
Grobwurzelarchitektur in Abhängigkeit von Baumart, Alter, Standort und sozialer Stellung

Dissertation

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

**vorgelegt von Maike Kuhr
geboren in Hildesheim**

Göttingen 1999

1. Gutachter: Prof. Dr. von Lüpke

2. Gutachter: Prof. Dr. Gruber

Tag der mündlichen Prüfung: 21.01.2000

Vorwort

Die vorliegenden Untersuchungen sind Teil eines gemeinsamen Projektes der Europäischen Union (AIR3-CT93-1269). Es wurden dabei verschiedene Fragestellungen zu "Funktionalen Aspekten der Wurzelarchitektur und der Biomasseverteilung von sechs europäischen Hauptbaumarten" bearbeitet. Das Institut für Waldbau der Universität Göttingen untersuchte hierbei Wurzeln der Fichte, Buche, Kiefer und Eiche. Die Daten wurden mit Hilfe einer gemeinsamen Datenbank verarbeitet und gingen in vergleichende Berechnungen mit Bäumen anderer Länder ein.

Dr. M. Drexhage wählte 1994 die Probeflächen aus und führte bis Mai 1996 erste Aufnahmen durch.

Mein herzlichster Dank gilt Prof. Dr. B. von Lüpke. Durch seine stete Bereitschaft zu Gesprächen und Gedankenaustausch sowie seine wertvollen Anregungen hat er ganz wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Ganz besonders hervorheben möchte ich die kompetente und freundschaftliche Unterstützung durch Dr. S. Jaehne. Gemeinsame Diskussionen, die inhaltliche, statistische und formale Probleme bei einem Glas Wein lösten, waren bei der Erstellung der Arbeit von unschätzbarem Wert.

Ebenfalls durch ihr besonderes Engagement entlasteten mich technische, studentische und wissenschaftliche Mitarbeiter, namentlich K.- H. Obal, P. Heinze, U. Westphal, A. Nannen, M. Unger, A. Parth, A. Horn, T. Kappes, A. Heidenfelder, K. DeWall, H. Dzierzon, H. Beuke, Dr. U. Sittig, Dr. N. Bartsch, Dr. M. Drexhage, Dr. D. Murach und I. Bechtold. Für die Lösung verwaltungstechnischer Probleme waren I. Albrecht und K. Gruel unerlässlich. Dafür möchte ich mich an dieser Stelle bei allen genannten Personen ganz herzlich bedanken.

Nicht zuletzt sei die freundliche Unterstützung durch die Forstämter Kattenbühl, Knesebeck, Holzminden und Bovenden hervorzuheben.

Göttingen im Januar 2000

Maïke Kuhr

INHALTSVERZEICHNIS

1 EINLEITUNG

1.1	Vorbemerkungen.....	1
1.2	Zielsetzung	2
1.3	Einführung in den Aufbau der Arbeit	3

2 MATERIAL

2.1	Standörtliche Beschreibung der Versuchsflächen	
2.1.1	Beschreibung der geographischen Lage und des Klimas	4
2.1.2	Beschreibung der Böden	5
2.2	Untersuchungsbestände	
2.2.1	Vorbemerkungen	7
2.2.2	Untersuchungsgebiet Bovenden (ehemals Radolfshausen), Fichte und Buche	
2.2.2.1	Untersuchungsgebiet Holzerode	8
2.2.2.2	Untersuchungsgebiet Krebeck.....	8
2.2.3	Untersuchungsgebiet Knesebeck, Kiefer und Fichte	10
2.2.4	Eiche	
2.2.4.1	Untersuchungsgebiet Holzminden	11
2.2.4.2	Untersuchungsgebiet Kattenbühl.....	13

3 METHODEN

3.1	Bodenanalyse	15
3.2	Auswahl und Erfassung der Probebäume	15
3.3	Konkurrenzbedingungen	
3.3.1	HEGYI-Index	15
3.3.2	Überragungswinkel.....	16
3.4	H/D-Wert	17
3.5	Kronenausdehnung.....	17
3.6	Probebaumentnahme	18
3.7	Gewinnung und Aufnahmeverfahren der ober- und unterirdischen Biomasse	18
3.8	Ermittlung der Grobwurzel- und Feinwurzelparameter	
3.8.1	Wurzel-Meßverfahren	19
3.8.2	Feinwurzelermittlung.....	21
3.8.3	Ermittlung der Einzelwurzeltiefe	21
3.9	Zusammenfassung der erhobenen Parameter	
3.10	Datenanalyse und Statistik	
3.10.1	Datenauswertung.....	21
3.10.2	Weiterführende Berechnungen der Wurzelparameter.....	22
3.10.3	Erstellung der Häufigkeitsverteilungen der Wurzeln der ersten Sektion	

3.10.3.1	Relation zwischen Horizontal- und Vertikalwurzeln.....	23
3.10.3.2	Berechnung des Wurzelvolumens.....	24
3.10.3.3	Oberfläche einer Einzelwurzel.....	25
3.11	Erstellen von Flußdiagrammen zur Beschreibung der oberirdischen- und unterirdischen Parameter.....	27
3.12	Formelsammlung	28

4 ERGEBNISSE

4.1	Oberirdische Parameter	
4.1.1	Konkurrenzbedingungen	
4.1.1.1	HEGYI Index	29
4.1.1.2	Überragungswinkel.....	33
4.1.2	Probebaumbeschreibende Parameter (BHD, Höhe, H/D-Wert, Stammvolumen) Anzahl der Probebäume und soziale Stellung	34
4.1.3	Kronenparameter	38
4.2	Wurzelparameter	
4.2.1	Einzelwurzel	
4.2.1.1	Wurzeldurchmesserverteilung	43
4.2.2	Wurzelsystem	
4.2.2.1	Tiefendurchwurzelung	49
4.2.2.2	Querschnittfläche und Wurzelanzahl der horizontalen und vertikalen Wurzeln (Sektion 1)	51
4.2.2.3	Verteilung der Wurzelanzahl und Wurzelquerschnittfläche auf die drei horizontalen und vertikalen Sektionen am Beispiel der Eiche; Holzminden	57
4.2.2.4	Tabellarische Darstellung der Verteilung der Wurzelquerschnittflächen und der Wurzelanzahl (Fi, Bu, Ki, Ei) auf die horizontalen und vertikalen Sektionen.....	60
4.2.2.5	Verhältnis Horizontal- zu Vertikalwurzeln	61
4.2.2.6	Wurzelvolumen.....	67
4.2.2.7	Wurzelvolumen differenziert nach sozialer Stellung.....	70
4.2.2.8	Wurzelvolumen der Probebäume in einem definierten Bodenraum	71
4.2.2.9	Wurzeloberfläche.....	71
4.2.2.10	Feinwurzelanzahl (FW).....	74
4.3	Sproß / Wurzelbeziehungen	
4.3.1	Beziehungen zwischen dem “HEGYI-Index“ und dem Wurzelvolumen	79
4.3.2	Beziehungen zwischen ober- und unterirdischen Parametern	
4.3.2.1	Verhältnis Stammvolumen zu Wurzelvolumen.....	80
4.3.2.1.1	Verhältnis Stamm- zu Wurzelvolumen differenziert nach Beständen	84
4.3.2.2	Beziehungen zwischen Wurzel, Stamm und Krone (Flußdiagramm)	89
4.3.2.2.1	Vergleich der Wurzel-, Stamm- und Kronenparameter der 30- bzw. 31 jährigen Fichte auf Sand und auf Lehm.....	92

5 DISKUSSION

5.1	Methode	95
5.2	Veränderung der Wurzelarchitektur bei Mischung von Buche und Fichte	
5.2.1	Vorbemerkungen	97
5.2.2	Tiefendurchwurzelung	98
5.2.3	Wurzelintensität	
5.2.3.1	Durchmesserverteilung der Wurzeln	99
5.2.3.2	Räumliche Verteilung der Wurzeln	99
5.2.4	Sproß / Wurzelbeziehungen.....	101
5.3	Kiefer und Fichte in 20, 30 und 50 jährigen Reinbeständen	
5.3.1	Wurzelentwicklung der Kiefer auf Sand	
5.3.1.1	Wurzelmorphologie der Kiefer	102
5.3.1.2	Tiefendurchwurzelung	102
5.3.1.3	Wurzelintensität.....	103
5.3.1.4	Sproß / Wurzelbeziehungen.....	104
5.3.2	Die Wurzelentwicklung der Fichte auf Sand	
5.3.2.1	Tiefendurchwurzelung	104
5.3.2.2	Wurzelintensität.....	105
5.3.2.3	Sproß / Wurzelbeziehungen.....	105
5.3.3	Wurzelentwicklung der Fichte auf Lehm	106
5.4	Einfluß des Bodens auf das Wurzelwachstum 30 jähriger Fichten (Sand/Lehm)	
5.4.1	Tiefendurchwurzelung	106
5.4.2	Wurzelintensität	107
5.4.3	Sproß / Wurzelbeziehungen.....	107
5.5	Einfluß der Verjüngungsmethode und unterschiedlicher Bodentypen (Stagnogley, Lehm) auf die Wurzelausbildung der Eiche	
5.5.1	Eiche auf problematischen Böden (Stagnogley)	108
5.5.2	Wurzelintensität	110
5.5.3	Sproß / Wurzelbeziehungen.....	110
5.6	Einfluß der sozialen Stellung auf die ober- und unterirdischen Baumkompartimente	112
5.7	Waldbauliche Schlußfolgerungen.....	114
6	ZUSAMMENFASSUNG.....	116
7	GLOSSAR	120
	LITERATURVERZEICHNIS	122
	Tabellenverzeichnis	I
	Abbildungsverzeichnis	V
	Anhang I-V	VII

1 Einleitung

1.1 Vorbemerkungen

Da Grobwurzeluntersuchungen besonders aufwendig sind, gibt es über die Wurzeln von Waldbäumen weit weniger Untersuchungen als über oberirdische Organe. Bis Ende der 60er Jahre werden lediglich allgemeine, wenig exakte Beschreibungen durchgeführt. Datenmaterial einzelner Wurzelsysteme ist schon zu Beginn dieses Jahrhunderts von LIESE (1926), HILF (1927), VATER (1927), BRÜCKNER und JAHN (1932) und KRAUSS (1938) erstellt worden. Diese Ergebnisse erklären die Wurzelprägungen verschiedener Baumarten jedoch nicht im ausreichenden Maße, da die Stichprobengröße sehr gering ist. Die gefundenen Resultate standen in keinem Verhältnis zu dem hohen Aufwand an Zeit und finanziellen Mitteln.

Karl GAYER stellte schon 1867 die Forderung nach "Vergleichenden Versuchen über die Wurzelbildung der verschiedenen Holzarten auf verschiedenen Böden". Dieses Ansinnen griffen KÖSTLER *et al* (1968) auf und vergleichen in ihrem Werk "Die Wurzeln der Waldbäume" eigene Erkenntnisse mit denen der Literatur, die sich ebenfalls zum größten Teil auf Ausgrabungen einzelner Wurzelsysteme beziehen.

In den 80er Jahren erhöht sich das Interesse an Wurzeln im Hinblick auf die Biomasse-Produktivität von Waldökosystemen, und man stellt fest, daß über den Anteil der Wurzeln an der Biomasse nur sehr wenig Konkretes bekannt ist. Z.B. reichen die Schätzungen über den Anteil der Feinwurzelumsetzung an der Nettoprimärproduktion von 8 % (KEYES und GRIER 1981) bis 67 % (GRIER *et al* 1981). Übersichten entsprechender Untersuchungen in verschiedenen Waldbeständen sind bei FOGEL (1985) und SANTANTONIO (1989) zu finden.

Ein nächster Anstoß zur Erhebung von Wurzeldata entwickelt sich aus der Fragestellung der sogenannten "neuartigen Waldschäden", da man annimmt, daß durch die Bodenversauerung Wurzelschädigungen auftreten. (ULRICH *et al* 1984, RAPP und JENSCHKE 1994).

Veranlaßt durch schwere Windwürfe Anfang der 90er Jahre, sind in den letzten Jahren genauere Untersuchungen von Grobwurzelsystemen durchgeführt worden (EICHHORN 1992, ZOTH und BLOCK 1992, ALDINGER *et al* 1996, MÖBMER 1997).

Die Baumarten werden in Pfahl-, Flach- und Herzwurzler gegliedert (BÜSGEN und MÜNCH 1927). Viele weiterführende Untersuchungen machen deutlich, daß diese Klassifikation innerhalb derselben Baumart großen Variationen unterliegen kann. So kann beispielsweise die als Flachwurzler bekannte Fichte Tiefenwurzeln ausbilden (KALININ 1978) und die als Herzwurzler bezeichnete Buche Flachwurzeln (POLOMSKI und KUHN 1998).

Grobwurzeln (Wurzeln mit einem Durchmesser >5 mm) haben in erster Linie die Funktion, den Baum im Boden zu verankern (STOKES und GUITARD 1997; ATGER und EDELIN 1993). Daneben sind sie Träger der feineren Wurzeln (Durchmesser <5 mm), die vorwiegend der Wasser- und Nährstoffaufnahme des Baumes dienen (RAVEN *et al* 1988). Bei manchen Baumarten tragen die Wurzeln zudem durch Wurzelbrut zur vegetativen Vermehrung bei. Die Aufgliederung des Wurzelsystems erfolgt nach einem Verzweigungsschema, das, differenziert nach Horizontal- und Vertikalebene, als Architektur bezeichnet wird. Abhängig ist diese Architektur von der Baumart und der Anpassung an die ökologischen Bedingungen (GRUBER

1992), wobei zunächst die physikalischen und chemischen Bodenverhältnisse (NIELSEN 1990) einen großen Einfluß haben. Weiterhin spielt die Kronenmasse eine entscheidende Rolle (MELZER 1962).

Neben den abiotischen Faktoren, Bodengefüge, Nährstoff- und Wasserversorgung, Exposition, Licht und Temperatur, beeinflussen vermutlich folgende Größen das Wurzelwachstum. Dies sind vor allem die Art der Entstehung (Naturverjüngung, Saat, Pflanzung oder vegetative Vermehrung) sowie die gesteuerte oder nicht gesteuerte Weiterentwicklung des Bestandes. Hieraus entstehen inter- und intraspezifische Konkurrenzbedingungen, die sich aus unterschiedlichen waldbaulichen Behandlungen ergeben (NIELSEN 1990). Diese Konkurrenzbedingungen werden sichtbar durch die Dichte und Struktur der Bestände.

Bekanntermaßen wirken sich diese Faktoren auf die Krone aus, die sicherlich zum großen Teil die Wuchsbedingungen der Bäume steuert (KOZLOWSKI und PALLARDY 1997; GRACE 1997). Oberirdische Parameter wie Höhen-, Durchmesser- und Kronenentwicklung sind ausführlich sowohl in der Waldwachstumskunde als auch im Waldbau untersucht worden. Unbekannt ist dagegen deren Zusammenhang mit der Wurzel Ausbildung. Ebenfalls nicht geklärt ist, inwiefern umgekehrt die Wurzeln das Wachstum oberirdischer Größen beeinflussen können. Dieses soll in der vorliegenden Arbeit in Zusammenhang mit ökologische Faktoren untersucht werden.

1.2 Zielsetzung

Oben gesagtes läßt erkennen, daß hinsichtlich der Grobwurzeln nur wenige Forschungsergebnisse verfügbar sind. Ziel dieser Arbeit ist es, eine Verteilung horizontaler und vertikaler Wurzelparameter herauszustellen. Dazu werden die Grobwurzeln und oberirdische Parameter der Baumarten Fichte, Kiefer, Eiche und Buche auf unterschiedlichen Standorten untersucht. Die Architektur der Wurzelsysteme wird beschrieben durch ihre Ausdehnung in die Tiefe und in die Horizontale, durch die Wurzelanzahl und -masse.

In einem ersten Schwerpunkt wird geprüft, ob und inwiefern sich der Aufbau der Grobwurzelarchitektur bei Mischung der Baumarten Fichte und Buche verändert. Anlaß zu diesen Untersuchungen geben Arbeiten von MACKENTHUN (1990) und FÖLSTER *et al* (1991), die berichten, daß bei Mischung von Fichte mit Buche eine Verflachung der Fichtenfeinwurzeln und eine Tiefenverlagerung der Buchenfeinwurzeln stattfinden. Es soll geprüft werden, ob dies für die Grobwurzelverteilung auch zutrifft. Weiterhin wird an diesen Flächen die Verschiedenheit der Wurzel Ausbildung von rund 60 jährigen Buchen und Fichten im Reinbestand untersucht und mit denen des Mischbestandes verglichen.

Einen weiteren Schwerpunkt bilden Untersuchungen in 20-, 30- und 40- bis 50 jährigen Fichten- und Kiefern-Reinbeständen. Die Bestände jeder Baumart stocken auf gleichen Standorten und erlauben daher eine Einschätzung der Entwicklung von Wurzelsystemen und oberirdischen Größen in Abhängigkeit vom Alter. Zusätzlich wird an 30 jährigen Fichtenbeständen auf Sandpodsol und schwach pseudovergleyter Parabraunerde der Einfluß unterschiedlicher Bodenverhältnisse auf die Wurzelentwicklung dargestellt.

An der Eiche soll bearbeitet werden, wie sich verschiedene Begründungsverfahren, Pflanzung und Saat, auf die Entwicklung des Grobwurzelsystems auswirken. Dies wird auf zwei Standorten untersucht.

Bei allen Baumarten wurden Probanden aus verschiedenen sozialen Stellungen gewählt. An diesen Bäumen wird erörtert, wie sich mit zunehmender Konkurrenz die ober- und unterirdischen Parameter verändern.

Im folgenden wird die Zielsetzung in Kurzform dargestellt.

- Welchen Einfluß hat die Mischung der Baumarten Fichte und Buche auf die Entwicklung des Wurzelsystems?
- Welchen Einfluß hat Konkurrenz anderer Bäume (soziale Stellung) auf die Wurzelarchitektur verschiedener Baumarten?
- Wie entwickelt sich die Wurzelarchitektur 20-, 30- und 50-jähriger Fichte und Kiefer auf gleichem Standort?
- Vergleich der Wurzelarchitektur von 30-jährigen Fichten auf verschiedenen Standorten.
- Wie unterscheidet sich die Wurzelarchitektur gesäter von der gepflanzter Eichen?

1.3 Einführung in den Aufbau der Arbeit

Gegliedert sind die Ergebnisse in drei Abschnitte. Im ersten werden die oberirdischen Parameter und in einem zweiten die Wurzelparameter dargestellt. Der dritte Abschnitt setzt die ober- und unterirdischen Baumparameter ins Verhältnis.

Zu den oberirdischen Faktoren zählen Konkurrenzbedingungen, ertragskundliche Daten und Kronenparameter (Probeebäume). Dabei gehören in dieser Arbeit Alter, BHD [cm], Höhe [m], Stammvolumen [m³], H/D-Wert und soziale Stellung zu den ertragskundlichen Daten. Zu den Kronengrößen werden Kronengewicht (trocken) [kg], welches getrennt nach Blattmasse, Astmasse (Äste erster und zweiter Ordnung) und Ästchenmasse (Äste dritter bis n-ter Ordnung) dargestellt ist, Kronenansatz, Kronenlänge und Kronenprozent gezählt. In zwei Beständen Kronenablotungen zur Ermittlung der Kronenschirmfläche vorgenommen. werden

Wurzelparameter

Es wird unterschieden zwischen Einzelwurzel und Gesamtwurzelsystem eines Baumes. Ersterer Begriff ist in dem Abschnitt Einzelwurzelmorphologie zu finden, letzterer im Abschnitt Wurzelsysteme.

Beziehungen zwischen ober- und unterirdischen Parametern

Hierzu werden Regressionen zwischen Konkurrenz-, Stamm- und Kronenparametern im Verhältnis zu Wurzelgrößen aufgestellt.

Aufbau der Ergebnisdarstellung

Grundsätzlich werden die Ergebnisse in folgender Reihenfolge dargestellt:

- Fichte und Buche im Rein- und Mischbestand (Untersuchungsbestand Holzerode)
- Fichte und Kiefer 20- bis 50-jährig (Untersuchungsbestände Krebeck und Knesebeck)
- Eiche im Vergleich Saat und Pflanzung (Untersuchungsbestände Holzminden und Kattenbühl)

2 Material

2.1 Standörtliche Beschreibung der Versuchsfelder

2.1.1 Beschreibung der geographischen Lage und des Klimas

Die Untersuchungen werden an den Baumarten Fichte (*Picea abies* (L.) Karst), Eiche (*Quercus robur* ssp. *petraea* Kl. et Kr. et Rol.), Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) und Buche (*Fagus sylvatica* L.) durchgeführt. Das Untersuchungsmaterial stammt aus Beständen der niedersächsischen Forstämter Bovenden (ehemals Radolfshausen), Knesebeck (ehemals Sprakensehl), Holzminden und Kattenbühl (Abb. 1).

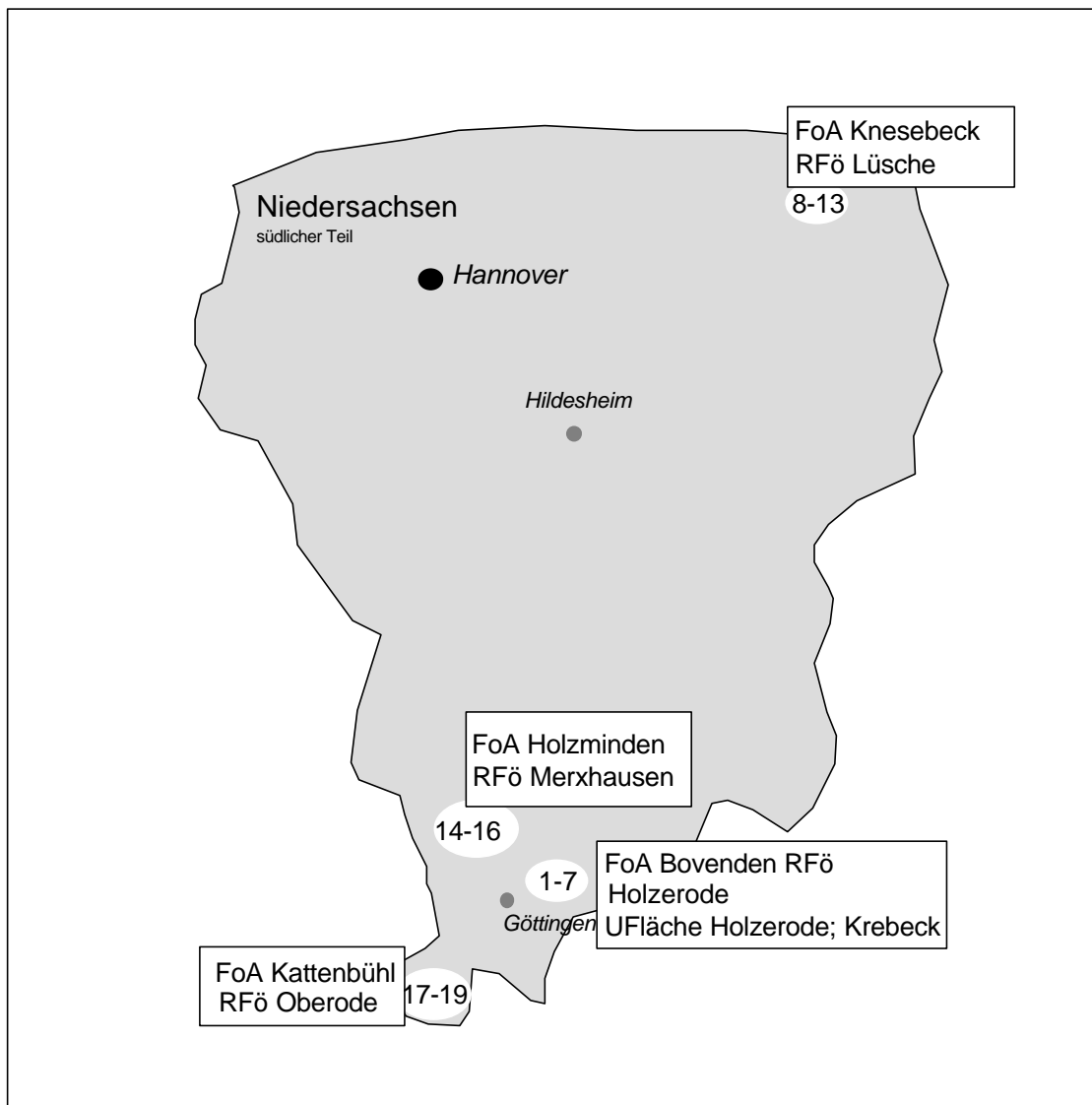


Abb. 1: Lage der Untersuchungsgebiete (Untersuchungsflächen Nr. 1-19)

Einen Überblick über ausgewählte Klimadaten gibt Tabelle 1.

Tabelle 1: Klimadaten der Untersuchungsflächen (Arbeitskreis Standortkartierung der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung; 1985)

Untersuchungsfläche	Wuchsbezirk	Mittlere Temperatur				Niederschlag	
		Höhe NN[m]	Jahr [°C]	Veg.-Zeit [°C]	>10°C [Tage]	[mm] Jahr	[mm] 'eg.zeit
Bovenden ₍₁₋₇₎	Göttinger Wald	201-300	7,8	14,0	150	680	340
Knesebeck ₍₈₋₁₃₎	Hohe Heide	101-150	8,0	14,3	148	730	330
Holzminden ₍₁₄₋₁₆₎	Unterer Solling	250-400	7,5	13,4	147	900	420
Kattenbühl ₍₁₇₋₁₉₎	Kaufunger Wald	451-500	7,5	14,0	150	780	370

2.1.2 Beschreibung der Böden

Tabelle 2 stellt die Bodenverhältnisse der Standorte im Überblick dar. Horizontweise Beschreibungen sind Anhang I (A – B) zu entnehmen.

Tabelle 2: Bodenbeschreibung

Bestand	Bestand Nr.	Geolog. Ausgangs-substrat	Bodentyp	NWK [mm]	Pufferbereich
Holzerode	1	Löß über Buntsandstein	Pseudogley-Parabraunerde (Lehm)	231	Aluminium
	2-4				Silikat
Krebeck	5-6	Löß über Buntsandstein	Pseudogley-Parabraunerde (Lehm)	223	Al/Fe
	7			197	
Knesebeck	8-9; 11	Geschiebesande	Braunerde-Podsol (Sand)	144	Al/Fe
	10			225	Eisen
	12-13				Al/Fe
Holzminden	15	Löß über Buntsandstein	Pseudogley-Parabraunerde (Lehm)	197	Aluminium
	14			175	
	16				Silikat
Kattenbühl	17	Buntsandstein	Stagnogley	135	Al/Fe
	19			117	
	18			121	Aluminium

Die wichtigsten Eigenschaften der einzelnen Bodentypen sollen im folgenden kurz beschrieben werden. Die verwendeten Bezeichnungen der standortkundlichen Feuchtestufen und der Horizonte entsprechen den Definitionen der "Bodenkundlichen Kartieranleitung" (AG BODENKUNDE 1982).

Pseudogley-Parabraunerde (Lehm)

Entscheidend für die räumliche Verbreitung der einzelnen Bodentypen auf den Standorten sind die Verteilung und die Mächtigkeit der quartären Lößablagerungen über dem darunterliegenden Buntsandstein. Die Flächen in Holzerode, Krebeck und Holzminden weisen Pseudogley-Parabraunerden (Lehm) aus unterschiedlich mächtigen, weitgehend entkalkten Lößen auf. Parabraunerden sind feinkörnige Böden mit einem durch Tonverlagerung an Ton verarmten A-Horizont (Al) und einem tonreichen Bt-Horizont. Der wenig wasserdurchlässige Bt-Horizont wirkt mit zunehmendem Tongehalt als Staukörper und führt dann zur Pseudovergleyung mit

einer wenig tonhaltigen Stauzone (Sw) und einem stark tonhaltigen Staukörper (Sd). Die Humusgehalte der Flächen schwanken zwischen 1% und 5% in Holzerode und Holzminden und zwischen 3% und 8% in Krebeck. Dabei handelt es sich in Holzerode um mullartigen Moder, in Krebeck um Moder und in Holzminden um f-Mull. Mit 10 % weist der Standort Holzminden bereits im Oberboden hohe Skelettanteile auf. Die Pseudogley-Parabraunerden (Lehm) der Untersuchungsgebiete weisen je nach Mächtigkeit der Böden mit 231 mm für Holzerode, 197 mm und 223 mm für die Standorte in Krebeck und 197 mm bzw. 175 mm für Holzminden eine mittlere nutzbare Wasserkapazität (NWK) auf. Die Böden der Standorte Holzerode und Holzminden zeigen jeweils stark unterschiedliche pH-Werte und liegen damit im Silikat- und im Aluminium Pufferbereich. In Krebeck befinden sich die Böden aller Teilflächen im Aluminium/ Eisen-Pufferbereich. Die Flächen in Holzerode wurden 1987 gekalkt. Die Durchwurzelbarkeit kann als gut bezeichnet werden.

Braunerde-Podsol

Braunerde-Podsol über Geschiebesanden sind auf dem Standort Knesebeck anzutreffen. Dieser Bodentyp ist nach SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL (1992) eine typische Weiterentwicklung saurer Braunerden. Die Tonverlagerung kommt durch Freisetzung von Aluminium zustande. Die Horizontabfolge zeichnet sich durch einen schwach gebleichten Ahe-Horizont und einen mit Humus angereicherten und deshalb dunkel gefärbten Bh-Horizont aus. Darauf folgt ein, durch eingelagerte Sesquioxide (Fe/Mn), mehr oder weniger stark verfestigter Bs-Horizont. Die Humusgehalte im Oberboden liegen im Entwicklungsstadium dieser Böden mit Werten zwischen 4,5 % und 7 % sehr hoch. Die Teilflächen des Standortes unterscheiden sich stark in der Bodenart und weisen daher sehr unterschiedliche nutzbare Wasserkapazitäten (NWK) auf. Die lehmigen Sande einiger Teilflächen führen zu einer NWK von 236 mm, die mittelsandigen Böden dagegen nur zu 144 mm (Anhang I). Die pH-Werte der einzelnen Standorte schwanken zwischen 2,7 und 3,6 und liegen damit im Aluminium/ Eisen- bzw. Eisen-Pufferbereich. Die Böden gelten als gut durchwurzelbar.

Stagnogley

Die Flächen auf dem Standort Kattenbühl können einheitlich dem Bodentyp Stagnogley zugeordnet werden. Diese Böden sind auf Buntsandstein entstanden, der von einer geringmächtigen Fließerdeschicht überlagert ist. Diese tonreiche Fließerde in etwa 60 cm Tiefe bildet den Stauhorizont, der den Wasserabfluß nach unten verhindert und damit die Vergleyung hervorruft. Auf allen Teilflächen erfolgte eine Bodenbearbeitung vor der Nutzung, weshalb der Ah- durch einen Ap- Horizont ersetzt werden kann. Darunter folgt der für diese Böden typische AhSw mit Eisen- und Mangananreicherungen über dem stark tonigen Sd. Die Teilflächen weisen 3,5 % bis 4 % Ton im Oberboden auf. Die nutzbare Wasserkapazität dieser Böden im effektiven Wurzelraum ist mit Werten zwischen 117 mm und 135 mm sehr niedrig. Dies ist jedoch auf die Flachgründigkeit der Durchwurzelungszone zurückzuführen, die durch die Fließerde in 60 cm Tiefe begrenzt wird (Anhang I).

2.2 Untersuchungsbestände

2.2.1 Vorbemerkungen

Die Bestände werden im folgenden nicht weiter nummeriert, sondern mit dem Namen des jeweiligen Forstamtes betitelt. Eine Übersicht der Untersuchungsflächen gibt Tabelle 3. In Holzrode geben die Bezeichnungen über die Mischungsverhältnisse, in Krebeck und Knesebeck über das Alter der Bestände Aufschluß. In Holzminden und Kattenbühl werden durch die Bezeichnungen die Verjüngungsmethoden charakterisiert.

Tabelle 3: Probeflächen

FoA	Nr.	Fläche	Bezeichnung	Zielsetzung	FoA	Nr.	Bezeichnung	Zielsetzung	
Bovenden	1	Holzerode	Buche	Misch- / Reinbestand (rund 60 jährig)	Knesebeck	11	Kiefer 20 jähr.	Alter, Entwicklung	
	2	Holzerode	Buche / Fichte			12	Kiefer 33 jähr.		
	3	Holzerode	Fichte			13	Kiefer 47 jähr.		
	4	Holzerode	Fichte / Buche		Holzminden	14	Pflanzung	Verjüngungsmethode	
	5	Krebeck	Fichte 21 jähr.	Eiche		15	Saat		
	6	Krebeck	Fichte 30 jähr.	22 jährig		16	Verpflanzung		
	7	Krebeck	Fichte 41 jähr.	Alter, Entwicklung	Kattenbühl	17	Pflanzung	Verjüngungsmethode	
Knesebeck	8		Fichte 20			Eiche	18		Saat I
	9		Fichte 31			13 jährig	19		Saat II
10		Fichte 50							

Eiche

Für die Untersuchungen an Eiche werden Flächen gewählt, die nach dem Betriebswerk mit Traubeneichen bestockt sind. Die Unterscheidung von Stiel- und Traubeneiche ist nicht immer eindeutig möglich. Aufgrund der Hybridbildung von *Quercus robur* L. und *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. und weil gegensätzliche Ausprägungen von Merkmalen zwischen den Typen fehlen, halten es KLEINSCHMIT *et al* (1995) für angebracht, von einer biologischen Art (*Quercus robur* L. ssp. *Petraea* Kl. *et* Kr. *et* Rol.) zu sprechen (ROLOFF UND BÄRTELS 1996).

Nach KRAHL-URBAN (1951) und KREUTZER (1961) besteht darüber hinaus zwischen dem Wurzelsystem der Stiel- und dem der Traubeneiche kein Unterschied, so daß in dieser Arbeit keine Differenzierung nach Trauben- und Stieleiche vorgenommen wird.

2.2.2 Untersuchungsgebiet Bovenden (ehemals Radolfshausen), Fichte und Buche

2.2.2.1 Untersuchungsgebiet Holzerode

Aus rund 30 ha Fläche der Abteilungen 315 / 316 und 317 wurden 40 Probestämme entnommen. Es soll hier die Fragestellung bearbeitet werden, ob sich die Grobwurzelarchitektur von Buche und Fichte in Mischung von der im Reinbestand erwachsenen Buche oder Fichte unterscheidet. Da keine dieser Aufgabenstellung entsprechenden benachbarte Bestände mit vergleichbaren Standortverhältnissen gefunden wurden, wurde diese sehr große Fläche gewählt. Sie wies in ihrem Kern von 11 ha die geforderten Reinbestandsmerkmale auf. Aus dieser Fläche wurden je 10 Fichten und Buchen entnommen. Im umliegenden Bereich konnten je 10 Buchen und Fichten gefunden werden, die von mindestens fünf Bäumen einer anderen Baumart umgeben waren.

Die Probestämme der Kollektive Buche / Fichte, Fichte und Fichte / Buche wurden aus einem Fichten / Buchen Mischbestand entnommen, der sich folgendermaßen beschreiben läßt: Fichte, 47 jähriges, geringes bis mittleres Baumholz aus Pflanzung, wüchsig, langschaftig, kleinkronig mit stamm bis flächenweise eingemischter Buche, 57 jährig, geringes Baumholz aus Naturverjüngung und Pflanzung, gleichwüchsig, mittel- und geradschaftig, großkronig mit vereinzelt, stammweise eingemischten Europäischen Lärchen, Birken, Kiefern, Bergahornen und Eichen, locker bis geschlossen. Die Probestämme der Kollektive Buche, Buche / Fichte und Fichte / Buche stammen aus einem Buchenbestand mit 0,6 ha Fichtenbeimischung: Buche, 75 jährig (± 20 Jahre), geringes bis mittleres Baumholz aus Naturverjüngung, wüchsig, langschaftig, mittelkronig mit stamm- bis gruppenweise eingemischter Europäischer Lärche und Fichte, 62 jährig, geringes bis mittleres Baumholz aus Pflanzung, gleichwüchsig und kleinkronig mit stamm- bis truppweise beigemischter Birke, Eiche, Kirsche und Bergahorn.

2.2.2.2 Untersuchungsgebiet Krebeck

In Krebeck wurden drei nebeneinander liegende Fichtenprobestflächen im Alter von 21, 30 und 41 Jahren aus den Abteilungen 301 und 302 gewählt. Die Feinerschließung wurde bei den älteren Beständen 1994 durchgeführt. Bei der jüngeren Fläche hat noch keine Feinerschließung stattgefunden. Die Rückegassenabstände betragen 25 m. Die Positionen der gewählten Probestämme sind der Skizze (Abb. 2) zu entnehmen.

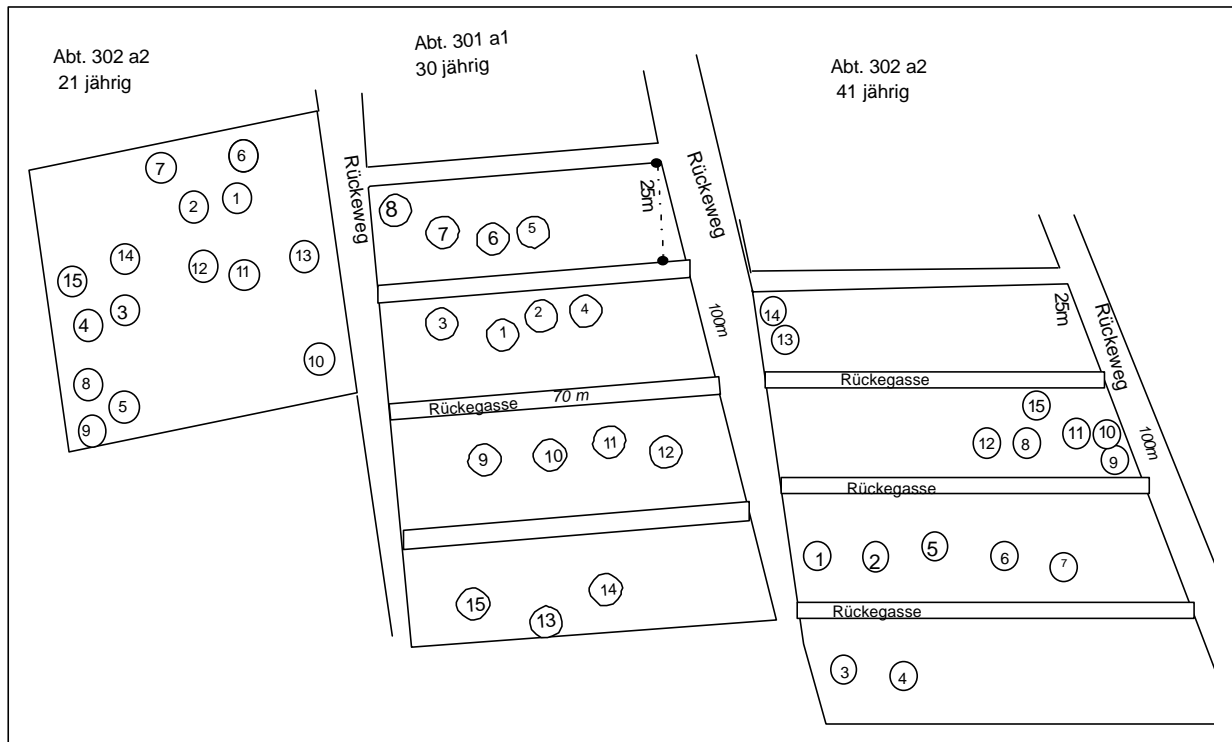


Abb. 2: Skizze der Untersuchungsgebiete Krebeck, 21-, 30- und 41 jährige Fichte

Bestandesbeschreibende Daten sind in Tabelle 4 dargestellt. Alle Flächen weisen eine bessere als erste Ertragsklasse auf. Der Bestockungsgrad der beiden jüngeren Flächen läßt auf einen guten Pflegezustand schließen. Die Läuterungen und Durchforstungen fanden in ausreichendem Maße statt. Einzelstammweise sind in allen Beständen Eiche, Bergahorn, Birke und Buche beigemischt, die begünstigt wurden.

Tabelle 4: Bestandesbeschreibung Krebeck

	Fichte 21	Fichte 30	Fichte 41
Alter (Jahre)	21	30	41
Natürliche Altersstufe	Stangenholz	geringes Baumholz	geringes Baumholz
Begründung	1976 Pflanzung 2+0 Westerhof 03	1970 2+2 Westerhof 633.08 1,7 m ² Ver- band 3400 Pfl./ha	Pflanzung 1958; 2+0
Stammzahl St/ha	2833	2373	2091
Schaftlänge	mittelschaftig	mittel- langschaftig	mittel- langschaftig
Bestockungsgrad (B°)	1,0	0,8	1,1
Höhe Zentralbaum (m)	10,5	14,1	18,2
BHD Zentralbaum (cm)	12,5	14,5	15,5
Vorrat fm / ha	100	202	350
Durchforstungen	Läuterung 1987	Läuterung 1987, Durchforstung 1994	Keine Läuterung Schneebruch '85/'86 Durchforstung 1992
Vorbestand	Fichte	Fichte	Fichte
Hangneigung (°)	2	2	4
Nat. Waldgesellschaft	Luzulo Fagetum	Luzulo Fagetum	Luzulo Fagetum

	Fichte 21	Fichte 30	Fichte 41
Alter (Jahre)	21	30	41
Aktuelle Waldgesellschaft	Culto Picetum	Culto Picetum	Culto Picetum
Flächengröße (ha)	1	7,4	5,6
Probeflächengröße (ha)	0,8	1	1

2.2.3 Untersuchungsgebiet Knesebeck, Kiefer und Fichte

Aus der Abteilung 93 der Revierförsterei Knesebeck wurden 20- und etwa 50 jährige und aus den Abteilungen 82 und 75 30 jährige Probestämme entnommen. Bestandesbeschreibende Daten sind nur für die älteren Flächen in Tabelle 5 dargestellt. Die 20 jährigen Fichten und Kiefern wurden aus einem mehrschichtigen Mischbestand, bestehend aus 112 jähriger Kiefer als Überhalt mit locker bis räumlicher Beimischung 44 jähriger Kiefern und einzelstammweiser Mischung mit Buche ($B^\circ 0,5$) entnommen. Der Nachwuchs, aus dem die Probestämme stammen, besteht aus ca. 20 jähriger, natürlich verjüngter Kiefer und horstweiser, gepflanzter, 20 jähriger Fichte ($B^\circ 0,7$) (Hohlspatenpflanzung mit 0+1+2 Westerhof 1300 4 x 1 m).

Tabelle 5: Bestandesbeschreibung Knesebeck

Bestand	Fichte	Fichte	Kiefer	Kiefer
Alter (Jahre)	31	50	33	47
Natürliche Altersstufe	Schwaches Baumholz	Mittleres Baumholz	Schwaches Baumholz	Mittleres Baumholz
Begründung	Hohlspatenpflanzung 2+1; 4348 St, 2x 1,15m 1965 Nachbesserung 1600 St 2+2 Nordd. Tiefland, 300 2+1 Westerhöfer 1,5x2	Nicht bekannt, da zwischen 1974 und 1984 dazugekauft	Pflanzung Romezverfahren	Saat
Stammzahl St/ha	2150	1375	2700	780
Schaftlänge	mittelschaftig	mittelschaftig	langschaftig	langschaftig
Bestockungsgrad (B°)	0,8	0,8	1,1	0,8
Höhe Zentralbaum (m)	13,8	20,3	12,4	18,1
BHD Zentralbaum (cm)	13,1	21	11,9	19,2
Vorrat fm/ha	190	320	143	214
Durchforstungen	Entnahme von Bäumen zum Zaunbau	Nicht bekannt	Nicht bekannt	1983 24 fm/ha Jungdurchforstung
Vorbestand	Kiefer	Nicht bekannt	Kiefer	Kiefer
Hangneigung ($^\circ$)	0	0	0	0
Reihenkoordinaten	Nord-Süd	Ost-West	Ost-West	Ost-West
Nat. Waldgesellschaft	Luzulo Fagetum	Luzulo Fagetum	Luzulo Fagetum	Luzulo

Bestand	Fichte	Fichte	Kiefer	Kiefer
Alter (Jahre)	31	50	33	47
Akt. Waldgesellschaft	Culto Picetum	Culto Picetum	Culto Pinetum	Fagetum Culto Pinetum
Flächengröße (ha)	1,1	1,3	2,2	17,3
Probeflächengröße (ha)	1,1	1,3	0,7	1,0

2.2.4 Eiche

2.2.4.1 Untersuchungsgebiet Holzminden

Für diese Untersuchungen wurden aus der Abteilung 50 (5,6 ha) der Revierförsterei Merxhausen drei Bestände ausgewählt. Sie werden in Tabelle 4 beschrieben. Die Untersuchungsflächen liegen innerhalb eines langgezogenen, ca.100 m schmalen, 600 m langen Streifens in der Reihenfolge Saat-Pflanzung-Verpflanzung in West-Ost Richtung (Abb. 3). Bei der Verpflanzung handelt es sich um aus dem Saatbestand entnommene und in diese Fläche verpflanzte Eichen. Die Reihen der Saateichen verlaufen etwa in West-Ost-, die der Pflanz- und Verpflanzungseichen in Nord-Süd-Richtung.

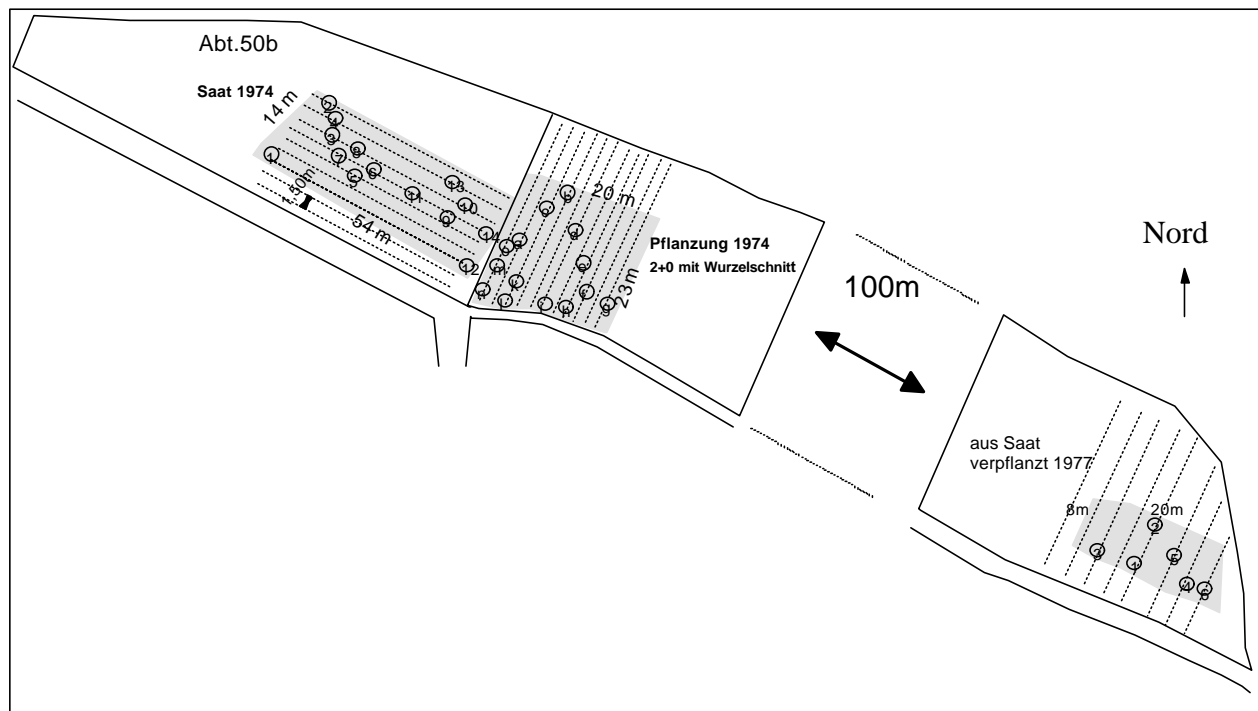


Abb. 3: Schematische Darstellung der Probeflächen Holzminden, 22 jährige Eiche, Pflanzung, Saat und Verpflanzung

Die drei Eichenbestände unterscheiden sich im Alter und nach Beschreibung im Bestandeslagerbuch kaum. Sie differieren bei genauerer Aufnahme jedoch in einem nicht geringen Maße. Die Saatfläche weist als dienende Baumart allein Hainbuche auf und zeigt sich wüchsiger als die beiden anderen Flächen. Die Pflanzung hat einen erheblichen Anteil (38 %) an Mischbaumarten wie Roteiche (*Quercus rubra* L.) und Linde (*Tilia cordata* MILL.). Die Linde wurde 1994 geköpft. Bei der Verpflanzung haben Roteiche und Linde einen höheren Mischungsanteil als bei der Pflanzung. Darüber hinaus ist die Linde in diesem Bestand nicht geköpft worden, so

daß beide Baumarten in den Hauptbestand eingewachsen sind und ihn teilweise schon überwachsen haben.

Tabelle 6: Bestandesbeschreibung Holzminden

Eiche	Pflanzung	Saat	Verpflanzung aus Saat
Alter (Jahre)	24	22	22
Natürliche Altersstufe	Stangenholz	Stangenholz	Stangenholz
Begründung	Pflanzung 1974 2+0	Saat 1974 500 kg/ha Herkunft Pfälzer Wald / Odenwald	Herkunft Saat 74, umgesetzt 1977
Stammzahl	3400	4500	4100
Schaftlänge	langschaftig	langschaftig	langschaftig
Bestockungsgrad (B°)	1,0	1,1	1,0
Höhe Zentralbaum (m)	11,1	12,2	10,4
BHD Zentralbaum (cm)	9,9	13,5	8,4
Maßnahmen	keine	keine	keine
Vorbestand	Wiesenaufforstung	Ackeraufforstung	Wiesenaufforstung
Hangneigung (°)	2	2	3
Waldgesellschaft	Galio Fagetum dryopteridetosum	Galio Fagetum dryopteridetosum	Galio Fagetum
Mischbaumarten	Linde geköpft 1995; REiche ins. 38 % BHD 6 cm Höhe 9 m	Hainbuche 7 % BHD 3 cm Höhe 5,3 m	Wi- Linde, REiche 53 % BHD 8,5 cm Höhe 11 m
Flächengröße (ha)	2,4	1,8	1,4
Probeflächengröße (ha)	0,1	0,1	0,5

2.2.4.2 Untersuchungsgebiet Kattenbühl

Auf einer rund 24 ha großen Windwurffläche wurden vom Forstamt Kattenbühl, Revierförsterei Oberode, verschiedene Eichenversuche angelegt. Unter anderem ein gepflanzter und zwei gesäte Bestände, die für die Fragestellung dieser Arbeit geeignet waren. Bestandesbeschreibende Daten sind Tabelle 7 zu entnehmen. Der Aufbau dieser Flächen ist in Abb. 4 skizzenhaft dargestellt.

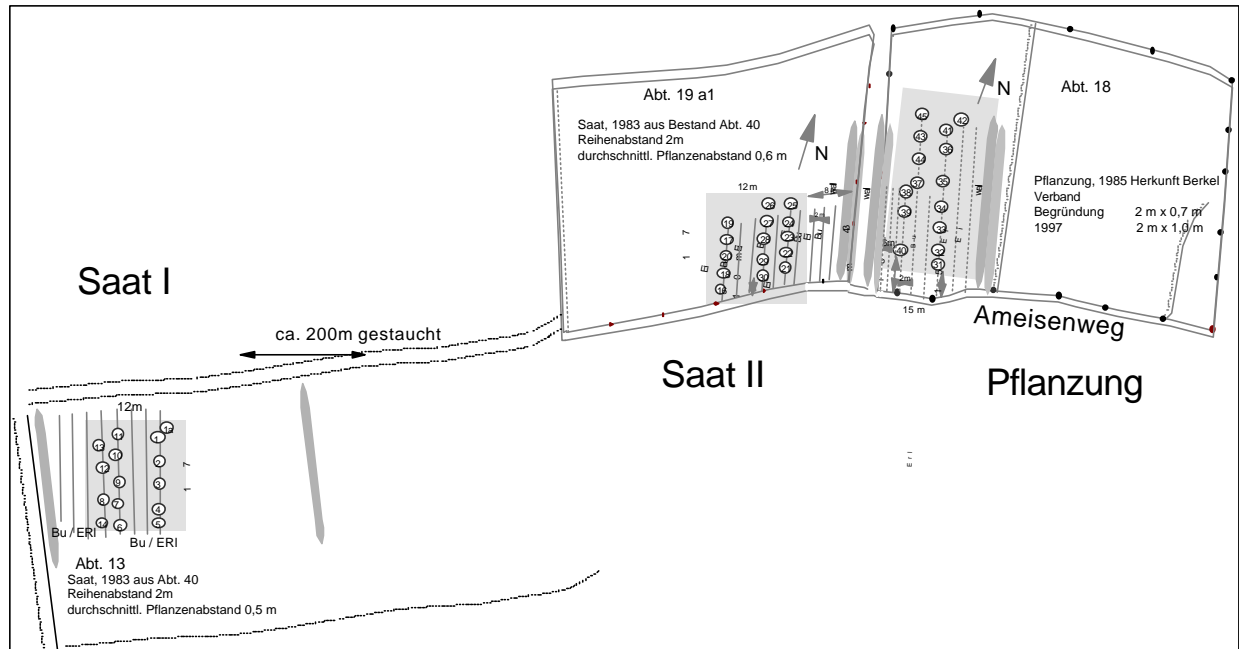


Abb. 4: Schematische Darstellung der Probeflächen Kattenbühl, 13 jährige Eiche, Saat und Pflanzung

Nach Schlagräumung, Kalkung und Schaffung von Dämmen (Dämme-Rome) auf Kahlschlagflächen wurde mit Eiche, sowohl Saat als auch Pflanzung, in reihenweiser Mischung mit Buche aufgeforstet. Zum Zeitpunkt der Untersuchungen befanden sich die drei ausgewählten Flächen in der Dickungsphase. Durch seine Wüchsigkeit ragt der gepflanzte Bestand deutlich hervor. Ebenso unterscheiden sich die beiden Saatbestände gleichen Alters und gleicher Herkunft in ihrem Wachstum. Die Saat I - Fläche ist wüchsiger als die Saat II - Fläche. Da aus der ersten Fläche mehr Wildlinge gewonnen wurden als aus der zweiten Fläche, hatte die Eiche des Saat I-Bestandes einen größeren Standraum zur Verfügung. Begünstigt durch mehr Licht und Nährstoffe konnten die Eichen der Saat I Fläche so dicker werden. Darüber hinaus sind sie auch höher. Geographisch liegen die beiden Bestände ca. 200 m auseinander (Abb. 4).

Tabelle 7: Bestandesbeschreibung Kattenbühl

Eiche	Pflanzung	Saat I	Saat II
Alter	14	13	13
Natürliche Altersstufe	Dickung	Dickung	Dickung
Begründung	1985 Schlagräumung u. Kalkung 5t/ ha Dämme -Rome; Pflanzung 1985 2+1 Berkel 818.07 10/50	1983 Stockrodung u. Kalkung 2t/ha Dämme -Rome; Saat 1983 336 kg/ha aus Abt 40 FoA Kattenbühl	1983 Stockrodung u. Kalkung 2t/ha Dämme -Rome; Saat 1983 150kg auf 0,3 ha Herkunft Abt. 40 FoA Kattenbühl
Düngung	1985 Einzelpflanzendüngung Volldünger; Lupinenaussaat 1985	Einzelpflanzendüngung '86/'87	Einzelpflanzendüngung '86/'87
Stammzahl St/ha	5000	8300	10000
Schlußgrad	geschlossen	geschlossen	gedrängt
Höhe Zentralbaum(m)	6,3	5,8	5,4
BHD Zentralbaum(cm)	6	5,6	5,0
Jungwuchspflege	Jungwuchspflege '91	Jungwuchspflege '91	keine
Vorbestand	Fichte	Fichte	Fichte
Hangneigung	Plateau	Plateau	Plateau
Waldgesellschaft	Galio Fagetum	Galio Fagetum	Galio Fagetum
Mischbaumarten	Bu/RErle/BAh/Bi'87/R Erl 90 geköpft	Bu/BAh / Bi / RErle '87/'90 geköpft	Bu/BAh/Bi/RErle '87/'90 geköpft
Flächengröße (ha)	3,2	2	0,3
Probeflächengröße (ha)	0,25	0,25	0,25

3 Methoden

3.1 Bodenanalyse

Im frischen Zustand wurden im Labor die pH(H₂O)- und pH(KCl)- Werte der Bodenlösung anhand einer Mischprobe aus zwei Probenahmen ermittelt. Nach Trocknung bei 40 °C wurden im Perkulationsverfahren mit NH₄Cl die effektive Austauschkapazität (Ake) und die austauschbaren Kationen (K, Ca, Mg, Fe und Al), wie bei MEIWES (1984) beschrieben, bestimmt. Die Ergebnisse der Bodenanalysen sind in Anhang I (C-F) zu finden. Die feldbodenkundlichen Aufnahmen wurden in Anlehnung an die forstliche Standortaufnahme 1996 (ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG 1996) durchgeführt.

3.2 Auswahl und Erfassung der Probebäume

Aus jeder Versuchsfläche wurden zwischen sechs und 16 Bäume aus dem Bestandesinneren ausgewählt. Es wurde in jedem Bestand eine etwa gleich große Anzahl Bäume der ersten vier Kraft'schen Klassen (3-7 Bäume) entnommen. Durch die Auswahl der verschiedenen Kraft'schen Klassen wurde erreicht, daß die Baumdurchmesser- und -höheverteilung des Bestandes weitgehend abgedeckt ist. Weiterhin sollten die Konkurrenzverhältnisse, die durch die soziale Stellung beschrieben werden, erfaßt werden.

Für die Mischbestandsuntersuchungen wurden die Probebäume so ausgewählt, daß der über alle Bäume gemittelte BHD etwa gleich war.

Am stehenden Baum wurden in 1,30 m Höhe die Durchmesser (BHD) ermittelt. Weiterhin wurde die Nordrichtung und der Stammfuß gekennzeichnet. So waren nach der Baumentnahme an den freiliegenden Wurzelsystemen Himmelsrichtung und Wurzelansatz noch erkennbar.

3.3 Konkurrenzbedingungen

Der Konkurrenzdruck, dem ein einzelner Baum ausgesetzt ist, ergibt sich aus den Dimensionen benachbarter Bäume und den Abständen zwischen Probebaum und Konkurrent (TOMÉ und BURKHART 1986, HOLMES und REED 1991, BIGING und DOBBERTIN 1992).

Bei allen Flächen wurden die drei nächsten Nachbarn der Probebäume mit ihrem Durchmesser und dem Abstand zum Probebaum aufgenommen.

Allein in Holzerode wurden weiterhin die Höhen der fünf bis neun Nachbarn ermittelt, so daß der im folgenden erörterte HEGYI-Index (1974) und der Überragungsindex (HARTKOPF 1994, BEHLEN 1996, BIRKE 1997 und BOMMER 1998) angewendet werden können.

3.3.1 HEGYI-Index

HEGYI (1974) hat einen Index (Formel 1) erstellt, der den BHD eines Konkurrenten mit dem Abstand des Probebaumes zum Konkurrenten gewichtet. Je größer der berechnete Wert, desto größer ist die Konkurrenz einzuschätzen. Für wenig bedrängte Bäume liegt der HEGYI-Index (C) bei eins, für stark bedrängte kann er in seltenen Fällen bis 15 ansteigen.

$$C = \sum_{j=1}^n (BHD_j / BHD_i) / D_{ij}$$

BHD_j = BHD des Konkurrenzbaumes j (cm)

BHD_i = BHD des Probebaumes i (cm)

D = Abstand des Probebaumes i zum Nachbarn j (m)

n = Anzahl der Konkurrenzbäume

Formel 1: HEGYI-Index (1974)

Dabei stellt sich die Frage, welcher Nachbarbaum wirklich als Konkurrent anzusehen ist. HEGYI (1974) definiert für die Entfernung Probebaum/ Konkurrent einen konstanten Radius von 3,05 m. In diesem Umkreis geht jeder Baum in die Berechnung des Indexes ein. Mit zunehmendem Alter steigt jedoch der Baumabstand, sei es durch Durchforstungen oder durch natürliche Selektion. Dies hat für die Aussagekraft des Indexes den Nachteil, daß der ermittelte Wert abnimmt und so einen geringen Konkurrenzdruck dokumentiert. Somit wird die Bedrängung nicht mehr hinreichend genau beschrieben.

Aus diesem Grund wurde von BIGING und DOBBERTIN 1992 eine Formel entwickelt, mit der, abhängig von Abstand und BHD der Probe- und Nachbarbäume, eine Konkurrenzsituation nachgewiesen werden kann (Formel 2).

$$Dt < (BHD_p + BHD_n) / 8$$

Dt = Abstand des Probebaumes zum Nachbarn (m)

BHD_p = BHD des Probebaumes (cm)

BHD_n = BHD des Nachbarbaumes (cm)

Formel 2: Berechnung des relevanten Konkurrenten nach BIGING und DOBBERTIN (1992)

Nach Bestimmung der jeweiligen Konkurrenten werden deren Daten für die Berechnung der Konkurrenz nach HEGYI (1974) verwendet.

3.3.2 Überragungswinkel

Eine weitere Möglichkeit zur Beschreibung der Konkurrenzsituation stellt ein Höhenvergleich zwischen Probebaum und Nachbarbäumen dar. Für die Fichten und Buchen aus Holzerode wurden alle Höhen der Nachbarbäume ermittelt, die die Krone des Probebaumes berührten. Von der Höhe und der Entfernung dieser benachbarten Bäume hängt es ab, inwiefern der Zentralbaum beschattet ist und / oder selbst für seine Nachbarn beeinträchtigende Schattenbildungen hervorruft (SCHMALTZ und MERKEL 1995). Beide Kriterien werden in dem "Überragungswinkel" (HARTKOPF 1994, BEHLEN 1996, BIRKE 1997 und BOMMER 1998) zur Bestimmung der Konkurrenzsituation genutzt (Abb. 5). Mit Zunahme der Beschattung wird das Assimilationsvermögen und damit die Wuchskraft eines Baumes eingeschränkt. Der Vorteil des Überragungsindex gegenüber anderen sich auf die Baumhöhe beziehenden Konkurrenzindizes liegt in der leichten Herleitung (Formel 3).

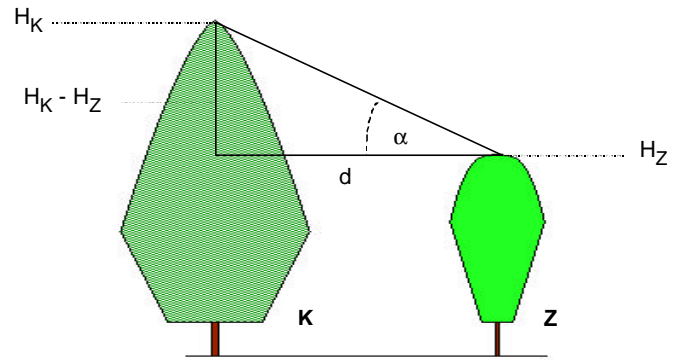
$$\tan \mathbf{a} = \frac{H_K - H_Z}{d}$$

\mathbf{a} = Überragungswinkel (°)

d = Baumabstand (m)

H_K = Höhe des Konkurrenten (m)

H_Z = Höhe des Zentralbaumes (m)



Formel 3: Überragungswinkel (\mathbf{a}) (u.a. HARTKOPF 1994)

Abb. 5: Darstellung zur Berechnung des Überragungswinkels (\mathbf{a})

Für den einzelnen Nachbarn können Werte von minimal 0° mit wenig Konkurrenz (gleiche Höhen, große Abstände) und der Annäherung an 90° bei erheblicher Höhenüberlegenheit und Nähe des Konkurrenten zum Zentralbaum vorkommen. Die Summe der Winkel (\mathbf{a}) aller aufgenommenen Nachbarbäume wird als Maß für den Konkurrenzdruck angesehen. Dabei werden solche Bäume, die niedriger als der Zentralbaum sind, nicht betrachtet. Sie üben vermutlich keine Konkurrenz auf den Probestaum aus.

3.4 H/D-Wert

Zusammen mit der Kronenausdehnung bildet der H/D-Wert (Schlankheitsgrad) einen wichtigen Indikator der Einzelbaumstabilität (KRAMER 1975). Er beschreibt das Verhältnis von Baumhöhe (H) zu Stammdurchmesser (D) und vermittelt auf diese Weise einen Eindruck von der statischen Konstruktion des Baumes. Der H/D-Wert hat besonders für Nadelhölzer eine große Bedeutung. Hohe H/D-Werte (>80) weisen in Verbindung mit geringen Kronenprozenten auf eine erhöhte Instabilität des Baumes hin. Der H/D-Wert wird hauptsächlich durch die Bestandesbehandlung, insbesondere durch Bestandesbegründung und Durchforstungsstrategie beeinflusst (KRAMER *et al* 1988). Er kann als ein Ergebnis der Bestandesdichte aufgefaßt werden. Je dichter die Bäume zusammenstehen, desto mehr nimmt ihr Durchmesser bei annähernd gleichbleibender Höhe zu. Der H/D-Wert wird demzufolge höher.

3.5 Kronenausdehnung

Bei den Beständen in Holzerode und Kattenbühl wird die Kronenausdehnung gemessen. In Holzerode wird die Kronenfläche mittels Kronenspiegel und Abstand zum Stamm ermittelt (4-8 Radien). In Kattenbühl werden nach Entnahme des Probestaumes in den Hauptkoordinaten Nord, Ost, Süd und West die jeweiligen Kronenradien aufgenommen. Auf diese Weise ist eine Berechnung der Kronenfläche anhand des durchschnittlichen Kronendurchmessers möglich (Formel 4).

$$Kf = \delta \cdot r^2$$

Kf = Kronenschirmfläche (m²)
 R = durchschnittlicher Kronenradius (m)

Formel 4: Kronenschirmfläche

3.6 Probebaumentnahme

Die Probebäume wurden nach längeren Regenperioden vorsichtig mittels eines Schleppers umgezogen (aus feuchtem Boden lassen sich die Wurzeln leichter herausziehen). Abgebrochene Wurzeln wurden nachgegraben und an den Bruchstellen am Wurzelsystem befestigt.

3.7 Gewinnung und Aufnahmeverfahren der ober- und unterirdischen Biomasse

Stamm

Nach der Entnahme des Probebaumes wurden die Länge des Stammes, der Kronenansatz (ab drittem lebenden Ast) und die mittleren Durchmesser fortlaufender Sektionen, 0,25 m-0,75 m-1,3 m-1,5 m-2,5 m-3,5 m usw., am liegenden Stamm gemessen. Mit Hilfe dieser abschnittsweisen Durchmesserdaten war die Volumenberechnung des Stammholzes mittels Formel 5 möglich.

$$V_{st} = \sum_i^n (G_m * l_i)$$

G_m = Mittengrundfläche des zu berechnenden Körpers (m)
 l_i = Länge des zu berechnenden Körpers (m)

Formel 5: Berechnung des Stammvolumens (m³)

Krone

Die Krone wurde im frischen Zustand vollständig gewogen. Anhand eines repräsentativen Probeastes aus der Kronenmitte konnte das Blatt-Ast (erste und zweite Ordnung)- Nebenästchen (dritte bis n-te Ordnung) - Verhältnis als Frisch- (FG) und Trockengewicht (TG) im Labor ermittelt werden. Anhand dieser Daten und der gemessenen Gesamtkronenmasse werden die Kronenbestandteile berechnet.

Wurzel

Nach den beschriebenen Aufnahmen wurde der Stamm in 0,25 m Höhe von dem Wurzelsystem abgetrennt. Die Wurzelsysteme wurden anfänglich mit einem Luftdruckgerät gesäubert. Dieser Aufwand, bei dem ein Kompressor mitsamt eines Ganzkörperschutzes benötigt wird, schien nach den 20 stärksten Wurzelsystemen und drei Tagen (zwei Mann) zu groß, so daß die restlichen Wurzeln per Hand mit Hilfe von Schaufel, Hacke und spitzen Eisenstangen gesäubert wurden. Die auf diese Weise gesäuberten 242 Wurzelsysteme waren zum größten Teil geringer dimensioniert und stammen zu 35 % aus Sandbodenflächen. Durchschnittlich ist für die Reinigung ein Zeitaufwand von 45 min / Wurzel / Mann nötig.

Nach dem Säuberungsverfahren wurden die Wurzeln vermessen (Abschnitt 3.8.1).

3.8 Ermittlung der Grobwurzel- und Feinwurzelparameter

3.8.1 Wurzel-Meßverfahren

In dieser Arbeit werden terminologisch alle Wurzeln, die einen größeren Durchmesser als 2 mm haben, als Grobwurzeln und die kleiner und gleich 2 mm (Durchmesser) als Feinwurzeln bezeichnet. Dimensionsverhältnisse werden durch die Wurzelquerschnittflächen charakterisiert.

Um qualitative und quantitative Aussagen zur Wurzelarchitektur machen zu können, muß jede Wurzel eines Wurzelsystems in bezug auf Verzweigung und Biomasse aufgenommen werden. Nach einem von NIELSEN entwickeltem Verfahren (ROOTARCH I 1995) werden die Wurzeln wie folgt vermessen.

Grundsätzlich ist eine Grobeinteilung des Wurzelsystems in horizontaler und vertikaler Richtung erforderlich. Der Horizontalwinkel gibt Aufschluß über die Himmelsrichtung, in die die Wurzel wächst, wobei 0° Norden und 180° Süden entsprechen (Abb. 6). Der Vertikalwinkel bestimmt die Tiefendurchwurzelung mit 0° Flachwurzel bis hin zu 90° Tiefenwurzel. Der Übergang von Flachwurzeln zu Tiefenwurzeln liegt bei 45° . Dabei wird eine Wurzel, deren Winkel kleiner gleich 45° ist, als Flachwurzel bzw. eine, deren Winkel größer 45° ist, als Tiefenwurzel eingeteilt. Darüber hinaus werden für jede Wurzel des Systems die maximale Tiefe und die geschätzte Anzahl der Feinwurzeln dokumentiert. Nach der Vermessung wird in einzelnen Beständen (Kattenbühl) das Gesamtwurzelsystem gewogen.

Zur genauen Vermessung der horizontalen Ebenen werden über die Gesamtwurzel fiktiv drei Zylinder in verschiedenen Radien gelegt (Tabelle 8). Diese sind abhängig vom Durchmesser der Probebäume. Je geringer die Probebaumdimensionen sind, desto enger müssen die Meßzylinder gelegt werden, da sonst zu wenig Wurzeln erfaßt werden. Tritt eine Wurzel durch den Zylinder der ersten, zweiten oder dritten Sektion, werden an der jeweiligen Durchtrittsstelle der Wurzelquerschnitt (zwei Messungen des Durchmessers) und die Durchtrittskordinaten (Neigungswinkel) bestimmt. Bei der praktischen Durchführung der horizontalen Vermessung der Wurzeln werden markierte Zollstöcke über das Wurzelsystem gelegt und die Sektionen mit Kreide gekennzeichnet, so daß die Radien schnell erfaßbar sind.

Zur vertikalen Erfassung werden in verschiedenen Tiefen Schnittebenen durch die Zylinder gelegt, in denen gleichsam die vorgenannten Bestimmungen erfolgen. Diese drei Schnittebenen werden an den Wurzeln eingezeichnet. Mit Erfassung der horizontalen und vertikalen Elemente erhält man eine räumliche Beschreibung der Wurzelgeometrie. Nach der Aufnahme einer Wurzel wird diese durch eine Wäscheklammer gekennzeichnet, so daß sie nicht doppelt vermessen werden kann.

Wurzeln, die in ihrem Ursprung horizontal verlaufen, in weiterer Entfernung von der Stammbasis ihre ursprüngliche Durchwurzelungsrichtung jedoch ändern, werden als Richtungswechsler bezeichnet. Sie werden in der vorliegenden Arbeit in die Kategorie eingestuft, in der sie sich in der ersten Sektion befanden. Die Information der Richtungsänderung ist dokumentiert, wird aber aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt.

Für diese Arbeit ist für die um 60 jährigen Buchen ein Zeitaufwand von etwa sechs Stunden und für gleichaltrigen Fichte ca. vier Stunden zu kalkulieren. Für die jüngeren Fichten, Kiefern und Eichen (13-31 jährig) werden im Mittel zwei Stunden benötigt.

Tabelle 8: Größe der Radien und Schnittebenen der gemessenen Sektionen (Abstände von der Stammbasis (Abb. 6))

Entfernung von Stammbasis (cm)	Sektion 1		Sektion 2		Sektion 3	
	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal
Holzerode (Fichte / Buche)	30	40	60	60	100	90
Krebeck (Fichte)	30	40	60	60	100	90
Knesebeck (Fichte / Kiefer)	30	40	60	60	100	90
Holzminden (Eiche)	20	20	40	40	70	70
Kattenbühl (Eiche)	20	30	40	40	70	70

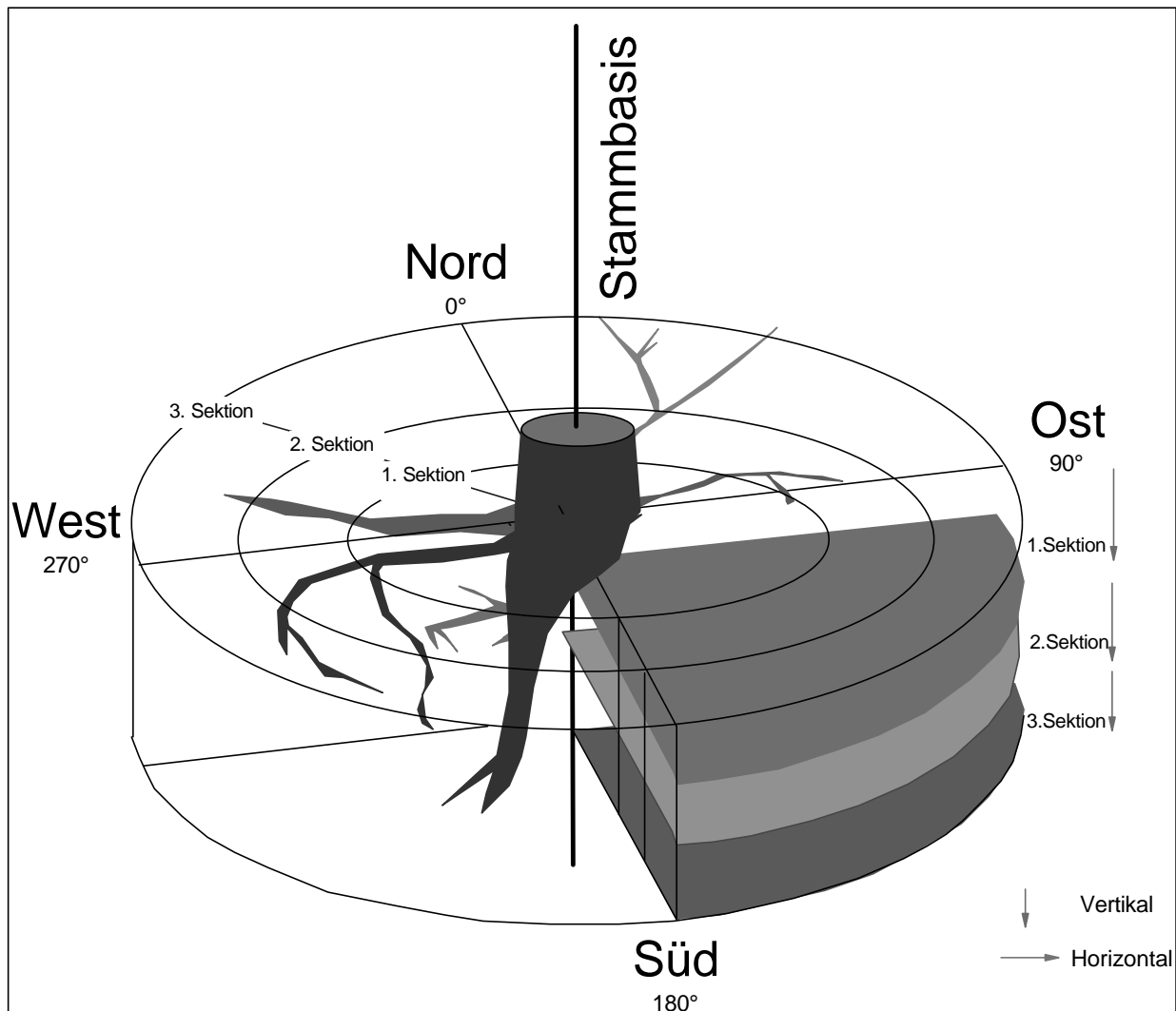


Abb. 6: Wurzelmeßschema

3.8.2 Feinwurzelermittlung

Wie im vorherigen Abschnitt schon erwähnt, wird für jede Einzelwurzel eines Systems die Feinwurzelmenge geschätzt. Als Feinwurzeln gelten jene Wurzeln, die kleiner als 2mm sind. Die Schätzung erfolgt nach Übung an 100 Einzelwurzeln, an denen nachträgliche Zählungen durch dieselben Personen durchgeführt wurden.

