Department für Wald- und Bodenwissenschaften

Institut für Waldwachstum

Leiter: Univ.Prof. Dipl.-FW. Dr. Arne Nothdurft

# KRONENALLOMETRIEN VON KIEFER UND EICHE IN REIN- UND MISCHBESTÄNDEN ANHAND VON TERRESTRISCHEN LASERSCAN - DATEN

**Masterarbeit**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplomingenieur

an der Universität für Bodenkultur

Eingereicht von

René Huber

Betreuer:

Univ.Prof. Dipl.-FW. Dr. Arne Nothdurft

Dipl.-Ing. Christoph Gollob

Traismauer, Mai 2020

## Kurzfassung

Das Etablieren und Forcieren von Mischbestände begründet sich im Wesentlichen darin, dass diese einerseits eine gewisse Risikostreuung gewährleisten, andererseits verschiedene ökologische Voraussetzungen und Wuchsbedingungen benötigen bzw. erfüllen.

Ein Teil dieser erhöhten Produktivität ist auf die daraus resultierende Verminderung der intraspezifischen Konkurrenz gegenüber dem verfügbaren Kronenraum zurückzuführen und kann im Optimalfall auch zu besseren ökologischen Bedingungen führen. Das bedeutet, dass der Kronenraum, vor allem in kaum strukturierten, einschichtigen Beständen als limitierender Faktor im Kampf um das verfügbare Licht zu sehen ist. Darum sind biologische Unterschiede, die die Kronenmorphologie der unterschiedlichen Baumarten betreffen, ein wichtiger Faktor was die effiziente Ausnutzung des verfügbaren Kronenraumes durch unterschiedliche Plastizitäten und Ansprüche angeht.

Ziel dieser Arbeit ist zu zeigen, ob sich Baumkronen in Reinbeständen morphologisch von Kronen in Mischbeständen unterscheiden, allometrische Modelle zu erstellen und Unterschiede in den Kronenparametern zu quantifizieren. Dazu wurden allometrische Zusammenhänge zwischen Brusthöhendurchmesser (dbh) und den gemessenen Kronenvariablen wie Kronenlänge (cl), Kronenradius (cr), Länge der Lichtkrone (lkr), der Höhe des Kronenansatzes (can), Kronenschirmprojektionsfläche (cpa), Mantelfläche der Lichtkrone (sfc) und der Höhe der breitesten Krone (hbk) erstellt. Untersuchungsgegenstand sind zwei Triplets, die mithilfe terrestrische Laserscans erhoben wurden.

Die Untersuchungen ergaben unter anderem, dass die Eiche (Q. petraea) bezüglich Kronenausprägung kaum auf die Mischung mit der Kiefer (P. sylvestris) reagiert. Es wurden keine statistisch gesicherten Unterschiede in den Ausprägungen der Kronen für die Eiche ausgemacht, die auf die Mischung zurückzuführen sind. Jedoch ergab die Untersuchung auch, dass die Eiche im Mischbestand mit schmäleren Kronen den gleichen Bhd erreicht, also einen Effizienzvorteil zeigt. Die Kiefer im Mischbestand hingegen profitiert statistisch signifikant hinsichtlich ihrer Kronenlänge (cl), des Kronenansatzes (can) und der Lage des breitesten Kronen-durchmessers (hbk).


Schlagworte: Kronenallometrie, Kronenkennzahlen, Rein- Mischbestände, Kiefer, Eiche, TLS

## English Version

Compared to pure stands, mixed stands provide manifold advantages in terms of an increased growth efficiency and a higher biodiversity.
One method to measure competition is to compare crown properties of tree species in mixed vs. pure stands.

The major goal of this thesis is to compare crown structure and crown proportions of Scots pine (P. sylvestris) and Sessile oak (Q. petraea) in pure and mixed stands. For this purpose, data was analyzed from sample plots established in form of two triplets. The complete aboveground vegetation was registered with a terrestrial laser scanning system. Afterwards the different variables of the individual trees of both two triplets were manually measured in Cloudcompare, a program for point cloud processing.

In this study, I analyzed the allometric relationships between diameter at breast heights (dbh) and other variables, such as crown size in terms of crown projection area (cpa), crown length (cl), crown witdth (cr), crown surface (sfc), and the height of the point of the broadest crown (hbk). In addition, I examined how these variables differ between the pure and mixed stands.

Results showed that the morphology of the oak crowns behaved not very sensitive to the mixture type. Evidence was lacking that mixed stands offer any advantages for oak´s crown properties. In contrast, scots pine showed significantly different crown properties in the mixed stands compared to the pure stands. Further investigations showed that Scots pine receives clear advantages in crown properties such as the crown length, the crown-base height (can) and the height of the maximum crown diameter (hbk).


Keywords: allometric relationship, crown-properties, mixes stands, pure stands, Oak, Scots pine, TLS

# Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit eidesstattlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nach bestem Wissen und Gewissen angefertigt habe. Es wurden keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Formulierungen sind gemäß den Richtlinien wissenschaftlicher Arbeiten zitiert und mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht worden.
Diese schriftliche Arbeit wurde noch an keiner Stelle vorgelegt.

René Huber Traismauer, am 09.09.2020

# Danksagung

Mein aufrichtiger Dank gilt all jenen, die mich während der Studienzeit und darüber hinaus motiviert und angetrieben haben.

Großer Dank geht an Steffi Hackl, ohne deren Hilfe das Studium für mich stark erschwert, wenn nicht sogar unmöglich gewesen wäre.

Mein Dank geht auch an Herrn Univ.Prof. Dipl.-FW. Dr. Arne Nothdurft und an die Bediensteten des Instituts für Waldwachstumsforschung der BOKU Wien für die Möglichkeit diese Arbeit verfassen zu dürfen und deren Unterstützung.

# Inhaltsverzeichnis

**1. Einleitung** ..... **1**

**2. Material und Methoden** ..... **3**
2.1. Datengrundlage/Triplets ..... 3
2.1.1. Wilhelmsdorf ..... 4
2.1.2. Kuhberg ..... 5
2.2. TLS ..... 7
2.2.1. Datenaufbereitung ..... 7
2.3. Datenanalyse ..... 9
2.3.1. Kennzahlenanalyse ..... 9
2.3.2. Kovarianzanalyse ..... 9
2.3.3. Allometriemodell ..... 10
2.3.4. Skalierungen ..... 10

**3. Ergebnisse** ..... **10**
3.1. Kennzahlenanalyse Eiche ..... 11
3.2. Kennzahlenanalyse Kiefer ..... 11
3.3. Kovarianzanalyse ..... 15
3.4. Allometrische Beziehung ..... 16
3.5. Skalierungen ..... 20

**4. Diskussion** ..... **23**

**5. Schlussfolgerung** ..... **25**

**6. Zusammenfassung** ..... **26**

**7. Literaturverzeichnis** ..... **28**

**8. Tabellenverzeichnis** ..... **30**

**9. Abbildungsverzeichnis** ..... **31**

**10. Anhang** ..... **33**

## 1. Einleitung

In Zeiten einer Änderung der klimatischen Bedingungen wird zunehmend in der Forstwirtschaft darauf reagiert. Ein Untersuchungsgegenstand dieser Reaktionen ist die Baumartenzusammensetzung der Bestände. Diese hat einerseits den Sinn, das Risiko eines Totalausfalles zu minimieren und den Bestand zu stabilisieren. Andererseits erbringt eine Mischung auch ertragskundliche Vorteile, was Zuwachs und individuelle Effizienz betrifft (Pretzsch et al. 2020).

Untersuchungen der Produktivität von Mischbeständen haben bereits mehrfach gezeigt, dass die untersuchten Mischbestände eine 10 – 30%ige höhere Produktivität aufweisen als direkt benachbarte, und somit standörtlich vergleichbare, Reinbestände (Degenhardt 2019). Das ist ein Effekt des unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Wuchsverhalten der Baumarten wie beispielsweise das Ausnutzen des Lichtes der Mischbauart vor und nach dem Laubaustrieb. Aber auch das Nährstoffangebot bzw. die Präferenz zu diversen Nährstoffen wird im Mischbestand gestreut und die Nährstoffkonkurrenzsituation interspezifisch gemildert.
In diesem Sinne ist es unter anderem wichtig, ein Verständnis für die Ursachen der besseren Bedingungen der Mischbaumarten zu entwickeln. Sind Bäume im Reinbestand tatsächlich schlechter gestellt als Bäume im Mischbestand? Ab welchen Änderungen der Parameter sind Abweichungen zwischen den Rein- und Mischbeständen nachweisbar?

Die in Österreich befindlichen Kiefernreinbestände sind aufgrund der klimatischen Änderungen bzw. der Geschwindigkeit, mit der diese Änderungen fortschreiten, zunehmend biotischen und abiotischen Risiken unterworfen. Mischbeständen mit Eichen sind eine mögliche Alternative zu diesen Reinbeständen (Degenhardt 2019).

Zu der Baumartenkombination Kiefer – Eiche gibt es gegenwärtig wenige Untersuchungen, vor allem die möglichen Unterschiede bei unterschiedlichen Standorten betreffend. Einige Arbeiten beziehen sich auf Allometrien von Stammdurchmessern zu Biomassegewichten, Baum- oder Stammvolumina verschiedener Baumarten wie sie, zum Beispiel, Zianis et al. (2005) oder Widlowski et al. (2003) berechnet bzw. zusammengefasst haben. Die Kronenallometrien von beispielsweise Buchen in Mischung mit Eichen, Fichten oder Kiefern wurden durch wissenschaftliche Arbeiten von Dieler und Pretzsch (2010) jene Lärche mit Fichte von Fellner & Sterba (2015) und von Dirnberger et al. (2016) vorgelegt. Pretzsch (2018) hat eine Arbeit veröffentlicht, wo auf die Struktur und das Wachstum von Kiefern und Eichen in Rein- und Mischbeständen eingegangen wird. Dort wird beschrieben, dass die Mischbestände produktiver sind (Kiefer +5%, Eiche +9%), die Kiefer auf besseren Standorten oder bei zunehmender Wasserversorgung im Mischbestand der Eiche überlegen ist und vice versa ist die Eiche auf schlechteren Standorten (schlechtere Nährstoffverfügbarkeit, abnehmende Wasserverfügbarkeit) der Kiefer im Mischbestand überlegen. Auf die Kronenbiologie wird dabei nicht tiefer eingegangen. Baumkronen jedoch charakterisieren und bestimmen die Leistung und Vitalität/Stabilität der Bäume. Die Struktur der Baumkronen kann innerhalb einer Baumart variieren und hängt dabei u.a. von Bestandesdichte und ökologischen Faktoren ab. Andererseits spiegelt der Kronenraum die Bestandesproduktivität, Bestandesresilienz und die Fitness wider (Pretzsch 2014).

Die vorliegende Arbeit untersucht 2 Triplets mit gleichen Standorteigenschaften.

Die Frage der Ressourceneffizienz in Mischbeständen ist eine Wichtige. In den letzten Jahren ist das Schlagwort der „Klimafitten Wälder“ ein oft gebrauchter Term. So wird in Modellen

geforscht wie sich Mischungen mit zunehmender Änderung einer Ressource, bedingt durch eine Änderung einer klimatischen Bedingung, in den meisten Fällen Niederschlag und Temperatur, verhält.

Die Möglichkeit Kronenmorphologien mittels TLS genauestens zu erfassen und zu modellieren birgt großes Potential in der empirischen Forschung. Im Speziellen das Nachbilden und Modellieren von komplexen Mischbeständen um inter- bzw. intraspezifische Konkurrenz nachzubilden (Pretzsch et al. 2011), und im weiteren Schritt die Verwendung als Sub-Modelle in Wachstumssimulatoren die wiederum als Tool der forstlichen Entscheidungshilfen fungieren (Sharma et al. 2017).

Die Kronenform der beteiligten Baumarten eines Mischbestandes sollten sich im Idealfall durch differenzierte Ansprüche und Ausnutzung vorhandenen Platzes und Lichtgenusses dahingehend ergänzen, dass vorhandener Platz durch, beispielsweise plastischem Reaktionsvermögen besser genutzt wird (Pretzsch 2014 & Dieler, Pretzsch 2012). Andererseits wird eine höhere Lichtdurchlässigkeit der herrschenden oder mitherrschenden Kronen, der zweiten Baumart ausreichen, um gut mitzuwachsen. Diese Mischungseffekte kommen u.a. in Form von verstärken Zuwächsen (Pretzsch 2018) und veränderten Kronenmorphologie zum Ausdruck (Dieler, Pretzsch 2012).

Außerdem reflektiert die Kronenausdehnung die Verfügbarkeit von räumlichen Ressourcen, im Speziellem kann die vertikale Kronenausdehnung (Kronenlänge) als treibende Kraft der Produktivität des Baumes angesehen werden (Burkardt et al. 2019).

In früheren Arbeiten zur Kronenmorphologie und Kronenstruktur von Bäumen in Rein- und Mischbeständen beschränkte man sich auf die manuelle Aufnahme der zu messenden Parameter der Krone im Wald (Dieler, Pretzsch 2012). Mit Hilfe von terrestrischen Laserscans ist man in der Lage, detaillierte digitale Abbildungen der einzelnen Bäume zu erhalten. Mit den, aus den generierten Punktewolken, gewonnenen Daten lassen sich die Kronen bis hin zur fein detaillierten Abbildung von, zum Beispiel, Rinde im Kronenbereich abbilden. In diesem Falle beschränkte man sich auf die Krone der einzelnen Bäume im Bestand, um diese genau zu digitalisieren und zu vermessen, wobei auch diese Arbeit nur unter gewissen Umständen erfolgsversprechend ist. Für die Kronenvermessungen von Laubbäumen ist es wichtig die Scans in der unbelaubten Jahreszeit aufzunehmen. Aber auch der Wind spielt eine entscheidende Rolle für die Qualität der Aufnahmen.

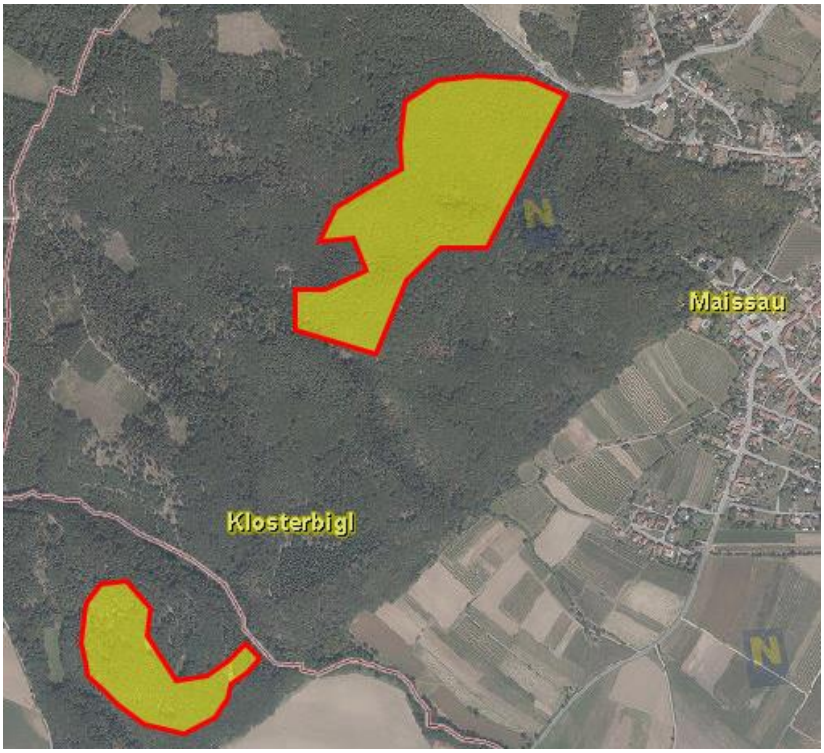
Ziel dieser Arbeit ist es den Einfluss der Mischung auf die Kronenkennzahlen und den Kronenallometrien zu untersuchen. Dabei soll die folgende Forschungsfrage beantwortet werden: Unterscheiden sich die mittleren Kronenkennwerte von Kiefer und Eiche im Rein- und Mischbestand auf Basis des vorliegenden Datenmaterials?

## 2. Material und Methoden

### 2.1. Datengrundlage, Triplets

Die Datengrundlage wurden in zwei Triplets durch terrestrische Laserscans gewonnen.

Die zwei Triplets befinden sich auf dem Gemeindegebiet der Marktgemeinde Maissau im nördlichen Niederösterreich an der Grenze zwischen dem Wald- und Weinviertel. Die Bestände befinden sich im Privatbesitz.




Quelle: Google Maps

Bei den untersuchten und gescannten Beständen handelt es sich durchwegs um einschichtige Bestände mit wenig Struktur. In den Reinbeständen der Kiefer gibt es kaum Unterwuchs. Bei den Eichenreinbeständen, vor allem in Kuhberg, wächst zum Teil flächig die Douglasie als Naturverjüngung ein. Vereinzelt sind Fichten und Lärchen in bemerkenswertem Umfang in der herrschenden und mitherrschenden Schicht dieser Flächen integriert.

Die Bestände befinden sich auf einer durchschnittlichen Seehöhe von ca. 450m. Die mittleren Jahresniederschläge belaufen sich auf 356 – 700 mm und die Jahresmitteltemperatur liegt bei 5,4 – 9,4°C.

Als Bodentyp ist eine kalkfreie Lockersediment-Braunerde aus sandig/lehmigem Tertiärsediment über kristallinem Gestein ausgewiesen, welcher schwach sauer ist und mäßige Wasserspeicherkapazität besitzt (eBOD, 2020).
Wie Abbildung 1 und 3 zeigen, liegen die Triplets nah beisammen.

#### 2.1.1. Wilhelmsdorf

Dieser Bestand ist 5,91 Hektar groß. Das Triplet liegt auf einer Kuppe. Wie Abbildung eins zeigt, ist die Durchmischung der Baumarten nur partiell gegeben, vor allem im westlichsten und südlichsten Teil des gesamten Bestandes.

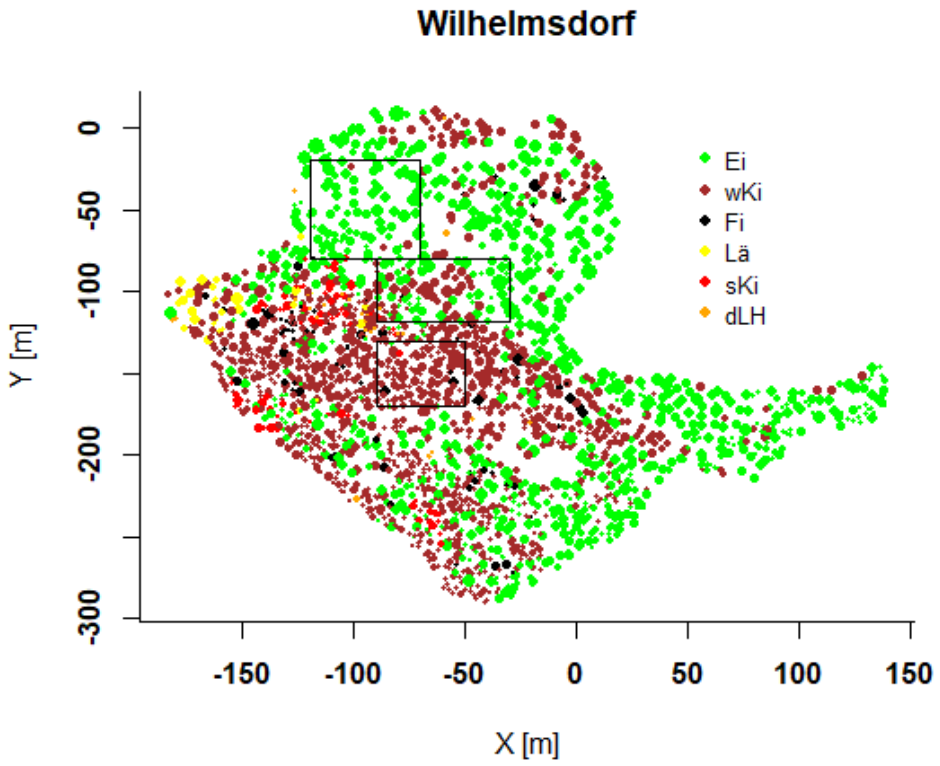



**Abbildung 1:** der Bestand „Wilhelmsdorf", zeigt die Baumarten skaliert nach dem BHD. Die drei Rechtecke markieren die Probeflächen „Eiche rein" oben, der Mischbestand in der Mitte und „Kiefer rein" unten.

Die Altersverteilung der Bäume (Tab.1) zeigt, dass der Kieferreinbestand die ältesten Bäume aufweist, jedoch auch den schwächsten Grundflächenmittelstamm. Die Kiefern haben in Wilhelmsdorf auch die größten Mittelhöhen, unabhängig von der Mischung. Die Angabe des Crown Competion Factors (CCF in Tab.1 & Tab.2) ist hier lediglich als ein Annäherungswert zu sehen, da die Kronen von vereinzelt vorkommenden Lärchen (gelb), Schwarzkiefern (rot) und Fichten (schwarz) in den Versuchsflächen in dieser Berechnung nicht berücksichtigt wurden (Abb.2). Es wurden lediglich die Kronen der vermessenen Eichen- und Kiefernkronen zur Berechnung herangezogen.

**Tabelle 1:** Kennzahlen zu Wilhelmsdorf

| Triplet | Fläche [m²] | Alter [yr] | Grundflächen-Mittelstamm [cm] | Mittelhöhe [m] | G/ha [m²] | V/ha [VfmS] | N am Ort |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Eiche | 3000 | 77-108 | 36,5 | 18,3 | 25,2 | 244 | 72 |
| Kiefer | 1600 | 79-148 | 28 | 19,8 | 33,8 | 445 | 110 |
| Eiche\|Kiefer | 2280 | 67-130 | 35,9\|32,5 | 18,4\|19,7 | 18,1\|13 | 205\|142 | 50\|44 |

| Triplet | SDI [N] | CCF [%] | N am ha |
|---|---|---|---|
| Eiche | 440 | 93,3 | 240 |
| Kiefer | 825 | 99,5 | 688 |
| Eiche\|Kiefer | 685 | 125 | 218\|194 |

Die drei Probeflächen des Triplets in Wilhelmsdorf im Detail (Abb.2). Man kann bereits erkennen, dass die Eiche im Rein- und Mischbestand die stärkeren BHD Klassen aufweist als die Kiefer.

