

# Wachstum von Fichte und Lärche im Rein- und Mischbestand im Vinschgau

als

Masterarbeit der Studienfakultät für Forstwissenschaft  
und Ressourcenmanagement der Technischen Universität München  
und  
am Department für Wald- und Bodenwissenschaften  
der Universität für Bodenkultur Wien

vorgelegt von

**Tassilo Odysseus Heller**

Die Masterarbeit wurde angefertigt am  
Lehrstuhl für Waldwachstumskunde  
der Technischen Universität München  
Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, 85354 Freising und  
am Institut für Waldwachstum der Universität für Bodenkultur Wien  
Peter-Jordan-Straße 82, 1190 Wien

Betreuer der Arbeit: Prof. Dr. Dr. h.c. **Hans Pretzsch**,  
Em. O. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. **Hubert Sterba**

Weitere Betreuer: Enno Uhl, Michael Heym, Dipl.-Ing. Gerald Dirnberger und Dipl.-Ing. Helga Fellner

Freising & Wien, im Februar 2016

## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>2</b>
<b>Abbildungs- und Tabellenverzeichnis</b>	<b>3</b>
<b>1 Zusammenfassung</b>	<b>6</b>
<b>2 Abstract</b>	<b>8</b>
<b>3 Einleitung und Fragestellung</b>	<b>10</b>
<b>4 Material und Methoden</b>	<b>13</b>
4.1 Untersuchungsansatz .....	13
4.2 Material. ....	15
4.2.1 Standörtliche Charakterisierung des Versuchsgebietes .....	15
4.2.2 Klimatische Charakterisierung des Versuchsgebietes .....	18
4.3 Methoden.....	21
4.3.1 Ertragskundliche Datenerhebung .....	21
4.3.2 Bearbeitung der Klimadaten.....	22
4.3.3 Bearbeitung der Zuwachsmessreihen.....	23
4.3.4 Bearbeitung der ertragskundlichen Daten .....	25
4.3.5 Berechnung der Mischungsanteile und der erwarteten Produktivität .....	29
4.3.6 Berechnung der Kennzahlen zur Stressreaktion nach Lloret et al. (2011) .....	31
4.3.7 Statistische Testverfahren.....	32
4.3.8 Verwendete Software .....	33
<b>5 Ergebnisse</b>	<b>34</b>
5.1 Volumenzuwächse im Rein- und Mischbestand - bestandesweise Auswertung .....	34
5.2 Variabilität von Mischungseffekten bei variierenden Wuchsbedingungen .....	37
5.2.1 Variabilität der Fichte im Rein- und Mischbestand.....	37
5.2.2 Variabilität der Lärche im Rein- und Mischbestand.....	39
5.3 Zuwachsvergleich der Rein- und Mischbestände in den Trockenjahren 1976 und 1980 - Auswertung der Einzelbaumreaktion nach Lloret et al. (2011) .....	41
<b>6 Diskussion</b>	<b>50</b>
6.1 Diskussion des Materials und der Methodik .....	50
6.2 Volumenzuwächse im Rein- und Mischbestand .....	53
6.3 Variabilität von Mischungseffekten bei variierenden Wuchsbedingungen .....	55
6.4 Zuwachsvergleich der Rein- und Mischbestände in Trockenjahren.....	56
6.5 Ökologische Bewertung der Mischung aus Fichte und Lärche .....	59
<b>7 Literaturverzeichnis</b>	<b>61</b>
<b>8 Anhang</b>	<b>66</b>
<b>9 Eidesstattliche Erklärung zur selbstständigen Anfertigung der Arbeit</b>	<b>74</b>
<i>Danksagung</i>	<b>75</b>

## Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung der optimierten Wuchsraumbesetzung und Ausnutzung der essentiellen Ressourcen Wasser, Nährstoffe, Licht und Wuchsraum in gemischten Beständen. ....	11
Abbildung 2: Design der Versuchspartellen (inkl. Nomenklatur): Jeweils ein Fichten-Reinbestand, ein Lärchen-Reinbestand und ein Fichten-Lärchen-Mischbestand bildete ein s.g. Triplet. Am Nördersberg wurden drei Triplets an drei verschiedenen Standorten angelegt (vgl. ebenfalls Anhang, Abb. 20).....	13
Abbildung 3: Verbreitung der tiefsubalpinen Schlusswaldgesellschaften im Alpenraum (verändert nach Mayer und Ott 1991). Roter Punkt: Lage des Versuchsgebietes Schlanders im Vinschgau.....	15
Abbildung 4: Gesamtübersicht Vinschgau inkl. begrenzender Gebirgsmassive. Roter Punkt: Lage der Versuchspartellen am Nördersberg. ....	16
Abbildung 5: Klimadiagramm der hydrologischen und meteorologischen Messstelle Schlanders. Die blauen Säulen stellen die durchschnittlichen Niederschlagsmengen, die rote Linie die durchschnittliche Temperatur in den Jahren 1960 bis 2013 dar.....	18
Abbildung 6: Niederschlagssummen und Durchschnittstemperaturen während der Vegetationszeit (V) Mai bis August in den Jahren 1960 bis 2013. Gestrichelte Linien: Durchschnittstemperatur und -niederschlag.....	19
Abbildung 7: Klimadiagramm des Jahres 1976.....	20
Abbildung 8: Klimadiagramm des Jahres 1980.....	21
Abbildung 9: Das fünfjährige gleitende Mittel für ein Jahr $x$ errechnet sich aus dem arithmetischem Mittel der Zuwächse aus zwei Jahren vor und nach, sowie dem Jahr $x$ . Hier: Beispielhaft das gleitende Mittel des Jahres 1976, 1977 und 1978.....	23
Abbildung 10: Übersicht der indexierten Zuwachsreihen der neun Versuchspartellen am Nördersberg geordnet nach Fichten- und Lärchenpartellen.....	24
Abbildung 11: Graphische Darstellung der Kennzahlen zur Quantifizierung von Wachstumsreaktionen auf Stressjahre nach Lloret et al. (2011).....	32
Abbildung 12: Darstellung der ermittelten laufenden Volumenzuwächse (2010 bis 2014) auf den drei Triplets am Nördersberg. Die gestrichelten Linien entsprechen den erwarteten Zuwächsen falls keine Mischungseffekte vorhanden sind. Die durchgezogenen Linien entsprechen den mit den Mischungsanteilen gewichteten, ermittelten Volumenzuwächsen. Die Mischungsanteile wurden auf Grundlage des SDI ermittelt. Links: laufende Volumenzuwächse $m^3 ha^{-1} Jahr^{-1}$ (IV). Rechts: Darstellung der relativen Produktivität (RPR). Die RPR entspricht den prozentuellen Volumenzuwächsen. Die Werte der Reinpartellen von 1,0 entsprechen 100% (als relativer Vergleichswert). Die errechneten Volumenzuwächse der Mischpartellen werden mit ihrer prozentuellen Abweichung vom erwarteten Volumenzuwachs abgebildet.....	35
Abbildung 13: Gegenüberstellung der erwarteten Zuwächse (Abszisse) und der ermittelten Zuwächse (Ordinate) der drei Triplets am Nördersberg. Die kleinen Kreise stellen die einzelnen Triplets dar. Die größeren Kreise (mit gestricheltem Rand) entsprechen dem arithmetischem Mittel der drei Triplets. In Abbildung 13b wurden die in Abb. 13a durch Sterne (*) kenntlich gemachten Zuwächse der Fichten-Reinpartelle und der Fichten-Lärchen-Mischpartelle des Triplets 2000 entfernt.....	36
Abbildung 14: Zuwachsunterschiede zwischen den Misch- und Reinpartellen in Abhängigkeit der jährlichen Wuchsbedingungen. Darstellung der indexierten Radialzuwächse der Fichte im Rein- und Mischbestand am Nördersberg getrennt nach Triplets, sowie der Ergebnisse der linearen Regression (Kapitel 4.3.7). Abszisse: Zuwächse des Reinbestandes [ $Irr$ ]. Ordinate: Zuwächse des Mischbestandes - Zuwächse des Reinbestandes [ $Irdiff.$ ] im selben Jahr. ....	39
Abbildung 15: Zuwachsunterschiede zwischen den Misch- und Reinpartellen in Abhängigkeit der jährlichen Wuchsbedingungen. Darstellung der indexierten Radialzuwächse der Lärche im Rein- und Mischbestand am Nördersberg getrennt nach Triplets, sowie der Ergebnisse der linearen Regression (Kapitel 4.3.7). Abszisse: Zuwächse des Reinbestandes [ $Irr$ ]. Ordinate: Zuwächse des Mischbestandes - Zuwächse des Reinbestandes [ $Irdiff.$ ] im selben Jahr. ....	41
Abbildung 16: Boxplotdarstellung der errechneten Kennzahlen zur Quantifizierung von Zuwachsreaktionen auf Stressjahre (Resistance, Recovery und Resilience) nach Lloret et al. (2011) der Einzelbäume für das Jahr 1976. Darstellung getrennt nach Baumarten (links Fichte und rechts Lärche), nach Triplets (1000, 2000 und 3000), sowie nach Reinbeständen (R) und Mischbeständen (M). ....	43

Abbildung 17: Graphische Darstellung der bestandesweise errechneten Kennzahlen (Mittelwerte aller Bäume auf der jeweiligen Versuchsparzelle) zur Quantifizierung von Zuwachsreaktionen auf Stressjahre (Resistance, Recovery und Resilience; Kapitel 4.3.6) nach Lloret et al. (2011) für das Jahr 1976. Darstellung getrennt nach Triplets (1000, 2000 und 3000), Baumart (links Fichte und rechts Lärche) und nach Reinbeständen (blau) und Mischbeständen (Fichte gelb und Lärche orange).....	44
Abbildung 18: Boxplotdarstellung der errechneten Kennzahlen zur Quantifizierung von Zuwachsreaktionen auf Stressjahre (Resistance, Recovery und Resilience) nach Lloret et al. (2011) der Einzelbäume für das Jahr 1980. Darstellung getrennt nach Baumarten (links Fichte und rechts Lärche), nach Triplets (1000, 2000 und 3000), sowie nach Reinbeständen (R) und Mischbeständen (M). .....	47
Abbildung 19: Graphische Darstellung der bestandesweise errechneten Kennzahlen (Mittelwerte aller Bäume auf der jeweiligen Versuchsparzelle) zur Quantifizierung von Zuwachsreaktionen auf Stressjahre (Resistance, Recovery und Resilience; Kapitel 4.3.6) nach Lloret et al. (2011) für das Jahr 1980. Darstellung getrennt nach Triplets (1000, 2000 und 3000), Baumart (links Fichte und rechts Lärche) und nach Reinbeständen (blau) und Mischbeständen (Fichte gelb und Lärche orange).....	48
Abbildung 20: Genaue Lage der drei Triplets am Nördersberg. Die Triplets befinden sich innerhalb eines 182 ha großen Areals. ....	66
Abbildung 21: Übersicht der Triplets und der Waldgesellschaften auf subalpiner Höhenstufe am Nördersberg.....	66
Abbildung 22: Entfernungen (Luftlinie) der Versuchsparzellen und der Messstelle Naturns zur Messstelle Schlanders. ....	67
Abbildung 23: Boxplotdarstellung des durchschnittlichen Temperaturunterschiedes der Messstellen Schlanders und Naturns innerhalb einer 30 jährigen Referenzperiode. ....	67
Abbildung 24: Graphische Übersicht der Bearbeitungsschritte von Zuwachsmessreihen. ....	69
Abbildung 25: Indexierte baumartspezifische Zuwachsreihen der Rein- und Mischparzellen. ....	70
Tabelle 1: Gesamtübersicht über Mischungsform, Baumarten (BA), Dimensionierung, Lage, Position, Exposition und Hangneigung (HN) der neun Versuchsparzellen (P). ....	15
Tabelle 2: Mittlere Temperaturwerte (T), Niederschlagssummen (N) und Ariditätsindizes (DM) nach De Martonne (1926) in der Referenzperiode von 1960 bis 2013 (kursiv), sowie für die Trockenjahre 1976 und 1980. Ganzjährige Werte (J) und Werte während der Vegetationsperiode (V) Mai bis August. In Klammern: Prozentuelle Abweichung der Trockenjahre 1976 und 1980 von der Referenzperiode 1960 bis 2013. ....	20
Tabelle 3: Alter auf Brusthöhe, Oberhöhen (hdom), Alterszuschläge, Pflanzenalter sowie Ertragsklassen der Versuchsparzellen.....	25
Tabelle 4: Funktionsparameter $n_0$ , $n_1$ , $n_2$ und $n_3$ von Fichte und Lärche, sowie die verwendeten Formeln zur Errechnung der Regressionsparameter $dwp_{Fi,Lä}$ (Wendepunkt der Höhenfunktion), $a$ und $b$ der Bayerischen Forstinventur (Franz 1971; Kennel 1972; Franz et al. 1973) .....	28
Tabelle 5: Ergebnisse der ertragskundlichen Standardauswertung nach Johann (1993) und Pretzsch (2002). Geordnet nach Triplet und Versuchsparzelle: Bestandesalter, Stammzahl (N), Oberhöhe (hdom), Oberdurchmesser (ddom), Höhe des Grundflächenmittelstammes (hg), Durchmesser des Grundflächenmittelstammes (dg), Grundfläche (G), Vorrat (V), laufender jährlicher Grundflächenzuwachs von 2009-2014 (IG) und laufender jährlicher Volumenzuwachs 2009-2014 (IV). <i>Stand: September 2014</i> .....	28
Tabelle 6: Ergebnisse der Berechnung der Stand-Density-Indizes nach Reineke (1933) der Rein- und Mischbestände, inkl. der errechneten Äquivalenzfaktoren (e) und der Mischungsanteile im Mischbestand.....	30
Tabelle 7: Beschreibung der von Lloret et al. (2011) entwickelten Kennzahlen zur Quantifizierung von Wachstumsreaktionen auf Stressjahre. ....	32
Tabelle 8: Gegenüberstellung der errechneten Kennzahlen nach Lloret et al. (2011) der Einzelbäume in den Rein- und Mischparzellen für das Jahr 1976. Die Werte geben Aufschluss darüber, wie viel Prozent der errechneten Einzelbaum-Kennzahlen (Resistance, Recovery und Resilience; Kapitel 4.3.6) in den jeweiligen Mischparzellen höher sind als in den Reinparzellen. Fett gedruckte Werte: Die Lloret-Kennzahlen der Einzelbäume des Mischbestandes weisen in über 50% der Fälle höhere Werte (bessere Performance, vgl. Kapitel 4.3.6) als die Einzelbäume des Reinbestandes auf. ....	45

---

Tabelle 9: P-Werte des <i>Welch Two Sample T-Tests</i> zum Vergleich der Kennzahlen nach Lloret et al. (2011) der Rein- und Mischbestände für das Jahr 1976 (Kapitel 4.3.7). Fett gedruckte Werte: Signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen Rein- und Mischbestand. Sternchen*: Mischbestand im Vorteil.....	45
Tabelle 10: Gegenüberstellung der errechneten Kennzahlen nach Lloret et al. (2011) der Einzelbäume in den Rein- und Mischparzellen für das Jahr 1980. Die Werte geben Aufschluss darüber, wie viel Prozent der errechneten Einzelbaum-Kennzahlen (Resistance, Recovery und Resilience; Kapitel 4.3.6) in den jeweiligen Mischparzellen höher sind als in den Reinparzellen. Fett gedruckte Werte: Lloret-Kennzahlen der Einzelbäume des Mischbestandes weisen in über 50% der Fälle höhere Werte (bessere Performance, vgl. Kapitel 4.3.6) als die Einzelbäume des Reinbestandes auf. ....	49
Tabelle 11: P-Werte des <i>Welch Two Sample T-Tests</i> zum Vergleich der Kennzahlen nach Lloret et al. (2011) der Rein- und Mischbestände für das Jahr 1980 (Kapitel 4.3.7). Fett gedruckte Werte: Signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen Rein- und Mischbestand. Sternchen*: Mischbestand im Vorteil. ....	49
Tabelle 12: Ariditätsindizes nach De Martonne (1926) von 1970 bis 2013. Jeweils für das gesamte Jahr (Jahresmittel) und die Vegetationsperiode (Veg. Mai-Aug) berechnet, inkl. prozentueller Abweichung vom Durchschnittswert. ....	68
Tabelle 13: Übersicht der gemessenen Brusthöhendurchmesser, Höhen, Kronenansätze (inkl. Standardabweichung) und der Gesamtanzahl der ertragskundlich erfassten Bäume je Versuchsparzelle (n). In Klammern: Anzahl der gebohrten Bäume. ....	71
Tabelle 14: Anzahl der Kernbohrungen je Baumart und Triplet .....	71
Tabelle 15: Übersicht der verwendeten Höhenkurven-Funktionen der einzelnen Versuchsparzellen.....	71
Tabelle 16: Flächenbezogene Ertragswerte der Jahre 2014, 2009, 2004 und 1999 nach Johann (1993) und Pretzsch (2002). Geordnet nach Triplet und Versuchsparzelle: Bestandesalter, Stammzahl (N), Oberhöhe (hdom), Oberdurchmesser (ddom), Höhe des Grundflächenmittelstammes (hg), Durchmesser des Grundflächenmittelstammes (dg), Grundfläche (G), Vorrat (V), laufender jährlicher Grundflächenzuwachs der letzten fünf Jahre (IG) und laufender jährlicher Volumenzuwachs der letzten fünf Jahre (IV).....	72
Tabelle 17: Gegenüberstellung der erwarteten Zuwächse ( $p$ ) und tatsächlich ermittelten Zuwächse ( $p$ ); getrennt nach Baumarten und Triplets.....	73
Tabelle 18: Ergebnisse der statistischen Analyse (Kapitel 4.3.7) der zeitlichen Wuchsvariabilität von Fichte und Lärche im Rein- und Mischbestand.....	73