3.8.3 Ermittlung der Einzelwurzeltiefe

Bei der Aufnahme der Einzelwurzel wird die maximale Tiefe über die Sektionen hinaus dokumentiert. Die Vermessung erfolgt von der Bodenoberfläche, die durch die Markierung des Wurzelansatzes erkennbar ist, bis an die tiefste Stelle jeder Einzelwurzel.

3.9 Zusammenfassung der erhobenen Parameter

Folgende Baum- und Wurzeldata stehen für die Analysen zur Verfügung (Tabelle 9).

Tabelle 9: Oberirdische Parameter

Oberirdische Parameter	
• Alter	• Kronengewicht (frisch, trocken)
• BHD	• % Anteile Blatt / Ast
• Höhe	• Kronenansatz
• H/D-Wert	• Kronenausdehnung (Kattenbühl, Holzerode)
• Soziale Stellung	• Stammvolumen
• HEGYI-Index	• Stammgewicht (Kattenbühl)
• Übertragungswinkel (α)	

Tabelle 10: Unterirdische Parameter

Wurzelparameter	
• Wurzeldurchmesser der 1., 2., 3. Sektion (2 Messungen)	• Feinwurzelanzahl pro Einzelwurzel
• Wurzelkoordinaten der 1., 2., und 3. Sektion (horizontal und vertikal)	• Gesamtwurzelgewicht (Kattenbühl)
• Maximale Wurzeltiefe der Einzelwurzel	

3.10 Datenanalyse und Statistik

3.10.1 Datenauswertung

Die Berechnung der Ergebnisse erfolgte unter zu Hilfenahme des Programms "TREEARCH" (NIELSEN 1995). Hiermit wurden die Querschnittsflächensummen jeder Sektion berechnet. Weiterführende Ergebnisse wurden mit den Programmen EXCEL, WINSTAT und STATISTICA erarbeitet.

In einem nächsten Schritt wurde eine Plausibilitätskontrolle vorgenommen. Danach wurde geprüft, ob Normalverteilungen vorliegen. Der Kolmogorov-Smirnov-Test berechnet dafür die maximalen Distanzen zwischen den kontinuierlich verteilten Daten und der idealen kumulierten Häufigkeit. Eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $p > 5\%$ wird als Signifikanzkriterium genutzt.

Liegt keine Normalverteilung vor, wurde entweder ein nichtparametrischer Mittelwertvergleichstest (Mann-Whitney U-Test) durchgeführt oder die Daten werden durch die Boxcox-Funktion transformiert. Hierbei wird die Schiefe der Verteilung reduziert. Diese wird definiert durch das Ersetzen von $x - \ln x$ für $L = 0$ - und $-X^L - 1/X$ für L ungleich 0. Mit Werten für $L > 1$ werden negative und mit $0 < L < 1$ werden positive Schiefen behoben. Es kann vorkommen, daß darüber hinaus die Kurtosis behoben werden muß. Die Kurtosis charakterisiert die Abweichung von der Normalverteilung. Dabei wird das X folgendermaßen ersetzt: $x - \text{sign} [(X-x_m+1)^L] - 1/L$ für $L=0$ und $x - \text{sign} [(X-x_m+1)^L]$ für L ungleich 0, wobei $L=0,5$ gesetzt wird. Mit Werten für $L > 1$ wird eine negative und mit $0 < L < 1$ wird eine positive Kurtosis behoben.

Mit der Varianzanalyse wurde geprüft, ob signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten vorliegen (Tukey $p = 0,05$). Die homologen Gruppen werden in den Abbildungen durch einen Stern (*) gekennzeichnet. Pfeile weisen darauf hin, welche Parameter sich signifikant von den gekennzeichneten Größen unterscheiden.

Für die Beurteilung statistischer Zusammenhänge zwischen den gemessenen Daten werden Korrelations (Pearson)-und Regressionsanalysen durchgeführt (SACHS 1978). Durch die Methode der kleinsten Quadrate kann eine bestangepaßte Ausgleichsgerade- oder Kurve mit der dazu gehörigen Funktion berechnet werden. Die Güte der Anpassung wird durch das Bestimmtheitsmaß (R^2) bei einem Signifikanzniveau von $p = 0,05$ dokumentiert. Weiterhin stellt sich die Frage, inwiefern sich die Steigung der Regressionsgeraden signifikant voneinander unterscheidet. Es besteht die Möglichkeit, daß die Veränderung eines Faktors, z. B des Baumalters, die Ausgleichsgerade nur verschiebt. D.h., es ist keine Änderung der Steigungen vorhanden. Um dies zu prüfen, wird eine Kovarianzanalyse mit Test auf Parallelität durchgeführt. Dieser Test beruht auf dem Vergleich der Residual-Varianz/Kovarianz-Matrix innerhalb jeder Zelle ($p = 0,05$).

Für die Beschreibung der normalverteilten Datensätze werden der arithmetische Mittelwert (\bar{x}), die Standardabweichung (s_x) und der Variationskoeffizient ($v\%$) berechnet. Die Standardabweichung wird in die jeweiligen Grafiken eingebunden (Pfeil).

3.10.2 Weiterführende Berechnungen der Wurzelparameter

3.10.3 Erstellung der Häufigkeitsverteilungen der Wurzeln der ersten Sektion

Für alle Bestände werden Häufigkeitsverteilungen der ersten Sektion in 10 mm-Klassen erstellt. Grundlage dieser Darstellung bilden alle gemessenen Wurzeldata einer Versuchsfläche (Anhang II). Darüber hinaus wird, nach Baumdurchmesser differenziert, eine weitere Stratifizierung für die Fichten-, Buchen- und Kiefernwurzeln nach 50 mm und für die Eichen nach

20 mm-Klassen vorgenommen. Diese werden für die verschiedenen Bestände als Kreisdiagramme der Vertikalen und Horizontalen dargestellt. Dabei sind die Kreisdiagramme der vertikalen Wurzeln aus Platzgründen kleiner dargestellt als die der horizontalen Wurzeln.

3.10.3.1 Relation zwischen Horizontal- und Vertikalwurzeln

Um eine Gleichmäßigkeit des Wurzelsystems in bis zu drei Kubikmetern Boden (abhängig von Sektionengröße bzw. Baumdurchmesser) charakterisieren zu können, wird die horizontale Wurzelanzahl zu der vertikalen ins Verhältnis gesetzt. Gleiches wird für die Wurzelquerschnittsfläche vorgenommen. In Abb. 7 werden exemplarisch diese Relationen dargestellt. Eine Voraussetzung für eine für die Stabilität des Baumes optimale Ausbildung eines Wurzelsystems ist die gleichmäßige Verteilung der Wurzelbiomasse im Boden (NIELSEN 1990). Darüber hinaus kann das Verhältnis der horizontalen und vertikalen Wurzelquerschnittsflächen in definierten Schichtebenen als ein Maß der "mechanischen und physiologischen Verankerung des Wurzelsystems betrachtet werden" (GRUBER 1992).

	Ausgewogenes Wurzelsystem				Unausgewogenes Wurzelsystem			
	Anzahl (N)		WQF (cm ²)		Anzahl (N)		WQF (cm ²)	
	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal
Sektion 1	1	1	5	5	1	1	5	5
Sektion 2	1	1	3	3	2	1	8	3
Sektion 3	1	1	2	2	4	2	4	2
Sektion 1	1:1		1:1		1:1		1:1	
Sektion 2	1:1		1:1		2:1		2,7:1	
Sektion 3	1:1		1:1		2:1		2:1	

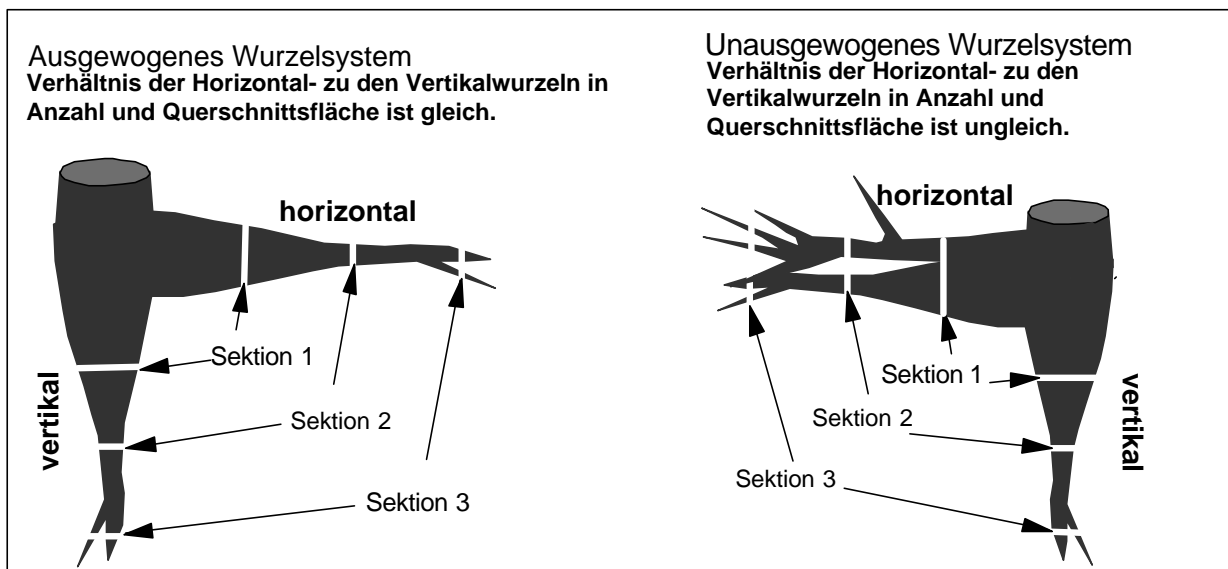


Abb. 7: Erklärende Darstellung der Verhältnismessung der Horizontal- zu den Vertikalwurzeln in Anzahl (N) und Wurzelquerschnittsfläche (WQF cm²) in den drei Sektionen. Ausgewogenes Wurzelsystem wird durch eine Relation von 1:1, unausgewogenes durch z.B. 5:1 gekennzeichnet.

Ein Wurzelanzahlverhältnis von 1 : 1 in z.B. 30 cm Radius von der Stammbasis (erste Sektion) läßt auf eine gleichmäßige Wurzel Ausbildung schließen, da ebensoviele Horizontal- wie Vertikalwurzeln vorhanden sind. Ein Verhältnis von z.B. 5 : 1 besagt, daß das Wurzelsystem in einer bestimmten Sektion fünfmal mehr Horizontalwurzeln als Vertikalwurzeln besitzt.

Jedoch ist das oben beispielhaft dargestellte Verhältnis von 1 : 1 nicht allein aussagekräftig, da die vertikalen Wurzeln durchaus dicker sein können als die horizontalen und umgekehrt. Die Stärke der Wurzeln wird durch die Summe der Einzelwurzelquerschnittflächen des gesamten Wurzelsystems erklärt und ebenfalls in Relation gesetzt. In gemeinsamer Betrachtung der Wurzelanzahl und der Querschnittflächen kann so die Wurzelsystemausformung und damit die Verteilung der Biomasse beschrieben werden. Z.B. liegt das Anzahlverhältnis bei 1 : 1, das Querschnittflächenverhältnis aber bei 10 : 1. Dieses Wurzelsystem besitzt demnach bei gleich vielen Horizontal- wie Vertikalwurzeln 10 mal dünnere Wurzeln in der Vertikalen als in der Horizontalen. Durch die relative Betrachtung ist es möglich, Baumarten und Altersstufen untereinander zu vergleichen. Das Flachwurzelsystem, das für die Fichte als typisch beschrieben wird, kann ebenso wie ein Herzwurzelsystem der Buche charakterisiert werden.

Zeigt das Wurzelsystem eines Baumes in Anzahl und Wurzelquerschnittfläche ein Verhältnis der Horizontal- zu Vertikalwurzeln von 1:1, so ist von der Form eines Zylinders auszugehen. Die Ausformung dieses Kreiskegels stellt nach SCHMID-HAAS und BACHHOFEN (1991) ein gutes Maß für die Stabilität des Baumes dar.

Beispielhaft werden für einen Eichenbestand neben den relativen Zahlen auch die Absolutwerte grafisch dargestellt. Für die anderen Bestände werden Tabellen erstellt, die die prozentualen Anzahl- und Querschnittflächenanteile erklären.

3.10.3.2 Berechnung des Wurzelvolumens

Zur Berechnung des Wurzelvolumens wird die "Newton'sche Formel" angewendet (Formel 6). Mit der Aufnahme der drei in der Horizontalen und Vertikalen gemessenen Sektionen ist die Möglichkeit der Bildung einer Ausgleichsfunktion (log) gegeben. Als Grundwert der Ausgleichsfunktion wird die summierte Wurzelquerschnittfläche aller Einzelwurzeln der horizontalen oder vertikalen drei Sektionen betrachtet. Die Berechnung der Ausgleichsfunktion wird für jedes einzelne Wurzelsystem durchgeführt. Diese Einzelbaumwerte sind die Grundlage der Bestandesdaten. Lassen sich die drei Werte nicht durch eine ausreichend angepaßte Funktion erklären ($R < 0,5$), fällt der Baum aus der Bestimmung der Bestandeswerte heraus.

Die für die Newton'sche Formel benötigten Grundflächen der stammnahen Wurzelbereiche lassen sich durch Extrapolation des oben beschriebenen Zusammenhangs zwischen Wurzelquerschnittfläche und Entfernung vom Wurzelzentrum herleiten. Die mittlere und die untere Grundfläche konnten anhand der Funktion geschätzt werden. Dies ist für die Anwendung der Newton'sche Formel (Formel 6) notwendig, bei der die Grundflächen des unteren, mittleren und oberen Wurzelastabschnittes benötigt werden.

$$v_w = l \cdot (g_u + 4g_m + g_o) / 6$$

l = Länge der Wurzel (dm)

g_u = untere Grundfläche (dm²)

g_m = mittlere Grundfläche (dm²)

g_o = obere Grundfläche (dm²)

Formel 6: Newton'sche Formel (KRAMER und AKCA 1987) zur Berechnung des Wurzelvolumens (dm³)

In Abhängigkeit des Baumalters wird für den Wert der unteren Grundfläche die Entfernung in 10 cm bzw. 20 cm von der Stammbasis gewählt, da in den meisten Fällen erst dort eine eindeutige Wurzelastausprägung zu beobachten ist. Demzufolge wird das Wurzelvolumen erst ab diesem Bereich berechnet, so daß nur das Wurzelastvolumen wiedergegeben wird.

Für die Werte der mittleren Grundfläche werden abhängig von der Dimension des Wurzelsystems die Entfernungen 40 bis 60 cm gewählt und für die oberen 70 bis 100 cm von der Stammbasis.

3.10.3.3 Oberfläche einer Einzelwurzel

Berechnung der Wurzeloberfläche

Für die Schätzung der Wurzeloberfläche wird die Formel zur Berechnung der Oberfläche eines Kegelstumpfes (Abb. 8) verwendet. Als Eingangsgrößen werden der Radius des oberen und unteren Wurzelabschnittes und die Mantellinie benötigt (Formel 7). Beide Größen sind nicht verfügbar und müssen kalkuliert werden. Bei der Anwendung dieser Formel werden der untere und der obere Querschnitt der Wurzel in die Berechnung der Gesamtoberfläche mit einbezogen.

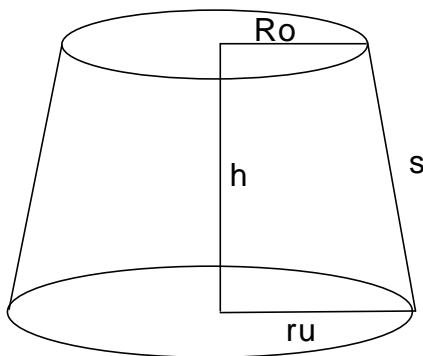


Abb. 8: Kegelstumpf

$$WO = \delta \cdot s \cdot (Ro + ru) + \delta \cdot ru^2 + \delta \cdot Ro^2$$

WO = Wurzeloberfläche (dm²)

s = Wurzelmantellinie (dm)

Ro = oberer Radius (dm)

ru = unterer Radius (dm)

Formel 7: Wurzeloberfläche

Ermittlung der Radien

Anhand des durchschnittlichen Wurzeldurchmessers in den drei gemessenen Sektionen wird für eine mittlere horizontale und vertikale Wurzel eine logarithmische Ausgleichsfunktion erstellt (Tabelle 11). Die Abnahme der Wurzeldurchmesser der Einzelwurzeln unterscheidet sich mit zunehmender Entfernung vom Wurzelzentrum nicht signifikant. Mit Hilfe der Funktionen können die Wurzeldurchmesser in einer beliebigen Entfernung zum Wurzelstock geschätzt werden. Die Funktion lautet $y = b \cdot \ln(x) + a$. Dabei beschreibt y den Durchmesser und x die Länge des Wurzelabschnitts.

Tabelle 11: Ausgleichsfunktionen zur Bestimmung der Wurzel Durchmesser in einer beliebigen Entfernung vom Wurzelstock; x = Entfernung vom Wurzelstock; y = Wurzel Durchmesser

	Bestand	Horizontal	R ²	Vertikal	R ²
Holzerode	Buche	$y = -17,691\text{Ln}(x) + 83,679$	0,99	$y = -20,446\text{Ln}(x) + 91,489$	0,94
	Bu/Fi	$y = -18,388\text{Ln}(x) + 87,106$	0,99	$y = -22,442\text{Ln}(x) + 98,67$	0,89
	Fichte	$y = -38,011\text{Ln}(x) + 178,28$	0,96	$y = -47,756\text{Ln}(x) + 209,13$	0,88
	Fi/Bu	$y = -39,388\text{Ln}(x) + 200,45$	0,95	$y = -54,156\text{Ln}(x) + 244,3$	0,90
Krebeck	Fichte 21	$y = -11,514\text{Ln}(x) + 54,54$	0,96	$y = -14,36\text{Ln}(x) + 62,986$	0,87
	Fichte 30	$y = -19,997\text{Ln}(x) + 94,885$	0,95	$y = -25,197\text{Ln}(x) + 110,52$	0,90
	Fichte 41	$y = -26,505\text{Ln}(x) + 129,54$	0,99	$y = -35,364\text{Ln}(x) + 156,34$	0,90
Knesebeck	Fichte 50	$y = -24,677\text{Ln}(x) + 126,24$	0,98	$y = -37,813\text{Ln}(x) + 167,18$	0,90
	Fichte 31	$y = -14,394\text{Ln}(x) + 71,455$	0,98	$y = -20,375\text{Ln}(x) + 90,047$	0,90
	Fichte 20	$y = -7,2344\text{Ln}(x) + 33,603$	0,99	$y = -8,8184\text{Ln}(x) + 38,342$	0,86
	Kiefer 47	$y = -20,473\text{Ln}(x) + 97,317$	0,98	$y = -25,16\text{Ln}(x) + 111,19$	0,90
	Kiefer 33	$y = -11,699\text{Ln}(x) + 54,437$	0,97	$y = -13,941\text{Ln}(x) + 60,952$	0,89
	Kiefer 20	$y = -4,9472\text{Ln}(x) + 22,723$	0,98	$y = -5,7708\text{Ln}(x) + 25,17$	0,88
Holzmin-den	Pflanzung	$y = -6,1397\text{Ln}(x) + 29,521$	0,99	$y = -8,1058\text{Ln}(x) + 35,365$	0,88
	Saat	$y = -6,9303\text{Ln}(x) + 33,657$	0,96	$y = -9,5306\text{Ln}(x) + 41,763$	0,90
	Verpflanzung	$y = -4,9472\text{Ln}(x) + 22,723$	0,98	$y = -8,5332\text{Ln}(x) + 37,175$	0,89
Kattenbühl	Pflanzung	$y = -0,7724\text{Ln}(x) + 7,5694$	0,91	$y = -7,5685\text{Ln}(x) + 31,535$	0,89
	Saat I	$y = -2,703\text{Ln}(x) + 13,67$	0,98	$y = -10,534\text{Ln}(x) + 44,222$	0,96
	Saat II	$y = -0,9346\text{Ln}(x) + 6,7455$	0,73	$y = -7,1719\text{Ln}(x) + 29,957$	0,94

Berechnung der Wurzelmantellinie

Weiterhin wird für die Formel der Wurzeloberfläche (Formel 7) die Wurzelmantellinie benötigt (Formel 8). Diese kann mit der Wurzellänge berechnet werden, die durch die Funktionen der Tabelle 11 kalkuliert wird. Die durchschnittlichen Wurzellängen liegen bei allen Beständen horizontal zwischen 80 cm und 150 cm und vertikal zwischen 65 cm und 80 cm (Tabelle 12).

$$s^2 = l^2 + (r_u - r_o)^2$$

s = Wurzelmantellinie (dm)

l = Wurzellänge (dm)

r_o = oberer Wurzelradius (10 cm von Stammbasis) (dm)

r_u = unterer Wurzelradius (dm)

Formel 8: Berechnung der Wurzelmantellinie

Tabelle 12: Nach den Ausgleichsfunktionen (Tabelle 11) berechnete Wurzellängen (mittlere Einzelwurzeln der untersuchten Bestände)

	Bestand	Wurzellänge (cm)			Bestand	Wurzellänge (cm)	
		horizontal	vertikal			horizontal	vertikal
Holzerode	Buche	100	75	Knesebeck	Kiefer 47	105	70
	Buche / Fichte	100	70				
	Fichte	95	65				
	Fichte / Buche	150	80				
Kre- beck	Fichte 41	120	70	Holz- minden	Pflanzung	100	65
	Fichte 30	105	70		Saat	110	65
	Fichte 21	100	70		Verpflanzung	80	65
Knese- beck	Fichte 50	155	70	Katten- bühl	Pflanzung	90	50
	Fichte 31	130	70		Saat I	90	55
	Fichte 20	90	65		Saat II	90	55

Nachdem die Mantellinie der Wurzel mit Hilfe von Formel 8 bestimmt wurde, kann die Wurzeloberfläche (Formel 7) berechnet werden.

Berechnet wird hier allein eine mittlere Wurzel des Bestandes, deren Wert abschließend mit der durchschnittlichen Wurzelanzahl multipliziert wird. Dieser Wert beschreibt die Wurzeloberfläche der Grobwurzeln eines Wurzelsystems. Betont werden muß, daß es sich bei diesen kalkulierten Daten nur um Schätzwerte handelt, da die Berechnung nur modellhaft erfolgen konnte.

3.11 Erstellen von Flußdiagrammen zur Beschreibung der oberirdischen- und unterirdischen Parameter

Nach Berechnung der ober- und unterirdischen Daten werden diese ins Verhältnis gesetzt und geprüft, ob Abhängigkeiten zwischen den Parametern bestehen. Die Ergebnisse werden in Flußdiagrammen dargestellt (Abb. 9). Dabei werden folgende Größen berücksichtigt:

- BHD (cm)
- Höhe (m)
- Kronengewicht (frisch) (kg)
- Blattgewicht (kg)
- in Kattenbühl Wurzelgewicht (kg)

In einem Fall wird, da das Blattgewicht nicht vorhanden ist, der Kronenansatz als Bezugseinheit gewählt.

Es werden sechs Grafiken so wiedergegeben, daß Stammvolumen(m³) und Wurzelvolumen(dm³) die x-Achse darstellen und die anderen Parameter die y-Achse. Abb. 9 zeigt beispielhaft die Aufteilung einer solchen Seite. Es ist so möglich, mit diesen Grafiken anhand eines festgelegten Baumdurchmessers die oben genannten Größen abzulesen. Genauer ist das Ergebnis jedoch durch die Berechnung der verschiedenen Werte, die nachfolgend beschrieben wird. Mit dem BHD (erste y-Achse), als leicht zu ermittelnde Eingangsgröße, wird durch eine lineare Funktion des Kästchens **A** das Stammvolumen ermittelt. Mit diesem Wert können darauffolgend die Höhe (**B**; erste y-Achse) und das Kronengewicht (**C**) berechnet werden. In Ab-

folge der Pfeile werden die übrigen Parameter kalkuliert. Auch möglich ist es, mit anderen Werten in die Berechnung einzusteigen. In dieser Arbeit wird jedoch immer die vorher beschriebene Reihenfolge eingehalten.

Die in der Grafik dargestellten Kronenparameter werden im frischen Zustand dargestellt. In Tabelle 13 sind die prozentualen Feuchtegehalte der Kronen wiedergegeben, so daß das Trockengewicht berechnet werden kann.

Tabelle 13: Prozentualer Wassergehalt der Krone

Bestand	% Wassergehalt	Bestand	% Wassergehalt
Holzerode	51,1	Holzminden	45,7
Krebeck	56,4	Kattenbühl	58,1
Knesebeck	43,2		

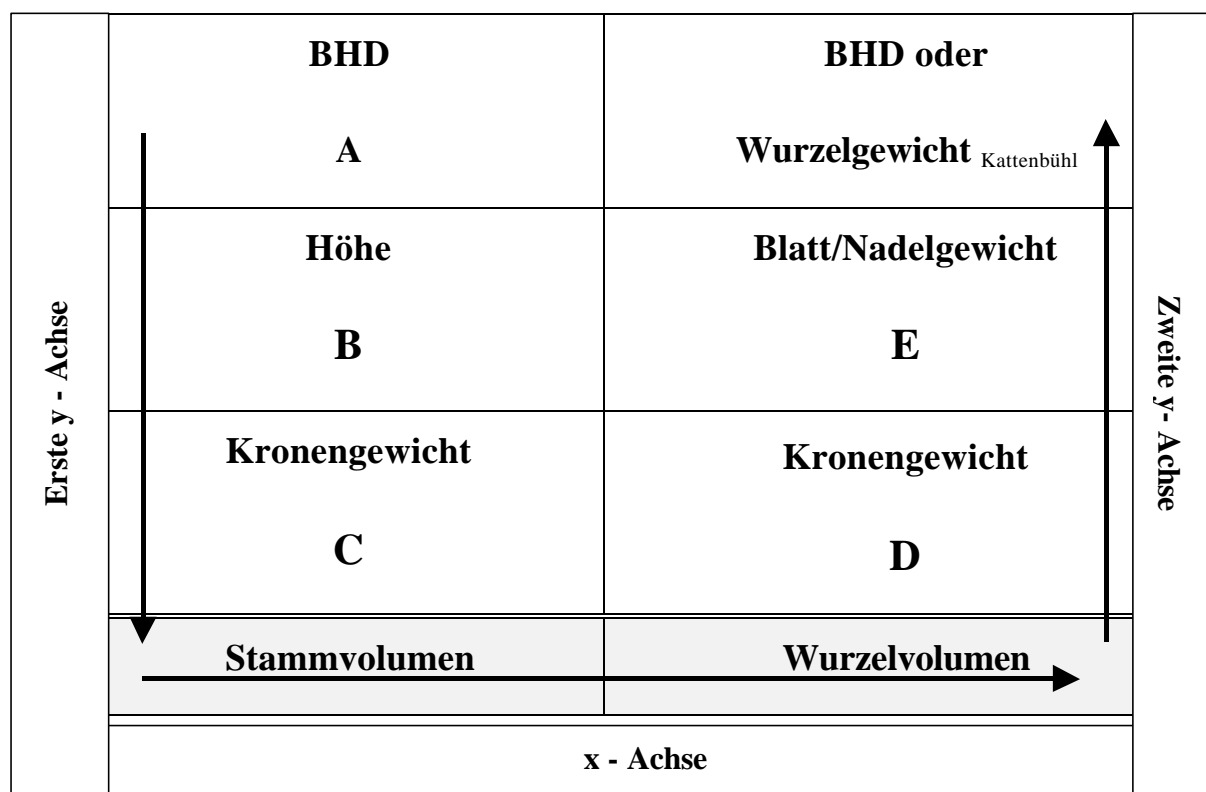


Abb. 9: Schema eines Flußdiagrammes

3.12 Formelsammlung

Die zur Berechnung der Wurzelparameter genutzten Formeln werden zusammenfassend im Anhang III dargestellt.

4 Ergebnisse

4.1 Oberirdische Parameter

4.1.1 Konkurrenzbedingungen

4.1.1.1 HEGYI Index

Holzerode

In Holzerode werden der Abstand und der BHD der Nachbarbäume (bis zu neun) aufgenommen. Anhand dieser Daten wird der HEGYI-Index berechnet und in Tabelle 14 für die einzelnen Kraft'schen Klassen dargestellt. Zur weiteren Information sind die mittleren Abstände der drei nächsten Nachbarn und die Anzahl der nach BIGING und DOBBERTIN (1992) errechneten Konkurrenten aufgeführt. Insgesamt ist für alle Kraft'sche Klassen zu beobachten, daß die Konkurrenz, beschrieben durch den HEGYI-Index, bei den Buchenbeständen signifikant höher ist als bei den Fichtenbeständen. Ferner steigt der HEGYI-Index mit Abfall der sozialen Stellung an.

Der mittlere Baumabstand ist bei den Fichten des Mischbestandes am weitesten, am engsten stehen die Bäume im Buchenmischbestand.

*Tabelle 14: Konkurrenzbeschreibende Daten; Holzerode, Buche und Fichte 55-65-jährig; (HEGYI – Index, Anzahl der Konkurrenten, Baumabstand der nächsten drei Nachbarn zum Probestaum); der Stern * beschreibt die signifikanten Unterschiede (f-Test) des HEGYI-Index ($p = 0,05$) in Richtung der Pfeile*

HEGYI		Buche	Buche / Fichte *	Fichte	Fichte/ Buche
				→	→
Kraft 1	HEGYI		2,02		1,07
	Anzahl Konkurrenten		7,00		5,50
	Nachbar 1		2,55		2,22
Abstände (m)	Nachbar 2		2,65		2,31
	Nachbar 3		2,80		2,60
Kraft 2	HEGYI	1,88	2,31	1,52	1,17
	Anzahl Konkurrenten	5,75	7,00	5,50	6,75
	Nachbar 1	2,20	1,59	2,54	3,22
Abstände (m)	Nachbar 2	3,45	2,03	3,27	4,20
	Nachbar 3	4,43	3,04	3,81	4,60
Kraft 3	HEGYI	2,02	2,53		1,50
	Anzahl Konkurrenten	4,67	6,00		5,33
	Nachbar 1	1,97	1,94		2,71
Abstände (m)	Nachbar 2	3,07	3,10		3,45
	Nachbar 3	3,90	3,81		3,81

		Buche	Buche / Fichte *	Fichte	Fichte/ Buche
HEGYI		→			→
Kraft 4	HEGYI				2,05
	Anzahl Konkurrenten				4,00
	Nachbar 1				1,22
Abstände (m)	Nachbar 2				2,80
	Nachbar 3				3,38

Krebeck

Für die folgenden Bestände kann nur ein vereinfachter HEGYI-Index berechnet werden, da lediglich die Durchmesser und die Abstände zwischen Probebaum und den drei nächsten Nachbarn ermittelt wurden.

Der vereinfachte HEGYI-Index steigt mit Abnahme der sozialen Stellung an (Tabelle 15). Die Werte des jüngsten Bestandes weisen auf einen signifikant stärkeren Konkurrenzdruck hin, welches auf die hohe Bestandesdichte zurückzuführen ist. Die Werte der beiden älteren Flächen differieren nur wenig. Im Mittel der Kraft'schen Klassen zeigt der ältere Bestand einen um 0,23 geringeren HEGYI-Index als die 30 jährige Fichtenfläche. Dies resultiert aus niedrigeren Werten der Kraft'schen Klassen 2 und 4. Die Abstände des nächsten Nachbarn (Nachbar 1) steigen vom jungen zum alten Bestand an und fallen von den herrschenden zu den beherrschten Bäumen ab.

Tabelle 15: Konkurrenzbeschreibende Daten; Krebeck, Fichte 21-41 jährig; (HEGYI-Index, Baumabstand der nächsten drei Nachbarn zum Probebaum); der Stern * beschreibt die signifikanten Unterschiede (f-Test) des HEGYI-Index ($p = 0,05$) in Richtung der Pfeile

		Fichte 21 *	Fichte 30	Fichte 41
HEGYI		→		
Kraft 1	HEGYI	1,30	0,79	0,90
	Nachbar 1	1,95	2,15	2,34
	Abstände (m)	Nachbar 2	2,20	2,45
Nachbar 3		2,25	2,60	2,56
Kraft 2	HEGYI	1,99	1,29	1,24
	Nachbar 1	1,37	1,60	1,82
	Abstände (m)	Nachbar 2	1,40	1,95
Nachbar 3		2,13	2,20	2,22
Kraft 3	HEGYI	2,61	2,21	2,23
	Nachbar 1	1,40	1,63	1,65
	Abstände (m)	Nachbar 2	1,90	1,83
Nachbar 3		2,15	2,05	2,45
Kraft 4	HEGYI	3,18	2,63	2,44
	Nachbar 1	1,53	1,25	1,80
	Abstände (m)	Nachbar 2	1,95	2,27
Nachbar 3		2,10	2,47	2,93

Knesebeck

Auch hier nimmt der HEGYI-Index mit Abnahme der sozialen Stellung und des Alters zu, wobei ein deutlicher Unterschied zwischen Fichte und Kiefer zu beobachten ist (Tabelle 16). Die Kiefern stehen unter einem größeren Konkurrenzdruck als die Fichten. Weiterhin steigt die Konkurrenz mit Verschlechterung der sozialen Stellung stärker an, als das bei der Fichte der Fall ist. Besonders fällt hierbei der 33 jährige Kiefernbestand auf, bei dem der HEGYI-Index signifikant höher ist als bei der älteren Fläche.

*Tabelle 16: Konkurrenzbeschreibende Daten; Knesebeck, Fichte und Kiefer, 31-50 jährig; (HEGYI-Index, Baumabstand der nächsten drei Nachbarn zum Probebaum); der Stern * beschreibt die signifikanten Unterschiede (f-Test) des HEGYI-Index ($p=0,05$) in Richtung der Pfeile*

Hegy		Fichte 31	Fichte 50	Kiefer 33	Kiefer 47
		←	←	*	→
Kraft 1	HEGYI	1,00	0,60	1,04	0,94
	Nachbar 1	2,00	2,66	1,44	2,14
	Nachbar 2	2,26	2,81	1,73	2,87
	Nachbar 3	2,58	3,23	2,02	3,40
Kraft 2	HEGYI	1,41	0,94	2,25	1,12
	Nachbar 1	2,20	2,58	1,30	2,38
	Nachbar 2	2,47	2,82	1,53	2,81
	Nachbar 3	2,98	3,13	2,01	3,03
Kraft 3	HEGYI	2,03	1,38	4,57	1,36
	Nachbar 1	1,86	2,18	0,65	2,65
	Nachbar 2	1,89	2,70	1,53	2,82
	Nachbar 3	1,98	2,72	1,81	3,03
Kraft 4	HEGYI	2,50	1,62	5,53	2,01
	Nachbar 1	1,92	1,05	0,69	2,17
	Nachbar 2	2,20	2,30	1,52	2,87
	Nachbar 3	2,62	2,90	1,56	2,92

Holzminden

Die herrschenden Saateichen besitzen mit dem HEGYI-Index von 2,19 die geringste Konkurrenz (Tabelle 17). Die Unterschiede sind jedoch nicht signifikant. Der Index steigt für die Pflanzeichen um 0,06 und für die verpflanzten Eichen um 1,16 an. Einer signifikant höheren Konkurrenz sind die beherrschten Eichen im Gegensatz zu den herrschenden ausgesetzt. Bei Ersteren ist ein um 0,58 höherer HEGYI-Index zu finden als bei Letzteren.

Tabelle 17: Konkurrenzbeschreibende Daten; Holzminden, 22 jährige Eiche (HEGYI-Index, Baumabstand der nächsten drei Nachbarn zum Probebaum); der Stern * beschreibt die signifikanten Unterschiede (f-Test) des HEGYI-Index ($p=0,05$) in Richtung der Pfeile

		Hegy	Pflanzung *	Saat	Verpfl	Pflanzung Saat →		
Kraft 2	HEGYI	2,25	2,19	3,35	Kraft 4	HEGYI	3,41	3,99
	Nachbar 1	1,19	0,99	0,90		Nachbar 1	1,02	0,91
Abstände (m)	Nachbar 2	1,39	1,36	1,04		Nachbar 2	1,51	1,27
	Nachbar 3	1,54	1,61	1,31		Nachbar 3	1,53	1,51

Kattenbühl

Die Konkurrenzindizes von Kattenbühl variieren stark und lassen nicht den Schluß zu, daß mit Abnahme der sozialen Stellung der HEGYI-INDEX und damit die Konkurrenz zunimmt. Die Ursachen der Variation liegen vermutlich darin, daß die Eichen jünger sind als die der anderen Bestände. Eine andere Möglichkeit bestände darin, daß in Kattenbühl häufig durch den Einsatz von Kindern des naheliegenden Waldjugendheims bestandespflgende Eingriffe erfolgten.

Tabelle 18: Konkurrenzbeschreibende Daten; Kattenbühl, 13 jährige Eiche (HEGYI-Index, Baumabstand der nächsten drei Nachbarn zum Probebaum)

		Pflanzung	Saat I	Saat II	
Kraft 1	HEGYI	1,68	5,52	3,89	
	Nachbar 1	0,87	0,40	0,23	
	Abstände (m)	Nachbar 2	1,04	1,00	0,65
		Nachbar 3	1,35	1,02	
Kraft 2	HEGYI	2,05	2,26	4,86	
	Nachbar 1	0,90	0,64	0,18	
	Abstände (m)	Nachbar 2	1,16	0,74	0,18
		Nachbar 3	1,93	1,20	0,10
Kraft 3	HEGYI	4,20	4,34	2,48	
	Nachbar 1	0,98	0,60	0,35	
	Abstände (m)	Nachbar 2	1,12	0,66	0,60
		Nachbar 3	1,35	1,03	
Kraft 4	HEGYI	4,66	18,47	5,84	
	Nachbar 1	1,13	0,49	0,45	
	Abstände (m)	Nachbar 2	1,00	0,79	0,90
		Nachbar 3	1,40	0,54	

4.1.1.2 Überragungswinkel

Eine andere Möglichkeit für die Beschreibung der Konkurrenzsituation stellt ein Höhenvergleich zwischen Probebaum und Nachbarbäumen dar. Für die Fichten und Buchen aus Holzerode wurden alle Höhen der Nachbarbäume ermittelt, die die Krone des Probebaumes berührten. Mit diesen Daten wird der Überragungswinkel berechnet. In Tabelle 19 ist für die Fichten und Buchen der Überragungswinkel (Summe α), die Anzahl der Höhenbedränger und der Überragungswinkel pro Bedränger, dargestellt. In allen Beständen steigen mit Abnahme der sozialen Stellung sowohl die Summe der Überragungswinkel als auch der Überragungswinkel pro Bedränger an.

Insgesamt wird die gemischte Buche am stärksten durch höhere und nähere Nachbarn bedrängt. Der bedrängende einzelne Nachbarbaum der herrschenden Buchen im Mischbestand hat einen rund 10° größeren Winkel, als das bei der herrschenden Mischbestandsfichte und der herrschenden Buche im Reinbestand der Fall ist. Die Reinbestandsfichte zeigt gegenüber der Buche im Mischbestand eine 3° geringere Abweichung bei jedoch durchschnittlich nur einem Konkurrenzbaum.

Tabelle 19: Summe der Überragungswinkel als Maß der Konkurrenz; Holzerode, Buche und Fichte. Der Stern * beschreibt die signifikanten Unterschiede (f-Test) des Überragungswinkels ($p = 0,05$) in Richtung der Pfeile

Kraft	Konkurrenzbeschreibende Faktoren	Buche ← Bu / Fi → Fichte → Fi / Bu →			
		Buche	Bu / Fi *	Fichte	Fi / Bu
1	Überragungswinkel				
	Überragungswinkel ($^\circ$)				42,98
	Anzahl Bedränger				2,00
	Überragungswinkel pro Bedränger ($^\circ$)				21,49
2	Überragungswinkel ($^\circ$)	28,08	141,62	28,57	82,73
	Anzahl Bedränger	1,25	4,00	1,00	4,25
	Überragungswinkel pro Bedränger ($^\circ$)	20,74	29,16	25,80	20,97
3	Überragungswinkel ($^\circ$)	82,60	241,68		106,03
	Anzahl Bedränger	2,80	5,89		3,00
	Überragungswinkel pro Bedränger ($^\circ$)	30,35	43,22		43,87
4	Überragungswinkel ($^\circ$)				155,41
	Anzahl Bedränger				3,00
	Überragungswinkel pro Bedränger ($^\circ$)				54,94

Die drei Faktoren

- HEGYI-Index
- durchschnittliche Baumentfernung
- und die Summe der Überragungswinkel

belegen, daß die Buche des Mischbestandes einer deutlich höheren Konkurrenz ausgesetzt ist als die anderen Kollektive. Im weiteren wird getrennt unterschieden zwischen Durchmesserbetrachtung (HEGYI-Index) und Höhenbetrachtung (Überragungswinkel). Dabei weisen die Fichten im Mischbestand den geringsten HEGYI-Index, jedoch nahezu den höchsten Überragungswinkel auf.

4.1.2 Probebaumbeschreibende Parameter (BHD, Höhe, H/D-Wert, Stammvolumen) Anzahl der Probebäume und soziale Stellung

Holzerode

In Tabelle 20 sind die mittleren oberirdischen Baumparameter mit jeweiliger Standardabweichung aufgeführt. Die Fichte im Reinbestand ist im Mittel nicht dicker als die im Mischbestand, wohl aber signifikant höher. Bei der Buche unterscheidet sich der BHD der Probebäume im Rein- und im Mischbestand kaum voneinander. Dabei ist die Buche im Reinbestand signifikant höher als die im Mischbestand. In Anhang IV sind die Baumparameter, getrennt nach sozialer Stellung, aufgeführt.

Die ältesten Bäume mit dem durchschnittlich geringsten HD-Wert sind bei dem Fichten/Buchenbestand zu finden. Es werden in diesem Kollektiv sechs Bäume der Kraft'schen Klassen 1 und 2 ausgewählt, und fünf der Klassen 3 und 4. Dadurch ist die Standardabweichung der Fichte im Mischbestand höher als bei den anderen Beständen, die eine geringere Anzahl sozialer Klassen aufweisen. Die Reinbestandsbäume sind im Mittel zehn Jahre jünger als die Mischbestandsbäume, außerdem weisen sie einen höheren HD-Wert auf. Hierbei sind bei Abnahme des sozialen Status die Bäume im Mittel zehn Jahre jünger. Bei den Buchen im Mischbestand steigt das Alter von der zweiten zur dritten Kraft'schen Klasse um rund vier Jahre an, der HD-Wert hingegen differiert kaum. Mit 88 % sind bei diesem Bestand die meisten Bäume in der dritten Klasse zu finden. Das Stammvolumen ist bei den Fichten nahezu doppelt so hoch wie bei den Buchen. Wie auch schon bei den anderen Größen zeigt die Mischbestandsfichte ein größeres Stammvolumen als die Reinbestandsfichte (20 %). Die Reinbestandsbuche weist ein 25 % höheres Volumen auf als die Mischbestandsbuche.

Tabelle 20: Mittlere Probebaumparameter \bar{x} und Standardabweichungen (s_x); Holzerode, Fichte und Buche im Rein- und Mischbestand (55-65jährig). Der Stern* beschreibt die signifikanten Unterschiede (f-Test) des Übertragungswinkels ($p = 0,05$) in Richtung der Pfeile

	Buche		Buche / Fichte		Fichte		Fichte / Buche	
	\bar{x}	(s_x)	\bar{x}	(s_x)	\bar{x}	(s_x)	\bar{x}	(s_x)
Alter	59,7	(4,6)	60,4	(6,2)	55,4	(1,2)	65,4	(6,1)
BHD (cm)	21,2	(2,6)	21,7	(4,9)	27,8	(2,9)	27,9	(7,0)
Höhe (m)	24,8*	(1,4)	→ 22,1	(2,5)	28,0*	(2,7)	→ 24,1	(2,9)
H/D-Wert	118,3	(12,6)	105,1	(19,7)	100,8	(2,2)	89,9	(15,6)
Stammvolumen (m ³)	0,44	(0,12)	0,32	(0,16)	0,71	(0,14)	0,73	(0,36)
Probepflanzen (n)	10		12		10		11	
Soziale Stellung	2; 3		1, 2, 3		2		1, 2, 3, 4	

Krebeck

Wie Tabelle 21 zeigt, steigen mit zunehmendem Alter die H/D-Werte der Fichten an. Bei den Bäumen der Kraft'schen Klassen 1 und 2 liegen sie unter 90. Eine Ausnahme bilden die Fichten der zweiten Kraft'schen Klasse des 41-jährigen Bestandes, deren H/D-Wert auf über 100 ansteigt. Bei den mitherrschenden und den beherrschten Bäumen liegen die Werte durchgängig über 100. Bei den 41-jährigen beherrschten Fichten steigen sie auf bis rund 150 an.

Tabelle 21: Mittlere Probebaumparameter \bar{x} und Standardabweichungen (s_x); Krebeck, 21-, 31- und 41-jährige Fichte im Reinbestand

Fläche		Fichte 21		Fichte 30		Fichte 41	
		\bar{x}	(s_x)	\bar{x}	(s_x)	\bar{x}	(s_x)
Kraft 1	BHD (cm)	15,1	(0,8)	20,1	(1,7)	23,8	(1,6)
	Höhe (m)	11,5	(0,9)	14,9	(0,6)	21,3	(1,0)
	H/D-Wert	76,5	(2,3)	74,4	(5,2)	89,7	(3,8)
	Stammvolumen (m ³)	0,1	(0,0)	0,2	(0,1)	0,4	(0,0)
	Probeebäume (n)	4		4		5	
Kraft 2	BHD (cm)	12,3	(1,3)	17,4	(1,7)	19,7	(1,6)
	Höhe (m)	10,1	(0,3)	14,4	(1,7)	20,4	(0,9)
	H/D-Wert	82,7	(8,0)	87,8	(15,5)	104,1	(7,1)
	Stammvolumen (m ³)	0,1	(0,0)	0,2	(0,1)	0,3	(0,0)
	Probeebäume (n)	3		4		5	
Kraft 3	BHD (cm)	9,9	(0,9)	12,4	(1,7)	14,0	(2,1)
	Höhe (m)	10,2	(0,7)	14,2	(3,0)	16,2	(1,0)
	H/D-Wert	102,7	(3,4)	113,8	(13,3)	116,2	(10,5)
	Stammvolumen (m ³)	0,04	(0,0)	0,1	(0,1)	0,1	(0,0)
	Probeebäume (n)	4		4		2	
Kraft 4	BHD (cm)	6,8	(1,0)	8,7	(1,5)	9,8	(0,6)
	Höhe (m)	7,5	(1,0)	11,2	(2,0)	15,1	(0,8)
	H/D-Wert	111,1	(12,8)	129,2	(0,7)	153,6	(1,9)
	Stammvolumen (m ³)	0,02	(0,001)	0,01	(0,001)	0,1	(0,01)
	Probeebäume (n)	4		3		3	

Knesebeck

Die nach sozialer Stellung differenzierten Probebaumdaten in Tabelle 22 zeigen für die Fichte und für die Kiefer die erwartete Zunahme der Höhe und des BHD mit Anstieg des Alters und der sozialen Stellung. Das H/D-Verhältnis steigt mit Minderung der Kraft'schen Klasse bei den älteren Beständen an. Die Bäume der 20-jährigen Flächen zeigen dieses Merkmal nicht. Die Ursachen hierfür liegen in dem Bestandaufbau. Weiterhin wird geprüft, ob Unterschiede zwischen den Baumarten bestehen. Hierbei zeigt die Fichte für nahezu alle Kraft'schen Klassen für BHD, Höhe und Stammvolumen höhere Werte als die Kiefer.

Im Altersvergleich der Bestandesformen weisen die um 30-jährigen Fichten durchgängig höhere H/D-Werte auf als die des 50-jährigen Bestandes.

Tabelle 22: Mittlere Probebaumparameter \bar{x} und Standardabweichungen (sx); Knesebeck, 20-50-jährige Fichte und Kiefer im Reinbestand

Fläche		Fi 20		Fi 31		Fi 50		Ki 20		Ki 33		Ki 47	
		\bar{x}	(sx)	\bar{x}	(sx)	\bar{x}	(sx)	\bar{x}	(sx)	\bar{x}	(sx)	\bar{x}	(sx)
Kraft 1	BHD (cm)	9,8	(0,4)	21,0	(1,6)	30,1	(2,7)	8,7	(1,5)	17,1	(1,0)	26,9	(0,8)
	Höhe (m)	8,1	(0,2)	16,9	(0,1)	18,4	(1,5)	8,1	(2,0)	13,4	(0,6)	17,5	(0,9)
	H/D-Wert	82,6	(0,8)	80,7	(6,5)	61,3	(4,7)	95,1	(22,8)	78,4	(7,9)	65,1	(4,6)
	Stammvolumen (m ³)	0,03	(0,0)	0,3	(0,0)	0,6	(0,1)	0,03	(0,01)	0,2	(0,01)	0,5	(0,1)
	Probabäume (n)	2		4		4		3		4		5	
Kraft 2	BHD (cm)	7,2	(0,3)	15,8	(0,5)	24,2	(2,3)	6,3	(0,6)	12,3	(1,6)	22,1	(1,1)
	Höhe (m)	6,2	(0,3)	15,2	(0,6)	18,9	(0,6)	5,9	(0,4)	13,2	(1,2)	17,1	(0,6)
	H/D-Wert	86,2	(6,4)	96,5	(4,5)	78,7	(5,7)	94,1	(9,9)	108,0	(6,0)	77,3	(6,0)
	Stammvolumen (m ³)	0,1	(0,1)	0,2	(0,0)	0,4	(0,1)	0,01	(0,0)	0,1	(0,02)	0,3	(0,05)
	Probabäume (n)	3		4		5		3		4		4	
Kraft 3	BHD (cm)	7,8	(0,3)	10,5	(1,0)	15,8	(1,3)	5,5	(2,1)	9,5	(1,5)	18,2	(0,6)
	Höhe (m)	6,6	(1,0)	11,9	(0,9)	15,2	(2,0)	4,7	(1,5)	11,6	(0,8)	16,1	(0,9)
	H/D-Wert	84,2	(15,9)	114,9	(18,1)	96,0	(11,0)	85,7	(6,1)	125,1	(28,9)	88,4	(3,0)
	Stammvolumen (m ³)	0,02	(0,0)	0,2	(0,2)	0,3	(0,0)	0,01		0,02	(0,0)	0,2	(0,01)
	Probabäume (n)	3		4		5		2		3		3	
Kraft 4	BHD (cm)	4,2	(1,8)	7,9	(1,3)	11,5		4,5	(0,5)	7,1	(0,4)	13,0	(2,8)
	Höhe (m)	4,1	(1,4)	10,0	(1,2)	11,0		4,4	(1,2)	9,8	(1,3)	15,0	(2,0)
	H/D-Wert	100,6	(17,2)	127,3	(8,6)	95,7		96,7	(15,3)	138,7	(26,5)	116,7	(11,6)
	Stammvolumen (m ³)	0,005	(0,0)	0,02	(0,0)	0,1		0,004	(0,0)	0,02	(0,0)	0,1	(0,05)
	Probabäume (n)	3		4		1		3		5		3	

Holzminden

In Tabelle 23 sind die Mittelwerte der sozialen Stellungen 2 und 4 der rund 22-jährigen Eichen zusammengestellt. Die herrschenden Bäume des Saatbestandes sind signifikant dicker als die Eichen der anderen Bestände, und in der Höhe übertreffen sie diese um 4%. Die gesäten Eichen besitzen somit ein signifikant höheres Stammvolumen. Der H/D-Wert ist bei den herrschenden Saateichen am geringsten.

Bei den Eichen der Verpflanzung handelt es sich ausschließlich um herrschende Bäume. Die Höhen- und BHD- Mittelwerte sind im Vergleich zu den anderen Beständen niedrig, und der H/D-Wert ist sehr hoch. Mit über zehn Metern Höhe ist die verpflanzte Eiche 13 % niedriger als die gesäte und 11 % niedriger als die gepflanzte Eiche.

Die beherrschten Bäume der Pflanzung besitzen einen höheren BHD, eine geringere Höhe und damit einen geringeren H/D-Wert als die der Saat.

*Tabelle 23: Mittlere Probestaumparameter \bar{x} und Standardabweichungen (sx); Holzminden, 22 jährige Eiche; Saat und Pflanzung. Der Stern * beschreibt die signifikanten Unterschiede (f-Test) des Übertragungswinkels ($p = 0,05$) in Richtung der Pfeile*

Fläche		Pflanzung	Saat	Verpflanzung
		\bar{x} (sx)	\bar{x} (sx)	\bar{x} (sx)
Kraft 2	BHD (cm)	10,0 (0,9) ←	11,2* (1,0) →	8,9 (0,7)
	Höhe (m)	11,4 (0,8)	11,8 (0,3)	10,3 (1,1)
	H/D-Wert	114,2 (10,7)	105,5 (8,4)	116,4 (16,1)
	Stammvolumen (m ³)	0,04 (0,01) ←	0,05* (0,01) →	0,03 (0,01)
	Probestäume (n)	7,0	7,0	6,0
Kraft 4	BHD (cm)	7,1 (0,8)	6,8 (0,7)	
	Höhe (m)	9,7 (0,9) ←	10,7* (0,7)	
	HD-Wert	139,7 (23,6)	158,5 (18,7)	
	Stammvolumen (m ³)	0,02 (0,01)	0,02 (0,00)	
	Probestäume (n)	7,0	7,0	

Kattenbühl

Die Probestäume der drei 13 jährigen Eichenflächen in Kattenbühl zeigen für den BHD in der Reihenfolge Pflanzung, Saat I und Saat II abfallende Werte. Die Höhe der Eichen differiert im Vergleich der drei Bestände. Im Durchschnitt aller 4 sozialen Klassen sind die Bäume der beiden Saatbestände 7 % niedriger als die der Pflanzung.

Tabelle 24: Mittlere Probestaumparameter \bar{x} und Standardabweichungen (sx); Kattenbühl, 13 jährige Eiche; Saat und Pflanzung

Fläche		Pflanzung	Saat I	Saat II
		\bar{x} (sx)	\bar{x} (sx)	\bar{x} (sx)
Kraft 1	BHD (cm)	8,6 (0,5)	8,0 (0,7)	6,9 (1,5)
	Höhe (m)	7,0 (0,6)	7,0 (0,4)	7,1 (0,6)
	H/D-Wert	82,4 (8,7)	87,4 (3,1)	105,5 (14,2)
	Stammvolumen (dm ³)	18,9 (3,2)	17,2 (3,9)	12,5 (5,5)
	Probestäume (n)	5,0	4,0	4,0
Kraft 2	BHD (cm)	6,9 (0,6)	6,5 (1,0)	5,1 (0,8)
	Höhe (m)	6,8 (1,1)	6,1 (0,6)	5,8 (0,4)
	H/D-Wert	99,0 (13,5)	94,6 (12,4)	116,5 (23,0)
	Stammvolumen (dm ³)	12,1 (3,1)	10,0 (2,6)	6,1 (1,9)
	Probestäume (n)	4,0	4,0	4,0

Fläche		Pflanzung	Saat I	Saat II
		x (sx)	x (sx)	x (sx)
Kraft 3	BHD (cm)	4,5 (0,2)	4,2 (0,5)	5,1 (1,4)
	Höhe (m)	6,2 (0,3)	5,0 (0,4)	5,8 (1,1)
	H/D-Wert	139,4 (2,1)	119,5 (7,3)	117,7 (22,4)
	Stammvolumen (dm ³)	5,4 (1,3)	4,2 (0,9)	6,9 (5,1)
	Probebäume (n)	3,0	4,0	3,0
Kraft 4	BHD (cm)	3,2 (0,7)	3,3 (0,5)	2,9 (0,4)
	Höhe (m)	4,4 (0,8)	4,6 (0,2)	4,4 (0,5)
	H/D-Wert	140,0 (22,0)	144,5 (20,2)	150,1 (18,1)
	Stammvolumen (dm ³)	2,4 (1,2)	2,5 (0,7)	2,0 (0,6)
	Probebäume (n)	4,0	3,0	4,0

4.1.3 Kronenparameter

In den jeweiligen Tabellen werden für die untersuchten Baumarten Mittelwerte \bar{x} einschließlich Standardabweichung (sx) aufgeführt. Die Gewichtsangaben der Krone gelten für die Trockensubstanz.

Holzerode

Die Buche zeigt in Mischung ein 54 % höheres Kronengewicht, eine 60 % größere Kronenschirmfläche und ein 35 % höheres Kronenprozent als im Reinbestand (Tabelle 25). Das hohe Kronengewicht der Mischbestandsbuche unterliegt einer höheren Streuung als das der Buche im Reinbestand. Signifikante Unterschiede sind jedoch nicht vorhanden.

Die Fichten haben im Reinbestand eine rund 50 % schwerere Krone als die Buchen (signifikant). Die Kronenschirmfläche differiert im Vergleich Buche zur Fichte durchschnittlich um 34 %. Die Mischbestandsfichte weist rund 35 % weniger Kronenmasse, eine 70 % kürzere Krone, jedoch eine 20 % größere Kronenüberschirmungsfläche auf als die Reinbestandsfichte. Weiterhin besitzt die Fichte im Reinbestand ein Kronenprozent von nahezu 50 % und die im Mischbestand nur eins von rund 30 %.

Tabelle 25: Mittlere Probebaumparameter \bar{x} und Standardabweichungen (sx); Holzerode, Buche und Fichte, 55-65-jährig im Rein- und im Mischbestand

Fläche	Buche	Buche / Fichte	Fichte	Fichte / Buche
	x (sx)	x (sx)	x (sx)	x (sx)
Kronengewicht (kg)	18,4 (7,0)	40,0 (23,9)	56,6 (19,1)	43,1 (18,6)
Kronenansatz (m)	15,1 (3,0)	8,8 (3,6)	14,5 (1,3)	16,2 (2,6)
Kronenlänge (m)	9,8 (2,5)	13,3 (2,5)	13,5 (3,0)	8,0 (2,5)
Kronenprozent %	39,5 (10,3)	61,0 (13,6)	48,8 (6,2)	33,2 (6,3)
Kronenschirmfläche (m ²)	16,4 (7,0)	43,7 (18,7)	9,4 (2,2)	11,2 (11,2)

Krebeck

Das Kronentrockengewicht (gesamt) fällt von der ersten zur vierten sozialen Stellung ab (Tabelle 26). Die Abweichungen der ersten Kraft'schen Klassen vom jeweiligen Gesamtmittelwert betragen für die Fichten des 21- und 41jährigen Bestandes etwa 70 %, für den 30jährigen Bestand 90 % in Richtung der vorherrschenden und mitherrschenden Bäume. Entsprechende Abweichungen der vierten Klasse vom Mittel liegen bei den 21jährigen bei 60 %, bei den 30- und 41jährigen Fichten bei 80 %. Bei Betrachtung der drei Altersklassen weisen die Bäume des 30jährigen Bestandes das höchste Kronengewicht auf. Differenziert nach Ast / Ästchen / Nadel ist für die untersuchten Altersstufen der Anteil der Nadelmasse am Kronengewicht am höchsten. Das größte Kronenprozent zeigt über alle sozialen Stellungen der junge, das kleinste der älteste Bestand.

Tabelle 26: Mittlere Probestaumparmeter \bar{x} und Standardabweichungen (s_x); Krebeck, 21-41 jährige Fichte im Reinbestand

		Fichte 21	Fichte 30	Fichte 41
		\bar{x} (s_x)	\bar{x} (s_x)	\bar{x} (s_x)
Kraft 1	Kronengewicht (kg)	28,0 (5,6)	57,7 (21,9)	46,87 (9,7)
	• Ast (kg)	8,0 (2,3)	16,4 (7,5)	14,1 (4,0)
	• Ästchen (kg)	5,3 (0,7)	11,3 (3,1)	9,9 (3,1)
	• Blatt (kg)	14,8 (3,4)	30,0 (11,6)	22,9 (9,3)
	Kronenansatz (m)	2,0 (0,6)	6,1 (0,9)	10,5 (1,2)
	Kronenlänge (m)	9,5 (1,3)	8,8 (1,0)	10,8 (1,0)
	Kronenprozent (%)	82,6 (6,1)	59,1 (6,1)	50,8 (4,6)
Kraft 2	Kronengewicht (kg)	23,3 (3,5)	33,5 (11,6)	29,0 (9,1)
	• Ast (kg)	6,9 (2,0)	8,5 (4,0)	9,3 (3,6)
	• Ästchen (kg)	4,4 (0,1)	7,3 (2,8)	6,3 (1,8)
	• Blatt (kg)	12,0 (1,8)	17,7 (5,5)	13,5 (3,8)
	Kronenansatz (m)	1,9 (0,3)	6,8 (0,7)	10,7 (0,9)
	Kronenlänge (m)	8,2 (0,4)	8,3 (1,9)	9,8 (1,6)
	Kronenprozent (%)	81,2 (2,8)	54,4 (6,9)	47,6 (6,1)
Kraft 3	Kronengewicht (kg)	9,6 (2,9)	15,3 (4,8)	11,1 (0,4)
	• Ast (kg)	2,7 (1,2)	5,8 (5,5)	2,8 (0,1)
	• Ästchen (kg)	1,8 (0,6)	4,9 (3,8)	2,3 (0,4)
	• Blatt (kg)	5,1 (1,4)	14,2 (12,5)	5,9 (0,1)
	Kronenansatz (m)	3,3 (1,0)	6,6 (1,4)	10,7 (0,2)
	Kronenlänge (m)	6,9 (0,6)	7,5 (1,6)	5,5 (1,2)
	Kronenprozent (%)	67,7 (8,1)	53,2 (0,7)	33,9 (5,4)
Kraft 4	Kronengewicht (kg)	6,4 (3,3)	6,5 (1,2)	5,8 (1,9)
	• Ast (kg)	1,8 (1,0)	1,5 (0,4)	1,6 (1,0)
	• Ästchen (kg)	1,2 (0,6)	1,3 (0,0)	1,5 (0,2)
	• Blatt (kg)	3,3 (1,7)	3,7 (1,2)	2,7 (0,7)
	Kronenansatz (m)	2,0 (0,3)	6,0 (0,5)	9,9 (0,7)
	Kronenlänge (m)	5,5 (0,7)	5,2 (1,9)	5,2 (0,3)
	Kronenprozent (%)	73,1 (1,8)	45,6 (9,0)	34,2 (1,9)

Knesebeck

Das Kronengewicht steigt mit Verbesserung der sozialen Stellung an (Tabelle 27). Mit zunehmendem Bestandesalter von 20 auf rund 30 Jahre fällt das Kronenprozent ab. Zwischen 30 und 50 Jahren bleibt es nahezu gleich.

Beim Vergleich der Kiefer mit der Fichte wird der artspezifische Kronenaufbau deutlich. Die Kiefer weist ein ein- bis zweifach geringeres Kronengewicht sowie durchschnittlich ein um 30 % geringeres Kronenprozent auf.

Tabelle 27: Mittlere Probestaumparmeter \bar{x} und Standardabweichungen (s_x); Knesebeck, 20-50 jährige Fichte und Kiefer im Reinbestand

	Fichte 20	Fichte 31	Fichte 50	Kiefer 20	Kiefer 33	Kiefer 47	
	\bar{x} (s_x)	\bar{x} (s_x)	\bar{x} (s_x)	\bar{x} (s_x)	\bar{x} (s_x)	\bar{x} (s_x)	
Kraft 1	Kronengewicht (kg)	11,4 (1,5)	59,8 (19,2)	100,9 (17,7)	4,6 (1,9)	18,9 (3,0)	44,5 (10,5)
	• Ast (kg)		26,4 (1,8)	49,2 (5,7)	1,5 (1,4)	7,9 (1,7)	19,0 (3,9)
	• Ästchen (kg)		10,9 (1,6)	22,4 (3,7)	0,3 (0,3)	2,9 (0,7)	3,8 (0,6)
	• Blatt (kg)		22,5 (19,0)	29,3 (8,7)	1,6 (1,6)	8,2 (1,9)	21,6 (6,4)
	Kronenansatz (m)	0,8 (0,4)	6,7 (1,6)	6,2 (1,9)	3,5 (1,2)	8,3 (0,9)	10,9 (0,9)
	Kronenlänge (m)	7,3 (0,6)	10,2 (1,7)	12,3 (0,5)	4,6 (0,9)	5,1 (0,8)	6,5 (1,2)
	Kronenprozent (%)	90,0 (5,5)	60,6 (9,8)	67,1 (7,4)	57,1 (6,4)	38,2 (6,0)	37,3 (5,6)
Kraft 2	Kronengewicht (kg)	7,8 (1,6)	20,0 (9,8)	57,7 (19,2)	2,2 (0,4)	6,6 (2,9)	25,7 (8,7)
	• Ast (kg)	4,2 (0,1)	9,3 (3,9)	31,0 (11,1)	0,2 (0,4)	2,5 (0,5)	10,8 (4,8)
	• Ästchen (kg)	1,6 (0,1)	4,4 (2,6)	13,9 (6,0)	0,0 (0,1)	0,9 (0,2)	2,4 (1,3)
	• Blatt (kg)	2,9 (0,6)	6,4 (3,5)	12,8 (2,9)	0,3 (0,5)	3,3 (2,7)	12,5 (3,2)
	Kronenansatz (m)	0,5 (0,2)	5,5 (2,2)	8,0 (0,7)	2,4 (0,2)	9,0 (1,1)	10,9 (0,5)
	Kronenlänge (m)	5,7 (0,3)	9,7 (2,0)	10,9 (0,2)	3,5 (0,3)	4,2 (1,2)	6,2 (0,4)
	Kronenprozent (%)	92,4 (2,5)	64,1 (14,1)	57,7 (2,2)	59,6 (1,1)	31,6 (8,1)	36,2 (1,9)
Kraft 3	Kronengewicht (kg)	6,1 (1,1)	8,5 (3,0)	27,6 (4,2)	2,4 (1,8)	3,3 (1,6)	19,4 (4,8)
	• Ast (kg)		4,4 (1,6)	15,8 (2,0)		1,2 (0,9)	7,3 (1,9)
	• Ästchen (kg)		2,0 (0,8)	5,8 (1,0)		0,5 (0,4)	1,8 (0,4)
	• Blatt (kg)		2,0 (0,7)	6,0 (1,8)		1,6 (0,7)	10,3 (2,8)
	Kronenansatz (m)	0,9 (0,2)	5,2 (1,4)	6,3 (1,7)	2,2 (0,3)	8,6 (0,6)	10,1 (1,0)
	Kronenlänge (m)	5,6 (0,9)	6,7 (1,2)	8,8 (1,7)	3,6 (1,8)	3,0 (0,4)	6,0 (1,9)
	Kronenprozent (%)	85,8 (2,4)	56,4 (11,1)	58,5 (8,6)	80,7 (25,2)	25,7 (2,3)	36,8 (9,8)
Kraft 4	Kronengewicht (kg)	3,0 (2,4)	5,5 (3,4)	12,2	0,7 (0,4)	1,6 (0,6)	10,8 (0,7)
	• Ast (kg)	1,7 (1,5)	3,0 (2,0)	6,5	0,1 (0,2)	0,5 (0,2)	4,8 (0,6)
	• Ästchen (kg)	0,6 (0,5)	1,1 (0,7)	2,5	0,0 (0,1)	0,4 (0,3)	0,9 (0,1)
	• Blatt (kg)	0,7 (0,4)	1,3 (0,8)	3,2	0,2 (0,3)	0,7 (0,3)	5,1 (0,3)
	Kronenansatz (m)	0,5 (0,2)	4,1 (1,5)	4,5	2,2 (0,9)	7,8 (1,0)	9,8 (0,9)
	Kronenlänge (m)	3,6 (1,2)	5,9 (2,6)	6,5	2,2 (0,5)	2,0 (0,6)	5,2 (1,4)
	Kronenprozent (%)	88,3 (3,0)	57,2 (21,6)	59,1	49,9 (8,0)	20,0 (4,4)	34,1 (6,4)

Holzminden

Tabelle 28 stellt die Kronenparameter der 22-jährigen Eichenbestände dar. Die Eiche der Verpflanzung zeigt bei dem höchsten Kronengewicht den niedrigsten Kronenansatz. Alle Bestände besitzen mehr Ast- als Blatt- oder Ästchenmasse.

Die Eichen der Pflanzung Kraft 2 weisen im Vergleich zu den anderen herrschenden Bäumen das geringste Kronenprozent auf. Die beherrschten Bäume zeigen rund 80 % weniger Kronengewicht als die herrschenden. Die Saateichen besitzen in der Relation ein über 50 % höheres Kronengewicht in der zweiten Klasse als die gepflanzten Eichen. Die beherrschten Saatbäume weisen ein rund 50 % geringeres Kronenprozent bei einer fast siebenmal so schweren Krone auf als die herrschenden.

Im Vergleich der herrschenden Bäume ist bei den Eichen der Saat eine ausgewogenere Biomasseverteilung innerhalb der Krone zu beobachten als bei den anderen Beständen. Die Blattmasse ist doppelt so hoch als bei den gepflanzten und verpflanzten Eichen. Die Ästchen haben den geringsten Anteil an der gesamten Kronenmasse. Nach diesen Resultaten haben die Bäume des Saatbestandes starke Äste mit vielen Blättern. Die Eichen des Pflanzungs- und Verpflanzungsbestandes weisen weniger starke Äste auf. Die beherrschten Saateichen besitzen weniger Blätter als die der Pflanzung.

Tabelle 28: Mittlere Probestaumparameter \bar{x} und Standardabweichungen (s_x); Holzminden, 22-jährige Eiche; Saat und Pflanzung

Fläche		Pflanzung	Saat	Verpflanzung
		\bar{x} (s_x)	\bar{x} (s_x)	\bar{x} (s_x)
Kraft 2	Kronengewicht (kg)	8,0 (2,9)	13,2 (4,3)	7,5 (3,7)
	• Ast (kg)	3,9 (1,8)	5,3 (2,5)	3,4 (1,7)
	• Ästchen (kg)	1,9 (0,6)	3,4 (1,4)	2,0 (1,1)
	• Blatt (kg)	2,2 (0,5)	4,5 (0,8)	2,1 (1,1)
	Kronenansatz (m)	6,9 (0,7)	6,4 (1,4)	5,2 (1,6)
	Kronenlänge (m)	4,5 (0,6)	5,4 (1,3)	5,1 (1,2)
	Kronenprozent (%)	39,3 (4,4)	46,0 (11,3)	49,4 (12,2)
Kraft 4	Kronengewicht (kg)	2,1 (1,5)	1,9 (1,0)	
	• Ast (kg)	0,8 (0,6)	0,8 (0,5)	
	• Ästchen (kg)	0,5 (0,3)	0,5 (0,3)	
	• Blatt (kg)	0,8 (0,7)	0,6 (0,4)	
	Kronenansatz (m)	6,9 (1,2)	8,0 (0,7)	
	Kronenlänge (m)	2,8 (1,7)	2,7 (1,0)	
	Kronenprozent (%)	28,3 (14,3)	25,2 (8,7)	

Kattenbühl

Auch hier fallen Kronengewicht, Kronenprozent und Kronenschirmfläche mit Abnahme des sozialen Status der Eichen ab (Tabelle 29). Das höchste Kronengewicht weist die gepflanzte Eiche mit 13,4 kg auf. Die Krone der Saateiche (Saat I) ist rund 3 kg leichter, die der Saat II Eiche (8 kg). Das höchste Kronenprozent besitzt die gepflanzte Eiche mit 70 %. Die gesäte Eiche (Saat I) hat relativ eine 6% und die Saat II Eiche eine 8% kürzere Krone als die ge-

pflanzte Eiche. Darüber hinaus überschirmt sie den Boden ein bis zwei Quadratmeter mehr als die anderen Bäume.

Der Anteil der Blätter am Kronengewicht ist bei den herrschenden Eichen am höchsten. Bei den Bäumen der vierten Kraft'schen Klasse ändert sich dieses. Sie zeigen einen höheren Anteil an Ästen. Blätter, Äste und Ästchen stehen insgesamt im Verhältnis 41 % zu 35 % zu 24 %.

Tabelle 29: Mittlere Probestaumparameter \bar{x} und Standardabweichungen (s_x); Kattenbühl, 13-jährige Eiche; Saat und Pflanzung

Fläche		Pflanzung	Saat I	Saat II
		\bar{x} (s_x)	\bar{x} (s_x)	\bar{x} (s_x)
Kraft 1	Kronengewicht (kg)	13,4 (2,8)	10,5 (3,5)	5,5 (2,1)
	• Ast (kg)	4,8 (1,0)	3,4 (1,8)	1,7 (0,7)
	• Ästchen (kg)	2,5 (1,4)	2,8 (1,3)	1,2 (0,6)
	• Blatt (kg)	6,0 (1,5)	4,2 (0,7)	2,6 (1,4)
	Kronenansatz (m)	2,1 (0,6)	2,4 (0,3)	2,7 (0,6)
	Kronenlänge (m)	5,0 (0,9)	4,5 (0,5)	4,4 (0,4)
	Kronenprozent %	70,2 (9,2)	64,9 (4,9)	62,3 (6,3)
	Kronenschirmfläche (m ²)	6,6 (1,3)	5,7 (2,5)	4,3 (1,9)
Kraft 2	Kronengewicht (kg)	8,8 (3,5)	5,8 (2,8)	3,3 (1,3)
	• Ast (kg)	3,2 (1,7)	1,7 (0,9)	1,2 (0,4)
	• Ästchen (kg)	2,1 (1,0)	1,5 (0,8)	0,7 (0,2)
	• Blatt (kg)	3,5 (1,1)	2,6 (1,4)	1,4 (0,9)
	Kronenansatz (m)	2,1 (0,2)	2,2 (0,5)	2,3 (0,2)
	Kronenlänge (m)	4,8 (1,0)	3,9 (0,8)	3,5 (0,5)
	Kronenprozent %	69,6 (4,2)	64,0 (8,8)	60,3 (4,3)
	Kronenschirmfläche (m ²)	4,8 (2,1)	4,8 (1,4)	3,9 (2,2)
Kraft 3	Kronengewicht (kg)	2,4 (0,6)	2,1 (0,7)	2,8 (2,0)
	• Ast (kg)	0,7 (0,1)	0,5 (0,2)	1,1 (0,8)
	• Ästchen (kg)	0,6 (0,2)	0,6 (0,2)	0,6 (0,4)
	• Blatt (kg)	1,2 (0,3)	1,0 (0,4)	1,1 (0,9)
	Kronenansatz (m)	2,5 (0,4)	2,0 (0,6)	2,7 (0,7)
	Kronenlänge (m)	3,7 (0,1)	3,0 (0,3)	3,1 (0,4)
	Kronenprozent %	60,1 (5,0)	59,7 (9,3)	53,8 (3,6)
	Kronenschirmfläche (m ²)	2,3 (0,7)	2,1 (0,6)	2,9 (1,6)
Kraft 4	Kronengewicht (kg)	1,6 (1,7)	0,6 (0,1)	0,8 (0,5)
	• Ast (kg)	0,6 (0,7)	0,2 (0,0)	0,4 (0,3)
	• Ästchen (kg)	0,5 (0,5)	0,2 (0,1)	0,2 (0,1)
	• Blatt (kg)	0,5 (0,4)	0,2 (0,0)	0,3 (0,2)
	Kronenansatz (m)	1,4 (0,7)	2,5 (0,3)	2,0 (0,4)
	Kronenlänge (m)	3,0 (1,2)	2,1 (0,4)	2,3 (0,7)
	Kronenprozent %	67,0 (18,4)	46,0 (7,9)	52,8 (13,4)
	Kronenschirmfläche (m ²)	2,0 (0,6)	2,5 (0,3)	2,8 (2,8)

4.2 Wurzelparameter

4.2.1 Einzelwurzel

4.2.1.1 Wurzeldurchmesserverteilung

Im folgenden werden die horizontalen und vertikalen Wurzeldurchmesser der ersten Sektion, differenziert nach fünf Klassen, in Kreisdiagrammen dargestellt. Die Größe der Diagramme gibt keinen Aufschluß über absolute Daten. Entsprechende Werte können Anhang II entnommen werden. Für die Fichten, Buchen und Kiefern werden 50mm- und für die Eichen 20mm-Durchmesserstufen gebildet. Darüber hinaus werden die maximalen Wurzeldurchmesser tabellarisch zusammengefaßt.