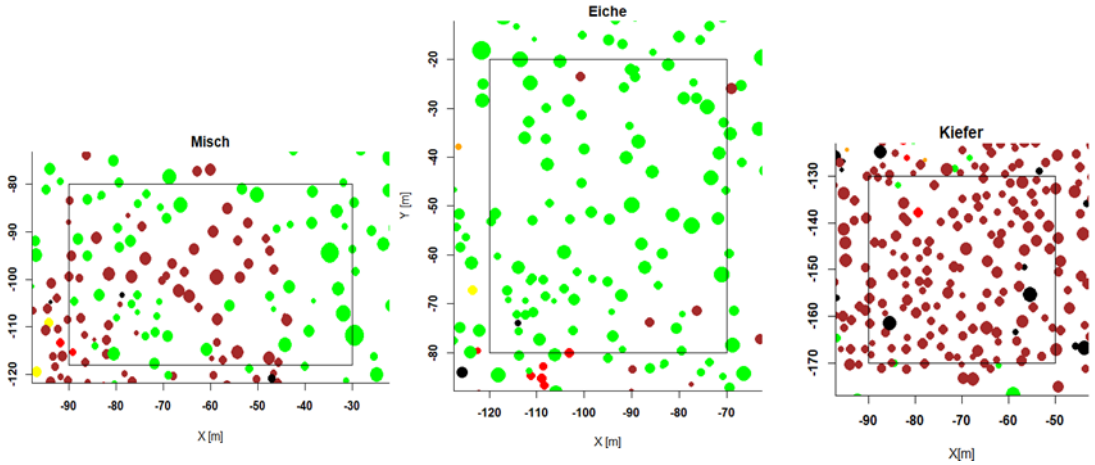



**Abbildung 2:** zeigt die Bestockung und Abmaß der drei Probeflächen skaliert nach dem BHD. Die Legende dazu ist in der Abb.1 ersichtlich.

### 2.1.2. Kuhberg

Dieser Bestand (7,58 ha) befindet sich in Mittelhanglage, dessen Gelände leicht von Nord nach Süd geneigt und dadurch südexponiert ist. Die Baumartenmischung ist im Norden des Bestandes gut durchmischt, und im Süden liegt der Kiefernhorst, in welcher ein Teil der Scans getätigt wurden (Abb.3).

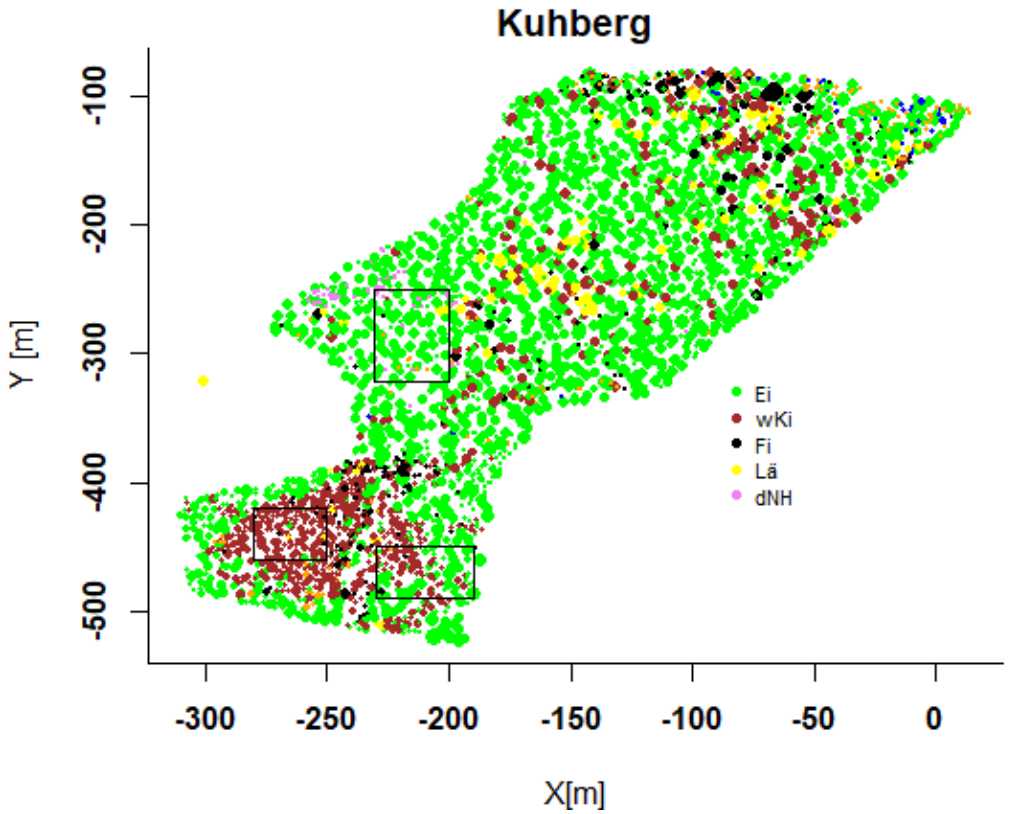



**Abbildung 3:** der Bestand „Kuhberg“, zeigt die Baumarten skaliert nach dem BHD. Die drei Rechtecke markieren die Probeflächen „Eiche rein“ oben, der Mischbestand rechts unten und „Kiefer rein“ links unten.

Der Grundflächenmittelstamm und die Mittelhöhe der beiden Reinbestände haben in diesem Bestand eine erhebliche Differenz (Tab.2), während im Mischbestand der Unterschied nicht so groß ist wie im Bestand Wilhelmsdorf. Der Crown Competion Factor (CCF) ist hier als ein Annäherungswert zu sehen, da die Kronen von vereinzelt vorkommenden Lärchen (gelb) und Fichten (schwarz) nicht berücksichtigt wurde (Abb.4).

**Tabelle 2:** Kennzahlen zu Kuhberg

| Triplet | Fläche [m²] | Alter [yr] | Grundflächen-Mittelstamm [cm] | Mittelhöhe [m] | G/ha [m²] | V/ha [VfmS] | N am Ort |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Eiche | 2100 | 34-95 | 38,2 | 21,5 | 25,6 | 289 | 47 |
| Kiefer | 1200 | 56-84 | 23,4 | 19,4 | 43,5 | 456 | 121 |
| Eiche\|Kiefer | 1600 | 34-81 | 31,4\|25,9 | 19,1\|19,6 | 22,7\|15,8 | 218\|165 | 47\|48 |

| Triplet | SDI [N] | CCF [%] | N am ha |
|---|---|---|---|
| Eiche | 442 | 85,6 | 244 |
| Kiefer | 906 | 81,3 | 1008 |
| Eiche\|Kiefer | 740 | 93,0 | 291\|303 |

Das Triplet in Kuhberg im Detail zeigt einen deutlich stärkeren Grundflächenmittelstamm (dg) der Eiche (Ei:38,2 cm|Ki:23,4 cm; Tab.2). Dieser Unterschied ist in nachstehender Grafik (Abb.4) klar erkenntlich. Der Unterschied im dg zwischen Kiefer und Eiche in Wilhelmsdorf liegt, wie bereits in Tabelle 2 beschrieben, bei 8,5 cm.

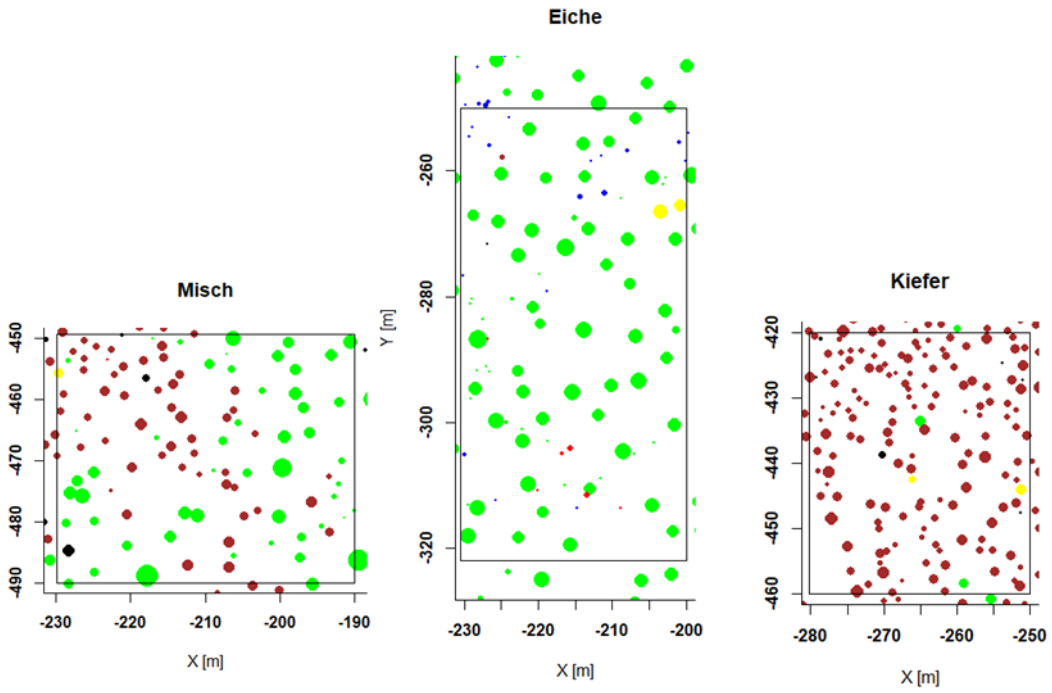



**Abbildung 4:** zeigt die Bestockung und das Abmaß der drei Probeflächen skaliert nach dem BHD. Die Legende dazu ist in der Abb.3 ersichtlich.

## 2.2. TLS

Um die einzelnen Baumkronen gut erfassen zu können, wurden die Bäume der jeweiligen Triplets mit einem terrestrischen Laserscanner erfasst. Die Feldarbeiten fanden im Frühjahr 2019 statt, um die Eichenkronen im unbelaubten Zustand erfassen zu können.

Der Scanner vom Fabrikat „FARO Focus“ benötigt pro Scan rund 15 Minuten. Um eine Scankette zu beginnen, wurde der Plot an seinen Grenzen mittels 6 großen Styroporkugeln (Durchmesser 30 cm) grob abgesteckt. Auf einen Puffer von rund einem Meter wurde geachtet. Mit acht kleineren Styroporkugeln (Durchmesser 10 cm) wurde jeder einzelne Scan abgegrenzt, wobei jeweils vier Kugeln bis zu 10 Meter vor, und vier Kugeln bis zu 10 Meter nach dem Scanner gesetzt wurden. Nach dem ersten Scan wurden die Kugeln, die vor dem Scanner waren, belassen, und der Scanner nach vorne getragen, sodass die vormals vorderen Kugeln beim nachfolgenden Scan die hinteren Kugeln wurden. Die vormals „hinteren“ Kugeln wurden gelöst und nun rund 10 Meter vor den Scanner platziert. Diese Kugeln dienen als Referenzpunkte um die einzelnen Scans am PC aneinander ketten zu können. Diese „Scankette“ wird in weiterer Folge digital als Punktewolke dargestellt. Pro Plot wurden 12 bis 18 Scans vorgenommen, um eine hinreichend genaue Erfassung der Kronen zu erzielen.

Die berechnete Punktewolke wurde mittels des Programms „CloudCompare“ (Version 2.11 alpha Anoia, 2019) visualisiert und bearbeitet. Pro Plot stand eine Punktewolke zur Verfügung, also je zwei für einen reinen Kiefern-, einen reinen Eichen- und einen Mischbestand. Aus diesen digitalen Probeflächen wurden die einzelnen Bäume herausschnitten und mittels der ID spezifiziert. Anschließend wurde jeder einzelne Baum individuell und manuell vermessen (Abb.5). Die so gewonnenen Daten wurden in ein Excelfile gespeichert.

### 2.2.1. Datenaufbereitung:

| | |
|---|---|
| **Höhe des Baumes [m]** | h |
| **Brusthöhendurchmesser, Bhd [m]** | Bhd |
| **Höhe jenes Punktes am Stamm, wo die Krone ihr Breitenmaximum aufweist [m]** | hbk |
| **Kronenansatz [m]** | can |
| **8 Kronenradien** | R |
| **<u>daraus berechnete Daten:</u>** | |
| **Verhältniszahl, Baumhöhe zu Brusthöhendurchmesser** | h/d |
| **Anteil des hbk an der Gesamthöhe h des Baumes [%]** | phbk |
| **Kronenschirmfläche der Lichtkrone [m²]** | sfc |
| **Länge der Lichtkrone [m]** | lkr |
| **Kronenprojektionsfläche [m²]** | cpa |
| **mittlerer Kronenradius [m]** | cr |
| **Kronenlänge [m]** | cl |
| **Kronenprozent [%]** | cper |
| **Plumpheitsgrad** | pl |
| **Ausladungsverhältnis** | aus |
| **Bestandesvolumen [VfmS] am Ort und am Hektar** | v |
| **Baumvolumen [m³]** | vb |
| **Kreisflächenmittelstamm [cm]** | dg |

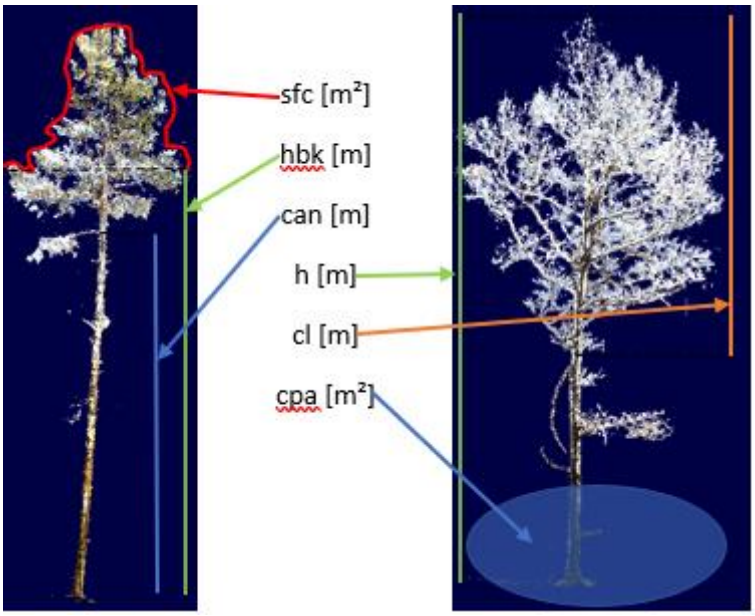



**Abbildung 5:** schematische Erläuterung der gemessenen Kronenparameter

Die Schaftholzvolumina wurden mit den Formzahlen nach Schieler (1988) berechnet. Die Mittelhöhe ist das arithmetische Mittel der Baumhöhen des einzelnen Plots und der Kreisflächenmittelstamm (dg) wurde mit der Formel

$$dg_{[cm]} = \sqrt{\frac{G}{N} * \frac{4}{\pi}}$$

für jeweils Kiefer und Eiche berechnet, wobei G die Summe der Grundfläche am Ort [m²], und N die Stammzahl der jeweiligen Baumart am Ort darstellt. Aufgrund der mangelnden Struktur der Bestände wurde lediglich das arithmetische Höhenmittel gebildet und auf die Berechnung einer Oberhöhe verzichtet.

Die Aufteilung der Kronenkennzahlen erfolgte nach dem Schema, welches Dirnberger et al. (2016) anwendete. Dieser teilte die Kronenkennzahlen in drei Kategorien.

Als erstes werden die Traditionellen Kennzahlen wie der Brusthöhendurchmesser (dbh), die Höhe (h), das H/D Verhältnis, die Höhe des Kronenansatzes (can), und die Kronenlänge (cl).

Die zweite Kategorie beschrieb er als die Kronenkennzahlen nach Assmann. Diese ist das Kronenprozent (cper), welches den prozentuellen Anteil der Kronenlänge (cl) zu Gesamthöhe (h) angibt.
Die zweite Assmann´sche Kronenkennzahl ist der Kronendurchmesser. Diese Kennzahl wird in dieser Arbeit zum Kronenradius (cr) heruntergebrochen. Der Plumpheitsgrad der Krone wird als Verhältnis des Kronendurchmessers (2 x cr) zur Kronenlänge (cl) angegeben (Dirnberger 2016, Assmann 1963 in Pretzsch 2010). Diese Kennzahl spielt für Vergleiche in gut strukturierten Mischbeständen Rolle (Jiménez 2001).

Und als letztes wird das Ausladungsverhältnis angegeben. Dies berechnet sich aus dem Kronendurchmesser dividiert durch den Bhd (dbh) (Dirnberger 2016, Assmann 1963 in Pretzsch 2010.
Als dritte Kategorie werden „komplexere Kronenkennzahlen“ angegeben. Diese sind u.a. die Kronenprojektionsfläche (cpa) und die Lichtkronenschirmfläche (sfc).

Lichtkronenschirmfläche (sfc):
Die Kronenschirmfläche wurde in dieser Arbeit als Kronenmantelfläche der Lichtkrone berechnet. Die Lichtkrone als Organ der Lichtinterzeption ist mit dem Radialzuwachs hoch korreliert (Metz et al. 2013). Diese Mantelfläche ist hier als die Mantelfläche eines quadratischen Paraboloids definiert, dessen Grundfläche am hbk liegt und dessen Radius der cr ist. Die Höhe des Paraboloids wurde aus der Differenz der Gesamthöhe des Baumes zur Höhe der breitesten Krone (hbk) berechnet. Dies ergibt die Höhe der Lichtkrone (lkr).

$$lkr_{[m]} = h - hbk$$

Somit kann die sfc mit folgender Formel berechnet werden:

$$sfc_{[m^2]} = 2\pi * \frac{cr}{6 * lkr^2} * [(cr^2 + 4lkr^2)^{1,5} - cr^3]$$

Die Kronenprojektionsfläche (cpa):
Um die Kronenprojektionsfläche zu berechnen wurde zuvor die Variable cr berechnet. Diese Variable bildet sich aus dem quadratischen Mittel der jeweils acht Kronenablotungen, wie sie u.a. bei Pretzsch et al., (2015) beschrieben wird. Diese Ablotungen wurden bei jedem individuellen Baum manuell am Computer gemessen. Dafür wurden die Kronenradien in die vier Haupthimmelsrichtungen gemessen und anschließend die Krone um 45 ° gedreht und wieder vier Mal im Kreuz gemessen. Daraus ergeben sich Kronenradienmessungen in die Himmelsrichtungen N, NO, O, SO, S, SW, W und NW. Um das quadratische Mittel daraus zu erhalten werden diese acht Kronendaten jeweils quadriert, summiert und danach durch Acht geteilt. Abschließend wird die Wurzel daraus gezogen.

$$cr_{[m]} = \sqrt{(N^2 + \cdots + NW^2)/8}$$

Die Kronenprojektionsfläche berechnet sich anschließend mittels der Kreisformel

$$cpa_{[m^2]} = \pi cr^2$$

### 2.3. Datenanalyse

Für die statistische Aufarbeitung wurde das Statistikprogramm R (R Core Team 2019, https://www.R-project.org/) u.a. mit dem Package „smatr“ (Warton et al. 2012), (Falster, et al. 2006) welches das Schätzverfahren SMA (standardized major axis regression) verwendet. Zur Datenaufarbeitung kam MS Excel zur Anwendung

#### 2.3.1. Kennzahlenanalyse

Die Unterschiede der diversen Variablen zwischen Rein- und Mischbeständen der Eichen und Kiefern wurde mittels eines t-Tests zweier unabhängiger Mittelwerte berechnet (Fellner, 2015). Dabei wurde vorher mittels eines Lillifors-Tests die Variablen auf Normalverteilung getestet. Wenn die Variable nicht normalverteilt war, wurde ein Wilcoxon Rangsummentest (Mann – Whitney U-Test) angewendet.

#### 2.3.2. Kovarianzanalyse

Dazu wurde zuvor ein lineares Modell und anschließend eine ANCOVA einschließlich der jeweiligen Eta² und partiellem Eta² (Packages „lsr“, und „car“) pro zu bewertende Variable berechnet. Die Varianzhomogenität wurde mittels LeveneTest ermittelt, sowie die Voraussetzungen der Kovariaten wurde mit Homogenität der Regressionssteigung, und visueller Vergleich der deskriptiven Statistik optisch geprüft. Es wird geprüft ob die Mischung sowie die Kovariablen Brusthöhendurchmesser und Baumhöhe signifikante Effekte auf die Kronenparameter hat, und wie groß diese Einflüsse sind.

### 2.3.3. Allometriemodell

Als Allometrie wird in der Ökologie quantitativ die relative Größenänderung zweier zu vergleichende Pflanzenorgane beschrieben. Die allometrische Grundgleichung (Niklas1994 in Dieler 2010) lautet:

$$y = \beta_0 * x^{\alpha_{y,x}}$$

Die Modellierung der einzelnen Parameter wurde als Funktion des BHD [*dbh*] ausgedrückt. Die jeweiligen Variablen (a, b) wurden mittels der R-Funktion nls (non linear [weighted] least squares estimates of a non linear model) modelliert und visualisiert. Die Formel hierzu lautet:

$$y = a * x^b$$

Wobei hier y die zu schätzende Variable ist, x der Prädiktor und a, b die Koeffizienten. Für die gesamte statistische Auswertung der vorliegenden Arbeit wurden das Statistikprogramm R (R Development Core Team 2017) und das RStudio als Entwicklungsumgebung verwendet, bzw. zur Datenaufbereitung MS Excel angewendet.