## 1 Zusammenfassung

Zahlreiche Studien haben bisher gezeigt, dass Synergie- und Konkurrenzeffekte in (gemischten) Waldbeständen immer simultan und gleichzeitig auftreten (Vandermeer 1992; Callaway und Walker 1997; Holmgren et al. 1997; Callaway 1998). Das veränderte Verhältnis von Konkurrenz und Begünstigung in gemischten Beständen kann zu Mehr- oder Minderzuwachs führen. Dabei ist oft die Standortgüte ausschlaggebend. Nach der Stress-Gradienten-Hypothese (Callaway und Walker 1997; Holmgren et al. 1997) treten in Mischbeständen auf günstigen Standorten oft Minderzuwächse, auf ungünstigen Standorten Mehrzuwächse zutage. Dies wurde bereits für zahlreiche Baumartenmischungen nachgewiesen (Pretzsch 2009; Bielak 2013; Pretzsch et al. 2013a; Pretzsch 2013; del Rio et al. 2014; Pretzsch et al. 2015). Eine wichtige Erklärung für Synergieeffekte in Mischbeständen wird durch die Nischenkomplementarität (Morin et al. 2011) geliefert. Der zugehörige zwei Baumarten in Mischung unterschiedliche ober- und unterirdische Wuchsräume besetzen und sich dabei die Ressourcenausnutzung (Licht, Wasser, Nährstoffe und Wuchsraum) beider Baumarten optimiert.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Vergleich von Rein- und Mischbeständen aus Fichte (*Picea abies* [L.] Karst) und Lärche (*Larix decidua* MILL.) auf subalpiner Höhenstufe (1600-1800 m ü. NN) am Nördersberg im südtiroler Vinschgau. Der Fokus liegt dabei auf der Untersuchung, inwieweit sich die Rein- und Mischbestände hinsichtlich Produktivität, langfristigen Wuchsverhalten und Klimaresilienz unterscheiden. Der Standort des Versuchsgebietes kann aufgrund der gegebenen klimatischen Verhältnisse (hohe Temperaturen, wenig Niederschlag, häufige Trockenereignisse) als ungünstig betrachtet werden. Für die Überprüfung der Frage, ob positive oder negative Mischungseffekte in Fichten-Lärchen-Mischbeständen auftreten, wurden im Sommer 2014 drei Triplets mit insgesamt neun Versuchspartzen angelegt. Ein Triplet bestand aus zwei Fichten/Lärchen-Reinpartzen und einer Fichten-Lärchen-Mischpartze. (i) Es zeigt sich, dass die Fichte im Mischbestand eine Produktivität (laufender Volumenzuwachs [ $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{Jahr}^{-1}$ ]) von -11% und +10% im Vergleich zum Reinbestand aufweist. Die Lärche leistet in Mischung zwischen -13% und +25% mehr Volumenzuwachs als im Reinbestand, wobei hier die Standortgüte eine essentielle Rolle spielt. (ii) Bei der Untersuchung des langfristigen Wuchsverhaltens wird deutlich, dass am Nördersberg vor allem junge Fichten-Lärchen-Mischbestände den Reinbeständen überlegen sind. (iii) Das Reaktionsmuster der zwei

Baumarten auf die Trockenjahre 1976 und 1980 offenbart, dass die Lärchen-Mischbestände mit häufig hintereinander auftretendem Trockenstress besser zurechtkommen als die Lärchen-Reinbestände. Die Fichten-Mischbestände puffern Dürreperioden ebenfalls effektiver als die Reinbestände ab, reagieren jedoch sensibler als die Lärche auf häufiger hintereinander auftretende Trockenereignisse.

Alle Ergebnisse der vorliegenden Arbeit deuten darauf hin, dass sowohl aus Sicht der Produktivität als auch aus klimatischen Gesichtspunkten eine Mischung aus Fichte und Lärche auf subalpiner Höhenstufe am vinschgauer Nördersberg sinnvoll ist.

**Schlagwörter:** *Fichte (Picea abies [L.] Karst), Lärche (Larix decidua MILL.), subalpine Höhenstufe, Mischungseffekt, Konkurrenz, Begünstigung, Mehrzuwachs, Minderzuwachs, Stress-Gradienten-Hypothese, Nischenkomplementarität, Trockenstress*

## 2 Abstract

Facilitation and competition always occur simultaneously in (mixed) forest stands (Vandermeer 1992; Callaway and Walker 1997; Holmgren et al. 1997; Callaway 1998). Changed proportions of facilitation and competition in mixed stands cause over- and underyielding due to the site quality. The stress-gradient hypothesis (Callaway and Walker 1997; Holmgren et al. 1997) predicts that underyielding prevails on rich sites, while on poor sites overyielding prevails. This dendroecological response has been determined for numerous forest species mixtures (Pretzsch 2009; Bielak 2013; Pretzsch et al. 2013a; Pretzsch 2013; del Rio et al. 2014; Pretzsch et al. 2015). Niche complementarity (Morin et al. 2011) is considered to be the main cause for positive mixing effects. This means that in mixed stands (of adequate tree species) optimized above-ground and belowground growing space utilizations occur, leading to a reduced competition for resources (light, water and nutrients).

This thesis deals with the comparison of pure and mixed forest stands of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst) and European larch (*Larix decidua* MILL.) at subalpine altitude (1600-1800 m o. NN) at the Nördersberg in the Vinschgau vally, South Tyrol. The investigations' focus lay on the contrasting juxtaposition of pure and mixed stands in terms of productivity, long-term yield performance and drought stress resilience. The study area can be characterized as poor because of its unfavorable climate conditions (high temperatures, low rainfalls and a high frequency of drought years).

In order to achieve knowledge of appearance of positive or negative mixing effects at Nördersberg, three triplets have been established in summer 2014. A triplet included two pure stands of Norway spruce and European larch and one mixed stand with both species. (i) It becomes apparent that productivity (annual volume increment [ $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{year}^{-1}$ ]) of Norway spruce in mixed stands lays between -11% and +10% in contrast to pure stands. In mixed stands productivity of European larch reaches from -11% to +25%, depending on site quality. (ii) Mostly young mixed stands reveal positive long-term yield performances, compared to pure stands. (iii) The reaction pattern to the drought years 1976 and 1980 bares that mixed European larch stands are more resilient to high frequencies of drought stress than pure stands. Mixed stands of Norway spruce provide higher resistance to drought periods than pure stands. However, Norway spruce reacts more sensitively to high frequent drought events than European larch.

From these results it can be concluded that both ecologically as well as climatically speaking, the species mixture of Norway spruce and European larch on the Nördersberg is reasonable.

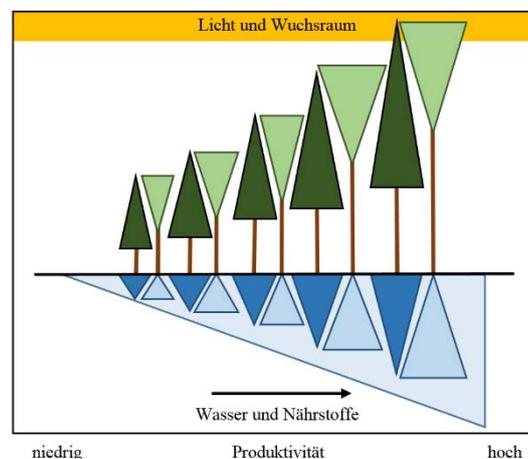
**Keywords:** *Norway spruce (Picea abies [L.] Karst), European larch (Larix decidua MILL.), subalpine altitude, mixing effects, competition, facilitation, over-yielding, under-yielding, Stress-gradient hypothesis, Niche complementarity, drought-stress*

### 3 Einleitung und Fragestellung

Seit Mitte des 20. Jahrhunderts wecken Mischbestände in der Forstwirtschaft und Forstwissenschaft ein immer stetiger wachsendes Interesse (Leibundgut 1987; Spellmann 1995; Kohnle und Klädtke 2010). Die hohe Leistungsfähigkeit naturnaher Mischwälder bei der Erfüllung von Waldfunktionen erklärt diese gestiegene Aufmerksamkeit wahrscheinlich am besten. In den meisten Fällen weisen Mischbestände eine höhere Artendiversität auf als Reinbestände (Scherer-Lorenzen et al. 2005; Hector und Bagchi 2007; Isbell et al. 2011). Diese Artendiversität spielt eine essentielle Rolle bei der Gewährleistung von Waldfunktionen und -leistungen wie Wasserschüttung, Biomasseproduktion, Kohlenstoffspeicherung im Boden, Biodiversität, Waldästhetik und Erholung (Gamfeldt et al. 2013). Standortgerechte Bergmischwälder leisten den effektivsten Schutz vor Erosion und gravitativen Naturgefahren (Mayer und Ott 1991). Auch bei ökonomischen Betrachtungen weisen naturnahe Mischbestände einige Vorteile auf. So wurde erkannt, dass Mischbestände eine deutlich höhere Toleranz gegenüber Insektenkalamitäten, Windwurf, Eisbruch sowie gegenüber Holzpreisschwankungen aufweisen (Knoke et al. 2005; Griess und Knoke 2011). Mischbestände wurden in Mitteleuropa hinsichtlich ihrer Produktivität und Klimaresilienz mittlerweile mehrfach mit Reinbeständen verglichen. Besonders auf armen Standorten offenbart sich oft eine Überlegenheit der Mischbestände. Es wurde nachgewiesen, dass auf Standorten mit niedrigerem Ertragsniveau, Mischbestände im Durchschnitt eine 10-25% höhere Produktivität aufweisen als Reinbestände (Pretzsch et al. 2013a; Pretzsch 2013; del Rio et al. 2014). Auch vor dem Hintergrund immer häufiger auftretender Trockenereignisse wächst die Bedeutung naturnaher Mischwälder. In vielen Fällen sind gemischte Bestände besser als Reinbestände in der Lage solche Extremereignisse abzapuffern und weitestgehend unbeschadet zu überstehen (Zang et al. 2011; Pretzsch et al. 2013b). Das hohe Interesse an der Wuchsdynamik von Mischbeständen überrascht daher nicht.

Im Wesentlichen werden für das Verständnis positiver Mischungseffekte und höherer Produktivität in gemischten Beständen drei Gründe zur Erklärung herangezogen. Zum einen besteht in Mischwäldern ein *geändertes Verhältnis aus Konkurrenz und Begünstigung (Facilitation)*. Die nachbarschaftliche Konkurrenz spielt sich in Waldbeständen in großen Teilen um die Ressourcen Wasser, Nährstoffe, Licht und Wuchsraum ab (Matyssek et al. 2010). Es wird angenommen, dass diese Konkurrenz in Mischbeständen durch

begünstigende Effekte wie Schutz vor abiotischen Schädigungen, verbesserter Humusbildung und effizienterer Ressourcennutzung, bei ansonsten ähnlicher Bestandesdichte, vermindert wird (Vandermeer 1992; Callaway und Walker 1997; Holmgren et al. 1997). Ein weiterer bedeutender Grund für die effiziente Ressourcennutzung in Mischbeständen ist die *Nischenkomplementarität* (Morin et al. 2011). Darunter versteht man die verbesserte Ausnutzung von ober- und unterirdischem Wuchsraum. So ist es möglich, dass bei der Mischung passender Baumarten sowohl die Wurzeln, als auch die Baumkronen beider Arten unterschiedliche Wuchsräume besetzen (flachwurzelnde und tiefwurzelnde Arten; tiefreichende und hoch sitzende Kronen; Abbildung 1). Die Besetzung von unterschiedlichen Wuchsräumen bringt unter Umständen auch wieder begünstigende Effekte für die andere Art mit sich, wie zum Beispiel hydraulischen Wasseraufstieg (Dawson 1993). Die *Stress-Gradienten-Hypothese* geht davon aus, dass vor allem auf ärmeren Standorten begünstigende Effekte vorherrschen, während auf gut versorgten Standorten Konkurrenzeffekte stärker zutage treten. Es wird angenommen, dass entlang ökologischer Gradienten die positive Wirkung von Baumartenmischung mit zunehmender Standortqualität abnimmt (Gesetz des abnehmenden Grenznutzens von Mitscherlich 1948; Pretzsch et al. 2013a; Pretzsch et al. 2015).



**Abbildung 1:** Darstellung der optimierten Wuchsräume und Ausnutzung der essentiellen Ressourcen Wasser, Nährstoffe, Licht und Wuchsraum in gemischten Beständen.

Ein Großteil der Untersuchungen, welche sich mit Mischungseffekten in Wäldern beschäftigt haben, befasst sich mit Beständen in collinen und montanen Höhenstufen (Pretzsch 2009; Pretzsch und Schütze 2009; Zang et al. 2011; Bielak 2013; Pretzsch 2013; Pretzsch et al. 2013a; Pretzsch et al. 2013b; del Río et al. 2014; Pretzsch et al. 2014; Pretzsch et al. 2015; Sterba et al. 2002; del Río und Sterba 2009). Callaway (1998) beleuchtete das Verhältnis von Konkurrenz und Begünstigung entlang eines Höhengradienten in subalpiner

Höhenstufe in den Rocky Mountains mit dem Ergebnis, dass vor allem im Bereich der Waldgrenze Begünstigung vorherrscht, während in tieferen Lagen Konkurrenz eine bedeutende Rolle in der Walddynamik einnimmt. Zöhler (1969) hat im Salzburger Lungau in montan-subalpiner Höhenstufe nachgewiesen, dass Mischbestände aus Lärche und Fichte 10-25% mehr Volumenzuwächse leisten als benachbarte Reinbestände.

Die vorliegende Arbeit greift die 1969 von Zöhler behandelte Thematik erneut auf und beschäftigt sich mit dem Vergleich von Rein- und Mischbeständen aus Fichte (*Picea abies* [L.] Karst) und Lärche (*Larix decidua* MILL.) in subalpiner Höhenstufe im südtiroler Vinschgau. Grund für die Untersuchung der Mischung genau dieser zwei Baumarten ist ihre zentrale Bedeutung im Alpenraum. So stellen Fichtenwälder in Mischung mit Lärche, zentralalpin (Österreich, Italien, Schweiz und Frankreich) auf subalpiner Höhenstufe, mit Abstand die bedeutendste Waldgesellschaft dar (Mayer 1974; Ellenberg 1996). In der Forstpraxis nimmt die Mischung aus Fichte und Lärche ebenfalls eine bedeutende Stellung ein. So werden unbewaldete Flächen auf subalpiner Höhenstufe sehr häufig zunächst mit Lärchen aufgeforstet (Vorwald), und anschließend mit Fichten ergänzt (Mayer and Ott 1991). Ein besseres Verständnis um die Leistungsfähigkeit von Fichten-Lärchen-Mischbeständen in den Alpen könnte daher unter Umständen von Interesse für die Forstwirtschaft sein. Und auch vor dem Hintergrund immer häufiger auftretender Extremereignisse (wie beispielsweise Trockenjahre) ist das Wissen um die Klimaresilienz der Baumartenmischung aus Fichte und Lärche in Zukunft von Bedeutung. Im Fokus dieser Untersuchung soll deshalb der Vergleich von Rein- und Mischbeständen aus Fichte und Lärche im Hinblick auf Produktivität und Klimaresilienz stehen. Die folgenden drei Fragestellungen werden in der vorliegenden Arbeit behandelt:

- (1) Inwiefern unterscheidet sich die Produktivität von Fichte und Lärche im Mischbestand von den jeweiligen Reinbeständen?
- (2) Reagieren Fichte und Lärche im Mischbestand anders auf unterschiedlich günstige Jahre als im Reinbestand?
- (3) Reagieren Fichte und Lärche im Mischbestand anders auf Extremjahre als im Reinbestand?

## 4 Material und Methoden

### 4.1 Untersuchungsansatz

Für den Vergleich von Rein- und Mischbeständen, wurden im Sommer 2014 zunächst neun repräsentative Versuchspartzellen in passender Höhenstufe und vergleichbarer, bzw. unmittelbarer räumlicher Nähe angelegt. Diese Versuchspartzellen wurden anschließend ertragskundlich vollständig erfasst. Basis der Zuwachsermittlung und der Ermittlung der klimatischen Reaktionsmuster auf den einzelnen Versuchspartzellen waren die Entnahme und die Analyse von Bohrkernen. Die erfassten ertragskundlichen Daten, sowie die gemessenen Jahrringbreiten der entnommenen Bohrkern, bildeten anschließend die Grundlage für die Beantwortung und Bearbeitung der in Kapitel 3 gestellten Fragestellungen.