Holzerode

Die Durchmesserverteilung der horizontalen Wurzeln im Buchenreinbestand liegt zwischen 1mm und 260mm. In der Vertikalen sind Wurzeln von 1mm bis 190mm zu beobachten (Tabelle 30). Sowohl horizontal als auch vertikal befinden sich rund 70% der Wurzeln in der Klasse 1mm bis 50mm (Abb. 10). Die Buche im Mischbestand weist horizontal Wurzeln bis 210mm und vertikal bis 220mm Durchmesser auf. Auch hier sind horizontal und vertikal rund 70% der Wurzeln dünner als 50mm.

Die Wurzeldurchmesserverteilung der Fichten unterscheidet sich deutlich von der der Buchen. Im Reinbestand besitzt die Fichte die meisten Horizontalwurzeln (60%) in der 1mm bis 50mm **und** 100mm bis 150mm-Klasse. Ähnlich wie bei den Buchen befinden sich 70% der Vertikalwurzeln in der 1mm bis 50mm-Klasse. Insgesamt sind 2% dicker als 150mm, dagegen sind es bei der reinen Buche 5%. Die Fichte im Mischbestand weist horizontal eine gleichmäßige Verteilung der Wurzeldurchmesserklassen auf. Es befinden sich rund 20% Wurzeln in jeder Durchmesserstufe. Vertikal liegen knapp 50% in der 1 bis 50mm-Klasse. 25% der Wurzeln sind größer als 150mm, wobei 6% sogar dicker als 200mm sind. Die stärkste Fichtenwurzel erreicht einen Durchmesser von 250mm (Tabelle 30) in 30cm Entfernung von der Stammbasis.

Tabelle 30: Maximale Durchmesser_(WD_{max}); der Wurzeln der ersten Sektion; Holzerode; 55-65jährige Buche im Rein- und Mischbestand

WD _{max} (mm)	Buche		Buche / Fichte		Fichte		Fichte / Buche	
	hor	vert	hor	vert	hor	vert	hor	vert
	260	190	210	220	250	185	245	240

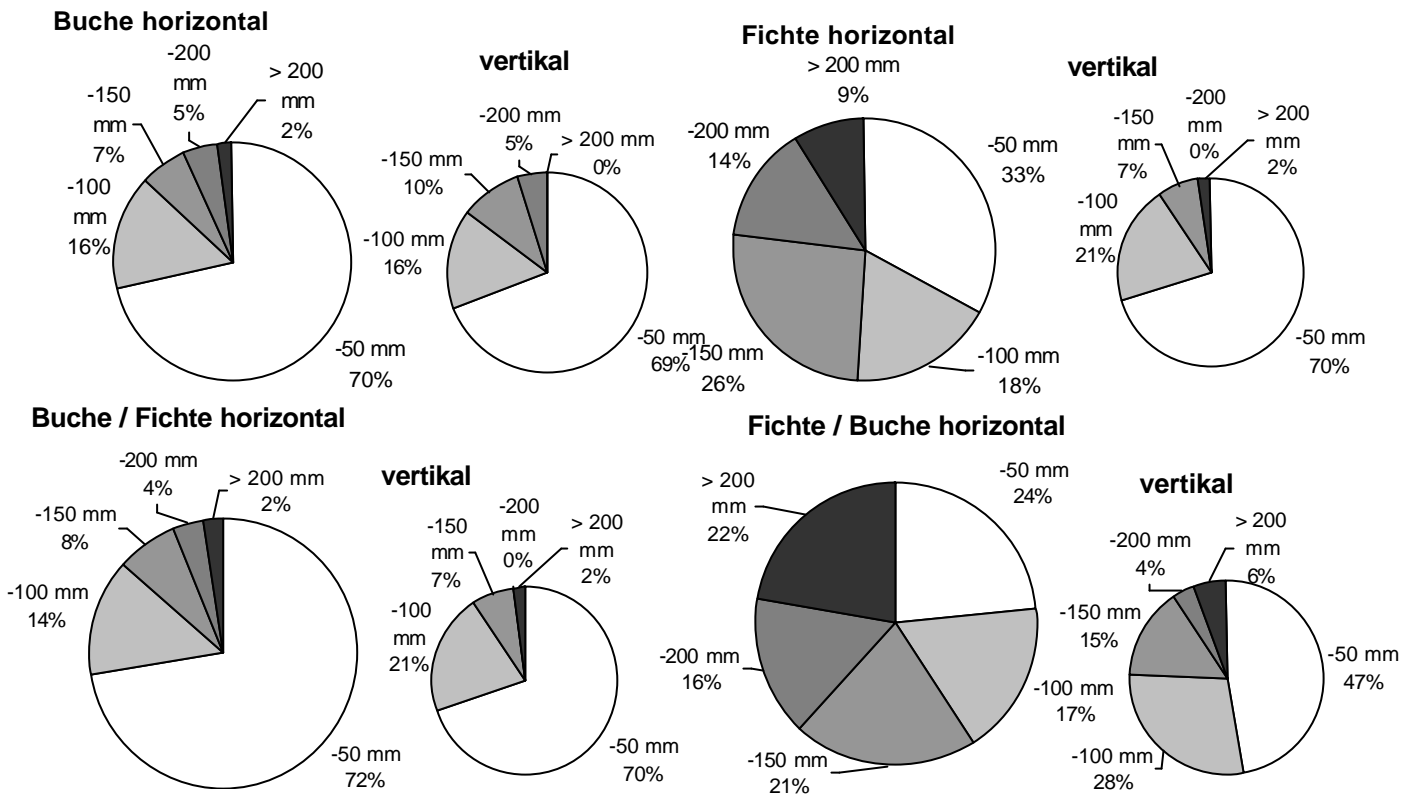


Abb. 10: Wurzelverteilung (50 mm-Klassen) der Horizontal- und Vertikalwurzeln (1. Sektion); Holzerode, 55-68 jährig Buche und Fichte im Rein- und Mischbestand

Krebeck

Die maximalen Wurzeldurchmesser der untersuchten Fichtenbestände sind Tabelle 31 zu entnehmen. Im Vergleich zum 21jährigen Bestand steigt der maximale Durchmesser der Horizontalwurzeln im 30jährigen um 75% auf 210mm. Bei dem 41jährigen Bestand erhöht er sich um weitere 30% auf 270mm. In vertikaler Richtung erreichen die Wurzeln des 21jährigen Bestandes maximale Durchmesser von 100mm. Im 30- und im 41jährigen Bestand liegen die entsprechenden Werte bei 170mm bzw. bei 150mm.

Tabelle 31: Maximale Durchmesser_(WD_{max}) der Wurzeln der ersten Sektion; Krebeck; 20-41 jährige Fichte im Reinbestand

Fichte	21 jährig		30 jährig		41 jährig	
	hor	vert	hor	vert	hor	vert
WD _{max} (mm)	120	100	210	170	270	150

Abb. 11 zeigt die durchschnittliche Wurzelverteilung der in Krebeck untersuchten Bestände. Die 21jährigen Fichten werden nicht dargestellt, da dort allein zwei Wurzelklassen zu finden sind. Sie besitzen kaum Wurzeln, die dicker als 100mm sind. Dreiviertel aller Horizontalwurzeln befinden sich in der 1mm bis 50mm-Klasse. Das verbleibende Viertel entfällt auf die 50mm bis 100mm-Klasse. Bei dem 30- und dem 41jährigen Bestand sind rund 40% der Horizontalwurzeln über 50mm dick.

Bei der 21jährigen Fichte sind 10% der Vertikalwurzeln dicker als 50mm. Dies trifft bei den 30jährigen Bäume für 21% - und bei den 41jährigen Fichten für 46% zu.

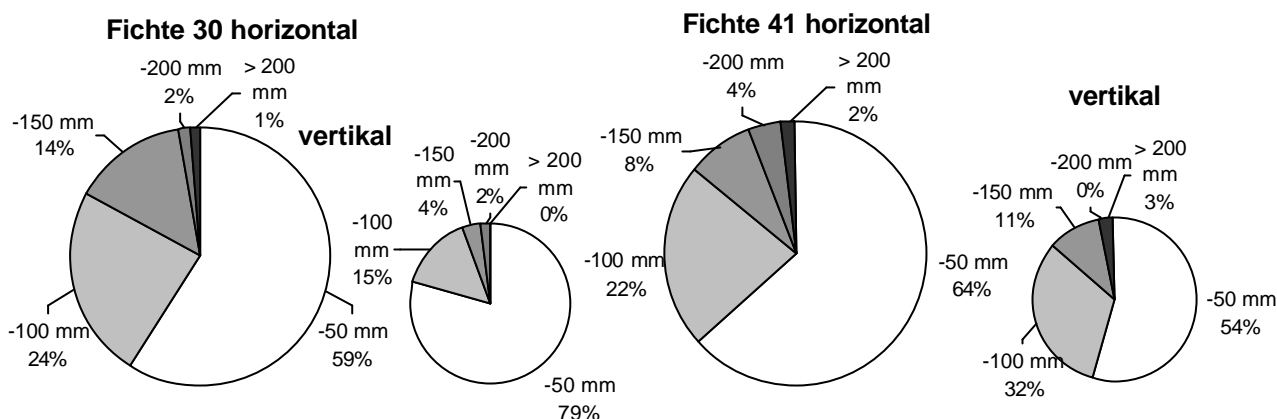


Abb. 11: Wurzeldurchmesserverteilung (50 m-Klassen) der Horizontal- und Vertikalwurzeln (1. Sektion); Krebeck, 30- und 41 jährige Fichte im Reinbestand

Knesebeck

Die maximalen Wurzel Durchmesser der in Knesebeck untersuchten Bestände sind in Tabelle 32 zusammengestellt. Bei den 20- und dem 31jährigen Fichten liegen sie horizontal bei 70mm bzw. 190mm. Bei der 50 jährigen Fichten lassen sich maximale Werte von 260 mm nachweisen.

Tabelle 32: Maximale Durchmesser (WD_{max}); der Wurzeln der ersten Sektion Knesebeck; Fichte und Kiefer, 20 - 50 jährig im Reinbestand

WD _{max} (mm)	Fichte		Kiefer	
	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal
20 jährig	70	40	50	60
um 30 jährig	190	160	150	110
41- bzw. 50 jährig	260	170	230	260

In Abb. 12 sind die Durchmesserverteilungen der in Knesebeck untersuchten Bestände dargestellt. Dabei werden die 20jährigen Fichten nicht berücksichtigt, weil sie horizontal und vertikal allein Wurzeln mit Durchmessern unter 50mm besitzen.

Zwei Drittel der Horizontalwurzeln sind bei den 31jährigen Fichten dünner als 50mm. Bei den 50jährigen sind es weniger als die Hälfte. In der vertikalen Richtung besitzt die 31jährige Fichte 10% Wurzeln, die dicker als 50mm sind, und die 50jährige 50%.

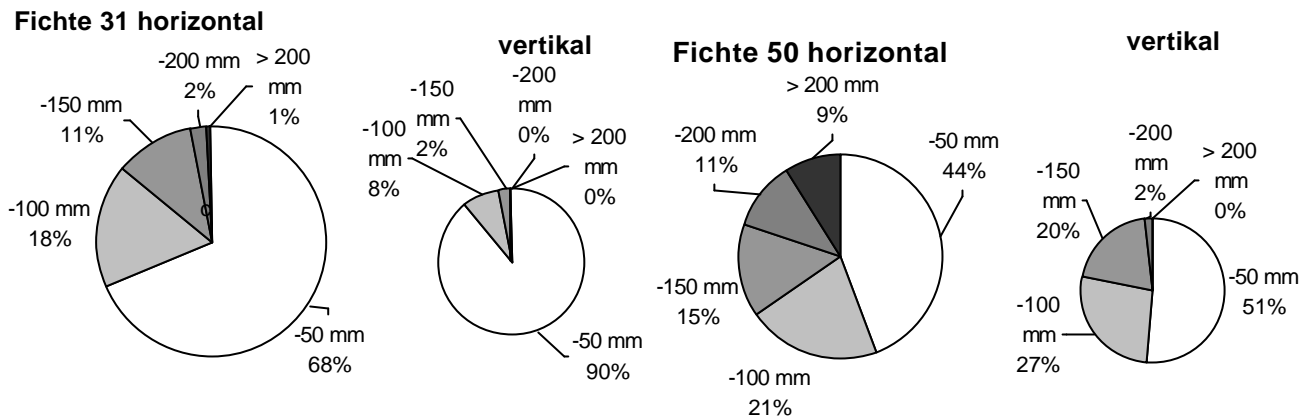


Abb. 12: Wurzeldurchmesserverteilung (50 mm-Klassen) der Horizontal- und Vertikalwurzeln (1. Sektion); Knesebeck, 31 und 50 jährige Fichte im Reinbestand

In Abhängigkeit vom Alter liegen die maximalen Wurzeldurchmesser der untersuchten Kiefernbestände horizontal zwischen 50 mm und 230 mm. In vertikaler Richtung reichen sie von 60 mm bis 260 mm (Tabelle 32).

Die 20 jährige Kiefer weist keine Wurzeln auf, die dicker als 50 mm sind. Aus diesem Grund wurde sie nicht dargestellt. Abb. 13 zeigt, daß die 33 jährige Kiefer horizontal nahezu 20% und vertikal 12% stärkere Wurzeln als 50 mm besitzt. Bei den 47 jährigen Bäumen erhöht sich der Prozentsatz der über 50 mm dicken Wurzeln auf 35% und vertikal 42%. 17% der vertikalen Wurzeln sind über 150 mm dick.

Bei den jungen Beständen läßt sich noch kein Unterschied zwischen Kiefer und Fichte feststellen. Dagegen fällt die Horizontalbewurzelung <50 mm der 31 jährigen Fichten gegenüber den etwa gleichalten Kiefer um 14% höher aus. Dieser Unterschied ist in vertikaler Richtung nicht nachzuweisen. Bei den um 50 jährigen Bäumen zeigt die Kiefer horizontal 35% Wurzeln dicker als 50 mm, die Fichte hingegen schon 56%. Dabei besitzen bei der Kiefer 7% und bei der Fichte 20% einen Durchmesser über 150 mm. In der Vertikalen weisen die Kiefer und die Fichte zu 42% bzw. 49% dickere Wurzeln als 50 mm auf. Von diesen sind bei der Fichte die meisten Wurzeln in den Klassen 50 bis 150 mm zu finden. Dagegen verteilen sich die Wurzeln bei der Kiefer gleichmäßiger auf alle Klassen.

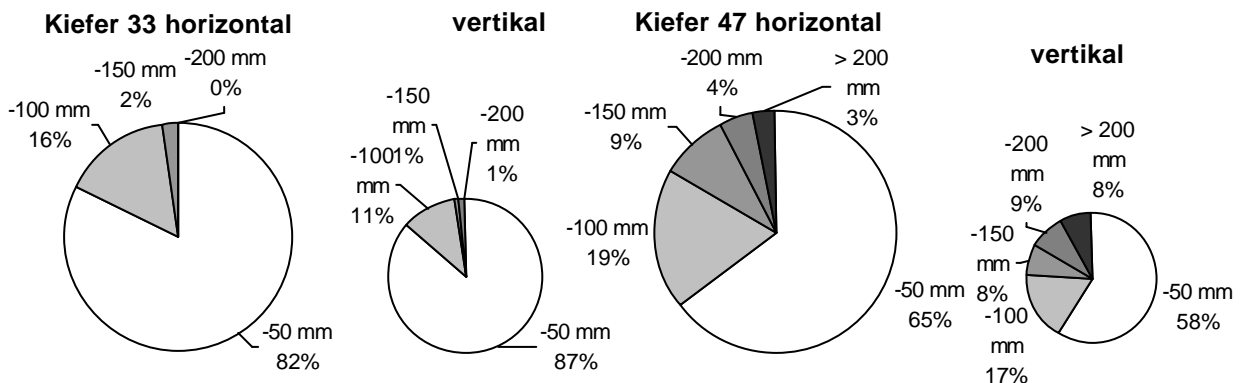


Abb. 13: Wurzeldurchmesserverteilung (50 mm-Klassen) der Horizontal- und Vertikalwurzeln; Knesebeck (1. Sektion); 33- und 47 jährige Kiefer im Reinbestand

Holzminden

Die maximalen Durchmesser der Pflanzeichen unterscheiden sich in horizontaler und vertikaler Richtung um 8% (Tabelle 33). Beim Saatbestand liegen entsprechende Werte zwischen 69 mm und 143 mm. Die stärkste Wurzel der verpflanzten Eichen hat horizontal einen Durchmesser von 55 mm. Die Vertikalwurzel ist dabei doppelt so stark wie die Horizontalwurzel.

Tabelle 33: Maximale Durchmesser_(WD_{max}); der Wurzeln der ersten Sektion; Holzminden, 22 jährige Eiche aus Saat und Pflanzung

WD _{max} (mm)	Pflanzung		Saat		Verpflanzung	
	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal
	82	89	69	143	55	92

Die Eichen der Pflanzung weisen horizontal 76% dünne Wurzeln in der 1 mm bis 20mm-Klasse auf (Abb. 14). Bei der Saateiche befinden sich 65% in dieser Klasse, das verbleibende Drittel der Wurzeln ist dicker ist 20mm. Bei allen Flächen sind horizontal unter 1% Wurzeln größer 80 mm zu finden. Auf die Darstellung der verpflanzten Eichen in Abb. 14 wird verzichtet, da die Verteilung in der Horizontalen der der Pflanzeichen und in der vertikalen der der Saateichen ähnelt.

Vertikal besitzt die Eiche der Pflanzung und Verpflanzung rund zur Hälfte Wurzeln größer als 20 mm. Dabei entfallen 43% auf die Wurzelklassen 20 mm bis 60 mm. Nur 6% der Vertikalwurzeln sind in der Klasse von 60 mm bis 80 mm zu finden. Die Saateiche weist 41% dünne Wurzeln (bis 20 mm) auf. Die übrigen 60% sind relativ gleichmäßig auf die vier größeren Wurzelklassen verteilt.

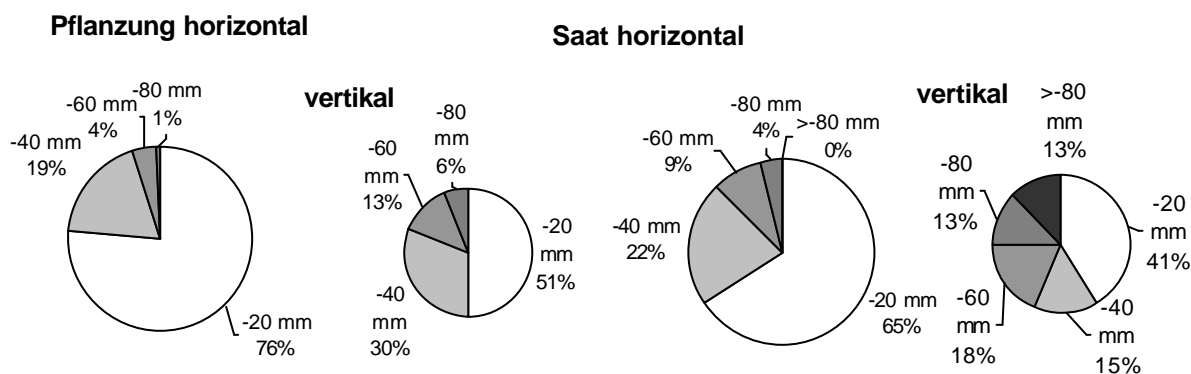


Abb. 14: Wurzeldurchmesserverteilung (20 mm-Klassen) der Horizontal- und Vertikalwurzeln (1. Sektion); Holzminden, 22 jährige Eiche aus Saat und Pflanzung

Kattenbühl

Die maximalen Wurzel Durchmesser der in Kattenbühl untersuchten Eichen reichen horizontal bis 63 mm und vertikal bis 67 mm. Dabei weisen die Eichen der Saat I Fläche die stärksten Wurzeln auf.

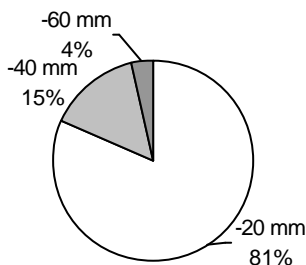
Tabelle 34: Maximale Durchmesser_(WD_{max}); der Wurzeln der ersten Sektion; Kattenbühl, Eiche 13 jährig aus Saat und Pflanzung

WD _{max} (mm)	Pflanzung		Saat I		Saat II	
	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal
	63	42	62	67	53	50

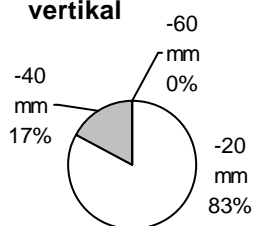
Die drei Bestände unterscheiden sich dadurch, daß in der Horizontalen die gepflanzten Eichen rund 20% Wurzeln besitzen, die einen größeren Durchmesser als 20 mm haben. Bei den Eichen des Saat I Bestandes sind es 10% und bei denen des Saat II Bestandes 6% (Abb. 15).

Im Schnitt besitzen sowohl die gepflanzten Eichen als auch die gesäten Eichen des Saat II Bestandes 17% Vertikalwurzeln, die dicker als 20 mm sind. Dabei weisen Erstere keine Vertikalwurzeln über 40 mm auf, Letztere besitzen hingegen 3%. Bei der gesäten Eiche (Saat I Fläche) sind 34% stärkere Wurzeln als 20 mm zu beobachten, wobei 6% sich in der 40 mm-60 mm-Klasse befinden.

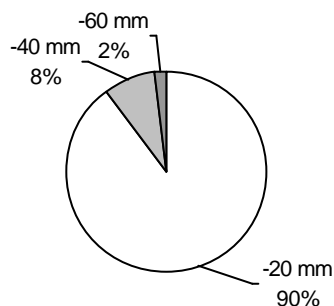
Pflanzung horizontal



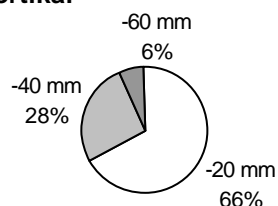
vertikal



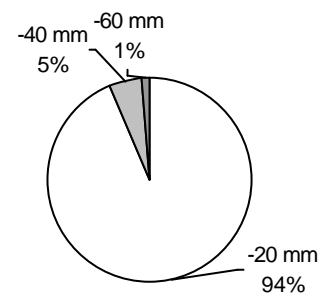
Saat I horizontal



vertikal



Saat II horizontal



vertikal

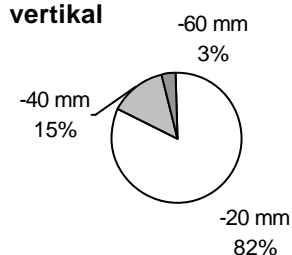


Abb. 15: Wurzel Durchmesser verteilung (20 mm-Klassen) der Horizontal- und Vertikalwurzeln; Kattenbühl (1. Sektion); 13 jährige Eiche aus Saat und Pflanzung

4.2.2 Wurzelsystem

4.2.2.1 Tiefendurchwurzelung

Die Abbildungen 16 und 17 stellen die durchschnittliche und maximale Tiefe der untersuchten Wurzeln der Fichte, Buche, Kiefer und Eiche dar.

Holzerode

Durchschnittlich wurzeln die Mischbestandsfichten 18 % (signifikant) bzw. 14 % tiefer als die Fichten des Reinbestandes und die Buchen des Reinbestandes (Abb. 16). Am flachsten wurzelt die Buche des Mischbestandes. Ihre Wurzeln erreichen eine durchschnittliche Tiefe von etwa 60 cm. Die Wurzeln der Fichten und Buchen der anderen Flächen erreichen dabei Tiefen von 70 cm bis 82 cm. Die maximal tiefsten Wurzeln sind rund 40 cm tiefer im Boden zu finden.

Krebeck

Die durchschnittliche Tiefe der Fichtenwurzeln steigt vom 21- zum 30-jährigen um 41 % (signifikant) und vom 30- zum 41-jährigen Bestand um 19 %. Dabei wurzeln die Fichten etwa zwischen 40 cm und 70 cm tief. Die tiefste Wurzel liegt bei allen Beständen rund 40 cm tiefer als die mittlere Wurzel. Die maximale Wurzeltiefe der Fichten liegt im Schnitt beim 30-jährigen Bestand 25 % (signifikant) tiefer als im jungen Bestand. Gegenüber den 41-jährigen wurzeln die 30-jährigen Fichten 6 % flacher. Die Variationskoeffizienten der mittleren und der maximalen Wurzeltiefe liegen zwischen 20 % und 30 %. Je jünger der Bestand, desto größer ist die Streuung der beiden berechneten Tiefenwerte.

Knesebeck

Im Schnitt liegen die Wurzeln der untersuchten Fichten in einer Tiefe von 30 cm bis 68 cm. Maximal erreichen sie eine Tiefe von 63 cm bis 119 cm. Durchschnittlich wurzeln die 20-jährigen Fichten um 53 % (signifikant) flacher als die 31-jährigen. Letztere wurzeln 13 % flacher als die 50-jährigen Bäume. Die tiefste Wurzel liegt bei allen untersuchten Fichten rund 40 cm tiefer als die durchschnittliche Wurzel. Dabei wurzeln die Fichten des jungen Bestandes um 36 % flacher als die des 31-jährigen Bestandes. Die Bäume der letztgenannten Fläche wurzeln 11 % flacher als die der 50-jährigen Fläche. Die Variationskoeffizienten der durchschnittlichen und der maximalen Wurzeltiefe liegen bei allen Beständen zwischen 20 % und 40 %. Der junge Bestand besitzt ebenso wie der in Krebeck die größte Streuung der Werte.

Bei den in Knesebeck untersuchten Kiefern nimmt die durchschnittliche Wurzeltiefe vom jüngsten bis zum ältesten Bestand um mehr als das Doppelte zu. Sie beträgt bei den 20-jährigen Kiefern 32 cm und bei den 47-jährigen 68 cm. Maximal wurzeln die Kiefern zwischen 40 und 50 cm tiefer als durchschnittlich. Dabei wurzeln die 20-jährigen Kiefern 16 % (signifikant) flacher als die 33-jährigen. Letztgenannte Gruppe wurzelt im Schnitt 25 % (signifikant) flacher als die Bäume des 47-jährigen Bestandes.

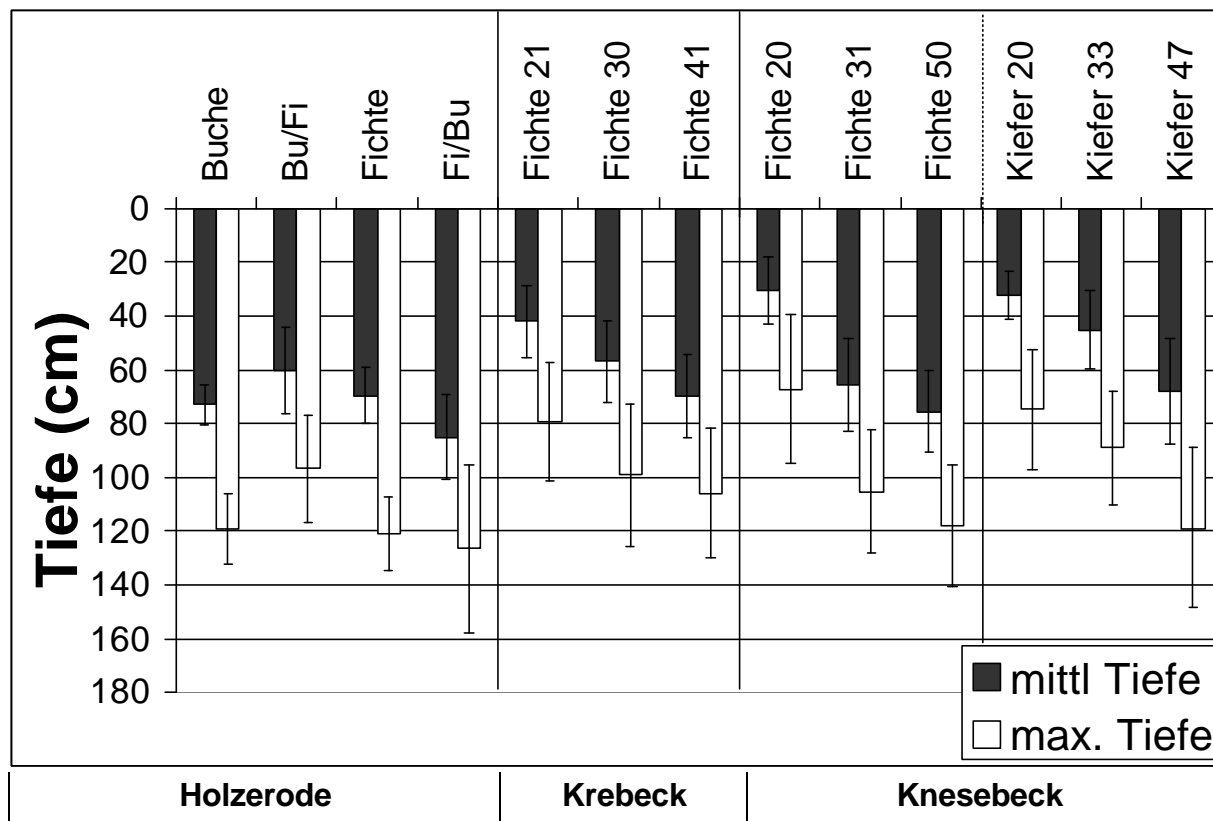


Abb. 16: Darstellung der mittleren und maximalen Gesamttiefe und Standardabweichung; Holzerode (Fichte und Buche, im Mittel 60-jährig im Misch- und Reinbestand), Krebeck (Fichte 20-41-jährig, Reinbestand) und Knesebeck (Fichte und Kiefer 20-50-jährig, Reinbestand)

Holzminden

Bei den untersuchten Eichen sind keine signifikanten Unterschiede in der maximalen Wurzeltiefe (Abb. 17) zu erkennen. Maximal wurzelt eine Saateiche rund 80 cm tief und damit 10 cm tiefer als die gepflanzte oder verpflanzte Eiche. Dagegen unterscheiden sich die mittleren Wurzeltiefen der drei Bestände nur geringfügig. Im Schnitt wurzeln die Saateichen 3 cm tiefer als die gepflanzten und verpflanzten Eichen. Allerdings kann dieser Unterschied statistisch nicht abgesichert werden. Bei Differenzierung der Saat- und der Pflanzeichen nach sozialer Stellung ist ein signifikanter Unterschied zwischen den Kraft'schen Klassen 2 und 4 festzustellen.

Kattenbühl

Die Tiefendurchwurzelung der Bestände in Kattenbühl wird horizontal und vertikal getrennt ermittelt. Diese Vorgehensweise dient der Prüfung, ob eine Horizontalwurzel mit einem Winkel von zum Beispiel 40° die gleiche Tiefe erreichen kann wie eine Vertikalwurzel. In Abb. 17 ist zu erkennen, daß eine durchschnittliche horizontale Einzelwurzel signifikant flacher wurzelt als eine Vertikalwurzel (rund 50 %). Die vertikalen Wurzeln reichen bis 48 cm, die horizontalen bis 23 cm tief in den Boden. Der Unterschied in der mittleren Durchwurzelungstiefe der horizontalen und vertikalen Wurzeln kann damit bestätigt werden. Die Variationskoeffizienten betragen für die horizontalen Wurzeln der Pflanzung 19 %, für die der Saat I 24 % und die der Saat II 28 %. Vertikal liegen sie zwischen 14 % und 17 %.

Die maximale Tiefe der Horizontal- und Vertikalwurzeln der Eichen aller Bestände differiert nicht stark. Die Vertikalwurzeln reichen bei den Eichen auf der Saat I und der Saat II Fläche rund 12 % tiefer in den Boden als die tiefsten Horizontalwurzeln. Diesbezüglich läßt sich bei den gepflanzten Eichen so gut wie keine Differenz feststellen. Für die maximal tiefsten Wurzeln liegen die Variationskoeffizienten zwischen 20 % und 35 %. Für die maximale Tiefenreichweite ist keine signifikante Differenz zwischen Horizontal- und Vertikalwurzeln festzustellen.

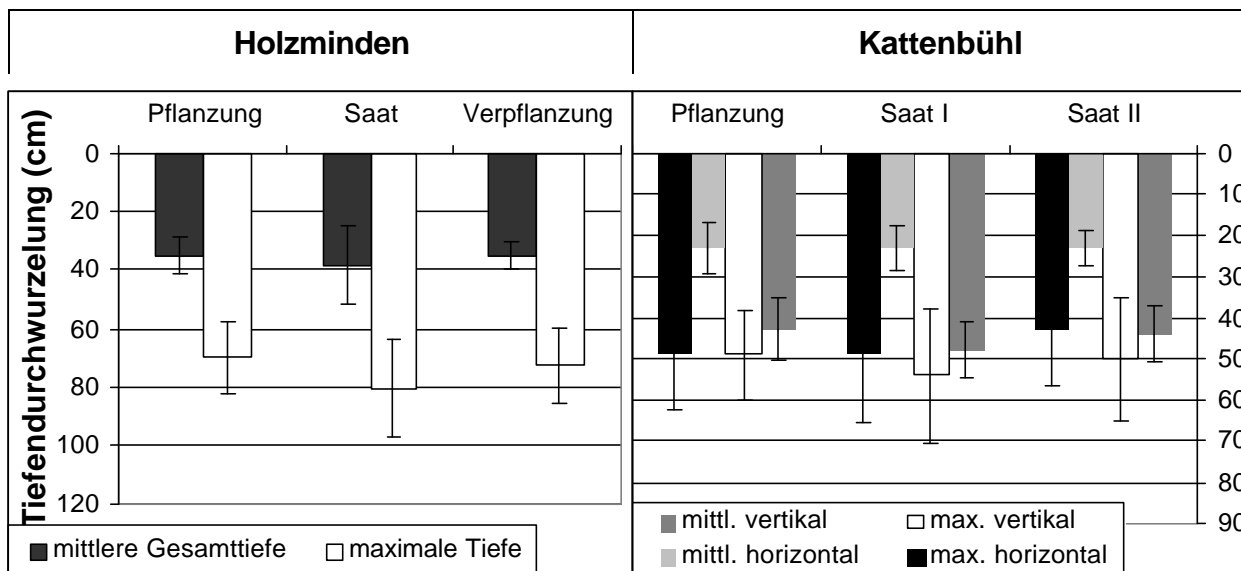


Abb. 17: Darstellung der mittleren und maximalen Gesamttiefe und Standardabweichung der 14- und 22 jährigen Eichen, Holzminden und Kattenbühl

4.2.2.2 Querschnittfläche und Wurzelanzahl der horizontalen und vertikalen Wurzeln (Sektion 1)

Um ein Bild über die Wurzelverteilung zu bekommen, werden im folgenden die Parameter "Wurzelanzahl" und "Wurzelquerschnittfläche" dargestellt. Beide Größen werden für die untersuchten Sektionen berechnet. Zunächst wird die erste Sektion durch die Auswertung der absoluten Meßwerte erörtert. Danach folgt eine Verhältnisbetrachtung der zweiten und dritten Sektion in den sich anschließenden Abschnitten.

Holzerode

In Abb. 18 wird für einen durchschnittlichen Baum eines Misch- oder Reinbestandes die Summe der Wurzelquerschnittfläche (cm²) dargestellt. Horizontal erreichen die Buchenwurzeln im Mittel der Bestände mit 16 Wurzeln eine Querschnittfläche von rund 500 cm². Die Fichten besitzen bei nur 10 Wurzeln eine Querschnittfläche von über 1000 cm². Sie weisen in horizontaler Richtung signifikant höhere Querschnittflächen auf als die Buchen.

Beim Vergleich der Bestandesformen zeigt die Buche im Mischbestand an Querschnittflächensumme durchschnittlich 8 % mehr in der Horizontalen (43 cm²) und 46 % weniger in der Vertikalen (174 cm²) als im Reinbestand. Die Fichte besitzt im Schnitt im Mischbestand horizontal eine 11 % und vertikal eine viermal so hohe Querschnittfläche als im Reinbestand. Sie entwickelt in Mischung mit Buche höhere Querschnittflächensummen der Horizontal- und Vertikal-

wurzeln (signifikant), während die Buche in Mischung mit Fichte geringere in der Vertikalen und höhere Wurzelquerschnitte in der Horizontalen aufweist.

Im folgenden wird die Anzahl der Wurzeln dargestellt, die eine Fichte oder Buche in der ersten Sektion besitzt (Abb. 18). Von allen in Holzerode untersuchten Beständen weist die Buche im Mischbestand horizontal die größte Wurzelanzahl auf. Dabei zeigt sie signifikant mehr Wurzeln als im Reinbestand. Ebenso weist die Fichte im Mischbestand mit 8 Wurzeln horizontal eine signifikant geringere Anzahl auf als im Reinbestand.

Vertikal besitzt die Buche im Reinbestand mit 12 Wurzeln die größte Anzahl. Sie zeigt signifikant (50 %) mehr Wurzeln als die Buche im Mischbestand. Die Fichten weisen in der vertikalen Wurzelrichtung mehr als halb so viele Wurzeln auf wie die Buchen.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die Fichte mit wenig Wurzeln eine größere Querschnittfläche erreicht als die Buche. Die Buche zeigt im Mischbestand vertikal signifikant geringere Querschnittsflächen bei signifikant weniger Wurzeln als im Reinbestand. Die Fichte hingegen weist im Mischbestand eine signifikant größere Querschnittfläche auf. Die Variationskoeffizienten liegen bei den horizontalen Wurzeln zwischen 20 % und 50 %, während sie bei den vertikalen auf über 50 % ansteigen.

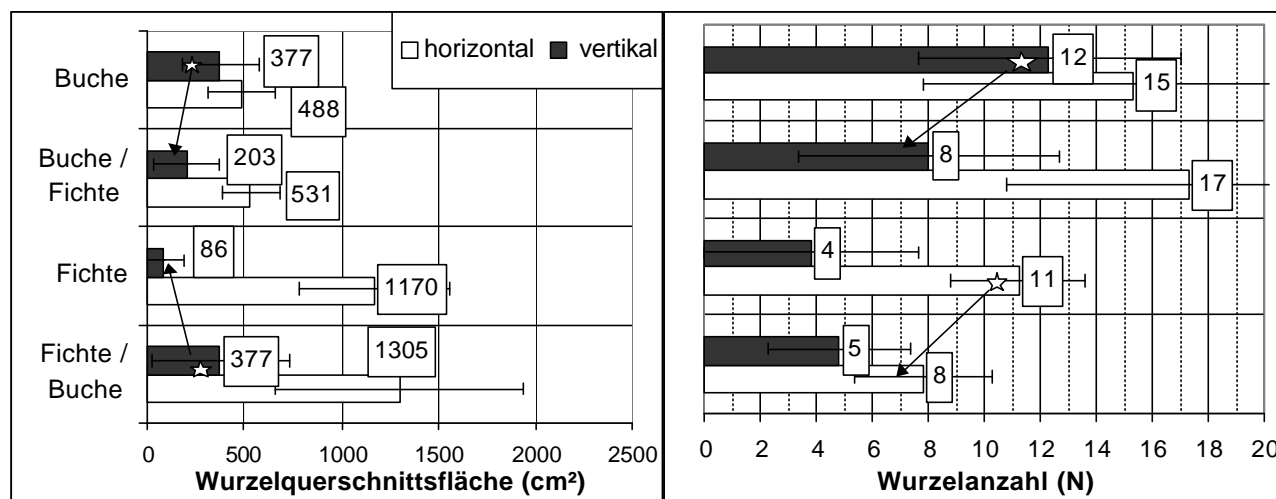


Abb. 18: Mittlere Summe der Wurzelquerschnittsfläche und Wurzelanzahl pro Baum und Standardabweichung (1. Sektion); Holzerode, Fichte und Buche (☆ signifikant → zu)

Krebeck

Die Absolutwerte der Wurzelquerschnittsflächensumme je Fichte bewegen sich in Abhängigkeit vom Alter horizontal zwischen etwa 150 cm² und 750 cm² und vertikal zwischen 30 cm² und 100 cm² (Abb. 19). Die Variationskoeffizienten der Wurzelquerschnittsflächen liegen bei allen drei Flächen über 60 %. Die mittlere Wurzelquerschnittsflächensumme der horizontalen Fichtenwurzeln steigt in der ersten Sektion signifikant von Bestand zu Bestand auf das Doppelte an. Vertikal erhöht sie sich von 21 zu 30 Jahren auf mehr als das Doppelte und von 30 zu 41 Jahren um die Hälfte.

In dem 21 jährigen Fichtenbestand besitzt jeder Baum durchschnittlich 13 Horizontalwurzeln (Abb. 19). Die 30 jährigen Fichten haben 17 %-, die 41 jährigen 32 % weniger Wurzeln. Verti-

kal weisen die Bäume des 21- und des 30 jährigen Bestandes durchschnittlich vier und die des 41 jährigen zwei Wurzeln auf. Letztere besitzen damit horizontal signifikant weniger Wurzeln als die jüngeren Flächen. Die Variationskoeffizienten der Wurzelanzahl liegen in horizontaler Richtung zwischen 18 % und 29 % und in vertikaler Richtung zwischen 60 und 65 %.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß mit zunehmendem Alter die Wurzelquerschnittfläche steigt und die Wurzelanzahl abfällt.

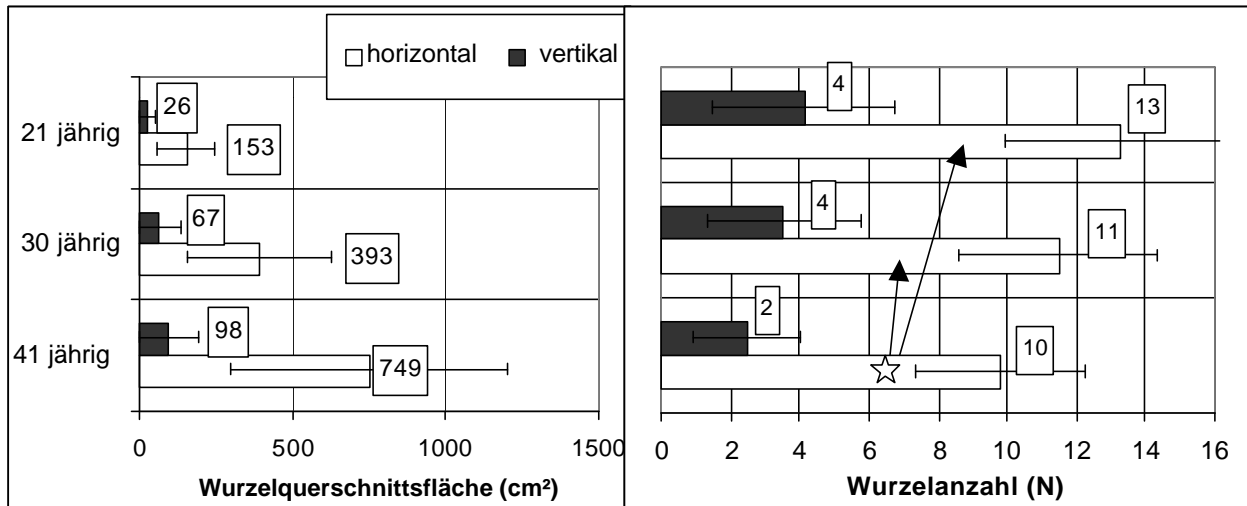


Abb. 19: Mittlere Summe der Wurzelquerschnittfläche und Wurzelanzahl pro Baum und Standardabweichung (1. Sektion); Knebeck, Fichte (☆signifikant → zu)

Knesebeck

Die Abbildungen unten (Abb. 20, Abb. 21) stellen die Wurzelanzahl und die Summe der Querschnittsflächen der Fichte und Kiefer des Untersuchungsgebietes Knesebeck dar.

Die jüngsten Fichten weisen horizontal eine Wurzelquerschnittflächensumme von durchschnittlich 40 cm² auf. In vertikaler Richtung liegt der entsprechende Wert bei 7 cm². Im Schnitt beträgt die Summe der Wurzelquerschnittflächen der ältesten Fichten horizontal 989 cm² und vertikal 136 cm². Diese Werte sind in horizontaler und vertikaler Richtung gegenüber den jüngeren Beständen signifikant höher. Mit Zunahme des Alters steigt die Wurzelquerschnittfläche der vertikalen Wurzeln von 20 zu 31 Jahren um das siebenfache und von 31 zu 50 Jahren auf das Zweieinhalbfache.

Alle Fichten besitzen in der Horizontalen 11 Wurzeln (Abb. 20). Vertikal schwankt die Wurzelanzahl in Abhängigkeit vom Alter der Bäume zwischen drei (20-jährig) und fünf (50-jährig).

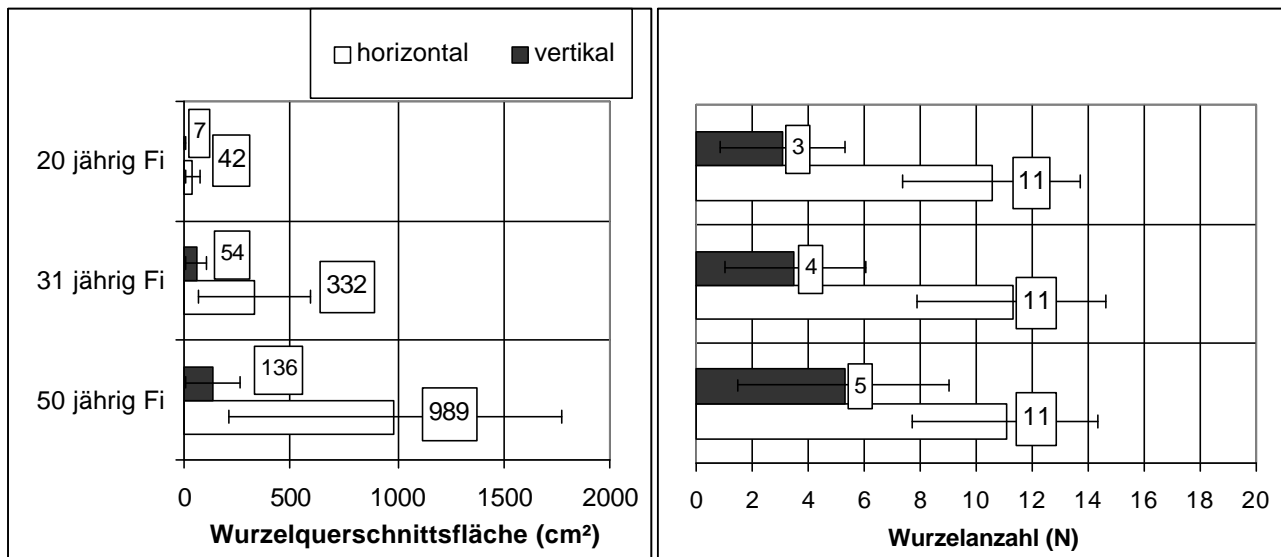


Abb. 20: Mittlere Summe der Wurzelquerschnittsfläche und Wurzelanzahl pro Baum und Standardabweichung (1. Sektion); Knesebeck, Fichte

Bei der Kiefer steigt im Schnitt die Wurzelquerschnittsfläche pro Baum horizontal von der 20-jährigen zur 33-jährigen auf das Zwölfwache und von der 33- zur 47-jährigen Kiefer auf das Vierfache an (Abb. 21). Die jüngeren Bäume besitzen absolut eine Wurzelquerschnittsflächen-summe von 14 cm², die 33-jährigen eine von 162 cm² und die ältesten eine von 642 cm². In vertikaler Richtung erhöhen sich die Werte von 20- auf 33-jährig auf das Vierfache und von 33 auf 47-jährig auf das Fünffache. Dabei haben die jungen Kiefern eine Wurzelquerschnittsfläche von 14 cm² und die ältesten eine von 292 cm².

Die durchschnittliche Wurzelanzahl pro Baum steigt von dem 20- zum 47-jährigen Bestand horizontal und vertikal auf das Doppelte an (Abb. 21). Bei den beiden älteren Flächen ist keine Veränderung der Wurzelanzahl festzustellen. Sie besitzen in der Horizontalen 15 Wurzeln und in der Vertikalen vier Wurzeln.

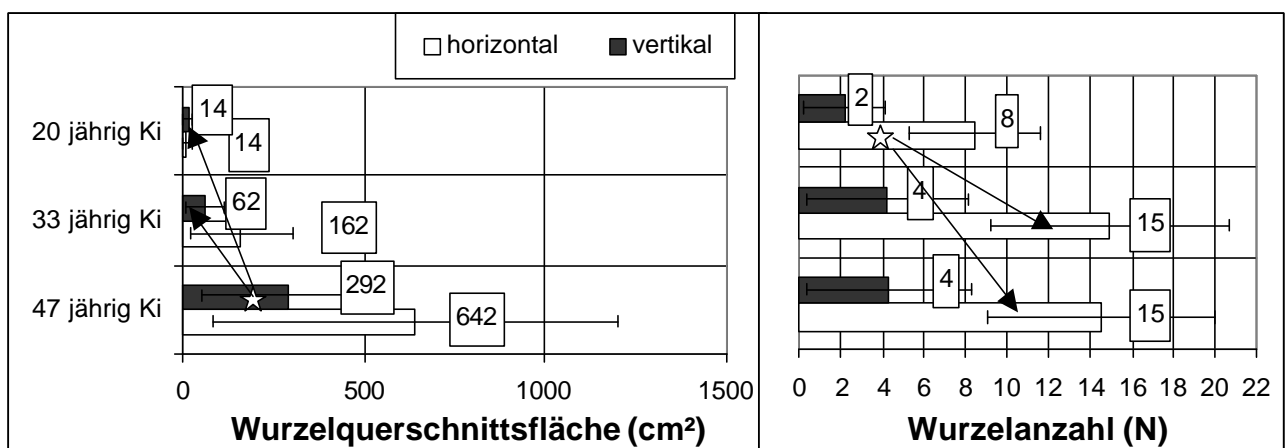


Abb. 21: Summe der Wurzelquerschnittsfläche und Wurzelanzahl pro Baum und Standardabweichung (1. Sektion); Knesebeck, Kiefer (☆signifikant → zu)

Holzminden

Die 22 jährigen Eichen zeigen in der ersten Sektion in vertikaler Richtung ähnlich hohe Wurzelquerschnittflächen wie in horizontaler (Abb. 22). Die Summe der vertikalen Wurzelquerschnittflächen liegt, abhängig vom Bestand, zwischen 43 cm² und 86 cm². Sie wird durch vier bis acht Wurzeln pro Baum gebildet. Horizontal sind daran 15 bis 19 Wurzeln mit einer Querschnittfläche von 60 cm² bis 72 cm² beteiligt. Beim Vergleich der drei Bestände weist die Saateiche horizontal bei 21 % weniger Wurzeln eine rund 18 % größere Wurzelquerschnittfläche auf als die Eiche der Pflanzung und die der Verpflanzung.

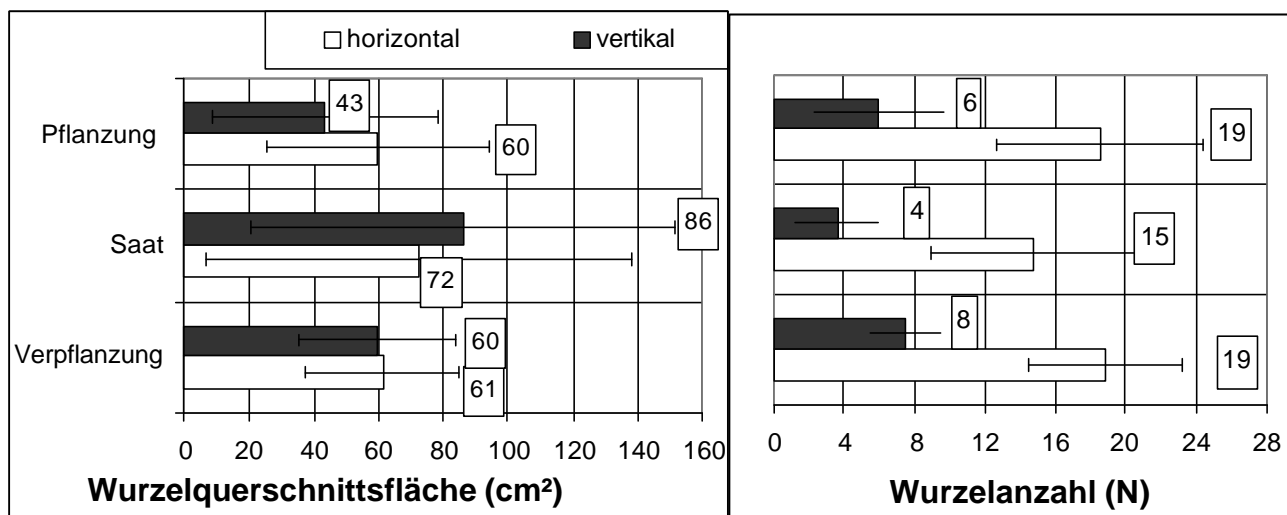


Abb. 22: Summe der Wurzelquerschnittfläche und Wurzelanzahl pro Baum und Standardabweichung (1. Sektion); Holzminden, 22 jährige Eiche

Da bei den verpflanzten Eichen nur herrschende Bäume entnommen wurden, wird nachfolgend eine Differenzierung nach sozialer Stellung vorgenommen. Dies wird in Tabelle 35 dargestellt. Weiterhin wird bei diesem Bestand die Bedeutung der Pfahlwurzel in Abhängigkeit von der sozialen Stellung erörtert. Dabei sind die Werte der Pfahlwurzelquerschnittflächen ein Bestandteil der entsprechenden vertikalen Daten.

Tabelle 35: Summe der Wurzelquerschnittfläche und Wurzelanzahl pro 22 jährige Eiche, differenziert nach Kraft; Holzminden (* signifikant unterschiedlich → zu)

	Wurzelquerschnittfläche (cm ²)					
	Kraft 2			Kraft 4		
	horizontal	vertikal	Pfahl	horizontal	vertikal	Pfahl
Pflanzung	86,2	56,7	23,4	33,4	29,7	15,3
Saat	128,7	85,1	81,0*	16,2	64,1	61,2
Verpflanzung	61,2	59,5	35,2			
	Anzahl (N)					
Pflanzung	20,9	5,7	1,1	16,3	6,1	0,9
Saat	16,4	3,9	1,7	13,1	3,3	1,9
Verpflanzung	18,8	7,5	2,0			

Die Wurzeln der gepflanzten Eichen der Kraft'schen Klasse 2 haben horizontal eine Querschnittflächensumme von $86,2\text{ cm}^2$ und vertikal eine von $56,7\text{ cm}^2$. Das Verhältnis der Horizontal- zu den Vertikalwurzeln liegt demnach bei 3 : 2. Die Pfahlwurzel der gepflanzten Eichen macht 40 % der gesamten vertikalen Wurzelquerschnittfläche aus. Die horizontalen und vertikalen Wurzeln der gepflanzten Eiche haben im Schnitt einen 40 % kleineren Querschnitt als die vergleichbaren Eichen der Saat. Die horizontalen Wurzeln der Saateichen besitzen eine Querschnittfläche von 129 cm^2 , die vertikalen eine von 85 cm^2 . Das Verhältnis der Horizontal- zu den Vertikalwurzeln liegt somit ebenfalls bei 3 : 2. Dabei hat die Pfahlwurzel an der Gesamtvertikalausbildung einen Anteil von 95 %.

Die Anzahl der Wurzeln beträgt bei den herrschenden gepflanzten Eichen in horizontaler 21 und in vertikaler Richtung sechs. Die Saateichen besitzen horizontal 16 und vertikal vier Wurzeln. Bei ihnen wird mit der geringeren Anzahl von Vertikalwurzeln eine große Querschnittfläche erreicht.

Die horizontalen Wurzeln der herrschenden Bäume des verpflanzten Bestandes sind 3 % dicker als die Vertikalwurzeln. An der Gesamtbewurzelung haben die 60 cm^2 dicken Horizontalwurzeln einen Querschnittflächenanteil von 51 %, die 61 cm^2 starken Vertikalwurzeln einen Anteil von 49 %. Die Pfahlwurzel macht 57 % der Vertikalbewurzelung aus. In der Horizontalen besitzen die herrschenden Eichen des verpflanzten Bestandes 19 Wurzeln. Vertikal sind es rund 50 % weniger.

Bei den beherrschten gepflanzten Eichen differieren die Querschnittswerte der horizontalen und der vertikalen Wurzeln nicht sehr stark. Der Anteil der Pfahlwurzel an der gesamten vertikalen Wurzelquerschnittfläche liegt bei 50 %. Die Horizontalwurzeln haben einen prozentualen Anteil an der Gesamtbewurzelung von 73 %, die vertikalen einen von 27 %.

Die beherrschten Bäume des Saatbestandes weisen im Vergleich zu den Wurzeln der herrschenden Eichen eine stärkere Vertikal- als Horizontalbewurzelung auf. Die horizontale Wurzelquerschnittflächensumme pro Baum ist 75 % geringer als die vertikale Fläche. Die Pfahlwurzel hat auch hier einen 96 %igen Anteil an der Vertikalbewurzelung. Die hohe Querschnittfläche der Vertikalwurzeln setzt sich aus rund drei Wurzeln zusammen, die der horizontalen Wurzeln aus 13 Wurzeln.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß durchschnittlich die Saateiche im Vergleich zur gepflanzten Eiche rund 30 % weniger Wurzeln hat, aber eine 40 % größere Wurzelquerschnittfläche (Abb. 22). Dies liegt im wesentlichen an den Bäumen der Kraft'schen Klasse 4. Die beherrschten Saateichen besitzen in der Tiefe rund 50 % weniger Wurzeln als die gepflanzten Eichen bei einer mehr als doppelt so großen Querschnittfläche.

Die Pfahlwurzelquerschnittfläche der herrschenden verpflanzten Eichen ist geringer als die der herrschenden Saateichen. Gegenüber den herrschenden Bäumen der gepflanzten Bäume weisen letztere knapp knapp die vierfachen Werte auf. Bei den beherrschten Bäumen macht die Pfahlwurzel der gesäten Eichen nahezu die gesamte vertikale Bewurzelung aus und bei den gepflanzten nur 50 %.

Kattenbühl

Absolut liegen die Wurzelquerschnittswerte horizontal zwischen 20 cm² und 50 cm² und vertikal bei 8 cm² (Abb. 23). Das Wurzelsystem der gepflanzten Eiche weist horizontal eine 16 % größere Querschnittsfläche auf als das der Saat I und eine signifikant (55 %) größere als das der Saat II-Fläche. In der Vertikalen zeigt die Eiche der Saat I-Fläche den höchsten Querschnittswert der Wurzeln. Er ist 13 % bzw. 28 % größer als die vergleichbaren Werte der Pflanz- und Saat II-Eichen. Der Variationskoeffizient schwankt bei den horizontalen Wurzelquerschnittsflächen zwischen 68 % und 84 %. Dagegen erreicht er für die vertikalen Wurzeln aller Bestände Werte von 95 %.

Die Anzahl der Horizontalwurzeln ist bei den Eichen der Pflanzung um 19 % größer als bei denen des Saat I-Bestandes (Abb. 23). Die Bäume der letztgenannte Gruppe zeigen darüber hinaus signifikant (39 %) mehr Horizontalwurzeln als die Saat II-Eichen. Vertikal weisen die gepflanzten Eichen doppelt soviele Wurzeln auf wie die der Saat I- und 50 % mehr als die der Saat II-Eichen. Absolut sind in der Horizontalen zwischen 20 und 40 Wurzeln zu finden und in der Vertikalen zwischen drei und sechs . Die Streuung der Wurzelanzahl differiert horizontal zwischen 34 % (Saat I) und 60 % (Pflanzung) sowie vertikal zwischen 58 % (Saat II) und 68 % (Pflanzung).

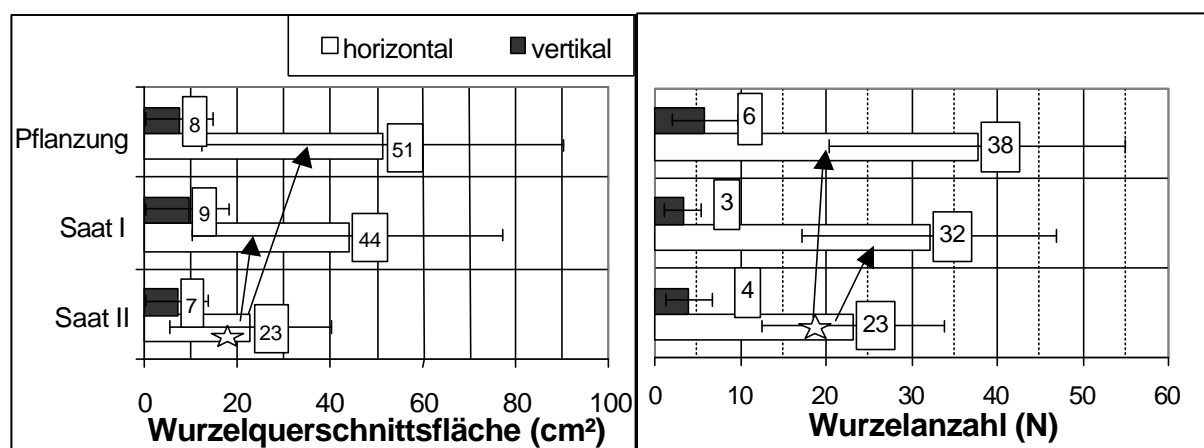


Abb. 23: Summe der Wurzelquerschnittsfläche und Wurzelanzahl pro Baum und Standardabweichung (1. Sektion); Kattenbühl, 13 jährige Eiche (☆signifikant → zu)

4.2.2.3 Verteilung der Wurzelanzahl und Wurzelquerschnittsfläche auf die drei horizontalen und vertikalen Sektionen am Beispiel der Eiche; Holzminden

Die Verteilung der Wurzelanzahl und Wurzelquerschnittsfläche wird nachfolgend beispielhaft an den 22 jährigen Eichen aus dem Untersuchungsgebiet in Holzminden erörtert. Anschließend werden tabellarisch für die anderen Flächen die prozentualen Anteile der horizontalen (GHQ) oder vertikalen (GVQ) Wurzeln an der Gesamtquerschnittsfläche (GQF) aufgeführt (GHQ+GVQ=GQF). Gleiche Berechnungen werden für die Wurzelanzahl dargestellt. Bezugsgröße bildet dafür die gesamte vertikale oder horizontale Wurzelmenge (GHA; GVA). Absolute Werte können anhand des vorherigen Abschnitts berechnet werden.

Abb. 24 zeigt die Wurzelanzahl und die Summe der Wurzelquerschnittfläche (pro Baum) für die Eichen des herrschenden Saatbestandes. Die Darstellung erfolgt getrennt nach Horizontal-Vertikal- und Pfahlwurzeln. Der Wert der Pfahlwurzel ist ein Bestandteil der Vertikalwurzel. Erhöhte Daten der Pfahlwurzelanzahl in der zweiten Sektion kommen dadurch zustande, daß die Hauptwurzel sich in viele kleine Wurzeln zergliedert. Die Abkürzungen HQF, VQF und PQF stehen für die horizontalen (HQF), vertikalen (VQF) und Pfahlwurzel (PQF)- Querschnittsflächen der einzelnen Sektionen. Die Summe aus HQF Sektion 1, HQF Sektion 2 und HQF Sektion 3 ergibt die gesamte horizontale Querschnittfläche (GHQ). Gleiches gilt für die vertikale Wurzelrichtung (VQF). Nach demgleichen Schema wird die Anzahl der Wurzeln pro Wurzelsystem dargestellt.

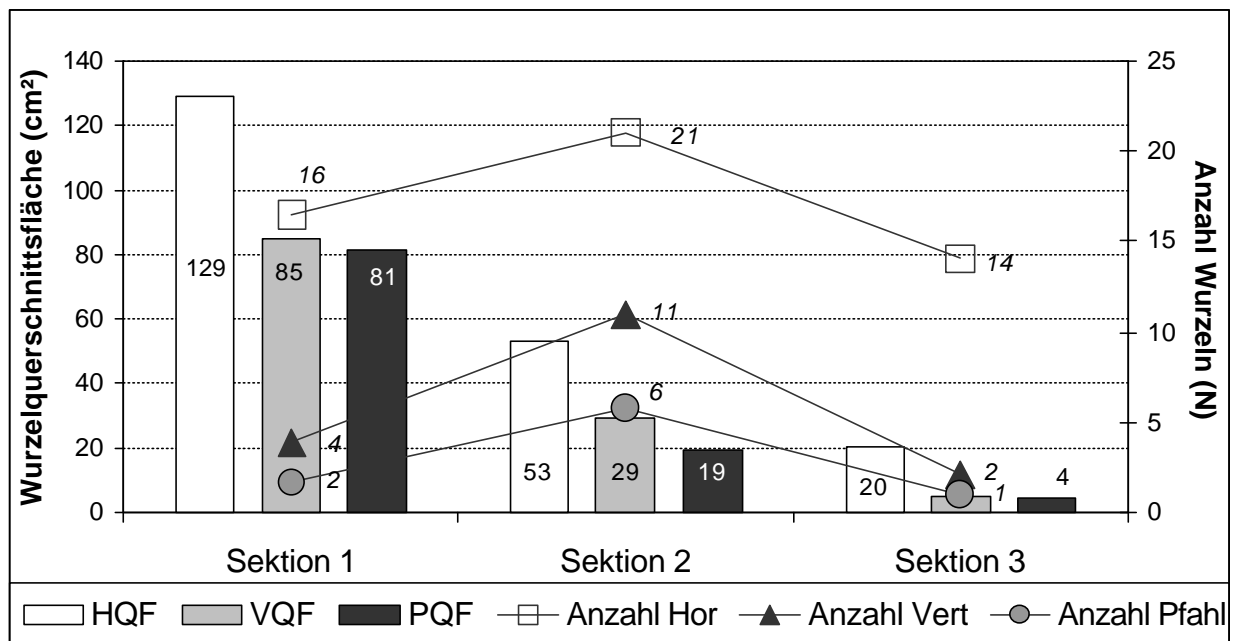


Abb. 24: Mittlere Wurzelquerschnittfläche und Wurzelanzahl der horizontalen (HQF), vertikalen (VQF) und Pfahlwurzeln (PQF) eines Wurzelsystems differenziert nach 3 Sektionen, Holzminden, Eiche, Kraft 2. Die große Anzahl der Pfahlwurzeln resultiert aus der Zergliederung der Pfahlwurzel in tieferen Bodenschichten

Bei den herrschenden Eichen aller in Holzminden untersuchten Bestände sind die Wurzeln folgendermaßen verteilt. Es liegen in der horizontalen stammnahen Region rund 60 % (HQF Sektion 1), in der mittleren Sektion 30 % (HQF Sektion 2) und in der dritten Sektion 10 % (HQF Sektion 3) der gesamten horizontalen Wurzelquerschnittfläche (GHQ) (Tabelle 36). In der Vertikalen entfallen etwa 70 % (HVF Sektion 1) der gesamten Wurzelquerschnittfläche auf die erste, 25 % (HVF Sektion 2) auf die zweite und 5 % (HVF Sektion 3) auf die dritte Sektion.

Tabelle 36: Mittlere prozentuale Verteilung der Wurzelquerschnittflächen auf die horizontalen und vertikalen Sektionen differenziert nach Kraft'schen Klassen; Holzminden, 22 jährige Eiche (HQF1+HQF2+HQF3=100 %; VQF1+VQF2+VQF3=100 %)

Wurzelquerschnitt Eiche			HQF1	HQF2	HQF3	VQF1	VQF2	VQF3	
			Sektion 1 (%)	Sektion 2 (%)	Sektion 3 (%)	Sektion 1 (%)	Sektion 2 (%)	Sektion 3 (%)	
Kraft 2	Pflanzung	horizontal	67	27	6	vertikal	62	37	1
	Saat		64	26	10		72	24	4
	Verpflanzung		60	29	11		70	29	1
Kraft 4	Pflanzung		64	29	7		68	21	11
	Saat		58	29	13		76	21	3

In Tabelle 37 werden für die Eichen der verschiedenen Bestände und Kraft'schen Klassen die prozentualen Anteile der Wurzeln pro Sektion an der Gesamtwurzelzahl dargestellt. Bezugsgröße ist die Summe der Wurzeln der drei Sektionen (GHA oder GVA).

Alle Eichen der verschiedenen Bestände weisen vertikal in der zweiten Sektion die meisten Wurzeln auf. In der Horizontalen sind die meisten Wurzeln in der ersten Sektion zu beobachten. In der Entfernung von 70 cm (HAF Sektion 3) sind relativ mehr Wurzeln zu finden als in einer Tiefe von 70 cm (VAF Sektion 3).

Tabelle 37: Mittlere prozentuale Verteilung der Wurzelanzahl auf die horizontalen und vertikalen Sektionen differenziert nach Kraft'schen Klassen; Holzminden, 22 jährige Eiche (HAF1+HAF2+HAF3=100 %; VAF1+VAF2+VAF3=100 %)

Wurzelanzahl			HAF1	HAF2	HAF3	VAF1	VAF2	VAF3	
			Sektion 1 (%)	Sektion 2 (%)	Sektion 3 (%)	Sektion 1 (%)	Sektion 2 (%)	Sektion 3 (%)	
Kraft 2	Pflanzung	horizontal	42	37	21	vertikal	30	51	18
	Saat		32	41	27		23	65	13
	Verpflanzung		41	41	18		43	49	6
Kraft 4	Pflanzung		45	40	15		30	39	31
	Saat		59	27	14		18	71	5

4.2.2.4 Tabellarische Darstellung der Verteilung der Wurzelquerschnittflächen und der Wurzelanzahl (Fi, Bu, Ki, Ei) auf die horizontalen und vertikalen Sektionen

Bei den untersuchten Fichten, Buchen, Kiefern und Eichen sind in der ersten Sektion sowohl horizontal als auch vertikal die stärksten Wurzeln zu finden (Tabelle 38). Die meisten Bäume besitzen stammnah (HQF Sektion 1) über zwei Drittel der Gesamtwurzelquerschnittfläche (GQF). Ausnahmen bilden die um 50-jährigen Fichten in Holzerode, Krebeck und Knesebeck. Hier gewinnt die zweite Sektion, gerade vertikal, an Bedeutung. Die Fichte des Reinbestandes aus Holzerode besitzt in der zweiten vertikalen Sektion an der gesamten vertikalen Wurzelquerschnittfläche (GVQ) einen Anteil von über 50 %.

Tabelle 38: Mittlere prozentuale Verteilung der Wurzelquerschnittfläche (WQF) auf die horizontalen und vertikalen Sektionen; Holzerode, Krebeck, Knesebeck und Kattenbühl; Fichte, Buche, Kiefer und Eiche

WQF		HQF			VQF		
		1. Sektion (%)	2. Sektion (%)	3. Sektion (%)	1. Sektion (%)	2. Sektion (%)	3. Sektion (%)
Holzerode	Buche	67	30	3	65	31	4
	Bu / Fi	67	28	5	68	28	4
	Fichte	53	35	12	36	55	9
	Fi / Bu	55	36	9	56	33	10
Krebeck	Fichte 20	75	20	5	67	25	8
	Fichte 30	73	23	4	69	27	4
	Fichte 41	68	27	5	56	37	7
Knesebeck	Fichte 20	78	18	4	94	3	3
	Fichte 31	67	25	8	65	28	7
	Fichte 50	62	29	9	58	34	8
	Kiefer 20	76	19	5	82	16	2
	Kiefer 33	77	20	3	72	24	4
	Kiefer 47	74	22	4	61	29	10
Kattenbühl Eiche	Pflanzung	63	24	13	95	5	0
	Saat I	64	24	12	89	11	0
	Saat II	67	25	8	83	17	0

Die Anzahl der Wurzeln verteilt sich auf die drei Sektionen im Gegensatz zu den Wurzelquerschnittflächen sehr unterschiedlich (Tabelle 39). In der Regel sind in der zweiten Sektion die meisten Wurzeln zu finden. Ein Ausnahme bilden die 13-jährigen Eichenbestände aus Kattenbühl, bei denen stammnah (20 cm Radius; 30 cm Tiefe) die höchste Wurzelanzahl vorkommt.

In Holzerode sind bei den Buchen im Mischbestand rund 30 % der Wurzeln in der ersten Sektion (HAF und VAF Sektion 1) und 50 % in der zweiten zu finden. Bei den anderen Beständen befinden sich maximal 20 % der Wurzeln in der ersten Sektion und 80 % in der zweiten plus dritten Sektion. Dabei zeigen die Fichten in der dritten Sektion 10 % bis 20 % mehr Wurzeln als die Buchen.

In Krebeck steigt der horizontale Querschnittflächenanteil der weiter von der Stammbasis entfernten Wurzeln mit Alterung an.

In Knesebeck geht in Abhängigkeit vom Alter der Anteil der ersten Sektion an der Gesamtwurzelanzahl zurück. Dies fällt besonders in der vertikalen Wurzelrichtung auf.

Tabelle 39: Mittlere prozentuale Verteilung der Wurzeln auf die horizontalen und vertikalen Sektionen; Holzerode, Krebeck, Knesebeck und Kattenbühl; Fichte, Buche, Kiefer und Eiche

Wurzelanzahl		HAF			VAF		
		1. Sektion (%)	2. Sektion (%)	3. Sektion (%)	1. Sektion (%)	2. Sektion (%)	3. Sektion (%)
Holzerode	Buche	18	47	35	12	59	29
	Bu / Fi	32	46	22	30	54	16
	Fichte	18	29	53	14	49	37
	Fi / Bu	15	38	47	10	41	49
Krebeck	Fi 20	44	34	22	48	40	12
	Fi 30	33	40	27	25	57	18
	Fi 41	24	39	37	15	55	30
Knesebeck	Fichte 20	56	32	12	75	16	9
	Fichte 31	28	38	34	34	45	21
	Fichte 50	23	36	41	16	52	32
	Kiefer 20	62	27	11	39	54	7
	Kiefer 33	45	37	18	42	41	17
	Kiefer 47	34	41	25	19	43	38
Kattenbühl	Pflanzung	60	30	10	92	7	1
	Saat I	59	32	9	83	16	1
	Saat II	60	31	9	92	7	1

4.2.2.5 Verhältnis Horizontal- zu Vertikalwurzeln

Im folgenden wird die Verteilung der Wurzeln in dem rund 3 m³ (bei den Eichen 1 m³) großen Wurzelballen beschrieben ((Pi*r²)*Bodentiefe). Sie wird anhand der Relationen zwischen Horizontal- und Vertikalbewurzelung in Anzahl und Querschnittfläche dargestellt. Ein enges Verhältnis zwischen der Summe der horizontalen und der der vertikalen Wurzelquerschnittfläche einer Sektion läßt auf ein gleichmäßiges Tiefenwurzelsystem schließen. Eine weite Relation bedeutet, daß eine geringere Wurzelquerschnittfläche bei den Vertikalwurzeln zu finden ist als bei den Horizontalwurzeln und somit ein Flachwurzelsystem ausgebildet wird.