### 2.3.4. Skalierung

Das Maß für die relative Wachstumsgeschwindigkeit der Größe y wird durch den Allometrieexponenten $\alpha_{y,x}$ ausgedrückt (Dieler 2010). Indem dieser die Änderung von y bei 1 %iger Änderung von x ausdrückt, repräsentiert dieses Maß den internen Allokationsschlüssel zwischen den zwei untersuchten Größen (Dieler 2010).

Diese Arbeit nutzt die allometrischen Beziehungen zwischen strukturbestimmenden Baummerkmalen der Eiche und Kiefer in Misch- und Reinbestand, um Zusammenhänge zu untersuchen. Im Speziellen werden die übergreifenden Skalierungen zwischen Kronen- und Stammdimensionen über die lineare Transformation der allometrischen Grundgleichung

$$\ln y = \ln \beta_0 + \alpha_{y,x} \times \ln x$$

untersucht (Dieler 2010).

Hierbei ist y der jeweilige Kronenparameter (abhängige Variable) und x als unabhängige Variable wurden der Bhd (dbh) und Baumvolumen (vb) verwendet.

## 3. Ergebnisse

In den folgenden Tabellen werden die deskriptiven Statistiken als Summe der Triplets zusammengefasst und in die zu untersuchenden Baumarten unterteilt. Die Parameter dazu: Brusthöhendurchmesser (dbh), Baumhöhe (h), Kronenlänge (cl), Kronenansatz (can), H/D – Verhältnis (h/d), Kronenradius (cr), Kronenprozent (cper), Plumpheitsgrad (pl), Ausladungsverhältnis (aus), Höhe der breitesten Krone (hbk), hbk in Prozent der Baumhöhe (phbk), Kronenprojektionsfläche (cpa) und der Kronenmantelfläche der Lichtkrone (sfc).

Die Zusammenfassung der Mischungsverhältnisse der Baumarten der beiden Triplets ergibt:

| Mischung | N/Ort | Mischungsprozent | N/ha |
|---|---|---|---|
| Kiefer im Reinbestand: | 231 | - | 825 |
| Eiche im Reinbestand: | 119 | - | 234 |
| Kiefer im Mischbestand: | 92 | 49 | 239 |
| Eiche im Mischbestand: | 97 | 51 | 248 |

### 3.1. Kennzahlenanalyse Eiche

Die Kennzahlen der Eiche streuen bei den meisten Variablen wesentlich stärker (Tab.3) als die Kennzahlen der Kiefer (Tab.4). Die Eiche hat im Mischbestand im Mittel schwächere Bhds und auch Kronenbreiten (cr). Die Kronenlänge der Eiche im Mischbestand ist etwas kürzer als im Reinbestand, relativ zu Baumhöhe jedoch (cper) ist der Unterschied noch geringer. Diese Unterschiede (cl, cper) sind bei der Eiche nicht signifikant verschieden. Bei der Kronenbreite jedoch ist der Unterschied gesichert (Tab.5). Generell scheint die Eiche im Reinbestand bei den Kronenkennzahlen den Eichen im Mischbestand überlegen bzw. sind keine sign. Unterschiede zu beobachten. Aufgrund der guten Überlappung der Altersverteilung und der Standortnähe der Plots kann man diese Unterschiede nicht dem Alter oder dem Standort zuschreiben. Der Plumpheitsgrad ist nahe an einem ausgeglichenen Verhältnis zwischen Kronenbreite und -länge. Da die untersuchten Bestände als einschichtig anzusehen sind und kaum Struktur besitzen, hat der Plumpheitsgrad als Kennzahl in der Momentaufnahme Berechtigung, für weitere Vergleiche jedoch nicht von Relevanz (Jiménez 2001).

**Tabelle 3:** Mittelwerte und Standardabweichung der Kennzahlen für die Eiche, unterteilt in klassische Kennzahlen, Kennzahlen nach Assmann und „komplexe“ Kennzahlen

| **Eiche** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | **klassische Kennzahlen** | | | | |
| | dbh [cm] | h [m] | cl [m] | can [m] | h/d |
| **Eiche Misch** | 31,9 ±11,0 | 18,7 ±3,46 | 7,52 ±2,61 | 11,2 ±2,72 | 62,6 ±14,8 |
| **Eiche Rein** | 36,4 ±7,58 | 19,6 ±2,63 | 7,70 ±2,26 | 11,9 ±2,28 | 55,7 ±12,7 |
| | **Assmann´sche Kennzahlen** | | | | |
| | cr [m] | cper [%] | pl | aus | lkr [m] |
| **Eiche Misch** | 2,86 ±1,30 | 39,9 ±11,0 | 81,6 ±52,1 | 18,1 ±6,30 | 3,96 ±3,83 |
| **Eiche Rein** | 3,39 ±0,896 | 39,2 ±9,49 | 92,6 ±29,0 | 18,6 ±2,95 | 3,80 ±1,77 |
| | **komplexe Kennzahlen** | | | | |
| | hbk [m] | phbk [%] | cpa [m²] | sfc [m²] | Ratio lkr:skr |
| **Eiche Misch** | 14,8 ±3,21 | 79,0 ±8,86 | 31,0 ±29,5 | 289,6 ±316,4 | 1,51 ±0,867 |
| **Eiche Rein** | 15,8 ±2,67 | 80,6 ±8,15 | 38,6 ±19,6 | 311,1 ±338,1 | 1,27 ±0,740 |

### 3.2. Kennzahlenanalyse Kiefer

Im Mischbestand der Kiefer ist dieser sehr homogen hinsichtlich Baumhöhe, Kronenlänge, Kronenradius und Kronenansatz aufgebaut. Es ist eine starke Streuung in den Kronenlängen zu verzeichnen (Tab.4). Die Kronenlängen sind im Mischbestand signifikant länger als im verglichenen Reinbestand. Die Kronenlängen der Eichen weisen keinerlei Signifikanzen in den Kronenlängen auf. Plumpheitsgrad und Ausladungsverhältnis nach Assmann weisen auch keine gesicherten Differenzen zwischen Rein- und Mischbestand auf (Tab.5).

Die Höhe der breitesten Krone (hbk), ist, im Gegensatz zur Eiche, mit einem gesicherten Unterschied zu Gunsten des Mischbestandes ausgewiesen. Der hbk liegt im Mischbestand im Mittel tiefer als im Reinbestand.

**Tabelle 4:** Mittelwerte und Standardabweichung der Kennzahlen der Kiefer, unterteilt in klassische Kennzahlen, Kennzahlen nach Assmann und „komplexe" Kennzahlen

| **Kiefer** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | **klassische Kennzahle** | | | | |
| | dbh [cm] | h [m] | cl [m] | can [m] | h/d |
| **Kiefer Misch** | 28,6 ±6,15 | 19,7 ±1,74 | 6,16 ±1,83 | 13,5 ±1,80 | 71,5 ±14,1 |
| **Kiefer Rein** | 25,2 ±5,03 | 19,6 ±1,65 | 5,15 ±14,4 | 14,4 ±1,62 | 80,3 ±14,3 |
| | **Assmann´sche Kennzahlen** | | | | |
| | cr [m] | cper [%] | pl | aus | lkr [m] |
| **Kiefer Misch** | 2,06 ±0,620 | 31,2 ±8,15 | 71,4 ±26,8 | 14,4 ±3,12 | 3,46 ±1,25 |
| **Kiefer Rein** | 1,77 ±0,638 | 26,2 ±6,94 | 72,0 ±25,8 | 14,0 ±4,37 | 2,87 ±1,23 |
| | **komplexe Kennzahlen** | | | | |
| | hbk [m] | phbk [%] | cpa [m²] | sfc [m²] | Ratio lkr:skr |
| **Kiefer Misch** | 16,2 ±1,84 | 82,4 ±6,01 | 14,6 ±8,48 | 139,23 ±127,33 | 2,51 ±2,38 |
| **Kiefer Rein** | 16,7 ±1,65 | 85,5 ±6,02 | 11,1 ±12,3 | 84,31 ±81,48 | 1,94 ±1,36 |

Die Vergleiche der mittleren Kronenparameter (Tab.5) zeigen deutliche Unterschiede zwischen den jeweiligen Rein- und Mischbeständen. Die Kiefer zeigt im Mischbestand ein rund 19 % höheres Kronenprozent. Auch die horizontale Kronenexpansion ist um ~17% gegenüber dem Reinbestand erhöht. Jedoch ist auch der Bhd im Mittel um 13 % stärker als im Reinbestand. Der hbk ist im Mischbestand im Schnitt um 3 % niedriger.

Die Eiche zeigt ein fast gänzlich gegenteiliges Verhalten. Hier zeigt das Ergebnis, dass die Kronenparameter der Reinbestandseiche jenen der Mischbestandseiche in allen Punkten überlegen ist. So hat die Eiche Rein beispielsweise eine ~7% kleinere Lichtkronenfläche, die Kiefer im Mischbestand eine 65% größere Lichtkronenfläche als im verglichenen Reinbestand.

**Tabelle 5:** zeigt die Abweichungen **in Prozent** der mittleren Kronenkennzahlen, je Baumart. Verglichen wurde Mischbestand zu Reinbestand. Signifikanzniveau: ***p<0,001, **p<0,01, *p<0,05, n.s: nicht signifikant. Bei negativem Vorzeichen ist das Mittel der Variable im Reinbestand größer als im Mischbestand.

| Verhältnis Mischbestand zu Reinbestand | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Traditionelle Kennzahlen** | | | | | | | | | |
| **Baumart** | dbh | | h | | H/D | | can | | cl | |
| **Eiche** | -12,3 | *** | -4,28 | n.s. | 12,4 | *** | -5,51 | n.s. | -2,38 | n.s. |
| **Kiefer** | 13,4 | *** | 0,363 | n.s. | -11,0 | *** | -6,55 | *** | 19,8 | *** |
| | **Kronenkennzahlen nach Assmann** | | | | | | | | | |
| **Baumart** | cper | | cr | | pl | | aus | | lkr | |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Eiche** | 1,89 | n.s. | -15,6 | *** | -11,9 | *** | -2,81 | * | 4,21 | n s. |
| **Kiefer** | 19,3 | *** | 16,5 | *** | -2,25 | n.s. | 3,20 | n.s. | 20,6 | *** |
| | **Komplexe Kronenkennzahlen** | | | | | | | | | |
| **Baumart** | cpa | | sfc | | hbk | | | | | |
| **Eiche** | -19,7 | *** | -6,91 | n s. | -6,01 | n.s. | | | | |
| **Kiefer** | 30,9 | *** | 65,1 | *** | -3,16 | * | | | | |

Der Höhen- und Bhd-Vergleich der zwei Baumarten zeigt keinen gesicherten Unterschied in den Höhen zwischen Rein- und Mischbestand. Die Differenz in den Bhds ist jedoch signifikant (Tab.5, Abb.6).

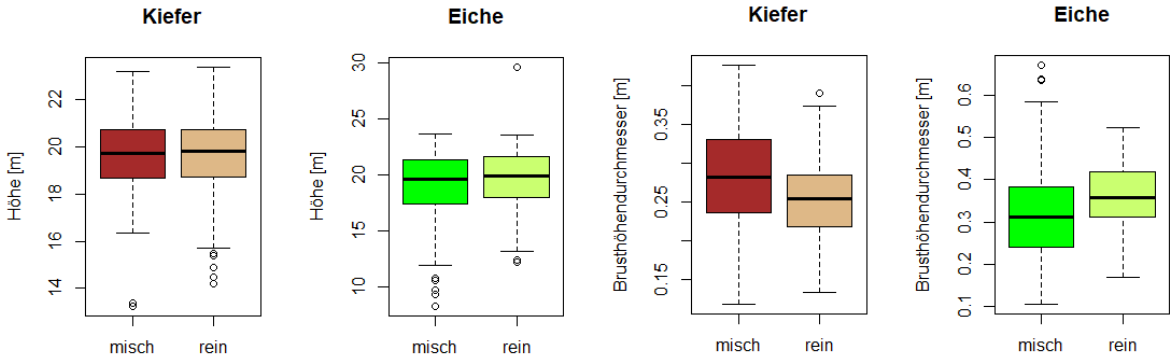



**Abbildung 6:** die Baumhöhen und die Brusthöhendurchmesser (dbh) im direkten Vergleich.

Auffällig ist, dass die Eiche keinen Unterschied im Parameter Kronenansatz (can) zeigt, die Kiefer jedoch im Reinbestand höhere Kronenansätze hat als im Mischbestand (Abb. 7).

Wie bereits oben erwähnt, weist die Kiefer im Mischbestand einen höchst signifikant niedrigeren Punkt der breitesten Krone. Das lässt sich dahingehen interpretieren, dass die Kiefernkronen im Mischbestand in den tiefer gelegenen Schichten des Bestandes mehr Licht bekommen. Der Unterschied der Höhe des Punktes der breitesten Krone (hbk) bei der Kiefer ist gesichert. Bei der Eiche gibt es keine gesicherten Unterschiede, dasselbe gilt für den Kronenansatz (can).

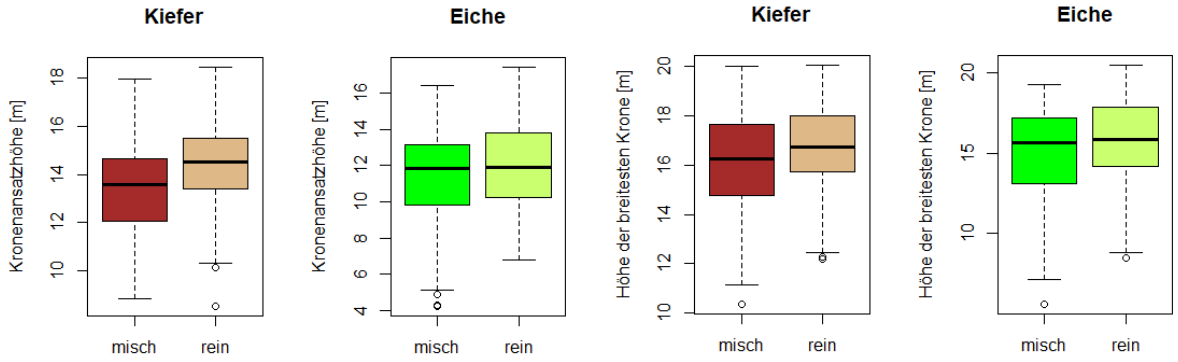



**Abbildung 7**: die Kronenansatzhöhe (can) und die Höhe der breitesten Krone (hbk) im direkten Vergleich.

Die Unterschiede zwischen Rein- und Mischbestand für Eiche und Kiefer in den Parametern sfc und cpa sind statistisch gesichert (Abb.8).

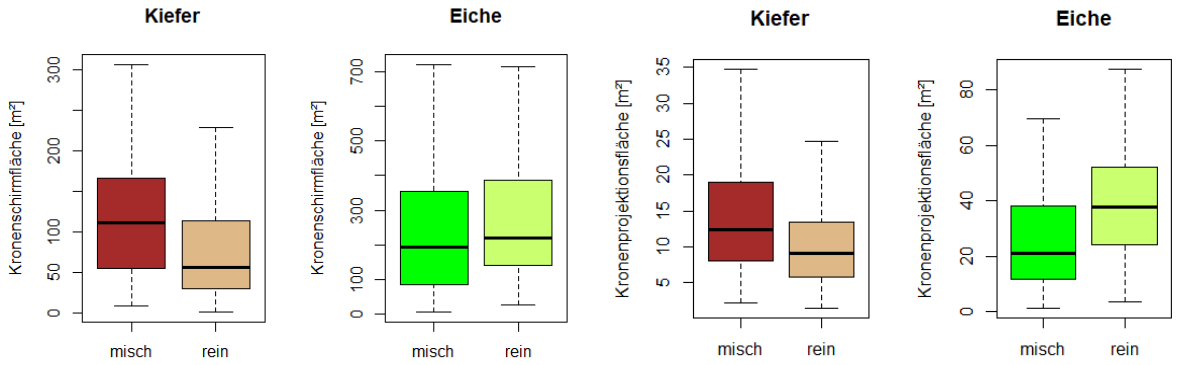



**Abbildung 8**: die Kronenprojektionsfläche (cpa) und die Kronenschirmfläche der Lichtkrone (sfc) im direkten Vergleich.

Die Kiefer reagiert im Mischbestand mit größeren Kronenradien und längeren Kronen, während die Eiche in diesem Fall im Mischbestand kürzere Kronenradien aufweist (Abb. 9).

Die Kronenlänge ist bei der Eiche von der Mischung kaum beeinflusst.

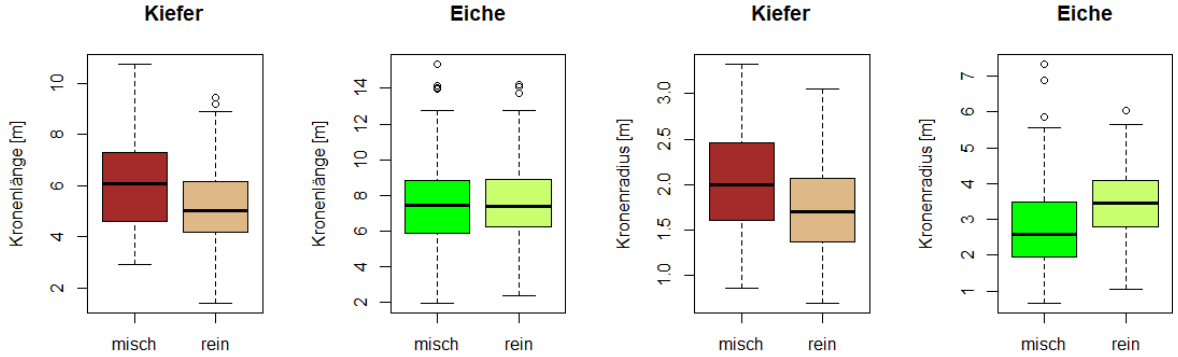



**Abbildung 9**: die Kronenlänge (cl) und die Kronenradien (cr) im direkten Vergleich.

Im Weiteren wird die Kronenlänge unterteilt in Lichtkronenlänge und Schattenkronenlänge gezeigt (Abb.10). Die Lichtkronen der Kiefer sind statistisch gesichert länger im Mischbestand. Bei der Eiche gibt es keine statistische Sicherheit. Zusätzlich wird die Länge der Schattenkrone zur Veranschaulichung der Ratio Lichtkronenlänge**:**Schattenkronenlänge gezeigt (Tab.3 & 4).

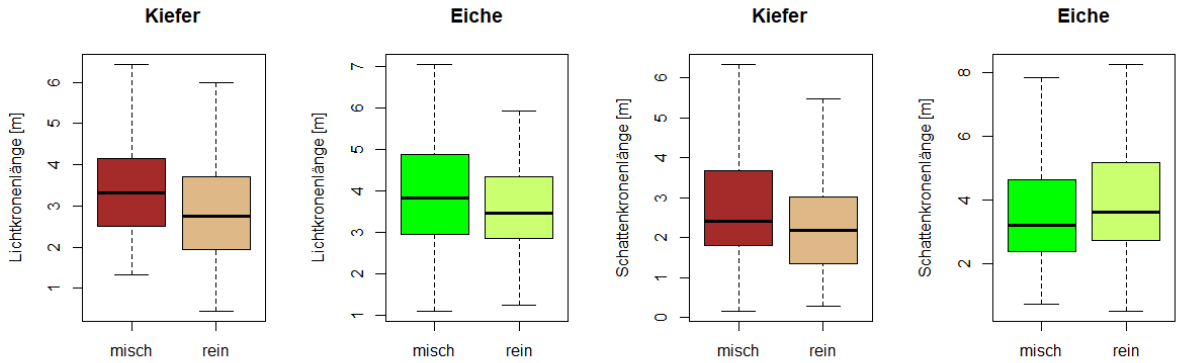



**Abbildung 10**: die Lichtkronenlänge (lkr) und die Schattenkronenlänge (skr) im direkten Vergleich.

Die Längen der Schattenkronen wurden nicht statistisch getestet. Die Kiefer weißt deutlich stärkere Unterschiede in der Ratio lkr:skr auf als die Eiche. So ist die Ratio im Kiefern-Reinbestand bei 1,94 (±1,36) und im Mischbestand sind die Lichtkronen im Mittel doppelt so lang wie im Reinbestand 2,51 (±2,38).
Der Vergleich zwischen Eiche und Kiefer im Mischbestand (Tab. 6) zeigt sich, dass die Eiche im Mittel einen stärkeren BHD hat, jedoch um einen Meter weniger hoch ist. Markant ist auch der Unterschied der Lichtkronenfläche (sfc) und der Kronenprojektionsfläche (cpa) zwischen Eiche und Kiefer.

**Tabelle 6:** direkter Vergleich einer mittleren Kiefer und einer mittleren Eiche im Mischbestand. Höhe (h), Kronenradius (cr), Kronenlänge (cl), Kronenprojektionsfläche (cpa) und Mantelfläche der Lichtkrone (sfc), Höhe der breitesten Krone (hbk) und die Höhe des Kronenansatzes (can)

| Eiche im Mischbestand | | Kiefer im Mischbestand |
|---|---|---|
| 18,7 | **h [m]** | 19,7 |
| 2,86 | **cr [m]** | 2,06 |
| 7,52 | **cl [m]** | 6,16 |
| 31,9 | **bhd [cm]** | 28,6 |
| 31,0 | **cpa [m²]** | 14,6 |
| 289,6 | **sfc [m²]** | 139,2 |
| 14,8 | **hbk [m]** | 16,2 |
| 11,2 | **can [m]** | 13,5 |

### 3.3. Kovarianzanalyse

Im Folgendem wird getestet, ob die Mischung (Reinbestand zu Mischbestand), und die Variablen Höhe (h) und der Brusthöhendurchmesser die Kronenparameter cl, cr, can, cpa, sfc, lkr und hbk beeinflussen. Die Voraussetzung der Homogenität der Regressionsteigungen wurde visuell, durch den Vergleich der Ausgleichsgeraden getestet. Diese Voraussetzungen sind für alle Parameter gegeben.