#### *Versuchsdesign*

Essentiell für die empirische Vergleichbarkeit von Rein- und Mischbeständen war die Anlage von Versuchspartzellen in unmittelbarer räumlicher Nähe, sodass für alle Partzellen möglichst dieselben klimatischen und standörtlichen Bedingungen herrschten. Eine Versuchseinheit bildete jeweils ein so genanntes *Triplet*. Ein solches Triplet bestand immer aus einer Fichten- und Lärchen-Reinpartzelle, sowie einer Fichten-Lärchen-Mischpartzelle in möglichst direkter räumlicher Nähe. Insgesamt wurden im Versuchsgebiet Nördersberg drei Triplets an drei verschiedenen Standorten angelegt, also insgesamt neun Versuchspartzellen (Abb. 2; Anhang, Abb. 20). Im Anschluss wurden die angelegten Versuchspartzellen ertragskundlich erfasst.



**Abbildung 2:** Design der Versuchspartzellen (inkl. Nomenklatur): Jeweils ein Fichten-Reinbestand, ein Lärchen-Reinbestand und ein Fichten-Lärchen-Mischbestand bildete ein s.g. Triplet. Am Nördersberg wurden drei Triplets an drei verschiedenen Standorten angelegt (vgl. ebenfalls Anhang, Abb. 20).

### *Auswahlkriterien*

Beim Auswahlverfahren der Standorte für die drei Triplets mussten mehrere Kriterien erfüllt werden, um einheitliche und vergleichbare Versuchspartellen zu erhalten:

- Mindestens 20 herrschende Bäume auf den Reinbestandspartellen
- Mindestens 40 herrschende Bäume auf den Mischbestandspartellen (jeweils 20 pro Baumart)
- Möglichst dichte Bestandesstruktur (Vollbestockung), das heißt von Durchforstungsmaßnahmen (soweit vorhanden) unbeeinflusste Bestandespartien
- Versuchspartellen mit Rechtecksflächen (möglichst nahe am Quadrat)
- Möglichst geringe Zahl an Randbäumen (Bäume außerhalb der Versuchspartelle, deren Krone jedoch innerhalb der Versuchspartelle liegt)
- Altershomogenität zwischen den Rein- und Mischpartellen
- Standorthomogenität zwischen den Rein- und Mischpartellen
- Einzelstammweise Mischung mit größtmöglicher Kroneninteraktion in den Mischpartellen

Der Grundgedanke hinter der Anlage von drei Triplets war der, dass versucht werden sollte ein zeitliches Nacheinander durch ein räumliches Nebeneinander zu ersetzen (künstliche Zeitreihe: Jungbestand, mittelalter Bestand, Altbestand). Zudem sollten sich die Bestände in den Triplets entlang ihres natürlichen Sukzessionsverlaufes bewegen (möglichst maximale Bestandesdichte).

### *Anlage der Versuchspartellen*

Die Anlage der Versuchspartellen erfolgte im Juli 2014. Die Seitenlängen der gefundenen Versuchspartellen wurden dezimetergenau vermessen und die Eckpunkte der Versuchspartellen mit ca. 50 cm langen Fichtenpfählen markiert. Alle Bäume innerhalb einer Versuchspartelle erhielten eine fortlaufende Nummerierung (zweifelsfreie Zuordnung der Daten). Zudem wurden die genauen GPS-Koordinaten, die exakte Meereshöhe, die Hangneigung und die Exposition jeder Versuchspartelle erfasst (siehe Tabelle 1). Die drei Triplets befinden sich alle innerhalb eines 182 ha großen Areals am Nördersberg (Anhang, Abb. 20).

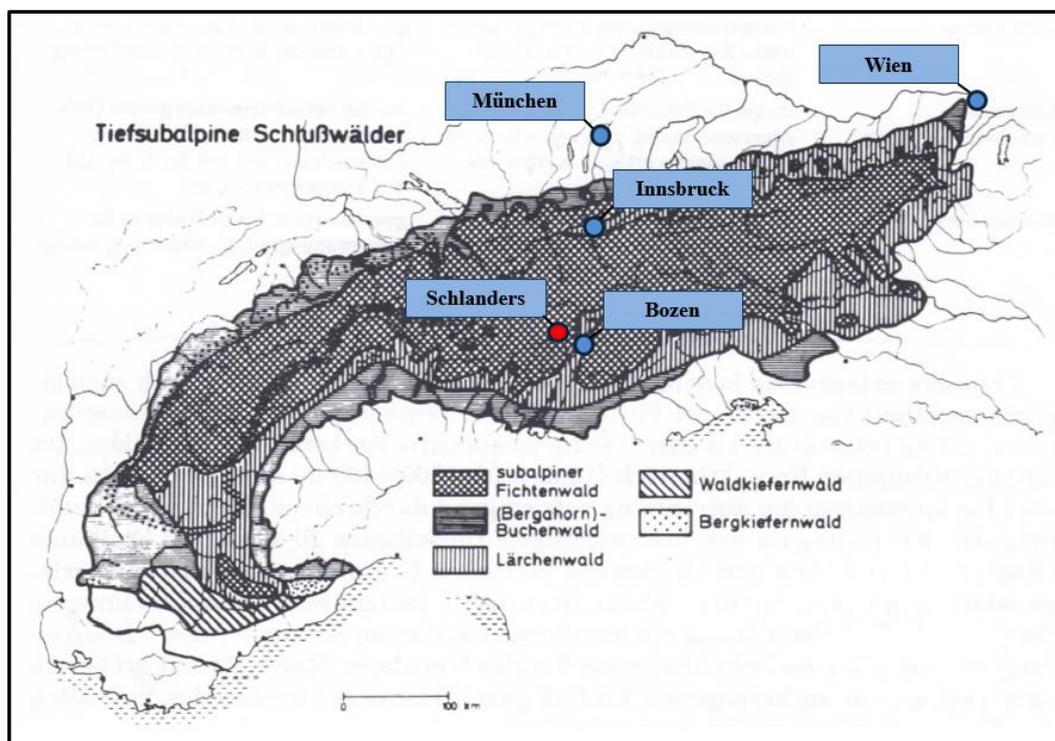
**Tabelle 1:** Gesamtübersicht über Mischungsform, Baumarten (BA), Dimensionierung, Lage, Position, Exposition und Hangneigung (HN) der neun Versuchspartellen (P).

Triplet	P	Bestand	BA	Länge [m]	Breite [m]	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Seehöhe [m ü. NN]	Östliche Länge	Nördliche Breite	Exposition Azimut [°]	HN [%]
1000	1	rein	Fi	12,5	13	162,5	1600	46,594433	10,779673	357	90
1000	2	rein	Lä	18,5	11	203,5	1650	46,593532	10,779578	347	45
1000	3	misch	Fi/Lä	22,5	16	360	1600	46,594013	10,779375	319	80
2000	1	rein	Fi	22	19	418	1705	46,593022	10,803840	4	40
2000	2	rein	Lä	16	20	320	1700	46,593445	10,802930	304	50
2000	3	misch	Fi/Lä	20	24	480	1734	46,592547	10,803843	26	33
3000	1	rein	Fi	24	27	648	1802	46,590783	10,771663	28	25
3000	2	rein	Lä	33	23	759	1820	46,590058	10,771122	24	45
3000	3	misch	Fi/Lä	38	36	1368	1820	46,590188	10,770452	16	45

## 4.2 Material

### 4.2.1 Standörtliche Charakterisierung des Versuchsgebietes

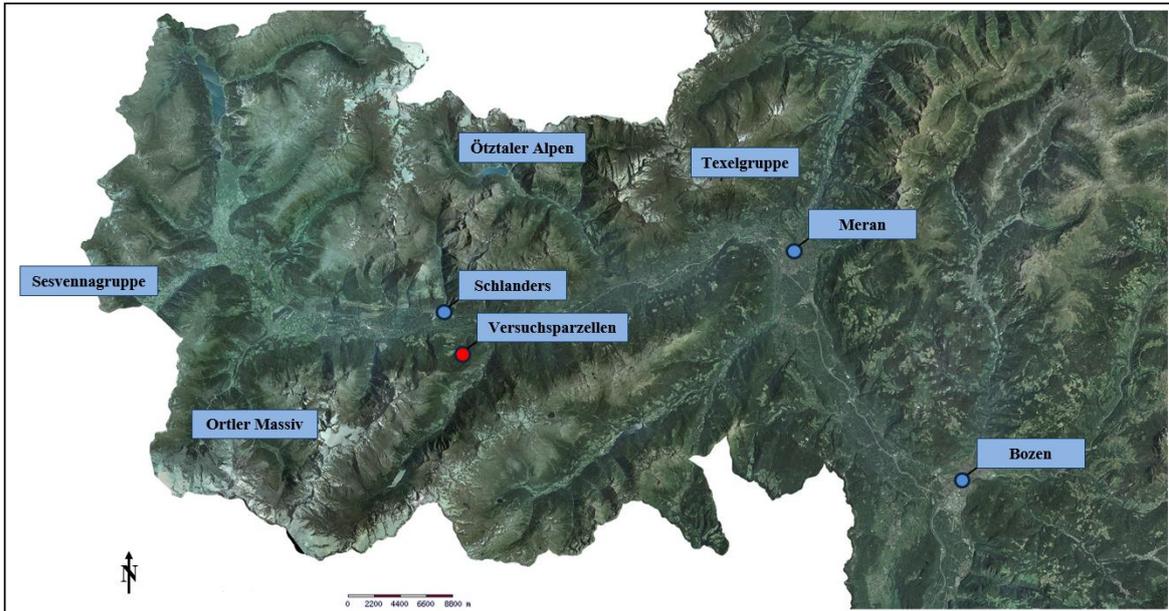
Alle Versuchspartellen liegen am nördlich exponierten Nördersberg auf einer Seehöhe von 1600 bis 1800 m ü. NN (subalpine Höhenstufe) im südtiroler Vinschgau oberhalb des Talortes Schlanders (Abbildung 3). Das Versuchsgebiet befindet sich vollständig im Nationalpark Stilfserjoch und unterliegt dem Forstinspektorat Schlanders bzw. der Forststation Schlanders.



**Abbildung 3:** Verbreitung der tiefsubalpinen Schlusswaldgesellschaften im Alpenraum (verändert nach Mayer und Ott 1991). Roter Punkt: Lage des Versuchsgebietes Schlanders im Vinschgau

### Geologie und Boden

Der Vinschgau verläuft in West-Ost Richtung und wird im Norden von den Öztaler Alpen, im Westen von der Sesvennagruppe, im Süden vom Ortler Massiv und im Osten von der Texelgruppe eingeschlossen (Abbildung 4).



**Abbildung 4:** Gesamtübersicht Vinschgau inkl. begrenzender Gebirgsmassive<sup>1</sup>. Roter Punkt: Lage der Versuchspartellen am Nördersberg.

Der Nördersberg liegt in der Vinschgauer Schieferzone und lässt sich geologisch zum Öztaler Gneisgebirge zuordnen. Phyllitgneis mit Granitgneis-Einlagerungen, Granatphyllite und Biotitglimmerschiefer stellen hier die vorherrschenden Gesteine dar. Auf dem Außernördersberg liegt auf den flacheren Hangbereichen teilweise eine Moränendecke (auch im Bereich der Versuchspartellen).

Die silikatisch-sauren und intermediären Gesteine am Nördersberg führen auf subalpiner Höhenstufe bei der Bodenbildung zu frischen Semipodsolen (selten klimabedingte Podsole) oder podsolierter Braunerde. Die am Standort typische Humusart ist rohhumusartiger Moder und Rohhumus. Der Boden ist im Bereich der Versuchspartellen überwiegend mäßig bis schlecht wasser- und nährstoffversorgt (Vacik et al. 2010a).

<sup>1</sup>Quelle: [http://gis2.provinz.bz.it/geobrowser/?project=geobrowser\\_pro&view=geobrowser\\_pro\\_atlas-b&locale=de](http://gis2.provinz.bz.it/geobrowser/?project=geobrowser_pro&view=geobrowser_pro_atlas-b&locale=de) [Stand: 05.01.2016]

### *Standörtliche Einordnung*

Der Vinschgau liegt nach Mayer und Ott (1991) im inneralpinen Arealzentrum der subalpinen Fichtenwälder (*Piceetum-subalpinum*, siehe Abbildung 3).

Die vorherrschende Waldgesellschaft in subalpiner Höhenstufe am Nördersberg ist nach Vacik et al. (2010b) der subalpine Silikat-Fichtenwald mit Moosglöckchen (*Larici-Piceetum linnaeaetosum borealis*). Neben dieser Gesellschaft tritt im Versuchsgebiet auch noch vereinzelt subalpiner bodenbasischer Sauerklee-Fichtenwald (*Oxali-Piceetum typicum*), subalpiner Silikat-Alpenlattich-Fichtenwald mit Wollreitgras (*Homogyno-Piceetum calamagrostietosum villosae*) und subalpiner Farn-Fichtenwald mit Grünerle (*Athyrio alpestris-Piceetum alnetosum alnobetulae*) auf (Anhang, Abb. 21).

### *Erscheinungsbild*

In subalpiner Höhenlage entstand am Nördersberg ein überwiegend grasdominierter Fichten- Lärchenwald. Dies lässt sich einerseits durch die relative Niederschlagsarmut (siehe Kapitel 4.2.2), andererseits durch die langzeitliche forst- und weidewirtschaftliche Nutzung erklären. Die Lärche (vielerorts auch die Zirbe) wurde somit entgegen ihrer natürlichen Verbreitung auf dieser Höhenstufe großflächig in der Bestandesstruktur etabliert.

In subalpiner Höhenlage bilden die Fichten-Lärchenwälder am Nördersberg geschlossene, meist einschichtige Bestandesstrukturen aus. Die Bestände sind i.d.R. gut wüchsig und erreichen bei einer Umtriebszeit von 180 bis 240 Jahren durchaus forstwirtschaftlich relevante Dimensionen. Die Fichte erreicht in ihrer Umtriebszeit im Schnitt Brusthöhendurchmesser (BHD) von über 45 cm bei durchschnittlichen Höhen von 28 m (+/- 3 m). Lärchen haben zum Erntezeitpunkt i.d.R. einen durchschnittlichen BHD von über 55 cm bei Höhen von 28 m (+/- 2 m).

Die Waldbestände am Nördersberg werden je nach Lage als Wirtschafts- oder Schutzwald bewirtschaftet (teilweise als Waldweide). Die natürliche Waldverjüngung stellt oftmals ein Problem dar. Grund hierfür ist der hohe Wildbestand (Rot- und Rehwild, Weidevieh) und die vielerorts weit fortgeschrittene Vergrasung (Vacik et al. 2010b).

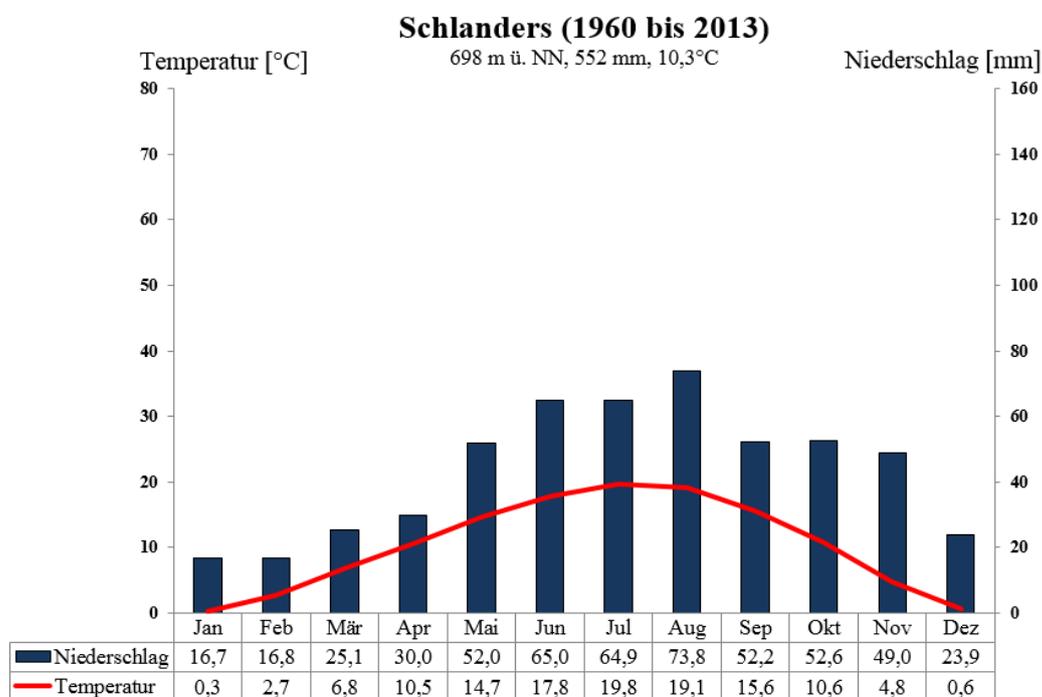
## 4.2.2 Klimatische Charakterisierung des Versuchsgebietes

Die der Arbeit zugrundeliegenden Klimadaten stammen von den hydrologischen und meteorologischen Messstellen Schlanders und Naturns. Schlanders befindet sich auf einer Seehöhe von 968 m ü. NN und liegt etwa 3 Kilometer Luftlinie entfernt von den Versuchsparzellen. Der Höhenunterschied zwischen der Messstelle Schlanders und den Versuchsparzellen beträgt zwischen 900 und 1100 Höhenmeter.