Bei allen untersuchten Bäumen ist kein signifikanter Unterschied der Relationen mit Abfall der sozialen Stellung festzustellen.

Holzerode

Beim Vergleich aller Bestände wird von der ersten zur zweiten Sektion die Querschnittsflächenrelation enger und zur dritten Sektion hin wieder weiter (Tabelle 40). Eine Ausnahme bildet die Mischbestandsfichte, bei der die vertikale im Verhältnis zur horizontalen Querschnitt-

fläche bei der zweiten Sektion abnimmt. In der dritten Sektion steigt sie jedoch wieder an. Demzufolge stellt sich die Verteilung in der zweiten Sektion weiter dar als in der dritten.

Deutliche Unterschiede sind zwischen Buchen und Fichten zu beobachten. Bei der Buche ist die Summe der Querschnittfläche gleichmäßiger verteilt als bei der Fichte. Dabei weist die Buche im Mischbestand weitere Relationen auf (2,6 : 1) als die im Reinbestand (1,4 : 1).

Bei den Fichtenbeständen besteht ein erheblicher Gegensatz in der Verteilung der Wurzelquerschnittflächen. Über alle Sektionen gemittelt, weist die Fichte des Reinbestandes ein Verhältnis der horizontalen zu vertikalen Querschnittflächen von 13,9 : 1 auf. Die Fichte im Mischbestand zeigt hingegen Werte von 3,5 : 1. Erstere besitzt demnach fast 14 mal so große horizontale als vertikale Querschnittflächen. Letztere 3,5mal so starke Horizontal- als Vertikalwurzeln. Dies ist ein deutliches Merkmal des Senkerwurzelsystems der Bäume des Mischbestandes.

Tabelle 40: Mittlere Relation der horizontalen zur vertikalen Wurzelquerschnittfläche (WQF); Holzerode, Fichte und Buche im Rein- und Mischbestand

WQF	Buche	Buche / Fichte	Fichte	Fichte / Buche
Sektion 1	1,3: 1	2,6:1	13,6:1	3,5:1
Sektion 2	1,4: 1	2,3:1	9,7:1	3,9:1
Sektion 3	1,3: 1	2,8:1	18,5:1	3,2:1
Mittel der Sektionen (sx)	1,4:1 (0,08)	2,6:1 (0,24)	13,9:1 (4,37)	3,5:1 (0,37)

in Klammern Standardabweichung

Beim Betrachten der Wurzelanzahl der vier in Holzerode untersuchten Bestände kann für die zweite Sektion ein engeres Verhältnis der horizontalen zu den vertikalen Wurzeln gefunden werden als für die anderen Sektionen (Tabelle 41). Die Buchen des Reinbestandes und die Fichten des Mischbestandes zeigen genauso viele Vertikal- wie Horizontalwurzeln. Im Mittel der drei Sektionen stellt sich deren Relation mit Werten von 0,9 : 1 (Buche) und 1,0 : 1 (Fichte / Buche) enger dar als die Relationen der beiden anderen Flächen. Die Buche im Mischbestand weist bei durchschnittlichen Ergebnissen von 1,8 : 1 knapp doppelt so viele Horizontal- als Vertikalwurzeln auf. Bei der Fichte im Reinbestand erhöht sich dieser Wert im Schnitt auf 2,5 : 1. Diese Daten kommen durch die weite Relation in der ersten und dritten Sektion zustande.

Tabelle 41: Mittlere Relation der Horizontal- zu den Vertikalwurzeln (Anzahl); Holzerode, Fichte und Buche

Anzahl	Buche	Buche / Fichte	Fichte	Fichte / Buche
Sektion 1	1,24:1	2,16:1	2,95:1	1,62:1
Sektion 2	0,72:1	1,49:1	1,42:1	0,79:1
Sektion 3	0,89:1	1,75:1	3,17:1	0,72:1
Mittel der Sektionen (sx)	0,95:1 (0,27)	1,80:1 (0,33)	2,51:1 (0,95)	1,04:1 (0,50)

in Klammern Standardabweichung

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die Buchen bei der Verteilung der Querschnittfläche und der Anzahl ein engeres Verhältnis Horizontal- zu Vertikalwurzeln haben als die Fichten. Die Fichte im Mischbestand nähert sich den Querschnittflächenrelationen der Buche stark

an, während die Fichte im Reinbestand eine wesentlich höhere Relation in Richtung Horizontalwurzeln aufweist als die Buche im Reinbestand. Dies trifft für die Wurzelanzahl nicht zu. Dies bedeutet, daß die Fichte im Reinbestand Vertikalwurzeln angelegt hat, diese aber sehr geringe Dimensionen erreichen.

Beim Vergleich der Buchenkollektive sind nicht so starke Unterschiede zwischen den Flächen festzustellen wie bei der Fichte. Die Buche im Mischbestand zeigt für die Querschnittfläche wie auch für die Anzahl geringfügig weitere Verteilungen der Wurzeln als die Buche im Reinbestand.

Krebeck

Das Wurzelquerschnittflächenverhältnis steigt in der ersten Sektion im Schnitt abhängig vom Alter von rund 6 : 1 auf 8 : 1 an (Tabelle 42). Die der zweiten Sektion liegt mit durchschnittlich 7 : 1 ($\pm 0,4$) bei allen drei Beständen auf einem ähnlichem Niveau. Die dritte Sektion zeigt in der Abfolge 21, 41 und 30 Jahre Verhältnisse zwischen den Horizontal- und Vertikalwurzeln von gerundet 5 : 1 bis 9 : 1.

Tabelle 42: Mittlere Relation der horizontalen zur vertikalen Wurzelquerschnittfläche (WQF); Krebeck, Fichte im Reinbestand

WQF	Fichte 21	Fichte 30	Fichte 41
Sektion 1	5,9:1	5,9:1	7,7:1
Sektion 2	7,1:1	6,7:1	7,4:1
Sektion 3	5,0:1	9,5:1	8,6:1
Mittel der Sektionen (sx)	6,0:1 (1,09)	7,4:1 (1,93)	7,9:1 (0,60)

in Klammern Standardabweichung

Die mittlere Relation der Wurzelanzahl steigt in Abhängigkeit vom Alter bei der ersten Sektion von etwa 3,2 : 1 auf 4,0 : 1. Bei der zweiten und dritten Sektion ist ein gegenläufiger Trend zu beobachten (Tabelle 43). Das Verhältnis zwischen Horizontal- und Vertikalwurzeln nimmt bei der zweiten Sektion von den 21 jährigen zu den 41 jährigen Fichten von 2,2 : 1 auf 1,3 : 1 ab. Mit weiterer Entfernung vom Wurzelstock fällt das Verhältnis von 5,3 : 1 auf 2,4 :

Tabelle 43: Mittlere Relation der Horizontal- zu Vertikalwurzel (Anzahl); Krebeck, Fichte im Reinbestand

Anzahl	Fichte 21	Fichte 30	Fichte 41
Sektion 1	3,2:1	3,4:1	4,0:1
Sektion 2	2,2:1	1,7:1	1,3:1
Sektion 3	5,3:1	3,5:1	2,4:1
Mittel der Sektionen (sx)	3,6:1 (1,60)	2,8:1 (0,95)	2,6:1 (1,34)

in Klammern Standardabweichung

Die Wurzelquerschnitte der Horizontalen sind in 30 cm bis 40 cm Entfernung von der Stammbasis (erste Sektion) bei den Fichten sechs- bis siebenmal so stark, wie die der Vertikalen. Die jüngeren Bäume zeigen geringfügig ausgewogenere Verhältnisse als die älteren. Bei den Relationen der Wurzelanzahl weisen die älteren Fichten engere Werte auf. Demnach haben sie eine geringe Anzahl sehr starker Horizontalwurzeln.

Knesebeck

Die Wurzelquerschnittflächen der beiden älteren Fichtenbestände weisen über alle Sektionen in horizontaler zu vertikaler Richtung Relationen von 5 : 1 bis 7 : 1 auf (Tabelle 44). Bei dem 20-jährigen Bestand steigen die entsprechenden Werte von der ersten zur zweiten Sektion auf maximal 42 : 1 an. In der dritten Sektion fällt bei den jüngeren Fichten die Relation auf 20 mal stärkere Horizontal- als Vertikalwurzeln wieder ab.

Tabelle 45 stellt die Relation der horizontalen und vertikalen Wurzelanzahl für die Fichten dar. Bei der ersten Sektion sind horizontal ein- (31-jährige Fichte) bis zweimal (20- und 50-jährige Fichte) so viele Wurzeln zu finden als vertikal. Mit weiterer Entfernung vom Wurzelstock zeigen die jüngeren Bäume sieben- bis zehnmal so viele Horizontal- als Vertikalwurzeln. Ersterer Wert beschreibt die zweite Sektion in einer Distanz von 60 cm vom Stock, letzterer die dritte Sektion. In der zweiten Sektion fällt das Verhältnis bei den 31- und 50-jährigen Fichten auf rund 1,5 : 1 ab. Die Anzahl der Vertikalwurzeln steigt somit an.

Die 20-jährige Kiefer besitzt in der ersten Sektion in der Horizontalen die gleiche Querschnittfläche wie in der Vertikalen (Tabelle 44). Dagegen sind entsprechende Werte der Horizontalwurzeln in einem Meter Entfernung vom Wurzelstock doppelt so groß wie die der Vertikalwurzeln (Tabelle 45). Die 33-jährige Kiefer hat in der ersten Sektion vertikal 2,6 mal so kleine Querschnittflächen als horizontal. In der zweiten und dritten Sektion erhöhen sich die Werte der Vertikalwurzeln im Verhältnis zu denen der Horizontalwurzeln (1,8 : 1). Es sind dort 1,8 mal so große Horizontal- als Vertikalwurzelschnittflächen zu finden. Bei der 47-jährigen Kiefer ist dieser Effekt extremer zu beobachten. Hier nimmt das Verhältnis der Vertikal- zur Horizontalfläche von der ersten bis zur dritten Sektion zu. Das heißt, die Querschnittflächen der **Vertikal**wurzeln sind in dieser weiteren Entfernung rund 25 % größer als die der Horizontalwurzeln.

Tabelle 44: Mittlere Relation der horizontalen zur vertikalen Wurzelquerschnittfläche (WQF); Knesebeck, Fichte und Kiefer im Reinbestand

WQF	Fichte 20	Fichte 31	Fichte 50	Kiefer 20	Kiefer 33	Kiefer 47
Sektion 1	5,8:1	6,2:1	7,3:1	1,0:1	2,6:1	2,2:1
Sektion 2	41,6:1	5,2:1	6,0:1	1,0:1	1,7:1	1,4:1
Sektion 3	21,1:1	6,1:1	7,5:1	2,1:1	1,9:1	0,8:1
Mittel der Sektionen (sx)	22,9:1 (17,96)	5,8:1 (0,54)	6,9:1 (0,82)	1,4:1 (0,63)	2,1:1 (0,46)	1,4:1 (0,72)

in Klammern Standardabweichung

Für die Relationen der Vertikal- zu den Horizontalwurzeln in ihrer Anzahl ist für die Kiefer ein deutlicher Trend über alle drei Altersstufen festzustellen (Tabelle 45). Stammnah sind drei- bis viermal so viele Horizontal- wie Vertikalwurzeln vorhanden. In der zweiten Sektion ist ein Verhältnis von 1 : 1 bis 2 : 1 festzustellen. In der dritten Sektion wird der Altersunterschied deutlich. Die Kiefern des jüngsten Bestandes weisen vier mal so viele Horizontal- als Vertikalwurzeln auf, die des mittelalten zeigen nur noch zweimal so viele und die des ältesten Bestandes rund ein Fünftel **weniger** Horizontal- als Vertikalwurzeln.

Tabelle 45: Mittlere Relation der Horizontal- zu den Vertikalwurzeln (Anzahl); Knesebeck, Fichte und Kiefer

Anzahl	Fichte 20	Fichte 31	Fichte 50	Kiefer 20	Kiefer 33	Kiefer 47
Sektion 1	3,4:1	2,1:1	3,2:1	3,9:1	3,3:1	3,5:1
Sektion 2	6,5:1	1,5:1	1,4:1	1,3:1	1,7:1	1,2:1
Sektion 3	9,5:1	2,3:1	2,3:1	3,6:1	2,0:1	0,8:1
Mittel der Sektionen (sx)	6,5:1 (3,04)	2,0:1 (0,41)	2,3:1 (0,88)	2,9:1 (1,44)	2,3:1 (0,87)	1,8:1 (1,48)

in Klammern Standardabweichung

Die Relationen zwischen den Horizontal- und Vertikalwurzeln kennzeichnen sehr deutlich das für die Kiefer charakteristische Pfahlwurzelsystem.

Holzminden

Die Relationen der horizontalen zu den vertikalen Wurzelquerschnittflächen werden für die Eichen differenziert nach sozialen Stellungen dargestellt und erörtert.

In der ersten und zweiten Sektion ist die Wurzelquerschnittfläche bei fast allen Beständen in der Horizontalen bis zu einmal größer als in der Vertikalen (Tabelle 46). Bei der dritten Sektion des verpflanzten Bestandes steigt die Relation auf 10 : 1. Die beherrschten Saateichen weisen in der ersten und in der zweiten Sektion höhere vertikale als horizontale Wurzelquerschnittflächen auf. Bei den Wurzeln der beherrschten Eichen des gepflanzten Bestandes ist dies nicht der Fall. Dort sind die Werte der horizontalen Wurzeln genauso bis doppelt so groß wie die vertikalen.

Tabelle 46: Mittlere Relation der horizontalen zur vertikalen Wurzelquerschnittfläche (WQF) differenziert nach Kraft'schen Klassen; Holzminden, 22 jährige Eiche

WQF	Kraft 2			Kraft 4	
	Pflanzung	Saat	Verpflanzung	Pflanzung	Saat
Sektion 1	1,5:1	1,5:1	1,0:1	1,1:1	0,3:1
Sektion 2	1,6:1	1,9:1	1,2:1	1,7:1	0,3:1
Sektion 3	2,0:1	4,1:1	10,4:1	5,6:1	3,2:1
Mittel der Sektionen (sx)	1,7:1 (0,28)	2,5:1 (1,41)	4,2:1 (5,38)	2,8:1 (2,45)	1,3:1 (1,67)

in Klammern Standardabweichung

Im Mittel der Sektionen besitzen die Wurzelsysteme der Eichen drei bis viermal so viele Horizontal- als Vertikalwurzeln (Tabelle 47). Dabei zeigen die verpflanzten Bäume eine hohe Streuung der Werte. Diese Streuung kommt durch die Relationen der dritten Sektion zustande, die 10,4 : 1 beträgt.

Bei allen Eichen sind in der ersten Sektion erheblich mehr Horizontal- als Vertikalwurzeln zu finden. Die entsprechenden Relationen werden zur zweiten Sektion hin enger und steigen zur dritten Sektion wieder an. Am deutlichsten ist dies bei den beherrschten Saateichen zu beobachten. Dort sind vertikal in der zweiten Sektion 25 % mehr Wurzeln zu finden als horizontal.

Tabelle 47: Mittlere Relation der Horizontal- zu den Vertikalwurzeln (Anzahl); Holzminden, 22 jährige Eiche

Anzahl	Pflanzung			Saar	
	Pflanzung	Saat Kraft 2	Verpflanzung	Pflanzung Kraft 4	Saat Kraft 4
Sektion 1	3,7:1	4,3:1	2,5:1	2,7:1	4,0:1
Sektion 2	2,7:1	1,9:1	2,1:1	2,4:1	0,8:1
Sektion 3	3,8:1	6,5:1	8,0:1	5,6:1	2,6:1
Mittel der Sektionen (sx)	3,4:1 (0,60)	4,2:1 (2,31)	4,2:1 (3,30)	3,5:1 (1,76)	2,5:1 (1,60)

in Klammern Standardabweichung

Die Relationen zwischen Horizontal- und Vertikalwurzeln in Wurzelquerschnittfläche und Anzahl verdeutlichen das für die Eiche charakteristische Pfahlwurzelsystem. Besonders ausgeprägt ist dies bei den gesäten Bäumen der Kraft'schen Klasse 4 zu bemerken. Dort sind signifikante Unterschiede zwischen gesäten und gepflanzten Eichen festzustellen. Für die herrschenden Bäume kann dieses nicht nachgewiesen werden. Saat und Pflanzung unterscheiden sich nicht signifikant.

Kattenbühl

Tabelle 48 stellt die Relationen der horizontalen zu der vertikalen Wurzelquerschnittfläche und Anzahl dar. Bei diesen Beständen sind nur an einzelnen Bäumen Wurzeln in der dritten Sektion gefunden worden, daher findet für diese Distanz keine Verhältnisbetrachtung statt. Die gepflanzte Eiche besitzt für die erste und zweite Sektion etwa sechsmal so viele Horizontal- wie Vertikalwurzeln. Dabei zeigen die Horizontalwurzeln eine ebenfalls sechsmal so große Querschnittfläche. Die Saat I Eiche weist bei einer fünfmal so großen Horizontal- als Vertikalwurzelschnittfläche eine rund zehnmal so hohe Horizontalwurzelanzahl auf. Allerdings ist Erstgenanntes nur für die erste Sektion zutreffend. In der zweiten Sektion liegt das Querschnittflächenverhältnis bei 10 : 1. Bei den Saat II Eichen sind in der ersten Sektion fünf mal mehr Wurzeln in der Horizontalen als in der Vertikalen zu finden. Ihr Wurzelquerschnittflächenverhältnis in der ersten Sektion zeigt den, von allen Beständen, geringsten Wert von 3 : 1 (Pfahlwurzel).

Tabelle 48: Mittlere Relation der Horizontal- zu den Vertikalwurzeln (Anzahl) sowie der horizontalen zur vertikalen Wurzelquerschnittfläche (WQF); Kattenbühl, 13 jährige Eiche

	WQF			Anzahl		
	Pflanzung	Saat I	Saat II	Pflanzung	Saat I	Saat II
Sektion 1	6,7:1	4,7:1	3,29:1	6,4:1	9,6:1	5,7:1
Sektion 2	6,0:1	9,1:1	7,5:1	6,3:1	9,9:1	6,9:1

4.2.2.6 Wurzelvolumen

Durch die in Abschnitt 3.10.2.3 dargestellte Methode wurde das Wurzelvolumen berechnet.

Holzerode

Zur Bestimmung des Wurzelvolumens wurden für alle untersuchten Bäume Regressionsrechnungen durchgeführt (WQF in bezug zur Entfernung von der Stammbasis). Zwei Bäume in Holzerode werden aus der Betrachtung herausgenommen. Sie wiesen bei der Anpassung der Ausgleichsfunktionen ein Bestimmtheitsmaß unter 0,5 auf.

Die Horizontal-, Vertikal- und Gesamtwurzelvolumina werden in Tabelle 49 dargestellt. Signifikante Unterschiede des Wurzelvolumens sind zwischen Buche und Fichte festzustellen. Das größte Wurzelvolumen weist die Fichte im Mischbestand mit durchschnittlich 112 dm³ pro Baum auf. Die entsprechenden Werte sind bei der Fichte im Reinbestand um 20 %, bei der Buche im Reinbestand um 54 % und bei der im Mischbestand um 64 % geringer. Ein Unterschied zwischen den Fichtenkollektiven läßt sich beim Betrachten der Vertikalwurzeln nachweisen. Dabei zeigt die Fichte im Mischbestand ein dreimal so großes Volumen als im Reinbestand. Sie besitzt vertikal ein ähnliches Wurzelvolumen wie die Buche im Reinbestand. Diese zeigt jedoch in der horizontalen Wurzelrichtung ein 68 % geringeres Wurzelvolumen als die Fichte. Die Mischbestandsbuche weist horizontal nahezu das gleiche, vertikal dagegen 80 % weniger Volumen auf wie die Reinbestandsbuche.

Mit Variationskoeffizienten bis zu 100 % variieren die Volumenwerte der Vertikalwurzeln der Fichte im Mischbestand sehr.

Tabelle 49: Mittleres Horizontal-, Vertikal- und Gesamtwurzelvolumen je Baum mit Standardabweichung (sx); Holzerode, Fichte und Buche im Rein- und Mischbestand

Wurzelvolumen (dm ³)	Buche (sx)	Bu / Fi (sx)	Fichte (sx)	Fi / Bu (sx)
horizontal	28,9 (15,4)	28,1 (9,1)	83,1 (29,8)	90,5 (40,3)
vertikal	22,4 (9,0)	12,4 (11,9)	6,8 (6,0)	21,7 (21,9)
Gesamt (hor + vert)	51,3 (18,4)	40,5 (17,1)	89,9 (32,1)	112,2 (47,2)

Krebeck

Die Wurzeln der jüngsten Fichten besitzen ein Gesamtvolumen von 9 dm³ und die der ältesten eines von 50 dm³ (Tabelle 50). Das Wurzelvolumen steigt in Abhängigkeit vom Alter der Fichten von 21 zu 30 Jahren auf nahezu das Dreifache und von 30 zu 41 Jahren auf mehr als das Doppelte. Der Variationskoeffizient fällt vom jüngsten zum ältesten Bestand von 81 % auf 65 % ab.

Durchschnittlich entfallen 87 % (± 2) des Gesamtvolumens auf die Horizontalwurzeln und 13 % (± 2) auf die Vertikalwurzeln. Das Volumen der Horizontalwurzeln steigt von 21 zu 30 Jahren auf etwa das Dreifache und von 30 zu 41 Jahren auf das Doppelte. Die Variationskoeffizienten liegen zwischen 66 % und 85 %. Wiederum zeigt die älteste Fläche die geringste und die jüngste die höchste Variation. Etwas anders stellt sich das Volumen der Vertikalwurzeln dar. In Abhängigkeit vom Alter des Bestandes steigt das Volumen erst auf fast das Dreifache und dann auf mehr als das Doppelte. Der Variationskoeffizient erhöht sich in der Vertikalen auf über 100 %.

Tabelle 50: Mittleres Horizontal-, Vertikal- und Gesamtwurzelvolumen je Baum mit Standardabweichung (sx); Krebeck, Fichte im Reinbestand

Wurzelvolumen (dm ³)	Fi 21	(sx)	Fi 30	(sx)	Fi 41	(sx)
horizontal	7,5	(6,4)	18,6	(13,2)	41,7	(28,0)
vertikal	1,1	(1,3)	2,9	(3,5)	5,0	(6,3)
Gesamt (hor + vert)	8,6	(7,0)	21,5	(14,2)	46,7	(30,2)

Knesebeck

Das Wurzelvolumen nimmt im Schnitt von 20 zu 31 Jahren von 1,8 dm³ pro Fichte um mehr als das Zehnfache und von 31 zu 50 Jahren auf rund das Dreifache zu (Tabelle 51).

Tabelle 51: Mittleres Horizontal-, Vertikal- und Gesamtwurzelvolumen je Baum mit Standardabweichung (sx); Knesebeck; Fichte im Reinbestand

Wurzelvolumen (dm ³)	Fichte 20 (sx)	Fichte 31 (sx)	Fichte 50 (sx)
horizontal	1,6 (1,5)	17,1 (16,2)	58,3 (38,5)
vertikal	0,2 (0,2)	3,2 (3,2)	12,8 (7,2)
Gesamt (hor + vert)	1,8 (1,5)	20,3 (18,6)	71,1 (41,8)

Das Volumen der Horizontalwurzeln der Kiefern (Tabelle 52) steigt in Abhängigkeit vom Alter von 20 auf 33 Jahre um mehr als das Zehnfache an, bei den Vertikalwurzeln auf das Dreifache. Von 33 zu 47 Jahren erhöht sich das Horizontalwurzelvolumen auf das Fünffache und das Vertikalwurzelvolumen um das Zehnfache. Die absoluten Werte des Gesamtvolumens liegen zwischen 10 dm³, bei der jüngsten und 50 dm³ bei der ältesten Kiefer. Die größte Streuung der Werte ist bei den 33-jährigen Kiefern zu beobachten. Der entsprechende Variationskoeffizient liegt bei 90 %.

Tabelle 52: Mittleres Horizontal-, Vertikal- und Gesamtwurzelvolumen mit Standardabweichung (sx); Knesebeck, Kiefer im Reinbestand

Wurzelvolumen (dm ³)	Kiefer 20 (sx)	Kiefer 33 (sx)	Kiefer 47 (sx)
horizontal	0,5 (0,6)	6,7 (7,8)	31,1 (25,1)
vertikal	0,6 (0,4)	1,7 (2,2)	19,2 (10,9)
Gesamt (hor + vert)	1,1 (0,9)	8,4 (8,1)	50,3 (32,5)

Holzminden

Die Volumina der Horizontal- und Vertikalwurzeln werden, differenziert nach Kraft'scher Klasse, in Tabelle 53 und 54 dargestellt.

Der herrschenden Saateichen zeigen ein größeres Wurzelvolumen als die herrschenden Pflanz-eichen. Dieses ist in der horizontalen Wurzelrichtung bei den Eichen der Saat signifikant höher als bei denen der Pflanzung, in der vertikalen hingegen nicht. Erstere besitzen ein Wurzelvolumen von 13,8 dm³, letztere eines von 10,7 dm³. Die verpflanzten Bäume weisen horizontal das halbe und vertikal ein 17 % geringeres Wurzelvolumen auf als die des Saatbestandes. Mit Abfall der sozialen Stellung verringert sich das Wurzelvolumen bei den Eichen der Pflanzung um insgesamt 60 %. Bei der Saat zeigen die beherrschten Eichen horizontal 87 % und vertikal

40 % weniger Wurzelvolumen als die herrschenden. Die Unterschiede zwischen Saat- und Pflanzzeichen der Kraft'schen Klasse 4 liegen bei 12 %.

*Tabelle 53: Mittleres Horizontal-, Vertikal- und Gesamtwurzelvolumen je Baum mit Standardabweichung (sx); Holzminden, Eiche, Kraft'sche Klasse 2 (*signifikant → zu)*

Wurzelvolumen (dm ³)	Pflanzung (sx)		Saat (sx)		Verpflanzung (sx)	
	Kraft 2		Kraft 2		Kraft 2	
horizontal	8,1	(2,5)* →	12,7	(3,4)	6,2	(2,4)
vertikal	2,6	(1,6)	3,6	(1,8)	3,0	(2,1)
Gesamt (hor + vert)	10,7	(6,6)	13,8	(4,6)	9,2	(2,8)

*Tabelle 54: Mittleres Horizontal-, Vertikal- und Gesamtwurzelvolumen je Baum mit Standardabweichung (sx); Holzminden, Eiche, Kraft'sche Klasse 4 (*signifikant → zu)*

Wurzelvolumen (dm ³)	Pflanzung (sx)		Saat (sx)	
	Kraft 4		Kraft 4	
horizontal	3,3	(1,5) * →	1,6	(1,3)
vertikal	1,0	(0,5) * →	2,2	(0,7)
Gesamt (hor + vert)	4,3	(308) * →	3,8	(1,5)

Kattenbühl

Mit 2,2 dm³ besitzen die gepflanzten Eichen das signifikant größte Wurzelvolumen (Tabelle 55). Im Schnitt zeigen sie in horizontaler Richtung ein um 27 % größeres Wurzelvolumen als die gesäten Bäume (Saat I). Das mittlere Volumen der Vertikalwurzeln ist in allen Beständen etwa gleich groß. Bei den gepflanzten Eichen haben die Horizontalwurzeln einen durchschnittlichen Anteil von 86 % am Gesamtwurzelvolumen. Die entsprechenden Werte betragen bei den Eichen des Saat I Bestandes 83 % und bei den Saat II Eichen 77 %. Die Vertikalwurzeln haben in derselben Reihenfolge Anteile von 14 %, 17 % und 23 % am Gesamtwurzelvolumen.

Die Variationskoeffizienten des Gesamtwurzelvolumens liegen zwischen 71 % und 76 %. Die Werte des vertikalen Wurzelvolumens sind größer als 100 %. Die des horizontalen Wurzelvolumens variieren bis zu 80 %.

*Tabelle 55: Mittleres Horizontal-, Vertikal- und Gesamtwurzelvolumen je Baum mit Standardabweichung (sx); Kattenbühl, Eiche (*signifikant → zu)*

Wurzelvolumen (dm ³)	Pflanzung (sx)	Saat I (sx)	Saat II (sx)
horizontal	1,9 (1,5) *	1,5 (1,2)	0,7 → (0,5)
vertikal	0,3 (0,5)	0,3 (0,3)	0,2 (0,3)
Gesamt (hor + vert)	2,2 (1,6) *	1,8 (1,3)	0,9 → (0,6)

4.2.2.7 Wurzelvolumen differenziert nach sozialer Stellung

In Abb. 25 wird beispielhaft für die Baumarten Fichte und Kiefer das Wurzelvolumen der Bäume unterschiedlicher sozialer Stellungen dargestellt. Bei den Fichten ist durchschnittlich von der ersten zur zweiten Kraft'schen Klasse eine Abnahme des Volumens um 30 % (± 10) festzustellen. Dies trifft ebenfalls für die nicht dargestellten Eichen zu. Die Kiefern zeigen in diesem Bereich eine um 20 % (± 6) stärkere Verminderung. Mit weiterem Abfall der sozialen Stellung von Klasse zu Klasse findet bei allen Baumarten eine Reduktion des Wurzelvolumens erst um rund 50 % und dann um 75 % statt. Die Bäume der Kraft'schen Klasse 4 haben bezüglich ihres Wurzelvolumens im Vergleich zu den stärkeren Bäumen nur eine geringe Bedeutung. Bei allen Beständen liegt die Variation innerhalb der Kraft'schen Klassen zwischen 30 % und 50 %. Je unterdrückter der Baum, desto größer ist die Streuung der Daten. Bei nahezu allen Beständen unterscheiden sich die Bäume der Kraft'schen Klassen 1 und 2 und die der Klassen 3 und 4 nicht signifikant. Zwischen diesen beiden Gruppen sind jedoch fast immer signifikante Unterschiede festzustellen.

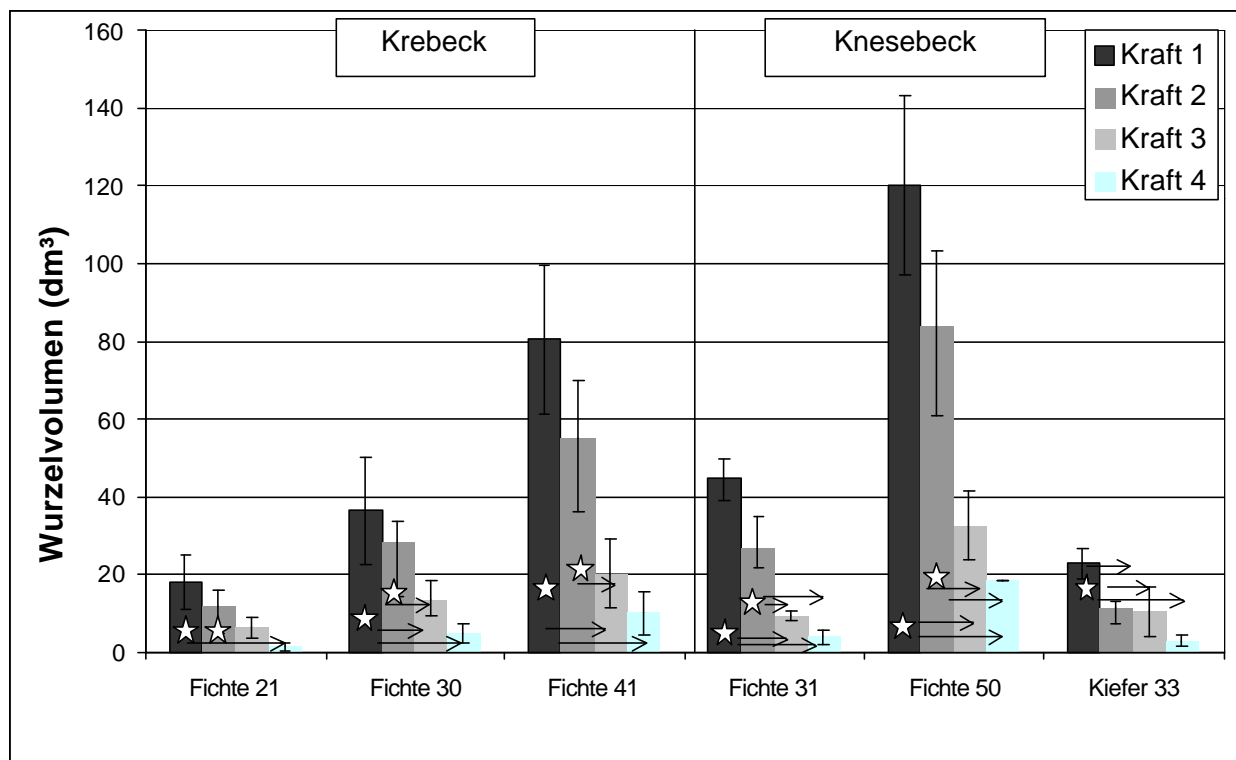


Abb. 25: Mittleres Wurzelvolumen mit Standardabweichung (s_x) differenziert nach sozialer Stellung der Bäume (☆ signifikant → zu); Krebeck und Knesebeck; Fichte und Kiefer

4.2.2.8 Wurzelvolumen der Probebäume in einem definierten Bodenraum

Durch die Aufnahmetechnik wird für die Eiche ein rund 1 m³ großer Bodenraum beschrieben, der sich unterhalb des Wurzelstockes befindet. Die prozentualen Anteile, die die Wurzel in diesem Bodenraum einnimmt, sind beispielhaft für die Eiche aus Holzminden in Tabelle 56 dargestellt. Durchschnittlich ist ein sehr geringer Prozentsatz des Bodens mit Grobwurzeln durchzogen. Die Werte betragen bei den herrschenden Bäumen etwa 1 % und bei den beherrschten 0,3 % bis 0,4 %.

Tabelle 56: Mittlere Wurzelanteile (Vol. %) pro m³ Boden, differenziert nach Kraft'schen Klassen; Holzminden; 22 jährige Eiche

Kraft'sche Klasse 2	Volumen (%)	Kraft'sche Klasse 4	Volumen (%)
Pflanzung	0,97	Pflanzung	0,39
Saat	1,43	Saat	0,35
Verpflanzung	0,84		

Für die anderen Bestände sind die mittleren prozentualen Anteile der Grobwurzeln pro m³ Boden in Tabelle 57 dargestellt. Dabei durchwurzeln die älteren Fichten mit 0,6 m³ bis 1,4 m³ am meisten Boden. Die etwa gleichalten (±10 Jahre) Buchen zeigen eine halb so große Bodenerschließung.

Tabelle 57: Mittlere Wurzelanteile (Vol. %) pro m³ Boden

Volumen (%) pro m ³ Boden				
Holzerode	Bu / Bu	Bu / Fi	Fi / Fi	Fi / Bu
Fichte und Buche	0,6	0,5	1,1	1,4
Krebeck	Fi 21	Fi 30	Fi 41	
Fichte	0,1	0,3	0,6	
Knesebeck	Fichte 20	Fichte 31	Fichte 50	
Fichte und Kiefer	0,02	0,3	0,9	
	Kiefer 20	Kiefer 33	Kiefer 47	
	0,01	0,1	0,6	
Holzminden	Pflanzung	Saat	Verpflanzung	
Eiche	0,7	0,8	0,8	
Kattenbühl	Pflanzung	Saat I	Saat II	
Eiche	0,2	0,2	0,1	

4.2.2.9 Wurzeloberfläche

Nach der Berechnung der für die Formel der Wurzeloberfläche notwendigen Parameter wird diese als Mittelwert kalkuliert. Durch die Multiplikation des Mittelwertes mit der Gesamtanzahl der Wurzeln pro Baum erhält man die Grobwurzeloberfläche eines Wurzelsystems. Durch

die Mittelwertbetrachtung wird die Wurzeloberfläche tendenziell unterschätzt. Gerade die gering dimensionierten, oberflächenvergrößernden Wurzeln werden nicht betrachtet, so daß die berechneten Daten nur als grobe Schätzwerte aufgefaßt werden dürfen. Abb. 26 und Abb. 27 zeigen für Fichten-, Buchen- und Kiefernbestände die prozentualen und absoluten Anteile der Horizontal- und Vertikalwurzeln an der Gesamtoberfläche des Wurzelsystems. Abb. 28 und Abb. 29 stellen Entsprechendes für die Eichenbestände dar.

Holzerode

Die Fichten im Mischbestand haben eine Wurzeloberfläche von 749 dm². Dabei weisen sie eine 55 % größere Wurzeloberfläche auf als die Fichten im Reinbestand. Diese besitzen eine 16 % größere Wurzeloberfläche als die Buchen im Mischbestand und eine 6 % geringere als die im Reinbestand. Letztgenannte zeigen mit 40 % den höchsten Anteil an vertikalen Wurzeln, die Fichte im Reinbestand zeigt mit 21 % den geringsten.

Krebeck

Beim Vergleich der 21 und 30 jährigen Fichten erhöht sich die Wurzeloberfläche von 165 dm² um 67 % auf 276 dm². Bis zum Alter von 41 Jahren vergrößert sie sich um 40 % auf 387 dm². Der Anteil der Vertikalwurzeloberfläche an der Gesamtoberfläche fällt von 21- zu 41 jährig von etwa 20 % auf 15 % ab.

Knesebeck

Die Gesamtoberfläche der Wurzeln der Fichte steigt mit zunehmendem Alter von 20 (64 dm²) auf 31 Jahre (249 dm²) auf das Vierfache und von 31 auf 50 Jahre (580 dm²) auf mehr als das Doppelte.

Die Wurzeloberfläche der Kiefer vergrößert sich von 20 (37 dm²) zu 30 Jahren (167 dm²) um das Vierfache und von 33 zu 47 Jahren (426 dm²) auf mehr als das Doppelte.

Differenziert nach Wurzelrichtung, liegt der Anteil der vertikalen Wurzeloberfläche bei den drei Fichten- und Kiefernbeständen bei 20 %.

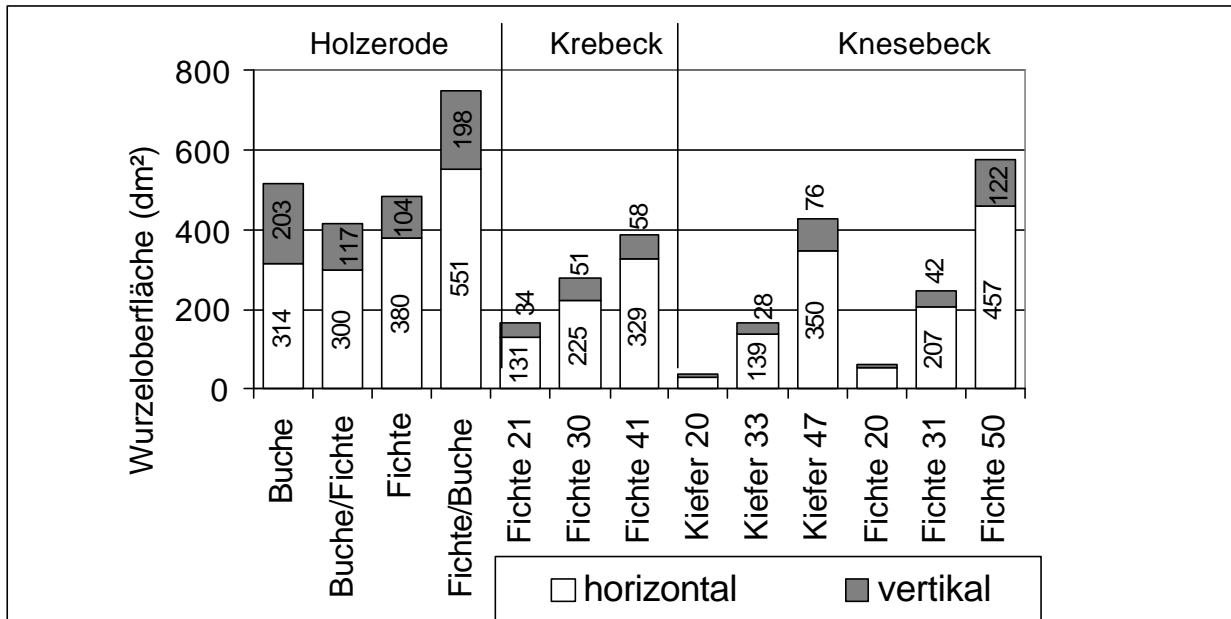


Abb. 26: Oberfläche (dm²) der horizontalen und vertikalen Wurzeln, Fichte, Buche und Kiefer; Holzzerode, Krebeck und Knesebeck

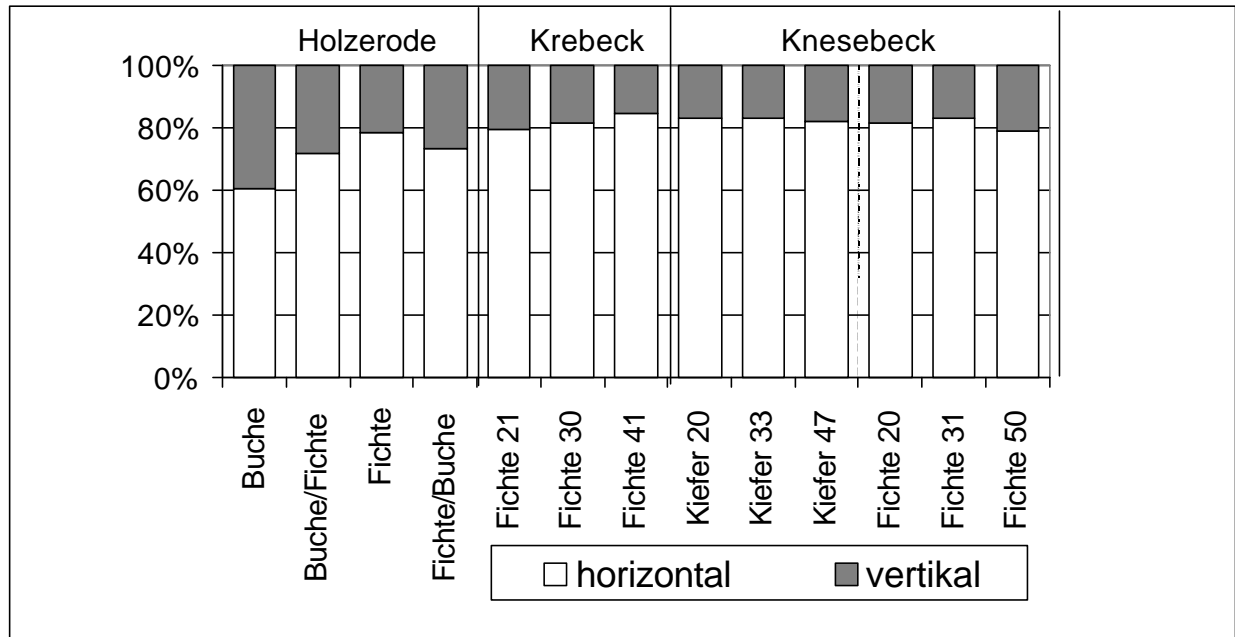


Abb. 27: Wurzeloberfläche (%), differenziert nach Wurzelrichtung (horizontal und vertikal); Fichte, Buche und Kiefer; Holzzerode, Krebeck und Knesebeck

Holzminden

Die Abbildungen 28 und 29 zeigen die Oberfläche der horizontalen und vertikalen Wurzeln der Eichen. Die Saateichen besitzen eine Gesamtwurzeloberfläche von 143 dm² und somit eine 8 % größere Oberfläche als die gepflanzten und eine 28 % größere als die verpflanzten Eichen. Die vertikalen Wurzeln der gepflanzten und der gesäten Eichen haben einen Anteil von rund 20 % an der gesamten Wurzeloberfläche. Bei den verpflanzten Eichen entfallen 40 % der gesamten Wurzeloberfläche auf die vertikalen und 60 % auf die horizontalen Wurzeln.

Kattenbühl

In Kattenbühl weisen die Wurzeln der gepflanzten Eichen die größte Oberfläche mit 144 dm² auf (Abbildungen 28 und 29). Die Saat I Eiche besitzt mit 91 dm² eine um 37 % kleinere Wurzeloberfläche. Die Saat II Eiche zeigt eine Wurzeloberfläche von 56 dm². Der Anteil der Vertikalwurzeln steigt von den Pflanzeichen zu den Eichen der Saat II Fläche von 10 % auf 17 % an.

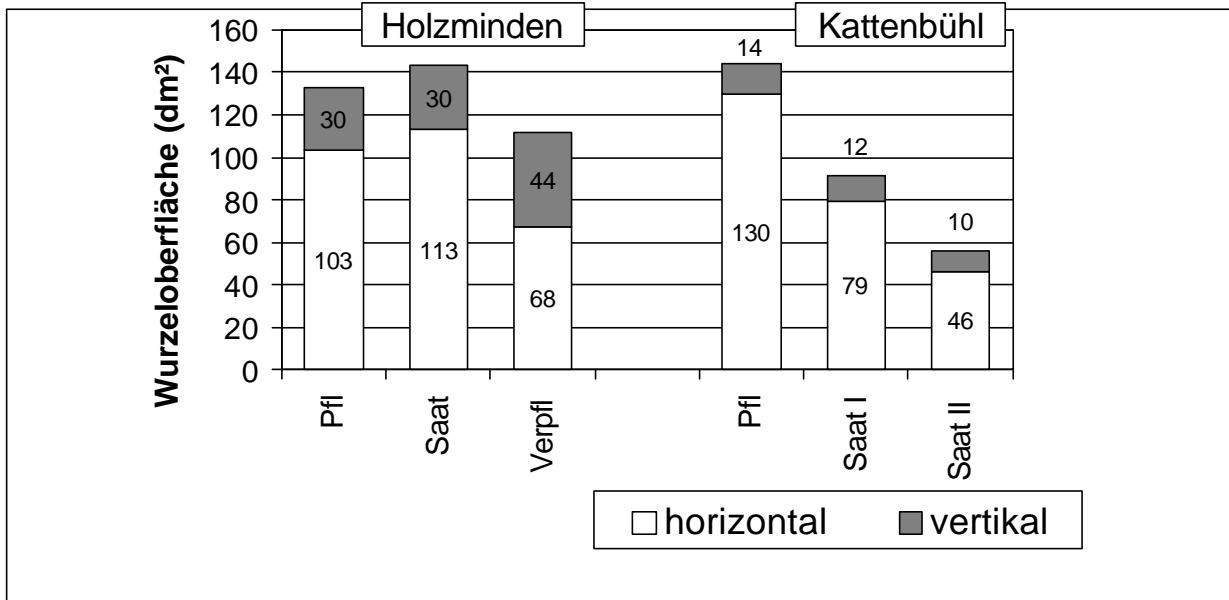


Abb. 28: Absolute Verteilung der Wurzeloberfläche (dm²) auf horizontale und vertikale Wurzeln; 13- und 22 jährige Eiche, Kattenbühl und Holzminden

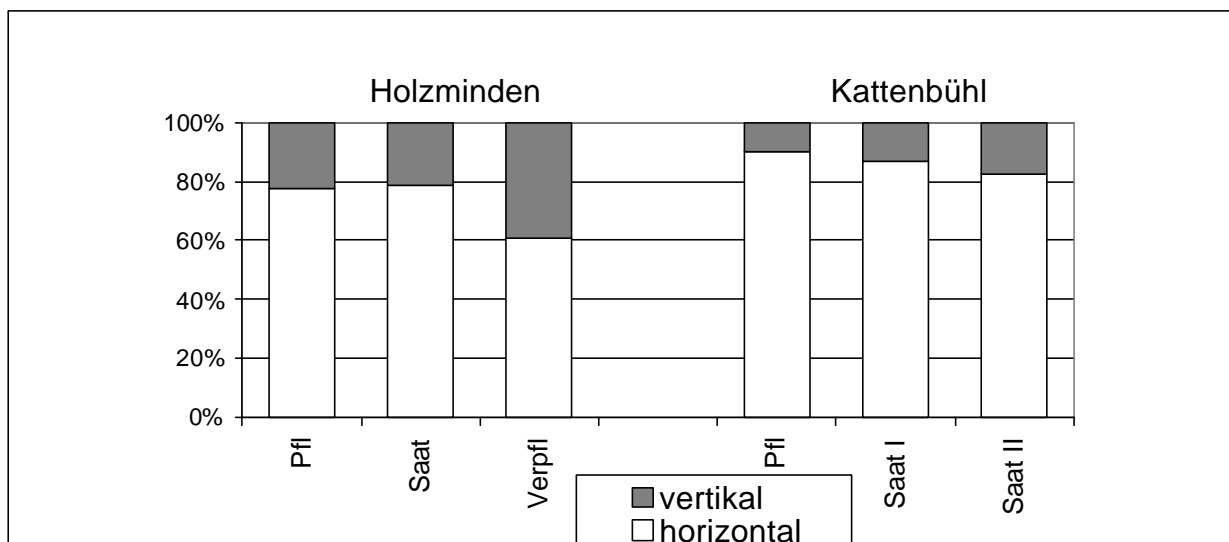


Abb. 29: Prozentuale Verteilung der Wurzeloberfläche auf horizontale und vertikale Wurzeln; 13- und 22 jährige Eichen, Kattenbühl und Holzminden

4.2.2.10 Feinwurzelanzahl (FW)

In Abbildung 30 und 31 sind die Bestandesdurchschnittswerte der Feinwurzeln (FW) dargestellt, die sich an den vertikal und horizontal verlaufenden Grobwurzeln befinden. Tabelle 58 zeigt die Anzahl der Feinwurzeln pro Einzelwurzel.

Holzerode

Die Fichten im Reinbestand besitzen durchschnittlich über 1550 Feinwurzeln pro Baum. Damit besitzen sie rund 150 Feinwurzeln mehr als die Buchen im Reinbestand. Beim Vergleich der Mischbestandsflächen weist die Fichte mit insgesamt 650 Feinwurzeln 150 Feinwurzeln mehr auf als die Buche (Abb. 30).

Die Reinbestände weisen an den Horizontal- und Vertikalwurzeln die höchste Feinwurzelmenge auf. Bei der Fichte im Reinbestand ist die Anzahl Feinwurzeln, die sich an den horizontalen Wurzeln befindet, signifikant höher als die der Buchen und Fichten der anderen Flächen (1250 zu 350 und 750). Die Buche im Reinbestand (650 FW) zeigt an den Vertikalwurzeln signifikant höhere Mengen an Feinwurzel als die anderen Bestände (150-300 FW).

Abschließend wird die geschätzte Feinwurzelmenge pro Einzelwurzel des Wurzelsystems (Tabelle 58) betrachtet. Die Mischbestandsbuche besitzt horizontal mit 25 Feinwurzeln signifikant weniger Feinwurzeln pro Wurzel als die anderen Bestände. In der Vertikalen zeigt die reine Buche signifikant höhere Feinwurzeln (60 FW) pro Einzelwurzeln als die gemischte Fichte.

Krebeck

Die Feinwurzelmenge eines Wurzelsystems der Fichte nimmt vom 21 zum 30-jährigen Bestand um rund 30 % zu (Abb. 30). Sie steigt von 250 FW auf 300 FW an. Von 30 Jahre bis zum Alter von 41 erhöht sich die Gesamtmenge um 70 %. Beim Betrachten der unterschiedlichen Wurzelrichtungen besitzt der 41-jährige Fichte an den Horizontalwurzeln signifikant mehr Feinwurzeln als die Bäume der anderen beiden Flächen. Mit Anstieg des Alters erhöhte sich die Menge von 200 FW auf 450 FW. Für die vertikalen Wurzeln liegen die Werte für alle Bestände bei 50 FW. Es ist keine Zunahme in Abhängigkeit vom Alter festzustellen.

Die Anzahl der Feinwurzeln pro horizontale Einzelwurzel ist bei den 21-jährigen Fichten um 40 % geringer als bei den 30-jährigen (Tabelle 58). Von 31- zu 41-jährig steigt die Menge auf das Doppelte an. Die absoluten Werte liegen zwischen 15 bzw. 50 Feinwurzeln pro Einzelwurzel. Für die vertikale Wurzel steigt die Feinwurzelanzahl in gleicher Reihenfolge erst gar nicht und dann um das Doppelte. Die 41-jährige Fichte zeigt mit 30 Feinwurzeln eine signifikant höhere Anzahl pro vertikale Wurzel als die jüngere Fichten mit 10 Feinwurzeln.

Knesebeck

Die Gesamtzahl der Feinwurzeln für ein Wurzelsystem der Fichte steigt von 20 auf 31 Jahre auf nahezu das Dreifache und von 31 auf 50 Jahre um rund 40 % (Abb. 30). Die Fichten haben mit 21 Jahren 150 Feinwurzeln, mit 31 Jahren 400 und mit 50 Jahren 550. Getrennt nach Wurzelrichtung, weisen die Vertikalwurzeln zwischen 50 % und 70 % weniger Feinwurzeln auf als die Horizontalwurzeln.

Die horizontale Einzelwurzel (Tabelle 58) hat bei dem jungen Bestand 10 Feinwurzeln-, die 31-jährige Fichte zeigt nahezu das Dreifache- und die 50-jährige das Vierfache. Die Anzahl der Feinwurzeln der vertikalen Richtung nimmt vom jüngeren (10 FW) zum mittelalten (15 FW) und vom mittelalten zum älteren Bestand (40 FW) um 50 % zu.

Bei den Kiefern (Abb. 30) steigt die Anzahl der Feinwurzeln pro Wurzelsystem mit Zunahme des Alters von 20 Jahre (50 FW) auf 33 Jahre um das Fünffache und von 33 auf 47 Jahre um

17 %. Dabei unterscheiden sich die Wurzeln der jüngeren Kiefern in ihrer Feinwurzelmenge signifikant von denen der beiden anderen Bestände. Die Differenz zwischen der Feinwurzelanzahl an den Horizontal- und Vertikalwurzeln ist bei den Kiefern schwächer als bei den Fichten. Es sind maximal doppelt so viele Feinwurzeln an den Horizontalwurzeln zu finden wie an den Vertikalwurzeln.

Die Einzelwurzeln der Kiefer (Tabelle 58) zeigen in der Horizontalen 50 % weniger Feinwurzeln als in der Vertikalen. Dabei besitzen die Kiefern abhängig vom Alter zwischen 5 und 20 Feinwurzeln pro horizontale und zwischen 10 und 40 pro vertikale Einzelwurzel. Signifikant weniger Feinwurzeln pro Einzelwurzel zeigt der 20-jährige Bestand gegenüber den anderen Beständen sowohl horizontal als auch vertikal.

Im Vergleich der 30-jährigen Fichten auf Sand (Knesebeck) mit denen auf Lehm (Krebeck) weisen die Wurzelsysteme der ersteren 100 Feinwurzeln mehr auf als die letzteren. Die horizontalen Wurzeln der 30-jährigen Fichten auf Sand haben 16 % mehr Feinwurzeln als die der Fichten auf Lehm. Die Fichte auf Lehm besitzt an den vertikalen Wurzeln halb so viele Feinwurzeln wie die auf Sand.

Die Anzahl der Feinwurzeln, die sich an den horizontalen Einzelwurzeln befinden, unterscheidet sich im Vergleich der beiden Flächen nicht voneinander. An der vertikalen Einzelwurzel zeigt die 31-jährige Fichte auf Sand 25 % mehr Feinwurzeln als die auf Lehm.

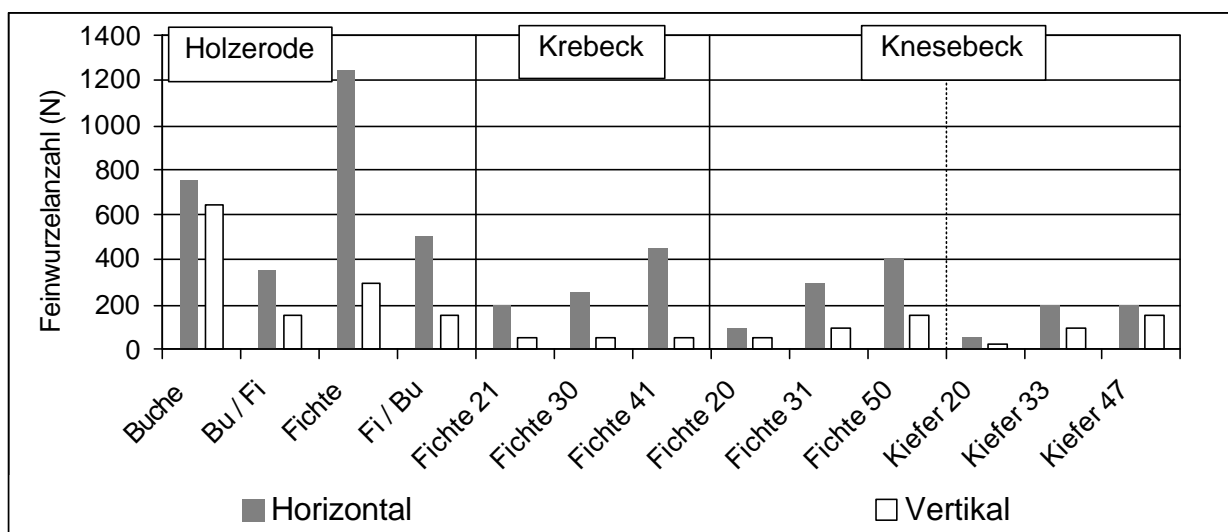


Abb. 30: Geschätzte Anzahl Feinwurzeln pro Wurzelsystem; Holzerode (Fichte und Buche), Krebeck (Fichte) und Knesebeck (Fichte und Kiefer)

Holzminden

Nach Abb. 31 sind bei den Wurzelsystemen der Saateichen (1350 FW) signifikant höhere Feinwurzelmenngen gegenüber den Pflanz- und dem Verpflanzungseichen zu finden. Differenziert nach sozialer Stellung, sind bei den herrschenden Saateichen horizontal (1100 FW) signifikant doppelt so viele Feinwurzeln zu finden wie bei den herrschenden Eichen der Pflanzung und der Verpflanzung. An den Vertikalwurzeln sind bei den gepflanzten- und den verpflanzten Bäumen im Vergleich zu den gesäten Eichen (250 FW) etwa halb so viele Feinwurzeln vorhanden. Bei den beherrschten Bäumen zeigt die gesäte Eiche eine doppelt so große (signifikant) horizontale und eine viermal so hohe vertikale Feinwurzelmenge als die gepflanzte.

Die Mittelwerte der Kraft'schen Klassen 2 und 4 für die Feinwurzeln einer Einzelwurzel sind in Tabelle 58 dargestellt. Dabei zeigt die Horizontalwurzel aller Bestände je rund 25 Feinwurzeln-, die Vertikalwurzel zwischen 15 für die Pflanzung und 40 für die Saat. Differenziert nach Kraft'scher Klasse (Tabelle ist nicht dargestellt) besitzt die Einzelwurzel bei den herrschenden Pflanz- und Saateichen in der Horizontalen 30-, und bei den herrschenden verpflanzten Eichen 20 Feinwurzeln. In der Vertikalen haben die gepflanzten und verpflanzten Eichen 20 Feinwurzeln und die Saateichen 30. Eine durchschnittliche Horizontal- oder Vertikalwurzel der beherrschten gepflanzten Eiche weist 10 auf, die der gesäten besitzt an einer Horizontalwurzel durchschnittlich 20 und an der Vertikalwurzel 40 Feinwurzeln. Die Feinwurzeln, die sich an den vertikalen Wurzeln der gesäten und gepflanzten Eichen befinden, unterscheiden sich signifikant.

Kattenbühl

Das Wurzelsystem der gepflanzten Eiche zeigt horizontal rund 50 % mehr Feinwurzeln als das der Eiche des Saat I Bestandes (Abb. 31). Letztere besitzt 27 % mehr Feinwurzeln als die Eiche der Saat II Fläche. Vertikal zeigen die Wurzeln der gepflanzten genauso viele Feinwurzeln wie die der Saat II- Eiche und als die Eiche des Saat I Bestandes.

Die gepflanzte Eiche (Tabelle 58) besitzt pro horizontal verlaufende Einzelwurzel 35 Feinwurzeln, in der Vertikalen sind es dagegen nur 20. Sie weist horizontal 17 % mehr Feinwurzeln auf als die Saat I Eiche und die Saat II- Eiche. Für die vertikalen Einzelwurzeln zeigen alle Bestände ähnliche Feinwurzelmengen pro Einzelwurzel.

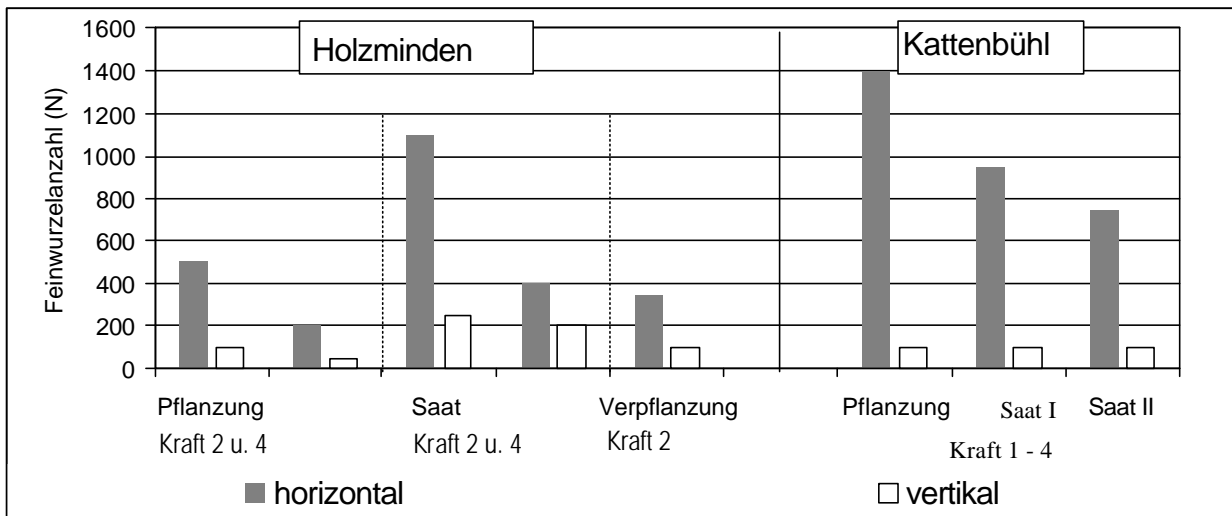


Abb. 31: Mittlere geschätzte Anzahl Feinwurzeln pro Baum, differenziert nach Kraft'schen Klassen; Holzminden, Kattenbühl; 13- und 22 jährige Eiche

Tabelle 58: Mittlere Anzahl Feinwurzeln und Standardabweichung (sx) pro Einzelwurzel eines Wurzelsystems

		Bestand	hor (sx)	vert (sx)			Bestand	hor (sx)	vert (sx)
Holzerode		Buche	60 (40)	60 (20)	Knesebeck		Kiefer 47	20 (5,84)	40 (30)
		Bu/Fi	25 (20)	30 (30)			Kiefer 33	10 (8,71)	20 (20)
		Fichte	60 (20)	30 (20)			Kiefer 20	5 (3,35)	10 (8)
		Fi/Bu	65 (30)	35 (20)					
Krebeck		Fichte 41	50 (25)	30 (30)	Holz- minden		Pflanzung	20 (11,72)	15 (8)
		Fichte 30	25 (10)	10 (5)			Saat	25 (10,10)	40 (25)
		Fichte 21	15 (5)	10 (8)			Verpflanzung	25 (8,06)	20 (5)
Knese- beck		Fichte 50	40 (20)	40 (25)	Katten- bühl		Pflanzung	35 (20)	20 (10)
		Fichte 31	25 (15)	15 (10)			Saat I	30 (15)	20 (10)
		Fichte 20	10 (5)	10 (5)			Saat II	30 (15)	20 (20)

4.3 Sproß / Wurzelbeziehungen

4.3.1 Beziehungen zwischen dem "HEGYI-Index" und dem Wurzelvolumen

Der berechnete HEGYI-Index wird nachfolgend für alle untersuchten Probestämme mit dem Wurzelvolumen in Beziehung gesetzt. Die dabei errechneten Funktionen mit den dazu gehörigen Bestimmtheitsmaßen sind in Tabelle 59, differenziert nach Beständen, zusammengestellt. Für die Daten der nicht dargestellten Flächen wurden Regressionen berechnet, deren Bestimmtheitsmaße unter 0,4 liegen. In Abb. 32 wird beispielhaft für den 41-jährigen Fichtenbestand in Krebeck die Beziehung zwischen HEGYI-Index und Wurzelvolumen dargestellt. Die Kurve fällt mit Anstieg des HEGYI-Indexes degressiv ab. Das Wurzelvolumen wird mit zunehmender Nähe und Stärke des Nachbarbaumes überproportional geringer. Ein ähnlicher Kurvenverlauf kann bei allen in Tabelle 59 aufgeführten Beständen festgestellt werden. Bei einem HEGYI-Index von 3,0 nimmt das Wurzelvolumen nahezu für alle Bestände nicht mehr weiter ab. Ausnahmen bilden die Saatbestände der Eiche, bei denen dieser Punkt erst bei einem Index von 4,0 erreicht wird.

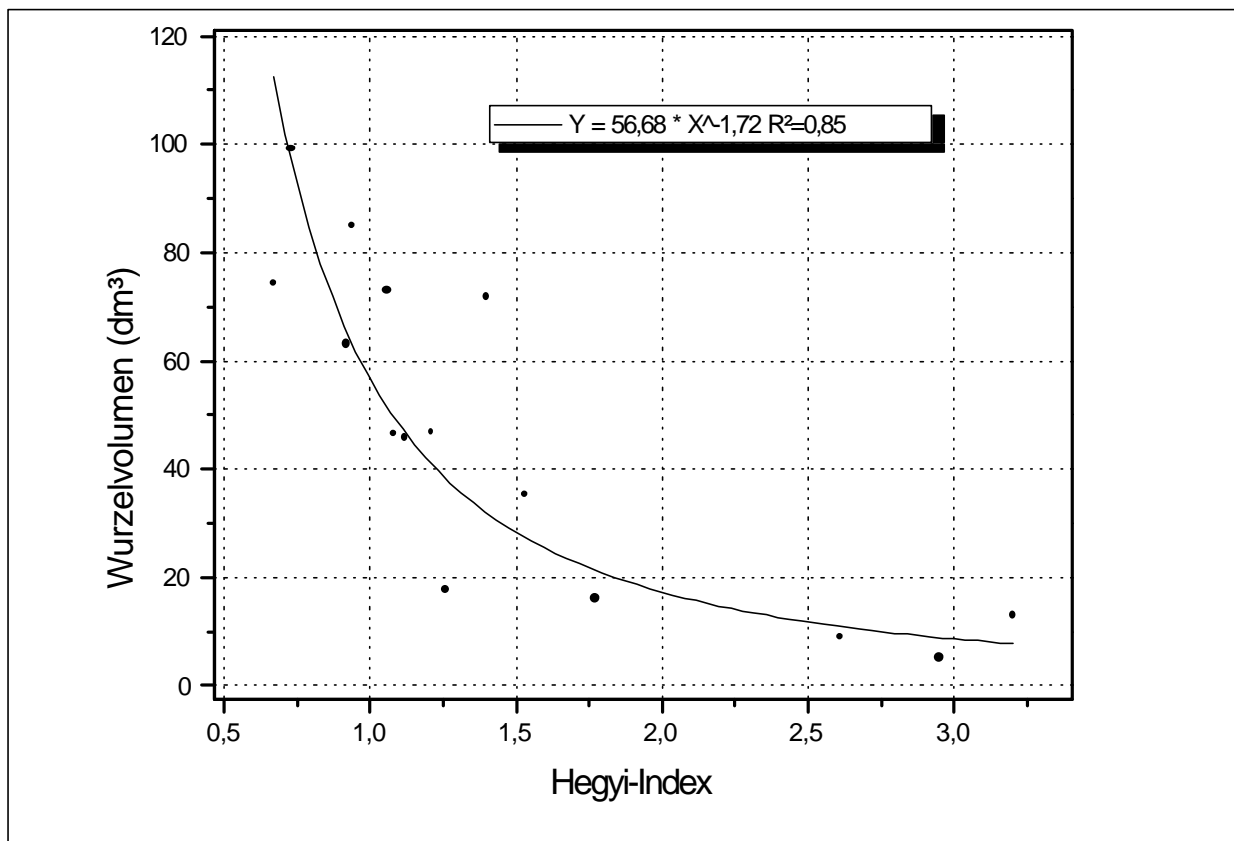


Abb. 32: Regression zwischen dem HEGYI-Index und dem Wurzelvolumen pro Baum am Beispiel eines 41-jährigen Fichtenbestandes

Tabelle 59: Funktionen der Beziehungen zwischen HEGYI-Index (X) und Wurzelvolumen (Y)

Fläche	Funktion	R ²
Buche	$Y = 1/(0,008+0,007*X)$	0,60
Buche / Fichte	$Y = 1/(-1,65+ 1,27*X)$	0,41
Fichte / Buche	$Y = 492* \text{EXP}(-1,07*X)$	0,83
Fichte 21	$Y = 19,3-14,2*\text{LOG}(X)$	0,73
Fichte 30	$Y = 62,8* \text{EXP}(-0,80*X)$	0,56
Fichte 41	$Y = 56,7* X^{-1,72}$	0,85
Kiefer 33	$Y = 2,09+15,4/X$	0,82
Fichte 31	$Y = -19,16 +58,03/X$	0,67
Fichte 50	$Y = 55,83 *^{-1,49}B$	0,74
Holzminden Saat	$Y = -2,71+30,23/X$	0,56
Kattenbühl Saat II	$Y = 1/(-4,07+1,75*X)$	0,79

4.3.2 Beziehungen zwischen ober- und unterirdischen Parametern

4.3.2.1 Verhältnis Stammvolumen zu Wurzelvolumen

Abb. 33 stellt die lineare Funktion dar, die die Beziehung zwischen Stammvolumen und Wurzelvolumen ($R^2=0,86$) für alle 262 untersuchten Bäume beschreibt.

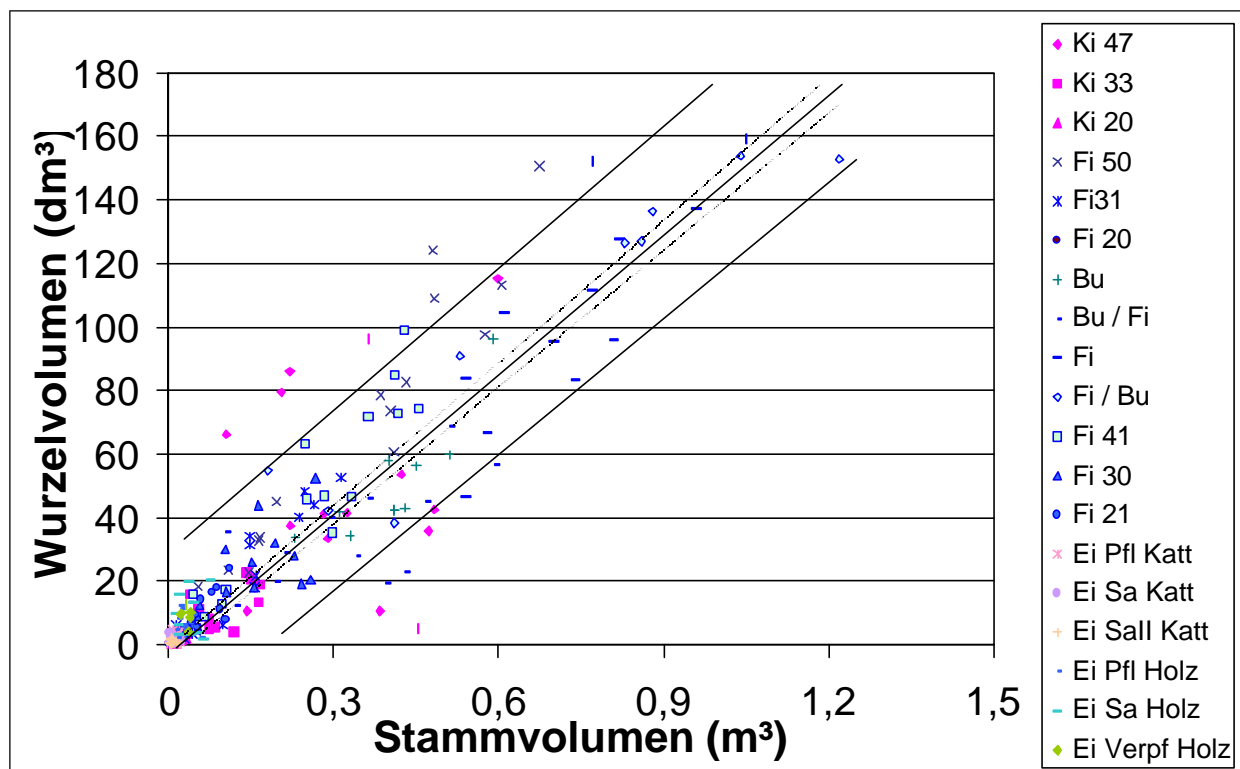


Abb. 33: Beziehung zwischen Wurzelvolumen (dm^3) und Stammvolumen (m^3) auf der Grundlage von allen 262 untersuchten Bäumen (Fichte, Buche, Kiefer und Eiche 14 bis 65-jährig), ——— 95 % Vertrauensintervall (Gerade); 95 % Vertrauensintervall (Daten); $R^2=0,86$; $y=143,58+1,89x$

Da die Beziehung nicht differenziert nach Baumart und Alter durchgeführt ist, gibt sie nur einen allgemeinen groben Zusammenhang wieder. Die Daten der einzelnen Bestände zeigen keine signifikanten Unterschiede (Kovarianzanalyse mit Test auf Parallelität) zu denen der in Abb. 33 dargestellten Funktion. Um einen tieferen Einblick gewinnen zu können, wird zum einen ermittelt, wie viele Probestämme oberhalb oder unterhalb der in Abb. 33 dargestellten Funktion liegen (Abb. 34_{Buche, Fichte, Kiefer}, Abb. 35_{Eiche}). Zum anderen wird mit der Funktion berechnet, welches Wurzelvolumen bei dem real aufgenommenen Stammvolumen der Probestämme vorliegt. Anhand dieses Wertes kann die durchschnittliche prozentuale Abweichung der Bestandesdaten von den durch die Funktion hergeleiteten kalkuliert werden (Abb. 34, Abb. 35).

Dabei ergibt sich für drei Buchen des Mischbestandes aus Holzerode eine mittlere prozentuale Abweichung der Punkte, die über der Ausgleichsfunktion liegen, von fast 60 %. Unterhalb der Kurve befinden sich die Werte der restlichen neun Probestämme mit einer Differenz von 32 %. Dies bedeutet, daß die Streuung des Wurzelvolumens bei der Buche im Mischbestand größer ist als bei der Buche des Reinbestandes.

