optimale Grundfläche ist die Grundfläche, bei der die maximale Volumenzuwachsstleistung erreicht wird.

3. Die kritische Grundfläche bezeichnet den Punkt, an dem nur noch 95 % maximale Volumenzuwachsleistung erreicht werden.

Der Zusammenhang wird in Abb. 1-5 schematisch veranschaulicht.

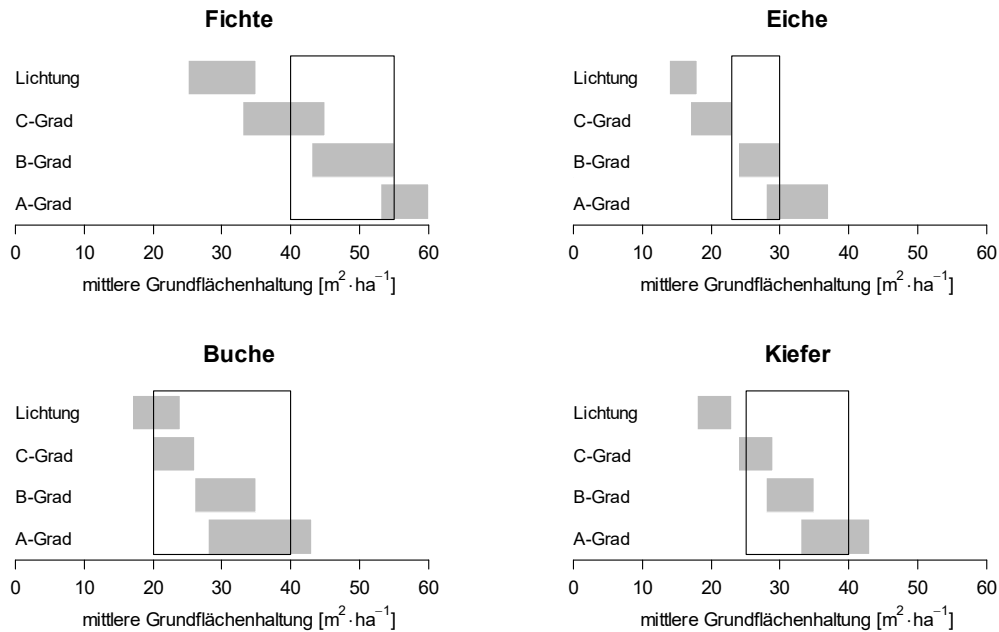


Abb. 1-4: Gegenüberstellung der Rahmenwerte für die mittlere Bestandesgrundfläche [$\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$] verschiedenartig behandelter Versuchsflächen (graue Balken) und dem Rahmen der „zuwachsoptimalen Grundflächenhaltung“ (schwarzer Rahmen) für die Baumarten Fichte, Eiche, Buche und Kiefer in Anlehnung an die Arbeiten von WIEDEMANN (1935, 1955).

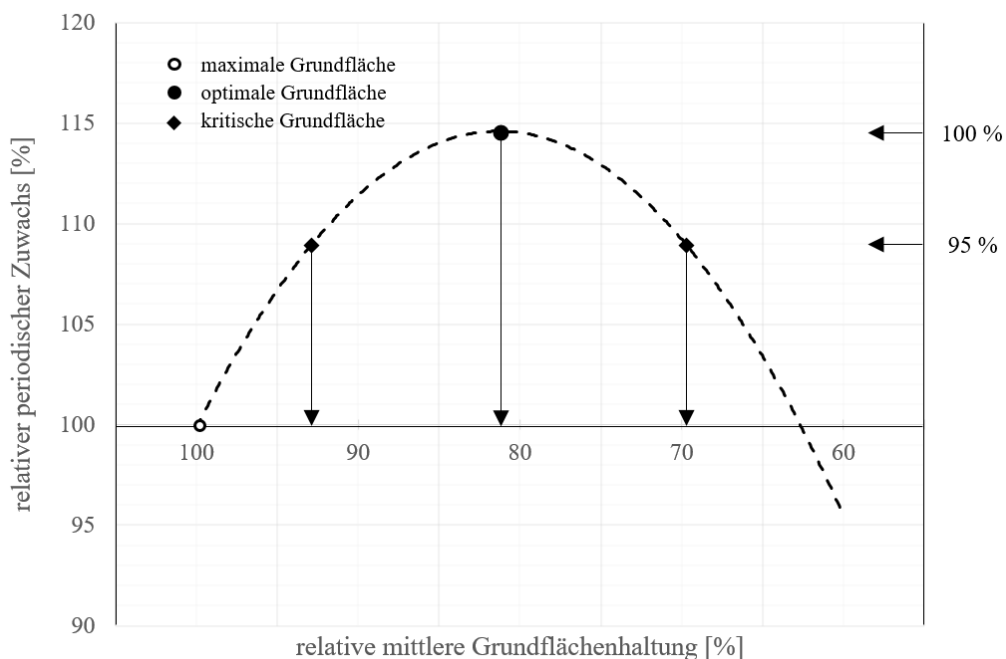


Abb. 1-5: Schematische Darstellung der Gesetzmäßigkeit der optimalen und kritischen Grundflächenhaltung (verändert nach FABRIKA und PRETZSCH 2013).

1.3 Ziele und Forschungsfragen

In diesem Kapitel werden der Arbeitsauftrag und die Zielstellungen der hier vorliegenden Arbeit näher erläutert. Weil das Thema „Ertragssteigerung in der Forstwirtschaft“ auf verschiedenen Ebenen gedeutet werden kann bzw. eine schier unendliche Möglichkeit an Fragestellungen und Untersuchungsmöglichkeiten aufwirft, muss der Themenkomplex zunächst anhand von verschiedenen Kriterien eingeschränkt und definiert werden. Anschließend wird eine Spezifizierung der Fragestellung im Einzelnen vorgenommen.

Abgrenzung der Themenstellung

Die hier vorliegende Arbeit befasst sich mit ertragskundlicher Analyse von Gehölzsystemen und den Möglichkeiten der Ertragssteigerung. Die Untersuchungen sollen nicht darauf abzielen, eine Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Waldwachstumskunde zu betreiben. Es wird primär auf bereits vorhandene Möglichkeiten zurückgegriffen, welche die Waldwachstumsforschung bietet (Ertragstafeln, Waldwachstumssimulatoren, Forsteinrichtungsdaten etc.). Nachfolgend wird eine Abgrenzung der Themenstellung anhand verschiedener Kriterien gegeben:

- **Bezüglich der Geografie:** Die Möglichkeiten der Ertragssteigerungen werden anhand des geografisch begrenzten Gebietes des Wuchsraumes Sachsen untersucht.
- **Bezüglich der Waldfunktionen:** Hinsichtlich der Waldfunktionen werden als Datengrundlage primär Bestände und Verfahren ausgewählt, bei denen die Aspekte der Holzproduktion im Vordergrund stehen. Somit stehen Waldbestände des Schlagweisen Hochwaldes sowie die Kurzumtriebswirtschaft im Zentrum der Betrachtung.
- **Bezüglich des Produktionsziels:** Das Produktionsziel soll eine Maximierung der quantitativen Holzmasse [$t_{\text{atro}} \cdot \text{ha}^{-1}$] darstellen. Qualitative bzw. sortimentsbezogene Betrachtungen werden nur am Rande mit einbezogen.

Ziele und Forschungsfragen

Unter Beachtung der zuvor genannten Einschränkungen werden folgende vier Forschungsfragen definiert:

1. Können **Kurzumtriebsplantagen** kurzfristig zu einer Steigerung der Holzproduktion führen und kann die Massenleistung für den Wuchsraum Sachsen quantifiziert werden?
2. Welche **Baumarten** haben unter Beachtung des Naturraumes Sachsen die höchste zu erwartende Ertragsleistung?
3. Haben **Umweltveränderungen** in den letzten Jahrzehnten zu einer signifikanten Steigerung des Waldwachstums geführt und kann dieses „Mehrwachstum“ für den Wuchsraum Sachsen anhand ausgewählter Baumarten quantifiziert werden?

4. Kann mittels Wahl eines geeigneten **Durchforstungsregimes** die Ertragsfähigkeit von Wäldern gesteigert werden?

1.4 Zum Aufbau dieser Arbeit

An dieser Stelle soll auf die besondere Gliederung dieser Arbeit kurz eingegangen werden. Wie bereits aus der gewählten Fragestellung und den Zielen erkennbar ist, unterteilt sich das Untersuchungsvorhaben in mehrere Teilprojekte. Um das vorliegende Manuskript möglichst leserfreundlich zu gestalten, wird jedes Teilprojekt als eine separate Arbeit mit eigener Einleitung, Vorstellung von projektspezifischer Methodik, Ergebnissen und einer weiterführenden Diskussion geschlossen vorgestellt. Eingerahmt werden die vorgestellten Teilprojekte von einer allgemeinen Beschreibung kapitelübergreifender Methodik sowie einer zusammenführenden Schlussbetrachtung. Das hier gewählte Vorgehen richtet sich an einem Vorschlag nach HUSS (1994) aus.

2 Methodik

Die Ertrags- und Waldwachstumskunde befasst sich mit der Ermittlung von Kennwerten für Einzelbäume (Durchmesser, Höhe etc.), welche auf höherer Ebene (z. B. auf Bestandesebene) aggregiert und oftmals in einem empirischen Modellansatz zusammengefasst werden. Die Kunst der ertragskundlichen Modellierung begründet sich darin, relevante Einzelaspekte und Gesetzmäßigkeiten, die das Baumwachstum beeinflussen, zu identifizieren und diese in eine einfache, pragmatische Vorstellung zu überführen. Entscheidend für diesen Prozess ist, „... *sich mit jenem Grad an Genauigkeit zufrieden zu geben, den die Natur der Dinge zulässt, und nicht dort Exaktheit zu suchen, wo nur Annäherung möglich ist*“. (ARISTOTELES etwa 347 bis 330 v. Chr.). Dies gilt insbesondere bei der Methodenwahl. Im vorliegenden Kapitel werden zunächst die in der Arbeit verwendeten Methoden der beschreibenden und analytischen Statistik erläutert, bevor eine Übersicht der verwendeten ertragskundlichen Kenngrößen gegeben wird. Abschließend werden Methoden zur Quantifizierung der Holzmasse von Bäumen und Gehölzsystemen aufgezeigt und gegenübergestellt.

2.1 Statistische Basisauswertung

In der vorliegenden Arbeit wurden verschiedene Verfahren der deskriptiven und analytischen Statistik eingesetzt. Im Folgenden wird versucht, diese Methoden in kompakter und verständlicher Form in ihren Grundzügen zu erläutern. Die rechnergestützte Umsetzung der statistischen Methoden erfolgte unter Anwendung der Programme MS-Excel® sowie der syntax-gesteuerten Statistiksoftware R⁷.

2.1.1 Korrelation und Regression

Für die Untersuchung stochastischer Zusammenhänge zwischen mindestens zwei intervallskalierten Merkmalen (X, Y) wird als statistisches Verfahren die Korrelationsanalyse angewandt (STORM 1995, KÖHLER 2007). Als Maßzahl für die Art und Stärke des linearen Zusammenhangs zweier Merkmalsausprägungen wird der Korrelationskoeffizient nach PEARSON (r_p) verwendet. Er berechnet sich nach Formel 2-1. Der PEARSONsche Korrelationskoeffizient ist eine dimensionslose Maßzahl und nimmt Werte zwischen -1 und 1 an, wobei ein Betrag nahe 1 einen starken und ein Betrag nahe 0 einen schwachen Zusammenhang bedeutet. Die Korrelationskoeffizienten wurden mithilfe des t-Tests auf Signifikanz überprüft.

⁷ R Core Team (2014). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.

$$r_p = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

Formel 2-1

Mit: r_p = PEARSONscher Maßkorrelationskoeffizient
 X_i = Messwert des Merkmals X am i -ten Individuum
 Y_i = Messwert des Merkmals Y am i -ten Individuum
 $\bar{X}$ = arithmetisches Mittel von X
 $\bar{Y}$ = arithmetisches Mittel von Y
 n = Anzahl aller Wertepaare

In Abb. 2-1 wird am Beispiel unterschiedlicher Punktwolken die Bedeutung des Korrelationskoeffizienten nach PEARSON aufgezeigt.

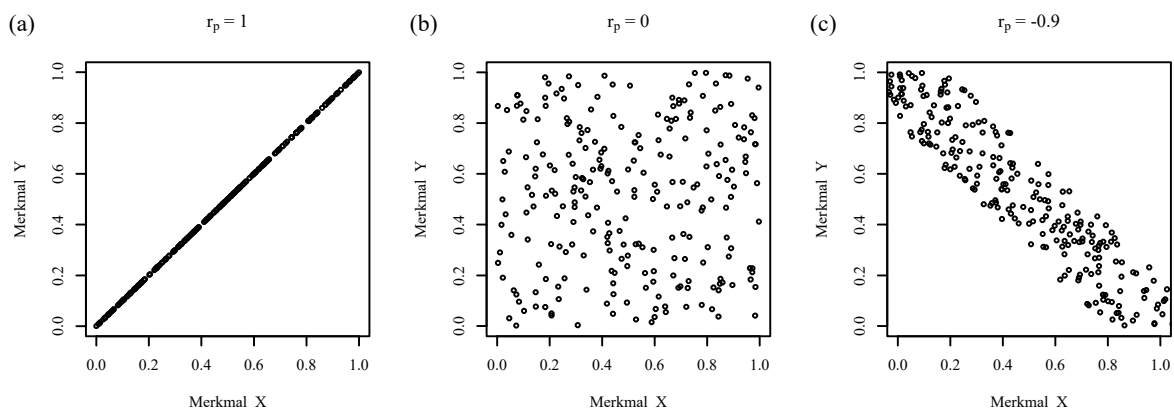


Abb. 2-1: Beispiele für einige Punktwolken mit den dazugehörigen Werten des PEARSONschen Maßkorrelationskoeffizienten: (a) perfekte positive Korrelation ($r_p = 1$), (b) keine Korrelation ($r_p = 0$), (c) stark negative Korrelation ($r_p = -0.9$)

Im Gegensatz zur Korrelation stellt die Regression eine Abhängigkeit zweier (einfache Regression) oder mehrerer Größen (multiple Regression, vgl. Kap. 2.1.2) durch einen funktionalen Bezug dar. Wenn es sich um eine Regressionsgerade nach Formel 2-2 handelt, spricht man von einer linearen Regression. In vielen Fällen kann der Zusammenhang zwischen zwei Merkmalen jedoch nicht durch einen linearen Zusammenhang beschrieben werden. In diesem Fall besteht die Möglichkeit einer linearisierenden Transformation der abhängigen Variablen und gegebenenfalls auch der unabhängigen Variablen (Potenzfunktion). Wenn dies nicht möglich war, wurde eine nichtlineare Funktion direkt an die Daten angepasst (nichtlineare Regression).

$$y = a_0 + a_1 \cdot x$$

Mit: y = Wert der abhängigen Variablen
 a_0 = Schnittpunkt mit der y-Achse
 a_1 = Steigung der Geraden
 x = Wert der unabhängigen Variablen

Formel 2-2

Ziel der Regressionsanalyse ist die Schätzung der Regressionskoeffizienten. Um das Prinzip der Regression zu verdeutlichen, wird zunächst mit der Erläuterung der einfachen linearen Regression begonnen: Um die Regressionskoeffizienten a_0 und a_1 bestimmen zu können, muss

die Ausgleichsgerade optimal an das Datenmaterial angepasst werden. Zur rechnerischen Ermittlung der Ausgleichsgeraden wird gefordert, dass die Summe der „quadrierten Abstände“ zwischen den beobachteten Werten (y) und den aus der Regressionsgleichung geschätzten Werten ($\hat{y}$) minimal ist (SACHS und HEDDERICH 2006). In der vorliegenden Arbeit erfolgt dies durch die Methode der kleinsten Quadrate nach CARL FRIEDRICH GAUSS (1809).

Zur Beschreibung der Anpassungsgüte der Regressionsfunktion an die Punktwolke der Ausgangsdaten wird auf das Bestimmtheitsmaß (R^2) sowie den Standardfehler der Schätzung (S_ε) zurückgegriffen. Hierbei gibt das Bestimmtheitsmaß den Anteil der Streuung an, der durch die Regressionsfunktion erklärt wird (SACHS und HEDDERICH 2006). Der Standardfehler der Schätzung leitet sich aus den Residuen (ε , vgl. Formel 2-3) ab und zeigt die Anpassungsgüte der Regressionsfunktion an das zugrunde liegende Datenmaterial. Der Standardfehler wird nach Formel 2-4 definiert.

$$\varepsilon = \hat{y} - y$$

Mit: ε = Residuum
 $\hat{y}$ = geschätzter Wert der abhängigen Variablen
 y = gemessener Wert der abhängigen Variablen

Formel 2-3

$$S_\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n - k}}$$

Mit: S_ε = Standardfehler der Regressionsschätzung
 ε_i = Residuum des Einzelwertes der Regressionsschätzung
 n = Anzahl der Beobachtungen
 k = Anzahl der Parameter

Formel 2-4

Das Bestimmtheitsmaß setzt die Varianz der Residuen, die durch die Regression vorhergesagt und daher determiniert sind, ins Verhältnis zur Varianz der beobachteten Werte (vgl. Formel 2-5).

$$R^2 = 1 - \frac{s_\varepsilon^2}{s_y^2}$$

Mit: R^2 = Bestimmtheitsmaß
 s_ε^2 = Varianz der Residuen
 s_y^2 = Varianz der abhängigen Variablen

Formel 2-5

Das Bestimmtheitsmaß R^2 als Gütemaß für die Vorhersage wächst mit zunehmender Anzahl an erklärenden Variablen (Prädiktoren) an. Deshalb wurde für Regressionsmodelle, die mehr als einen Prädiktor verwenden, das korrigierte Bestimmtheitsmaß (R_{adj}^2) verwendet (vgl. Formel 2-6). Hierbei handelt es sich um ein Korrekturverfahren, das die Anzahl der Prädiktoren sowie den Stichprobenumfang berücksichtigt.

$$R_{adj}^2 = R^2 \cdot \frac{n - 1}{n - k}$$

Mit: R_{adj}^2 = korrigiertes Bestimmtheitsmaß
 R^2 = Bestimmtheitsmaß
 n = Anzahl der Beobachtungen
 k = Anzahl der Parameter

Formel 2-6

Zusätzlich zu den Gütemaßen wurden für jede Regressionsfunktion ein Hypothesentest zur Prüfung der einzelnen Koeffizienten mithilfe der t-Teststatistik⁸ und eine zusammenfassende Prüfung aller Koeffizienten über die F-Teststatistik durchgeführt.

2.1.2 Multiple lineare Regression

Das Ziel der multiplen linearen Regression ist die Vorhersage einer abhängigen Variablen (Regressand) durch mindestens zwei bzw. mehrere erklärende Variablen (Prädiktoren). Voraussetzung ist ein linearer oder linearisierbarer Zusammenhang zwischen den Regressanden und den unterschiedlichen Prädiktoren. Die Gleichung für das sich ergebende theoretische Regressionsmodell hat stets die in Formel 2-7 dargestellte Form.

$$Y = a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + \dots + a_n \cdot X_n + a_0 + \varepsilon$$

Formel 2-7

Mit:

- Y = Regressand
- $X_1, \dots, X_n$ = Prädiktoren
- $a_0, \dots, a_n$ = Regressionskoeffizienten
- ε = Fehler (stochastischer Effekt)

Im Folgenden wird anhand eines Beispiels die Funktionsweise der multiplen linearen Regression vorgestellt: In Tab. 2-1 ist ein fiktiver Datensatz für 9 unterschiedliche Waldstandorte gegeben. Dargestellt ist die relative Bonität in Abhängigkeit von den Standortvariablen Niederschlag, Temperatur und Höhenlage.

Tab. 2-1: Beispieldatensatz

Lauf-Nr.	Niederschlag [mm]	Temperatur [°C]	Höhenlage [m ü. NN]	rel. Bonität
i	X_1	X_2	X_3	Y
1	300	3,2	200	2,0
2	200	2,1	300	2,2
3	500	5,6	300	2,9
4	400	4,6	0	3,1
5	600	6,2	400	4,6
6	700	7,5	100	2,2
7	800	8,1	900	5,1
8	900	9,3	200	4,7
9	200	2,3	700	4,6

Zunächst werden die Prädiktoren auf Kollinearität geprüft. Kollinearität liegt vor, wenn sich die Werte eines Prädiktors aus einer Linearkombination der Werte der übrigen Prädiktoren vor-

⁸ Die Irrtumswahrscheinlichkeit für die Koeffizienten der Regressionsanalyse wird im Ergebniskapitel mit den Symbolen *, ** und *** gekennzeichnet. Dabei steht *, ** und *** für eine Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner als 0,5, 0,01 und 0,001.

hersagen lassen. Kollinearität hat insbesondere für die stabile Schätzung der Koeffizienten einen hohen Schätzfehler zur Folge und erschwert die Interpretation des Ergebnisses. Verwendet wird hierfür zunächst eine einfache Korrelationsmatrix der Prädiktoren (vgl. Kap. 2.1.1). Das Ergebnis ist in Tab. 2-2 dargestellt.

Tab. 2-2: Korrelationsmatrix der Prädiktoren Niederschlag, Temperatur und Höhenlage

	Niederschlag	Temperatur	Höhenlage
Niederschlag	1	0,99 p-Wert: < 0,001	0,06 p-Wert: 0,878
Temperatur	0,99 p-Wert: < 0,001	1	0,02 p-Wert: 0,967
Höhenlage	0,06 p-Wert: 0,878	0,02 p-Wert: 0,967	1

Die Matrix zeigt, dass Temperatur und Niederschlag sehr stark miteinander korrelieren ($r = 0,99$) und kein signifikanter Unterschied zwischen den Prädiktoren festgestellt werden kann (p-Wert < 0,001). Eine weitere Möglichkeit der Kollinearitätsdiagnostik bietet die Berechnung der sogenannten Toleranz bzw. dem daraus abgeleiteten Varianzinflationsfaktor (VIF). Die Toleranz berechnet sich nach Formel 2-8. Allgemein wird die Toleranz aus der Regression aller übrigen Prädiktoren gegen den jeweils betrachteten Prädiktor abgeleitet. Je kleiner die Toleranz, umso redundanter ist der Beitrag des Prädiktors im Modell.

$$Toleranz = 1 - R^2 \quad \text{Mit: } R^2 = \text{Bestimmtheitsmaß} \quad \text{Formel 2-8}$$

$$VIF = \frac{1}{1 - R^2} \quad \text{Mit: } VIF = \text{Varianzinflationsfaktor} \quad \text{Formel 2-9}$$

$$R^2 = \text{Bestimmtheitsmaß}$$

Der Kehrwert der Toleranz ist der Varianzinflationsfaktor (Formel 2-9). Konventionell werden VIF-Werte von bis zu ca. 4 als unkritisch gesehen, jene über 10 als starke Indikatoren für Kollinearität (vgl. WOLLSCHLÄGER 2010, S. 233ff.). Für die im Beispiel gegebenen Daten ergibt sich für die Toleranz bzw. den Varianzinflationsfaktor das in Tab. 2-3 dargestellte Ergebnis. Es wird sich entschieden, die Variable Temperatur für die weitere Modellerstellung zu verwerfen.

Tab. 2-3: Darstellung der Toleranz und dem daraus abgeleiteten Varianzinflationsfaktor (VIF)

	Niederschlag	Temperatur	Höhenlage
Toleranz	0,004	0,004	0,672
VIF	253,96	252,12	1,49

Für die weitere Vorgehensweise bei der Anpassung der multiplen linearen Regressionsfunktion werden zunächst Modelle mit unterschiedlichen Prädiktorenkombinationen aufgestellt und getestet, inwieweit sich das korrigierte Bestimmtheitsmaß (R^2_{adj}) und Akaike Informationskrite-

rium (AIC)⁹ unterscheiden. Bei der Modellerstellung ist es sinnvoll, zunächst mit allen Variablenkombinationen zu arbeiten (volles Modell) und im Ausschlussverfahren von Prädiktoren rückwärts vorzugehen. Gehen wir von einem vollen Modell aus, so werden alle Prädiktoren schrittweise verworfen, deren zugehöriger erklärter Varianzanteil nicht signifikant ist. Begonnen wird mit der Variablen, die den kleinsten Varianzanteil aufweist (KÖHLER 2007). Für das gegebene Beispiel sind unterschiedliche Modelle in Tab. 2-4 aufgeführt. Es wird deutlich, dass Modell 2 hinsichtlich R_{adj}^2 und AIC das beste Ergebnis liefert ($R_{adj}^2 = 0,66$ bzw. $AIC = 27$).

Tab. 2-4: Vergleich unterschiedlicher Modelle

	Modell	R_{adj}^2	AIC
1.	Bonität = $0,505 + 5,280 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Höhenlage} + 3,781 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Niederschlag} - 4,127 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{Niederschlag}}{\text{Höhenlage}}$	0,49	28
2.	Bonität = $1,452 + 2,793 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Höhenlage} + 2,102 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Niederschlag}$	0,66	27
3.	Bonität = $2,488 + 2,906 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Höhenlage}$	0,37	29

Für die Interpretation des Zusammenhangs der verschiedenen Prädiktoren und der abhängigen Zielvariablen können die Standardpartialregressionskoeffizienten (SPC) gebildet werden (KÖHLER 2007). Sie sind in Formel 2-10 definiert und eignen sich für eine direkte quantitative Beurteilung des Prädiktors.

$$SPC_i = a_i \cdot \frac{s_{x_i}}{s_y}$$

Mit: SPC = Standardpartialregressionskoeffizienten **Formel 2-10**
 s_y = Standardabweichung des Regressanden
 s_{x_i} = Standardabweichung des Prädiktors
 a_i = Regressionskoeffizient

In Tab. 2-5 werden die Standardpartialregressionskoeffizienten bezogen auf Modell 2 abgebildet. Aus dem Ergebnis kann geschlussfolgert werden, dass die Höhenlage einen größeren Einfluss (54 %) gegenüber dem Niederschlag (46 %) in dem verwendeten Modell besitzt.

Tab. 2-5: Darstellung des Standardpartialregressionskoeffizienten (SPC)

	Höhenlage	Niederschlag
SPC	0,573	0,482

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass eine weiterführende Behandlung des Themas bei KÖHLER (2007), WOLLSCHLÄGER (2010) bzw. DORMANN und KÜHN (2012) nachgelesen werden kann.

⁹ Beim Akaike Informationskriterium (engl. Akaike Information Criterion (AIC)) stehen kleinere Werte für eine höhere Informativität. Es berücksichtigt einerseits die Güte der Modellanpassung, andererseits die Komplexität des Modells, gemessen an der Anzahl zu schätzender Parameter. Besitzen zwei Modelle dieselbe Anpassungsgüte, erhält das Modell mit einer geringeren Anzahl von Parametern den kleineren AIC -Wert.

2.1.3 Evaluierung biometrischer Modelle

Das wichtigste Kriterium für die Abbildung der Modellgüte ist der Vergleich zwischen Modellprognose und wirklichem Wuchsverhalten (VANCLAY 1994, PRETZSCH 2001). Die Evaluierung der erstellten Modelle erfolgt in der vorliegenden Arbeit in Anlehnung an HARTMANN (2010) in 2 Schritten.

Schritt 1: Modellevaluierung auf Basis von linearer Regression und relativer Abweichung

Zunächst wird unter Verwendung der linearen Regression (vgl. Kap. 2.1.1) das Bestimmtheitsmaß zwischen beobachteten Werten (Realwerten) und geschätzten Werten (Schätzwerten) ermittelt. Das Bestimmtheitsmaß (R^2) gibt über die Qualität der linearen Annäherung Auskunft, macht aber keine Angaben, ob das Modell richtig spezifiziert wurde (HRADETZKY 1978, WILLMOTT 1982). Deshalb muss zusätzlich die Regressionsgerade geprüft werden. Entscheidend ist, dass sich das Interzept (a_0) der linearen Ausgleichsgeraden dem Wert 0 annähert und die Steigung (a_1) annähernd 1 beträgt und somit entlang der 1:1-Linie in dem zugehörigen Diagramm verläuft. In Abb. 2-2 (a) sind alle drei Sachverhalte annähernd erfüllt ($R^2 = 0,85$, $a_0 = 0,98$; $a_1 = 0,98$) und das Modell besitzt somit einen hohen Vorhersagewert.

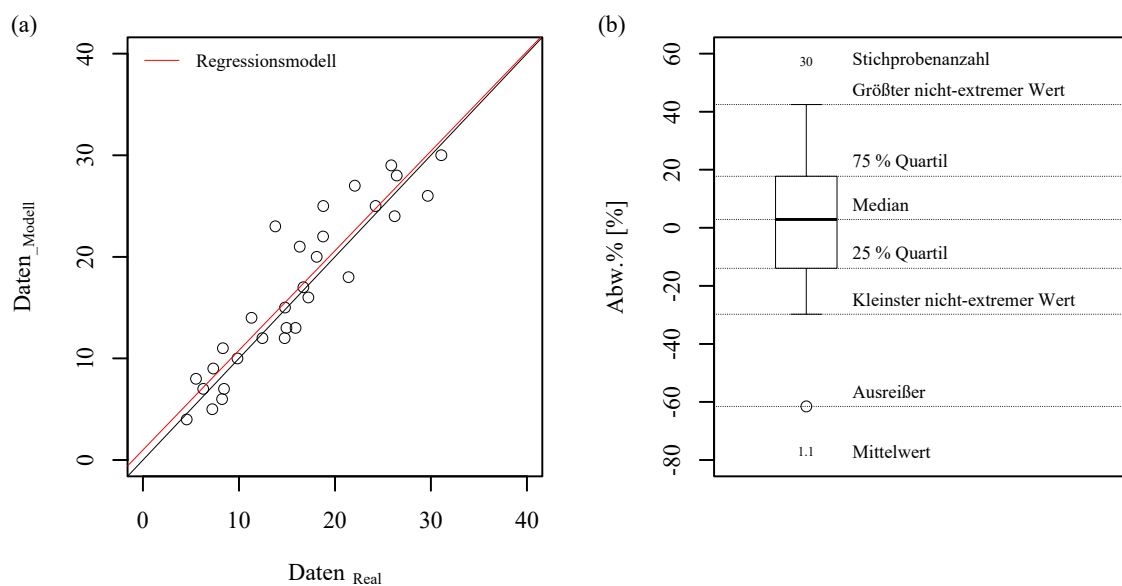


Abb. 2-2: (a) Beispiel einer Ausgleichsgeraden zwischen beobachteten ($Daten_{Real}$) und geschätzten Daten ($Daten_{Modell}$) (b) Darstellung der rel. Abweichungen ($Abw. \%$) in einer Boxplotgrafik mit Erläuterung der gezeigten Größen

Für einen schnellen Überblick kann die relative Abweichung ($Abw. \%$) der geschätzten Werte von den tatsächlichen Werten mittels eines Boxplotdiagramms dargestellt werden (vgl. Abb. 2-2 (b)). Die Bestimmung der relativen Abweichung erfolgt nach Formel 2-11.

$$Abw. \% = \frac{x_i - X_i}{X_i} \cdot 100$$

Mit: $Abw. \%$ = rel. Abweichung [%]
 x_i = Schätzwert
 X_i = Realwert

Formel 2-11

Schritt 2: Evaluierungskenngrößen auf Basis von Bias, Präzision und Treffgenauigkeit

Zur Überprüfung der Abbildungsgüte eines biometrischen Modells können die Präzision der Prognoserechnung, die Verzerrung (Bias) und die Genauigkeit eines Modells im Vergleich mit der Wirklichkeit (Treffgenauigkeit) eingesetzt werden. Die Evaluierungskenngrößen werden im Folgenden definiert:

a) Bias oder Verzerrung

Der Begriff Verzerrung oder Bias ($\bar{e}$) beschreibt den arithmetischen Mittelwert aus der Differenz von Schätzwerten (x_i) und Prognosewerten (X_i). Der Bias zeigt einen systematischen Fehler an und kann bei ausreichend großem Stichprobenumfang über eine systematische Über- oder Unterschätzung Auskunft geben.

$$\bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X_i)}{n}$$

Mit: $\bar{e}$ = Verzerrung/ Bias
 x_i = Schätzwert
 X_i = Realwert
 n = Anzahl der Fälle/ Stichprobenumfang

Formel 2-12

b) Präzision oder Prognosestreuung

Nach PRETZSCH (2001, S. 292) gibt „die Präzision (Prognosestreuung) die Anhäufung oder Konzentration von Prognosewerten um ihr arithmetisches Mittel an“. Sie kennzeichnet nach SACHS und HEDDERICH (2006) die Wiederholbarkeit der Vorhersagewerte und kann als Standardabweichung des Bias bezeichnet werden.

$$s_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{e} - X_i)^2}{n - 1}}$$

Mit: s_e = Präzision oder Prognosestreuung
 $\bar{e}$ = Verzerrung/ Bias
 x_i = Schätzwert
 X_i = Realwert
 n = Anzahl der Fälle/ Stichprobenumfang

Formel 2-13

c) Treffgenauigkeit

Die Treffgenauigkeit (m_x) setzt sich aus Verzerrung ($\bar{e}$) und Präzision (s_e) zusammen und unterzieht das Modell einer breiten Genauigkeitsprüfung.

$$m_x = \sqrt{s_e^2 + \bar{e}^2}$$

Mit: m_x = Treffgenauigkeit
 s_e = Präzision oder Prognosestreuung
 $\bar{e}$ = Verzerrung/ Bias

Formel 2-14

Als ein unabhängiges Maß können Bias, Präzision und Treffgenauigkeit in Relation zum mittleren Realwert ($\bar{X}$) in Prozent dargestellt werden (vgl. Formel 2-15). Grundsätzlich gilt, je näher

Bias, Präzision und Treffgenauigkeit dem Wert 0 bzw. 0 % kommen, umso näher ist das Modell an der Wirklichkeit.

$$\bar{e}\% (s_e\%, m_x\%) = \frac{\bar{e} (s_e, m_x)}{\bar{X}} \quad \text{Mit: } \bar{X} = \text{arithmetisches Mittel des Realwerts} \quad \text{Formel 2-15}$$

2.2 Übersicht ertragskundlicher Kenngrößen

Nachstehend erfolgt eine Übersicht der wichtigsten ertragskundlichen Kenngrößen, die im Zuge dieser Arbeit verwendet werden. Die Definitionen erfolgen in Anlehnung an die Arbeit von KRAMER und AKÇA (1995). Die hierbei verwendete Symbolik richtet sich an KRAMER (1988) aus.

Arithmetischer Mitteldurchmesser ($\bar{d}_{1,3}$)

Der arithmetische Mitteldurchmesser des $d_{1,3}$ ¹⁰ bezieht die schwachen und unterdrückten Bäume eines Bestandes mit ein und unterliegt insbesondere bei Niederdurchforstung starken Schwankungen.

$$\bar{d}_{1,3} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_{1,3_i} \quad \text{Mit: } \begin{array}{l} \bar{d}_{1,3} = \text{arithmetischer Mitteldurchmesser [cm]} \\ N = \text{Stammzahl [Stück} \cdot \text{ha}^{-1}] \\ d_{1,3} = \text{Brusthöhendurchmesser [cm]} \end{array} \quad \text{Formel 2-16}$$

Bestandesgrundfläche (G)

Die Bestandesgrundfläche beschreibt die Summe der Grundflächen aller Individuen eines Baumkollektivs in einer Höhe von 1,3 m über dem Boden. Sie kann mithilfe der Kreisflächenformel hergeleitet werden:

$$G = \frac{\pi \cdot \sum_{i=1}^N d_{1,3_i}^2}{4F} \quad \text{Mit: } \begin{array}{l} G = \text{Grundfläche [m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}] \\ N = \text{Stammzahl [Stück]} \\ d_{1,3} = \text{Brusthöhendurchmesser [cm]} \\ F = \text{Größe der Probefläche [ha]} \end{array} \quad \text{Formel 2-17}$$

Durchmesser und Höhe des Grundflächenmittelstammes (d_g, h_g)

Neben der Verwendung des arithmetischen Durchmessers ist die Verwendung des Grundflächenmittelstammes (d_g) in der Ertragskunde allgemein üblich. Er ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel der Brusthöhenquerschnittsflächen aller Bäume eines Bestandes.

¹⁰ Der $d_{1,3}$ (Brusthöhendurchmesser) beschreibt den Durchmesser eines Einzelbaumes in einer Höhe von 1,30 m über dem Erdboden.

$$\bar{g} = \frac{\sum_{i=1}^N g_i}{N} \quad \bar{g} = \frac{\pi}{4} \cdot d_g^2 \quad d_g = 2 \cdot \sqrt{\frac{\bar{g}}{\pi}} \quad \text{Formel 2-18}$$

Mit: $\bar{g}$ = mittlere Grundfläche [m²]
 d_g = Durchmesser des Grundflächenmittelstammes [cm]
 N = Stammzahl [Stück]
 g = Grundfläche des Einzelbaumes [m²]

Weil der Durchmesser des Grundflächenmittelstammes dem quadratischen Mittelwert aller Durchmesserwerte eines Baumkollektivs entspricht, lässt er sich auch mit Formel 2-19 herleiten.

$$d_g = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N d_{1,3i}^2}{N}} \quad \text{Mit: } d_g = \text{Durchmesser des Grundflächenmittelstammes [m]} \quad \text{Formel 2-19}$$

N = Stammzahl [Stück]
 $d_{1,3}$ = Durchmesser des Einzelbaumes [cm]

Die Höhe des Grundflächenmittelstammes (h_g) gibt an, wie hoch ein Baum mit dem Brusthöhendurchmesser des d_g ist. Sie wird regressionsanalytisch über die Höhenkurvenfunktionen bestimmt (vgl. WENK et al. 1990, S. 220ff.). Zum Einsatz kamen in der vorliegenden Arbeit die Funktionen nach MICHAÏLOFF (1943) und PRODAN (1965). Die Funktionsbezüge sind nachfolgend dargestellt:

Höhenkurvenfunktion nach MICHAÏLOFF (1943)

$$h = 1,3 + \frac{d_{1,3}}{a_1 + a_2 \cdot d_{1,3} + a_3 \cdot d_{1,3}^2} \quad \text{Mit: } h = \text{Höhe [m]} \quad \text{Formel 2-20}$$

a_1, a_2, a_3 = Regressionskoeffizienten
 $d_{1,3}$ = Brusthöhendurchmesser [cm]

Höhenkurvenfunktion nach PRODAN (1965)

$$h = 1,3 + e^{a_1 + \frac{a_2}{d_{1,3}}} \quad \text{Mit: } h = \text{Höhe [m]} \quad \text{Formel 2-21}$$

a_1, a_2, a_3 = Regressionskoeffizienten
 $d_{1,3}$ = Brusthöhendurchmesser [cm]
 e = EULERSche Zahl

Oberdurchmesser (d_o) und Oberhöhe (h_o)

Der Oberdurchmesser ist der Grundflächenmittelstamm (d_g) der 10 % durchmesserstärksten Bäume eines Baumkollektivs. Die Oberhöhe (h_o) gibt an, wie hoch ein Baum mit dem Brusthöhendurchmesser des d_o ist. Wie zuvor beschrieben, wird sie regressionsanalytisch über die Höhenkurvenfunktionen nach MICHAÏLOFF (1943) bzw. PRODAN (1965) hergeleitet.

Gesamtwuchsleistung (GWL) und durchschnittliche Gesamtwuchsleistung (dGZ)

Die Gesamtwuchsleistung (GWL) ist die gesamte Wuchsleistung je ha eines Bestandes von der Begründung bis zum Jahr der Aufnahme. Sie entspricht der Summe der Vornutzungen plus des stehenden Vorrates. Die durchschnittliche Gesamtwuchsleistung (dGZ) ist definiert als Gesamtwuchsleistung, die durch die entsprechende Produktionsdauer (Bezugsalter) dividiert wird (vgl. Formel 2-22).

$$dGZ = \frac{GWL}{t}$$

Mit: dGZ = durchschnittliche Gesamtwuchsleistung
 GWL = Gesamtwuchsleistung
 t = Produktionsdauer (Bezugsalter)

Formel 2-22

2.3 Modellierung der Dendromasseproduktion

Die Taxierung und der Verkauf von Holzvorräten geschieht traditionell über Volumeneinheiten. Der Verkauf nach Masse (Gewicht), vorwiegend von niederwertigen Sortimenten wie beispielsweise Industrieholz, hat sich aufgrund der Entwicklung neuer Techniken erst in den letzten Jahrzehnten etabliert. Demzufolge konzentriert sich ein Großteil der waldwachstumskundlichen Instrumente (Ertragstafeln, Wachstumsmodelle etc.) vorwiegend auf die Bestimmung des Holzvolumens. Das Volumenmaß eignet sich jedoch nur eingeschränkt für einen Vergleich der Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Baumarten bzw. waldbaulicher Szenarien (KRAMER 1988). Um die tatsächliche Ertragsstärke von Waldbeständen quantifizieren zu können, wird deshalb bereits von WECK (1955) die Einheit Trockensubstanz [$t_{atro} \cdot ha^{-1}$] der oberirdisch nutzbaren Holzmasse empfohlen. Im folgenden Kapitel wird diese Maßeinheit genauer definiert (Kap. 2.3.1), bevor Methoden vorgestellt werden, mit denen sie, ausgehend von Volumenexpansions- und Raumdichtefaktoren (Kap. 2.3.2) bzw. unter Verwendung allometrischer Funktionsbezüge (Kap. 2.3.3) hergeleitet werden kann.

2.3.1 Trockensubstanz des Baumholzes als Maß der Standortproduktivität

In den letzten 100 Jahren wurden die derzeit in der forstlichen Praxis zum Einsatz kommenden Ertragstafeln anhand unterschiedlicher Verfahren konstruiert. Bei den meisten Tafeln liegen Volumenbetrachtungen zugrunde. Echte, auf das Gewicht bezogene Massentafeln, wie z. B. von HEINSDORF und KRAUSS (1990) für die Kiefer, existieren nur wenige. Eine Standardisierung hinsichtlich Bezugsgröße Baumholz, Derbholz¹¹ oder Schaftholz¹² gibt es ebenfalls nicht. In der überwiegenden Mehrheit der herkömmlichen Modelle wird das Derbholzvolumen als grundlegende Maßeinheit des Ertrages verwendet. Dies führt nach WENK et al. (1990) besonders bei Jungbeständen zu einer Fehleinschätzung der Biomasse, weil hierbei Holz, das schwächer als 7 cm ist, keine Beachtung findet (vgl. Abb. 2-3). Auch der Begriff „Baumholz“ wird von verschiedenen Autoren unterschiedlich definiert, je nachdem, ob Laub- und Nadelmasse mit einbezogen oder weggelassen wird. Eine weitere Verzerrung kann letztendlich durch die

¹¹ Derbholz: Schaft und Äste eines Baumes über 7 cm Durchmesser ab Stockabschnitt

¹² Schaftholz: Schaft ohne Äste ab Stockabschnitt

Einbeziehung bzw. das Weglassen des Rindenanteils entstehen. Eine Übersicht für im Wuchsraum Sachsen angewendete Ertragstafel-Modelle wichtiger Baumarten in Anlehnung an die Vorgaben der Sächsischen Landesanstalt für Forsten (2000) und deren unterschiedliche Bezugsbasis gibt Anhang 2 wieder. Aus den bisherigen Ausführungen wird ersichtlich, dass, bevor mit einer weiteren Betrachtung der Dendromasse fortgefahren werden kann, zunächst eine für diese Arbeit sinnvolle standardisierte Bezugsgröße festgelegt und anschließend die benötigten Ertragskennwerte auf diese vereinheitlicht werden müssen.

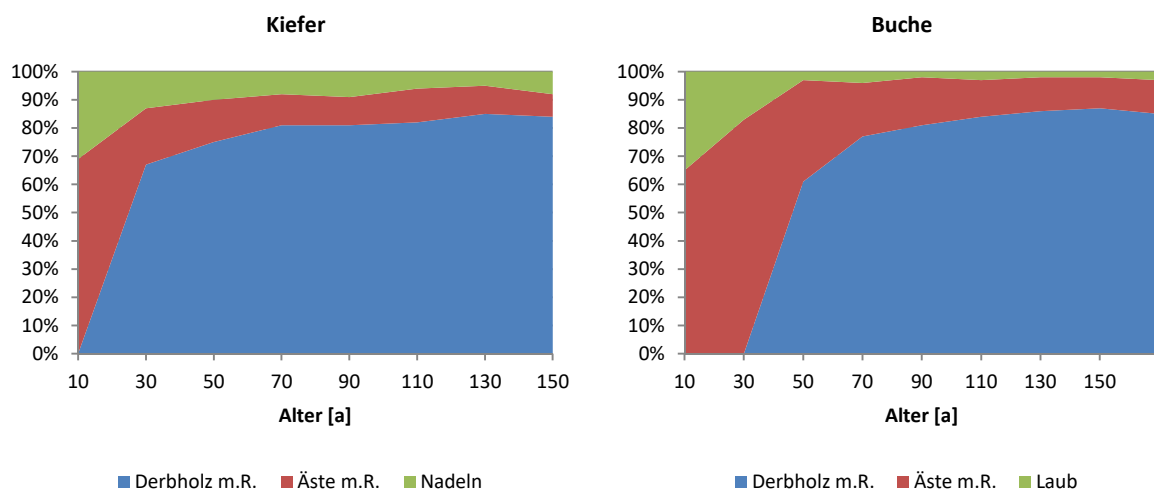


Abb. 2-3: Prozentuale Anteile an der oberirdischen Biomasse am Beispiel der Baumarten Kiefer und Buche (abgeleitet aus Untersuchungen von DAUBER und KREUTZER 1979)

Von der gesamten von einem Ökosystem hervorgebrachten Bio- bzw. Phytomasse wird i. d. R. nur ein Bruchteil stofflich oder energetisch verwertet. Um unterschiedliche waldbauliche Szenarien auf verschiedenen Standorten hinsichtlich eines „produktiv-nutzungsorientierten“ Ansatzes vergleichen zu können, ist es demnach sinnvoll, die Betrachtungen auf diese Biomassenkompartimente zu beschränken. Neben dem üblicherweise stofflich genutzten Schaftholz können auch Äste, Rinde sowie Laub und Nadeln vorwiegend thermische Verwendung finden. In der Literatur werden bei Arbeiten zum Aufkommen der oberirdischen Biomasse Laub und Nadeln regelmäßig ausgeklammert (KREUTZER und DAUBER 1980, KRAMER und KRÜGER 1981, BEMMANN et al. 1997, HASCHKE 1998). Nach DIETER et al. (2001) ist dieses Vorgehen wegen des hohen Gehaltes an Nährelementen in Laub und Nadeln notwendig. Die Nutzung von Blatt- und Nadelmasse kann in einem ökologisch orientierten Waldbau ohne Meliorationsmaßnahmen nicht als langfristig nachhaltig gewertet werden. Schlussfolgernd soll in dieser Arbeit unter nutzbaren Biomassekomponenten von Waldökosystemen nur Schaftholz, Äste und Rinde verstanden werden, welche im Folgenden unter dem Begriff Baumholz zusammengefasst werden.

In Abb. 2-4 ist die in dieser Arbeit verwendete Bezeichnung der verschiedenen Biomassekomponenten von Waldökosystemen in Anlehnung an die Arbeit von THOMAS (1980) abgebildet. Um unterschiedliche waldbauliche Szenarien auf verschiedenen Standorten hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit vergleichen zu können, ist es demnach sinnvoll, das Maß „Trockenmasse des Baumholzvolumens [$t_{\text{atro}} \cdot \text{ha}^{-1}$]“ als standardisierende Größe zu verwenden.

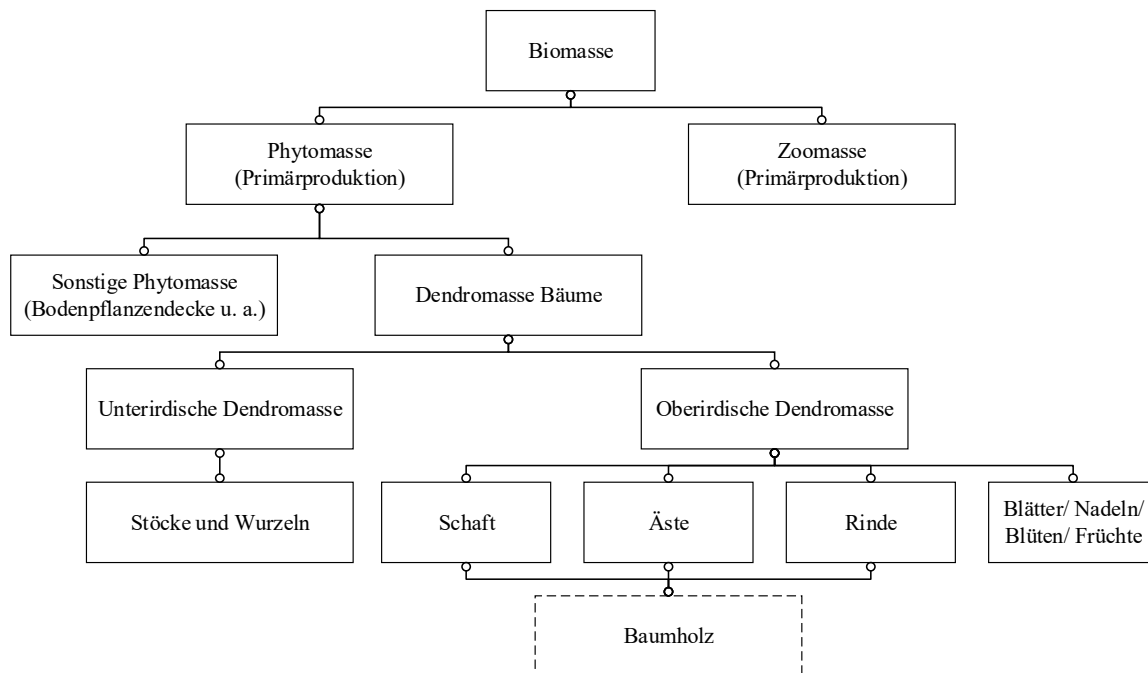


Abb. 2-4: Übersicht verschiedener Biomassekomponenten von Waldökosystemen (verändert nach THOMAS 1980)

2.3.2 Volumenexpansions- und Raumdichtefaktoren

Zahlreiche Autoren haben sich im Zusammenhang mit dem Nährstoffentzug bzw. der Kohlenstoffbilanzierung von Waldbeständen mit approximativen Schätzverfahren zur Herleitung der Biomasse beschäftigt (DAUBER und KREUTZER 1979, DIETER und ELSASSER 2002, PISTORIUS 2007, MUCHIN et al. 2008, ZELL 2008, KÄNDLER und BÖSCH 2009). Hierbei werden in einem ersten Schritt Ertragstafeldaten, welche i. d. R. in Derbholzvolumen vorliegen, auf das Baumholzvolumen expandiert. Dies geschieht unter Verwendung von Volumenexpansionsfaktoren. In einem zweiten Schritt kann dann über durchschnittliche Raumdichtewerte die Trockenmasse abgeleitet werden. Abb. 2-5 gibt eine Übersicht über das hier angewandte Vorgehen zur Herleitung der Massenexpansionsfaktoren. Nachfolgend werden die einzelnen Schritte am Beispiel der Baumart Kiefer ausführlich erläutert. Anschließend wird eine Evaluierung des Modells mithilfe der Ertragstafel nach LEMBCKE et al. (1975) bzw. der Massentafel nach HEINSDORF und KRAUSS (1990) durchgeführt.

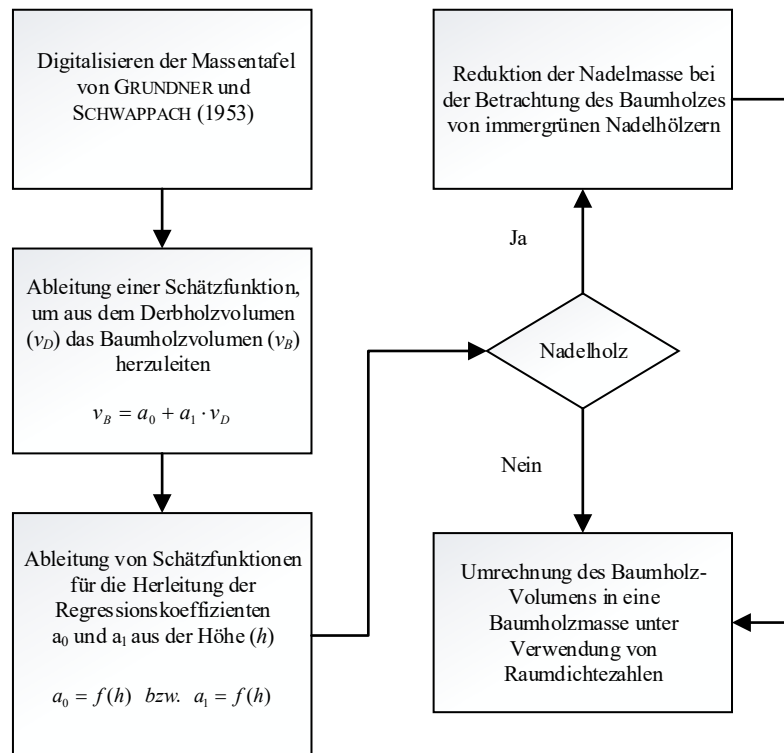


Abb. 2-5: Übersicht über das Vorgehen bei der Herleitung von Massenexpansionsfaktoren

2.3.2.1 Herleitung des Volumenexpansionsfaktors

Ein Volumenexpansionsfaktor ermöglicht die Umrechnung von Derbholzvolumen in Baumholzvolumen. Als Grundlage für die Herleitung der Expansionsfaktoren wird die Massentafel von GRUNDNER et al. (1952)¹³ verwendet. Diese Tafel ist für die Baumarten Buche, Eiche, Erle, Fichte, Kiefer, europäische Lärche und Weiß-Tanne aufgestellt worden. Das Grundmaterial bildet hierbei die sektionsweise Aufnahme von über 70.000 Einzelstämmen. Es muss erwähnt werden, dass die Tabellen keine Messwerte wiedergeben, sondern bereits auf „grafisch ausgeglichenen“ bzw. interpolierten Werten beruhen. Deswegen kann der Zusammenhang zwischen den Eingangsgrößen Brusthöhendurchmesser, Höhe und den zu bestimmenden Größen Derb- bzw. Baumholzvolumina der Einzelbäume nur als Hilfsfunktion gesehen werden (ZELL 2008). Bei der Betrachtung des Baumholzes von immergrünen Nadelhölzern (Fichte, Kiefer etc.) beziehen GRUNDNER et al. (1952) die Nadel- und Blattmasse in ihre Tafelwerte mit ein. Die errechneten Baumholzvolumenwerte für Nadelholz müssen demnach um dieses Maß reduziert werden, was unter Verwendung der Umrechnungsfaktoren von DAUBER und KREUTZER (1979) umgesetzt wird (vgl. Anhang 4). Der Modellansatz nach PISTORIUS (2007) leitet zunächst einen

¹³ Im forstlichen Sprachgebrauch wird der Begriff Masse auch als Synonym für Volumen verwendet, was physikalisch betrachtet falsch ist. Bei der forstlichen Massentafel nach GRUNDNER et al. (1952) handelt es sich in Wirklichkeit um eine Volumentafel für den Einzelbaum.

Volumenexpansionsfaktor her. Hierfür werden die Werte für Derb- und Baumholzvolumen nach der Tafel von GRUNDNER et al. (1952) zunächst grafisch aufgetragen und mittels linearer Regression ein Ausgleich zwischen dem Derbholzvolumen und dem Baumholzvolumen nach Formel 2-23 vorgenommen. Anschließend kann der zugehörige Expansionsfaktor berechnet werden (vgl. Formel 2-24).

$$v_B = a_0 + a_1 \cdot v_D$$

Mit: v_B = Baumholzvolumen des Einzelbaumes [m³]
 v_D = Derbholzvolumen des Einzelbaumes [m³]
 a_0, a_1 = Koeffizienten **Formel 2-23**

$$VEF = \frac{v_B}{v_D}$$

Mit: VEF = Volumenexpansionsfaktor **Formel 2-24**
 v_B = Baumholzvolumen des Einzelbaumes [m³]
 v_D = Derbholzvolumen des Einzelbaumes [m³]

Abb. 2-6 (a) zeigt das Ergebnis der Kurvenanpassung am Beispiel der Baumart Kiefer im Alter zwischen 1 bis 80 Jahren. Hierbei wird deutlich, dass das Modell nach PISTORIUS (2007) besonders bei niedrigen Derbholzeinzelbaumvolumina teils erheblich abweicht (vgl. Abb. 2-6 (b)). Es erscheint deshalb sinnvoll, diesen Ansatz zu verbessern und ein zweistufiges Verfahren zu wählen. Hierbei werden die Werte der Massentafel nach GRUNDNER et al. (1952) für Derb- und Baumholz zunächst grafisch aufgetragen und getrennt nach Einzelbaumhöhen mittels eines linearen Regressionsmodells ausgeglichen (vgl. Abb. 2-6 (c)). In einem weiteren Schritt können dann die Regressionskoeffizienten a_0 und a_1 in Abhängigkeit von der Einzelbaumhöhe dargestellt und mit einer Polynomfunktion beschrieben werden. Die Polynomfunktionen zur Herleitung der Regressionskoeffizienten a_0 und a_1 für die Baumart Kiefer im Altersspektrum zwischen 1 bis 80 Jahren werden in Formel 2-25 und Formel 2-26 wiedergegeben.

$$a_0 = -0,0140 + 0,0098 \cdot h - 0,0011 \cdot h^2 + 3,89 \cdot 10^{-5} \cdot h^3 - 5,22 \cdot 10^{-7} \cdot h^4$$
Formel 2-25

Mit: a_0 = Koeffizient
 h = Höhe des Einzelbaumes [m]

$$a_1 = 2,8006 - 0,3088 \cdot h + 0,0225 \cdot h^2 - 0,0007 \cdot h^3 + 6,33 \cdot 10^{-6} \cdot h^4 + 4,82 \cdot 10^{-7} \cdot h^5$$
Formel 2-26

Mit: a_1 = Koeffizient
 h = Höhe des Einzelbaumes [m]

Abb. 2-6 (c) verdeutlicht das Ergebnis des zweistufigen Schätzansatzes. Deutlich zeigt sich die Verbesserung gegenüber dem Modell nach PISTORIUS (2007) insbesondere bei niedrigen Derbholzvolumina der Einzelbäume (vgl. Abb. 2-6 (d)). Zusätzlich wurde für die Validierung der biometrischen Modelle die rel. Treffgenauigkeit ($m_x\%$) als Grad der Annäherung der Schätzung an die Tafelwerte nach GRUNDNER et al. (1952) berechnet (vgl. Kap. 2.1.3). Hier zeigt der zweistufige Schätzansatz mit einer rel. Treffgenauigkeit von 5,39 % eine deutliche Verbesserung gegenüber dem Ansatz von PISTORIUS (2007), welcher eine Treffgenauigkeit von 13,86 %

aufweist. Neben der Baumart Kiefer wurden die Modellgleichungen für die Baumarten Buche, Eiche, Erle, Gemeine Fichte, Lärche und Weiß-Tanne erstellt. Eine Übersicht für die Modellgleichungen der zuvor genannten Baumarten befindet sich in Anhang 5. Eine Evaluierung beider Modelle auf Basis der relativen Abweichungen für die zuvor genannten Baumarten wird in Anhang 6 gegeben.

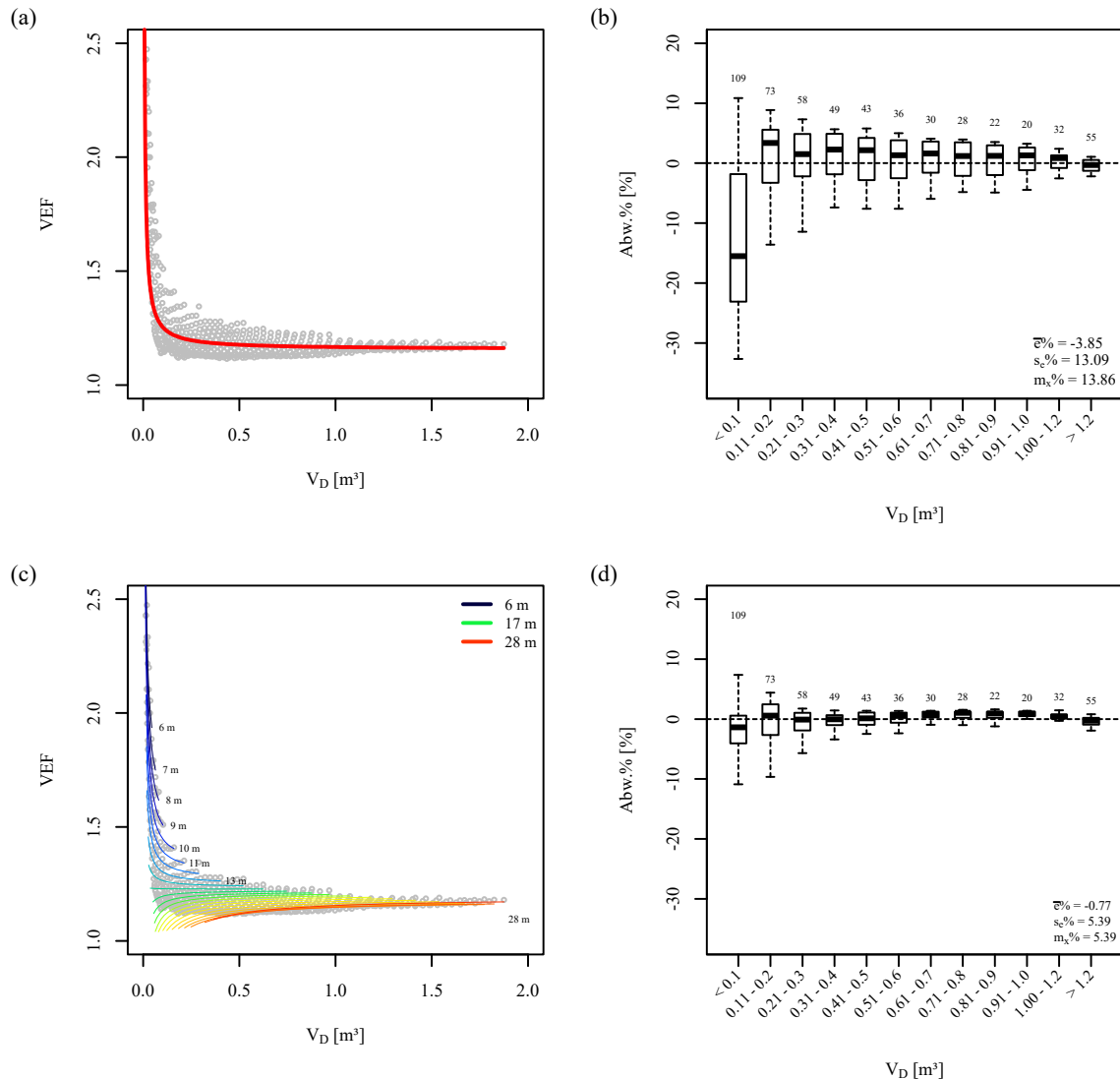


Abb. 2-6: Verhältnis von Derbholzvolumen (v_D) und dem Volumen-Expansionsfaktor (VEF), dargestellt am Beispiel der Kiefer (a) nach dem Modell von PISTORIUS (2007) bzw. (c) nach dem neu entwickelten zweistufigen Schätzverfahren. Zusätzlich dargestellt sind die relativen Abweichungen von den als Realwert angenommenen Massentafelwerten nach GRUNDNER et al. (1952), dargestellt (b) für das Modell von PISTORIUS (2007) bzw. (d) nach dem neu entwickelten zweistufigen Schätzverfahren.

Die Kiefernenertragstafel nach LEMBCKE et al. (1975) enthält bereits Baumholzvolumina, welche zum Vergleich eingesetzt werden können. Das Ergebnis des zuvor erläuterten neu entwickelten zweistufigen Schätzansatzes im Vergleich mit den Baumholzwerten der Kiefernenertragstafel von LEMBCKE et al. (1975) wird getrennt nach Bonitäten in Abb. 2-7 dargestellt. Es zeigt sich, dass die modellierten Werte (schwarz) nur in geringem Maße von den Tafel-Werten (rot) abweichen.

Es kann demnach geschlussfolgert werden, dass der hergeleitete Algorithmus für die Schätzung des Baumholzvolumens geeignet ist.

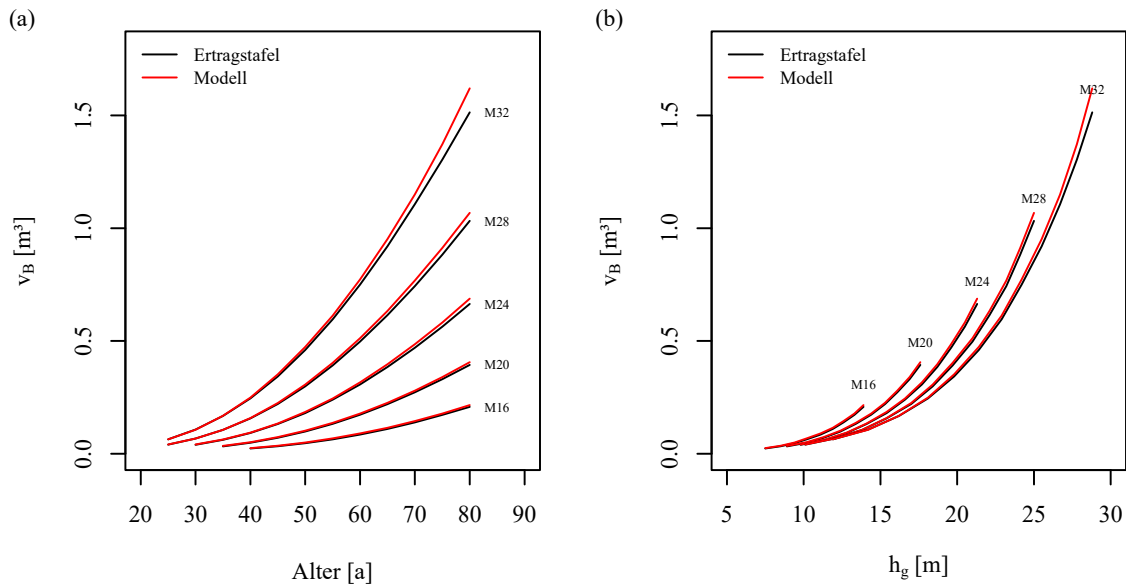


Abb. 2-7: Gegenüberstellung der Einzelbaumvolumina an Baumholz (v_B), die anhand des zweistufigen Schätzansatzes hergeleitet wurden (rot) und den Volumenmittelstammwerten, die aus der Ertragstafel nach LEMBCKE et al. (1975) (schwarz) für die Bonitäten M16 – M32 abgeleitet wurden, (a) aufgetragen über dem Alter bzw. (b) der Höhe des Grundflächenmittelstammes (h_g)

2.3.2.2 Umrechnung des Baumholzvolumens in Baumholzmasse

Aus dem hergeleiteten Baumholzvolumen kann unter Einbeziehung der Raumdichte (R_D) eine Masse für den Einzelbaum bestimmt werden. Dieses Vorgehen ist in der Literatur als „approximatives Schätzverfahren zur Biomasseermittlung“ bekannt (HEINSDORF und KRAUSS 1990). Die Raumdichte beschreibt nach METTE (1984) das Verhältnis der Holzmasse in darrtrockenem Zustand (M_0) zum Volumen des Holzes in waldfrischem bzw. voll gequollenem Zustand (V_u) (vgl. Formel 2-27).

$$R_D = \frac{M_0}{V_u}$$

Mit: R_D = Raumdichte(zahl) [$\text{kg} \cdot \text{fm}^{-1}$]
 M_0 = Masse bei 0 % Feuchtigkeit [kg]
 V_u = Volumen bei einer Feuchte oberhalb der Fasersättigung [fm]

Formel 2-27

Die Raumdichte kann nach TRENDLENBURG (1955) bei Kenntnis des Schwindmaßes (β_v) unter Verwendung der in Formel 2-28 dargestellten Gleichung aus der Darrdichte¹⁴ hergeleitet werden.

$$R_D = r_0 \cdot \frac{100 - \beta_v}{100}$$

Mit: R_D = Raumdichte(zahl)
 r_0 = Darrdichte
 β_v = Schwindmaß

Formel 2-28

¹⁴ Darrdichte: Die Darrdichte gibt die Masse eines Kubikmeters darrtrockenen Holzes in Kilogramm an.

Darrdichte [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$] und Raumdichte [$\text{kg} \cdot \text{fm}^{-1}$] unterscheiden sich um das Maß der Raumänderung, die das Holz zwischen darrtrockenem Zustand und Fasersättigung im feuchten Zustand erfährt. Eine Übersicht der zugehörigen Werte für Darrdichte und Schwindmaß befindet sich in Anhang 7. Abb. 2-8 informiert über die in dieser Arbeit verwendeten Werte für die Raumdichte, in Anlehnung an die Arbeiten von KOLLMANN (1951), RIEBEL (2007) und WAGENFÜHR (2007). Gezeigt werden die oberen und unteren Grenzwerte bzw. die mittlere Raumdichte. Hierbei wird deutlich, wie stark die Raumdichte innerhalb der einzelnen Baumarten streut. KOLLMANN (1978) führt diese Unterschiede auf unterschiedliche Provenienzen sowie variierende Standort- und Umweltbedingungen zurück, denen die Bäume während ihres Wachstums ausgesetzt sind. Es ist davon auszugehen, dass auch unterschiedliche waldbauliche Behandlungskonzepte die Raumdichte beeinflussen.

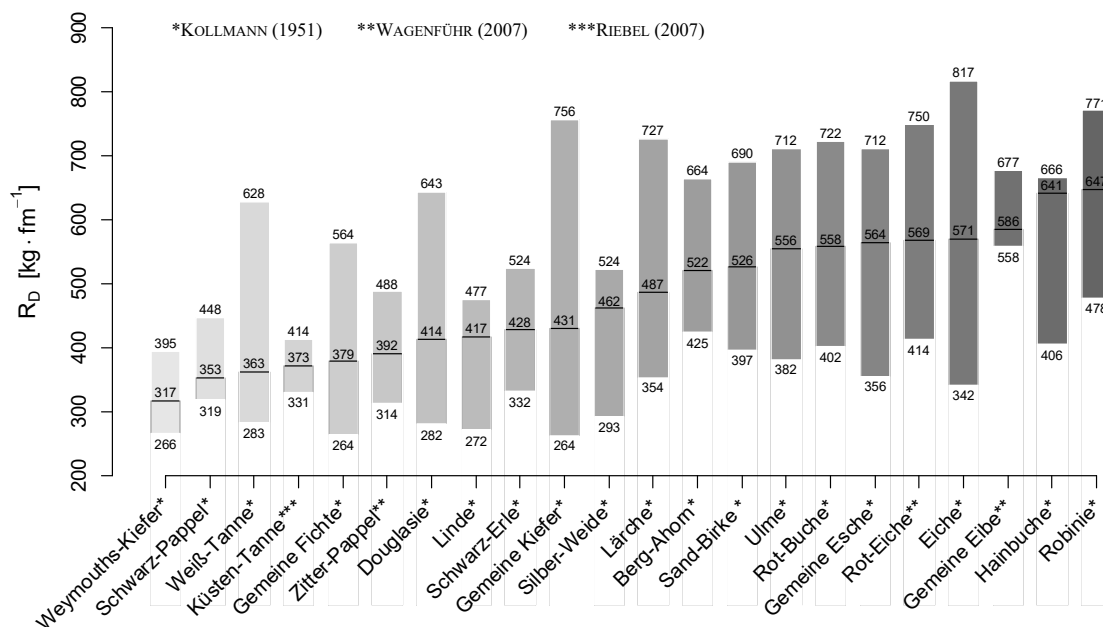


Abb. 2-8: Mittel- und Grenzwerte der Raumdichte (R_D) ausgewählter Baumarten

Um zu vergleichen, inwieweit die Umrechnungen der mittels des zweistufigen Schätzansatzes hergeleiteten und mittels der Raumdichtezahl in eine Masse umgerechneten Werte mit faktischen Massenwerten von Einzelbäumen übereinstimmen, kann die Schätztafel für Trockenmasse und Nährstoffspeicherung von Kiefernbeständen nach HEINS DORF und KRAUSS (1990) herangezogen werden. Für die Erarbeitung dieser Tafel wurden von 82 Probestämmen aus vollbestockten Beständen Brusthöhendurchmesser, Baumhöhen sowie das zugehörige Einzelbaumgewicht bestimmt. Den Vergleich der hergeleiteten Einzelbaummassen an Baumholz (m_B) und den Werten der Tafel nach HEINS DORF und KRAUSS (1990) zeigt Abb. 2-9 (a). Es wird deutlich, dass die modellierten Werte die Tafelwerte unterschätzen. Mit hoher Wahrscheinlichkeit kann

dies auf den großen Schwankungsbereich der Raumdichte bei der Baumart Kiefer (264 bis 756 $\text{kg} \cdot \text{fm}^{-1}$) zurückgeführt werden (vgl. Abb. 2-9 (b)).

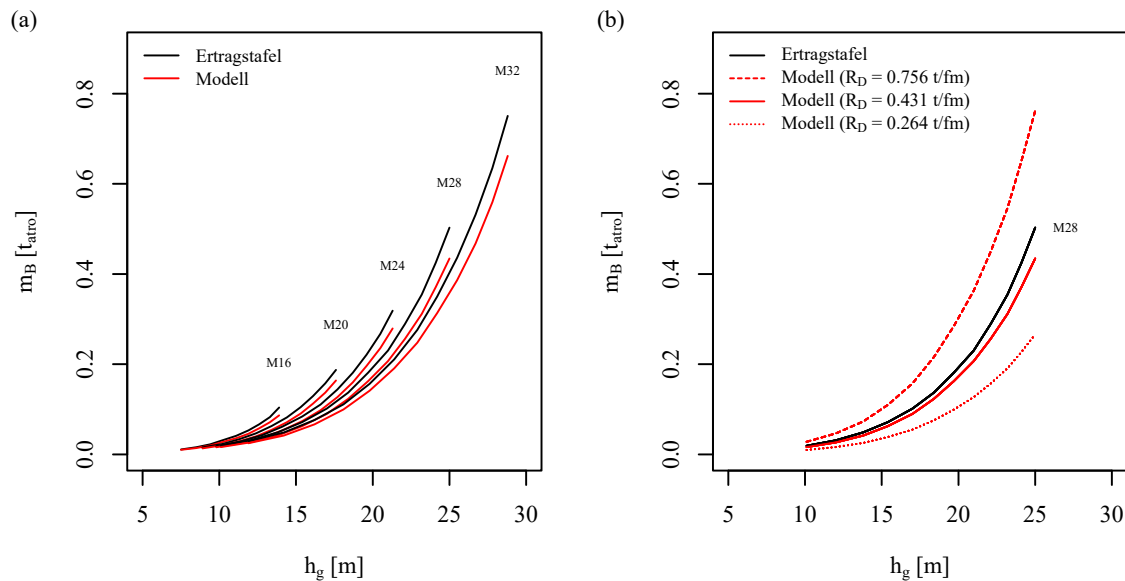


Abb. 2-9: Gegenüberstellung der hergeleiteten Einzelbaummassen an Baumholz (rot) und den Tafelwerten nach HEINSDORF und KRAUSS (1990) (schwarz) für die Bonitäten M16 – M32, aufgetragen über der Höhe des Grundflächenmittelstammes (h_g)

2.3.3 Allometrische Formelbeziehungen als Grundlage der Dendromassebestimmung

Eine weitere Möglichkeit die oberirdische Dendromasse herzuleiten, beruht auf der Anwendung von Schätzfunktionen, welche einen allometrischen¹⁵ Zusammenhang zwischen dem oberirdischen Trockengewicht von Einzelbäumen und weiteren Baumattributen, wie z. B. Durchmesser, Höhe etc., herstellen. Hergeleitet werden diese Gleichungen, welche im weiteren Verlauf dieser Arbeit als Biomassefunktionen¹⁶ bezeichnet werden, anhand von Stichprobenbäumen, deren Einzelbaummasse bestimmt und regressionsanalytisch in Beziehung zu leicht messbaren Baumattributen gesetzt wird. Neben einer Fülle von Einzelveröffentlichungen existieren umfangreiche Sammlungen für standortspezifische Biomassefunktionen, insbesondere für Europa (ZIANIS et al. 2005, MUUKKONEN und MÄKIPÄÄ 2006, MUUKKONEN 2007, ANNIGHÖFER et al. 2016), Australien (EAMUS et al. 2000) und Nordamerika (TER-MIKAELIAN und KORZUKHIN 1997, JENKINS et al. 2004). Besonders hervorzuheben ist die Arbeit von JENKINS et al. (2004) mit einer Sammlung von 2.640 Biomassefunktionen aus 177 Erhebungsstudien.

¹⁵ Allometrie bedeutet, dass sich das Wachstum verschiedener Organe im Verhältnis zum Gesamtkörper zwar in der Geschwindigkeit unterscheidet, aber das Verhältnis der Wuchsgeschwindigkeiten zueinander konstant bleibt (PRETZSCH 2001).

¹⁶ Unter Biomasse wird in diesem Kontext die Dendromasse, d. h. die oberirdische Masse von Bäumen/Beständen im unbelaubten Zustand (Stamm und Astholz mit Rinde) verstanden. Das nach der Entnahme der Bäume im Bestand verbleibende Stockholz, die in den Wurzeln fixierte Holzmasse sowie die Blattmasse sind nicht Gegenstand der Betrachtungen.