Mit einem Levene – Test wurde auf Varianzhomogenität zwischen den Kronenparametern der jeweiligen Gruppen (Eiche-Misch zu Eiche-Rein, bzw. Kiefer-Misch zu Kiefer-Rein) getestet.

**Tabelle 7:** Die Ergebnisse der Levene - Testung:
Signifikanzniveau: ***p<0,001, **p<0,01, *p<0,05, n.s: nicht signifikant.

| Parameter | Eiche Pr(>F) | Kiefer Pr(>F) |
|---|---|---|
| **cl** | 0,15 | 0,013 * |
| **ln(cl)** | - | 0,801 |
| **cr** | 0,0014 ** | 0,15 |
| **cr²** | 0,0724 | - |
| **sfc** | 0,75 | 0,0041** |
| **ln(sfc)** | - | 0,21 |
| **cpa** | 0,072 | 0,24 |
| **can** | 0,36 | 0,17 |
| **hbk** | 0,34 | 0,43 |
| **h** | 0,067 | 0,71 |
| **dbh** | 0,0018 ** | 0,23 |
| **dbh²** | 0,0477* | - |
| **lkr** | 0,84 | 0,92 |

Um eine Varianzhomogenität bzw. eine Annäherung daran (dbh) zu haben wurden die Variablen dhb und cr bei der Eiche quadriert. Die Variablen cl und sfc bei der Kiefer wurde mit dem Logarithmus naturalis versehen, um die notwendige Homoskedastizität zu erreichen (Tab.7).

Die nächsten Tabellen (Tab.8 & 9) zeigen, dass die Mischung bei der Kiefer einen signifikanten Einfluss auf die Variablen Höhe der breitesten Krone (hbk), die Kronenlänge (cl) bzw. den Kronenansatz (can) aufweist. Wobei die Mischung zwar deutlichen Einfluss (Tab.8) auf die abhängigen Variablen hat, jedoch kaum Erklärungskraft für die Varianz aufweist (can_pη²: 0,067***, hbk_pη²:<0,01**). Lediglich bei der Kronenlänge (ln(cl)_ pη²: 0,519***) hat die Mischung einen höheren und signifikanten erklärenden Effekt.

Die Höhe erklärt bei der Kiefer im Falle der cl rund 15% der Varianz der Kronenlänge (cl_pη²:0,149***) und gut 29% des Kronenansatzes (can_pη²: 0,291***). Die Varianzen der Variablen cr, hbk, cpa und sfc werden maßgeblich vom dbh beeinflusst.
Bei der Eiche weist die Mischung bei keinem Kronenparameter einen gesicherten Effekt (Tab.9) auf, während die Kovariaten dbh und h mit fast durchgehend statistisch signifikanten Einfluss auf die Kronenparameter eingehen. Während bei der Kiefer der dbh rund 21% der Varianz des hbk erklärt, erklärt die Höhe bei der Eiche mit rund 67 % die Varianz des hbk. Beide Fälle sind signifikant.

Interessant ist in diesem Falle, dass die Parameter „can“ und „cl“ bei der Eiche die gleichen Signifikanzen aufweisen, jedoch in den Koeffizienten der Regressionsgleichung (Annex) sich genau gegengleich verhalten (absolut gesehen jedoch gleich). Die Bestimmtheitsmaße sind jedoch unterschiedlich. Das kann daran liegen das die Summe der beiden Variablen die Höhe des Baumes ergibt und somit die gleichen Regressionskoeffizienten mit gegengleichen Vorzeichen ergibt.

Die ergänzenden Ergebnisse der Kovarianzanalysen und der linearen Regressionen sind dem Annex zu entnehmen.

**Tabelle 8**: pη²– Werte der unabhängigen Variable (Mischung) und der Kovariten für die Baumart Kiefer
Signifikanzniveau: ***p<0,001, **p<0,01, *p<0,05, n.s: nicht signifikant.

| Kiefer | can | ln(sfc) | cpa | hbk | cr | ln(cl) | lkr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Mischung | 0,067*** | 0,0285*** | 0,006 | 0,01** | 0,001 | 0,519*** | 0,0319** |
| dbh | 0,016* | 0,161*** | 0,235*** | 0,207 | 0,452*** | 0,0239** | 0,0103 |
| h | 0,291*** | 0,0392*** | 0,002** | 0,0275*** | 0,0491*** | 0,159*** | 0,0716*** |

**Tabelle 9**: pη²– Werte der unabhängigen Variable (Mischung) und der Kovariten für die Baumart Eiche
Signifikanzniveau: ***p<0,001, **p<0,01, *p<0,05, n.s: nicht signifikant.

| Eiche | can | sfc | cpa | hbk | cr² | cl | lkr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Mischung | 0,0108 | 0,00636 | 0,00231 | 0,0124 | 0,008 | 0,0108 | 0,0144 |
| dbh² | 0,112*** | 0,268*** | 0,592*** | 0,0461** | 0,589*** | 0,112*** | 0,0473** |
| h | 0,463*** | 0,00255 | 0,0552*** | 0,693*** | 0,064*** | 0,240*** | 0,0389** |

### 3.4. Allometrische Beziehungen:

Die Parameter cpa, sfc, hbk, cr und cl können als Funktion des BHDs gezeigt werden.
In der nachstehenden Tabelle (Tab.10) sind die Koeffizienten der allometrischen Modellierung zusammengefasst.

**Tabelle 10:** Zusammenfassung der allometrischen Beziehungen der Kronenparameter in Abhängigkeit des BHD. Signifikanzniveau: ***p<0,001, **p<0,01, *p<0,05, n.s: nicht signifikant.

| | | Mischbestand | | | Reinbestand | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Baumart** | abhängige Variable | a | b | $R^2$ | a | b | $R^2$ |
| **Eiche** | cr[1] | 0,0909** | 0,995*** | 0,55 | 0,0636*** | 1,105*** | 0,73 |
| | cpa[2] | 0,0312 | 1,959*** | 0,51 | 0,0132 | 2,204*** | 0,73 |
| | sfc[3] | 0,0682 | 2,349*** | 0,54 | 0,0199 | 2,657*** | 0,20 |
| | cl[4] | 1,016** | 0,582*** | 0,33 | 0,749* | 0,650*** | 0,23 |
| | hbk[5] | 4,773*** | 0,331*** | 0,31 | 9,228*** | 0,150* | 0,041 |
| | can[6] | 5,0148 | 0,235 | 0,075 | 14,211*** | -0,0511 | 0,036 |
| **Kiefer** | cr | 0,0599** | 1,055*** | 0,55 | 0,0305*** | 1,251*** | 0,67 |
| | cpa | 0,0152 | 2,03*** | 0,53 | 0,00210* | 2,610*** | 0,66 |
| | sfc | 0,1423 | 2,0404*** | 0,23 | 0,1207 | 2,0184*** | 0,18 |
| | cl | 1,845* | 0,361* | 0,077 | 0,967*** | 0,520*** | 0,14 |
| | hbk | 10,121*** | 0,141*** | 0,084 | 9,969*** | 0,161*** | 0,12 |
| | can | 9,125*** | 0,117 | 0,042 | 10,378*** | 0,103** | 0,037 |

[1]Kronenradius, [2]Kronenüberschirmungsfläche, [3]Mantelfläche der Lichtkrone, [4]Kronenlänge, [5]Höhe des Punktes der breitesten Krone, [6]Höhe des Kronenansatzes

Die Kronenansatzmodell (Abb.11) der Kiefer und Eiche zeigen, dass die Kiefern in den Mischbeständen deutlich niedrigere Kronenansätze haben als in den Reinbeständen. Dieser Unterschied bleibt auch bei gleichen mittleren Bhd bestehen. Die Eichen hingegen weisen ein vergleichsweise ambivalentes Muster den Kronenansatz betreffend auf. So zeigt das Modell, dass bis zu einem Bhd von ~40 cm die Eiche rein einen höheren Ansatz hat, danach liegt der Ansatz unter dem der Mischbestandseiche

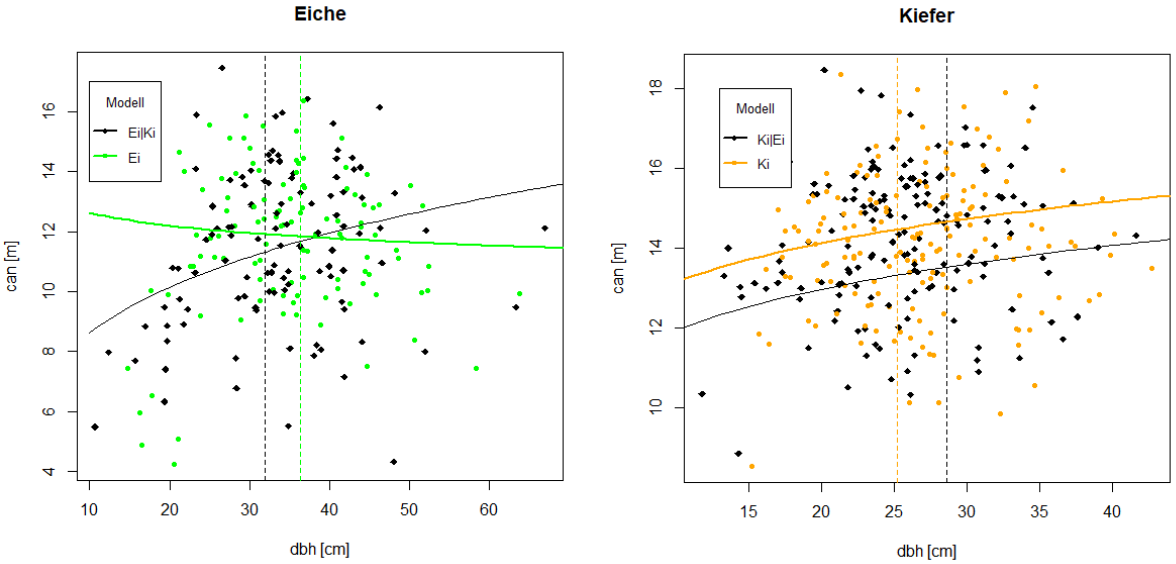



**Abbildung 11**: zeigt die die Höhe des Kronenansatzes von Kiefer und Eiche getrennt nach Rein- und Mischbestand. Die Ausgleichslinien wurden mit einem nicht linearen Modell erstellt.
Die mittleren BHD für Ei bzw. Ei|Ki lauten 36,4 bzw. 31,9 cm. Die mittleren BHD für Ki bzw. Ki|Ei lauten 25,2 bzw. 28,6 cm.

Abbildung 12 zeigt das Modell für die crown pojektion area (cpa). Bei der Eiche sind kaum Unterschiede zwischen Rein- und Mischbestand vorhanden. Mit steigendem Bhd würde dieser Unterschied in diesem Modell größer werden, jedoch auch die Unsicherheit dieser Prognose. Bei der Kiefer sind im schwachen Bhd – Bereich Unterschiede im cpa zu Gunsten der Kiefer

im Mischbestand auszumachen. Und auch dieser Unterschied würde sich im Bhd – Bereich von 32 cm drehen.

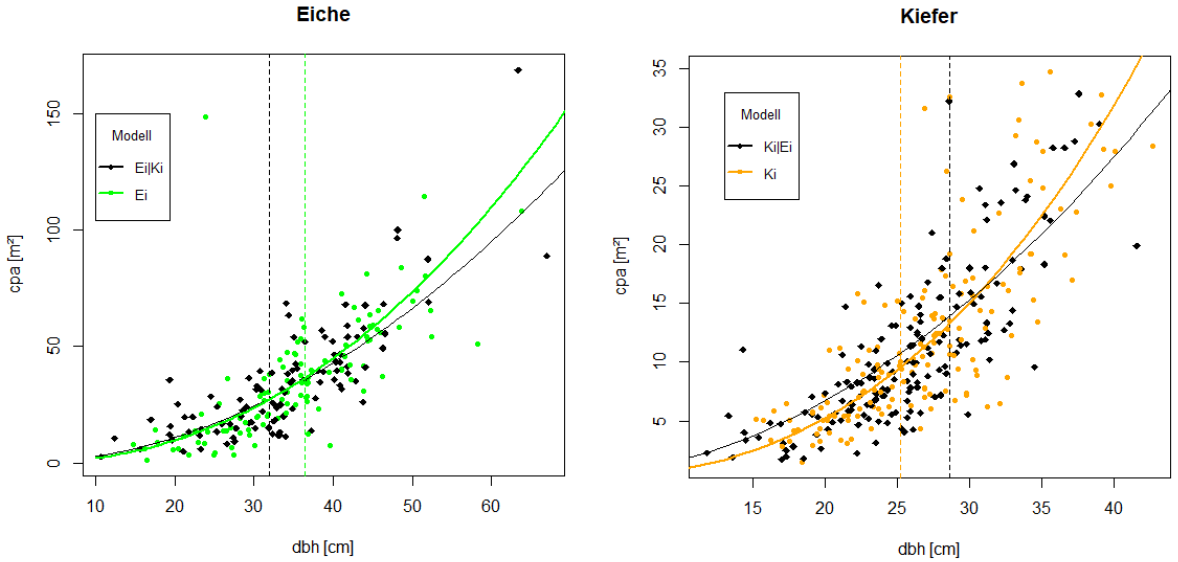



**Abbildung 12**: zeigt die Kronenprojektionsfläche der Kiefer und der Eiche getrennt nach Rein- und Mischbestand. Die Ausgleichslinien wurden mit einem nicht linearen Modell erstellt.
Die mittleren BHD für Ei bzw. Ei|Ki lauten 36,4 bzw. 31,9 cm. Die mittleren BHD für Ki bzw. Ki|Ei lauten 25,2 bzw. 28,6 cm.

Deutliche Unterschiede zeigt das Modell für die Kronenlängen (Abb. 13). Die Kiefer hat im Modell deutlich kürzere Kronen im Reinbestand als im Mischbestand. Dieser Unterschied würde bei gleichem Mitteldurchmesser bei Kiefer als auch bei Eiche auch nicht verschwinden. Die Signifikanzen hierfür sind der Tabelle 5 ersichtlich.

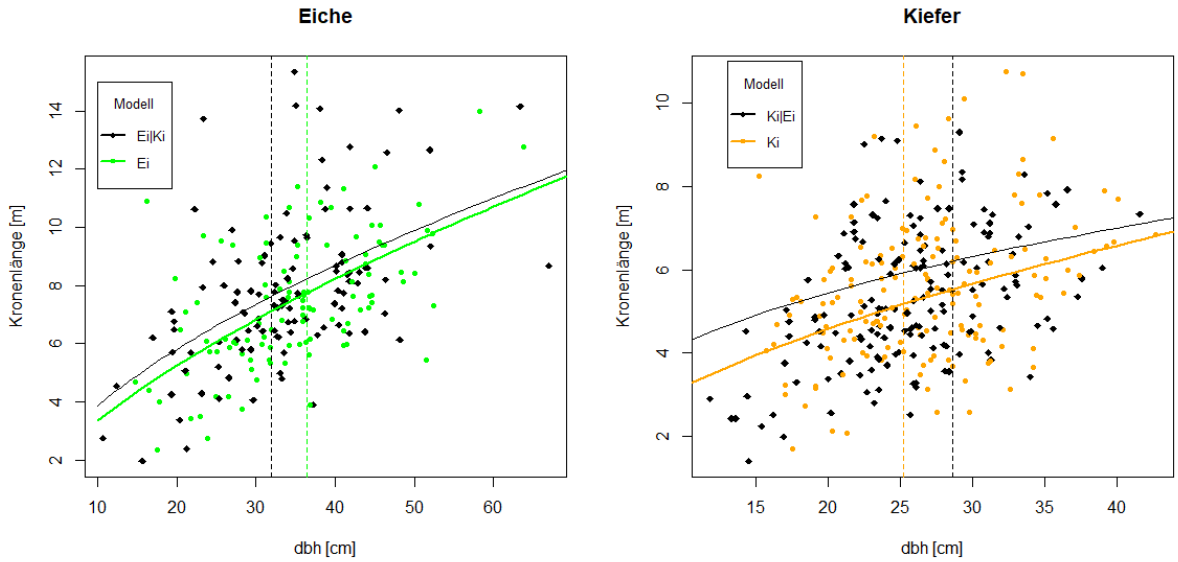



**Abbildung 13**: Die Kronenlängen der zwei Eichenbestände variiert kaum, selbst wenn die mittleren Durchmesser beider Bestände gleich wären. Bei der Kiefer wiederum bliebe der Unterschied signifikant bei gleichen mittleren BHD. Die mittleren BHD für Ei bzw. Ei|Ki lauten 36,4 bzw. 31,9 cm. Die mittleren BHD für Ki bzw. Ki|Ei lauten 25,2 bzw. 28,6 cm.

Das Kronenradienmodell zeigt, dass die Kronenradien der Eiche im kleineren Bhd – Spektrum annähernd gleich sind und mit aufsteigendem Bhd die Diskrepanz zwischen Rein- und Mischbestand zu Gunsten des Eichen Reinbestandes größer wird (Abb. 14). Bei der Kiefer sind die Kronenradien im Reinbestand im unteren Bhd - Klassen kleiner als im Mischbestand. Dieser Trend kehrt sich bei einem Bhd von rund 32 Zentimeter um.

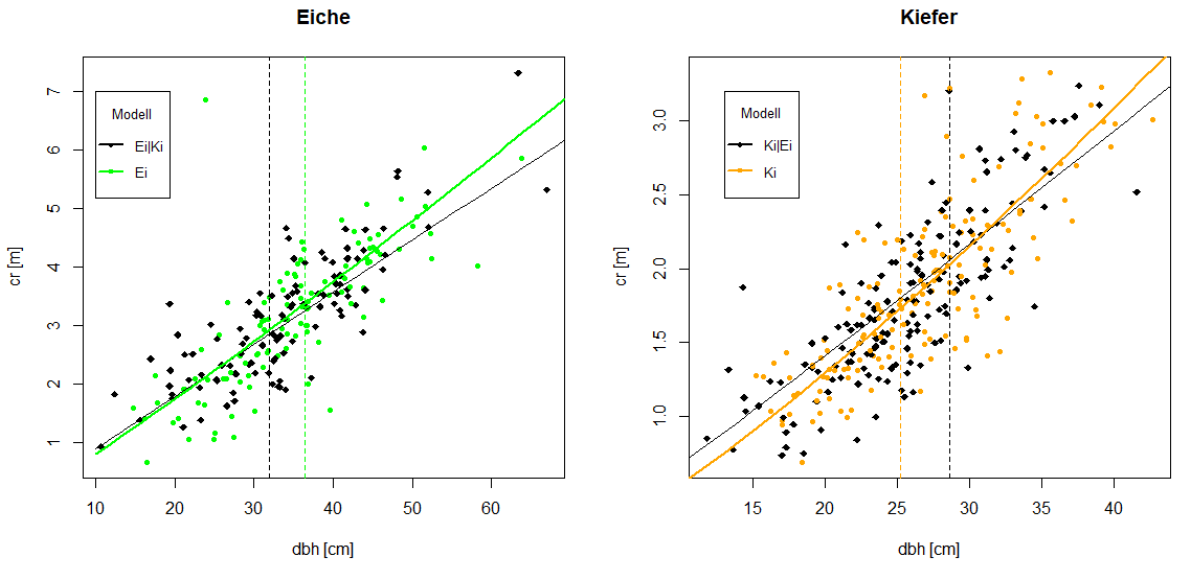



**Abbildung 14**: Die Kronenradien modelliert über den BHD. Die mittleren BHD für Ei bzw. Ei|Ki lauten 36,4 bzw. 31,9 cm. Die mittleren BHD für Ki bzw. Ki|Ei lauten 25,2 bzw. 28,6 cm.

Die Höhe jenes Punktes der breitesten Krone am Stamm (*hbk*) liegt im Reinbestand der Kiefer signifikant höher (Abb.15 & Tab.5). Dieser Unterschied bleibt auch bei steigenden Brusthöhendurchmesser erhalten. Der Grund dafür liegt unter anderem daran, dass im Mischbestand mehr Licht in die unteren Bereiche der Kronen lässt.

Bei dem Eichenmodell zeigt sich, dass ab einen BHD von ungefähr 38 Zentimeter sich der hbk im Reinbestand tiefer liegt als beim Mischbestand.

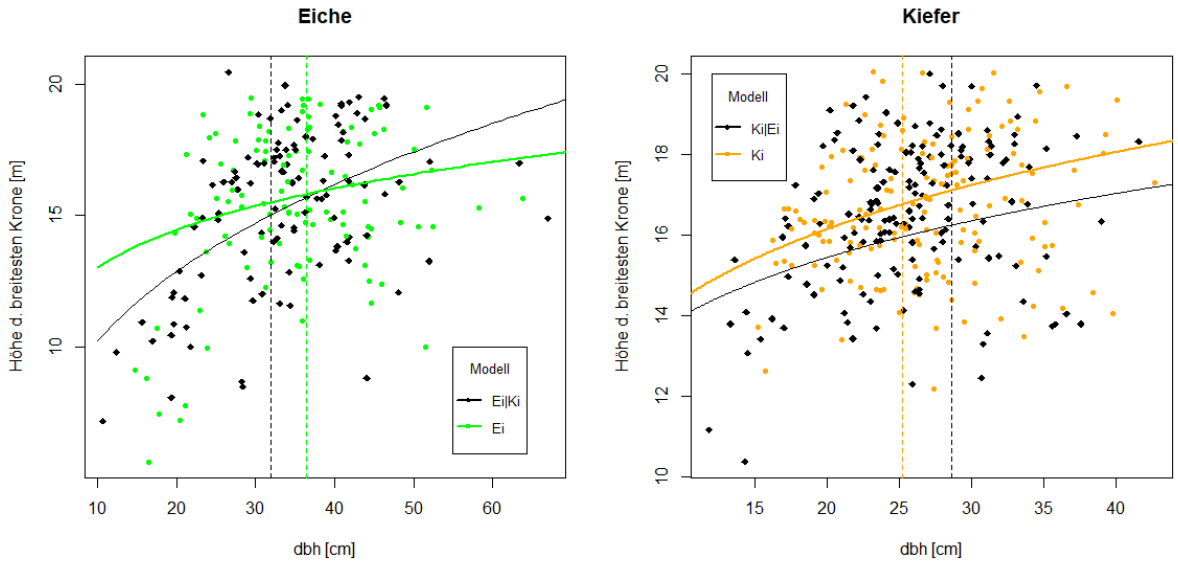


**Abbildung 15:** Höhe der breitesten Krone (hbk) in Relation zum BHD für Kiefer und Eiche in Rein- und Mischbestand. Die mittleren BHD für Ei bzw. Ei|Ki lauten 36,4 bzw. 31,9 cm. Die mittleren BHD für Ki bzw. Ki|Ei lauten 25,2 bzw. 28,6 cm.