Bei den Fichten und Kiefern der Flächen aus Krebeck und Knesebeck kann festgestellt werden, daß mit zunehmendem Alter die Anzahl der Bäume steigt, deren Werte oberhalb der Kurve liegen. Dabei nimmt die Streuung der Daten unterhalb der Kurve ab und oberhalb zu. Extrem ist dies für die 47 jährige Kiefer zu beobachten, deren Werte mit einer prozentual hohen Abweichung nach oben und unten variieren.

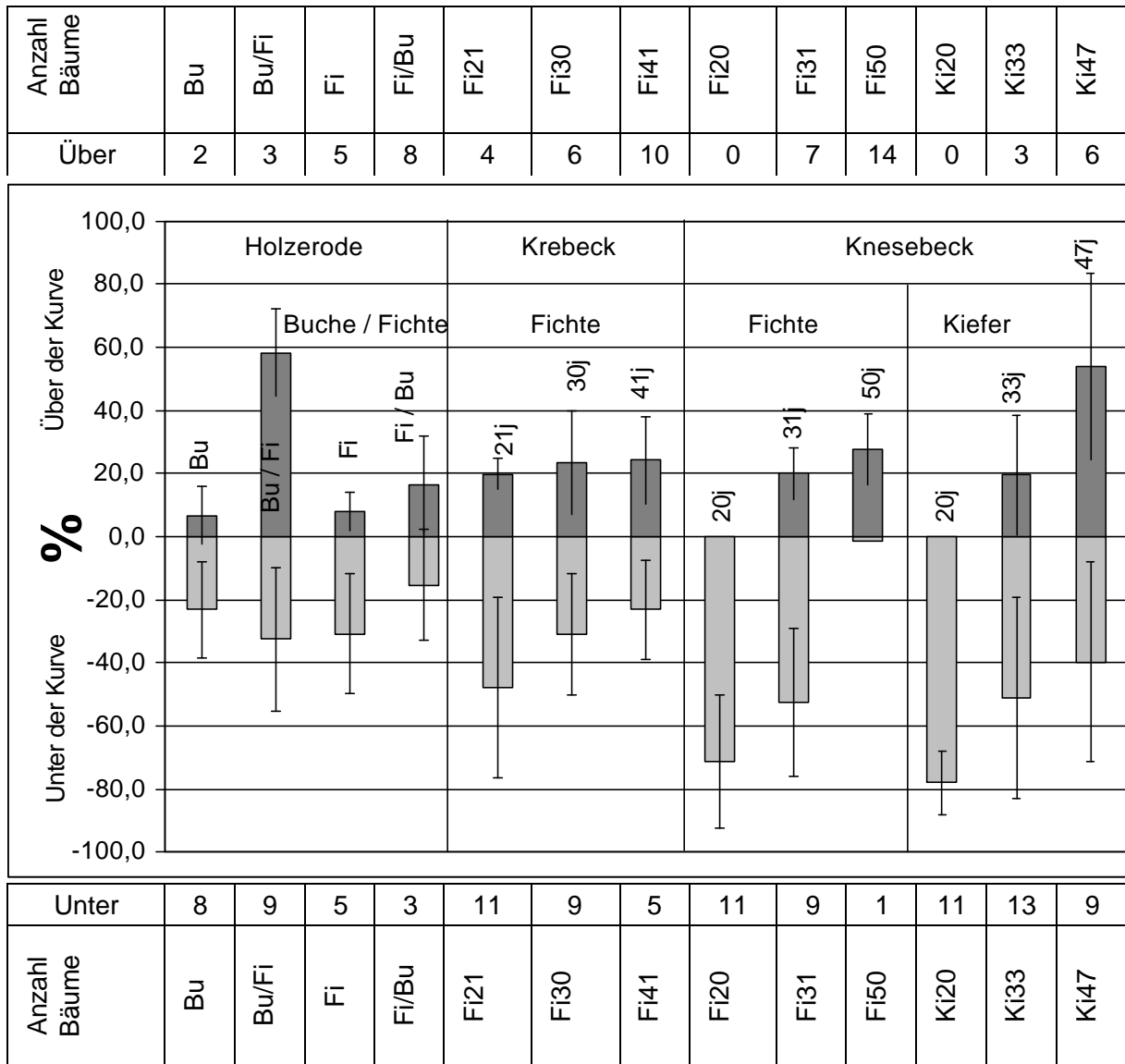


Abb. 34: Durchschnittliche prozentuale Abweichung der Probestämme mit Standardabweichung (Buche, Fichte und Kiefer) von der in Abb. 33 dargestellten Ausgleichsfunktion. Positive Werte beschreiben die Abweichung der Bäume, die oberhalb der Kurve liegen. Negative stellen die Daten der Bäume dar, die sich unterhalb der Kurve befinden. Die Tabellenwerte geben die Anzahl der Bäume wieder, die ober- oder unterhalb der Kurven liegen

Eiche

Bei den Eichen des Untersuchungsgebietes aus Holzminden liegen die realen Daten recht gleichmäßig über und unter den nach Abb. 33 errechneten Funktionswerten. Die Prohebäume der Eichen aus Kattenbühl zeigen hingegen durchgehend ein Wurzelvolumen, das unterhalb der Kurve liegt. Die jüngeren Bäume haben nach der berechneten Funktion bei gleichem Stammvolumen wie die Eichen aus Holzminden ein geringeres Wurzelvolumen.

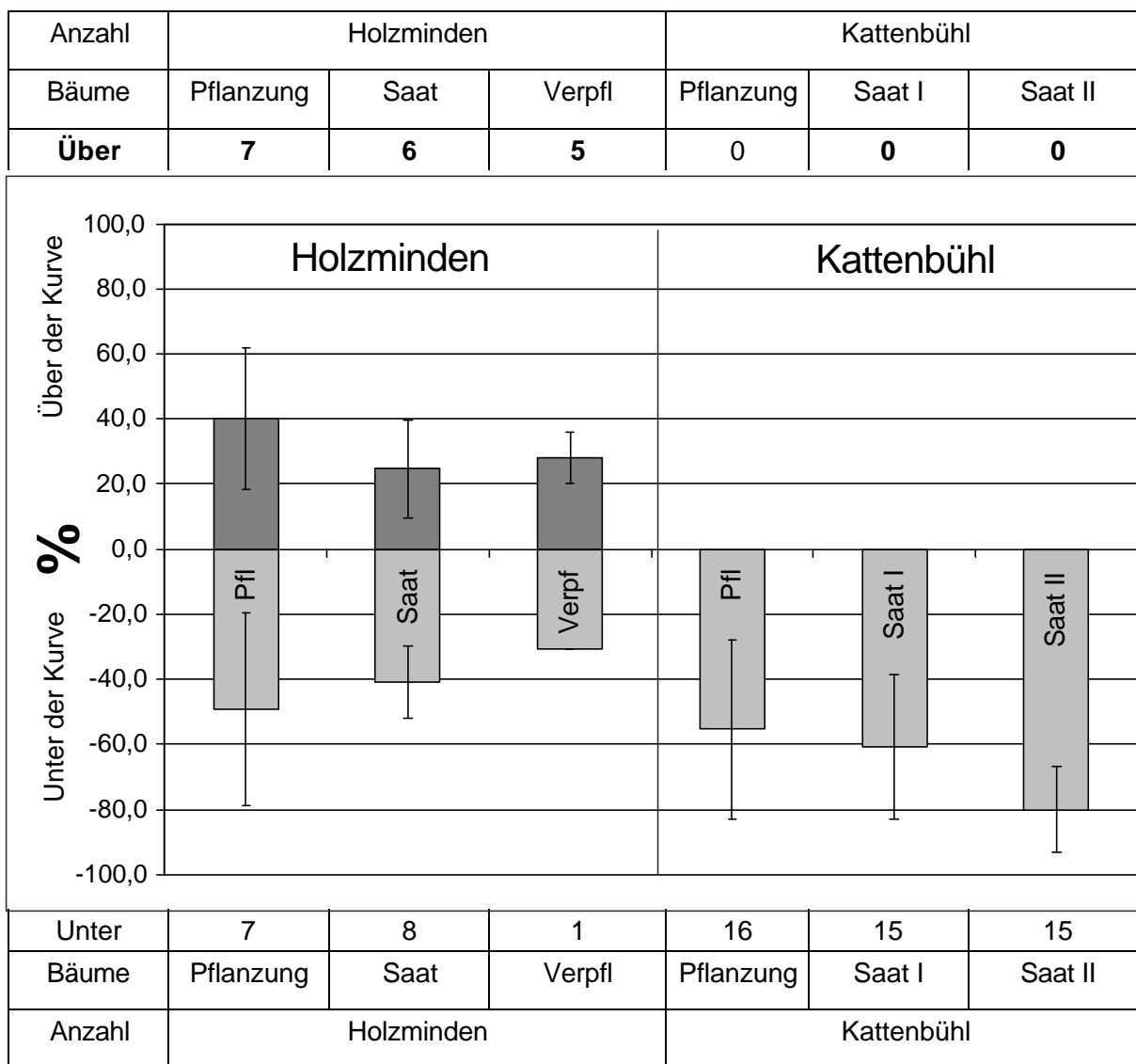


Abb. 35 : Durchschnittliche prozentuale Abweichung der Prohebäume (Eiche) von der in Abb. 33 dargestellten Ausgleichsfunktion mit Standardabweichung. Positive Werte beschreiben die Abweichung der Bäume, die oberhalb der Kurve liegen. Negative stellen die Daten der Bäume dar, die sich unterhalb der Kurve befinden. Die Tabellenwerte geben die Anzahl der Bäume wieder, die ober- oder unterhalb der Kurven liegen

4.3.2.1.1 Verhältnis Stamm- zu Wurzelvolumen differenziert nach Beständen

Um weitere, genauere Informationen über die Beziehung zwischen Stamm- und Wurzelvolumen zu erreichen, werden diese Parameter in einem nächsten Schritt, getrennt nach Baumarten und Altersstufen, hergeleitet. Die Relationen sind überwiegend durch Bestimmtheitsmaße von über 0,5 charakterisiert. Davon machen nur die untersuchten Kiefernbestände eine Ausnahme, für die kleinere Bestimmtheitsmaße berechnet werden. Im folgenden sollen die gefundenen Zusammenhänge bei den Fichten, Buchen und Eichen erörtert werden. Die Kiefern werden aufgrund der schlechten Beziehungen nicht beschrieben. Die Funktionen der anderen Bäume sind in Tabelle 60 dargestellt.

Tabelle 60: Parameter der linearen $[Y = A + B \cdot X]$ Beziehungen zwischen Wurzel (Y)- und Stammvolumen (X), getrennt nach Baumart; Fichte, Buche, Eiche. Es werden nur Regressionen mit dem Bestimmtheitsmaß (R^2) $\geq 0,5$ dargestellt

	Fläche	A	B	R ²		Fläche	A	B	R ²
Holzerode	Buche	-10,16	155,10	0,77	Holzminden und Kattenbühl; Eiche	Holz Pflanz.	-0,02	307,89	0,87
	Buche / Fichte	-1,86	101,75	0,64		Holz Saat	0,09	258,28	0,83
	Fichte	-17,68	159,62	0,67		Holz Verpf.	0,78	281,64	0,50
	Fichte / Buche	16,91	130,02	0,86					
Krebeck	Fichte 21	-0,81	174,81	0,71		Katt Pflanz.	0,15	192,12	0,79
	Fichte 30	4,83	119,96	0,58		Katt Saat I	0,08	194,99	0,91
	Fichte 41	-1,68	189,05	0,64		Katt Saat II	0,19	95,798	0,62
Knesebeck	Fichte 20	-0,29	135,58	0,79					
	Fichte 31	-2,74	182,59	0,92					
	Fichte 50	0,56	200,57	0,91					

Holzerode

In allen Fällen gibt ein linearer Ausgleich den Zusammenhang zwischen Stamm- und Wurzelvolumen am besten wieder (Abb. 36). Zwischen den verschiedenen Beständen sind keine signifikanten Unterschiede der Ausgleichsfunktionen festzustellen.

Beim Vergleich der untersuchten Bestände weist die Ausgleichsgerade für die gemischte Fichte die größten Funktionswerte auf. Das heißt, diese Bäume besitzen bei einem gleichen Stammvolumen ein höheres Wurzelvolumen als die der anderen Bestände. Dennoch zeigt die Gerade der Fichte im Mischbestand eine geringere Steigung als die des Reinbestandes (Tabelle 60). Dadurch ist bei einem Stammvolumen von 1,17 m³ ein Schnittpunkt vorhanden, ab dem die Fichte im Reinbestand das größere Wurzelvolumen pro Baum besitzt. Die Buchenkollektive zeigen weit auseinanderliegende Geraden. Dabei besitzt die Ausgleichsgerade der Buche im Reinbestand die größte Steigung (Tabelle 60). Bis zu einem Stammvolumen von 0,2 m³ weist die Buche im Mischbestand ein größeres Wurzelvolumen auf als im Reinbestand. Danach übertrifft das Wurzelvolumen der Reinbestandsbuche das der Mischbestandsbuche.

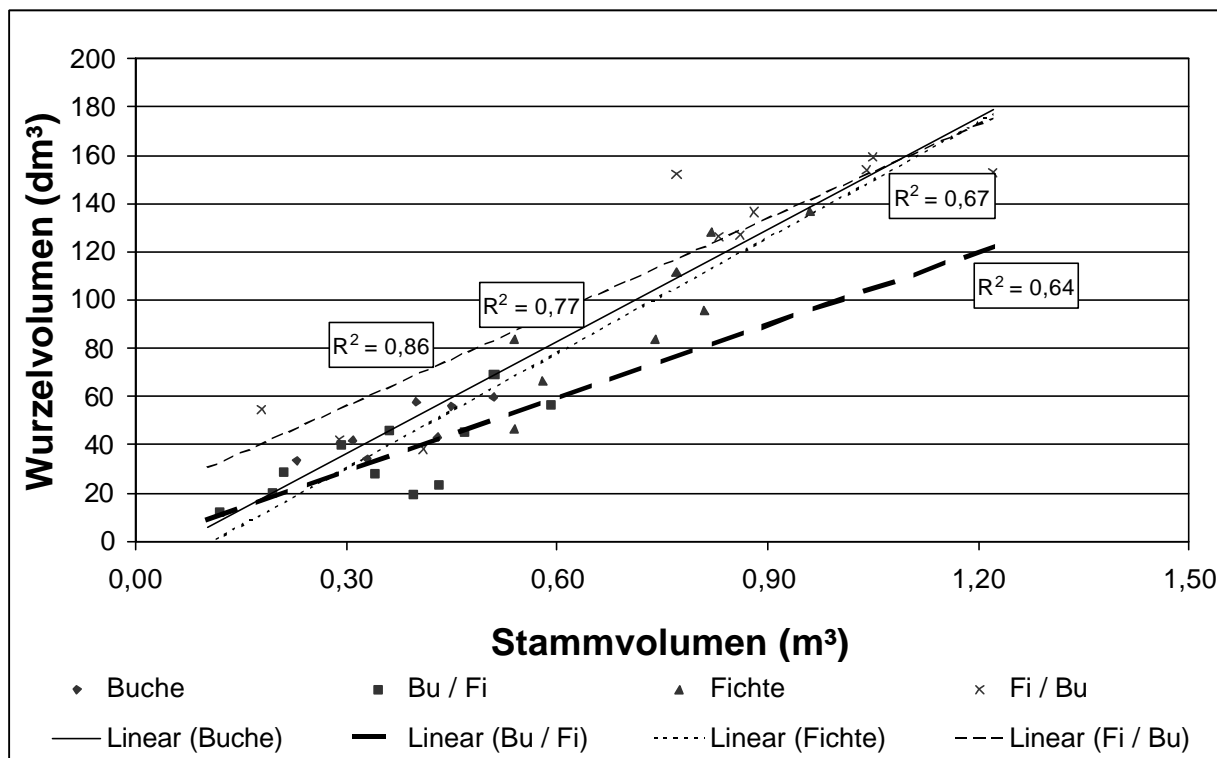


Abb. 36: Regression zwischen Stamm- und Wurzelvolumen; Holzerode; 55-65 jährige Fichte und Buche im Rein- und Mischbestand

Krebeck

Die linearen Funktionen, die die Beziehungen zwischen Stamm- und Wurzelvolumen beschreiben, sind Tabelle 60 zu entnehmen. Die für die 30 jährigen Fichten ermittelte Ausgleichsgerade weist die geringste Steigung, aber auch das geringste Bestimmtheitsmaß auf (Abb. 37). Dagegen verlaufen die Geraden für die 21- und 41 jährigen Bestände fast identisch. Signifikante Unterschiede sind zwischen den drei Beständen nicht festzustellen. Bei einem Stammvolumen von rund 0,10 m³ schneiden sich die lineare Funktionen aller Bestände. Das heißt, das Wurzelvolumen (18 dm³) ist an diesem Punkt für alle Bäume gleich groß.

Bei einem beispielhaft gewählten Stammvolumen von 0,06 m³ weist eine 21- oder 41 jährige Fichte ein Wurzelvolumen von 10 dm³ auf (Tabelle 61). Die 30 jährige Fichte zeigt bei diesem Stammvolumen ein 20 % höheres Wurzelvolumen. Bei einem Stammvolumen von 0,25 m³ besitzt sie ein Wurzelvolumen von 35 dm³ und die ältere Fichte eins von 46 dm³. Die junge Fichte weist keine Bäume auf, die ein Stammvolumen von 0,30 m³ erreichen, so daß für diesen Wert kein Wurzelvolumen berechnet wird.

Tabelle 61: Wurzelvolumen bei beispielhaft gewähltem Stammvolumen von 0,06 m³ und 0,25 m³; Krebeck, Fichte 21-, 30- und 41 jährig im Reinbestand (21 jähriger Bestand besitzt nur Bäume mit einem Stammvolumen bis 0,11 m³)

Stammvolumen (m³)/Baum	Fichte 21		Fichte 30		Fichte 41	
	0,06	-	0,06	0,25	0,06	0,25
Wurzelvolumen (dm³)	10	-	12	35	10	46

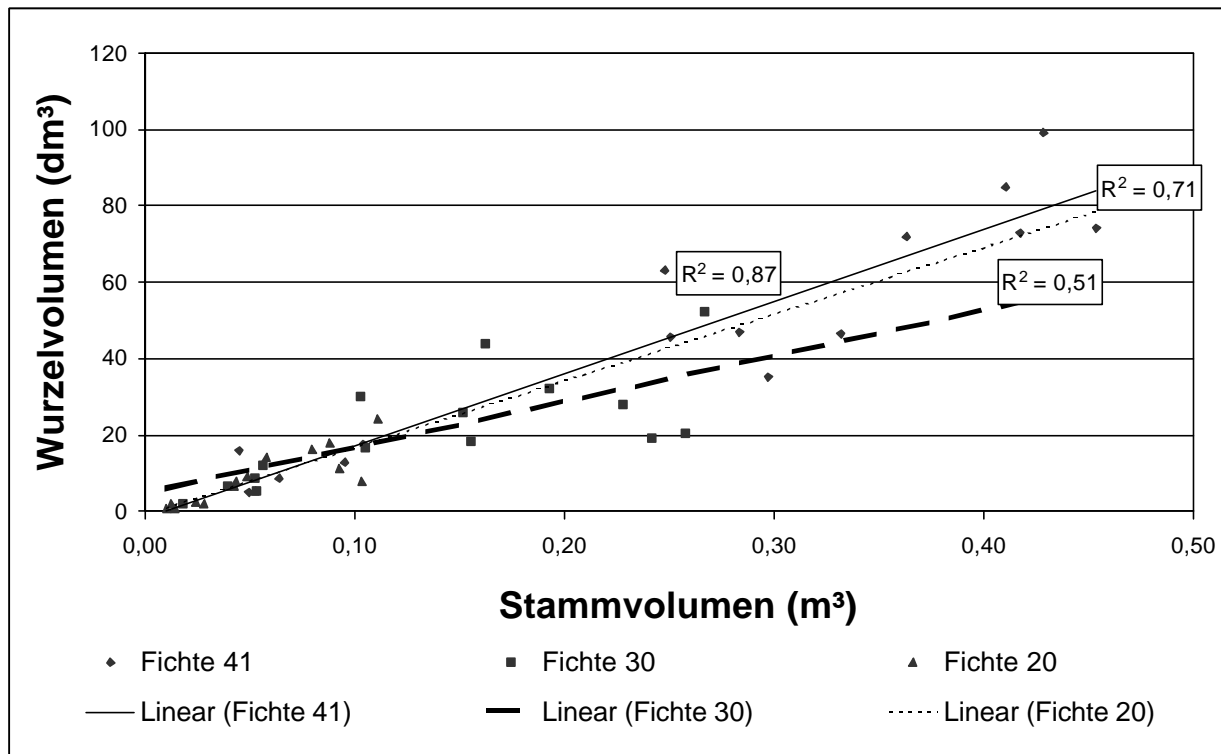


Abb. 37: Regression zwischen Stamm- und Wurzelvolumen; Krebeck, 21-, 30- und 41 jährige Fichte. (Die Geraden der 21 jährigen Fichten enden bei einem Stammvolumen von 0,11 m³ und die des 30 jährigen bei 0,27 m³)

Knesebeck

Abb. 38 stellt lineare Zusammenhänge zwischen Stamm- und Wurzelvolumen für die in Knesebeck untersuchten 20-, 31- und 50 jährigen Fichten dar. Die Bäume des jüngsten Bestandes zeigen die geringste Steigung der Geraden (Tabelle 60). Für diese Fläche sind nur Bäume zu finden, die ein Stammvolumen kleiner 0,06 m³ besitzen. Die lineare Funktion der Fichten des 31 jährigen Bestandes zeigt eine geringere Steigung als die der 50 jährigen Bäume. Es sind keine signifikanten Unterschiede der Steigungen der Ausgleichsfunktionen festzustellen.

Beispielhaft wird für ein Stammvolumen von 0,06 m³ das Wurzelvolumen berechnet (Tabelle 62). Dabei zeigt der 20 jährige Fichtenbestand ein Wurzelvolumen von 7,8 dm³ pro Baum. Damit besitzen diese Bäume ein 7 % geringeres Wurzelvolumen als die 31 jährigen Fichten. Diese weisen wiederum ein 33 % geringeres Wurzelvolumen auf als die 50 jährigen Fichten (12,6 dm³). Bei einem Stammvolumen von 0,3 m³ zeigen die 31 jährigen Bäume ein Wurzelvolumen von 50 dm³. Die älteren Fichten haben mit einem Wert von 0,06 m³ ein 20 % höheres Wurzelvolumen als die 31 jährigen.

Tabelle 62: Wurzelvolumen bei beispielhaft gewählten Stammvolumina von 0,06 m³; und 0,3 Knesebeck, 20-, 31- und 50 jährige Fichte

Stammvolumen (m ³)/Baum	Fichte 20		Fichte 31		Fichte 50	
	0,06	-	0,06	0,3	0,06	0,3
Wurzelvolumen (dm ³)	7,8	-	8,4	50	12,6	60

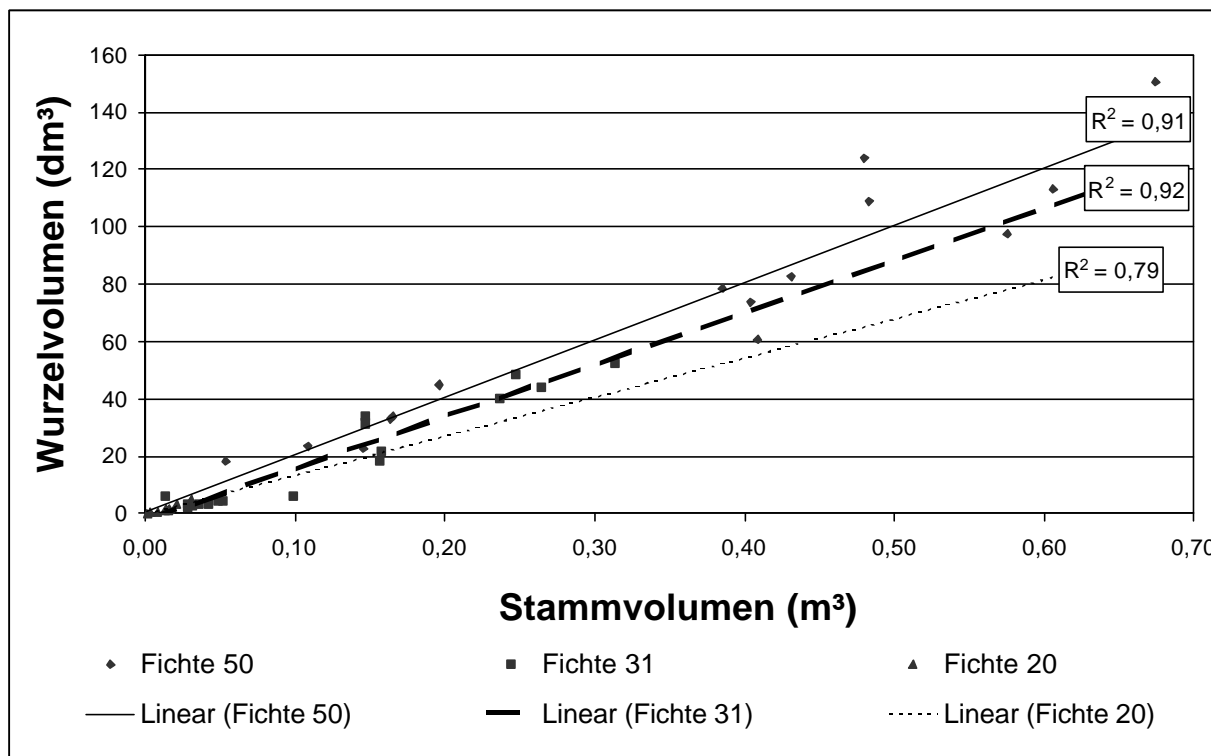


Abb. 38: Regression zwischen Stamm- und Wurzelvolumen; Knesebeck, 20-, 33- und 47 jährige Fichte. (Die Geraden der 21 jährigen Fichten enden bei einem Stammvolumen von 0,06 m³ und die der 30 jährigen bei 0,32 m³)

Holzminden

Abb. 39 zeigt die Beziehungen zwischen Stammvolumen und Wurzelvolumen der untersuchten Eichen in Holzminden. Die für sie berechneten Bestimmtheitsmaße erreichen Werte zwischen 0,5 und 0,9 (Tabelle 60). Die lineare Ausgleichsfunktion der verpflanzten Eichen kann den Meßdaten nicht in der Güte angepaßt werden, wie es bei den anderen Flächen der Fall ist. Das Bestimmtheitsmaß liegt hier bei 0,5. Signifikante Unterschiede der Steigung der Ausgleichsfunktionen sind nicht zu finden.

Die Gerade der Pflanzeichen zeigt eine geringere Steigung als die der Saateichen. Die Bäume der Saat besitzen bei gleichem Stammvolumen ein größeres Wurzelvolumen als die der Pflanzung. Bei einem Stammvolumen von z.B. 0,02 m³ ist bei der gepflanzten und der gesäten Eiche ein Wurzelvolumen von 5dm³ und bei der verpflanzten eines von 6dm³ festzustellen. Bei einem Stammvolumen von 0,07 m³ weisen die Bäume der Pflanzung mit 18 dm³ ein um 17 % geringeres Wurzelvolumen auf als die der Saat und die der Verpflanzung.

Tabelle 63: Wurzelvolumen bei beispielhaft gewählten Stammvolumina von 0,02 m³ und 0,07 m³; Holzminden, 22 jährige Eiche

Stammvolumen (m³)/Baum	Pflanzung		Saat		Verpflanzung	
	0,02	0,07	0,02	0,07	0,02	0,07
Wurzelvolumen (dm³)	5	18	5	21	6	21

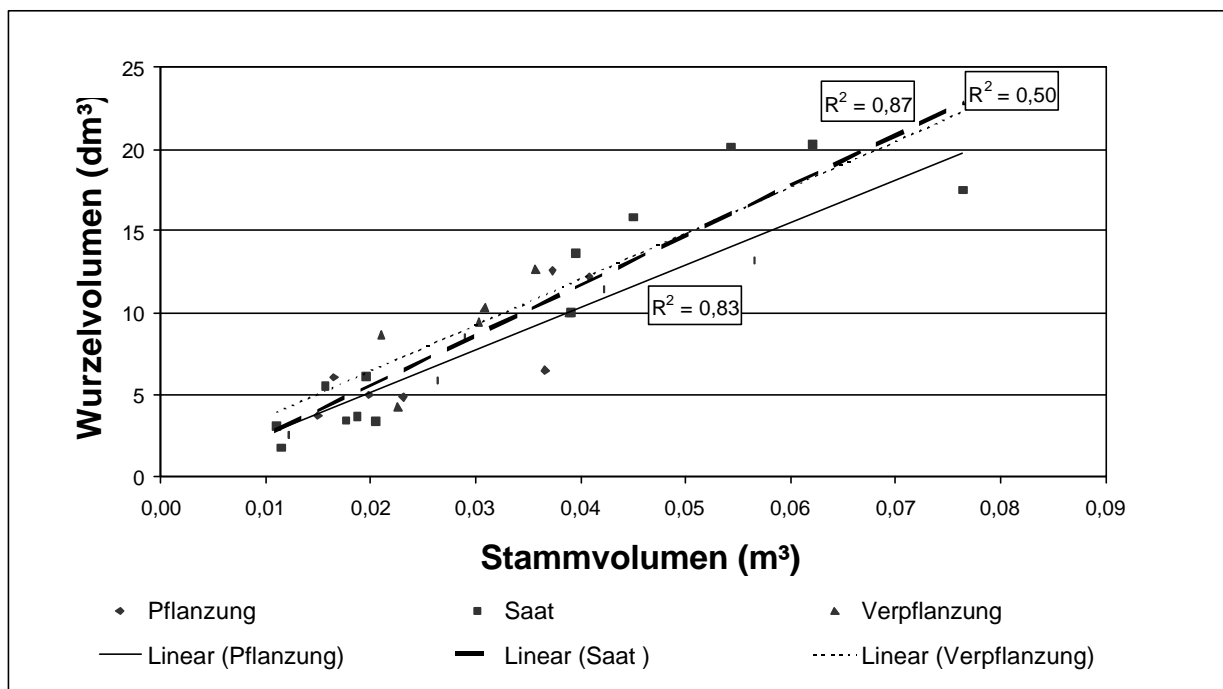


Abb. 39: Regression zwischen Stamm- und Wurzelvolumen; Holzminen, 22 jährige Eiche

Kattenbühl

Abb. 40 zeigt die linearen Beziehungen zwischen dem Stamm- und dem Wurzelvolumen der 13 jährigen gepflanzten und gesäten Eichen aus Kattenbühl. Tabelle 60 stellt die ermittelten Funktionen dar. Bei Bestimmtheitsmaßen von 0,6 und 0,9 ist von einer guten Anpassung an die Daten auszugehen. Die Geraden der gepflanzten und der gesäten Eichen (Saat I Bestand) weisen sowohl eine nahezu gleiche Steigung als auch ein fast identisches absolutes Glied auf. Die Steigungen der Ausgleichsfunktionen unterscheiden sich nicht signifikant, wohl aber die der Funktionen des Saat I- und Saat des II- Bestandes.

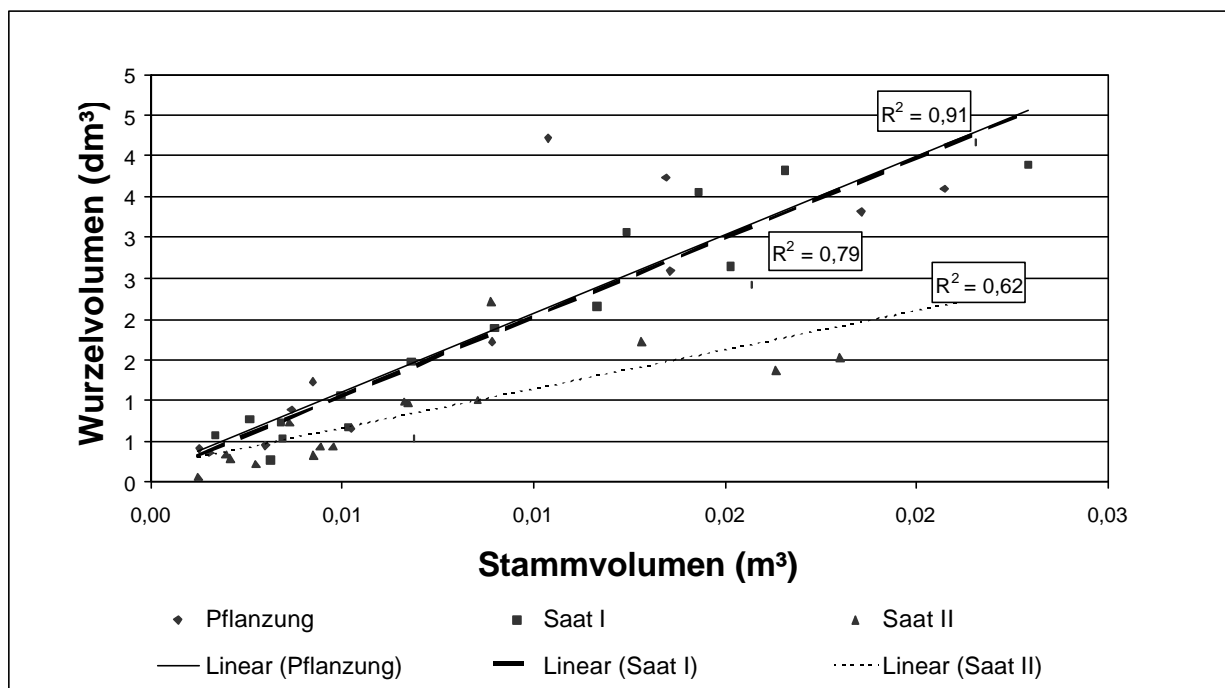


Abb. 40: Regression zwischen Stamm- und Wurzelvolumen; Kattenbühl, 13 jährige Eiche

4.3.2.2 Beziehungen zwischen Wurzel, Stamm und Krone (Flußdiagramm)

Der Begriff "Flußdiagramm" wird angewendet, um zu verdeutlichen, daß mit einer beliebigen Eingangsgröße, wie z.B. der Höhe oder dem BHD, andere Parameter kalkuliert werden können.

Die in Anhang V, Seiten N-BB dargestellten sechs Grafiken pro Seite zeigen für jeden Bestand das Stamm- und Wurzelvolumen auf der x-Achse und weitere Baumparameter auf der y-Achse. Die Funktionen und Bestimmtheitsmaße sind den Grafiken zu entnehmen. Bestände, deren Regressionen ein Bestimmtheitsmaß unter 0,5 aufweisen, werden nicht dargestellt (Holzerode, Buche; Knesebeck, Kiefer 47-jährig). Bei einem Bestand konnten die Beziehungen zwischen Blattgewicht und Wurzelvolumen nicht hergeleitet werden, da das Blattgewicht nicht ermittelt wurde. Für diese Bäume wird der Kronenansatz zur Bildung der Regression herangezogen (Holzerode, Fichte im Mischbestand).

Holzerode

In Anhang V, Seite N und O werden die linearen Funktionen der ober- und unterirdischen Parameter der Fichten im Rein- und Mischbestand dargestellt. Durchschnittliche Bestimmtheitsmaße von 0,7 geben die gute Anpassung der Regressionen wieder. Für die Buchenbestände sind diese guten Zusammenhänge ($R^2 < 0,5$) nicht zu finden. Eine Erstellung von Flußdiagrammen wird deshalb nicht vorgenommen.

Im folgenden wird beispielhaft für jeweils eine Fichte des Rein- und des Mischbestandes eine Kalkulation anhand eines standardisierten BHD durchgeführt (Tabelle 64). Mit Hilfe dieser Daten ist ein direkter Vergleich einer Fichte im Rein- und Mischbestand möglich. Als Eingangsgröße wird z.B. ein BHD von 27 cm gewählt. Dieser entspricht etwa dem mittleren BHD der Probestämme. Durch Funktion (a) aus Tabelle 64 findet als erstes die Berechnung des Stammvolumens für die Fichte des Reinbestandes statt. Mit dem Ergebnis wird anschließend anhand von Funktion (b) die Höhe abgelesen und durch diese wiederum das Kronengewicht (Funktion (c)). Weiterhin wird das Wurzelvolumen und das Blattgewicht kalkuliert (Funktion (d); (e)).

Für die Fichten im Mischbestand sind keine Daten der Blattparameter vorhanden. Um dennoch Informationen zu erhalten, wird statt dessen der Kronenansatz mit dem Stamm- und Wurzelvolumen in Beziehung gesetzt (Tabelle 64). Die Berechnung der Parameter erfolgt entsprechend vorgenannter Tabelle in der dort ausgewiesenen alphabetischen Folge.

Der Vergleich zwischen den berechneten Wurzel-, Stamm- und Kronenparametern der Fichten des Rein- mit denen des Mischbestandes zeigt, daß die Reinbestandsfichte (27 m) bei gleichem Durchmesser 14 % (signifikant) höher ist als die Fichte im Mischbestand. Letztere ist somit abholziger. Das Verhältnis zwischen Stamm- und Wurzelvolumen liegt bei der Fichte im Reinbestand bei 8:1 und bei der im Mischbestand bei 7:1 (nicht signifikant (ns)). Darüber hinaus ist die Krone der Ersteren schwerer (ns) als die der Letzteren. Dies läßt den vorsichtigen Schluß zu, daß das Verhältnis zwischen ober- und unterirdischen Größen bei der Fichte im Reinbestand unausgewogener ist als bei der im Mischbestand. Allerdings unterscheiden sich Kronengewicht, Stamm- und Wurzelvolumen nicht signifikant, so daß der Begriff "vorsichtiges" Ergebnis gewählt wird.

Tabelle 64: Beispiel einer Berechnung der Parameter eines Baumes anhand der Ausgleichsfunktionen aus Anhang V, Seiten N, 0; Holzerode, Fichte im Rein- und im Mischbestand. Eingangsgröße: BHD 27 cm (Nadelgewicht war bei der Fichte im Mischbestand nicht verfügbar, so daß an dessen Stelle der Kronenansatz berechnet wird.)

BHD (cm)	Fichte		Fichte / Buche	
	27		27	
	Ausgleichsfunktion	Ergebnis	Ausgleichsfunktion	Ergebnis
Stammvolumen (m ³)	(a) $27\text{cm}=19,93x+13,68$	0,67	(a) $27\text{ cm}=20,51x+12,87$	0,69
Höhe (m)	(b) $Y=19,37*0,67+14,26$	27,27	(b) $Y=8,29*0,69+18,05$	23,80
Kronengewicht (kg)	(c) $Y=181,04*0,67-7,4$	113,90	(c) $Y=82,4*0,69+19,35$	76,21
Wurzelvolumen (dm ³)	(d) $113,90\text{kg}=0,74x+54,44$	80,36	(d) $76,21=0,53x+20,17$	105,74
Kronenansatz _(KA) (m)			(e) $y=0,03*105,92+20,17$	16,25
Nadelgewicht (kg)	(e) $Y=0,48*80,35+19,04$	57,61		

Krebeck

Anhang V, P-R, stellt für die Fichtenbestände verschiedenen Alters die allometrischen Beziehungen zwischen Wurzel, Kronen- und Stammparametern dar. Die Daten unterscheiden sich für die verschieden alten Bestände signifikant. Die Funktionen mit den jeweiligen Bestimmtheitsmaßen sind den Grafiken zu entnehmen. Die Bestimmtheitsmaße der errechneten Regressionen zeigen für die 21- und die 41 jährigen Fichten eine sehr gute Anpassung der Funktion mit einem R^2 zwischen 0,7 und 0,9. Für die Daten der 30 jährigen Bäume liegen die Werte ($R^2=0,5-0,8$) geringfügig niedriger.

Nach dem in Holzerode beschriebenen Schema werden die Wurzel-, Stamm- und Kronenparameter für die 21-, 30- oder 41 jährige Fichte der 1. Ertragsklasse in Krebeck berechnet (Tabelle 65). Diese gewählten Beispieldurchmesser entsprechen in etwa den jeweiligen Grundflächenmittelstämmen. Außerdem werden die Parameter für eine Fichte der drei Altersstufen mit einem BHD von 14 cm kalkuliert (Tabelle 65). Dieser Wert kennzeichnet einen vorherrschenden bis herrschenden Baum im 21 jährigen Bestand, einen herrschenden bis mitherrschenden im 30 jährigen Bestand und einen bedrängten im 41 jährigen (Abschnitt 4.1.2). Der BHD beträgt für die 21 jährige Fichte der ersten Ertragsklasse bei starker Durchforstung 8 cm, für die 30 jährige 12 cm und die 41 jährige 17 cm. Die berechneten Parameter Stammvolumen, Höhe und Nadelgewicht steigen vom jungen zum mittelalten Bestand um rund die Hälfte an. Für die ältesten Bäumen ist dies ebenso zu beobachten. Das Kronengewicht (frisch) steigt extremer auf nahezu das Doppelte an. Übertroffen werden diese Werte noch vom Wurzelvolumen. Dieses nimmt von 21 zu 30 jährig auf das Neunfache und von 30 zu 41 jährig auf fast das Dreifache zu.

Weiterhin werden für alle Flächen die Parameter für je eine 21-, 30- und 41 jährige Fichte mit einem BHD von 14 cm berechnet. Die Unterschiede der sozialen Klasse werden bei dem Kronengewicht (frisch) besonders deutlich (Tabelle 65). Dieses ist bei der 21 jährigen Fichte am höchsten. Baumhöhe und Stammvolumen steigen bei Alterszunahme um rund 25 % an. Das Wurzelvolumen erhöht sich von 21 zu 30 jährig nicht in diesem Maße, wohl aber von

30 zu 41 jährig. Letzgenanntes besagt, daß die Relation zwischen ober- und unterirdischen Größen mit Abnahme der sozialen Stellung enger wird. Dies wird hervorgerufen durch das geringe Kronengewicht der bedrängten älteren Bäume.

Tabelle 65: Beispiel einer Berechnung von Stamm-, Kronen- und Wurzelparametern anhand der Ausgleichsfunktionen aus Anhang V, P-R; Krebeck, Fichte; Eingangsgrößen: zum einen Fichte, 1. Ertragsklasse, und zum anderen Fichte, BHD 14 cm

	1. Ertragsklasse (starke Durchforstung)			BHD 14 cm für alle Bestände		
	21 jährig	30 jährig	41 jährig	21 jährig	30 jährig	41 jährig
BHD (cm)	8	12	17	14	14	14
Stammvolumen (m ³)	0,02	0,08	0,22	0,09	0,12	0,14
Höhe (m)	8,33	12,65	18,44	11,41	13,54	17,01
Kronengewicht (kg)	12,47	27,82	45,21	44,44	40,14	27,88
Wurzelvolumen (dm ³)	1,55	13,84	39,61	17,94	18,45	23,57
Nadelgewicht (kg)	6,71	15,92	21,82	22,77	22,04	12,84

Knesebeck

Anhang V, S-W, stellt die linearen Beziehungen zwischen den Stamm-, Kronen- und Wurzelparametern für die untersuchten Fichten und Kiefern dar. Die jeweiligen Funktionen und Bestimmtheitsmaße ($R^2=0,5-0,9$) sind denselben Abbildungen zu entnehmen. Für die 47 jährige Kiefer können nur schlecht angepaßte Zusammenhänge zwischen Wurzelvolumen und Kronenparametern gefunden werden. Das Bestimmtheitsmaß liegt unter 0,5.

Um eine Entwicklung in Abhängigkeit des Alters darstellen zu können, wird beispielhaft der BHD des Grundflächenzentralbaumes für die Berechnungen genutzt. Der Wert kann den Bestandesdaten entnommen werden, die in Abschnitt 2.2.3 dargestellt sind. Mit diesem BHD werden die Wurzel-, Stamm- und Kronenparameter berechnet (Tabelle 66).

Dabei hat die 20 jährige Fichte einen BHD von 7cm, die 31 jährige einen von 13 cm und die 50 jährige einen von 21 cm. Diese Durchmesserwerte entsprechen in etwa Bäumen einer ersten Ertragsklasse (starke Durchforstung SCHOBER 1975). Das Wurzelvolumen erhöht sich ebenso wie das Stammvolumen von den jungen zu den mittelalten Fichten auf mehr als das Zehnfache und von den mittelalten zu den ältesten auf etwa das Dreifache. Der Anstieg des BHD und der Höhe sind signifikant abhängig vom Stammvolumen und Alter der Fichten. Darüber hinaus ist der BHD signifikant abhängig vom Wurzelvolumen und Alter des Bestandes.

Ebenso wie für die Fichte des Untersuchungsgebietes in Knesebeck wird für die 20- und 33 jährige Kiefer die Relation zwischen Wurzel-, Kronen- und Stammparametern anhand der Funktionen aus Anhang V, AA-BB, berechnet. Die Ergebnisse werden in Tabelle 66 dargestellt. Für die Kalkulation wird beispielhaft der BHD des Grundflächenzentralbaumes verwendet. Er beträgt für die 20 jährige Kiefer 6cm und für die 33 jährige 12 cm. Mit Erhöhung des BHD steigt das Stammvolumen von 21- zu 33 jährig um das Siebenfache (signifikant), die Höhe auf das Doppelte (signifikant) und das Kronengewicht (ns) auf mehr als das Dreifache an (Tabelle 66). Das Wurzelvolumen nimmt von 20 zu 33 jährig um mehr als das Neunfache zu.

Aus diesen Ergebnissen kann der Schluß gezogen werden, daß die Zunahme der untersuchten Parameter in der Phase von 20- zu 30 Jahren sehr hoch ist. Dieses wird ebenso für die Fichte des Untersuchungsgebietes in Knesebeck festgestellt. Signifikant steigen der BHD und die Höhe der Fichten an. Dies ist abhängig vom Alter, Stamm- und Wurzelvolumen der Bäume.

Tabelle 66: Beispiel einer Berechnung von Stamm-, Kronen- und Wurzelparametern anhand der Ausgleichsfunktionen aus Anhang V, S-W; Knesebeck, Fichte und Kiefer (20-50-jährig); Eingangsgröße BHD des Grundflächenzentralbaumes

	Fichte 20	Fichte 31	Fichte 50	Kiefer 20	Kiefer 33
BHD (cm)	7	13	21	6	12
Stammvolumen (m ³)	0,016	0,11	0,32	0,01	0,08
Höhe (m)	6,14	13,05	16,64	5,54	12,01
Kronengewicht (kg)	14,96	42,18	115,84	5,09	20,05
Wurzelvolumen (dm ³)	1,90	17,38	64,85	0,93	9,76
Nadelgewicht (kg)	10,71	20,52	61,05	1,61	8,22

4.3.2.2.1 Vergleich der Wurzel-, Stamm- und Kronenparameter der 30- bzw. 31-jährigen Fichte auf Sand und auf Lehm

Zum Vergleich der 30- bzw. 31-jährigen Fichten auf den Untersuchungsflächen in Krebeck und in Knesebeck werden im folgenden die Unterschiede der ober- und unterirdischen Parameter anhand der Funktionen aus Anhang V, Q und T, berechnet. Es wird untersucht, inwieweit sich bedingt durch die verschiedenen Bodentypen, Differenzen der Wurzel-, Baum- und Kronenparameter ergeben. Erörtert wird dieses am Beispiel einer Fichte mit dem BHD von 13 cm. Dieser BHD bietet sich für die Berechnung an, da die Ergebnisse für die Fichte auf Sand (Knesebeck) bereits im vorherigen Abschnitt dargestellt werden.

Die Bäume, die auf Lehm stocken, zeigen im Vergleich zu den Fichten auf Sand bei diesem BHD keine signifikanten Unterschiede zwischen den errechneten Parametern. Allein für das Kronengewicht können bei der Fichte auf Sand 22 % höhere Werte festgestellt werden.

Tabelle 67: Wurzel-, Stamm- und Kronenparameter einer 30 bzw. 31-jährigen Fichte auf Lehm und auf Sand bei einem beispielhaft gewählten BHD von 13 cm (entspricht etwa dem Grundflächenzentralstamm), Berechnung anhand der Funktionen aus Anhang V, Q und T

	Lehm	Sand
	Fichte 30	Fichte 31
BHD (cm)	13	13
Stammvolumen (m ³)	0,10	0,11
Höhe (m)	13,7	14,2
Kronengewicht (kg)	35	44
Wurzelvolumen (dm ³)	15	17
Blattgewicht (kg)	19	21

Holzminden

Die Flußdiagramme der gepflanzten und gesäten Eichen aus Holzminden sind in Anhang V, X-Y, dargestellt. Sie stellen die Beziehungen zwischen ober- und unterirdischen Parametern dar. Bestimmtheitsmaße von rund 0,8 geben die gute Anpassung dieser Regressionen für die Saateichen wieder. Bei den Eichen der Pflanzung und Verpflanzung können derartig gute Zusammenhänge nicht immer gefunden werden. Bei den gepflanzten Eichen sind Variationen zwischen Wurzelvolumen und BHD vorhanden. Die Daten der verpflanzten Eichen weisen darüber hinaus auch bei den oberirdischen Größen sehr starke Abweichungen auf. Der Grund hierfür ist wohl die geringe Anzahl der Probestämme, die nur aus einer Kraft'schen Klasse entnommen wurden. Signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Größen sind zwischen den drei Bestandesformen nicht vorhanden.

Tendenziell kann angemerkt werden, daß Kronengewicht, Stamm- und Wurzelvolumen der Saateiche bei gleichem BHD höher sind als bei den Pflanzeichen. (Tabelle 68). Für die Relation zwischen ober- und unterirdischen Parametern (Stamm- (m^3)/Wurzelvolumen (m^3) und Kronengewicht (kg) / Wurzelvolumen (dm^3)) sind nur geringfügige Differenzen zwischen Saat und Pflanzung festzustellen. Dabei weist die Saateiche etwas günstigere Verhältnisse zwischen Stamm (m^3) und Wurzelvolumen (m^3) auf als die gepflanzte Eiche. Für die Beziehung zwischen Kronengewicht (kg) und Wurzelvolumen (dm^3) ist Gegenteiliges festzustellen. Dort zeigt der gepflanzte Baum günstigere Werte als der gesäte, so daß behauptet werden kann, daß sich die Relation zwischen ober- und unterirdischen Parametern ausgleicht.

Tabelle 68: Beispiel einer Berechnung der Parameter einer 22 jährigen Eiche; Eingangsgrößen: BHD 7 cm und 12 cm; Holzminden

BHD (cm)	Pflanzung		Saat	
	7	7	12	12
Stammvolumen (m^3)	0,016	0,017	0,057	0,061
Höhe (m)	9,7	10,8	12,6	11,9
Kronengewicht (kg)	4,1	6,4	26,5	30,9
Wurzelvolumen (dm^3)	3,9	4,7	15,2	17,5
Blattgewicht (kg)	1,8	0,7	8,2	3,7
Stamm- / Wurzelvol. (m^3)	4:1	3,6:1	3,8:1	3,5:1
Kronengewicht (kg) / Wurzelvolumen (dm^3)	1,1:1	1,4:1	1,7:1	1,8:1

Kattenbühl

Die Grafiken aus Anhang V, Z-BB, stellen die Beziehungen zwischen den ober- und unterirdischen Parametern der in Kattenbühl untersuchten 13 jährigen Eichen dar. Die Ausgleichsfunktionen und Bestimmtheitsmaße sind den Abbildungen zu entnehmen. Zwischen den Beständen sind signifikante Unterschiede für das Kronengewicht in Abhängigkeit vom Stammvolumen und das Blattgewicht (frisch) in Abhängigkeit vom Wurzelvolumen festzustellen. Weiterhin unterscheidet sich das Kronengewicht in bezug zum Wurzelvolumen der Saat II Eichen von den gepflanzten signifikant.

In Tabelle 69 werden Wurzel-, Baum- und Kronenparameter exemplarisch für Bäume mit dem Durchmesser 6cm und 8cm dargestellt. Es handelt sich nach den in Abschnitt 4.1.2 dargestellten Ergebnissen um eine vorherrschende und eine herrschende Eiche. Dabei sind Kronen- (signifikant), Blatt- (signifikant), Wurzelgewicht und Wurzelvolumen (signifikant) der Eiche des Saat I- Bestandes am geringsten. Daher stellt sich das Verhältnis zwischen dem Stamm- und Wurzelvolumen für die Saat I Eichen am ungünstigsten dar. Die Bäume der anderen Flächen unterscheiden sich diesbezüglich kaum. Die Eichen der drei Flächen unterscheiden sich hinsichtlich der Relation zwischen Kronengewicht und Wurzelvolumen nur geringfügig.

Tabelle 69: Beispiel einer Berechnung der Parameter; 13 jährige Eiche; BHD 6 cm und 8 cm; Kattenbühl

BHD (cm)	Pflanzung			Pflanzung		
	Saat I	Saat II	Saat I	Saat II	Saat I	Saat II
	6	6	6	8	8	8
Stammvolumen (dm ³)	10,3	9,9	9,9	16,9	16,1	16,4
Höhe (m)	6,3	6,3	5,9	7,1	7,5	6,8
Kronengewicht (kg)	12,1	7,6	9,7	20,5	12,0	17,2
Wurzelvolumen (dm ³)	2,1	1,3	2,0	3,7	2,3	3,3
Blattgewicht (kg)	5,2	3,0	4,06	9,1	4,9	6,8
Wurzelgewicht (kg)	8,4	5,0	7,3	13,1	8,3	11,6
Stamm-/Wurzelvol. (dm ³)	4,9:1	7,6:1	5,0:1	4,6:1	7:1	5,0:1
Kronengewicht (kg) / Wurzelvolumen (dm ³)	1,4:1	1,5:1	1,3:1	1,6:1	1,5:1	1,5:1

5 Diskussion

5.1 Methode

Die in dieser Arbeit dargestellten Wurzel­daten sind nur unter Berücksichtigung der Methode und insbesondere deren Qualität zu beurteilen. Nach BÖHM (1979) hängt die Methode von dem Ziel der Untersuchung ab. Hierfür ist es notwendig, das bestmöglichst an diesem Ziel orientierte Verfahren zu finden. In Tabelle 70 ist eine Übersicht der Verfahren dargestellt, die in der Literatur zu Untersuchungen der Grobwurzeln genutzt werden (POLOMSKI und KUHN 1998).

Tabelle 70: Übersicht der in der Literatur beschriebenen Methoden für Wurzeluntersuchungen (POLOMSKI und KUHN 1998)

Problemstellung	Methoden	Literatur
Wurzelarchitektur Vertikale Anordnung	Totalausgrabungen Teilausgrabungen Wurzelprofile Blockmethoden	KÖSTLER <i>et al</i> 1968 KÖSTLER <i>et al</i> 1968 KÖSTLER <i>et al</i> 1968 KARIZUMI 1968, BÖHM und KÖPKE 1977
Wurzelarchitektur Horizontale Anordnung	Freilegung mittels Wasserstrahl Freilegung mittels Vakuumpumpe	KÖSTLER <i>et al</i> 1968; BÖHM 1979
Mechanische Eigenschaften, Zugfestigkeit	Mechanische Belastbarkeit	KOKKONEN 1929; WHITELEY und DEXTER 1984; SCHIECHTLE 1983; LICHTENEGGER 1985; ABE und IWAMATO 1986; HÄHNE 1991
Wachstumsrate Lebensdauer Biomasse	Feldmethoden 1. Rhizoskop 2. Glaswand 3. Bohrkerne 4. Einwuchsmethode 5. Profilwand Labormethoden 1. Container 2. Wachstumskammer 3. Gravimetrische Methoden 4. Färbemethoden	CARLEY und WATSON 1966; BÖHM 1979; BROWN und THILENIUS 1977; PERSSON 1979 BASSAM und SOMMER 1980; VOS und GROENWALD 1983; STEEN 1983; VAVOULIDOU-THEODOROU und BABEL 1983; BOSCH 1984; ITOH und BARBER 1983; SEUFERT <i>et al</i> 1986; BECKER <i>et al</i> 1988 WÖLLMER 1987; UPCHURCH <i>et al</i> 1988; FERNANDEZ und PARUELA 1988; ABERTS <i>Et al</i> 1989; PIJNENBORG <i>et al</i> 1990; ZOON und TIENDEREN 1990; CHENG <i>et al</i> 1991; GIJSMAN <i>at al</i> 1991; EGLI und KÄLIN 1991; WAGNER 1994; BOX 1996; BRECKLE 1996
Wurzelarchitektur Verzweigung / Oberfläche	Monolith-Methoden Box-Methoden Nadelwand-Methode Markierte Elemente Färbemethoden	ELLERN <i>et al</i> 1970; BÖHM 1979; STEINBERG und FREYTAG 1980; STEINBERG und FREYTAG 1980 SATTELMACHER <i>et al</i> 1983

Ein Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Wurzelarchitektur von Fichte, Kiefer, Buche und Eiche schematisiert zu erfassen und zu beschreiben. Die Grobwurzelarchitektur ist als Auf- und Grundriß eines Wurzelsystems zu verstehen. Für diese Zielsetzung wurde die in dieser Arbeit

durchgeführte Methode der Wurzelaufnahme entwickelt. So war es möglich innerhalb der vorgesehenen Zeit einen großen Stichprobenumfang zu untersuchen und damit waldbauliche Fragestellungen zu bearbeiten.

Das Verfahren kann als eine Mischung der von HILF 1927 durchgeführten Totalausgrabungen und der von ELLERN *et al* (1970) und BÖHM (1979) beschriebenen Monolith - Methode angesehen werden. Die Wurzelsysteme werden in ihrer Gesamtheit aus der Erde entnommen. Ein dreidimensionales Raster, dessen Aussehen "Tortenstücken" ähnelt, wird über das System gelegt, und an den Durchtrittsstellen werden die Durchmesser der Einzelwurzeln aufgenommen. Es wird demnach bis zu einem Meter Entfernung vom Wurzelstock ein runder Wurzelmonolith entnommen, der in 27 Abschnitte zerteilt und vermessen wird. Nachteil dieser Methode ist, daß durch die Entnahme des Baumes Wurzelabriss und Veränderungen der Wurzellage, insbesondere der dünneren Wurzeln stattfinden. Dieses Problem kann durch die erstmals von WEAVER (1919) angewandte Profilwandmethode beseitigt werden. Bei diesem Verfahren werden in bestimmten Radien bis in festgelegte Tiefen Grabungen durchgeführt. An deren baumzugewandten Schnittseiten können manuelle Messungen der Wurzeldurchmesser und -Positionen durchgeführt werden oder fotografische Auswertungen mit Hilfe einer computergesteuerten Bildanalyse stattfinden (SUTTON 1978). Um eine Vergleichbarkeit mit den hier durchgeführten Daten zu erlangen, müssen für einen Baum sechs Profile angelegt werden. Dies ist notwendig, um die drei horizontalen und drei vertikalen Radien in verschiedenen Entfernungen vom Stamm zu untersuchen. Die Profilwandmethode ist eine sehr genaue Aufnahmetechnik, für die jedoch ein hoher Zeitaufwand erforderlich ist. In der Literatur sind wenig Zeitangaben für die jeweiligen Methoden dargestellt. BIBELRIETHER (1962) führt für die Erfassung eines freigelegten Wurzelsystems von ca. 20cm dicken Eichen durchschnittlich sechs bis acht Stunden Arbeitszeit an. Die für die vorliegende Arbeit durchgeführten Untersuchungen an etwa 10cm dicken Eichen dauerten im Schnitt eine Stunde (zwei Personen). Der Arbeitsaufwand ist von vielen Faktoren wie der Bodenbeschaffenheit, dem Alter der Bäume (bzw. BHD), der Baumart und dem Genauigkeitsanspruch der Aufnahmen abhängig und so einer großen Variabilität unterlegen.

Vorteilhaft bei der in dieser Arbeit angewandte Methode ist der im Vergleich zu den anderen Verfahren geringere Zeitaufwand, der umfangreichere Stichproben ermöglicht. Eine Schwierigkeit dieses Verfahrens ist die Variationsbreite bei der Festlegung der Radiengröße, die abhängig sein sollte von der Baumart, dem Alter (BHD) und dem Standort. In der Literatur werden verschieden große Radien angegeben. Dabei lassen sich keine Gesetzmäßigkeiten erkennen. So wählen DREXHAGE (1994) und DO-HYUNG LEE (1998) bei ca. 40jährigen Fichten horizontale Radien von 20cm und 50cm und vertikale Tiefenstufen von 10cm bzw. 20cm. NIELSEN (1990) mißt bei denselben Baumarten horizontal sowie vertikal in 40cm und 100cm Entfernung von der Stammbasis. KREUTZER (1961) beschränkt seine Messungen an jüngeren Bäumen auf einen Horizontalradius von 57cm, in dem er sechs Tiefenstufen, beginnend bei 30cm, unterscheidet. In der vorliegenden Arbeit werden für die älteren Bäume horizontale und vertikale Radien von 30cm, 60cm und 100cm und für die jüngeren 20cm-, 40cm- und 70cm- Radien genutzt. Tabelle 71 gibt einen Überblick über die verwendeten Radien in Abhängigkeit vom BHD der Probestämme. Für eine genauere Vermessung empfiehlt es sich, weitere Sektionen in gleichmäßigen Abständen in die vorgeschlagenen Distanzen einzubinden.

Diese sollten zum Beispiel bei einem BHD von 16 cm bis 30 cm in 15 cm, 45 cm und 80 cm Entfernung vom Wurzelstock liegen.

Ein grundsätzlich anderes Verfahren wird von PUHE (1994) angewendet. Bei ihm bilden Verzweigungen und nicht Radien des Wurzelsystems die Datengrundlage. Die Wurzeldurchmesser und die Koordinaten werden an jeder Verzweigung gemessen. Dabei handelt es sich um eine sehr genaue Methode, die pro Baum mit einem BHD von 2 cm bis 21 cm einen Zeitaufwand von zwei bis acht Wochen benötigt. Bei dieser Arbeit war die Zielsetzung eine andere, so daß ein grundsätzlich anderes Konzept der Wurzelvermessung verwendet wurde.

Die Vielzahl der Aufnahmemethoden erschwert die Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Die Anwendung eines einheitlichen Verfahrens erscheint daher empfehlenswert. Die hier gewählte Methode bietet sich dafür an, weil das Ergebnis bei hinreichender Genauigkeit durch eine hohe Stichprobengröße abgesichert werden kann. Im Falle einer Verwendung von Aufnahme radien ist es notwendig, deren Größe bei einer BHD-Klasse gleich zu gestalten.

Tabelle 71: Radiengrößen zur Wurzelquerschnitterfassung

BHD des Baumes (cm)	Radiengröße (cm)		
	Sektion 1	Sektion 2	Sektion 3
<15	20	40	70
16–30	30	60	100
>30	40	80	120

5.2 Veränderung der Wurzelarchitektur bei Mischung von Buche und Fichte

5.2.1 Vorbemerkungen

Anlaß zu Mischbestandsuntersuchungen an Buche und Fichte geben u.a. Beobachtungen von FÖLSTER *et al* (1991) und MACKENTHUN (1990). Sie finden heraus, daß in Mischbeständen eine Verflachung der Fichtenfeinwurzeln und eine Tiefenverlagerung der Buchenfeinwurzeln stattfindet. Diese Aussagen bestätigt ROTHE (1997). Er erörtert, daß Fichten und Buchen eine direkte Wurzelkonkurrenz vermeiden. Ihre Feinwurzeln überlappen sich nur bis zu einer Tiefe von 30 cm. Er führt weiterhin an, daß sich die Durchwurzelungsintensität bei der Fichte im Mischbestand erhöht. Dabei erschließt die Mischbestandsfichte bei halber Stammzahl den Boden fast so intensiv wie die Reinbestandsfichte. Dagegen sind bei der Buche deutlich geringere Feinwurzelmassen im Mischbestand zu finden als im Reinbestand. Die Ursachen für diese Ergebnisse sind noch wenig bekannt. Als mögliche Erklärung führt WITTKOPF (1995) die unterschiedliche Anfälligkeit der Baumarten gegenüber Protonentoxizität und allelopathischen Stoffwechselprodukten der Fichte an. Das Auftreten solcher Effekte wurde bei unseren heimischen Baumarten wiederholt nachgewiesen (LEIBUNDGUT 1975). Von WEISSEN und VAN PRAAG (1991) wird die Beeinflussung des Wurzelwachstums durch Huminstoffe diskutiert. Diese speziellen Auswirkungen sind jedoch im Freiland bis jetzt wenig erforscht.

Weiterhin berichten RYSAVI und ROLOFF (1994) sowie BÜTTNER und LEUSCHNER (1994) von vertikalen Verdrängungen der Buchenwurzeln durch die Mischung mit Esche oder Eiche. Standortsabhängig wird beim Vergleich verschiedener Fichtenmischbestände eine unterschiedliche Tiefendurchwurzelung festgestellt. Dabei wird auf Stagnogley eine Konzentration der

Wurzeln im Auflagehumus (CHAPMAN *et al* 1986) beobachtet, während auf Moorböden Wurzeln in tieferen Bodenschichten gefunden werden (MCKAY und MALCOM 1988).

BONNEMANN (1939) untersucht die Wurzelentwicklung von einem rund 100jährigen Kiefern/Buchenmischbestand auf tiefgründigem sandigem Lehm und beobachtet die größte Wurzelmasse der Kiefern in 1 cm bis 20 cm Bodentiefe. Dagegen sind in einer Bodentiefe von 20 bis 60 cm erhebliche Wurzelmenen der Buchen zu finden. HENDRIKS und BIANCHI (1995) konnten bei Douglasien-Buchenmischbeständen eine verbesserte Tiefendurchwurzelung beider Baumarten nachweisen.

5.2.2 Tiefendurchwurzelung

Die Tiefendurchwurzelung (Vertikalbewurzelung) spielt für die Verankerung im Boden eine wichtige Rolle (COUTTS 1983) und ist ein wichtiger Zeiger der Stabilität. Sie hängt von den Faktoren Durchlüftung, Nährstoffversorgung, Tiefgründigkeit, Versauerung und Wasserversorgung des Bodens ab. Beim Vergleich maximaler Wurzeltiefen werden für die Fichte Tiefen von 6 m in tiefgründigem, lehmigem Sand (JÜTTNER 1954) und für die Buche Tiefen von 3 m auf reinem Sand (GANNBEN 1934) angegeben. PUHE (1994) findet bei einer einzelnen Fichte im ehemaligen Forstamt Ebergötzen Wurzeln in nahezu 3 m Tiefe. Damit kann die Aussage von VATER (1927) unterstützt werden, daß die Fichte nicht pauschal als Flachwurzler zu bezeichnen ist. Nach GRUBER (1992) zählt die Fichte zum Abiestyp, der sich durch eine zentral dominierende, geotrop wachsende Hauptwurzel auszeichnet. Allerdings liegt eine schwache Apikalontrolle über die Seitenwurzeln vor. Schon bei geringen Verschiebungen der optimalen Bodenbedingungen wird das Wachstum der Zentralwurzel gehemmt.

Nach BÜSGEN und MÜNCH (1927) und RACHTEJENKO (1952) ist bei der Fichte mit 30 Jahren das Tiefenwachstum im wesentlichen abgeschlossen, so daß eine starke Veränderung der Tiefendurchwurzelung mit zunehmendem Alter nicht erwartet werden kann. Unterstützt wird diese Aussage durch die Tiefenwurzeln der 41- und 50jährigen Fichten aus Krebeck (Lehm) und Knesebeck (Sand). Sie wurzeln etwa genauso tief wie die älteren Fichten aus Holzerode.

Die für diese Arbeit untersuchten Fichten im Rein- und Mischbestand und Buchen im Reinbestand mit durchschnittlich gleichem BHD weisen Wurzeltiefen bis zu 120 cm auf. Deutlich flacher hingegen wurzelt die Buche des Mischbestandes. Die Werte für die tiefsten Einzelwurzeln der rund 60jährigen Fichten und Buchen bewegen sich durchaus im Rahmen der in der Literatur angegebenen Daten. Im Schnitt wurzeln die Fichten im Mischbestand 85 cm tief und damit etwa 15 % tiefer als die Buche bzw. die Fichte im Reinbestand. Im Vergleich der beiden Reinbestände sind keine großen Unterschiede in bezug auf die Wurzeltiefe der Einzelwurzeln festzustellen. Durchschnittlich am flachsten wurzeln die Buchen des Mischbestandes (60 cm). Nach diesen Ergebnissen ist bezüglich der Tiefendurchwurzelung allein für die Fichte ein positiver Effekt durch die Mischung mit Buche zu beobachten, nicht jedoch für die Buche im Mischbestand. Über die Tiefendurchwurzelung der Bäume in Fichten - Buchenmischbeständen sind für die Grobwurzeln in der Literatur keine Angaben zu finden. Auch für die Feiwurzeln können bezüglich der maximalen Durchwurzelungstiefe keine Aussagen gemacht werden. Bedingt durch die Methode der Feiwurzelentnahme werden hierbei maximal Tiefen bis 60 cm erreicht.

5.2.3 Wurzelintensität

5.2.3.1 Durchmesser-Verteilung der Wurzeln

Die Verteilung der Wurzeln auf verschiedene Durchmesserklassen ist bei den untersuchten ca. 60-jährigen Fichten im Mischbestand bei durchschnittlich gleichen Dimensionen ausgewogener als bei den Fichten im Reinbestand. Die Mischbestandsfichte besitzt einen signifikant höheren Anteil dickerer Wurzeln. Bei der Buche im Rein- und im Mischbestand unterscheiden sich die Durchmesser der Vertikal- und Horizontalwurzeln nur geringfügig und nicht signifikant. Durch die Begründung der Fichte im Mischbestand wird das Dickenwachstum der Horizontal- und besonders das der Vertikalwurzeln gefördert. Für die Buche kann kein positiver Effekt durch die Mischung mit Fichte erkannt werden.

5.2.3.2 Räumliche Verteilung der Wurzeln

Bei der relativen Verteilung der Wurzelanzahl sind bei der reinen Buche stammnah rund 15% weniger Horizontal- und Vertikalwurzeln zu finden als bei der Mischbestandsbuche. Entsprechend mehr Wurzeln sind in entfernteren Distanzen vom Wurzelstock zu beobachten. Beim Vergleich der Relationen zwischen Horizontal- und Vertikalwurzeln ist bei den Buchen eine gleichmäßige Verteilung der Wurzeln über die verschiedenen Sektionen festzustellen. Dabei weist die Buche im Reinbestand geringfügig ausgewogenere Verhältnisse auf als die Buche im Mischbestand. Aber nicht nur die Wurzelanzahl, sondern auch die Wurzelquerschnittfläche ist bei der Durchführung eines Vergleichs zwischen den Rein- und Mischbeständen von Bedeutung. Aus diesem Grund erfolgt eine Betrachtung der relativen Abnahme der Wurzelquerschnittfläche mit zunehmender Entfernung von der Stammbasis. Die vertikale Wurzelquerschnittfläche der Buche im Reinbestand ist absolut stärker als im Mischbestand. Dennoch erfolgt die relative Abnahme der Querschnittfläche im ähnlichem Maße. Allerdings werden die Wurzeln der Mischbestandsfichte ab einer Tiefe von 40cm nicht dicker. Die Buche muß demnach Faktoren ausgesetzt sein, die den Anstieg der Vertikalwurzelquerschnittfläche begrenzen. Eine Ursache dafür könnten die Fichtenwurzeln sein, die in dieser Tiefe noch große Wurzelquerschnittflächen aufweisen. Damit konkurrieren sie direkt mit den Buchenwurzeln (Abschnitt 4.1.1). Dabei können eventuell allelopathische Wirkungen eine Rolle spielen (WITTKOPF 1995).

Die Reinbestandsfichte weist horizontal nahezu die gleiche Verteilung der Wurzeln auf wie die Fichte im Mischbestand. Die meisten ihrer Wurzeln sind in einer Tiefe von 60cm und bei einer Stamm(Stock-)entfernung (horizontal) von einem Meter zu finden. Die Mischbestandsfichte zeigt in der Tiefe eine höhere Wurzelintensität als die des Reinbestandes. Die meisten ihrer Wurzeln erreichen eine Tiefe von einem Meter. In der horizontalen Wurzelrichtung ist die größte Querschnittfläche der Wurzeln beider Bestände in Stammnähe zu finden. Dies läßt sich bei der Mischbestandsfichte für die Vertikalwurzeln ebenfalls feststellen. Dagegen weist die Reinbestandsfichte in 60cm Tiefe die größte Querschnittfläche auf. Dabei darf nicht vergessen werden, daß die absolute Querschnittfläche der Mischbestandsfichte horizontal um 11% und vertikal dreimal so hoch ausfällt. Es zeichnet sich ab, daß die Reinbestandsfichte in der Tiefe ihre geringe Vertikalwurzelmenge durch einen großen Wurzelquerschnitt kompensiert. Auf diese Weise kann sie eine ausreichende Standfestigkeit (Stabilität) erreichen. Wird das Ge-

samtwurzelvolumen betrachtet, zeigt die Fichte im Mischbestand 20% höhere Werte als die Fichte des Reinbestandes. Dies kommt, wie oben dargestellt, durch das geringere Vertikalwurzelvolumen zustande. Der Boden wird im Mischbestand intensiver in der Tiefe durchwuzelt als im Reinbestand. Diese Resultate entsprechen nicht den Feststellungen von MACKENTHUN (1990), FÖLSTER *et al* (1991) und ROTHE (1997), die eine Verflachung der Fichtenwurzeln im Mischbestand beobachten. MACKENTHUN (1990) und ROTHE (1997) weisen diesen Effekt bei Feinwurzeln nach. In der vorliegenden Untersuchung stellt sich die Verteilung der Grobwurzeln anders dar als die Verteilung der Feinwurzeln. Die Grobwurzeln der Fichte im Reinbestand weisen in der Horizontalen erheblich mehr Feinwurzeln auf als die im Mischbestand, was bedeutet, daß die Durchwurzelungsintensität der Feinwurzeln im Oberboden zunimmt. Dies wäre eine mögliche Erklärung der Ergebnisse von MACKENTHUN (1990) und ROTHE (1997), die ebenfalls eine Zunahme der Feinwurzelintensität beobachten. WIEDEMANN (1943) stellt fest, daß der Unterschied zwischen Misch- und Reinbeständen meist sehr gering ist. Anhand seiner Untersuchungen wurzelt die Fichte im Mischbestand nicht tiefer als im Reinbestand, und auch die Buche zeigt im Mischbestand keine Unterschiede.

FÖLSTER *et al* (1991) untersuchen nicht nur Fein-, sondern auch Grobwurzeln von 60jährigen Fichten und 95- bis 160 jährigen Buchen in einzelstamm- und 60jährige Bäume in truppweiser Mischung. Bei beiden Mischungsformen stellen sie eine vertikale Wurzelraumteilung fest. In der Tiefe von 20-30 cm halten sich Fichten und Buchenwurzeln die "Waage", während darüber die Fichte und darunter die Buche dominiert. Diese im Vergleich zu der vorliegenden Arbeit konträren Ergebnisse können bei den von FÖLSTER *et al* (1991) untersuchten Fichten und Buchen der einzelstammweisen Mischung darin begründet sein, daß ein großer Altersunterschied vorliegt. Bei den gleichalten truppweise gemischten Fichten stellt sich nach bodenkundlichen Untersuchungen heraus, daß die Fichten auf wesentlich stärker stauwasserbeeinflußtem Boden stocken als die Buchen. Diese Außenbedingungen könnten eine Begründung der gegenteiligen Ergebnisse sein.

Die verschiedenen Resultate weisen darauf hin, daß bezüglich der Wurzelausprägung in Mischbeständen noch keine eindeutigen Aussagen getroffen werden können und somit weitere Untersuchungen durchgeführt werden müssen.

Im folgenden sei kurz die Relation der Horizontal- und Vertikalwurzeln (Anzahl und Querschnittfläche) als weiterer Indikator der Wurzelintensität dargestellt. Die Ergebnisse charakterisieren die Verteilung der Wurzelbiomasse in einem definierten Bodenraum. Nach GRUBER (1992) ist dieses Verhältnis ein Maß der mechanischen und physiologischen Verankerung.