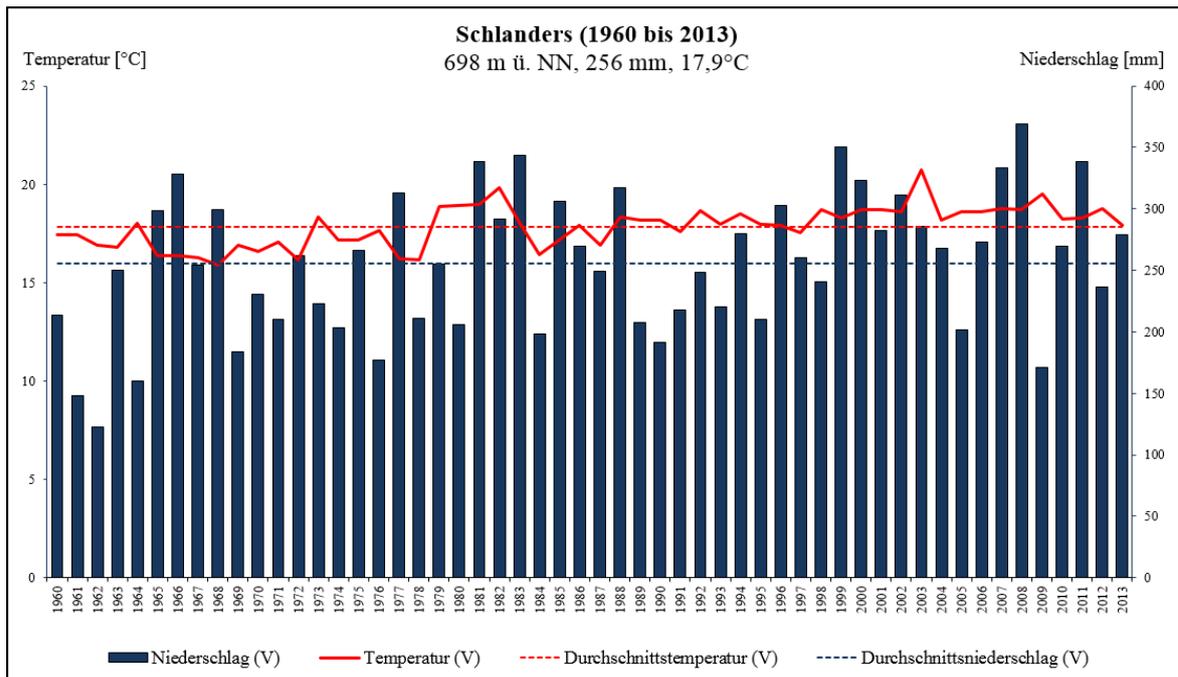
Im ursprünglichen Klima-Datenmaterial der Messstelle Schlanders gab es eine Aufzeichnungslücke der Temperaturwerte in den Jahren 1979 bis 1987. Diese Datenlücke wurde mit Hilfe der Temperaturwerte der 16,5 Kilometer entfernten Messstelle Naturns (Anhang, Abb. 23) extrapolativ rekonstruiert (Kapitel 4.3.2).

### *Klima*

Die Jahresdurchschnittstemperatur in den Jahren 1960 bis 2013 beträgt in Schlanders 10,3°C bei einer mittleren jährlichen Niederschlagsmenge von 522 mm (Abbildung 5). In der forstlich relevanten Vegetationsperiode von Anfang Mai bis Ende August beträgt die Durchschnittstemperatur in den Jahren 1960 bis 2013 17,9°C, bei Niederschlagsmengen von 256 mm (Abbildung 6).



**Abbildung 5:** Klimadiagramm der hydrologischen und meteorologischen Messstelle Schlanders. Die blauen Säulen stellen die durchschnittlichen Niederschlagsmengen, die rote Linie die durchschnittliche Temperatur in den Jahren 1960 bis 2013 dar.



**Abbildung 6:** Niederschlagssummen und Durchschnittstemperaturen während der Vegetationszeit (V) Mai bis August in den Jahren 1960 bis 2013. Gestrichelte Linien: Durchschnittstemperatur und -niederschlag.

Vacik et al. (2010b: 119) beschreibt das Klima im Versuchsgebiet als „Steppenklima“, welches charakterisiert wird durch relativ hohe Jahresdurchschnittstemperaturen bei gleichzeitig geringen Niederschlagsmengen und ausgeprägten Trockenperioden. In subalpinen Lagen liegt der durchschnittliche Jahresniederschlag im Versuchsgebiet bei ca. 800 mm. Trotzdem wird diese Niederschlagsmenge als vergleichsweise gering im Vergleich zu anderen subalpin gelegenen Standorten in den Alpen eingestuft.

### *Trockenjahre*

Für die Bearbeitung der Fragestellung 3 (Kapitel 3) wurden zunächst Trockenjahre im Versuchsgebiet definiert. Trockenjahre charakterisieren sich durch stark reduzierte Niederschlagssummen (im Vergleich zu einer Referenzperiode), und werden häufig durch erhöhte Durchschnittstemperaturen während der Vegetationszeit verstärkt (Zang et al. 2011).

Die Definition von Trockenjahren am Nördersberg erfolgte zunächst durch die Berechnung des Ariditätsindex nach De Martonne (1926) (vgl. Kapitel 4.3.2). Anschließend wurden noch standorttypische biotische (*Zeiraphera diniana* sowie *Ips typographus*) und abiotische (Wind- und Schneebruch) Störfaktoren, welche zu Zuwachsverlusten führen, ermittelt. Diese Ermittlung von biotischen und abiotischen Störfaktoren erfolgte durch Recherche und Überprüfung der Forstschadensmeldungen des Forstinspektorates Schlanders.

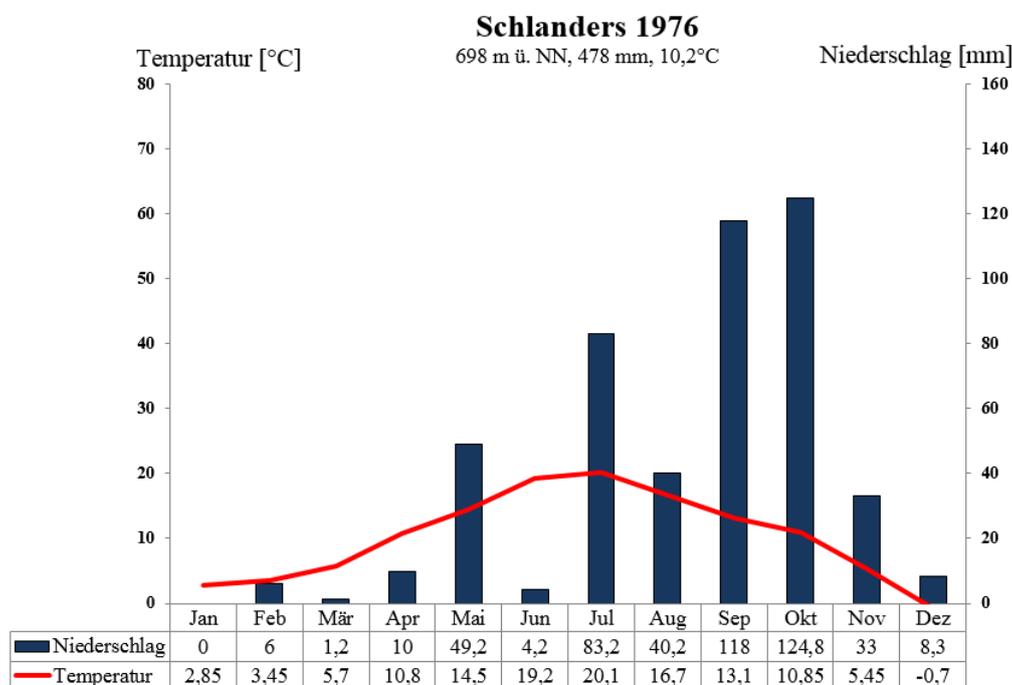
Als Trockenjahre ohne nennenswerte biotische oder abiotische Beeinflussung wurden die Jahre 1976 und 1980 identifiziert (zusammengefasst in Tabelle 2).

**Tabelle 2:** Mittlere Temperaturwerte (T), Niederschlagssummen (N) und Ariditätsindizes (DM) nach De Martonne (1926) in der Referenzperiode von 1960 bis 2013 (kursiv), sowie für die Trockenjahre 1976 und 1980. Ganzjährige Werte (J) und Werte während der Vegetationsperiode (V) Mai bis August. In Klammern: Prozentuelle Abweichung der Trockenjahre 1976 und 1980 von der Referenzperiode 1960 bis 2013.

Jahr	T (J) [°C]	N (J) [mm]	T (V) [°C]	N (V) [mm]	DM (J) [mm °C <sup>-1</sup> ]	DM (V) [mm °C <sup>-1</sup> ]
<i>1960-2013</i>	<i>10,3</i>	<i>522</i>	<i>17,9</i>	<i>256</i>	<i>25,7</i>	<i>9,2</i>
1976	10,2 (-1,11%)	487,1 (-8,4%)	17,6 (-1,3%)	176,8 (-30,8%)	23,7 (-7,8%)	6,4 (-30,3%)
1980	11,6 (+13,0%)	443,4 (-15,1%)	18,9 (+6,0%)	205,8 (-19,5%)	20,5 (-20,5)	7,1 (-22,5%)

### Trockenjahr 1976

Im Jahr 1976 war die Durchschnittstemperatur während der Vegetationsperiode mit 17,6°C um 1,3% unter dem Referenzdurchschnitt, der Niederschlag lag mit 177 mm 30,8% unterhalb des langjährigen Durchschnitts. Der De Martonne Ariditätsindex für dieses Jahr lag 30,3% unter dem durchschnittlichen Wert für das Versuchsgebiet (siehe Tabelle 2). Vor allem im Juni 1976 gab es eine ausgeprägte Dürreperiode (Abbildung 7).



**Abbildung 7:** Klimadiagramm des Jahres 1976.

### Trockenjahr 1980

Im Jahr 1980 betrug die Durchschnittstemperatur während der Vegetationsperiode 18,9°C und lag damit 6% über dem Referenzdurchschnitt, der Niederschlag lag mit 206 mm 19,5% unterhalb des Durchschnitts. Der De Martonne Ariditätsindex für das Jahr 1980 lag 22,5% unter dem durchschnittlichen Wert für das Versuchsgebiet (Tabelle 2). 1980 fielen vor allem im Mai, Juli und August weniger Niederschläge als im Referenzzeitraum 1960 bis 2013 üblicherweise fallen (Abbildung 8).

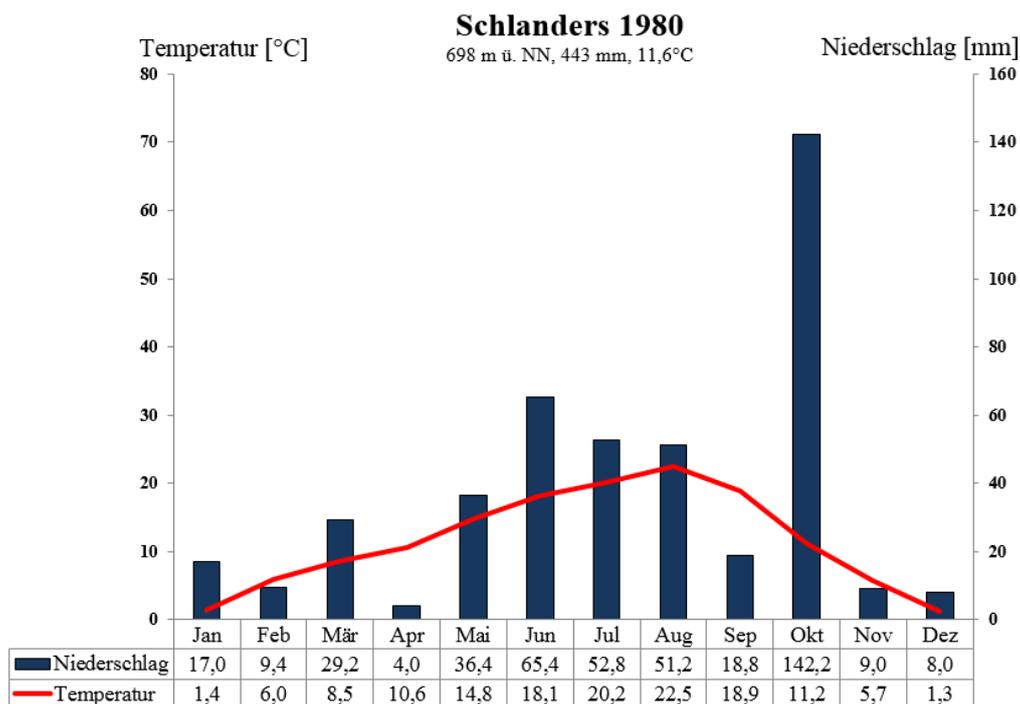


Abbildung 8: Klimadiagramm des Jahres 1980

## 4.3 Methoden

### 4.3.1 Ertragskundliche Datenerhebung

Im September 2014 wurden folgende ertragskundliche Daten erhoben:

- Bestimmung der Baumart
- Brusthöhendurchmesser in 1,3 m Höhe (Umfangmaßband)
- Baumhöhe und Kronenansatz (Baumhöhenmesser Vertex IV der Firma Haglölf)
- Kronenradien in acht Himmelsrichtungen (Methode: Pretzsch 2010: 116)
- Stammfußkoordinaten (Vertex IV der Firma Haglölf)
- Entnahme von Bohrkernen an den 20 herrschenden Bäumen (zwei Bohrkern pro Baum, je von Norden und Osten mittels Presslerschem Zuwachsbohrer der Firma Haglölf)

Die Tabelle 13 im Anhang gibt einen Überblick über die erfassten ertragskundlichen Daten und über die Anzahl der beprobten Bäume je Versuchsparzelle.

#### *Bohrkernanalyse*

Anfang Oktober 2014 wurden die gewonnenen Bohrkerne im Jahrringlabor des Lehrstuhls für Waldwachstumskunde in Freising analysiert. Zunächst wurden die gewonnenen Bohrkerne mit der Faserrichtung senkrecht auf den Objektträger aufgeklebt und geschliffen (Körnung P 180 und P 320). Die anschließend gut erkennbaren Jahrringe wurden mittels Digitalpositiometer nach K. Johann vermessen. Die zwei gemessenen Radialzuwächse pro Baum wurden im Anschluss visuell überprüft, ggf. synchronisiert und anschließend gemittelt.

### **4.3.2 Bearbeitung der Klimadaten**

#### *Rekonstruktion der Temperaturwerte von 1979 bis 1987*

Die Aufzeichnungslücke der Messstelle Schlanders von 1979 bis 1987 (Kapitel 4.2.2) wurde anhand der Temperaturwerte der Messstelle Naturns folgendermaßen rekonstruiert: Zunächst wurden die Temperaturwerte der Messstelle Schlanders von den Temperaturwerten der Messstelle Naturns subtrahiert (aus insgesamt 30 Jahren). Anschließend wurde die monatliche durchschnittliche Abweichung der beiden Messstellen ermittelt. Mithilfe dieser monatlichen durchschnittlichen Abweichung konnte aus den Temperaturwerten der Messstelle Naturns die Aufzeichnungslücke von 1979 bis 1987 der Messstelle Schlanders rekonstruiert werden. Vor allem in der Vegetationsperiode Mai bis August lagen die Abweichungen (mit wenigen Ausnahmen - *Ausreißer*) der beiden Messstellen nicht weit auseinander, sodass der vorgenommenen Temperaturrekonstruktion Vertrauen geschenkt werden konnte (Anhang, Abb. 23).

#### *Berechnung des Ariditätsindex nach De Martonne (1926)*

Der Berechnung des Ariditätsindex (Formel 1) nach De Martonne (1926) liegt die Überlegung zugrunde, dass sich aus dem Verhältnis aus Niederschlag und Temperatur in einem bestimmten Jahr eine Aussage über die klimatischen Verhältnisse treffen lässt, welche mit Durchschnittswerten aus Referenzperioden verglichen werden können.

$$\text{De Martonne Ariditätsindex} = \frac{\text{Niederschlag}}{(\text{Temperatur}+10)}$$

*Formel 1*

Je niedriger der jeweilige Wert, desto arider, also trockener gestaltete sich das Klima im untersuchten Jahr. Im Anhang sind in Tabelle 12 alle De Martonne Ariditätsindizes von 1970 bis 2013 aufgeführt.

### 4.3.3 Bearbeitung der Zuwachsmessreihen

#### *Ermittlung der mittleren Radialzuwächse*

Pro Baum wurden zwei Bohrkerne entnommen, jeweils aus nördlicher und östlicher Richtung (Kapitel 4.3.1). Beide Bohrkerne wurden anschließend vermessen und deren durchschnittlicher Radialzuwachs pro Jahr folgendermaßen ermittelt:

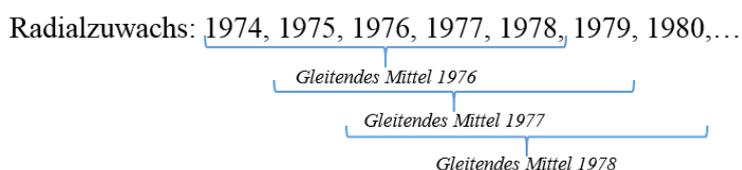
$$\text{Zuwachs}_{\text{Mittel Jahr}^{-1}} = \frac{\text{Zuwachs}_{\text{Nord Jahr}^{-1}} + \text{Zuwachs}_{\text{Ost Jahr}^{-1}}}{2} \quad \text{Formel 2}$$

Die Ermittlung der durchschnittlichen Radialzuwächse pro Baum bildete die Grundlage für weitere Analysen.