Abschließend wird die Frage aufgeworfen, wann sinnvollerweise ein approximatives Schätzverfahren unter Verwendung der Raumdichte bzw. ein allometrischer Funktionsbezug (Biomassefunktionen) zur Herleitung der oberirdischen Dendromasse eingesetzt wird. Grundsätzlich hat sich gezeigt, dass Biomassefunktionen den Massenertrag von Einzelbeständen und Baumkollektiven sehr genau schätzen können, dies gilt insbesondere für Reinbestände mit geringen Brusthöhendurchmessern (< 15 cm). Die Anwendung von Biomassefunktionen auf ältere strukturierte Bestände bzw. Mischbestände ist nach GROTE et al. (2003) in Frage zu stellen bzw. muss mit sehr hohen Stichprobenumfängen abgesichert werden. Bei der generalisierenden, überregionalen Verwendung verfügbarer Biomassefunktionen ergeben sich weitere Probleme. So weisen ČERNÝ (1990) und SOMOGYI et al. (2007) darauf hin, dass Biomassefunktionen für die gleiche Baumart starken regionalen Schwankungen unterliegen. Zusätzlich wird das Einzelbaumgewicht stark durch das waldbauliche Behandlungskonzept beeinflusst. Insbesondere der Dichtstand und die damit verbundene Astmasse sind ausschlaggebend für den Verlauf der Biomassefunktion (vgl. Kap. 3.1.4, S. 68). Wie heterogen sich die unterschiedlichen Funktionsbeziehungen darstellen, geht aus Abb. 2-10 hervor. Gezeigt wird eine Auswahl von Biomassefunktionen für die Baumart Kiefer aus der Sammlung von MUUKKONEN (2007), welche der Bonität M28 der Ertragstafel nach HEINSDORF und KRAUSS (1990) gegenübergestellt werden.

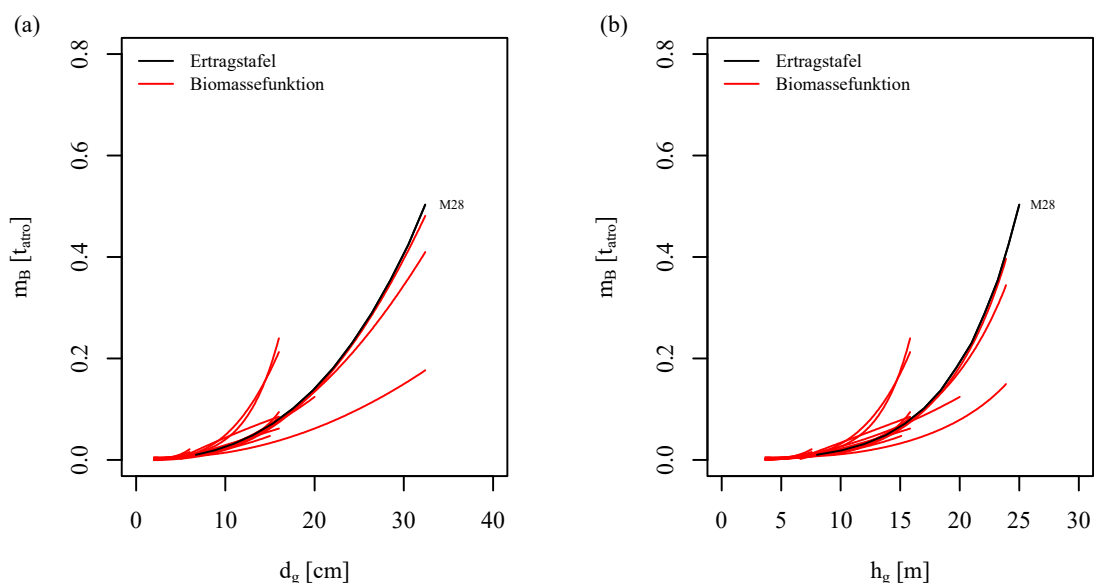


Abb. 2-10: Einzelbaummasse (m_B) ausgewählter Biomassefunktionen aus der Sammlung von MUUKKONEN (2007) (rot) und den Tafelwerten nach HEINSDORF und KRAUSS (1990) (schwarz) für die Bonität M28, aufgetragen (a) über dem Durchmesser des Grundflächenmittelstammes (d_g) bzw. (b) der Höhe des Grundflächenmittelstammes (h_g)

Schlussfolgernd kann festgehalten werden, dass Biomassefunktionen überregional eingesetzt werden können, wenn diese neben der Baumart auch die Variablen Dichte und Standortgüte einbeziehen. Erste Untersuchungen von WIRTH et al. (2004) und ALI (2009) für die Baumarten Fichte bzw. Pappel bestätigen dies. Funktionen, welche die zuvor genannten Kriterien berücksichtigen, existieren für die im Untersuchungsgebiet heimischen Baumarten gegenwärtig nicht. Es empfiehlt sich deshalb, bei der Massenherleitung größerer zusammenhängender Waldbestände, speziell wenn hierbei Forstinventurdaten verwendet werden, das approximative Schätzverfahren unter Verwendung von mittleren Raumdichten einzusetzen. Ein Entscheidungsbaum für die in dieser Arbeit angewandten Methoden wird in Abb. 2-11 gegeben.

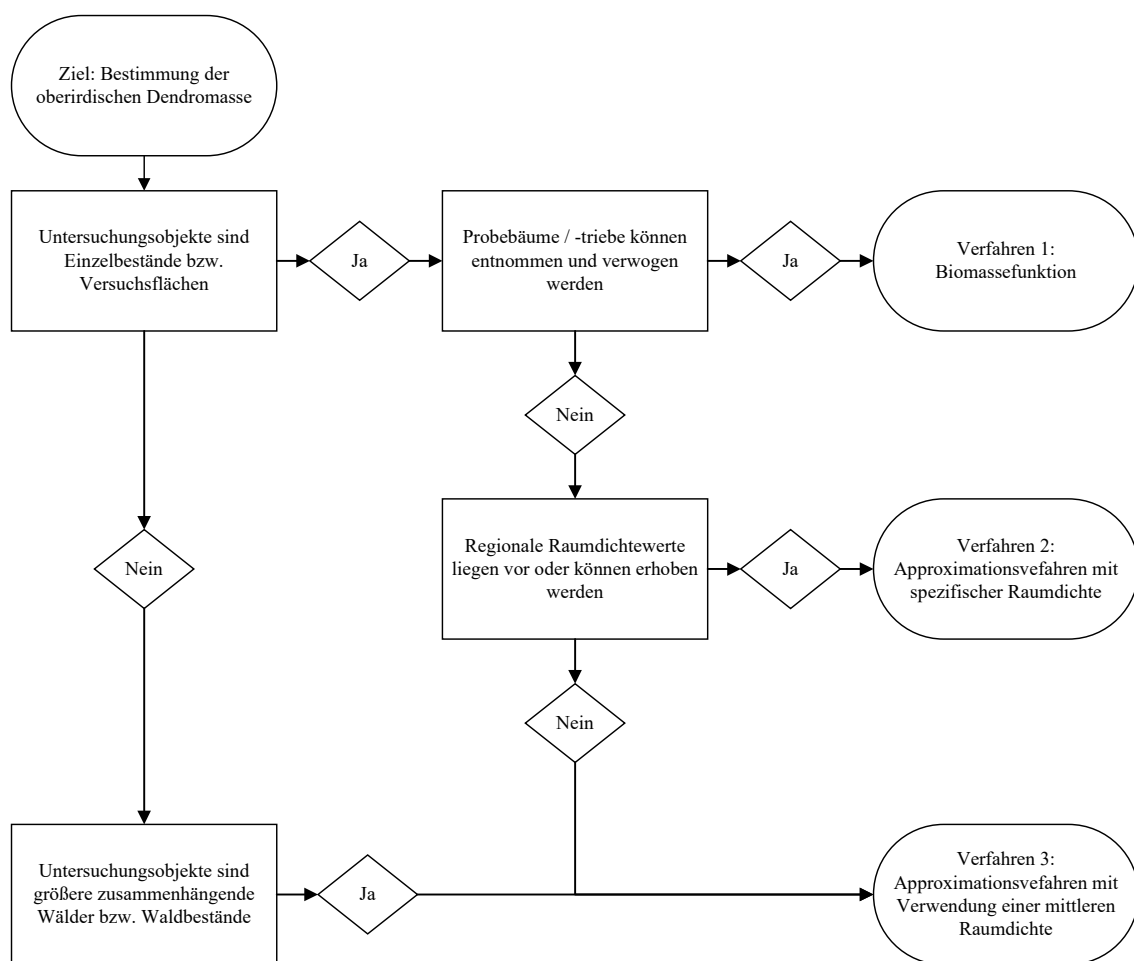


Abb. 2-11: Entscheidungsbaum für die Auswahl des Verfahrens zur Herleitung der oberirdischen Dendromasse

3 Szenarien zur Steigerung der Dendromasseproduktion

Die nachhaltige Optimierung der Holzproduktion in Waldsystemen auf der Grundlage einer alternativen Baumartenwahl und eines modifizierten Behandlungsregimes stehen im Zentrum der vorliegenden Arbeit. Bedenkt man, dass diese Zielsetzung bereits von HEINRICH COTTA (1763 - 1844), dem Gründer der modernen Forstwissenschaft, verfolgt wurde und sich in den letzten 200 Jahren wie ein roter Faden durch die einzelnen Teilgebiete dieses Wissenschaftszweiges zieht, so erscheint es logisch, dass dieses komplexe Thema in der vorliegenden Arbeit nur anhand von ausgewählten Schwerpunkten vorgestellt werden kann. Um die Übersichtlichkeit und Leserfreundlichkeit bei der Fülle von Forschungsergebnissen zu wahren, werden diese nachfolgend in zwei Kapitel gegliedert, die in ihrer Struktur aufeinander aufbauen. Verbindendes Element ist stets die Frage nach der Wuchseistung von naturnahen und -fernen Bestockungstypen bzw. intensiven und extensiven Wirtschaftsweisen, welche in der abschließenden Diskussion miteinander verglichen und bewertet werden.

Dementsprechend widmet sich Kapitel 3.1 zunächst einem der intensivsten waldbaulichen Produktionssysteme, nämlich der Betrachtung von Kurzumtriebsplantagen, bevor in Kapitel 3.2 die Ertragsleistungen unterschiedlicher Baumarten der klassischen Reinbestandeswirtschaft von Schlagweisen Hochwäldern vorgestellt werden. Schwerpunkt dieser beiden Kapitel ist u. a. die Abschätzung der standörtlichen Produktionskraft für unterschiedliche Baumarten und die damit verbundene Herleitung von Standortleistungsbeziehungen. In weiteren Schritten werden dann waldbauliche Optionen für eine Maximierung der Ertragsleistung (optimale Pflanzzahlen, Durchforstungsregime etc.) bewertet und diskutiert.

3.1 Modellierung des Produktionspotenzials von Pappel-KUP

Der Anbau von schnellwachsenden Baumarten, wie z. B. Pappel, Weide, Robinie, Erle, Birke etc. auf Kurzumtriebsplantagen zählt in Deutschland zu den intensivsten waldbaulichen Produktionssystemen überhaupt. Primäres Ziel dieser Wirtschaftsform ist die Erzeugung von Biomasse für die energetische Verwendung (vgl. Kap. 1.2.1). Im folgenden Teil der Arbeit werden anhand eines vordefinierten Szenarios die ertragskundlichen Möglichkeiten dieser Wirtschaftsform im Einzugsgebiet des Freistaates Sachsen aufgezeigt. Im Vordergrund stehen Plantagen der Baumart Pappel. Für die Modellierung des Biomasse-Potenzials wird in drei Schritten vorgegangen:

1. Vorstellung eines Modells zur Schätzung des Standortleistungspotenzials von KUP in der 1. Rotation (Kap. 3.1.1).
2. Entwicklung eines ertragskundlichen Modells zur Abbildung der Ertragssteigerung von KUP in Folgerotationen (Kap. 3.1.2).
3. Zusammenführung der Modelle und Abschätzung des durchschnittlichen Biomasse-Potenzials von KUP anhand eines festgelegten Modell-Szenarios (Kap. 3.1.3).

Die folgenden Abschnitte behandeln den methodischen Weg der Zielerreichung und richten sich an dem zuvor genannten Vorgehen aus. Am Ende des Kapitels werden die Ergebnisse diskutiert sowie eine Zusammenfassung der wichtigsten Aspekte gegeben.

3.1.1 Standortleistungsschätzung für KUP

Aus zahlreichen Literaturquellen geht hervor, dass Biomasseerträge von KUP neben der Wahl des Klons und des Pflanzdesigns stark von Standort- und Klimavariablen beeinflusst werden (ARMSTRONG 1997, BULLARD et al. 2002a, BULLARD et al. 2002b, DECKMYN et al. 2004, STOLARSKI et al. 2008, ALI 2009, RÖHLE et al. 2013, SKIBBE et al. 2013, SKIBBE 2016). ALI (2009) gelang es, diese Zusammenhänge statistisch abzubilden und einen standortbasierten Leistungsschätzer für Kurzumtriebsplantagen aus Pappel abzuleiten. Da das Modell von ALI (2009) speziell an die Wuchsbedingungen des Freistaates Sachsen angepasst wurde, bietet sich seine Verwendung im Zuge dieser Arbeit an. Das von ALI (2009) entwickelte Modell leitet über Standortfaktoren sowie Bestandesalter und -dichte die Biomasseleistung von Kurzumtriebsplantagen in einem zweistufigen Ansatz her. In einem ersten Schritt erfolgt die Schätzung der Oberhöhe (h_0) mittels multipler linearer Regressionsanalyse (vgl. Kap. 2.1.2) in Abhängigkeit vom Be-

standesalter und den Standortfaktoren Mitteltemperatur der Monate April bis Juli (T_{4-7}), Niederschlagssumme der Monate Mai bis Juni (N_{5-6}), Ackerzahl (Az)¹⁷ und nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (nFK_{WE}). Die Modellgleichung lautet:

$$h_o = a_1 \cdot \text{Alter} + a_2 \cdot N_{5-6} \cdot Az + a_3 \cdot \frac{T_{4-7}}{nFK_{WE}} \quad \text{Formel 3-1}$$

Mit: h_o = Oberhöhe [m]
 Az = Ackerzahl
 T_{4-7} = Durchschnittstemperatur der Monate April bis Juli [°C]
 N_{5-6} = Niederschlagssumme der Monate Mai bis Juni [mm]
 nFK_{WE} = Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum [mm]
 $a_1 \dots a_3$ = Regressionskoeffizienten

Das Spektrum der erhobenen Standort- und Klimavariablen wird in Tab. 3-1 wiedergegeben. Es schränkt den Anwendungsbereich des Modells zugleich ein.

Tab. 3-1: Minimale und maximale Werte von Standort- und Klimavariablen der von ALI (2009) untersuchten Versuchsflächen

Klima- bzw. Standortvariable	Formelbezug	Min.	Max.
Ackerzahl	Az	25	70
Durchschnittstemperatur der Monate April bis Juli [°C]	T_{4-7}	10	15
Niederschlagssumme der Monate Mai bis Juni [mm]	N_{5-6}	90	200
Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum [mm]	nFK_{WE}	100	200

Die Funktionskoeffizienten a_1 , a_2 und a_3 sind abhängig von dem gewählten Pappelhybrid (Tab. 3-2). Besonders bemerkenswert sind hierbei die hohen Bestimmtheitsmaße (R^2) der klon-spezifischen Funktionen, welche verdeutlichen, dass mehr als 97 % der Variation der Oberhöhe mittels der Variablen erklärt werden können.

Tab. 3-2: Koeffizienten der Funktion zur Berechnung der Oberhöhe für verschiedene Pappelhybride nach ALI (2009)

Klon	Alter	a_1	a_2	a_3	R^2
Androscoggin	2 - 7	1,402	0,0005	-27,022	0,98
Max	2 - 9	1,569	0,0004	-23,198	0,99
Matrix	2 - 9	1,629	0,0005	-36,409	0,99
Münden	2 - 7	1,374	0,0006	-29,399	0,97

¹⁷ Nach SCHEFFER et al. (2010) können die Bodeneigenschaften eines Ackerstandortes durch die Bodenzahl bewertet werden. Die Bodenzahl ist ein ungefähres Maß für die Ertragsfähigkeit eines Bodens. Grundlage ist eine Ansprache von Bodenart, Ausgangsgestein und Zustandsstufe. Aus der Bodenzahl wird unter Berücksichtigung von Klima und Relief die Ackerzahl hergeleitet.

Die Untersuchungen von ALI (2009) zeigten, dass eine direkte Schätzung der Biomasseleistung über die Standortvariablen nicht möglich ist, weil der Ertrag in starkem Maße abhängig von der vorhandenen Pflanzenanzahl ist. Deswegen erfolgt in einem zweiten Schritt die Schätzung des Biomassevorrates (BM_{atro}) anhand der Bestandesdichte¹⁸ mittels nichtlinearer Regressionsanalyse durch die Bestandesoberhöhe (vgl. Formel 3-2).

$$BM_{atro} = a_4 \cdot h_o^{a_5} \quad \text{Mit: } \begin{array}{ll} BM_{atro} & = \text{Biomasse [tatro} \cdot \text{ha}^{-1}] \\ h_o & = \text{Oberhöhe [m]} \\ a_4, a_5 & = \text{Regressionskoeffizienten} \end{array} \quad \text{Formel 3-2}$$

Für die Klone Androscoggin, Matrix und Münden konnten mangels zur Verfügung stehender Versuchsflächen die Funktionsbezüge nur für eine Ausgangspflanzzahl (N_{Stock}) von 1.150 Stück $\cdot$ ha⁻¹ angepasst werden. Für die Max-Klone wurden die Koeffizienten a_4 und a_5 mittels der unten angegebenen Gleichungen für eine Ausgangsdichte von 1.150 bis 13.000 Steckhölzern $\cdot$ ha⁻¹ hergeleitet.

$$a_4 = -1,13 \cdot 10^{-9} \cdot N_{Stock}^2 + 2,54 \cdot 10^{-5} \cdot N_{Stock} + 0,028 \quad \text{Formel 3-3}$$

Mit: $\begin{array}{ll} a_4 & = \text{Regressionskoeffizient für die Schätzung der Biomasse} \\ N_{Stock} & = \text{Ausgangspflanzzahl an Steckhölzern [Stück} \cdot \text{ha}^{-1}] \end{array}$

$$a_5 = -3,41 \cdot 10^{-9} \cdot N_{Stock}^2 - 5,01 \cdot 10^{-5} \cdot N_{Stock} + 2,614 \quad \text{Formel 3-4}$$

Mit: $\begin{array}{ll} a_5 & = \text{Regressionskoeffizient für die Schätzung der Biomasse} \\ N_{Stock} & = \text{Ausgangspflanzzahl an Steckhölzern [Stück} \cdot \text{ha}^{-1}] \end{array}$

Die von ALI (2009) durchgeführte Validierung des Modells zeigte, dass die Ertragsschätzungen in Relation zum mittleren Beobachtungswert um durchschnittlich -7,6 % abweichen. Damit befinden sich die Ergebnisse in einem durchaus akzeptablen Bereich (SKIBBE et al. 2013).

3.1.2 Ertragsleistung von Pappel im Kurzumtrieb bei Folgerotationen

Für die Herleitung der Erträge auf Kurzumtriebsplantagen wurden bereits verschiedene biometrische Modelle entwickelt (ALI 2009, HARTMANN 2010, PÉREZ-CRUZADO 2011, SKIBBE et al. 2013, AMTHAUER GALLARDO 2014, SKIBBE 2016). Allen gemeinsam ist, dass deren Parametrisierung primär auf Versuchsdatenmaterial beruht, welches von Probeflächen der 1. Rotation abgeleitet wurde. Für die Abschätzung des Ertrages von Folgerotationen sind sie somit nur bedingt geeignet. Literaturangaben zufolge ist insbesondere in der 2. Rotation eine Ertragssteigerung zu erwarten (HOFMANN 1999, BOELCKE 2006, WERNER et al. 2006, DIETZSCH 2011, RÖHLE et al. 2015). Für die Schätzung eines Produktions-Potenzials der „Wirtschaftsform

¹⁸ ALI (2009) definiert die Bestockungsdichte mit der Anzahl der gesteckten Steckhölzer pro Hektar (Ausgangs-Stockzahl). Nachstehend wird zwischen gepflanzten Stöcken (N_{Stock}) und Trieben (N_T) unterschieden. An einem „gepflanzten“ Stock (Steckholz) können mehrere Triebe ausgebildet werden.

Kurzumtrieb“ im Einzugsgebiet des Freistaates Sachsen erscheint es sinnvoll, diesen Ertragsanstieg herzuleiten. Im Zuge des vorliegenden Kapitels soll deshalb die Frage beantwortet werden, inwieweit sich in Folgerotationen die Ertragsleistung von Kurzumtriebsplantagen verändert und inwieweit dies in einem Modell beschrieben werden kann.

3.1.2.1 Methodisches Vorgehen

In einem ersten Schritt wurde das vorhandene Datenmaterial der Professur für Waldwachstum und Holzmesskunde der Technischen Universität Dresden gesichtet und sortiert. Anschließend wurde in einem zweiten Schritt festgestellt, zu welchen Plantagen Ertragskennwerte aus der 1. und 2. Rotation vorliegen bzw. zu welchen Plantagen die Ertragswerte für Folgerotationen noch erhoben werden können. Die benötigten Daten wurden im Zeitraum zwischen Februar 2012 und März 2013 aufgenommen. Für die sich anschließende Modellentwicklung wurden weitere Daten aus der Literatur herangezogen. Auf die Methodik zur Erhebung von Biomasse auf Kurzumtriebsplantagen soll im Folgenden kurz eingegangen werden.

Für die Bestimmung der Biomasse auf Kurzumtriebsplantagen existiert noch kein standardisiertes Vorgehen. Es hat sich allerdings gezeigt, dass bei einer Vielzahl möglicher Verfahren die Regressionsmethode nach VERWIJST und TELENUS (1999) ein besonders geeignetes praxisrelevantes Verfahren darstellt (HARTMANN 2006, BEMMANN et al. 2007, HAUKE et al. 2015, SKIBBE 2016). Deshalb wurde diese bei der Biomasseermittlung der beprobten Versuchsfelder zugrunde gelegt. Das genaue Vorgehen bei Verwendung dieser Methode wird bei RÖHLE et al. (2010b) beschrieben. Hierbei wird der Brusthöhendurchmesser ($d_{1,3}$) in eine allometrische Beziehung zum Trockengewicht des Einzelbaumes gesetzt und mittels einer einfachen allometrischen Funktion regressionsanalytisch ausgeglichen (vgl. Kap. 2.3.3). Untersuchungen von RÖHLE et al. (2006) anhand von umfangreichem Datenmaterial zeigten, dass die in Formel 3-5 dargestellte Funktionsgleichung die besten Anpassungsgüten lieferte.

$$bm = a_1 \cdot d_{1,3}^{a_2} \quad \text{Mit: } \begin{array}{ll} bm & = \text{Biomasse des Einzeltriebs [kg}_{\text{atro}} \cdot \text{Stück]} \\ d_{1,3} & = \text{Brusthöhendurchmesser [cm]} \\ a_1, a_2 & = \text{Regressionskoeffizienten} \end{array} \quad \text{Formel 3-5}$$

Aus dieser im Folgenden als „Biomassefunktion“ bezeichneten Gleichung kann unter Verknüpfung mit der Durchmesser- und Biomasseverteilung der Biomasseertrag abgeleitet werden. Dementsprechend gliederten sich die Arbeitsschritte in Anlehnung an RÖHLE et al. (2010b) wie folgt auf:

1. $d_{1,3}$ -Messung aller Triebe auf einer repräsentativen Teilfläche der KUP.
2. Ernte von 15 Trieben über das gesamte $d_{1,3}$ -Spektrum.

3. Bestimmung des Frischgewichtes der geernteten Einzeltriebe.
4. Trocknung der Proben bei 103,5 °C bis zur Gewichtskonstanz und Ermittlung des Trockengewichts der Einzeltriebe.
5. Aufstellung einer Biomassefunktion (Beziehung zwischen $d_{1,3}$ und Trockenbiomasse) anhand der Daten der geernteten Individuen.
6. Berechnung der Flächen- und Hektardaten durch Einsetzen aller $d_{1,3}$ -Werte in die Biomassefunktion.

3.1.2.2 Versuchsflächen

Die zur Beprobung ausgewählten Versuchsflächen befanden sich in Sachsen und dem südlichen Brandenburg. Bei der Zusammenstellung der Flächen wurde darauf geachtet, dass nach Möglichkeit eine Vielzahl von verschiedenen Landschaftsräumen und Klimastufen Berücksichtigung fanden. Die Lage sowie Bezeichnung der Versuchsflächen ist in Abb. 3-1 dargestellt. Die Höhenlage der Versuchsfelder erstreckte sich vom Tiefland (Vetschau) bis in die mittleren Berglagen (Arnsfeld) und variierte zwischen 70 bis 650 m über NN. Der für die Ertragsleistungen bedeutsame mittlere Jahres-Niederschlag schwankt dementsprechend stark zwischen 550 bis 850 mm, wobei tendenziell festgehalten werden kann, dass er zum Gebirge hin ansteigt. Die zum Teil sehr unterschiedliche Ausstattung bzw. die Qualität des Bodens spiegelt sich in der Ackerzahl wider, welche sich in einem Wertebereich von 22 bis 55 Bodenwertpunkten bewegt. Die Biomassebestimmung wurde für 10 Pappelklone der Sorten Max, Androscoggin und Hybrid 275 durchgeführt.

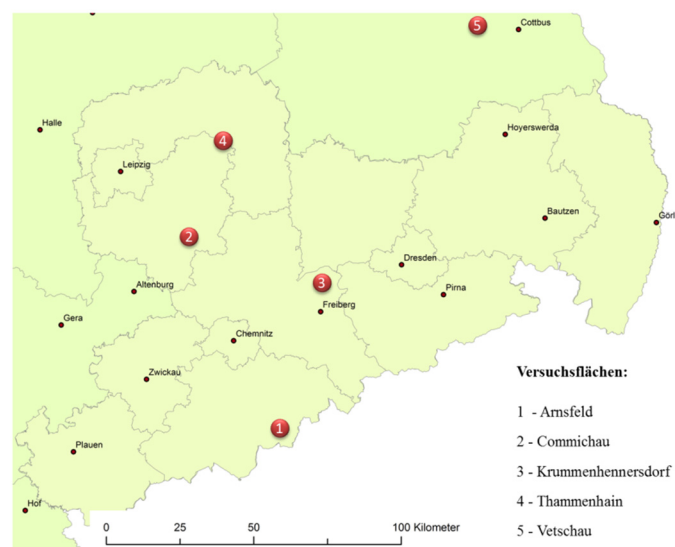


Abb. 3-1: Lage der Versuchsflächen

Die zum Zwecke der Modellbildung aus der Literatur (BOELCKE 2006, WERNER et al. 2006, BIERTÜMPFEL et al. 2009, BIERTÜMPFEL et al. 2012) ergänzten ertragskundlichen Daten stammen von Versuchsflächen der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) sowie der Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern (LFA-MV). Einbezogen wurden Daten unterschiedlicher Pappelklone der Versuchsflächen „Bad Salzungen“, „Dornburg“ und „Langenwetzendorf“ (TLL) sowie „Gülzow“ (LFA-MV) im 3-jährigen Umtrieb. Für die Modellevaluierung fanden zusätzliche unveröffentlichte Ertragswerte Verwendung, die dankenswerterweise von der TLL zur Verfügung gestellt wurden. Es handelt sich hierbei um Ertragsdaten von Pappelklonen der Versuchsflächen „Dornburg“ und „Langenwetzendorf“, die im 5-jährigen Umtrieb bewirtschaftet worden sind. Über die wichtigsten Kenngrößen hinsichtlich der standörtlichen und klimatischen Ausstattung aller Versuchsflächen informiert Tab. 3-3. Nähere Ausführungen zu den verwendeten Pflanzdichten, Klonen und Erntezeitpunkten sind in Anhang 8 aufgeführt.

Tab. 3-3: Standörtliche und klimatische Daten zu den Versuchsfeldern

Versuchsfläche	Ackerzahl	Höhe [m ü. NN]	Mittlere Jahrestemperatur [°C]	Mittlerer Jahresniederschlag [mm]
Arnsfeld	29	600 - 650	< 7	> 850
Commichau	55	210	8 - 9	680
Krummenhennersdorf	45	350	7,2	820
Thammenhain I + II	42	130	8,5	550 - 660
Vetschau	22	70	8,5	550
Bad Salzungen	33	290	8.1	586
Dornburg	60	260	8,8	600
Gülzow	52	10	8,2	559
Langenwetzendorf	40 - 44	380	7,5	600

3.1.2.3 Ergebnisdarstellung

Das folgende Kapitel stellt die Ergebnisse zur Ertragsleistung von Pappel im Kurzumtrieb bei Folgerotationen vor. Im Mittelpunkt steht die Veränderung ertragskundlicher Kenngrößen zwischen 1. und 2. Rotation. Eine tabellarische Übersicht der wichtigsten ertragsspezifischen Kenngrößen auf den beprobten Versuchsflächen wird in Anhang 9 gegeben.

Entwicklung der Triebzahl (N_T)

In einer „klassischen Hochwaldwirtschaft“ spiegelt die Stammzahl den fortwährenden Ausscheidungsprozess von Baumindividuen aufgrund von biologisch-abiotischen Einwirkungen wider und nimmt mit zunehmendem Alter ab. In „niederwaldartiger“ Kurzumtriebsplantagenwirtschaft muss dieser Sachverhalt differenzierter betrachtet werden. Aufgrund der Fähigkeit zu Stockausschlag bzw. zur Wurzelbrut nimmt zwischen den aufeinanderfolgenden Rotationen die Triebzahl stark zu. Abb. 3-2 informiert, inwieweit die Triebzahl von 1. zu 2. Rotation auf den fünf untersuchten Versuchsfeldern ansteigt. Die maximale absolute Steigerung zeigt Klon Max 1 auf der Versuchsfläche Krummenhennersdorf mit einer Steigerung von 14.222 auf 67.704 Stück·ha⁻¹. Die niedrigste Steigerung zeigt Klon Androscoggin auf der Versuchsfläche Arnsfeld.

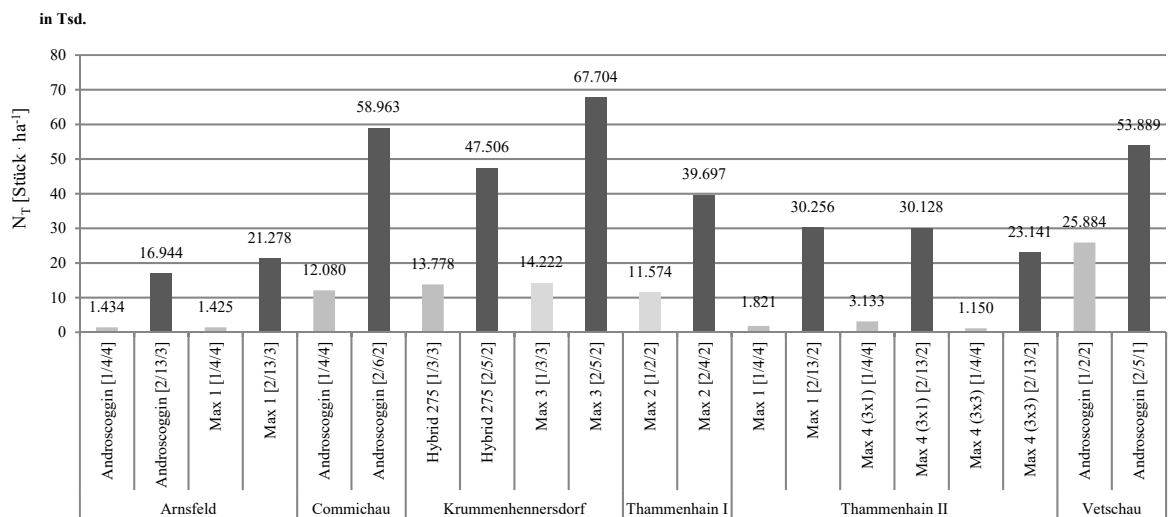


Abb. 3-2: Triebzahl (N_T) für die 1. Rotation (Balken hellgrau) und 2. Rotation (Balken dunkelgrau). Die Versuchsfelder und die beprobten Klone sind namentlich aufgeführt. Das Alter wird in Rotation / Wurzelalter [Jahre] / Triebalter [Jahre] angegeben.

Um die Frage zu beantworten, welche ertragskundlichen Kennwerte einen Einfluss auf absolute ($\Delta N_{T_{1-2.Rot}}$) und relative Triebzahlsteigerung ($\Delta N_{T\%_{1-2.Rot}}$) ausüben, wurde der Grad des linearen Zusammenhangs mittels Rangkorrelationskoeffizient nach PEARSON (r_p) hergeleitet (vgl.

Tab. 3-4). Hierbei wird deutlich, dass $\Delta N_{T_{1-2.Rot}}$ stark mit dem durchschnittlichen Gesamtzuwachs der 1. Rotation ($dGZ_{B_{1.Rot}}$) sowie Rotationslänge und Ackerzahl korreliert ist. $\Delta N_{T\%_{1-2.Rot}}$ korreliert stark mit der Rotationslänge bzw. mit der Triebzahl der 1. Rotation ($N_{T_{1.Rot}}$).

Tab. 3-4: Ergebnisse der Korrelationsanalyse zwischen den absoluten ($\Delta N_{T_{1-2.Rot}}$) bzw. relativen Triebzahlsteigerungen ($\Delta N_{T\%_{1-2.Rot}}$) von 1. zur 2. Rotation und verschiedenen ertragsbildenden Variablen (n = 28)

absolute Triebzahlsteigerung			relative Triebzahlsteigerung		
Variablen	r_p	p-Wert	Variablen	r_p	p-Wert
$\Delta N_{T_{1-2.Rot}} \sim N_{T_{1.Rot}}$	0,50	0,145	$\Delta N_{T\%_{1-2.Rot}} \sim N_{T_{1.Rot}}$	-0,85	0,002
$\Delta N_{T_{1-2.Rot}} \sim d_{g_{1.Rot}}$	-0,16	0,660	$\Delta N_{T\%_{1-2.Rot}} \sim d_{g_{1.Rot}}$	0,52	0,126
$\Delta N_{T_{1-2.Rot}} \sim d_{o_{1.Rot}}$	-0,22	0,549	$\Delta N_{T\%_{1-2.Rot}} \sim d_{o_{1.Rot}}$	0,60	0,065
$\Delta N_{T_{1-2.Rot}} \sim h_{g_{1.Rot}}$	0,44	0,199	$\Delta N_{T\%_{1-2.Rot}} \sim h_{g_{1.Rot}}$	0,19	0,594
$\Delta N_{T_{1-2.Rot}} \sim h_{o_{1.Rot}}$	0,65	0,044	$\Delta N_{T\%_{1-2.Rot}} \sim h_{o_{1.Rot}}$	-0,06	0,865
$\Delta N_{T_{1-2.Rot}} \sim dGZ_{B_{1.Rot}}$	0,87	0,001	$\Delta N_{T\%_{1-2.Rot}} \sim dGZ_{B_{1.Rot}}$	-0,57	0,087
$\Delta N_{T_{1-2.Rot}} \sim \text{Rotationslänge}$	-0,67	0,046	$\Delta N_{T\%_{1-2.Rot}} \sim \text{Rotationslänge}$	0,89	0,000
$\Delta N_{T_{1-2.Rot}} \sim Az$	0,65	0,042	$\Delta N_{T\%_{1-2.Rot}} \sim Az$	-0,10	0,793

$\Delta N_{T_{1-2.Rot}}$ = absolute Triebzahlsteigerung von 1. zur 2. Rotation; $\Delta N_{T\%_{1-2.Rot}}$ = relative Triebzahlsteigerung von 1. zur 2. Rotation; $N_{T_{1.Rot}}$ = Triebzahl zum Ende der 1. Rotation; $d_{g_{1.Rot}}$ = Durchmesser des Grundflächenmittelstammes zum Ende der 1. Rotation; $d_{o_{1.Rot}}$ = Oberdurchmesser zum Ende der 1. Rotation; $h_{g_{1.Rot}}$ = Höhe des Grundflächenmittelstammes zum Ende der 1. Rotation; $h_{o_{1.Rot}}$ = Oberhöhe zum Ende der 1. Rotation; $dGZ_{B_{1.Rot}}$ = durchschnittlicher Gesamtzuwachs zum Ende der 1. Rotation; Az = Ackerzahl

Bei einer Gegenüberstellung der absoluten ($\Delta N_{T_{1-2.Rot}}$) und relativen Triebzahlsteigerung ($\Delta N_{T\%_{1-2.Rot}}$) von der 1. zur 2. Rotation in Abhängigkeit zur Triebzahl der 1. Rotation ($N_{T_{1.Rot}}$) zeigt sich ein Trend (vgl. Abb. 3-3). Dabei wird deutlich, dass Versuchsfächen mit einer geringen Triebzahl in der 1. Rotation die geringsten absoluten, jedoch die höchsten relativen Steigerungsraten ihrer Triebzahlen aufweisen. Dieser Sachverhalt wird deutlich am konträren Verlauf der linearen Trendfunktion (vgl. Abb. 3-3 a und b).

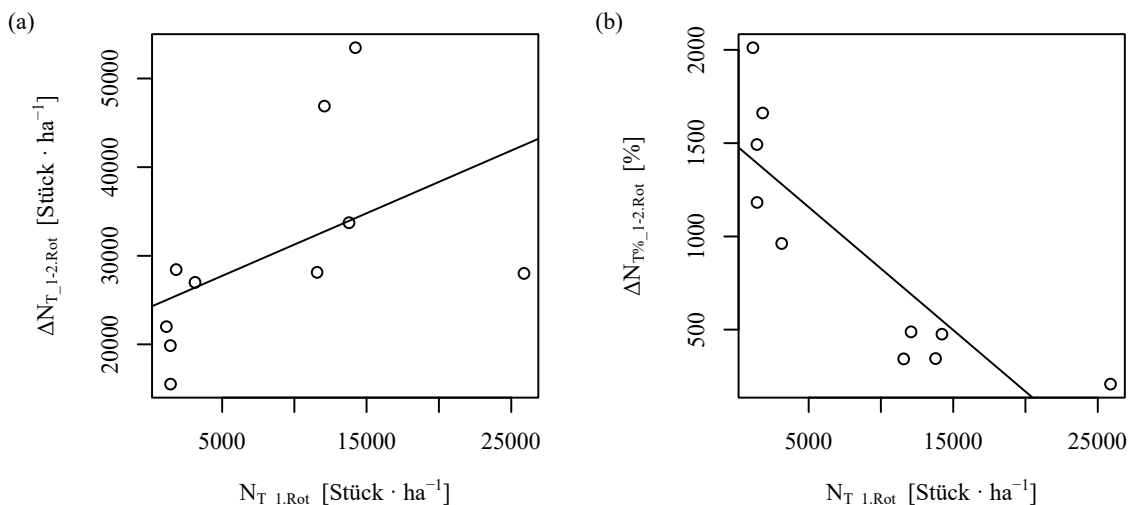


Abb. 3-3: Gegenüberstellung (a) der absoluten ($\Delta N_{T_{1-2.Rot}}$) bzw. (b) relativen Triebzahlsteigerung ($\Delta N_{T\%_{1-2.Rot}}$) von 1. zur 2. Rotation in Abhängigkeit von der Triebzahl der 1. Rotation ($N_{T_{1.Rot}}$)

Entwicklung von Durchmesser und Höhe

Erwartungsgemäß zeigt der Korrelationskoeffizient (r_p) an, dass sowohl der Durchmesser des Grundflächenmittelstammes (d_g) als auch der Oberdurchmesser (d_o) eine starke Interaktion mit der Höhe des Grundflächenmittelstammes (h_g) bzw. der Oberhöhe (h_o) aufweisen (vgl. Tab. 3-5). Der lineare Zusammenhang wird in Abb. 3-4 grafisch dargestellt.

Tab. 3-5: Ergebnisse der Korrelationsanalyse zwischen dem Durchmesser des Grundflächenmittelstammes (d_g) bzw. dem Oberdurchmesser (d_o) und verschiedenen ertragsbildenden Variablen ($n = 28$)

Durchmesser des Grundflächenmittelstammes			Oberdurchmesser		
Variablen Kombination (d_g)	r_p	p-Wert	Variablen Kombination (d_o)	r_p	p-Wert
$d_g \sim N_T$	-0,69	0,000	$d_o \sim N_T$	-0,57	0,001
$d_g \sim dGZ_B$	-0,37	0,051	$d_o \sim dGZ_B$	-0,16	0,425
$d_g \sim h_g$	0,76	0,000	$d_o \sim h_g$	0,79	0,000
$d_g \sim h_o$	0,52	0,004	$d_o \sim h_o$	0,71	0,000

d_g = Durchmesser des Grundflächenmittelstammes; N_T = Triebzahl; d_o = Oberdurchmesser; h_g = Höhe des Grundflächenmittelstammes; h_o = Oberhöhe; dGZ_B = durchschnittlicher Gesamtzuwachs an Dendromasse

Deutlich ist zu erkennen, dass d_o stärker mit h_g bzw. h_o korreliert ist als d_g . Eine Aussage bezüglich der rotationsspezifischen Entwicklung gestaltet sich aufgrund des differierenden Triebalters zwischen den Rotationen als schwierig. Dennoch kann festgehalten werden, dass tendenziell sowohl d_g und d_o als auch h_g und h_o mit steigender Rotation abnehmen.

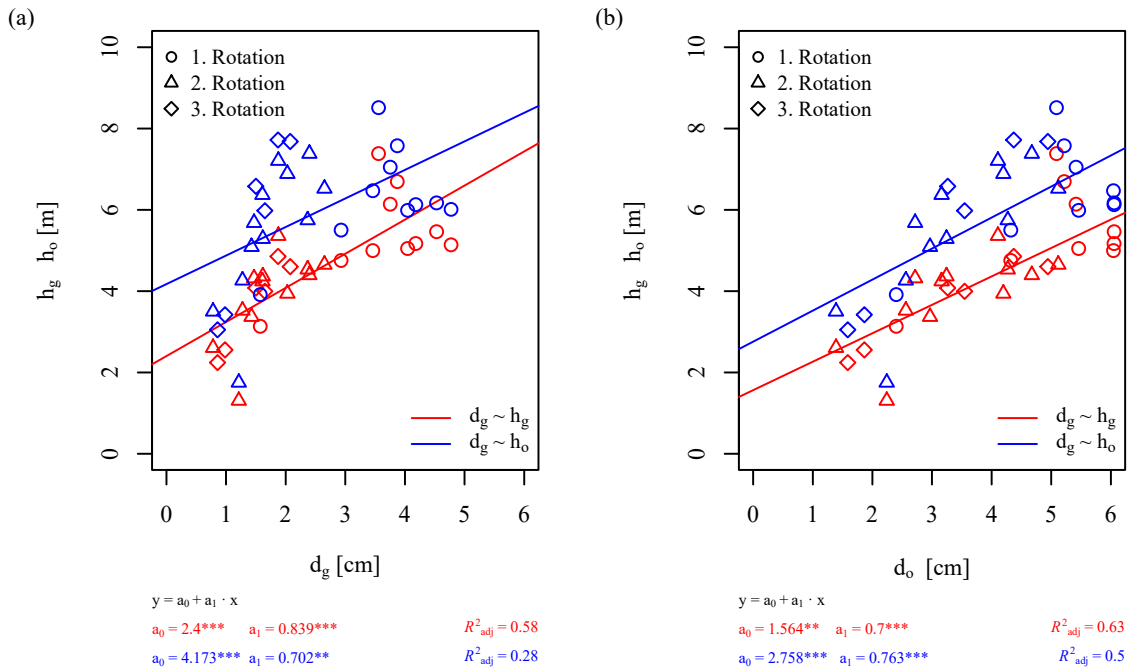


Abb. 3-4: Zusammenhang zwischen dem (a) Durchmesser des Grundflächenmittelstammes (d_g) bzw. (b) des Oberdurchmessers (d_o) mit der Höhe des Grundflächenmittelstammes (h_g) bzw. der Oberhöhe (h_o)

Abb. 3-5 zeigt die Entwicklung der Triebzahl über dem d_g , getrennt nach Rotationen. Die in Abb. 3-5 (a) abgebildete Potenzfunktion zeigt den zunächst starken und dann flacher werdenden Abfall der Triebzahl mit ansteigendem d_g .

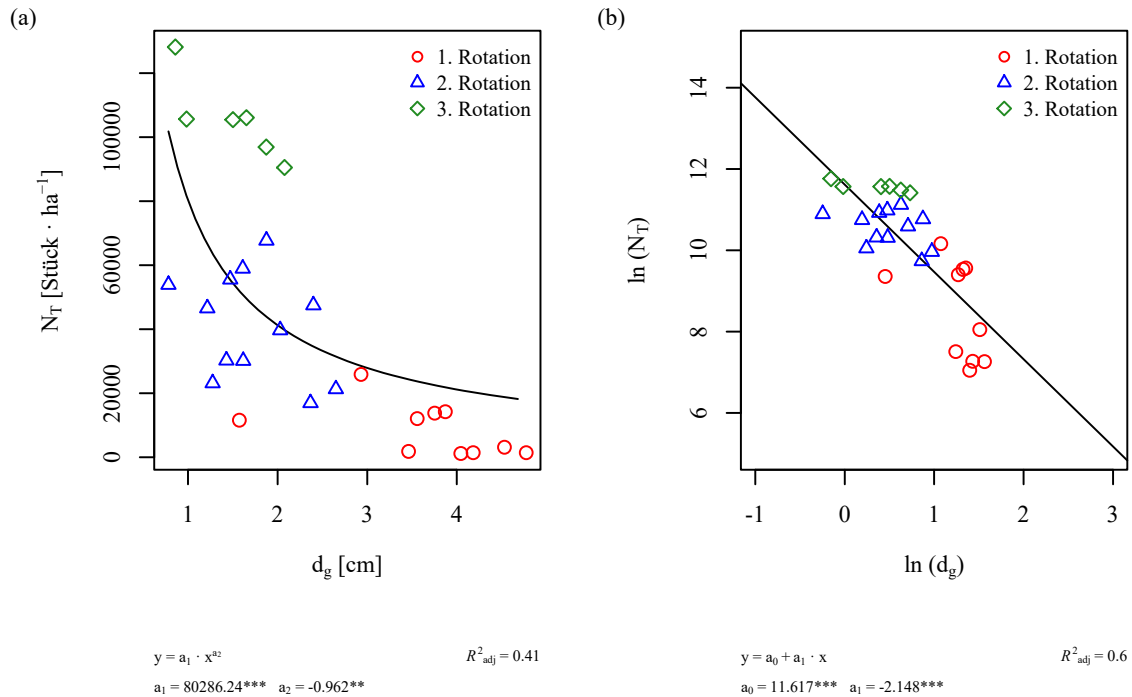


Abb. 3-5: (a) Nichtlinearer Zusammenhang zwischen dem Durchmesser des Grundflächenmittelstammes (d_g) als Funktion der Triebzahl (N_T), (b) Ergebnis der linearisierenden doppelt-logarithmischen Transformation

Aufgrund der Zunahme der Triebzahl durch Stockausschlag und Wurzelbrut vermindert sich der d_g demnach von der 1. zur 3. Rotation. Durch Auftragen im doppelt-logarithmischen Koordinatennetz kann die Potenzfunktion durch eine Geradengleichung ersetzt werden (linearisierende Transformation), wodurch die Punktfolge wesentlich besser ausgeglichen wird (Abb. 3-5 (b)).

Der Zusammenhang zwischen den drei ertragskundlichen Größen (N_T , d_g , h_g) wird in Abb. 3-6 dargestellt. Hierbei wurden die Variablen in einem dreidimensionalen Koordinatennetz aufgetragen (a) und in einem zweiten Schritt ein Ausgleichsgitter aus den linearen Trendfunktionen berechnet (b). Es zeigt sich, dass mit der über die Rotationen hinweg ansteigenden Triebzahl ein Abfallen von h_g und d_g zu beobachten ist. Dieses allometrische Verhältnis kann auch auf N_T , d_o und h_o übertragen werden.

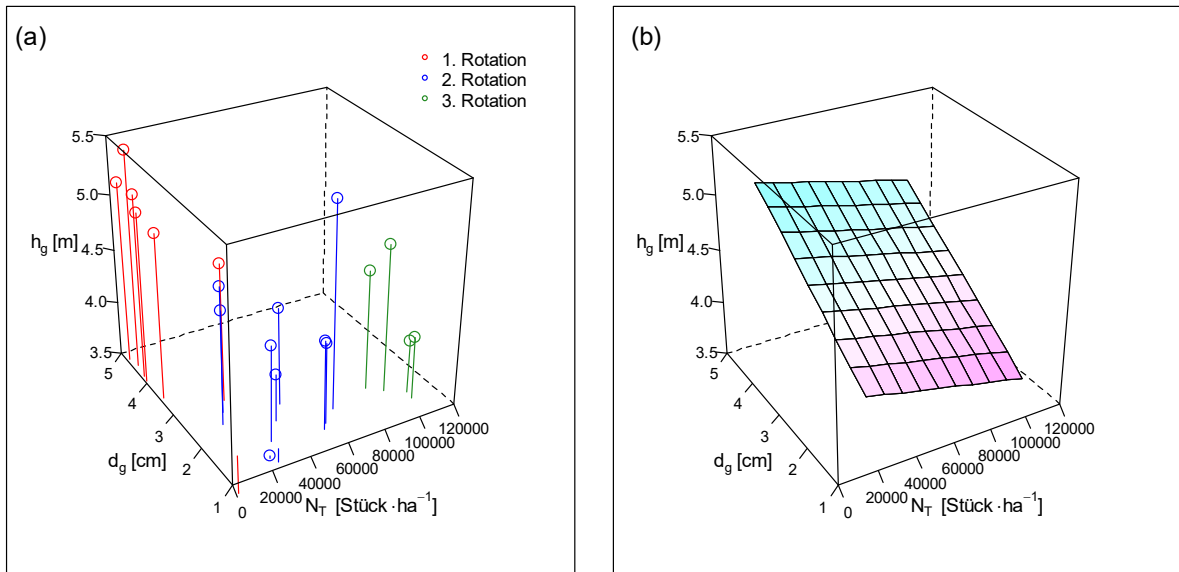


Abb. 3-6: Zusammenhang zwischen der Höhe des Grundflächenmittelstammes (h_g), dem Durchmesser des Grundflächenmittelstammes (d_g) und der Triebanzahl (N_T)

Zur Analyse der Struktur von Kurzumtriebsplantagen kann als Weiser die Stammzahlverteilung nach Durchmesserklassen ($d_{1,3}$) herangezogen werden. Sie gibt an, mit welchen Häufigkeiten bestimmte Durchmesser- oder Stärkestufen vertreten sind (PRODAN 1965).

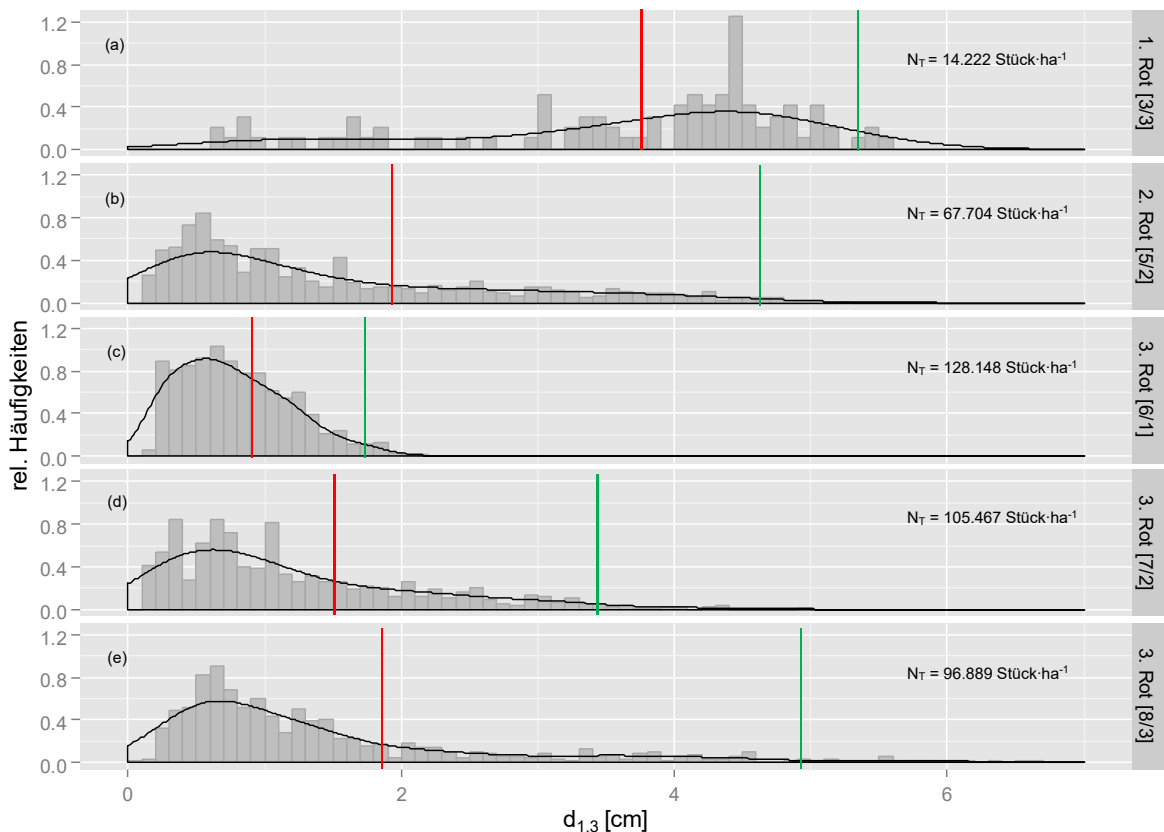


Abb. 3-7: Relative Häufigkeitsverteilung des $d_{1,3}$ bei unterschiedlichem Aufnahmealter des Klon Max 3 der VFL Krummenhennersdorf mit eingezeichnetem d_g (rot) und d_o (grün)

Abb. 3-7 informiert am Beispiel des Klons Max 3 der Versuchsfläche Krummenhennersdorf über die relative Häufigkeitsverteilung des $d_{1,3}$ der gemessenen Triebe, getrennt nach Rotation und Triebalter. Zusätzlich wurden d_g (rot) und d_o (grün) abgebildet. Es liegen jeweils eine Messung für die 1. und 2. Rotation bzw. drei Messungen für die 3. Rotation vor. Hierbei zeigt sich die zunehmende Linksschiefe der Verteilung mit steigender Triebzahl. Diese Verteilungs-Asymmetrie ist ebenfalls typisch für junge Waldbestände mit hoher Individuendichte (KRAMER 1988). Mit zunehmendem Triebalter innerhalb einer Rotation entscheiden einzelne Individuen den Konkurrenzkampf für sich und es kommt zur verstärkten Ausprägung des rechtsliegenden Astes der Verteilung (vgl. Abb. 3-7 (c, d, e)).

Entwicklung der Biomassefunktion

Die Biomassefunktion ist die Beziehung zwischen dem Einzeltriebgewicht (b_m) und $d_{1,3}$. Die Wirkung auf Lage und Form unterschiedlicher Rotationen auf die Biomassefunktion zeigt Abb. 3-8. Mit ansteigender Rotation wird der Kurvenverlauf flacher und ein Absinken der Kurve ist zu beobachten. Diese Verlagerung wurde am Beispiel der Versuchsfläche Commichau abgebildet (vgl. Abb. 3-8 (b)). Das Gewicht des Einzeltriebes bei gleichem $d_{1,3}$ nimmt demnach mit steigender Rotation ab.

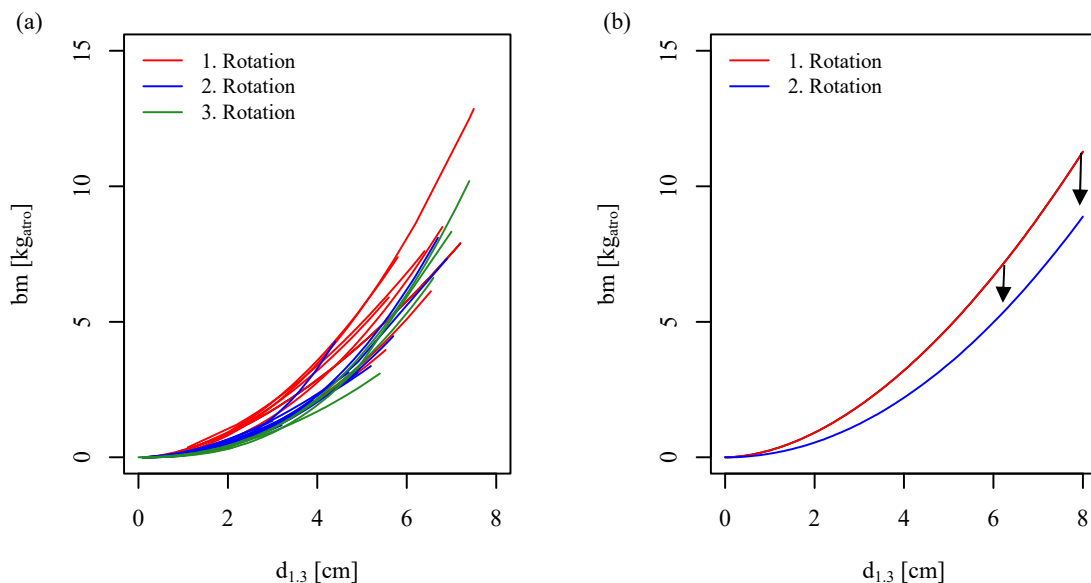


Abb. 3-8: (a) Verlauf der Biomassefunktionen für alle aufgenommenen Versuchsflächen, (b) Lage und Formveränderung der Biomassefunktion bei verschiedenen Rotationen am Beispiel des Klons Androscoggin der Versuchsfläche Commichau

Entwicklung des dGZ_B

Abb. 3-9 zeigt eine Gegenüberstellung der Erträge (dGZ_B) für 1. und 2. Rotation aller aufgenommenen Versuchsflächen. Es wird deutlich, dass der dGZ_B je nach Versuchsfläche und deren Standortausstattung stark variiert und ausnahmslos von 1. zur 2. Rotation ansteigt.

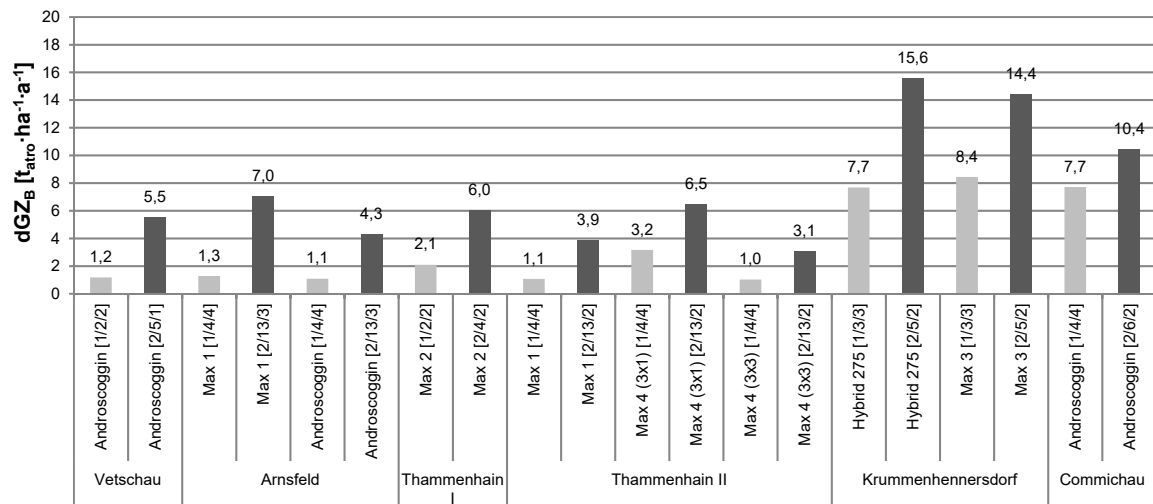


Abb. 3-9: Gegenüberstellung der Ertragswerte (dGZ_B) von 1. Rotation (Balken hellgrau) und 2. Rotation (Balken dunkelgrau). Die Versuchsfelder und die beprobten Klone sind namentlich aufgeführt. Das Alter wird in Rotation / Wurzelalter [Jahre] / Triebalter [Jahre] angegeben.

Die rotationsbedingte Zunahme des dGZ_B geht dabei stets mit einer Erhöhung der Triebzahl einher. Der Zusammenhang wird beispielhaft in Abb. 3-10 anhand der Versuchsfläche Thammenhain verdeutlicht.

Um die Frage zu beantworten, welche ertragskundlichen Kennwerte einen Einfluss auf die absolute (ΔdGZ_B) und relative Steigerung des durchschnittlichen Gesamtzuwachses ($\Delta dGZ_{B\%}$) ausüben, wurde der Grad des linearen Zusammenhangs mittels PEARSONSchem Korrelationskoeffizient (r_p) hergeleitet (vgl. Tab. 3-6).

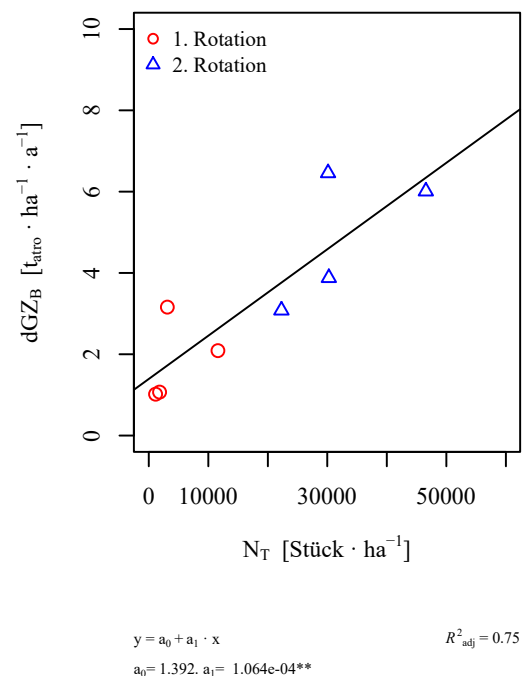


Abb. 3-10: Zusammenhang zwischen dem durchschnittlichen Gesamtzuwachs (dGZ_B) und der Triebzahl (N_T), dargestellt am Beispiel der Versuchsfläche Thammenhain

Tab. 3-6: Ergebnisse der Korrelationsanalyse zwischen der absoluten ($\Delta dGZ_{B\ 1-2.Rot}$) bzw. relativen Steigerung des durchschnittlichen Gesamtzuwachses ($\Delta dGZ_{B\% 1-2.Rot}$) von 1. zur 2. Rotation und verschiedenen ertragsbildenden Variablen (n = 10)

Absolute Steigerung des dGZ_B			relative Steigerung des dGZ_B		
Variablen Kombination	r_p	p-Wert	Variablen Kombination	r_p	p-Wert
$\Delta dGZ_{B\ 1-2.Rot} \sim N_{T_1.Rot}$	0,39	0,269	$\Delta dGZ_{B\% 1-2.Rot} \sim N_{T_1.Rot}$	-0,11	0,761
$\Delta dGZ_{B\ 1-2.Rot} \sim d_{g_1.Rot}$	0,08	0,829	$\Delta dGZ_{B\% 1-2.Rot} \sim d_{g_1.Rot}$	0,07	0,838
$\Delta dGZ_{B\ 1-2.Rot} \sim d_{o_1.Rot}$	0,03	0,934	$\Delta dGZ_{B\% 1-2.Rot} \sim d_{o_1.Rot}$	0,18	0,609
$\Delta dGZ_{B\ 1-2.Rot} \sim h_{g_1.Rot}$	0,09	0,813	$\Delta dGZ_{B\% 1-2.Rot} \sim h_{g_1.Rot}$	-0,58	0,081
$\Delta dGZ_{B\ 1-2.Rot} \sim h_{o_1.Rot}$	0,13	0,712	$\Delta dGZ_{B\% 1-2.Rot} \sim h_{o_1.Rot}$	-0,53	0,113
$\Delta dGZ_{B\ 1-2.Rot} \sim dGZ_{B_1.Rot}$	0,51	0,123	$\Delta dGZ_{B\% 1-2.Rot} \sim dGZ_{B_1.Rot}$	-0,80	0,006
$\Delta dGZ_{B\ 1-2.Rot} \sim \text{Rotationslänge}$	-0,51	0,134	$\Delta dGZ_{B\% 1-2.Rot} \sim \text{Rotationslänge}$	0,38	0,275
$\Delta dGZ_{B\ 1-2.Rot} \sim \text{Ackerzahl}$	-0,07	0,843	$\Delta dGZ_{B\% 1-2.Rot} \sim \text{Ackerzahl}$	-0,89	0,001

$\Delta dGZ_{B\ 1-2.Rot}$ = Steigerung des durchschnittlichen Gesamtzuwachses von 1. zur 2. Rotation; $\Delta dGZ_{B\% 1-2.Rot}$ = relative Steigerung des durchschnittlichen Gesamtzuwachses von 1. zur 2. Rotation; $N_{T_1.Rot}$ = Triebzahl zum Ende der 1. Rotation; $d_{g_1.Rot}$ = Durchmesser des Grundflächenmittelstammes zum Ende der 1. Rotation; $d_{o_1.Rot}$ = Oberdurchmesser; $h_{g_1.Rot}$ = Höhe des Grundflächenmittelstammes zum Ende der 1. Rotation; $h_{o_1.Rot}$ = Oberhöhe; $dGZ_{B_1.Rot}$ = durchschnittlicher Gesamtzuwachs zum Ende der 1. Rotation; Az = Ackerzahl

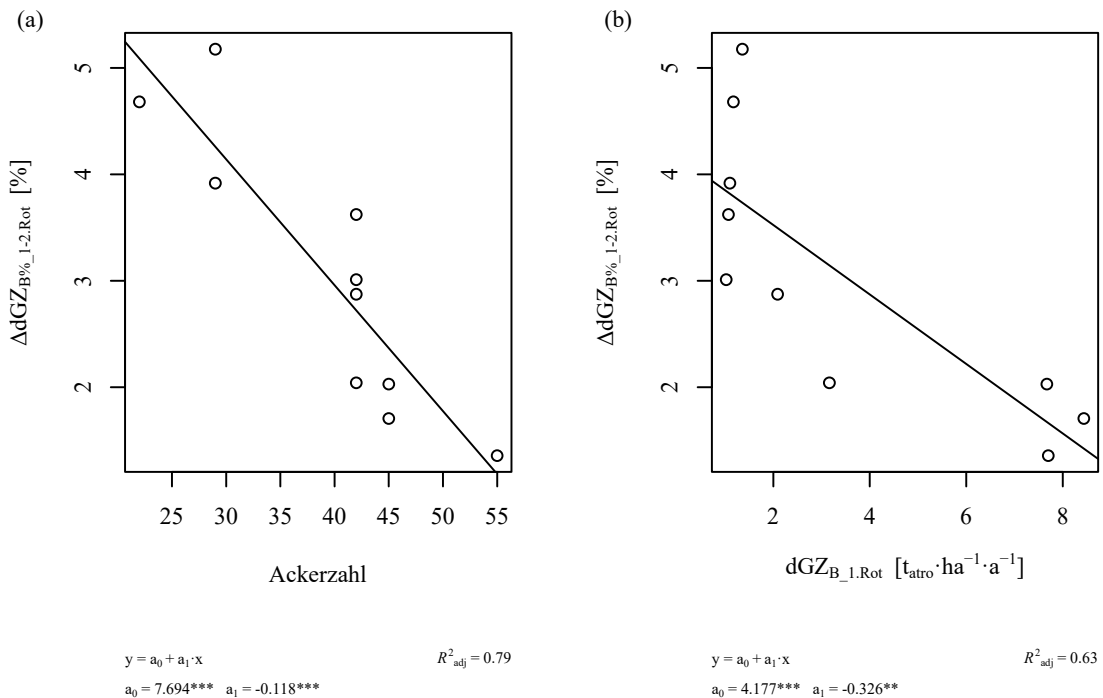


Abb. 3-11: Gegenüberstellung der relativen Steigerungsraten des durchschnittlichen Gesamtzuwachses ($\Delta dGZ_{B\% 1-2.Rot}$) von 1. auf die 2. Rotation, (a) über der Ackerzahl als Ausdruck der Bodengüte bzw. (b) dem durchschnittlichen Gesamtzuwachs der 1. Rotation ($dGZ_{B_1.Rot}$)

Aus Tab. 3-6 ist ersichtlich, dass die höchste Korrelation zwischen dem $\Delta dGZ_{B\% 1-2.Rot}$ und der Ackerzahl ($r_p = -0,89$) sowie $\Delta dGZ_{B\% 1-2.Rot}$ und $dGZ_{B_1.Rot}$ ($r_p = -0,80$) erzielt wurde. In Abb. 3-11 werden diese Beziehungen grafisch veranschaulicht.

3.1.2.4 Modell zur Leistungsschätzung von Kurzumtriebsplantagen in Folgerotationen

Bisher standen die explorative Herausarbeitung einzelner ertragskundlicher Kenngrößen und ihre rotationsbedingte Veränderung im Vordergrund. Im weiteren Verlauf soll nun der Versuch unternommen werden, einen funktionalen Zusammenhang zu finden, um die Ertragssteigerung über die Rotationen hinweg in einem Modell abzubilden. Weil der eigene Datenumfang, besonders für Erträge ab der 3. Rotation, nur in sehr geringem Umfang vorhanden ist, werden geeignete Daten aus der Literatur ergänzt (vgl. Kap. 3.1.2.2).

Werden die zuvor genannten Überlegungen (vgl. Kap. 3.1.2.3) in einem Modell aggregiert, so erscheint es sinnvoll, einen Ertragssteigerungsfaktor (ESF) herzuleiten, der in Abhängigkeit vom Ertrag (dGZ_B) der Vorrotation den Ertrag für die Folgerotation ableiten kann. Die Berechnung des $ESF_{1-2.Rot}$ von 1. auf 2. Rotation wird in Formel 3-6 aufgezeigt. Weil der dGZ_B mit der Standortgüte in einem signifikanten Zusammenhang steht, kann er gleichzeitig als Bonitierungsmaßstab für den Standort eingesetzt werden.

$$ESF_{1-2.Rot} = \frac{dGZ_{B,2.Rot}}{dGZ_{B,1.Rot}}$$

Formel 3-6

Mit $ESF_{1-2.Rot}$ = Ertragssteigerungsfaktor von 1. auf 2. Rotation
 $dGZ_{B,1.Rot}$ = durchschnittlicher Gesamtzuwachs der 1. Rotation [$t_{atro} \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$]
 $dGZ_{B,2.Rot}$ = durchschnittlicher Gesamtzuwachs der 2. Rotation [$t_{atro} \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$]

In Abb. 3-12 (a) wird der $ESF_{1-2.Rot}$ für die 1. (roter Funktionsgraph) bzw. der $ESF_{2-3.Rot}$ für die 2. (blauer Funktionsgraph) Rotation dem jeweiligen dGZ_B der Vorrotation gegenübergestellt und mittels einer inversen Funktion regressionsanalytisch ausgeglichen. Zusätzlich wurde in Abb. 3-12 (b) durch Transformation der Abszissenachse das Modell linearisiert und die statistischen Kennwerte abgeleitet (vgl. Tab. 3-7).

Tab. 3-7: Statistische Kennwerte der linearen Regression für die Ertragssteigerungsfaktoren von 1. auf 2. bzw. 2. auf 3. Rotation im Verhältnis zum jeweiligen dGZ_B der Vorrotation

Prüfglied	Funktionsanpassung				
	Funktionstyp	R^2	p-Wert	a_0	a_1
$ESF_{1-2.Rot}$	linear	0,63	0,000	1,1881***	3,020***
$ESF_{2-3.Rot}$	linear	0,09	0,155	0,799***	1,256

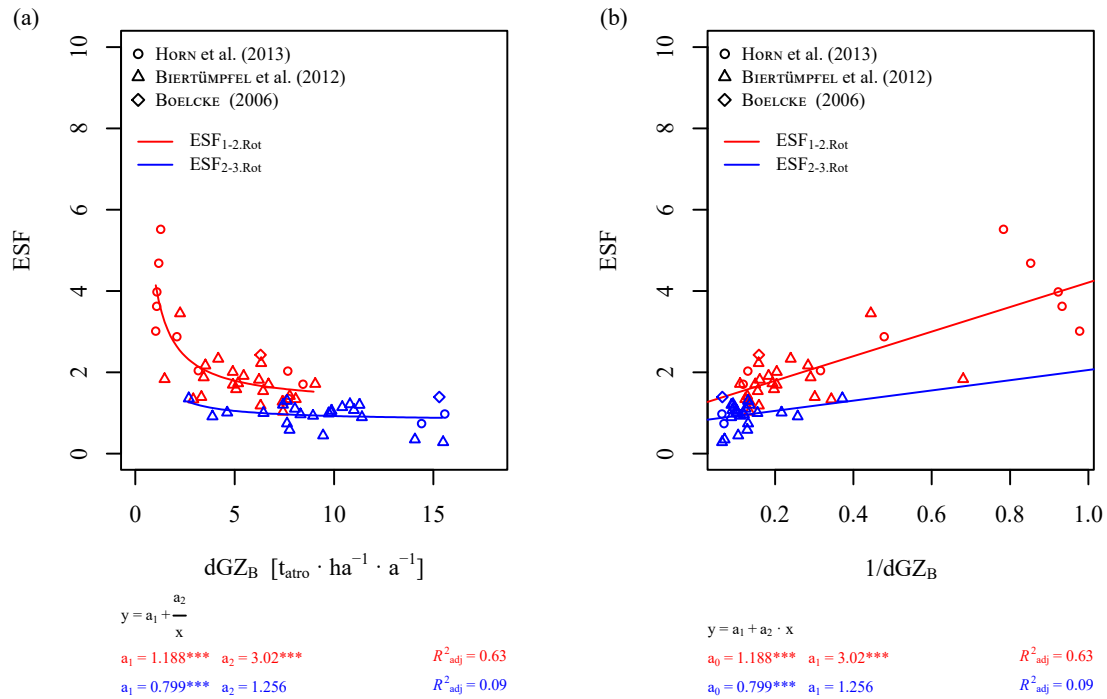


Abb. 3-12: Gegenüberstellung der Ertragssteigerungsfaktoren von 1. auf 2. ($ESF_{1-2.Rot}$) bzw. 2. auf 3. ($ESF_{2-3.Rot}$) Rotation im Verhältnis zum jeweiligen dGZ_B der Vorrotation (a) ohne bzw. (b) mit linearisierender Transformation

Die Gütemaße der Funktionen zeigen, dass der $ESF_{1-2.Rot}$ (roter Funktionsgraph) in einem signifikanten Zusammenhang mit dem $dGZ_{B-1.Rot}$ steht ($R^2 = 0,63$, p-Wert = 0,000). Der bereits in Tab. 3-6 aufgezeigte Zusammenhang bestätigt sich auch bei erweiterter Datengrundlage. Die in Formel 3-7 abgebildete Beziehung kann demnach für die Ertragssteigerung von 1. auf 2. Rotation Anwendung finden.

$$ESF_{1-2.Rot} = 1,188 + \frac{3,020}{dGZ_{B-1.Rot}}$$

Formel 3-7

Mit: $ESF_{1-2.Rot}$ = Ertragssteigerungsfaktor von 1. auf 2. Rotation
 $dGZ_{B-1.Rot}$ = durchschnittlicher Gesamtzuwachs der 1. Rotation [$t_{atro} \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$]

Die Gütemaße für die Abbildung der Ertragssteigerung von 2. auf 3. Rotation (blauer Funktionsgraph in Abb. 3-12) sind nicht signifikant ($R^2 = 0,09$, p-Wert = 0,155). Als Modellansatz muss diese Funktionsbeziehung verworfen werden. Es scheint, dass die ökologische Wachstumsamplitude der Klone von variablen Standortfaktoren bzw. von klonspezifischen Unterschieden überprägt wird. Für die Modellierung der Ertragssteigerung von 2. auf 5. Rotation wurde deshalb ein anderes Vorgehen gewählt.

Um klonspezifische Unterschiede auszuschließen, wurde die Untersuchung der Ertragssteigerung von 2. auf 5. Rotation nur auf die Klone Max 1 bis 4 beschränkt. Um die Behandlung der

Versuchsflächen (Pflanzzahl, Rotationslänge etc.) zu vereinheitlichen, wurden nur die Versuchsdaten der TLL benutzt. Trotz dieser Einschränkung ist bei der dGZ_B -Entwicklung der übrig gebliebenen 6 Klone eine starke Heterogenität zwischen den Rotationen festzustellen (Abb. 3-13a). Die dGZ_B -Werte wurden deshalb über der Rotation in einem linear transformierten Koordinatennetz aufgetragen und mittels eines funktionalen Ausgleichs „geglättet“ (Abb. 3-13b). Der Vorteil dieses Vorgehens liegt in der Bereinigung der durch saisonale Unterschiede von Witterung entstandenen Variation.