Die Mantelflächen der Lichtkronen (sfc) der Eiche unterscheiden sich kaum in den Bereich der repräsentativen BHDs (Abb.16). Die Kiefer weist im Modell des Mischbestands durchwegs eine größere Fläche auf. Dieser Unterschied wird stärker mit zunehmenden Bhd der Kiefer.

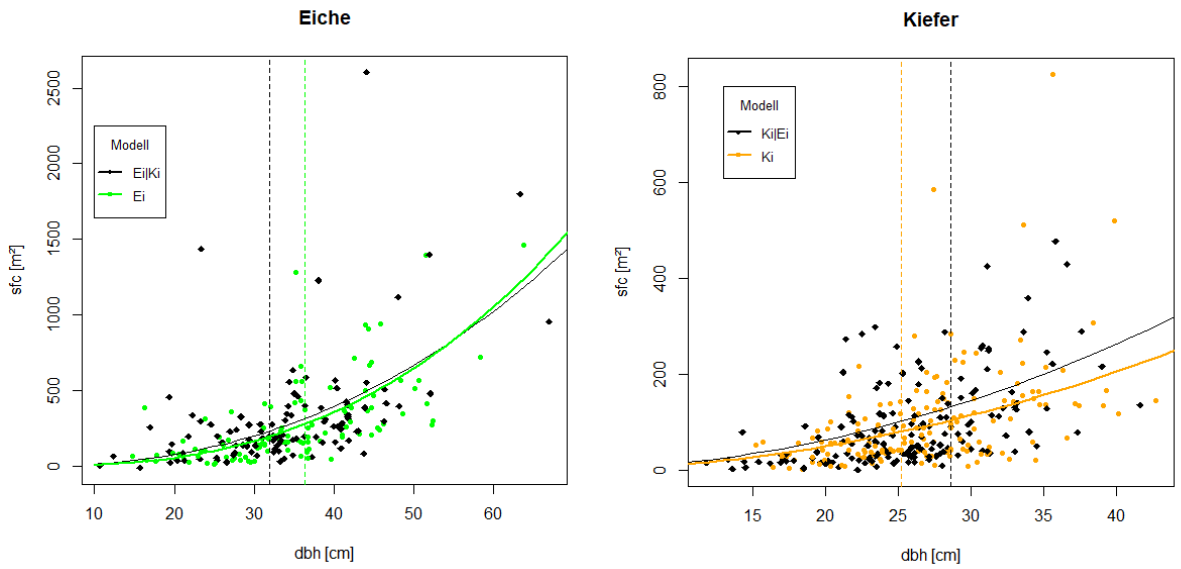



**Abbildung 16**: zeigt die Mantelfläche der Lichtkronen der Kiefer und der Eiche in Rein- bzw. Mischbestand ändern. Die mittleren BHD für Ei bzw. Ei|Ki lauten 36,4 bzw. 31,9 cm. Die mittleren BHD für Ki bzw. Ki|Ei lauten 25,2 bzw. 28,6 cm.

### 3.5. Skalierung

Folgende Tabelle (Tab. 11) zeigt den strukturellen Zusammenhang zwischen den Durchmesser d (BHD), und der Baumhöhe h, Kronenradius cr und der Kronenlänge cl jeweils für Eiche und Kiefer im Rein- und Mischbestand. Wobei die Kiefer im Reinbestand am wenigsten pro Prozent BHD-Zunahme in die Höhe investiert $\alpha_{h,d}$ = 0,338 und die Eiche im Reinbestand am Meisten, $\alpha_{h,d}$ = 0,620. Insgesamt gesehen wird für die Ausbreitung der Krone in den horizontalen und in den vertikalen Raum im Reinbestand mehr investiert als im Mischbestand. Die einzige Ausnahme davon ist die Kiefer im Mischbestand. Hier wird mehr in die Baumhöhe (h) investiert als vergleichsweise im Reinbestand.

Ein signifikanter Unterschied besteht im Allometriekoeffizient für die vertikale Kronenausdehnung cl der Eiche im Mischbestand. So ist der Zuwachs der Kronenlänge im Verhältnis zur relativen DBH-Zunahme im Mischbestand geringer als im Reinbestand. Im Reinbestand investieren Kiefern und Eichen jeweils geringfügig mehr in die horizontale Kronenausdehnung (cr) als im Mischbestand. Der Zuwachs der Lichtkrone im Eichenmischbestand liegt bei rund 2/3 dessen, was in die Lichtkronen des Reinbestandes pro 1 % Zunahme des Bhd investiert wird.

**Tabelle 11:** die Skalierungsexponenten $\alpha_{y,x}$ [slope] und ln(β) [elevation] der einzelnen Kennzahlen, die Konfidenzintervalle von α (95%), sowie die Relation von Mischbestand und Reinbestand. Automatisch getestet wurde ob sich die Steigung (slope) von Rein- zu Mischbestand unterscheidet.
Signifikanzniveau: ***p<0,001, **p<0,01, *p<0,05, n.s: nicht signifikant.

| eindimensionale Kennzahlen | *Kiefer* | *Kiefer [Eiche]* | *Eiche* | *Eiche [Kiefer]* |
|---|---|---|---|---|
| **ln(β)** | 1,52 | 1,49 | 1,56 | 1,55 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **$\alpha_{h,d}$** | 0,338 | 0,379 | 0,620 | 0,532 |
| **$\alpha_{h,d}$ in rel. Ei. bzw. Ki** | 1 | 1,12 | 1 | 0,858 |
| **Unteres CI** | 0,331 | 0,302 | 0,517 | 0,450 |
| **Oberes CI** | 0,428 | 0,459 | 0,743 | 0,629 |
| **ln(β)** | 1,13 | 1,09 | 1,11 | 1,09 |
| **$\alpha_{cr,d}$** | 1,49 | 1,45 | 1,33 | 1,30 |
| **$\alpha_{cr,d}$ in rel. Ei. bzw. Ki** | 1 | 0,973 | 1 | 0,977 |
| **Unteres CI** | 1,37 | 1,26 | 1,12 | 1,13 |
| **Oberes CI** | 1,63 | 1,66 | 1,48 | 1,49 |
| **ln(β)** | 1,56 | 1,55 | 1,48 | 1,38 |
| **$\alpha_{cl,d}$** | 1,43 | 1,42 | 1,38 | 1,02 * |
| **$\alpha_{cl,d}$ in rel. Ei. bzw. Ki** | 1 | 0,99 | 1 | 0,739 |
| **Unteres CI** | 1,25 | 1,17 | 1,16 | 0,845 |
| **Oberes CI** | 1,64 | 1,72 | 1,64 | 1,22 |
| **ln(β)** | 1,73 | 1,45 | 1,31 | 1,17 |
| **$\alpha_{lkr,d}$** | 2,17 | 1,71 | 1,75 | 1,18 |
| **$\alpha_{lkr,d}$ in rel. Ei. bzw. Ki** | 1 | 0,79 | 1 | 0,67 |
| **Unteres CI** | 1,89 | 1,38 | 1,45 | 0,961 |
| **Oberes CI** | 2,48 | 2,12 | 2,11 | 1,44 |

Im Folgendem werden die Kronenprojektionsfläche cpa, und die Lichtkronenfläche sfc untersucht (Tab.12). Für die Lichtkronenfläche gilt, dass die Eiche in Mischung nur 77 % dessen in die sfc investiert als sie es vergleichsweise im Reinbestand pro prozentuellen Anstieg des Bhd tut.
Die Kronenprojektionsflächen – Baumdurchmesser – Allometrie liegt zwischen 2,60 und 3,00. Der Erwartungswert bei geometrischer Gleichheit (Pretzsch 2010) liegt hierfür bei 2. Jedoch wurde eine Variation dieser Allometrie bei oben zitierter Arbeit festgestellt (Pretzsch 2010).

**Tabelle 12:** die Skalierungsexponenten $\alpha_{y,x}$ [slope] und ln(β) [elevation] der einzelnen Kennzahlen, die Konfidenzintervalle von α (95%), sowie die Relation von Mischbestand und Reinbestand. Automatisch getestet wurde ob sich die Steigung von Rein- zu Mischbestand unterscheidet.
Signifikanzniveau: ***p<0,001, **p<0,01, *p<0,05, n.s: nicht signifikant.

| **2-dimensionale Kennzahlen** | ***Kiefer*** | ***Kiefer [Eiche]*** | ***Eiche*** | ***Eiche [Kiefer]*** |
|---|---|---|---|---|
| **ln(β)** | 2,75 | 2,68 | 2,72 | 2,67 |
| **$\alpha_{cpa,d}$** | 2,98 | 2,89 | 2,67 | 2,60 |
| **$\alpha_{cpa,d}$ in rel. Ei. bzw. Ki** | 1 | 0,97 | 1 | 0,97 |
| **Unteres CI** | 2,74 | 2,52 | 2,40 | 2,27 |
| **Oberes CI** | 3,25 | 3,31 | 2,97 | 2,98 |
| **ln(β)** | 4,54 | 2,77 | 4,10 | 3,85 |
| **$\alpha_{sfc,d}$** | 4,60 | 3,96 | 3,99 | 3,09 |
| **$\alpha_{sfc,d}$ in rel. Ei. bzw. Ki** | 1 | 0,86 | 1 | 0,77 |
| **Unteres CI** | 4,09 | 3,24 | 3,42 | 2,61 |
| **Oberes CI** | 5,18 | 4,85 | 4,65 | 3,67 |

In nachstehender Tabelle (Tab.13) zeigt den Allometrieexponenten für das Schaftholzvolumen (v) pro Bhd.

Die Kiefer in Mischung alloziert relativ weniger Biomasse in das Schaftholzvolumen (v), die Eiche in Mischung jedoch geringfügig mehr. Diese Angaben beziehen sich auf den prozentuellen Anstieg pro 1 prozentige Zunahme des BHDs (d).

**Tabelle 13:** die Skalierungsexponenten $\alpha_{y,x}$ [slope] und ln(β) [elevation] der einzelnen Kennzahlen, die Konfidenzintervalle von α (95%), sowie die Relation von Mischbestand und Reinbestand. Automatisch getestet wurde ob sich die Steigung von Rein- zu Mischbestand unterscheidet. Signifikanzniveau: ***p<0,001, **p<0,01, *p<0,05, n.s: nicht signifikant.
Schaftholzvolumen (v)

| 3-dimensionale Kennzahlen | *Kiefer* | *Kiefer [Eiche]* | *Eiche* | *Eiche [Kiefer]* |
|---|---|---|---|---|
| **ln(β)** | 1,03 | 0,808 | 1,01 | 0,998 |
| **$\alpha_{v,d}$** | 2,19 | 1,87 | 2,23 | 2,29 |
| **$\alpha_{v,d}$ in rel. Ei. bzw. Ki** | 1 | 0,85 | 1 | 1,03 |
| **Unteres CI** | 2,14 | 1,78 | 2,12 | 2,21 |
| **Oberes CI** | 2,24 | 1,98 | 2,35 | 2,38 |

## 4. Diskussion

Die Eiche zeigt im Mischbestand signifikant kleinere/schwächere ($p<0,05$) Ausprägungen der Krone als im verglichenen Reinbestand. Hier sind vor allem die Parameter Kronenbreite, Mantelfläche der Lichtkrone zu nennen (Tab.5). Im erstgenannten Parameter findet Pretzsch (2010) keine Bestätigung. Hierbei muss aber erwähnt werden, dass speziell im Plot „Eiche rein“ des Bestandes Wilhelmsdorf die Eiche augenscheinlich sehr ausgeprägte breite Kronen entwickelt haben. Eine Erklärung dafür kann der starke Lichteinfall an der nördlichen, und großen Teilen der westlichen und östlichen Plotgrenze aufgrund der dort geringeren Stammzahldichte sein.

Ein gegenteiliges Bild zeigen die Ergebnisse für die Kiefer. Diese Baumart profitiert von der Mischung mit der Eiche. Sämtliche Kronenparameter wie Kronenansatz, Kronenlänge, aber auch die Mantelfläche der Lichtkrone sind statistisch signifikant (Tab.5). Die Höhe der breitesten Krone liegt im Mischbestand gesichert tiefer als im Reinbestand. Die Ursache dafür ist in der differenzierten interspezifischen Lichtkonkurrenzsituation zu finden (Pretzsch 2010). Die laubabwerfende Eiche lässt, über das Jahr gesehen, mehr Lichtgenuss zu, worauf die Kiefer mit längeren Kronen reagiert. Auch zweidimensionale Kennzahlen wie die Mantelfläche der Lichtkronen als Träger der Effizienz (Jiménez 2001), und die Kronenüberschirmungsfläche sind im Mischbestand gesichert ausgeprägter. Längere Kronen mit einem tiefer liegenden Kronenansatz sowie breitere Kronen der Kiefer ist mit einem Plus an Stabilität für den Einzelbaum, und weiters für den Bestand zu sehen. Auf Einzelbaumebene kann eine Steigerung der Resistenz gegenüber Trockenheit und damit einhergehend gegen den Borkenkäfer angenommen werden.

Die unterschiedlichen Reaktionen der beiden untersuchten Baumarten auf die Mischung verdeutlicht, dass der Faktor Mischung deutlich, vor allem bei der Kiefer signifikanten Einfluss auf die Kronenparameter hat. Unterschiede in den Varianzen des Kronenansatzes, der Höhe der breitesten Krone und der Kronenlänge sind mit dem Faktor „Mischung“ zu erklären. Die Eiche zeigt keinerlei Auswirkung der Mischung auf vorliegenden Kronenparameter. Jedoch zeigt hier die Kronenbreite-BHD Allometrie, dass die Eiche bei gleichem BHD deutlich schmälere Kronen aufweist. Das kann dahingehend als gesteigerte Effizienz gesehen werden, dass Eichen mit schmäleren Kronen im Mischbestand den gleich großen BHD erreichen, den eine Eiche im Reinbestand mit breiterer Krone erreicht. Dazu muss noch gesagt werden, dass die Eiche im Mischbestand die längeren Kronen mit längerer Lichtkrone ausbilden. Schmälere Kronen der Eichen bedeuten aber auch mehr Platz für weitere Eichen am Standort. Im Triplet „Kuhberg“ ist das auch der Fall (Tab.2).

Der Platz zwischen den Kronen wird im Mischbestand besser genutzt als im Reinbestand. Die im Reinbestand, insbesondere bei Kiefer, zu beobachtende „Crown Shyness“ verschwindet im Mischbestand. So ist ein Einwachsen der Kronen (auch optisch in den Punktewolken) im Mischbestand zu erkennen. Die scharfen Grenzen der Kronen im Reinbestand verschwimmen im Mischbestand. Das ist einerseits mit der unterschiedlichen Phänologie der Baumarten, andererseits mit der schwächeren intraspezifischen (Kronen-)Konkurrenz zu erklären. Somit wird verfügbarer Kronenraum effizienter genutzt.

Als Crown Shyness bezeichnet man den Abstand zwischen den Kronen bei voller Bestockung. Die Kronen der Nachbarbäume berühren sich nicht, was von unten bzw. oben gesehen die Möglichkeit ergibt die einzelnen Kronen zu differenzieren. Das ist das Resultat der mechanischen Beanspruchung der äußeren Zweige, welche bei Wind gegeneinanderschlagen und brechen, aber auch das gegenseitige Beschatten in den Randbereichen der Kronen führt

zu einem eingeschränkten Wachstum in der Peripherie was schließlich zu diesem Phänomen führt (Hattimare R. 2018).

Es bleibt zu sagen, dass in dieser Arbeit lediglich die momentane Konkurrenzsituation abbildet, ohne diese näher zu quantifizieren. Ein interessanter Vergleich wäre die Änderungen der Kronenallometrien bei unterschiedlichen Konkurrenzsituationen am selben Standort bzw. im Weiteren bei unterschiedlichen Standorten. Ertragskundlich wäre in diesem Zusammenhang auch Unterschiede im Radialzuwachs interessant. Zu diesem Thema hat Pretzsch (2018) Kaneko und Salamanka (1999), Pritzel (2004), Mammen et al. (2003), Noack (2006) und Schröder (2008, 2009) zitiert, die festhalten, dass die Kiefer insbesondere auf besseren Standorten gegenüber der Eiche profitiert, die Eiche jedoch auf ärmeren Standorten von düngender Deposition der ganzjährig benadelten Kiefer profitiert. Auch dürfte die Streu in den Mischbeständen günstige Effekte auf ärmeren Standorten haben.

Die allometrischen Modelle dazu zeigen auch, dass die Unterschiede bei gleichen mittleren Bhd in Misch- und Reinbestand bestehen blieben, jedoch bei der Kiefer mit schwächer werdenden Bhd auseinander gehen und mit stärker werdenden Bhd schwinden, bzw. sich der Trend umkehren würde (Abb. 11, 12 & 14). Dies gilt für das repräsentative Bhd-Spektrum.

Einen signifikanten Unterschied gibt es im Anstieg des Allometrieexponenten der Kronenlänge der Eichen. Die Eichen investieren im Reinbestand ($\alpha_{cl,d}$ = 1,38) mehr als im Mischbestand ($\alpha_{cl,d}$ = 1,02) und reagieren somit deutlich plastischer als die Kiefer. Dies kann dahingehend interpretiert werden, dass die Eiche im Reinbestand mehr in die Kronenlänge stecken muss, um konkurrenzfähig zu bleiben.

In einigen Arbeiten wurde u.a. untersucht, ob die Kronenausprägungen der metabolischen Skalierungstheorie (MST) (West et al. 2009) folgt. So wird die MST in Dieler und Pretzsch (2012) für die Kronenlänge-Durchmesserallometrie mit 2/3 angegeben. Die von mir gefundenen Allometrieexponenten folgen dieser Skalierungsregel nicht ($\alpha_{cl,d}$ =1,02 – 1,43). Der Skalierungsexponent für die Kronenschirmfläche (ksf) der Eiche im Reinbestand gibt Pretzsch (2010) mit $\alpha_{ksf,d}$ = 2,78 an. Das Ergebnis in dieser Arbeit für die Eiche im Reinbestand lautet $\alpha_{sfc,d}$ =3,99, wobei der Weg der Berechnung des ksf in Pretzsch (2010) nicht angegeben wird.

Die Abbildung ganzer Bestände mittels TLS bietet, wie weiter oben bereits erwähnt, erhebliche Vorteile die Güte der Abmaße betreffend (Pretzsch et al. 2011). So ist auf den Scan die weiter oben genannte „Crown Shyness“ sehr gut zu beobachten. Dieses kam vor allem bei den intraspezifischen Interaktionen zwischen den Bäumen in den reinen Kiefernbeständen zu tragen. Der zeitliche Aufwand bei der manuellen Bemessung der individuellen Kronen am PC ist erheblich und macht den Großteil der zeitlichen Investition dieser Arbeit aus. Es gibt hierbei auch die Möglichkeit durch Programmierung eine Automatisierung der Baumvermessungen zu bewerkstelligen. Die Sensibilität des Messgerätes während der Arbeit im Wald ist sehr hoch. So ist auf einen festen Stand zu achten, da die rotierenden Bewegungen des Scanners bei unsachgemäßer Aufstellung ein Nachgeben des Stativs zu Folge haben könnte. Die schlägt sich natürlich stark auf die Qualität des Scans aus, die natürlich erst am PC zu erkennen ist. So gab es bei der Auswertung der Laserscans gab es auf der Probefläche „Kuhberg Misch“ einen Versatz in allen drei Achsen. Grund dafür könnte eben ein leichtes Nachgeben des Stativs während des Messvorganges gewesen sein oder eine mangelhafte Erfassung der Referenzkugeln zwischen 2 Scans. Diese Verschiebung machte sich bei der manuellen Auswertung dadurch bemerkbar, dass die Bäume in diesem Plot einen „Schatten“ aufwiesen, der in einer anderen Farbe auftrat. Je weiter weg von diesen zwei Scans Bäume vermessen

wurden desto geringer fiel dieser Versatz aus. Durch konsequentes Ignorieren dieses Schattens wurde versucht den Fehler zu umgehen.

Das Mischverhältnis innerhalb der Plots wurde nicht berücksichtigt. Augenscheinlich war, dass in den einzelnen Mischplots eine gewisse Klumpung der Baumarten zu erkennen war (Abb. 4), sodass eigentlich nur die Randbäume, welche im Plot eine andere Baumart als unmittelbaren Nachbarn haben, den vollen Effekt der Mischung zeigen. Dies wäre im Zuge der Auswertung von diversen Indices zu berücksichtigen, welchen nächsten Nachbar das jeweilige Individuum hat, um dazu ein Ergebnis zu bekommen. Inwiefern dieser Umstand eine Rolle spielt ist hier nicht näher untersucht worden.

Die Konkurrenz, inter- und intraspezifisch beeinflusst die Kronenparameter beträchtlich. So wurde in fast allen Arbeiten und Studien ein Konkurrenzmaß (z.B.: SDI) miteingeschlossen. Bestandesdichtemaßzahlen wie der SDI können eine größere Rolle spielen, sie wurden in dieser Arbeit jedoch nicht weiter berücksichtigt.