#### *Glättung und Indexierung der Zuwachsmessreihen*

Um die Zuwächse der verschiedenen Rein- und Mischbestände empirisch vergleichbar und untersuchbar zu machen, wurden die gemessenen Radialzuwächse geglättet und indexiert. Dies hatte den Zweck, etwaige Alterstrends der Bestände und anderweitige Zuwachsreaktionen aus den Zuwachsmessreihen zu eliminieren (im Anhang, Abb. 24 findet sich eine graphische Übersicht über die einzelnen Schritte).

Zunächst wurde ein fünfjähriges gleitendes Mittel für jedes Jahr berechnet (Abb. 9). Ein fünfjähriges gleitendes Mittel erschien aufgrund der häufigen biotischen und abiotischen Störfrequenz (Kapitel 4.2.2) im Versuchsgebiet am sinnvollsten.

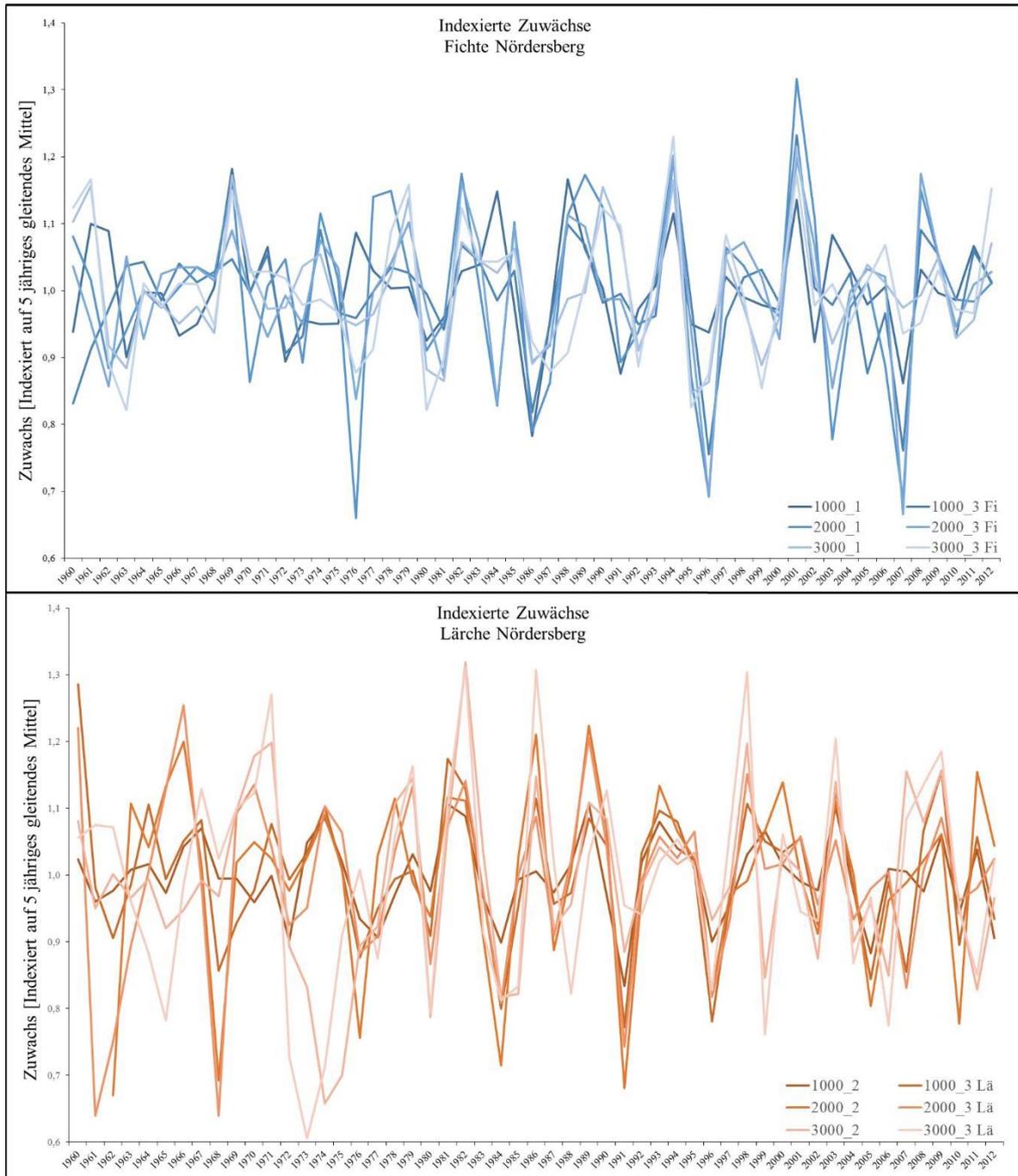


**Abbildung 9:** Das fünfjährige gleitende Mittel für ein Jahr x errechnete sich aus dem arithmetischem Mittel der Zuwächse aus zwei Jahren vor und nach, sowie dem Jahr x. Hier: Beispielhaft das gleitende Mittel des Jahres 1976, 1977 und 1978.

Anschließend wurden die Zuwachsdaten nach Cook und Kairiukstis (1992) indexiert:

$$\text{Indexierter Zuwachs}_{\text{Jahr } x} = \frac{\text{Zuwachs unbearbeitet}_{\text{Jahr } x}}{\text{Zuwachs gleitendes Mittel}_{\text{Jahr } x}} \quad \text{Formel 3}$$

Abbildung 10 gibt eine Übersicht der indexierten Zuwächse der neun Versuchspartellen (Mittelwerte aller Bäume je Versuchspartelle) am Nördersberg. Im Anhang finden sich in Abbildung 25 die indexierten Zuwachsmessreihen geordnet nach Baumart je Triplet.



**Abbildung 10:** Übersicht der indexierten Zuwachsreihen der neun Versuchspartellen am Nördersberg geordnet nach Fichten- und Lärchenpartellen.

#### 4.3.4 Bearbeitung der ertragskundlichen Daten

##### *Ermittlung des Bestandesalters und der Ertragsklassen*

Essentiell für die Bearbeitung der ertragskundlichen Daten war die Ermittlung des realen Bestandesalters (absolutes Bestandesalter ab Keimling; Pflanzenalter). Bei der Entnahme der Bohrkern auf 1,3 m Höhe (Kapitel 4.3.1) konnte durch Kernbohrungen lediglich das Bestandesalter auf Brusthöhe festgestellt werden. Eine Übersicht der Anzahl an Kernbohrungen je Versuchspartelle findet sich im Anhang auf Tabelle 14.

In der Ertragstafel zum „Wachstum der Lärche in Südtirol“ von Tumler (1992) konnte das absolute Bestandesalter direkt neben dem Alter auf Brusthöhe abgelesen werden.

Für die Bestimmung des absoluten Alters der Fichte musste zunächst der Site Index der einzelnen Versuchspartellen ermittelt werden. Der jeweilige Site Index wurde in Abhängigkeit des Brusthöhenalters und der Oberhöhenbonität ( $h_o$ ) berechnet. Vom Site Index hing im Anschluss der Alterszuschlag zum jeweiligen Brusthöhenalter ab (Nogglar 1989: 17).

Nun konnten unter Anwendung der entsprechenden Ertragstafeln gleichermaßen für die Lärchenpartellen (Tumler 1992) und Fichtenpartellen (Nogglar 1989) die jeweiligen Ertragsklassen errechnet werden. Diese bildeten anschließend die Grundlage für die retrospektive Höhenrekonstruktion der Bestände. Tabelle 3 gibt einen Überblick über das Alter auf Brusthöhe, das absolute Alter und die errechneten Ertragsklassen der Versuchspartellen.

**Tabelle 3:** Alter auf Brusthöhe, Oberhöhen ( $h_{dom}$ ), Alterszuschläge, Pflanzenalter sowie Ertragsklassen der Versuchspartellen.

Triplet	Parzelle	$h_{dom}$ [m]	Alter BHD [Jahre]	Alterszuschlag [Jahre]	Pflanzenalter [Jahre]	Ertragsklasse
1000	1 Fi	14,9	59	19	78	7,7
1000	2 Lä	17,3	57	17	74	4,49
1000	3 Fi	15,5	55	17	72	9,17
1000	3 Lä	17,0	52	13	65	5,81
2000	1 Fi	19,9	95	26	121	5,46
2000	2 Lä	25,5	51	9	60	9,18
2000	3 Fi	22,6	57	13	70	13,58
2000	3 Lä	25,1	57	8	65	8,82
3000	1 Fi	30,0	195	27	222	5,83
3000	2 Lä	30,4	196	17	213	4,62
3000	3 Fi	30,5	205	27	232	5,67
3000	3 Lä	28,6	220	21	241	3,04

Es wird deutlich, dass das Triplet 2000 keine Altershomogenität aufweist. Die Fichten-Reinparzelle ist mit 121 Jahren, bei gleichzeitig vergleichbarer Oberhöhe, etwa doppelt so alt wie der Rest des Triplets. Dieser Umstand wurde bei der Flächenanlage und -aufnahme im Sommer 2014 leider nicht erkannt.

Ansonsten stellen sich die Triplets 1000 und 3000 sowohl vom Alter als auch vom Ertragsniveau als homogen dar.

#### *BHD Rekonstruktion*

Das Ziel bestand darin, aus den erfassten ertragskundlichen Daten (BHD, Baumhöhe und Zuwächse) vom September 2014 retrospektiv die flächenbezogenen Ertragswerte früherer Wuchsperioden zu ermitteln (Pretzsch et al. 2015). Insbesondere die Ermittlung der Produktivität (laufender Volumenzuwachs) der Versuchspartellen lag dabei im Fokus. In der vorliegenden Arbeit wurden die Bestandeskennwerte der letzten 15 Jahre berechnet.

Wie in Kapitel 4.3.1 beschrieben, wurden pro Versuchspartelle an mindestens 20 Bäumen Bohrkerne entnommen. Die gemessenen Zuwächse dieser Bäume wurden (je Versuchspartelle) als Grundlage für die BHD-Rekonstruktion der ungebohrten Bäume verwendet. Es wird hierbei zunächst der 5-jährige kumulierte Durchmesserzuwachs pro Baum ermittelt und anschließend die Regressionsparameter mittels der Methode der kleinsten Quadrate hergeleitet (Pretzsch et al. 2015). Die abhängige Variable sei hierbei der kumulierte Durchmesserzuwachs (Formel 4) mit dem Zeitraum 5 Jahre und die unabhängige Variable sei der Brusthöhendurchmesser am Ende der zu betrachtenden Periode ( $BHD_p$ ).

$$D_{k,p} = a_0 + a_1 * BHD_p + a_2 * BHD_p^2 \quad \text{Formel 4}$$

mit:

$D_{k,p}$  = Berechneter kumulativer Durchmesserzuwachs [mm] in der Periode [p]

$a_0, a_1, a_2$  = Regressionsparameter

$BHD_p$  = gemessener Brusthöhendurchmesser [mm] am Ende der Periode [p]

Dies erlaubte für alle nicht gebohrten Bäume die Rekonstruktion der jeweiligen BHDs für jeden beliebigen Zeitraum ( $D_{k,i}$ ).

$$D_{k,i} = \frac{D_{k,p}}{n \text{ Jahre}_p} \quad \text{Formel 5}$$

mit:

$D_{k,i}$  = Berechneter kumulativer Durchmesserzuwachs [mm] des Einzelbaumes [i]

$n \text{ Jahre}_p$  = Anzahl der Jahre in der Periode [p]

### Höhenrekonstruktion

Grundlage für die Höhenrekonstruktion bildeten die Ertragstafeln für Fichte von Noggler (1989) und Lärche von Tumler (1992) sowie die standardisierte Höhenkurvenfunktion der Bayerischen Forstinventur (Franz 1971; Kennel 1972; Franz et al. 1973).

- (i) Zunächst wurde für das Jahr 2014 für jede Versuchsparzelle die Höhe des Grundflächenmittelstammes (hg) berechnet (Kramer und Akça 2008: 115).
- (ii) Im Anschluss wurde mit Hilfe der rekonstruierten BHDs der Durchmesser des Grundflächenmittelstammes (dg) für jedes Jahr 2014<sub>-i</sub> ermittelt (Kramer und Akça 2008: 103).
- (iii) Nun wurde für jedes Jahr und für jede Versuchsparzelle mithilfe der Ertragstafeln und der jeweiligen ermittelten Ertragsklasse der hg interpoliert.
- (iv) Die berechneten Höhen (hg) und Durchmesser (dg) des Grundflächenmittelstammes pro Jahr (i) und Versuchsparzelle wurden anschließend für die Ermittlung der einzelnen Baumhöhen ( $H_i$ ) verwendet. Die passende Höhenkurve wurde visuell ermittelt:

$$H_i = 1,3 + \left(\frac{BHD}{a+b \cdot BHD}\right)^3 \quad \text{Pettersen 1955 (aus Pretzsch 2010: 187)} \quad \text{Formel 6}$$

$$H_i = a * e^{\frac{b}{BHD}} + 1,3 \quad \text{Michailoff 1943 (aus Kramer und Akça 2008: 109)} \quad \text{Formel 7}$$

$$H_i = 1,3 + \frac{BHD^2}{a+b \cdot BHD+c \cdot BHD^2} \quad \text{Prodan 1944 (aus Kramer und Akça 2008: 109)} \quad \text{Formel 8}$$

Die Regressionskoeffizienten a und b (Tabelle 4) errechneten sich aus der standardisierten Höhenkurvenfunktion der Bayerischen Forstinventur (Franz 1971; Kennel 1972; Franz et al. 1973). Eine Übersicht welche Funktion für welche Versuchsparzelle verwendet wurde, findet sich im Anhang auf Tabelle 15.

**Tabelle 4:** Funktionsparameter  $n_0$ ,  $n_1$ ,  $n_2$  und  $n_3$  von Fichte und Lärche, sowie die verwendeten Formeln zur Errechnung der Regressionsparameter  $dwp_{Fi,Lä}$  (Wendepunkt der Höhenfunktion),  $a$  und  $b$  der Bayerischen Forstinventur (Franz 1971; Kennel 1972; Franz et al. 1973)

	$n_0$	$n_1$	$n_2$	$n_3$
<i>Fichte</i>	0,4	-2,9401	1,1801	-0,0086
<i>Lärche</i>	0,4	-2,3886	0,7738	-0,0040
$dwp_{Fi,Lä}$	$n_0 + exp^{n_1 + n_2 * \ln(\text{Alter}) + n_3 * \text{Alter}}$			
$a$	$\frac{1}{(hg_i - 1,3)^{\frac{1}{3}}} * \frac{1}{1 + \frac{dwp_{Fi,Lä}}{dg_i}}$			
$b$	$a * dwp_{Fi,Lä}$			
$e$	Eulersche Zahl: 2,71828			

### Ermittlung der flächenbezogenen Ertragswerte

Die Berechnung der Baumhöhen und BHDs ermöglichte nun die Ermittlung der flächenbezogenen Ertragswerte nach Johann (1993) und Pretzsch (2002) für das Jahr 2014, welche in Tabelle 5 dargestellt sind. Im Anhang auf Tabelle 18 findet sich die ertragskundliche Standardauswertung für die Jahre 2014, 2009, 2004 und 1999.