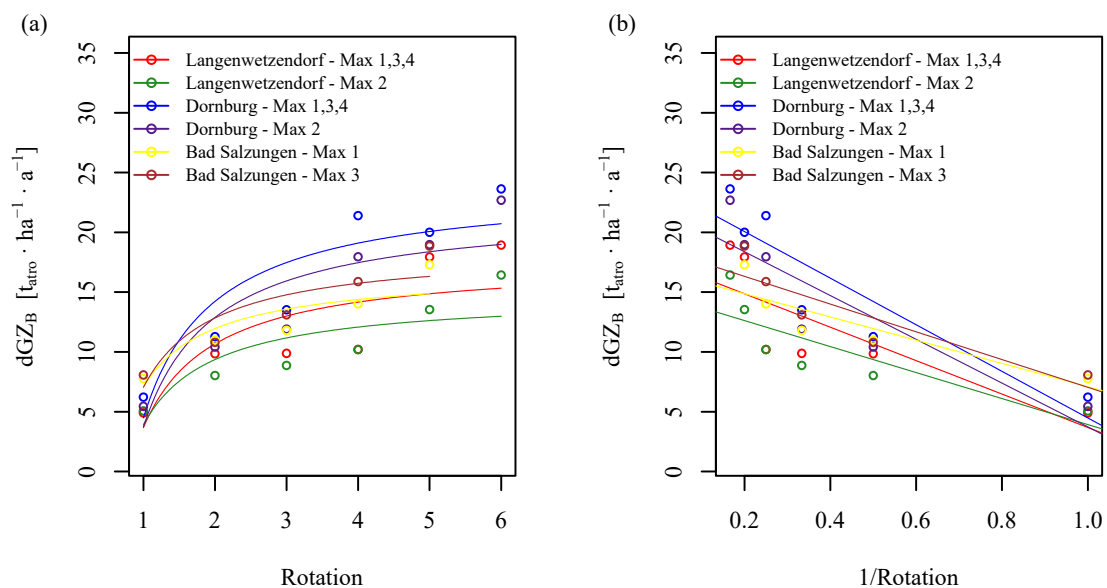


Abb. 3-13: Entwicklung des durchschnittlichen Gesamtwachses (dGZ_B) über der Rotation, dargestellt für die Versuchsflächen Langenwetzendorf, Dornburg und Bad Salzungen

Die statistischen Kennwerte der linearen Regression werden in Tab. 3-8 wiedergegeben.

Tab. 3-8: Statistische Kennwerte der linearen Regression zur Herleitung der modellierten dGZ_B -Werte

Standort	Prüfglied	Funktionsanpassung				
		Funktionstyp	R^2	p-Wert	a_0	a_1
Langenwetzendorf	Max 1,3,4	linear	0,66	0,050	17,66	-13,98
	Max 2	linear	0,70	0,037	14,79	-10,86
Dornburg	Max 1,3,4	linear	0,82	0,013	23,97	-19,49
	Max 2	linear	0,81	0,015	22,04	-18,31
Bad Salzungen	Max 1	linear	0,79	0,043	16,81	-9,70
	Max 3	linear	0,80	0,042	18,64	-11,60

Abb. 3-14 informiert über die Herleitung der ESF aus den „geglätteten“ dGZ_B -Werten. Deutlich ist der zunächst starke und dann flacher werdende Abfall des ESF von 2. zur 5. Rotation

zu erkennen. Aufgrund des geringen Datenmaterials wurde auf eine weitere Aufsplittung der ESF über dem dGZ_B der Vorrotation verzichtet.

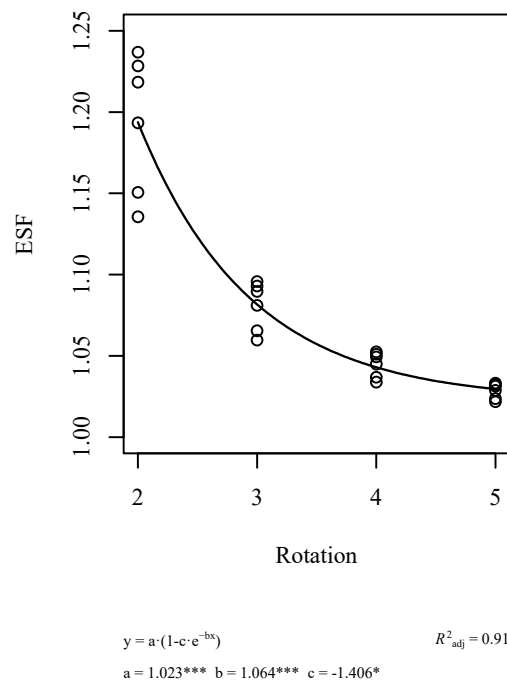


Abb. 3-14: Herleitung der Ertragssteigerungsfaktoren (ESF) für die 2. bis 5. Rotation

Die mittels der Formel 3-8 herleitbaren ESF werden im Folgenden für die jeweiligen Rotationen unabhängig vom Standort als konstant angenommen.

$$ESF_{2-5.Rot} = 1,023 \cdot (1 + 1,406 \cdot e^{-1,064 \cdot Rot}) \quad \text{Formel 3-8}$$

Mit: $ESF_{2-5.Rot}$ = Ertragssteigerungsfaktor
 Rot = Rotation
 e = EULERSche Zahl

Werden die zuvor genannten Schritte in einem Modell zusammengefasst, entsteht eine dGZ_B -Entwicklung, wie in Abb. 3-15 dargestellt. Der „Start dGZ_B “ für die 1. Rotation wurde in einem Spektrum zwischen 1 bis $12 \text{ t}_{atro} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ gewählt. Die zugehörigen Steigerungs-Faktoren wurden hierbei aus den dGZ_B -Werten für die 1. Rotation aus Formel 3-7 bzw. für die 2. bis 5. Rotation aus Formel 3-8 abgeleitet. Zusätzlich ist die Verteilung aller vorhandenen dGZ_B -Werte als Boxplot dargestellt.

Im nachfolgenden Abschnitt wird für den gewählten Ansatz eine Evaluierung vorgenommen, bevor eine abschließende kritische Wertung in der sich anschließenden Diskussion gegeben wird.

wird. Es ist zu vermuten, dass hier ein Einwirken eines biotischen und abiotischen Störfaktors vorliegt (vgl. Kap. 3.1.4). Bei den übrigen Rotationen liegt die mittlere rel. Abweichung ($\bar{e}\%$) von Real- und Schätzwert zwischen 18,4 bis 23,2 %.

Tab. 3-9: Evaluierungsgrößen Bias (Verzerrung), Präzision (Prognosestreuung) und Treffgenauigkeit der Modelle bei Anwendung auf das für die Parametrisierung verwendete Datenmaterial

Rotation	a_0	a_1	R^2	$\bar{e}\%$	$s_e\%$	$m_x\%$
2. Rot	2,167	0,521	0,67	-23,2	24,9	34,1
3. Rot	6,474	0,569	0,33	22,2	43,8	49,0
4. Rot	1,853	0,742	0,75	-5,1	26,4	26,9
5. Rot	1,898	0,727	0,75	-6,9	27,9	28,7
6. Rot	1,192	0,846	0,95	-1,8	18,4	18,5

$\bar{e}\%$ = Bias (Verzerrung); $s_e\%$ = Präzision (Prognosestreuung); $m_x\%$ = Treffgenauigkeit, alle bezogen auf den Mittelwert des realen dGZ_B

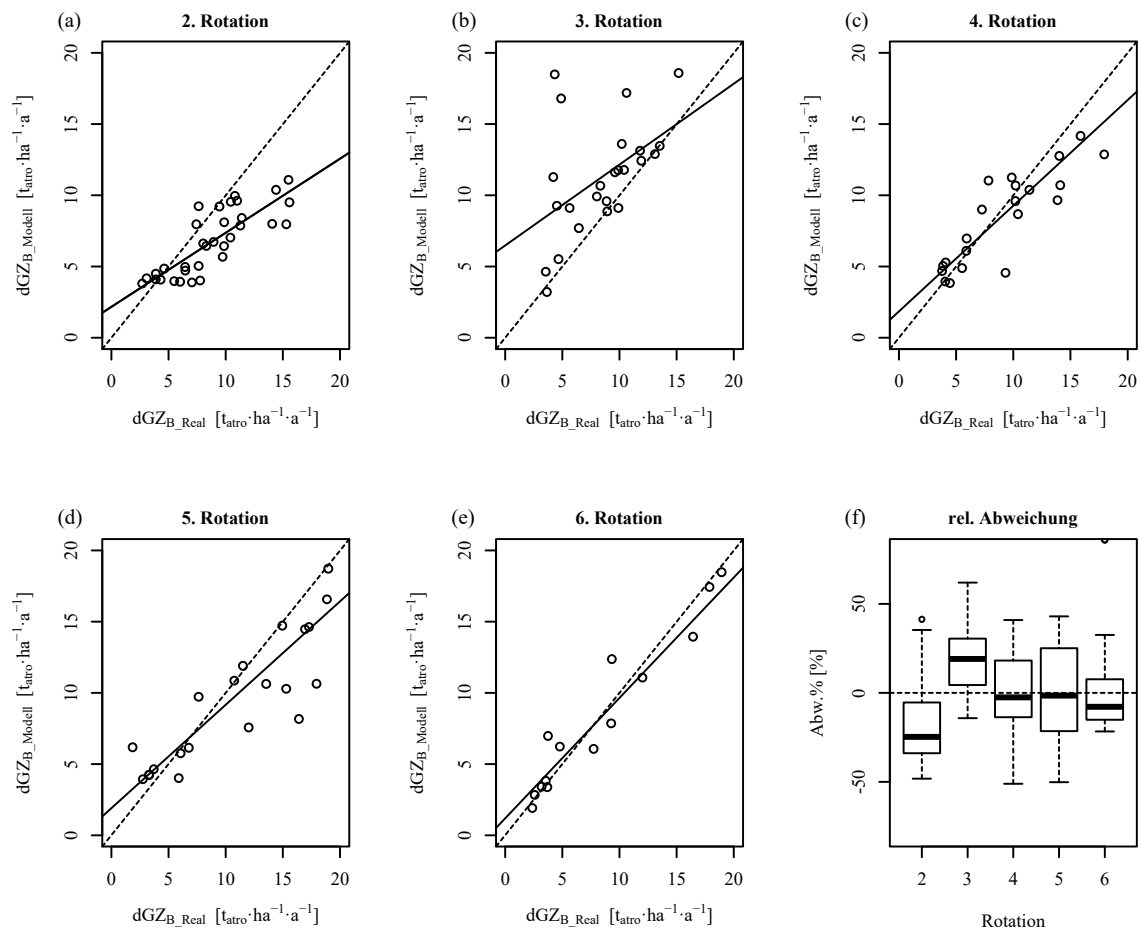


Abb. 3-16: Anpassungsgüte (a - e) und prozentuale Abweichungen (f) zwischen realem und geschätztem durchschnittlichem Gesamtzuwachs (dGZ_B), dargestellt für die 2. bis 6. Rotation anhand der zur Parametrisierung verwendeten Datensätze

Für die Modellevaluierung mit einem unabhängigen Datensatz finden zusätzliche Ertragswerte Verwendung, die dankenswerterweise von der TLL zur Verfügung gestellt wurden. Es handelt sich hierbei um Ertragsdaten der Versuchsflächen Dornburg und Langenwetzendorf von 1. bis 3. Rotation. Die Versuchsflächen wurden mit einer Pflanzzahl von $7.100 \text{ Stück} \cdot \text{ha}^{-1}$ begründet und in einem 5-jährigen Umtrieb bewirtschaftet. Nähere Ausführungen zu den Versuchsflächen und Klonen können bei WERNER et al. (2006) entnommen werden. Das für den Evaluierungsdatensatz hergeleitete Ergebnis zeigt sowohl für die 2. als auch für die 3. Rotation eine Unterschätzung an (vgl. Tab. 3-10).

Tab. 3-10: Evaluierungsgrößen Bias (Verzerrung), Präzision (Prognosestreuung) und Treffgenauigkeit der Modelle bei Anwendung auf einen unabhängigen Datensatz

Rotation	a_0	a_1	R^2	$\bar{e}\%$	$s_e\%$	$m_x\%$
2. Rot	-0,084	0,767	0,43	-24,3	21,8	32,6
3. Rot	4,761	0,450	0,64	-11,9	24,3	27,1

$\bar{e}\%$ = Bias (Verzerrung); $s_e\%$ = Präzision (Prognosestreuung); $m_x\%$ = Treffgenauigkeit, alle bezogen auf den Mittelwert des realen dGZ_B

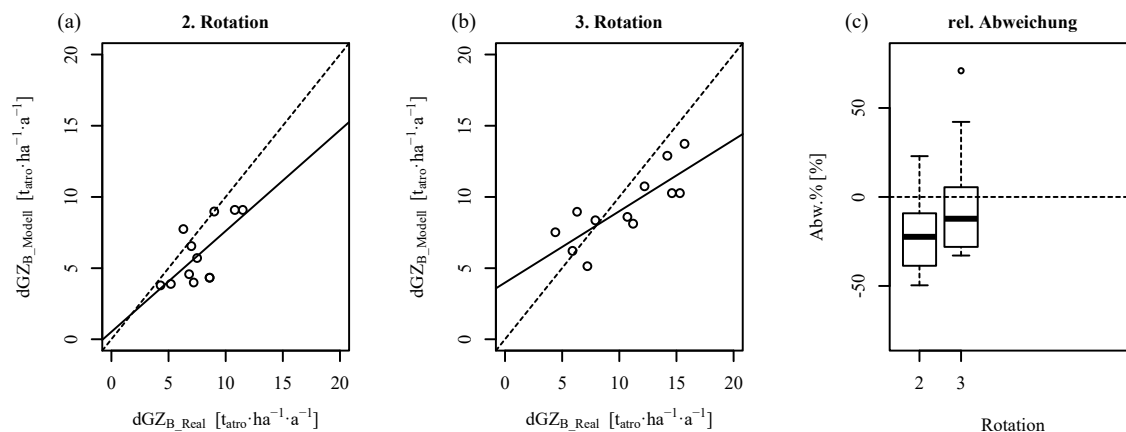


Abb. 3-17: Anpassungsgüte (a - b) und relative Abweichungen (c) zwischen realem und geschätztem durchschnittlichem Gesamtzuwachs (dGZ_B), dargestellt für die 2. bis 3. Rotation anhand eines unabhängigen Datensatzes

3.1.3 Abschätzung des Dendromassepotenzials von Pappel-KUP im Freistaat Sachsen

Wie bereits beschrieben, erfolgt die Zusammenführung der Modelle sowie die Abschätzung des durchschnittlichen Biomasse-Potenzials von KUP anhand eines festgelegten Modell-Szenarios. Hierbei wird ein theoretisches Potenzial (RAAB et al. 2005) der jährlich erzeugbaren Biomasse an Ackerfläche für das Hoheitsgebiet des Freistaates Sachsen quantifiziert. Die Grünlandflä-

chen werden bei der Betrachtung bewusst ausgespart¹⁹. Im Folgenden werden zunächst die Eingangsgrößen für das Szenario erläutert und in einem zweiten Schritt die geschätzten Biomasseerträge vorgestellt.

Als Ausgangswerte für das Standortleistungsmodell nach ALI (2009) wurden die in Tab. 3-11 aufgeführten Modellparameter festgelegt. Die benötigten Standortleistungsdaten (vgl. Kap. 3.1.1) wurden in einem GIS-basierten Ansatz ausgewertet. Hierbei erschien es für den agrarstrukturellen Leistungsvergleich angebracht, zunächst Mittelwerte der Standortleistungsgrößen auf Basis der Verwaltungseinheit „Gemeinde“ zusammenzufassen. Die Auswertungsebene wurde somit nicht naturräumlich, sondern anhand von politischen Grenzen gewählt. Aus den hergeleiteten Mittelwerten der Standortdaten konnten dann, unter Verwendung des Standortleistungsmodells nach ALI (2009), die Erträge (dGZ_B) für die 1. Rotation bestimmt werden. Mittels des in Kap. 3.1.2 erstellten Modells (vgl. Formel 3-7, Formel 3-8) erfolgte anschließend die Potenzialabschätzung für die 2. bis 4. Folgerotation.

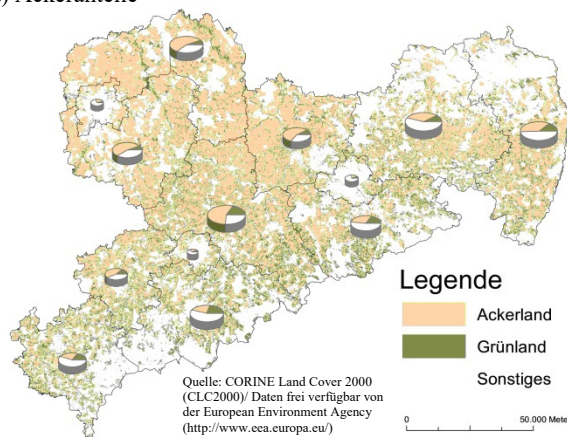
Tab. 3-11: Festgelegte Eingangsgröße für die Standortleistungsschätzung nach ALI (2009)

Klon:	Klongruppe Max
Rotationslänge:	5 Jahre
Begründungspflanzzahl:	10.000 Stück
Bewirtschaftungszeitraum:	20 Jahre

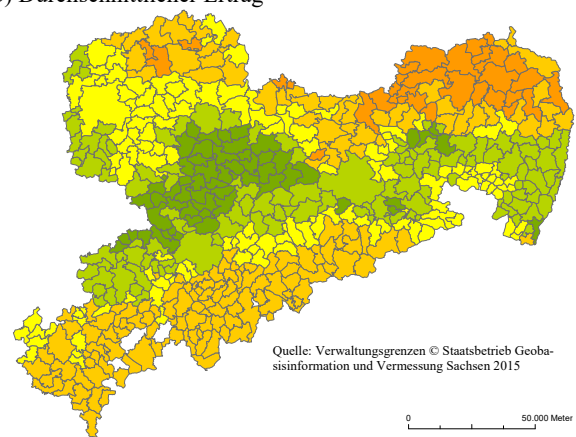
Eine zusammenfassende Tabelle für die hergeleiteten Potenziale auf Ebene der sächsischen Landkreise befindet sich in Anhang 10. Hierbei wird als Potenzial der flächengewogene Mittelwert von 1. bis 4. Rotation angegeben. Eine verallgemeinernde Übersicht des zu erwartenden durchschnittlichen Gesamtwachses an oberirdischer Dendromasse (dGZ_B), getrennt nach Rotationen, wird in Abb. 3-18 gegeben. Als Ergebnis kann für das gewählte Szenario folgendes festgehalten werden: Auf der für den Freistaat Sachsen zur Verfügung stehenden Ackerfläche (ca. 817 Tsd. ha) können durchschnittlich $9,45 \text{ t}_{\text{atro}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ und somit ein jährliches Erntevolumen von ca. 7,6 Mio. t_{atro} generiert werden.

¹⁹ Während die Anlage und Nutzung von Kurzumtriebsplantagen auf Ackerflächen aus juristischer Sicht unproblematisch ist, gilt auf Grünlandflächen für alle Mitgliedsstaaten der Europäischen Union das „Dauergrünlanderhaltungsgebot (VO/EG Nr. 73/2009, Artikel 6; VO/EG/Nr. 1122/2009, Artikel 3). In Deutschland erfolgt die genaue Umsetzung der Regelung im Verantwortungsbereich der einzelnen Bundesländer. Das Grünlanderhaltungsgebot begründet sich in der höheren Kohlenstoff- und Stickstoffspeicherkapazität sowie einer größeren Biodiversität gegenüber dem Ackerland (BEMMANN et al. 2013).

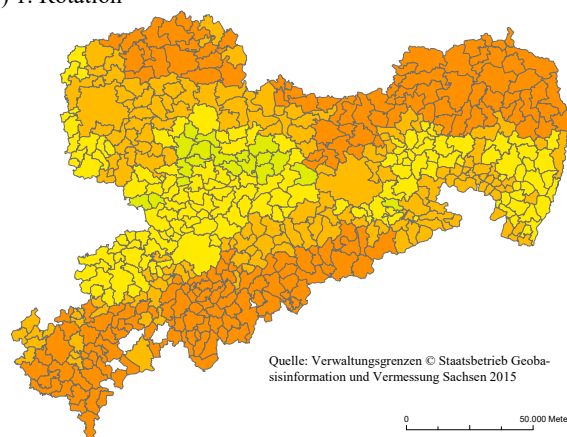
(a) Ackeranteile



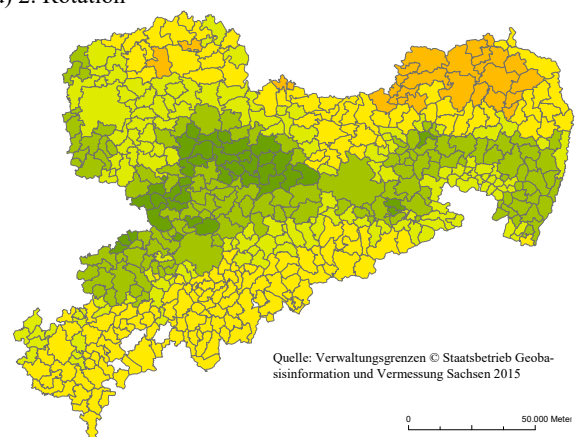
(b) Durchschnittlicher Ertrag



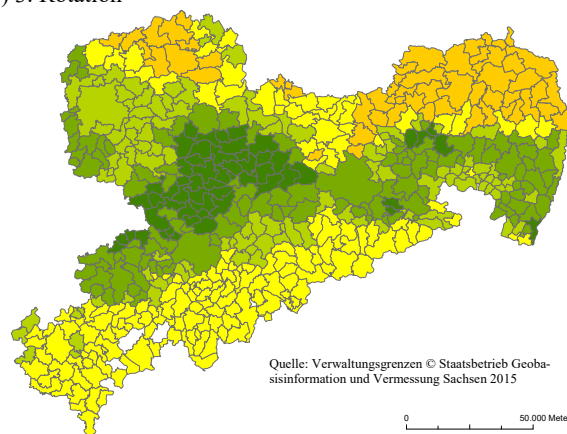
(c) 1. Rotation



(d) 2. Rotation



(e) 3. Rotation



(f) 4. Rotation

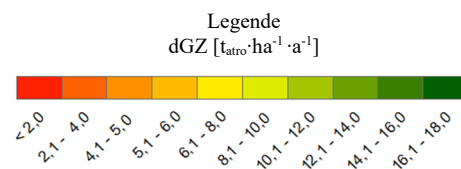
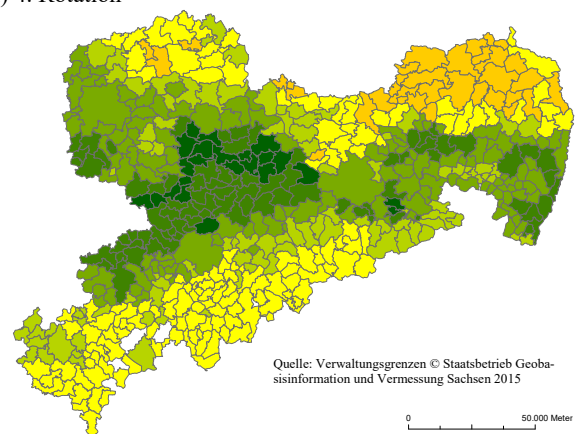


Abb. 3-18: (a) Übersicht der prozentualen Flächenverteilung von landwirtschaftlichen Acker- und Grünlandflächen auf Ebene der sächsischen Landkreise (b - f), modellierte durchschnittliche Gesamtzuwächse auf Gemeindeebene an Trockenbiomasse (dGZ_B) für die Klongruppe Max bei 5-jährigem Umtrieb und Steckholzzahl von 10.000 Pflanzen pro ha für 1. – 4. Rotation

3.1.4 Diskussion der Ergebnisse

In diesem Kapitel soll primär das Modell zur Schätzung der Erträge in Folgerotationen im Vordergrund stehen. Hierbei wird zunächst das zugrunde liegende Datenmaterial diskutiert, bevor in einem zweiten Schritt ein Vergleich der Ergebnisse mit den Resultaten anderer Autoren vorgenommen wird. Abschließend erfolgt eine kritische Wertung des Modells.

Im Vergleich von Versuchsflächen, die nicht in einem zeitlichen und räumlichen Zusammenhang stehen, kommt es zwangsläufig zu unterschiedlicher Beeinflussung durch variable Standortfaktoren. Als Grundfaktoren, die auf das Pflanzenwachstum wesentlich einwirken, nennt KRAMER (1988) den Lichtfaktor (Sonneneinstrahlung, Fotosynthese, Assimilation), den Wärmefaktor (abhängig von der Höhenlage), den Wasserfaktor (abhängig von Luftfeuchtigkeit, Niederschlag und Bodenfeuchtigkeit) sowie chemische Faktoren (Bodenausstattung, Nährelemente) und mechanische (unvorhergesehene Ereignisse, wie z. B. Wind, Blitzschlag etc.) bzw. biotische Stressoren (z. B. Insektenfraß, Wildverbiss etc.). So könnte das Ausbleiben einer Ertragssteigerung von der 1. auf die 2. Rotation einem Trockenjahr geschuldet sein oder eine starke Ertragssteigerung auf einem ungewöhnlich hohen Niederschlag in der Vegetationszeit beruhen. Diese Betrachtungen wurden beim Vergleich der Daten unberücksichtigt gelassen. Ein weiteres Problem bezüglich der Vergleichbarkeit der Daten besteht aufgrund des differierenden Triebalters in den zu vergleichenden Rotationen. Der Verlauf des dGZ_B innerhalb einer Rotation wird beispielhaft in Abb. 3-19 anhand der Versuchsfläche Krummenhennersdorf dargestellt.

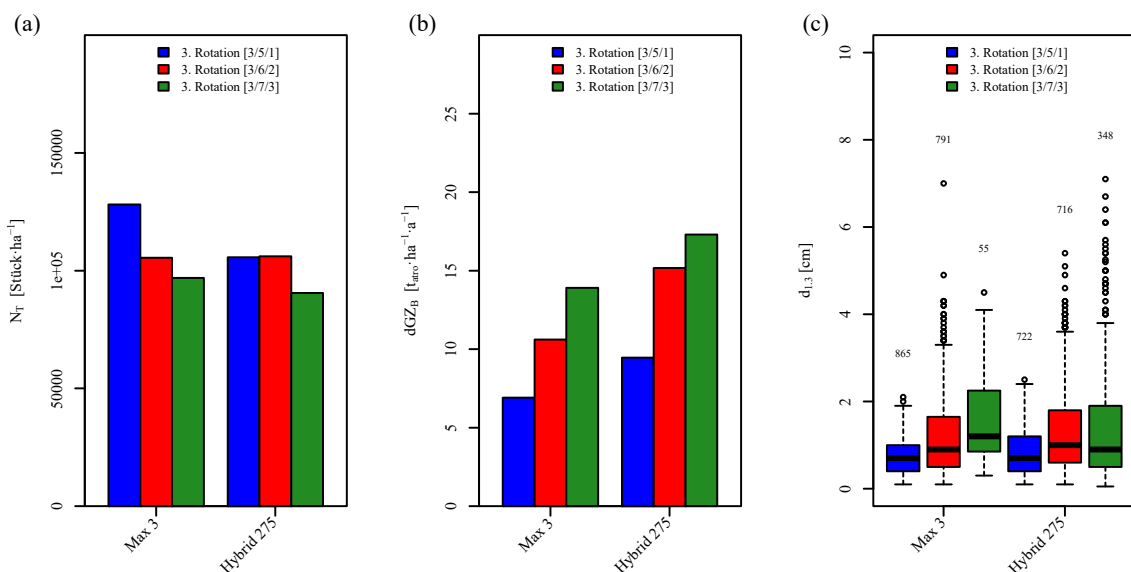


Abb. 3-19: Vergleich der Entwicklung von (a) Triebzahl, (b) dGZ_B und (c) Verteilung des $d_{1,3}$ für das 1. bis 3. Standjahr der 3. Rotation am Beispiel der Versuchsfläche Krummenhennersdorf

Die Entwicklung der in Abb. 3-19 dargestellten Ertragsgrößen innerhalb einer Rotation wird bestätigt von DANFORS et al. (1998) und AFAS et al. (2008), die bei ihren Untersuchungen von KUP aus Weide in Schweden bzw. Pappelplantagen in Belgien zu ähnlichen Ergebnissen kommen (vgl. Abb. 3-20). Es wird deutlich, dass konsequent der dGZ_B für unterschiedliche Rotationen im selben Triebalter verglichen werden muss, um eine exakte Ertragssteigerung abzuleiten. Dies ist bei den eigenen Aufnahmen stellenweise nicht möglich gewesen, jedoch wurde darauf geachtet, die Differenzen der Triebalter möglichst gering zu halten. Die Ergebnisse müssen deshalb mit der nötigen Vorsicht betrachtet werden.

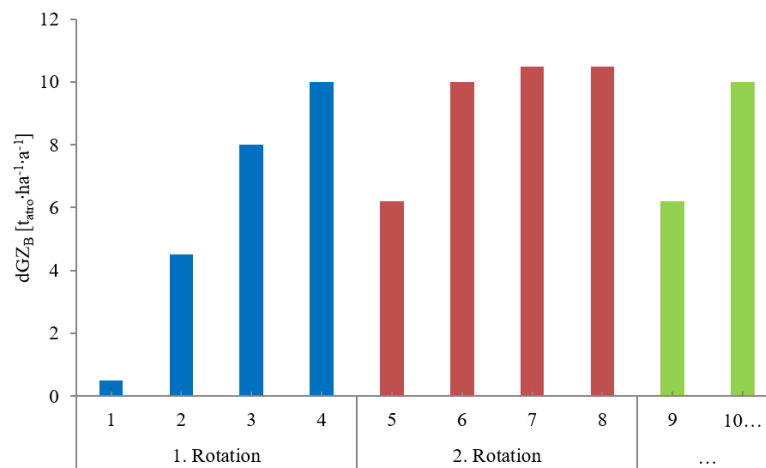


Abb. 3-20: Ertragszuwachs einer schwedischen Weidenplantage im 4-jährigen Umtrieb (verändert nach DANFORS et al. 1998)

Trotz dieser Unsicherheiten ist festzuhalten, dass bei allen untersuchten Versuchsflächen nach der ersten Ernte bzw. in der 2. Rotation stets eine deutliche Leistungssteigerung eintrat. Gründe für diesen Leistungsanstieg können im überproportional entwickelten Wurzelsystem, dem Wegfallen der „Anwuchsphase“ bei Begründung sowie der primär durch Stockausschlag bzw. sekundär durch Wurzelbrut gesteigerten Triebzahl zu Beginn der 2. Rotation gesehen werden. Triebzahl und Triebzahlsteigerung sind die entscheidenden „Schlüsselgrößen“, um das Verhalten von ertragsbildenden Messgrößen sowie den Ertragsanstieg in Folgerotationen erklären zu können. Nachfolgend wird sich hiermit näher auseinandergesetzt.

Aus den erhobenen Messdaten konnte abgeleitet werden, dass die Triebzahlsteigerung stark mit der Rotationslänge korreliert ist (vgl. Tab. 3-4). Sehr hohe Triebzahlsteigerungen (> 600 %) werden ausschließlich bei Rotationslängen von mehr als 10 Jahren erreicht. Diese Tatsache kann auf den Durchmesser des nach der Ernte zurückbleibenden Wurzelstockes zurückgeführt werden. Seitentriebe entstehen aus sogenannten Proventivknospen, die unter der Rinde des verbliebenen Stockrests lokalisiert sind (STRASBURGER 2012). Bei einer 10-jährigen Rotation

bleibt nach der Ernte ein wesentlich größerer Stockrest zurück und folglich stehen mehr Initialstellen für die Triebbildung zur Verfügung. Aufgrund des seitlichen Austreibens ordnen sich die Triebe ringförmig um den Stumpf an und es entsteht ein für ältere Pappelplantagen typisches Bild (vgl. Abb. 3-21). Zusätzlich nimmt mit der Länge der Rotation auch die Größe des Wurzeltellers und somit die Affinität der Klone zur Wurzelbrutbildung zu.



Abb. 3-21: 13 Jahre alter Wurzelstock mit 4-jährigen Trieben in der 2. Rotation des Klon Androscoffin [2/13/4]

Der Zusammenhang zwischen Triebzahl und d_g auf Kurzumtriebsplantagen kann aus Gesetzmäßigkeiten, die für Hochwälder seit langem bekannt sind, abgeleitet werden. Bereits ASSMANN (1961) stellte fest, dass die Stammzahl in Waldbeständen (N) näherungsweise mit dem Durchmesser des Grundflächenmittelstammes korreliert ist und als entsprechende Funktion dargestellt werden kann. ASSMANN (1961) leitete diesen Zusammenhang aus der von REINEKE (1933) aufgestellten „Stand-Density-Rule“ ab. Die von ASSMANN (1961) verwendete Näherungsfunktion und ihre logarithmische Schreibweise sind in Formel 3-9 dargestellt.

$$N = a_1 \cdot d_g^c \quad \text{bzw.} \quad \ln N = a_1 - c \cdot \ln d_g \quad \text{Formel 3-9}$$

Mit: N = Stammzahl [Stück · ha⁻¹]
 d_g = Durchmesser des Grundflächenmittelstammes [cm]
 c = allometrische Konstante
 a_1 = Regressionskoeffizient

REINEKE (1933) begründete seine Regel aufgrund von Inventurergebnissen von maximal bestockten, gleichaltrigen Beständen im Nordwesten der USA. Bei seinen Untersuchungen stellte er fest, dass unabhängig vom Standort die Stammzahlabnahme im Verhältnis zum Mitteldurchmesser annähernd der allometrischen Konstante $c = -1,605$ folgt. Die Funktion stellt somit eine biologische Obergrenze der max. möglichen Dichte eines Bestandes bzw. einer Plantage dar. Die Lage der lineartransformierten Gerade wird dabei durch den Lageparameter a bestimmt,

welcher mit zunehmender Standortgüte ansteigt (STERBA 1975, 1981). Für das Interzept der Geradengleichung können nach PRETZSCH (2000) die Werte 11 für ungünstige, 12 für mittlere und 13 für gute Standorte angegeben werden. In Abb. 3-22 sind die auf den Plantagen beobachteten Triebzahlen in Abhängigkeit vom d_g dargestellt. Zusätzlich wurden als Referenzwerte die Funktionsbezüge für die sich aus der REINEKE-Beziehung ergebenden Standortgüten eingetragen.

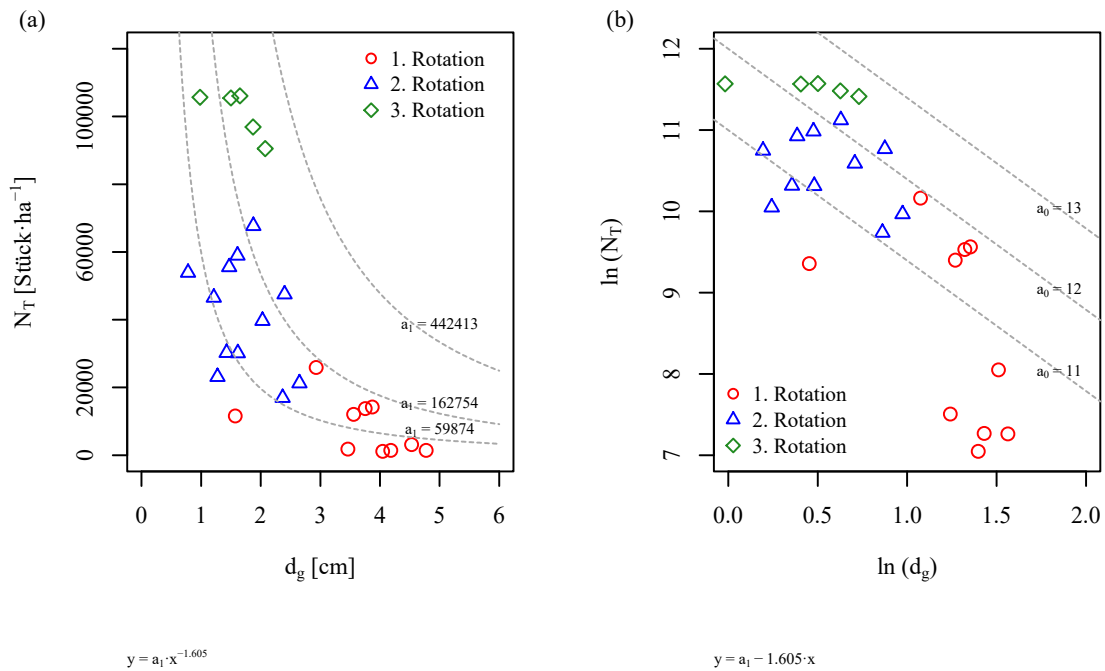


Abb. 3-22: Zusammenhang zwischen Triebzahl (N_T) und Durchmesser des Grundflächenmittelstammes (d_g) auf den beprobten Versuchsfeldern. Zusätzlich wurden als Referenzwerte die Funktionsbezüge für die sich aus der REINEKE-Beziehung ergebenden Standortgüten eingetragen.

Es ergibt sich eine deutliche standortspezifische Streuung, wobei die tendenzielle Annäherung der von Rotation zu Rotation ansteigenden Triebdichten an die von REINEKE aufgestellten Beziehungen nachgewiesen werden kann. Besonders deutlich ist dieser Zusammenhang beim Vergleich der Ausgleichsgeraden der als Standort mittlerer Güte einzuschätzenden Versuchsfläche Thammenhain (Ackerzahl = 42), welche mit der Geraden für maximale Bestockungsdichte von mittleren Standorten einen nahezu identischen Verlauf aufweist (vgl. Abb. 3-23 (a)). Die Regel nach REINEKE eignet sich demnach in hervorragender Weise für die Bestimmung eines altersunabhängigen Ertragsniveaus bei vollbestockten Kurzumtriebsplantagen. Zusätzlich ermöglicht die Kenntnis der abgeleiteten standortabhängigen maximalen Triebzahl dem Bewirtschafter einzuschätzen, inwieweit die potenzielle Leistungsfähigkeit seiner Plantage ausgeschöpft wird.

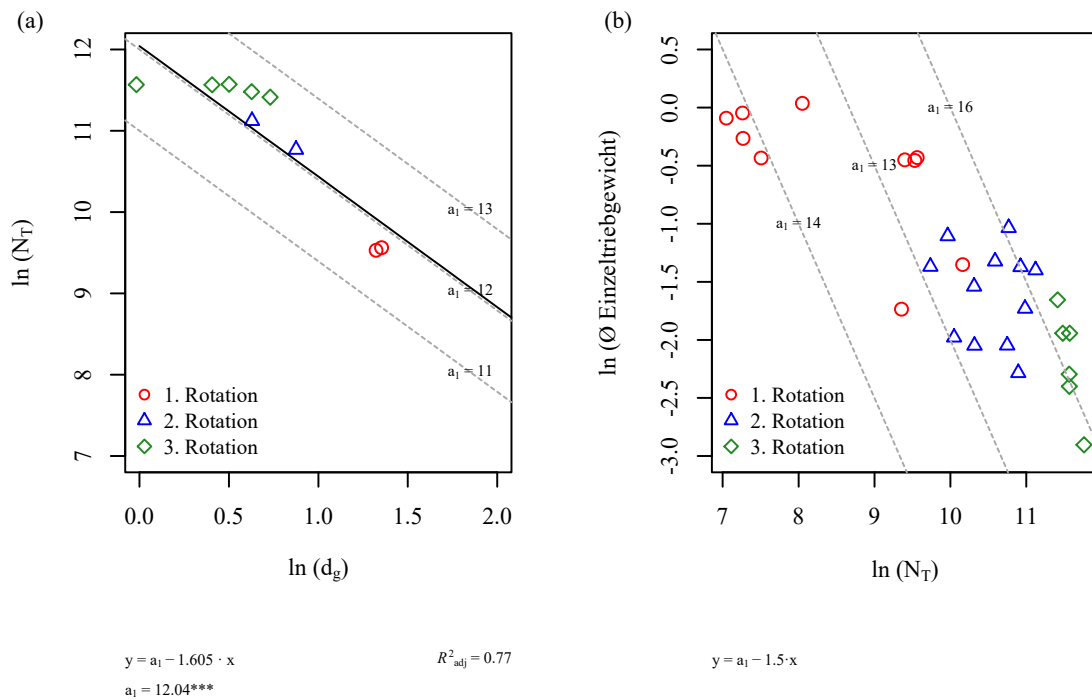


Abb. 3-23: (a) „Stand-Density-Rule“ nach REINEKE (1933) am Beispiel der Versuchsfläche Thammenhain II
(b) „-3/2-Selbstdifferenzierungsregel“ nach YODA et al. (1963) am Beispiel aller beprobten Kurzumtriebsplantagen

Unabhängig von REINEKE (1933) stellten KIRA et al. (1953) und YODA et al. (1963) bzw. später auf deren Arbeiten fußend HARPER (1977) und WELLER (1987a, 1987b, 1990) einen Zusammenhang zwischen dem durchschnittlichen Gewicht einer Pflanze (bm) und der Pflanzendichte (N) [Stück·Flächeneinheit⁻¹] auf. Die vermutete Beziehung, welche als „-3/2-Selbstdifferenzierungsregel“ bekannt ist, wird in Formel 3-10 dargestellt. Das durchschnittliche Pflanzengewicht steht dabei mit der Pflanzendichte in einem allometrischen Verhältnis, welches dem Allometrie-Koeffizienten von -3/2 folgt.

$$bm = a_1 \cdot N^{-\frac{3}{2}} \quad \text{bzw.} \quad \ln bm = a_0 - \frac{3}{2} \cdot \ln N \quad \text{Formel 3-10}$$

Mit: bm = durchschnittliche Biomasse des Einzelbaumes [kg·Stück⁻¹]
 N = Stammzahl [Stück·ha⁻¹]
 a_0, a_1 = Regressionskoeffizienten

Nach PRETZSCH (2000, S. 209) kann „die Dichteabnahme durch Selbstdifferenzierung in Waldbeständen aus den stereometrischen Zusammenhängen von Kugeln ... veranschaulicht werden“. Die räumliche Allometrie zwischen Zunahme von Kugelvolumen sowie der damit verbundenen Abnahme der maximal möglichen Anzahl von Kugeln (Dichte) auf einer definierten Fläche folgt ebenfalls der -1,5ten Potenz (vgl. Abb. 3-24). Weiterhin merkt PRETZSCH (2000, S. 208) an, dass der „... Übergang von YODA's Regel zu REINEKE's Bestandesdichte-Regel ...

möglich wird, wenn in der erstgenannten Regel die Masse durch eine Funktion des Durchmessers ersetzt wird“. Ein Übertrag der zuvor beschriebenen Gesetzmäßigkeiten auf die eigenen Daten wird in Abb. 3-23 (b) gegeben.

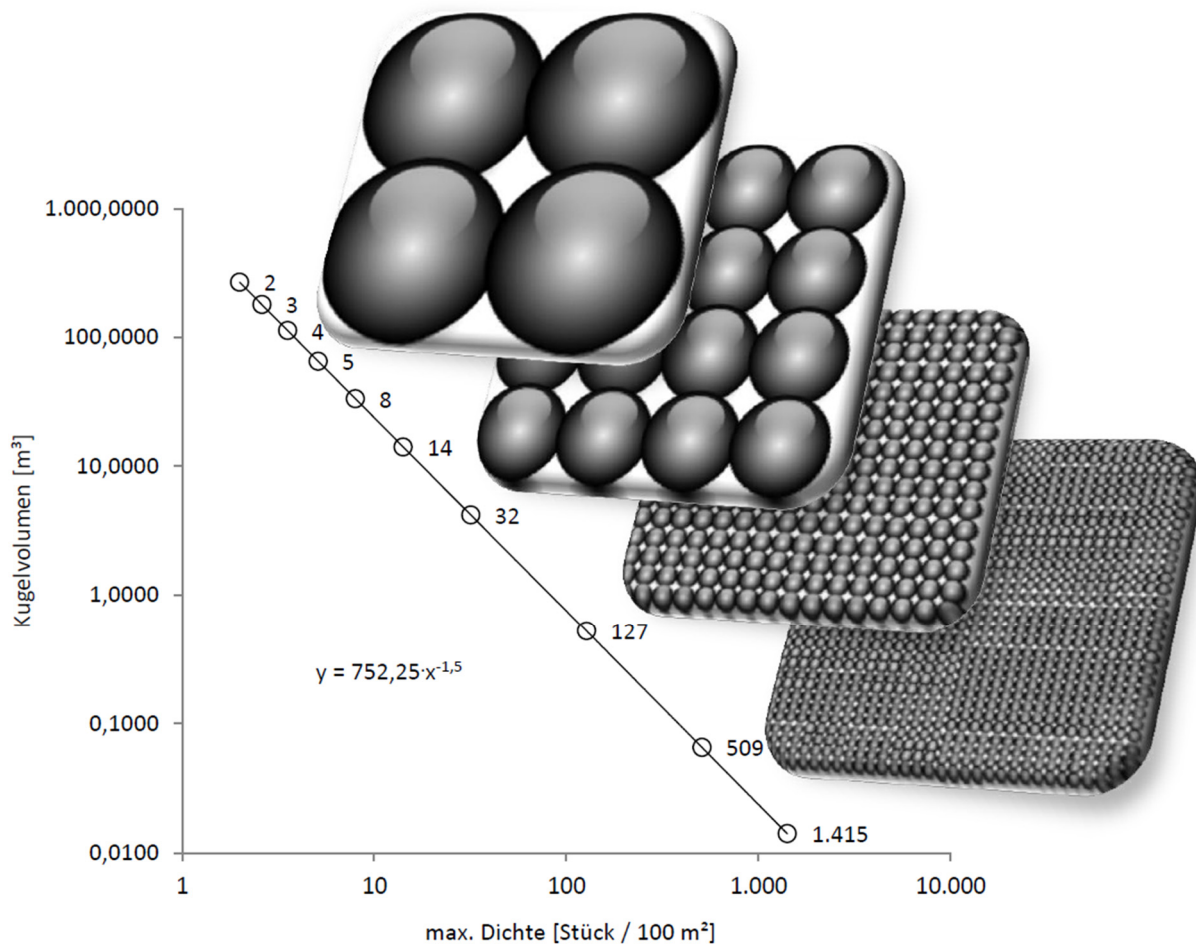


Abb. 3-24: Die Dichteabnahme durch Selbstdifferenzierung in Waldbeständen kann aus den stereometrischen Zusammenhängen von Kugeln auf einer konstant großen Fläche veranschaulicht werden. Die räumliche Allometrie zwischen Volumen- und Dichteänderung ist bei Pflanzen ähnlich wie bei Kugeln und folgt der -1,5ten Potenz (verändert nach PRETZSCH 2000).

Störereignisse außen vorlassend, endet die rotationsbedingte Steigerung der Triebzahl auf Plantagen erst, wenn eine wachstumsnotwendige Ressource (Raum, Nährstoffe etc.) auf der Fläche zum Minimumfaktor wird. Auf hochwertigen Ackerböden wird das in der Regel der verfügbare Raum sein. Danach stagniert die Triebzunahme bzw. sinkt aufgrund nachlassender Vitalität und einsetzender Mortalität wieder ab. Es ist davon auszugehen, dass auf Kurzumtriebsplantagen frühestens in der 2. Rotation die maximale Dichte nach den Regeln von REINEKE bzw. YODA erreicht wird. FRIEDRICH (1995) bestätigt diesen Sachverhalt und gibt an, dass auf den von ihm untersuchten Versuchsflächen selbst bei sehr engen Pflanzverbänden (1,3 x 0,3 m) und 2- bis 3-jähriger Umtriebszeit erst in der 2. Rotation konkurrenzbedingte Abgänge zu beobachten waren.

Neben der Triebzahl ist vor allem die Biomasseleistung von Plantagen entscheidend. Der straffe Zusammenhang zwischen Triebzahl und Biomasseleistung (dGZ_B), welcher bei TUBBY und ARMSTRONG (2002) und RÖHLE et al. (2010b) beschrieben wird, konnte anhand der Daten ebenfalls nachvollzogen werden (vgl. Abb. 3-10). Der Ertragsanstieg von 1. auf 2. Rotation zeigte sich besonders markant. Die relative Zunahme des dGZ_B fiel dabei umso höher aus, je schlechter der Standort bzw. je geringer die Wuchsleistung in der 1. Rotation war. Demnach kann auf Plantagen, die einen geringen Ertrag in der 1. Rotation zeigen, mit dem 2- bis 4-fachen und auf ertragsstarken Plantagen mit mindestens dem 1,3-fachen Anstieg gerechnet werden. Die Ertragssteigerung verhält sich somit analog der Triebzahlsteigerung. Hingegen fiel der Ertragsanstieg von der 2. auf die 3. Rotation deutlich niedriger aus.

Es konnte beobachtet werden, dass die relative Zunahme des dGZ_B besonders bei weiten Ausgangspflanzverbänden wesentlich größer ausfällt als bei engen Pflanzverbänden. Dies erscheint logisch, weil die Wachstumseinbuße durch intraspezifische Konkurrenz zwischen den Einzelpflanzen bei geringer Triebzahldichte viel später einsetzt als bei dichten Pflanzverbänden mit hoher Pflanzdichte. Weiterhin ist zu vermuten, dass auf Standorten mit geringer Wertigkeit (Bodenwertzahl < 30) der dGZ_B sein Maximum wesentlich später erreicht als auf besseren Standorten. Ähnliches kann im Hochwald beobachtet werden, kulminiert der dGZ bei guten Bonitäten doch wesentlich früher als bei schlechten Bonitäten. Die Bonität kann als ein „indirektes Maß“ für die Standortgüte gesehen werden. Verantwortlich hierfür ist der längere Zeitraum, den die Pflanzen bei widrigen Bedingungen für die vollkommene Ressourcenerschließung benötigen. Nach BEMMANN et al. (2007) eignen sich in unseren Breiten besonders Standorte mit einem Jahresniederschlag von > 500 mm bzw. 300 mm Niederschlag in der Vegetationsperiode, einer hohen nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum, ergänzt durch Kapillaraufstieg bei Grundwasseranschluss sowie eine durchschnittliche Jahrestemperatur von > 7 °C. Der Boden sollte keine Staunässe aufweisen und mindestens 30 cm durchwurzelbar sein. Frische, feuchte, anehmige Sande, tonige Lehme bieten sich nach BOELCKE (2006) besonders an. Die Ackerzahl sollte für einen produktiven Anbau von KUP mindestens 30 Bodenwertpunkte nicht unterschreiten. Wie zu erwarten, zeigen die Versuchsergebnisse, dass mit Verbesserung der Ackerzahl eine Steigerung der absoluten Biomasseleistung einhergeht. Wenn es demnach primäres Ziel ist, insbesondere auf schwachen Standorten, wie z. B. Rekultivierungsflächen in Bergbaufolgelandschaften und Grenzertragsstandorten, den Ertrag möglichst schnell zu maximieren, muss im Umkehrschluss mit einer hohen Ausgangspflanzenzahl (> 10.000 Stück·ha⁻¹) gearbeitet werden. BURGER (2010) merkt hierzu treffend an, dass der mit

hohen Pflanzzahlen „erkaufte“ Vorteil der schnellen Standortpotenzialausschöpfung allerdings ebenfalls mit dem Nachteil hoher finanzieller Begründungskosten bezahlt werden müsse.

Bei der Betrachtung der Biomassekurven fällt auf, dass diese von der 1. auf die 2. Rotation absinken (vgl. Abb. 3-8 (b)), woraus geschlussfolgert werden kann, dass das Gewicht des Einzeltriebes bei gleichem $d_{1,3}$ tendenziell von der 1. auf die 2. Rotation gesunken ist. Dieses Phänomen erklärt sich nach HARTMANN (2010) über den Zusammenhang von Stammzahl und Konkurrenz. Bei weiten Pflanzverbänden bzw. geringen Pflanzzahlen sind die Einzeltriebe in der Lage, aufgrund der geringen Konkurrenz wesentlich mehr Kronenholz auszubilden als bei hohen Triebzahlen und geringem Pflanzabstand. In triebzahlreicheren Beständen sind die Konkurrenzwirkungen wesentlich stärker ausgeprägt und aufgrund des eingeschränkten Platzes kommt es bei einem übereinstimmenden $d_{1,3}$ zu einer kleineren Gesamtbiomasse des Einzeltriebes. Demnach führt eine hohe Triebzahl aufgrund des Wettbewerbs um Ressourcen zu einer Verschiebung der Allometrie von Krone und Stamm des Einzeltriebes. Legt man nun zugrunde, dass sich die Triebzahl in der 2. Rotation gegenüber der 1. Rotation aufgrund des Stockauschlages stark erhöht und die intraspezifische Konkurrenz zwischen den einzelnen Pappeltrieben stark zunimmt, erklärt sich das Absinken der Biomassekurve (vgl. Abb. 3-25).

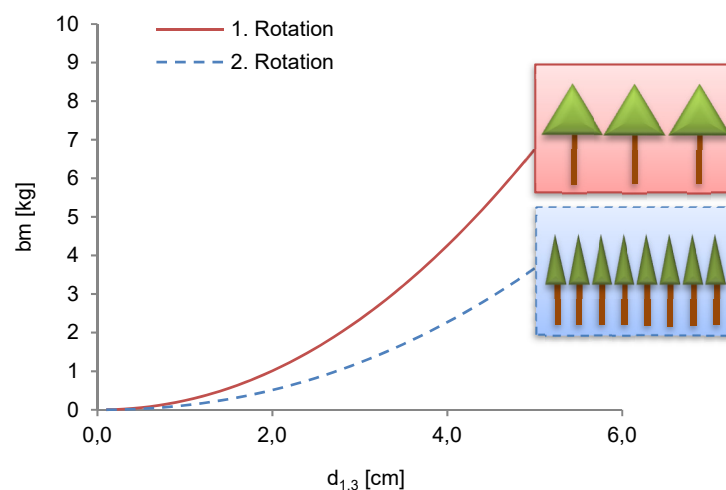


Abb. 3-25: Absinken des Einzelbaumgewichtes (bm) bei gleichem Brusthöhendurchmesser ($d_{1,3}$) aufgrund des konkurrenzbedingten Verschiebens von Schaft- und Astholz

Kritische Wertung des Modellansatzes

In Kap. 3.1.2 wurde die Entwicklung eines Ertragssteigerungsmodells von Kurzumtriebsplantagen in Folgerotationen für die Baumart Pappel vorgestellt. Weil derzeit kein vergleichbares Modell existiert, liefert es einen wesentlichen Beitrag zur ganzheitlichen Analyse und Bewertung der Kurzumtriebswirtschaft. Für die Modellbildung konnte, insbesondere für die 3. bis 6. Rotation, nur auf verhältnismäßig geringe und stellenweise sehr heterogene Datengrundlagen zugegriffen werden. Eine erste Evaluierung des Modells zeigte, dass sich bei den geprüften Daten in der Regel eine Unterschätzung des Realwertes einstellte. Der vorgestellte Ansatz unterstellt zudem eine Konstanz von Boden- und Klimaverhältnissen (Standortkonstanz) während des Bewirtschaftungszeitraums. Aufgrund der tatsächlichen Variabilität der Standortfaktoren sind somit Abweichungen zwischen dem Modell und realen Erträgen von vornherein gegeben. Klonspezifische Unterschiede werden ebenfalls nicht erfasst. Auch die Frage nach dem mortalitätsbedingten Rückgang des Zuwachses aufgrund von abiotischen bzw. biotischen Stressoren kann das Modell nur bedingt beantworten. Dies ist ein Problem, weil Kurzumtriebsplantagen aufgrund der Verwendung von wenigen Arten bzw. Klonsorten eine sehr eingeschränkte genetische Diversität und somit eine hohe Anfälligkeit gegenüber Störungen²⁰ aufweisen (GEORGI et al. 2013). Festzuhalten ist, dass die zur Modellerstellung verwendeten Ertragsdaten nur wenig schadbedingte Zuwachsverluste aufwiesen. Auf einem Großteil der beprobten Versuchsflächen wurden zudem ausgefallene Stöcke durch Nachpflanzung ersetzt. Schlussfolgernd kann demnach mit hoher Wahrscheinlichkeit angenommen werden, dass die optimalen Zuwachsverläufe des dGZ_B über die Rotationen hinweg durch die Modellfunktionen abgebildet werden. Die Auswirkungen abiotischer bzw. biotischer Stressoren auf den Ertrag können jedoch beträchtlich sein und sogar zum Totalausfall einzelner Klone führen. In Abb. 3-26 wird dieser Sachverhalt, bezogen auf die optimale Pflanzenzahl der „Stand-Density-Rule“ nach REINEKE (1933), veranschaulicht. Die Grafik zeigt, dass die Triebdichte (schwarz gestrichelt) einer Plantage bei Pflanzung (1. Rotation) meist unter der optimalen Pflanzendichte (schwarz gepunktet) liegt. Weil Triebdichte und dGZ_B linear korreliert sind (vgl. Abb. 3-10), stellt die optimale Triebdichte auch gleichzeitig das altersbezogene Produktionsoptimum einer KUP dar. Erst nach der ersten Ernte und der damit verbundenen Triebzahlerhöhung nähern sich die tatsächliche und die optimale Triebdichte an. Gleichzeitig wird die Triebzahl jedoch durch Störungen wieder gedämpft. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Höhe der kalamitätsbedingten Ertragsverluste mit der Standzeit einer Plantage zunehmen und deshalb insbesondere in höheren Rotationen vom

²⁰ Störung wird in Anlehnung an NENTWIG et al. (2009) als ein Ereignis definiert, durch das Organismen entfernt oder geschädigt werden. Die Störung kann durch einen abiotischen (z. B. Wind, Schnee, Erntemaßnahmen etc.) oder biotischen Stressor (Pilze, Insekten etc.) verursacht werden.

Produktionsoptimum verstärkt abgewichen wird (vgl. Abb. 3-26). Es ist demnach nicht verwunderlich, dass es aufgrund eines durch Störung überprägten Mortalitätsregimes beispielsweise in der Arbeit von LAUREYSENS et al. (2005b) nicht gelang, die „Stand-Density-Rule“ nachzuweisen.

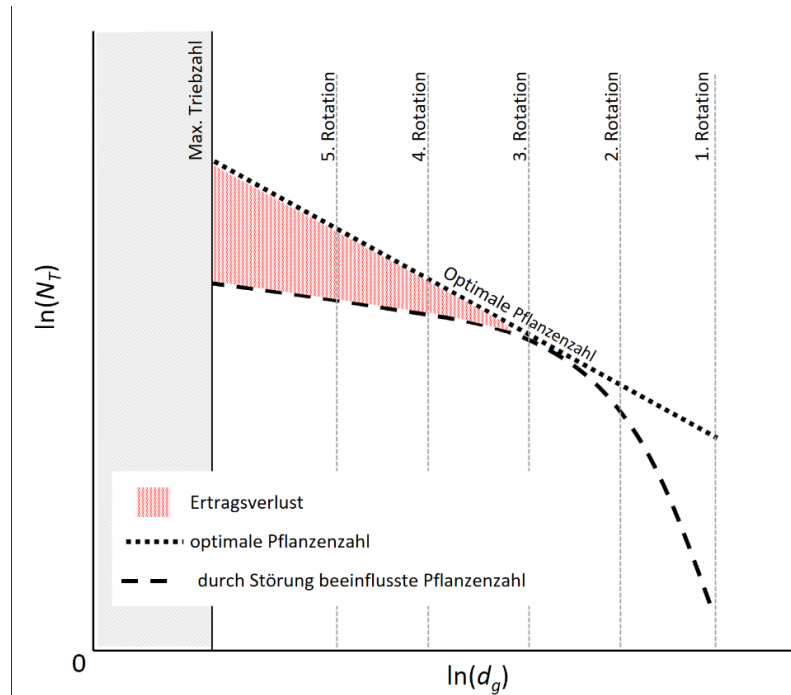


Abb. 3-26: Schematische Darstellung der durch Störereignisse hervorgerufenen Zuwachsverluste auf KUP, bezogen auf die „Stand-Density-Rule“ nach REINEKE (1933)

In Abb. 3-27 wurde mithilfe des Modells ein Störungsregime auf einer Kurzumtriebsplantage nachempfunden. Die Abbildung informiert über die Auswirkungen eines jährlichen Ernteausfalls von 1 bis 2 %. Modelliert wurde mit den in Kap. 3.1.3 vorgestellten Ausgangsdaten, bezogen auf den Freistaat Sachsen. Deutlich ist zu erkennen, dass der durchschnittliche Ertragsverlust bei 1 % jährlicher Mortalität und 5-jähriger Rotationslaufzeit von durchschnittlich -5 % (1. Rotation) auf -25,1 % (6. Rotation) im Modelllauf ansteigt. Abgestorbene Stöcke wirken sich demnach mit einer negativen Rückkoppelung auf den Ertrag in Folgerotationen aus. Zu ähnlichem Ergebnis kommen auch LAUREYSENS et al. (2005a) bei der Untersuchung von 17 Pappelklonen in Belgien. Das Ergebnis ist plausibel, denn wenn Stöcke ausfallen, stehen diese für den nächsten Produktionszyklus nicht zur Verfügung. Jedoch existiert auch eine positive Rückkoppelung. So werden bei Absterbeprozessen die Nachbarpflanzen gefördert und gleichen aufgrund dieses „Wuchsbeschleunigungseffekts“ die Mindererträge teilweise wieder aus. Die Fähigkeit eines biologischen Systems, nach einer Störung zum Ausgangszustand zurückzukehren, wird als Resilienz bezeichnet. Selbst nach der extremsten Art einer Störung, der Ernte, versucht die Plantage, wieder in den Zustand optimaler Ressourcennutzung zurückzukehren. In

der Regel geschieht dies umso schneller, je weiter sich die Plantage von dem Punkt optimaler Triebdichte bzw. Ressourcenausnutzung entfernt hat. Es erscheint demnach sinnvoll, dass bei niedrigen dGZ_B höhere Ertragssteigerungsraten im Modell unterstellt werden.

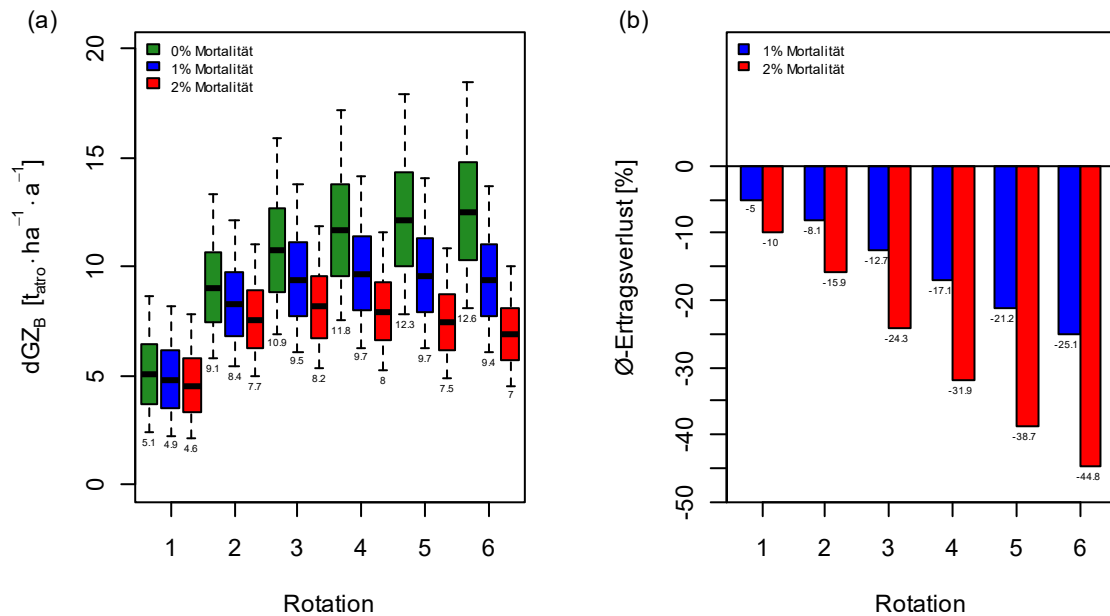


Abb. 3-27: Modellierter jährlicher Ernteausfall von 1 – 2 % am Beispiel des Freistaates Sachsen

Abschließend kann Folgendes festgehalten werden: Trotz der zuvor beschriebenen Einschränkungen bietet das vorgestellte Modell einen einfachen Ansatz für die Beschreibung der Ertragsentwicklung auf KUP in Folgerotationen und kann durch zukünftige Messungen weiter angepasst und in seiner Parametrisierung verbessert werden. Wünschenswert wäre, das Modell sowohl für unterschiedliche Baumarten und Klone sowie unterschiedliche Begründungspflanzzahlen weiter anzupassen. Der vorgestellte Ansatz zur Schätzung der Erträge auf Kurzumtriebsplantagen in Folgerotationen eignet sich somit nur unter Vorbehalt als Vorhersageinstrument für eine klonspezifische Leistungsentwicklung. Vielmehr kann er in Verbindung mit einem Modell zur Standortleistungsschätzung (ALI 2009, AMTHAUER GALLARDO 2014) langfristige, großräumige Potenziale für die Wirtschaftsform Kurzumtrieb abschätzen. Er bietet somit eine erste Planungsgrundlage für zur Verfügung stehende Biomassepotenziale einer Region.

3.2 Ertragsbewertung von Baumarten in altersgleichen Reinbeständen des Schlagweisen Hochwaldes

Der folgende Abschnitt soll einen Einblick in die Wuchsleistung der wichtigsten einheimischen und fremdländischen Baumarten in Sachsen vermitteln. Um die zwischenartliche Konkurrenz auszuschließen und die Betrachtung auf die standortabhängige Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Baumarten zu fokussieren, steht die Untersuchung von altersgleichen Reinbeständen²¹ des Schlagweisen Hochwaldes im Mittelpunkt dieses Kapitels. Diese Situation wird gegenwärtig auf einem Großteil der Waldflächen in Sachsen wiedergefunden. Das Leistungsspektrum dieser Wirtschaftsform wird traditionell auf der Grundlage von Bestandesmittel- und Bestandessummenwerten (Ertragstafelmodelle) abgebildet. Vergleich, Konstruktion und Anwendung der für Sachsen gebräuchlichen Ertragstafelmodelle als Weiser für die standortbezogene Leistungsfähigkeit von Baumarten stehen somit im Mittelpunkt der folgenden Abschnitte, die sich in drei große Themenkomplexe gliedern:

1. **Konstruktion und Anwendung von Ertragstafeln:** Zunächst wird eine kurze Einführung zur Aufstellung von Ertragstafeln und zur gegenwärtigen Problematik ihrer Anwendung in der Forsteinrichtung gegeben. Anschließend wird die Konstruktion eines Bonitätsfächers für die schnellwachsende Baumart Küsten-Tanne (*Abies grandis* (DOUGLAS ex D. DON) LINDL.) gezeigt. In einem weiteren Schritt erfolgt eine Gegenüberstellung der Leistungsfähigkeit verschiedener Baumarten anhand der für Sachsen gültigen Ertragstafelmodelle sowie ein Übertrag auf die sächsische Forsteinrichtung.
2. **Standortleistungsmodellierung:** In diesem Kapitel wird für das Bundesland Sachsen ein Modell entwickelt, welches den Einfluss von Topografie, Boden und Klima auf die Bonität einer Baumart beschreibt. Darauf aufbauend wird gezeigt, wie sich bei Veränderung einzelner Klimavariablen der baumarten- und bonitätsspezifische Wachstumsgang verändert.
3. **Durchforstungsregime:** Ertragstafeln folgen einem waldbaulichen Behandlungskonzept. In der Regel richtet sich dieses Behandlungskonzept an den im Arbeitsplan des Vereins Deutscher Forstlicher Versuchsanstalten vorgeschlagenen Durchforstungsarten und -stärken (Verein Deutscher Forstlicher Versuchsanstalten 1902) aus. Anhand einer Versuchsfläche soll nachvollzogen werden, wie Art und Stärke einer Durchforstung den Zuwachs beeinflussen.

²¹ Ein Waldbestand wird in der vorliegenden Arbeit als Reinbestand definiert, wenn die Hauptbaumart zumindest 80 % Anteil an der Baumartenverteilung besitzt.

3.2.1 Ertragstafeln – Konstruktion von Bestandeswuchsmodellen

Ertragstafeln zählen zu den deskriptiven Wachstumsmodellen²² und ermöglichen die Gütebeurteilung (Bonitierung) des Ertragsvermögens eines Standortes aufgrund der Produktionsleistungen des aufstockenden Waldbestandes (RÖHLE 1997). Sie geben die baumartenspezifische Entwicklung von Bestandesmittel- und Summenwerten wieder, die aus einem in der räumlichen Verteilung und standörtlichen Ausstattung, in der zeitlichen Erfassung, in Altersstruktur, Provenienz und Behandlung heterogenen Versuchsflächennetz abgeleitet sind (PRETZSCH 1999). Der territoriale Gültigkeitsbereich einer Tafel richtet sich dabei an der Grundgesamtheit der zuvor genannten Variablen aus. Es handelt sich also um regionalgültige hochaggregierte Prognosemodelle, welche primär für die Schätzung der Volumen- bzw. Massenleistung größerer Waldregionen und nur bedingt für die Ableitung des Waldwachstums einzelner Waldbestände geeignet sind. In den letzten 200 Jahren hat sich der grundlegende tabellarische Aufbau sowie die Gliederung in verbleibenden und ausscheidenden Bestand nur wenig verändert (PAULSEN 1795, HARTIG 1847, SCHWAPPACH 1890, WIEDEMANN 1949, WENK et al. 1985). Nach GADOW (2003) ist dies zweifellos ein Anzeichen, dass Ertragstafeln die operationalen Anforderungen der mittel- und langfristigen Forstplanung erfüllen können.

Um ein näheres Verständnis für die Funktionsweise von Ertragstafeln zu entwickeln erscheint es sinnvoll, den Bonitätsbegriff und seine historische Entwicklung zu erläutern: Die Bonität (von lat. *bonitas*, „Qualität“) ist ein Maß für den Vergleich der Ertragsfähigkeit unterschiedlicher Waldbestände. Die Ertragsfähigkeit ist abhängig von der Baumart bzw. Provenienz, der Standortgüte sowie dem definierten waldbaulichen Behandlungsprogramm, welches der Ertragstafel zugrunde liegt. In der ersten Hälfte des 18. Jahrhunderts wurde nach dem altersabhängigen Holzertrag bonitiert. Waldbestände mit dem höchsten Holzertrag bekamen die Bonität I zugewiesen. Fälschlicherweise wurde in dieser Zeit der Begriff „Massenbonität“ geprägt. Fälschlicherweise, weil in Wirklichkeit die Volumenleistung gemeint war. HEINRICH COTTA (1828) beschreibt in seiner „*Anweisung zum Waldbau*“ die Massenbonität als den einfachsten, verständlichsten und vollkommensten Maßstab zur Bestimmung der Güte des Standortes. Erst später wurde, federführend durch Arbeiten von BAUR (1877), LOREY (1878) und WEISE (1880) die Bonitierung nach der altersabhängigen mittleren Bestandeshöhe gebräuchlich. Sehr schnell zeigte sich, dass die Mittelhöhe, insbesondere bei niederdurchforstungsartigen Eingriffen, einer

²² Deskriptive Waldwachstumsmodelle setzen sich eine formale Beschreibung der Datensätze zum Ziel, wohingegen in mechanistischen Waldwachstumsmodellen versucht wird, auf biologischen, chemischen oder physikalischen Grundgesetzen beruhenden Prozessen zu modellieren.

rechnerischen Verschiebung unterliegt. Die Mittelhöhe und damit einhergehend die Bonität steigt nach einer Niederdurchforstung an, ohne dass Wachstum stattgefunden hat. Um das Problem zu umgehen, wurde die Oberhöhenbonitierung eingeführt (vgl. KRAMER 1959). Als richtungsweisend ist in diesem Zusammenhang die Tafel von ASSMANN und FRANZ (1963) für die Baumart Fichte zu nennen, die dieses Konzept als eine der ersten umsetzte. Auf die Konstruktion von Oberhöhenbonitätsfächern wird in Kap. 3.2.1.1 ausführlich eingegangen. Neben der Änderung der verwendeten Bonitierungsgröße änderte sich auch der Bonitierungsmaßstab, von der relativen Bonitierungseinteilung, wo der Ertragsfächer i. d. R. in 3 bis 5 Bonitätsstufen unterteilt wurde, hin zu einer absoluten bzw. direkten Bonitierung (vgl. SOCHA et al. 2016). Bei der direkten Bonitierung werden Leistungsgrößen wie die Mittelhöhe, die Oberhöhe oder der dGZ , bezogen auf ein Bezugsalter, als Bonitätskennwert verwendet. Prinzipiell ist die Aussage, ob ein 40-jähriger Fichtenbestand, der aktuell eine Oberhöhe von 18 m aufweist, mit einer auf das Bezugsalter 100 bezogenen Oberhöhenbonität von 34 m bzw. Mittelhöhenbonität von 32 m oder einer dGZ_{100} -Bonität von $13 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ angegeben wird, als gleichwertig zu sehen²³. Einen besonderen Vorteil bietet jedoch eine dGZ -Bonität bei der standortabhängigen Leistungsbeurteilung von Waldbeständen, weil hier der Ertrag bei gegebener Bonität unmittelbar abzulesen ist. Ein Vergleich der baumartenspezifischen Ertragsleistungen im Wuchsraum Sachsen anhand von $dGZ_{50/100}$ -Bonitäten²⁴ wird in Kap. 3.2.1.2 vorgenommen.

Diese zuvor getätigten Aussagen über die Anwendbarkeit von Ertragstafeln gelten unter der Annahme, dass das Baumwachstum unter konstanten Umweltbedingungen stattfindet. Erfährt ein Standort, z. B. durch Stickstoffeintrag oder vermehrten Niederschlag, eine Aufwertung, verbessert sich der Wachstumsgang. Die Anwendung der Ertragstafel in der operativen Forstplanung ist dann als kritisch zu sehen. Wenn das Forschungsziel jedoch nicht auf die zahlenmäßige Fixierung der Zuwachsleistung, sondern die Abschätzung der langfristigen Änderung von Waldwachstumsbedingungen zielt, erfahren Ertragstafeln eine besondere Relevanz. Entsprechend dem zugrunde liegenden waldwachstumskundlichen Datenmaterial geben insbesondere ältere Ertragstafeln die generalisierten Zuwachsverläufe aus einer Zeit wieder, in der die Einwirkung des Menschen auf die Umwelt wesentlich geringer war (RÖHLE 1995, PRETZSCH und UTSCHIG 2000). Sie können somit als Indikator für die langfristige Veränderung des Wachstums im Ökosystem Wald dienen. So konnte beispielsweise PRETZSCH (1999) an bayrischen

²³ vgl. Tafelwerte nach WENK et al. (1985)

²⁴ Der dGZ_{50} bzw. dGZ_{100} gibt den durchschnittlichen Gesamtwuchs einer Ertragsklasse im Alter 50 bzw. 100 an. Er wird u. a. in Baden-Württemberg und Sachsen als Bonitierungsmaß verwendet.

Versuchsflächen einen Mehrzuwachs von 12 bis 43 % gegenüber dem aus der Ertragstafel abgeleiteten Normalwachstum feststellen. Als Erklärung für diesen deutlichen positiven Wachstumstrend gibt PRETZSCH (1999) die für die Nordhemisphäre nachgewiesene Temperaturerhöhung und die Verlängerung der Vegetationszeit an. Die Fragestellung, inwieweit sich dieser Wachstumstrend auf Sachsen übertragen lässt, wird anhand ausgewählter Baumarten in Kap. 3.2.1.3 behandelt. Zusammenfassend geben Ertragstafeln demnach das mittlere Normalwachstum bei Standort- und Klimakonstanz für ideelle Waldbestände sowie ein festgelegtes Durchforstungskonzept wieder.

3.2.1.1 Konstruktion eines Bonitierungsfächers

Nach ASSMANN (1961, S.157ff.) wird das Rückgrat von Ertragstafeln i. d. R. durch drei Grundbeziehungen gebildet, welche Wachstums- oder Zuwachsgrößen in Abhängigkeit von Alter und Höhe darstellen:

Einordnungsbeziehung: $Höhe = f_1(Alter)$ Formel 3-11

Hilfsbeziehung: $Gesamtwuchsleistung = f_2(Höhe)$ Formel 3-12

Endbeziehung: $Gesamtwuchsleistung = f_3(Alter)$ Formel 3-13

An den drei Grundbeziehungen kann der Aufbau von Ertragstafeln nachvollzogen werden. Die erste Grundbeziehung wird als Einordnungsbeziehung bezeichnet und stellt auf einem gegebenen Standort die Höhenentwicklung in Abhängigkeit vom Alter dar (Formel 3-11). Aufgrund des direkten Standortbezuges wird auf Grundlage dieser Beziehung aus dem Alters-Höhenbefund von Versuchsflächen ein Höhenfächer konstruiert. Dieser zeigt den im Anwendungsbereich der Tafel zu erwartenden Korridor von standortspezifischen Höhenwachstumsverläufen (PRETZSCH 2001) und bildet gleichzeitig die Grundlage für die Bonitierung. Die zweite Grundbeziehung informiert über die Abhängigkeit der Gesamtwuchsleistung von der Höhe (Formel 3-12). Sie fußt auf dem EICHHORNSchen Gesetz²⁵. Nach ASSMANN (1961) wird sie als Hilfsbeziehung bezeichnet, um aus der Einordnungsbeziehung die Endbeziehung (Formel 3-13) herzuleiten. Die Endbeziehung setzt die Gesamtwuchsleistung in Abhängigkeit zum Alter. Gestützt werden die Grundbeziehungen durch eine Vielzahl von Quer- und Leitbeziehungen.

²⁵ Das „EICHHORNSche Gesetz“ wurde 1902 für den verbleibenden Bestand formuliert. Es besagt, dass ein von der Bonität unabhängiger, statistischer Zusammenhang zwischen der Mittelhöhe und dem Bestandesvolumen besteht. Der Zusammenhang gilt für schwach niederdurchforstete bis unbehandelte Bestände. Die Gesetzmäßigkeit erfuhr durch GEHRHARDT (1909), (1923), (1930) zahlreiche Erweiterungen und bildete eine Grundlage für die Herleitung der von ASSMANN und FRANZ (1963) eingeführten Ertragsniveaustufen.

Querbeziehungen werden für die mathematische Verknüpfung der Wachstums- und Zuwachsgrößen benötigt. Leitbeziehungen sind Parameterfunktionen der Grundbeziehungen zur Berechnung der Bestandeswachstumsgrößen für definierte Bonitäten, Ertragsniveaustufen und Wachstumstypen (WENK et al. 1990). Im Folgenden wird anhand von zwei umfangreichen Datensätzen der Baumarten Küsten-Tanne und Gemeine Fichte gezeigt, wie der für die Einordnungsbeziehung benötigte Bonitätsfächer unter Verwendung eines Vorschlages von SLOBODA (1971) konstruiert werden kann. Gewählt wurde die Baumart Küsten-Tanne, weil sie zu den ertragsreichsten Baumarten Sachsens zählt (vgl. Kap. 3.2.1.3) bzw. die Gemeine Fichte, weil sie mit einem Anteil von ca. 34 % an der Gesamtbaumartenverteilung in Sachsen die vorherrschende Baumart ist.