## 5. Schlussfolgerung

Ein genaueres Wissen über Veränderungen der Kroneneigenschaften im Mischbestand gegenüber denen im Reinbestand ist unabdingbar, um geeignete Maßnahmen im Sinne einer naturnäheren Waldbewirtschaftung zu planen und durchzuführen. Die Kiefer zeigt in dieser Arbeit im Mischbestand eindeutige Vorteile hinsichtlich ihrer Kronenmorphologie. So sind die maßgeblichen Ergebnisse für die meisten Parameter, wie die Kronenlänge, die Kronenbreite, die Höhe der breitesten Krone sowie der Kronenansatz und die daraus resultierenden zweidimensionalen Parameter statistisch gesichert. Die Mantelfläche der Lichtkrone ist verantwortlich für die Lichtinterzeption und im Weiteren für den Radialzuwachs. Für die Forstwirtschaft bedeutet das, dass die Erziehung der Kiefer in einer Mischung mit Eichen nicht nur Vorteile bezüglich Bestandesstabilität, Risikostreuung und ökologischen Gesichtspunkten bringt, sondern auch positive Wirkungen auf die Kronenparameter hat, wie die Kronenlänge und den Kronenansatz. Diese beiden Maßzahlen haben bedeutsamen Einfluss auf den Volumszuwachs und auf die (Bestandes-) Stabilität sind. So sind die Kiefern im Mischbestand mit längeren und breiteren Kronen und daraus resultierenden größeren Assimilationsflächen besser gegen Trockenheitsstress und in weiterer Folge drohenden Borkenkäferbefall gerüstet.

Für die Eiche bringt der Mischbestand keine gesicherten Vorteile mit sich, insbesondere die Kronenparameter bleiben unbeeinflusst vom Mischungstyp. Hier sind jedoch die weiter oben erwähnten ökologischen Faktoren sowie die Bestandesstabilität ein gutes Argument. Jedoch ist anhand der Daten ein Effizienzvorteil auszumachen, der neben den Kronenparametern wohl auch in besseren Bedingungen und geringerer Konkurrenz bezüglich der Wurzelbiomasse, insbesondere der Feinwurzeln zu finden sein wird. So hat Rewald (2009) gezeigt, dass die Eiche in einem Mischbestand mit drei weiteren Baumarten einen Feinwurzelanteil von 20 Prozent aufweist – bei einem Grundflächenanteil von 50 Prozent sowie einen Blattflächenanteil von 46 Prozent. In dieser Arbeit werden unter anderem Hendriks and Bianchi (1995), Rust and Savill (2000) sowie Schmid and Kazda (2002) zitiert, wobei letzterer sich mit asymmetrischer Wurzelkonkurrenz von Pseudotsuga menziesii, Fraxinus excelsior und Picea abies auseinandersetzt, die anderen zwei Zitate mit Eiche und Buche im Mischbestand. Bezüglich der Konkurrenz zwischen den Wurzeln von Eichen und Kiefern ist noch kaum etwas bekannt.
Ein forstwirtschaftliches Ziel in der Eichenproduktion ist ein möglichst langer astfreier Schaft, sowie gleichmäßige Jahresringe, um Wertholz zu produzieren. Die Kiefer als Mischbaumart spielt für die Rolle der begleitenden Baumart, speziell für die Beschattung der Eichenstämme

keine Rolle. Vor allem in den einschichtigen, wenig strukturierten Beständen im Versuchsgebiet. So weist die Eiche im Mischbestand fast das gleiche Kronenprozent auf wie Eichen im Reinbestand (cper: Ei_r 39,9| Ei_m 39,2). Außerdem ist die Kiefer eine Lichtbaumart und ist als Füll- oder Pressholz nicht geeignet.

## 6. Zusammenfassung

Der Vergleich zweier Triplets mit Kiefer und Eiche in Rein und Mischbeständen ergab im Wesentlichen, dass die Eiche kaum Mischungseffekte mit der Kiefer aufzeigt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass die Eiche im Reinbestand im Mittel signifikant breitere aber nicht signifikant längere Kronen aufweist (Tab.5). Auch die zwei- und dreidimensionalen Kronenparameter wie crown projection area, Schirmfläche der Lichtkrone und das Kronenvolumen sind im Reinbestand relativ größer als im verglichenen Mischbestand. Diese Unterschiede sind statistisch gesichert. Das Ausladungsverhältnis und der Plumpheitsgrad zeigen bei der Eiche gesicherte Unterschiede. So ist der Plumpheitsgrad im Reinbestand signifikant näher bei 1 als im Mischbestand. Dies ist damit zu erklären, dass die Eiche im Reinbestand breitere Kronen aufweist. Eine Differenz in der Höhe der breitesten Krone, Baumhöhe und Kronenprozent ist nicht signifikant. Der Bhd ist im Mischbestand statistisch signifikant schwächer als im Reinbestand.

Die Allometriemodelle der Eiche zeigen, dass der Unterschied in der Kronenlänge und im Kronenradius selbst bei gleichem Bhd zwischen Rein und Mischbestand bestehen bleibt. Die crown projection area und die Lichtkronenschirmfläche wiederum ergeben im Model, dass bei gleichem Bhd kaum unterschieden werden kann, diese Parameter aber mit steigendem Bhd im Reinbestand stärker steigen als im Mischbestand. Der breiteste Punkt der Krone ist im schwächeren Bhd-Bereich im Reinbestand höher gelegen. Dieser Trend kehrt sich jedoch bei rund 38 cm Bhd um; sodass ab dieser Marke der breiteste Punkt der Krone im Mischbestand höher ist.

Die Skalierung der Eichen pro prozentuellen Zuwachs des Bhds ergab, dass die Eiche im Mischbestand rund 85% dessen in die Höhe investiert, was die Eiche im Reinbestand in die Höhe investiert. Bei der Kronenlänge sind es rund 75% und bei der Fläche der Lichtkrone rund 77%.

Die Kiefer reagiert deutlich stärker auf die Mischung mit der Eiche. Es ist statistisch gesichert, dass die Kiefer in der Mischung im Mittel niedrigere Kronenansätze, längere und breitere Kronen entwickelt. Auch die Höhe der breitesten Krone liegt signifikant tiefer als im Reinbestand. Auch die Unterschiede in den zwei- bzw dreidimensionalen Kennzahlen sind gesichert und zeigen im Mischbestand höhere Werte als im Reinbestand. Die Mischung hat in den Fällen Kronenansatz, Kronenlänge und Höhe der breitesten Krone einen ausschlaggebenden Effekt. Das Ausladungsverhältnis und der Plumpheitsgrad der Kiefer unterscheidet sich nicht zwischen dem Reinbestand und dem Mischbestand.

Die Baumhöhenunterschiede sind nicht gesichert, die Differenz in den Bhd sind signifikant.

Die Allometriemodelle ergeben, dass der Unterschied in den Kronenlängen und Höhe der breitesten Krone bei gleichem Bhd bestehen bleibt, der genannte Unterschied mit steigendem Bhd im ersten Fall schmäler wird und im zweiten Fall steigend ist. Der Kronenradius ist im unteren Bhd-Spektrum für den Reinbestand niedriger. Der Wendepunkt liegt in etwa bei Bhd 32 cm. Die Lichtkronenfläche der Reinbestandskiefer liegt im repräsentativen Bhd-Bereich kontinuierlich unter dem der Mischbestandskiefer. Dieser Unterschied wird in den höheren Bhd-Klassen ausgeprägter. Auch in der crown projection area haben die Mischbestandskiefern

im unteren Bhd-Spektrum die größeren Flächen. Dieser Unterschied schwindet mit steigendem Bhd und wendet sich bei Bhd 32 cm.

Die Skalierung der Parameter pro prozentuellen Zuwachs des Bhds ergaben bei der Kiefer in den Parametern Kronenradius, crown projection area und Kronenlänge kaum Unterschiede. Die Kiefer investiert im Mischbestand rund 12% mehr in die Baumhöhe als eine vergleichbare Kiefer im Reinbestand. Bei der Lichtkronenfläche investiert die Mischbestandskiefer 86% dessen, was die vergleichbare Reinbestandskiefer investiert.

## 7. Literaturverzeichnis

**Burkardt** Katharina, Anninghöfer Peter, Seidel Dominik, Christian Ammer and Torsten Vor: Intraspecific competition affects crown and stem characteristics of non-native Quercus rubra L. stands in Germany. Forests 2019, 10, 846, doi 10.3390/f10100846, 2019

**CloudCompare**: Version 2.11, alpha Anoia 2019, download im Oktober 2019
https://cloudcompare.software.informer.com

**Degenhardt** A.: Kronenstruktur, Standraumeffizienz und Wachstum von Eiche in Rein- und Mischbeständen mit der Baumart Kiefer in Brandenburg. DVFFA – Sektion Ertragskunde, Beiträge zur Jahrestagung, S 44 – 51, 2019

**Dieler** J., Pretzsch H.: Zur Kronenplastizität der Buche (Fagus sylvatica L.) im Rein- und Mischbestand. DVFFA – Sektion Ertragskunde, Beiträge zur Jahrestagung, S 109 – 117, 2010

**Dieler** J., Pretzsch H.: Plastizität von Baumkronen: Strukturmerkmale von Fichten und Buchen im Rein- und Mischbestand. Allg. Forst- u. J.-Ztg.,184. Jg., 11/12, 2012

**Dirnberger** G., Kumer A., Schnur E. und Sterba H.: Ändern sich Kronenallometrien von Fichte und Lärche in Abhängigkeit der Mischung? DVFFA – Sektion Ertragskunde, Beiträge zur Jahrestagung, S 20 – 29, 2016

**eBOD**, digitale Bodenkarte des Bundesforschungs- und Ausbildungszetrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW) und des Bundesamtes für Wasserwirtschaft – Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, abgerufen am 23.Juni.2020
www.bodenkarte.at

**Falster** D., Warton D., and Wright I.: User´s guide to SMART: Standardised Major Axis Tests and Routines, Version 2.0, Copyright 2006
http://www.bio.mq.edu.au/ecology/SMATR/

**Fellner** H. und Sterba H.: Kronenallometrie der Lärche. DVFFA – Sektion Ertragskunde, Beiträge zur Jahrestagung 2015

**Hattimare** Rishabh: Crown Shyness in Various Tree Species. International Journal of Recent Innovations in Academic Research, 2(8): 241 – 245, 2018

**Jiménez** J., Kramer H. und Aguirre O.: Bestandesuntersuchungen in einem ungleichaltrigen Tanne., Douglasien-, Kiefern-Naturbestand Nordostmexikos. Allg. Forst-u.J.Ztg. 173. Jg., 2-3, S 47 – 55, 2001

**Metz** Jérôme, Seidel Dominik, Schall Peter, Scheffer Dina, Schulze Ernst-Detlef and Ammer Christian: Crown modeling by terrestrial laser scanning as an approach to assess the effect of aboveground intra- and interspecific competition on tree growth. Forest Ecology and Management 310, 275 – 288, 2013

**Pretzsch** H., Steckel M., Heym M., Biber P., Ammer C., Ehbrecht M., Bielak K., Bravo F., Orónez C., Collet C., Vast F., Drössler L., Brazaitis G., Godvod L., Jansons A., de-Dios-Gracia j., Löf M., Aldea J., Korboulewsky N., Reventlow D.O.J., Nothdurft A., Engel M., Pach M., Skrzyszewski J., Pardos M.,

Ponette Q., Sitko R., Fabrika M., Svoboda M., Cerny J., Wolff B., Ruiz-Peinado R., and del-Rio M.: Stand growth and structure of mixed-species and monospecific stands of Scots pine (Pinus sylvestrisL.) and oak (Q. robur L., Quercus petraea (Matt.) Liebl.) analysed along a productivity gradient through Europe. European Journal of Forest Research 139, pp 349 – 367, 2020
https://doi.org/10.1007/s10342-019-01233-y

**Pretzsch** H., del Rio M., Steckel M., Heym M., Bielak K., Bravo F., Brazaitis G., Coll L., Collet C., Jansons A., Löf M., Nord-Larson Th., Pach M., Ponette Q., Sitko R., Svoboda M. Vallet P., Vospernik S. und Wolff B.: Struktur und Wachstum von Kiefer und Eiche im Rein- und Mischbestand. Analyse entlang eines ökologischen Gradienten durch Europa. DVFFA – Sektion Ertragskunde, Beiträge zur Jahrestagung, S 41 – 53, 2018

**Pretzsch** H., Bieber P., Uhl E., Dahlhauser J., Rötzer T., Cadeltey J., Kioke T., van Con T., Chavanne A., Seifert T., du Toit B., Farnden C. and Pauleit S.: Crown size and growing space requirement of common tree species in urban centres, parks and forests. Urban Forestry & Urban Greening 14, p 466 – 479, 2015

**Pretzsch** H.: Struktur des Kronenraumes und Morphologie der Kronen in Mischung im Vergleich zum Reinbestand. DVFFA – Sektion Ertragskunde, Beiträge zur Jahrestagung, S 140 – 149, 2014

**Pretzsch** H., Seifert St., Huang P.: Beitrag des terrestrischen Laserscannings zur Erfassung der Struktur von Baumkronen. Schweiz Z. Forstwesen 162, S 186 – 194, 2011

**Pretzsch** H.: Gesetzmäßigkeiten der Kronenformentwicklung und Wuchsraumbesetzung. Querschnittsanalyse auf der Basis langfristiger Versuchsflächen. DVFFA – Sektion Ertragslehre, Beiträge zur Jahrestagung, S 96 – 108, 2010

**Rewald** B. and Leuschner Ch.: Belowground competition in a broad-leaved temperate mixed forest: pattern analysis and experiments in a four-species stand. European Journal of Forest Research 128, p 387 – 398, 2009

**R Core Team (2019)**: R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna Austria. URL, 2019
http://www.R-project.org/

**Sharma** Ram P., Bilek Lukáš, Vacek Zdeněk and Vacek Stanislav: Modelling crown width-diameter relationship for Scots pine in the central Europe. Springer Verlag GmbH Germany, Trees (2017) 31, S 1875 – 1889, doi 10.1007/s00468-017-1593-8, 2017

**Warton** I. D., Duursma A.R., Falster S. D. and Taskinen S.: SMATR 3 – an R package for estimation and inference about allometric lines. Methods in Ecology and Evolution 3, S 257 – 259, 2012

**West** G.B., Brown J.H. and Enquist B.J.: A general quantitative theory of forest structure and dynamics, Proceedings of the National Academy of Sciences 106(17), S 7040 – 7045, 2009

**Widlowski** J., Vertraete M., Pinty B., and Gobcon N.: Allometric Relationships of Selected European Tree Species. Parametrization of tree architecture for the purpose of 3D canopy reflectance models used

in the interpretation of remote sensing data. European Commission Joint Research Centre, EUR 20855 EN, 2003

**Zianis** D., Muukkonen P., Mäkipää R. and Mencuccini M.: Biomass and stemvolume equations for tree species in Europe. Silva Fennica Monographs 4, 63p, 2005

## 8. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Kennzahlen zu Wilhelmsdorf – **S4**

Tabelle 2 Kennzahlen zu Kuhberg – **S6**

Tabelle 3 Mittelwerte und Standardabweichung der Kennzahlen für die Eiche, unterteilt in klassische Kennzahlen, Kennzahlen nach Assmann und „komplexe“ Kennzahlen – **S11**

Tabelle 4 Mittelwerte und Standardabweichung der Kennzahlen der Kiefer, unterteilt in klassische Kennzahlen, Kennzahlen nach Assmann und „komplexe“ Kennzahlen – **S12**

Tabelle 5 zeigt die Abweichungen in Prozent der mittleren Kronenkennzahl je Baumart. Verglichen wurde Mischbestand zu Reinbestand. Signifikanzniveau: ***p<0,001, **p<0,01, *p<0,05, n.s: nicht signifikant. – **S12f**

Tabelle 6 direkter Vergleich einer mittleren Kiefer und einer mittleren Eiche im Mischbestand. Höhe (h), Kronenradius (cr), Kronenlänge (cl), Kronenprojektionsfläche (cpa), Mantelfläche der Lichtkrone (sfc), Höhe der breitesten Krone (hbk) und die Höhe des Kronenansatzes. – **S15**

Tabelle 7 Ergebnisse der Levene – Testung; Signifikanzniveau: ***p<0,001, **p<0,01, *p<0,05, n.s: nicht signifikant. – **S15**

Tabelle 8 $p\eta^2$– Werte der unabhängigen Variable (species) und der Kovariten für die Baumart Kiefer Signifikanzniveau: ***p<0,001, **p<0,01, *p<0,05, n.s: nicht signifikant. – **S16**

Tabelle 9 $p\eta^2$– Werte der unabhängigen Variable (species) und der Kovariten für die Baumart Eiche Signifikanzniveau: ***p<0,001, **p<0,01, *p<0,05, n.s: nicht signifikant. – **S16**

Tabelle 10 Zusammenfassung der allometrischen Beziehungen der Kronenparameter in Abhängigkeit des BHD. – **S16f**

Tabelle 11 die Skalierungsexponenten $\alpha_{y,x}$ [slope] und ln(β) [elevation] der eindimensionalen Kennzahlen, die Konfidenzintervalle von α (95%), sowie die Relation von Mischbestand und Reinbestand. Automatisch getestet wurde ob sich die Steigung (slope) von Rein- zu Mischbestand unterscheidet.
Signifikanzniveau: ***p<0,001, **p<0,01, *p<0,05, n.s: nicht signifikant. – **S20f**

Tabelle 12 die Skalierungsexponenten $\alpha_{y,x}$ [slope] und ln(β) [elevation] der zweidimensionalen Kennzahlen, die Konfidenzintervalle von α (95%), sowie die Relation von Mischbestand und Reinbestand. Automatisch getestet wurde ob sich die Steigung (slope) von Rein- zu Mischbestand unterscheidet.
Signifikanzniveau: ***p<0,001, **p<0,01, *p<0,05, n.s: nicht signifikant. – **S21**

Tabelle 13 die Skalierungsexponenten $\alpha_{y,x}$ [slope] und ln(β) [elevation] der dreidimensionalen Kennzahlen, die Konfidenzintervalle von α (95%), sowie die Relation von Mischbestand und Reinbestand. Automatisch getestet wurde ob sich die Steigung (slope) von Rein- zu Mischbestand unterscheidet.
Signifikanzniveau: ***p<0,001, **p<0,01, *p<0,05, n.s: nicht signifikant.
Schaftholzvolumen (v) – **S22**

## 9. Abbildungsverzeichnis


Abbildung 1 der Bestand „Wilhelmsdorf“, zeigt die Baumarten skaliert nach dem BHD. Die drei Rechtecke markieren die Probeflächen „Eiche rein“ oben, der Mischbestand in der Mitte und „Kiefer rein“ unten. – **S4**

Abbildung 2 zeigt die Bestockung und Abmaß der drei Probeflächen, skaliert nach dem BHD. Die Legende dazu ist in Abb.1 ersichtlich. – **S5**

Abbildung 3 der Bestand „Kuhberg“, zeigt die Baumarten skaliert nach dem BHD. Die drei Rechtecke markieren die Probeflächen „Eiche rein“ oben, der Mischbestand rechts unten und „Kiefer rein“ links unten. – **S5**

Abbildung 4 zeigt die Bestockung und Abmaß der drei Probeflächen, skaliert nach dem BHD. Die Legende dazu ist in Abb.3 ersichtlich. – **S6**

Abbildung 5 schematische Erläuterung der gemessenen Kronenparameter – **S8**

Abbildung 6 die Baumhöhen und die Brusthöhendurchmesser (dbh) im direkten Vergleich. – **S13**

Abbildung 7 die Kronenansatzhöhe (can) und die Höhe der breitesten Krone (hbk) im direkten Vergleich – **S13**

Abbildung 8 die Kronenprojektionsfläche (cpa) und die Lichtkronenschirmfläche (sfc) im direkten Vergleich. – **S14**

Abbildung 9 die Kronenlänge (cl) und die Kronenradien (cr) im direkten Vergleich. – **S14**

Abbildung 10 die Lichtkronenlängen (lkr) und die Schattenkronenlängen (skr) im direkten Vergleich. – **S14**

Abbildung 11 zeigt die Höhe des Kronenansatzes der Kiefer und der Eiche getrennt nach Rein- und Mischbestand. Die Ausgleichslinien wurden mit einem nicht linearen Modell erstellt.
Die mittleren BHD für Ei bzw. Ei|Ki lauten 36,4 bzw. 31,9 cm. Die mittleren BHD für Ki bzw. Ki|Ei lauten 25,2 bzw. 28,6 cm. – **S17**

Abbildung 12 zeigt die Kronenprojektionsflächen der Kiefer und der Eiche getrennt nach Rein- und Mischbestand. Die Ausgleichslinien wurden mit einem nicht linearen Modell erstellt.
Die mittleren BHD für Ei bzw. Ei|Ki lauten 36,4 bzw. 31,9 cm. Die mittleren BHD für Ki bzw. Ki|Ei lauten 25,2 bzw. 28,6 cm. – **S18**

Abbildung 13 zeigt die Kronenlängen der Kiefer und der Eiche getrennt nach Rein- und Mischbestand. Die Ausgleichslinien wurden mit einem nicht linearen Modell erstellt.
Die mittleren BHD für Ei bzw. Ei|Ki lauten 36,4 bzw. 31,9 cm. Die mittleren BHD für Ki bzw. Ki|Ei lauten 25,2 bzw. 28,6 cm. – **S18**

Abbildung 14 zeigt die Kronenradien der Kiefer und der Eiche getrennt nach Rein- und Mischbestand. Die Ausgleichslinien wurden mit einem nicht linearen Modell erstellt.
Die mittleren BHD für Ei bzw. Ei|Ki lauten 36,4 bzw. 31,9 cm. Die mittleren BHD für Ki bzw. Ki|Ei lauten 25,2 bzw. 28,6 cm. – **19**

Abbildung 15 zeigt die Höhe der breitesten Krone der Kiefer und der Eiche getrennt nach Rein- und Mischbestand. Die Ausgleichslinien wurden mit einem nicht linearen Modell erstellt.
Die mittleren BHD für Ei bzw. Ei|Ki lauten 36,4 bzw. 31,9 cm. Die mittleren BHD für Ki bzw. Ki|Ei lauten 25,2 bzw. 28,6 cm. – **S20f**