**Tabelle 5:** Ergebnisse der ertragskundlichen Standardauswertung nach Johann (1993) und Pretzsch (2002). Geordnet nach Triplet und Versuchsparzelle: Bestandesalter, Stammzahl (N), Oberhöhe (hdom), Oberdurchmesser (ddom), Höhe des Grundflächenmittelstammes (hg), Durchmesser des Grundflächenmittelstammes (dg), Grundfläche (G), Vorrat (V), laufender jährlicher Grundflächenzuwachs von 2009-2014 (IG) und laufender jährlicher Volumenzuwachs 2009-2014 (IV). Stand: September 2014

Triplet	Parzelle	Bestand	Baumart	Alter [Jahre]	N [n ha <sup>-1</sup> ]	hdom [m]	ddom [cm]	hg [m]	dg [cm]	G [m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> ]	V [m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ]	IG [m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup> ]	IV [m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup> ]
1000	1	rein	Fichte	78	1908	14,9	23,7	13,2	16,0	38,2	239,4	1,2	12,2
1000	2	rein	Lärche	74	1622	17,3	30,0	15,0	16,6	35,3	241,1	0,8	9,4
1000	3	misch	Fichte	72	806	15,5	26,3	13,8	17,5	19,4	126,8	0,4	5,6
1000	3	misch	Lärche	65	778	17,0	31,2	15,5	20,7	26,2	186,2	0,5	6,6
1000	3	misch	Gesamt		1584					45,6	312,9	0,9	12,2
2000	1	rein	Fichte	121	1244	19,9	41,9	17,1	23,5	54,1	451,7	0,8	10,2
2000	2	rein	Lärche	60	1438	25,5	42,6	23,4	24,0	65,1	697,6	1,3	22,1
2000	3	misch	Fichte	70	458	22,6	43,5	21,2	30,0	32,4	329,9	0,8	14,0
2000	3	misch	Lärche	65	500	25,1	39,6	23,6	28,3	31,3	336,6	0,5	8,7
2000	3	misch	Gesamt		958					63,8	666,5	1,2	22,7
3000	1	rein	Fichte	222	355	30,0	61,1	29,4	47,1	61,9	815,8	0,8	10,2
3000	2	rein	Lärche	213	356	30,4	68,1	30,0	52,2	76,3	937,6	0,5	8,2
3000	3	misch	Fichte	232	212	30,5	62,9	29,9	46,9	36,7	490,8	0,4	5,1
3000	3	misch	Lärche	241	146	28,6	64,3	28,4	56,2	36,3	422,7	0,3	4,5
3000	3	misch	Gesamt		358					73,0	913,5	0,7	9,6

### 4.3.5 Berechnung der Mischungsanteile und der erwarteten Produktivität

Zur Bearbeitung der Fragestellung (1) inwiefern sich die Produktivität von Fichte und Lärche im Mischbestand von den jeweiligen Reinbeständen unterscheidet (Kapitel 3), war die Berechnung der korrekten Mischungsanteile von Fichte und Lärche in den Mischbeständen essentiell (Sterba et al. 2014). Die Berechnung der Mischungsanteile ermöglichte die Ermittlung der zu erwartenden Produktivität und somit einen direkten Vergleich mit der gemessenen Produktivität (Over-, bzw. Underyielding; Pretzsch 2010). Die Produktivität der Bestände wurde durch den mittleren laufenden fünfjährigen Volumenzuwachs IV ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{Jahr}^{-1}$ ) ausgedrückt. In der vorliegenden Arbeit wurden die Mischungsanteile auf Grundlage des *Stand-Density-Indexes* (SDI) nach Reineke (1933) ermittelt. Zunächst wurde die Bestandesdichte der Reinparzellen getrennt nach Baumarten berechnet:

$$SDIMAX_{Fi, rein} = Stammzahl_{Fi, rein} * \left(\frac{25}{dg_{Fi, rein}}\right)^{-1,605} \quad \text{Formel 9}$$

$$SDIMAX_{Lä, rein} = Stammzahl_{Lä, rein} * \left(\frac{25}{dg_{Lä, rein}}\right)^{-1,605} \quad \text{Formel 10}$$

Der SDIMAX im Reinbestand repräsentiert den regionaltypisch-maximalen Standraumbedarf der jeweiligen Baumart (Pretzsch et al. 2015: 933f). Analog wurde auch der SDI je Baumart im Mischbestand berechnet ( $SDI_{Fi, (Lä)}$  und  $SDI_{(Fi), L\ddot{a}}$ ). Im Anschluss wurde der Äquivalenzfaktor ( $e$ ) ermittelt, um den SDI einer Baumart in jenen der anderen umzurechnen:

$$e = \frac{SDIMAX_{Fi, rein}}{SDIMAX_{Lä, rein}} \quad \text{Formel 11}$$

Der errechnete Äquivalenzfaktor bildete die Basis zur Berechnung der Mischungsanteile der beiden Baumarten im Mischbestand:

$$m_{Fi, (L\ddot{a})} = \frac{SDI_{Fi, (L\ddot{a})}}{(SDI_{Fi, (L\ddot{a})} + SDI_{(Fi), L\ddot{a}} * e)} \quad \text{Formel 12}$$

$$m_{(Fi), L\ddot{a}} = \frac{SDI_{(Fi), L\ddot{a}} * e}{(SDI_{Fi, (L\ddot{a})} + SDI_{(Fi), L\ddot{a}} * e)} \quad \text{Formel 13}$$

Auf diese Weise floss der unterschiedliche Standraumbedarf (Sterba et al. 2014) der Fichten und Lärchen in die Berechnung der Mischungsanteile ( $m_{Fi, (L\ddot{a})}$  und  $m_{(Fi), L\ddot{a}}$ ) mit ein (Tabelle 6).



#### 4.3.6 Berechnung der Kennzahlen zur Stressreaktion nach Lloret et al. (2011)

Zur Beantwortung der Fragestellung (3) ob Fichten und Lärchen im Mischbestand anders auf Extremjahre als im Reinbestand reagieren (Kapitel 3), wurden die von Lloret et al. (2011) entwickelten Kennzahlen zur Quantifizierung von Reaktionsmustern auf Stressjahre verwendet. Im Fokus der Untersuchung standen die Trockenjahre 1976 und 1980 (in Abb. 10 und 25 sind die Zuwachseinbrüche in den Jahren 1976 und 1980 deutlich erkennbar).

Zunächst wurden die indexierten Zuwächse (auf Einzelbaumbasis, Kapitel 4.3.3) vor, während und nach dem jeweiligen Trockenjahr bearbeitet. Abweichend von der ursprünglichen Arbeit von Lloret et al. (2011), in der Grundflächenzuwächse die Grundlage der Untersuchung bildeten, wurden in der vorliegenden Arbeit indexierte Radialzuwächse verwendet:

Die Quantifizierung der dreijährigen Wachstumsphase vor einem Trockenereignis (*pre Dr*) wurde durch das arithmetische Mittel der indexierten Zuwächse der drei Jahre vor dem jeweiligen Trockenereignis (*t*) gebildet:

$$preDr = \frac{\sum_{x=t-3}^{t-1} \text{indexierter Zuwachs Jahr}_x}{3} \quad \text{Formel 16}$$

Die Zuwachsreaktion des Baumes während eines Trockenereignisses (*Dr*) wurde durch den indexierten Zuwachs des jeweiligen Trockenjahres beschrieben:

$$Dr = \text{indexierter Zuwachs Jahr}_x \quad \text{Formel 17}$$

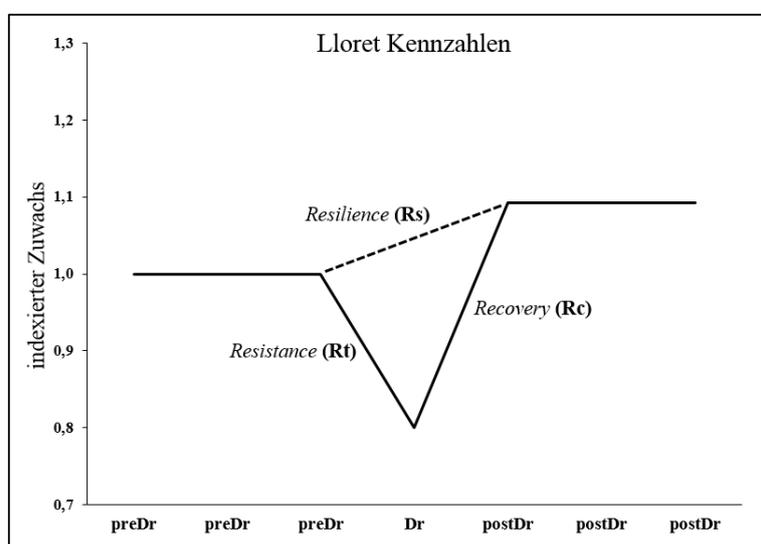
Die Quantifizierung der dreijährigen Wachstumsphase nach einem Trockenereignis (*post Dr*) wurde durch das arithmetische Mittel der indexierten Zuwächse der drei Jahre nach einem Trockenereignis gebildet:

$$postDr = \frac{\sum_{x=t+1}^{t+3} \text{indexierter Zuwachs Jahr}_x}{3} \quad \text{Formel 18}$$

Im Anschluss konnten die in Tabelle 7 beschriebenen Kennzahlen Resistance, Recovery und Resilience errechnet werden. Abbildung 11 veranschaulicht die graphische Darstellung der Kennzahlen.

**Tabelle 7:** Beschreibung der von Lloret et al. (2011) entwickelten Kennzahlen zur Quantifizierung von Wachstumsreaktionen auf Stressjahre.

<b>Resistance (Rt)</b>	
$Rt = \frac{Dr}{preDr}$	Beschreibung des Zuwachseinbruches während des Stressereignisses. Je geringer der Zuwachseinbruch ausfällt, desto größer Rt.
<b>Recovery (Rc)</b>	
$Rc = \frac{postDr}{Dr}$	Beschreibung der Erholungsfähigkeit nach einem Stressereignis. Je größer Rc, desto besser die Erholung.
<b>Resilience (Rs)</b>	
$Rs = \frac{postDr}{preDr}$	Beschreibung der Elastizität, also der Fähigkeit nach einem Stressereignis auf das ursprüngliche Wachstumsniveau zurückzukehren. Wenn $Rs = 1$ , dann wurde das Wachstumsniveau vor dem Stressereignis wieder erreicht, wenn $Rs < 1$ geringeres Wachstumsniveau, wenn $Rs > 1$ erhöhtes Wachstumsniveau gegenüber dem Stressereignis.



**Abbildung 11:** Graphische Darstellung der Kennzahlen zur Quantifizierung von Wachstumsreaktionen auf Stressjahre nach Lloret et al. (2011).

#### 4.3.7 Statistische Testverfahren

*Fragestellung 2 (Kapitel 3): Reagieren Fichte und Lärche im Mischbestand anders auf unterschiedlich günstige Jahre als im Reinbestand?*

Die statistische Analyse der Zuwachsreaktionen in Misch- und Reinbeständen auf variierende Umweltbedingungen wurde separat für jede Baumart durchgeführt. Als Basis hierfür dienten die jährlichen Mittelwerte der indexierten Radialzuwächse (Kapitel 4.3.3) der Rein- ( $I_{r_r}$ ) und Mischversuchspartellen ( $I_{r_m}$ ). Aus dem Wert der Differenz aus  $I_{r_m}$  und  $I_{r_r}$  (Formel 19) lässt sich für das jeweilige Jahr erkennen, ob der Rein- oder Mischbestand hinsichtlich Wuchsleistung überlegen ist:

$$I_{r_{diff}} = I_{r_m} - I_{r_r} \quad \text{Formel 19}$$

mit:

$I_{r_{diff}}$  = Differenz der indexierten Radialzuwächse der Misch- und Reinparzelle im jeweiligen Jahr

$I_{r_m}$  = Mittelwert aller indexierten Radialzuwächse der Mischparzelle im jeweiligen Jahr

$I_{r_r}$  = Mittelwert aller indexierten Radialzuwächse der Reinparzelle im jeweiligen Jahr

Anschließend wurde mittels linearem Modell (Formel 20) auf Signifikanz geprüft:

$$y = m_1 * x_1 + b \quad \text{Formel 20}$$

mit:

$y$  =  $I_{r_{diff}}$  (abhängige Variable)

$m_1$  = Steigung der Regressionsgeraden

$x_1$  =  $I_{r_r}$  (unabhängige Variable)

$b$  = y-Achsenabschnitt

*Fragestellung 3 (Kapitel 3): Reagieren Fichte und Lärche im Mischbestand anders auf Extremjahre als im Reinbestand?*

Auf signifikante Unterschiede der  $R_t$ -,  $R_c$ - und  $R_s$ -Werte (Kapitel 4.3.3) zwischen den Rein- und Mischbeständen wurde mittels „*Welch Two Sample t-test*“ (Crawley 2007: 293ff) geprüft.

#### 4.3.8 Verwendete Software

Die der Arbeit zugrunde liegenden Daten wurden deskriptiv mit Excel 2013 und analytisch mit der Statistiksoftware R (Version 3.2.2, 2015-08-14; R Core Team 2016) bearbeitet und untersucht.

Zur Berechnung von flächenbezogenen Ertragswerten wurden lehrstuhlinterne (Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Technischen Universität München) Standardprogramme (Biber 2013) verwendet.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Volumenzuwächse im Rein- und Mischbestand - bestandesweise Auswertung

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse zur ersten Fragestellung (Kapitel 3) präsentiert.

#### *Triplet 1000*

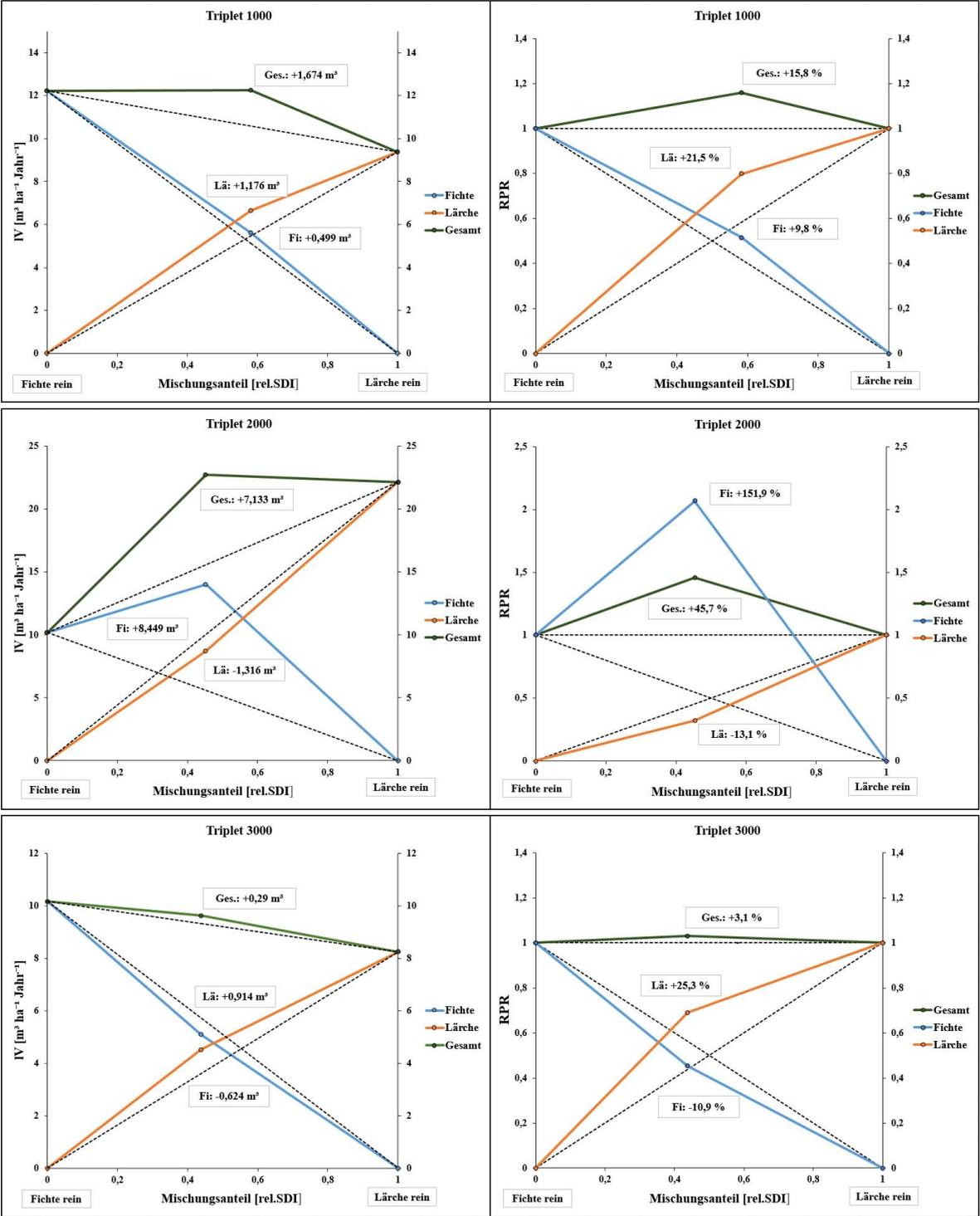
Die Produktivität des gesamten Mischbestandes (Fichte und Lärche) ist mit  $12,2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$  genauso hoch wie die des Fichten-Reinbestandes (ebenfalls  $12,2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ ) und höher als die des Lärchen-Reinbestandes mit  $9,4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$  ( $p_{Fi,Lä} = p_{Fi}$  und  $p_{Fi,Lä} > p_{Lä}$ ). Der Erwartungswert der Gesamtproduktivität wird um  $1,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$  übertroffen, das entspricht einer erhöhten Produktivität von 15,8%. Die Fichte leistet im Mischbestand  $0,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$  mehr Zuwachs als der errechnete Erwartungswert, was einem Plus von 9,8% entspricht. Die Lärche leistet im Mischbestand  $1,2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$  mehr als errechnet. Dies entspricht einem Mehrzuwachs von 21,5%. (Abbildung 12, Anhang Tabelle 17)

#### *Triplet 2000*

Der Gesamtzuwachs des Mischbestandes liegt bei  $22,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ , und befindet sich damit über dem erwarteten Zuwachs von  $15,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$  (+45,7%). Die Gesamtproduktivität im Mischbestand liegt oberhalb der Produktivität im Fichten-Reinbestand ( $10,2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ ) und oberhalb der Produktivität des Lärchen-Reinbestandes von  $22,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$  ( $p_{Fi,Lä} > p_{Fi}$  und  $p_{Fi,Lä} > p_{Lä}$ ). Im Mischbestand leistet die Fichte  $8,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$  mehr als erwartet (+151,9%). Die Lärche leistet im Mischbestand  $1,3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$  weniger Zuwachs als der errechnete Erwartungswert, was einem Minus von 13,1% entspricht. (Abbildung 12, Anhang Tabelle 17)