Konstruktion eines Bonitierungsfächers für die Baumart Küsten-Tanne

Eine einfache Lösung zur Konstruktion eines an den Oberhöhenzuwachs angepassten Bonitierungsfächers bietet eine von SLOBODA (1971) entwickelte Funktion, welche bereits mehrfach für die Modellierung von Höhenwachstumsgängen erfolgreich herangezogen wurde (NAGEL 1985, BÖCKMANN 1990, RÖHLE 1992, MUCHIN 2004, NOTHDURFT et al. 2006, KAHLE 2011). Bei der SLOBODA-Funktion handelt es sich um eine drei- bzw. vierparametrische Differentialgleichung 1. Ordnung. Die Schätzung der Parameter erfolgt anhand der Differentialform (Formel 3-14). Durch Integration erhalten wir aus der Zuwachsfunktion die zur Darstellung des Bonitätsfächers notwendigen Alters-Höhen-Kurven (Formel 3-15). Für die in dieser Arbeit verwendete vierparametrische Formulierung wird in Formel 3-15 die Variable $h_o(t_0)$ als zusätzlicher Parameter betrachtet. Die Höhe zum Bonitierungszeitpunkt (t_0) wird demnach nicht als gegeben betrachtet, sondern über eine Optimierung geschätzt (vgl. WENK et al. 1990, KAHLE 2011).

$$h'_o(t) = \frac{dh_o}{dt}(t) = a_2 \cdot \frac{h_o}{t^{a_3}} \cdot \ln\left(\frac{a_1}{h_o}\right) \quad \text{Formel 3-14}$$

$$h_o(t) = a_1 \cdot \left(\frac{h_o(t_0)}{a_1}\right)^{\exp\left(\frac{a_2}{(a_3-1) \cdot t^{a_3-1}} - \frac{a_2}{(a_3-1) \cdot t_0^{a_3-1}}\right)} \quad \text{Formel 3-15}$$

Mit:

$h_o(t)$	= Oberhöhe im Alter t
$h'_o(t)$	= laufender jährlicher Oberhöhenzuwachs im Alter t
t	= Alter [a]
$a_1 \dots a_3$	= Parameter

Eine besondere Eigenschaft, welche die SLOBODA-Funktion auszeichnet, ist die Berücksichtigung von Äquivalenzklassen. Dies bedeutet, dass aus der Menge aller Werte-Tripel (t , $h_o(t)$, $h'_o(t)$) einer Wachstumskurve Äquivalenzklassen als eindeutige Abbildung äquivalenter Ele-

mente (Höhenwachstumsfächer) extrahiert werden können. Somit wird ein empirisch-zeitberücksichtigendes Richtungsfeld (WOLFsches Richtungsfeld) aufgebaut. Der Vorteil der SLOBODA-Funktion begründet sich darin, dass bei Kenntnis der Parameter $a_{1,2,3}$ alle denkbaren Bonitätskurven allein durch Veränderung ihrer Bonität (gegeben durch das Wertepaar $h_o(t_0)$ und t_0 in Formel 3-15) beschrieben werden können.

Bei den durchgeführten Untersuchungen wurde aus Versuchsflächendatensätzen der Baumart Küsten-Tanne ein Oberhöhenbonitätsfächer abgeleitet. Die verwendeten Daten wurden dankenswerterweise vom Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (LFE) zur Verfügung gestellt. Der Datensatz basiert auf 6 Versuchsflächen mit insgesamt 19 Parzellen und 100 ertragskundlichen Vollaufnahmen im Bestandesalter von 23 bis 54 Jahren. Die Lage der Versuchsflächen befindet sich in den Lehroberförstereien Freienwalde und Chorin (Brandenburg)²⁶ auf nährstoffkräftigen bis -reichen, durchschnittlich wasserversorgten Standorten. Eine Übersicht der verwendeten Versuchsflächen befindet sich in Anhang 11. Eine weiterführende Beschreibung des verwendeten Versuchsflächenmaterials kann bei LOCKOW und LOCKOW (2007) nachgelesen werden. Die allgemeine Vorgehensweise für die hier verwendete Herleitung des Oberhöhenbonitätsfächers lässt sich verkürzt folgendermaßen skizzieren:

1. Festlegung des Alters-Höhenrahmens anhand der Versuchsflächendaten. Die Oberhöhen für die einzelnen Versuchsflächenaufnahmen wurden über das grundflächengewichtete Mittel der 10 % stärksten Bäume hergeleitet (vgl. Kap. 2.2.).
2. Berechnung des mittleren Höhenzuwachses, getrennt nach Versuchsparzellen.
3. Anpassung der Funktion nach SLOBODA (1971) an die hergeleiteten Höhenzuwachswerte (Formel 3-14).
4. Integration und Herleitung des Oberhöhenbonitätsfächers (Formel 3-15).

Abb. 3-28 (a) zeigt den nach Formel 3-14 laufenden jährlichen Höhenzuwachs über dem Alter. Aufgrund des vorhandenen Altershöhen-Rahmens wurden ausgeglichene Oberhöhenbonitäten von 20 bis 40 m (in 2 m-Stufen), bezogen auf das Alter 50, gewählt. Die Lage der Kulminationspunkte ist durch eine rote Linie kenntlich gemacht. Die Verlagerung des Kulminationspunktes (maximaler Höhenzuwachs) über dem Alter tritt deutlich in Erscheinung. So kulminiert die Bonität 40 m im Alter von 12 Jahren mit einem maximalen Höhenzuwachs von $1,15 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, wohingegen die Bonität 20 m erst im Alter von 21 Jahren bei einem maximalen Höhenzuwachs

²⁶ Es wurde auf Versuchsflächendaten aus Brandenburg zurückgegriffen, weil für Sachsen ein äquivalenter Datensatz nicht vorlag.

von 0,51 m kulminiert. Die ideale Schichtung der einzelnen Zuwachskurven tritt deutlich in Erscheinung. Abb. 3-28 (b) enthält den durch Integration aus der Zuwachsfunktion abgeleiteten Höhenfächer. Das Bezugsalter 50 Jahre ist durch strichlierte Signaturen besonders hervorgehoben. Zusätzlich wurden die zugrunde liegenden Versuchsflächendaten dargestellt (rote Punkte).

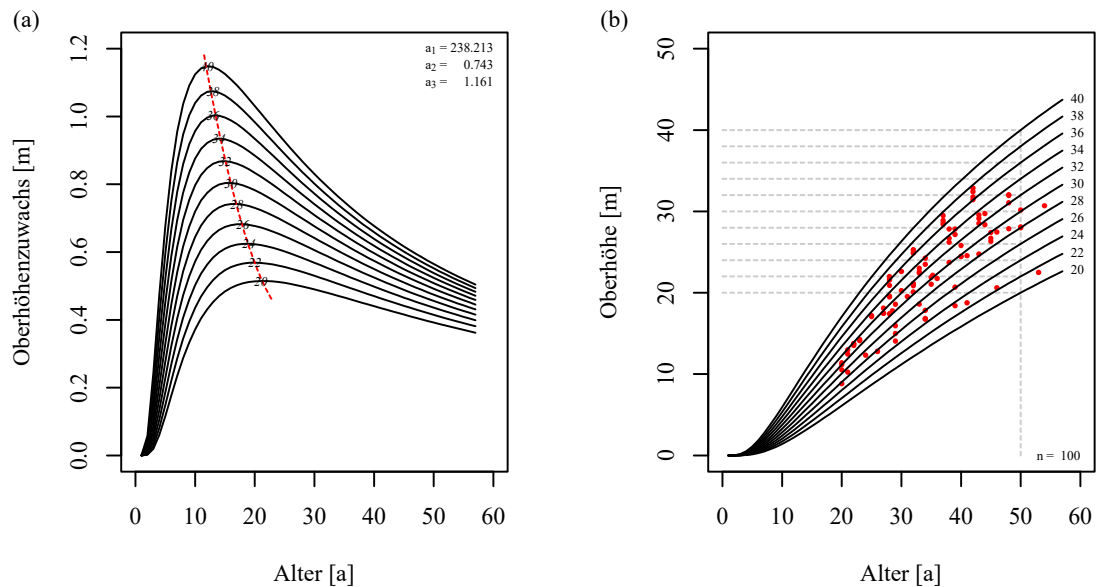


Abb. 3-28: (a) Mit der SLOBODA-Funktion (1971) modellierter Höhenzuwachs auf Basis der untersuchten Küsten-Tannen-Versuchsflächen ($n = 100$). Dargestellt sind die ausgeglichenen Höhenbonitäten (Höhe im Alter 50 Jahre) 20 bis 40 m in 2 m-Stufen. Die Lage der Kulminationspunkte ist durch eine rote Linie kenntlich gemacht. (b) Aus den Höhenzuwachskurven abgeleiteter Alters-Höhenfächer für die Baumart Küsten-Tanne (Bonitäten 20 bis 40, Altersbereich bis 55 Jahre). Das Bezugsalter 50 Jahre ist durch strichlierte Signaturen besonders hervorgehoben. Zusätzlich wurden die zugrunde liegenden Versuchsflächendaten dargestellt (rote Punkte).

Konstruktion eines Bonitierungsfächers für die Baumart Gemeine Fichte

Weiterhin wurde ein Oberhöhenbonitätsfächer für die Baumart Gemeine Fichte erstellt. Die verwendeten Datensätze entstammen dem Tharandter Versuchsflächendatenbanksystem des Lehrstuhls für Waldwachstum und Holzmesskunde der Technischen Universität Dresden²⁷. Der Datensatz basiert auf 141 Fichten-Versuchsflächen mit insgesamt 2.094 ertragskundlichen Vollaufnahmen im Bestandesalter von 11 bis 143 Jahren. Die Versuchsflächen liegen in den Bundesländern Sachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt und bilden einen umfangreichen Bereich der Standortgüte ab. Eine Übersicht der Versuchsflächen und ihrer standörtlichen Einordnung befindet sich in Anhang 12. Für die Erstellung des Bonitätsfächers wurde ebenfalls die

²⁷ Das Tharandter Versuchsflächendatenbanksystem wurde im Zeitraum von 1997 bis 1999 auf ORACLE®-Basis unter der wissenschaftlichen Leitung von Prof. Dr. H. Röhle und Dr. D. Gerold durch K. Körner entwickelt und programmiert. Das Versuchsflächendatenbanksystem enthält ca. 250 Versuchsflächen in Sachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt mit einer Gesamtfläche von 170 ha. Neben der Datenhaltung und Aktualisierung ermöglicht die Datenbank auch, die durch die DESER-Norm nach JOHANN (1996) festgelegten waldwachstumskundlichen Routineauswertungen, die Modellierung bestandsspezifischer Höhenwachstumsverläufe und deren Visualisierung sowie SQL-Abfragen des Datenbestandes durchzuführen. Eine weitere Beschreibung spezieller Funktionen findet sich bei RÖHLE (1999).

von SLOBODA (1971) entwickelte Funktion bzw. das im vorherigen Abschnitt beschriebene Verfahren eingesetzt. Über das Ergebnis informiert Abb. 3-29.

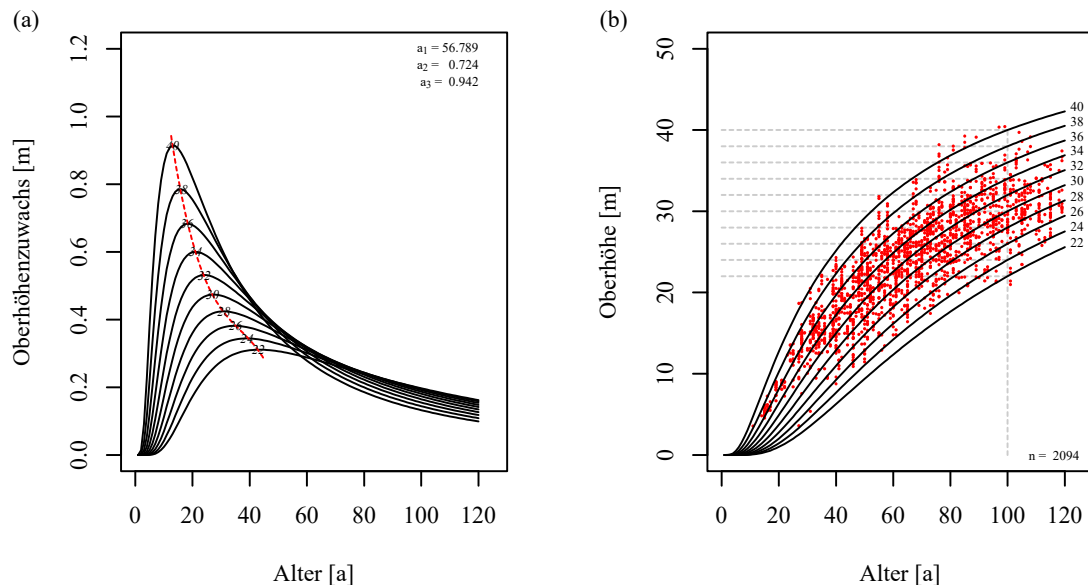


Abb. 3-29: (a) Mit der SLOBODA-Funktion (1971) modellierter Höhenzuwachs auf Basis der untersuchten Fichten-Versuchsfächer ($n = 2094$). Dargestellt sind die ausgeglichenen Höhenbonitäten (Höhe im Alter 100 Jahre) 22 bis 40 m in 2-m-Stufen. Die Lage der Kulminationspunkte ist durch eine rote Linie kenntlich gemacht. (b) Aus den Höhenzuwachskurven abgeleiteter Alters-Höhenfächer für die Baumart Fichte (Bonitäten 22 bis 40, Altersbereich bis 140 Jahre). Das Bezugsalter 100 ist durch strichlierte Signaturen besonders hervorgehoben. Zusätzlich wurden die zugrunde liegenden Versuchsfächendaten dargestellt (rote Punkte).

Aufgrund des vorhandenen Altershöhen-Rahmens wurden ausgeglichene Oberhöhenbonitäten von 22 bis 40 m (in 2-m-Stufen), bezogen auf das Alter 100 Jahre, gewählt (vgl. Abb. 3-29 (a)). Die Verlagerung des Kulminationspunktes (maximaler Höhenzuwachs) über dem Alter tritt auch hier deutlich in Erscheinung. Die Fichte kulminiert bei einer Oberhöhenbonität von 40 m im Alter von 13 Jahren mit einem maximalen Höhenzuwachs von $0,91 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, wohingegen die Bonität 22 m erst im Alter von 43 Jahren bei einem maximalen Höhenzuwachs von $0,31 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ kulminiert. Auffällig ist, dass die ideale Schichtung der einzelnen Zuwachskurven nicht gegeben ist, sondern dass es zu einem Überschneiden der einzelnen Höhenzuwachsverläufe kommt. Abb. 3-29 (b) enthält den durch Integration aus der Zuwachsfunktion abgeleiteten Höhenfächer, bezogen auf das Bezugsalter 100 Jahre.

Bewertung der konstruierten Oberhöhenbonitätsfächer

Bei der Bewertung der Bonitätsfächer muss zunächst das Überschneiden der Zuwachskurven der Baumart Fichte diskutiert werden. Bei einem Bonitätsfächer stellt jede einzelne Kurvenschar (Bonität) einen Wachstumsgang dar, der das summarische Zusammenwirken unterschiedlicher Standortfaktoren in einer Standortgüteklasse zum Ausdruck bringt. Schneiden sich die einzelnen Zuwachskurven bedeutet dies, dass nach dem Schnittpunkt die jährlichen Zuwächse der schlechteren Bonität bzw. des schlechteren Standortes über denen der höheren Bonität und

somit des besseren Standortes liegen. ASSMANN (1961) schließt diesen Sachverhalt bei der Ertragstafelkonstruktion aus und postuliert die gleichmäßige Schichtung von Zuwachskurven als *conditio sine qua non* für moderne Bonitätssysteme. Es leitet sich demnach die Frage ab, ob das Überschneiden der Zuwachsgänge ein Artefakt des unterstellten mathematischen Modells ist, oder ob tatsächlich für dieses Wuchsverhalten eine plausible Erklärung gefunden werden kann. Um diese Frage zu beantworten, muss zunächst erwähnt werden, dass der Verlauf von harmonischen Höhenwachstumskurven spätestens seit der Veröffentlichung von GUTTENBERG (1915) stark diskutiert wird. Dieser hatte anhand von Stammanalysen gezeigt, dass es sogar bei gleichen Höhenbonitäten, bedingt durch verschiedene Wuchsgebiete, zu unterschiedlichen Verläufen des Höhenwachstums kommen kann. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen WECK (1955), FIEDLER (1978), MONSERUD (1984), WENK und GEROLD (1991) sowie STERBA und ECKMÜLLER (2010). Besonders hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang die Arbeit von WENK und GEROLD (1991). In dieser Arbeit wird ein heuristisches Wachstumsmodell vorgestellt, das, bedingt durch die Ausscheidung von drei Wachstumstypen (L, M und S), drei Bonitätssysteme mit jeweils unterschiedlichen Höhenwachstumsgängen für die gleiche Bonität herleiten kann (vgl. auch WENK et al. 1985). Es könnte demnach geschlossen werden, dass es aufgrund der großen Grundgesamtheit der verwendeten Versuchsflächendaten zu einem Verschnitt unterschiedlicher Wachstumstypen kommt. Der Datensatz müsste demnach nach standörtlichen Gesichtspunkten, Aspekten der Genetik und Provenienz etc. weiter differenziert werden. Wenn der Datensatz der Fichten-Versuchsflächen beispielsweise auf die Klimastufen der höheren Berglagen (H) des Erzgebirges eingegrenzt wird, ist die harmonische Schichtung des Bonitätsfächers wieder hergestellt (vgl. Abb. 3-30).

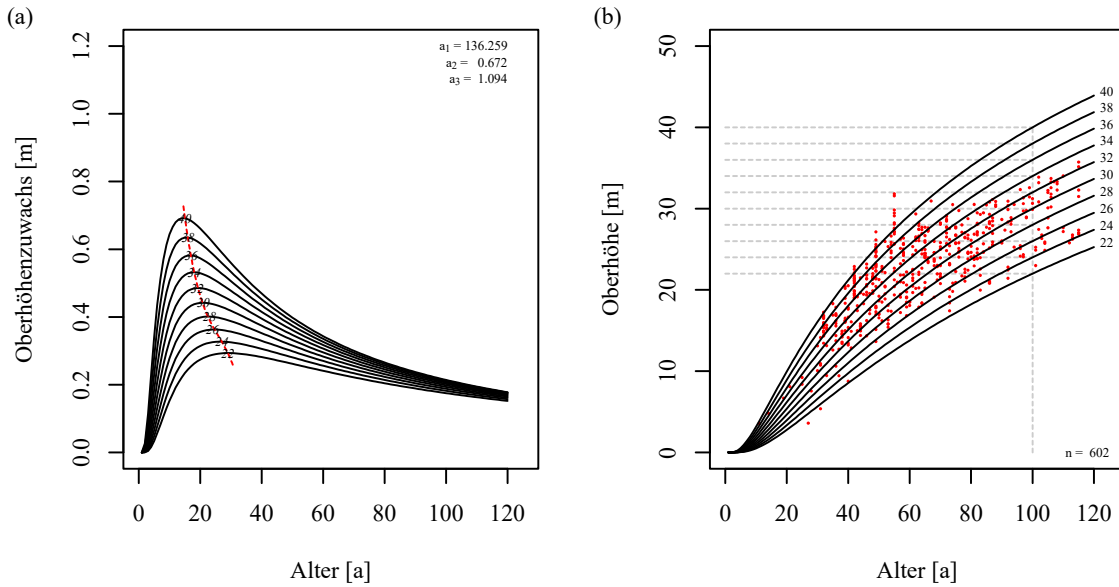


Abb. 3-30: (a) Oberhöhenzuwachs- bzw. (b) Alters-Oberhöhenfächer nach SLOBODA (1971) für die Fichten-Versuchsflächen der höheren Lagen des Erzgebirges ($n = 602$)

Eine andere mögliche Antwort auf diese Frage könnte der altersabhängige Rhythmus des Höhenwachstumszyklus eines Baumes oder altersgleichen Reinbestandes bieten. Nach einem Vorschlag von ASSMANN (1961) wird der Lebenszyklus eines Baumes in drei Phasen unterteilt. Diese „Lebensphasen“ können an jeder beliebigen Zuwachsfunktion nachvollzogen werden. Im folgenden Beispiel wird eine einfache Wachstums- bzw. Zuwachsfunktion nach MICHAÏLOV und TERASAKI (vgl. WENK et al. 1990, S. 38) hierfür verwendet. Die Wachstumsfunktion ist in Formel 3-16 bzw. die dazugehörige Zuwachsfunktion (Differentialgleichung 1. Ordnung) in Formel 3-17 dargestellt. Die Funktion hat einen Wendepunkt bei $t = \frac{a_2}{2}$ sowie eine Asymptote bei $\lim_{t \rightarrow \infty} h(t) = a_1$.

$$h_o(t) = a_1 \cdot \exp\left(\frac{-a_2}{t}\right) \quad \text{Formel 3-16}$$

$$h'_o(t) = \frac{dh_o}{dt}(t) = \frac{a_1 \cdot a_2 \cdot \exp\left(-\frac{a_2}{t}\right)}{t^2} \quad \text{Formel 3-17}$$

Mit:

- h_o = Oberhöhe [m]
- $h'_o(t)$ = laufender jährlicher Oberhöhenzuwachs im Alter t
- t = Alter [a]
- a_1, a_2 = Parameter

In Abb. 3-31 (a) wird der Lebenszyklus eines Baumes auf die zuvor genannte Zuwachsfunktion (Formel 3-16) übertragen. Dargestellt ist die Höhen-Zuwachskurve, welche zwei Wendepunkte (P_1, P_3) und einen Gipfel (Kulminationspunkt) aufweist. Der Kulminationspunkt (P_2) der Zuwachskurve fällt mit dem Wendepunkt der in Abb. 3-31 (b) dargestellten Wachstumskurve zeit-

lich zusammen. Durch die beiden Wendepunkte der dargestellten Höhen-Zuwachsfunktion lassen sich drei Phasen abgrenzen. Die erste Phase, welche als Phase der Jugend oder des Aufschwungs bezeichnet wird, liegt zwischen dem Startpunkt und dem ersten Wendepunkt (P_1) der Zuwachskurve (grün schattiert). Zwischen dem ersten (P_1) und zweiten Wendepunkt (P_3) verläuft die Wachstumsfunktion konvex zur X-Achse. Dieses Teilstück, welches den Kulminationspunkt (P_2) enthält, wird als Vollkraftphase bezeichnet (blau schraffiert). Ab dem zweiten Wendepunkt nehmen die Zuwachswerte langsam ab. Die letzte Phase wird als Alters- oder Abschwungsphase bezeichnet (rot schraffiert). Sie befindet sich hinter dem zweiten Wendepunkt (P_2) der Zuwachsfunktion. Wie Abb. 3-31 (b) zeigt, nähert sich die Wachstumsrate umso mehr der Asymptote, je näher der Zeitpunkt natürlicher Mortalität rückt. Der asymptotische Wert einer Wachstumsfunktion steht demnach in Bezug zu den maximalen Höhen, die Bäume oder Waldbestände innerhalb ihrer Lebenszeit erreichen können. In Abb. 3-31 (c, d) werden Standorte mit unterschiedlicher Wuchskraft (Bonitäten) gegenübergestellt. Es wird deutlich, dass die Lebensphasen auf dem „besseren“ Standort wesentlich kürzere temporale Abschnitte einnehmen als auf dem „schlechteren“ Standort. Beschleunigtes Wachstum führt demnach auch zu schnellerem Altern und schnellerer Mortalität (KAHLE 2011). Während sich auf dem besseren Standort die Bäume bereits in der Abschwungsphase befinden, steigt der Höhenzuwachs auf dem schlechteren Standort weiterhin an (Vollkraftphase). Zum Schnittpunkt der Zuwachsfunktionen kommt es, wenn der Kulminationspunkt des Höhenwachstums auf dem schlechteren Standort sehr spät erfolgt und die asymptotischen Werte (a_1) der Wachstumsfunktionen für guten und schlechten Standort sich annähern (vgl. Abb. 3-31 (d)).

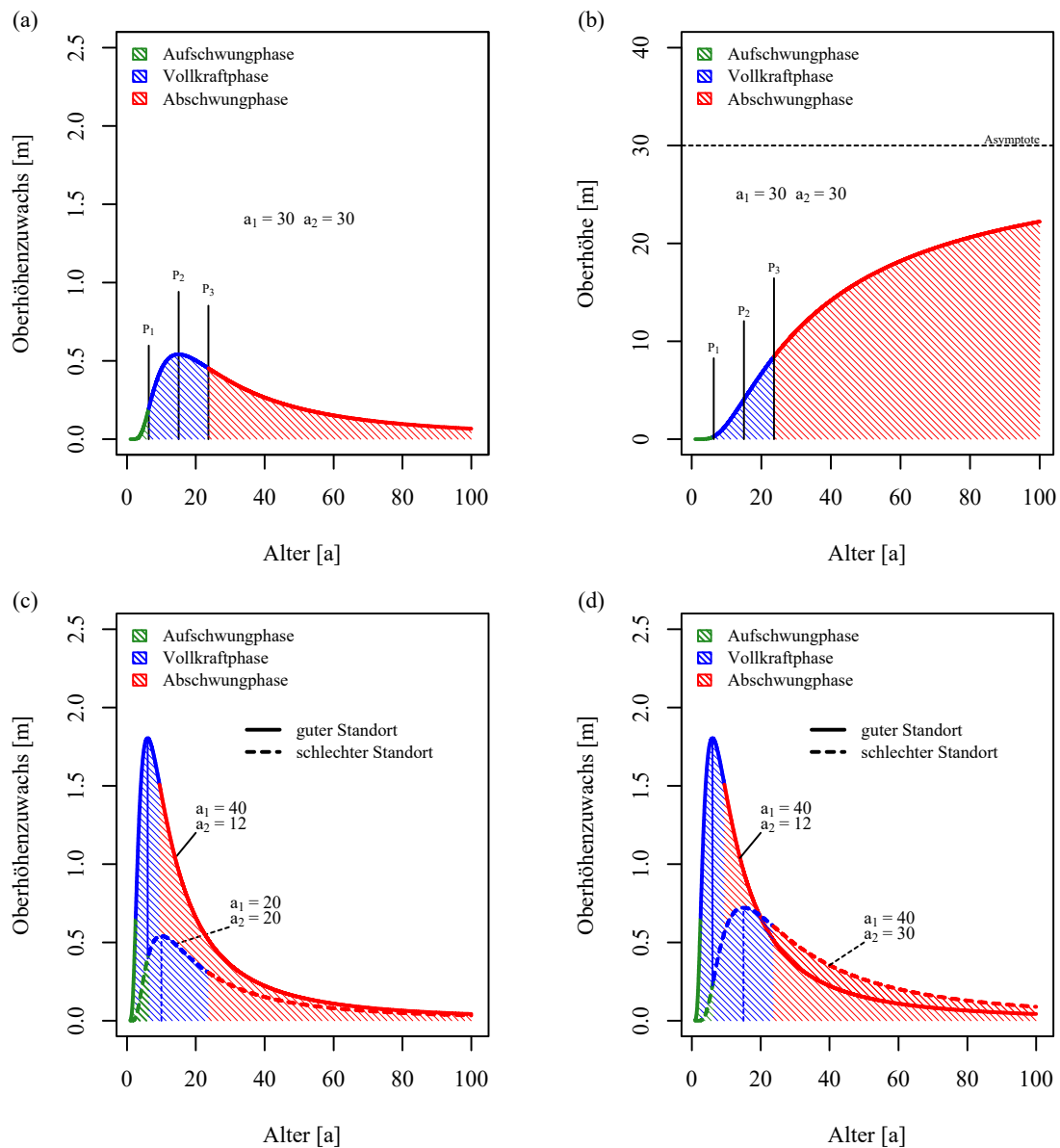


Abb. 3-31: Schematische Darstellung des Höhenwachstums, bezogen (a, c, d) auf die abgeleitete Zuwachsfunktion bzw. (b) auf die Wachstumsfunktion nach MICHAÏLOV und TERASAKI (vgl. WENK et al. 1990, S. 38)

Es stellt sich demnach die Frage, ob Bäume auf qualitativ unterschiedlichen Standorten unterschiedlich hoch werden oder ob die Bäume schlechterer Bonität sich aufgrund ihrer längeren Lebensspanne der maximalen Endhöhe besserer Bonitäten annähern können. Für den ersten Fall müsste jede Bonität über eine eigene Asymptote verfügen, im zweiten Fall würden sich die durch die Bonität ausgedrückten Wachstumsgänge einem asymptotischen Wert annähern.

Die eigenen Untersuchungen zeigen, dass die von SLOBODA (1971) aufgestellte Funktion beide Fälle modellieren kann. Entscheidend ist, welchen Wert der Parameter a_3 (vgl. Formel 3-15) einnimmt. Bei einem Wert von $a_3 > 1$ erhält jeder bonitätsspezifische Wachstumsgang seine eigene Asymptote. Bei einem Wert von $a_3 < 1$ finden wir die Asymptote bei a_1 und es kommt zu einem Überschneiden der Zuwachsfunktionsschar. Die mathematische Herleitung der

Asymptoten für die von SLOBODA (1971) aufgestellte Funktion befindet sich in Anhang 13. Um das Systemverhalten der SLOBODA-Funktion zu verdeutlichen, werden beide Fälle in Abb. 3-32 gegenübergestellt.

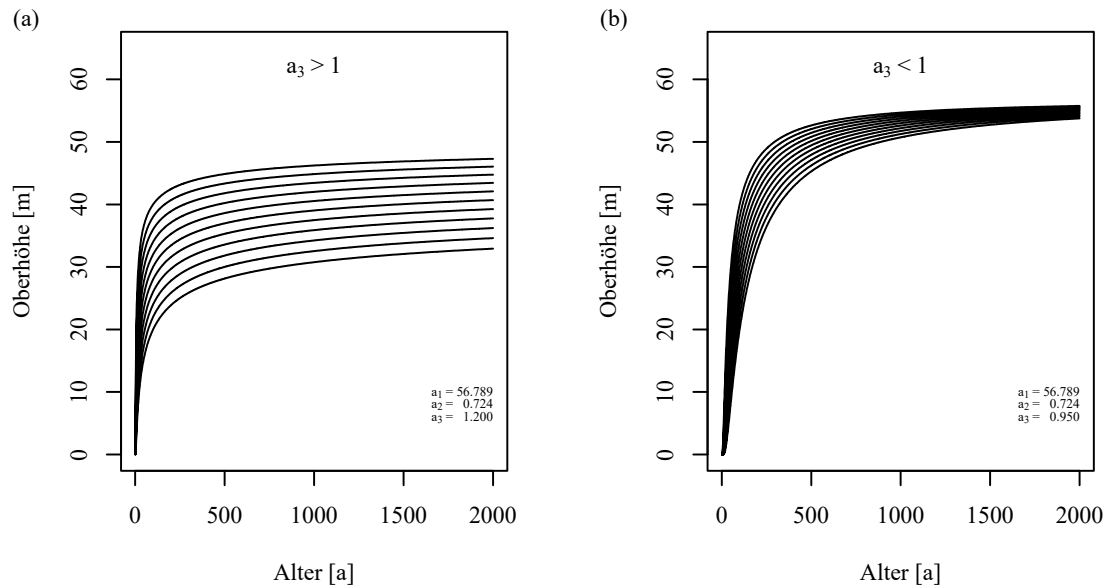


Abb. 3-32: Systemverhalten der Funktion nach SLOBODA (1971) für (a) $a_3 > 1$ bzw. (b) $a_3 < 1$

Aus den zuvor getätigten Aussagen wird deutlich, dass der Kenntnis der standortabhängigen Maximalhöhe von Bäumen eine besondere Bedeutung bei der Modellierung eines höhenspezifischen Bonitätsfächers zukommt. PESCHEL (1938) weist darauf hin, dass bei Kenntnis der Höhe, die ein Baum zum Zeitpunkt der Kulmination hat, dieser ca. 25 % der zu erwartenden „Endhöhe“ erreicht. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommt MIßBACH (2015), welcher in seinen Untersuchungen die Hypothese aufstellt, dass die theoretische Endhöhe eines Bestandes fünfmal größer (20 %) als die Höhe beim Auftreten des Zuwachsmaximums ist. Um diese Aussagen zu überprüfen, wurde in Abb. 3-33 (b) die relative Beziehung der Kulminationshöhe (h_k) ins Verhältnis zur Endhöhe (h_E), bezogen auf den zuvor modellierten Oberhöhenbonitätsfächer für die Baumart Fichte (Abb. 3-33 (a)), dargestellt. Es wird deutlich, dass die Fichte in Abhängigkeit von der Oberhöhenbonität (h_{100} : 20 bis 40 m) in einer Altersspanne von 13 bis 49 Jahren bei einer Höhe zwischen 6,5 bis 7,5 m kulminiert. Bezogen auf eine unterstellte Umtriebszeit von 120 Jahren, erreicht die Fichte bei einer Oberhöhenbonität von 20 m einen Anteil von 32 % bzw. bei einer Oberhöhenbonität von 40 m einen Anteil von 15 % ihrer Endhöhe. Die Aussage von PESCHEL (1938) bzw. MIßBACH (2015) kann hinsichtlich der Baumart Fichte um die zuvor genannten Werte modifiziert werden.

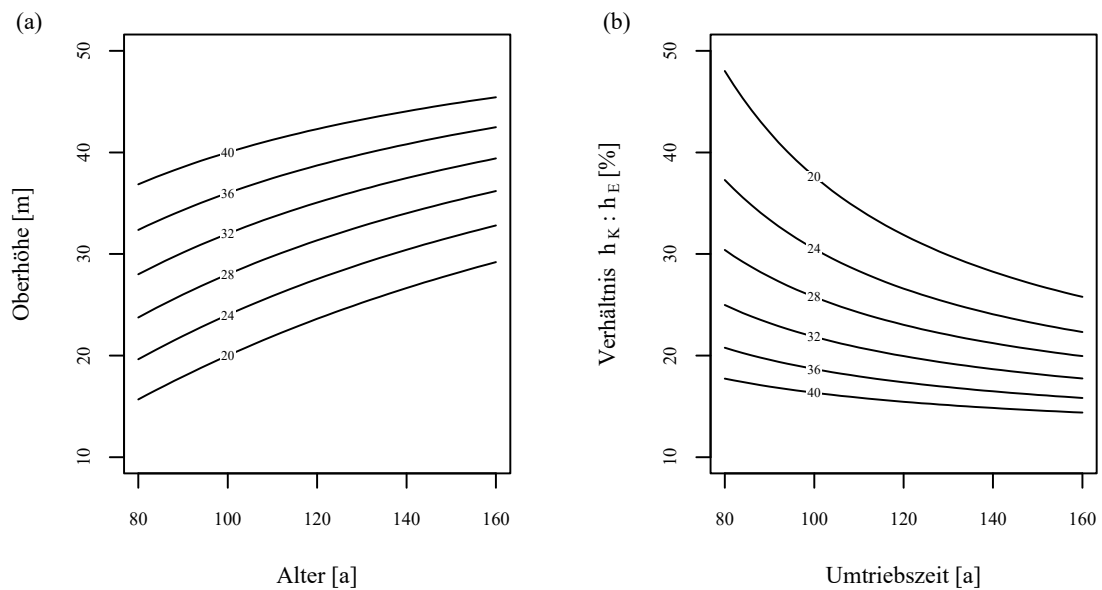


Abb. 3-33: (a) Auszug aus dem Oberhöhenbonitätsfächer für die Gemeine Fichte. (b) Gegenüberstellung der relativen Beziehung [%] der Kulminationshöhe (h_K) in Bezug zur Endhöhe (h_E) für unterschiedliche Umtriebszeiten (80 bis 160 Jahre), bezogen auf den zuvor dargestellten Oberhöhenbonitätsfächer der Gemeinen Fichte.

Um zu überprüfen, ob der Oberhöhenbonitätsfächer der Fichte mit den durch die sächsische Forsteinrichtung erhobenen Alters-Höhen-Werten harmoniert, erfolgt in Abb. 3-34 (a) eine Gegenüberstellung. Verwendung fanden alle im Zuge der Forsteinrichtung für den sächsischen Staatswald erfassten Fichten-Reinbestände zum Stichjahr 2013²⁸. Zusätzlich wurde zur Unterstützung des optischen Eindrucks der dargestellten Variablen eine (nicht-parametrische) Glättungskurve hinterlegt (rot-strichliert). Die Glättungskurve beruht auf der sogenannten „loess“-Methode (locally estimated scatter smoother) und dient einer explorativen Darstellung von Variablenbeziehungen. Die Intensität der Blaufärbung informiert über die lokale Gewichtung der einzelnen Datenpunkte im Verhältnis zur Glättungskurve. Details zu dieser Methode können u. a. bei DORMANN und KÜHN (2012) nachgelesen werden. Das Vorgehen empfiehlt sich, weil Forsteinrichtungsdaten keine „echte Zeitreihe“ darstellen, sondern die Alters-Oberhöhenbeziehung sich aus einer Vielzahl räumlich getrennter und über das Altersspektrum gestreuter Bestände abbildet (unechte Wuchsreihe). Weiterhin muss darauf hingewiesen werden, dass, analog der betriebsinternen Arbeitsanweisung zur Ausführung von Forsteinrichtungsarbeiten im sächsischen Staatswald (WAB 60 in Fassung vom 12.08.2005), Waldbestände bis zu einer

²⁸Die Nutzung der aus dem Forsteinrichtungssystem Sachsen (FESA) entstammenden Daten erfolgt mit freundlicher Genehmigung des Staatsbetriebs Sachsenforst im Zuge einer Kooperationsvereinbarung mit der Technischen Universität Dresden. Die Daten beziehen sich auf das Stichjahr 2013.

Höhe von 12 m dynamisch bonitiert²⁹ werden. Für Vergleichszwecke wurde in Abb. 3-34 (b) die Oberhöhen-Altersbeziehung aus der Fichten-Ertragstafel nach WENK et al. (1985) hinterlegt. Beachtet werden muss, dass sich die bonitätsspezifischen Wachstumsgänge der Tafel nach WENK et al. (1985) auf die Mittelhöhe im Alter 100 beziehen.

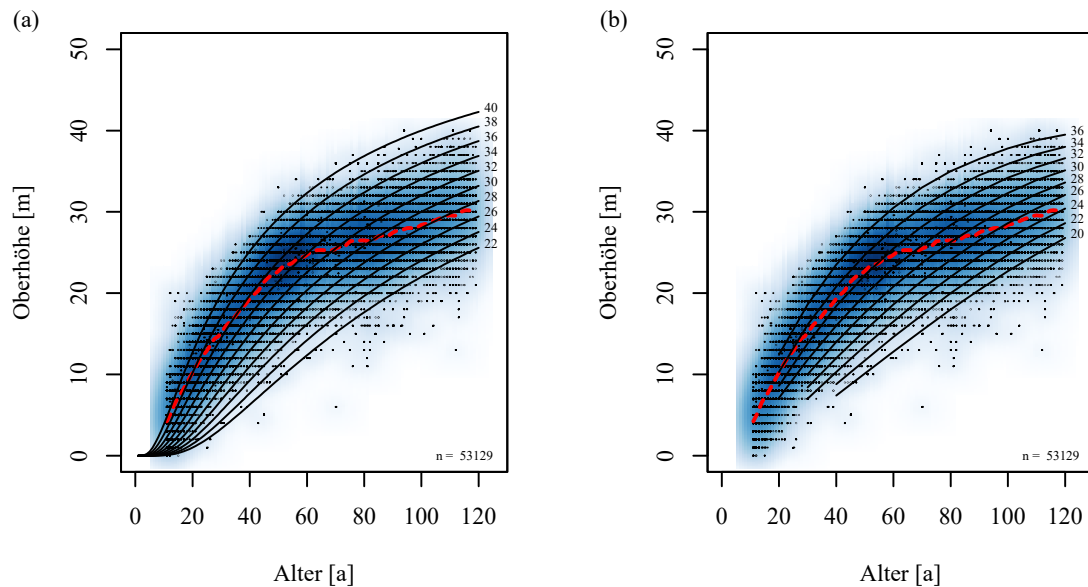


Abb. 3-34: Vergleich der durch die sächsische Forsteinrichtung erhobenen Alters-Höhen-Werte mit (a) dem konstruierten Oberhöhenbonitätsfächer für die Gemeine Fichte bzw. (b) dem Oberhöhenfächer der Tafel nach WENK et al. (1985). Zusätzlich dargestellt wurden die (nicht-parametrische) Glättungskurve (rot strichliert) sowie die darauf aufbauende lokale Gewichtung der einzelnen Wertepaare.

Bei der in Abb. 3-34 vorgenommenen Gegenüberstellung kann ein Abfallen des geglätteten Wachstumsganges gegenüber dem Bonitätsfächer beobachtet werden. Dies gilt sowohl für den konstruierten (Abb. 3-34 (a)) als auch den Oberhöhenfächer der Tafel von WENK et al. (1985) (vgl. Abb. 3-34 (b)). Daraus kann abgeleitet werden, dass jüngere Bestände (< 60 Jahre) ein wesentlich besseres Höhenwachstum gegenüber den Altbeständen aufweisen. GEROLD und GEROLD (2013) gehen davon aus, dass diese guten bis sehr guten Bonitäten prognostisch auch in Zukunft ihr Wachstum beibehalten werden. Ältere Waldbestände hingegen haben im Allgemeinen schlechtere Bonitäten. Inwieweit dieser Sachverhalt zu erklären ist, wird in Kap. 3.2.1.3 weiterführend behandelt.

²⁹ Bei der dynamischen Bonitierung wird diejenige Ertragsklasse gewählt, die eine Baumart in ähnlich gewachsenen Beständen auf vergleichbarem Standort erreicht. Konkret bedeutet dies, dass in der sächsischen Forsteinrichtung Waldbestände bis einschließlich 12 m in Anlehnung an benachbarte, möglichst standörtlich vergleichbare junge und mittelalte Bestände bonitiert werden. Die Bonitierung erfolgt demnach ohne die Verwendung der Alters-Höhenbeziehung (statische Bonitierung).

3.2.1.2 Ertragstafeln als Maß für baumartenspezifische Wuchseleistungen in Sachsen

Soll für den Wuchsraum Sachsen aufgezeigt werden, welche Baumart die höchste Volumen- bzw. Massenleistung erbringt, bietet ein artspezifischer Vergleich der mittleren $dGZ_{50/100}$ -Bonitäten eine erste Annäherung an diese Fragestellung (vgl. Kap. 3.2.1). In Abb. 3-35 ist dies für die wichtigsten Wirtschaftsbaumarten dieser Region umgesetzt. Dargestellt sind die Verteilungen der $dGZ_{50/100}$ -Bonitäten aller im Zuge der Forsteinrichtung für den sächsischen Staatswald erfassten Reinbestände. Die Bonitierung beruht auf den im Wuchsraum Sachsen angewendeten Ertragstafel-Modellen. Eine Übersicht der Modelle in Anlehnung an die Vorgaben der Sächsischen Landesanstalt für Forsten (2000) befindet sich in Anhang 2. Weil die Originaltafelwerte relative bzw. absolute Höhenbonitäten wiedergeben, wurden sie funktional ausgeglichen und auf ganzzahlige $dGZ_{50/100}$ -Bonitäten umgerechnet. Es soll zudem erwähnt werden, dass nicht für jede Baumart eine dem sächsischen Wuchsraum angepasste Ertragstafel vorhanden ist. Deshalb erfolgt bei der Bonitierung eine Zuordnung der Baumarten. So wird beispielsweise die Baumart Küsten-Tanne nach der Ertragstafel für Douglasie von BERGEL (1985) bewertet. Eine Übersicht der im Forsteinrichtungssystem Sachsen bei Bonitierung anzuwendenden Baumartenzuordnungen befindet sich in Anhang 3 (vgl. Sächsische Landesanstalt für Forsten 2000).

In Abb. 3-35 (a) wird als Leistungsmaßstab das Derbholzvolumen [$\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$], bezogen auf das Alter 50³⁰ bzw. 100 Jahre, verwendet. Es wird ersichtlich, dass die mittlere Volumenleistung der $dGZ_{50/100}$ -Bonitäten in einer Spanne zwischen $4,69 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ (Gemeine Birke) bis $11,97 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ (Küsten-Tanne) schwanken. Die vier Baumarten mit den durchschnittlich höchsten $dGZ_{50/100}$ -Bonitäten [$\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$] sind in aufsteigender Reihenfolge die Weymouth-Kiefer ($\emptyset 11,5 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$), die Gemeine Fichte ($\emptyset 11,54 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$), die Douglasie ($\emptyset 11,67 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$) und die Küsten-Tanne ($\emptyset 11,97 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$). Wie bereits in Kap. 2.3 erläutert, kann die tatsächliche Produktivität von Waldbeständen nur über den Vergleich der Holzmassen quantifiziert werden. Deshalb wurde in Abb. 3-35 (b) unter Verwendung der Raumdichte (vgl. Kap. 2.3) eine Umrechnung in Derbholzmasse [$\text{t}_{\text{atro}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$] vorgenommen. Abb. 3-35 (b) zeigt, dass die mittlere Massenleistung der $dGZ_{50/100}$ -Bonitäten [$\text{t}_{\text{atro}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$] in einer Spanne zwischen $2,0 \text{ t}_{\text{atro}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ (Gemeine Birke) bis $4,83 \text{ t}_{\text{atro}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ (Douglasie) liegt. Die vier Baumarten mit den durchschnittlich höchsten $dGZ_{50/100}$ -Bonitäten [$\text{t}_{\text{atro}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$] sind

³⁰Für die Baumarten Lärche, Gemeine Birke, Robinie, Pappel und Rot-Erle sind die Ertragsklassen als dGZ_{50} -Bonitäten ausgewiesen.

die Gemeine Fichte ($\bar{O} 4,37 \text{ t}_{\text{atro}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$), die Robinie ($\bar{O} 4,37 \text{ t}_{\text{atro}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$), die Küsten-Tanne ($4,46 \text{ t}_{\text{atro}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$) sowie die Douglasie ($4,83 \text{ t}_{\text{atro}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$).

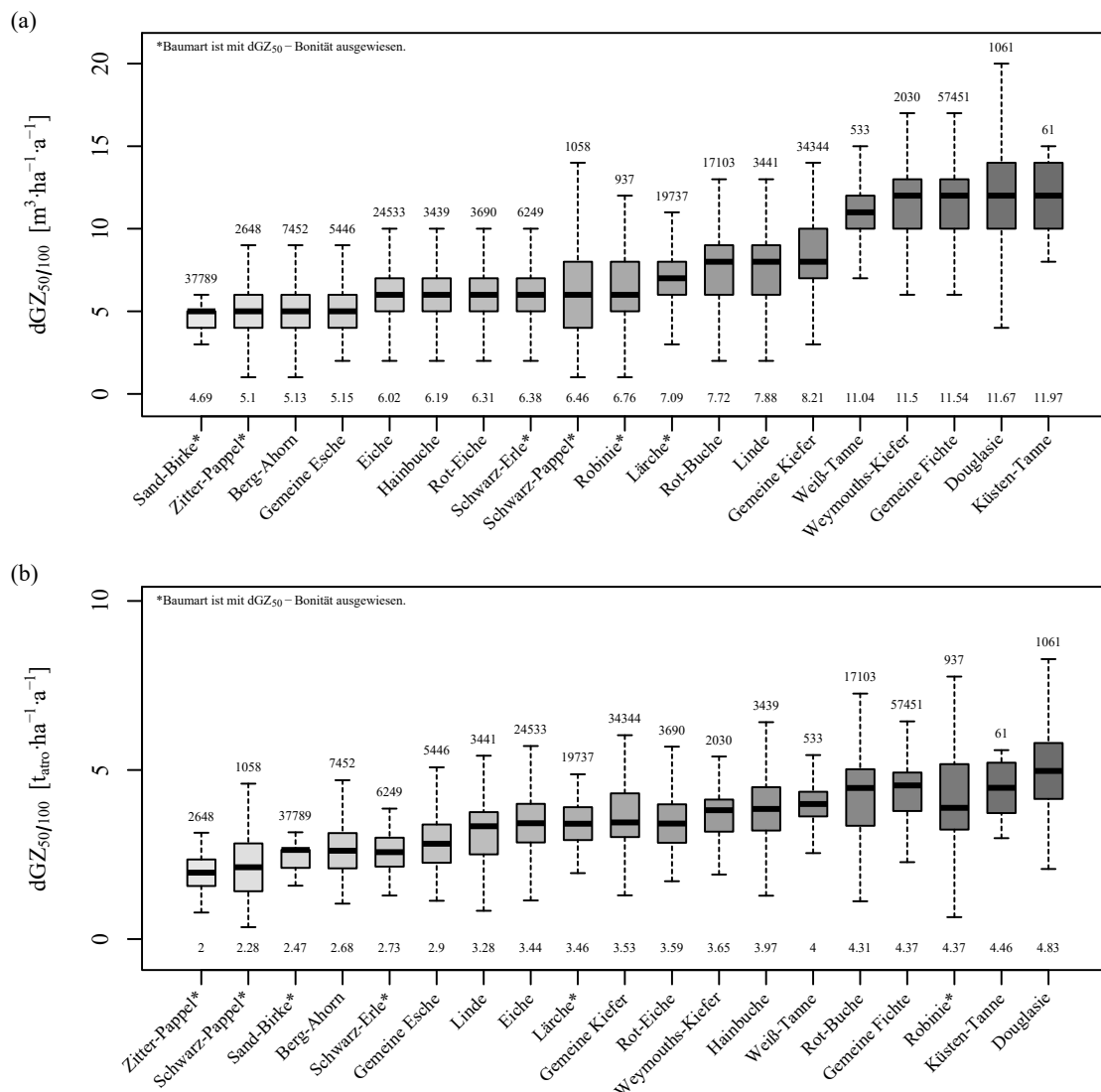


Abb. 3-35: Vergleich der $dGZ_{50/100}$ -Bonitäten, bezogen (a) auf das Derbholzvolumen [$\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$] bzw. (b) auf die Derbholzmasse [$\text{t}_{\text{atro}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$]. Die Daten beziehen sich auf die in der Forsteinrichtung für den sächsischen Staatswald erfassten Reinbestände, bezogen auf das Stichjahr 2013.

Der in Abb. 3-35 vorgestellte Vergleich unterstellt, dass die Bestände den bonitätsspezifischen Wachstumsgang (Volumenentwicklung bis ins Alter von 100 Jahren) einhalten und dass eine gleichmäßige Verbreitung der einzelnen Baumarten über das gesamte Standort- bzw. Bonitätsspektrum vorliegt. Wenn diese zwei Voraussetzungen nicht gegeben sind, könnten beispielsweise die niedrigen $dGZ_{50/100}$ -Bonitäten der Baumart Zitter-Pappel auf fehlerhafte Ertragsstufwerte oder auf das primäre Vorkommen auf ärmeren Standorten zurückgeführt werden. In beiden Fällen spiegelt das Ergebnis nicht die tatsächliche Wuchskraft der Baumarten wider. Der in Abb. 3-35 vorgenommene Vergleich der Bonitätsverteilungen kann dementsprechend

nur eine erste Annäherung an die Fragestellung nach der Ertragsleistung einzelner Baumarten sein.

Eine wesentlich bessere Kennziffer zur Durchführung von Ertragsvergleichen zwischen verschiedenen Baumarten bietet der durchschnittliche Gesamtzuwachs zum Zeitpunkt seiner Kulmination (dGZ_{max}). In Abb. 3-36 werden anhand der für Sachsen gültigen Ertragstafelmodelle (vgl. Anhang 2) die maximalen durchschnittlichen Gesamtzuwächse an Baumholzmasse (dGZ_{max}), differenziert nach Baumart und Bonität, gezeigt. Zusätzlich dargestellt ist das bonitätsspezifische Kulminationsalter. Die Umrechnung der Tafelmodelle von Derbholzvolumen in Baumholzmasse erfolgte unter Verwendung des in Kap. 2.3.2 vorgestellten Algorithmus.

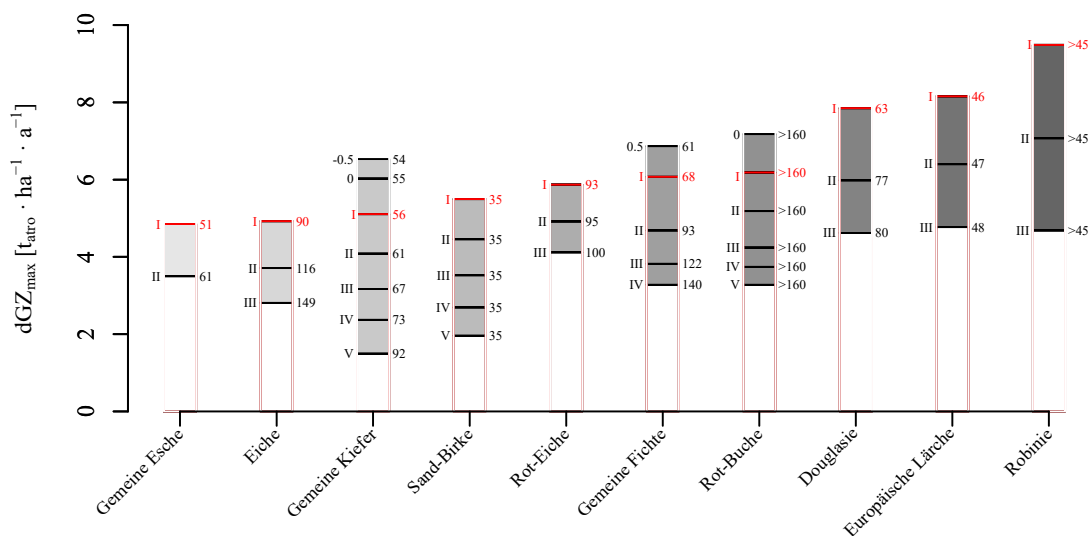


Abb. 3-36: Vergleich der maximalen durchschnittlichen Gesamtzuwachsleistung an **Baumholzmasse** (dGZ_{max}) unterschiedlicher Baumarten anhand der für Sachsen gültigen Ertragstafeln. Neben den Säulen sind die jeweiligen relativen Bonitäten (links) bzw. das Kulminationsalter des dGZ_{max} (rechts) angegeben. Für eine bessere Vergleichbarkeit wurde die I relative Bonität rot markiert.

Aus Abb. 3-36 geht hervor, dass der Zeitpunkt, an dem der dGZ_{max} erreicht wird, abhängig von der Baumart und der durch die Bonität beschriebenen Standortgüte ist. Festzuhalten ist, dass bei den meisten Tafeln der durchschnittliche Gesamtzuwachs bei abnehmender Standortgüte bzw. sich verschlechternder Bonität später kulminiert. Die Tafel von LOCKOW (1998) für die Sand-Birke besitzt konstruktionsbedingt keine bonitätsspezifische Verlagerung des Kulminationsalters.

3.2.1.3 Ertragstafeln als Maßstab für den Klimawandel

In den letzten Jahrzehnten wiesen eine Vielzahl waldwachstumskundlicher Untersuchungen darauf hin, dass die tatsächlichen Zuwachsgänge starke Veränderungen in ihren Verlaufskurven

gegenüber dem ertragstafelspezifischen Normalwachstum zeigen (FRANZ 1983, PRETZSCH 1987, 1992, RÖHLE 1995, SPIECKER et al. 1996, BÖSCH 2001, BOISVENUE und RUNNING 2006, PRETZSCH et al. 2014b). In diesem Kapitel wird deshalb der Frage nachgegangen, wie das Wachstum und somit die Ertragsleistung von Waldbeständen durch Klima und Standortveränderung beeinflusst werden und ob Ertragstafeln als Maßstab für den Klimawandel eingesetzt werden können. Einen ersten Anhaltspunkt für die Beantwortung der Frage können die Daten der sächsischen Forsteinrichtung geben. In Abb. 3-37 werden die dGZ_{100} -Bonitäten unterschiedlicher Begründungsperioden für ausgewählte Baumarten gegenübergestellt. Verglichen werden die Bonitätsverteilungen aller Bestände aus den Begründungsjahren 1961 bis 1990 mit den Beständen aus den Begründungsjahren 1861 bis 1960 (vgl. Abb. 3-37 (a)) bzw. 1931 bis 1960 (vgl. Abb. 3-37 (b)). Auf das Alter bezogen wird dementsprechend die Bonitätsverteilung aller Bestände zwischen 23 bis 52 Jahren den älteren Beständen im Alter von 53 bis 152 Jahren bzw. 53 bis 82 Jahren gegenübergestellt³¹.

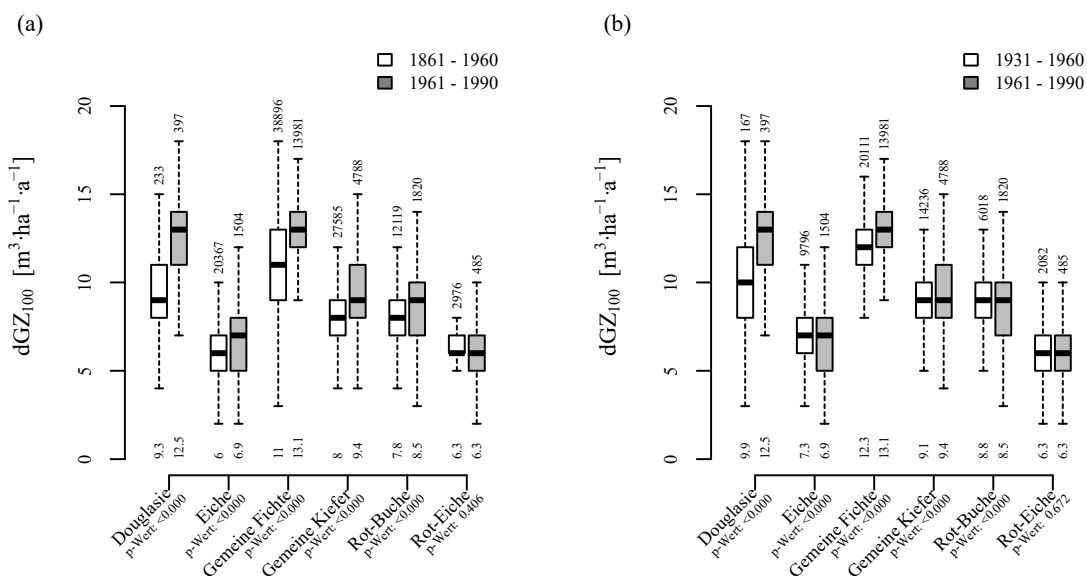


Abb. 3-37: Gegenüberstellung der dGZ_{100} -Bonitätsverteilungen aller Bestände aus den Begründungsjahren 1961 bis 1990 mit den Beständen aus den Begründungsjahren (a) 1861 bis 1960 bzw. (b) 1931 bis 1960. Die Daten beziehen sich auf die in der Forsteinrichtung für den sächsischen Staatswald erfassten Reinbestände, bezogen auf das Stichjahr 2013.

Betrachten wir die Nadelbaumarten, so zeigt sich ein einheitlich signifikanter³² Anstieg der mittleren Bonitäten. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass beispielsweise Fichtenbe-

³¹ Die Forsteinrichtungsdaten beziehen sich auf das Stichjahr 2013.

³² Verwendet wurde der Wilcoxon-Mann-Whitney-Test nach MANN und WHITNEY (1947).

stände, die nach 1960 begründet wurden, auf wesentlich besseren Standorten stehen. Uneinheitlich zeigt sich das Ergebnis bei den Laubbäumen. Für die Baumarten Eiche³³ und Rot-Buche ist ein signifikanter Anstieg der dGZ_{100} -Bonitäten nachweisbar. Bei der Rot-Eiche (p-Wert: 0,406) ist keine signifikante Veränderung beim Vergleich der Begründungszeiträume erkennbar. In Abb. 3-38 wird exemplarisch für die Baumarten Gemeine Fichte, Rot-Buche, Gemeine Kiefer und Eiche die Veränderung der Bonitätsverteilung für die Begründungsjahre 1860 bis 1990, gestaffelt in 10-Jahresperioden, dargestellt.

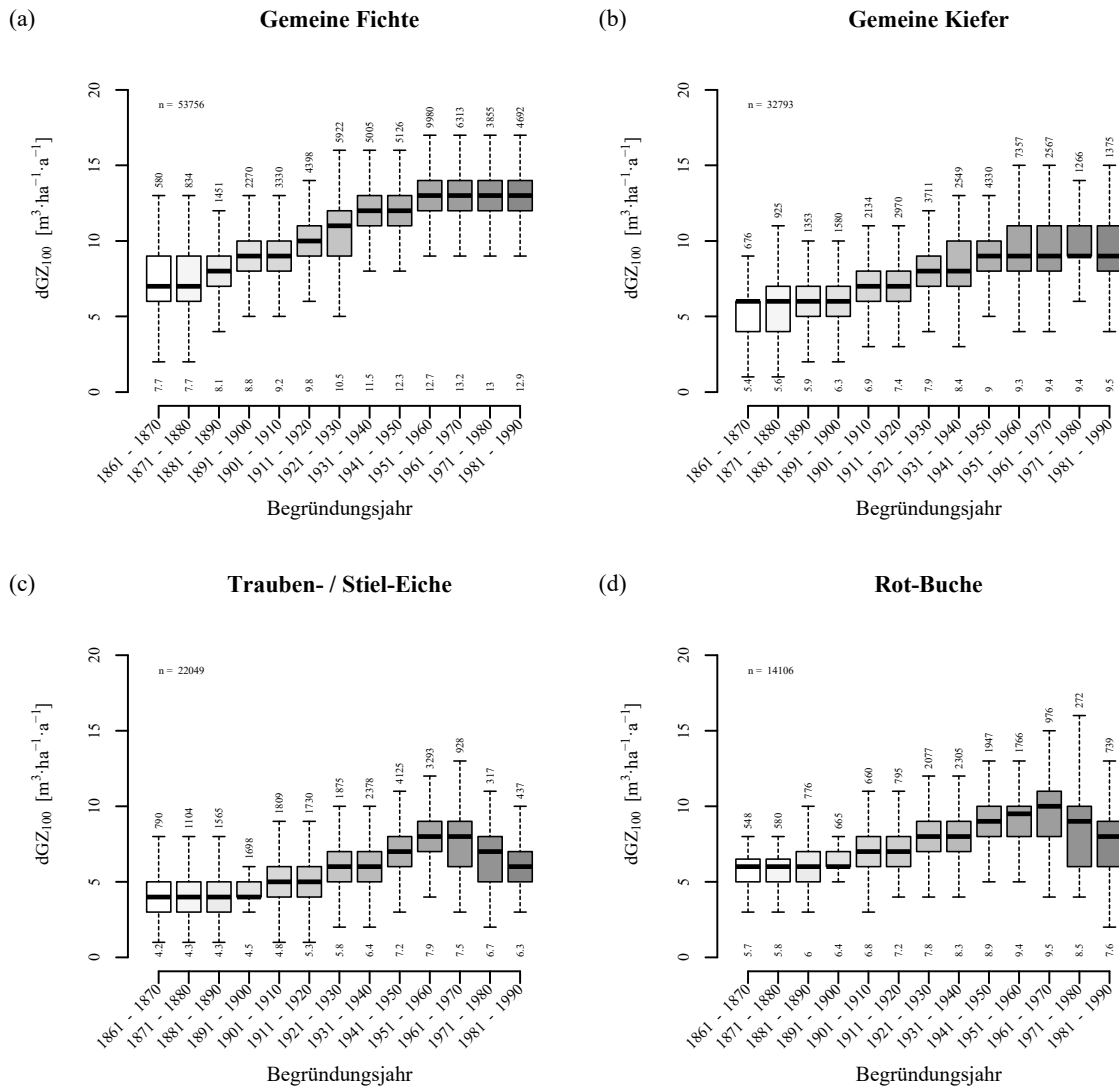


Abb. 3-38: Darstellung der Bonitätsverteilung für die Begründungsjahre 1861 bis 1990 (gestaffelt in 10-Jahresperioden) für ausgewählte Baumarten. Die Daten beziehen sich auf die in der Forsteinrichtung für den sächsischen Staatswald erfassten Reinbestände, bezogen auf das Stichjahr 2013.

Aus Abb. 3-38 geht hervor, dass bei allen vier Baumarten ein zum Teil erheblicher Anstieg der mittleren dGZ_{100} -Bonität, bezogen auf die Begründungsdekaden von 1860 bis 1970, auftritt.

³³ Trauben-Eiche (*Quercus petraea* (MAT.) LIEBL.) und Stiel-Eiche (*Quercus robur* L.) werden bei der Betrachtung zusammengefasst.

Ebenfalls für alle vier Baumarten ist ein ab 1970 einsetzender stagnierender (Gemeine Fichte, Gemeine Kiefer) bis rückläufiger Trend (Eiche, Rot-Buche) der mittleren dGZ_{100} -Bonität nachweisbar. Bei Annahme unveränderter Umweltvariablen sowie einer Gleichverteilung der Standorte wäre zu erwarten, dass sowohl Streuung als auch Median und Mittelwert der Bonitätsverteilung gleich sind und keine signifikanten Unterschiede zwischen den Wuchsperioden auftreten. Die Ergebnisse weisen jedoch darauf hin, dass Alter und dGZ_{100} -Bonität positiv korreliert sind. Oftmals wird aus diesem Befund fälschlicherweise die Schlussfolgerung abgeleitet, dass die besseren Bonitäten bzw. das „verbesserte Wachstum“ jüngerer Waldbestände allein auf einen Standortdrift zurückzuführen wäre. Es muss aber festgehalten werden, dass es andere Gründe gibt, welche eine mögliche Erklärung geben könnten: Zunächst ist davon auszugehen, dass Bestände auf wuchsstarken Standorten ihr Produktionsziel in einer kürzeren Umtriebszeit erreichen als Waldbestände auf einem schlechten Standort. Daraus kann abgeleitet werden, dass Fichtenbestände auf sehr guten Standorten ein Alter von 160 Jahren nicht mehr erreichen, sondern vorher ausscheiden (Zielstärkennutzung). Die kürzere Umtriebszeit auf „besseren“ Standorten lässt es zudem wahrscheinlicher werden, dass junge Bestände auf ihnen stocken. Zu erklären ist dies durch den mathematischen Satz zur Berechnung bedingter Wahrscheinlichkeiten (BAYES-Theorem). Ein anschauliches Rechenbeispiel, welches diesen Sachverhalt genauer erläutert, wird in Anhang 14 gegeben.

Um die zuvor beschriebene Problematik mit den aus der Forsteinrichtung stammenden Daten zu umgehen, wird im Folgenden versucht, anhand echter Zeitreihen (Versuchsflächendaten) eine Veränderung des Wachstums in Abhängigkeit von der Wachstumsperiode nachzuweisen. Als Datensatz finden die bereits in Kap. 3.2.1.1 vorgestellten Versuchsflächen der Gemeinen Fichte Verwendung (vgl. Anhang 12). Für die einzelnen Datensätze wurden aus der Tafel von WENK et al. (1985) die relativen Bonitäten über die Oberhöhe abgeleitet. Anschließend konnten die berechneten Bonitäten (Bonität zum Zeitpunkt der Datenaufnahme) in Bezug zur Ausgangsbonität (Bonität zum Zeitpunkt der Versuchsflächenbegründung) gesetzt werden. Das Ergebnis ist in Abb. 3-39 dargestellt. Es zeigt, dass 83 % der Bonitätswerte in einem Wertebereich von $\pm 0,5$ Bonitätsstufen³⁴ um die Ausgangsbonität schwanken (Abb. 3-39 (b)). Zu einem ähnlichen Ergebnis kommen auch GEROLD und GEROLD (2013).

³⁴ $\pm 0,5$ Bonitätsstufen entsprechen in der Tafel nach WENK et al. (1985) einem Schwankungsbereich von 2 m, bezogen auf eine Mittelhöhe im Bezugsalter 100.

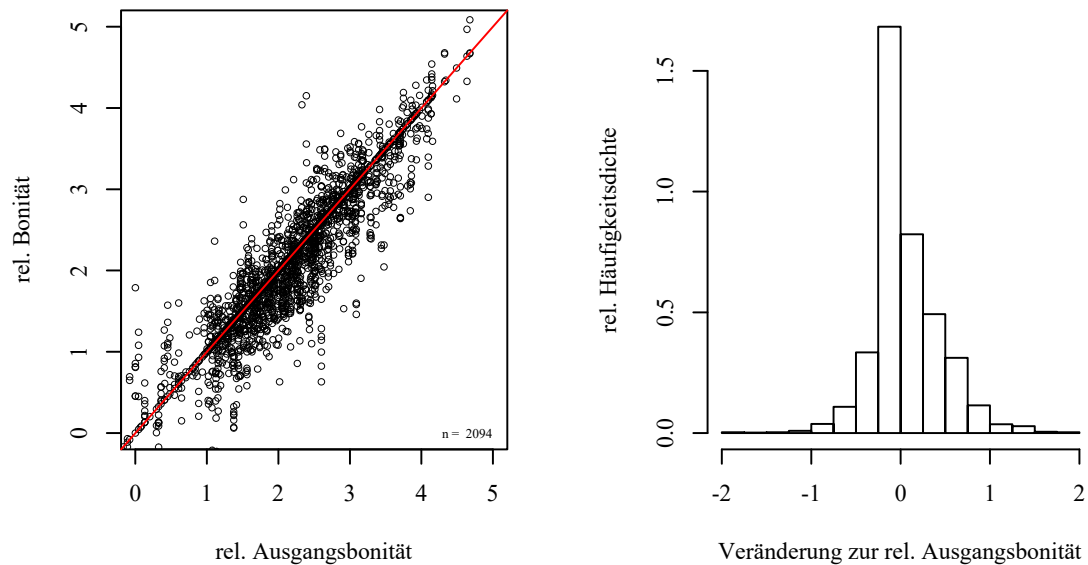


Abb. 3-39: (a) Gegenüberstellung der berechneten Bonitäten zum Zeitpunkt der Datenaufnahme (rel. Bonität) gegen die relativen Bonitäten, welche sich auf das Begründungsjahr der Versuchsfläche beziehen (rel. Ausgangsbonität). Die Bonität der verwendeten Fichten-Versuchsflächen wurde nach der Tafel WENK et al. (1985) hergeleitet. (b) Darstellung der relativen Häufigkeitsdichte der Differenzen aus relativer Ausgangsbonität und der relativen Bonität zum Zeitpunkt der Datenaufnahme.

In einem weiteren Schritt wurde getestet, ob das Begründungsjahr auf die Bonität einen signifikanten Einfluss ausübt. Eine einfache Möglichkeit bietet die multiple lineare Regression (vgl. Kap. 2.1.2). Ziel ist die regressionsanalytische Schätzung der Zielvariablen „Bonität“ (BON) aus den Prädiktoren „Ausgangsbonität“ (BON_A), „Begründungsjahr“ (JHB) und „Alter“ (Alt). Analog dem in Kap. 2.1.2 beschriebenen Vorgehen werden die Prädiktoren zunächst auf Kollinearität geprüft, bevor ein Modell erstellt wird.

Tab. 3-12: Darstellung Toleranz und Varianzinflationsfaktor (VIF)

	Ausgangs- bonität	Begrün- dungsjahr	Alter
Toleranz	0,816	0,742	0,891
VIF	1,23	1,35	1,12

Die Auswertung der Ergebnisse hinsichtlich Toleranz und VIF zeigt, dass kein kollinearer Zusammenhang zwischen den Prädiktoren erkennbar ist (vgl. Tab. 3-12). Über das multiple lineare Regressionsmodell sowie die statistischen Kennwerte informiert Tab. 3-13. Hierbei weisen die statistischen Kennwerte auf einen signifikanten Einfluss der Erklärungsvariablen „Begründungsjahr“ auf die Zielvariable „Bonität“ hin. Die Nullhypothese, dass das Begründungsjahr auf die Bonität keinen signifikanten Einfluss hat, wird somit abgelehnt. Für die Variable „Aufnahmejahr“ konnte kein signifikanter Einfluss auf das Modell nachgewiesen werden. Die Standardpartialregressionskoeffizienten (SPC, vgl. Kap. 2.1.2, S. 20) belegen, dass im gegebenen Modell der Einfluss des Begründungsjahres auf die Bonität gering ist (5,5 %).

Tab. 3-13: Statistische Kennwerte der Regressionsfunktion zur Schätzung der Bonitätsentwicklung

$BON = a_0 + a_1 \cdot BON_A + a_2 \cdot JHR_B + a_3 \cdot Alt + \varepsilon$			Mit:
			BON = rel. Bonität im jeweiligen Jahr BON_A = rel. Ausgangsbonität JHR_B = Begründungsjahr Alt = Alter a_0, a_1, a_2, a_3 = Regressionskoeffizienten ε = Fehler (stochastischer Effekt)
Regressionskoeffizienten	Standardfehler	SPC	Stichprobenumfang
$a_0 = 3,7056^{***}$	$a_0 = 1,0372$		$n = 2094$
$a_1 = 0,9194^{***}$	$a_1 = 0,0101$	$a_1 = 0,8964$	
$a_2 = -0,0019^{***}$	$a_2 = 0,0005$	$a_2 = -0,0547$	Bestimmtheitsmaß
$a_3 = -0,0008$	$a_3 = 0,0005$	$a_3 = -0,0220$	$R_{adj} = 0,83$

Abschließend soll der Zusammenhang zwischen Wachstumsperiode und Bonität anhand einer über 100 Jahre zurückreichenden Versuchsreihe getestet werden. Verwendung findet hierfür ein im Wermsdorfer Wald³⁵ gelegener Eichen-Durchforstungsversuch mit insgesamt sechs Parzellen. Für die Betreuung und wissenschaftliche Konzeption des Versuches ist das Institut für Waldwachstum und Forstliche Informatik der Technischen Universität Dresden verantwortlich. Die Anlage des Versuches erfolgte 1902 im Alter von 60 Jahren und wurde 1914 um vier Parzellen erweitert. Die Durchmesser- und Höhenwerte der Versuchsfläche wurden in kontinuierlichen Intervallen von 5 bis 10 Jahren aufgenommen, sodass durchgehende Messreihen von 15 bis 18 Messungen vorliegen. Eine zusammenfassende Übersicht des Versuchs wird in Anhang 15 gegeben. Detaillierte Angaben über Versuchsziel und Geschichte können bei HÜNLICH (2003) nachgelesen werden. In einem ersten Schritt wurden für die einzelnen Versuchsflächen datensätze die relativen Bonitäten über die Mittelhöhe abgeleitet. Verwendung fand die Eichen-ertragstafel nach ERTELD (1962). Die durchforstungsunabhängige Oberhöhe fand keine Verwendung, weil die Tafel konstruktionsbedingt diese nicht enthält. Abb. 3-40 (a) zeigt die Gegenüberstellung der Mittelhöhe über dem Alter im Vergleich mit der Ertragstafel nach ERTELD (1962). Um zu überprüfen, inwieweit die Versuchsflächendaten vom Normalwachstum der Ertragstafel abweichen, wurde in einem zweiten Schritt die Differenz zwischen der Ausgangsbonität, die der Bestand im Jahr 1902/14 innehatte, und der Bonität zum Zeitpunkt der jeweiligen Datenaufnahme berechnet. Über das Ergebnis informiert Abb. 3-40 (b). Es wird deutlich, dass die Bonitäten der sechs Eichenparzellen in einem Wertebereich von $\pm 0,5$ Bonitätsstufen um die Ausgangsbonität schwanken. Um zu testen, ob das Aufnahmejahr (JHR_A) einen Einfluss auf die Bonitätsentwicklung der Eichenparzellen hat, wurde ein multiples Regressionsmodell erstellt. Die statistischen Kennwerte des Regressionsmodells sind in Tab. 3-14 dargestellt.

³⁵ Die Versuchspartellen liegen im sächsischen Forstrevier Horstsee (Abt. 59).

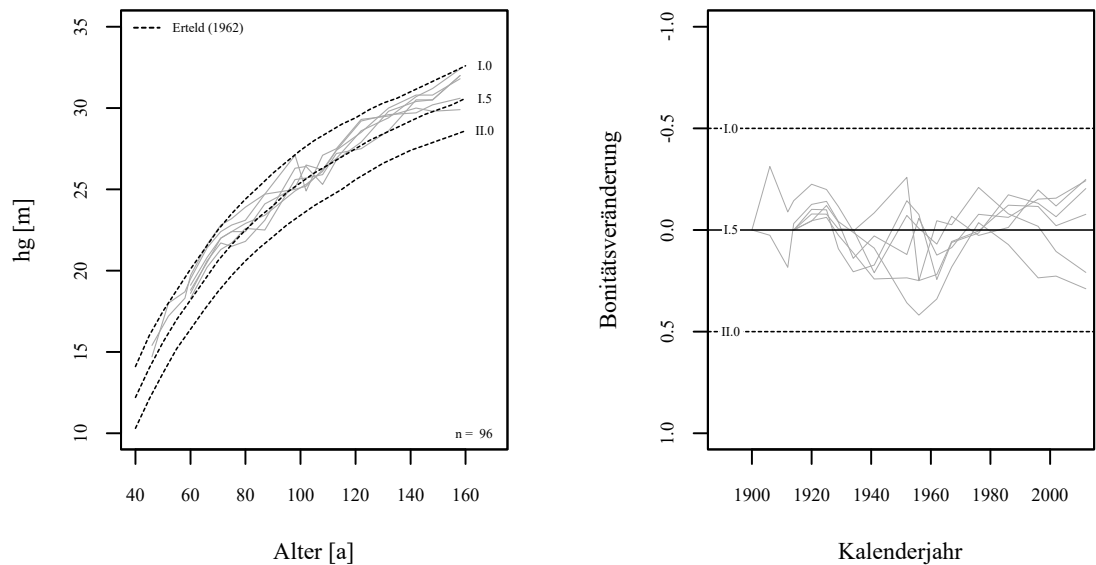


Abb. 3-40: (a) Gegenüberstellung der Mittelhöhe (h_g) über dem Alter der sechs Versuchsparzellen des Durchforschungsversuchs Wermsdorf und der Eichenertragstafel nach ERTELD (1962). (b) Darstellung der Differenz zwischen der Ausgangsbonität, die der Bestand im Jahr 1902/14 innehatte, und der Bonität zum Zeitpunkt der jeweiligen Datenaufnahme in Bezug zum Kalenderjahr.