Abbildung 16 zeigt die Mantelfläche der Lichtkronen der Kiefer und der Eiche getrennt nach Rein- und Mischbestand. Die Ausgleichslinien wurden mit einem nicht linearen Modell erstellt.
Die mittleren BHD für Ei bzw. Ei|Ki lauten 36,4 bzw. 31,9 cm. Die mittleren BHD für Ki bzw. Ki|Ei lauten 25,2 bzw. 28,6 cm. – **S20**

Abbildung 17 zeigt die Länge der Lichtkronen der Kiefer und der Eiche getrennt nach Rein- und Mischbestand. Die Ausgleichslinien wurden mit einem nicht linearen Modell erstellt.
Die mittleren BHD für Ei bzw. Ei|Ki lauten 36,4 bzw. 31,9 cm. Die mittleren BHD für Ki bzw. Ki|Ei lauten 25,2 bzw. 28,6 cm. – **S34**

Abbildung 18 zeigt die Plots zu den berechneten Skalierungsexponenten (durch das Paket „smatr“) für die Kiefer; Reinbestand (gelb) Mischbestand (blau). – **S38f**

Abbildung 19 zeigt die Plots zu den berechneten Skalierungsexponenten (durch das Paket „smatr“) für die Eiche; Reinbestand (gelb) Mischbestand (blau). – **S44f**

# 10. Anhang

## 10.1 Deskriptive Statistiken der einzelnen Triplets für Kiefer und Eiche

### Standort Kuhberg

| Kuhberg | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **komplexe Kennzahlen** | hbk [m] | phbk [%] | cpa [m²] | vc [m³] | sfc [m²] |
| **Eiche Misch** | 14,8 ±3,26 | 77,6 ±7,56 | 21,3 ±18,6 | 140,0 ±165,0 | 41,0 ±30,2 |
| **Kiefer Misch** | 16,1 ±1,49 | 82,5 ±5,43 | 10,2 ±5,26 | 49,0 ±31,9 | 22,0 ±9,79 |
| **Eiche Rein** | 17,5 ±1,92 | 81,7 ±8,58 | 38,3 ±15,0 | 214,0 ±111,0 | 58,2 ±23,8 |
| **Kiefer Rein** | 16,3 ±1,61 | 84,4 ±6,32 | 8,06 ±4,60 | 34,1 ±28,4 | 17,9 ±10,7 |

| Kuhberg | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Assmann´sche Kennzahlen** | cr [m] | cper [%] | pl | aus |
| **Eiche Misch** | 2,41 ±0,991 | 43,6 ±9,63 | 57,6 ±12,98 | 16,4 ±4,18 |
| **Kiefer Misch** | 1,74 ±0,447 | 34,3 ±8,29 | 53,6 ±12,92 | 13,7 ±2,31 |
| **Eiche Rein** | 3,42 ±0,704 | 40,1 ±9,41 | 82,4 ±20,0 | 18,0 ±2,15 |
| **Kiefer Rein** | 1,54 ±0,429 | 27,5 ±7,53 | 60,8 ±19,66 | 13,4 ±2,29 |

| Kuhberg | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **klassische Kennzahlen** | dbh [cm] | h [m] | cl [m] | can [m] | h/d |
| **Eiche Misch** | 29,6 ±10,5 | 19,1 ±3,61 | 8,36 ±2,56 | 10,7 ±2,59 | 68,5 ±14,9 |
| **Kiefer Misch** | 25,5 ±0,0460 | 19,6 ±1,62 | 6,77 ±1,91 | 12,8 ±1,57 | 78,8 ±12,9 |
| **Eiche Rein** | 37,8 ±0,0549 | 21,5 ±1,02 | 8,62 ±2,13 | 12,8 ±2,04 | 57,8 ±8,20 |
| **Kiefer Rein** | 23,0 ±0,0463 | 19,4 ±1,55 | 5,38 ±1,61 | 14,0 ±1,49 | 87,0 ±13,9 |

### Standort Wilhelmsdorf

| Wilhelmsdorf | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **klassische Kennzahlen** | dbh [cm] | h [m] | cl [m] | can [m] | h/d |
| **Eiche Misch** | 34,1 ±11,2 | 18,4 ±3,3 | 6,72 ±2,4 | 11,7 ±2,7 | 57,0 ±12,6 |
| **Kiefer Misch** | 32,0 ±0,0588 | 19,7 ±1,87 | 5,50 ±1,48 | 14,2 ±1,74 | 63,5 ±10,6 |
| **Eiche Rein** | 35,5 ±0,086 | 18,3 ±2,61 | 7,10 ±2,14 | 11,2 ±2,2 | 54,3 ±14,8 |
| **Kiefer Rein** | 27,6 ±0,0429 | 19,8 ±1,74 | 4,89 ±1,30 | 14,9 ±1,64 | 72,9 ±10,6 |

| Wilhelmsdorf | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Assmann´sche Kennzahlen** | cr [m] | cper [%] | pl | aus |
| **Eiche Misch** | 3,29 ±1,42 | 36,4 ±11,1 | 104,2 ±63,6 | 19,6 ±7,52 |
| **Kiefer Misch** | 2,41 ±0,599 | 27,8 ±6,53 | 90,8 ±24,4 | 15,3 ±3,66 |
| **Eiche Rein** | 3,37 ±1,01 | 38,5 ±9,55 | 99,4 ±32 | 19,0 ±3,34 |
| **Kiefer Rein** | 2,02 ±0,734 | 24,7 ±5,90 | 86,4 ±33,4 | 14,6 ±5,81 |

| Wilhelmsdorf | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **komplexe Kennzahlen** | hbk [m] | phbk [%] | cpa [m²] | vc [m³] | sfc [m²] |
| **Eiche Misch** | 14,8 ±3,20 | 80,3 ±9,82 | 40,2 ±34,7 | 218,0 ±259,0 | 58,5 ±44,4 |
| **Kiefer Misch** | 16,3 ±2,17 | 82,4 ±6,64 | 19,3 ±8,77 | 86,6 ±57,6 | 34,1 ±16,9 |
| **Eiche Rein** | 14,6 ±2,47 | 79,8 ±7,83 | 38,9 ±22,2 | 205,0 ±155,0 | 57,5 ±31,8 |
| **Kiefer Rein** | 17,1 ±1,60 | 86,8 ±5,42 | 14,5 ±16,5 | 47,9 ±34,7 | 23,3 ±17,7 |

## 10.2 Allometrische Modelle

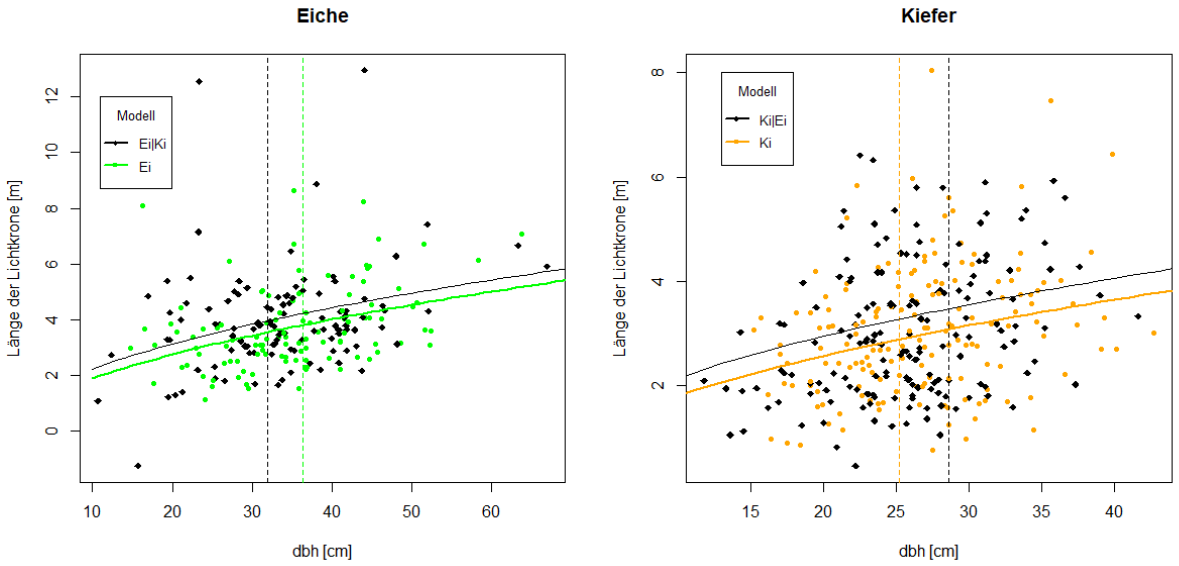



Abbildung 17 zeigt die Länge der Lichtkronen der Kiefer und der Eiche getrennt nach Rein- und Mischbestand. Die Ausgleichslinien wurden mit einem nicht linearen Modell erstellt.
Die mittleren BHD für Ei bzw. Ei|Ki lauten 36,4 bzw. 31,9 cm. Die mittleren BHD für Ki bzw. Ki|Ei lauten 25,2 bzw. 28,6 cm. – **S18**

a|b|R²: Ei_m:0,0682|2,349***|0,54 Ei_r:0,0199|2,657***|0,20;
Ki_m:0,1423|2,040***|0,23 Ki_r:0,1207|2,018***|0,18

## 10.3 Kovarianzanalyse Kiefer

**Kiefer**:

```
Kiefer Mischbestand (N = 92)
> summary(h)
   Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
   13.2    18.7    19.7    19.7    20.7    23.2
```

```
> summary(dbh_m)
   Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
   0.118  0.236   0.283   0.286   0.341   0.670

Kiefer Reinbestand (N = 231)
> summary(rh)
   Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
   14.2    18.7    19.8    19.6    20.7    23.4
> summary(rdbh_m)
   Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
  0.133   0.218   0.254   0.252   0.286   0.391

pander(car::Anova(aov(cl ~ species + dbh + h, data = Kiefer), type = "III"))

-------------------------------------------------------------------------
              Sum Sq   Df   F value    Pr(>F)      Eta²       pEta²
----------------- -------- ----- --------- ------------------------------
 **(Intercept)**     16      1     8.292    0.004252

   **species**     44.42     1     23.02    2.463e-06   0.0506      0.0673

     **dbh**       9.914     1     5.138     0.02407    0.0113      0.0159

      **h**         107      1     55.45    9.015e-13   0.1218      0.1481

  **Residuals**    615.5    319     NA         NA
-------------------------------------------------------------------------

Table: Anova Table (Type III tests)

> pander(summary.lm(aov(cl ~ species + dbh + h, data = Kiefer)))

-------------------------------------------------------------------------------
              Estimate   Std. Error   t value   Pr(>|t|)   Eta²     pEta²
----------------- ---------- ------------ --------- ------------------------------
 **(Intercept)**    -2.65       0.9203      -2.88    0.004252

 **speciesKi_r**   -0.8619      0.1796     -4.798    2.463e-06  0.0506   0.0673

     **dbh**        3.744       1.652       2.267     0.02407   0.0113   0.0159

      **h**         0.394      0.05291      7.447    9.015e-13  0.1218   0.1481
-------------------------------------------------------------------------------


-----------------------------------------------------------------
 Observations   Residual Std. Error   $R^2$    Adjusted $R^2$
-------------- --------------------- -------- ----------------
     323               1.389          0.2993       0.2927
-----------------------------------------------------------------

Table: Fitting linear model: cl ~ species + dbh + h
```

```
> pander(summary.lm(aov(cr ~ species + dbh + h, data = Kiefer)))

-------------------------------------------------------------------------------
              Estimate   Std. Error   t value   Pr(>|t|)    Eta²       pEta²
----------------- ---------- ------------ --------- ------------------------------
 **(Intercept)**    0.9181      0.3066      2.995    0.002964

 **speciesKi_r**   0.005268    0.05984     0.08803    0.9299

     **dbh**         8.92       0.5503      16.21    1.59e-43    0.419     0.452

      **h**        -0.07158    0.01763     -4.061    6.165e-05   0.0263    0.0491
-------------------------------------------------------------------------------


-----------------------------------------------------------------
 Observations   Residual Std. Error   $R^2$    Adjusted $R^2$
-------------- --------------------- -------- ----------------
     323               0.4628         0.4914       0.4866
-----------------------------------------------------------------

Table: Fitting linear model: cr ~ species + dbh + h

> pander(car::Anova(aov(cr ~ species + dbh + h, data = Kiefer), type = "III"))

-------------------------------------------------------------------------
              Sum Sq   Df   F value    Pr(>F)     Eta²      pEta²
----------------- -------- ----- --------- ------------------------------
 **(Intercept)**    1.92     1     8.967    0.002964

   **species**     0.00166   1    0.007749   0.9299   <0.0001   <0.0001
```

```
     **dbh**        56.27     1     262.7     1.59e-43   0.419     0.452
      **h**         3.531     1     16.49     6.165e-05  0.0263    0.0491
  **Residuals**     68.32    319     NA          NA
-----------------------------------------------------------------------------
Table: Anova Table (Type III tests)
```

```
> pander(car::Anova(aov(hbk ~ species + dbh + h, data = Kiefer), type = "III"))
-----------------------------------------------------------------------------
       bsp         Sum Sq   Df   F value    Pr(>F)      Eta²      pEta²
----------------- -------- ----- --------- ------------------------------
 **(Intercept)**   6.189     1     4.514     0.03439     NA        NA
   **species**     14.75     1     10.75    0.001156     0.0155    0.0326
     **dbh**       4.708     1     3.434     0.0648      0.00495   0.0106
      **h**        416.9     1     304.1    2.683e-48    0.438     0.488
  **Residuals**    437.4    319     NA         NA        NA        NA
-----------------------------------------------------------------------------
Table: Anova Table (Type III tests)
```

```
> pander(summary.lm(aov(hbk ~ species + dbh + h, data = Kiefer)))
-------------------------------------------------------------------------------
              Estimate   Std. Error   t value   Pr(>|t|)     Eta²      pEta²
----------------- ---------- ------------ --------- ------------------------------
 **(Intercept)**    1.648       0.7758      2.125     0.03439
 **speciesKi_r**    0.4966      0.1514      3.279    0.001156    0.0155    0.0326
     **dbh**        -2.58       1.392      -1.853     0.0648     0.00495   0.0106
      **h**         0.7778     0.04461      17.44    2.683e-48   0.438     0.488
-------------------------------------------------------------------------------

-------------------------------------------------------------
 Observations   Residual Std. Error   $R^2$    Adjusted $R^2$
-------------- --------------------- -------- ----------------
     323              1.171           0.5405       0.5362
-------------------------------------------------------------
Table: Fitting linear model: hbk ~ species + dbh + h
```

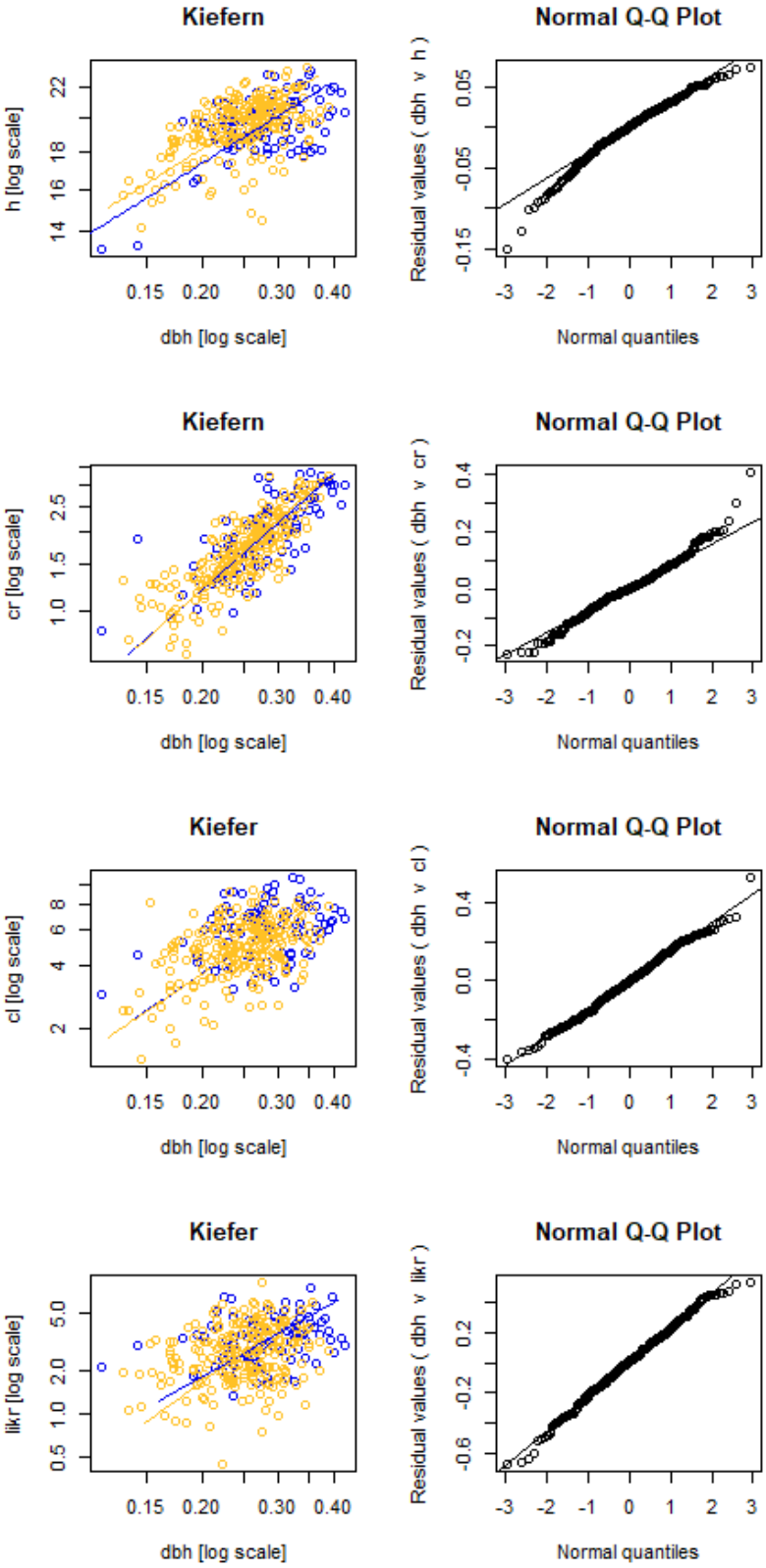
```
> pander(summary.lm(aov(cpa ~ species + dbh + h, data = Kiefer)))
-------------------------------------------------------------------------------
              Estimate   Std. Error   t value   Pr(>|t|)     Eta²      pEta²
----------------- ---------- ------------ --------- ------------------------------
 **(Intercept)**    5.922       6.672      0.8876     0.3754
 **speciesKi_r**    0.1908      1.302      0.1465     0.8836     <0.0001   <0.0001
     **dbh**        109.4       11.97       9.138    7.565e-18    0.202     0.207
      **h**         -1.153      0.3836     -3.006    0.002859     0.0219    0.0275
-------------------------------------------------------------------------------

-------------------------------------------------------------
 Observations   Residual Std. Error   $R^2$    Adjusted $R^2$
-------------- --------------------- -------- ----------------
     323              10.07           0.2274       0.2202
-------------------------------------------------------------
Table: Fitting linear model: cpa ~ species + dbh + h
```

```
> pander(car::Anova(aov(cpa ~ species + dbh + h, data = Kiefer), type = "III"))
-----------------------------------------------------------------------------
              Sum Sq   Df   F value    Pr(>F)      Eta²      pEta²
----------------- -------- ----- --------- ------------------------------
 **(Intercept)**   79.89     1    0.7879     0.3754
   **species**     2.177     1    0.02147    0.8836     <0.0001   <0.0001
     **dbh**        8468     1     83.51    7.565e-18    0.202     0.207
      **h**        916.1     1     9.035    0.002859     0.029     0.0275
  **Residuals**    32346    319    NA         NA
```

```
-----------------------------------------------------------------------
Table: Anova Table (Type III tests)

> pander(summary.lm(aov(sfc ~ species + dbh + h, data = Kiefer)))

-------------------------------------------------------------------------------
              Estimate   Std. Error   t value   Pr(>|t|)     Eta²      pEta²
----------------- ---------- ------------ --------- ------------------------------
 **(Intercept)**    -8.074      8.322      -0.9702    0.3327
 **speciesKi_r**    -2.385      1.624      -1.469     0.1429    0.00460   0.00672
     **dbh**        148.4       14.94       9.935    1.919e-20  0.213     0.236
      **h**        -0.3342      0.4785     -0.6985    0.4854    0.00105   0.00153
-------------------------------------------------------------------------------

-------------------------------------------------------------
 Observations   Residual Std. Error   $R^2$   Adjusted $R^2$
-------------- --------------------- ------- ----------------
     323               12.56          0.311       0.3045
-------------------------------------------------------------

Table: Fitting linear model: sfc ~ species + dbh + h
-
> pander(car::Anova(aov(sfc ~ species + dbh + h, data = Kiefer), type = "III"))

-------------------------------------------------------------------------------
              Sum Sq   Df    F value    Pr(>F)       Eta²      pEta²
----------------- -------- ----- --------- ------------------------------------
 **(Intercept)**   148.5     1    0.9414     0.3327       NA        NA
   **species**     340.2     1     2.157     0.1429       0.00466   0.00672
     **dbh**       15574     1     98.71    1.919e-20     0.21322   0.23632
      **h**        76.97     1    0.4878     0.4854       0.00105   0.00153
  **Residuals**    50327    319     NA         NA         NA        NA
-------------------------------------------------------------------------------

Table: Anova Table (Type III tests)

> pander(car::Anova(aov(can ~ species + dbh + h, data = Kiefer), type = "III"))

-----------------------------------------------------------------------
              Sum Sq   Df    F value    Pr(>F)    Eta²         pEta²
----------------- -------- ----- --------- ---------- ------------------------
 **(Intercept)**     16      1     8.292    0.004252  NA NA
   **species**     44.42     1     23.02    2.463e-06     0.0465   0.0673
     **dbh**       9.914     1     5.138     0.02407  0.0104       0.0159
      **h**        253.1     1     131.2    1.14e-25  0.265        0.2914
  **Residuals**    615.5    319     NA         NA     NA NA
-----------------------------------------------------------------------

Table: Anova Table (Type III tests)
> pander(summary.lm(aov(can ~ species + dbh + h, data = Kiefer)))

-------------------------------------------------------------
              Estimate   Std. Error   t value   Pr(>|t|)
----------------- ---------- ------------ --------- -----------
 **(Intercept)**     2.65       0.9203      2.88     0.004252
 **speciesKi_r**    0.8619      0.1796      4.798    2.463e-06
     **dbh**        -3.744      1.652      -2.267     0.02407
      **h**         0.606      0.05291     11.45    1.14e-25
-------------------------------------------------------------

-------------------------------------------------------------
 Observations   Residual Std. Error   $R^2$   Adjusted $R^2$
-------------- --------------------- ------- ----------------
     323               1.389          0.3556       0.3495
-------------------------------------------------------------
```

```
Table: Fitting linear model: can ~ species + dbh + h
```