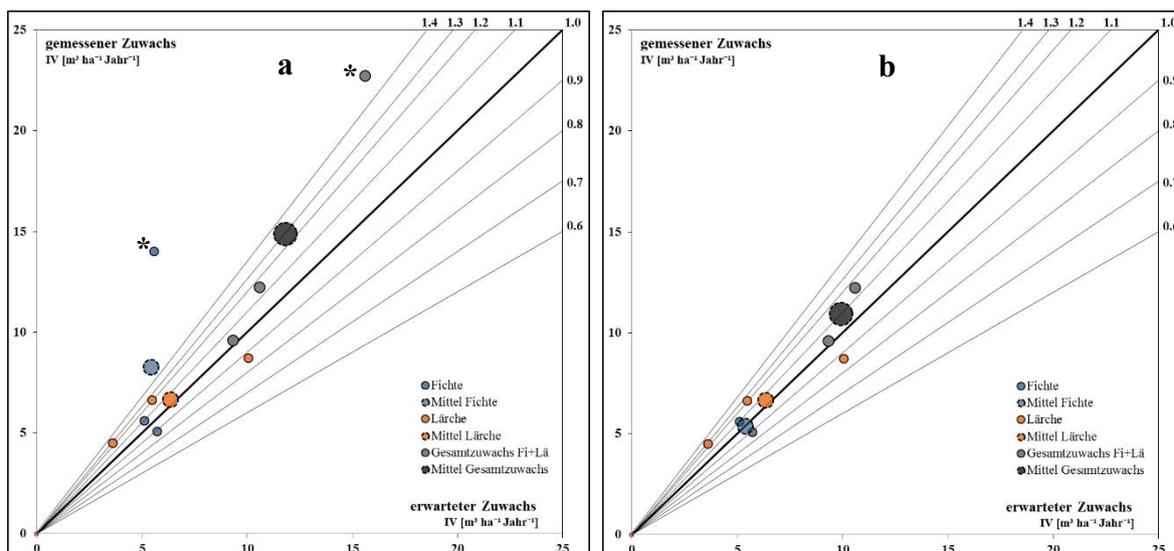
#### *Triplet 3000*

Im Mischbestand liegt die gemessene Gesamtproduktivität bei  $9,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ , was einem Mehrzuwachs von  $0,3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$  (+3,1%) gegenüber dem errechneten Erwartungswert entspricht. Die Gesamtproduktivität im Mischbestand liegt unterhalb der Produktivität im Fichten-Reinbestand ( $10,2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ ) und oberhalb der Produktivität des Lärchen-Reinbestandes von  $8,2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$  ( $p_{Fi,Lä} < p_{Fi}$  und  $p_{Fi,Lä} > p_{Lä}$ ). Die Fichte leistet im Mischbestand  $0,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$  weniger Zuwachs als der errechnete Erwartungswert, was einem Minus von 10,9% entspricht. Die Lärche leistet im Mischbestand  $0,9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$  mehr als errechnet. Dies entspricht einem Mehrzuwachs von 25,3%. (Abbildung 12, Anhang Tabelle 17)



**Abbildung 12:** Darstellung der ermittelten laufenden Volumenzuwächse (2010 bis 2014) auf den drei Triplets am Nördersberg. Die gestrichelten Linien entsprechen den erwarteten Zuwächsen falls keine Mischungseffekte vorhanden sind. Die durchgezogenen Linien entsprechen den mit den Mischungsanteilen gewichteten, ermittelten Volumenzuwächsen. Die Mischungsanteile wurden auf Grundlage des SDI ermittelt. Links: laufende Volumenzuwächse  $m^3 ha^{-1} Jahr^{-1}$  (IV). Rechts: Darstellung der relativen Produktivität (RPR). Die RPR entspricht den prozentuellen Volumenzuwächsen. Die Werte der Reinparzellen von 1,0 entsprechen 100% (als relativer Vergleichswert). Die errechneten Volumenzuwächse der Mischparzellen werden mit ihrer prozentuellen Abweichung vom erwarteten Volumenzuwachs abgebildet.

Abbildung 13 stellt die in Abbildung 12 bereits gezeigten Ergebnisse erneut in einer anderen Form dar. Die gemessenen Zuwächse werden über den erwarteten Zuwächsen aufgetragen und als Kreise dargestellt. Kreise oberhalb der 1,0-Linie offenbaren einen Synergieeffekt im betreffenden Triplet. Kreise unterhalb der 1,0-Linie weisen auf erhöhte Konkurrenz hin. In Abbildung 13 wird deutlich, dass auf allen drei Triplets im Gesamtbestand (schwarze Kreise) Synergieeffekte auftreten.



**Abbildung 13:** Gegenüberstellung der erwarteten Zuwächse (Abszisse) und der ermittelten Zuwächse (Ordinate) der drei Triplets am Nördersberg. Die kleinen Kreise stellen die einzelnen Triplets dar. Die größeren Kreise (mit gestricheltem Rand) entsprechen dem arithmetischen Mittel der drei Triplets. In Abbildung 13b wurden die in Abb. 13a durch Sterne (\*) kenntlich gemachten Zuwächse der Fichten-Reinparzelle und der Fichten-Lärchen-Mischparzelle des Triplets 2000 entfernt.

Sowohl in Abbildung 12 als auch in Abbildung 13a fällt vor allem der sehr hohe gemessene Zuwachs der Fichte in der Mischparzelle des Triplets 2000 mit einem Plus von 151,9% gegenüber dem erwarteten Zuwachs auf (in der Abbildung 13a durch Sterne (\*) kenntlich gemacht). Dies könnte eine Überschätzung darstellen. Auf die näheren Umstände hierfür wird in Kapitel 6.1 eingegangen. Abbildung 13b stellt deshalb erneut die erwarteten und gemessenen Zuwächse dar, jedoch ohne den Fichtenzuwachs in der Mischparzelle 2000 und ohne den Gesamtzuwachs der Mischparzelle 2000. Abbildung 13b verdeutlicht, dass die Fichte (blaue Kreise) am Nördersberg in Mischung in etwa den erwarteten Zuwachs leistet. Die Lärche (orange Kreise) leistet in Mischung etwa ein Plus von 10%, ebenso wie der Gesamtzuwachs der Mischparzellen (schwarze Kreise).

## 5.2 Variabilität von Mischungseffekten bei variierenden Wuchsbedingungen

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse zur zweiten Fragestellung (Kapitel 3), inwieweit Fichte und Lärche im Mischbestand anders auf unterschiedlich günstige Jahre als im Reinbestand reagieren, präsentiert. Dieser Frage wird durch Betrachtung der Differenz ( $I_{r_{diff.}}$ ) der indexierten Radialzuwächse der Rein- und Mischbestände nachgegangen (Kapitel 4.3.7).

Auf der Abszisse (Abbildung 14 und 15) aufgetragene Zuwächse des Reinbestandes ( $I_{r_r}$ ) repräsentieren die Zuwachsvariabilität aufgrund variierender Umweltbedingungen (Sortierung aufsteigend von schlechten nach guten Umweltbedingungen). Hohe Zuwächse auf der x-Achse (Werte  $> 1$ ) deuten auf günstige Wuchsbedingung im betreffenden Jahr hin. Niedrige Zuwächse (Werte  $< 1$ ) sind ein Indikator für ungünstige Wuchsbedingung. Auf der Ordinate sind die Zuwächse des Mischbestandes - Zuwächse des Reinbestandes ( $I_{r_{diff.}}$ ) für dasselbe jeweilige Jahr aufgetragen (Kapitel 4.3.7). Werte auf der y-Achse größer 0 (oberhalb der rot gestrichelten Linie) repräsentieren eine Überlegenheit des Mischbestandes, Werte kleiner 0 (unterhalb der rot gestrichelten Linie) deuten auf eine Überlegenheit des Reinbestandes im betreffenden Jahr hin. Die Steigung ( $m_1$ ) der Regressionsgerade gibt Aufschluss über den allgemeinen Trend in ungünstigen Jahren:

$m_1 \approx 0$ (horizontale Steigung):	kein Trend
$m_1 > 0$ (positive Steigung):	Reinbestand im Vorteil (wüchsiger)
$m_1 < 0$ (negative Steigung):	Mischbestand im Vorteil (wüchsiger)

### 5.2.1 Variabilität der Fichte im Rein- und Mischbestand

In Abbildung 14 werden die Zuwachsunterschiede zwischen den Misch- und Reinparzellen in Abhängigkeit der jährlichen Wuchsbedingungen der Fichten dargestellt. Im Anhang (Tabelle 18) werden die Ergebnisse der statistischen Analyse (Formel 20, Kapitel 4.3.7) nochmal detailliert präsentiert.

*Triplet 1000*

Es besteht ein hochsignifikanter ( $p = 0,00152$ ) negativer ( $m = -0,396$ ) Zusammenhang zwischen  $[I_{r_{diff.}}]$  und  $[I_{r_r}]$ .

Dies bedeutet, dass die Fichten im Mischbestand den Fichten im Reinbestand in Jahren mit ungünstigen Wuchsbedingungen hinsichtlich Wuchsleistung (Radialzuwachs) überlegen sind.

*Triplet 2000*

Es besteht ein höchstsignifikanter ( $p = 0,0000156$ ) negativer ( $m = -0,3569$ ) Zusammenhang zwischen  $[I_{r_{diff.}}]$  und  $[I_{r_r}]$ .

Auch im Triplet 2000 sind die Fichten im Mischbestand in ungünstigen Jahren den Fichten im Reinbestand hinsichtlich Wuchsleistung überlegen.

*Triplet 3000*

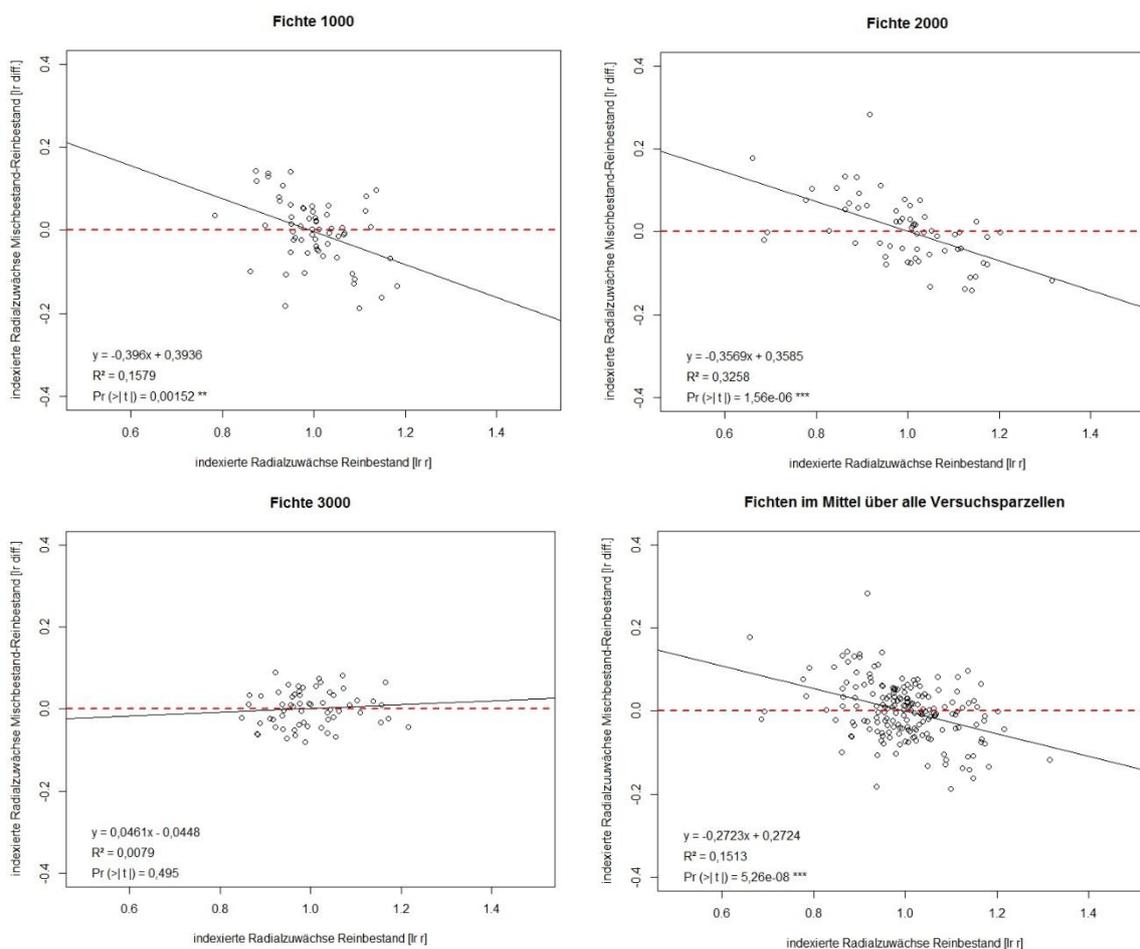
Es besteht ein nicht signifikanter ( $p = 0,495$ ) positiver ( $m = 0,0461$ ) Zusammenhang zwischen  $[I_{r_{diff.}}]$  und  $[I_{r_r}]$ .

Dies deutet darauf hin, dass die Mischungsform bei der Fichte keinen Einfluss auf den Zuwachs bei variierenden Umweltbedingungen nimmt.

*Fichten im Mittel über alle Versuchspartzellen*

Es besteht ein höchstsignifikanter ( $p = 0,0000526$ ) negativer ( $m = -0,2723$ ) Zusammenhang zwischen  $[I_{r_{diff.}}]$  und  $[I_{r_r}]$ .

Die Auswertung aller drei Triplets zusammen in einem Modell ergibt eine Wuchsüberlegenheit der Fichten auf den Mischpartzellen gegenüber der Fichten auf den Reinpartzellen in Jahren mit ungünstigen Wuchsbedingungen am Nördersberg.



**Abbildung 14:** Zuwachsunterschiede zwischen den Misch- und Reinparzellen in Abhängigkeit der jährlichen Wuchsbedingungen. Darstellung der indexierten Radialzuwächse der Fichte im Rein- und Mischbestand am Nördersberg getrennt nach Triplets, sowie der Ergebnisse der linearen Regression (Kapitel 4.3.7). Abszisse: Zuwächse des Reinbestandes  $[I_{r_r}]$ . Ordinate: Zuwächse des Mischbestandes - Zuwächse des Reinbestandes  $[I_{r_{diff.}}]$  im selben Jahr.

## 5.2.2 Variabilität der Lärche im Rein- und Mischbestand

In Abbildung 15 werden die Zuwachsunterschiede zwischen den Misch- und Reinparzellen in Abhängigkeit der jährlichen Wuchsbedingungen der Lärchen dargestellt. Im Anhang (Tabelle 18) werden die Ergebnisse der statistischen Analyse (Formel 20, Kapitel 4.3.7) nochmal detailliert präsentiert.

*Triplet 1000*

Es besteht ein nicht signifikanter ( $p = 0,236$ ) positiver ( $m = 0,214$ ) Zusammenhang zwischen  $[I_{r_{diff.}}]$  und  $[I_{r_r}]$ .

Die Steigung würde auf einen Wachstumsvorteil des Reinbestandes in ungünstigen Jahren hinweisen, dies ist jedoch statistisch nicht gesichert.

*Triplet 2000*

Es besteht ein höchstsignifikanter ( $p = 0,000193$ ) negativer ( $m = -0,3199$ ) Zusammenhang zwischen  $[I_{r_{diff.}}]$  und  $[I_{r_r}]$ .

Im Triplet 2000 besteht ein statistisch gesicherter Wachstumsvorteil (Radialzuwachs) der Lärchen auf der Mischparzelle gegenüber der Lärchen auf der Reinparzelle in Jahren mit ungünstigen Wuchsbedingungen.

*Triplet 3000*

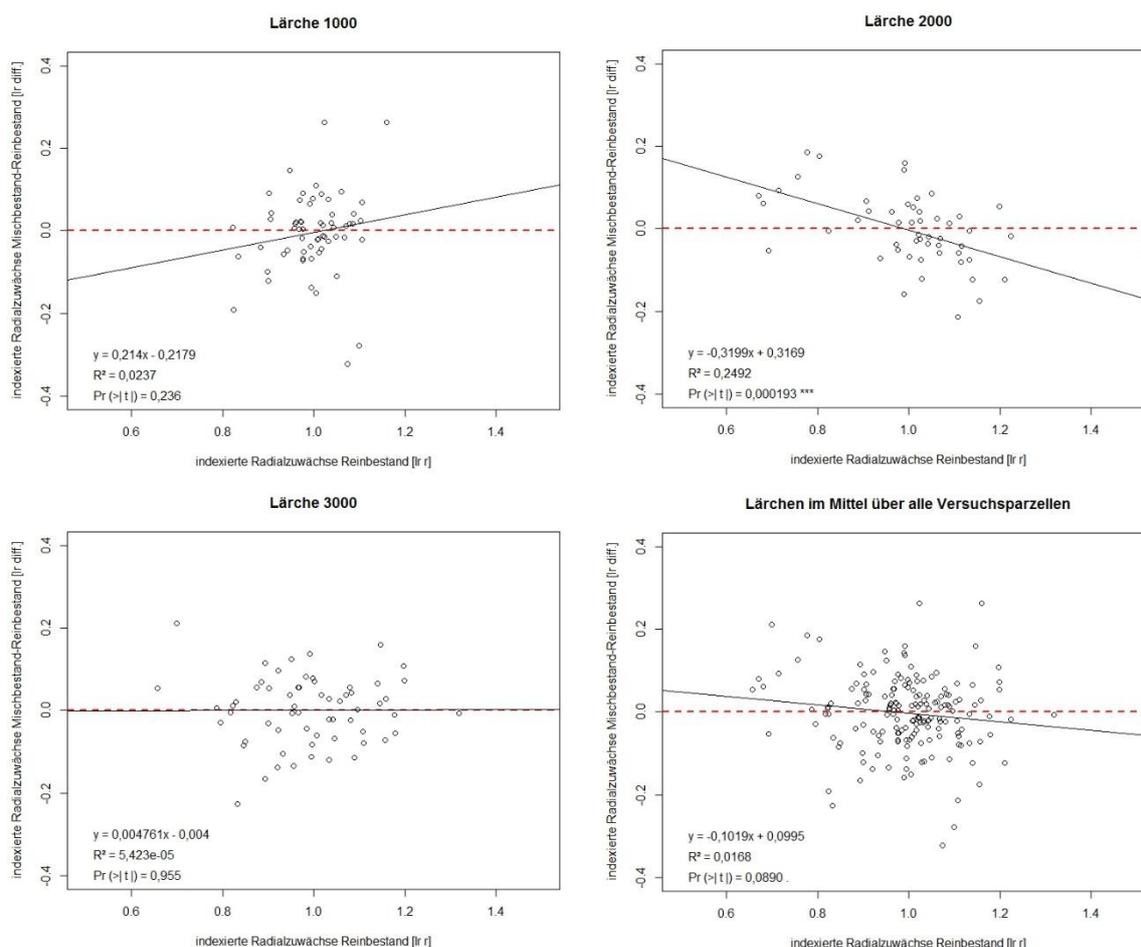
Es besteht ein nicht signifikanter ( $p = 0,955$ ) positiver ( $m = 0,004761$ ) Zusammenhang zwischen  $[I_{r_{diff.}}]$  und  $[I_{r_r}]$ .