Aus den in Tab. 3-14 dargestellten statistischen Kennwerten wird ersichtlich, dass das Aufnahmejahr keinen signifikanten Einfluss auf die Bonität hat. Die Mittelhöhe der Eichen entwickelt sich demnach ertragstafelkonform und weicht nur gering von der Ausgangsbonität ab.

Tab. 3-14: Statistische Kennwerte der Regressionsfunktion zur Schätzung der Bonitätsentwicklung

$BON = a_0 + a_1 \cdot BON_A + a_2 \cdot JHR_A + \varepsilon$			Mit: BON = rel. Bonität im jeweiligen Jahr BON_A = rel. Ausgangsbonität JHR_A = Aufnahmejahr a_0, a_1, a_2, a_3 = Regressionskoeffizienten ε = Fehler (stochastischer Effekt)
Regressionskoeffizienten	Standardfehler	SPC	Stichprobenumfang
$a_0 = 0,3236$	$a_0 = 1,0372$		$n = 112$
$a_1 = 0,4567^{***}$	$a_1 = 0,0101$	$a_1 = 0,3514$	
$a_2 = 0,0002$	$a_2 = 0,0005$	$a_2 = -0,0314$	Bestimmtheitsmaß
			$R_{adj} = 0,13$

Schlussfolgernd kann mit den in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnissen nachgewiesen werden, dass sich die Oberhöhenbonitäten der Baumart Fichte, bezogen auf den Wuchsraum Sachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt, in den letzten 100 Jahren um ca. 5,5 % verbessert haben. Für die Herleitung dieses Ergebnisses wurde das Normalwachstum nach der Fichtenertragstafel von WENK et al. (1985) unterstellt. Die vorgestellten Ergebnisse stimmen mit den Untersuchungen von PRETZSCH et al. (2014a, 2015a) überein, welche anhand von langfristigen ertragskundlichen Versuchsflächen in Bayern einen signifikanten Anstieg der Oberhöhe von bis zu 7 % nachweisen konnten. Anhand des Beispiels der Eichenversuchsfläche konnte dieser Sachverhalt nicht bestätigt werden. Die Ergebnisse weisen die Oberhöhe als stabilen Weiser für die Bestandesgüte und somit die Bonität aus.

3.2.2 Standortleistungsmodellierung für die Hochwälder Sachsens

Unterschiedliche Standorte bringen differenzierte Waldgesellschaften hervor, welche sich in der quantitativen als auch qualitativen Produktivität von Dendromasse unterscheiden. Diese Leistungsfähigkeit einzuschätzen und somit Rückschlüsse auf den Vorrat bzw. den Zuwachs zu tätigen, ist eines der primären Anliegen der Waldwachstumskunde. Zweifellos ist der empfindlichste Indikator, den es für Standorteigenschaften von Waldbeständen und damit für die Standortdiagnose gibt, der natürliche auf ihm stockende Bestand. In den vorherigen Kapiteln wurde die Bonität als leistungsbeschreibende Indikationsgröße für Baumarten vorgestellt. Wenn über das Alter und die Höhe bonitiert wird, bietet dies die Möglichkeit, die „eentlichen“ Klima- und Standortfaktoren in Ertragstafelmodellen auszuklammern. In diesem Kapitel soll nun untersucht werden, wie sich die Bonität in Abhängigkeit von Topografie, Boden und Klima verändert. Ziel ist, die Standortvariablen zu identifizieren, welche auf die Bonität und somit die Produktionsleistung von Waldbeständen einen wesentlichen Einfluss ausüben. In diesem Kapitel wird dementsprechend ein einfaches klimasensitives Modell zur Schätzung von bonitätsspezifischen Wachstumsgängen am Beispiel ausgewählter Baumarten vorgestellt, bezogen auf das Untersuchungsgebiet Sachsen. Das Kapitel gliedert sich in drei Teilbereiche auf: Zunächst wird der empirisch-statistische Modellansatz erörtert (Kap. 3.2.2.1), bevor die baumartenspezifischen Modelle vorgestellt werden (Kap. 3.2.2.2). In einem abschließenden Schritt erfolgt die Diskussion der Ergebnisse (Kap. 3.2.2.3).

3.2.2.1 Methodische Ansätze zur Modellierung des Standortleistungsbezuges

Bisherige Standortleistungsmodelle lassen sich nach drei methodischen Ansätzen einteilen:

- a) Empirisch-statistische Modelle: Bei diesem Ansatz werden mit regressionsanalytischen Methoden hochaggregierte Standortvariablen den Kenngrößen für Wachstum gegenübergestellt. Standortleistungsmodelle, die nach diesem Ansatz hergeleitet wurden, finden sich u. a. bei WYKOFF et al. (1982), STERBA (1995), KÄNDLER und RIEMER (2005), ALBERT und SCHMIDT (2008), LAUBHANN et al. (2009) sowie NOTHDURFT et al. (2012).
- b) Theoretisch-qualitative Modelle: Bei diesem Modellansatz wird der Einfluss einer Standortvariablen auf das Wachstum in einer unimodalen Dosis-Wirkungs-Funktion verschlüsselt. Die Wirkungsfunktionen für unterschiedliche Standortvariablen können im einfachsten Fall multiplikativ miteinander verknüpft werden. Beispiele hierfür finden sich u. a. bei BOTKIN et al. (1972), SHUGART (1984), KAHN (1994).

- c) Ökophysiologische Prozessmodelle: Dieser Ansatz stützt sich auf allgemeingültig angenommene ökophysiologische Grundbeziehungen. So wird beispielsweise der Zuwachs einzelner Baumkompartimente (Krone, Äste, Schaft etc.) über Photosynthese, Atmung und Allokation erklärt. Die Standortvariablen informieren hierbei über die Ressourcenverfügbarkeit. Modelle, die diesen Ansatz verwenden, finden sich u. a. bei BOSSEL (1994, 1996), BUGMANN (1997, 2001), MÄKELÄ et al. (2000) und MÄKELÄ (2003).

Für die Erstellung des Standortleistungsmodells wurde in der vorliegenden Arbeit ein empirisch-statistischer Ansatz gewählt. Der Ansatz greift auf eine Methode des Data Mining³⁶, nämlich Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS), zurück (FRIEDMAN 1991, 1993). MARS wurde in den USA mit großem Erfolg für den Aufbau des „Climate Change Tree Atlas“ eingesetzt (IVERSON und PRASAD 2001, IVERSON et al. 2005, PRASAD et al. 2006). MARS generiert nichtlineares Modellverhalten mittels Stützstellen (Knoten), die durch lineare Abschnitte verbunden werden. Mithilfe von Kreuzvalidierung (Cross Validation), also der Aufteilung der Daten in einen Trainings- und einen Test-Datensatz, werden in MARS einfache, nicht „überangepasste“ und optimal vorhersagende Modelle kreiert. Für die Berechnung der Modelle wurde das Statistikpaket R³⁷ unter Verwendung der Programmbibliothek „earth“³⁸ eingesetzt. Die Programmbibliothek „earth“ enthält u. a. eine umfassende MARS-Implementation. In den folgenden Kapiteln wird zunächst die verwendete Geodatenbasis vorgestellt, bevor anhand eines einfachen Beispiels die Arbeitsweise des MARS-Algorithmus erläutert wird.

Vorstellung der für die Standortleistungsmodellierung verwendeten Geodatenbasis

Als Grundlage für die Modellerstellung dienten zunächst die Forsteinrichtungsdaten für den sächsischen Staatswald. Mithilfe der digitalen Forstgrund- bzw. Waldeinteilungskarte konnte die räumliche Lage der einzelnen Staatswaldbestände identifiziert werden. In einem weiteren Schritt wurde mithilfe einer GIS-gestützten Analyse eine Verschneidung der Forstgrundkarte mit den in Tab. 3-15 genannten Karten vorgenommen. Durch diesen Arbeitsschritt war es möglich, eine Vielzahl von Standort- und Klimavariablen auf die Bestandeseinheit „Waldbestand“ zu aggregieren. Die Durchführung der Arbeitsschritte wurde mit dem Programm ArcGIS 10.3.1 umgesetzt.

³⁶ Data Mining: Unter Data Mining wird die Anwendung von Methoden und Algorithmen zur möglichst automatischen Extraktion empirischer Zusammenhänge verstanden.

³⁷ R Core Team (2014). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>.

³⁸ MILBORROW, S.; HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R. (2014): R package „earth“ (Multivariate Adaptive Regression Splines). <http://CRAN.R-project.org/package=earth>.

Tab. 3-15: Darstellung der für die Standortleistungsmodellierung verwendeten Geodatenbasis sowie der extrahierten und für die Modellerstellung verwendeten Umweltvariablen

Karten- bzw. Datengrundlage für die Modellierung	extrahierte Variablen
1. Forstgrundkarte und Forsteinrichtungsdaten des Staatsbetriebes Sachsenforst im Maßstab 1:5000. Zur Verfügung gestellt mit freundlicher Genehmigung des Staatsbetriebs Sachsenforst	$dGZ_{50/100}$ -Bonitäten
2. Digitale Bodenkarte des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie im Maßstab 1:50.000 mit Leit- und Begleitbodenformen (BK50)*	nutzbare Feldkapazität effektive Kationenaustauschkapazität Bodentiefe
3. Klimakarten des Deutschen Wetterdienstes im Raster 1 x 1 km. Verwendet wurden die Karten für Gebietsmittelwerte der Lufttemperatur sowie der Niederschlagshöhe für alle Monate und Jahre seit 1881**	Temperaturwerte Niederschlagswerte
4. Digitales Geländemodell im Raster 200 x 200 m (DGM200 / GeoBasis-DE® / BKG 2015), Bundesamt für Kartographie und Geodäsie***	Höhenlage über NN
5. Digitale Kreis- und Gemeindegrenzen des Bundeslandes Sachsen, Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN)	

*abgerufen am 25.08.2015 unter <http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/boden/27787.htm>

**abgerufen am 25.08.2015 unter: <ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC>

***abgerufen am 25.08.2015 unter: <http://www.geodatenzentrum.de/geodaten>

Um das Modell möglichst einfach und anwenderfreundlich zu gestalten, wurden aus der Vielzahl an Variablen letztendlich sieben Prädiktor-Variablen ausgewählt, die für den sächsischen Staatswald flächendeckend zur Verfügung standen. Eine Übersicht der Variablen sowie deren Erläuterung befindet sich in Tab. 3-16. Als abhängige Variable (Responsevariable) wurde die dGZ_{100} -Bonität gewählt. Weil die Schätzung der dGZ_{100} -Bonitäten Standortkonstanz voraussetzt, weisen die durch die Forsteinrichtung erhobenen Daten einen Trend über dem Alter auf (vgl. Kap. 3.2.1.3). Um die Verzerrung der Bonitätsschätzung in adäquater Weise ausschließen zu können, wurde das Begründungsjahr (BG) als erklärende Variable in die Modelle mit aufgenommen. Weiterhin erfolgte eine Eingrenzung des Datensatzes auf Waldbestände, die zwischen 1930 bis 1960 begründet wurden. Die Notwendigkeit dieses Schrittes leitet sich aus der Wahl des Referenzzeitraumes für die verwendeten Klimavariablen ab, welcher die durchschnittlichen Jahresmittelwerte von Temperatur und Niederschlag für den Zeitraum von 1961 bis 1990 erfasst. Die potenzielle Kationenaustauschkapazität (KAK_{WE}) sowie die nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum wurden aus den Leit- und Begleitbodenformen der Digitalen Bodenkarte des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (BK50) hergeleitet und können als grobe Schätzwerte verstanden werden. Das gewählte Variablen-set setzt sich dementsprechend aus sehr einfachen, bei den entsprechenden Fachdiensten größtenteils frei erhältlichen Umwelt- und Standortvariablen zusammen.

Tab. 3-16: Erläuterung der aus den Geodaten extrahierten Umweltvariablen

Abkürzung	Beschreibung der Umweltvariablen
<i>BG</i>	Begründungsjahr: Beschreibt das Jahr der Bestandesbegründung.
<i>dGZ₁₀₀</i>	Durchschnittlicher Gesamtwuchs im Alter 100 [$\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$]: Der <i>dGZ₁₀₀</i> gibt den durchschnittlichen Gesamtwuchs pro Jahr einer Ertragsklasse im Alter 100 an. In dem nachfolgend beschriebenen Standortleistungsmodell dient der <i>dGZ₁₀₀</i> als abhängige Variable (Responsevariable).
<i>BT</i>	Bodentiefe [m]: In der vorliegenden Arbeit wurde die Bodentiefe aus den Leitbodenformen der BK50 abgeleitet.
<i>Höhe_{NN}</i>	Höhenlage über NN [m]
<i>KAK_{WE}</i>	Potenzielle Kationenaustauschkapazität im effektiven Wurzelraum [$\text{mmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$]: Die Kationenaustauschkapazität (<i>KAK</i>) stellt die Menge der austauschbar gebundenen Kationen (vor allem Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, Na^+, NH_4^+, H^+, Al^{3+}) eines Bodens dar. Art und Mengenanteile der Tonminerale und Huminstoffe bedingen im Wesentlichen die <i>KAK</i> eines Bodens. Unter potenzieller Kationenaustauschkapazität (<i>KAK_{pot}</i>) versteht man diejenige <i>KAK</i>, die bei einem definierten pH-Wert von 8,2 vorliegt, bei dem die Protonen aller Säuregruppen der Huminstoffe austauschbar sind (Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden 2005, S. 368). Die <i>KAK_{WE}</i> errechnet sich durch Multiplikation der potenziellen Kationenaustauschkapazität mit der Durchwurzelungstiefe (<i>WE</i>). Die effektive Durchwurzelungstiefe beschreibt hierbei die rechnerisch bestimmte Mächtigkeit einer von Bodenart und Trockendichte abhängigen Bodenzone, in der die nutzbare Feldkapazität von den Pflanzenwurzeln einjähriger landwirtschaftlicher Nutzpflanzen ausgeschöpft werden kann (Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden 2005, S. 355). Aufgrund der bodentypologischen Besonderheiten, die das Wurzelwachstum in Forstböden mit sich bringt, wurde die effektive Durchwurzelungstiefe in der vorliegenden Arbeit um 20 % erhöht. Das Vorgehen richtet sich an den Empfehlungen des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2005) aus.
<i>nFK_{WE}</i>	Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum [$\text{mm} \cdot \text{dm}^{-1}$]: Unter der nutzbaren Feldkapazität wird die Wassermenge verstanden, die ein wassergesättigter Boden gegen die Schwerkraft halten kann. Sie ist definiert als die Menge des Bodenwassers als Volumenanteil in % oder in mm Wassersäule, die in Poren mit Äquivalentdurchmesser zwischen 50 μm und 0,2 μm oder bei einer definierten Saugspannung zwischen pF 1,8 und 4,2 gebunden ist. Sie berechnet sich aus der Differenz zwischen Feldkapazität und permanentem Welkepunkt (Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden 2005, S. 348). Die nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (<i>nFK_{WE}</i>) ist die Summe des für die Pflanzen ausschöpfbaren Bodenwassers und errechnet sich bei grundwasserfernen, terrestrischen Böden durch Multiplikation der nutzbaren Feldkapazität (<i>nFK</i>) in $\text{mm} \cdot \text{dm}^{-1}$ mit der effektiven Durchwurzelungstiefe (<i>WE</i>). Die effektive Durchwurzelungstiefe beschreibt hierbei die rechnerisch bestimmte Mächtigkeit einer von Bodenart und Trockendichte abhängigen Bodenzone, in der die nutzbare Feldkapazität von den Pflanzenwurzeln einjähriger landwirtschaftlicher Nutzpflanzen ausgeschöpft werden kann (Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden 2005, S. 355). Aufgrund der bodentypologischen Besonderheiten, die das Wurzelwachstum in Forstböden mit sich bringt, wurde die effektive Durchwurzelungstiefe in der vorliegenden Arbeit um 20 % erhöht. Das Vorgehen richtet sich an den Empfehlungen des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2005) aus.
<i>N_{Jahr}</i>	Durchschnittliche Jahresniederschläge für den Zeitraum von 1961 bis 1990 [mm]: Bei den verwendeten Werten handelt es sich um langjährige Niederschlagsmittel für den 30-jährigen Referenzzeitraum von 1961 bis 1990. Der gewählte Referenzzeitraum richtet sich an der Empfehlung der WMO (World Meteorological Organization) aus.
<i>T_{Jahr}</i>	Durchschnittliche Jahresmitteltemperatur für den Zeitraum von 1961 bis 1990 [$^{\circ}\text{C}$]: Bei den verwendeten Werten handelt es sich um langjährige Jahresmittel für den 30-jährigen Referenzzeitraum von 1961 bis 1990. Der gewählte Referenzzeitraum richtet sich an der Empfehlung der WMO (World Meteorological Organization) aus.

Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS)

Mit den zuvor beschriebenen Standortvariablen wurde das Standortleistungsmodell aufgestellt. Die Grundlage für den verwendeten MARS-Algorithmus bildet die in Formel 3-18 dargestellte Basisfunktionendarstellung, wobei jedoch die Basisfunktionen nicht mehr fest vorgegeben sind, sondern geeignete Terme aus einer großen Menge von möglichen Kandidaten ausgewählt werden (FAHRMEIR et al. 2009).

$$y_i = \sum_{j=1}^k c_j \cdot B_j(x_i) + \varepsilon_i$$

Mit: y_i = Responsevariable der Messung i
 B_j = Basisfunktion
 k = Anzahl der Basisfunktionen
 c_j = Regressionskoeffizient
 x_i = Vektor der Prädiktoren $x_i = (x_{i1}, \dots, x_{ip})$ bei Messung i
 ε_i = Fehler (stochastischer Effekt) bei Messung i

Formel 3-18

Der für die Modellerstellung verwendete MARS-Algorithmus arbeitet im Wesentlichen in zwei Teilschritten. Zunächst wird eine Vorwärts- und Rückwärtssuche durch den Raum der möglichen Modelle vorgenommen. Hierbei wird durch Streichung bereits vorhandener Terme bzw. Aufnahme neuer Terme eine Vielzahl unterschiedlicher Modelle erstellt. In einem zweiten Schritt werden dann die Modelle mittels Kreuzvalidierung an den gewählten Test-Kriterien ausgerichtet. Hierfür werden die Daten in einen Testdatensatz und einen Validierungsdatensatz zur Abschätzung der Prognosegüte aufgeteilt. Durch die Gegenüberstellung von Test- und Validierungsdatensatz kann das potenziell am besten geeignete Modell identifiziert werden. Verwendet wird das Modell mit dem kleinsten quadrierten Prognosefehler. Die Kreuzvalidierungsfunktion ist in Formel 3-19 dargestellt.

$$CV = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Mit: CV = Quadrierter Prognosefehler
 y_i = Realwert
 $\hat{y}_i$ = geschätzter Erwartungswert

Formel 3-19

Das Ergebnis der Kreuzvalidierungsfunktion kann, analog der Herleitung des Bestimmtheitsmaßes (R^2), mithilfe der in Formel 3-20 dargestellten Funktion normalisiert werden.

$$GRSq = 1 - \frac{CV}{CV_{null}}$$

Mit: $GRSq$ = Gütekriterium für die Kreuzvalidierung
 CV = Quadrierter Prognosefehler
 CV_{null} = Quadrierter Prognosefehler für das Interzept-Modell

Formel 3-20

Anhand eines einfachen Beispiels soll das Ergebnis des MARS-Algorithmus verdeutlicht werden. Ziel soll es sein, die Variable dGZ_{100} -Bonität aus den Prädiktorvariablen nFK_{WE} , $T_{1961/90}$ und $Höhe_{NN}$ abzuleiten. Das abgeleitete Modell sowie die statistischen Kennwerte sind in Tab. 3-17 dargestellt.

Tab. 3-17: Ergebnis des MARS-Algorithmus, bezogen auf einen einfachen Beispieldatensatz

$dGZ_{100} =$			
6,8459			
+	0,004985	· max(0; nFK	– 148,25)
–	0,62932	· max(0; 8,3	– $T_{1961/90}$)
–	1,4128	· max(0; $T_{1961/90}$	– 8,3)
–	2,5634	· max(0; $T_{1961/90}$	– 8,8)

Mit:	dGZ_{100} = dGZ_{100} -Bonität	Stichprobenzahl
	nFK = nutzbare Feldkapazität [mm]	$n = 1.165$
	$T_{1961/90}$ = Temperatur [°C]	Statistische Kennwerte
		$GRSq = 0,22$

Im vorliegenden Beispiel besteht das Modell aus vier Basistermen, welche zwei der drei Prädiktorvariablen verwenden. Über die Anwendung des MARS-Algorithmus auf eine konkrete Kombination von Standortleistungsvariablen informiert Anhang 17. In Abb. 3-41 sind die Basisfunktionen des Beispieldatensatzes grafisch dargestellt. Es wird deutlich, wie der MARS-Algorithmus nichtlineares Modellverhalten mittels Stützstellen (Knoten) generiert, die durch lineare Abschnitte verbunden sind (Quasilineare Regression). Eine größere Anzahl an Einflussvariablen bedingt deutlich komplexere Modelle.

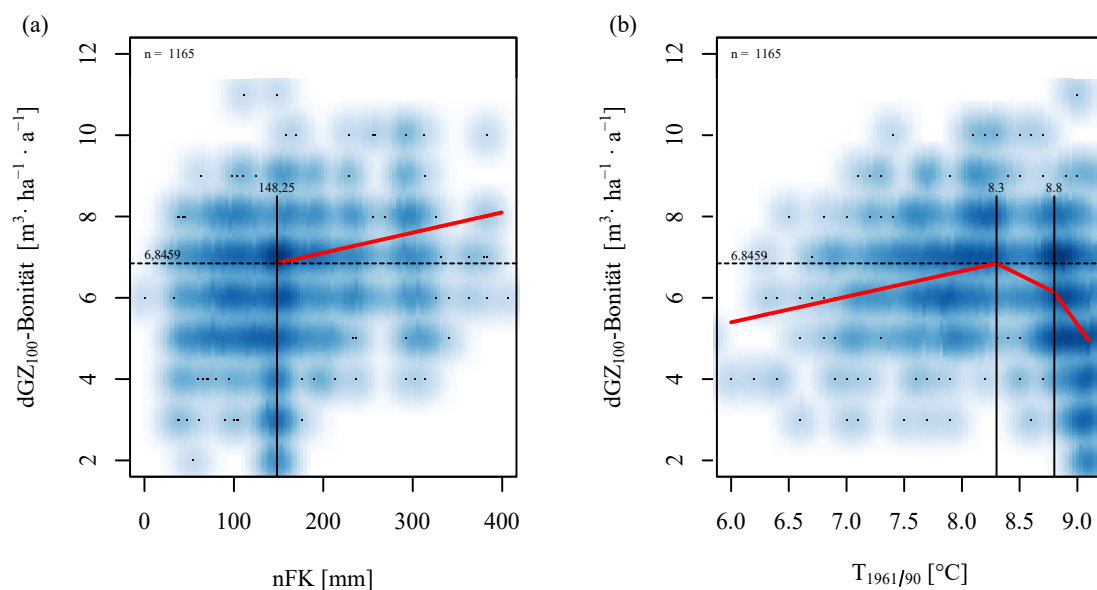


Abb. 3-41: MARS-Schätzung für den simulierten Datensatz

Grundsätzlich gilt, dass einfache Modelle mit einer geringen Anzahl von Basisfunktionen oftmals eine schlechtere Anpassung an die Daten haben. Im Gegenzug führt die Verwendung eines sehr großen Modells zu einer Funktionsschätzung, welche zu stark an die Daten angepasst ist und dementsprechend nur schwer interpretiert werden kann. Um die Modelle „nicht überanzupassen“, wurde die maximale Anzahl der Basisterme auf 20 festgesetzt.

3.2.2.2 Darstellung der Standortleistungsmodelle für den Wuchsraum Sachsen

Unter Verwendung des MARS-Algorithmus wurden Modelle für die Baumarten Gemeine Fichte, Gemeine Kiefer, Rot-Buche, Rot-Eiche sowie Stiel-Eiche angepasst. Verwendung fanden hierfür die in Tab. 3-16 beschriebenen Standortleistungsvariablen. Die baumartenspezifischen Modellfunktionen sind in Anhang 16 dargestellt. Tab. 3-18 informiert über die statistischen Modellkennwerte. Hierbei wird deutlich, dass die Baumart Rot-Buche bzw. Gemeine Fichte die beste Anpassung ($GRSq = 0,28$) bzw. die Baumart Stiel-Eiche ($GRSq = 0,19$) die schlechteste Modellanpassung an das verwendete Datenmaterial aufweist. Die Anzahl der verwendeten Basisterme liegt zwischen 13 und 15.

Tab. 3-18: Statistische Kennwerte der mittels MARS-Algorithmus hergeleiteten baumartenspezifischen Standortleistungsmodelle

Baumart	Anzahl der verwendeten Waldbestände	Anzahl der Basisterme	Anzahl der verwendeten Variablen	GRSq
Gemeine Fichte	26.015	15	5/7	0,28
Gemeine Kiefer	17.140	14	6/7	0,25
Rot-Buche	4.247	14	5/7	0,28
Rot-Eiche	1.356	15	6/7	0,23
Stiel-Eiche	4.591	13	7/7	0,19

Abb. 3-42 informiert über den Einfluss der Prädiktorvariablen auf die Modellgüte. Gezeigt wird, inwieweit der Anteil der erklärten Varianz ($GRSq$) durch die Hinzunahme der entsprechenden Prädiktorvariablen verbessert wird.

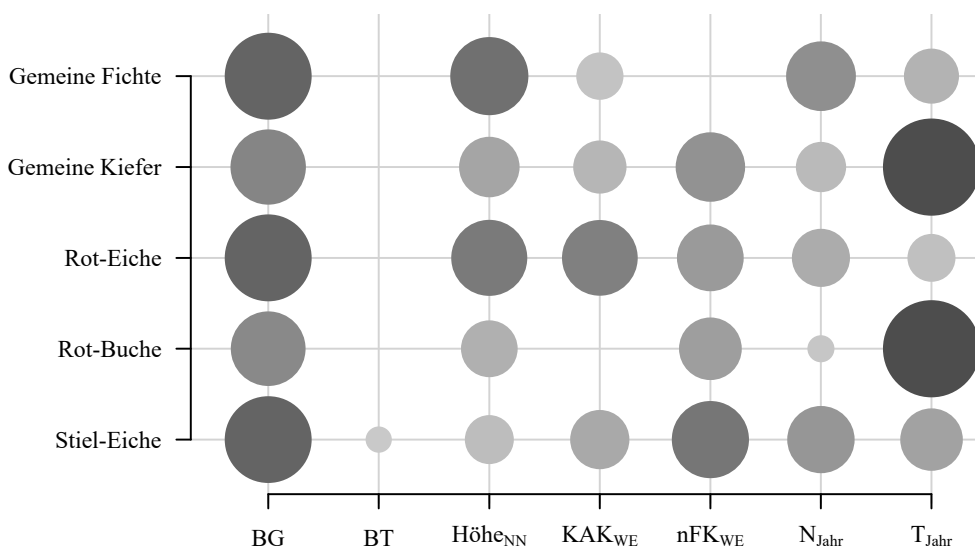


Abb. 3-42: Einfluss der Prädiktorvariablen auf das Gütekriterium ($GRSq$) für die mittels MARS-Algorithmus hergeleiteten baumartenspezifischen Standortleistungsmodelle. Gezeigt wird, inwieweit durch die Hinzunahme der entsprechenden Variablen das Gütekriterium ($GRSq$) verbessert wird. Die Kreisflächengröße ist proportional zum prozentualen Einfluss der entsprechenden Variablen auf die Verbesserung der Modellgüte. Die Erläuterung verwendeter Abkürzungen kann in Tab. 3-16 nachgelesen werden.

Aus Abb. 3-42 geht hervor, dass die Variable Begründungsjahr (BG) einen starken Einfluss auf die Schätzung der dGZ_{100} -Bonität ausübt. Lediglich bei den Baumarten Gemeine Kiefer bzw. Rot-Buche beeinflusst die Temperatur das Schätzergebnis stärker. Die Variable Bodentiefe spielt bei der Modellerstellung nur eine untergeordnete Rolle. In Abb. 3-43 wird eine Übersicht der Abweichungen zwischen modellierten und realen dGZ_{100} -Bonitäten gegeben. Zusätzlich dargestellt sind relativer Bias ($\bar{e}\%$), relative Präzision ($s_e\%$) und relative Treffgenauigkeit ($m_x\%$). Beim Vergleich des Bias fällt auf, dass es insbesondere bei der Baumart Stiel-Eiche ($\bar{e}\% = -19,59$) zu einer systematischen Unterschätzung der Werte kommt.

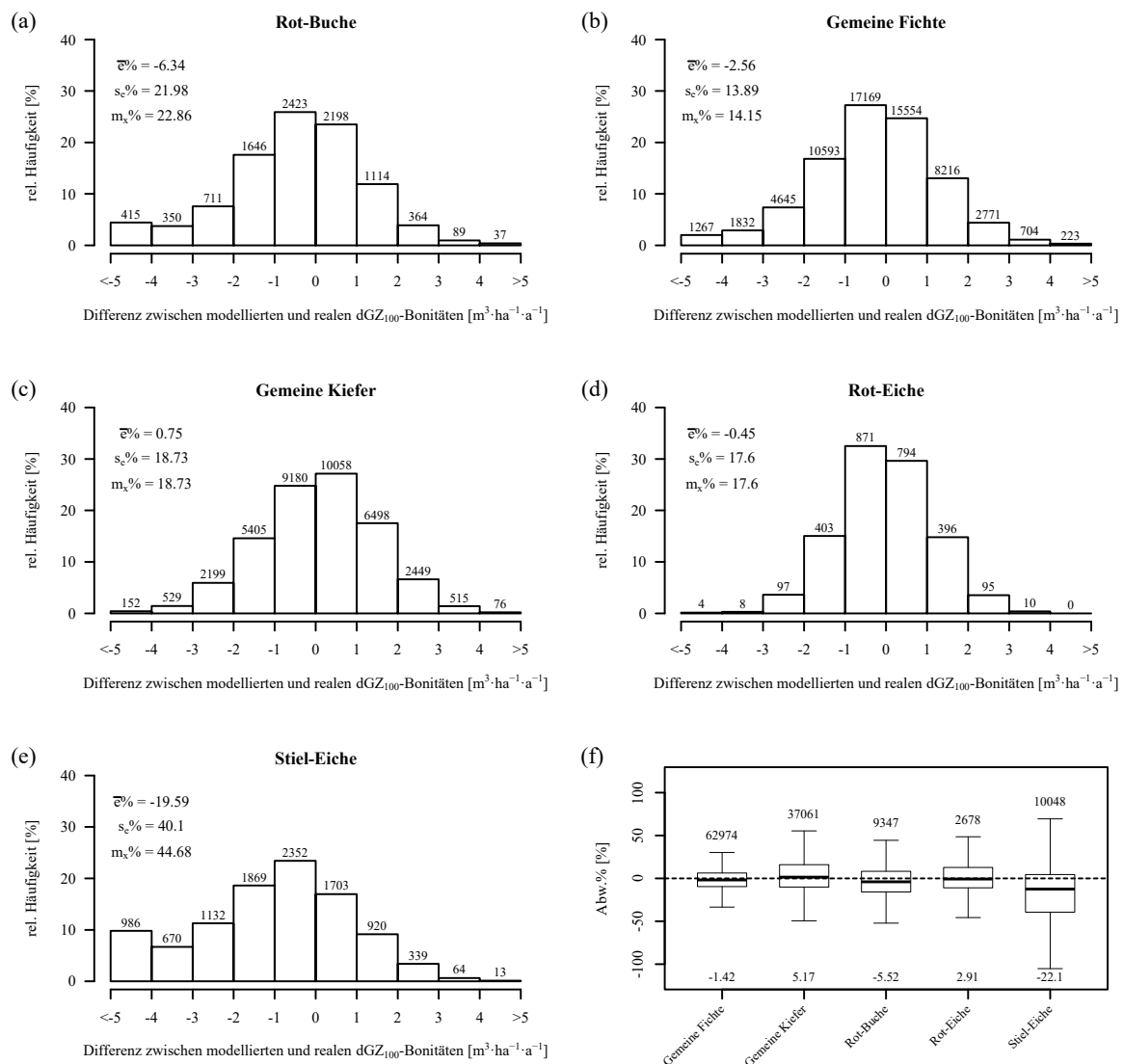


Abb. 3-43: (a-e) Relative Häufigkeitsverteilung [%] der Differenzen zwischen realen und modellierten dGZ_{100} -Bonitäten, getrennt nach Baumarten. (f) Vergleich der Differenzen [%] zwischen realen und modellierten dGZ_{100} -Bonitäten in der Zusammenschau für alle Baumarten.

In einem weiteren Schritt wurde unter Verwendung der zuvor beschriebenen Modelle die dGZ_{100} -Bonität für die Gemeindewaldflächen Sachsens bestimmt (vgl. Abb. 3-44). Hierfür wurde zunächst in einem GIS-basierten Ansatz anhand der Prädiktorvariablen die baumarten-spezifische dGZ_{100} -Bonität für alle Waldbestände des sächsischen Staatswaldes geschätzt. Anschließend konnten die flächengewogenen Mittelwerte der dGZ_{100} -Bonitäten auf Ebene der Verwaltungseinheit „Gemeinde“ bestimmt werden. Die Auswertungsebene wurde somit nicht naturräumlich, sondern anhand von Verwaltungsgrenzen gewählt.

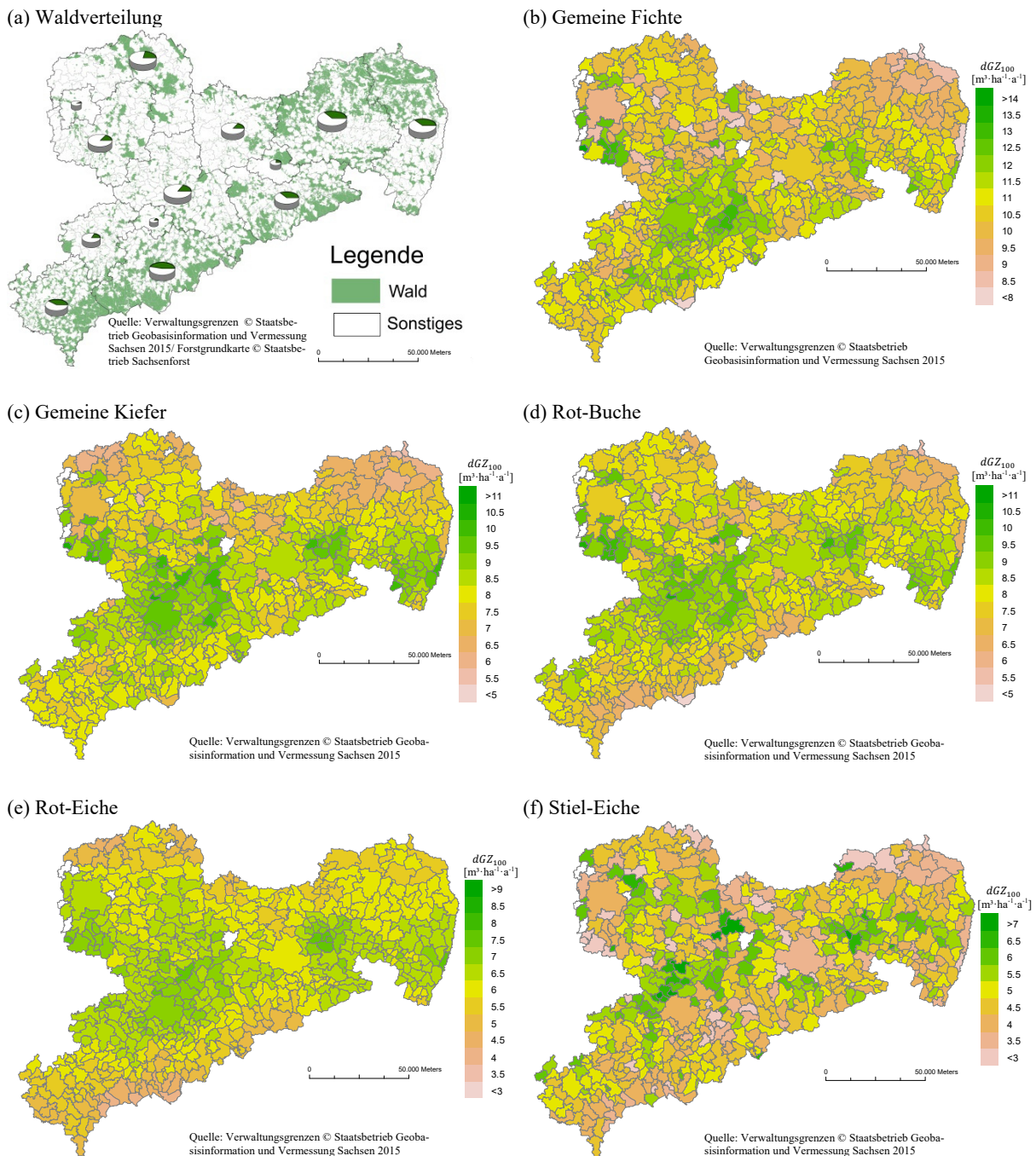


Abb. 3-44: (a) Übersicht der prozentualen Flächenverteilung von Wald auf Ebene der sächsischen Landkreise, (b - f) modellierte dGZ_{100} -Bonitäten für ausgewählte Baumarten. Dargestellt ist der flächengewogene Mittelwert aller modellierten dGZ_{100} -Bonitäten einer Gemeinde.

In Abb. 3-44 müssen beim Vergleich des modellierten Leistungsspektrums die baumartenspezifischen Intervalle des Legendenfarbcodes beachtet werden. Um einen zusammenfassenden Vergleich des Leistungsspektrums der Baumarten darstellen zu können, wird in Abb. 3-45 eine Gegenüberstellung der modellierten dGZ_{100} -Bonitäten auf Ebene aller Waldbestände des sächsischen Staatswaldes gegeben. Wenn die modellierten dGZ_{100} -Bonitäten unter Verwendung des Raumdichtefaktors in Masse umgerechnet werden, zeigt sich eine deutliche Dominanz der Rot-Buche (vgl. Abb. 3-45 (b)).

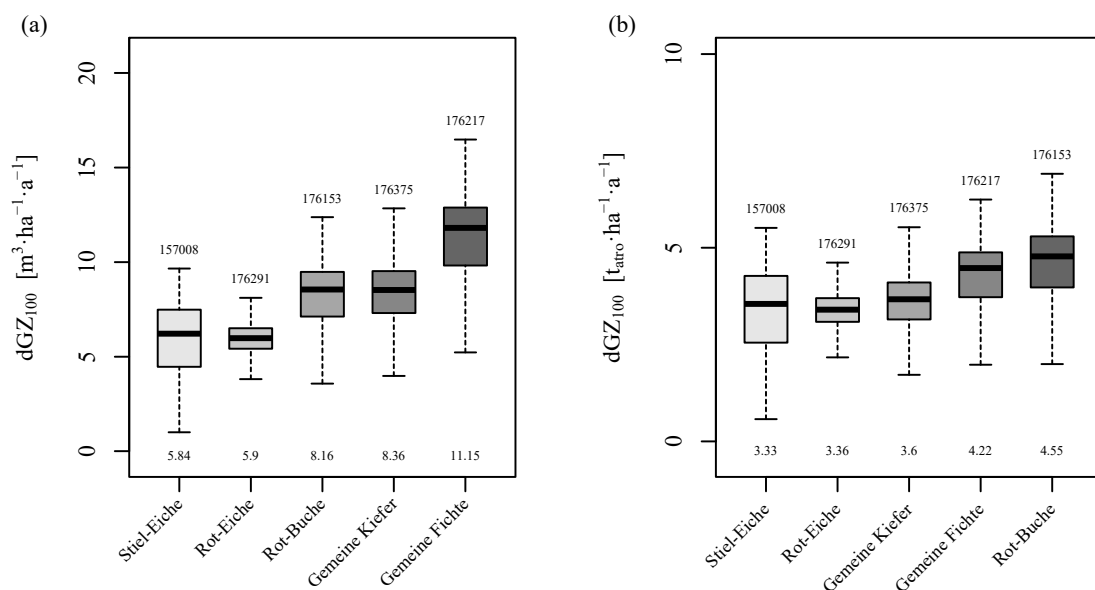


Abb. 3-45: Vergleich der dGZ_{100} -Bonitäten, bezogen (a) auf das Derbholzvolumen [m³·ha⁻¹·a⁻¹] bzw. (b) auf die Derbholzmasse [tatro·ha⁻¹·a⁻¹]. Die Darstellung erfolgt unter Verwendung der mittels des MARS-Algorithmus modellierten dGZ_{100} -Bonitäten. Modelliert wurde das baumartenspezifische Leistungsspektrum, bezogen auf alle Waldbestände des sächsischen Staatswaldes.

3.2.2.3 Diskussion der Ergebnisse

Ein entscheidender Faktor für die Ausnutzung der vollen standörtlichen Produktionskraft ist die Herleitung von Standortleistungsbeziehungen, welche die Abschätzung der zu erwartenden Holzerträge bereits vor der Bestandesbegründung ermöglichen. In den vorherigen Kapiteln wurde die Modellierung des Standortleistungsbezuges für die sächsischen Wälder vorgestellt. Das beschriebene Vorgehen gliederte sich in zwei Arbeitsschwerpunkte auf. In einem ersten Schritt wurde unter Verwendung des MARS-Algorithmus ein Standortleistungsmodell erstellt. Ziel war hierbei die Schätzung der dGZ_{100} -Bonität in Abhängigkeit von ausgewählten Standortleistungsvariablen. In einem zweiten Schritt konnte unter Verwendung der erstellten Modelle das Ertragspotenzial der ausgewählten Wirtschaftsbaumarten für den gesamten sächsischen Wuchsraum modelliert werden. Darauf aufbauend gliedert sich das vorliegende Kapitel

zunächst in eine einleitende Übersicht, bevor die angewendeten Methoden diskutiert werden. Abschließend werden aus den Ergebnissen Schlussfolgerungen für die forstliche Praxis gezogen.

Weil die Ertragsfähigkeit des Standortes in der Forstwirtschaft i. d. R. als unveränderlich betrachtet wird, kann nur der Versuch unternommen werden, über eine „optimale waldbauliche Wirtschaftsweise“ die Baumarten an die gegebenen Umweltverhältnisse anzupassen. Neben waldbaulichen Durchforstungsstrategien, auf die in den nachfolgenden Kapiteln näher eingegangen wird, ist hierfür vor allem die richtige Baumartenwahl entscheidend. Demnach stellt sich die Frage, unter welchen Klima- und Standortbedingungen Wirtschaftsbaumarten am konkurrenzstärksten sind und ihre optimalen Wuchseleistungen erbringen können. Einen ersten Ansatz für die Beantwortung dieser Frage bietet das Ökogramm von THOMASIUS (1991). Zur Charakterisierung des Standortes werden dabei die Feuchtigkeit des Bodens und die Jahresmitteltemperatur für die Einschätzung der Konkurrenzkraft benutzt (Abb. 3-46). THOMASIUS (1991) stellt die These auf, dass Baumarten, die im Grenzbereich ihrer ökologischen Amplitude wachsen, ertragsschwach und stark gefährdet hinsichtlich Klimaveränderungen sind. Schlussfolgernd bedeutet demnach eine gute Bonität, dass Baumarten sich im Optimum ihrer ökologischen Amplitude befinden und unempfindlicher gegenüber klimatisch bedingten Stressoren sind.

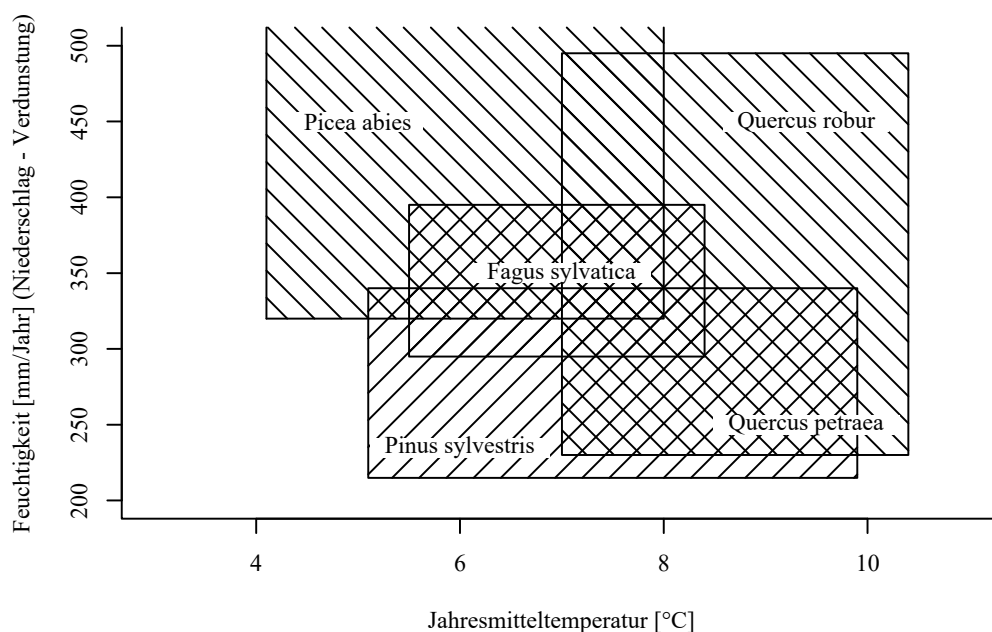


Abb. 3-46: Ökogramme forstwirtschaftlich bedeutungsvoller Baumarten für Mitteleuropa (verändert nach THOMASIUS 1991)

Um das Vorgehen von THOMASIUS (1991) aufzugreifen und das Vorkommen und die Konkurrenzkraft forstwirtschaftlicher Hauptbaumarten in Sachsen vereinfacht abzubilden, wurden in Abb. 3-47 die Variablen N_{Jahr} und T_{Jahr} den in der sächsischen Forsteinrichtung angegebenen dGZ_{100} -Bonitäten gegenübergestellt. Eine Erläuterung der verwendeten Variablen findet sich in Tab. 3-16. Um eine ausreichende Datenbasis zu sichern, verbergen sich hinter jedem einzelnen Bildpunkt (Pixel) der Grafik mindestens zehn Waldbestände. Die dGZ_{100} -Bonitäten wurden für jedes der Pixel unter Verwendung eines flächengewogenen Mittelwertes errechnet und farblich codiert.

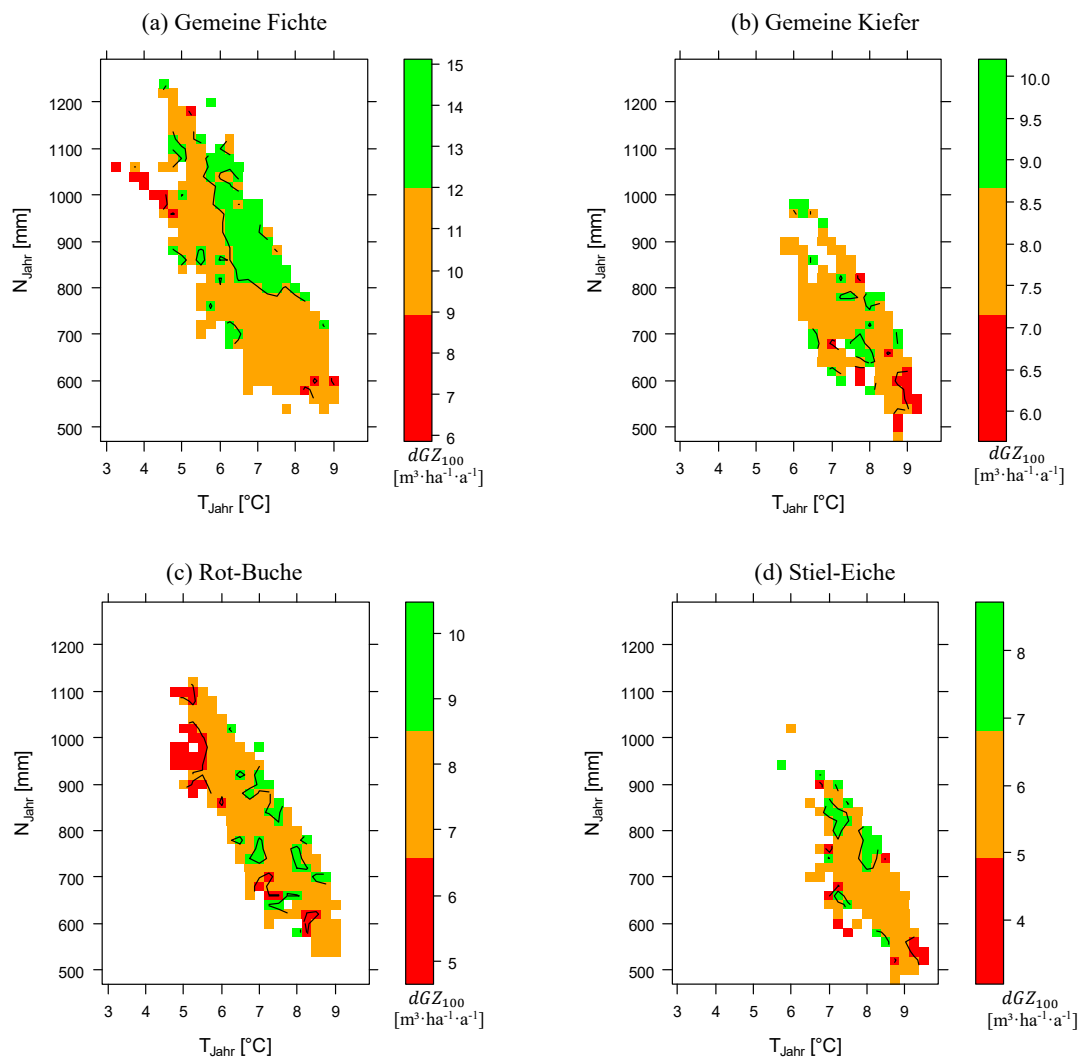


Abb. 3-47: Gegenüberstellung der Variablen N_{Jahr} und T_{Jahr} den in der sächsischen Forsteinrichtung angegebenen dGZ_{100} -Bonitäten in einem zweifaktoriellen Ökogramm

Bereits an dieser Grafik lassen sich einfache autökologische³⁹ Ableitungen treffen. So wird beispielsweise deutlich, dass in Sachsen die Gemeine Kiefer und die Stiel-Eiche vor allem auf den

³⁹Autökologie bezeichnet den Bereich der Ökologie, der sich mit Wechselbeziehungen zwischen einzelnen Arten und ihrer Umwelt beschäftigt (BROSE und MUNK 2009).

trockeneren Gebieten anzutreffen sind und, dass niedrige jährliche Niederschläge (< 600 mm) und hohe Jahresmitteltemperaturen ($> 8,5$ bis $9,0$ °C) bei diesen Baumarten zu einem Abfall der Bonität führen. Die Waldbestände der Gemeinen Fichte und Rot-Buche kommen in einem deutlich breiteren Temperatur- und Niederschlagsspektrum als die zuvor genannten Baumarten vor. Bemerkenswert ist der deutlich ausgeprägte Optimums-Bereich der Gemeinen Fichte. Dieser liegt bei hohen jährlichen Niederschlägen (> 800 mm) und einer Jahresmitteltemperatur von $5,8$ bis 6 °C. Für die Baumart Rot-Buche hingegen kann anhand von Abb. 3-47 ein solches Optimum nicht abgeleitet werden. Vielmehr zeigt die Buche in einem großen Bereich gleichbleibende Wuchsleistungen, lediglich bei einer Unterschreitung einer Jahresmitteltemperatur von ca. $< 5,0$ bis $5,5$ °C kommt es zu einer Verschlechterung der Bonität.

Die anhand Abb. 3-47 gemachten Aussagen sind jedoch sehr unscharf, weil neben den zwei verwendeten Klimavariablen weitere Faktoren eine Rolle spielen können. So ist beispielsweise die Komponente Wasserverfügbarkeit nicht nur vom Niederschlag allein, sondern auch von Faktoren wie nutzbare Feldkapazität, Geländere relief, Exposition u. a. abhängig. Eine hohe Wasserspeicherkapazität des Bodens kann einen niedrigen Niederschlag ausgleichen. Daraus schlussfolgernd können Bestände mit gleicher Wuchskraft (Bonität) auf Standorten vorkommen, die sich hinsichtlich Standortfaktoren wie Wasserhaushalt, Nährstoffausstattung, klimatische Bedingungen etc. unterscheiden. Es wird deutlich, dass komplexere Modelle notwendig sind, um das Leistungsspektrum der forstlich bedeutendsten Baumarten für den Wuchsraum darstellen zu können. Mit dem hier vorgestellten empirisch-statistischen Modellansatz (MARS) wird das zweifaktorielle Ökogramm in einen multifaktoriellen Wirkungsraum erweitert. Obwohl die Ergebnisse der MARS-Modelle auf den ersten Blick überzeugen, ist der Ansatz in einigen Punkten ausbaufähig. In den nachfolgenden Absätzen wird die Methodenkritik nach Themenschwerpunkten abgehandelt.

Ausgleich des Alterstrends

Weil die Schätzung der dGZ_{100} -Bonitäten Standortkonstanz voraussetzt, weisen die durch die Forsteinrichtung erhobenen Daten einen Trend über dem Alter auf. Um die hierdurch entstehende Verzerrung der Bonitätsschätzung in adäquater Weise ausschließen zu können, wurde das Begründungsjahr (BG) als erklärende Variable in die Modelle mit aufgenommen. Weiterhin erfolgte eine Eingrenzung des Datensatzes auf Waldbestände, die zwischen 1930 bis 1960 begründet wurden. Für zukünftige Modelle erscheint es sinnvoll, den hier verwendeten statischen Ansatz zu verlassen und der Responsevariable dynamisch ein Variablenset an Prädiktoren zuzuweisen. Dies würde bedeuten, dass beispielsweise jeder Waldbestand den durchschnittlichen

Niederschlag während seiner ihm spezifischen Wachstumsperiode zugewiesen bekommt und nicht mehr eine für alle Waldbestände identische Niederschlagsperiode zugrunde gelegt wird. Weiterhin müssten die sich verändernden Umweltbedingungen in das Modell mit aufgenommen werden. Die nicht vorhandene Standortkonstanz über die Verwendung der Prädiktorvariable „Begründungsjahr“ in das Modell mit einzubringen, kann dementsprechend nur als eine Zwischenlösung betrachtet werden. Ein Vorschlag hierfür findet sich bei ALBERT und SCHMIDT (2012), welche die Stickstoffdeposition und die Variable CO₂-Konzentration der Atmosphäre in ihr Standortleistungsmodell mit aufnehmen. Auch hier wäre es sinnvoll, die Variable über der Wuchsperiode zu dynamisieren und beispielsweise eine über das spezifische Bestandesleben gemittelte jährliche Stickstoffdeposition zu verwenden. Die hier vorgeschlagenen Ansätze scheiterten an der bisher nicht verfügbaren Datengrundlage.

Verwendetes Variablenet

Für die Parametrisierung eines Standortleistungsbezuges müssen die verwendeten Variablen räumlich und zeitlich hoch aufgelöst vorliegen. Dies ist jedoch bei vielen Variablen nicht der Fall. Um eine adäquate flächendeckende Datengrundlage zu erhalten, werden die Standortvariablen über kombinierte geostatistische und regressionsanalytische Verfahren durch die datenerhebenden Stellen regionalisiert und dann dem Anwender zur Verfügung gestellt. So sind beispielsweise die sächsischen Bodeninformationen von punktuell erhobenen Weiserprofilen in hochaggregierten Leitbodenprofilen zusammengeführt worden. Welche Unsicherheiten daraus resultieren, kann bei BENNING und PETZOLD (2015, 2016) nachgelesen werden. Ähnliche Verfahren sind auch bei den Klimaparametern, welche auf Basis der DWD-Stationen hergeleitet wurden, angewendet worden⁴⁰. Hieraus wird deutlich, dass bereits die Datengrundlage mit einem variablenspezifischen statistischen Fehler behaftet ist. Die Qualität und Abbildungsgüte der verwendeten Standortleistungsvariablen spielen jedoch eine entscheidende Rolle. Inwieweit einzelne Prädiktorvariablen die einzelnen baumartenspezifischen Standortleistungsmodelle verbessern, wurde in Abb. 3-42 gezeigt. Hierbei wurde deutlich, dass die Prädiktorvariable Bodentiefe einen sehr geringen Einfluss hat. Besonders stark scheint die dGZ_{100} -Bonität hingegen von der Temperatur beeinflusst zu werden. Weil viele pflanzenphysiologische Prozesse temperaturabhängig sind (z. B. Photosynthese, autotrophe Respiration, Keimung, phänologische Prozesse etc.), erscheint die Variablengewichtung zunächst biologisch plausibel. Dennoch könnte das zuvor beschriebene Ergebnis auch darauf hindeuten, dass lediglich die Abbildungsgüte der Prädiktorvariable Temperatur wesentlich besser ist als die der Prädiktorvariable Bodentiefe.

⁴⁰ Eine Übersicht über die sächsischen Klimastationen sowie die Aufbereitung von Klimadaten für den Wuchsraum Sachsen wird bei BERNHOFER und MELLENTIN (2008) gegeben.

Abb. 3-42 zeigt somit nicht nur den physiologischen Einfluss einer Variablen, sondern wird auch durch die Güte und Messgenauigkeit dieser bestimmt.

Gültigkeit und Interpretierbarkeit des Modells

Nach RÖHLE (2004) zeichnet sich in den letzten zwei Jahrzehnten ein Paradigmenwechsel in der forstlichen Leistungsschätzung ab: Die Abkehr von der Ertragstafel und die Hinwendung zu einzelstammorientierten Wachstumsmodellen, die eine fundierte kleinräumige Zustandsanalyse mehrschichtiger, gemischter Bestände ermöglichen. Moderne Waldwachstumssimulatoren konzentrieren sich deshalb vorwiegend auf das Wachstum des Einzelbaumes und modifizieren es in Abhängigkeit von der Bestandesstruktur (SCHRÖDER 2004, BRAND 2005). Standort- und Klimavariablen bleiben hierbei außen vor. Für überregionale Leistungsvergleiche von Baumarten erscheint dieses Vorgehen nicht zielführend. Der hier vorgestellte Ansatz verwendet deshalb die Bonität als Bezugsgröße und stellt diese den geostatistisch und regressionsanalytisch hochaggregierten Standortvariablen gegenüber. Bonitäten sind universal gültige, einheitliche Skalen und bieten eine einfache, robuste Möglichkeit, einen unmittelbaren Leistungsvergleich innerhalb einer Baumart bzw. auch zwischen verschiedenen Baumarten kenntlich zu machen (KANGAS 1976, 1977). Durch die Verwendung des MARS-Algorithmus wurden die verwendeten Prädiktorvariablen regressionsanalytisch zusammengefasst und bilden einen „geglätteten“ mittleren Trend ab. Es wird deutlich, dass durch die zugrunde liegende Methodik sich von der kleinräumigen Darstellung der Einzelbaumebene gelöst wird, um eine regionale Modellierung des Wachstums anzustreben. Hierbei schränkt der verwendete Datensatz das Modell auf standörtliche und klimatische Gegebenheiten des Bundeslandes Sachsen ein. Eine Extrapolation der Modelle über den abgebildeten Bereich der Standort- und Klimavariablen ist nicht empfehlenswert. Neben der gegenwärtigen Einschätzung der Leistungsfähigkeiten in unterschiedlichen Regionen können die hier vorgestellten Modelle auch für die Modellierung des Klimawandels eingesetzt werden. Im nachfolgenden Abschnitt werden die Möglichkeiten der Standortleistungsmodelle am Beispiel der Baumart Kiefer vorgestellt.

Möglichkeiten für die waldbauliche Praxis – Gemeine Kiefer im Klimawandel

Neben der Herleitung einer ertragsstarken Bestockung für einen gegebenen Standort können Standortleistungsmodelle vor allem auf die Fragen des Klimawandels eine Antwort geben. Im 4. IPCC-Bericht (2007) wird davon ausgegangen, dass sich die globale Oberflächentemperatur bis zum Ende des 21. Jahrhunderts je nach eingesetzten Szenarien zwischen 1,1 und 6,4 °C erhöht. Die klimatischen Rahmenbedingungen können jedoch regional höchst unterschiedlich ausfallen, was besonders die Forstwirtschaft aufgrund ihrer langfristigen Planungshorizonte vor

große Herausforderungen stellt. In der Literatur finden sich zahlreiche Quellen, welche sich mit der Anpassung forstbetrieblicher Konzepte an den Klimawandel beschäftigen (LINDNER 1999, BROADMEADOW 2005, KÖLLING et al. 2009, RÖHLE et al. 2010a, LINDNER et al. 2014). Im Bundesland Sachsen orientieren sich die forstbetrieblichen Konzepte an Bestandzieltypen und Waldentwicklungstypen, die aus Leitwaldgesellschaften abgeleitet sind. Leitwaldgesellschaften werden wiederum durch charakteristische Hauptbaumarten geprägt (GEMBALLA und SCHLUTOW 2007, EISENHAUER 2008, Staatsbetrieb Sachsenforst 2013, GEMBALLA und PETZOLD 2014). Im Fokus des forstlichen Interesses steht deshalb die Darstellung der Wuchskraft der Leitbaumarten in Abhängigkeit von sich verändernden Umweltbedingungen. Inwieweit Standortleistungsmodelle als Entscheidungs- und Analyseinstrument diesen Prozess unterstützen können, wird in Abb. 3-48 gezeigt. Dargestellt ist die Veränderung der dGZ_{100} -Bonität am Beispiel der Gemeinen Kiefer bei einer Temperaturerhöhung von $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Alle übrigen Standortparameter wurden hierbei konstant gehalten. Verwendet wurde das MARS-Modell für die Gemeine Kiefer, welches in Anhang 19 dargestellt ist⁴¹.

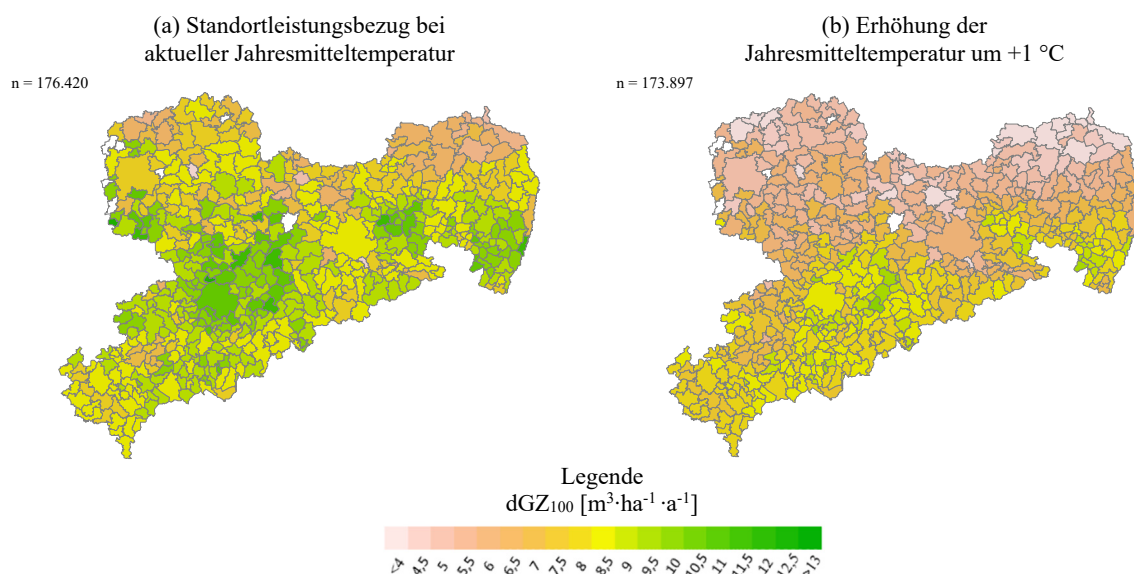


Abb. 3-48: Darstellung der modellierten dGZ_{100} -Bonitäten für die Baumart Gemeine Kiefer bei aktueller Jahresmitteltemperatur (a) bzw. bei erhöhter Jahresmitteltemperatur (b). Dargestellt ist der flächengewogene Mittelwert aller modellierten dGZ_{100} -Bonitäten für die Waldbestände einer Gemeinde.

Die Simulation zeigt bei Erhöhung der Temperatur ein deutliches Absinken der Wuchseleistung gegenüber den heutigen Bonitäten. Insbesondere in den südost-sächsischen Bereichen, wo die Gemeine Kiefer gegenwärtig die führende Baumart ist und es derzeit nur wenige Alternativen zu ihr gibt, werden bei einer Temperaturerhöhung von $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ nur noch Bonitäten von

⁴¹ Die mittels MARS-Algorithmus erstellten Modelle können nicht über den durch den Wertebereich der verwendeten Variablen (gesicherten Bereich) extrapoliert werden.

$< 6,0 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ erreicht. Der Zusammenhang zwischen Temperatur und Bonitätsveränderung kann aus Abb. 3-49 entnommen werden. Modelliert wurde hierbei mit zwei verschiedenen Grundgesamtheiten:

- In Abb. 3-49 (a) wurde hypothetisch angenommen, dass jeder Waldbestand in Sachsen aus Kiefer besteht. Die Bonität bei gegenwärtiger Jahresmitteltemperatur von $7,7^\circ\text{C}$ wurde dementsprechend gleich 100 % gesetzt. Dargestellt ist die prozentuale Verschiebung des flächengewichteten Mittelwertes der dGZ_{100} -Bonität bei Temperaturveränderung. Die Grafik gibt somit eine Antwort auf die Frage, inwieweit sich das Wuchspotenzial der Gemeinen Kiefer in Abhängigkeit von der Temperatur verändert. Dabei zeigt sich, dass eine Erhöhung der Jahresmitteltemperatur von $+2^\circ\text{C}$ ($9,7^\circ\text{C}$) einen Abfall der dGZ_{100} -Bonität von -29,9 % zur Folge hat. Aus dem Absenken der Jahresmitteltemperatur um -1°C resultiert eine leichte Erhöhung (+2 %) der dGZ_{100} -Bonität.
- Abb. 3-49 (b) bezieht lediglich die Grundgesamtheit aller derzeit vorhandenen Kiefernbestände mit ein. Der flächengewichtete Mittelwert aller Bonitätswerte bei einer Jahresmitteltemperatur von $8,4^\circ\text{C}$ wurde gleich 100 % gesetzt. Die Grafik gibt somit eine Antwort auf die Frage, wie die derzeit vorhandenen Kiefernbestände auf eine Temperaturveränderung reagieren. Festgehalten werden muss, dass die Waldbestände der Gemeinen Kiefer bereits auf den wärmer temperierten Standorten zu finden sind. Eine Erhöhung der Temperatur um 2°C ($10,4^\circ\text{C}$) führt deshalb zu einem Abfall der dGZ_{100} -Bonität von -47,4 % und somit zu sehr starken Ertragsverlusten.

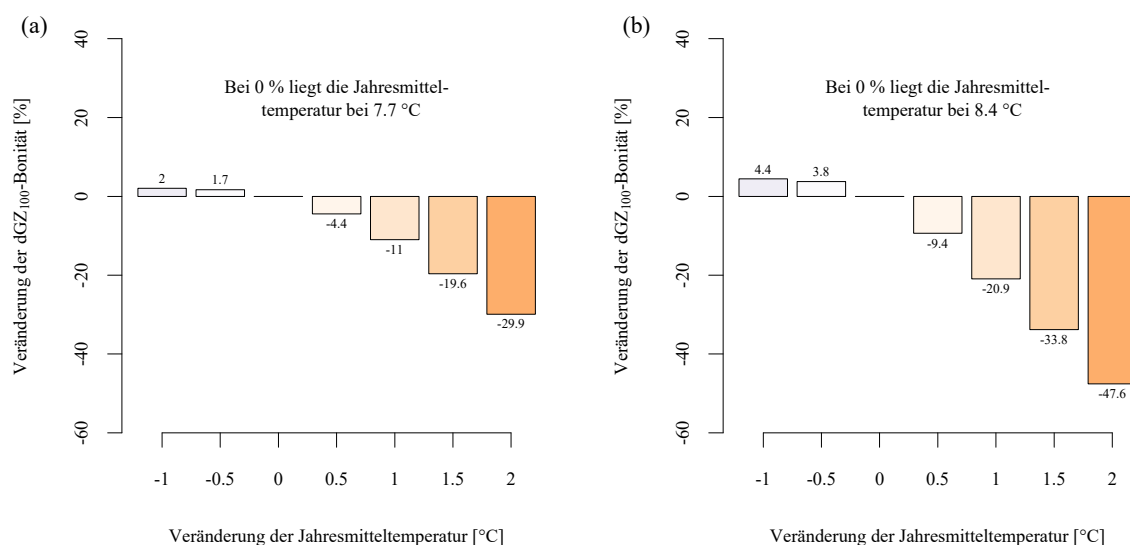


Abb. 3-49: Simulation der dGZ_{100} -Bonität bei Veränderung der Jahresmitteltemperatur unter ceteris paribus-Bedingungen am Beispiel Sachsens. Dargestellt ist die prozentuale Verschiebung des flächengewichteten Mittelwertes.

Die zuvor gezeigte Grafik kann zudem als ein Ausschnitt einer ökologischen Toleranzkurve betrachtet werden. Toleranzkurven spiegeln die Wuchseistung einer Art in Abhängigkeit von Umweltgradienten wider. Sie folgen i. d. R. einer unimodalen (eingipfeligen) Funktion (vgl. Abb. 3-50). Ein Über- oder Unterangebot löst Stress aus und führt zum Rückgang der Wuchseistung und letztendlich zum Tod (NENTWIG et al. 2009). Das ökologische Optimum stellt sich bei Harmonisierung der Wuchseigenschaften mit dem Standort ein und spiegelt den Optimalbereich der Biomasseproduktion wider. Doch ist der maximale Massenzuwachs bei fast allen Baumarten durch den Mangel an irgendeiner Ressource limitiert (LIEBIG 1855 veröffentlichtes "Gesetz" des Minimums).

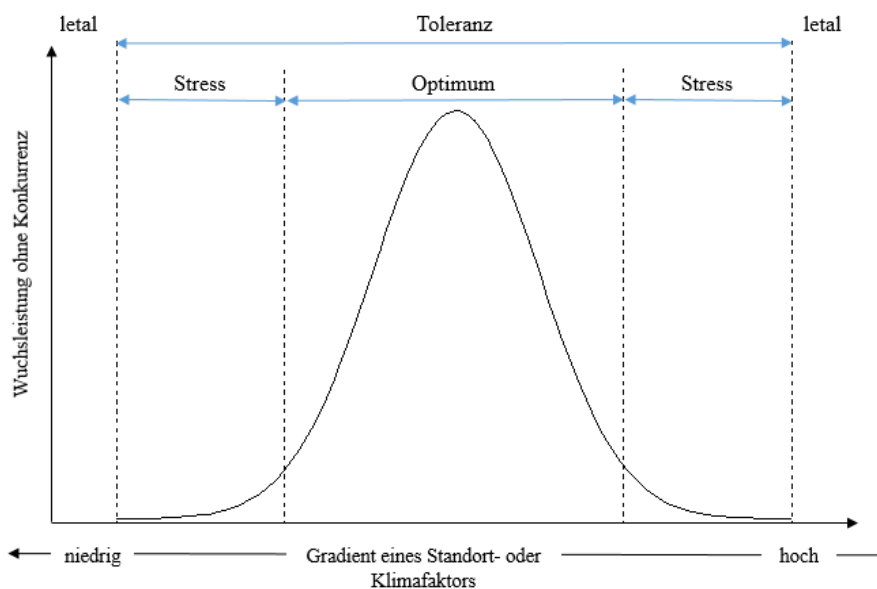


Abb. 3-50: Die Toleranzkurve gibt die Beziehung zwischen dem Gradienten einer Ressource (z. B. eines Standort- oder Klimafaktors) und dem Wachstum (Vitalität) grafisch wieder.

Das physiologische Optimum unterscheidet sich oftmals vom natürlichen Vorkommen (ökologisches Optimum) einer Art. Diese Diskrepanz wird durch die Wechselwirkung abiotischer (Feuer, mechanische Beeinträchtigung etc.) und biotischer Faktoren (Konkurrenz, Herbivore, Pathogene, Symbionten etc.) und Störungen am Wildstandort erklärt (STRASBURGER 2012). Weil das hier vorgestellte Standortleistungsmodell jedoch anthropogen begründete Reinbestände als Datengrundlage verwendet, klammert es den Faktor interspezifischer Konkurrenz durch artfremde Baumarten aus.

Aufgrund des euryöken⁴² Toleranzbereiches der Baumart *Pinus silvestris* L. ist ihr boreal-nemorales Verbreitungsgebiet das größte aller einheimischen Baumarten (BARTELS 1993).

⁴² Euryöke Arten besitzen eine große ökologische Potenz, sie leben in einem weiten Toleranzbereich eines Umweltfaktors (BROSE und MUNK 2009).

Schlussfolgernd kann anhand des hier vorgestellten empirischen Standortleistungsmodells nur ein kleiner Ausschnitt aus dem Spektrum des Umweltgradienten dargestellt werden. Die oftmals vorgenommene Extrapolation der Toleranzkurve mittels einer unimodalen Wirkungsfunktion über den bekannten Datenbereich hinaus empfiehlt sich nicht und führt zu einer Verfälschung der Ergebnisse.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die standort- und klimasensitive Schätzung der Leistungsfähigkeit von Waldbeständen ein zentrales Anliegen der waldwachstumskundlichen Forschung darstellt (RÖHLE 2013). Die getätigten Ausführungen machen deutlich, dass mit dem hier vorgestellten Standortleistungsmodell die Kombinationen von Standort- und Klimavariablen identifiziert werden können, welche optimales Wachstum und somit optimale Holzproduktion einer Baumart gewährleisten. Die Bonität als Responsevariable bildet die Grundlage des Modells und kann als eine Normierung von Waldbeständen verstanden werden, welche sie unabhängig vom Alter vergleichbar macht. Weiterhin konnte gezeigt werden, wie sich unter veränderten Klimabedingungen die Wuchskraft von Baumarten verschiebt. Die Anwendung des Modells wird durch die in Sachsen vorkommenden Gradienten der verwendeten Klima- und Standortfaktoren limitiert (vgl. S. 109ff.). Die vorgestellten Ergebnisse sind als sehr vielversprechend zu deuten und lassen absehen, dass Standortleistungsmodelle zukünftig einen wichtigen Beitrag in der Forsteinrichtung liefern und Fragen der Baumartenwahl und Entwicklung auf überregionaler Ebene beantworten können.

3.2.3 Waldbehandlung und Ertrag

Neben dem Standort hat auch das Durchforstungsregime einen Einfluss auf den Ertrag von Waldbeständen. Die Möglichkeit, den Zuwachs an Holzvolumen eines undurchforsteten Waldbestandes mit der Entnahme einzelner Baumindividuen zu erhöhen, beflügelt seit Generationen das Denken von Forstleuten. Der Zusammenhang zwischen Durchforstungsregime und periodischem Zuwachs in einschichtigen Reinbeständen wird gegenwärtig nach der Theorie „der optimalen Grundflächenhaltung“ von ASSMANN (1961) beschrieben (vgl. Kap. 1.2.3.4, S. 10ff.). Die von ASSMANN aufgestellte Hypothese wurde jedoch nie bewiesen. So kommen beispielsweise WENK et al. (1990, S. 146ff.) in ihrem Werk über die Waldertragslehre zum abschließenden Urteil, dass die Existenz einer optimalen Grundfläche lediglich „*wahrscheinlich ist*“ und dass, „*sobald eine statistische Auswertung aller Flächen versucht wird ... kein deutlicher Zusammenhang zwischen Zuwachs und Grundfläche besteht*“. Zudem steht die von

ASSMANN aufgestellte These im Widerspruch zu den beim Kurzumtrieb beobachteten Zusammenhängen. Dort ergaben die Untersuchungen, dass eine ansteigende Triebdichte mit einem ansteigenden dGZ_B einhergeht (vgl. Kap. 3.1.4., S. 69ff.). In den nachstehenden Ausführungen wird dieser Fragestellung am Beispiel der schnellwachsenden Baumart Küsten-Tanne nachgegangen. Hierfür konnte auf einen Durchforstungsversuch zurückgegriffen werden, welcher dankenswerterweise vom Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (LFE) zur Verfügung gestellt wurde.

3.2.3.1 Durchforstungsversuch mit Küsten-Tanne

Der Küsten-Tanne-Durchforstungsversuch befindet sich in der Abteilung 168 a⁴ der brandenburgischen Oberförsterei Chorin, Revier Maienpfuhl. Eine Übersicht der standörtlichen und klimatischen Bedingungen wird in Tab. 3-19 gegeben.

Tab. 3-19: Küsten-Tannen-Durchforstungsversuch Freienwalde 168: Übersicht der klimatischen und standörtlichen Bedingungen der Versuchsfläche

Höhe [m ü. NN]	Mittlere Jahrestemperatur [°C]	Mittlerer Jahresniederschlag [mm]	Bodentyp	Nährkraftstufe	Feuchtestufe
65 - 117	8,4 - 8,9	510 – 560	Braunerde	R* / K**	2***

*R = reicher Standort **K = kräftiger Standort ***2 = mittelfrischer Standort

Der Versuchsaufbau besteht aus 4 Parzellen mit 49- bis 51-jähriger Küsten-Tanne. Eine Übersicht von Alter, Flächengröße und Behandlungen der jeweiligen Parzellen wird in Tab. 3-20 gegeben. Die erweiterte Beschreibung des Versuchs befindet sich in Anhang 19 bzw. kann in den im Zuge der vorliegenden Veröffentlichung entstandenen Qualifizierungsarbeiten von F. RÖHLE (2015) und MÜLLER (2016) nachgelesen werden.