Die Buchen zeigen bei der Wurzelquerschnittfläche ein ausgewogeneres Verhältnis zwischen den Horizontal- und Vertikalwurzeln als die Fichten. Für die Wurzelanzahl kann diese Aussage nicht gemacht werden. Diese Verhältnisse charakterisieren das Senkerwurzelsystem der Fichte und das Herzwurzelsystem der Buche. Erstere zeigt wenige, im Querschnitt sehr starke Horizontalwurzeln, von denen viele dünne Senkerwurzeln in die vertikale Richtung abgehen. Das Herzwurzelsystem der Buche ist gekennzeichnet durch eine Vielzahl schwächerer Wurzeln, die sich bis in tiefe Bodenschichten verteilen und den Bodenraum sehr intensiv, netzartig erschließen. Interessant erscheint hierbei, daß die Fichte des Mischbestandes in der Verhältnisbetrachtung sich der Buche annähert.

5.2.4 Sproß / Wurzelbeziehungen

Relationen ober- zu unterirdischen Parametern bei Mischbeständen (Fichte/Buche) sind in der Literatur nicht beschrieben worden. Die eigenen Untersuchungen weisen Zusammenhänge zwischen Kronen-, Stamm- und Wurzelgrößen auf, die mit zunehmendem Alter geringer werden. Ähnliche Aussagen macht MELZER (1962) in seiner Arbeit über stochastische Beziehungen verschiedener Sproß/Wurzelmerkmale von 4- und 50jährigen Reinbestandsfichten.

Das Verhältnis zwischen Stamm- und Wurzelvolumen liegt bei der Fichte im Reinbestand durchschnittlich bei 8,4:1 und bei der des Mischbestandes bei 6,9:1, wobei diese Unterschiede nicht signifikant sind. Im Hinblick auf die Einzelbaumstabilität stellt sich dieses Ergebnis für die Fichte im Mischbestand positiver dar als für die im Reinbestand. Hinzu kommt, daß die Fichte im Reinbestand erstaunlicherweise eine um 24% höhere Kronenmasse besitzt als die im Mischbestand. Dieses Resultat widerspricht Aussagen von SCHÜTZ (1989). Er führt an, daß die Kronenausbildung der Fichte in Einzelmischung mit Buche deutlich verbessert wird. Allerdings weist die hier untersuchte Fichte des Mischbestandes einen geringeren H/D-Wert auf, so daß sich ein Zusammenhang zwischen geringem H/D-Wert und größerer Wurzelmasse ergibt. Bei den Buchen können die Zusammenhänge zwischen ober- und unterirdischen Parametern nicht gefunden werden. Gründe dafür bleiben unklar. Vermutlich sind sie baumarten- und/oder altersspezifisch. ROLOFF und RÖMER (1989) beschreiben Sproß / Wurzelsysteme von zwei Meter hohen Buchen. Sie stellen gute Beziehungen zwischen den Parametern Sproßlänge/Wurzellänge, Sproßgewicht/Wurzelgewicht und Blattfläche/Wurzelgewicht heraus. Aber schon bei diesen Untersuchungen konnte eine große Heterogenität der Wurzelsysteme festgestellt werden, so daß die Autoren ausdrücklich auf die Problematik der Grobwurzelerfassung hinweisen. Ähnliche Aussagen macht PELLINEN (1986). Aus diesen Erläuterungen kann der Schluß gezogen werden, daß die gefundene Heterogenität der hier dargestellten Untersuchungen bei der Buche altersbedingt ist.

Bei den Relationen zwischen den ober- und den unterirdischen Parametern darf die Konkurrenzsituation der Bäume nicht außer acht gelassen werden. Die in dieser Arbeit vorgestellten Konkurrenzindizes zeigen, daß die Buche im Mischbestand der größten Konkurrenz ausgesetzt ist. Dies wäre ein Ansatz, um zu erklären, warum ihr Wurzelvolumen im Gegensatz zu dem der Reinbestandsbuche geringer ausfällt. Allerdings muß dabei bedacht werden, daß der verwendete HEGYI-Index nicht zwischen inter- und intraspezifischer Konkurrenz unterscheiden kann. Aus diesem Grund können Unterschiede in Abhängigkeit von der beigemischten Baumart nicht berücksichtigt werden. Unter Umständen sind nicht die Menge, die Höhe und der Durchmesser der beigemischten Fichten für den hohen Konkurrenzdruck auf die Buche verantwortlich, sondern die Tatsache, daß es sich bei den konkurrierenden Bäumen eben um Fichten handelt.

Würden die Aussagen, die FÖLSTER *et al* (1991), MACKENTHUN (1990) und ROTHE (1997) gemacht haben, auch für die Grobwurzeln zutreffen, müßte die Menge der Wurzeln der Mischbestandsbuche in den unteren Bodenschichten zunehmen. Aber gerade dort zeigt die Buche des Mischbestandes ein um die Hälfte geringeres Wurzelvolumen als die reine Buche. EHWALD *et al* (1961) kommen zu den gleichen Ergebnissen bei Mischung der Kiefer mit Buche. Durch Beimischung von Buche wurzelt die Kiefer intensiver und nähert sich so der Wurzelausprägung von Buchenbeständen an.

Anhand der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit ist festzustellen, daß die Wurzelintensität der Buche im Mischbestand deutlich abnimmt. Trotzdem ist der H/D-Wert der Mischbestandsbuche kleiner als der der reinen Buche. Unter dem Aspekt, daß die dort ermittelten Konkurrenzindizes höher ausfallen, stellt dies ein bemerkenswertes Ergebnis dar.

Als Fazit dieser Untersuchungen kann gesagt werden, daß die Einmischung von Fichte in Buchenbestände die Wurzelqualität und -quantität der eingemischten Fichte deutlich verbessert. Für die Buche hat diese Einmischung jedoch nachteilige Wirkungen. Sie wurzelt flacher und besitzt weniger Vertikalwurzeln. Hierin sind Stabilitätsverluste zu erwarten.

5.3 Kiefer und Fichte in 20, 30 und 50 jährigen Reinbeständen

5.3.1 Wurzelentwicklung der Kiefer auf Sand

5.3.1.1 Wurzelmorphologie der Kiefer

Für die Kiefer sind eine begrenzte seitliche (horizontale) Ausdehnung der Wurzeln und die starke Neigung zur Ausbildung von Vertikalwurzeln typisch. Sie zeigt sich gegenüber mechanischen Widerständen im Boden sehr empfindlich, kann aber auf Veränderungen äußerer Bedingungen, wie z.B. skelettreiche Böden, gut reagieren (WIEDEMANN 1927). Auffällig ist die strenge Trennung der Horizontal- und Vertikalwurzeln, die MOIR UND BACHELARD (1969) sowie BRAEKKE UND KOZLOWSKI (1977) an verschiedenen Kiefernarten herausstellen. Durch ihre ausgeprägte Pfahlwurzel und Wurzelplastizität (MOROSOW 1928, SCAMONI 1950, WIEDEMANN 1951) ist die Kiefer in der Lage, schwierige Standorte gut zu durchwurzeln. Abhängig ist die Pfahlwurzelbildung von der Provenienz. So findet BIBELRIETHER (1964) bei einer ostpreussischen Herkunft eine deutlichere Pfahlwurzelentwicklung als bei einer des Rhein-Main Gebietes. LIESE (1926) hält Unterschiede der Genotypen ebenfalls für denkbar. Nach KÖSTLER *et al* (1968) hängt die Pfahlwurzelbildung neben genetischen Einflüssen primär von der Bodenart und nur sekundär vom Bodentyp ab. Nach KALININ (1983) ist eine Veränderung der Wurzelmorphologie mit steigendem Alter der Kiefern nur dann erkennbar, wenn ungehindertes Wurzelwachstum stattfinden kann. Dies bedeutet, daß keine Stauschichten oder flachgründige, skelettreiche Böden dem Wurzelwachstum entgegenwirken.

5.3.1.2 Tiefendurchwurzelung

In der Literatur wird eine maximale Wurzeltiefe der Kiefer von 9,40m angegeben (LAIKARI 1929b). Dabei weisen die verschiedenen Beschreibungen in Abhängigkeit vom Baumalter eine hohe Variation auf (STONE und KALISZ 1991). Auf tiefgründigen Böden erreichen die Wurzeln 20jähriger Kiefern eine Tiefe von 1,50m (KÖSTLER *et al* 1968), die Wurzeln 30-40jähriger Kiefern eine Tiefe von 1,80-5 m (KÖSTLER *et al* 1968, KALININ 1983) und die Wurzeln 40jähriger Kiefern eine Tiefe von 9,40m (LAIKARI 1929b). In Knesebeck, einem ebenfalls tiefgründigen Standort, wird für die 20jährige Kiefer eine maximale Wurzeltiefe von 0,77m (Mittelwert) gefunden. Bei den 33- und 47 jährigen Kiefernbeständen wurzeln die Bäume 16% (0,9 m) bzw. 56% (1,20m) tiefer. Die Unterschiede zwischen den hier festgestellten Wurzeltiefen und den entsprechenden Literaturwerten kommen dadurch zustande, daß in der Literatur "Spitzenwerte" einzelner Bäume dargestellt werden. Dagegen beziehen sich die Angaben in der

vorliegenden Arbeit auf die Mittelwerte der maximalen Tiefe der ausgesuchten Probestämme. Die Streuung der Daten kann bis zu 30% vom Mittelwert betragen. Darüber hinaus fehlt bei vielen Literaturangaben eine Unterscheidung zwischen Fein- und Grobwurzeln. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit können nur Aussagen über die Tiefe der Grobwurzeln gemacht werden, da beim Umziehen der Bäume tiefer gelegene Feinwurzeln abgerissen sein dürften.

Unabhängig von diesen methodischen Problemen wird die Wurzeltiefe der Kiefer im tiefgründigen Sand von zahlreichen Faktoren beeinflusst. In dieser Beziehung ist die bereits bei der Ausprägung der Pfahlwurzel beschreibende Abhängigkeit von der Provenienz zu erwähnen. Darüber hinaus können HOCHTANNER und SEITSCHKE (1964) anhand von Meliorationsversuchen feststellen, daß die Kiefer bei einer verbesserten Nährstoffversorgung tiefer wurzelt. Ähnliches weist RASPE (1992) bei der Fichte nach.

5.3.1.3 Wurzelintensität

Verteilung der stammnahen Wurzeln

Bis zum Alter von 33 Jahren steigt in der relativen Betrachtung der Anteil der über 50 mm dicken Kiefernwurzeln nur wenig an (rund 15%). Bis zum Alter von 47 Jahren erfolgt eine stärkere Zunahme gerade der Vertikalwurzel Durchmesser um nahezu 50%. In diesem Alter sind fast 20% der Vertikalwurzeln über 150 mm stark. Letzgenanntes deutet bei der Kiefer auf den großen Anteil der Pfahlwurzel an der gesamten vertikalen Bewurzelung hin. Ausgedrückt wird dies gleichermaßen durch die Summe der Wurzelquerschnitte, die das gesamte Wurzelsystem charakterisieren. Mit Anstieg des Alters erhöht sich der Wurzelquerschnitt sowohl horizontal als auch vertikal von 20- zu fast 50jährig auf mehr als das Zwanzigfache. Die Wurzelanzahl steigt aber nur auf das Doppelte an. Dies kann ebenfalls als Nachweis der starken Vertikalwurzeln aufgefaßt werden.

Verteilung der Wurzeln mit zunehmender Entfernung vom Wurzelstock

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, daß sich bei der Kiefer mit zunehmendem Alter die relativen Werte der Wurzelanzahl bei den verschiedenen Sektionen stark verändern. Die Kiefer legt bei Alterung neue Horizontal- und vermehrt Vertikalwurzeln an. Erstaunlich hierbei ist, daß sich die Summe der Querschnittfläche in den einzelnen Sektionen von 20- zu 47jährig in der relativen Betrachtung kaum wandelt. Dabei sind 75 % der Wurzelquerschnittfläche stammnah und 25 % in weiterer Entfernung zu finden. Dies deutet darauf hin, daß die Kiefer in der Jugend verstärkt Wurzeln in den tieferen Bodenschichten ausbildet und die Horizontalwurzelbildung, zeitlich gesehen, später erfolgt. Zu dem gleichen Ergebnis kommt WAGENHOFF (1938). Bei seinen Untersuchungen erreicht die Kiefer bereits nach drei Jahren eine Wurzeltiefe von 1 m. Dagegen beginnen die Horizontalwurzeln erst nach 15 Jahren mit einer extensiven Ausdehnung in die Seitenbereiche. KALELA (1955) bemerkt, daß bis zu einem Alter von 40 Jahren die volle Dichte des Wurzelwerkes erreicht ist und lediglich in tieferen Bodenschichten die Anzahl der Wurzeln weiter zunimmt. Das spätere Einsetzen des horizontalen Wurzelwachstums beschreiben KÖSTLER *et al* (1968) bei 20–30jährigen Kiefern. Die von ihnen untersuchten Bäume weisen im hohen Alter 80% Horizontal- und 20% Vertikalwurzeln auf.

WAGENHOFF (1938) und KÖSTLER *et al* (1968) stellen weiterhin fest, daß bei der Kiefer die Querschnittfläche der Vertikalwurzeln einen Anteil von nur 20–40% an der gesamten Wur-

zelquerschnittfläche hat. Der entsprechende Wert liegt bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen bei durchschnittlich 50%. Wie schon KÖSTLER *et al* (1968) erörtern, verringert sich der Anteil der Vertikalwurzeln im Verhältnis zur Horizontalwurzelmasse im höherem Alter. Diese Abnahme kann darin begründet sein, daß die stammnahen Horizontalwurzeln sehr viel dicker werden als die Vertikalwurzeln.

5.3.1.4 Sproß / Wurzelbeziehungen

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit haben gezeigt, daß sich nur bei den 20- und 33jährigen Kiefern (nicht aber bei dem älteren Bestand) Zusammenhänge zwischen den ober- und unterirdischen Bauparametern finden lassen (Abschnitt 4.3). Ebenfalls weisen KÖSTLER *et al* (1968) darauf hin, daß nur bei jungen Kiefern Beziehungen zwischen Baumhöhe und Wurzeltiefe zu finden sind. WIEDEMANN (1942) und BIBELRIETHER (1964) vermuten, daß schlechte Stammformen der Kiefer im Stangenholzalter mit einer flachen, einseitigen Durchwurzelung einhergehen. HILF (1927) und WAGENHOFF (1938) bemerken, daß während des ganzen Bestandeslebens kein Zusammenhang zwischen Kronen- und Horizontalwurzel- ausdehnung vorhanden ist. Diese Feststellungen stehen mit den geringen Korrelationen im Einklang, die zwischen den entsprechenden Parametern in dieser Arbeit ermittelt werden. Sie lassen die Schlußfolgerung zu, daß das Wachstum der Kiefer sich mit zunehmendem Alter sehr variabel gestaltet. Beim Betrachten der Relation zwischen Stamm- und Wurzelvolumen entfallen bei jüngeren Kiefern 10% auf das Wurzelvolumen, bei den 33jährigen sind es nur 6%. LAITAKARI (1929a) findet bei einer ca. 60jährigen Kiefer mit $0,7108\text{ m}^3$ Stammvolumen ein Wurzelvolumen von $0,1575\text{ m}^3$. Letzteres stellt einen Anteil von 16% des Wurzelvolumens am Gesamtvolumen dar. Die Größenunterschiede der Werte sind damit zu erklären, daß LAITAKARI (1929a) mit dem oben aufgeführten Wert seinen stärksten Baum angeführt hat. Bei Betrachtung der für diese Arbeit untersuchten Kiefern hat der stärkste Baum ein Stammvolumen von $0,5\text{ m}^3$ mit einem Wurzelvolumen von $0,08\text{ m}^3$. Bei diesen Werten hat das Wurzelvolumen ebenfalls einen Anteil am Gesamtvolumen von 16%.

5.3.2 Die Wurzelentwicklung der Fichte auf Sand

5.3.2.1 Tiefendurchwurzelung

Im Schnitt erreicht eine 50jährige Fichte auf Sandboden eine Wurzeltiefe von 120cm. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen HILF (1927), WITTICH (1948) und WAGENKNECHT und BELITZ (1959). Sie stellen darüber hinaus fest, daß die Fichte auf grundwasserfreien, lockeren Sanden bis 8m tief wurzeln kann. Tendenziell ist zu beobachten, daß die Geschwindigkeit des Wurzelwachstums mit zunehmendem Alter abnimmt. Allerdings wird der zeitliche Ablauf dieser Entwicklung kontrovers diskutiert. Nach RACHTEJENKO (1952) soll das vertikale Wachstum der Senkerwurzeln mit spätestens 30 Jahren abgeschlossen sein. JAHN *et al* (1971) behaupten hingegen, daß die Tiefenwurzeln der Fichte bis zu 50Jahre später als die Haupthorizontalwurzeln angelegt werden. Dies würde bedeuten, daß die Fichte erst im höheren Alter den Unterboden erschließt.

Bei den vorliegenden Untersuchungen läßt sich feststellen, daß die 30jährigen Fichten im Vergleich zu den 20jährigen Bäumen um 36% tiefer wurzeln. Der entsprechende Wert beträgt bei den 51jährigen Fichten 47%. Dies bedeutet, daß sich das vertikale Wurzelwachstum bei fortgeschrittenem Alter der Fichten allmählich verlangsamt. Die 30 Jahre, die RACHTEJENKO (1952) als Wachstumsgrenze des vertikalen Wurzelwachstums angibt, können als ungefähre Richtwert angesehen werden. In diesem Alter verlangsamt sich das Tiefenwachstum. Es ist aber keineswegs vollständig abgeschlossen.

5.3.2.2 Wurzelintensität

Räumliche Verteilung der Wurzeln

Für die Standfestigkeit und das Wachstum der Fichten ist es entscheidend, in welcher Größenordnung der Boden durch Grobwurzeln erschlossen wird und wie sich dies mit zunehmenden Alter der Bäume verändert. Das Wurzelwachstum der Fichte zeichnet sich in den ersten Lebensjahren durch die Entwicklung der Hauptseitenwurzeln aus (HOFFMAN 1939). Diese bilden die Basis der Senkerwurzeln, die die vertikale Bewurzelung der Fichte kennzeichnen.

In dieser Arbeit wird geprüft, in welchem Verhältnis die horizontale und die vertikale Vergrößerung des Wurzeldurchmessers bei Alterung festzustellen ist. Dabei wird beobachtet, daß die horizontalen Wurzeln bei den jüngeren Bäumen größere Dimensionen erreichen als die vertikalen Wurzeln. Die junge Fichte besitzt noch keine stärkeren Vertikalwurzeln, die 50jährige weist hingegen schon über die Hälfte stärkere Wurzeln auf. Diese Beobachtung der erst horizontalen und zeitlich später vertikalen Durchmesserentwicklung kann durch die Betrachtung der Wurzelquerschnittflächen mit zunehmender Entfernung vom Stamm unterstützt werden.

Weiterhin ist mit Zunahme des Alters sowohl horizontal als auch vertikal eine Verlangsamung des Wurzelwachstums festzustellen. Der Schwerpunkt der horizontalen und vertikalen Wurzeln in ihrer Anzahl verlagert sich im Alter von 20 bis 31 Jahren in die zweite Sektion (60cm von der Stammbasis) und von 31 bis 50 Jahren in die dritte Sektion (100cm von der Stammbasis). Nach KÖSTLER *et al* (1968) machen die Horizontalwurzeln der Fichte 60% bis sogar 100% der Gesamtwurzelmasse aus. Die Fichten des Untersuchungsgebietes in Knesebeck zeigen in der Horizontalen 80% ihrer Gesamtbewurzelung und 20% in der Vertikalen. Mit zunehmender Entfernung vom Stamm (zweite Sektion) steigt der Anteil der vertikalen Querschnittsflächen im Verhältnis zu den horizontalen um etwa 5% an. Anzahlmäßig sind doppelt so viele Wurzeln in der Horizontalen wie in der Vertikalen zu finden. Dabei ist wiederum eine Erhöhung der Wurzelanzahl in 60cm Entfernung vom Stamm erkennbar. Diese letztgenannten Merkmale charakterisieren das für die Fichte typische Senkerwurzelssystem (KÖSTLER *et al* 1968). Das von KÖSTLER *et al* (1968) beschriebene Wurzelbild kann aufgrund der in dieser Arbeit gefundenen numerischen Daten unterstützt werden. Die von ihnen dargestellte typische Vertikalwurzelbildung setzt bei einem Alter zwischen 20 und 30 Jahren ein.

5.3.2.3 Sproß / Wurzelbeziehungen

Mit Zunahme des Alters ist bei den Fichten des Untersuchungsgebietes in Knesebeck ein abfallendes Verhältnis des Stamm- zum Wurzelvolumen festzustellen. Im Gegensatz zur Kiefer steigt bei der Fichte der Anteil des Stammes mit Alterszunahme an. Die junge Fichte weist ein zehnfach so hohes Stamm- als Wurzelvolumen auf, die älteste nur noch ein fünffach so hohes.

Wird das Kronengewicht mit in die Betrachtung einbezogen, können die ungünstigen Relationen der jüngeren Bäume relativiert werden. Sie besitzen eine um über 100kg im Frischezustand leichtere Krone als die ältere Fichte. Damit ist die Relation zwischen Krone, Stamm und Wurzelvolumen für den jüngeren Baum günstiger einzuschätzen als für den älteren.

5.3.3 Wurzelentwicklung der Fichte auf Lehm

Das Verhältnis der Horizontal- zu den Vertikalwurzeln in ihrer Anzahl steigt bei den in Krebeck untersuchten Fichten mit zunehmendem Alter von 6:1 auf 8:1 an. Dagegen fällt die entsprechende Relation beim Betrachten der Wurzelanzahl mit zunehmenden Alter von rund 4:1 auf 3:1 ab. Demzufolge zeichnet sich der junge Bestand durch vergleichsweise viele, relativ dünne Horizontalwurzeln aus. Mit zunehmenden Alter fällt die Anzahl der Horizontalwurzel geringer aus. Dafür sind diese um so dicker. Die vertikalen Wurzeln der jungen und mittelalten Fichten haben am Gesamtvolumen einen Anteil von rund 12%. Diese Ergebnisse sind bei Annahme der gleichen Dichte bei Fichtenwurzelholz mit den Untersuchungen von DREXHAGE (1994) vergleichbar. Er fand bei um 40jährigen Fichten (Harz) Anteile der Vertikalwurzelmasse von 4% bis 31% an der Gesamtwurzelmasse. DO-HYUNG LEE (1998) untersucht ebenfalls etwa 30 jährige Fichten. Seine Aufnahmeflächen liegen geographisch nicht weit von den in dieser Arbeit untersuchten Flächen entfernt. Er ermittelt in rund einem Meter Entfernung vom Stamm eine doppelt so große Querschnittfläche der Horizontalwurzeln und eine dreimal so große der Vertikalwurzeln. Stammenah sind die Daten von DO-HYUNG LEE (1998) in der Horizontalen mit den Daten aus Krebeck vergleichbar. In Krebeck sind demnach geringer dimensionierte Wurzeln in tieferen Bodenschichten zu finden. Dabei hat dieser Bestand eine etwa doppelt so hohe Stammzahl/ha wie der von DO-HYUNG LEE (1997) untersuchte. Weiterhin ist der Boden in Ebergötzen, ein Kolluvium, besser zu durchwurzeln als der in Krebeck. Dieser zeigt in 70cm Tiefe schwerer zu durchwurzeln, tonreichere Bodenschichten. Die Unterschiede der Wurzelquerschnittflächen könnten demnach durch die höhere Stammzahl und/oder den tonreicheren Boden in Krebeck zustande kommen. Hierin sind nach GRUBER (1992) Verluste in der mechanischen und physiologischen Stabilität zu vermuten.

5.4 Einfluß des Bodens auf das Wurzelwachstum 30 jähriger Fichten (Sand/Lehm)

5.4.1 Tiefendurchwurzelung

Die Fichten wurzeln auf Lehm schneller in die Tiefe als auf Sandboden. Allerdings erreichen ihre Wurzeln auf dem erstgenannten Standort eine geringere Tiefe. Zu dem gleichen Ergebnis kommt WIEDEMANN (1951). Seine Untersuchungen beziehen sich auf grundwasserferne Sandstandorte. Dagegen stellen KRAUSS (1935, 1938) und JÜTTNER (1954) auf trockenen ebenfalls grundwasserfernen Sandstandorten ein flaches und extensives Wurzelwachstum einzelner Fichten fest. Dieses Ergebnis kann im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen nicht bestätigt werden. Da von KRAUSS (1935, 1938) und JÜTTNER (1954) nur wenige Bäume untersucht wurden, könnte dies der Grund für die differierenden Resultate sein. Darüber hinaus wird in letzt genannten Arbeiten keine Angabe zur Nährstoffversorgung des Bodens gemacht, die aus-

schlaggebend sein kann für die unterschiedliche Durchwurzelungstiefe (STONE und KALISZ 1991).

5.4.2 Wurzelintensität

Sowohl in der Vertikalen als auch in der Horizontalen zeigen die Fichten bei gleichem Alter auf Pseudogley-Parabraunerde im Schnitt größere Wurzelquerschnittflächen als die auf dem Sandstandort. Dies läßt sich unabhängig von der Entfernung zur Stammbasis feststellen. Aber nicht nur die mittlere Querschnittfläche, sondern auch die Anzahl der Wurzeln fällt auf dem besseren Standort größer aus. Davon bilden lediglich die Tiefenwurzeln eine Ausnahme. Hier weisen die Bäume auf Sandboden in Stammnähe mehr Wurzeln auf. Darüber hinaus ist das Gesamtvolumen der Wurzeln bei den auf Sand gewachsenen Fichte geringfügig geringer.

Die dargestellten Verhältnisse belegen eine geringere Wurzelintensität der auf Sand stockenden Fichte. Allerdings sind bei diesen Bäumen in rund einem Meter Entfernung von der Stammbasis mehr Wurzeln zu finden als bei denen des besseren Standortes. Dies könnte ein Merkmal sein, daß auf eine im späteren Alter extensivere Wurzelbildung der Fichte auf Sand hindeutet. Dadurch kann der Wurzelballen vergrößert werden, und der Baum steht stabiler (NIELSEN 1990).

Gegenüber den auf Sandboden wachsenden Fichten zeigen die Bäume auf Lehm ein unausgewogeneres Verhältnis der Horizontal- zu den Vertikalwurzeln. Darüber hinaus haben die Fichten auf Sand wesentlich mehr Feinwurzeln als die auf Lehm. Dies deutet darauf hin, daß die knapperen Wasser- und Nährstoffressourcen von ihnen effektiver genutzt werden können (MARSCHNER 1986, MURACH 1989, SCHLICHTER *et al* 1983). Die Tatsache, daß die Fichten auf Sand tiefer, extensiver und gleichmäßiger wurzeln, eine geringere Grobwurzelmasse aber weit aus mehr Feinwurzeln besitzen, bestätigt die Ausführung von FIEDLER *et al* (1963). Sie stellen heraus, daß die Fichte auf schlechterem Boden eine annähernd gleiche Grobwurzelintensität zeigt, die Feinwurzelmenge jedoch stark zunimmt. Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, daß diese Zunahme hauptsächlich in den tiefer liegenden Bodenschichten stattfindet. Da die Fichten auf grundwasserfernem Sand schlechter an Wasser und Nährstoffe gelangen, läßt sich eine Verlagerung der Wurzelmasse leicht nachvollziehen. Dieser Ansicht sind auch SCHMIDT-VOGT *et al* (1987). Sie führen an, daß der Baum immer bestrebt ist, seine Wurzel in tiefere, feuchte Bodenbereiche zu bekommen. Dies erreicht er, indem er immer neue Wurzeln in der Tiefe ausbildet.

5.4.3 Sproß / Wurzelbeziehungen

Anhand der Sproß- und Kronenparameter, die in Tabelle 72 für ein beispielhaft gewähltes Wurzelvolumen von $0,028\text{m}^3$ dargestellt sind, wird deutlich, daß sich die Fichte auf Sand nur geringfügig (nicht signifikant) von der Fichte auf Lehm unterscheidet. Diese errechneten Daten unter standardisierten Bedingungen stellen sich anders dar als die durchschnittlichen Daten der Probebäume. BURGER (1930), KRAUSS *et al* (1935) und FIEDLER *et al* (1963) stellen fest, daß die Fichten auf schlechtem Boden, um gleiche Wuchsleistungen zu erreichen, mehr Wurzeln benötigen als die auf gutem Boden. Demzufolge müßte die Fichte auf Lehm für die Entwicklung ihrer oberirdischen Baumkompartimente eine geringere Wurzelmasse benötigen als die Fichte auf Sand. Eine Erklärung dafür könnte bei GRACE (1997) zu finden sein. Demnach be-

stimmt das C/N-Verhältnis in den Blättern die Allokation der Assimilate. Bei einer ausreichenden Stickstoffernährung werden vorwiegend Blätter gebildet. Dagegen kommt es bei Unterversorgung zu einer verstärkten Ausbildung von Wurzeln, um den entstehenden Mangel zu kompensieren. Dies bedeutet, daß die Bäume auf guten Standorten vorrangig ihre Blattfläche und nachrangig ihr Wurzelwerk ausbauen. Diese Ergebnisse von KRAUSS *et al* (1935), FIEDLER *et al* (1963) und GRACE (1997) stimmen nicht mit den für diese Arbeit gemachten Untersuchungen überein. Ein Grund dafür könnte sein, daß die Fichten auf Sand über einen größeren Standortraum verfügen und die N-Versorgung auch auf Sand optimal ist, wie die auf Lehm. Ein Unterschied der sozialen Stellung ist für den standardisierten Baum nicht festzustellen. Die Bäume mit einem Stammvolumen von 0,28 m³ sind auf beiden Standorten gleichsam herrschend.

Tabelle 72: Sproß - und Kronenparameter zweier Fichten mit einem beispielhaften Wurzelvolumen von 0,028 m³ auf Lehm und auf Sand

Wurzelvolumen 0,028 m ³	BHD (cm)	Höhe (m)	H/d-Wert	Stammvolumen (m ³)	Kronengewicht (kg) frisch	Blatt (kg) frisch
Lehm	17,3	15,5	89,0	0,19	59,7	31,4
Sand	16,0	15,3	96,0	0,17	64,4	30,5
Differenz %	8	1	-8	11	-8	3

5.5 Einfluß der Verjüngungsmethode und unterschiedlicher Bodentypen (Stagnogley, Lehm) auf die Wurzelbildung der Eiche

5.5.1 Eiche auf problematischen Böden (Stagnogley)

Aus ökonomischen Gründen wurde die Fichte aufgrund ihrer hervorragenden Wüchsigkeit im letzten Jahrhundert verstärkt angebaut. Daher wurden alte Eichenstandorte nach Abtrieb der Bäume in vielen Fällen mit der schnellwüchsigen Fichte aufgeforstet. Der Anbau von Fichte bietet beträchtliche Vorteile, aber auch Risiken, die kontrovers diskutiert werden (RÖHRIG 1990). Es bestehen Zweifel, ob durch die Fichte eine Verschlechterung der biologischen und physikalischen Eigenschaften des Bodens stattfindet (BONNEMANN 1970, GENSSLER 1959).

In dieser Zeit stehen noch keine flächendeckenden Bodenkartierungen zur Verfügung, so daß oft Unwissen über die verschiedenen Bodeneigenschaften herrscht. Die Folge ist, daß die Fichte oft nicht standortgemäß begründet wird. Manche dieser Standorte weisen Tonschichten auf, die zum einen schlecht durchwurzelbar sind und zum anderen das Regenwasser nicht in tiefere Bodenhorizonte abfließen lassen (Stagnogley). Im Sommer verschwindet dieses Stauwasser durch direkte Verdunstung und Transpiration der Pflanze, und der Boden trocknet aus. Dadurch findet ein stetiger Wechsel zwischen Wasserüberschuß und Austrocknung statt, der diese Böden kennzeichnet. Die entscheidenden Faktoren für das Wachstum der Wurzeln in diesem Boden sind die Dichtlagerung der Bodenpartikel und der zeitweilige Sauerstoffmangel.

Durch die Stürme "Wiebke" und "Vivian" (1990) sind allein in Deutschland 62,5 Mio m³ Holz (KRONAUER 1990) geworfen worden. Diese Flächen müssen mit Baumarten aufgeforstet werden, die die Standorte optimal nutzen können. Dabei ist beispielsweise in Bayern vorgesehen, 27% der Sturmwurfflächen mit Eiche wiederzubewalden (KÖNIG *et al* 1995). Es müssen

Baumarten zur Wiederbeflanzung gewählt werden, die die dichten Tonschichten durchwurzeln können. Dafür eignet sich die tiefwurzelnde Eiche. Jedoch auch hier besteht Unwissen darüber, inwieweit diese Baumart mit der Verdichtung des Bodens zurechtkommt.

Bei einem der in der vorliegenden Untersuchung gewählten Standorte sind die Eichen durch Saat und Pflanzung auf einer Windwurflläche (Stagnogley) begründet worden. Bei dem anderen Standort handelt es sich um eine Aufforstungsfläche aus ehemaliger landwirtschaftlicher Nutzung. Der Boden weist eine schwache Pseudovergleyung auf, ist aber tiefgründig durchwurzelbar.

Die Eiche kann zur Neubegründung eines Bestandes gesät oder gepflanzt werden, wobei die Saat unter ökonomischen Aspekten günstiger ist. Im Vergleich zur Pflanzung liegen die Kosten für das Säen bei rund einem Drittel (BAUMHAUER 1996).

Die Pfahlwurzel

Nach Untersuchungen von WALTER (1962) ist bei der Eiche die Bildung einer Pfahlwurzel genetisch bedingt. Im höherem Alter kann die Ausprägung der Pfahlwurzel durch eine Anpassung an skelettreiche Bodenverhältnisse überdeckt werden. Bei lockerem Bodensubstrat ist sie jedoch noch lange beobachtbar, bei verdichtetem hingegen nicht (JENIK 1957). Gegenteiliges beobachtet PFEIL (1860). Er stellt fest, daß sich die Pfahlwurzeln der Eiche auf frischem, nährstoffreichen Boden zurückbilden. KÖSTLER *et al* (1968) untersuchen 38 auf tiefgründigem Boden stockende Saateichen. Davon bilden 25 Bäume eine Pfahlwurzel aus. In 35 cm Tiefe löst sich diese in viele kleine Wurzeln auf, die sich im weiteren Verlauf horizontal ausrichten. Bis dahin verringert sich der Durchmesser der Pfahlwurzel sehr schnell. Diese Beobachtung wird von KÖSTLER *et al* (1968) als typisch angesehen und mit einem auf der Spitze stehenden Kegel verglichen. Bei Untersuchungen zur Morphologie der Pfahlwurzel gesäter und gepflanzter Eichen sind von BIBELRIETHER (1962), KÖSTLER *et al* (1968), FEICHT und GEYER (1993), SCHÜTE und TAE SU (1993) und HAUSKELLER-BULLERJAHN (1997) durchgängig die Pfahlwurzelbildung der Saat und die Herzwurzelbildung der Pflanzung beschrieben. Diese Beobachtung wird auch bei den hier untersuchten Eichen gemacht. In einer Bodentiefe von 20 cm hat die Pfahlwurzel der Saateiche einen Anteil von über 90% an der gesamten vertikalen Wurzelquerschnittfläche. Bei der Pflanzeiche hat die stärkste Wurzel nur einen 40 prozentigen Anteil. Diese Ergebnisse lassen sich in ähnlicher Weise auf allen untersuchten Böden feststellen. KREUTZER (1961) vermutet, daß sich die Hohlräume, die nach Verrottung der Pfahlwurzeln entstehen, günstig auf den Gas- und Wasserhaushalt des Bodens auswirken. Weiterhin wird die Erschließung des Oberbodens verbessert, indem die verbleibenden Wurzelkanäle als Raum für neue Wurzeln, Mikroorganismen, Niederschlagswasser und Regenwürmer dienen. KREUTZER (1961) nimmt an, daß der vergleichsweise kleine Hohlraum, den die Pflanzeichen beim Verrotten hinterlassen, leichter zusammensackt und schneller verschlämmt, als dies bei den Saateichen der Fall ist. Es wäre ebenfalls denkbar, daß durch die höhere Wurzelanzahl, die bei der gepflanzten Eichen gefunden wird, ein größeres Netz an Wurzelkanälen nach Verrottung der Wurzeln geschaffen wird. Durch dieses wäre eine weitreichendere, feinere Erschließung des Bodens die Folge. Wie letztere Darstellungen zeigen, besteht für diesen Bereich noch großer Forschungsbedarf.

5.5.2 Wurzelintensität

Die relative Verteilung der Wurzeln mit steigender Distanz vom Stamm unterscheidet sich bei Saat und Pflanzung. Die Saateiche verlagert ihr Wurzelwachstum stärker in stammnahe, tiefere Bodenhorizonte, die gepflanzten Bäume in horizontale, weiter entfernte Bodenzonen. Dies kann unabhängig vom Standort festgestellt werden.

Beim Betrachten der Wurzelanzahl kann für die Saateiche die von KÖSTLER *et al* (1968) beschriebene Zersplitterung der Pfahlwurzel bestätigt werden. In einer Tiefe von 40 cm ist eine Zunahme der Wurzelanzahl von rund 30% zu erkennen. Bei den gepflanzten Eichen sind es 20%. Dies dokumentiert, daß vermutlich durch genetische Veranlagung die Pflanze in nahezu demgleichen Maße ihre Wurzelanzahl in tieferen Bodenhorizonten erhöht wie die Saateiche. Dieser Effekt ist in der Horizontalen nicht festzustellen. Auf Stagnogley ist die Erhöhung der Wurzelanzahl in tieferen Bodenschichten nicht zu beobachten. Die Begründung dafür liegt in der Festlegung der in dieser Arbeit gemessenen unterschiedlichen Schnittebene. Sie wurde in 30 cm Tiefe gewählt. Bei den Wurzelsystemen auf Lehm lag dieser Wert bei 20 cm. Dies kommt gerade bei der Betrachtung der ersten Sektion stark zum Ausdruck, da die Pfahlwurzel der Eichen auf Stagnogley dort schon aufgegliedert war.

Die Aufteilung der Pfahlwurzel kann auch durch die Verhältnisbetrachtung der Horizontal- zu den Vertikalwurzeln belegt werden. Dies läßt sich sehr deutlich bei den beherrschten Saateichen nachweisen. Sie zeigen stammnah vier mal mehr Horizontal- als Vertikalwurzeln. Daraus läßt sich der Schluß ziehen, daß in dieser Sektion ein Großteil der vertikalen Bewurzelung auf eine dicke Pfahlwurzel entfällt. Mit zunehmender Entfernung verkleinert sich das Verhältnis zwischen den Horizontal- und Vertikalwurzeln. Dies muß als Folge der Aufteilung der Pfahlwurzel aufgefaßt werden.

5.5.3 Sproß / Wurzelbeziehungen

Das Verhältnis zwischen den oberirdischen Baumkompartimenten und der Wurzel spielt für die Stabilität und Nährstoffversorgung eine große Rolle (SCHMIDT-VOGT und GÜRTH 1977, RAVEN *et al* 1988, KAUSMANN und SCHIEWER 1989, JOHNSON 1993). Daher wird es in der Praxis als Qualitätskriterium für junge Baumschulpflanzen verwendet. Ein geringes Sproß / Wurzelverhältnis gewährleistet bei richtiger Pflanztechnik ein gutes Gedeihen der Jungpflanzen (SCHMIDT-VOGT 1966, MCGEE UND LOFTIS 1993). Es existieren mehrere Definitionen, die dieses Verhältnis beschreiben. Die gängigste setzt die Sproßlänge mit dem Wurzelhalsdurchmesser in Beziehung. Außerdem kann das Verhältnis des Wurzel- zum Sproß-Trockengewicht oder das der Wurzeltiefe zur Sproßlänge betrachtet werden. Mit zunehmendem Alter steigt das Sproß / Wurzelverhältnis der Bäume überproportional an (BAZZAZ 1997, MULLIN 1963). Anfänglich ist ein enges Verhältnis zu beobachten, das mit zunehmendem Alter der Bäume zugunsten des Sprosses ansteigt. Abhängig ist dieser Anstieg von den standortbestimmenden Größen wie Licht, Wasser, Boden, Nährstoffe und Wärme. Diese Faktoren und die zwischen ihnen bestehenden Wechselbeziehungen führen zu einer sehr großen Variation der Sproß / Wurzelrelation. Dabei sehen BORCHERT (1973) und CASTLE (1978) die Wurzel und den Sproß als ein voneinander abhängendes "Balancesystem" an. Wird die Wurzel verletzt, können nicht ausreichend Nährstoffe und Wasser aufgenommen werden, so daß das Sproßwachstum behindert wird. Im umgekehrten Schluß wird bei Abbruch eines Kronenteiles die Photosynthe-

leistung des Baumes eingeschränkt, so daß auch das Wurzelwachstum gebremst wird. ROLOFF und RÖMER (1989) untersuchen die Beziehung zwischen Wurzel und Sproß an 2m hohen Buchen und stellen eine durchschnittliche Relation von einem dreifach höheren Sproß- als Wurzelgewicht fest ($R^2=0,89$). Dieser Wert läßt sich auch bei den herrschenden Eichen ermitteln, die in der vorliegenden Arbeit untersucht werden. Bei den beherrschten Bäumen ist ein viermal größeres Stamm- als Wurzelvolumen zu beobachten. Trotz engerer Baumabstände zeigt die 22jährige Saateiche auf Lehm ein stärkeres Wurzelwachstum als die Pflanzeiche. Auf Stagnogley stehen die Saateichen ebenfalls enger zusammen, haben aber im Gegensatz zu den Saateichen auf Pseudogley-Parabraunerde ein geringeres Wurzelvolumen als die Pflanzeichen.

Es kann gesagt werden, daß auf Lehm die Relation zwischen Stamm und Wurzel bei den Saateichen enger ist als bei den Pflanzeichen. Wird jedoch die Krone mit in die Betrachtung einbezogen, zeigt sich, daß dieser Schluß nicht gezogen werden darf, da die Krone der gesäten Eichen sehr viel schwerer ist als die Krone der gepflanzten. Die gepflanzte Eiche zeigt ein geringeres Stammvolumen, aber auch ein geringeres Kronengewicht als die gesäte, so daß sich wieder ein engeres Verhältnis zwischen Sproß- und Wurzel einstellt. Die absoluten Größen verändern sich, nicht aber die Relation der ober- zu den unterirdischen Parametern. Es stellt sich wieder ein Gleichgewicht ein, was bei erster Betrachtung der Bestandesdaten nicht offensichtlich erwartet werden konnte.

Gründe des höheren Kronengewichtes der Saatbäume könnten darin liegen, daß durch ein größeres Wurzelvolumen eine stärkere Kronenausbildung möglich ist. Da über das Bodenwasser mehr Nährstoffe aufgenommen werden, könnte das Kronenwachstum gefördert werden. Andererseits ist der Saateiche als dienende Baumart mit 7% die Hainbuche beigemischt. Bei der Pflanzung werden insgesamt 38% Roteiche und Linde als Mischbaumarten dazugepflanzt. Letztere mußte geköpft werden, da sie sonst in den Hauptbestand einwachsen und ihn in seinem Wachstum behindern würde. Diese Köpfung wurde ein Jahr vor der Probebaumentnahme durchgeführt, so daß die untersuchten Eichen bis kurz vor ihrer Entnahme einer starken Konkurrenz ausgesetzt waren. Demnach sind zu der Pflanzung mehr und wüchsiger Hilfsbaumarten beigemischt, die mit den Eichen stärker konkurrieren. Dies könnte ein weiterer Grund dafür sein, daß die Kronen kleiner ausgebildet sind.

Auf Stagnogley zeigt die Pflanzeiche im Vergleich der absolut ermittelten oberirdischen Daten höhere Werte als die Saateiche. Mit der Berechnung der Parameter am Beispiel einer Eiche mit standardisiertem BHD zeigt sich jedoch kein großer Unterschied zwischen Saat und Pflanzung. Das Verhältnis zwischen Stamm- und Wurzelvolumen stellt sich für die Pflanzeiche geringfügig enger dar als für die Saateiche. Dabei weisen die Bäume der Pflanzung eine schwerere und größere Krone auf als die der Saat, so daß das geringfügig günstigere Stamm / Wurzelverhältnis wieder ausgeglichen sein dürfte. Der Grund für die unterschiedliche Kronenentwicklung liegt in dem weiten Standraum, der den gepflanzten Eichen zur Verfügung steht.

Unabhängig vom Standort ist für die Eiche auf Stagnogley die Sproß/Wurzelbeziehung für Pflanzung und Saat ähnlich zu beurteilen. So haben weder Dimension noch Standort wesentlichen Einfluß auf die Beziehungen zwischen Wurzel, Krone und Stamm. Besonders der fehlende Einfluß des Bodens auf die Parameter überrascht, da die Meinung besteht, daß der Standort die Wurzel Ausbildung stark modifiziert (KÖSTLER *et al* 1968).

5.6 Einfluß der sozialen Stellung auf die ober- und unterirdischen Baumkompartimente

Die soziale Stellung eines Baumes ist ein Ergebnis von kleinstandörtlichen Bedingungen wie Strahlung, Wasser (DHOTE *et al* 1994), Temperatur, Nährstoffversorgung (COLIN-BELGRAND *et al* 1993), genetisches Potential und Konkurrenzsituation (KENNEL 1966). Um Ziele der Bestandespflege charakterisieren zu können, ist es notwendig, eine Gliederung des Bestandes vorzunehmen (RÖHRIG und GUSSONE 1990). Dafür stellt die soziale Stellung im Bestand ein Kriterium auf Einzelbaumebene dar. Durch sie wird die Vitalität des Baumes bestimmt, die durch Stamm- und Kronenausbildung charakterisiert ist. Gleichaltrige Bestände können so reproduzierbar klassifiziert werden. Dabei stellt die Kraft'sche Klasseneinteilung die verbreitetste Methode dar. Allerdings weist sie auch unbestreitbare Mängel auf (ROZSNYAY 1979). Der größte Nachteil ist die subjektive Klassifizierung durch den Beobachter. KENNEL (1966) überprüft die okular bestimmten Baumklassen durch Diskriminanzanalysen. Die Übereinstimmungen der geschätzten mit den berechneten Größen betragen bei der Fichte 80 % und bei der Buche 73 %.

Bei den meisten Bäumen ist die Abhängigkeit der Wurzel Ausbildung von der Ausformung der Baumkrone und damit von der sozialen Stellung des Baumes sehr groß (SCHMIDT-VOGT 1977). Ungeklärt ist die Frage, ob die Stellung im Bestand die Wurzel Ausbildung oder umgekehrt die Wurzel Ausbildung die soziale Stellung beeinflusst (WAGENKNECHT und BELITZ 1959). KÖSTLER *et al* (1968) vermuten in der Wurzelmorphologie sogar die Begründung des "Umsetzens" von Eliteanwärttern (herrschende Bäume) und echter Elite (vorherrschende Bäume).

Alle Bäume der vorliegenden Untersuchungen werden differenziert nach Kraft'schen Klassen ausgewählt. Dadurch läßt sich die Veränderung des Wurzelvolumens bei Rückgang der sozialen Stellung beurteilen. Dabei ist das Wurzelvolumen der vorherrschenden Bäumen und herrschenden Bäume signifikant höher als das der mitherrschenden und beherrschten. Ähnliches ist für den BHD, die Höhe, das Kronengewicht und das Stammvolumen zu beobachten. Dabei fallen BHD und Höhe durchschnittlich von Klasse zu Klasse um 20 % ab und Kronengewicht, Stamm- und Wurzelvolumen um rund 50 %. Stamm-, Wurzelvolumen und Kronengewicht gehen demnach im Gegensatz zu BHD und Höhe überproportional zurück. Die Relation zwischen Sproß und Wurzel verändert sich aber dabei nicht signifikant.

Die folgenden Überlegungen beschäftigen sich mit der Frage: "Beeinflusst die Wurzelmorphologie das Baumwachstum oder das Baumwachstum die Wurzelmorphologie?"

Dieses wird am Beispiel 22-jähriger Eichen erörtert. Bei herrschenden Eichen auf Lehm ist ein signifikant größerer Anteil Horizontal- als Vertikalwurzeln zu finden, bei den beherrschten kehrt sich dieses Verhältnis um. Diese Beobachtungen sind in der Literatur in der Form noch nicht dargestellt. LEMKE (1956) beobachtet an Roteiche (*Quercus rubra* L.), daß beherrschte Bäume im höheren Alter (67 Jahre) noch reduzierte Pfahlwurzeln besitzen. Bei den Herrschenden ist dies nicht mehr zu erkennen. Sie zeigen ein ausgeprägtes Herzwurzelsystem. Obwohl es sich um eine andere Eichenart handelt, wäre dieser Wachstumsverlauf auch für die hier untersuchten Eichen denkbar, da sich die Pfahlwurzel der beherrschten Bäume sehr ausgeprägt darstellt. Demgegenüber bemerkt LEMKE (1956) jedoch, daß bei der beherrschten Roteiche (*Quercus rubra* L.), trotz ausgebildeter Pfahlwurzel, ein Flachwurzelsystem zu beobachten ist. Diese

Annahme verwundert und kann anhand der für diese Arbeit gemachten Untersuchungen nicht bestätigt werden.

Um die Differenzierung der Bäume im Bestand zu erklären, wäre zuerst eine Kronenkonkurrenz denkbar. Anhand des HEGYI-Indexes ist zu erkennen, daß die Eichen der Kraft'schen Klasse 2 einer signifikant geringeren Konkurrenz ausgesetzt sind als die der Kraft'schen Klasse 4. Außerdem sind bei Letzteren die Abstände zu den benachbarten Bäumen geringer. Bei Beschattungsversuchen an jungen Waldpflanzen spielt das Licht in bezug auf das Wurzelwachstum eine große Rolle. Die Substanzproduktion der Wurzel reduziert sich bei Beschattung deutlich stärker als die der oberirdischen Pflanzenteile (RÖHRIG 1966). Diese Resultate sind für die Buche von BURSCHEL *et al* (1964, 1965) sowie HARLEY und WAID (1955), für die Traubeneiche von BROWN (1955), JARVIS (1964), OVERTON und MCRAE (1960) sowie RÖHRIG (1958) und für die Kiefer, Eiche und Buche von LYR (1994) gemacht worden. HAUSKELLER-BULLERJAHN (1997) stellt hingegen fest, daß bei Zunahme der Beschattung keine signifikanten Veränderungen der Sproß / Wurzelbeziehung zu finden sind.

Die Bäume, die in den ersten zehn Jahren die stärkste Krone ausbilden, besitzen aufgrund eines höheren Lichtgenusses eine höhere Photosyntheserate und können mehr Wurzelmasse entwickeln. Diese ist zum großen Teil in den oberen Bodenschichten (horizontalen Ebene) zu finden, wo die meisten Nährstoffe vorhanden sind. Das horizontale Wurzelwachstum kann für die herrschenden Eichen beider Standorte gleichsam beobachtet werden. Mit Anlage dieser Wurzeln wäre der horizontale Bodenbereich ausgefüllt, und die in der Initialphase starken Bäume dominieren über die schwächeren Eichen durch die horizontale Ausbreitung ihrer Wurzeln. Die schwächeren Bäume verlagern ihre Wurzeln in tiefere Schichten. Dennoch können sie die Defizite nicht mehr aufholen und bleiben so in ihrem Wurzelwachstum immer stärker zurück. Auf der anderen Seite wäre es denkbar, daß es aufgrund genetischer oder kleinstandörtlicher Unterschiede zu einer stärkeren Horizontalwurzelbildung kommt. Nach FABRICIUS (1929) bewirkt der Wurzelwettbewerb bei gleichem Lichtgenuß ein bedeutendes Zurückbleiben der Entwicklung. Auch SHAW (1974) bemerkt, daß die Wurzelkonkurrenz benachbarter Bäume und der Begleitvegetation einen größeren Einfluß auf das Wachstum junger Eichen hat als die Strahlungsintensität. Nachdem eine durch die Wurzel hervorgerufene Differenzierung im Bestand stattgefunden hat, besitzt die herrschende Eiche eine größere Wurzelmasse. Dadurch ist von einer besseren Wasser- und Nährstoffversorgung auszugehen, so daß das Sproßwachstum ebenfalls gefördert wird. Bei diesem Ansatz wäre zuerst die Wurzelkonkurrenz und nachfolgend die Kronenkonkurrenz vorhanden, während bei der ersten Überlegung erst die Kronen- und dann die Wurzelkonkurrenz einsetzen würde.

Beide Ansätze gehen von der Annahme aus, daß sich zwischen der ober- und unterirdischen Masse immer ein Balance einstellt (BORCHERT 1973, CASTLE 1978). Dabei sind "Balancespannweiten" möglich, welche durch die verschiedenen sozialen Stellungen zustande kommen.

Eine andere Möglichkeit zur Klärung der vermehrten Wurzelbildung könnte in der Windexposition der herrschenden Bäume gefunden werden. Auch wenn Eichen in einem recht engem Verband erwachsen, läßt sich eine deutliche Höhenstrukturierung des Jungwuchses erkennen. Bei den 13jährigen Bäumen in Kattenbühl ist eine Höhendifferenz der zweiten zur vierten Kraft'schen Klasse von ca. 40% zu beobachten. Dominante Bäume ragen demnach aus dem

Bestand heraus und sind besonders an der Kronenspitze dem Wind ausgesetzt. Um ihre Stabilität zu erhöhen, bilden die Eichen verstärkt Wurzeln aus (FRITZSCHE 1933; NIELSEN 1990). Diese sind unabhängig vom Boden in horizontalen Schichten zu finden.

Es ist ebenfalls möglich, daß alle drei diskutierten Möglichkeiten zusammen das Wachstum der Eichen bestimmen. Das heißt, die Eichen wurzeln nach Keimung erst einmal in die Tiefe, wobei gleichzeitig das Sproßwachstum und eine Höhendifferenzierung einsetzen. Darüber hinaus finden einige Bäume kleinstandörtlich bessere Bedingungen vor und können so oberirdische Pflanzenteile besser versorgen. Durch die daraus folgende höhere Photosyntheserate sind diese Bäume in der Lage, verstärkt horizontale Wurzeln auszubilden. Die Horizontalwurzeln gewährleisten wiederum eine bessere Wasser- und Nährstoffversorgung, und obendrein besetzen sie den Wurzelraum. Gleichzeitig ist das Sproßwachstum gefördert, so daß die Bäume aus dem Bestand hervorragen. Somit sind sie einer verstärkten Windexposition ausgesetzt, auf die sie zur Stabilitätserhöhung mit noch stärkerem Wurzelwachstum reagieren müssen.

Inwieweit ein oder alle drei Ansätze der Realität entsprechen, kann aufgrund der statischen Aufnahmetechnik dieser Arbeit nicht beantwortet werden. Nach SZAPPANOS (1969) hängt das Wachstum des Jungwuchses bei gleichen Beleuchtungsverhältnissen von den Niederschlagsverhältnissen und dem Wasserhaushalt des Standortes ab. Er stellt bei Traubeneichen-Hainbuchenbeständen mit und ohne Wurzelkonkurrenz fest, daß die Nährstoffversorgung, aber besonders die Wasserversorgung ohne Wurzelkonkurrenz verbessert wird.

Nach Untersuchungen von SCHÜTE und KIM TAE SU (1993) an im Mittel 10jährigen Direktsaateichen treten neben der Pfahlwurzel keine seitlichen Hauptwurzeln auf. HAUSKELLER-BULLERJAHN (1997) kommt an 6jährigen Saat- und Pflanzeichen zu gleichem Ergebnis. Bis zum Alter von 10 Jahren erfolgt das Wurzelwachstum demnach überwiegend geotrop. Die Entwicklung der Horizontalwurzeln müßte so, nach den für die vorliegende Arbeit festgestellten Ergebnissen, auf Lehm zwischen 10 und 22 jährig einsetzen. Bei den 13jährigen dominanten Eichen auf Stagnogley ist eine große Horizontalwurzelmasse vorhanden. Diese dürfte nach den Ergebnissen von SCHÜTE und KIM TAE SU (1993) und HAUSKELLER-BULLERJAHN (1997) zwischen 10 und 13 Jahren stattgefunden haben, was wenig plausibel erscheint. Unterschiede dürften durch die unterschiedlichen Standortverhältnisse zustande kommen.

5.7 Waldbauliche Schlußfolgerungen

Es war zu klären, inwiefern sich die Grobwurzelarchitektur im Buchen-Fichten-Mischbestand gegenüber der in den Reinbeständen verändert. Die Ergebnisse, die anhand von 40 untersuchten Bäumen gewonnen werden, lassen erste Tendenzen erkennen, die in die Praxis einbezogen werden können. Die Wurzeln der etwa 60jährigen Fichte zeigen im Mischbestand deutlich bessere Merkmale als die der Fichte im Reinbestand. So konnte beispielhaft festgestellt werden, daß die Summe der Querschnittflächen der Vertikalwurzeln bei der Fichte im Mischbestand in 90cm Tiefe fast fünfmal höher ist als bei der Fichte im Reinbestand. In der horizontalen Richtung besaßen die Wurzeln der Bäume beider Bestandesformen ähnliche Dimensionen. Darüber hinaus konnte für die Fichte im Reinbestand ein ungünstigeres Verhältnis des Stamm- zu Wurzelvolumen festgestellt werden als bei der im Mischbestand. Für die Buche konnten diesbezüglich keine eindeutigen Schlußfolgerungen getroffen werden. Ansatzweise kann aus

den Ergebnissen gefolgert werden, daß die Buche des Mischbestandes flacher wurzelt als die des Reinbestandes. Dies zeigte sich insbesondere an den vertikal verlaufenden Wurzeln, die in ihrem Querschnitt deutlich denen der Reinbestandsbuchen unterlegen waren. Es können jedoch keine signifikanten Schlüsse aus den Beziehungen zwischen ober- und unterirdischen Größen gezogen werden ($R^2 < 0,5$).

Es kann demnach empfohlen werden, die Fichte aufgrund ihres stärkeren Wurzelwachstums im Mischbestand mit Buche zu begründen. Inwiefern sich die Mischung auf die Buche auswirkt, kann nicht eindeutig festgestellt werden.

Ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der Beurteilung des Verjüngungsverfahrens der Eiche. Nach den oben diskutierten Ergebnissen sind keine eindeutigen Vorteile der Saat oder Nachteile der Pflanzung festzustellen. Erste, nach der Datenaufnahme festgestellte bessere Ertragsleistung der Saateiche auf Lehm steht die höhere Wuchsleistung der Pflanzeiche auf Stagnogley gegenüber. Nicht beurteilt werden kann in dieser Arbeit der Einfluß der Güte des Saat- und des Pflanzgutes auf die Morphologie der Wurzeln. Neben der Qualität des Saatgutes, die ausgedrückt sein kann durch die Größe der Eichel (RICE *et al* 1993) spielen beim Keimen vorhandene Nährstoff- und Wasserversorgung (LONG *et al* 1996) ebenso wie die CO₂-Konzentration (MIAO-SHILI und JONAS 1996), Wärme und Licht (KOZLOWSKI 1972, MAYER UND POLJAKOFF-MAYBER 1975) eine große Rolle. Letztgenannte ökologische Kriterien werden bestimmt durch die Saattechnik (RÖHRIG 1976) und den Saattermin.

Bei der Pflanzung bestehen ebenfalls viele Kriterien, die das Wachstum des Baumes beeinflussen. Die Güte des Pflanzenmaterials hängt von Baumschulbehandlung, Aufzucht, Wurzelquerschnitt, Lagerung und Transport, Pflanzensortiment und letztendlich von dem Pflanzvorgang im Wald ab. Aus ökonomischer Sicht ist die Saat vorzuziehen, da sie finanziell günstiger ist (BAUMHAUER 1996). Einen Vorteil der Saat könnte nach KREUTZER (1961) die Bodenerschließung durch die Pfahlwurzel darstellen. Diesem ist besonders auf Stagnogley eine große Bedeutung zuzumessen. Durch ihren großen Wurzelquerschnitt werden nach dem Absterben des Baumes vertikale Hohlräume geschaffen. Dadurch kann das Bodenwasser besser abfließen und eine ausgeprägtere Bioturbation stattfinden. Diese großen Hohlräume kann allein die Pfahlwurzel der Saat schaffen, da die Pflanzung meist keine Pfahlwurzel mehr besitzt. Inwiefern wirklich diese von KREUTZER (1961) geforderten großen Hohlräume benötigt werden, ist aus der Literatur nicht zu ersehen. Die Aussage von KREUTZER (1961) muß als Hypothese aufgefaßt werden, da keine direkten Untersuchungen zu dieser Frage dargestellt werden. Zu bedenken ist dabei, daß die gepflanzten Eichen durch viele kleine Wurzelkanäle ebenfalls Hohlräume schaffen, deren Effizienz im Vergleich zur Pfahlwurzel untersucht werden muß. Nach den vorliegenden Untersuchungen der Eiche auf Stagnogley zeigt der gesäte Baum, bei etwa gleichem Wurzelquerschnitt wie der gepflanzte, eine geringere Wurzelanzahl. Weitere Kriterien wie die relativen Betrachtungen zwischen Sproß-, Wurzelvolumen und Kronengewicht ergeben, genauso wie das Verhältnis von Horizontal- zu Vertikalbewurzelung, ebenfalls keinen Anlaß, eines der Begründungsverfahren vorzuziehen.

6 Zusammenfassung

Die vorliegenden Untersuchungen sind Teil eines gemeinsamen Projektes der Europäischen Union. Es wurden dabei verschiedene Fragestellungen zu "Funktionalen Aspekten der Wurzelarchitektur und der Biomasseverteilung von sechs europäischen Hauptbaumarten" bearbeitet. Das Waldbauinstitut der Universität Göttingen untersuchte hierbei Wurzeln der Fichte, Buche, Kiefer und Eiche.

Ziel dieser Arbeit war es, zu klären, inwiefern verschiedene Faktoren wie Baumartenmischung, Alter der Bäume, Standort und Verjüngungsmethode die Grobwurzelarchitektur der Baumarten Fichte, Buche, Kiefer und Eiche beeinflussen. Dazu wurden 17 Flächen ausgewählt, in denen einzelne Fragestellungen bearbeitet wurden. Die Untersuchungsbestände liegen in den niedersächsischen Forstämtern Bovenden (Holzerode und Krebeck), Knesebeck, Holzminden und Kattenbühl.

Aus jedem Untersuchungsbestand wurden 6-16 Probestämme entnommen. Zur Klärung der Frage, wie stark ein Baum von seinen Nachbarn bedrängt war, wurden die Durchmesser der drei nächsten Nachbarbäume und die Entfernung Probestamm/Nachbarbaum ermittelt. Bei einzelnen Beständen wurden darüber hinaus die Höhe und die Kronenschirmfläche der Nachbarbäume aufgenommen. Mit diesen Daten wurden die konkurrenzbeschreibenden Indizes HEGYI-INDEX und ÜBERRAGUNGSWINKEL berechnet. Nach der Entnahme der Probestämme wurden Kronen-, Stamm- und Wurzelparameter untersucht. Das Wurzelsystem wurde zur Vermessung in Horizontal- und Vertikalebene unterteilt. In diesen Ebenen wurden in drei unterschiedlichen Entfernungen vom Wurzelstock Winkel und Durchmesser (bis 2mm) der Wurzel gemessen. Eine Wurzel mit dem Winkel kleiner 45° wurde als Horizontalwurzel, eine größer/gleich 45° als Vertikalwurzel bezeichnet. Mit diesen Werten wurden Wurzeldurchmesserverteilungen erstellt, die als Grundlage für die Berechnung der Wurzelquerschnittflächen in den drei horizontalen und vertikalen Entfernungen von der Stammbasis (Sektionen) dienten. Daneben wurde für jede Einzelwurzel die maximale Tiefe ermittelt. Damit wurden die durchschnittliche und die maximale Tiefe für jedes Wurzelsystem berechnet. Weiterhin wurde die Anzahl der Feinwurzeln geschätzt, die sich an einer Einzelwurzel befanden.

Die Summe der Wurzelquerschnittflächen in Verbindung mit der Wurzelanzahl ergab einen Wert, der das Wurzelsystem charakterisierte. Anhand dieser Parameter wurden die "Relation zwischen Horizontal- und Vertikalwurzel", das "Wurzelsystemvolumen" und die "Wurzelsystemoberfläche" berechnet. Das Wurzelsystemvolumen wurde, differenziert nach Horizontal- und Vertikalwurzeln, für jeden Probestamm kalkuliert. Grundlage dieser Berechnungen bildete die Querschnittflächensumme eines Wurzelsystems, die für die drei Sektionen verfügbar war. Die Beziehung zwischen Sproß und Wurzel wurde durch eine lineare Ausgleichsfunktion zwischen Stamm- und Wurzelsystemvolumen beschrieben (Abb. 33). Dabei zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Bestandesformen. Zur genaueren Erfassung des bestandesspezifischen Verlaufes des Wurzelsystemvolumens in Abhängigkeit vom Stammvolumen wurden darüber hinaus Regressionen für die einzelnen Bestände erstellt. Auch hier wurde geprüft, inwiefern sich die Regressionsgeraden statistisch voneinander unterscheiden.

Zur detaillierten Erfassung der Sproß/Wurzelbeziehungen wurden sogenannte "Flußdiagramme" für nahezu alle Bestände erstellt (Anhang V). In diesen sechs Diagrammen wurden Regressionen zwischen Stamm- und Wurzelvolumen und den Parametern BHD, Höhe, Kronen-, Blatt- und Wurzelgewicht (nur für den Bestand Kattenbühl) gegenübergestellt. Dabei ergaben sich in den meisten Fällen gute Zusammenhänge mit durchschnittlichen Bestimmtheitsmaßen von 0,79.

Bei allen untersuchten Beständen wurden Bäume verschiedener sozialer Stellungen entnommen. Ober- und unterirdische Baumparameter zeigten mit Abfall der Kraft'schen Klasse die erwarteten abnehmenden Werte. Dabei gingen Kronengewicht, Wurzel- und Stammvolumen deutlich stärker zurück als BHD und Höhe. Weiterhin war ein signifikanter Unterschied zwischen dem Wurzelvolumen der Bäume der Kraft'schen Klassen 1 und 2 zu den Klassen 3 und 4 zu beobachten. Auch zeigten herrschende Bäume ein schwach engeres Verhältnis zwischen Sproß und Wurzel als beherrschte. Ungeklärt ist die Frage, ob die Wurzel das Sproßwachstum oder umgekehrt das Sproßwachstum die Wurzel beeinflusst. Ob die soziale Differenzierung durch Wurzel- oder Kronenkonkurrenz zustande kommt, konnte in dieser Arbeit nicht geklärt werden. Dies wäre eine wichtige Frage, für die weitere Untersuchungen notwendig erscheinen.

Anhand von Fichten und Buchen im Rein- und Mischbestand auf Lehm wurde untersucht, welchen Einfluß die Mischung dieser Baumarten auf deren Wurzelarchitektur hat (Holzerode).

Danach zeichnet sich ab, daß die Fichte in Mischung mit Buche ein signifikant tiefer reichendes und im Querschnitt größeres Wurzelsystem entwickelt als die Fichte im Reinbestand. Die Summe der Wurzelquerschnittfläche der ersten Sektion (30 cm Radius bzw. 40 cm Tiefe) ist bei der Fichte im Mischbestand in der horizontalen- 11 % und in der vertikalen Wurzelrichtung viermal so hoch als die der Fichte im Reinbestand (Abschnitt 4.2.2.2). Die in Mischung mit Buche festgestellte Veränderung der Wurzelarchitektur betrifft demnach hauptsächlich die Tiefendurchwurzelung. Mit zunehmender Tiefe (zweite Sektion, 60 cm) besitzt die Fichte im Mischbestand noch eine 40 % größere Wurzelquerschnittflächensumme als im Reinbestand, in der dritten Sektion (90 cm Tiefe) beträgt dieser Wert 80 %. Demnach ist das Verhältnis zwischen Horizontal- und Vertikalbewurzelung bei den Fichten im Mischbestand enger als bei den Fichten im Reinbestand. Diese Ergebnisse kennzeichnen das in Richtung Herzwurzelsystem tendierende Wurzelsystem der Mischbestandsfichte und das Senkerwurzelsystem der Fichte im Reinbestand. Weiterhin ist bei den Fichten des Mischbestandes eine signifikant geringere Anzahl an Feinwurzeln festzustellen als bei den Reinbestandsfichten.

Die Buche im Mischbestand zeigt ein flacheres Wurzelsystem mit einer geringeren Wurzelquerschnittfläche als die Buche im Reinbestand. In der horizontalen Wurzelrichtung besaß sie eine 10 % kleinere Wurzelquerschnittfläche (nicht signifikant). In der Tiefe war jedoch die Wurzelquerschnittfläche (signifikant) nur halb so groß. Im Vergleich der vier untersuchten Bestände war die Buche im Reinbestand allerdings durch ihre Nachbarbäume am stärksten bedrängt. Dies zeigten die errechneten Konkurrenzindizes. Demnach kann das Ergebnis der flacher und schwächer wurzelnden Buchen des Mischbestandes vermutlich nicht auf Bestände mit konkurrenzstärkerer Buche übertragen werden. Die Resultate dieser Untersuchungen zur Grobwurzelarchitektur von Mischbestandsbäumen sind in der Literatur nicht beschrieben und

erfordern weitere Forschung. Sie lassen die Schlußfolgerung zu, daß die Begründung von Mischbeständen mit Fichte und Buche durchaus Vorteile für das Wurzelsystem der Fichte hat.

Einen nächsten Schwerpunkt bildeten 21-, 30- und 41 jährige Fichten auf ähnlichem Standort (Lehm). Anhand dieser drei Bestände sollte geklärt werden, wie sich das Wurzelsystem und oberirdische Größen mit zunehmendem Alter verändern. Dabei wird deutlich, daß die Tiefendurchwurzelung mit Anstieg des Alters kontinuierlich zunimmt. Dies stellt ein interessantes Ergebnis dar, da nach RACHTEJENKO (1952) das vertikale Wachstum der Senkerwurzeln mit 30 Jahren nahezu abgeschlossen sein soll, in Krebeck jedoch bis zum Alter von 41 Jahren noch eine Zunahme der Tiefenerschließung des Bodens beobachtet wurde. Allerdings verlangsamte sich dieser Vorgang. Während die Summe der Wurzelquerschnittfläche in 40 cm Tiefe vom Alter 21 bis 30 Jahre auf das Dreifache zunahm, stieg sie von 31 bis 40 Jahre nur noch um die Hälfte an.

Die Frage, wie sich ober- und unterirdische Größen mit zunehmendem Alter ändern, wurde auch an Fichte und Kiefer auf Sandboden (Knesebeck) bearbeitet. Hierfür wurden drei 20 bis 50 jährige Bestände jeder Baumart ausgewählt. Zusätzlich konnte an zwei 30 jährigen Fichtenbeständen analysiert werden, inwiefern standörtliche Unterschiede das Wurzelwachstum (auf Sand und auf Lehm) verändern. Die Fichte auf Sand wurzelte durchschnittlich tiefer als die auf Lehm. Auch in Knesebeck konnte bei der Fichte beobachtet werden, daß sich die Geschwindigkeit der Tiefendurchwurzelung im höheren Alter verlangsamte. Dabei steigt die Summe der Wurzelquerschnittfläche in 40 cm Tiefe von 20 bis 31 Jahren auf das Achtfache. Bei Alterszunahme um weitere zwanzig Jahre erhöht sich dieser Wert aber auf nur knapp das Dreifache. Bei den ober- und unterirdischen Größen ist kein signifikanter Unterschied zwischen den Fichten auf Lehm und denen auf Sand zu erkennen (S.90).

Für die Kiefer konnte ebenfalls ein kontinuierlicher Anstieg der Durchwurzelungstiefe mit zunehmendem Alter festgestellt werden. Die Summe der Wurzelquerschnittfläche stieg vom Alter 20 bis 33 Jahre in der vertikalen Richtung auf mehr als das Vierfache an und in der Horizontalen auf das Zwölffache. Die Relation zwischen den Horizontal- und den Vertikalwurzeln war bei der Kiefer sehr viel enger als bei der Fichte. Darin drückt sich das für die Kiefer typische Pfahlwurzelsystem aus. Das Verhältnis zwischen ober- und unterirdischen Größen wies für ältere Kiefern eine große Streuung auf.

Untersuchungen an 13- bzw. 22 jährigen Eichen auf zwei verschiedenen Standorten (Holzminde: Lehm; Kattenbühl: Stagnogley) sollten Unterschiede der Wurzelarchitektur herausstellen, die aus verschiedenen Verjüngungsverfahren (Pflanzung und Saat) resultieren. Die Saateiche auf Lehm wies höhere ober- und unterirdischen Wuchsleistungen auf als die gepflanzte Eiche. Auf Stagnogley besaß die Saateiche eine geringere Wuchsleistung als die gepflanzte Eiche. Die Wurzeln der Saateiche zeigten auf Lehm in der vertikalen Wurzelrichtung durchschnittlich weniger Vertikalwurzeln. Sie besaßen aber in 20 cm Tiefe eine doppelt so große Wurzelquerschnittflächensumme wie die gepflanzten Eichen. Diese Unterschiede hoben sich jedoch in tieferen Bodenschichten wieder auf. Bei den Bäumen auf Stagnogley zeigte die gepflanzte Eiche in der Horizontalen eine größere Wurzelquerschnittfläche als die gesäte Eiche. In der vertikalen Wurzelrichtung waren nur geringfügige, nicht signifikante Unterschiede festzustellen. Durch Berechnungen unter standardisierten Bedingungen konnte herausgestellt werden, daß

die Beziehung zwischen ober- und unterirdischen Größen sehr ähnlich zu bewerten ist. Für die Eichen beider Standorte wurde beobachtet, daß bei Saateichen die Pfahlwurzel an der gesamten vertikalen Bewurzelung einen größeren Anteil hatte als bei Pflanzeichen. Die Pflanzeichen wiesen viele, im Querschnitt kleinere vertikale Wurzeln auf und erreichten somit ähnliche Wurzelquerschnittswerte. Der Unterschied der Tiefendurchwurzelung zwischen gesäten und gepflanzten Eichen war nicht signifikant. Im Vergleich beider Standorte wurzelten die Eichen auf Stagnogley durchschnittlich erstaunlicherweise fast genauso tief wie auf Lehm, obwohl sie jünger waren.

Insgesamt konnten in der Tiefendurchwurzelung und der Wurzelquerschnittfläche keine signifikanten Unterschiede zwischen gepflanzten und gesäten Eichen gefunden werden. Da andere Untersuchungen gegensätzliche Resultate erbrachten, besteht auch hier Forschungsbedarf. Darüber hinaus konnte keine eindeutige Aussage zur Hemmung des Wurzelwachstums der Eiche auf Stagnogley gemacht werden. Hierfür wären Wiederholungen in späteren Jahren sehr wünschenswert.