## 10.4 Skalierung Kiefer (package “smatr”)



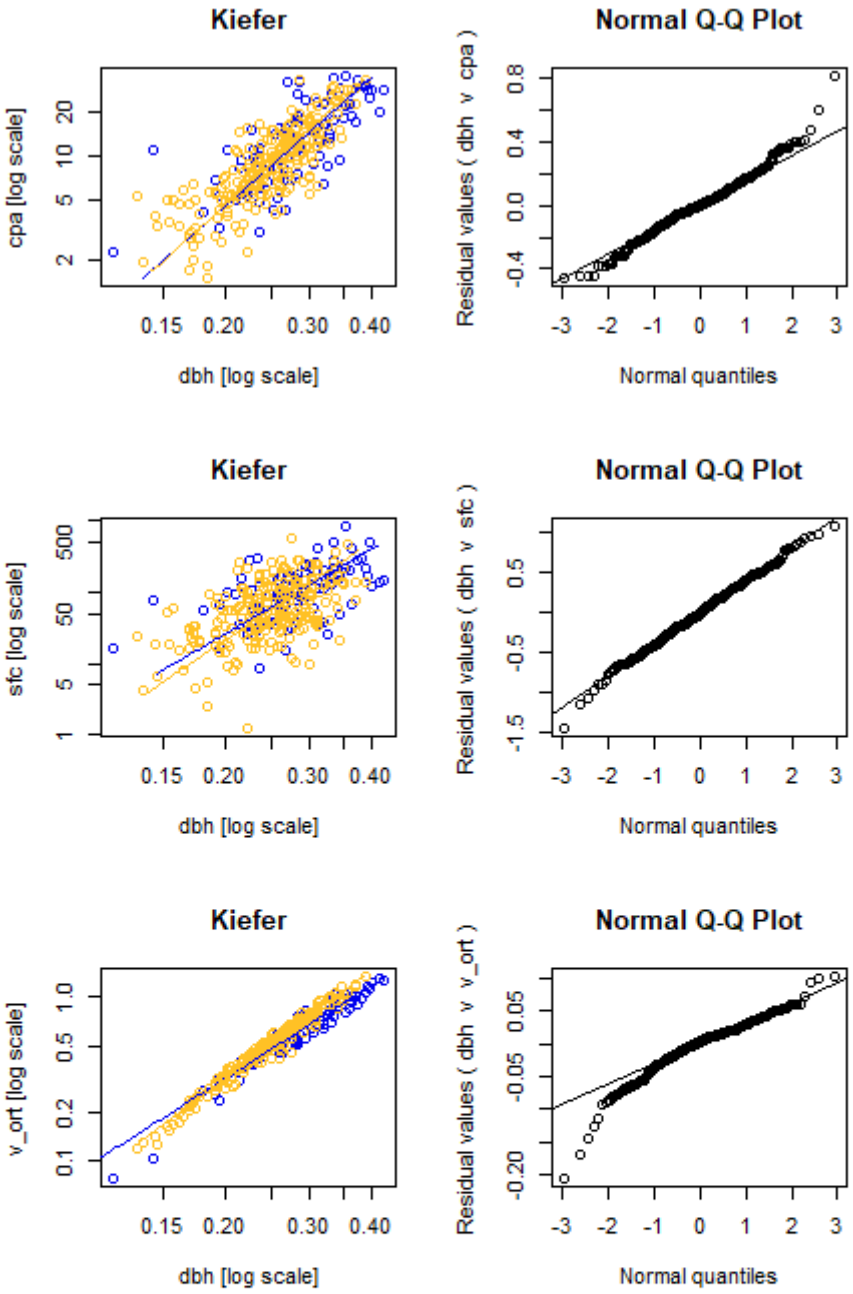



Abbildung 18 zeigt die Plots zu den berechneten Skalierungsexponenten (durch das Paket „smatr“) für die Kiefer; Reinbestand (gelb) Mischbestand (blau)

## 10.5 Kovarianzanalyse Eiche

### Eiche:

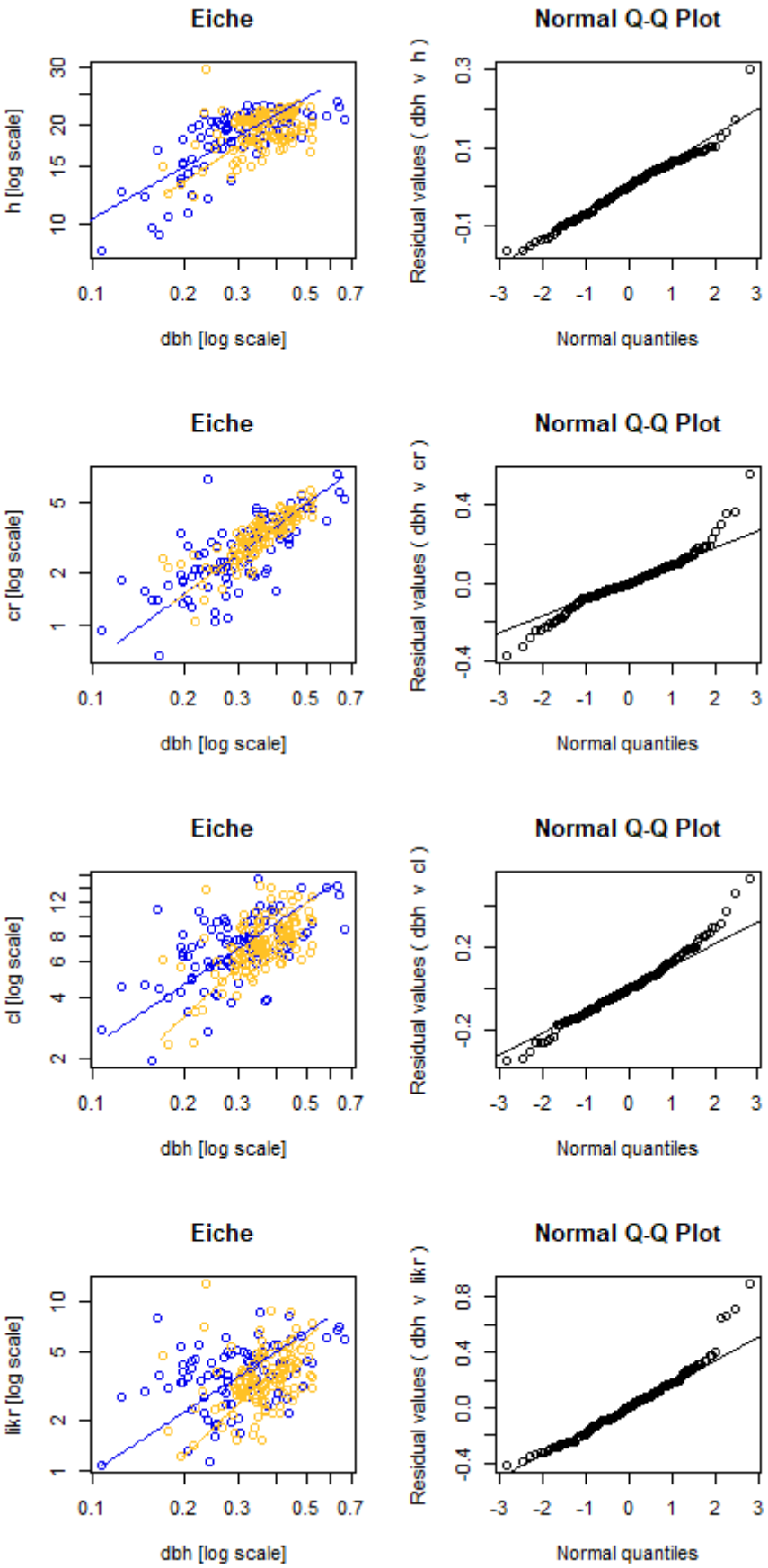
```
Eiche Mischbestand (N = 97)
> summary(h)
   Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
   8.25   17.42   19.57   18.72   21.36   23.65
> summary(dbhcm)
   Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
   10.7    24.1    31.3    31.9    38.2    67.0

Eiche Reinbestand (N = 119)
> summary(rh)
   Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
   12.1    17.9    19.9    19.6    21.6    29.6

> summary(rdbhcm)
   Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
   17.0    31.3    35.9    36.4    41.8    52.4


pander(car::Anova(aov(cl ~ species + dbh_sq + h, data = Eiche), type = "III"))

-----------------------------------------------------
               Sum Sq   Df    F value    Pr(>F)
----------------- -------- ----- --------- -----------
 **(Intercept)**    2.78     1    0.8343     0.3621

   **species**     7.715     1     2.315     0.1296

   **dbh_sq**      89.49     1     26.85    5.106e-07

      **h**        223.1     1     66.93    2.579e-14

  **Residuals**    706.5    212     NA         NA
-----------------------------------------------------

Table: Anova Table (Type III tests)

Call:
lm(formula = cl ~ species + dbh_sq + h)

Residuals:
    Min      1Q  Median      3Q     Max
-4.4783 -1.2175 -0.2760  0.9837  6.9402

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -0.73844    0.80847  -0.913    0.362
speciesEi_r -0.38663    0.25411  -1.522    0.130
dbh_sq      10.50868    2.02798   5.182 5.11e-07 ***
h            0.37701    0.04608   8.181 2.58e-14 ***
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Residual standard error: 1.826 on 212 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.4378, Adjusted R-squared:  0.4298
F-statistic: 55.02 on 3 and 212 DF,  p-value: < 2.2e-16

> etaSquared(fit1, type = 3, anova = FALSE)
            eta.sq eta.sq.part
species 0.00613957   0.0108017
dbh_sq  0.07121370   0.1124196
h       0.17750008   0.2399461

> pander(car::Anova(aov(cr_sq ~ species + dbh_sq + h, data = Eiche), type = "III"))

-----------------------------------------------------
               Sum Sq   Df    F value    Pr(>F)
----------------- -------- ----- --------- -----------
 **(Intercept)**   260.4     1     10.84    0.001162

   **species**      11.8     1    0.4911     0.4842

   **dbh_sq**       7399     1      308     3.497e-43

      **h**        299.6     1     12.47    0.0005066

  **Residuals**     5092    212     NA         NA
-----------------------------------------------------

Table: Anova Table (Type III tests)

> fit1<-lm(cr_sq ~ species + dbh_sq + h)
> summary(fit1)
```

```
Call:
lm(formula = cr_sq ~ species + dbh_sq + h)

Residuals:
    Min      1Q  Median      3Q     Max 
-14.031  -2.417  -0.645   2.129  39.832 

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)    
(Intercept)   7.1470     2.1705   3.293 0.001162 ** 
speciesEi_r   0.4781     0.6822   0.701 0.484195    
dbh_sq       95.5538     5.4445  17.551  < 2e-16 ***
h            -0.4369     0.1237  -3.532 0.000507 ***
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Residual standard error: 4.901 on 212 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.619,	Adjusted R-squared:  0.6136 
F-statistic: 114.8 on 3 and 212 DF,  p-value: < 2.2e-16

> etaSquared(fit1, type = 3, anova = FALSE)
              eta.sq eta.sq.part
species 0.0008827432 0.002311269
dbh_sq  0.5536415202 0.592327104
h       0.0224186204 0.055565091

pander(car::Anova(aov(hbk ~ species + dbh_sq + h, data = Eiche), type = "III"))

-----------------------------------------------------
              Sum Sq   Df    F value    Pr(>F)
----------------- -------- ----- --------- -----------
 **(Intercept)**    3.05     1     1.241     0.2666

   **species**     6.544     1     2.662     0.1043

   **dbh_sq**      25.17     1     10.24    0.001588

      **h**         1178     1     479.2    2.571e-56

  **Residuals**    521.2    212     NA         NA
-----------------------------------------------------

Table: Anova Table (Type III tests)

> fit1<-lm(hbk ~ species + dbh_sq + h)
> summary(fit1)

Call:
lm(formula = hbk ~ species + dbh_sq + h)

Residuals:
    Min      1Q  Median      3Q     Max 
-8.5461 -0.7010  0.1821  0.9317  3.4519 

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)    
(Intercept) -0.77342    0.69440  -1.114  0.26663    
speciesEi_r  0.35609    0.21826   1.632  0.10426    
dbh_sq      -5.57309    1.74184  -3.200  0.00159 ** 
h            0.86648    0.03958  21.891  < 2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Residual standard error: 1.568 on 212 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.7228,	Adjusted R-squared:  0.7189 
F-statistic: 184.3 on 3 and 212 DF,  p-value: < 2.2e-16

> etaSquared(fit1, type = 3, anova = FALSE)
             eta.sq eta.sq.part
species 0.003480429  0.01240033
dbh_sq  0.013385095  0.04606386
h       0.626565413  0.69328952

pander(car::Anova(aov(cpa ~ species + dbh_sq + h, data = Eiche), type = "III"))

-----------------------------------------------------
              Sum Sq   Df    F value    Pr(>F)
----------------- -------- ----- --------- -----------
 **(Intercept)**    2570     1     10.84    0.001162

   **species**     116.4     1    0.4911     0.4842

   **dbh_sq**      73024     1      308     3.497e-43

      **h**         2957     1     12.47    0.0005066

  **Residuals**    50259    212     NA         NA
```

```
-----------------------------------------------------

Table: Anova Table (Type III tests)

> fit1<-lm(cpa ~ species + dbh_sq + h)
> summary(fit1)

Call:
lm(formula = cpa ~ species + dbh_sq + h)

Residuals:
    Min      1Q  Median      3Q     Max 
-44.080  -7.593  -2.027   6.690 125.134 

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)    
(Intercept)  22.4530     6.8188   3.293 0.001162 ** 
speciesEi_r   1.5020     2.1432   0.701 0.484195    
dbh_sq      300.1911    17.1043  17.551  < 2e-16 ***
h            -1.3727     0.3887  -3.532 0.000507 ***
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Residual standard error: 15.4 on 212 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.619,  Adjusted R-squared:  0.6136 
F-statistic: 114.8 on 3 and 212 DF,  p-value: < 2.2e-16

> etaSquared(fit1, type = 3, anova = FALSE)
              eta.sq eta.sq.part
species 0.0008827432 0.002311269
dbh_sq  0.5536415202 0.592327104
h       0.0224186204 0.055565091

pander(car::Anova(aov(sfc ~ species + dbh_sq + h, data = Eiche), type = "III"))

-----------------------------------------------------
              Sum Sq   Df    F value    Pr(>F)
---------------- -------- ----- --------- -----------
 **(Intercept)**    1982     1     4.165     0.04251

   **species**     55.14     1    0.1159     0.7339

   **dbh_sq**      122998    1     258.5    1.471e-38

      **h**        898.4     1     1.888     0.1709

  **Residuals**    100875   212     NA         NA
-----------------------------------------------------

Table: Anova Table (Type III tests)

> fit1<-lm(sfc ~ species + dbh_sq + h)
> summary(fit1)

Call:
lm(formula = sfc ~ species + dbh_sq + h)

Residuals:
    Min      1Q  Median      3Q     Max 
-51.259 -11.883  -2.749   8.166 121.458 

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)    
(Intercept)  19.7143     9.6603   2.041   0.0425 *  
speciesEi_r  -1.0337     3.0363  -0.340   0.7339    
dbh_sq      389.5945    24.2319  16.078   <2e-16 ***
h            -0.7567     0.5507  -1.374   0.1709    
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Residual standard error: 21.81 on 212 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.5919, Adjusted R-squared:  0.5861 
F-statistic: 102.5 on 3 and 212 DF,  p-value: < 2.2e-16

> etaSquared(fit1, type = 3, anova = FALSE)
              eta.sq  eta.sq.part
species 0.0002231007 0.0005463665
dbh_sq  0.4976150215 0.5494093976
h       0.0036348314 0.0088278276

pander(car::Anova(aov(can ~ species + dbh_sq + h, data = Eiche), type = "III"))

-----------------------------------------------------
              Sum Sq   Df    F value    Pr(>F)
---------------- -------- ----- --------- -----------
 **(Intercept)**    2.78     1    0.8343     0.3621

   **species**     7.715     1     2.315     0.1296
```

```
   **dbh_sq**      89.49     1     26.85    5.106e-07

      **h**         609      1     182.7    1.927e-30

  **Residuals**    706.5    212     NA         NA
-----------------------------------------------------

Table: Anova Table (Type III tests)

> fit1<-lm(can ~ species + dbh_sq + h)
> summary(fit1)

Call:
lm(formula = can ~ species + dbh_sq + h)

Residuals:
    Min      1Q  Median      3Q     Max
-6.9402 -0.9837  0.2760  1.2175  4.4783

Coefficients:
             Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   0.73844    0.80847   0.913    0.362
speciesEi_r   0.38663    0.25411   1.522    0.130
dbh_sq      -10.50868    2.02798  -5.182 5.11e-07 ***
h             0.62299    0.04608  13.518  < 2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Residual standard error: 1.826 on 212 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.4733, Adjusted R-squared:  0.4659
F-statistic: 63.51 on 3 and 212 DF,  p-value: < 2.2e-16

> etaSquared(fit1, type = 3, anova = FALSE)
             eta.sq eta.sq.part
species 0.005751216   0.0108017
dbh_sq  0.066709130   0.1124196
h       0.454012461   0.4629486
```

## 10.6 Skalierung Eiche (package „smatr“)



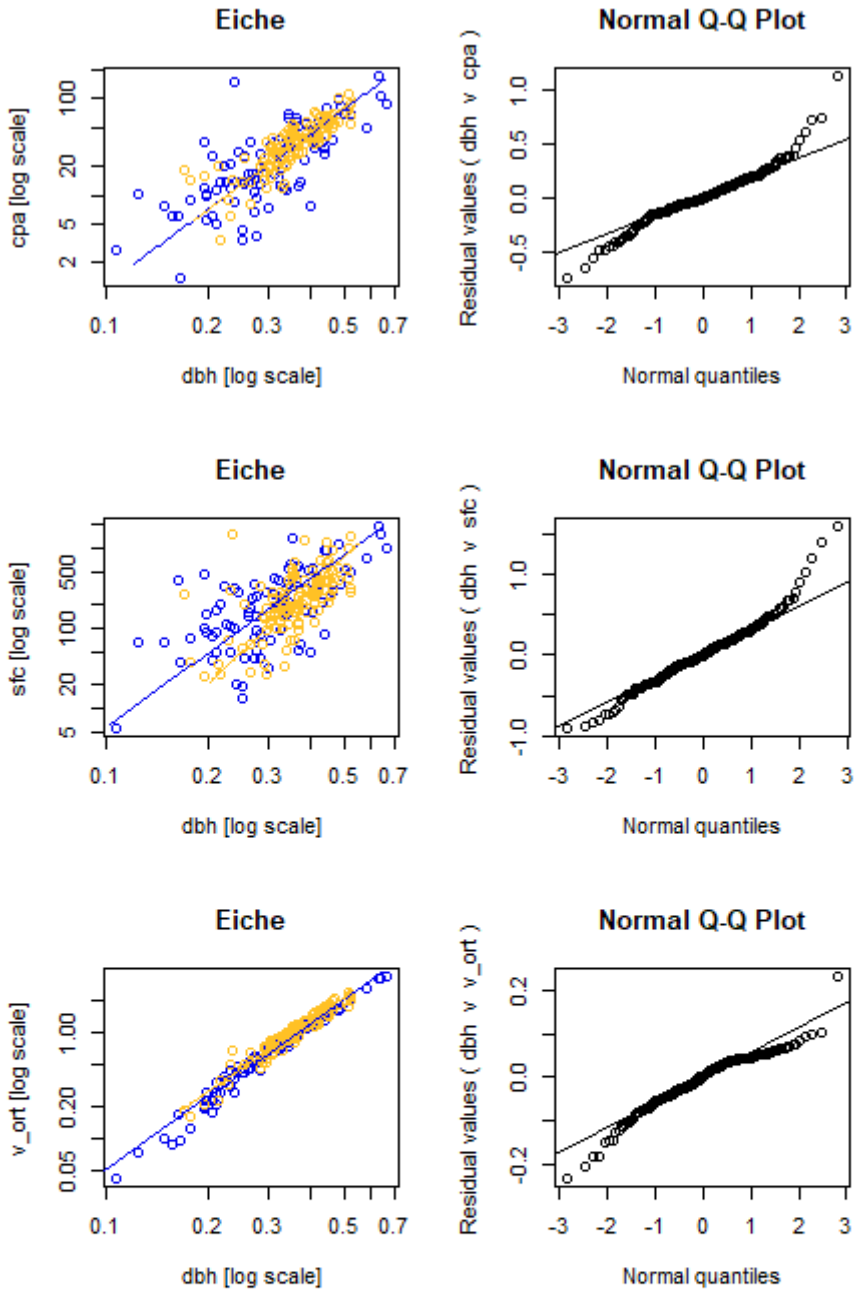



Abbildung 19 zeigt die Plots zu den berechneten Skalierungsexponenten (durch das Paket „smatr“) für die Eiche; Reinbestand (gelb) Mischbestand (blau)