Tab. 3-20: Küsten-Tannen-Durchforstungsversuch Freienwalde 168: Übersicht der Versuchsparzellen

	Parzelle I	Parzelle II	Parzelle III	Parzelle IV
Begründungsjahr	1965	1965	1963	1963
Flächengröße [m ²]	495	637	1.529	1.426
Behandlung	A-Grad	C-Grad	gestaffelte Durchforstung (gest. DF)	Gruppendurchforstung* (grup. DF)

*Gruppendurchforstung: Bei dem hier vorgenommenen Eingriff wurde stark niederdurchforstet. Einzelne vorherrschende dicht stehende Gruppen wurden beim ersten Eingriff erhalten. In den folgenden Durchforstungen wurde eine mäßige Entnahme von gering entwickelten, zwischenständigen sowie stark geschädigten Bäumen praktiziert. Ziel war es, eine vertikale Differenzierung zu erhalten bzw. eine stark horizontale Strukturierung zu schaffen.

Eine Gesamtauswertung aller wesentlichen ertragskundlichen Kennwerte in Anlehnung an die DESER-Norm (JOHANN 1996) befindet sich in Anhang 20. Die waldwachstumskundliche Auswertung der Parzellen erfolgte unter Verwendung des Versuchsflächendatenbanksystems VFLDBS auf ORACLE®-Basis, welches am Lehrstuhl für Waldwachstums- und Holzmesskunde in Tharandt entwickelt wurde⁴³. Eine grafische Übersicht der wichtigsten Kennwerte wird in Abb. 3-51 gegeben.

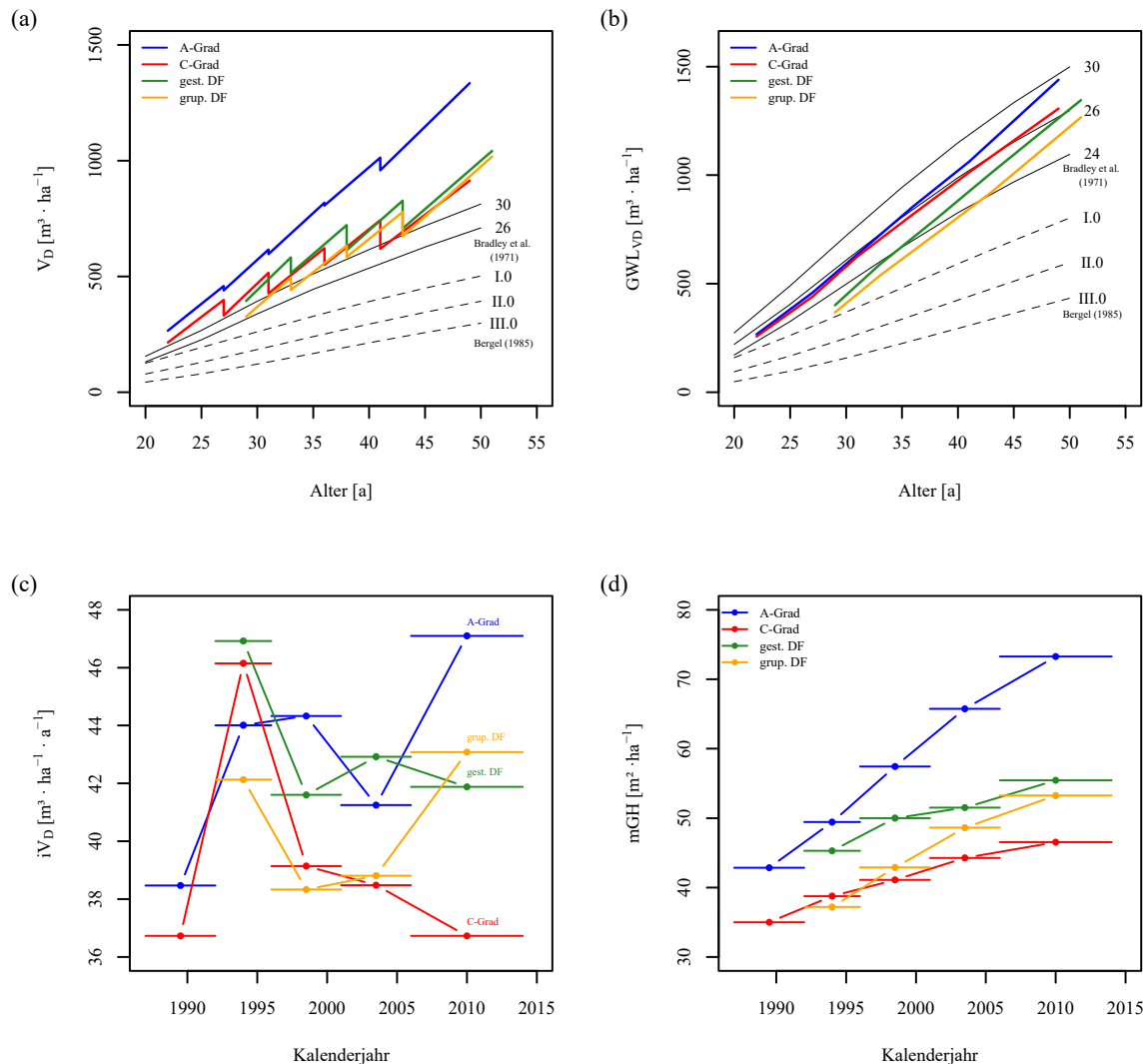


Abb. 3-51: Küsten-Tannen-Durchforstungsversuch Freienwalde 168: Darstellung (a) Volumenentwicklung (V_D) bzw. (b) Gesamtwuchsleistung an Derbholzvolumen (GW_{LV}) unterschiedlicher Durchforstungsarten im Vergleich zur Douglasien-Ertragstafel nach BERGEL (1985) und der Küsten-Tannen-Ertragstafel nach BRADLEY et al. (1971). (c) Darstellung des jährlichen Derbholzzuwachses (iV_D) bzw. (d) der mittleren Grundflächenhaltung (mGH) über dem Kalenderjahr.

Um die Theorie „der optimalen Grundflächenhaltung“ zu überprüfen, wird in Abb. 3-52 der Zusammenhang dargestellt. In Anlehnung an die Arbeiten von ASSMANN (1961) wurden die relativen jährlichen Volumenzuwächse (*rel. iV*) über den prozentualen mittleren Grundflächen

⁴³ Das Datenbanksystem wurde unter der wissenschaftlichen Leitung von Prof. Dr. H. Röhle und Dr. D. Gerold durch K. Körner entwickelt und programmiert (vgl. auch RÖHLE (1999)).

aufgetragen, wobei die A-Grad-Durchforstung gleich 100 % gesetzt ist. Die auf der Abszisse von links nach rechts abnehmende relative Grundflächenhaltung (*rel. mGH*) spiegelt somit den abnehmenden Bestockungsgrad bei zunehmender Durchforstungsstärke wider. Eine grafisch eingetragene Kurve sowie eine regressionsanalytisch hergeleitete Ausgleichsgerade zeigen an, wie die Versuchsflächen bei gegebenem Standort auf das Absenken der Grundfläche bzw. stärker werdende Durchforstung reagieren.

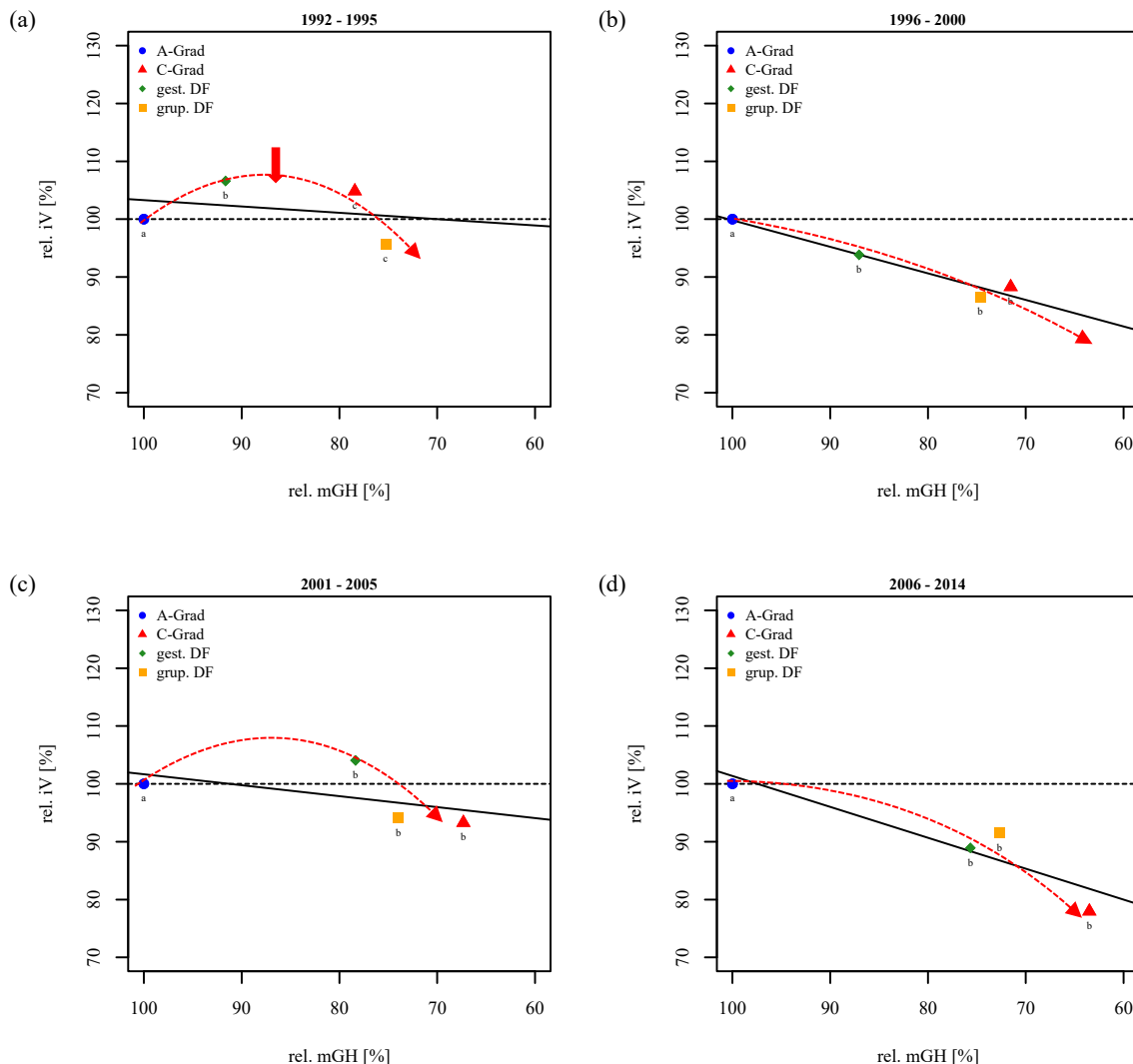


Abb. 3-52: Zusammenhang zwischen rel. mittlerer Grundflächenhaltung (*rel. mGH*) und rel. laufendem Volumenzuwachs an Derbholz (*rel. iV*) am Beispiel des Küsten-Tannen-Durchforstungsversuchs Freienwalde 168. Zusätzlich wurden mittels Teststatistik Gruppen identifiziert (lateinische Buchstaben).

Hierbei zeigt sich, dass insbesondere in der ersten Altersphase (1992 - 1995) eine leichte Grundflächenabsenkung den jährlichen Bestandeszuwachs steigert (vgl. Abb. 3-52 (a)). Durch eine Absenkung der maximalen Grundflächenhaltung von 49,42 m² (A-Grad) auf 38,76 m² (gest. Durchforstung) steigert sich der periodische Volumenzuwachs an Derbholz um 2,14 m³·ha⁻¹ (7 %). Ein weiteres Absenken der Grundfläche bis letztendlich auf 37,2 m² (grup.

DF) führt zum Rückgang bzw. Zuwachsverlust gegenüber dem mit einem roten Pfeil angedeuteten Zuwachsoptimum. Für die Periode 2001 bis 2005 finden wir für den periodischen Zuwachs der Reihe nach die Werte 104 %, 94 % und 93 % bzw. für die Wachstumsperiode 2006 bis 2014 die Werte 89 %, 91 %, 78 % (vgl. Abb. 3-52 (c, d)). Wird aus diesen Werten die Optimumskurve abgeleitet, zeigt sich deutlich, dass mit zunehmendem Alter die Krümmung geringer wird und eine Verlagerung Richtung Abszissenachse stattfindet. Diese Verlagerung wurde bereits von ASSMANN (1961) beschrieben. Lediglich die Wachstumsperiode 1996 bis 2000 (vgl. Abb. 3-52 (b)) entspricht nicht dem von ASSMANN (1961) beschriebenen Theorem.

In einem weiteren Schritt wurden die jährlichen Einzelbaumzuwächse der verschiedenen Durchforstungsvarianten getrennt nach Wuchsperioden auf Unterschiede getestet⁴⁴. Aus dem statistischen Vergleich kann abgeleitet werden, dass sich über alle Wachstumsperioden hinweg lediglich die A-Grad-Durchforstung signifikant von den anderen Behandlungsvarianten unterscheidet. Bei Vergleich der Einzelbaumzuwächse der übrigen Durchforstungsvarianten kristallisiert sich nur in der Wachstumsperiode von 1992 bis 1995 eine zusätzliche Gruppe heraus (vgl. Abb. 3-52 (a)). Ein statistischer Nachweis des Wuchsbeschleunigungseffekts kann dementsprechend an den hier vorgestellten Ergebnissen nicht nachvollzogen werden.

3.2.3.2 ASSMANNs Theorie der Grundflächenhaltung und die -3/2 Selbstdifferenzierungsregel nach REINEKE (1933)

Wie bereits zuvor erörtert, ist für die Darstellung der Produktionskraft nicht der jährliche Zuwachs entscheidend, sondern der sich aus der Gesamtwuchsleistung ableitende durchschnittliche Gesamtzuwachs (vgl. Kap. 3.2.1.2, S. 89). Bei einem direkten Vergleich der unterschiedlichen Behandlungsvarianten kann festgestellt werden, dass die A-Grad-Durchforstung über alle Perioden hinweg stets den höchsten durchschnittlichen Gesamtzuwachs an Derbholz (dGZ_{VD}) aufweist (vgl. Abb. 3-53 (a)). Somit ist eine hohe Stammzahl der niedrigen Stammzahlhaltung, bezogen auf den durchschnittlichen Gesamtzuwachs bzw. die Gesamtwuchsleistung, überlegen. Selbiges Ergebnis konnte bereits aus den zuvor dargestellten Untersuchungen zu Kurzumtriebsplantagen abgeleitet werden (vgl. Kap. 3.1.4) bzw. ist bei ZEIDE (2001) für Hochwälder beschrieben. Selbst bei den von ASSMANN (1961) eingesetzten Versuchsflächendaten des Durchforstungsversuchs Dalby⁴⁵, anhand derer er sein Theorem begründete, weisen schlussendlich die undurchforsteten Parzellen die höchsten dGZ -Werte auf. Diese Ergebnisse verwundern,

⁴⁴ Verwendet wurde der Wilcoxon-Mann-Whitney-Test nach MANN und WHITNEY (1947).

⁴⁵ Versuchsreihe Dalby liegt in Süd-Schonen, im schwedischen Staatsforst. Es handelt sich um einen Durchforstungsversuch mit 81-jähriger Fichte, welcher über einen Zeitraum von 50 Jahren untersucht wurde.

weil trotz „Wuchsbeschleunigungseffekt“, welcher sich temporär bei Niederdurchforstung einstellt, letztendlich die undurchforsteten Parzellen die höhere Biomasse aufweisen.

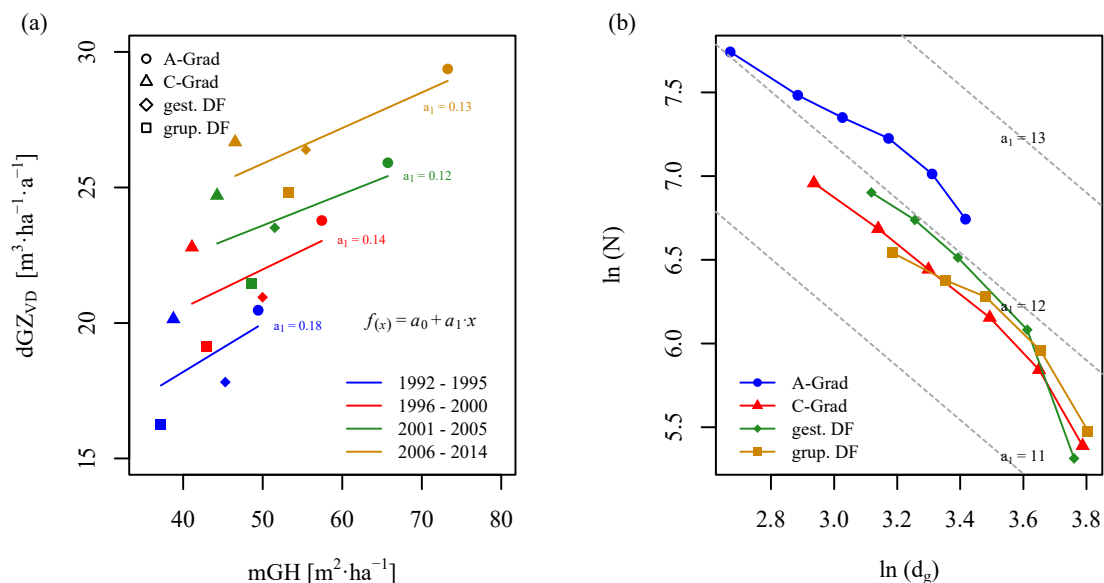


Abb. 3-53: (a) Dargestellt ist der durchschnittliche Gesamtzuwachs an Derbholz in Bezug zur mittleren Grundflächenhaltung bzw. (b) der Zusammenhang zwischen Stammzahl (N) und Mitteldurchmesser (d_g). Zusätzlich wurden die Funktionsbezüge für die sich aus der REINEKE-Regel ergebenden Standortgüten eingetragen. Als Datengrundlage dient der Küsten-Tannen-Durchforstungsversuch Freienwalde 168.

In Abb. 3-53 (b) wurde die -3/2 Selbstdifferenzierungsregel nach REINEKE (1933) auf die Daten des Küsten-Tannen-Durchforstungsversuchs übertragen. Deutlich zeigt sich die Verlagerung der A-Grad-Durchforstung gegenüber den anderen Durchforstungsvarianten. Standortliche Unterschiede sind aufgrund der räumlichen Nähe der hier vorgestellten Versuchsparzellen weitestgehend auszuschließen. Die im vorherigen Kapitel aufgestellte These, dass, je mehr sich die Stammzahlhaltung der Selbstdifferenzierungslinie annähert, umso höher die Flächenproduktionsleistung an Dendromasse ist (vgl. Kap. 3.1.4, S. 70ff.), scheint sich demnach zu bestätigen. Jedoch stellt sich nun die Frage, inwieweit dieser Sachverhalt, insbesondere aus biologischer Sicht, erklärt werden kann.

Um die Wirkungsweise einer Durchforstung zu verstehen, muss zunächst die Zuwachssteuierung eines Baumes sowie der leistungsmindernde Einfluss von Beschirmung erläutert werden. Als wichtigster Prozess für alle Wachstumsvorgänge ist die Photosynthese zu sehen. Neben der Assimilation findet in den Blättern die Respiration (Atmung) statt, wo erzeugte Energie wieder verbraucht wird. Die Biomasseproduktion bei Bäumen ist dabei nur ein Bruchteil der gesamten Assimilationsleistung und ein Großteil der erzeugten Energie geht, bedingt durch Respiration,

den Verlust von Blättern, Ästen, Wurzeln, wieder verloren. Der obere Teil der Krone, die Lichtkrone, ist für die Wuchsleistung der Waldbäume von besonderer Bedeutung. Dieser Kronenbereich besitzt einen optimierten Zugang zum Sonnenlicht und hat den entscheidensten Anteil an der fotosynthetischen Versorgung des Baumes, weil die hier sitzenden Blätter eine hohe Nettoassimilation leisten. Wenn das Ziel eine Maximierung der flächenbezogenen Gesamtwuchsleistung ist, muss die fotosynthetisch aktive Biomasse der Lichtkrone maximiert werden. Forstsanitäre Problemstellungen außer Acht gelassen, gelingt dies am einfachsten durch systematisch angeordnete, in Höhe und Durchmesser sich gleichende Baumindividuen, welche kleine, schmale Kronen aufweisen. Dieser Zustand stellt sich in altersgleichen Reinbeständen ein, wenn nicht durchforstet oder nur tote und absterbende Bäume (A-Grad) entnommen werden (vgl. Abb. 3-54 (a)) (HENGST 1962). Durch Durchforstung hingegen wird der Stärkenzuwachs des Einzelbaumes gefördert. Die Bäume entwickeln aufgrund des vorhandenen Wuchsräume große, breite Kronen mit hohen Astanteilen und ein ungünstiges Verhältnis zwischen Licht- und Schattenkrone (vgl. Abb. 3-54 (b)). Aufgrund der somit höheren Respiration sinkt die Nettoassimilationsleistung dieser Bäume ab (vgl. KRAMER 1988). Paradoxe Weise führt somit der durch Durchforstung herbeigeführte, temporär auftretende Wuchsbeschleunigungseffekt zur Ausformung großkroniger Baumindividuen und somit mit zunehmendem Alter zu einer absinkenden Gesamtwuchsleistung gegenüber den stammzahlreicheren, undurchforsteten Waldbeständen.

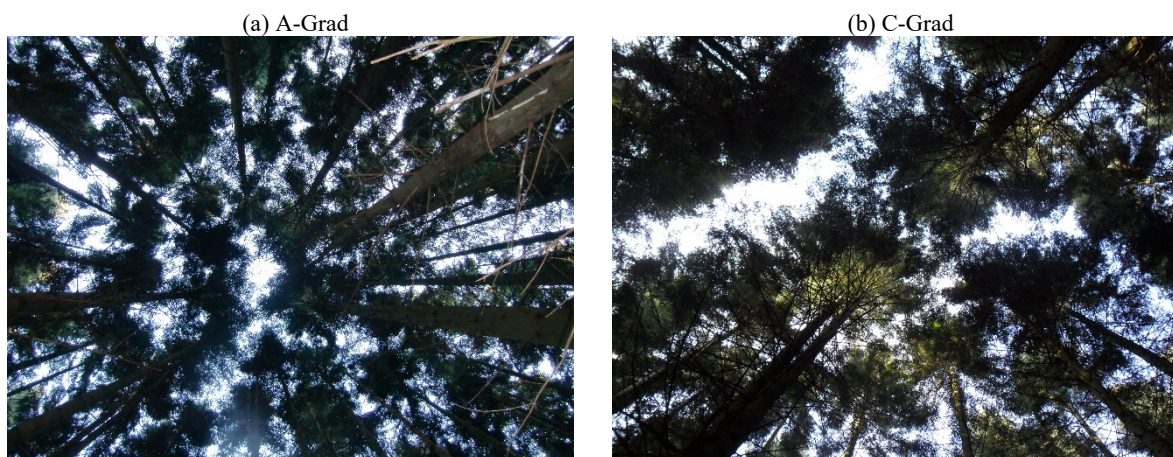


Abb. 3-54: Vergleich von Kronenbreiten und Lichtraumausnutzung 49-jähriger Küsten-Tannen bei unterschiedlichen Durchforstungsstärken

Je näher das Durchforstungsregime eines altersgleichen Reinbestandes entlang seiner standortspezifischen maximalen Grundflächenhaltung geführt wird, welche durch die Regel nach REINEKE (1933) beschrieben wird, umso kleiner und schmalkroniger sind die Individuen gegenüber gleichalten, stark durchforsteten Waldbeständen. Hieraus leitet sich eine effizientere

Assimilationsleistung der Bestände mit höherer Stammzahlhaltung und letztendlich deren höhere Gesamtwuchsleistung ab. In Abb. 3-55 sind die zuvor getätigten Aussagen schematisch abgebildet. Dargestellt ist, wie sich unterschiedliche Durchforstungsstärken auf den durchschnittlichen Gesamtwuchs (dGZ) auswirken. Hierbei soll verdeutlicht werden, dass, je stärker der Durchforstungseingriff ist, umso schneller der Bereich der maximalen Flächenproduktion verlassen wird. Stattdessen wird jedoch das Einzelbaumwachstum gesteigert. Die von REINEKE (1933) aufgestellte Regel kann demnach in altersgleichen Reinbeständen als Produktionsfeld gesehen werden. Der maximale Dendromassenertrag eines Waldbestandes ist demnach bei maximaler Stammzahlhaltung sowie der Kulmination seines dGZ während der Vollkraftphase (vgl. Kap. 3.2.1.2) zu finden.

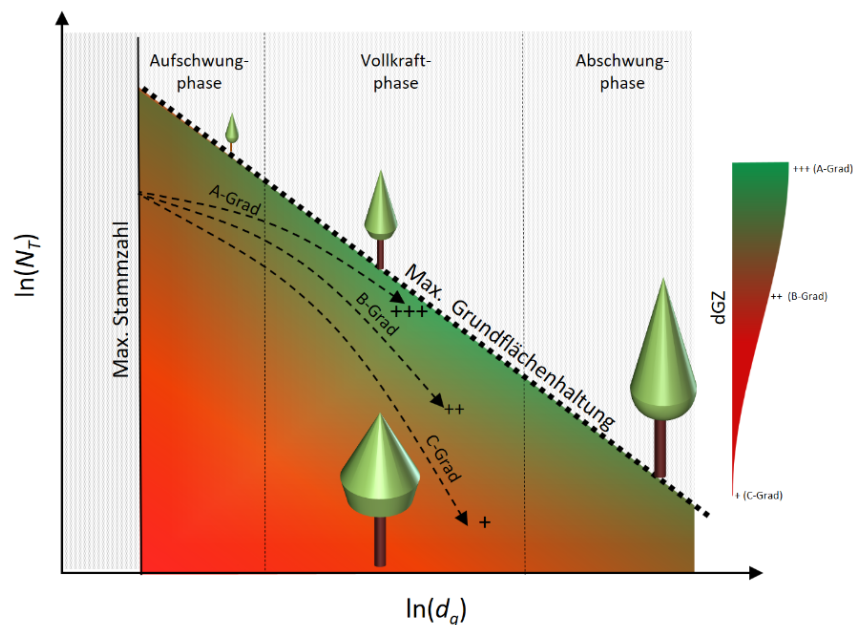


Abb. 3-55: Auswirkungen unterschiedlicher Durchforstungsstärken und damit verbundener Stammzahlhaltung auf den durchschnittlichen Gesamtwuchs (dGZ), bezogen auf die von REINEKE (1933) formulierte Regel

Ähnliches kann in der Landwirtschaft beobachtet werden: Durch Wahl der optimalen Saatgutmenge wird hier versucht, maximale Flächenerträge zu erzielen. Ab einem standortabhängigen Grenzwert kann auch hier durch dichtere Einsaat der Ertrag nicht mehr gesteigert werden. Hier spricht man vom „constant final yield“, also einem, bei gegebener Bodenfruchtbarkeit nicht mehr steigbaren Biomasseertrag pro Fläche (STRASBURGER 2012). Die räumliche Struktur der Individuen ist hierbei entscheidend. Nach Arbeiten von WEINER et al. (2001) bewirkt ein angenähert regelmäßiges Saatmuster höhere Erträge.

Weiterhin kann aus den zuvor getätigten Feststellungen abgeleitet werden, dass in einem altersgleichen Reinbestand hohe Stammzahlen und somit hohe Konkurrenz für einen Einzelbaum

wuchshemmend sind, gleichzeitig jedoch förderlich für die Gesamtwuchsleistung. Abb. 3-56 informiert darüber, wie sich die Konkurrenzsituation entlang der von REINEKE (1933) beschriebenen Regel darstellt. Hierfür wurden Stammzahl und Durchmesser mit einem einfachen Konkurrenzindex verschnitten. Verwendung fand der *CCF*, welcher eine Maßzahl für den Konkurrenzdruck im Kronenraum ist. Der *CCF* gibt hierbei das Verhältnis zwischen der summierten Kronenschirmfläche aller Bäume eines Bestandes und deren Flächengröße an (vgl. Formel 3-21). Demzufolge bedeutet ein *CCF* von 1, dass die gesamte Bestandesfläche zu 100 % überschirmt wird (PRETZSCH 2001).

$$CCF = \frac{1}{A} \cdot \sum_{i=1}^N \cdot kg_i$$

Mit: *CCF* = Kronenkonkurrenzfaktor
A = Bestandesfläche [m²]
kg = Kronengrundfläche [m²]
N = Stammzahl [Stück]

Formel 3-21

In einem weiteren Schritt konnte die -3/2-Regel eingezeichnet werden (vgl. Abb. 3-56, schwarze Linien). Interessant ist, dass entlang der für unterschiedliche a_1 hergeleitete Graphen (vgl. Formel 3-9, S. 63) der *CCF* konstant bleibt. Aus dem Ergebnis kann somit geschlossen werden, dass, wenn die Stammzahlhaltung entlang der Selbstdifferenzierungslinie geführt wird, eine maximale als auch gleichbleibende Konkurrenz zu erwarten ist.

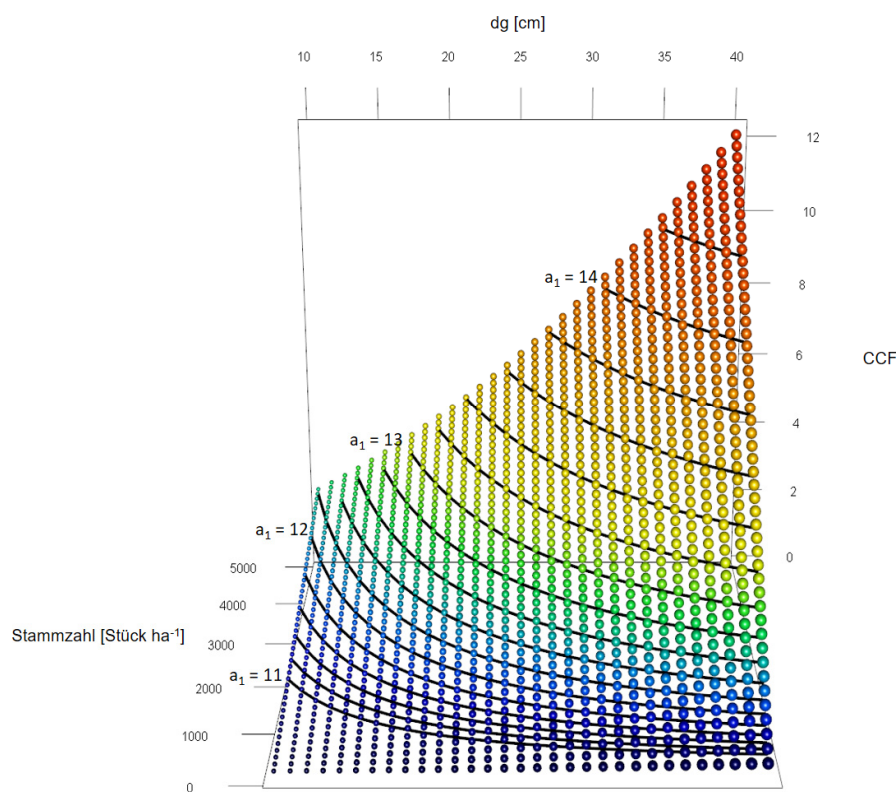


Abb. 3-56: Darstellung der Konkurrenzverhältnisse entlang der -3/2 Selbstdifferenzierungslinie: Gezeigt wird das Verhältnis zwischen Stammzahl, Durchmesser des Grundflächenmittelstammes (d_g) und dem Kronenkonkurrenzfaktor (*CCF*). Die Färbung gibt die Stärke der *CCF* wieder. Die -3/2 Selbstdifferenzierungslinie wurde für unterschiedliche a_1 dargestellt (schwarze Linien).

Unter natürlichen Umweltbedingungen darf die von REINEKE (1933) für uniforme Reinbestände aufgestellte Regel nicht als eine konstante Linie verstanden werden, sondern muss vielmehr als ein Band gesehen werden, welches sich dynamisch in Abhängigkeit der vorherrschenden Standort- und Klimaeigenschaften verschiebt. Standortvariablen sind dabei stabiler als Klimavariablen zu sehen. So kann beispielsweise eine längere Trockenperiode die Leistungsfähigkeit eines Standortes kurzfristig beeinflussen.

Abschließend soll erwähnt werden, dass der Blick dieser Arbeit auf die Dendromasse gerichtet und primär theoretischer Natur ist. Unter natürlichen Umweltbedingungen wird die „Produktivitätskraft von Wald-Ökosystemen“ beispielsweise auch über eine „*üppig entwickelte Strauch- und Bodenvegetation*“, wie ASSMANN (1961) formuliert, ausgelastet. Zudem wird unter dem Grundverständnis einer multifunktionalen Forstwirtschaft die Nutzfunktion gleichwertig mit Schutz- und Erholungsfunktion gesehen. Inwieweit es sinnvoll ist, waldbauliche Strategien der Ertragsmaximierung anzuwenden, wird deshalb u. a. im nachfolgenden Kapitel diskutiert werden.

4 Schlussbetrachtung

In der vorliegenden Arbeit wird erstmals gezeigt, wie sich das Leistungsspektrum von Kurzumtriebsplantagen in Folgerotationen darstellt. Das vorgestellte Modell ist eine wichtige Grundlage bei der Planung der nachhaltigen und effizienten Erzeugung und Bereitstellung von Dendromasse aus Kurzumtrieb. Weiterhin konnte dargestellt werden, welche Erträge eine traditionelle Hochwaldwirtschaft erwarten lassen und wie sich die Wachstumsbedingungen aufgrund von Klima- und Standortveränderungen in den letzten 100 Jahren im Wuchsgebiet Sachsen verändert haben. Für die wichtigsten Wirtschaftsbaumarten wurde zudem ein Standortleistungsmodell entwickelt. Mithilfe dieses Modells können Waldbesitzer die Konsequenzen von Baumartenwechsel auf den Ertrag anhand der Veränderung der dGZ_{100} -Bonität nachvollziehen sowie die Auswirkungen des Klimawandels prognostizieren. Zudem wurde der Zusammenhang zwischen Durchforstung und Gesamtzuwachs neu bewertet. Alle Modelle sind in der vorliegenden Arbeit beschrieben und können vom interessierten Anwender nach kurzer Einarbeitungszeit eingesetzt werden. Weil eine umfangreiche Evaluierung der zuvor genannten Modelle sowie eine weiterführende Methodendiskussion in den spezifischen Themen-Kapiteln bereits erfolgt ist, werden in den nachfolgenden Textabschnitten die Forschungsfragen zusammengeführt und in einem weiterführenden Kontext diskutiert. Hierfür erfolgt in einem ersten Schritt ein Vergleich von Baumplantagen mit einer traditionellen Hochwaldwirtschaft. In einem weiteren Schritt werden die in der Arbeit vorgestellten Optionen zur Intensivierung waldbaulicher Systeme im Zusammenhang aktueller gesellschaftlicher und politischer Entwicklungen dargestellt, bevor ein abschließendes Fazit gezogen wird.

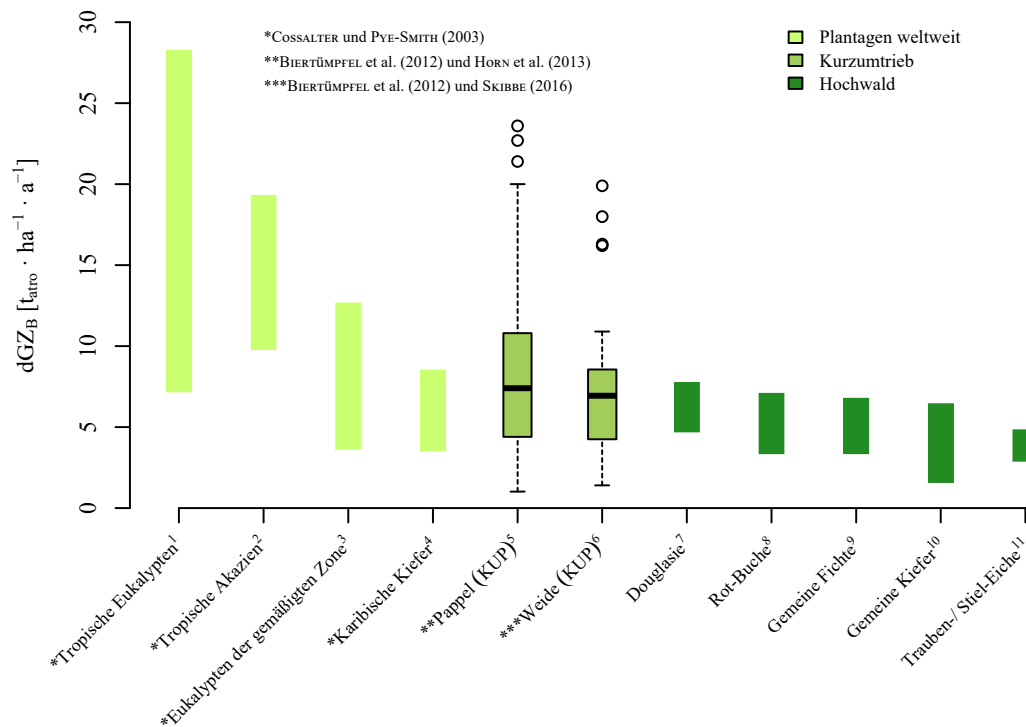
4.1 Baumplantagen im Vergleich mit Hochwäldern

Intensiv bewirtschaftete Baumplantagen werden weltweit stark diskutiert. Besonders industrielle Plantagen mit Baumarten der Gattung *Eukalyptus* und *Acacia* in den Tropen und Subtropen bzw. *Populus* und *Pinus* in den gemäßigten Breiten haben traurige Berühmtheit erlangt (NUTTO 2007, BEMMANN et al. 2008). Neben den sozialen und gesellschaftlichen Problemen führte der großflächige Anbau dieser Baumarten oftmals zur Absenkung des Grundwasserspiegels und somit zu einer Austrocknung von ganzen Landstrichen sowie damit einhergehender Erosion und Desertifikation. Darüber hinaus stehen der Verlust an Biodiversität, insbesondere wenn Baumplantagen durch Rodung von Wald entstanden sind, sowie die Anfälligkeit der gepflanzten Monokulturen gegenüber Schädlingsbefall in starker Kritik (BEMMANN et al. 2008). Trotz der damit einhergehenden Problematik ist die globale Fläche von Forstplantagen in den letzten Jahrzehnten stark angestiegen. Nach WEST (2006) wurden im Zeitraum von 1990 bis 2000

weltweit ca. 3 Mio. ha an Plantagen für die Erzeugung von Holzprodukten neu angelegt. KANOWSKI (2005) gibt an, dass weltweit auf ca. 190 Mio. ha Landfläche intensive Plantagenforstwirtschaft betrieben wird. Dies entspricht ca. 5 % der weltweit bestockten Waldflächen. Als Hauptgrund für diese Entwicklung ist die überlegene Produktivität von Plantagensystemen gegenüber Natur- und traditionell bewirtschafteten Hochwäldern zu nennen. So werden beispielsweise in den tropischen Naturwäldern nur durchschnittliche Zuwächse von 1 bis $5 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ generiert, wohingegen Plantagenbaumarten auf vergleichbaren Standorten durchschnittliche Holzerträge von 10 bis $40 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ erzielen können (COSSALTER und PYE-SMITH 2003, EVANS 2004, PAYN et al. 2015). Werden zudem die kürzeren Umtriebszeiten von Plantagenbaumarten sowie die günstigen Holzerntekosten bei der Betrachtung mit einbezogen, zeigen sich deutlich die betriebswirtschaftlichen Vorteile von Holzplantagen.

In Deutschland kann, trotz der ökonomischen Vorteile von Plantagenforstwirtschaft, der zuvor beschriebene globale Trend nicht beobachtet werden. Mit einer Gesamtfläche von ca. 6.000 ha Kurzumtriebsplantagen für die Feldholzproduktion (BEMMANN und BUTLER MANNING 2013) ist diese Wirtschaftsform für die nationale Holzproduktion derzeit bedeutungslos. Aus den in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnissen geht jedoch hervor, dass aus Kurzumtrieb zu erwartende Flächenerträge deutlich die Holzproduktion aus traditioneller Hochwaldwirtschaft übertreffen können. Um dies zu zeigen, werden in Abb. 4-1 die zu erwartenden Holzerträge aus Kurzumtrieb mit Pappeln- und Weidenhybriden der Massenleistung der wichtigsten Wirtschaftsbaumarten des Schlagweisen Hochwaldes gegenübergestellt. Die Ertragswerte für den Hochwald spiegeln den maximalen durchschnittlichen Gesamtwuchs an Baumholzmasse (dGZ_{max}) für das ertragstafelspezifische Bonitätsspektrum wider (vgl. Kap. 3.2.1.2, S. 89). Zusätzlich dargestellt ist die Dendromasseproduktion der weltweit am häufigsten vorkommenden Plantagenbaumarten nach COSSALTER und PYE-SMITH (2003). Demnach liegt das Spektrum der zu erwartenden Erträge im deutschen Hochwald zwischen 1,4 bis $7,8 \text{ t}_{atro} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$. Die Baumart mit der durchschnittlich höchsten dGZ_{100} -Bonität [$\text{t}_{atro} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$] in Sachsen ist die Douglasie. Die Feldholzproduktion im Kurzumtrieb kann hingegen durchschnittliche Gesamtwüchse an Dendromasse von bis zu $23,6 \text{ t}_{atro} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ($\emptyset 9,45 \text{ t}_{atro} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$) erzielen und somit durchaus mit den Ertragsergebnissen der weltweiten Plantagen mithalten. Im Gegensatz zum Hochwald stehen diese Potenziale aus der Feldholzwirtschaft kurzfristig für die Steigerung der Holzproduktion zur Verfügung. Gründe für die hohe Produktionsleistung von KUP finden sich u. a. in der Wahl von zuwachsstarken Baumarten, dem Einsatz züchterisch verbesserter Klone und der Ver-

wendung hoher Pflanzendichten. Weil Kurzumtriebsplantagen in Deutschland auf landwirtschaftlichen Flächen begründet werden, weisen die Böden eine durch Düngung verbesserte Bodenfruchtbarkeit sowie eine durch Pflügen aufgelockerte, gut durchlüftete Bodenstruktur auf, woraus sich ebenfalls ein verbessertes Wachstum ableitet.



¹**Tropische Eukalypten:** *Eucalyptus grandis* [W.HILL ex MAIDEN], *Eucalyptus urophylla* [S.T.BLAKE], *Eucalyptus tereticornis* [SM.], *Eucalyptus camaldulensis* [DEHNH.], *Eucalyptus pellita* [F.MUELL.], *Eucalyptus robusta* [SM.], *Eucalyptus deglupta* [BLUME] (Hauptanbaugebiete: Brasilien, Südafrika, Uruguay, Indien, Kongo, Zimbabwe, China, Thailand, Vietnam, Madagaskar, Myanmar)

²**Tropische Akazien:** *Acacia mangium* [WILLD.], *Acacia auriculiformis* [A.CUNN. ex BENTH.], *Acacia crassiparva* [A.CUNN. ex BENTH.] (Hauptanbaugebiete: Indonesien, China, Malaysia, Vietnam, Indien, Philippinen, Thailand)

³**Eukalypten der gemäßigten Zone:** *Eucalyptus globulus* [LABILL.], *Eucalyptus nitens* [H.DEANE ex MAIDEN] und weitere frostresistente Arten (Hauptanbaugebiete: Chile, Portugal, Spanien, Argentinien, Uruguay, Südafrika, Australien)

⁴**Karibische Kiefer:** *Pinus caribaea* var. *hondurensis* [(SÉNÉCL.) W.H.BARRETT ex GOLFARI] (Hauptanbaugebiet: Venezuela)

⁵**Pappel (KUP):** Dendromasseerträge von Klonen der Gattung *Populus* auf Versuchsflächen in Ostdeutschland (u. a. Androskoggin, Max 1 - 4, Hybrid 275, Muhle Larsen, Unal, Raspalje, Beaupre, Donk)

⁶**Weide (KUP):** Dendromasseerträge von Klonen der Gattung *Salix* auf Versuchsflächen in Ostdeutschland (u. a. Inger, Jorr, Sven, Tora, Tordis, Ulv)

⁷**Douglasie** (*Pseudotsuga menziesii* (MIRB.) FRANCO): Aus der Ertragstafel nach BERGEL (1985) abgeleitete, bonitätsspezifische Spanne der maximal durchschnittlichen Gesamtwuchsleistungen an Baumholzmasse (**dGZ_{max}**)

⁸**Rot-Buche** (*Fagus sylvatica* L.): Aus der Ertragstafel nach DITTMAR et al. (1986) abgeleitete, bonitätsspezifische Spanne der maximal durchschnittlichen Gesamtwuchsleistungen an Baumholzmasse (**dGZ_{max}**)

⁹**Gemeine Fichte** (*Picea abies* (L.) KARST): Aus der Ertragstafel nach WENK et al. (1985) abgeleitete, bonitätsspezifische Spanne der maximal durchschnittlichen Gesamtwuchsleistungen an Baumholzmasse (**dGZ_{max}**)

¹⁰**Gemeine Kiefer** (*Pinus sylvestris* L.): Aus der Ertragstafel nach LEMBCKE et al. (1975) abgeleitete, bonitätsspezifische Spanne der maximal durchschnittlichen Gesamtwuchsleistungen an Baumholzmasse (**dGZ_{max}**)

¹¹**Trauben- und Stiel-Eiche** (*Quercus petraea* (MAT.) LIEBL. und *Quercus robur* L.): Aus der Ertragstafel nach ERTELD (1962) abgeleitete, bonitätsspezifische Spanne der maximal durchschnittlichen Gesamtwuchsleistungen an Baumholzmasse (**dGZ_{max}**)

Abb. 4-1: Vergleich der Dendromasseproduktion von Plantagenforstwirtschaft mit den zu erwartenden Erträgen ausgewählter Wirtschaftsbaumarten der sächsischen Hochwälder

Dennoch zeigt die große Spannbreite der auf ostdeutschen Versuchsflächen erhobenen Ertragswerte (1,02 bis 23,6 $\text{t}_{\text{atro}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$), dass mit Kurzumtriebswirtschaft auch große Risiken einhergehen. Durch den Anbau oftmals weniger Klonsorten und die damit eingeschränkte genetische Diversität weisen Kurzumtriebsplantagen hohe Anfälligkeiten gegenüber biotischen und abiotischen Risikofaktoren auf. Rostpilze, massenhafte Vermehrung des Großen und des Kleinen Roten Pappelblattkäfers (*Chrysomela populi* L., *Chrysomela tremulae* FABRICIUS), Trockenheit und Frost können zu erheblichen Ertragsverlusten bis zum kompletten Ausfall der Plantage führen (GEORGI et al. 2013). Durch Züchtung neuer resistenter Sorten, kleinräumiger Mischung der Baumarten und Klone auf der Plantage sowie der Anwendung von Pflanzenschutzmitteln können diese Risiken teilweise reduziert werden.

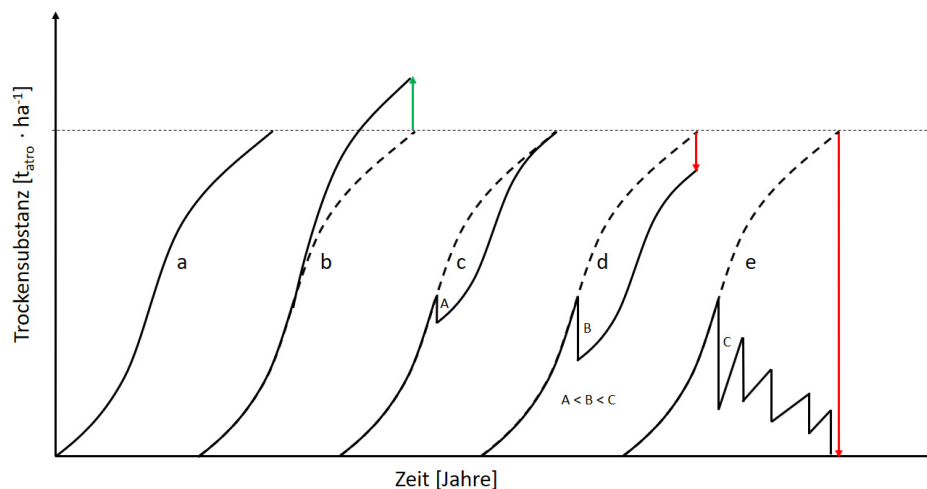
Bei einem Vergleich zwischen Hochwald und Kurzumtriebsplantage müssen auch die unterschiedlichen Zielsetzungen mit einbezogen werden. Im Gegensatz zu Kurzumtriebsplantagen, bei denen i. d. R. die Produktion von Industrieholz (wie z. B. Zellstofffaser- und Energieholz, Hackschnitzel etc.) im Mittelpunkt steht, haben Hochwälder primär die Produktion von möglichst hochwertigem Stammholz (Qualitätsholz) zum Ziel. Neben der Fehlerfreiheit des Holzkörpers spielt bei der Qualitätsholzerzeugung vor allem die mittlere Dimension des Stammes eine entscheidende Rolle. Die in Abb. 4-1 vorgestellten Ertragswerte für den Hochwald entsprechen nicht der Realität, weil die Eigenschaften von Qualitätsholz erst erreicht werden, wenn der durchschnittliche Gesamtzuwachs des Waldbestandes bereits abgesunken ist (vgl. Kap. 1.2.3.3, S. 10). Am Beispiel der Gemeinen Kiefer lässt sich dieser Sachverhalt nachvollziehen. Die Gemeine Kiefer kulminiert beispielsweise in der I-Bonität im Alter 56 bei einem dGZ von 5,11 $\text{t}_{\text{atro}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$. Bei einer Umtriebszeit mit Wertholzoption von 130 Jahren ist ihr dGZ jedoch auf 4,27 $\text{t}_{\text{atro}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ abgesunken (-15 %). Die in Abb. 4-1 dargestellten Werte für den Hochwald entsprechen somit einem über die Umtriebszeit ertragsoptimierten Leistungsmaximum (vgl. Kap. 3.2.1.2).

Mit den in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnissen konnte weiterhin gezeigt werden, dass vor allem die hohen Triebzahlen für die Ertragsstärke von Kurzumtriebsplantagen verantwortlich sind. Die Zunahme der Triebzahl ist der Hauptgrund für den bei allen Versuchsplantagen zu beobachtenden Anstieg der Erträge in der 2. Rotation. In Hochwäldern hingegen wird durch eine Senkung der Stammzahl die Maximierung des Flächenzuwachses zugunsten der schnellen Dimensionierung des Einzelstammes aufgegeben. Durchforstung im Schlagweisen Hochwald führt deshalb, trotz der vielfach beobachteten temporären Erhöhung des laufenden Zuwachses

(Wuchsbeschleunigungseffekt), letztendlich bei Erreichen der Umtriebszeit zu einer niedrigeren Gesamtwuchsleistung gegenüber undurchforsteten Gehölzbeständen. Es ist deshalb davon auszugehen, dass mittels Durchforstung die Massenleistung von Wäldern nicht gesteigert werden kann. Begründung hierfür ist vermutlich, dass die Einzelbäume den mittels Durchforstung geschaffenen Wuchsraum ausnutzen und breite Kronen mit hohen Astanteilen ausbilden. Die Baumindividuen weisen somit ein ungünstiges Verhältnis zwischen Licht- und Schattenkrone auf. Die höhere Respiration führt zu einer niedrigeren Nettoassimilationsleistung gegenüber im Dichtstand erzogenen, schmalkronigen Bäumen. Der bei Waldbeständen vor allem in der Aufschwungphase kurzzeitig zu beobachtende Wuchsbeschleunigungseffekt wird somit durch Zuwachsverluste in der Vollkraft- und Abschwungphase „erkauft“ (vgl. Kap. 3.2.3.2). Die hier vorgestellten Ergebnisse stehen somit im Widerspruch zu der von ASSMANN (1961) aufgestellten „These zum optimalen Grundflächentheorem“. Im engen Bestandesschluss erzogene, schmalkronige Baumindividuen besitzen i. d. R. eine mangelnde individuelle Stabilität gegenüber Sturm- und Schneebelastungen. Lediglich der Deckungsschutz durch Nachbarbäume und ein kollektives Stützgefüge sorgen für die Standfestigkeit. Bereits eine geringe Auflockerung kann den gesamten Waldbestand destabilisieren (BURSCHEL und HUSS 1997). Trotz der überlegenen Gesamtwuchsleistung verbietet sich deshalb aus forstsanitären Erwägungen ein lang anhaltender Dichtstand bei längeren Umtriebszeiten. Weiden und Pappeln im Kurzumtrieb hingegen weisen gegenüber Sturmwurf und -bruch eine erstaunlich hohe Widerstandsfähigkeit auf. Zudem erreichen die oftmals strauchförmigen Austriebe nur selten Höhen, welche die Plantage einem Windwurfrisiko aussetzen. Ein langanhaltender Dichtstand und hohe Triebzahlen sind die Grundlage für ertragreiche Ernten auf einer Kurzumtriebsplantage.

Neben der Ertragsstärke ist bei einer wirtschaftlichen Betrachtung auch die Ertragsstabilität von großer Bedeutung. In diesem Zusammenhang wird oftmals angenommen, dass Forstwirtschaft in Hochwaldbeständen grundsätzlich gleichbleibendere bzw. stabilere Erträge liefert gegenüber intensiv bewirtschafteten, naturfernen Kurzumtriebsplantagen. Für die Bewertung der Ertragsstabilität sind in Anlehnung an BURSCHEL und HUSS (1997) jedoch zwei Fähigkeiten von großer Bedeutung: Die Fähigkeit eines Systems, Störungen zu widerstehen (Resistenz) und nach eingetretener Störung die ursprüngliche Produktivität in einem akzeptablen Zeitraum wieder zu erreichen. Dies kann auf natürlichem Wege geschehen (Resilienz) bzw. durch menschliches Dazutun. In Abb. 4-2 werden die Möglichkeiten gezeigt, wie der Wachstumsverlauf von Waldbeständen bzw. Gehölzanpflanzungen nach Störungen unterschiedlicher Stärke aussehen kann:

- Durch eine leichte Störung verursachte Reduktion der Bestockungsdichte wird durch temporären Mehrzuwachs wieder ausgeglichen (vgl. Abb. 4-2 c).
- Durch eine mittlere Störung herbeigeführte Reduktion der Bestockungsdichte führt zu großem Verlust an Trockensubstanz. Die starken Verluste können bis zum Erreichen der Umtriebszeit nicht kompensiert werden (vgl. Abb. 4-2 d).
- Eine starke Störung destabilisiert den Waldbestand oder die Gehölzanpflanzung. Die Reduktion der Bestockungsdichte schreitet aufgrund von Folgeschäden stärker voran. Erneuerungsmaßnahmen werden notwendig (vgl. Abb. 4-2 e).



- Ungestörter Wachstumsverlauf.
- Veränderter Wachstumsverlauf durch eine Aufwertung des Standortes, beispielsweise durch Meliorationsmaßnahmen oder anthropogene Immissionen von Stickstoff.
- Veränderter Wachstumsverlauf durch eine leichte Störung im mittellalten Bestand. Die Verluste an Dendromasse werden im weiteren Verlauf des Bestandeslebens durch Mehrzuwachs wieder ausgeglichen.
- Störung eines mittellalten Bestandes. Der Ertragsverlust kann durch das Gehölzsystem bis zum Ende der Umtriebszeit nicht aufgewertet werden.
- Durch starke Störung destabilisierter Bestand, der durch Folgeschäden weiter zerstört wird.

Abb. 4-2: Schematischer Wachstumsverlauf von Waldbeständen nach Störungen unterschiedlicher Stärke (verändert nach BURSCHEL und HUSS 1997)

Bäume in Hochwäldern besitzen aufgrund ihrer langen Standzeiten eine hohe Resistenz bzw. Resilienz gegenüber abiotischen und biotischen Störgrößen. Totalausfälle eines Waldbestandes sind somit unwahrscheinlicher als bei einer Kurzumtriebsplantage. Übersteigt jedoch der Störfaktor die Toleranz eines Waldbestandes (z. B. bei flächenhaftem Windwurf, vgl. Abb. 4-2 e) dauert es i. d. R. viele Jahrzehnte, bis in der neubegründeten Kultur die ursprüngliche Ertragsstärke wiederhergestellt ist. Eine Kurzumtriebsplantage besitzt eine niedrigere Resistenz, kann aber, selbst nach komplettem Ausfall, durch Nachpflanzung bzw. Neuanlage innerhalb weniger Jahre in den Bereich ihrer ursprünglichen Produktivität zurückgeführt werden. Der Vollständigkeit halber soll erwähnt werden, dass es auch Umweltveränderungen gibt, die sich positiv

auf den Zuwachs an Dendromasse von Waldbeständen bzw. Gehölzpflanzungen auswirken (vgl. Abb. 4-2 b). So konnte in dieser Arbeit nachgewiesen werden, dass sich die Oberhöhenbonitäten der Baumart Gemeine Fichte im Wuchsraum Sachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt in den letzten 100 Jahren um ca. 5,5 % (entspricht ca. 1 bis 2 m, bezogen auf das Wuchsalter 100 Jahre) verbessert haben. Grund hierfür ist eine anthropogen bedingte Änderung der Standorte und des Klimas. Eine Gefahr durch Umweltveränderungen besteht jedoch darin, dass Baumarten aus ihrer ökologischen Amplitude verschoben werden. Aufgrund der langen Umtriebszeiten und der langsamen Generationsfolge von Waldbeständen sind diese gegenüber Umweltveränderungen besonders anfällig. Gefährdet sind vor allem die Wälder, in denen sich die strukturbestimmende Baumart schon jetzt im ökologischen Grenzbereich befindet. Mehrzuwächse durch Veränderungen der Umweltbedingungen stehen zudem einem steigenden Risiko an Kalamitäten gegenüber.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass bei den hier vorgestellten „anthropogenen Waldökosystemen“, zu denen Waldbestände des Schlagweisen Hochwalds als auch Kurzumtriebsplantagen gleichermaßen zählen, oftmals nur scheinbare Möglichkeiten zur Produktivitätssteigerung vorgestellt wurden. Der Blick der vorliegenden Arbeit fokussiert sich auf verwertbare Dendromasse, welche jedoch nur einen Bruchteil an der hervorgebrachten Biomasse des Gesamtökosystems Wald ausmacht. Bei vielen forstlichen Maßnahmen wird jedoch lediglich der Anteil einzelner Biomassekomponenten eines Ökosystems gezielt zugunsten der Dendromasse verschoben.

4.2 Die Holzproduktion der Zukunft – Quo vadis deutsche Forstwirtschaft?

Eine der Kernaufgaben der Waldwachstumskunde ist die „*Optimierung des Waldertrages bei unterschiedlichen Zielsetzungen unter sorgfältiger Berücksichtigung ökologischer Gesichtspunkte und des Prinzips der Nachhaltigkeit*“ (RÖHLE 1995, S. 218). Der Definition folgend, ist die „Optimierung des Waldertrages“ in Abhängigkeit von Zeit, Standort und waldbaulichen Maßnahmen gleichrangig mit ökologischen und naturschutzfachlichen Zielsetzungen. Auch das Prinzip der Nachhaltigkeit beschränkt sich nicht nur auf die Sicherung der Holzproduktion, sondern bezieht alle Ressourcen und Faktoren der ökosystemaren Gesamtbilanz eines Waldes mit ein. Zu beobachten ist weiterhin, dass in den dicht besiedelten Industrieländern Waldnaturschutz und Walderholung höher bewertet werden als die Holzproduktion (DUNKEL et al. 1994). Während in den meisten Ländern der Erde Ressourcenknappheit herrscht und große Anstren-

gungen unternommen werden müssen, um eine nachhaltige Steigerung der natürlichen Rohstoffe herbeizuführen, ist in Mitteleuropa, speziell Deutschland, eine gegenläufige Tendenz zu beobachten. Unter dem (gefühlten) Eindruck maximaler Ressourcenverfügbarkeit dominieren hier die „Landschaftsaspekte“ des Waldes, den die breite Öffentlichkeit primär als Kulisse für Freizeit und Erholung sieht. Die daraus resultierende, wachsende Bedeutung der biozentrischen Funktionen äußert sich u. a. in Arten- und Habitatschutz, Ausweisung von Totalreservaten mit Nutzungsverzicht sowie Altbaum- und Totholzkonzepten. Die Forstwirtschaft soll kahlschlagsfrei, extensiv und kleinräumig erfolgen, ökologische Nischen schaffen und artenreiche, aufeinander abgestimmte und dem Standort angepasste Waldbilder erzeugen (GADOW 2005). Aus diesen Gründen scheint gegenwärtig die Schaffung von langlebigen extensiv bewirtschafteten Hochwäldern, vor allem in politischen Überlegungen, besonders geeignet für Deutschland. Um Plantagenwirtschaft abzugrenzen, wurde diese eindeutig forstliche Bewirtschaftungsart der Landwirtschaft zugeordnet und darf in Deutschland nur auf Agrarflächen umgesetzt werden. Folgerichtig kann die deutsche Plantagenwirtschaft hinsichtlich ihrer ökologischen Wirkungen auch nicht mit Hochwäldern verglichen werden, sondern muss intensiv bewirtschafteten, einjährigen landwirtschaftlichen Kulturen gegenübergestellt werden. Bei dieser Betrachtung relativieren sich viele der zuvor aufgeführten Nachteile der Kurzumtriebswirtschaft. Nach BEMMANN (2012) weisen Kurzumtriebsplantagen eine höhere Biodiversität, einen geringeren Bedarf an Spritzmitteln und mineralischer Düngung sowie eine verbesserte Bodenbiologie und Humusanreicherung gegenüber intensiv bewirtschafteten Ackerkulturen auf. Demgegenüber stehen jedoch eine längere Flächenbindung, hohe Anlage- und Etablierungskosten und fehlende, durch Wertschöpfungsketten determinierte Absatzmöglichkeiten für das produzierte Energieholz. Dies sind Ursachen, warum derzeit nur sehr wenige Landwirte Energieholzplantagen anlegen. Zudem existiert kein erkennbarer politischer Wille auf Bundes- und Landesebene, eine Kurzumtriebswirtschaft zu entwickeln und großflächig zu fördern (BEMMANN 2012). Wird bedacht, dass 10 t Trockenmasse pro Hektar einem Äquivalent von ca. 4.500 l Heizöl, ca. 9.300 m³ Erdgas bzw. ca. 7 t Steinkohle entsprechen (LIEBHARD 2007), stellt sich die Frage, ob Deutschland, insbesondere vor dem Hintergrund der zu erwartenden Holzlücke (vgl. Kap. 1.1) auf großflächig angelegte Kurzumtriebsplantagen verzichten kann.

Großflächige Ausweisung von Schutzgebieten auf der einen Seite sowie die daraus folgende Kompensation der ausgefallenen Holzerträge durch intensive forstliche Bewirtschaftungssysteme auf der anderen Seite führen zur Abkehr von der multifunktionalen Forstwirtschaft.

Schleichend entwickeln sich segregative Waldnutzungsansätze und es kommt zu einer räumlichen Trennung von Waldfunktionen, verbunden mit einem spezifischen Management von Teilflächen (SUDA und PUKALL 2014). Dieser langsam fortschreitende Prozess ist als eine Fehlentwicklung zu werten, denn gerade der Kompromiss zwischen Nutz-, Schutz- und Erholungsfunktion sichert einen ganzheitlichen und sinnvollen Erhalt des Ökosystems Wald (LEIBUNDGUT 1988). In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob multifunktionale Waldbauprogramme mit ertragssteigernden Maßnahmen aus der Kurzumtriebswirtschaft ergänzt werden können. Eine Möglichkeit wäre beispielsweise das Einbringen schnellwachsender Baumarten als Zeitmischung in bzw. an Rückegassen. Nach derzeitig üblicher waldbaulicher Praxis wird für die Beerntung von Hochwaldbeständen in einem zu erschließenden Waldort im Abstand von jeweils 20 m eine Rückegasse von ca. 4 m Breite angelegt. Mit dieser Maßnahme stehen bis zu 20 % der Bestandesfläche für die Holzproduktion nicht mehr zur Verfügung (vgl. Abb. 4-3).

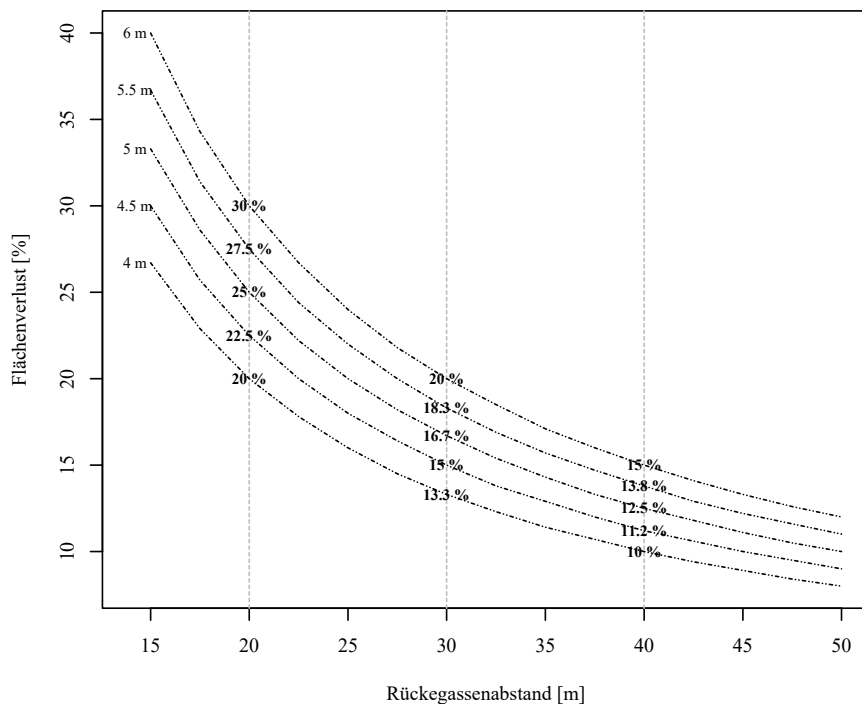


Abb. 4-3: Flächenverlust in Waldbeständen durch die Anlage von Rückegassen, dargestellt für unterschiedliche Gassenbreiten (4 bis 6 m) und verschiedene Rückegassenabstände (15 bis 50 m)

Der entstehende Produktionsverlust könnte durch temporäre Bepflanzung der Rückegassen mittels schnellwüchsiger Baumarten verhindert werden (vgl. Abb. 4-4 (a)). Hierbei muss bedacht werden, dass zum Zeitpunkt des nächsten mechanisierten Eingriffes der Umtrieb für die eingebrachte Baumart beendet ist. Eine Modifikation dieses waldbaulichen Systems könnte deshalb durch horst- bis gruppenweise Einbringung einer Mischbaumart links und rechts neben der Rückegasse erfolgen (vgl. Abb. 4-4 (b)). Die Beerntung der in „Erntetaschen“ eingebrachten

Mischbaumarten richtet sich dabei nicht am ersten Befahren der Rückegasse aus, demnach kann die Ernte auch bei größeren Durchmessern erfolgen (WEICH und UNSELD 2011).

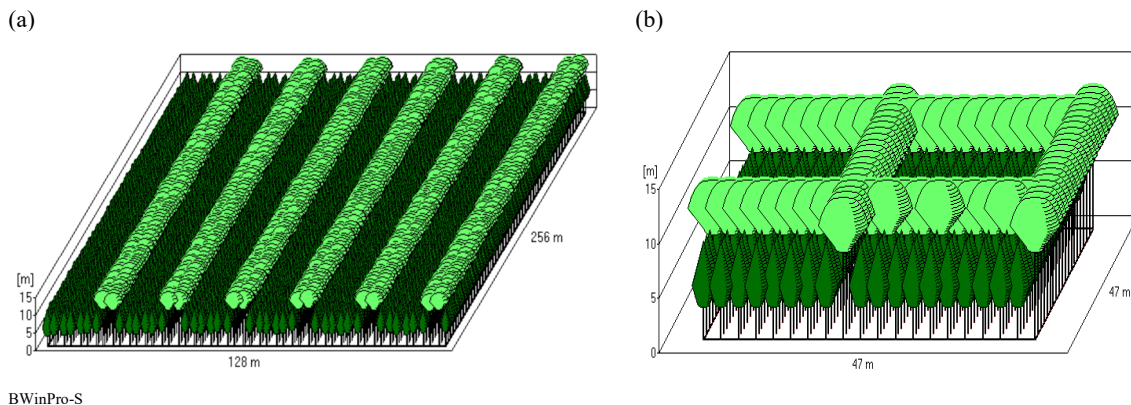


Abb. 4-4: (a) Schematische Darstellung der Einbringung von Pappeln auf Rückegassen. (b) Einbringung von schnellwachsenden Baumarten in Erntetaschen. Die Erstellung der Grafiken erfolgte mit dem Programm BWIN-Pro-S (DÖBBELER et al. 2011)

Sinnvoll erscheinen als Baumarten neben Pappelhybriden auch Aspen, Hybridlärchen und eventuell Birken oder Douglasien. Bezüglich des Arbeitsablaufes könnten die Bäume auf den Gassen 20 bis 25 Jahre wachsen und dann im Zuge der ersten maschinellen Pflege bzw. Durchforstung mit entnommen werden. Denkbar wäre auch der Anbau von schnellwachsenden Baumarten als Vorwald. Hier bietet sich ebenfalls die Baumart Pappel an, welche schnell einen geschlossenen Schirm bildet, konkurrierende Bodenvegetation zurückdrängt und Frostschäden am i. d. R. durch Pflanzung nachgezogenen Unterstand verhindert (UNSELD et al. 2010, UNSELD und BAUHUS 2011). Die genannten Beispiele sind nur einige der denkbaren Optionen.

Abschließend steht zu hoffen, dass sich aus dieser Arbeit beim Leser die Einsicht entwickelt, dass die Substitution von fossilen Brennstoffen durch nachhaltig erzeugtes Rohholz derzeit eine der weltweit effektivsten Umwelt- und Klimaschutzmaßnahmen darstellt. Demnach bleibt zu wünschen, dass nachhaltig bewirtschaftete Kurzumtriebsplantagen bzw. mit schnellwachsenden Baumarten aufgewertete Hochwälder auch in Deutschland breite Akzeptanz in der Bevölkerung finden und die Notwendigkeit der Holzerzeugung verstanden wird. Denn durch den Waldbau von heute entscheiden wir auch über die Ressourcen von morgen.

5 Zusammenfassung

Durch das Ansteigen der Weltbevölkerung und das wirtschaftliche Aufstreben insbesondere der Entwicklungs- und Schwellenländer wird die Nachfrage nach dem Rohstoff Holz beträchtlich wachsen. Gleichzeitig ist die Entwicklung der weltweiten Waldfläche rückläufig. Eine wesentliche Frage für die nationalen Volkswirtschaften wird in der Zukunft sein, den bereits jetzt knapp werdenden Rohstoff Holz in ausreichendem Maße zur Verfügung zu stellen. Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit ertragskundlicher Analyse von Gehölzsystemen und den Möglichkeiten der Ertragssteigerung am Beispiel des Bundeslandes Sachsen. Im Zentrum stehen vor allem Kurzumtriebsplantagen im Vergleich mit Schlagweisen Hochwäldern. Die in dieser Arbeit vorgestellten Forschungsschwerpunkte sind in vier Teilgebiete gegliedert und werden nachfolgend kurz zusammengefasst.

Modellierung des Produktionspotenzials von Pappel-KUP

In diesem Teilgebiet werden anhand vordefinierter Szenarien die ertragskundlichen Möglichkeiten von Kurzumtriebsplantagen im Einzugsgebiet des Freistaates Sachsen gezeigt. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass neben Baumart und Klon, den Standorteigenschaften und der Bestandesdichte vor allem der Rotationszyklus einen bedeutsamen Einflussfaktor für die Ertragsleistung darstellt. Nach der ersten Ernte, d. h. ab der 2. Rotation, tritt meist eine ausgeprägte Leistungssteigerung auf. Gründe für diesen Leistungsanstieg können im überproportional entwickelten Wurzelsystem, dem Wegfallen der „Anwuchsphase“ bei Begründung sowie der primär durch Stockausschlag bzw. sekundär durch Wurzelbrut gesteigerten Triebzahl zu Beginn der 2. Rotation gesehen werden. Die Untersuchungen zeigen, dass die Steigerungsraten des dGZ_B zwischen dem 1,36- bis 5,52-fachen des Ertrages der 1. Rotation (dGZ_B) liegen. Die Zunahme des dGZ_B fällt umso höher aus, je schlechter der Standort bzw. je geringer die Wachstumsleistung in der 1. Rotation ist. Besonders Standorte mit niedrigen Ackerzahlen weisen die höchsten Steigerungsraten auf. Anhand einer breiten Datenbasis konnte ein Modell für die Ertragssteigerung von KUP in Folgerotationen entwickelt werden.

Konstruktion und Anwendung von Ertragstafeln in Hochwäldern

Gezeigt wird, wie anhand von Ertragstafeln das Wachstum sowie die Ertragsstärke von Baumarten überregional nachvollzogen werden kann. Nach einer kurzen Erläuterung zur Aufstellung von Ertragstafeln wird die Konstruktion eines Bonitätsfächers für die schnellwachsende Baumart Küsten-Tanne (*Abies grandis* (DOUGLAS ex D. DON) LINDL.) vorgestellt. In weiteren Schritten erfolgen eine Gegenüberstellung der Wachstumsleistung verschiedener Baumarten anhand der

für Sachsen gültigen Ertragstafelmodelle sowie ein Übertrag auf die sächsische Forsteinrichtung. Die Ertragstafeln wurden hierfür mittels eines eigens entwickelten Modells in die Einheit Trockensubstanz [$t_{atro} \cdot ha^{-1}$] der oberirdisch nutzbaren Holzmasse (Baumholz) umgerechnet. Abschließend wird die gegenwärtige Problematik der Anwendung von Ertragstafeln in der Forsteinrichtung aufgrund von Standort- und Klimaveränderungen diskutiert. Ertragstafeln zeigen das mittlere Normalwachstum für ideelle Waldbestände im Zeitraum ihrer Konstruktion. Sie geben somit langperiodische Grundmuster der Zuwachsverläufe aus einer Zeit wieder, in der die anthropogene Einflussnahme auf unsere Umwelt wesentlich geringer ausgeprägt war. Ertragstafeln eignen sich somit hervorragend zur Beurteilung grundsätzlicher Trendänderungen von Wachstumsbedingungen aufgrund von Klima- und Standortveränderungen. Unter der Zuhilfenahme der Ertragstafel nach WENK et al. (1985) konnte nachgewiesen werden, dass sich das Wachstum der Fichte (*Picea abies* L.) in den letzten 100 Jahren, bezogen auf den Wuchsraum Sachsen, um 5,5 % verbessert hat.

Standortleistungsmodellierung für die Hochwälder Sachsens

Unterschiedliche Standorte bringen differenzierte Waldgesellschaften hervor, welche sich in der quantitativen als auch qualitativen Produktivität von Dendromasse unterscheiden. Die Leistungsfähigkeit einzuschätzen und somit Rückschlüsse auf den Vorrat bzw. den Zuwachs zu tätigen, ist das primäre Anliegen der hier vorgestellten Ergebnisse. Um dies umzusetzen, wurde ein Modell entwickelt, welches den Einfluss von Topografie, Boden und Klima auf die Bonität der wichtigsten Wirtschaftsbaumarten im sächsischen Staatswald beschreibt. Für die Erstellung des Modells wurde ein empirisch-statistischer Ansatz gewählt. Der Ansatz greift auf eine Methode des Data Mining, nämlich Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS) zurück. Darauf aufbauend wird erläutert, wie sich bei Veränderung einzelner Klimavariablen der baumarten- und bonitätsspezifische Wachstumsgang verändert. In einer abschließenden Diskussion werden Probleme und Schwierigkeiten herausgearbeitet, die mit der Modellierung der Standortleistung einhergehen sowie die möglichen Anwendungsbereiche standortsensitiver Modelle aufgezeigt.

Waldbehandlung und Ertrag

Neben dem Standort hat das Durchforstungsregime einen entscheidenden Einfluss auf den Ertrag von Waldbeständen. In der Regel richtet sich dieses Behandlungskonzept an den im Arbeitsplan des Vereins Deutscher Forstlicher Versuchsanstalten vorgeschlagenen Durchforstungsarten und -stärken (Verein Deutscher Forstlicher Versuchsanstalten 1902) aus. Der Zusammenhang zwischen Durchforstungsregime und periodischem Zuwachs in einschichtigen

Reinbeständen wird gegenwärtig nach der „Theorie der optimalen Grundflächenhaltung“ von ASSMANN (1961) beschrieben. Demnach kann der Zusammenhang zwischen Bestandesdichte (quantifiziert durch die mittlere Grundflächenhaltung) und dem periodischen Zuwachs mit einer optimalen Dosis-Wirkungs-Funktion dargestellt werden. Die von ASSMANN aufgestellte Hypothese wurde jedoch nie bewiesen. Deshalb wird in der vorliegenden Arbeit versucht, anhand eines Küsten-Tannen-Durchforstungsversuchs das „optimale Grundflächentheorem“ nachzuvollziehen. Die Ergebnisse zeigen, dass bei einem direkten Vergleich der unterschiedlichen Behandlungsvarianten die A-Grad-Durchforstung über alle Perioden hinweg stets den höchsten durchschnittlichen Gesamtzuwachs an Derbholz aufweist. Somit ist eine hohe Stammzahl der niedrigen Stammzahlhaltung, bezogen auf den durchschnittlichen Gesamtzuwachs bzw. die Gesamtwuchsleistung, überlegen. Eine Optimum-Beziehung kann somit nur schwerlich nachvollzogen werden. Vielmehr weisen die Ergebnisse darauf hin, dass Durchforstung im Schlagweisen Hochwald immer zu einer Absenkung der Gesamtwuchsleistung führt. Begründung hierfür ist, dass die Einzelbäume den mittels Durchforstung geschaffenen Wuchsraum ausnutzen und breite Kronen mit hohen Astanteilen ausbilden. Die Baumindividuen weisen somit ein ungünstiges Verhältnis zwischen Licht- und Schattenkrone auf. Die höhere Respiration führt zu einer niedrigeren Nettoassimilationsleistung gegenüber im Dichtstand erzogenen, schmalkronigen Bäumen. Der durch Durchforstung herbeigeführte, vor allem in der Aufschwungphase kurzzeitig zu beobachtende Wuchsbeschleunigungseffekt wird somit durch Zuwachsverluste in der Vollkraft- und Abschwungphase „erkauft“.