7 Glossar

Buche	Probabäume sind Buchen, die von bis zu 10 Buchen umgeben waren
Buche / Fichte (Bu / Fi)	Probabäume sind Buchen, die von bis zu 10 Fichten umgeben waren
Einzelwurzel	Eine Wurzel des gesamten Wurzelsystemes
Feinwurzeln (KÖSTLER <i>et al</i> 1968)	Feinstwurzeln <1mm Feinwurzeln im engeren Sinne 1-2mm Schwachwurzeln 2-5mm
Fichte	Probabäume sind Fichten, die von bis zu 10 Fichten umgeben waren
Fichte / Buche (Fi / Bu)	Probabäume sind Fichten, die von bis zu 10 Buchen umgeben waren
GHA= Gesamte Wurzelanzahl	Summe aller horizontalen Wurzeln in ihrer Anzahl, unter 45° in die Tiefe gehende Wurzeln der drei Sektionen
GHQ = Gesamte Wurzelquerschnittfläche	Summe aller horizontalen Wurzelquerschnittflächen, unter 45° in die Tiefe gehende Wurzeln
GPA	Summe aller unter 60° in die Tiefe gehenden Pfahlwurzeln
GPQ gesamte Pfahlwurzelquerschnittfläche	Summe aller Querschnittsflächen der Pfahlwurzeln der drei Sektionen
GQF Gesamtwurzelquerschnittfläche	Summe aller Wurzelquerschnittflächen der drei Sektion eines Wurzelsystems
Grobwurzeln (KÖSTLER <i>et al</i> 1968)	Grobwurzeln im engeren Sinne 5-20 mm Derbwurzeln 20-50 mm Starkwurzeln >50 mm
GVA = gesamte vertikale Wurzelanzahl	Summe aller vertikalen Wurzeln in ihrer Anzahl, über 45° in die Tiefe gehend

GVQ = gesamte vertikale Wurzelquerschnittfläche	Summe aller vertikalen Wurzelquerschnittflächen, über 45° in die Tiefe gehend
Kronenparameter	Kronengewicht, Astgewicht, Blattgewicht, Ästchengewicht, Kronenansatz, Kronenlänge, Kronenprozent
Maximale Durchwurzelungstiefe	Durchwurzelungstiefe der Einzelwurzel eines Wurzelsystems, die am tiefsten wurzelt (cm)
Mittlere Gesamtwurzeltiefe	Mittelwert aller Einzelwurzeltiefen eines Wurzelsystems
Richtungswechselnde Wurzeln	Wurzeln, die in der ersten Sektion in die horizontale oder vertikale Richtung wachsen, in der weiteren Entfernung vom Stamm ihren ursprünglichen Verlauf jedoch ändern
Stammbasis	Mittelachse des Wurzelstocks
WQF Wurzelquerschnittfläche	Nach der Formel $d_1/2 \cdot d_2/2 \cdot (\Pi)$ berechnete Querschnittfläche einer Wurzel des Gesamtwurzelsystems
Wurzelast	Tritt eine Verzweigung der Wurzel vor der ersten Sektion auf, so wird dieser sich verjüngende Teil als "Wurzelast" bezeichnet (analog zu Stamm: und alles was davon abgeht, ist ein Ast)
Wurzellänge	Länge des von der Stammbasis abgehenden Wurzelastes
Wurzelstock	Zentralpartie des Wurzelsystems, d. h. dicht unter dem Stamm im Boden befindlicher Teil des Wurzelsystems, deren Basis der Ausgangspunkt für die horizontalen und vertikalen Wurzelmessungen ist
Wurzelsystem	Dreidimensionaler, halbkreisförmiger Wurzelkörper bis zu 100 cm horizontaler und 90 cm vertikaler Entfernung von der Stammbasis (Fichte, Kiefer, Buche), Eiche 70 cm horizontal und vertikal

Literaturverzeichnis

- ABE, K.; IWAMATO, M. 1986:** An evaluation of tree-root effect on slope stability by tree-root strength. *Journal of the Japanese Forestry Society* 68, 505-510.
- ABERTS, R.; BERENDSE, F.; KLERK, N. M.; BAKKER, C. 1989:** Root production and root turnover in two dominant species of wet heathlands. *Oecologia* 81, 374-378.
- AG BODENKUNDE 1982:** Bodenkundliche Kartieranleitung. 4. Auflage, Stuttgart, Schweizerbart, 392 S.
- ALDINGER, E.; SEEMANN, D.; KÖNNERT, V. 1996:** Wurzeluntersuchungen auf Sturmwurfflächen 1990 in Baden-Württemberg. *Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung* 38, 11-25.
- ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG 1996:** Forstliche Standortaufnahme – Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. Arbeitskreis Standortkartierung 5. Auflage, Enching bei München, IHW Verlag.
- ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG 1985:** Forstliche Wuchsgebiete und Wuchsbezirke in der Bundesrepublik Deutschland. Münster-Hiltrup, Landwirtschaftsverlag GmbH, 29-31.
- ATGER, C; EDELIN, 1993:** Premières données sur l'architecture comparée des systèmes racinaires et caulinaires. *Can. Journal Bot.* 72, 963-975.
- BASSAM, N. E.; SOMMER, C. 1980:** Eine Methode zur in situ-Ermittlung der Leistungsfähigkeit des Wurzelnetzes von Genotypen. *Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau* 149, 191-397.
- BAUMHAUER, H. 1996:** Verjüngung durch Saat. Ein Beitrag zur Kostensenkung. *Allgemeine Forstzeitschrift / Der Wald* 51, 1192-1194.
- BAZZAZ, F. A. 1997:** Allocation of resources in plants: State of the science and critical questions. In: BAZZAZ, F. A.; GRACE, J. (Eds.). *Plant resource allocation*, San Diego u.a., Academic Press, 1-37.
- BECKER, G.; HOFFMANN, R.; KREBS, M. 1988:** Einsatz eines Rhizoskops zur Beurteilung eines veränderten Wurzelwachstums als Folge der Befahrung von Waldböden. *Allgemeine Forstzeitschrift* 43, 866-868.
- BEHLEN, T. 1996:** Vitalität und Wachstum eines Buchenjungwuchses unter dem Einfluß von Birken-Sukzessionsvorwald im Hessischen Forstamt Alsfeld. *Fachhochschule Hildesheim-Holzminde, Fachbereich Forstwirtschaft und Umweltmanagement Göttingen*. Diplomarbeit.

- BIBELRIETHER, H. 1962:** Wurzeluntersuchungen an Tannen und Eichen in Mittelschwaben. Forstwissenschaftliches Centralblatt 18, 230-248.
- BIBELRIETHER, H. 1964:** Unterschiedliche Wurzelbildung bei Kiefern verschiedener Provenienz. Forstwissenschaftliches Centralblatt 83, 129-139
- BIGING, G. S.; DOBBERTIN, M. 1992:** A comparison of distance-dependent competition measures for height and basal area growth of individual conifer trees. Forest Science 38 (3), 695-720
- BIRKE, M. 1997:** Wuchsdynamik und qualitative Differenzierung einer Bergahorndickung mit Birkenkonkurrenz. Fachhochschule Hildesheim-Holzminde, Fachbereich Forstwirtschaft und Umweltmanagement Göttingen. Diplomarbeit.
- BÖHM, W. 1979:** Methods of studying root systems. Ecological Studies 33. Berlin Heidelberg New York, Springer Verlag.
- BÖHM, W.; KÖPKE, U. 1977:** Comparative root investigations with two profile wall methods. Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau 144, 297-303.
- BOMMER, S. 1998:** Untersuchung zur Konkurrenzsituation in Buchen - Douglasien - Jungbeständen im Kreisforstamt Farchau. Fachhochschule Hildesheim-Holzminde, Fachbereich Forstwirtschaft und Umweltmanagement Göttingen. Diplomarbeit
- BONNEMANN, A 1939:** Der gleichaltrige Mischbestand von Kiefer und Buche. Mitteilungen aus Forstwirtschaft und Forstwissenschaft 10, 439-483.
- BONNEMANN, A. 1970:** Zum Anbau der Fichte auf staunassen Böden. Forstarchiv 41, 217-221
- BORCHERT, R. 1973:** Simulation of rhythmic tree growth under constant conditions. Physiological Plant 29, 173-180. Zitiert in: ROLOFF, A und RÖMER 1989, Beziehungen zwischen Krone und Wurzel bei der Rotbuche (*Fagus Sylvatica* L.). Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 160 (9/10); 200-205.
- BOSCH, A. L. 1984:** A new root observation method. The perforated soil system. Acta Oecologica; Oecologia plantarum 5 (1), 61-74.
- BOX, J. E. jr. 1996:** Use of minirhizotrans to study wheat rooting. In: PERSSON, H.; BAITULIN, I. O. (eds.), Plant root systems and natural vegetation. Acta phytogeogr. Suec. 81, 109-112.
- BRAEKKE, F. H., KOZŁOWSKI, T. T. 1977:** Distribution and growth of roots in *Pinus resinosa* and *Betula papyrifera* stands. Medd. Nor. Inst. Skogforsk. 33, 10, 439-451.
- BRECKLE, S. W. 1996:** Growth of tree roots under heavy metal (PB)-stress. In PERSSON, H.; BAITULIN, I. O. (eds.) Plant root systems and natural vegetation. Acta phytogeogr. Suec. 81, 39-43.

- BROWN, G. R.; THILENIUS, J. F. 1977:** A tool and method for extracting plant-root-soil cores on remote sites. *J. Range Manag.* 30, 72-74.
- BROWN, J. M. B. 1955:** Ecological investigations: Shade and growth of oak seedlings. *Rep. For. Res. For. Comm.* 24-25. Zitiert in: RÖHRIG, E. 1966, Die Wurzelentwicklung der Waldbäume in Abhängigkeit von den ökologischen Verhältnissen. *Forstarchiv* 37 (10), 217-229, 237-249.
- BRÜCKNER, E.,; JAHN, R. 1932:** Über die Wurzel Ausbildung verschiedener Holzarten in Böden des ostthüringischen Buntsandsteingebietes. *Tharandter Forstliches Jahrbuch* 83, 150-170.
- BURGER, H. 1930:** Bodenveränderung und Wurzelbildung. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 2, 67-71.
- BURSCHEL, P.; HUSS, J. 1964:** Die Reaktion von Buchensämlingen auf Beschattung. *Forstarchiv* 35, 225-233. Zitiert in: RÖHRIG, E. 1966, Die Wurzelentwicklung der Waldbäume in Abhängigkeit von den ökologischen Verhältnissen. *Forstarchiv* 37 (10), 217-229, 237-249
- BURSCHEL, P.; SCHMALTZ, J. 1965A:** Untersuchungen über die Bedeutung von Unkraut und Altholzkonkurrenz für junge Buchen. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 84, 230-243.
- BURSCHEL, P.; SCHMALTZ, J. 1965B:** Die Bedeutung des Lichtes für die Entwicklung junger Buchen. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 136, 193-210.
- BURSCHEL, P.; HUSS, J.; KALBHENN, R. 1964:** Die natürliche Verjüngung der Buche. *Schriftenreihe der forstlichen Fakultät Göttingen* 34, 186 S.
- BÜSGEN, M.; MÜNCH, E. 1927:** Bau und Leben unserer Waldbäume. 3. Auflage, Jena. Fischer
- BÜTTNER, V.; LEUSCHNER, C. 1994:** Spatial and temporal patterns of fine root abundance in a mixed oak/beech forest. *Forest Ecology and Management* 70 (1-3), 11-21.
- CARLEY, H. E.; WATSON, R. D. 1966:** A new gravimetric method for estimating root surface areas. *Soil sci.* 5, 589-291.
- CASTLE, W. S. 1978:** Citrus root systems: Their structure, function, growth, and relationship of tree performance. *Proc. Int. Soc. Citriculture* 3, 62-69. Zitiert in: ROLOFF, A. und RÖMER 1989, Beziehungen zwischen Krone und Wurzel bei der Rotbuche (*Fagus Sylvatica* L.). *Allgemeine Forstzeitschrift* 160 (9/10), 200-205.

- CHAPMAN, K.; WITTAKER, J. B.; HEAL, O. W. 1986:** Metabolic and Faunal Activity in Litters of Tree Mixtures Compared with Pure Stands. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 24, 33-40. Zitiert in: BROWN, A. H. F. 1992 Functioning of mixed - species stands at Gisburn, NW- England. In: CANNELL, M. G. R.; Malcom, D. C.; Robertson, P. A. (eds), *The ecology of mixed - species stands of trees*. Special Publication 11 of the British Ecological Society, Blackwell Scientific Publications; Oxford, 125-150.
- CHENG, W.; COLEMAN, D.; BOX, J. E. JR. 1991:** Measuring root turnover using the minirhizotron technique. *Agriculture Ecosystem Environment* 34, 261-267.
- COLIN-BELGRAND, M.; RANGER, J.; D'ARGOUGES, S. 1993:** Internal nutrient cycling in *Castanea sativa* wood: a dynamic study of a stand chronosequence. *Acta-Oecologica* 14 (5), 653-680; 44 ref..
- COUTTS, M. P. 1983:** Root architecture and tree stability. *Plant and Soil* 56, 171-188.
- DHOTE, J. F; MOHREN, G. M. J. 1994:** Hypotheses about competition for light and water in even-aged common beech (*Fagus sylvatica* L.). *Forest Ecology and Management* 69, 1-3, 219-232.
- DO-HYUNG LEE 1998:** Architektur der Wurzelsysteme von Fichten (*Picea abies* L) auf unterschiedlich versauerten Standorten. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A*, 153.
- DRESCHER, W. 1959:** Aus der Bestandes- und Ertragsgeschichte von Beständen des südlichen Hochschwarzwaldes. *Schriftenreihe der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg* 19.
- DREXHAGE, M. 1994:** Die Wurzelentwicklung 40 jähriger Fichten (*PICEA ABIES* [L]) in der Langen Bramke (Harz). *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme. Reihe A*, 111.
- EGLI, S.; KÄLIN, I. 1991:** Root window technique for in vivo observation for ectomycorrhiza on forest trees. In: NORRIS, J. R.; REED, D. J. (eds), *Methods on microbiology*, Vol. 23. New York, Academic Press, 423-433.
- EHWALD, E.; GRUNERT, F.; SCHULZ, W.; VETTERLEIN, E. 1961:** Zur Ökologie von Kiefern-Buchen-Mischbeständen. *Archiv für Forstwesen* 10 (4-6), 397-416.
- EICHHORN, J. 1992:** Wurzeluntersuchungen an sturmgeworfenen Bäumen in Hessen. *Forst und Holz* 47 (18), 555-559.
- ELLERN, S. J.; HARPER, J. L.; SATAR, G. R. 1970:** A comparative study of the distribution of the root of *Avena futua* and *Avena strigosa* in mixed stands using a ¹⁴C labelling technique. *Journal of ecology* 58, 865-868.

- FABRICIUS, L. 1929:** Neue Versuche zur Feststellung des Einflusses von Wurzelwettbewerb und Lichtentzug des Schirmstandes auf den Jungwuchs. Forstwissenschaftliches Centralblatt 51, 477-506.
- FEICHT, H.; GEYER, R. 1993:** Untersuchungen zur Wurzelentwicklung natürlich verjüngter/gesäter und gepflanzter Eichen auf im Unterboden verdichteten Standorten. In: Bericht über die Arbeitstagung "Pflanztechnik und Wurzelentwicklung" der Bayerischen Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt, 48-60.
- FERNANDEZ, A.; PARUELA, J. M. 1988:** Root systems of two patagonian shrubs: A quantitative description using a geometrical method. Journal of Range Management 41, 220-223.
- FIEDLER, H. J.; HUNGER, W.; ZANT, R. 1963:** Untersuchungen über die Bodendurchwurzelung der Fichte. Archiv für Forstwesen 12, 1214-1223.
- FOGEL, R 1985:** Roots as primary producers in below-ground ecosystems. Special Series of the British Ecological Society 4, 22-36.
- FÖLSTER, H., DEGENHARD, M.; FLOR, T.; LUX, M. 1991:** Untersuchungen zur Tiefendurchwurzelung und Durchwurzelungsintensität auf Braunerde-Pseudogleyen im Vorderen Hunsrück in Abhängigkeit von Baumart und Bestandesstrukturparametern. In: Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz 19, 91-106.
- FRITZSCHE, K. 1933:** Sturmgefahr und Anpassung. (Physiologische und technische Fragen des Sturmschutzes). Tharandter forstliches Jahrbuch 84, 1-94.
- GANNBEN, R. H. 1934:** Untersuchungen an Buchenstandorten Nord- und Mitteldeutschlands. Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen 36, 225-249, 359-394, 472-494, 583-606.
- GAYER, K. 1867:** Über forstliche Versuchsstationen insbesondere in Bayern. Monatsheft für Forst- und Jagdwesen, 201-213.
- GENSSLER, H. 1959:** Veränderungen von Boden und Vegetation nach generationsweisen Fichtenanbau. Universität Göttingen, Forstliche Fakultät, Dissertation.
- GIJSMAN, A. J.; FLORIS, J.; VAN NOORDWIJK, M.; BROUWER, G. 1991:** An inflatable minirhizotron system for root observations which improves soil/tube contact. Plant and soil 134, 261-269.
- GRACE, J. 1997:** Toward models of resource allocation by plants. In: BAZZAZ, F. A.; GRACE, J. (eds.), Plant resource allocation. San Diego u.a., Academic Press, 279-291.
- GRIER, C. C.; VOGT K. A.; KEYES, M. R.; EDMONTS, R. L. 1981:** Biomass distribution and above- and below-ground production in young and mature *Abies amabilis* zone ecosystems in the Washington Cascades. Can. Journal of Forest Research 11, 155-167.

- GROSSKOPF, W. 1950:** Bestimmung der charakteristischen Feinwurzelintensitäten in ungünstigen Waldprofilen und ihre ökologische Auswertung. Mitteilungen der Bundesanstalt für Forst- und Holzwirtschaft 11, 1-19.
- GRUBER, F. 1992:** Mündliche Mitteilungen. Zitiert in: DO-HYUNG LEE (1997). Architektur der Wurzelsysteme von Fichten (*Picea abies* [L]) auf unterschiedlich versauerten Standorten. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, 153, 74.
- GRUBER, F. 1992:** Dynamik und Regeneration der Gehölze. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme. Reihe A, 86 / Teil 1.
- HÄHNE, K. 1991:** Der Einfluß von Gräsern- und Gehölzwurzeln auf die Scherfestigkeit von Böden und damit auf die Standsicherheit von Hängen und Böschungen. Technische Universität Berlin, Institut für Landschaftsbau, Dissertation.
- HARLEY, J. L.; WAD, J. S. 1955:** The effect of light on the roots of beech and its surface population. Plant and soil, 96-112. Zitiert in: Röhrig, E. 1966, Die Wurzelentwicklung der Waldbäume in Abhängigkeit von den ökologischen Verhältnissen. Forstarchiv 37 (10), 217-229, 237-249[M21].
- HARTKOPF, A. 1994:** Zur Konkurrenzwirkung von Weichlaubhölzern in einem Fichtenjungwuchs. Universität Göttingen Forstwissenschaftlicher Fachbereich, Institut für Waldbau Abt. I., Diplomarbeit.
- HAUSKELLER-BULLERJAHN, K. 1997:** Wachstum junger Eichen unter Schirm. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, 147.
- HEGYI, F. 1974:** A simulation model for managing jack-pine stands. In Growth models for tree and stand simulation, Rapporteur ou uppsatser, Institutionen för skogsproduktion, Skogshögskolan, Stockholm, 74-76.
- HENDRIKS, C. M. A., BIANCHI, F. J. J. A. 1995:** Root density and root biomass in pure and mixed forest stands of douglas fire and beech. Netherlands Journal of agricultural Science 43 (3), 321-331.
- HILF, H. H. 1927:** Studien über die Wurzelausbreitung von Fichte, Buche und Kiefer in geschlossenen älteren Beständen, insbesondere auf Sandböden. Eberswalde, Dissertation, 121 S.
- HOCHTANNER, G.; SEITSCHEK, O. 1964:** Wuchsleistungen von Kiefernbeständen auf Meliorierungsflächen nach dem Bodenwöhler Verfahren. Forstwissenschaftliches Centralblatt 83, 1-22.
- HOFFMANN, R. 1939:** Vergleichenden Untersuchungen über die Wurzeltracht forstlicher Kleinpflanzen. Ludwig-Maximilians-Universität München, Dissertation.
- HOLMES, M. J.; REED, D. D. 1991:** Competition indices for mixed species northern hardwoods. Forest Science 37 (5), 1338-1349.

- ITOH, S.; BARBER, S. A. 1983:** Phosphorus uptake by six plant species as related to root hairs. *Agron. Journal* 75, 457-461.
- JAHN, R.; SCHEFFOLD, K.; HAUCK, U. 1971:** Wurzeluntersuchungen von Waldbäumen in Baden-Württemberg. Schriftenreihe der Landesforstverwaltung Baden-Württembergs 33, 120 S.
- JENIK, J. 1957:** Das Wurzelsystem der Stieleiche und Traubeneiche. *Rozprawy Ceskoslovenske Akademie Ved.*. Zitiert in: KÖSTLER *et al* 1968 *Die Wurzeln der Waldbäume in Mitteleuropa*. Hamburg Berlin, Paul Parey Verlag.
- JARVIS, P. G. 1964:** The adaptability to light intensity of seedlings of *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. *Journal of ecology*, 545-568. Zitiert in: RÖHRIG, E. 1966 *Die Wurzelentwicklung der Waldbäume in Abhängigkeit von den ökologischen Verhältnissen*. *Forstarchiv* 37 (10), 217-229, 237-249.
- JOHNSON, P. S. 1993:** Sources of oak reproduction. In: LOFTIS, D.L.; MCGEE, C.E. (eds.), *Oak regeneration: Serious problems, practical recommendations Symposium oak regeneration*, Knoxville, Tennessee, Sept. 8-10, 1992; *Generale technical report*, SE 84, 112-131.
- JÜTTNER, O. 1954:** 70 Jahre Heideaufforstung. Bremen, Walter Dorn Verlag.
- KALELA, E.K. 1955:** Über Veränderungen in den Wurzelverhältnissen der Kiefernbestände im Laufe der Wachstumsperiode. *Acta For. Fenn.* 65, 1-41.
- KALININ, M. I. 1978:** Modellierung der Waldbestände (russ.). Lwow, Wistscha Schkola Verlag, 205 S.
- KALININ, M. I. 1983:** Ausbildung der Wurzelsysteme von Bäumen (russ.). Moskwa, Lesnaja Promslyennost.
- KARIZUMI, N. 1968:** Estimation of root biomass in forests by the soil block sampling. In GHILARAV, M. S.; KOVDAL, V. A. (eds), *Methods of productivity studies in root systems and rhizosphere organism*. International Symposium 1968, USSR Leningrad, Nauka, 79-86.
- KAUSSMANN, B.; SCHIEWER, U. 1989:** Funktionelle Morphologie und Anatomie der Pflanzen. Jena, Fischer Verlag.
- KENNEL, R. 1966:** Soziale Stellung, Nachbarschaft und Zuwachs. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 85, 193-204.
- KEYES, M. R.; GRIER, C. C. 1981:** Above- and below-ground net production in 40 years old douglas fir stands on low and high productivity sites. *Canadian Journal of Forest Research* 11, 599-605.

- KLEINSCHMIT, J. R. G.; KREMER, A.; ROLOFF, A. 1995** : Sind Stieleiche und Traubeneiche zwei getrennte Arten? Allgemeine Forstzeitschrift / Der Wald 50 (26), 1453-1456.
- KOKKONEN, P. 1929**: Beobachtungen über das Wurzelsystem der Kiefer im Moorböden. Acta for finn. 25, 1-21.
- KÖNIG, A; MÖBMER, R., BÄUMLER, A. 1995**: Waldbauliche Dokumentation der flächigen Sturmschäden des Frühjahrs 1990 in Bayern und meteorologische Situation zur Schadenszeit. Berichte aus der bayerischen Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft (LWF) 2, 19-25, 47-70.
- KÖSTLER, J. N.; BRÜCKNER, E; BIBELRIETHER, H. 1968**: Die Wurzeln der Waldbäume in Mitteleuropa. Hamburg-Berlin, Paul Parey Verlag.
- KOZLOWSKI, T. T.; PALLARDY, S. G. 1997**: Growth control in woody plants. San Diego u.a., Academic Press.
- KOZLOWSKI, T. T. 1972**: Seed biology, Vol. II. Academic Press, New York – London.
- KRAHL-URBAN, J. 1951**: Waldfeldbau in einem Mittelgebirgsrevier. Schriftenreihe der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen 1.
- KRAMER, H. 1975**: Erhöhung der Produktionssicherheit zur Förderung einer nachhaltigen Fichtenwirtschaft. Forstarchiv 46, 9-13
- KRAMER, H.; GUSSONE, H. A.; SCHOBER, R. 1988**: Waldwachstumslehre. Hamburg – Berlin, Paul Parey Verlag, 374 S.
- KRAMER, H.; AKCA, A. 1987**: Leitfaden für Dendrometrie und Bestandesinventur. Frankfurt am Main, J. D. Sauerländer's Verlag, 287 S.
- KRAUSS, G. 1938**: Wald und Boden. In: Raumforschung und Raumordnung 2 (11/12), 592-596.
- KRAUSS, G.; WOBST, W.; GÄRTNER, G. 1935**: Humusaufgabe und Bodendurchwurzelung im Eibenstocker Granitgebiet. Tharandter Forstliches Jahrbuch 85, 17-51.
- KREUTZER, K. 1961**: Wurzelbildung junger Waldbäume auf Pseudogleyböden. Forstwissenschaftliches Centralblatt 80, 356-392.
- KRONAUER, H. 1990**: Ausmaß der Sturmschäden 1990 und Maßnahmen zur Bewältigung. Allgemeine Forstzeitschrift 45 (17/18), 434-437.
- LAITAKARI, E. 1929A**: Die Wurzelforschung in ihrer Beziehung zur praktischen Forstwissenschaft, Acta for. Fenn. 33, 1-380.

- LAITAKARI, E. 1929B:** The root system of pine - A morphological investigation. Acta for. Fenn. 33, 307-380.
- LEIBUNDGUT, H. 1975:** Untersuchungen über die gegenseitige Beeinflussung verschiedener Baumarten. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 127, 766-771.
- LEMKE, K. 1956:** Untersuchungen über das Wurzelsystem der Roteiche auf diluvialen Standortsformen. Archiv für Forstwesen 5, 8-45, 161-202.
- LICHTENEGGER, E. 1985:** Die Ausbildung der Wurzelsysteme krautiger Pflanzen und deren Eignung für Böschungssicherung auf verschiedenen Standorten. In PFLUG, E. (Hrsg). Wurzelwerk und Standsicherheit von Böschungen und Hängen. Aachen, SEPIA Verlag, 63-82.
- LIESE, J. 1926:** Beiträge zur Kenntnis des Wurzelsystems der Kiefer (*Pinus sylvestris*) nebst anderen Baumarten. Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen 58, 129.
- LONG, T. J.; JONES, R. H. 1996:** Seedling growth strategies and seed size effects in fourteen oak species native to different soil moisture habitats. Trees (- Structure and Function -) 11 (1), 1-8; 54.
- LYR, H. 1994:** Effect of root temperature on growth parameters of QUERCUS ROBUR compared to other tree species. IUFRO-Symposium, Environmental constraints and oaks. Nancy.
- MACKENTHUN, G. 1990:** Vergleichende Ökologische Untersuchungen eines Fichten/Buchenmischbestandes und verschiedener Reinbestände in Westerhof, Harzvorland. Universität Göttingen, Forstwissenschaftlicher Fachbereich, Geobotanisches Institut / Institut für Waldbau Abt. I. Diplomarbeit.
- MARSCHNER, H. 1986:** Mineral nutrition of higher plants. London, Academic press. Zitiert in: Abschlußbericht 1989-1993 zum BMFT- Forschungsvorhaben. Stabilitätsbedingungen von Waldökosystemen Teil B, 77.
- MAYER, A. M.; POLJAKOFF - MAYBER, A. 1975:** The germination of seeds. Oxford - New York, Pergamon Press.
- MCGEE, C. E.; LOFTIS, D. L. 1993:** Oak regeneration: A summary: Serious problems, practical recommendations; Symposium Oak regeneration, Knoxville, Tennessee, Sept. 8-10, 1992, LOFTIS, D. L.; MCGEE, C. E. Gen. Tech. Rep., SE 84, Asheville, N. C., 316-319.
- MCKAY, H. M.; MALCOM, D. L. 1988:** A comparison of the fine root component of a pure and a mixed coniferous stand. Canadian Journal of Forest Research 18 (11), 1416-1426.
- MEIWES, K. J. 1984:** Chemische Untersuchungsverfahren für Mineralböden, Auflagehumus und Wurzeln. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme 7, 1-67.

- MELZER, E. W. 1962:** Die stochastischen Beziehungen zwischen Sproß- und Wurzelsystem des Baumes. *Archiv für Forstwesen* 11 (7), 822-838.
- MIAO-SHILI; MIAO-SL 1995:** Acorn mass and seedling growth in *Quercus rubra* in response to elevated CO₂. *Journal of Vegetation Science*, 6 (5), 697-700; 17 ref.
- MOIR, W. H., BACHELARD, E. P. 1969:** Distribution of fine roots in three *Pinus radiata* plantations near Canberra, Australia. *Journal of Ecology* 50, 658 – 663.
- MOROSOW, G. F. 1928:** Die Lehre von den Waldtypen; Neudamm. Zitiert in: KÖSTLER et al 1968, Die Wurzeln der Waldbäume in Mitteleuropa. Hamburg – Berlin, Paul Parey Verlag.
- MÖßMER, R. 1997:** Untersuchung der Sturmschäden des Jahres 1990 in Bayern. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Bericht zur 1. Wiederholungsaufnahme "Pflanzverfahren und Pflanztechnik".
- MULLIN, R. E. 1963:** Growth of white spruce in the nursery. *Forest Science* 9, 68.
- MURACH, D. 1989:** Natural and anthropogenic stress in spruce and beech ecosystems in the Solling project. In: Abschlußbericht 1989-1993 zum BMFT-Forschungsvorhaben. Stabilitätsbedingungen von Waldökosystemen Teil B, 69-78.
- NIELSEN, C. N. N. 1990:** Einflüsse von Pflanzenabstand und Stammzahlhaltung auf Wurzelform, Wurzelbiomasse, Verankerung sowie auf die Biomasseverteilung im Hinblick auf die Sturmfestigkeit der Fichte. Frankfurt am Main, J. D. Sauerländer's Verlag, Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Forstlichen Versuchsanstalt 100.
- NIELSEN, C. N. N. 1995:** Report of project "Development of roots and root/ shoot-ratios. Air3-CT93-1269, unveröffentlicht.
- OVINGTON, J. D.; MCRAE, C. 1960:** The growth of seedlings of *Quercus petraea*. *Journal of Ecology*, 639-646. Zitiert in: RÖHRIG, E. 1966 Die Wurzelentwicklung der Waldbäume in Abhängigkeit von den ökologischen Verhältnissen. *Forstarchiv* 37 (10), 217-229, 237-249.
- PELLINEN, P. 1986:** Biomassenuntersuchungen im Kalkbuchenwald. Universität Göttingen, Forstwissenschaftler Fachbereich. Dissertation.
- PERSSON, H. 1979:** Fineroot production, mortality and decomposition in forest ecosystems. *Vegetatio* 41, 101-109.
- PERSSON, H. 1980:** Spatial distribution of fine- root growth, mortality and decomposition in a young Scots pine stand in central Sweden. *Oikos* 34, 77-87.
- PFEL, W. 1860:** Die deutsche Holzzucht. Leipzig.

- PIJNENBORG, W. M.; LIE, T. A.; ZEHNDER, A. J. B. 1990:** Nodulation of lucerne (*Medicago sativa* L.) in an acid soil: pH dynamics on the rhizosphere of seedlings growing in rhizotrons. *Plant and soil* 126, 161-168.
- POLOMSKI, J; KUHN, N. 1998:** Wurzelsysteme. Bern - Stuttgart - Wien, Paul Haupt Verlag.
- PUHE, J. 1994:** Die Wurzelentwicklung der Fichte (*Picea abies* [L.] Karst.) bei unterschiedlichen chemischen Bodenbedingungen. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Göttingen, Reihe A*, 108.
- RACHTEJENKO, J. N. 1952:** Die Wurzelsysteme der Baum- und Straucharten. Golesbumisdat, Moskau. Zitiert in: MELZER, E. W. 1962, Die stochastischen Beziehungen zwischen Sproß- und Wurzelsystem des Baumes. *Archiv für Forstwesen* 11 (7), 822-838.
- RAPP, C.; JENSCHKE, G. 1994:** Acid deposition and ectomycorrhizal symbiosis: Field investigations and causal relationships. In: GODBOLD, D. L. and HÜTTERMAN, A. (Hrsg.) *Effects of acid rain on forest processes*. New York, Wiley – Liss, 183-230.
- RASPE, S. 1992:** Biomasse und Mineralstoffgehalte der Wurzeln von Fichtenbeständen (*Picea abies* [L.] Karst) des Schwarzwaldes und Veränderungen nach Düngung. *Freiburger bodenkundliche Abhandlungen* 29.
- RAVEN, P. H.; EVERT, R.F.; CURTIS, H. 1988:** *Biologie der Pflanzen*. 2., verbesserte Auflage, Berlin New York, Walter de Gruyter.
- RICE, K. J.; GORDON, D. R.; HARDISON, J. L.; WELKER, J. M. 1993:** Phenotypic variation in seedlings of a 'keystone' tree species (*Quercus douglasii*): the interactive effects of acorn source and competitive environment. *Oecologia* 96 (4), 537-547.
- RÖHRIG, E. 1958:** Die Anzucht von Forstpflanzen in Nadelstreubeeten. *Schriftenreihe der forstlichen Fakultät und Mitteilungen der Niedersächsischen forstlichen Versuchsanstalt Göttingen* 22.
- RÖHRIG, E. 1966:** Die Wurzelentwicklung der Waldbäume in Abhängigkeit von den ökologischen Verhältnissen. *Forstarchiv* 37 (10), 217-229, 237-249.
- RÖHRIG, E. 1976:** Einfluß unterschiedlicher Saattiefe auf die Entwicklung von einjährigen Eichen-Sämlingen. *Der Forst- und Holzwirt* 31, 119-121.
- RÖHRIG, E.; GUSSONE, H. A. 1990:** *Waldbau, Alfred Dengler* 2. Band. Baumartenwahl, Bestandesbegründung und Bestandespflege. Hamburg und Berlin, Paul Parey Verlag.
- ROLOFF, A.; BÄRTELS, A. 1996:** *Gartenflora Bd. 1 Gehölze*. Eugen Ulmer Verlag; S. 694.
- ROLOFF, A.; RÖMER, H.-P. 1989:** Beziehungen zwischen Krone und Wurzel bei der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.). *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 160 (9/10), 200-205.

- ROTHE, A. 1997:** Einfluß des Baumartenanteils auf Durchwurzelung, Wasserhaushalt, Stoffhaushalt und Zuwachsleistung eines Fichten - Buchen - Mischbestandes am Standort Höglwald. Forstliche Forschungsberichte München 163.
- ROZSNYAY, Z. 1979:** Forstgeschichtliche Betrachtungen zur Entstehung der KRAFT'schen Baumklasse. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 150, 65-72.
- RYSAVI, T.; ROLOFF, A. 1994:** Ursachen der Vereschung in Mischbeständen und Vorschläge zu ihrer Vermeidung. Forst und Holz 49, 392-395.
- SACHS, L. 1978:** Angewandte Statistik. 5. Auflage, Berlin – Heidelberg – New York, Springer.
- SANTANTONIO, D. 1989:** Dry-matter partitioning and fine-root production in forests-new approaches to a difficult problem. In: PEREIRA J. S. and LANDSBERG J. J. (eds.), Biomass Production by fast - growing trees, 57-72.
- SATTELMACHER, B.; KLOTZ, F.; MARSCHNER, H. 1983:** Bestimmung von Wurzeloberflächen mit Hilfe von Schnellmethoden. In: BÖHM, W.; KUTSCHERA, L; LICHTENEGGER, E. (Hrsg.), Wurzelökologie und ihre Nutzenanwendung. Internationales Symposium vom 27.-29.9.1982, Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft, Gumpenstein, A-Irdning, 95-98.
- SCAMONI, A. 1950:** Waldbauliche Untersuchungen auf grundwassernahen Talsanden. Berlin.
- SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P. 1992:** Lehrbuch der Bodenkunde. 13. Auflage, Stuttgart, Ferdinand Enke Verlag.
- SCHIECHTLE, H. M. 1983:** Pflanzen als Mittel zur Bodenstabilisierung. In BÖHM, W.; KUTSCHERA, L.; LICHTENEGGER, E. (Hrsg.), Wurzelökologie und ihre Nutzenanwendung. Internationales Symposium vom 27.-29.9.1982, Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft, Gumpenstein, A-Irdning, 703-708.
- SCHLICHTER, T. M.; PLOEG, R. R. VAN DER; ULRICH, B. 1983:** A simulation model on the water uptake of a beech forest: Testing variations in root biomass and distribution. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 146, 725-735.
- SCHMALTZ, J.; MERKEL, H. 1995:** Waldbaugrundlagen. Skriptenreihe der Fachhochschule Hildesheim – Holzminden, Fachbereich Forstwirtschaft Göttingen, 5.
- SCHMID-HAAS, P.; BACHHOFEN, H. 1991:** Die Sturmgefährdung von Einzelbäumen und Beständen. Schweizerische Zeitung für Forstwesen 142, 477-504.
- SCHMIDT - VOGT, H.; GÜRTH, P. 1977:** Eigenschaften von Forstpflanzen und Kulturerfolg. II. Mitteilung; Auspflanzungsversuche mit Fichtenpflanzen verschiedener Größen und Durchmesser mit Winkel- und Lochpflanzung. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 148, 145-157.

- SCHMIDT-VOGT, H. 1966:** Wachstum und Qualität von Forstpflanzen. 2. Auflage, München – Basel – Wien, Bayerischer Landwirtschaftsverlag.
- SCHMIDT-VOGT, H. 1977:** Die Fichte, Bd I Hamburg - Berlin, Paul Parey Verlag.
- SCHMIDT-VOGT, H.; WÜTHERICH, G.; DEICHNER, P. 1987:** Untersuchungen zur Sturmstabilität von Fichten-Tannen Mischbeständen auf verschiedenen Standorten Süddeutschlands. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 158, 42-50.
- SCHMITZ, P. GROTH, A. 1984:** Vergleichende Untersuchung der Vertikalwurzelentwicklung von Traubeneichen bei unterschiedlicher Begründungsart. Albert-Ludwig-Universität Freiburg i. Br., Institut für Waldbau, Diplomarbeit, 96 S.
- SCHOBER, R. 1975:** Ertragstabeln wichtiger Baumarten. Frankfurt am Main, J. D. Sauerländer's Verlag.
- SCHÜTE, G.; TAE SU, K. 1993:** Vergleichende Wurzeluntersuchungen an Stecklingen, in vitro vermehrten Pflanzen, Direktsaaten und Sämlingen der Stiel- und Traubeneiche. In: Beiträge zur In: Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt 111, 159-212.
- SCHÜTZ, J. P. 1989:** Zum Problem der Konkurrenz in Mischbeständen. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 140 (12), 1069-1083.
- SEUFERT, G.; WÖLLMER, H; ARNDT, U; BABEL, U. 1986:** Das Rhizoskop-eine Möglichkeit zur störungsarmen Beobachtung des Wurzelraumes. Allgemeine Forstzeitschrift 41 (20), 493-493.
- SHAW, M. W. 1974:** The reproductive characteristics of oak. MORRIS, M. G.; PERRING, F. H. (eds.) "The british oak" Botanical society of the british Isles. E. W. Classey Ltd.; Faringdon, 162-181. Zitiert in: HAUSKELLER-BULLERJAHN, K. 1997, Wachstum junger Eichen unter Schirm. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, Bd. 147.
- STEEN, E. 1983:** The net stocking method for studying quantitative and qualitative variation with time of grass roots. In BÖHM, W.; KUTSCHERA, L; LICHTENEGGER, E. (Hrsg) Wurzelökologie und ihre Nutzanwendung. Internationales Symposium vom 27.-29.9.1982, Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft, Gumpenstein, A- Irndning, 63-74.
- STEINBERG, D.; FREYTAG, E. 1980:** Wurzelverteilungsmessungen nach Applikation radioaktiver Tracer. Übersichtsbeitrag. Archiv für Bodenfruchtbarkeit und Pflanzenproduktion 24, 351-358.
- STOKES; A.; GUITARD, D 1997:** Tree root response to mechanical stress. In: The biology of root formation and development. Plenum Publishing Corp., New York, Basic Life Sci., Vol. 65, 227-236.

- STONE, E. L., KALISZ, P. J. 1991:** On the maximum extent of tree roots. *For. Ecol. Manag.* 46, 59-102.
- SUTTON, R. F. 1978:** Root system development in young outplants, particularly white spruce proceedings of the root farm of planted trees Symposium, Victoria B. C., Canada-B. C. Ministry of Forests / Canadian Forestry Service, Joint Report 8, 172-185.
- SZAPPANOS, A. 1969:** Der Beleuchtungsgrad der Traubeneichenbestände und deren Auswirkung auf das Wachstum des Jungwuchses. *Az Erdészeti és Faipari Egyetem* 2, 89-104
- TOMÉ, M.; BURKHART, H. E. 1986:** Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual trees. *Forest Science* 35 (3), 816-831.
- ULRICH, B.; PIROUZPANAH, D., MURACH, D. 1984:** Beziehungen zwischen Bodenversauerung und Wurzelentwicklung von Fichten mit unterschiedlich starken Schadenssymptomen. *Forstarchiv* 55, 127-134.
- UPCHURCH, D. R.; MCMICHAEL, B. L.; TAYLOR, H. M. 1988:** Use of minirhizotrans to characterize root system orientation. *Soil Science Am. J.* 52, 319-323.
- VATER, H. 1927:** Die Bewurzelung der Kiefer, Fichte und Buche. *Tharandter Jahrbuch* 78, 65-85.
- VAVOULIDOU-THEODOROU, E.; BABEL, U. U. 1983:** Methoden zur quantitativen Bestimmung von Fichtenfeinwurzeln. *Mitteilungen der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft* 38, 783-788.
- VÖGTLE, H. 1985:** Fichtenrein- und Fichten-Buchen-Mischbestände. *Allgemeine Forstzeitschrift* 40 (36), 924.
- VOS, J.; GROENWALD, J. 1983:** Estimation of root densities by observation tubes and endoscope. *Plant and soil* 74, 295-300.
- WAGENHOFF, A. 1938:** Untersuchungen über die Entwicklungen des Wurzelsystems der Kiefer auf diluvialen Sandböden. *Zeitschrift für Forst- u. Jagdwesen* 70, 449.
- WAGENKNECHT, E. 1955:** Wurzeluntersuchungen und ihre Bedeutung für standortgerechten Waldbau. *Archiv f. Forstwesen* 4, 397-406.
- WAGENKNECHT, E.; BELITZ, G. 1959:** Die Fichte im nordostdeutschen Flachland: Anbauwürdigkeit u. waldbauliche Behandlung. Radebeul u.a., Neumann, 121 S.
- WAGNER, S. 1994:** Die Rhizoskopie-Erfahrungen mit der störungsarmen Wurzelbeobachtung. *Forst und Holz* 49 (10), 270-273.
- WALTER, H. 1962:** Grundlagen des Pflanzenlebens, Bd. I. 4. Auflage, Stuttgart.

- WEAVER, J. E. 1919:** The Ecological Relations of Roots. Carnegie Institution of Washington. Washington D. C., Publ. 286.
- WEISSEN, F.; VAN PRAAG, H. J. 1991:** Root growth inhibition effects of holoorganic moder humus layer under spruce (*Picea abies* (L) Karst.) and beech (*Fagus sylvatica* L.). Plant and Soil 135, 167-174.
- WHITELEY, G. M., DEXTER, A. R. 1984:** The behaviour of roots encountering cracks in soil. In: Plant and soil 77, 141-149.
- WIEDEMANN, E. 1927:** Der Wurzelbau älterer Waldbäume. Forstarchiv 3, 229-233.
- WIEDEMANN, E. 1942:** Die schlechtesten ostdeutschen Kiefernbestände. Berlin
- WIEDEMANN, E. 1943:** Der Vergleich der Massenleistung des Mischbestandes mit dem Reinbestand. Allgemeine Forst und Jagdzeitung 119, 123-132
- WIEDEMANN, E. 1951:** Ertragskundliche und waldbauliche Grundlagen der Forstwissenschaft. Frankfurt a. M.
- WITTICH, W. 1948:** Die heutigen Grundlagen der Holzartenwahl. 2. Auflage, Hannover, Schaper, 67 S.
- WITTKOPF, W. 1995:** Wurzelintensität im Fichten-Buchen-Mischbestand im Vergleich zum Reinbestand; Ludwig-Maximilians-Universität München, Forstwissenschaftlicher Fachbereich. Diplomarbeit.
- WÖLLMER, H. 1987:** Methodik der Rhizoskopie zur Untersuchung des Feinwurzelwachstums von Waldbäumen. Universität Hohenheim, Institut für Bodenbiologie und Standortlehre, Diplomarbeit.
- ZOON, F. C.; TIENDEREN VAN, P. H. 1990:** Aroid quantitative measurement of root length anf root branching by microcomputer image analysis. Plant and soil 126, 301-308. Zitiert in: POLOMSKI, J.; KUHN, N. 1998, Wurzelsysteme. Bern - Stuttgart, Paul Haupt Verlag, 22.
- ZOTH, R.; BLOCK, J. 1992:** Untersuchungen an Wurzelballen sturmgeworfener Bäume in Rheinland-Pfalz. Forst und Holz 47 (18), 566-571.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Klimadaten der Untersuchungsflächen (Arbeitskreis Standortkartierung der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung; 1985).....	5
Tabelle 2:	Bodenbeschreibung.....	5
Tabelle 3:	Probeflächen.....	7
Tabelle 4:	Bestandesbeschreibung Krebeck.....	9
Tabelle 5:	Bestandesbeschreibung Knesebeck.....	10
Tabelle 6:	Bestandesbeschreibung Holzminden.....	12
Tabelle 7:	Bestandesbeschreibung Kattenbühl.....	14
Tabelle 8:	Größe der Radien und Schnittebenen der gemessenen Sektionen (Abstände von der Stammbasis (Abb. 6).....	20
Tabelle 9:	Oberirdische Parameter.....	21
Tabelle 10:	Unterirdische Parameter.....	21
Tabelle 11:	Ausgleichsfunktionen zur Bestimmung der Wurzeldurchmesser in einer beliebigen Entfernung vom Wurzelstock; x = Entfernung vom Wurzelstock; y = Wurzeldurchmesser.....	26
Tabelle 12:	Nach den Ausgleichsfunktionen (Tabelle 11) berechnete Wurzellängen (mittlere Einzelwurzeln der untersuchten Bestände).....	27
Tabelle 13:	Prozentualer Wassergehalt der Krone.....	28
Tabelle 14:	Konkurrenzbeschreibende Daten; Holzerode, Buche und Fichte 55-65jährig; (HEGYI-Index, Anzahl der Konkurrenten, Baumabstand der nächsten drei Nachbarn zum Probebaum); der Stern * beschreibt die signifikanten Unterschiede (f-Test) des HEGYI-Index ($p = 0,05$) in Richtung der Pfeile.....	29
Tabelle 15:	Konkurrenzbeschreibende Daten; Krebeck, Fichte 21-41jährig; (HEGYI-Index, Baumabstand der nächsten drei Nachbarn zum Probebaum); der Stern * beschreibt die signifikanten Unterschiede (f-Test) des HEGYI-Index ($p = 0,05$) in Richtung der Pfeile.....	30
Tabelle 16:	Konkurrenzbeschreibende Daten; Knesebeck, Fichte und Kiefer, 31-50jährig; (HEGYI-Index, Baumabstand der nächsten drei Nachbarn zum Probebaum); der Stern * beschreibt die signifikanten Unterschiede (f-Test) des HEGYI-Index ($p=0,05$) in Richtung der Pfeile.....	31
Tabelle 17:	Konkurrenzbeschreibende Daten; Holzminden, 22jährige Eiche (HEGYI-Index, Baumabstand der nächsten drei Nachbarn zum Probebaum); der Stern * beschreibt die signifikanten Unterschiede (f-Test) des HEGYI-Index ($p=0,05$) in Richtung der Pfeile.....	32
Tabelle 18:	Konkurrenzbeschreibende Daten; Kattenbühl, 13jährige Eiche (HEGYI-Index, Baumabstand der nächsten drei Nachbarn zum Probebaum).....	32
Tabelle 19:	Summe der Übraggungswinkel als Maß der Konkurrenz; Holzerode, Buche und Fichte. Der Stern * beschreibt die signifikanten Unterschiede (f-Test) des Übraggungswinkels ($p = 0,05$) in Richtung der Pfeile.....	33
Tabelle 20:	Mittlere Probebaumparameter \bar{x} und Standardabweichungen (s_x); Holzerode, Fichte und Buche im Rein- und Mischbestand (55-65jährig). Der Stern*	

	beschreibt die signifikanten Unterschiede (f-Test) des Übertragungswinkels ($p = 0,05$) in Richtung der Pfeile	34
Tabelle 21:	Mittlere Probebaumparameter \bar{x} und Standardabweichungen (sx); Krebeck, 21-, 31- und 41 jährige Fichte im Reinbestand	35
Tabelle 22:	Mittlere Probebaumparameter \bar{x} und Standardabweichungen (sx); Knesebeck, 20-50 jährige Fichte und Kiefer im Reinbestand	36
Tabelle 23:	Mittlere Probebaumparameter \bar{x} und Standardabweichungen (sx); Holzminden, 22 jährige Eiche; Saat und Pflanzung. Der Stern * beschreibt die signifikanten Unterschiede (f-Test) des Übertragungswinkels ($p = 0,05$) in Richtung der Pfeile	37
Tabelle 24:	Mittlere Probebaumparameter \bar{x} und Standardabweichungen (sx); Kattenbühl, 13 jährige Eiche; Saat und Pflanzung.....	37
Tabelle 25:	Mittlere Probebaumparameter \bar{x} und Standardabweichungen (sx); Holzerode, Buche und Fichte, 55-65 jährig im Rein- und im Mischbestand	38
Tabelle 26:	Mittlere Probebaumparameter \bar{x} und Standardabweichungen (sx); Krebeck, 21-41 jährige Fichte im Reinbestand.....	39
Tabelle 27:	Mittlere Probebaumparameter \bar{x} und Standardabweichungen (sx); Knesebeck, 20-50 jährige Fichte und Kiefer im Reinbestand	40
Tabelle 28:	Mittlere Probebaumparameter \bar{x} und Standardabweichungen (sx); Holzminden, 22 jährige Eiche; Saat und Pflanzung	41
Tabelle 29:	Mittlere Probebaumparameter \bar{x} und Standardabweichungen (sx); Kattenbühl, 13 jährige Eiche; Saat und Pflanzung.....	42
Tabelle 30:	Maximale Durchmesser _(WD_{max}) ; der Wurzeln der ersten Sektion; Holzerode; 55-65 jährige Buche im Rein- und Mischbestand.....	43
Tabelle 31:	Maximale Durchmesser _(WD_{max}) ; der Wurzeln der ersten Sektion; Krebeck; 20-41 jährige Fichte im Reinbestand.....	44
Tabelle 32:	Maximale Durchmesser _(WD_{max}) ; der Wurzeln der ersten Sektion Knesebeck; Fichte und Kiefer, 20 - 50 jährig im Reinbestand.....	45
Tabelle 33:	Maximale Durchmesser _(WD_{max}) ; der Wurzeln der ersten Sektion; Holzminden, 22 jährige Eiche aus Saat und Pflanzung	47
Tabelle 34:	Maximale Durchmesser _(WD_{max}) ; der Wurzeln der ersten Sektion; Kattenbühl, Eiche 13 jährig aus Saat und Pflanzung.....	48
Tabelle 35:	Summe der Wurzelquerschnittfläche und Wurzelanzahl pro 22 jährige Eiche, differenziert nach Kraft; Holzminden (* signifikant unterschiedlich zu).....	55
Tabelle 36:	Mittlere prozentuale Verteilung der Wurzelquerschnittflächen auf die horizontalen und vertikalen Sektionen differenziert nach Kraft'schen Klassen; Holzminden, 22 jährige Eiche (HQF1+HQF2+HQF3=100 %; VQF1+VQF2+VQF3=100%)	59
Tabelle 37:	Mittlere prozentuale Verteilung der Wurzelanzahl auf die horizontalen und vertikalen Sektionen differenziert nach Kraft'schen Klassen; Holzminden, 22 jährige Eiche (HAF1+HAF2+HAF3=100 %; VAF1+VAF2+VAF3=100 %).....	59
Tabelle 38:	Mittlere prozentuale Verteilung der Wurzelquerschnittfläche (WQF) auf die horizontalen und vertikalen Sektionen; Holzerode, Krebeck, Knesebeck und Kattenbühl; Fichte, Buche, Kiefer und Eiche.....	60

Tabelle 39:	Mittlere prozentuale Verteilung der Wurzeln auf die horizontalen und vertikalen Sektionen; Holzerode, Krebeck, Knesebeck und Kattenbühl; Fichte, Buche, Kiefer und Eiche.....	61
Tabelle 40:	Mittlere Relation der horizontalen zur vertikalen Wurzelquerschnittfläche (WQF); Holzerode, Fichte und Buche im Rein- und Mischbestand.....	62
Tabelle 41:	Mittlere Relation der Horizontal- zu den Vertikalwurzeln (Anzahl); Holzerode, Fichte und Buche	62
Tabelle 42:	Mittlere Relation der horizontalen zur vertikalen Wurzelquerschnittfläche (WQF); Krebeck, Fichte im Reinbestand	63
Tabelle 43:	Mittlere Relation der Horizontal- zu Vertikalwurzel (Anzahl); Krebeck, Fichte im Reinbestand	63
Tabelle 44:	Mittlere Relation der horizontalen zur vertikalen Wurzelquerschnittfläche (WQF); Knesebeck, Fichte und Kiefer im Reinbestand.....	64
Tabelle 45:	Mittlere Relation der Horizontal- zu den Vertikalwurzeln (Anzahl); Knesebeck, Fichte und Kiefer	65
Tabelle 46:	Mittlere Relation der horizontalen zur vertikalen Wurzelquerschnittfläche (WQF) differenziert nach Kraft'schen Klassen; Holzminden, 22 jährige Eiche.....	65
Tabelle 47:	Mittlere Relation der Horizontal- zu den Vertikalwurzel (Anzahl); Holzminden, 22 jährige Eiche	66
Tabelle 48:	Mittlere Relation der Horizontal- zu den Vertikalwurzeln (Anzahl) sowie der horizontalen zur vertikalen Wurzelquerschnittfläche (WQF); Kattenbühl, 13 jährige Eiche	66
Tabelle 49:	Mittleres Horizontal-, Vertikal- und Gesamtwurzelvolumen je Baum mit Standardabweichung (sx); Holzerode, Fichte und Buche im Rein- und Mischbestand.....	67
Tabelle 50:	Mittleres Horizontal-, Vertikal- und Gesamtwurzelvolumen je Baum mit Standardabweichung (sx); Krebeck, Fichte im Reinbestand	68
Tabelle 51:	Mittleres Horizontal-, Vertikal- und Gesamtwurzelvolumen je Baum mit Standardabweichung (sx); Knesebeck; Fichte im Reinbestand.....	68
Tabelle 52:	Mittleres Horizontal-, Vertikal- und Gesamtwurzelvolumen mit Standardabweichung (sx); Knesebeck, Kiefer im Reinbestand	68
Tabelle 53:	Mittleres Horizontal-, Vertikal- und Gesamtwurzelvolumen je Baum mit Standardabweichung (sx); Holzminden, Eiche, Kraft'sche Klasse 2 (*signifikant zu).....	69
Tabelle 54:	Mittleres Horizontal-, Vertikal- und Gesamtwurzelvolumen je Baum mit Standardabweichung (sx); Holzminden, Eiche, Kraft'sche Klasse 4 (*signifikant zu).....	69
Tabelle 55:	Mittleres Horizontal-, Vertikal- und Gesamtwurzelvolumen je Baum mit Standardabweichung(sx); Kattenbühl, Eiche (*signifikant zu)	69
Tabelle 56:	Mittlere Wurzelanteile (Vol. %) pro m ³ Boden, differenziert nach Kraft'schen Klassen; Holzminden; 22 jährige Eiche	71
Tabelle 57:	Mittlere Wurzelanteile (Vol. %) pro m ³ Boden	71

Tabelle 58: Mittlere Anzahl Feinwurzeln und Standardabweichung (sx) pro Einzelwurzel eines Wurzelsystems	78
Tabelle 59: Funktionen der Beziehungen zwischen HEGY-Index (X) und Wurzelvolumen (Y).....	80
Tabelle 60: Parameter der linearen $[Y = A + B \cdot X]$ Beziehungen zwischen Wurzel (Y)- und Stammvolumen (X), getrennt nach Baumart; Fichte, Buche, Eiche. Es werden nur Regressionen mit dem Bestimmtheitsmaß (R^2) 0,5 dargestellt.....	84
Tabelle 61: Wurzelvolumen bei beispielhaft gewähltem Stammvolumen von 0,06 m ³ und 0,25 m ³ ; Krebeck, Fichte 21-, 30- und 41-jährig im Reinbestand (21-jähriger Bestand besitzt nur Bäume mit einem Stammvolumen bis 0,11 m ³)	85
Tabelle 62: Wurzelvolumen bei beispielhaft gewählten Stammvolumina von 0,06 m ³ ; und 0,3 Knesebeck, 20-, 31- und 50-jährige Fichte	86
Tabelle 63: Wurzelvolumen bei beispielhaft gewählten Stammvolumina von 0,02 m ³ und 0,07 m ³ ; Holzminden, 22-jährige Eiche	87
Tabelle 64: Beispiel einer Berechnung der Parameter eines Baumes anhand der Ausgleichsfunktionen aus Anhang V, Seiten N, 0; Holzerode, Fichte im Rein- und im Mischbestand. Eingangsgröße: BHD 27 cm (Nadelgewicht war bei der Fichte im Mischbestand nicht verfügbar, so daß an dessen Stelle der Kronenansatz berechnet wird.).....	90
Tabelle 65: Beispiel einer Berechnung von Stamm-, Kronen- und Wurzelparametern anhand der Ausgleichsfunktionen aus Anhang V, P-R; Krebeck, Fichte; Eingangsgrößen: zum einen Fichte, 1. Ertragsklasse, und zum anderen Fichte, BHD 14 cm	91
Tabelle 66: Beispiel einer Berechnung von Stamm-, Kronen- und Wurzelparametern anhand der Ausgleichsfunktionen aus Anhang V, S-W; Knesebeck, Fichte und Kiefer (20-50-jährig); Eingangsgröße BHD des Grundflächenzentralbaumes.....	92
Tabelle 67: Wurzel-, Stamm- und Kronenparameter einer 30 bzw. 31-jährigen Fichte auf Lehm und auf Sand bei einem beispielhaft gewählten BHD von 13 cm (entspricht etwa dem Grundflächenzentralstamm), Berechnung anhand der Funktionen aus Anhang V, Q und T.....	92
Tabelle 68: Beispiel einer Berechnung der Parameter einer 22-jährigen Eiche; Eingangsgrößen: BHD 7 cm und 12 cm; Holzminden	93
Tabelle 69: Beispiel einer Berechnung der Parameter; 13-jährige Eiche; BHD 6 cm und 8 cm; Kattenbühl	94
Tabelle 70: Übersicht der in der Literatur beschriebenen Methoden für Wurzeluntersuchungen (POLOMSKI und KUHN 1998)	95
Tabelle 71: Radiengrößen zur Wurzelquerschnitterfassung	97
Tabelle 72: Sproß - und Kronenparameter zweier Fichten mit einem beispielhaften Wurzelvolumen von 0,028 m ³ auf Lehm und auf Sand	108

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Lage der Untersuchungsgebiete (Untersuchungsflächen Nr. 1-19)	4
Abb. 2:	Skizze der Untersuchungsgebiete Krebeck, 21-, 30- und 41 jährige Fichte	9
Abb. 3:	Schematische Darstellung der Probeflächen Holzminden, 22jährige Eiche, Pflanzung, Saat und Verpflanzung	11
Abb. 4:	Schematische Darstellung der Probeflächen Kattenbühl, 13jährige Eiche, Saat und Pflanzung.....	13
Abb. 5:	Darstellung zur Berechnung des Übertragungswinkels (α)	17
Abb. 6:	Wurzelmeßschema	20
Abb. 7:	Erklärende Darstellung der Verhältnisbetrachtung der Horizontal- zu den Vertikalwurzeln in Anzahl (N) und Wurzelquerschnittfläche (WQF cm ²) in den drei Sektionen. Ausgewogenes Wurzelsystem wird durch eine Relation von 1:1, unausgewogenes durch z.B. 5:1 gekennzeichnet.	23
Abb. 8:	Kegelstumpf	25
Abb. 9:	Schema eines Flußdiagrammes	28
Abb. 10:	Wurzeldurchmesserverteilung (50 mm-Klassen) der Horizontal- und Vertikalwurzeln; Holzerode, 55-68jährig Buche und Fichte im Rein- und Mischbestand	44
Abb. 11:	Wurzeldurchmesserverteilung (50 m-Klassen) der Horizontal- und Vertikalwurzeln; Krebeck, 30- und 41 jährige Fichte im Reinbestand.....	45
Abb. 12:	Wurzeldurchmesserverteilung (50 mm-Klassen) der Horizontal- und Vertikalwurzeln; Knesebeck, 31 und 50 jährige Fichte im Reinbestand.....	46
Abb. 13:	Wurzeldurchmesserverteilung (50 mm-Klassen) der Horizontal- und Vertikalwurzeln; Knesebeck, 33- und 47 jährige Kiefer im Reinbestand.....	46
Abb. 14:	Wurzeldurchmesserverteilung (20 mm-Klassen) der Horizontal- und Vertikalwurzeln; Holzminden, 22 jährige Eiche aus Saat und Pflanzung.....	47
Abb. 15:	Wurzeldurchmesserverteilung (20 mm-Klassen) der Horizontal- und Vertikalwurzeln; Kattenbühl, 13 jährige Eiche aus Saat und Pflanzung.....	48
Abb. 16:	Darstellung der mittleren und maximalen Gesamttiefe und Standardabweichung; Holzerode (Fichte und Buche, im Mittel 60jährig im Misch- und Reinbestand), Krebeck (Fichte 20-41jährig, Reinbestand) und Knesebeck (Fichte und Kiefer 20-50jährig, Reinbestand)	50
Abb. 17:	Darstellung der mittleren und maximalen Gesamttiefe und Standardabweichung der 14- und 22 jährigen Eichen, Holzminden und Kattenbühl.....	51
Abb. 18:	Mittlere Summe der Wurzelquerschnittfläche und Wurzelanzahl pro Baum und Standardabweichung (1. Sektion); Holzerode, Fichte und Buche (signifikant zu)	52
Abb. 19:	Mittlere Summe der Wurzelquerschnittfläche und Wurzelanzahl pro Baum und Standardabweichung (1. Sektion); Krebeck, Fichte (signifikant zu)	53
Abb. 20:	Mittlere Summe der Wurzelquerschnittfläche und Wurzelanzahl pro Baum und Standardabweichung (1. Sektion); Knesebeck, Fichte.....	54
Abb. 21:	Summe der Wurzelquerschnittfläche und Wurzelanzahl pro Baum und Standardabweichung (1. Sektion); Knesebeck, Kiefer (signifikant zu).....	54
Abb. 22:	Summe der Wurzelquerschnittfläche und Wurzelanzahl pro Baum und Standardabweichung (1. Sektion); Holzminden, 22 jährige Eiche.....	55
Abb. 23:	Summe der Wurzelquerschnittfläche und Wurzelanzahl pro Baum und Standardabweichung (1. Sektion); Kattenbühl, 13jährige Eiche (signifikant zu)	57

Abb. 24:	Mittlere Wurzelquerschnittfläche und Wurzelanzahl der horizontalen (HQF), vertikalen (HQF) und Pfahlwurzeln (PQF) eines Wurzelsystems differenziert nach 3 Sektionen, Holzminden, Eiche, Kraft 2. Die große Anzahl der Pfahlwurzeln resultiert aus der Zergliederung der Pfahlwurzel in tieferen Bodenschichten	58
Abb. 25:	Mittleres Wurzelvolumen mit Standardabweichung (sx) differenziert nach sozialer Stellung der Bäume (signifikant zu); Krebeck und Knesebeck; Fichte und Kiefer	70
Abb. 26:	Oberfläche (dm ²) der horizontalen und vertikalen Wurzeln, Fichte, Buche und Kiefer; Holzerode, Krebeck und Knesebeck	73
Abb. 27:	Wurzeloberfläche (%), differenziert nach Wurzelrichtung (horizontal und vertikal); Fichte, Buche und Kiefer; Holzerode, Krebeck und Knesebeck	73
Abb. 28:	Absolute Verteilung der Wurzeloberfläche (dm ²) auf horizontale und vertikale Wurzeln; 13- und 22 jährige Eiche, Kattenbühl und Holzminden	74
Abb. 29:	Prozentuale Verteilung der Wurzeloberfläche auf horizontale und vertikale Wurzeln; 13- und 22 jährige Eichen, Kattenbühl und Holzminden	74
Abb. 30:	Geschätzte Anzahl Feinwurzeln pro Wurzelsystem; Holzerode (Fichte und Buche), Krebeck (Fichte) und Knesebeck (Fichte und Kiefer).....	76
Abb. 31:	Mittlere geschätzte Anzahl Feinwurzeln pro Baum, differenziert nach Kraft'schen Klassen; Holzminden, Kattenbühl; 13- und 22 jährige Eiche	77
Abb. 32:	Regression zwischen dem HEGYI – Index und dem Wurzelvolumen pro Baum am Beispiel eines 41 jährigen Fichtenbestandes	79
Abb. 33:	Beziehung zwischen Wurzelvolumen (dm ³) und Stammvolumen (m ³) auf der Grundlage von allen 262 untersuchten Bäumen (Fichte, Buche, Kiefer und Eiche 14 bis 65 jährig), ----- 95 % Vertrauensintervall (Gerade); 95 % Vertrauensintervall (Daten)	80
Abb. 34:	Durchschnittliche prozentuale Abweichung der Probestämme mit Standardabweichung (Buche, Fichte und Kiefer) von der in Abb. 33 dargestellten Ausgleichsfunktion. Positive Werte beschreiben die Abweichung der Bäume, die oberhalb der Kurve liegen. Negative stellen die Daten der Bäume dar, die sich unterhalb der Kurve befinden. Die Tabellenwerte geben die Anzahl der Bäume wieder, die ober- oder unterhalb der Kurven liegen.....	82
Abb. 35 :	Durchschnittliche prozentuale Abweichung der Probestämme (Eiche) von der in Abb. 33 dargestellten Ausgleichsfunktion mit Standardabweichung. Positive Werte beschreiben die Abweichung der Bäume, die oberhalb der Kurve liegen. Negative stellen die Daten der Bäume dar, die sich unterhalb der Kurve befinden. Die Tabellenwerte geben die Anzahl der Bäume wieder, die ober- oder unterhalb der Kurven liegen.....	83
Abb. 36:	Regression zwischen Stamm- und Wurzelvolumen; Holzerode; 55-65 jährige Fichte und Buche im Rein- und Mischbestand.....	85
Abb. 37:	Regression zwischen Stamm- und Wurzelvolumen; Krebeck, 21-, 30- und 41 jährige Fichte. (Die Geraden der 21 jährigen Fichten enden bei einem Stammvolumen von 0,11 m ³ und die des 30 jährigen bei 0,27 m ³).....	86
Abb. 38:	Regression zwischen Stamm- und Wurzelvolumen; Knesebeck, 20-, 33- und 47 jährige Fichte. (Die Geraden der 21 jährigen Fichten enden bei einem Stammvolumen von 0,06 m ³ und die der 30 jährigen bei 0,32 m ³)	87
Abb. 39:	Regression zwischen Stamm- und Wurzelvolumen; Holzminden, 22 jährige Eiche.....	88
Abb. 40:	Regression zwischen Stamm- und Wurzelvolumen; Kattenbühl, 13 jährige Eiche	88

Horizontabfolge der verschiedenen Bestände**Tabelle 1: Bodenbeschreibung der Standorte Holzerode, 55-65jährige Fichte und Buche im Rein- und Mischbestand; Pseudogley-Parabraunerde**

Standort Holzerode, Fichte, Buche im Rein- und Mischbestand								
Flächen	Horizont	Tiefe cm	Bodenart	Tonanteil %	Lagerungsdichte	Humusanteil %	Skelettanteil %	nWK
1-3	Mullartiger Moder							
	Ah/Al	10	uU	<5	gering	5		26
	Bt	40	uU	<5	mittel			75
	Sw	60	uU	<5	mittel			50
	Sd	>60	Ut4	25	mittel			80
							Summe	231
4	Ah/Al	10	Uls	8	gering	5		26
	Bt	50	Slu	12	mittel			80
	Sw	>50	Uls	15	mittel			125
								Summe

Tabelle 2: Bodenbeschreibung der Standorte Krebeck, 21-41jährige Fichte im Reinbestand; Pseudogley-Parabraunerde

Standort Krebeck; Fichte 21, 30 und 41 jährig								
Flächen	Horizont	Tiefe cm	Bodenart	Tonanteil %	Lagerungsdichte	Humusanteil %	Skelettanteil %	nWK
5-6	Moder							
	Ah/Al	10	Us	5	gering	5		26
	Bt	50	Us	5	gering	5		104
	Sw	70	lu	15	mittel			33
	Sd	>110	lt2	35	mittel			60
							Summe	223
7	Moder							
	Ah/Al	10	Us	5	gering	5		26
	Bt	40	Us	5	gering	5		78
	Sw	60	lu	15	mittel			33
	Sd	>100	lt2	35	mittel			60
							Summe	197

Tabelle 3: Bodenbeschreibung der Standorte Knesebeck, 20-50jährige Fichte und Kiefer im Reinbestand; Braunerde-Podsol

Standort Knesebeck; Fichte und Kiefer, 20-, 30- und 50 jährig								
Flächen	Horizont	Tiefe cm	Bodenart	Tonanteil %	Lagerungsdichte	Humusanteil %	Skelettanteil %	nWK K
8-9; 11	Rohhumusartiger Mull							
	Ahe	5	Sl2	6	gering	0,5		12
	Bhs	10	Sl2	6	gering	0,5		12
	Bv	50	Sl3	10	gering	-		92
	Cvll	>50	LS4	18	dicht	-		120
							Summe	236
10; 12-13	Rohhumusartiger Mull							
	Ahe	15	mS	-	gering	0,5		17
	Bh	20	mS	-	mittel	4		
	Bs	15	SL2	6	mittel	-		12

Standort Knesebeck; Fichte und Kiefer, 20-, 30- und 50 jährig								
Flächen	Horizont	Tiefe cm	Bodenart	Tonanteil %	Lagerungs- dichte	Humus- anteil %	Skelett- anteil %	nWK
	Bv	60	SI2	18	gering	-		81
	CvII	>60	mS	-	gering			34
Summe								144

Tabelle 4: Bodenbeschreibung der Standorte Holzminden, 22 jährige Eiche, Saat, Pflanzung und Verpflanzung; Pseudogley-Parabraunerde

Standort Holzminden; Eiche, 22 jährig								
Flächen	Horizont	Tiefe cm	Bodenart	Tonanteil %	Lagerungs- dichte	Humus- anteil %	Skelett- anteil %	nWK
15	F- Mull							
	Ah/Al	10	Us	10	gering	5	10	23
	Bt	60	Us	10	gering	5	10	117
	Sw	80	Us	10	mittel	5	10	45
	Cv/Sd	>80	Lt2	50	dicht	25	50	12
Summe								197
14; 16	F- Mull							
	Ah/Al	10	Us	10	gering	5	10	23
	Bt	60	Us	10	gering	5	10	117
	Sw	70	Us	10	mittel	5	10	23
	Cv/Sd	>70	Lt2	50	dicht	25	50	12
Summe								175

Tabelle 5: Bodenbeschreibung der Standorte Kattenbühl, 13 jährige Eiche, Pflanzung, SaatI und SaatII; Stagnogley

Standort Kattenbühl; Eiche, 13 jährig								
Flächen	Horizont	Tiefe cm	Bodenart	Tonanteil %	Lagerungs- dichte	Humus- anteil %	Skelett- anteil %	nWK
17	F- Mull							
	Ap	20	Ls2	20	gering	5		52
	AhSw	35	Ls2	20	mittel	5		37
	Sw	50	Ls2	25	mittel	5		34
	Sd	>50	Lt2	40	dicht			12
Summe								135
18	F- Mull							
	Ap	10	Ls2	20	gering	5		26
	AhSw	25	Ls2	20	mittel	5		37
	Sw	35	Ls2	25	mittel	5		23
	Srd	>35	Lt2	40	dicht			12
Summe								98
19	F- Mull							
	Ap	10	Ls2	20	gering	5		26
	AhSw	25	Ls2	20	mittel	5		37
	Sw	45	Ls2	25	mittel	5		46
	Srd	>45	Lt2	40	dicht			8
Summe								117

Tabelle 6: Bodenchemie der Standorte Holzerode, Fichte und Buche im Rein- und Mischbestand (55-65 jährig); Krebeck 21-41 jährig im Reinbestand; Pseudogley-Parabraunerde

Standort Holzerode										
Bestand (Nr.)	Horizont	Austauschbare Kationen (AKE) $\mu\text{mol/g}$					Elemente in Festphase mg/kg			pHKCl
		H	K	Ca	Mg	Al	C	N	P	
Buche/Buche (1)	Ol/Fh	0,0	14,8	167,5	33,7	6,2	256100	1310	864,5	3,9
	Ah/Al	6,1	2,6	25,7	8,5	31,1	60800	2900	346,5	3,4
	Bt/Sw	0,3	1,0	2,5	1,1	31,1	8200	400	548,5	3,6
	Sd	0,3	1,3	2,5	0,8	34,2	2800	300	560,2	3,5
Buche/Fichte (2)	Ol/Fh	0,0	7,7	329,8	137,3	0,0	159100	8100	593,8	6,3
	Ah	0,2	2,3	58,5	31,8	3,6	49100	2500	422,7	4,3
	Al	0,7	1,3	2,4	1,6	21,8	5900	300	202,8	3,6
	Bt/Sw	1,1	3,3	19,8	5,1	46,3	3200	300	298,6	3,4
Fichte/Fichte (3)	Ah/Al	1,4	2,0	72,1	40,8	6,7	69800	3100	275,6	3,9
	Bt/Sw	0,6	0,8	2,4	2,5	32,5	8300	400	135,0	6,1
	Sd	0,2	1,3	1,6	1,3	32,0	2000	200	215,0	3,6
Fichte/Buche(4)	Ah	0,7	1,3	2,4	1,6	21,8	5900	300	202,8	3,6
	Al	0,7	1,3	2,4	1,6	21,8	5900	300	202,8	3,6
	Bt/Sw	1,1	3,3	19,8	5,1	46,3	3200	300	298,6	3,4

Standort Krebeck										
Bestand (Nr.)	Horizont	Austauschbare Kationen (AKE) $\mu\text{mol/g}$					Elemente in Festphase mg/kg			pHKCl
		H	K	Ca	Mg	Al	C	N	P	
Fichte 21 (5)	Ol/Fh	59,3	8,3	28,4	12,2	37,8	187400	9000	673,3	2,9
	Ah/Al	28,6	3,4	9,2	4,7	60,9	133700	6000	478,0	2,9
	Bt/Sw	1,9	1,4	3,3	0,8	39,1	13300	600	151,9	3,5
Fichte 30 (6)	Ol/Fh	15,0	12,0	102,9	18,1	10,0	338800	15500	884,0	3,6
	Ah/Al	3,4	1,6	11,0	2,7	27,1	99700	2600	285,3	3,5
	Bt/Sw	1,8	1,5	2,5	1,1	31,1	8400	400	169,7	3,4
Fichte 41 (7)	Ol/Fh	13,1	8,5	88,2	15,8	15,6	214000	9700	701,4	3,6
	Ah/Al	9,1	1,3	7,9	1,9	44,5	31200	1500	238,3	3,1
	Bt/Sw	2,0	1,0	2,1	0,7	38,7	10100	500	134,0	3,4

Tabelle 7: Bodenchemie der Standorte Krebeck 21-41 jährig im Reinbestand, Pseudogley–Parabraunerde, Knesebeck, Fichte und Kiefer 20–50jährig, Braunerde-Podsol