Bei einer abschließenden Gegenüberstellung der Möglichkeiten zur Steigerung der Dendromasseproduktion wurde gezeigt, dass Kurzumtriebsplantagen einen relevanten Beitrag zur zukünftigen Rohholzversorgung in Deutschland erbringen können. Mit einer Gesamtfläche von ca. 6.000 ha ist diese Wirtschaftsform für die nationale Holzproduktion allerdings derzeit noch bedeutungslos. Sollten die fossilen Brennstoffe künftig knapper und teurer werden, könnten nachhaltig bewirtschaftete Kurzumtriebsplantagen bzw. mit schnellwachsenden Baumarten aufgewertete Hochwälder auch in Deutschland zu den forstlichen Bewirtschaftungssystemen der Zukunft gehören.

Summary

The rise in the global population and in the economic ambitions of the developing and newly industrialising nations in particular will prompt a significant increase in the demand for wood. While these developments are taking place, however, the area of forest cover globally is in decline. An issue of central importance for national economies in the years to come will concern their ability to secure an adequate supply of the already limited raw material wood. Against this background, the study presented herein focuses on analyses of the yields provided by certain wood production systems and on the options to increase this yield. The study addresses the issue on the basis of the example of the German federal state Sachsen. A focal point of the study is short rotation coppice plantations, contrasted against age-class high forest stands. The research presented in this study is subdivided into four parts, each of which is summarised individually in the following.

Modelling the production potential of poplar short rotation coppice

In this part of the study the yield possibilities offered by short rotation coppice plantations in Sachsen are demonstrated based on a set of predefined scenarios. The results obtained clearly demonstrated that, in addition to tree species and variety, the site characteristics and the stocking density, the rotation cycle is an especially important influencing factor in terms of yield. After the first harvest, that is, from the second rotation onwards, a marked increase in the growth performance of a short rotation coppice usually occurs. The reasons for this increased growth may be found in the over-proportionately developed root system, the absence of an establishment phase and the increased number of stems from the start of the second rotation onwards, arising primarily as a result of coppicing but also in the form root sprouts. The investigations revealed that the increases in the mean total biomass growth (dGZ_B) were between 1.36 and 5.52 times that of the yield achieved in the first rotation. The increase in the dGZ_B was higher the poorer the site and the lower the growth performance in the first rotation. Sites with low site quality index values in particular revealed the greatest relative rates of yield increase. The large dataset allowed for the creation of a model of yield growth in short rotation coppice plantations of poplar after the first harvest.

Construction and application of yield tables in high forests

This part of the study revealed how the growth and the yield capacity of tree species may be comprehended across regions on the basis of yield tables. Following a short explanation of the creation of yield tables, the construction of a stand site class for the fast-growing tree species grand fir (*Abies grandis* (DOUGLAS ex D. DON) LINDL.) is presented. In a subsequent step the

growth performances of different tree species are contrasted on the basis of the yield table models applicable in Sachsen and then applied to the system of forest management planning for Sachsen. The yield tables were converted, using a model developed specifically for this purpose, to the unit dry matter ($t_{atro} \text{ ha}^{-1}$) of the aboveground, utilisable dendromass. Finally, the difficulties associated with applying yield tables in forest management planning in the context of changing site and climate conditions is discussed. Yield tables indicate the average normal growth for ideal forest stands at the time of the tables' construction. They provide long term basic patterns for growth processes from a time when the effects of the anthropogenic influence on our environment were much less apparent than is the case today. Yield tables, therefore, are an ideal tool to assess fundamental alterations to trends in growth conditions due to site and climate changes. With the aid of the yield table according to WENK et al. (1985), it was possible to demonstrate that over the last 100 years the growth of Norway spruce (*Picea abies* L.) in Sachsen has improved by 5.5 %.

Modelling site performance for Sachsen's high forests

Different sites give rise to different forest associations. These, in turn, differ with respect to dendromass production – quantitatively and qualitatively. The primary focus of the results presented in this part of the study centres on the ability to assess growth capacity, and so to draw conclusions with respect to both stand volume and increment. To facilitate this, a model was developed to describe the influence of topography, soil and climate on the yield of the tree species of greatest economic importance found in Sachsen's state forests. An empirical statistical approach was chosen for the creation of the model. The approach draws on a data mining method, namely multivariate adaptive regression splines (MARS). Developing on this, it is demonstrated how the alteration of individual climate variables affects tree growth in specific tree species and for specific site classes. In the subsequent discussion, the problems and difficulties associated with the modelling of site performance are developed upon and the possible applications of site-sensitive models are highlighted.

Forest management and yield

Not only the site but also the thinning regime applied has a decisive influence on the yield achieved by forest stands. In most cases in Germany this management concept is based on the thinning types and intensities recommended in the work plan published by the *Verein Deutscher Forstlicher Versuchsanstalten* (Association of German Forestry Research Stations) in 1902. The link between thinning regimes and periodic increment in single-layered pure stands is cur-

rently described on the basis of the ‘theory of the maintenance of the optimal basal area’ proposed by ASSMANN (1961). According to this theory, the link between stocking density, quantified by the average basal area, and the periodic increment can be demonstrated by an optimal dose-response function. ASSMANN’s hypothesis was never proved, however. As part of this study, an attempt was made to demonstrate the optimal basal area theory on the basis of a thinning experiment in grand fir. The results of a direct comparison between the different treatments revealed that the ‘*A-Grad-Durchforstung*’ (grade A thinning) resulted in the highest mean total solid volume increment over all periods. This means that a high stocking density is superior to the maintenance of a low number of stems, based on the mean total increment and the total growth performance. An optimal relationship, therefore, is difficult to demonstrate. The research results revealed rather that thinning in age-class high forest always leads to a reduction in the overall growth performance. The reason for this is that the individual trees avail of the space created by thinning and develop large crowns with high branch proportions. The individual trees, therefore, demonstrate an unfavourable relationship between light crowns and shade crowns. The higher respiration leads to a lower net assimilation performance compared to that achieved by the small-crowned trees in a tightly stocked stand. The short-lived increase in growth following thinning, especially apparent in the growth phase, is ultimately offset by considerable increment losses in the optimum and ageing phases.

To conclude, a comparison of the options considered in this study as a means to increase the availability of dendromass revealed that short rotation coppice plantations in particular possess the potential to secure Germany’s wood supply for the future. At present, however, occupying a total area of only approx. 6 000 ha, this form of management plays no role in timber production nationally. As fossil fuels become scarcer and more expensive, sustainably managed short rotation coppice plantations and high forests enriched with fast-growing tree species may assume an important role in Germany in the future.

6 Literaturverzeichnis

Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. Mit 103 Tabellen und 31 Listen. Schweizerbart. Stuttgart. 438 S.

AFAS N. A., MARRON N., DONGEN S. van, LAUREYSENS I., CEULEMANS R. (2008): Dynamics of biomass production in a poplar coppice culture over three rotations (11 years). *Forest Ecology and Management* 255 (5-6): 1883–1891.

ALBERT M., SCHMIDT M. (2008): Erste Ergebnisse zur Modellierung des Standort-Leistungs-Bezuges der Baumart Fichte unter Klimawandel. In: Nagel J. (Hrsg.): *Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde: Beiträge zur Jahrestagung*. Trippstadt: 32–43.

ALBERT M., SCHMIDT M. (2012): Standort-Leistungs-Modelle für die Entwicklung von waldbaulichen Anpassungsstrategien unter Klimawandel. *Archiv für Forstwesen und Landschaftsökologie* 46 (3): 57–71.

ALI W. (2009): Modelling of biomass production potential of poplar in short rotation plantations on agricultural lands of Saxony, Germany. Dissertation. Technische Universität Dresden. XV, 130 S.

AMTHAUER GALLARDO D. (2014): Standortbasierte Ertragsmodellierung von Pappel und Weidenklonen in Kurzumtriebsplantagen. Dissertation. Technische Universität Dresden. 201 S.

ANNIGHÖFER P., AMEZTEGUI A., AMMER C., BALANDIER P., BARTSCH N., BOLTE A., COLL L., COLLET C., EWALD J., FRISCHBIER N., GEBEREYESUS T., HAASE J., HAMM T., HIRSCHFELDER B., HUTH F., KÄNDLER G., KAHL A., KAWALETZ H., KUEHNE C., LACOINTE A., LIN N., LÖF M., MALAGOLI P., MARQUIER A., MÜLLER S., PROMBERGER S., PROVENDIER D., RÖHLE H., SATHORNIKICH J., SCHALL P., SCHERER-LORENZEN M., SCHRÖDER J., SEELE C., WEIDIG J., WIRTH C., WOLF H., WOLLMERSTÄDT J., MUND M. (2016): Species-specific and generic biomass equations for seedlings and saplings of European tree species. *European Journal of Forest Research* 135 (2): 313–329.

ARMSTRONG A. (1997): The United Kingdom network of experiments on site/yield relationships for short rotation coppice. Forestry Commission. Edinburgh. 6 S.

ASSMANN E. (1961): Waldertragskunde. Organische Produktion, Struktur, Zuwachs und Ertrag von Waldbeständen. BLV Verlagsgesellschaft. München. XV, 490 S.

ASSMANN E., FRANZ F. (1963): Vorläufige Fichten-Ertragstafel für Bayern 1963. Institut für Ertragskunde der Forstlichen Forschungsanstalt München. 104 S.

ASSMANN E. (1968): Möglichkeiten zur Steigerung der organischen Produktion und der Ertragsleistung von Wäldern. In: Vincent G. (Hrsg.): *How to increase forest productivity. Present international scientific findings*. Vyt. knihtiskem MIR. Praha: 322–368.

BARTELS H. (1993): Gehölzkunde. Einführung in die Dendrologie. Ulmer. Stuttgart. 336 S.

BAUER F. (1953): Die Roteiche. Sauerländer. Frankfurt a. M. 106 S.

BAUR F. v. (1877): Die Fichte in Bezug auf Ertrag, Zuwachs und Form. Springer-Verlag. Berlin. 58 S.

BEMMANN A., GROBE W., KÖCHER R., KUNIS R., ISSLEIB M. (1997): Energetische Nutzung von Waldholz in Sachsen. *AFZ - DerWald* 52 (13): 706–710.

BEMMANN A., FEGER K.-H., GEROLD D., GROBE W., HARTMANN K.-U., PETZOLD R., RÖHLE H., SCHWEINELE J., STEINKE C. (2007): Kurzumtriebsplantagen auf landwirtschaftlichen Flächen in der Region Großenhain im Freistaat Sachsen. *Forstarchiv* 78 (3): 95–101.

BEMMANN A., PRETZSCH J., SCHULTE A. (2008): Baumplantagen weltweit - eine Übersicht. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 159 (6): 124–132.

BEMMANN A. (2012): Dresdner Erklärung. Mit Bäumen Wald retten – Holz aus Kurzumtriebsplantagen für eine energetische Nutzung. Dresden. 4 S.

BEMMANN A., BUTLER MANNING D. /Hrsg. (2013): Energieholzplantagen in der Landwirtschaft. Verlag Agrimedia. Clenze. 189 S.

BEMMANN A., GURGEL A., SCHUA C., FEGER K.-H. (2013): Kurzumtriebsplantagen auf Grünland. In: Bemann A., Butler Manning D. (Hrsg.): *Energieholzplantagen in der Landwirtschaft*. Verlag Agrimedia. Clenze: 145–150.

- BENNING R., PETZOLD R. (2015): Welche Unsicherheiten resultieren aus der Berechnung der nutzbaren Feldkapazität auf Basis aggregierter Leitprofile? Tagungsbeitrag zu: Jahrestagung der DBG, K II AG Waldböden (Unsere Böden - Unser Leben).
- BENNING R., PETZOLD R., DANIGEL J., GEMBALLA R., ANDREAE H. (2016): Ableitung von Leitbodenprofilen für die Punkte der Bundeswaldinventur in Sachsen und Thüringen. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* 14 (16): 35–42.
- BERGEL D. (1985): Douglasien-Ertragstafel für Nordwestdeutschland. Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt. Göttingen. 72 S.
- BERNHOFER C., MELLENTIN U. (2008): Sachsen im Klimawandel. Eine Analyse. Freistaat Sachsen Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft. Dresden. 211 S.
- BIERTÜMPFEL A., RUDEL H., WERNER A. (2009): 15 Jahre Energieholzversuche in Thüringen. Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt. Jena. 8 S.
- BIERTÜMPFEL A., GRAF T., VETTER A. (2012): Ölfrüchte und Nachwachsende Rohstoffe. Feldversuchsbericht 2010 und 2011. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. Jena. 37 S.
- BMEL (2016): Der Wald in Deutschland. Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. Selbstverlag. Berlin. 52 S.
- BÖCKMANN T., KRAMER H. (1990): Herleitung vorläufiger Massentafeln für Winterlinde (*Tilia cordata* Mill.) in Nordwestdeutschland. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 161 (3): 41–47.
- BÖCKMANN T. (1990): Wachstum und Ertrag der Winterlinde (*Tilia cordata* Mill.) in Niedersachsen und Nordhessen. Dissertation. Georg-August-Universität Göttingen. 143 S.
- BOELCKE B. (2006): Schnellwachsende Baumarten auf landwirtschaftlichen Flächen. Leitfaden zur Erzeugung von Energieholz. Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern. Schwerin. 40 S.
- BOISVENUE C., RUNNING S. W. (2006): Impacts of climate change on natural forest productivity – evidence since the middle of the 20th century. *Global Change Biology* 12 (5): 862–882.
- BÖSCH B. (2001): Neue Bonitierungs- und Zuwachshilfen. In: Forstwissenschaftliche Fakultät der Universität Freiburg und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (Hrsg.): Wissenstransfer in Praxis und Gesellschaft. FVA-Forschungstage 5.- 6. Juli 2001. Selbstverlag. Freiburg (Breisgau): 266–277.
- BOSSEL H. (1994): TREEDYN3 forest simulation model. Mathematical model, program documentation, and simulation results. Selbstverlag des Forschungszentrums Waldökosysteme der Universität Göttingen. Göttingen. 118 S.
- BOSSEL H. (1996): TREEDYN3 forest simulation model. *Ecological Modelling* 90 (3): 187–227.
- BOTKIN D. B., JANAK J. F., WALLIS J. R. (1972): Rationale, limitations, and assumptions of a northeastern forest growth simulator. *IBM Journal of Research and Development* 16 (2): 101–116.
- BOYSEN-JENSEN P. (1932): Die Stoffproduktion der Pflanzen. G. Fischer. Jena. 108 S.
- BRADLEY R. T., CHRISTIE J. M., JOHNSTON D. R. (1971): Forest management tables (metric). Her Majesty's Stationary Office. London. V, 201 S.
- BRAND S. (2005): Modellierung des Jugendwachstums der Eiche im Voranbau unter Kiefernschirm. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden. 156 S.
- BROADMEADOW M.S.J. (2005): Climate change and the future for broadleaved tree species in Britain. *Forestry* 78 (2): 145–161.
- BROSE U., MUNK K. (2009): Ökologie, Evolution. Thieme. Stuttgart, New York. XV, 479 S.
- BRYNDUM H. (1978): Der Einfluß verschiedener Durchforstungsstärken auf Massen- und Wertleistung der Fichte am Beispiel der dänischen Versuchsflächen. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 97 (1): 302–313.
- BUGMANN H. (1997): An efficient method for estimating the steady-state species composition of forest gap models. *Canadian Journal of Forest Research* 27 (4): 551–556.
- BUGMANN H. (2001): A Review of Forest Gap Models. *Climatic Change* 51 (3-4): 259–305.

- BULLARD M. J., MUSTILL S. J., McMILLAN S. D., NIXON P. M. I., CARVER P., BRITT C. P. (2002a): Yield improvements through modification of planting density and harvest frequency in short rotation coppice *Salix* spp. - 1. Yield response in two morphologically diverse varieties. *Biomass and Bioenergy* 22 (1): 15–25.
- BULLARD M. J., MUSTILL S. J., CARVER P., NIXON P. M. I. (2002b): Yield improvements through modification of planting density and harvest frequency in short rotation coppice *Salix* spp. - 2. Resource capture and use in two morphologically diverse varieties. *Biomass and Bioenergy* 22 (1): 27–39.
- BURGER F. (2010): Bewirtschaftung und Ökobilanzierung von Kurzumtriebsplantagen. Dissertation. Technische Universität München. 166 S.
- BURSCHEL P., HUSS J. (1997): Grundriss des Waldbaus. Ein Leitfaden für Studium und Praxis. Paul Parey Verlag. Berlin. XVI, 487 S.
- ČERNÝ M. (1990): Biomass of *Picea abies* (L.) Karst. in midwestern bohemia. *Scandinavian Journal of Forest Research* 5 (1-4): 83–95.
- COSSALTER C., PYE-SMITH C. (2003): Fast-wood forestry. Myths and realities. CIFOR. Bogor. 50 S.
- COTTA H. (1828): Anweisung zum Waldbau. 4. Auflage. Arnoldische Buchhandlung. Dresden. 413 S.
- DANFORS B., LEDIN S., ROSENQVIST H. (1998): Short-rotation willow coppice. Growers' manual. Swedish Institute of Agricultural Engineering. Uppsala. 40 S.
- DAUBER E., KREUTZER K. (1979): Die Ermittlung des Potentials forstlicher Reststoffe in der Bundesrepublik Deutschland. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 98 (1): 289–297.
- DECKMYN G., LAUREYSENS I., GARCIA J., MUYS B., CEULEMANS R. (2004): Poplar growth and yield in short rotation coppice: model simulations using the process model SECRETS. *Biomass and Bioenergy* 26 (3): 221–227.
- DENGLER A., RÖHRIG E., GUSSONE H. A. (1990): Zweiter Band: Baumartenwahl, Bestandesbegründung und Bestandespflege. Mit 41 Tabellen. Paul Parey Verlag. Hamburg, Berlin. 314 S.
- DIETER M., ENGLERT H., KLEIN M. (2001): Abschätzung des Rohholzpentials für die energetische Nutzung in der Bundesrepublik Deutschland. Institut für Ökonomie. Hamburg. 40 S.
- DIETER M., ELSASSER P. (2002): Carbon Stocks and Carbon Stock Changes in the Tree Biomass of Germany's Forests. Kohlenstoffvorräte und -veränderungen in der Biomasse der Waldbäume in Deutschland. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 121 (4): 195–210.
- DIETZSCH A. (2011): Nutzung kontaminierter Böden. Anbau von Energiepflanzen für die nachhaltige ressourcenschonende und klimaverträgliche Rohstoffabsicherung zur Erzeugung von Strom, Wärme und synthetischen Biokraftstoffen der zweiten Generation. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG). Dresden. 76 S.
- DITTMAR O., KNAPP E., LEMBCKE G. (1986): DDR-Buchenertragstafel 1983. Institut für Forstwissenschaften, Abteilung Information. Eberswalde, Finow. 57 S.
- DÖBBELER H., ALBERT M., SCHMIDT M., NAGEL J., SCHRÖDER J. (2011): BWINPro - Programm zur Bestandesanalyse und Prognose. Handbuch zur gemeinsamen Version von BWINPro und BWINPro-S. Version 6.3. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt. 117 S.
- DORMANN F. C., KÜHN I. (2012): Angewandte Statistik für die biologischen Wissenschaften. 2. Auflage. Freiburg. 245 S.
- DUNKEL K., ELSASSER P., OESTEN G., ROEDER A. (1994): Wertschätzung des Waldes aus der Sicht der Waldbesucher. Ergebnisse einer Zielgebietsbefragung im Pfälzerwald. *Mitteilung der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz* 94 (27): 1–72.
- EAMUS D., BURROWS W., MCGUINNESS K. (2000): Review of allometric relationships for estimating woody biomass for Queensland, the Northern Territory and Western Australia. Australian Greenhouse Office. Canberra. iv, 56 S.
- EISENHAUER D.-R. (2008): Waldbaukonzept und Klimawandel. *AFZ - DerWald* 63 (15): 814–817.
- ERTELD W. (1952): Wachstum und Ertrag der Robinie im Gebiet der Deutschen Demokratischen Republik. Dissertation. Berlin, Humboldt-Universität. 144 S.
- ERTELD W. (1962): Wachstumsgang und Vorratsbehandlung der Eiche im norddeutschen Diluvium. *Archiv für Forstwesen* 11 (11): 1155–1176.

- EVANS E. (2004): Domain-driven design: Tackling complexity in the heart of software. Addison-Wesley. 529 S.
- FABRIKA M., PRETZSCH H. (2013): Forest ecosystem analysis and modelling. Technical University in Zvolen. 620 S.
- FAHRMEIR L., KNEIB T., LANG S. (2009): Regression. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 501 S.
- FAO (2016): The Global Forest Resources Assessment. Food and Agriculture Organization. Rom. 44 S.
- FIEDLER F. (1978): Abhängigkeit des Zuwachses in Fichtenbeständen von der Witterung unter Einfluß des Baumalters und der Standortgruppe. Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung 18 (4): 227–230.
- FISCHER A. (1995): Forstliche Vegetationskunde. Blackwell Wissenschafts-Verlag. Berlin, Wien. XV, 315 S.
- FRANZ F. (1983): Auswirkungen der Walderkrankungen auf Struktur und Wuchsleistung von Fichtenbeständen. Forstwissenschaftliches Centralblatt 102 (1): 186–200.
- FRIEDMAN J. H. (1991): Multivariate Adaptive Regression Splines. The Annals of Statistics 19 (1): 1–67.
- FRIEDMAN J. H. (1993): Fast MARS. Technical Report 110. 17 S.
- FRIEDRICH E. (1995): Produktionsbedingungen für die Bewirtschaftung schnellwachsender Baumarten im Stockausschlagsbetrieb in kurzen Umtriebszeiten auf landwirtschaftlichen Flächen. In: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hrsg.): Tagungsband Statusseminar Schnellwachsende Baumarten, Kassel. Gülzow: 43–48.
- GADOW K. von (2003): Waldstruktur und Wachstum. Universitäts-Verlag Göttingen. Göttingen. 237 S.
- GADOW K. von (2005): Forsteinrichtung. Analyse und Entwurf der Waldentwicklung. Universitäts-Verlag Göttingen. Göttingen. 342 S.
- GAUSS C. F. (1809): Theoria motus corporum coelestium. In sectionibus conicis solem ambientium. Sumtibus F. Perthes et I.H. Besser. Hamburg. xi, 227 S.
- GEHRHARDT E. (1909): Ueber Bestandes-Wachstumsgesetze und ihre Anwendung zur Aufstellung von Ertrags- tafeln. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 85: 117–128.
- GEHRHARDT E. (1923): Ertragstafeln für Eiche, Buche, Tanne, Fichte und Kiefer. Springer-Verlag. Berlin. 46 S.
- GEHRHARDT E. (1930): Ertragstafeln für reine und gleichartige Hochwaldbestände von Eiche, Buche, Tanne, Fichte, Kiefer, grüner Douglasie und Lärche. Springer-Verlag. Berlin. 73 S.
- GEMBALLA R., SCHLUTOW A. (2007): Überarbeitung der Forstlichen Klimagliederung Sachsens. AFZ - DerWald 62 (15): 822–826.
- GEMBALLA R., PETZOLD R. (2014): Forstliche Standortsinformationen im Klimawandel. In: Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Hrsg.): Interklim – Der Klimawandel im böhmisch-sächsischen Grenz- raum: 76–79.
- GEORGI R., HELBIG C., MÜLLER M. (2013): Biotische und abiotische Schäden in Kurzumtriebsplantagen. In: Bemann A., Butler Manning D. (Hrsg.): Energieholzplantagen in der Landwirtschaft. Verlag Agrimedia. Clenze: 42–48.
- GEROLD D., GEROLD D. (2013): Ertragstafeln und/oder Wachstumsmodelle. Chancen und Risiken für den Forst- sachverständigen. Wertermittlungsforum 31 (3): 90–101.
- GROTE R., SCHUCK J., BLOCK J., PRETZSCH H. (2003): Oberirdische holzige Biomasse in Kiefern-/Buchen- und Eichen-/Buchen-Mischbeständen. Forstwissenschaftliches Centralblatt 122 (5): 287–301.
- GRUNDNER L., SCHWAPPACH A., SCHOBER R. (1952): Massentafeln zur Bestimmung des Holzgehaltes stehender Waldbäume und Waldbestände. Zehnte völlig neubearbeitete Auflage. Paul Parey Verlag. Berlin, Hamburg. 216 S.
- GUTTENBERG A. (1915): Wachstum und Ertrag der Fichte im Hochgebirge. Deuticke. Wien. 153 S.
- HAMM T., HUTH F., WAGNER S. (2017): Einfluss der Spätblühenden Traubenkirsche (*Prunus serotina* EHRH.) auf die Verjüngung heimischer Laubbaumarten in Kiefernforsten. In: Schaefer M., Schlegel-Starmann H. (Hrsg.): Ergebnisse aus dem Stipendienschwerpunkt »Forschung auf DBU-Naturerbflächen – Ökologische Dy- namik in Offenland und Wald«. Deutsche Bundesstiftung Umwelt. Osnabrück: 40–46.
- HARPER J. L. (1977): Population biology of plants. Academic Press. London, New York. 892 S.

- HARTIG T. (1847): Vergleichende Untersuchungen über den Ertrag der Rothbuche im Hoch- und Pflanz-Walde, im Mittel- und Niederwald-Betriebe nebst Anleitung zu vergleichenden Ertragsforschungen. Förstner. Berlin. 148, XXII S.
- HARTMANN K.-U. (2006): Biomassefunktionen als Grundlage zur Ertragsermittlung in Kurzumtriebsbeständen. In: Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten (Hrsg.): Jahrestagung vom 29. - 31. Mai 2006, Stauf. Tagungsbericht der Sektion Ertragskunde: 167–173.
- HARTMANN K.-U. (2010): Entwicklung eines Ertragsschätzers für Kurzumtriebsbestände aus Pappel. Dissertation. Technische Universität Dresden. 150, IX S.
- HASCHKE P. (1998): Forstliche Energieholzpotenziale in Deutschland und Aspekte ihrer künftigen Nutzung. Teil 1: Modellrechnungen zur Abschätzung des theoretischen und realisierbaren Potenzials an energetisch nutzbarem Waldholz. Holz-Zentralblatt 124 (53): 801–806.
- HAUK S., SKIBBE K., RÖHLE H., SCHRÖDER J., WITTKOPF S., KNOKE T. (2015): Nondestructive Estimation of Biomass Yield for Short-Rotation Woody Crops Is Reliable and Shows High Yields for Commercial Stands in Bavaria. BioEnergy Research 8 (3): 1401–1413.
- HEINSDORF D., KRAUSS H. H. (1990): Schätztafeln für Trockenmasse und Nährstoffspeicherung von Kiefernbeständen. Institut für Forstwissenschaften Eberswalde. Eberswalde. 77 S.
- HENGST E. (1962): Baumgestalt und Zuwachs. Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden 12 (2): 527–531.
- HETSCH S., STEIERER F., PRINS C. (2008): Wood resources availability and demands: Part 2: Future wood flows in the forest and energy sector. UNECE. Genf. 22 S.
- HOFMANN M. (1999): Modellvorhaben "Schnellwachsende Baumarten". Zusammenfassender Abschlußbericht. Landwirtschaftsverlag. Münster. 476 S.
- HORN H., SKIBBE K., RÖHLE H. (2013): Wuchsleistung von KUP aus Pappel in Folgerotationen. AFZ - DerWald 68 (7): 53–55.
- HRADECKÝ J. (1978): Das Bestimmtheitsmaß. Forstwissenschaftliches Centralblatt 97 (1): 168–181.
- HÜNLICH B. (2003): Das Wachstum der Eiche im Wermsdorfer Wald. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden. 72 S.
- HUSS J. (1994): Leitfaden für die Anfertigung von Diplomarbeiten und Dissertationen in der Forstwissenschaft und verwandten Fachgebieten. Sauerländer. Frankfurt am Main. 138 S.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Summary for policy makers. Selbstverlag. Genf. 996 S.
- IVERSON L. R., PRASAD A. M. (2001): Potential Changes in Tree Species Richness and Forest Community Types following Climate Change. Ecosystems 4 (3): 186–199.
- IVERSON L. R., PRASAD A. M., SCHWARTZ M. W. (2005): Predicting Potential Changes in Suitable Habitat and Distribution by 2100 for Tree Species of the Eastern United States. Journal of Agricultural Meteorology 61 (1): 29–37.
- JENKINS J. C., CHOJNACKY D. C., HEATH L. S., BIRDSEY R. A. (2004): Comprehensive database of diameter-based biomass regressions for North American tree species. Gen. Tech. Rep. NE-319. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station. Newtown Square. 45 S.
- JOHANN K. (1996): DESER-Norm 1993. Normen der Sektion Ertragskunde im Deutschen Verband Forstlicher Forschungsanstalten zur Aufbereitung von waldwachstumskundlichen Dauerversuchen. In: Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten (Hrsg.): Jahrestagung 1996, Neresheim. Tagungsbericht der Sektion Ertragskunde: 96–104.
- JOSTEN E., REICHE T., WITTCHE B. (2009): Holzfachkunde. Ein Lehr-, Lern- und Arbeitsbuch für Tischler/Schreiner, Holzmechaniker und Fachkräfte für Möbel-, Küchen- und Umzugsservice. Vieweg + Teubner Verlag. Wiesbaden. xvi, 594.
- JUNACK H. (1978): Stellungnahme zu Karl Sinner "Zur Neuorientierung der Kiefern-Reinbestandswirtschaft". Allgemeine Forstzeitschrift 33 (6): 133–134.
- JUNACK H. (1980): Vorratspflege im zweischichtigen Kiefernwald. Allgemeine Forstzeitschrift 35 (11): 265–267.

- KAHLE H. P. (2011): Führt beschleunigtes Wachstum zu schnellerem Altern? In: Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten (Hrsg.): Jahrestagung vom 6. bis 8. Juni 2011, Cottbus. Tagungsbericht der Sektion Ertragskunde: 102–108.
- KAHN M. (1994): Modellierung der Höhenentwicklung ausgesuchter Baumarten in Abhängigkeit vom Standort. Ludwig-Maximilians-Universität München. 204 S.
- KALTSCHMITT M. /Hrsg. (2009): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer-Verlag. Dordrecht, Heidelberg, London, New York. 1030 S.
- KÄNDLER G., RIEMER U. (2005): Der Zusammenhang zwischen Wuchsleistung und Standort bei Fichte, Tanne und Buche auf den wichtigsten Standortseinheiten des Südschwarzwaldes. In: Teuffel K. v. (Hrsg.): Waldumbau. Für eine zukunftsorientierte Waldwirtschaft; Ergebnisse aus dem Südschwarzwald. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg: 57–84.
- KÄNDLER G., BÖSCH B. (2009): Biomassebestimmung an Waldbäumen – Methodische Grundlagen. FVA-Einblick 13 (2+3): 6–9.
- KANGAS Y. (1976): Die Messung der Bestandesbonität. Theoretische Grundlagen. 1. und 2. Teil. Suomen metsätieteellinen seura. Helsinki. 48 S.
- KANGAS Y. (1977): Die Messung der Bestandesbonität. Ein für das Kontrollmaterial entwickeltes, auf Bestockungsmerkmalen gründendes Bonitierungsfunktionsmodell. 3. Teil. Suomen metsätieteellinen seura. Helsinki. 48 S.
- KANOWSKI P. (2005): Intensively Managed Planted Forests. Scoping Dialogue on Intensively Managed Planted Forests. 8 S.
- KIRA T., OGAWA H., SAKAZAKI N. (1953): Intraspecific competition among higher plants. I. Competition-density-yield interrelationships in regularly dispersed populations. Journal of Institute Polytechnical, Osaka City University, Series D 4 (1-16): 106–129.
- KLÄDTKE J. (2003): Düngungsversuch Fichte 337 Pfalzgrafenweiler. Waldwachstumskundliche Ergebnisse und Schlussfolgerungen. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 174 (2/3): 31–41.
- KNAPP E. (1963): Holzmeßkundliche Untersuchungen über die massebildenden Faktoren des Einzelstammes wirtschaftlich wichtiger Pappelsorten unter besonderer Berücksichtigung der Bauform. Dissertation. Berlin. 183 S.
- KNUST C. (2016): Einsatz von Rinde-Asche-Pellets zur Erhaltung von Stoffkreisläufen bei intensivierter Holznutzung in der Oberlausitz. Dissertation. Technische Universität Dresden. 148 S.
- KÖHLER W. (2007): Biostatistik. Eine Einführung für Biologen und Agrarwissenschaftler. Springer-Verlag. Berlin. 329 S.
- KÖLLING C., KNOKE T., SCHALL P., AMMER C. (2009): Überlegungen zum Risiko des Fichtenanbaus in Deutschland vor dem Hintergrund des Klimawandels. Forstarchiv 80 (2): 42–54.
- KOLLMANN F. (1951): 1. Band.: Anatomie und Pathologie, Chemie, Physik, Elastizität und Festigkeit. Springer-Verlag. Berlin, Göttingen, Heidelberg. 1050 S.
- KOLLMANN F. (1978): Schwankungen von Wachstum, Zuwachs und spezifischer Masse (Rohdichte und Raumdichte) bei Hölzern. Holz als Roh- und Werkstoff 36 (3): 111–119.
- KRAFT G. (1884): Beiträge zur Lehre von den Durchforstungen, Schlagstellungen und Lichtungshieben. Klindworth's Verlag. Hannover. 147 S.
- KRAMER H. (1959): Die Oberhöhe als Bestandesmerkmal. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung: 241–255.
- KRAMER H., KRÜGER H. H. (1981): Vorrat und Nutzungsmöglichkeit forstlicher Biomasse in der BRD. Der Forst- und Holzwirt 36 (2): 33–37.
- KRAMER H. (1988): Waldwachstumslehre. Ökologische und anthropogene Einflüsse auf das Wachstum des Waldes, seine Massen- und Wertleistung und die Bestandessicherheit; mit 165 Tabellen. Paul Parey Verlag. Hamburg. 374 S.
- KRAMER H., AKÇA A. (1995): Leitfaden zur Waldmeßlehre. Sauerländer. Frankfurt am Main. 266 S.
- KREMSER W. (1978): Kiefer muß nicht Sünde sein. Allgemeine Forstzeitschrift 33 (6): 130–133.
- KREUTZER K., DAUBER E. (1980): Die potentielle forstliche Nutzung in der Bundesrepublik Deutschland. Forstwissenschaftliches Centralblatt 99 (1): 1–5.

- KURTH H., GEROLD D., ULBRICHT R. (1994): Forsteinrichtung. Nachhaltige Regelung des Waldes. Deutscher Landwirtschaftsverlag. Berlin. 592 S.
- LAUBHANN D., STERBA H., REINDS G. J., VRIES W. de (2009): The impact of atmospheric deposition and climate on forest growth in European monitoring plots: An individual tree growth model. *Forest Ecology and Management* 258 (8): 1751–1761.
- LAUREYSENS I., PELLIS A., WILLEMS J., CEULEMANS R. (2005a): Growth and production of a short rotation coppice culture of poplar. III. Second rotation results. *Biomass and Bioenergy* 29 (1): 10–21.
- LAUREYSENS I., DERAEDT W., CEULEMANS R. (2005b): Population dynamics in a 6-year-old coppice culture of poplar. *Forest Ecology and Management* 218 (1-3): 115–128.
- LEIBUNDGUT H. (1988): Waldbau heute. P. Haupt. Bern. 119 S.
- LEMBCKE G., KNAPP E., DITTMAR O. (1975): DDR-Kiefern-Ertragstafel. Institut für Forstwissenschaften Eberswalde. Eberswalde. 63 S.
- LIEBHARD P. (2007): Energieholz im Kurzumtrieb. Rohstoff der Zukunft. Stocker. Graz. 123 S.
- LIEBIG J. (1855): Die Grundsätze der Agricultur-Chemie. Mit Rücksicht auf die in England angestellten Untersuchungen. F. Vieweg und Sohn. Braunschweig. 107 S.
- LINDNER M. (1999): Waldbaustrategien im Kontext möglicher Klimaänderungen. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 118 (1-6): 1–13.
- LINDNER M., FITZGERALD J. B., ZIMMERMANN N. E., REYER C., DELZON S., MAATEN E., SCHELHAAS M.-J., LASCH P., EGGERS J., MAATEN-THEUNISSEN M., SUCKOW F., PSOMAS A., POULTER B., HANEWINKEL M. (2014): Climate change and European forests: what do we know, what are the uncertainties, and what are the implications for forest management? *Journal of environmental management* 146: 69–83.
- LOCKOW K.-W. (1996): Ertragstafel für die Roterle (*Alnus glutinosa* [L.] Gaertn.) in Mecklenburg-Vorpommern. Ministerium für Landwirtschaft und Naturschutz. Schwerin. 67 S.
- LOCKOW K.-W. (1998): Ertragstafel für die Sandbirke (*Betula pendula* Roth) sowie für die Moorbirke (*Betula pubescens* Ehrh) für das nordostdeutsche Tiefland. Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei. Schwerin. 90 S.
- LOCKOW K.-W., LOCKOW J. (2007): Anbau der Großen Küstentanne in Brandenburg aus ertragskundlicher Sicht. *Forstarchiv* 78 (5): 158–165.
- LÖFFLER H., PATZAK W., DÜRRSTEIN H. (1988): Ernte von Kurzumtriebsplantagen. In: *Forstwissenschaftliche Fakultät der Universität München (Hrsg.): Anbau schnellwachsender Laubbaumarten in Kurzumtrieben auf landwirtschaftlichen Nutzflächen als Problem von Forst- und Holzwirtschaft. 6 Kolloquiumsvorträge u. Diskussion; Kolloquium d. Lehrstühle für Forstpolitik u. Forstl. Betriebswirtschaftslehre d. Ludwig-Maximilians-Univ. München. Selbstverlag. München: 26–56.*
- LOREY T. (1878): Die mittlere Bestandeshöhe. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 54: 149–155.
- MÄKELÄ A., LANDSBERG J., EK A. R., BURK T. E., TER-MIKAELIAN M., AGREN G. I., OLIVER C. D., PUTTONEN P. (2000): Process-based models for forest ecosystem management: current state of the art and challenges for practical implementation. *Tree Physiology* 20 (5-6): 289–298.
- MÄKELÄ A. (2003): Process-based modelling of tree and stand growth: towards a hierarchical treatment of multiscale processes. *Canadian Journal of Forest Research* 33 (3): 398–409.
- MANN H. B., WHITNEY D. R. (1947): On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *The Annals of Mathematical Statistics* 18 (1): 50–60.
- MANTAU U. (2010): EUwood - Real potential for changes in growth and use of EU. Final report. Hamburg/Germany. 160 S.
- METTE H.-J. (1984): Holzkundliche Grundlagen der Forstnutzung. Deutscher Landwirtschaftsverlag. Berlin. 148 S.
- MICHAILOFF I. (1943): Zahlenmäßiges Verfahren für die Ausführung der Bestandeshöhenkurven. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 65 (6): 273–279.
- MIßBACH S. (2015): Untersuchungen zu standortunabhängigen Eigenschaften des Wachstums für verschiedene Baumarten. Dissertation. Technische Universität Dresden. 193 S.
- MÖHRING B., HATZFELD N. v. (2016): Vom Nutzen der Holznutzung. *AFZ - DerWald* 71 (23): 10.

- MONSERUD R. A. (1984): Height Growth and Site Index Curves for Inland Douglas-fir Based on Stem Analysis Data and Forest Habitat Type. *Forest Science* 30 (4): 943–965.
- MUCHIN A. (2004): Analytische Untersuchungen zum Einfluss des Standorts auf das Wachstum von Stiel- und Traubeneiche im nordostdeutschen Tiefland. Dissertation. Technische Universität Dresden. 169 S.
- MUCHIN A., BILKE G., MURN Y., RÖGE R. (2008): Nachhaltige Potenziale von Dendromasse. In: Murach D., Knur L., Schultze M. (Hrsg.): DENDROM - Zukunftsrohstoff Dendromasse. Systemische Analyse, Leitbilder und Szenarien für die nachhaltige energetische und stoffliche Verwendung von Dendromasse aus Wald- und Agrarholz; Endbericht, November 2008, Eberswalde, Berlin, Cottbus. Kessel. Remagen: 117–150.
- MÜLLER D. (2016): Waldwachstumskundliche Auswertung und Analyse des Küstentannendurchforstungsversuches Chorin 168 (Brandenburg) mit Focus auf das optimale Grundflächentheorem von ASSMANN (1961). Bachelorarbeit. 42 S.
- MUUKKONEN P., MÄKIPÄÄ R. (2006): Biomass Equations for European Trees: Addendum. *Silva Fennica* 40 (4): 763–773.
- MUUKKONEN P. (2007): Generalized allometric volume and biomass equations for some tree species in Europe. *European Journal of Forest Research* 126 (2): 157–166.
- NAGEL J. (1985): Wachstumsmodell für Bergahorn in Schleswig-Holstein. Dissertation. 124 S.
- NEBE W. (1976): Zur Methodik standortkundlicher Auswertung von Bestandesdüngungsversuchen. *Beiträge für die Forstwirtschaft* 11 (4): 179–184.
- NEBE W. (1978a): Düngung von Fichtenjungbeständen auf grund- und stauwasserfreien Standorten. *Beiträge für die Forstwirtschaft* 13 (3): 127–130.
- NEBE W. (1978b): Ein Düngungsvorschlag für Fichtenbestände am Beispiel des Tharandter Waldes. *Beiträge für die Forstwirtschaft* 13 (4): 155–162.
- NENTWIG W., BACHER S., BRANDL R. (2009): Ökologie kompakt. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg. 354 S.
- NOTHDURFT A., KUBLIN E., LAPPI J. (2006): A non-linear hierarchical mixed model to describe tree height growth. *European Journal of Forest Research* 125 (3): 281–289.
- NOTHDURFT A., WOLF T., RINGELER A., BÖHNER J., SABOROWSKI J. (2012): Spatio-temporal prediction of site index based on forest inventories and climate change scenarios. *Forest Ecology and Management* 279: 97–111.
- NUTTO L. (2007): Die Eukalyptus-Plantagenwirtschaft in Brasilien. *Forstarchiv* 78 (6): 49–53.
- PAULSEN J. C. (1795): Kurze praktische Anweisung zum Forstwesen oder Grundsätze über die vorteilhafteste Einrichtung der Forsthaushaltung und über Ausmittlung des Werths vom Forstgrunde besonders auf die Grafschaft Lippe angewendet. Selbstverlag. Detmold. XVI, 152 S.
- PAYN T., CARNUS J.-M., FREER-SMITH P., KIMBERLEY M., KOLLERT W., LIU S., ORAZIO C., RODRIGUEZ L., SILVA L. N., WINGFIELD M. J. (2015): Changes in planted forests and future global implications. *Forest Ecology and Management* 352: 57–67.
- PÉREZ-CRUZADO C. (2011): Models for estimating biomass and carbon in biomass and soils in *Pinus radiata* (D. Don), *Eucalyptus globulus* (Labill) and *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden plantations established in former agricultural lands in northwestern Spain. Dissertation. 235 S.
- PESCHEL W. (1938): Die mathematischen Methoden zur Herleitung der Wachstumsgesetze von Baum und Bestand und die Ergebnisse ihrer Anwendung. Dissertation. Berlin. 247 S.
- PETZOLD R., FEGER K.-H., SCHWÄRZEL K. (2009): Wasserhaushalt von Kurzumtriebsplantagen. In: Reeg T. (Hrsg.): Anbau und Nutzung von Bäumen auf landwirtschaftlichen Flächen. Wiley-VCH. Weinheim: 41–55.
- PISTORIUS T. (2007): Die Bedeutung von Kohlenstoffbilanzen im Diskurs über die Einbindung der Forstwirtschaft in die nationale Klimapolitik. Dissertation. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. 252 S.
- PRASAD A. M., IVERSON L. R., LIAW A. (2006): Newer Classification and Regression Tree Techniques: Bagging and Random Forests for Ecological Prediction. *Ecosystems* 9 (2): 181–199.
- PRETZSCH H. (1987): Zur Frage des Normalwachstums der Kiefer in der Oberpfalz. *Der Forst- und Holzwirt* 42 (11/10): 289–293.
- PRETZSCH H. (1992): Zunehmende Unstimmigkeit zwischen erwartetem und wirklichem Wachstum unserer Waldbestände. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 111 (1): 366–382.

- PRETZSCH H. (1999): Waldwachstum im Wandel. Forstwissenschaftliches Centralblatt 118 (1-6): 228–250.
- PRETZSCH H. (2000): Die Regeln von REINEKE, YODA und das Gesetz der räumlichen Allometrie. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 171 (11): 205–210.
- PRETZSCH H., UTSCHIG H. (2000): Wachstumstrends der Fichte in Bayern. Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. München. 170 S.
- PRETZSCH H. (2001): Modellierung des Waldwachstums. Mit 10 Tabellen. Paul Parey Verlag. Berlin. XVI, 341 S.
- PRETZSCH H. (2011): Vergleich der Produktivität von Rein- und Mischbeständen aus Eiche und Buche entlang eines ökologischen Gradienten. In: Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten (Hrsg.): Jahrestagung vom 6. bis 8. Juni 2011, Cottbus. Tagungsbericht der Sektion Ertragskunde: 69–80.
- PRETZSCH H., BIBER P., SCHÜTZE G., UHL E., RÖTZER T. (2014a): Beschleunigtes Waldwachstum erfordert Anpassung. Holz-Zentralblatt 38 (48): 1178.
- PRETZSCH H., BIBER P., SCHÜTZE G., UHL E., RÖTZER T. (2014b): Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. Nature communications 5: 1–10.
- PRETZSCH H., BIBER P., SCHÜTZE G., UHL E., RÖTZER T. (2015a): Baumwachstum auf der Überholspur. Beschleunigtes Waldwachstum in Mitteleuropa seit 1870. In: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (Hrsg.): Das forstliche Versuchswesen in Bayern - LWF-Wissen 76. Selbstverlag. Freising: 31.
- PRETZSCH H., RÍO M. D., AMMER C., AVDAGIC A., BARBEITO I., BIELAK K., BRAZAITIS G., COLL L., DIRNBERGER G., DRÖSSLER L., FABRIKA M., FORRESTER D. I., GODVOD K., HEYM M., HURT V., KURYLYAK V., LÖF M., LOMBARDI F., MATOVIĆ B., MOHREN F., MOTTA R., DEN OUDEN J., PACH M., PONETTE Q., SCHÜTZE G., SCHWEIG J., SKRZYSZEWSKI J., SRAMEK V., STERBA H., STOJANOVIĆ D., SVOBODA M., VANHELLEMONT M., VERHEYEN K., WELLHAUSEN K., ZLATANOV T., BRAVO-OVIEDO A. (2015b): Growth and yield of mixed versus pure stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) analysed along a productivity gradient through Europe. European Journal of Forest Research 134 (5): 927–947.
- PRETZSCH H. (2015): Veränderte Dynamik von süddeutschen Waldbeständen seit 1870. In: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (Hrsg.): Das forstliche Versuchswesen in Bayern - LWF-Wissen 76. Selbstverlag. Freising: 72–87.
- PRODAN M. (1965): Holzmeßlehre. Sauerländer. Frankfurt am Main. 644 S.
- RAAB K., ELTROP L., DEIMLING S., KALTSCHMITT M. (2005): Biogene Festbrennstoffe. In: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hrsg.): Leitfaden Bioenergie. Planung Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen. Selbstverlag. Gülzow: 14–52.
- REIF A. (2010): Waldbau und Baumartenwahl in Zeiten des Klimawandels aus Sicht des Naturschutzes. Abschlussbericht eines F+E-Vorhabens im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz FKZ 3508 84 0200. Bundesamt für Naturschutz. Bonn. 125 S.
- REINEKE L. H. (1933): Perfecting a stand density index for even-aged stands. Journal of Agricultural Research 4 (46): 627–638.
- RIEBEL H. (2007): Die große Küstentanne [*Abies Grandis* (Dougl. ex. D.Don.) Lindl.]: Holzeigenschaften und Holzverwendung. Forst und Holz 62 (6): 21–26.
- RÖHLE F. (2015): Untersuchung von Zuwachs und Ertrag verschiedener Durchforstungsvarianten von Reinbeständen aus der Großen Küstentanne [*Abies grandis* (Douglas ex D. Don) Lindl.] mit dem Prognose- und Analyseprogramm BWINPro-S. Masterarbeit. 109 S.
- RÖHLE H. (1992): Yield tables for Aleppo pine (*Pinus halepensis*) in Israel. Selbstverlag des Lehrstuhles für Waldwachstumskunde. München. 63 S.
- RÖHLE H. (1995): Zum Wachstum der Fichte auf Hochleistungsstandorten in Südbayern. Zugleich: Ludwig-Maximilians-Universität München, Habilitation, 1994. Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. München. 272 S.
- RÖHLE H. (1997): Änderung von Bonität und Ertragsniveau in südbayerischen Fichtenbeständen. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 168 (6/7): 110–114.
- RÖHLE H. (1999): Datenbankgestützte Modellierung von Bestandeshöhenkurven. Centralblatt für das gesamte Forstwesen 116 (1/2): 35–46.

- RÖHLE H. (2004): Wachstumsmodelle und Umweltfaktoren - Möglichkeiten und Grenzen der forstlichen Modellierung. *Forst und Holz* 59 (10): 480–484.
- RÖHLE H., HARTMANN K.-U., GEROLD D., STEINKE C., SCHRÖDER J. (2006): Aufstellung von Biomassefunktionen für Kurzumtriebsbestände. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 177 (10/11): 178–187.
- RÖHLE H., GEROLD D., GEMBALLA R. (2010a): Beziehungen zwischen Klima und Zuwachs, dargestellt am Beispiel von Fichte, Kiefer und Buche in Sachsen. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 181 (1/2): 21–35.
- RÖHLE H., ALI W., HARTMANN K.-U., STEINKE C. (2010b): Wachstum und Biomasseproduktion schnellwachsender Baumarten im Kurzumtrieb. In: Bemann A. (Hrsg.): *AGROWOOD. Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven*. Weißensee-Verlag. Berlin: 103–116.
- RÖHLE H. (2013): Standortleistungsschätzung und Biomasseermittlung in Kurzumtriebsplantagen. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 184 (11/12): 237–246.
- RÖHLE H., SKIBBE K., HORN H. (2013): Wachstum und Ertragsaussichten von Kurzumtriebsplantagen. In: Bemann A., Butler Manning D. (Hrsg.): *Energieholzplantagen in der Landwirtschaft*. Verlag Agrimedia. Clenze: 35–42.
- RÖHLE H., HORN H., SKIBBE K., MÜLLER M. (2015): Site-Based Yield Estimation and Biomass Calculation in Short Rotation "Coppice Plantations". In: Butler Manning D., Bemann A., Bredemier M., Lamersdorf N., Ammer C. (Hrsg.): *Bioenergy from dendromass for the sustainable development of rural areas*. Wiley-VCH. Weinheim: 173–186.
- RÖHRICHT C., RUSCHER K. (2010): Anbauempfehlungen. Schnellwachsende Baumarten im Kurzumtrieb. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG). Dresden. 58 S.
- RÖHRIG E., LÜPKE B. V., DENGLER A., BARTSCH N. (2006): *Waldbau auf ökologischer Grundlage*. 91 Tabellen. Ulmer. Stuttgart (Hohenheim). 479 S.
- ROSENKRANZ L. C. A. (2003): Auswirkungen der Umsetzung von Naturschutzmaßnahmen auf die Forst- und Holzwirtschaft. Dissertation. Georg-August-Universität Göttingen. 131 S.
- Sächsische Landesanstalt für Forsten (2000): *Hilfstafeln zur sächsischen Forsteinrichtungsdienstanweisung. Zusammenstellung für den Gebrauch in der Forsteinrichtung*. Sächsische Landesanstalt für Forsten. Graupa. III, 164 S.
- Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2005): *Bodenbewertungsinstrument Sachsen*. 55 S.
- SACHS L., HEDDERICH J. (2006): *Angewandte Statistik. Methodensammlung mit R*. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. XIX, 702 S.
- SCHEFFER F., SCHACHTSCHABEL P., BLUME H.-P. (2010): *Lehrbuch der Bodenkunde*. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg, Berlin. XIV, 569 S.
- SCHMIDT P. A., GNÜCHTEL A., WAGNER W., DRECHSLER M., MIHM M., KÖHLER S. (1998): Zuordnung der natürlichen Waldgesellschaften zu den Standortsformengruppen (Ökogramme). Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Forsten. Graupa. 20 S.
- SCHOBER R. (1946): *Ertragstafel für europäische Lärche 1946*. Selbstverlag. Grünberg in Hessen. 11 S.
- SCHOBER R. (1953): *Die japanische Lärche. Eine biologisch-ertragskundliche Untersuchung*. Sauerländer. Frankfurt am Main. XII, 46 S.
- SCHÖCKER S., SCHMIEDEL D., SCHWABE M. (2013): Die Ausbreitung der Spätblühenden Traubenkirsche (*Prunus serotina*) unter Prozessschutzbedingungen. *Archiv für Forstwesen und Landschaftsökologie* 47 (1): 1–11.
- SCHRÖDER J. (2004): Zur Modellierung von Wachstum und Konkurrenz in Kiefern/Buchen-Waldumbaubeständen Nordwestsachsens. Dissertation. Technische Universität Dresden. IV, 271 S.
- SCHULTE A. (2007): Dendromasse - Trends und Interdependenzen. *Forstarchiv* 78 (3): 59–64.
- SCHWAPPACH A. (1890): *Wachstum und Ertrag normaler Fichtenbestände. Nach den Aufnahmen des Vereins Deutscher Forstlicher Versuchsanstalten*. Springer-Verlag. Berlin. 100, IV S.
- SHUGART H. H. (1984): *A theory of forest dynamics. The ecological implications of forest succession models*. Springer-Verlag. New York. xiv, 278 S.

- SKIBBE K., HORN H., RÖHLE H. (2013): Ertragsschätzung von Kurzumtriebsplantagen. *AFZ - DerWald* 68 (7): 50–52.
- SKIBBE K. (2016): Entwicklung eines Ertragsschätzers für Kurzumtriebsbestände aus Weide. Dissertation. Technische Universität Dresden. ix, 156 S.
- SLOBODA B. (1971): Zur Darstellung von Wachstumsprozessen mit Hilfe von Differentialgleichungen erster Ordnung. 109 S.
- SOCHA J., COOPS N. C., OCHAL W. (2016): Assessment of age bias in site index equations. *iForest - Biogeosciences and Forestry* 9: 402–408.
- SOMOGYI Z., CIENCIALA E., MÄKIPÄÄ R., MUUKKONEN P., LEHTONEN A., WEISS P. (2007): Indirect methods of large-scale forest biomass estimation. *European Journal of Forest Research* 126 (2): 197–207.
- SPELLMANN H. (2013): Waldbauliche Konsequenzen aus einer veränderten Rohholznachfrage. Masse statt Klasse? *AFZ - DerWald* 68 (9): 10–15.
- SPIECKER H., MIELIKÄINEN K., KÖHL M., SKOVGAARD J. P. (1996): Growth Trends in European Forests. Studies from 12 Countries. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. xi, 372 S.
- Staatsbetrieb Sachsenforst (2013): Richtlinie zu den Waldentwicklungstypen im Staatswald des Freistaates Sachsen (Teil 1). Selbstverlag. 41 S.
- STERBA H. (1975): Assmanns Theorie der Grundflächenhaltung und die „Competition-Density-Rule“ der Japaner Kira, Ando und Tadaki. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen* 92 (1): 46–62.
- STERBA H. (1981): Natürlicher Bestockungsgrad und Reinekes SDI. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen* 98 (2): 101–116.
- STERBA H. (1995): Forest decline and increasing increments. A simulation study. *Forestry* 68 (2): 153–163.
- STERBA H., ECKMÜLLER O. (2010): Bonität und Kulmination des Höhenzuwachses. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 181 (1/2): 14–21.
- STOLARSKI M., SZCZUKOWSKI S., TWORKOWSKI J., KLASA A. (2008): Productivity of seven clones of willow coppice in annual and quadrennial cutting cycles. *Biomass and Bioenergy* 32 (12): 1227–1234.
- STORM R. (1995): Wahrscheinlichkeitsrechnung, mathematische Statistik und statistische Qualitätskontrolle. Fachbuchverlag. Leipzig, Köln. 196 S.
- STRASBURGER E. (2012): Lehrbuch der Botanik. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. XVI, 1175 S.
- SUDA M., PUKALL K. (2014): Multifunktionale Forstwirtschaft zwischen Inklusion und Extinktion. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 165 (11): 333–338.
- SUTTON W. R. J. (1999): Does the world need planted forests? Paper presented at the "Intersessional expert meeting on the role of planted forests", Santiago, Chile. 6–9th April 1999. 15 S.
- TER-MIKAELIAN M. T., KORZUKHIN M. D. (1997): Biomass equations for sixty-five North American tree species. *Forest Ecology and Management* 97 (1): 1–24.
- THOMASIUS H. (1980): Werden unsere Wälder zur Holzfabrik? Abhandlungen und Berichte des Naturkundemuseums Görlitz. Selbstverlag. Görlitz. 9 S.
- THOMASIUS H. (1981): Baumplantagen zur Holzproduktion aus ökologischer und waldbaulicher Sicht. In: Agrarwissenschaftliche Gesellschaft der DDR (Hrsg.): Forstliche Plantagen. Probleme und methodische Fragen der Plantagenwirtschaft mit forstlichen Baumarten. Agrarwissenschaftliche Gesellschaft der Deutschen Demokratischen Republik. Dresden: 13–24.
- THOMASIUS H. (1991): Mögliche Auswirkungen einer Klimaveränderung auf die Wälder in Mitteleuropa. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 110 (1): 305–330.
- THRÄN D., EDEL M., PFEIFER J., PONITKA J., RODE M., KNISPEL S. (2011): Identifizierung strategischer Hemmnisse und Entwicklung von Lösungsansätzen zur Reduzierung der Nutzungskonkurrenzen beim weiteren Ausbau der Biomassennutzung. DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum. Leipzig. 193 S.
- TRENDELENBURG R. (1955): Das Holz als Rohstoff. Carl Hanser Verlag. München. 541 S.
- TUBBY I., ARMSTRONG A. (2002): Establishment and management of short rotation coppice. Forestry Commission. Edinburgh. 12 S.

- UN (2015): World population prospects. The 2015 revision: key findings and advance tables. United Nations. New York. 59 S.
- UNSELD R., WENZEL M., WEICH T., STARK H., WEINREICH A., BAUHUS J. (2010): Energie-Vorwälder in Südwestdeutschland – Alternative Bewirtschaftungsformen zur Steigerung der energetisch nutzbaren Biomasse im Wald. *Forst und Holz* 65 (10): 14–17.
- UNSELD R., BAUHUS J. (2011): Wuchspotenzial von Pappeln für Vorwald auf Waldstandorten Südwestdeutschlands. *AFZ - DerWald* 66 (10): 6–9.
- VANCLAY J. K. (1994): Modelling forest growth and yield. Applications to mixed tropical forests. CAB International. Wallingford. xvii, 312 S.
- VANSELOW K. (1943): Über die Ursachen der annähernd gleichen Massenleistung unserer Reinbestände bei verschiedener Durchforstung. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 65 (1): 1–13.
- Verein Deutscher Forstlicher Versuchsanstalten (1902): Beratungen der vom Vereine Deutscher Forstlicher Versuchsanstalten eingesetzten Kommission zur Feststellung des neuen Arbeitsplanes für Durchforstungs- und Lichtungsversuche. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 78: 180–184.
- VERWIJST T., TELENIS B. (1999): Biomass estimation procedures in short rotation forestry. *Forest Ecology and Management* 121 (1–2): 137–146.
- VOS H. (2008): Schlussbericht des BMBF-Projektes „Buche-Küstentanne“. Teilprojekt 4: Verwertungsorientierte Untersuchungen der Hölzer der Baumarten *Fagus sylvatica* (Buche) und *Abies grandis* (Küstentanne) aus naturnah bewirtschafteten Mischwäldern zur Herstellung innovativer und zukunftsfähiger Holzprodukte und Holzwerkstoffe. Selbstverlag. 12 S.
- WAGENFÜHR R. (2007): Holzatlas. Fachbuchverl. Leipzig im Hanser-Verl. München. 816 S.
- WECK J. (1955): Forstliche Zuwachs- und Ertragskunde. Neumann. Radebeul, Berlin. 160 S.
- WEICH T., UNSELD R. (2011): Energie-Vorwälder in Südwestdeutschland – Erntetechniken im Energievorwald und Konsequenzen für den Waldbau. *AFZ - DerWald* 66 (5): 20–23.
- WEINER J., GRIEPENTROG H.-W., KRISTENSEN L. (2001): Suppression of weeds by spring wheat *Triticum aestivum* increases with crop density and spatial uniformity. *Journal of Applied Ecology* 38 (4): 784–790.
- WEISE W. (1880): Ertragstafeln für die Kiefer. Verlag Springer. Berlin. 156 S.
- WELLER D. E. (1987a): A Reevaluation of the $-3/2$ Power Rule of Plant Self-Thinning. *Ecological Monographs* 57 (1): 23–43.
- WELLER D. E. (1987b): Self-Thinning Exponent Correlated with Allometric Measures of Plant Geometry. *Ecology* 68 (4): 813–821.
- WELLER D. E. (1990): Will the Real Self-Thinning Rule Please Stand Up?--A Reply to Osawa and Sugita. *Ecology* 71 (3): 1204–1207.
- WENK G., GEROLD D., RÖMISCH K. (1985): DDR-Fichtenertragstafel. Technische Universität Dresden. Tharandt. 64 S.
- WENK G., ANTANAITIS V., SMELKO S. (1990): Waldertragslehre. Deutscher Landwirtschaftsverlag. Berlin. 448 S.
- WENK G., GEROLD D. (1991): Methodik der Konstruktion von Ertragstafeln für Rein- und Mischbestände. In: Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten (Hrsg.): Jahrestagung 1991, Tesis-Karden/Mosel. Tagungsbericht der Sektion Ertragskunde: 36–59.
- WERNER A., VETTER A., REINHOLD G. (2006): Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Energieholz. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. Jena. 19 S.
- WEST P. W. (2006): Growing plantation forests. Springer-Verlag. Berlin. XIII, 304 S.
- WIEDEMANN E. (1935): Zur Klärung der Durchforstungseingriffe. *Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen* 67: 56–64.
- WIEDEMANN E. (1942): Der gleichaltrige Fichten-Buchen-Mischbestand. *Mitteilungen aus Forstwirtschaft und Forstwissenschaft* 13 (1): 1–88.
- WIEDEMANN E. (1943): Der Vergleich der Massenleistung des Mischbestandes mit dem Reinbestand. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 119: 123–132.

- WIEDEMANN E. (1949): Ertragstafeln der wichtigen Holzarten bei verschiedener Durchforstung sowie einiger Mischbestandsformen. Schaper. Hannover. 100 S.
- WIEDEMANN E. (1950): Ertragskundliche und waldbauliche Grundlagen der Forstwirtschaft. Sauerländer. Frankfurt am Main. 128 S.
- WIEDEMANN E. (1955): Ertragskundliche und waldbauliche Grundlagen der Forstwirtschaft. Das Hauptergebnis der 70jährigen Arbeiten der (ehem.) Preußischen Forstlichen Versuchsanstalt. Sauerländer. Frankfurt am Main. 346 S.
- WILLMOTT C. J. (1982): Some Comments on the Evaluation of Model Performance. Bulletin of the American Meteorological Society 63 (11): 1309–1313.
- WIMMENAUER K. (1919): Wachstum und Ertrag der Esche. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 95: 37–40.
- WIRTH C., SCHUMACHER J., SCHULZE E.-D. (2004): Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe - a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation. Tree physiology 24 (2): 121–139.
- WOLLSCHLÄGER D. (2010): Grundlagen der Datenanalyse mit R. Eine anwendungsorientierte Einführung. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 433 S.
- WYKOFF W. R., CROOKSTON N., STAGE A. (1982): User's Guide to the Stand Prognosis Model. General Technical Report INT-133. Ogden. 112 S.
- YODA K., KIRA T., OGAWA H., HOZUMI K. (1963): Self thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions. Intraspecific competition among higher plants. Journal of Institute Polytechnical, Osaka City University, Series D 14: 107–129.
- ZEIDE B. (2001): Thinning and Growth: A Full Turnaround. Journal of Forestry 99 (6): 20–25.
- ZELL J. (2008): Methoden für die Ermittlung, Modellierung und Prognose der Kohlenstoffspeicherung in Wäldern auf Grundlage permanenter Großrauminventuren. Dissertation. Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek. Göttingen, Freiburg (Breisgau). 152 S.
- ZIANIS D., MUUKKONEN P., MÄKIPÄÄ R., MENCUCCINI M., KORPILAHTI E. (2005): Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. Silva Fennica (4): 1–63.

7 Anhang

Anhang 1:	Auszug aus der Anleitung von Durchforstungs- und Lichtungsversuchen des Vereins deutscher forstlicher Versuchsanstalten (1902)	XII
Anhang 2:	Übersicht in Sachsen angewandter Ertragstafelmodelle und deren Bezugsbasis	XIV
Anhang 3:	Übersicht der nach der Sächsischen Forsteinrichtungsdienstanweisung bei Bonitierung anzuwendenden Baumartenzuordnung	XV
Anhang 4:	Funktionale Beziehung zwischen dem Bruthöhendurchmesser und den derbholzbezogenen Anteilen an Reisholz (m. R.) sowie der Laub- bzw. Nadelmasse nach DAUBER und KREUTZER (1979).....	XVI
Anhang 5:	Modellgleichungen für die Herleitung des Baumholzvolumens aus Derbholzvolumen und Höhe unter Verwendung der Massentafel nach GRUNDNER et al. (1952)	XVII
Anhang 6:	Gegenüberstellung der relativen Abweichungen des Modells nach PISTORIUS (2007) und des neu entwickelten Schätzansatzes für die Herleitung des Baumholzvolumens aus dem Derbholzvolumen unter Verwendung der Massentafel nach GRUNDNER et al. (1952)	XVIII
Anhang 7:	Übersicht von Darrdichte (r_0) und Schwindmaß (β_V) sowie der Raumdichte (R_D) von ausgewählten Baumarten	XIX
Anhang 8:	Übersicht über verwendete Versuchsflächen (KUP) und Klone	XX
Anhang 9:	Versuchsflächenspezifische Auswertung ertragskundlicher Kenngrößen der Ertragssteigerung in Folgerotationen	XXII
Anhang 10:	Modellierter durchschnittlicher Gesamtwuchs an Trockenbiomasse (dGZ_B) für die Klongruppe Max bei fünfjährigem Umtrieb und Steckholzzahl von 10.000 Pflanzen pro ha, zusammengefasst auf Ebene der sächsischen Landkreise. Dargestellt ist das arithmetische Mittel des dGZ_B aus 1. bis 4. Rotation.	XXIV
Anhang 11:	Übersicht langfristiger Küsten-Tannen-Versuchsflächen	XXV
Anhang 12:	Übersicht langfristiger Fichten-Versuchsflächen	XXVI
Anhang 13:	SLOBODA (1971) - Mathematische Herleitung der Asymptoten	XXIX
Anhang 14:	Rechenbeispiel zum BAYES-Theorem	XXX
Anhang 15:	Übersicht des ertragskundlichen Durchforstungsversuchs „Wermsdorf“	XXXI
Anhang 16:	Darstellung der für die Standortleistungsmodellierung verwendeten Geodatenbasis	XXXII
Anhang 17:	Rechenbeispiel zum MARS-Algorithmus	XXXIII
Anhang 18:	Übersicht der MARS-Modelle	XXXIV
Anhang 19:	Beschreibung des Durchforstungsversuchs „Maienpfuhl“	XXXV
Anhang 20:	Bestandeskennwerte des Durchforstungsversuchs „Maienpfuhl“	XXXVI

Anhang 1: Auszug aus der Anleitung von Durchforstungs- und Lichtungsversuchen des Vereins deutscher forstlicher Versuchsanstalten (1902)

Im folgenden Auszug aus dem Arbeitsplan deutscher forstlicher Versuchsanstalten von 1902 (Verein Deutscher Forstlicher Versuchsanstalten 1902) werden die Art (Nieder-, Hochdurchforstung, Lichtung) und die Entnahmemenge (schwache, mäßige, starke Durchforstung) von ertragskundlichen Durchforstungsversuchen abschließend definiert:

Anweisung zur Ausführung von Durchforstungs- und Lichtungsversuchen

§1

Die Versuche bezwecken die Feststellung des Einflusses, welchen die verschiedenen Arten und Stärkegrade der Durchforstung und Lichtung ausüben:

1. auf den Gesamtzuwachs eines Bestandes, auf die Verteilung des Zuwachses nach dem bleibenden und ausscheidenden Bestand und auf die einzelnen Stammklassen in Rücksicht auf Anzahl, Stärke, Höhen- und Formzahlausbildung
2. auf den Bodenzustand

1. Grundlagen

§2

Die Glieder eines Bestandes lassen sich, wie folgt, unterscheiden:

- I. **Herrschende Stämme.** Diese umfassen alle Stämme, welche an dem oberen Kronenschirm teilnehmen, und zwar:
 1. *Stämme mit normaler Kronenentwicklung und guter Stammform.*
 2. *Stämme mit abnormer Kronenentwicklung oder schlechter Stammform.* Hierher gehören:
 - a. eingeklemmte Stämme (kl),
 - b. schlechtgeformte Vorwüchse (v),
 - c. sonstige Stämme mit fehlerhafter Stammausformung, insbesondere Zwiesel (zw),
 - d. sogenannte Peitscher (p) und
 - e. kranke Stämme aller Art (kr).
- II. **Beherrschte Stämme.** Diese umfassen alle Stämme, welche an dem oberen Kronenschirm nicht teilnehmen. In diese Gruppe sind zu rechnen:
 3. *Zurückbleibende*, aber noch schirmfreie Stämme, für Boden- und Bestandespflege in Betracht kommende Stämme.
 4. *Unterdrückte* (unterständige, übergipfelte), aber noch lebensfähige Stämme, für Boden- und Bestandespflege in Betracht kommende Stämme.
 5. *Absterbende und abgestorbene Stämme*, für Boden- und Bestandespflege nicht mehr in Betracht kommend. Auch niedergebogene Stangen gehören hierher.

§3

Die Durchforstungen erstrecken sich grundsätzlich auf die Entnahme abgestorbener und absterbender, im Wachstum nachlassender, kranker oder in Bezug auf Krone oder Schaft nicht regelmäßig geformter oder auch solcher

Stämme, welche trotz guter Schaft- und Kronenform auf die verbleibenden wertvolleren und aussichtsvolleren Stämme schädlich einwirken. Sie entfernen also die Stämme der Klassen 5-2 zum Teil oder ganz, Stämme der Klasse 1 aber nur ausnahmsweise, soweit dieses zur Auflösung von Gruppen notwendig erscheint.

Die Lichtungshiebe dagegen entnehmen grundsätzlich wachstumskräftige, gesunde, für die verbleibenden Nachbarn zur Zeit unschädliche Stämme, also bald größere, bald kleinere Teile der Stammklasse 1 und bezwecken dauernde Schlußunterbrechung. Diese soll alsdann meist das ganze Bestandsleben hindurch fort dauern, oder sich wenigstens über eine längere Periode erstrecken, wie z. B. bei dem Seebach'schen Lichtungsbetriebe.

In Bezug auf die Durchforstung werden folgende Arten und Grade unterschieden:

I. Niederdurchforstung.

1. *Schwache Durchforstung* (A = Grad). Diese bleibt auf die Entfernung der abgestorbenen und absterbenden Stämme, sowie der niedergebogenen Stangen (5) beschränkt und hat nur die Aufgabe, Materialien für vergleichende Zuwachsuntersuchungen zu liefern.

2. *Mäßige Durchforstung* (B = Grad). Diese erstreckt sich auf die abgestorbenen und absterbenden, niedergebogenen, unterdrückten Stämme, die Peitscher, die gefährlichsten schlechtgeformten Verwüchse, soweit sie nicht durch Aestung unschädlich zu machen sind, und die kranken Stämme (Klasse 5, 4. und ein Teil von 2).

3. *Starke Durchforstung* (C = Grad). Diese entfernt alle Stämme mit Ausnahme der Klasse 1, so daß nur Stämme mit normaler Kronenentwicklung und guter Schaftform verbleiben, welche durch Auflösung sämtlicher Gruppen nach allen Seiten Raum zur freien Entwicklung ihrer Kronen haben, jedoch ohne daß eine dauernde Unterbrechung des Schlusses stattfindet.

Für die Grade B und C gelten noch folgende Grundsätze:

a) In allen Fällen, in denen durch Herausnahme herrschender Stämme Lücken entstehen, können daselbst etwa vorhandene unterdrückte oder zurückbleibende Stämme belassen werden.

b) Bei der Entfernung gesunder Stämme der Klasse 2 mit schlechter Kronenentwicklung oder Schaftform ist mit derjenigen Beschränkung zu verfahren, welche durch die Rücksicht auf die Beschaffenheit und den Schluß des gesamten Bestandes geboten ist.

II. Hochdurchforstung

Diese ist ein Eingriff in den herrschenden Bestand zum Zwecke besonderer Pflege späterer Haubarkeitsstämme unter grundsätzlicher Schonung eines Teiles der beherrschten Stämme. Hiervon sind zwei Grade zu unterscheiden:

4. *Schwache Hochdurchforstung* (D-Grad). Diese beschränkt sich auf den Aushieb der abgestorbenen und absterbenden, niedergebogenen, ferner der schlechtgeformten und kranken Stämme, der Zwiesel, Sperrwüchse, Peitscher, sowie derjenigen Stämme, welche zur Auflösung von Gruppen gleichwertiger Stämme entnommen werden müssen. Es werden also entfernt: Klasse 5, ein großer Teil von Klasse 2 und einzelne Stämme von 1. Die Entfernung der schlechtgeformten Vorwüchse und der sonstigen Stämme mit fehlerhafter Schaftform, insbesondere der Zwiesel, kann, wenn solche Stämme in größerer Anzahl vorhanden sind, zur Vermeidung zu starker Schlußunterbrechung auf mehrere Durchforstungen verteilt werden. Auch empfiehlt es sich, die bei der ersten Durchforstung verbleibenden Stämme dieser Art durch Aufästung oder Beseitigung von Zwieselarmen vorläufig unschädlich zu machen. Dieser Grad kommt vorwiegend für jüngere Bestände in Betracht.

5. *Starke Hochdurchforstung* (E-Grad). Dieser Grad erstrebt unmittelbar die Pflege einer verschieden bemessenen Anzahl von Zukunftsstämmen. Zu diesem Zwecke werden außer den abgestorbenen, absterbenden, niedergebogenen und kranken Stämmen auch alle diejenigen entnommen, welche die gute Kronenentwicklung der Zukunftsstämme behindern, also Klasse 5 und Stämme der Klassen 1 und 2. Dieser Grad erscheint hauptsächlich für die älteren Bestände geeignet.

§5

Die Versuche über den Einfluß der Lichtungshiebe verfolgen hinsichtlich der Ermittlungen über den Massenzuwachs den Zweck festzustellen, ob und wie weit die dauernden Unterbrechungen des Bestandschlusses den Zuwachs des gesamten Bestandes oder einzelner Bestandsglieder noch über das mittels der stärksten Durchforstungsgrade zu erzielende Maß hinaus zu steigern vermögen, und ferner zu untersuchen, wo der Zuwachs infolge allzustarker Verminderung der Stammzahl wieder zu sinken beginnt und wo die Steigerung des Zuwachses der Einzelstämme ihre

Grenze findet. Zu diesem Zweck empfiehlt es sich, vorbehaltlich anderer spezieller Versuche, z. B. über den Seebach'schen Lichtungsbetrieb, zwei Grade der Lichtung zu unterscheiden:

1. *Schwache Lichtung* (L-I-Grad).

2. *Starke Lichtung* (L-II-Grad).

Jene entnimmt 20-30%, diese 30-50% der Stammgrundfläche der nach dem C = Grade durchforsteten Vergleichsfläche. Die starke Lichtung soll jedenfalls das Maximum des Gesamtzuwachses übersteigen; sie kann daher nach Bedarf noch über den angegebenen Betrag hinaus gesteigert werden.

Anhang 2: Übersicht in Sachsen angewandter Ertragstafelmodelle und deren Bezugsbasis

Baumart	Durchforstungsart	Ertragsniveau / Bonitätssystem / Volumenschlussgrad	Grundlagen	Autoren	Jahr der Aufstellung	Bezugsbasis
Gemeine Fichte <i>Picea abies</i> (L.) KARST	gestaffelte Niederdurchforstung	mittleres Bonitätssystem	Probeflächen in Ostdeutschland	WENK, RÖMISCH, GEROLD	1985	Schaffholz
Gemeine Kiefer <i>Pinus sylvestris</i> L.	Auslesedurchforstung	mittleres Ertragsniveau	1500 Versuchs- und Probeflächen in Nordostdeutschland	LEMCKE, KNAPP, DITTMAR	1975	Derbholz Baumholz
Europäische Lärche <i>Larix decidua</i> MILL.	mäßige Durchforstung		Probeflächen in Nordwestdeutschland	SCHÖBER	1946	Derbholz
Japanische Lärche <i>Larix kaempferi</i> (LAMB.) CARR.	starke Durchforstung		Probeflächen in Nordwestdeutschland	SCHÖBER	1953	Derbholz
Gewöhnliche Douglasie* <i>Pseudotsuga menziesii</i> (MIRB.) FRANCO	starke Durchforstung	mittleres Ertragsniveau	53 Versuchs- und Probeflächen in Westdeutschland	BERGEL	1985	Schaffholz Derbholz
Rot-Buche <i>Fagus sylvatica</i> L.	Hochdurchforstung	Volumenschlussgrad 1,0	Versuchs- und Probeflächen in Nordostdeutschland	VERSUCHS- UND PROBEFLÄCHEN IN NORD- DITTMAR, KNAPP, LEMCKE	1986	Derbholz Baumholz
Stiel-Eiche <i>Quercus robur</i> L. Trauben-Eiche, <i>Quercus petraea</i> (MAT.) LIEBL.	Hochdurchforstung		Versuchs- und Probeflächen in Nordostdeutschland	ERTELD	1962	Derbholz
Rot-Eiche <i>Quercus rubra</i> L.	gestaffelte Durchforstung		Probeflächen in Westdeutschland, Holland, Dänemark	BAUER	1953	Derbholz
Sand-Birke <i>Betula peadula</i> ROTH.	starke Auslesedurchforstung		192 Probeflächen in Nordostdeutschland	LOCKOW	1998	Derbholz Baumholz
Gemeine Esche <i>Fraxinus excelsior</i> L.	schwache Durchforstung			WIMMENAUER	1919	Derbholz
Robinie <i>Robinia pseudoacacia</i> L.	mäßige Hochdurchforstung		Probeflächen in Ostdeutschland	ERTELD	1952	Derbholz
Rot-Erle <i>Alnus glutinosa</i> (L.) GAENN.	starke Auslesedurchforstung		166 Probeflächen in Nordostdeutschland	LOCKOW	1996	Schaffholz Derbholz
Pappel <i>Populus spec.</i>				KNAPP	1963	Derbholz
Winterlinde <i>Tilia cordata</i> Mill.				BÖCKMANN	1990	Derbholz

*Für die Bonitierung zugeordnete Baumarten u.a. Küsten-Tanne (*Abies grandis* (D.DON) LINDL.)

Anhang 3: Übersicht der nach der Sächsischen Forsteinrichtungsdienstanweisung bei Bonitierung anzuwendenden Baumartenzuordnung

Wenn für eine Baumart keine Ertragstafel für das Wuchsgebiet Sachsen ausgewiesen ist, werden im Zuge der Sächsischen Forsteinrichtungsansweisung für die Bonitierung folgende Zuordnungen getroffen (vgl. SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR FORSTEN 2000, S. 1):

Baumart	Zugeordnete Baumarten
Gemeine Fichte - <i>Picea abies</i> (L.) KARST	Weymouthskiefer - <i>Pinus strobus</i> L. Omorika-Fichte - <i>Picea omorika</i> (Panč.) Purk. Stech-Fichte - <i>Picea pungens</i> Engelm. Weiß-Tanne - <i>Abies alba</i> Mill. Lebensbäume - <i>Thuja spec.</i> Scheinzypressen - <i>Chamaecyparis spec.</i> Sonstige Nadelbaumarten
Gemeine Kiefer <i>Pinus sylvestris</i> L.	Schwarzkiefer - <i>Pinus nigra</i> J.F.ARNOLD Bergkiefer - <i>Pinus mugo</i> TURRA Murraykiefer - <i>Pinus contorta</i> DOUGL. EX LOUD. Rumelische Kiefer - <i>Pinus peuce</i> GRISEB. Sonstige Kiefern - <i>Pinus spec.</i>
Gewöhnliche Douglasie <i>Pseudotsuga menziesii</i> (MIRB.) FRANCO	Nordmann-Tanne - <i>Abies nordmanniana</i> (STEV.) SPACH Küsten-Tanne - <i>Abies grandis</i> (DOUGLAS EX D.DON) LINDL. Kolorado-Tanne - <i>Abies concolor</i> (GORD. ET GLEND.) LINDL. EX HILDEBR. Kanadische Hemlocktanne - <i>Tsuga canadensis</i> (L.) CARRIÈRE Sonstige Tannen - <i>Abies spec.</i>
Europäische Lärche <i>Larix decidua</i> MILL.	Japanische Lärche - <i>Larix kaempferi</i> (LAMB.) CARRIÈRE Sonstige Lärchen - <i>Larix spec.</i>
Rot-Buche <i>Fagus sylvatica</i> L.	Hainbuche - <i>Carpinus betulus</i> L. Gewöhnliche Rosskastanie - <i>Aesculus hippocastanum</i> L. Sonstige Hartlaubbaumarten
Sand-Birke <i>Betula peadula</i> ROTH.	Moor-Birke - <i>Betula pubescens</i> EHRH. Sal-Weide - <i>Salix caprea</i> L. Gemeine Hasel - <i>Corylus avellana</i> L. Sonstige Baumweiden - <i>Salix spec.</i> Sonstige Weichlaubbaumarten
Esche <i>Fraxinus excelsior</i> L.	Berg-Ahorn - <i>Acer pseudoplatanus</i> L. Spitz-Ahorn - <i>Acer platanoides</i> L. Feld-Ahorn - <i>Acer campestre</i> L. Berg-Ulme - <i>Ulmus glabra</i> HUDS. Flatter-Ulme - <i>Ulmus laevis</i> PALL. Vogel-Kirsche - <i>Prunus avium</i> L.
Winterlinde <i>Tilia cordata</i> Mill.	Sommer-Linde - <i>Tilia platyphyllos</i> SCOP.

Anhang 4: Funktionale Beziehung zwischen dem Brusthöhendurchmesser und den derbholzbezogenen Anteilen an Reisholz (m. R.) sowie der Laub- bzw. Nadelmasse nach DAUBER und KREUTZER (1979)

$$K = e^{a_1 + \frac{a_2}{d_{1,3}} + \frac{a_3}{d_{1,3}^2}}$$

Mit: K = rel. Anteil der Reststoffkomponente, bezogen auf das Trockengewicht des Derbholzes m. R.
 $d_{1,3}$ = Brusthöhendurchmesser
 a_1, a_2, a_3 = Koeffizienten

Regressionskoeffizienten für Reisholz

Baumart	a_1	a_2	a_3	R^2
Fichte	1,621	22,058	-35,338	0,925
Kiefer	2,328	9,125	335,117	0,462
Buche	2,239	16,005	-31,374	0,974
Eiche	1,556	22,802	-72,107	0,961

Regressionskoeffizienten für Nadeln bzw. Laub

Baumart	a_1	a_2	a_3	R^2
Fichte	1,250	19,809	-25,957	0,880
Kiefer	1,468	12,640	92,550	0,497
Buche	0,037	11,072	-16,858	0,922
Eiche	-0,298	18,737	-66,769	0,900

Anhang 5: Modellgleichungen für die Herleitung des Baumholzvolumens aus Derbholzvolumen und Höhe unter Verwendung der Massentafel nach GRUNDNER et al. (1952)

$$v_B = a_0 + a_1 \cdot v_D$$

Mit: v_B = Baumholzvolumen des Einzelstammes [m³]
 v_D = Derbholzvolumen des Einzelstammes [m³]
 a_0, a_1 = Koeffizienten

Regressionskoeffizienten für die Herleitung von a_0 aus der Höhe (h)

$$a_0 = a_2 + a_3 \cdot h + a_4 \cdot h^2 + a_5 \cdot h^3 + a_6 \cdot h^4$$

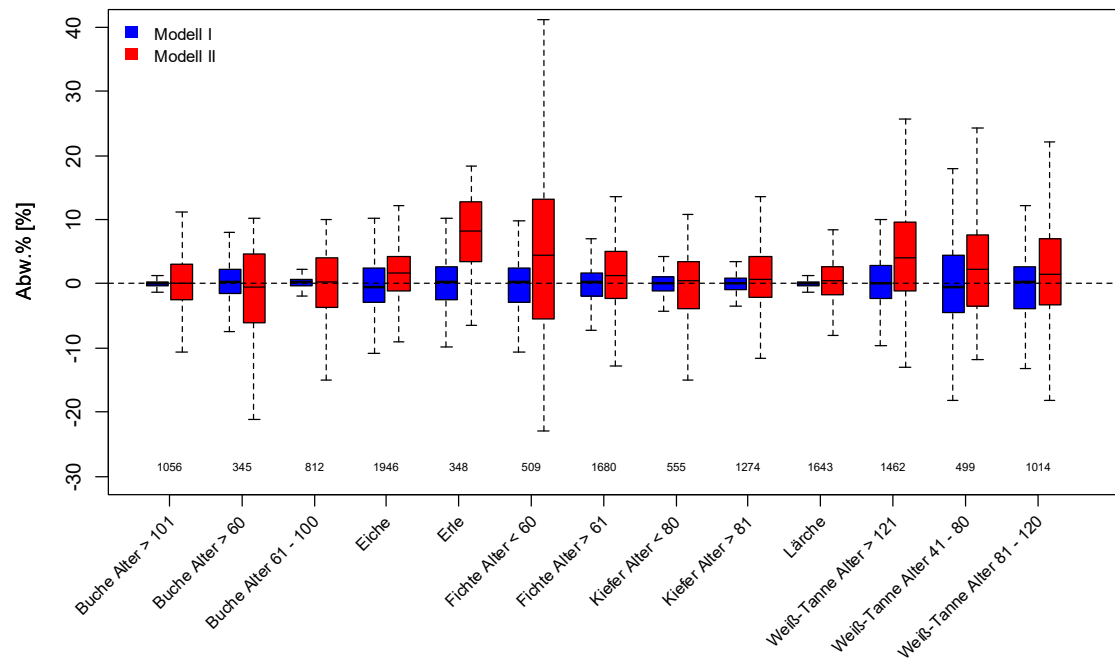
Baumart	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	R_{adj}^2
Buche Alter > 101	-0,2438459	0,04638626	-0,00311151	$8,64 \cdot 10^{-5}$	$-8,93 \cdot 10^{-7}$	0,98
Buche Alter > 60	-0,15061432	0,03766927	-0,00295152	$9,22 \cdot 10^{-5}$	$-1,05 \cdot 10^{-6}$	0,99
Buche Alter 61 - 100	-0,2499919	0,05072847	-0,0035662	0,00010248	$-1,12 \cdot 10^{-6}$	0,99
Eiche	-0,35442544	0,10019015	-0,00861665	0,00027381	$-2,84 \cdot 10^{-6}$	0,97
Erle	-0,25999761	0,07823142	-0,00801195	0,00034169	$-5,45 \cdot 10^{-6}$	0,98
Fichte Alter < 60	-0,03701457	0,02063212	-0,00265316	0,00011737	$-1,77 \cdot 10^{-6}$	0,97
Fichte Alter > 61	-0,84122157	0,17453143	-0,01193628	0,00032578	$-3,27 \cdot 10^{-6}$	0,99
Kiefer Alter < 80	-0,01395667	0,00978308	-0,00105509	$3,89 \cdot 10^{-5}$	$-5,22 \cdot 10^{-7}$	0,98
Kiefer Alter > 81	0,11860399	-0,02756663	0,00220864	$-7,22 \cdot 10^{-5}$	$7,89 \cdot 10^{-7}$	0,92
Lärche	0,00772307	0,00227487	-0,0003006	$6,74 \cdot 10^{-6}$	$-5,79 \cdot 10^{-8}$	0,99
Weiß-Tanne Alter > 121	-2,54196993	0,50305562	-0,03572766	0,00110388	$-1,33 \cdot 10^{-5}$	0,99
Weiß-Tanne Alter 41 - 80	0,24293421	-0,07269452	0,00737284	-0,00029564	$3,67 \cdot 10^{-6}$	0,98
Weiß-Tanne Alter 81 - 120	-2,24836707	0,57960209	-0,05041783	0,0017933	$-2,28 \cdot 10^{-5}$	0,97

Regressionskoeffizienten für die Herleitung von a_1 aus der Höhe (h)

$$a_1 = a_2 + a_3 \cdot h + a_4 \cdot h^2 + a_5 \cdot h^3 + a_6 \cdot h^4 + a_7 \cdot h^5$$

Baumart	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	R_{adj}^2
Buche Alter > 101	7,79971	-1,31375	0,10549	-0,00423	$8,38 \cdot 10^{-5}$	$-6,55 \cdot 10^{-7}$	0,99
Buche Alter > 60	4,40705	-0,62986	0,04343	-0,00097	$-1,02 \cdot 10^{-5}$	$4,64 \cdot 10^{-7}$	0,98
Buche Alter 61 - 100	4,85172	-0,63766	0,04523	-0,00159	$2,73 \cdot 10^{-5}$	$-1,84 \cdot 10^{-7}$	0,99
Eiche	6,11195	-1,29973	0,12594	-0,00566	0,00011906	$-9,50 \cdot 10^{-7}$	0,77
Erle	17,13523	-4,8337	0,54278	-0,02883	0,00073225	$-7,16 \cdot 10^{-6}$	0,93
Fichte Alter < 60	0,54576	0,28189	-0,02841	0,0013	$-2,96 \cdot 10^{-5}$	$2,75 \cdot 10^{-7}$	0,96
Fichte Alter > 61	5,47377	-0,86313	0,06532	-0,00232	$3,90 \cdot 10^{-5}$	$-2,51 \cdot 10^{-7}$	0,77
Kiefer Alter < 80	2,80064	-0,30879	0,02246	-0,0007	$6,33 \cdot 10^{-6}$	$4,82 \cdot 10^{-8}$	0,98
Kiefer Alter > 81	3,88398	-0,47626	0,03423	-0,00127	$2,38 \cdot 10^{-5}$	$-1,80 \cdot 10^{-7}$	0,98
Lärche	1,75817	-0,04985	0,00171	$-3,61 \cdot 10^{-5}$	$4,63 \cdot 10^{-7}$	$-2,76 \cdot 10^{-9}$	0,99
Weiß-Tanne Alter > 121	0,12524	0,32667	-0,03262	0,00145	$-2,94 \cdot 10^{-5}$	$2,22 \cdot 10^{-7}$	0,91
Weiß-Tanne Alter 41 - 80	8,39904	-1,98533	0,21123	-0,01066	0,00025615	$-2,36 \cdot 10^{-6}$	0,94
Weiß-Tanne Alter 81 - 120	1,79682	-0,12976	0,01124	-0,00041	$6,41 \cdot 10^{-6}$	$-3,06 \cdot 10^{-8}$	0,82

Anhang 6: Gegenüberstellung der relativen Abweichungen des Modells nach PISTORIUS (2007) und des neu entwickelten Schätzansatzes für die Herleitung des Baumholzvolumens aus dem Derbholzvolumen unter Verwendung der Massentafel nach GRUNDNER et al. (1952)



Die Abbildung informiert über die rel. Abweichungen [Abw. %] des Modells PISTORIUS (2007) (Modell II) und dem neu entwickelten Schätzansatz (Modell I) von den aus der Massentafel nach GRUNDNER et al. (1952) entnommenen Realwerten. Die Evaluierung wurde getrennt für die Baumarten Buche, Eiche, Erle, Fichte, Kiefer, Lärche und Weiß-Tanne vorgenommen.

Anhang 7: Übersicht von Darrdichte (r_0) und Schwindmaß (β_V) sowie der Raumdichte (R_D) von ausgewählten Baumarten

Baumart	lat. Name	Darrgewicht r_0 [g/cm ³]	Schwindmaß β_V [%]	Raumdichte R_D [kg/fm]
Amerikanische Zitter-Pappel	<i>Populus tremuloides</i> MICHX.	0,4*	10,7*	357*
Balsam-Pappel	<i>Populus balsamifera</i> L.	0,35*	10,8*	312*
Berg-Ahorn	<i>Acer pseudoplatanus</i> L.	0,59*	11,5*	522*
Douglasie	<i>Pseudotsuga menziesii</i> [MIRB] FRANCO	0,47*	11,9*	414*
Gemeine Esche	<i>Fraxinus excelsior</i> L.	0,65*	13,2*	564*
Gemeine Fichte	<i>Picea abies</i> L.	0,43*	11,9*	379*
Gemeine Kiefer	<i>Pinus sylvestris</i> L.	0,49*	12,1*	431*
Hainbuche	<i>Carpinus betulus</i> L.	0,79*	18,8*	641*
Küsten-Tanne	<i>Abies grandis</i> LINDL.	0,37***	10,7***	332***
Robinie	<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	0,73*	11,4*	647*
Rot-Buche	<i>Fagus sylvatica</i> L.	0,68*	17,9*	558*
Rot-Eiche	<i>Quercus rubra</i> L.	0,62**	13,8**	534**
Sand-Birke	<i>Betula pendula</i> ROTH	0,61*	13,7*	526*
Schwarz-Erle	<i>Alnus glutinosa</i> [L.] GAERTN.	0,49*	12,6*	428*
Schwarz-Pappel	<i>Populus nigra</i> L.	0,41*	13,8*	353*
Silber-Weide	<i>Salix alba</i> L.	0,52*	11,2*	462*
Weiß-Tanne	<i>Abies alba</i> MILL.	0,41*	11,5*	363*
Weymouths-Kiefer	<i>Pinus strobus</i> L.	0,37*	14,2*	317*
Zitter-Pappel	<i>Populus tremula</i> L.	0,45**	12,8**	392**
Europäische Lärche	<i>Larix decidua</i> MILL.	0,55*	11,4*	487*
Japanische Lärche	<i>Larix kaempferi</i> [LAMB.] CARR.			
Feld-Ulme	<i>Ulmus minor</i> MILL.	0,64*	13,2*	556*
Flatter-Ulme	<i>Ulmus laevis</i> <u>PALL.</u>			
Berg-Ulme	<i>Ulmus glabra</i> HUDS.			
Trauben-Eiche	<i>Quercus petraea</i> LIEBL.	0,65*	12,2*	571*
Stiel-Eiche	<i>Quercus robur</i> L.			
Winter-Linde	<i>Tilia cordata</i> MILL.	0,49*	14,9*	417*
Sommer-Linde				

* KOLLMANN (1951) / ** WAGENFÜHR (2007) / ***RIEBEL (2007), VOS (2008)

Anhang 8: Übersicht über verwendete Versuchsflächen (KUP) und Klone

Versuchsflächen des Instituts für Waldwachstum und Forstliche Informatik der Technischen Universität Dresden:

Versuchsfläche	Klon	Ausgangsstockzahl [Stück · ha ⁻¹]	Alter zum Zeitpunkt der Aufnahme* [Jahre]	Aufnahmejahr
Arnsfeld	Max 1	1.666	1/4/4	2002
	Androscoggin		2/13/3	2012
Commichau	Androscoggin	13.675	1/4/4	2010
			2/6/2	2012
Krummenhennersdorf	Hybrid 275 Max 3	11.851	1/3/3	2008
			2/5/2	2010
			3/6/1	2011
			3/7/2	2012
			3/8/3	2013
Thammenhain I	Max 2	11.111	1/2/2	2011
			1/3/1	2012
			1/3/2	2013
Thammenhain II	Max 1	1.666	1/4/4	2002
			2/13/2	2012
	Max 4	3.333	1/4/4	2002
			2/13/2	2012
	Max 4	1.111	1/4/4	2002
			2/13/2	2012
Vetschau	Max 2	27.777	1/2/2	2008
			2/5/1	2012

* Das Alter wird in Rotation / Wurzelalter [Jahre] / Triebalter [Jahre] angegeben.

Versuchsflächen der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft:

Versuchsfläche	Klon	Ausgangsstockzahl [Stück · ha ⁻¹]	Alter zum Zeitpunkt der Aufnahme* [Jahre]	Aufnahmejahr
Dornburg	Muhle Larsen	14.700	1/3/3	1996
	Androscoggin		2/6/3	1999
	Max 1,3,4		3/9/3	2002
	Max 2		4/12/3	2005
	Unal		5/15/3	2008
	Raspalje		6/18/3	2011
	Beaupre	11.000		
	Donk			
	Unal**		1/5/5	1998
	Raspalje**		2/10/5	2003
	Beaupre**		3/15/5	2008
	Androscoggin**			
Langenwetzendorf	Max 1,3,4**	14.700		
	Max 2**			
	Muhle Larsen		1/3/3	1996
	Androscoggin		2/6/3	1999
	Max 1,3,4		3/9/3	2002
	Max 2		4/12/3	2005
	Unal		5/15/3	2008
	Boelare	11.000	6/18/3	2011
	Beaupre			
	Donk			
	Unal**		1/5/5	1998
	Beaupre**		2/10/5	2003
Bad Salzungen	Muhle Larsen**	14.700	3/15/5	2008
	Androscoggin**			
	Max 1,3,4**			
	Max 2**			
	Max 1		1/3/3	1998
	Max 3		2/6/3	2001
	Androscoggin	14.700	3/9/3	2004
	NE 42		4/12/3	2007
	Schwarza		5/15/3	2010
	J 105			

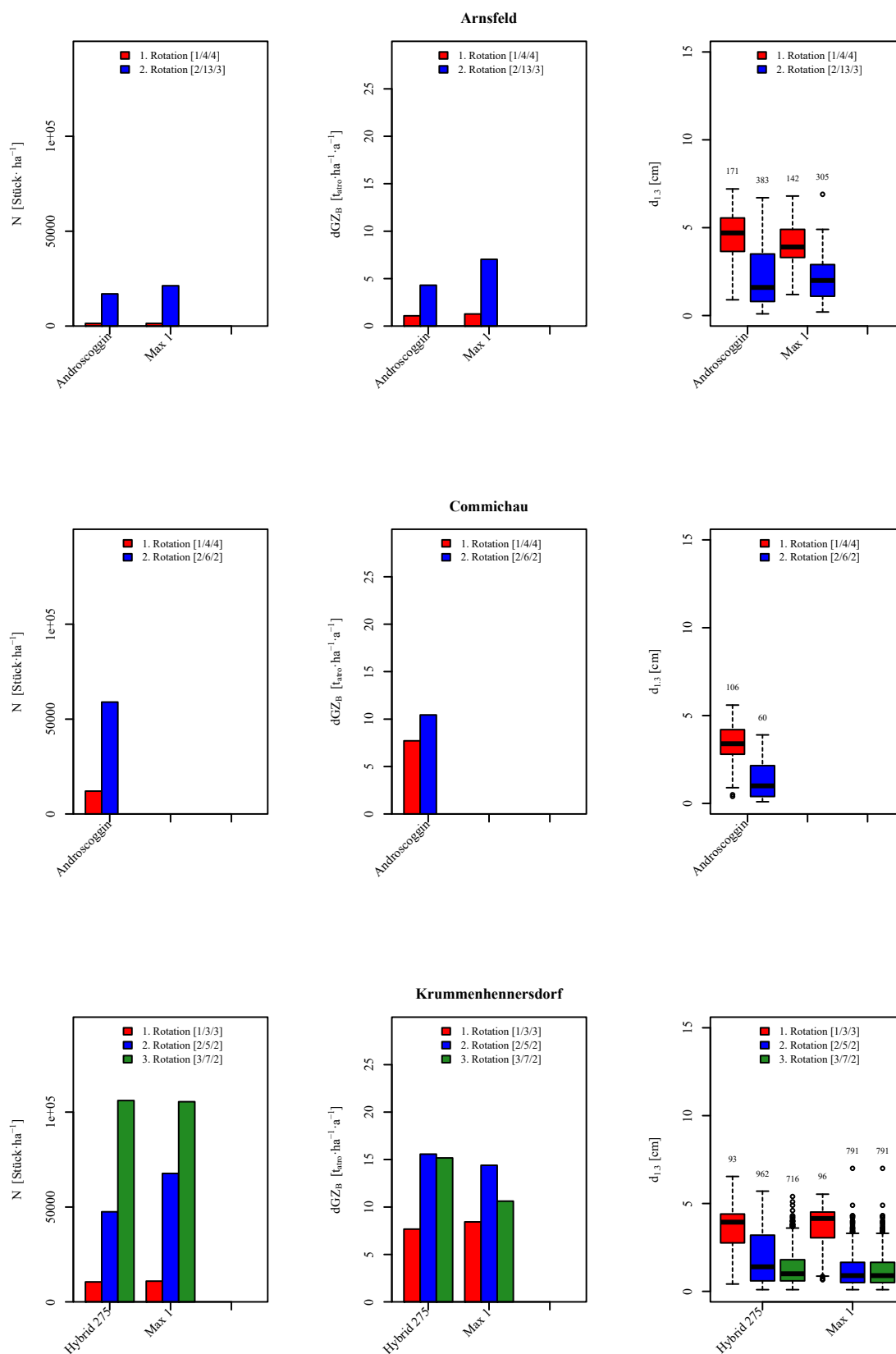
* Das Alter wird in Rotation / Wurzelalter [Jahre] / Triebalter [Jahre] angegeben. ** Für die Evaluierung verwendete Datensätze.

Versuchsflächen der Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern:

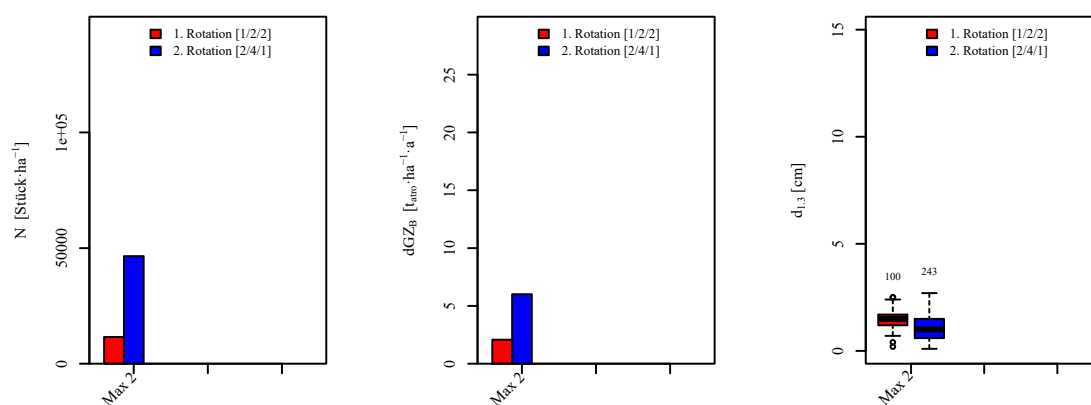
Versuchsfläche	Klon	Ausgangsstockzahl [Stück · ha ⁻¹]	Alter zum Zeitpunkt der Aufnahme* [Jahre]	Aufnahmejahr
Gülzow	nicht bekannt	13.300	1/3/3	1996
			2/6/3	1999
			3/9/3	2001
			4/12/3	2004

* Das Alter wird in Rotation / Wurzelalter [Jahre] / Triebalter [Jahre] angegeben.

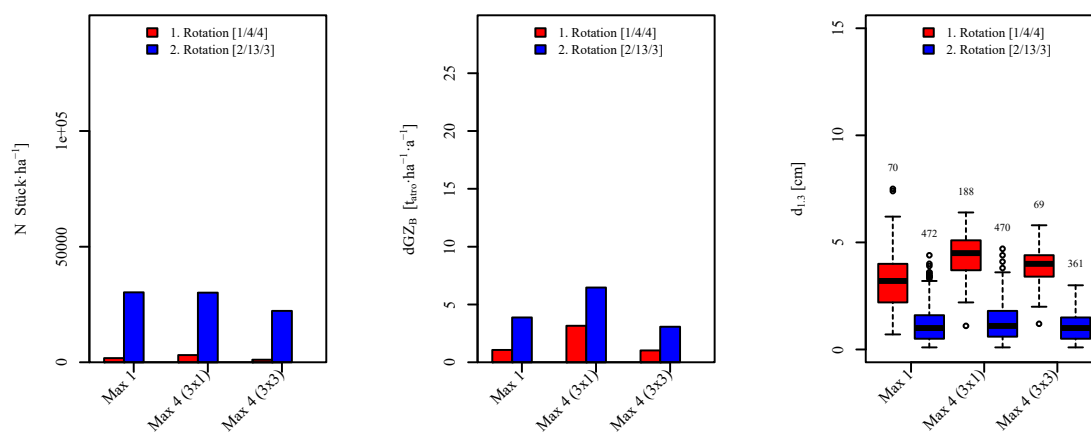
Anhang 9: Versuchsflächenspezifische Auswertung ertragskundlicher Kenngrößen der Ertragssteigerung in Folgerotationen



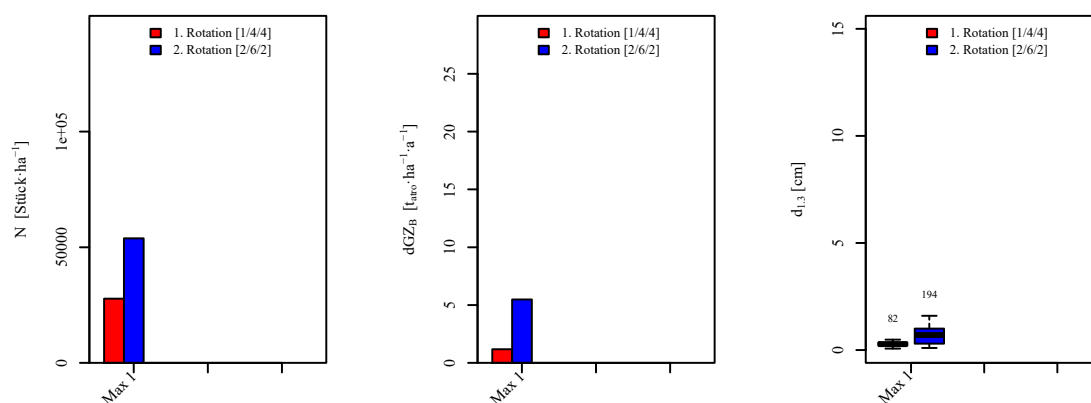
Thammenhain I



Thammenhain II



Vetschau



Anhang 10: Modellierter durchschnittlicher Gesamtzuwachs an Trockenbiomasse (dGZ_B) für die Klongruppe Max bei fünfjährigem Umtrieb und Steckholzzahl von 10.000 Pflanzen pro ha, zusammengefasst auf Ebene der sächsischen Landkreise. Dargestellt ist das arithmetische Mittel des dGZ_B aus 1. bis 4. Rotation.

Kreis / Kreisfreie Stadt	Ackerfläche [ha]	$\bar{\emptyset} dGZ_{B_{1-4, Rot}}$ [t _{atro} ·ha ⁻¹ ·a ⁻¹]	Potenzial [t _{atro} ·ha ⁻¹]
Bautzen	86.910	8,88	771.576
Kreisfreie Stadt Chemnitz	6.286	10,55	66.310
Kreisfreie Stadt Dresden	6.015	10,33	62.133
Erzgebirgskreis	49.201	7,32	360.265
Görlitz	94.014	8,30	780.784
Leipzig	88.539	10,63	941.276
Kreisfreie Stadt Leipzig	8.184	10,07	82.395
Meißen	82.173	9,55	784.861
Mittelsachsen	151.531	10,90	1.652.137
Nordsachsen	112.627	8,48	955.119
Sächsische Schweiz - Osterzgebirge	52.043	9,57	498.012
Vogtlandkreis	37.870	7,73	292.784
Zwickau	42.144	10,48	441.470
	$\Sigma 817.537$	$\bar{\emptyset} 9,45$	$\Sigma 7.689.129$

Anhang 11: Übersicht langfristiger Küsten-Tannen-Versuchsflächen

Die im Folgenden aufgeführten Versuchsflächendaten sind Eigentum des Landesbetriebs Forst Brandenburg (LFB) und wurden dankenswerterweise für die waldwachstumskundlichen Auswertungen dieser Arbeit zur Verfügung gestellt.

Ver- such	Parzelle	Revier	Abteilung	Begründungs- jahr	Durchfors- tungsart*	Nährkraft-** u. Feuchtestufe***
1	1	Maienpfuhl	168 c ²	1965	A-Grad	R2
1	2	Maienpfuhl	168 c ²	1965	st NDf	R2
1	3	Maienpfuhl	168 c ²	1963	gst DF	R2
1	4	Maienpfuhl	168 c ²	1963	st NDf	R2
2	1	Maienpfuhl	199 a ²	1959	m HDf	R2
3	1	Maienpfuhl	200 b ²	1904	Lichtung	K2
4	1	Breitefenn	204 a ³	1967	st HDf	R2 K2
4	2	Breitefenn	204 a ³	1967	m NDf	R2 K2
5	1	Breitefenn	209 a ³	1959	gst Df	K2
5	2	Breitefenn	209 a ³	1959	Auslese-DF	K2
5	3	Breitefenn	209 a ³	1959	Auslese-DF	K2
5	4	Breitefenn	209 a ⁴	1962	m NDf	R2 K2
5	5	Breitefenn	209 a ⁴	1962	st NDf	R2 K2
5	6	Breitefenn	209 a ⁴	1962	A-Grad	R2 K2
5	7	Breitefenn	209 a ⁴	1961	Lichtung	R2 K2
6	1	Breitefenn	210 a ¹	1960	m NDf	R2 K2
6	2	Breitefenn	201 a ¹	1960	st NDf	R2 K2
6	3	Breitefenn	201 a ¹	1961	m NDf	R2 K2
7	1	Wittenberge	94 a ⁴	1960	m HDf	Z1

*Durchforstungsarten :

- m NDf: Mäßige Niederdurchforstung (B-Grad)
- st NDf: Starke Niederdurchforstung (C-Grad)
- m HDf: Mäßige Hochdurchforstung (D-Grad)
- st HDf: Starke Hochdurchforstung (E-Grad)
- gst Df: Gestaffelte Durchforstung

**Nährkraftstufe:

- R = reicher Standort
- K = kräftiger Standort
- Z = ziemlich armer Standort

***Feuchtestufe:

- 1 = frischer Standort
- 2 = mittelfrischer Standort

Anhang 12: Übersicht langfristiger Fichten-Versuchsflächen

Die im Folgenden aufgeführten Versuchsflächendaten entstammen dem Tharandter Versuchsflächendatenbanksystem. Das Tharandter Versuchsflächendatenbanksystem wurde im Zeitraum von 1997 bis 1999 auf ORACLE®-Basis unter der wissenschaftlichen Leitung von Prof. Dr. H. Röhle und Dr. D. Gerold durch K. Körner entwickelt und programmiert. Eine nähere Beschreibung der für die Standortformengruppe verwendeten Kürzel sowie ihre Zuordnung zu den standörtlichen Ökogrammen kann in der Veröffentlichung von SCHMIDT et al. (1998) nachgelesen werden.

Versuch	Bundesland	Forstamt	Revier	Abteilung	Parzellen	Standortformengruppe
7109	Sachsen-Anhalt	Trautenstein	Hasselfelde-Süd	357 a ⁶	2	Mf-M2
7110	Sachsen-Anhalt	Trautenstein	Trautenstein-West	318 a	3	Mff-K2
7111	Sachsen-Anhalt	Trautenstein	Trautenstein-Ost	379 a ¹	1	Mff-Z3/M3
7112	Sachsen-Anhalt	Elend	Rübeland-West	483 a ³ , a ⁴	3	Mff-K3/K2
7113	Sachsen-Anhalt	Elend	Rübeland-Ost	534 a ¹	3	Mf-K3
7114	Sachsen-Anhalt	Hasselfelde	Hasselfelde-Nord	111 a ¹	2	Mff-M3/M2
7201	Sachsen-Anhalt	Elend	Knaupsholz	359 d ³	3	Mff-M2/M3
7202	Sachsen-Anhalt	Ilsenburg	Plessenburg	459 a ²	3	Hff-M2/M3
7203	Sachsen-Anhalt	Hochharz	Renneckenberg	439 a ¹	3	Hff-M2/M3
7204	Sachsen-Anhalt	Hochharz	Hohne	133 a ³	3	Mff-M2
7205	Sachsen-Anhalt	Hochharz	Hohne	137 a ⁶	3	Hff-M2
7206	Sachsen-Anhalt	Wernigerode	Karlshaus	616 b ² , 630 b ²	3	Mff-M2/M1
7207	Sachsen-Anhalt	Wernigerode	Karlshaus	634 a ⁸	3	Mff-M2
7208	Sachsen-Anhalt	Hochharz	Hohne	174 a ²	3	Hff-M2/M3
9615	Thüringen	Crawinkel	Wegscheide	49 b ²	3	Mf-M2
9616	Thüringen	Crawinkel	Neues Haus	479 a ¹¹	1	Mf-M1
9617	Thüringen	Crawinkel	Neues Haus	605 a ⁴	1	Mf-M2
9618	Thüringen	Crawinkel	Saukopf	135 a ²	1	Mf-M2
9619	Thüringen	Tambach-Diethar	Saukopf	130 b ²	1	Mf-M2
9620	Thüringen	Crawinkel	Frankenhain	107 b ³	1	Mf-M2
11121	Thüringen	Ilmenau	Arlesberg	778 a ¹	3	Mf-M2
11122	Thüringen	Ilmenau	Arlesberg	761 a ⁶	1	Mf-Z3/Z2
11123	Thüringen	Gehren	Großbreitenbach	50 a ³	1	Hf-M2
11124	Thüringen	Gehren	Allzunah	145 a ²	1	Hff-M2
11125	Thüringen	Schmiedefeld	Morast	1441 a ²	3	Mf-M2
11126	Thüringen	Schmiedefeld	Morast	1447 b ¹	3	Hf-M2
11202	Thüringen	Scheibe-Alsbach	Wurzelberg	93 a ² , 97 a ³	3	Hff-M2
11228	Thüringen	Schmiedefeld	Goldisthal	43 a ¹	2	Hff-M2
11229	Thüringen	Neuhaus	Oelze	56 b ⁵	2	Hff-M2
11230	Thüringen	Neuhaus	Oelze	56 a ¹ -3	2	Hff-M2
11231	Thüringen	Schmiedefeld	Schmiedefeld	131 a ¹	3	Mf-M2
11232	Thüringen	Neuhaus	Cursdorf	30 b ¹	3	Mf-M2
11333	Thüringen	Sonneberg	Hasenthal	162 a ²	3	Hff-M2
11334	Thüringen	Sonneberg	Hasenthal	162 a ¹	3	Hff-M2
11335	Thüringen	Sonneberg	Hasenthal	163 a ² , a ³	3	Hff-M3
11601	Thüringen	Oberhof	Sattelbach	12 e	3	Hf-Z3
11602	Thüringen	Oberhof	Oberhof	112 a ⁵	3	Hff-M2
11606	Thüringen	Dietzhausen	Ebertshausen	5230 c	3	Uff-M3
11636	Thüringen	Dietzhausen	Mäbendorf	15 a	3	Uff-Z2
11637	Thüringen	Dietzhausen	Albrechts	2520 c ¹	3	Uff-M2
11638	Thüringen	Dietzhausen	Oberstadt	130 a ²	3	Uff-M2
11639	Thüringen	Dietzhausen	Sattelbach	4327 b ¹	3	Hf-Z2
11640	Thüringen	Dietzhausen	Sattelbach	4327 b ²	3	Uff-Z2
11641	Thüringen	Dietzhausen	Billstadt	5523 a ²	3	Uf-Z2
11642	Thüringen	Dietzhausen	Billstadt	5439 a ⁵	3	Uf-Z2
11643	Thüringen	Dietzhausen	Ebertshausen	5210 c ²	3	Uff-M2
12101	Sachsen	Langburkersdorf	Massenei	835 a ¹	2	Uf-WM2
12168	Sachsen	Neukirch	Sohland	713 a ³	3	Uf-M2
12169	Sachsen	Neukirch	Sohland	719 a ⁹	3	Uf-M2/M3
12402	Sachsen	Straßgräbchen	Cosel	256 a ²	1	m-A2
12608	Sachsen	Bad Schandau	Hirschewald	3339 a ¹	12	Uf-WM2/M2
12619	Sachsen	Bad Schandau	Steinberg	209 e	3	Uf-M
12670	Sachsen	Langburkersdorf	Hohwald	562 b ¹	3	Uf-M1

12723	Sachsen	Dresden	Rossendorf	123 a ⁵	10	Uf-M2
12802	Sachsen	Bärenfels	Dippoldiswalde	2309 b ²	9	Mf-M2
12804	Sachsen	Altenberg	Dönschten	767 a ³	6	Mf-M2/Z2
12805	Sachsen	Tharandt	Naundorf	458 b ³	2	Uf-M2/WM2
12806	Sachsen	Tharandt	Tharandt	223 a ¹	4	Uf-M2
12807	Sachsen	Tharandt	Tharandt	29 b ¹	1	Uf-WZ2
12808	Sachsen	Tharandt	Hetzdorf	104a3	1	Uf-WZ2
12809	Sachsen	Tharandt	Hetzdorf	105a2	3	Uf-Z2
12812	Sachsen	Tharandt	Dorfhain	606a3	1	Uf-M2
12813	Sachsen	Tharandt	Dorfhain	624 a ²	1	Uf-M2
12815	Sachsen	Tharandt	Niederschöna	22 b	1	Uf-WM2/m2
12816	Sachsen	Tharandt	Dorfhain	901 a ¹	8	Uf-M2
12818	Sachsen	Tharandt	Grillenbourg	336 a ⁷	6	Uf-M2
12819	Sachsen	Tharandt	Niederschöna	710 b ¹	7	Uf-M2
12820	Sachsen	Tharandt	Naundorf	432 b ²	1	Uf-M2
12821	Sachsen	Tharandt	Naundorf	433 b ¹	1	Uf-M2
12822	Sachsen	Tharandt	Naundorf	439 a ¹	1	Uf-Z3
12826	Sachsen	Tharandt	Grillenbourg	320 b ¹	1	Uf-M2
12827	Sachsen	Tharandt	Grillenbourg	355 a ¹ , a ²	8	Uf-M2
12829	Sachsen	Tharandt	Tharandt/Höckend	165 a ⁶	1	Um-M2
12830	Sachsen	Tharandt	Tharandt	236 a	9	Uf-M2
12831	Sachsen	Tharandt	Tharandt ÖMF	236 a ²	12	Uf-M2
12832	Sachsen	Tharandt	Tharandt ÖMF	236 a ²	12	Uf-M2
12834	Sachsen	Altenberg	Oberbärenburg	443 a ³	1	Hf-Z2
12835	Sachsen	Altenberg	Rotherdbach	425 a ⁴	2	Hf-Z2
12837	Sachsen	Altenberg	Schellerhau	185c ³	1	Hf-Z2
12844	Sachsen	Tharandt	Naundorf	428 a ¹ , 458 b ⁵	3	Uf-M2
12845	Sachsen	Tharandt	Grillenbourg	321 a ⁷	3	Uf-M2
12846	Sachsen	Tharandt	Grillenbourg	342 b ²	2	Uf-M2
14201	Sachsen	Stollberg	Oberwald	414 a ³ /a ⁴ , 415 a ⁴	2	Uf-M2w/BM2
14202	Sachsen	Stollberg	Oberwald	425 a ⁴	2	Uf-M2
14301	Sachsen	Brand-Erbisdorf	Mönchenfrei	36a6	4	Mf-M2
14303	Sachsen	Marienberg	Rübenau	130 a ¹	2	Hf-Z2
14304	Sachsen	Olbernhau	Ansprung	89 a ²	6	Hf-Z2
14307	Sachsen	Marienberg	Poberschau	29 a ⁶	6	Hf-Z3
14347	Sachsen	Bärenfels	Nassau	90 a ³	3	Mf-M2/M3
14348	Sachsen	Bärenfels	Nassau	90 a ² , b ²	3	Mf-M2/M1
14349	Sachsen	Brand-Erbisdorf	Lichtenberg	170 a ¹	3	Mf-M2
14350	Sachsen	Heinzebank	Zöblitz	9 a ⁹	3	Mf-M2
14351	Sachsen	Heinzebank	Zöblitz	6 b ³	3	Mf-M2
14352	Sachsen	Heinzebank	Zöblitz	6 a ¹	3	Mf-M2
14501	Sachsen	Lauter	Bockau	301 a ⁵	6	Hf-M2
14502	Sachsen	Lauter	Bockau	221a2	3	Hf-M2
14507	Sachsen	Lauter	Antonsthal	146 a ²	6	Hf-M1/Z2
14510	Sachsen	Ehrenfriedersdorf	Greifensteine	357 a ⁰	3	Hf-NM2
14511	Sachsen	Ehrenfriedersdorf	Elterlein	368 a ² , a ⁴ , b ¹	6	Mf-M3,Hf-M2
14512	Sachsen	Ehrenfriedersdorf	Greifensteine	521 a ¹⁷	5	Mf-M2
14513	Sachsen	Ehrenfriedersdorf	Greifensteine	126c4	1	Mf-M1
14517	Sachsen	Neudorf	Hammerunterwiesenthal	722 a ⁷	1	Hf-M3
14518	Sachsen	Neudorf	Neudorf	352 a ⁶	2	Hf-M2
14520	Sachsen	Neudorf	Neudorf	416 a ⁶	6	Hf-M3
14521	Sachsen	Neudorf	Tellerhäuser	81a2	3	Hf-M3
14553	Sachsen	Lauter	Bockau	304 a ³ , a ⁹	3	Mf-M2/M3
14554	Sachsen	Lauter	Conradswiese	322 a ²	3	Hf-M2
14555	Sachsen	Lauter	Bockau	364 a ³	3	Mf-M1/M2
14556	Sachsen	Lauter	Sosa	430 a ⁵	3	Mf-Z2
14557	Sachsen	Lauter	Conradswiese	223 a ⁹	3	Mf-M3
14558	Sachsen	Lauter	Bockau	306 a ¹	3	Mf-M2
14559	Sachsen	Lauter	Bockau	365 a ⁴	3	Hf-M2
14560	Sachsen	Lauter	Bockau	320a5	3	Hf-M2
14561	Sachsen	Lauter	Conradswiese	215 a ¹	3	Mf-M3
14601	Sachsen	Eibenstock	Sosa	23 a ³	1	Mf-Z2/OI
14602	Sachsen	Eibenstock	Sosa	51 a ⁴	19	Hf-Z2
14606	Sachsen	Eibenstock	Carlsfeld	274 a ³	3	Hf-OI
14609	Sachsen	Schönheide	Grünheide	325 a ¹	1	Mf-M2
14610	Sachsen	Schöneck	Tannenhaus	66 b ¹	6	Hf-OI/M2
14611	Sachsen	Schöneck	Tannenhaus	84 a	3	Hf-OI
14662	Sachsen	Schönheide	Torfhaus	138 a ²	3	Hf-Z2
14663	Sachsen	Schönheide	Torfhaus	134 a ⁵	3	Hf-Z2
14664	Sachsen	Eibenstock	Eibenstock	209 a ²	3	Hf-M2
14665	Sachsen	Eibenstock	Eibenstock	209 a ³	3	Hf-Z2
14666	Sachsen	Eibenstock	Eibenstock	108 a ³	3	Hf-Z2
14667	Sachsen	Eibenstock	Eibenstock	109 a ¹	3	Hf-Z2
14801	Sachsen	Adorf	Bad Brambach	142 b ²	10	Mm-M2
14802	Sachsen	Adorf	Schönlind	195 b ²	2	Mm-M2
14803	Sachsen	Adorf	Schönlind	193 a ³	2	Mm-M2
14806	Sachsen	Adorf	Bad Elster	767 a ¹	2	Mm-M2

14807	Sachsen	Adorf	Bad Elster	777 a ⁸	2	Mm-M2
14808	Sachsen	Adorf	Bad Elster	782 b ²	2	Mm-M2
14809	Sachsen	Adorf	Bad Elster	829 a ⁵	2	Mm-M2
14810	Sachsen	Adorf	Bad Elster	832 a ⁶	2	Mm-Z2
14812	Sachsen	Adorf	Bad Elster	839 a ⁸	2	Mm-M2
14814	Sachsen	Adorf	Schönlind	848 a ²	1	Mm-Z2
14815	Sachsen	Adorf	Schönlind	849e	1	Mm-Z2
14816	Sachsen	Adorf	Freiberg	873 a ²	2	Mm-M2
14817	Sachsen	Mehlteuer	Reichenbach	929 a ¹ , a ³	10	Mm-M2w/M2

Anhang 13: SLOBODA (1971) - Mathematische Herleitung der Asymptoten

Die Herleitung erfolgte in persönlicher Kommunikation mit dem Statistiker Dr. Robert Schlicht.

Zur Lösung der Differentialgleichung mit „getrennten Variablen“

$$h'(t) = \frac{d}{dt} h(t) = a_2 \cdot \frac{h(t)}{t^{a_3}} \cdot \ln \frac{a_1}{h(t)}$$

schreiben wir diese um in

$$\frac{h'(t)}{h(t) \cdot \ln \frac{a_1}{h(t)}} = a_2 \cdot t^{-a_3}.$$

Unter der Voraussetzung $0 < h(t) < a_1$ für alle t ist die linke Seite die Ableitung in t von $-\ln \ln \frac{a_1}{h(t)}$

(da $\frac{d}{dh} \ln \ln \frac{a_1}{h} = \frac{1}{\ln(a_1/h)} \cdot \frac{1}{a_1/h} \cdot \frac{-a_1}{h^2} = -\frac{1}{h \cdot \ln(a_1/h)}$), und die rechte Seite die

Ableitung in t von $a_2 \cdot \ln t$, falls $a_3 = 1$, bzw. von $\frac{a_2}{1-a_3} t^{1-a_3}$ sonst. Integration beider Seiten von t_0

bis t ergibt somit

$$-\ln \ln \frac{a_1}{h(t)} + \ln \ln \frac{a_1}{h(t_0)} = \begin{cases} a_2 (\ln t - \ln t_0), & \text{falls } a_3 = 1 \\ \frac{a_2}{1-a_3} (t^{1-a_3} - t_0^{1-a_3}) & \text{sonst} \end{cases}.$$

Nach Multiplikation beider Seiten mit -1 und Anwendung der Exponentialfunktion erhält man

$$\frac{\ln \frac{a_1}{h(t)}}{\ln \frac{a_1}{h(t_0)}} = \begin{cases} \exp(-a_2 (\ln t - \ln t_0)), & \text{falls } a_3 = 1 \\ \exp\left(-\frac{a_2}{1-a_3} (t^{1-a_3} - t_0^{1-a_3})\right) & \text{sonst} \end{cases},$$

was man auch umschreiben kann in

$$\ln \frac{h(t)}{a_1} = \ln \frac{h(t_0)}{a_1} \cdot \begin{cases} (t/t_0)^{-a_2}, & \text{falls } a_3 = 1 \\ \exp\left(\frac{a_2}{(a_3-1) \cdot t^{a_3-1}} - \frac{a_2}{(a_3-1) \cdot t_0^{a_3-1}}\right) & \text{sonst} \end{cases}.$$

Erneute Anwendung der Exponentialfunktion und Multiplikation mit a_1 ergibt somit die Lösung

$$h(t) = a_1 \cdot \left(\frac{h(t_0)}{a_1}\right)^{(t/t_0)^{-a_2}}, \quad \text{falls } a_3 = 1$$

bzw.

$$h(t) = a_1 \cdot \left(\frac{h(t_0)}{a_1}\right)^{\exp\left(\frac{a_2}{(a_3-1) \cdot t^{a_3-1}} - \frac{a_2}{(a_3-1) \cdot t_0^{a_3-1}}\right)} \quad \text{sonst.}$$

Insbesondere erhält man für $a_2 > 0$ die asymptotischen Werte

$$\lim_{t \rightarrow \infty} h(t) = \begin{cases} a_1, & \text{falls } a_3 \leq 1 \\ a_1 \cdot \left(\frac{h(t_0)}{a_1}\right)^{\exp\left(-\frac{a_2}{(a_3-1) \cdot t_0^{a_3-1}}\right)}, & \text{falls } a_3 > 1 \end{cases}.$$

Anhang 14: Rechenbeispiel zum BAYES-Theorem

Untersucht wird ein Altersklassenwald, bestockt mit der Baumart Gemeine Fichte. Im gewählten Beispiel setzt sich der Altersklassenwald aus Beständen unterschiedlichen Alters und homogenen Strukturen zusammen. Die Hälfte der Waldbestände wurde auf optimalen Standorten begründet. Die übrigen Waldbestände stocken auf sehr schlechten Standorten. Es sei angenommen, dass die Fichten auf dem Optimalstandort ihr Produktionsziel im Alter von 80 Jahren erreichen. Auf dem schlechten Standort werden 120 Jahre zum Erreichen des Produktionsziels benötigt. Nach Erreichen des Produktionsziels erfolgt ein Kahlschlag.

Frage:

Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein nach dem Abtrieb neu gepflanzter Waldbestand auf einem guten oder auf einem schlechten Standort begründet wird?

Lösung:

Für einen zufällig ausgewählten Bestand und t zwischen 0 bis 80 Jahren gilt:

$$P(\text{Alter} \leq t \mid \text{Standort gut}) = \frac{t}{80}$$

$$P(\text{Alter} \leq t \mid \text{Standort schlecht}) = \frac{t}{120}$$

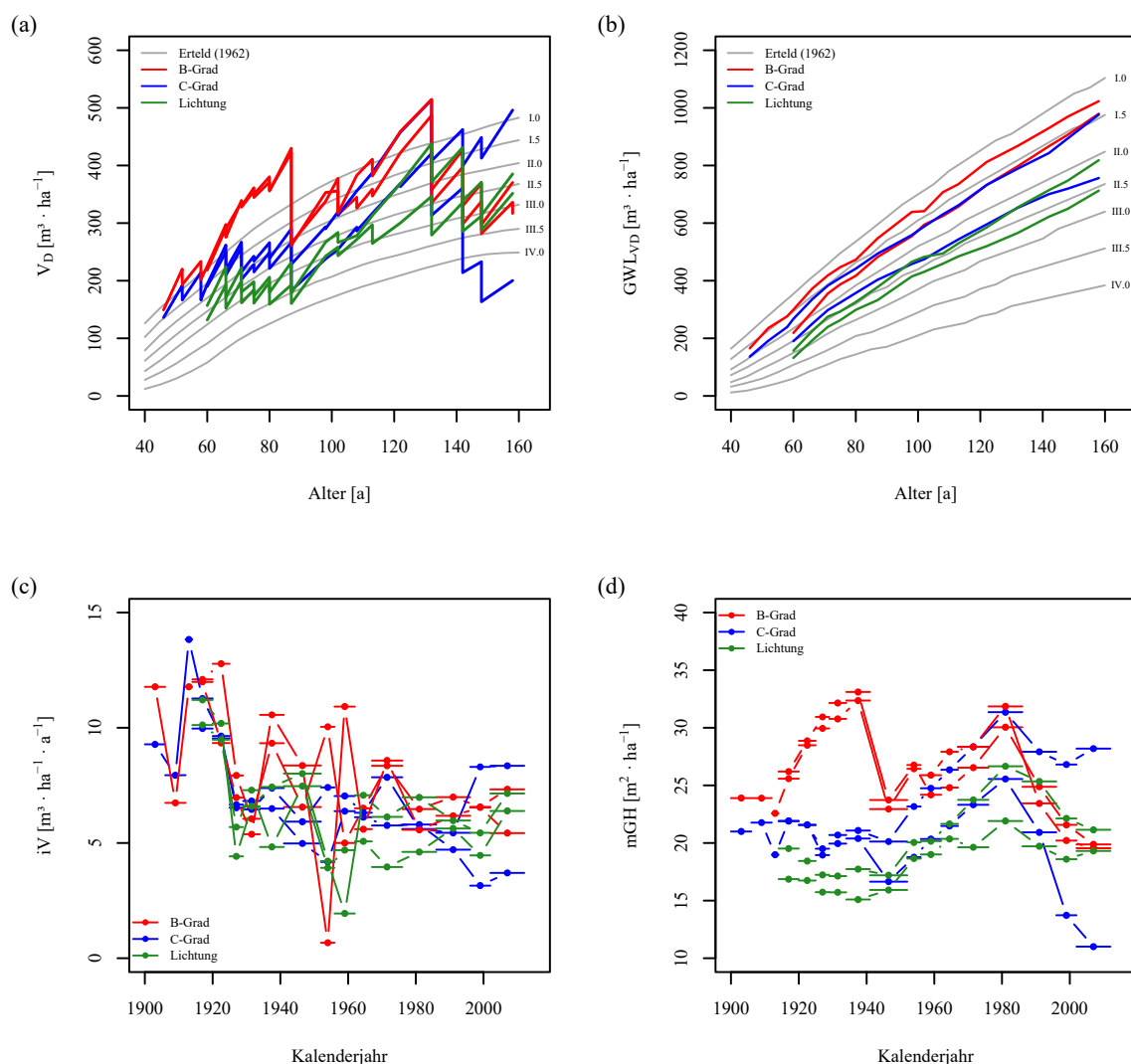
Daraus folgt (nach Definition von bedingten Wahrscheinlichkeiten bzw. BAYES-Theorem):

$$\frac{P(\text{Standort gut} \mid \text{Alter} \leq t)}{P(\text{Standort schlecht} \mid \text{Alter} \leq t)} = \frac{P(\text{Standort gut}) \cdot \frac{t}{80}}{P(\text{Standort schlecht}) \cdot \frac{t}{120}} = \frac{P(\text{Standort gut})}{P(\text{Standort schlecht})} \cdot 1,5$$

Die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass ein neubegründeter Waldbestand auf einem guten Standort begründet wird, beträgt demnach 60 % bzw. für einen schlechten Standort 40 %. Für einen neubegründeten Waldbestand ist somit ein guter Standort wahrscheinlicher, als es aufgrund der im Beispiel genannten Anteile guter und schlechter Standorte (50 % : 50 %) zu erwarten wäre.

Anhang 15: Übersicht des ertragskundlichen Durchforstungsversuchs „Wermsdorf“

Die Versuchsfläche „Wermsdorf“ befindet sich in der Abteilung 59 des sächsischen Forstreviers Horstsee. Die Versuchsfläche ist eben bis schwach geneigt. Die vorkommende lokale Bodenform ist ein Wermsdorfer Decklöß-Staugley. Dieser ist mit einer etwa 40 cm starken Lößdecke ausgestattet, die sich über einem altpleistozänen Geschiebelehm befindet. Die Standortformengruppe ist als Um-WM2 (Untere trockene Berglagen einschließlich Hügelland mit einem wechselfrischen mäßig nährstoffhaltigen Boden) definiert. Im Folgenden wird eine kurze Übersicht ausgewählter ertragskundlicher Kennwerte gegeben:



Dargestellt sind (a) die Volumenentwicklung über dem Alter bzw. (b) die Gesamtwuchsleistung über dem Alter im Vergleich zur Eichen-Ertragstafel nach ERTEL (1962). Weiterhin wird gezeigt (c) der laufende Zuwachs über dem Alter und (d) die mittlere Grundflächenhaltung über dem Kalenderjahr.

Anhang 16: Darstellung der für die Standortleistungsmodellierung verwendeten Geodatenbasis

Karten- bzw. Datengrundlage für die Modellierung	extrahierte Variablen
1. Forstgrundkarte und Forsteinrichtungsdaten des Staatsbetriebes Sachsenforst im Maßstab 1:5000. Zur Verfügung gestellt mit freundlicher Genehmigung des Staatsbetriebs Sachsenforst.	$dGZ_{50/100}$ -Bonitäten
2. Digitale Bodenkarte des Sächsischen Landesamts für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie im Maßstab 1:50.000 mit Leit- und Begleitbodenformen (BK50).*	nutzbare Feldkapazität effektive Kationenaustauschkapazität Bodentiefe
3. Klimakarten des Deutschen Wetterdienstes im Raster 1 x 1 km. Verwendet wurden die Karten für Gebietsmittelwerte der Lufttemperatur sowie der Niederschlagshöhe für alle Monate und Jahre seit 1881.**	Temperaturwerte Niederschlagswerte
4. Digitales Geländemodell im Raster 200 x 200 m (DGM200 / GeoBasis-DE® / BKG 2015), Bundesamt für Kartographie und Geodäsie.***	Höhenlage über NN
5. Digitale Kreis- und Gemeindegrenzen des Bundeslands Sachsen, Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN).	

*abgerufen am 25.08.2015 unter <http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/boden/27787.htm>

**abgerufen am 25.08.2015 unter: <ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC>

***abgerufen am 25.08.2015 unter: <http://www.geodatenzentrum.de/geodaten>

Anhang 17: Rechenbeispiel zum MARS-Algorithmus

Anhand eines einfachen Beispiels soll das Ergebnis des MARS-Algorithmus verdeutlicht werden. Ziel soll es sein, die Variable „ dGZ_{100} -Bonität“ aus den Prädiktorvariablen nFK , $T_{1961/90}$ und $Höhe_{NN}$ abzuleiten. Das abgeleitete Modell sowie die statistischen Kennwerte sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

$dGZ_{100} =$			
6,8459			
+	0,004985	· max(0; nFK	– 148,25)
–	0,62932	· max(0; 8,3	– $T_{1961/90}$)
–	1,4128	· max(0; $T_{1961/90}$	– 8,3)
–	2,5634	· max(0; $T_{1961/90}$	– 8,8)

Mit:	dGZ_{100}	= dGZ_{100} -Bonität	Stichprobenzahl
	nFK	= nutzbare Feldkapazität [mm]	$n = 1.165$
	$T_{1961/90}$	= Temperatur [°C]	Statistische Kennwerte
			$GRSq = 0,22$

Wenn für nFK der Wert 200 mm und für die $T_{1961/90}$ der Wert 7,5 °C eingetragen wird, ergibt sich für die Herleitung der Responsevariable folgende Rechnung:

$dGZ_{100} =$			
6,8459			
+	0,004985	· max(0; 200	– 148,25)
–	0,62932	· max(0; 8,3	– 7,5)
–	1,4128	· max(0; 7,5	– 8,3)
–	2,5634	· max(0; 7,5	– 8,8)

Werden die Werte errechnet, ergibt sich das in der nachfolgenden Tabelle dargestellte Ergebnis. Wenn der Wert ≤ 0 ist, wird der Maximumwert zu null und der entsprechende Basisterm hat dementsprechend keinen Einfluss auf die Berechnung.

$dGZ_{100} =$			
6,8459			
+	0,004985	· max(0; 51,5)	
–	0,62932	· max(0; 0,8)	
–	1,4128	· max(0 ; –0,8)	
–	2,5634	· max(0 ; –1,3)	

Letztendlich ergibt sich folgendes Ergebnis:

$$dGZ_{100} = 6,8459 + 0,004985 \cdot 51,5 - 0,62932 \cdot 0,8 = 6,6$$

Anhang 18: Übersicht der MARS-Modelle

Gemeine Fichte

$$dGZ_{100} = 12.597$$

$$\begin{aligned}
 &+ 0.00036779 \cdot \max(0, 669 - Höhe_{NN}) \\
 &- 0.0052874 \cdot \max(0, Höhe_{NN} - 669) \\
 &- 0.017208 \cdot \max(0, 34.1 - KAK_{WE}) \\
 &+ 0.00081151 \cdot \max(0, KAK_{WE} - 34.1) \\
 &- 0.010702 \cdot \max(0, KAK_{WE} - 192.1) \\
 &+ 0.0094282 \cdot \max(0, N_{Jahr} - 808) \\
 &- 0.0031825 \cdot \max(0, 855 - N_{Jahr}) \\
 &- 0.010727 \cdot \max(0, N_{Jahr} - 855) \\
 &+ 0.0078971 \cdot \max(0, N_{Jahr} - 947) \\
 &- 0.44676 \cdot \max(0, T_{Jahr} - 6.1) \\
 &- 0.89217 \cdot \max(0, T_{Jahr} - 7.2) \\
 &+ 0.29518 \cdot \max(0, T_{Jahr} - 7.2) \\
 &- 0.092856 \cdot \max(0, 1937 - BG) \\
 &+ 0.061444 \cdot \max(0, BG - 1937)
 \end{aligned}$$

Rot-Buche

$$dGZ_{100} = 10.615$$

$$\begin{aligned}
 &- 0.0064612 \cdot \max(0, 268 - Höhe_{NN}) \\
 &- 0.0025204 \cdot \max(0, Höhe_{NN} - 268) \\
 &- 0.036704 \cdot \max(0, nFK_{WE} - 144.2) \\
 &- 0.0048091 \cdot \max(0, 162.9 - nFK_{WE}) \\
 &+ 0.11378 \cdot \max(0, nFK_{WE} - 162.9) \\
 &- 0.10514 \cdot \max(0, nFK_{WE} - 178.7) \\
 &+ 0.036083 \cdot \max(0, nFK_{WE} - 204.9) \\
 &- 0.002506 \cdot \max(0, 779 - N_{Jahr}) \\
 &- 0.78751 \cdot \max(0, 7.3 - T_{Jahr}) \\
 &- 0.84195 \cdot \max(0, T_{Jahr} - 7.3) \\
 &+ 1.5601 \cdot \max(0, T_{Jahr} - 8) \\
 &- 0.062363 \cdot \max(0, 1951 - BG) \\
 &+ 0.032896 \cdot \max(0, BG - 1951)
 \end{aligned}$$

Gemeine Kiefer

$$dGZ_{100} = 9.5416$$

$$\begin{aligned}
 &- 0.010214 \cdot \max(0, 189.2 - Höhe_{NN}) \\
 &- 0.0025981 \cdot \max(0, Höhe_{NN} - 189.2) \\
 &+ 0.067432 \cdot \max(0, nFK_{WE} - 58.8) \\
 &- 0.72976 \cdot \max(0, nFK_{WE} - 70.34) \\
 &+ 0.66574 \cdot \max(0, nFK_{WE} - 71.4) \\
 &- 0.021116 \cdot \max(0, 32.68 - KAK_{WE}) \\
 &+ 0.0014749 \cdot \max(0, KAK_{WE} - 32.68) \\
 &+ 0.0072242 \cdot \max(0, 612 - N_{Jahr}) \\
 &+ 0.0028505 \cdot \max(0, N_{Jahr} - 612) \\
 &- 0.77313 \cdot \max(0, T_{Jahr} - 8.3) \\
 &- 1.51 \cdot \max(0, T_{Jahr} - 8.9) \\
 &- 0.051267 \cdot \max(0, 1958 - BG) \\
 &+ 0.080762 \cdot \max(0, BG - 1958)
 \end{aligned}$$

Rot-Eiche

$$dGZ_{100} = -12.353$$

$$\begin{aligned}
 &+ 0.12557 \cdot \max(0, Höhe_{NN} - 100) \\
 &- 0.038928 \cdot \max(0, Höhe_{NN} - 134) \\
 &+ 0.08739 \cdot \max(0, 305 - Höhe_{NN}) \\
 &- 0.090745 \cdot \max(0, Höhe_{NN} - 305) \\
 &- 0.0070498 \cdot \max(0, 78.5 - nFK_{WE}) \\
 &- 0.0045176 \cdot \max(0, 187.8 - KAK_{WE}) \\
 &- 0.01145 \cdot \max(0, KAK_{WE} - 187.8) \\
 &+ 0.0052215 \cdot \max(0, N_{Jahr} - 685) \\
 &- 0.015624 \cdot \max(0, N_{Jahr} - 908) \\
 &- 0.45832 \cdot \max(0, 8.3 - T_{Jahr}) \\
 &- 5.4176 \cdot \max(0, T_{Jahr} - 8.3) \\
 &+ 5.4199 \cdot \max(0, T_{Jahr} - 8.4) \\
 &+ 0.0076674 \cdot \max(0, 1939 - BG) \\
 &+ 0.045342 \cdot \max(0, BG - 1939)
 \end{aligned}$$

Stiel-Eiche

$$dGZ_{100} = 9.0646$$

$$\begin{aligned}
 &- 0.068099 \cdot \max(0, 114 - Höhe_{NN}) \\
 &- 0.24388 \cdot \max(0, 2 - BT) \\
 &+ 0.0085273 \cdot \max(0, nFK_{WE} - 214.76) \\
 &- 0.042727 \cdot \max(0, nFK_{WE} - 312.2) \\
 &- 0.0075952 \cdot \max(0, 61.61 - KAK_{WE}) \\
 &+ 0.0084188 \cdot \max(0, 641 - N_{Jahr}) \\
 &+ 0.0032465 \cdot \max(0, N_{Jahr} - 641) \\
 &- 0.72231 \cdot \max(0, 8.2 - T_{Jahr}) \\
 &- 0.69616 \cdot \max(0, T_{Jahr} - 8.2) \\
 &- 0.049886 \cdot \max(0, BG - 1953) \\
 &- 0.085493 \cdot \max(0, 1963 - BG) \\
 &- 0.85773 \cdot \max(0, BG - 1963)
 \end{aligned}$$

Übersicht der verwendeten Abkürzungen:

dGZ_{100} = Durchschnittlicher Gesamtzuwachs an Derbholzvolumen, bezogen auf ein Alter von 100 Jahren [$\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$]

N_{Jahr} = Durchschnittliche Niederschläge für den Zeitraum von 1961 bis 1990 [mm]

BG = Begründungsjahr

BT = Bodentiefe [m]

T_{Jahr} = Durchschnittliche Jahresmittel-Temperatur für den Zeitraum von 1961 bis 1990 [$^{\circ}\text{C}$]

$Höhe_{NN}$ = Höhenlage über NN [m]

KAK_{WE} = Potenzielle Kationenaustauschkapazität im effektiven Wurzelraum [$\text{mmolc} \cdot \text{kg}^{-1}$]

nFK_{WE} = Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum [$\text{mm} \cdot \text{dm}^{-1}$]

Anhang 19: Beschreibung des Durchforstungsversuchs „Maienpfuhl“

Die vier Versuchsflächen des Durchforstungsversuches liegen im Landkreis Märkisch-Oderland in der Nähe der Stadt Bad Freienwalde im Revier Maienpfuhl. Die Versuchsflächendaten wurden dankenswerterweise vom Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (LFE) bereitgestellt. Die nachfolgenden Ausführungen über das waldbauliche Behandlungskonzept der einzelnen Versuchsparzellen ist der im Zuge dieser Arbeit entstandenen Veröffentlichung von RÖHLE F. (2015) entnommen worden.

Parzelle 1 wurde nach dem Behandlungskonzept der A-Grad Durchforstung behandelt. Die Entnahme beschränkte sich auf tote und kurz vor dem Absterben stehende Bäume.

In **Parzelle 2** wurde stark niederdurchforstet (C-Grad). Ziel war es, die besten herrschenden Stämme herauszupflegen und für den verbleibenden Bestand einen lockeren Kronenschlussgrad zu erzeugen. Alle fehlerhaften herrschenden und beherrschten Bäume wurden entnommen. Bei den Bäumen der fünften, vierten und dritten sowie bei einigen der zweiten und einzelnen Bäumen der ersten KRAFT'schen Klasse (KRAFT 1884) erfolgte ebenfalls eine Entnahme. Zudem wurden auf der Fläche Z-Stämme ausgewählt und im Jahre 1987 auf 6 m Höhe geastet. Diese sind im Zuge der weiteren Bestandesbehandlung konsequent begünstigt worden. Nur wenige zwischenständige Bäume blieben als Füllbestand erhalten.

Auf **Parzelle 3** wurde eine gestaffelte Durchforstung durchgeführt. Bei zunächst sehr starken Durchforstungseingriffen in der Jugendphase des Bestandes wurden Z-Stämme ausgewählt und freigestellt und im Jahre 1987 auf 6 m Stammhöhe geastet. Nach dem ebenfalls sehr kräftigen Hieb in den Jahren 1986 und 1991 erfolgten nur noch mäßige Durchforstungseingriffe. Dabei sind laut Versuchsakte einige dicht stehende Gruppen und zwischenständige „Peitscher“ aufgelöst bzw. entnommen worden.

In **Parzelle 4** wurden die durchgeführten Eingriffe stark niederdurchforstungsartig vorgenommen. Einzelne vorherrschende, dicht stehende Gruppen wurden beim ersten Eingriff erhalten (Gruppendurchforstung). In der folgenden Durchforstung wurde die Entnahme auf gering entwickelte zwischenständige sowie stark geschädigte Bäume beschränkt. Eine vertikale Differenzierung sollte möglichst erhalten bleiben. Bei den Eingriffen sollte gegenüber den anderen Flächen eine heterogene Bestandesstruktur erzeugt werden.

Anhang 20: Bestandeskennwerte des Durchforstungsversuchs „Maienpfuhl“

Die dargestellten Bestandeskennwerte beziehen sich auf einen Hektar.

	Jahr		Alter <i>a</i>	verbleibender Bestand										ausscheidender Bestand					Gesamtbestand				
	<i>N</i>	<i>h_o</i>		<i>d_o</i>	<i>h_o/d_o</i>	<i>h_g</i>	<i>d_g</i>	<i>h_g/d_g</i>	<i>G</i>	<i>V</i>	<i>N</i>	<i>h_g</i>	<i>d_g</i>	<i>G</i>	<i>V</i>	<i>GW_{Lv}</i>	<i>mGH</i>	<i>iG</i>	<i>iV</i>	<i>dGZ</i>			
	Stück	m	cm		m	cm		m ²	m ³	Stück	m	cm	m ²	m ³	m ³	m ³	m ²	m ² ·a ⁻¹	m ³ ·a ⁻¹	m ³			
Parzelle I (A-Grad)	1987	2.303	16,2	24,2	0,67	13,3	14,5	0,92	37,8	265,7	424	5,8	4,98	0,83	0,4	266,1				12,1			
	1992	27	1.778	21,6	29,3	0,74	18,3	17,9	1,02	44,8	439,7	525	12	8,81	3,2	18,4	458,5	42,85	2,04	38,47	16,98		
	1996	31	1.556	24,5	32,6	0,75	21,6	20,6	1,05	52,0	596,8	222	16,1	11,1	2,15	19	634,6	49,42	2,34	44,01	20,47		
	2001	36	1.374	28,3	36,4	0,78	24,9	23,9	1,04	61,5	806,7	182	15,2	10,1	1,46	11,8	856,2	57,43	2,19	44,33	23,78		
	2006	41	1.111	31,1	39,2	0,79	28,3	27,4	1,03	65,5	958,4	263	21,7	14,79	4,51	54,5	1062,5	65,74	1,71	41,25	25,91		
2014	49		35,7	43,7	0,82	32,1	30,5	1,05	81,0	1.335,2						1439,3	73,27	1,94	47,1	29,37			
Parzelle II (C-Grad)	1987	22	1.052	15,6	26,4	0,59	14,2	18,8	0,75	29,3	214,7	1099	10,6	9,6	7,95	41,8	256,5				11,66		
	1992	27	801	20,7	30,8	0,67	19,1	23,1	0,83	33,6	331,1	251	17,9	19	7,12	67,2	440,1	35	2,27	36,73	16,3		
	1996	31	628	24,9	34,7	0,72	23	27,1	0,85	36,2	426,7	173	22	23,97	7,79	89	624,7	38,76	2,61	46,15	20,15		
	2001	36	471	29,2	39,2	0,75	27,4	32,9	0,83	40,1	550,6	157	22,5	21,96	5,94	71,8	820,4	41,09	1,96	39,14	22,79		
	2006	41	345	32,5	43,7	0,74	31,4	38,5	0,82	40,1	619,5	126	28,8	29,07	8,34	123,6	1012,8	44,26	1,69	38,48	24,7		
2014	49		37,3	50,9	0,73	35,7	44,2	0,81	52,9	913,3						1306,7	46,53	1,6	36,73	26,67			
Parzelle III (gest. DF)	1992	29	994	21,1	32,2	0,65	19,1	22,6	0,84	39,9	393,9	52	15,4	13,81	0,78	6,5	400,5				13,81		
	1996	33	844	24,6	36,3	0,68	22,4	26,0	0,86	44,6	513,8	150	21,4	22,65	6,06	67,8	588,1	45,29	2,69	46,92	17,82		
	2001	38	674	28,1	40,8	0,69	25,8	29,7	0,87	46,8	612,8	170	24,4	25,32	8,56	109	796,1	49,99	2,15	41,6	20,95		
	2006	43	438	31,8	44,5	0,72	30,3	37,1	0,82	47,3	707,0	235	25,1	22,01	8,96	120,4	1010,7	51,51	1,88	42,92	23,51		
	2014	51		35,4	51,5	0,69	33,9	43,0	0,79	63,6	1.042,0						1345,8	55,44	2,04	41,88	26,39		
Parzelle IV (grup. DF)	1992	29	694	21,7	32,3	0,67	19,9	24,2	0,82	31,9	326,5	210	16,9	16,53	4,51	41	367,5				12,67		
	1996	33	589	24,9	37,1	0,67	23,1	28,6	0,81	37,8	441,6	105	21,6	23,99	4,75	53,4	536,0	37,2	2,66	42,13	16,24		
	2001	38	533	28,6	41,5	0,69	26,3	32,5	0,81	44,2	584,4	56	25,3	29,39	3,81	48,9	727,7	42,88	2,05	38,33	19,15		
	2006	43	386	31,8	45,3	0,7	30,4	38,7	0,78	45,4	673,6	147	25,9	25,8	7,7	104,9	921,7	48,62	1,77	38,81	21,44		
	2014	51		35,8	51,9	0,69	34,7	44,9	0,77	61,1	1.018,2						1266,4	53,25	1,97	43,08	24,83		

Erklärung

1. Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.
2. Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts habe ich Unterstützungsleistungen von folgenden Personen erhalten: ---
3. Weitere Personen waren an der geistigen Herstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe eines kommerziellen Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.
4. Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und ist – sofern es sich nicht um eine kumulative Dissertation handelt – auch noch nicht veröffentlicht worden.
5. Sofern es sich um eine kumulative Dissertation gemäß § 10 Abs. 2 handelt, versichere ich die Einhaltung der dort genannten Bedingungen.
6. Ich bestätige, dass ich die Promotionsordnung der Fakultät Umweltwissenschaften der Technischen Universität Dresden anerkenne.

Ort, Datum

Hendrik Horn