Standort Knesebeck										
Bestand (Nr.)	Horizont	Austauschbare Kationen (AKE) $\mu\text{molc/g}$					Elemente in Festphase mg/kg			pH_{KCl}
		H	K	Ca	Mg	Al	C	N	P	
Fichte 20 (8)	Ahe	4,6	0,9	30,0	4,9	17,8	72900	3300	165,1	3,5
	Bhs/Bv	3,7	0,4	3,1	0,8	12,5	12300	500	60,8	3,4
	CvII	0,0	0,2	1,1	0,3	8,0	5200	200	56,1	4,3
Fichte 31 (9)	Ahe	3,9	0,8	6,2	2,6	48,9	59700	2100	177,9	3,4
	Bhs/Bv	0,0	0,3	1,0	0,3	17,3	12300	500	109,6	4,2
	CvII	0,0	0,2	0,6	0,2	11,1	1600	-	69,1	4,2
Fichte 50 (10)	Ahe	40,7	2,0	3,5	1,9	32,9	128199	4700	220,3	2,7
	Bh/Bs/Bv	0,0	0,2	0,7	0,3	15,6	8100	300	71,3	4,0
	CvII	0,0	0,2	0,5	0,2	10,2	4900	200	71,6	4,1
Kiefer 20 (11)	Ahe	4,6	0,9	30,0	4,9	17,8	72900	3300	165,1	3,5
	Bhs/Bv	3,7	0,4	3,1	0,8	12,5	12300	500	60,8	3,4
	CvII	0,0	0,2	1,1	0,3	8,0	5200	200	56,1	4,3
Kiefer 33 (12)	Ah/Al	1,1	0,6	14,2	2,8	48,9	58400	2000	171,3	3,6
	Bt/Sw	0,0	0,3	0,8	0,3	18,7	14000	600	102,0	4,3
	Cv/Sd	0,0	0,3	0,8	0,2	11,6	1700	0	66,8	4,3
Kiefer 47 (13)	Ahe	6,6	0,7	34,5	9,5	27,6	61800	2200	198,5	3,4
	Bh/Bs/Bv	0,0	0,3	1,6	0,5	15,6	9800	400	112,6	4,2
	CvII	0,0	0,1	0,5	0,2	3,1	1100	0	80,8	4,4

Tabelle 8: Bodenchemie des Standortes Holzminden, Eiche 22 jährig, Saat und Pflanzung, Pseudogley-Parabraunerde

Standort Holzminden										
Bestand (Nr.)	Horizont	Austauschbare Kationen (AKE) μ mol/g					Elemente in Festphase mg/kg			pH _{KCl}
		H	K	Ca	Mg	Al	C	N	P	
Ei Pflanz 24 (14)	Ah/Al	2,2	4,5	22,8	3,9	3,0	30100	2000	424,2	3,9
	Bt	0,7	2,9	24,8	2,3	29,4	20900	1200	413,4	4,0
	Sw	0,0	1,7	39,1	1,6	22,7	4600	400	145,2	4,0
	CvSd	0,0	1,0	34,5	1,9	20,5	2200	300	117,5	4,0
Ei Saat 22 (15)	Ah/Al	2,0	6,5	39,0	7,0	18,7	31300	1900	511,8	4,2
	Bt/Sw	1,2	4,9	20,5	3,5	22,2	19899	1600	978,7	4,0
	Sw/Cv	0,0	3,8	9,1	0,8	27,1	4000	400	281,2	3,7
Ei Verpfl 22 (16)	Ah/Al	0,0	7,9	86,7	7,5	0,0	35500	2300	--	6,0
	Bt/Sw	0,0	6,6	87,2	6,2	0,0	16600	1100	436,5	5,9
	CvSd	0,0	3,6	78,2	9,6	4,0	2000	300	223,3	5,0

Tabelle 9: Bodenchemie der Standorte Kattenbühl; Eiche 13 jährig, Saat und Pflanzung, Pseudogley-Parabraunerde

Standort Kattenbühl										
Bestand (Nr.)	Horizont	Austauschbare Kationen (AKE) μ mol _e /g					Elemente in Festphase mg/kg			pH _{KCl}
		H	K	Ca	Mg	Al	C	N	P	
Ei Pflanz 14 (17)	Ap	3,8	1,0	29,7	15,1	62,7	100500	4200	303,1	3,7
	Ah/Sw	5,2	1,8	16,2	5,3	104,1	100700	3900	397,5	3,5
	Sd	0,6	0,3	5,0	1,3	35,6	10100	500	117,2	3,7
Ei Saatl 12 (18)	Ap	2,6	2,5	62,2	9,6	39,6	187700	7900	324,0	4,0
	Ah/Sw	7,9	3,5	59,2	3,8	100,1	307600	12600	529,2	3,8
	Sw	0,0	0,4	9,6	1,2	47,6	27400	900	175,6	3,7
Ei Saat II 12 (19)	Ap	4,5	2,8	48,2	7,2	72,9	166700	7700	423,1	4,1
	Ah/Sw	6,4	2,0	17,0	1,3	129,0	156200	7300	465,4	3,6
	Srd	0,0	0,5	7,1	1,5	57,8	30700	1100	167,6	3,9

Holzerode

Buche: N = 10
Buche / Fichte. N = 12

Fichte: N = 10
Fichte / Buche: N = 11

Krebeck

Fichte 21 jährig: N = 15

Fichte 30 jährig: N = 15

Knesebeck

Fichte 20 jährig: N = 11

Kiefer 20 jährig: N = 11

Fichte 31 jährig: N = 16

Kiefer 33 jährig: N = 16

Fichte 50 jährig: N = 15

Kiefer 47 jährig: N = 15

Holzminden	Kattenbühl
------------	------------

Eiche Pflanzung: N = 14

Eiche Pflanzung: N = 16

Eiche Saat: N = 14

Eiche Saat: N = 15

Eiche Verpflanzung: N = 6

Eiche Saat II: N = 15

Tabelle 10: Formelübersicht**Ausformungskoeffizient eines
Wurzelsystems (Anzahl)**

$$\frac{HN_i}{VN_i}$$

HN_i = horizontale Wurzelanzahl der i'ten
Sektion

VN_i = vertikale Wurzelanzahl der i'ten
Sektion

**Ausformungskoeffizient eines
Wurzelsystems (WQF)**

$$WQF = \frac{HQF_i}{VQF_i}$$

HQF_i = horizontale Querschnittsfläche der
i'ten Sektion

VQF_i = vertikale Querschnittsfläche der i'ten
Sektion

Feinwurzeln pro Einzelwurzel

$$\frac{FW}{WA_i}$$

Feinwurzeln pro Wurzelsystem

$$\sum_{i=1}^N \frac{FW}{WA_i}$$

mit $N = N_{WA}$

**Berechnung der Anzahl der Konkurrenten
eines Probebaumes zur Anwendung
des Hegyi Indexes (1974)**

$$D_t < \frac{BHD_p + BHD_n}{8}$$

D_t = Abstand des Probebaumes zum
Nachbarn

BHD_p = BHD des Probebaumes p [cm]

BHD_n = BHD des Nachbarbaumes n [cm]

HEGYI-Index (HEGYI 1974)

$$C_{ii} = \sum_{j=1}^n \frac{(BHD_j / BHD_i)}{D_{ij}}$$

BHD_j = BHD des Probebaumes i [cm]

BHD_i = BHD des Konkurrenzbaumes j [cm]

D = Abstand des Probebaumes zum
Nachbarn j [m]

N = Anzahl der Konkurrenzbäume

**horizontale Wurzelquerschnittfläche (HQF_i)
der durchschnittlichen Einzelwurzel**

$$HQF_i = \frac{\sum_{j=1}^n HQF_j}{n}$$

HQF_i=horizontale WQF der EW

n = Anzahl der horizontalen Einzelwurzeln
pro Wurzelsystem

**horizontale Wurzelquerschnittfläche eines
Baumes (HQF_i)**

$$HQF_i = \sum_{j=1}^n HQF_j$$

**horizontaler Prozentanteil (WQF) der 1.- 3.
Sektion an der gesamten WQF
(1. Sektion + 2. Sektion + 3.Sektion)**

$$HQF_j[\%] = 100 * \frac{HQF_i}{\sum_{i=1}^3 HQF_i}$$

HQF_i = horizontale Querschnittsfläche der
i'ten Sektion

Kronenschirmfläche

$$K_f = \delta * r^2$$

K_f = Kronenschirmfläche

d = durchschnittlicher Kronendurchmesser

maximale Wurzeldurchmesser

$$WD_{\max}$$

maximale Wurzeltiefe

$$WT_{\max}$$

mittlere Wurzeltiefe

$$WT = \frac{\sum_{i=1}^N WT_i}{N}$$

WT = Wurzeltiefe

N = Anzahl der Wurzeltiefen

Stammvolumen (V_{st})

$$V_{st} = \sum_{i=1}^n (G_m * l_i)$$

G_m = Mittengrundfläche des zu
berechnenden Körpers

l_i = Länge des zu berechnenden Körpers

Überragungswinkel

$$\tan \alpha = \frac{H_K - H_Z}{D}$$

D = Baumabstand

 α = Überragungswinkel H_K = Höhe des Konkurrenten H_Z = Höhe des Zentralbaumes**vertikale Wurzelquerschnittfläche (VQF_i)
der durchschnittlichen Einzelwurzel**

$$VQF_i = \frac{\sum_{j=1}^n VQF_j}{n}$$

VQF_i = vertikale WQF der EWn = Anzahl der vertikalen Einzelwurzeln
pro Wurzelsystem**vertikale Wurzelquerschnittfläche des
Wurzelsystems (VQF_i) (1., 2., oder 3.
Sektion)**

$$VQF_i = \sum_{j=1}^n VQF_j$$

VQF_i = Summe der vertikalen
Wurzelquerschnittflächen**vertikaler Prozentanteil (WQF_j) der 1.-3.
Sektion an der gesamten WQF_j (1.
Sektion + 2. Sektion + 3. Sektion)**

$$VQF_j[\%] = 100 * \frac{VQF_i}{\sum_{i=1}^3 VQF_i}$$

VQF_i = horizontale Querschnittsfläche der
i'ten Sektion**Wurzeloberfläche (W_m)**

$$W_m = \pi * s * (R_o + r_u) + \pi * r_u^2 + R * d_o^2$$

W_m = Wurzeloberfläche

s = Wurzelmantellinie

R_o = oberer Durchmesserr_u = unterer Durchmesser**Wurzelquerschnittfläche der Einzelwurzel
(WQF_{EW})**

$$WQF_{EW} = \left(\frac{d_1}{2} * \frac{d_2}{2} \right) * P$$

d₁ = Durchmesser 1. Klappungd₂ = Durchmesser 2. Klappung**Wurzelvolumen (V_w)**

$$V_w = \frac{l * (G_u + 4 * G_m + G_o)}{6}$$

l = Länge des Wurzelabschnittes

g_u = untere Grundflächeg_m = mittlere Grundflächeg_o = obere Grundfläche

Tabelle 11: Ertragskundliche Daten, differenziert nach Kraft'schen Klassen; Mittelwerte mit Standardabweichung(Sx); Holzerode

		Buche	Buche / Fichte	Fichte	Fichte / Buche
Kraft 1	BHD (cm)		34,5		34,3(5,1)
	Höhe (m)		21		27,8(0,1)
	H/D-Wert		60,9		81,7(12,4)
	Stammvolumen (m³)		0,1		1,1(0,1)
	Probebaumanzahl (n)		1		2
	Alter (Jahre)		60		71,5(0,7)
Kraft 2	BHD (cm)	22,3(2,5)	21,5(1,4)	27,8(2,9)	32,1(1,9)
	Höhe (m)	25,6(0,8)	23,5(0,2)	28,0(2,7)	25,2(0,5)
	H/D-Wert	116,5(16,0)	109,5(7,2)	100,8(2,2)	78,7(4,2)
	Stammvolumen (m³)	0,5(0,1)	0,3(0,2)		0,9(0,1)
	Probebaumanzahl (n)	4	2	10	4
	Alter (Jahre)	61,3(3,3)	57,5(3,5)	55,4(1,2)	65,8(1,7)
Kraft 3	BHD (cm)	20,6(2,7)	20,3(3,2)		25,0(5,3)
	Höhe (m)	24,3(1,5)	21,9(2,9)		23,5(1,3)
	H/D-Wert	119,4(11,4)	109,1(16,1)		96,3(16,6)
	Stammvolumen (m³)	0,4(0,1)	0,4(0,1)		0,6(0,2)
	Probebaumanzahl (n)	6	9		3
	Alter (Jahre)	58,4(5,5)	61,3(7,2)		63 (9,9)
Kraft 4	BHD (cm)				17,5(2,8)
	Höhe (m)				19,3(2,2)
	H/D-Wert				110,9(5,2)
	Stammvolumen (m³)				0,2(0,1)
	Probebaumanzahl (n)				2
	Alter (Jahre)				61(9,9)

Tabelle 12: Kronenparameter, differenziert nach Kraft'schen Klassen; Mittelwerte mit Standardabweichung(Sx); Holzerode

	Kraft 1	Buche	Buche / Fichte	Fichte	Fichte / Buche
Kraft 1	TG Krone (kg)		97,4		57,1(10,0)
	Kronenansatz (m)		7,7		18,5(1,0)
	Kronenlänge (m)		13,3		9,2(0,9)
	Kronenprozent (%)		63,3		33,3(3,3)
	Kronenfläche (m²)		44,9		11,9(9,7)
Kraft 2	TG Krone (kg)	17,3(7,8)	53,9(18,4)	56,6(19,7)	49,0(17,5)
	Kronenansatz (m)	16,8(3,3)	8,6(2,7)	14,5(1,3)	17,1(1,44)
	Kronenlänge (m)	8,8(2,3)	14,9(2,7)	13,5(3,0)	8,0(1,7)
	Kronenprozent (%)	34,5(11,9)	63,4(11,4)	47,8(6,2)	31,9(6,3)
	Kronenfläche (m²)	15,0(7,4)	45,5(7,8)	9,4(2,2)	8,7(1,0)
Kraft 3	TG Krone (kg)	19,2(7,1)	29,3(10,6)		44,2(14,0)
	Kronenansatz (m)	13,9(2,3)	8,9(4,1)		15,4(1,03)
	Kronenlänge (m)	10,4(2,2)	12,9(2,6)		8,1(0,5)
	Kronenprozent (%)	42,8(8,5)	60,2(15,3)		34,4(1,7)
	Kronenfläche (m²)	17,4(7,3)	43,2(21,7)		12,4(1,2)
Kraft 4	TG Krone (kg)				15,77(4,94)
	Kronenansatz (m)				12,98(4,49)
	Kronenlänge (m)				6,35(2,3)
	Kronenprozent (%)				33,76(15,6)
	Kronenfläche (m²)				13,41(2,6)

TG = Trockengewicht

Holzerode, Fichte im Reinbestand

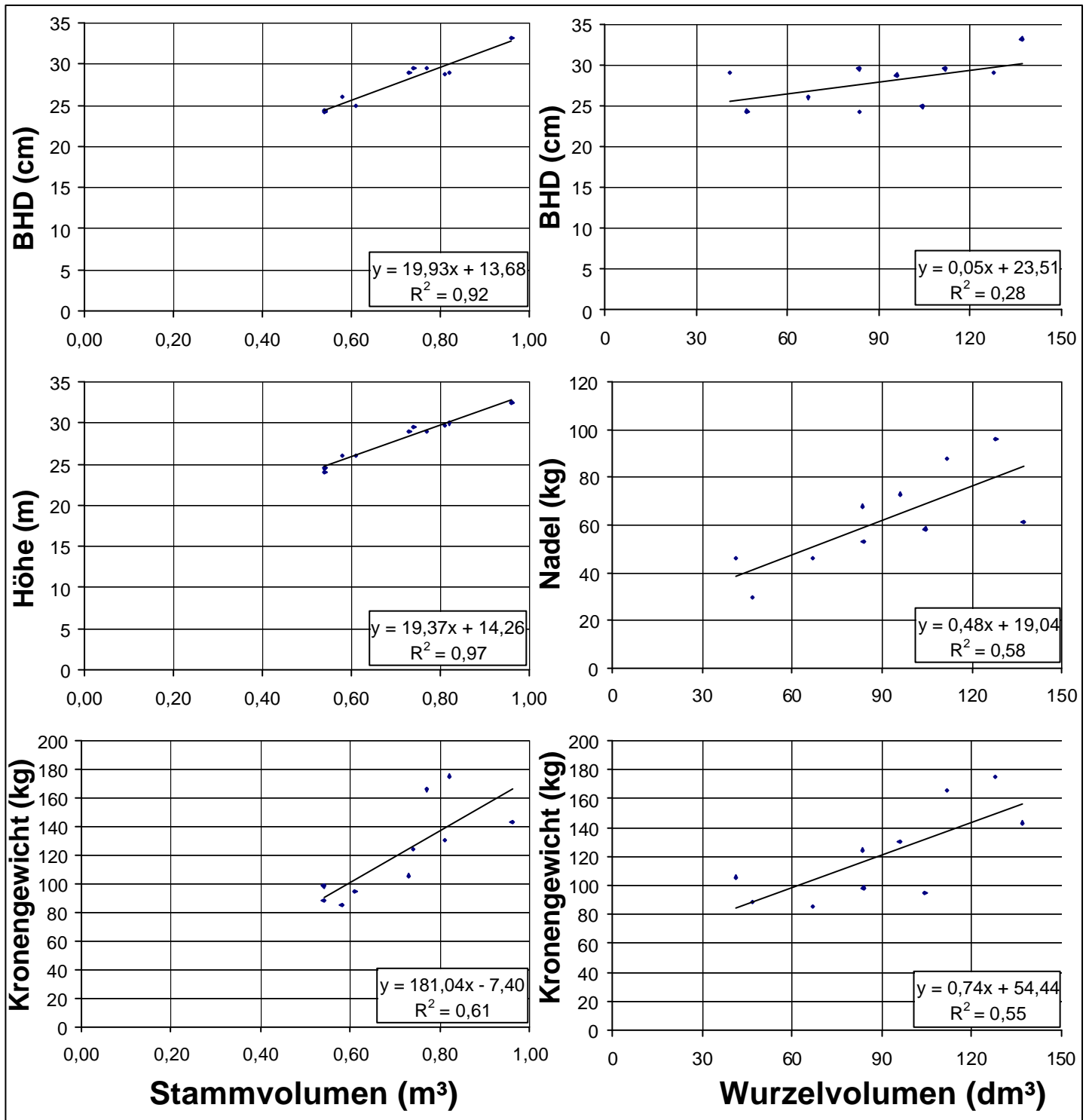


Diagramm 1: Beziehungen zwischen Stamm-, Kronen- und Wurzelparametern; Holzerode, Fichte im Reinbestand (durchschnittlich 55-jährig). Kronenansatz und -Gewicht (im Frischezustand).

Holzerode, Fichte im Mischbestand

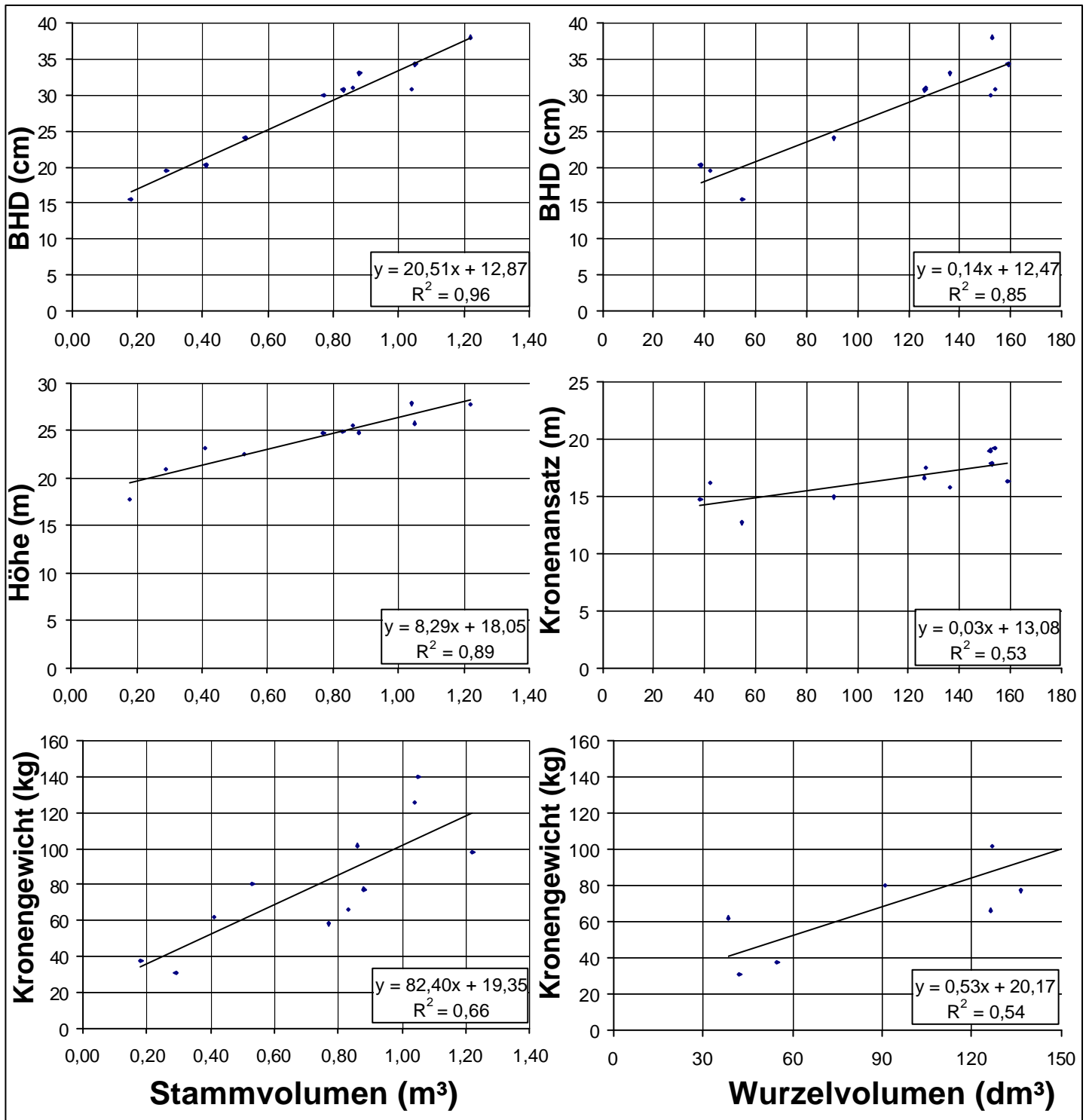


Diagramm 2: Beziehungen zwischen Stamm-, Kronen- und Wurzelparametern; Holzerode, Fichte im Mischbestand (durchschnittlich 65 jährig). Nadel/Blatt- und Kronengewicht (im Frischezustand).

Krebeck, Fichte 21 jährig

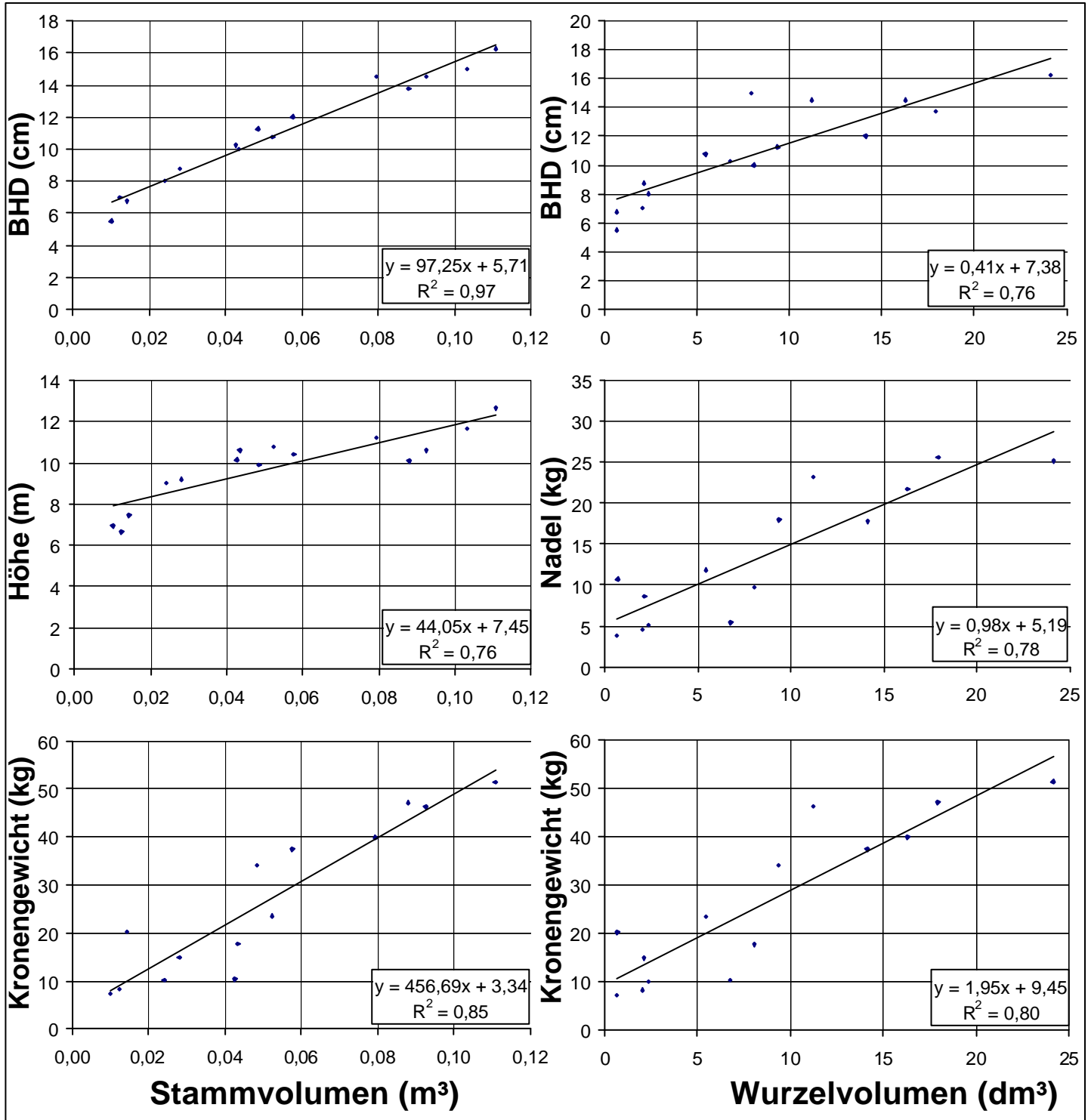


Diagramm 3: Beziehungen zwischen Stamm-, Kronen- und Wurzelparametern; Krebeck, Fichte 21 jährig, Nadel/Blatt- und Kronengewicht (im Frischezustand).

Krebeck, Fichte 30 jährig

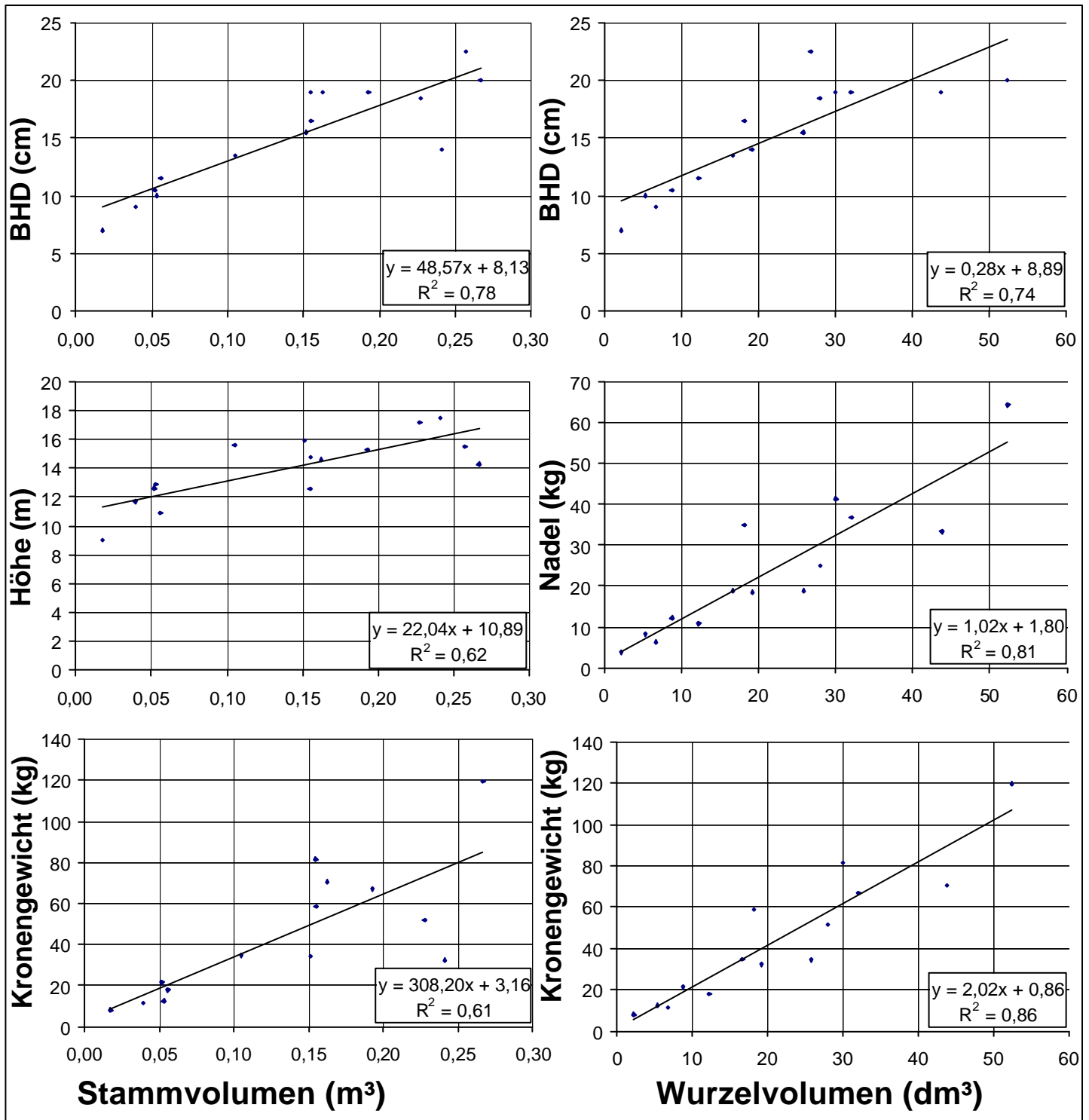


Diagramm 4: Beziehungen zwischen Stamm-, Kronen- und Wurzelparametern; Krebeck, Fichte 30 jährig, Nadel/Blatt- und Kronengewicht (im Frischezustand).

Krebeck, Fichte 41 jährig

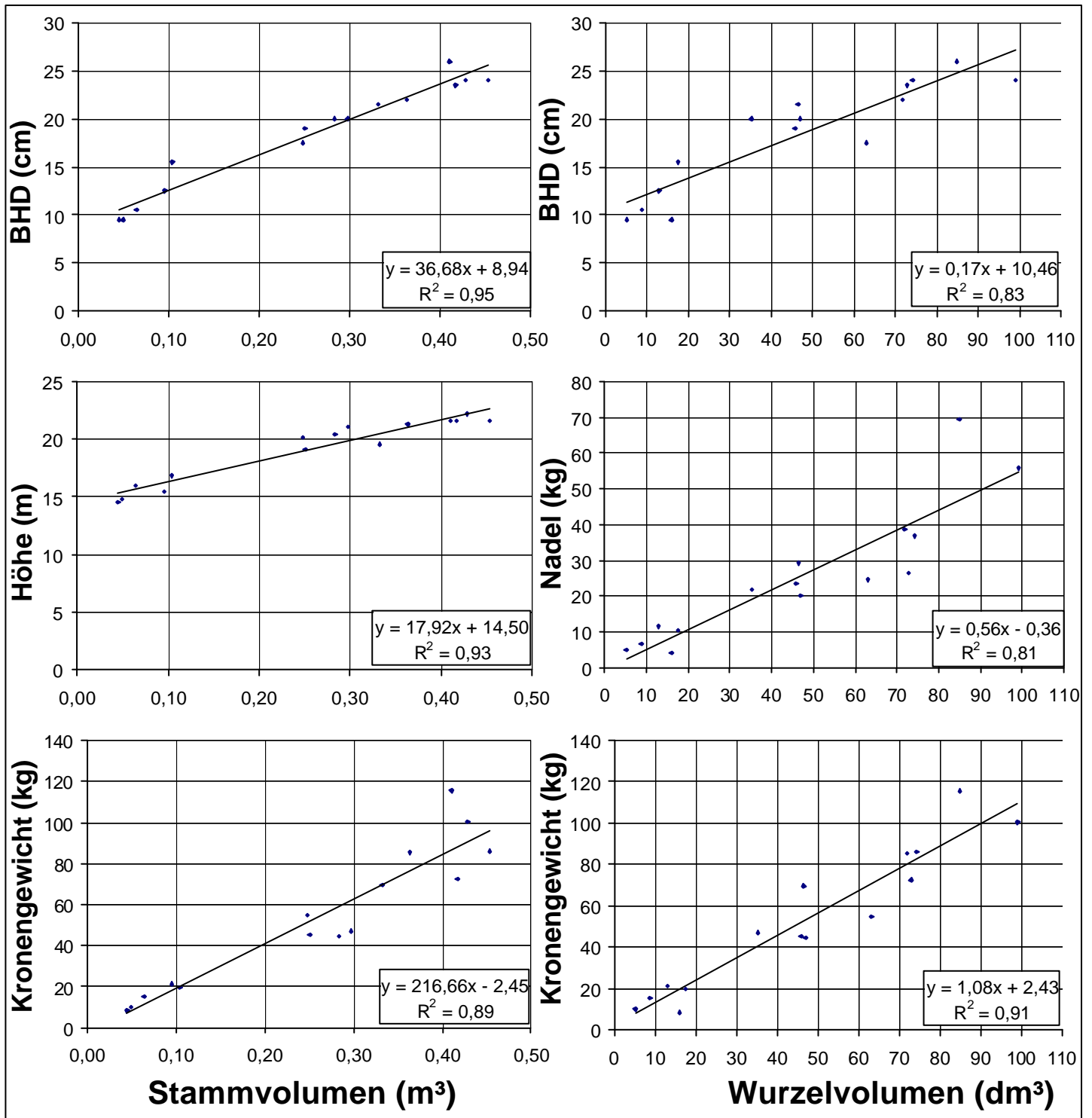


Diagramm 5: Beziehungen zwischen Stamm-, Kronen- und Wurzelparametern; Krebeck, Fichte 41 jährig, Nadel/Blatt- und Kronengewicht (im Frischezustand).

Knesebeck, Fichte 20 jährig

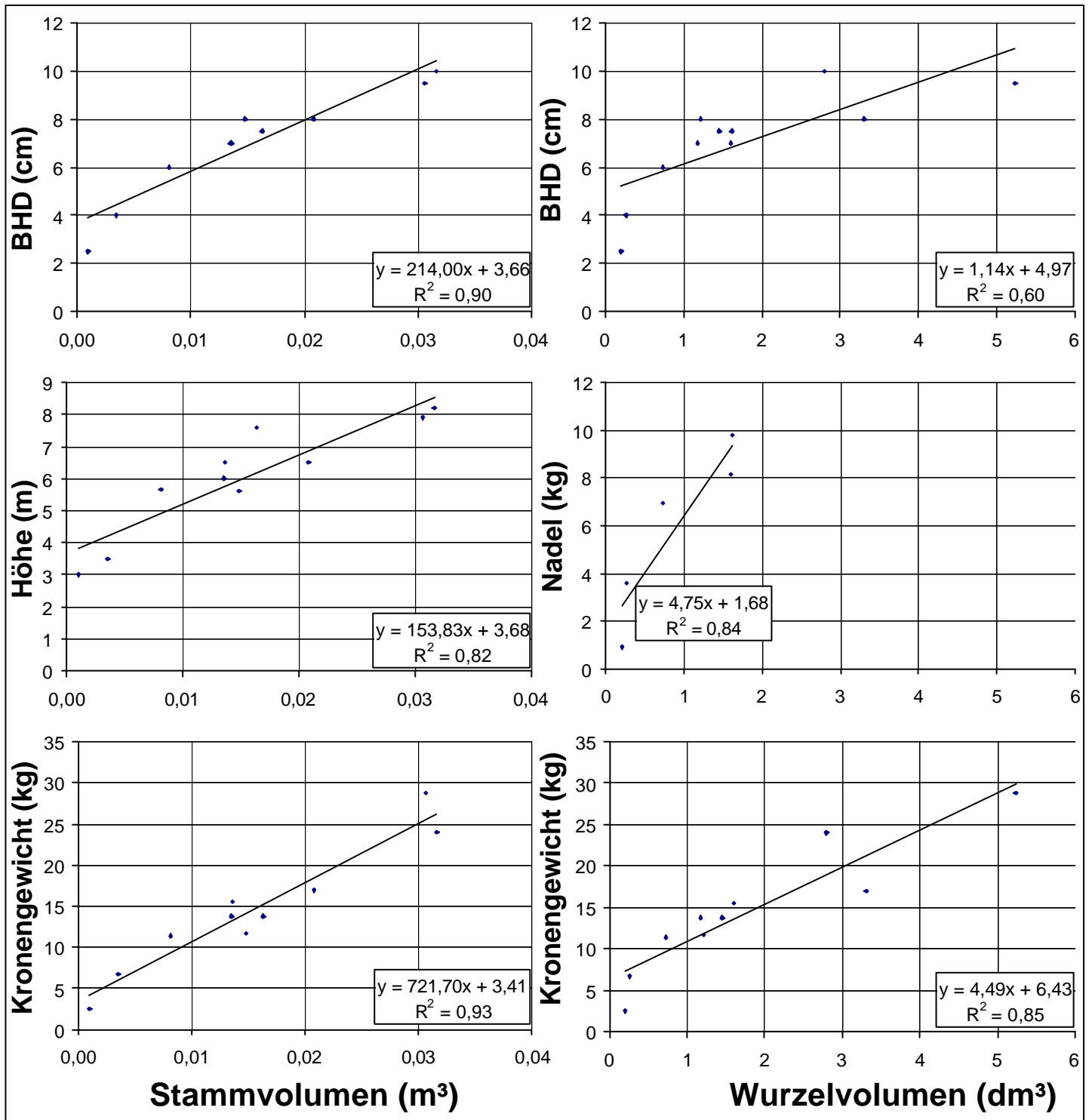


Diagramm 6: Beziehungen zwischen Stamm-, Kronen- und Wurzelparametern; Knesebeck, Fichte 20 jährig, Nadel/Blatt- und Kronengewicht (im Frischezustand).

Knesebeck, Fichte 31 jährig

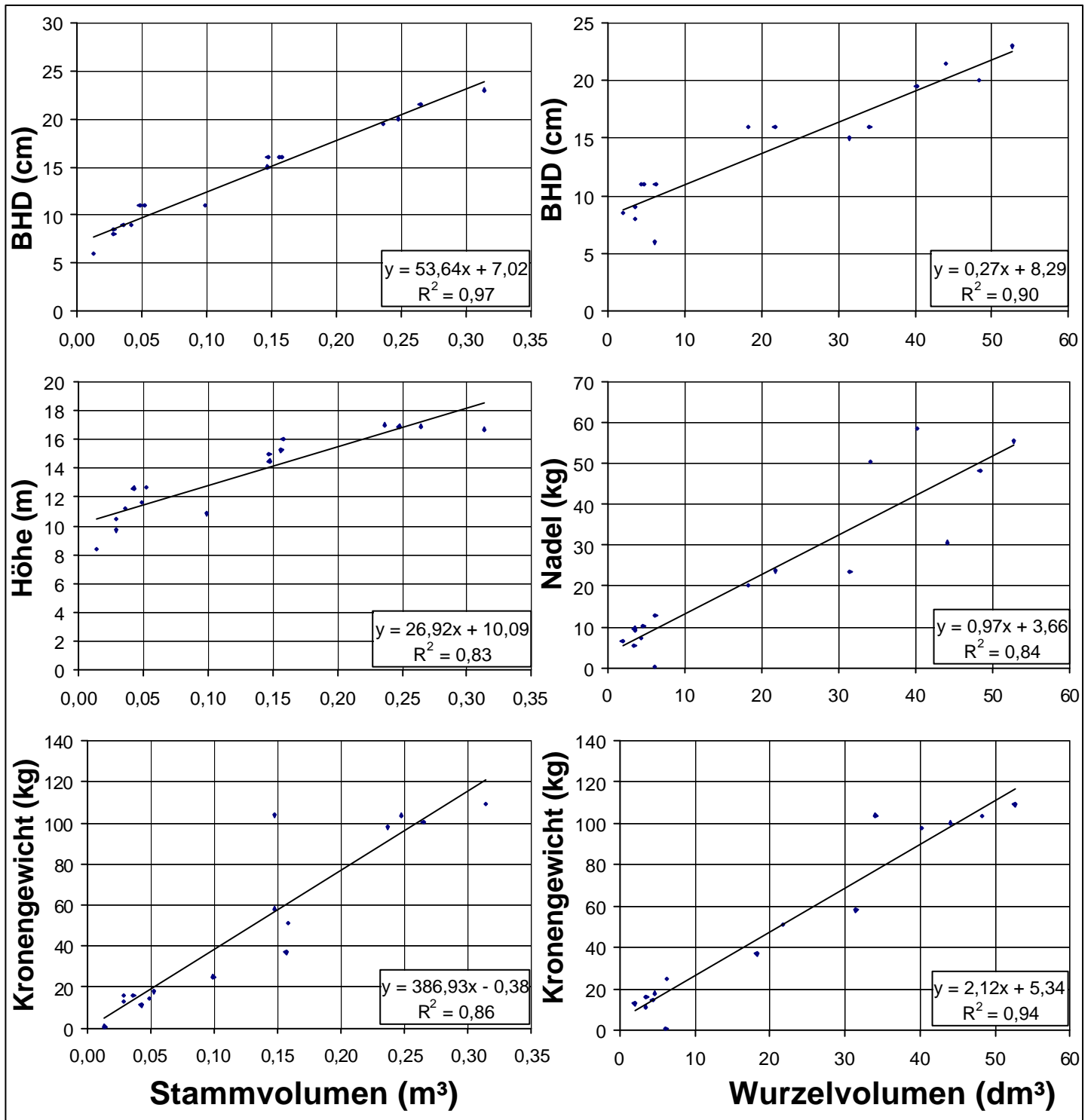


Diagramm 7: Beziehungen zwischen Stamm -, Kronen- und Wurzelparametern; Knesebeck, Fichte 31 jährig, Nadel/Blatt- und Kronengewicht (im Frischezustand).

Knesebeck, Fichte 50 jährig

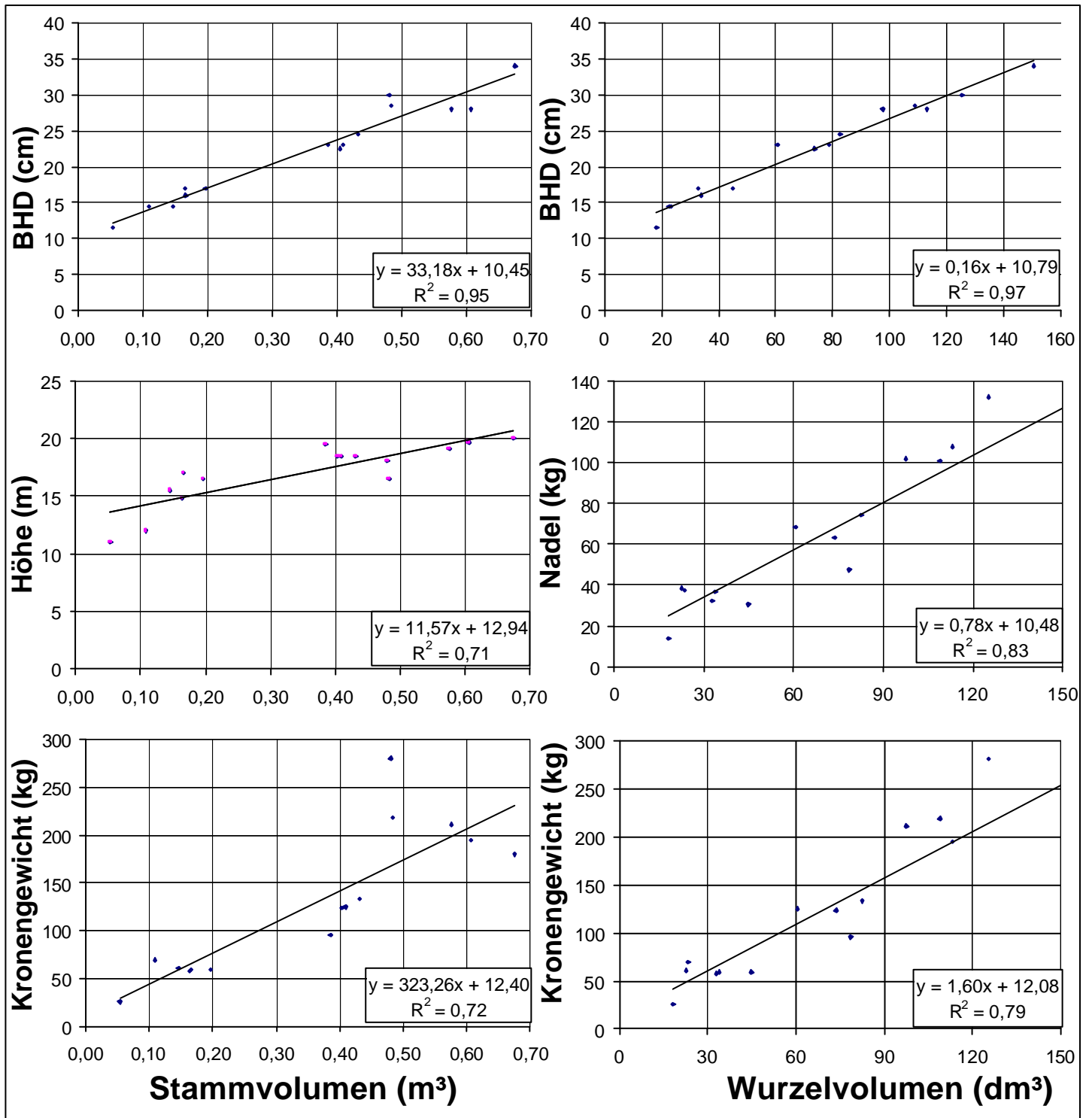


Diagramm 8: Beziehungen zwischen Stamm -, Kronen- und Wurzelparametern; Knesebeck, Fichte 50 jährig. Nadel/Blatt- und Kronengewicht (im Frischezustand).

Knesebeck, Kiefer 20 jährig

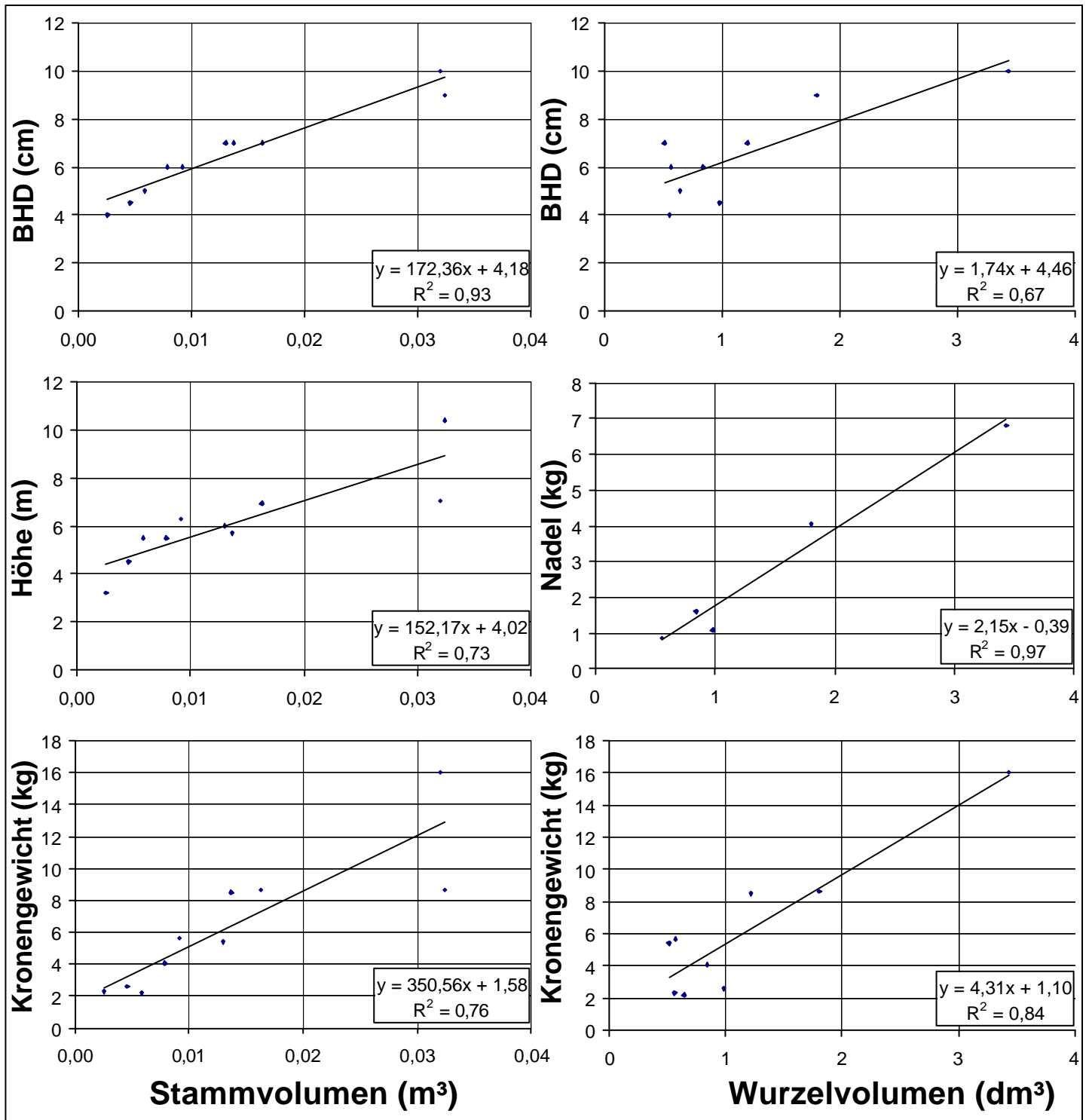


Diagramm 9: Beziehungen zwischen Stamm -, Kronen- und Wurzelparametern; Knesebeck, Kiefer 20jährig. Nadel/Blatt- und Kronengewicht (im Frischezustand).

Knesebeck, Kiefer 33 jährig

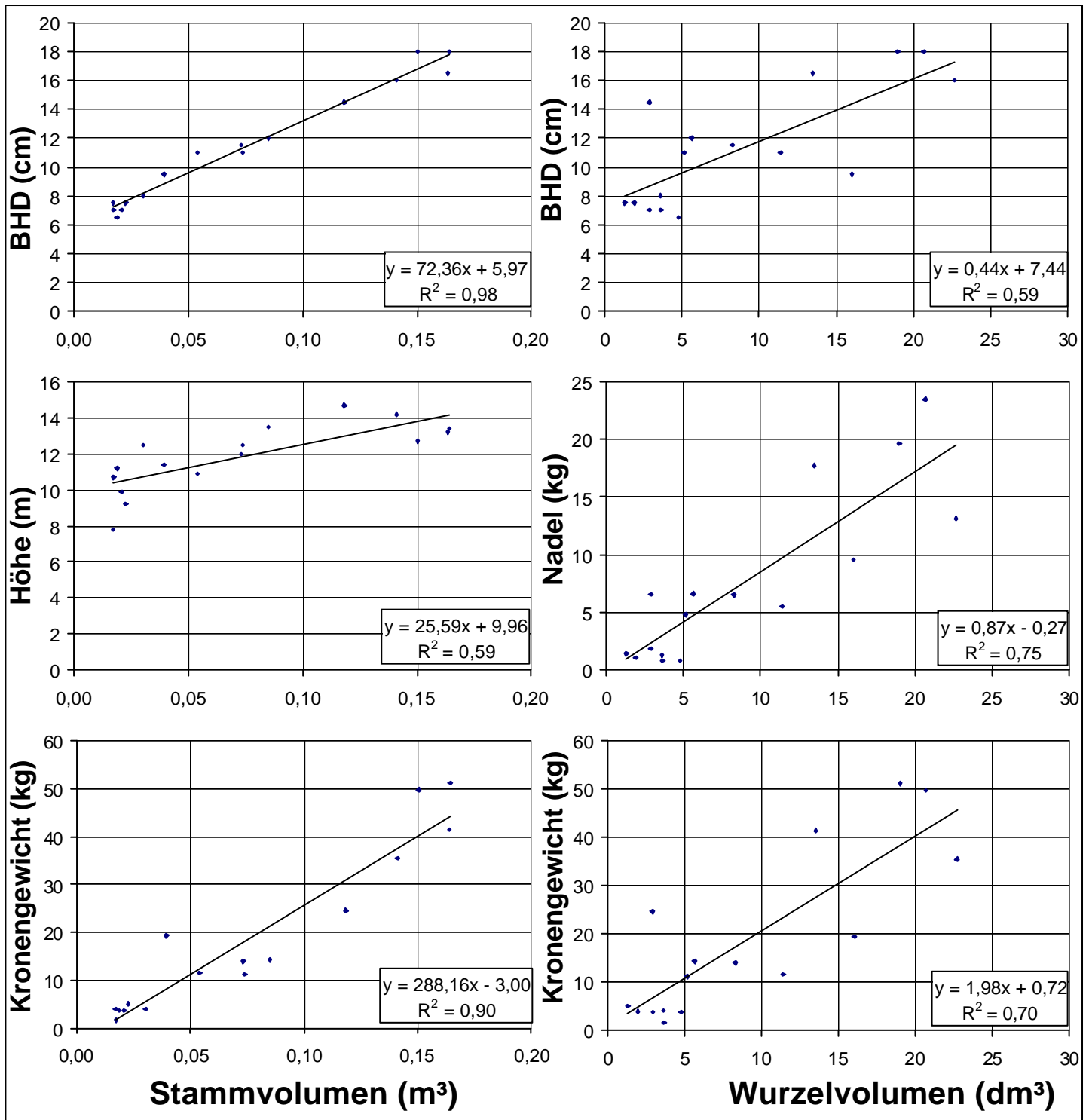


Diagramm 10: Beziehungen zwischen Stamm -, Kronen- und Wurzelparametern; Knesebeck, Kiefer 33 jährig, Nadel/Blatt- und Kronengewicht (im Frischezustand).

Holzminden, Eiche Pflanzung 22 jährig

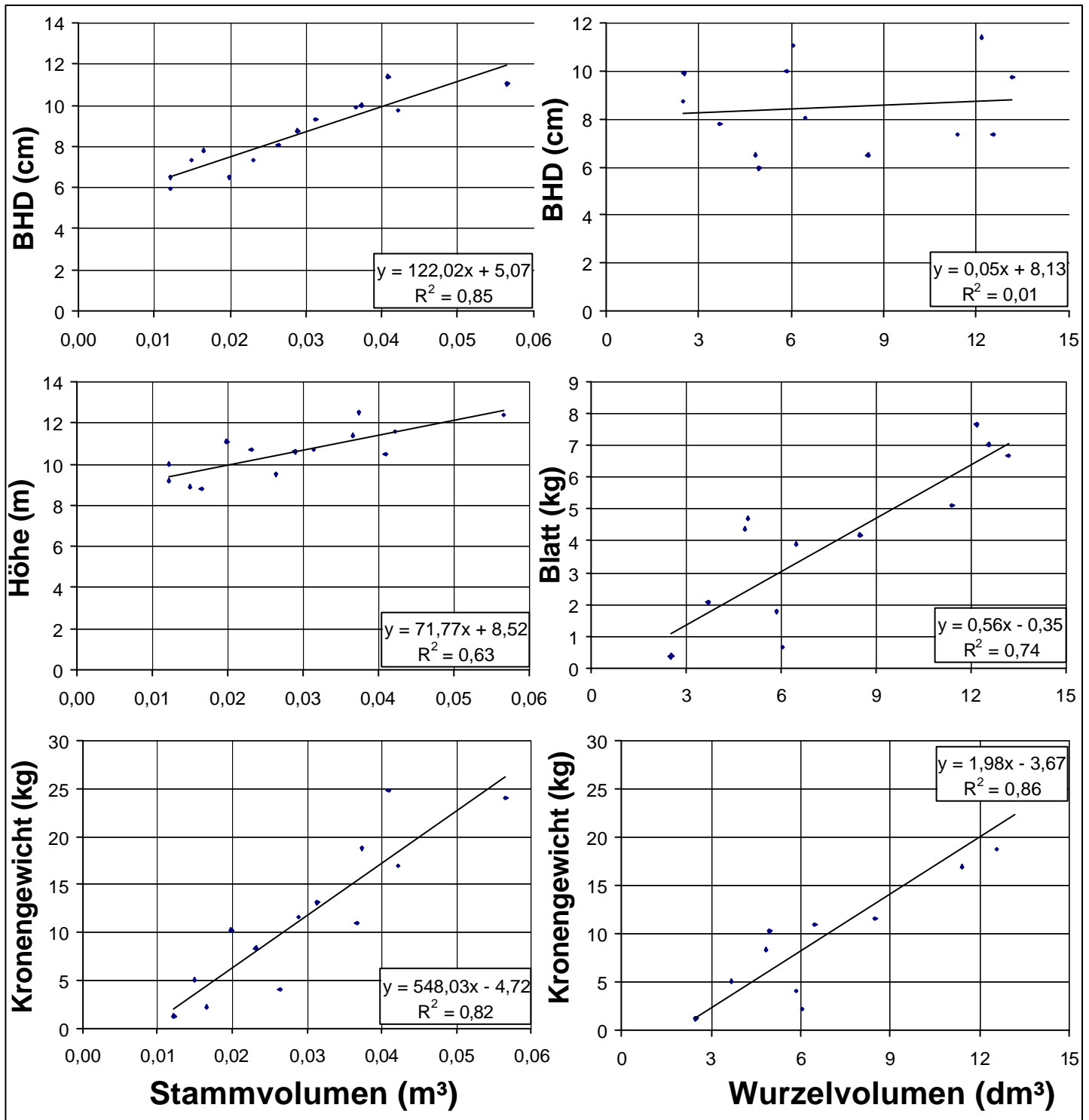


Diagramm 11: Beziehungen zwischen Stamm- Wurzel- und Kronenparametern; Holzminden, Eiche, Pflanzung 22 jährig, Nadel/Blatt- und Kronengewicht (im Frischezustand).

Holzminden, Eiche Saat 22 jährig

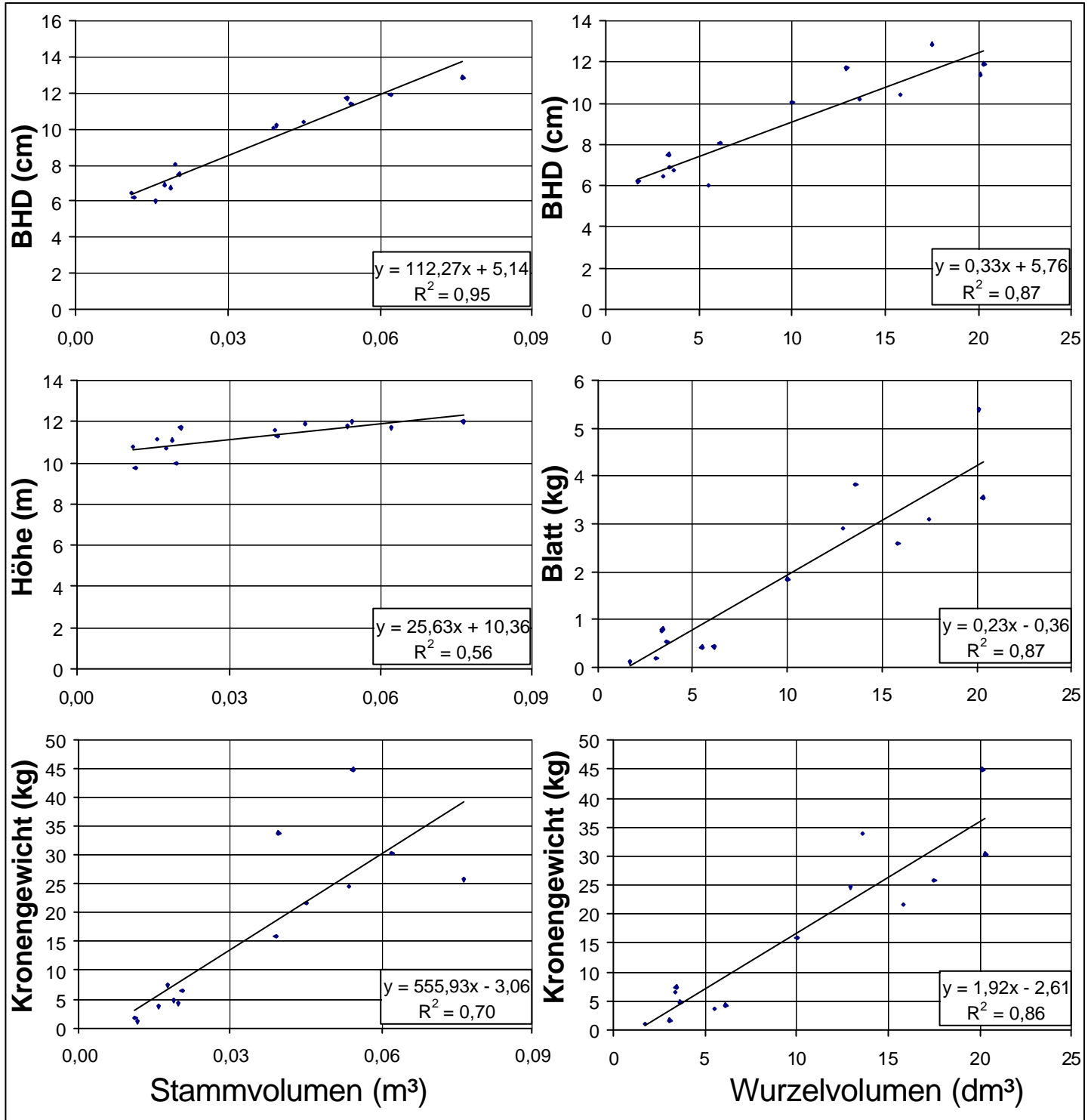


Diagramm 12: Beziehungen zwischen Stamm- Wurzel- und Kronenparametern; Holzminden, Eiche, Saat 22 jährig, Nadel/Blatt- und Kronengewicht (im Frischezustand).

Kattenbühl, Eiche Pflanzung 13 jährig

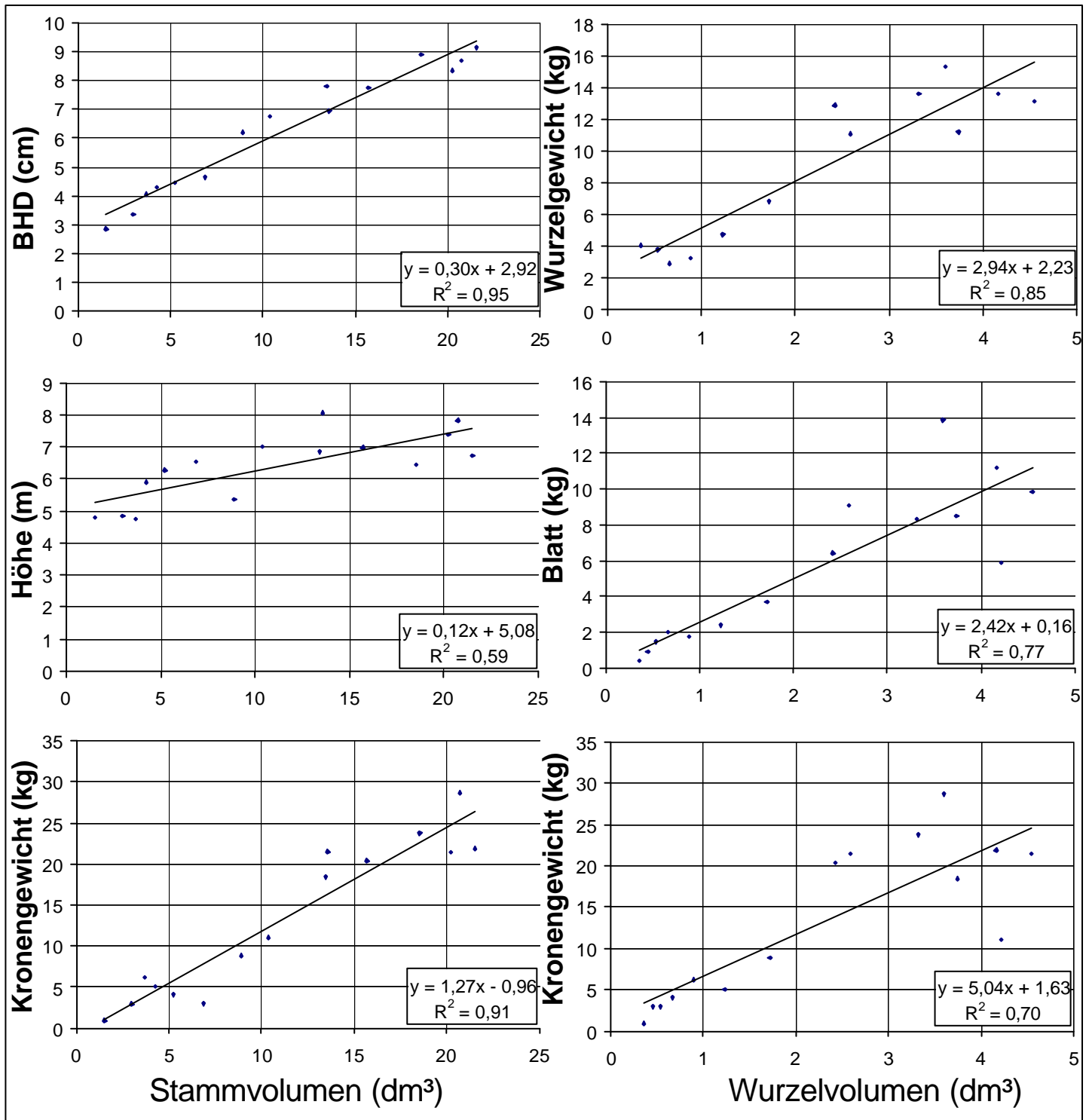


Diagramm 13 : Beziehungen zwischen Stamm- Wurzel- und Kronenparametern; Kattenbühl, Eiche, Pflanzung 13 jährig, Nadel/Blatt- und Kronengewicht (im Frischezustand).

Kattenbühl, Eiche Saat I 13 jährig

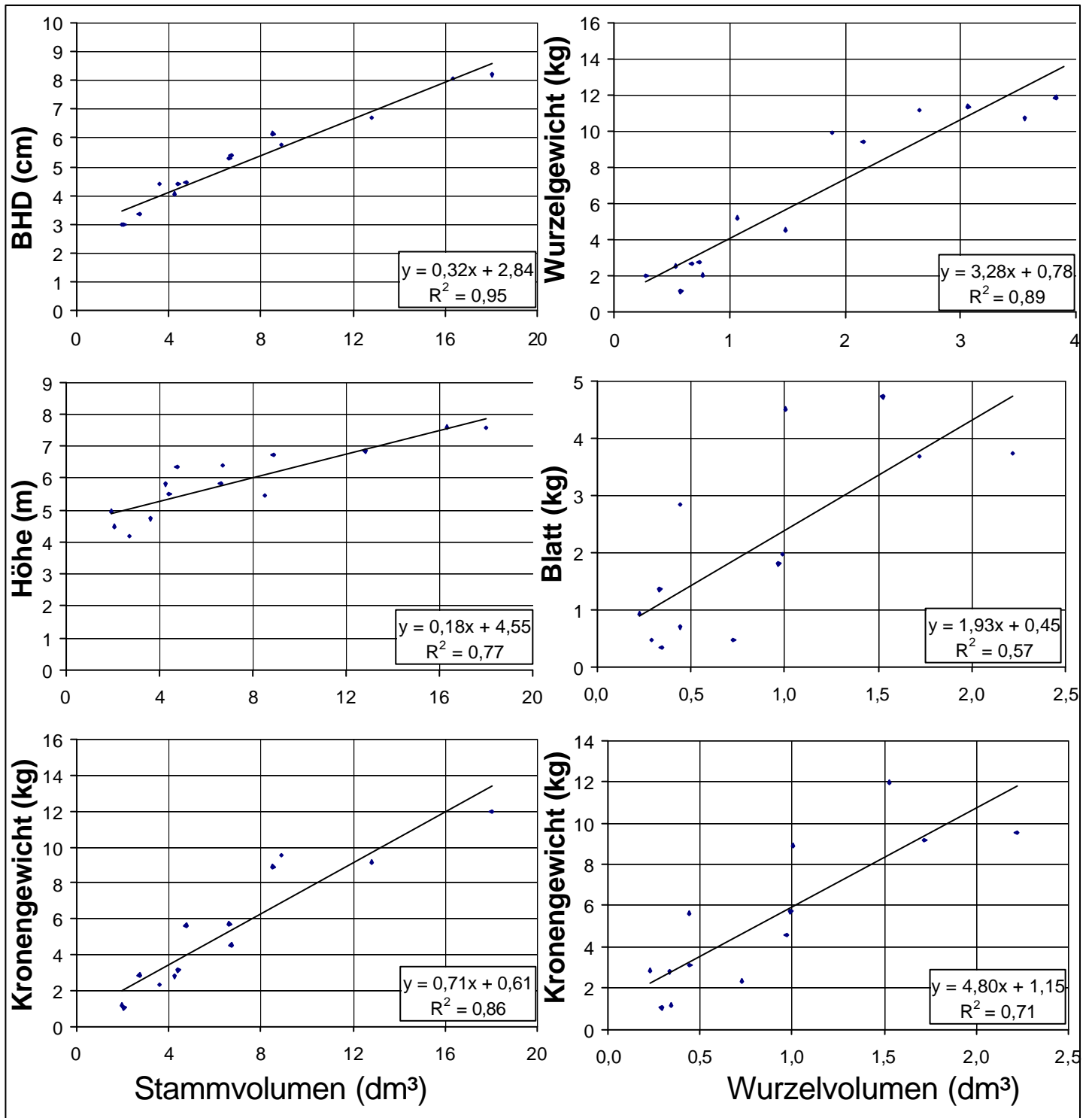


Diagramm 14: Beziehungen zwischen Stamm- Wurzel- und Kronenparametern; Kattenbühl, Eiche, Saat I 13 jährig, Nadel/Blatt- und Kronengewicht (im Frischezustand).

Kattenbühl, Eiche Saat II 13 jährig

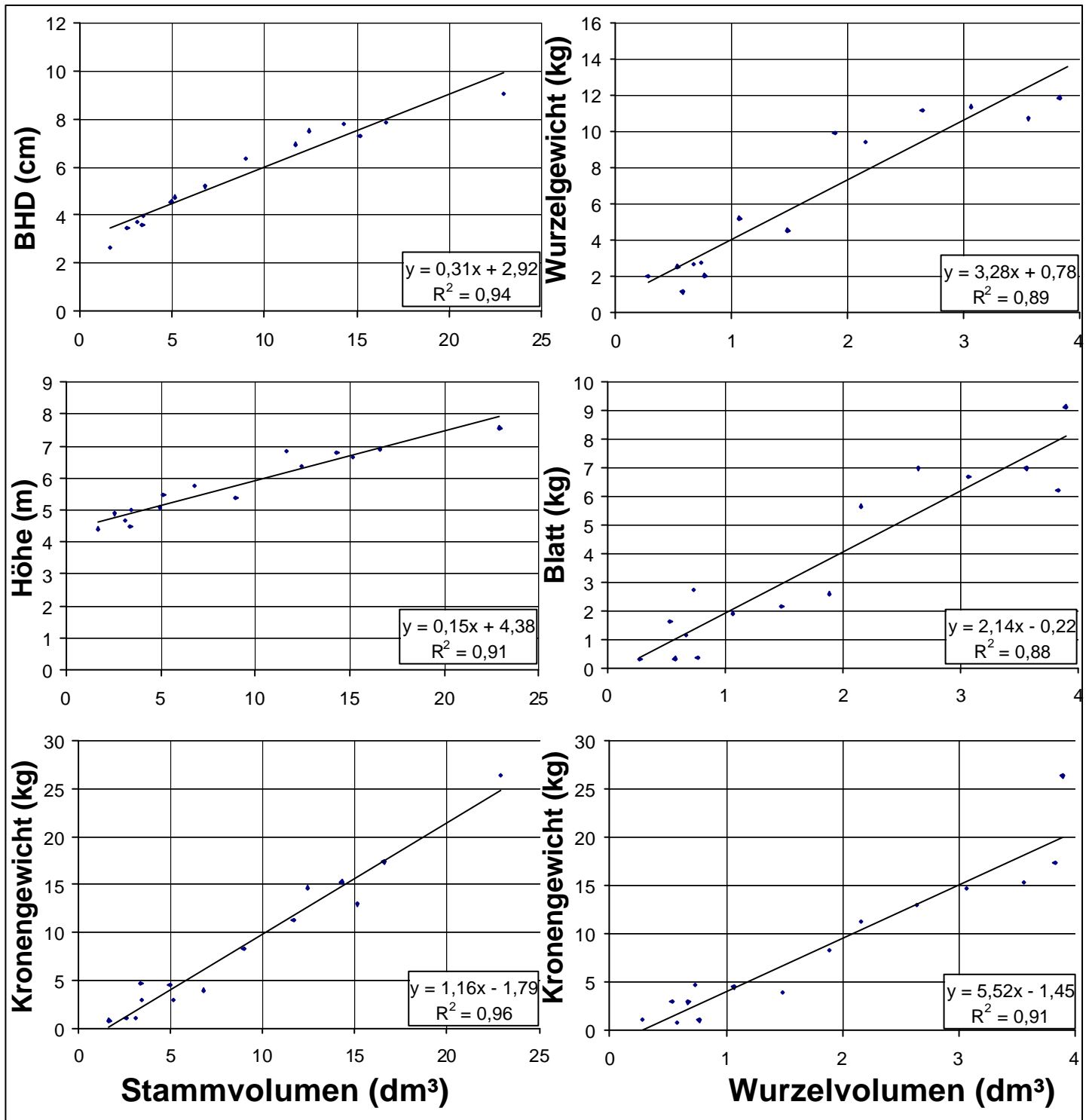


Diagramm 15: Beziehungen zwischen Stamm- Wurzel- und Kronenparametern; Kattenbühl, Eiche, Saat II 13jährig, Nadel/Blatt- und Kronengewicht (im Frischezustand).

Maike Kuhr

Persönliche Angaben:

Familienstand: ledig
Staatsangehörigkeit: deutsch
Geburtstag: 26.02.1968
Geburtsort: Hildesheim

Ausbildung:

- 1974 - 1978 Grundschule Diekholzen
- 1978 - 1987 Gymnasium Andreanum
- 1987- 1989 Ausbildung zur landwirtschaftlich-technischen Assistentin, Braunschweig und Sölingen
- 1989 - 1990 Tätigkeiten im Institut für Geoanalytik, Technologiezentrum Hildesheim, und Arztpraxis für Kiefer-Gesichts-Mundchirurgie, Hildesheim
- 1990 - 1991 Forstpraktikum Forstamt Escherode
- 1991 - 1996 Forststudium an der Georg-August-Universität Göttingen mit Abschluß als Diplom Forstwirtin
- Diplomarbeit "fremdländische und seltene Baumarten im Stadtwald Hildesheim"
 - Schwerpunkt Biologie/Ökologie
- 1996-1999 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Waldbau der Universität Göttingen