Die Wuchsreaktion der Lärche auf günstige und ungünstige Jahre gestaltet sich auf dem Triplet 3000 sehr ähnlich zur Wuchsreaktion der Fichte im Triplet 3000 (Kapitel 5.2.1). Auch bei der Lärche lässt sich keine unterschiedliche Wuchsreaktion auf unterschiedlich günstige Jahre von ihrer jeweiligen Mischungsform ableiten.

*Lärchen im Mittel über alle Versuchspartzellen*

Es besteht ein nicht signifikanter ( $p = 0,089$ ) negativer ( $m = -0,10195$ ) Zusammenhang zwischen  $[I_{r_{diff.}}]$  und  $[I_{r_r}]$ .

Das Ergebnis der Auswertung aller Lärchen in den drei Triplets am Nördersberg ergibt eine ähnliche Tendenz wie bei allen Fichten (Kapitel 5.2.1). Die negative Steigung deutet auf einen Vorteil der Lärchen auf den Mischparzellen in ungünstigen Jahren hin. Diese Tendenz ist jedoch statistisch nicht gesichert.



**Abbildung 15:** Zuwachsunterschiede zwischen den Misch- und Reinparzellen in Abhängigkeit der jährlichen Wuchsbedingungen. Darstellung der indexierten Radialzuwächse der Lärche im Rein- und Mischbestand am Nördersberg getrennt nach Triplets, sowie der Ergebnisse der linearen Regression (Kapitel 4.3.7). Abszisse: Zuwächse des Reinbestandes [ $I_{r_t}$ ]. Ordinate: Zuwächse des Mischbestandes - Zuwächse des Reinbestandes [ $I_{r_{diff}}$ ] im selben Jahr.

### 5.3 Zuwachsvergleich der Rein- und Mischbestände in den Trockenjahren 1976 und 1980 - Auswertung der Einzelbaumreaktion nach Lloret et al. (2011)

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse zur dritten Fragestellung (Kapitel 3), inwieweit Fichten und Lärchen im Mischbestand anders auf Extremjahre als im Reinbestand reagieren, präsentiert. Abbildung 16 und 18 stellen die errechneten Kennzahlen zur Quantifizierung von Zuwachsreaktionen auf Stressjahre (Resistance, Recovery und Resilience, Kapitel 4.3.6) nach Lloret et al. (2011) der Einzelbäume für die Jahre 1976 und 1980 als Boxplots dar. Auf den Abbildungen 17 und 19 finden sich die graphischen Darstellungen der bestandesweise gemittelten Lloret-Kennzahlen getrennt nach Baumart und Versuchspartelle für das Jahr 1976 und 1980. In Tabelle 8 und 10 ist für die Jahre 1976 und 1980 zusammengefasst, wieviel Prozent (Anzahl der Einzelbäume) der errechneten Lloret-Kennzahlen im Mischbestand höhere Werte aufweisen als im jeweiligen Reinbestand. Die Prozentangaben

geben also Aufschluss darüber, ob der Misch- oder Reinbestand im betreffenden Trockenjahr eine bessere Performance bei der jeweiligen Lloret-Kennzahl lieferte. Die Tabellen 9 (1976) und 11 (1980) geben einen Überblick über den statistischen Vergleich der Rein- und Mischbestände (Kapitel 4.3.7).

#### *Resistance Trockenjahr 1976*

Die Fichten auf der Mischparzelle des Triplets 2000 sind den Fichten auf der Reinparzelle überlegen (74%). Diese Überlegenheit der Mischparzelle ist signifikant ( $p=0,008799$ ).

Bei der Lärche sind die Mischparzellen der Triplets 2000 und 3000 den jeweiligen Reinparzellen überlegen (83% und 67%). Der Unterschied zwischen der Misch- und Reinparzelle des Triplets 2000 ist signifikant ( $p=0,002015$ ).

Bei der Fichte sind 1/3, bei der Lärche 2/3 der Mischparzellen ihren jeweiligen Reinparzellen hinsichtlich der Resistance-Werte überlegen (Tabelle 8 und 9).

#### *Recovery Trockenjahr 1976*

Die Fichten auf den Mischparzellen der Triplets 1000 und 3000 weisen zu 88% und 65% höhere Recovery-Werte als die jeweiligen Fichten auf den Reinparzellen auf. Der Unterschied zwischen der Misch- und Reinparzelle des Triplets 3000 ist signifikant ( $p=0,04051$ ). Im Triplet 2000 weisen die Fichten auf der Reinparzelle signifikant ( $p=0,0004591$ ) höhere Recovery-Werte auf.

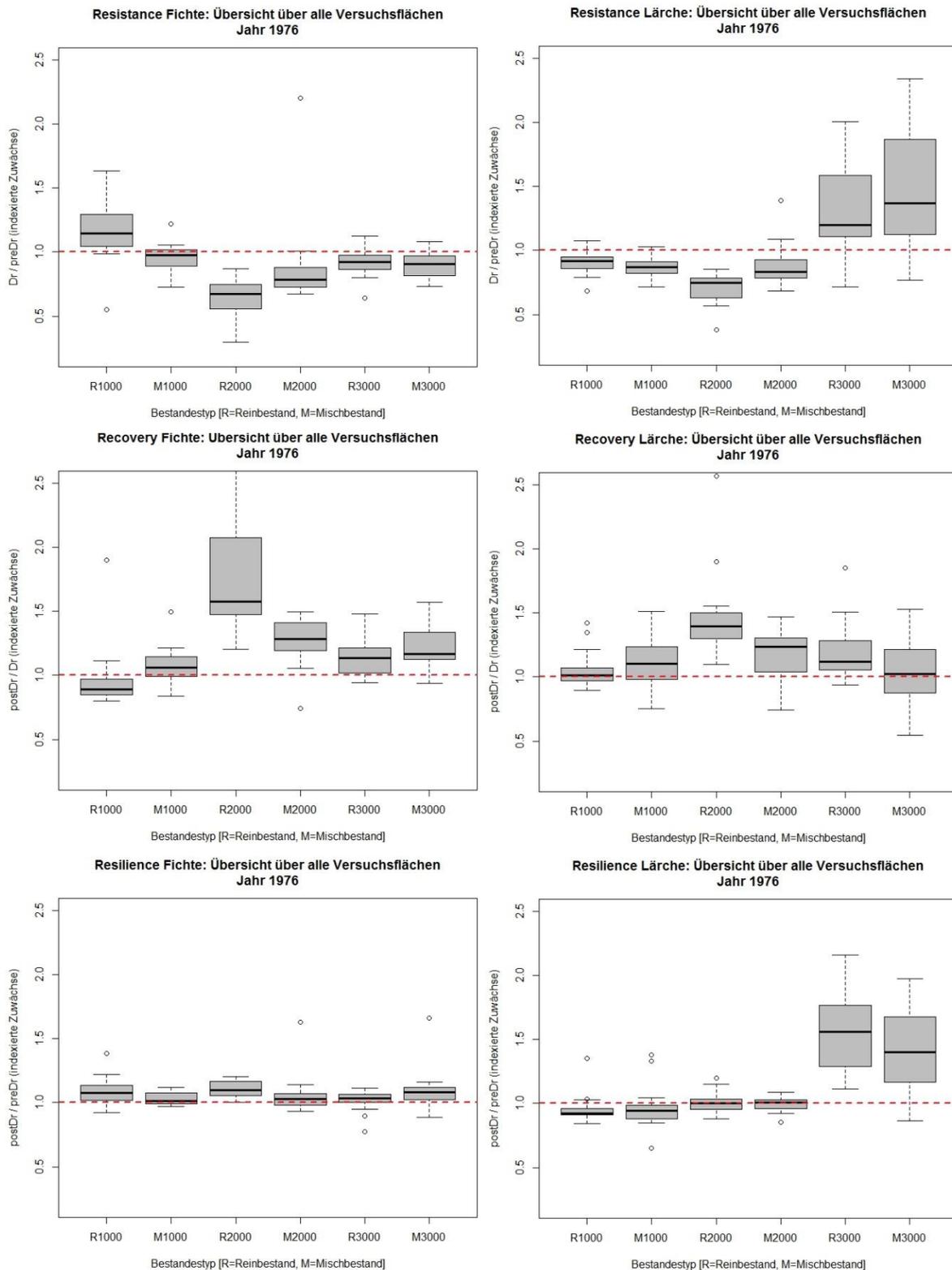
Bei der Lärche ist nur die Mischparzelle des Triplets 1000 ihrer entsprechenden Reinparzelle überlegen (53%). Die Recovery-Werte der Lärchen auf der Reinparzelle des Triplets 2000 sind signifikant ( $p=0,0004591$ ) unterschiedlich zur Mischparzelle.

Bei der Fichte sind 2/3, bei der Lärche 1/3 der Mischparzellen ihren jeweiligen Reinparzellen hinsichtlich der Recovery-Werte überlegen (Tabelle 8 und 9).

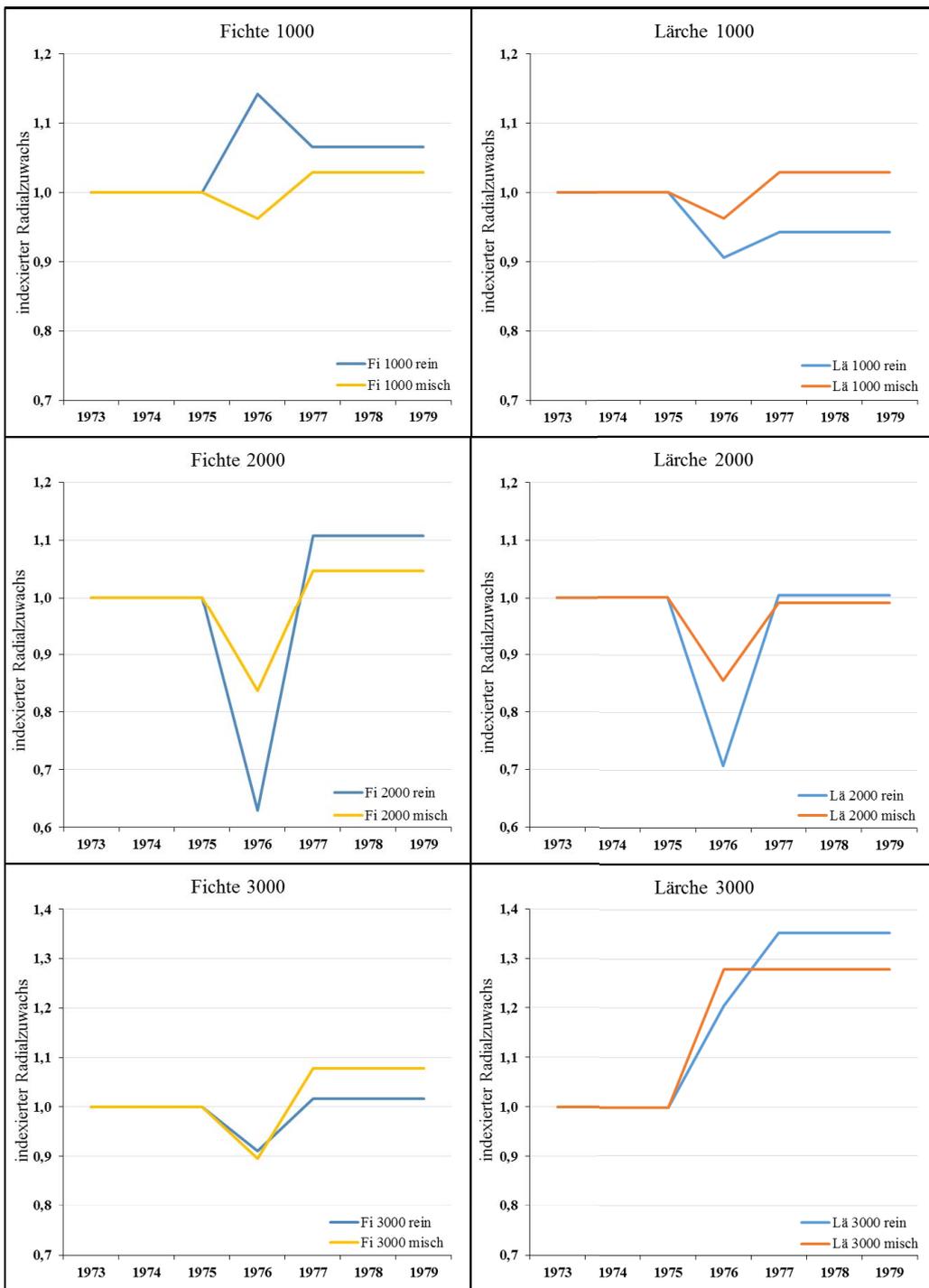
#### *Resilience Trockenjahr 1976*

Ausschließlich die Fichten auf der Mischparzelle des Triplets 3000 weisen höhere (65%) Resilience-Werte als die Fichten auf der Reinparzelle auf. Dieser Unterschied ist nur knapp nicht signifikant ( $p=0,05871$ ). Bei der Lärche ist ausschließlich die Mischparzelle des Triplets 1000 der jeweiligen Reinparzelle hinsichtlich des Resilience-Wertes überlegen

(58%). Bei der Fichte sind ebenso wie bei der Lärche 1/3 der Mischparzellen ihren jeweiligen Reinparzellen hinsichtlich der Resilience-Werte überlegen (Tabelle 8 und 9).



**Abbildung 16:** Boxplotdarstellung der errechneten Kennzahlen zur Quantifizierung von Zuwachsreaktionen auf Stressjahre (Resistance, Recovery und Resilience) nach Lloret et al. (2011) der Einzelbäume für das Jahr 1976. Darstellung getrennt nach Baumarten (links Fichte und rechts Lärche), nach Triplets (1000, 2000 und 3000), sowie nach Reinbeständen (R) und Mischbeständen (M).



**Abbildung 17:** Graphische Darstellung der bestandesweise errechneten Kennzahlen (Mittelwerte aller Bäume auf der jeweiligen Versuchspartizelle) zur Quantifizierung von Zuwachsreaktionen auf Stressjahre (Resistance, Recovery und Resilience; Kapitel 4.3.6) nach Lloret et al. (2011) für das Jahr 1976. Darstellung getrennt nach Triplets (1000, 2000 und 3000), Baumart (links Fichte und rechts Lärche) und nach Reinbeständen (blau) und Mischbeständen (Fichte gelb und Lärche orange).

### Zusammenfassung Trockenjahr 1976

Die Mischbestände der Fichte reagieren auf das Trockenjahr 1976 sensibler als die Reinbestände. Dies zeigt sich auf 2/3 der Mischparzellen durch höhere Zuwachseinbußen im Trockenjahr 1976. Die Fichte auf der Mischparzelle des Triplets 2000 reagieren auf den trockenheitsinduzierten Zuwachseinbruch jedoch signifikant besser als der Reinbestand. Die Fichten der zwei Mischbestände der Triplets 1000 und 3000, welche einen höheren Zuwachseinbruch als die Reinbestände erlitten haben, erholen sich im Anschluss des Stressereignisses jedoch rasch, und erreichen nach dem Trockenjahr 1976 ein höheres Wuchsniveau als vor dem Ereignis (Abbildung 16 und 17).

Insgesamt betrachtet reagieren die Lärchen auf den Mischparzellen aller drei Triplets auf das Trockenjahr 1976 stabiler als die Lärchen auf den Reinparzellen. Es besteht einzig ein Unterschied im Reaktionsmuster nach dem Stressereignis. Das Wuchsniveau der Lärchen auf den Mischparzellen der Triplets 1000 und 3000 wird nach dem Trockenereignis gesteigert, wohingegen das Wuchsniveau der Lärchen auf der Mischparzelle des Triplets 2000 leicht sinkt (Abbildung 16 und 17).

**Tabelle 8:** Gegenüberstellung der errechneten Kennzahlen nach Lloret et al. (2011) der Einzelbäume in den Rein- und Mischparzellen für das Jahr 1976. Die Werte geben Aufschluss darüber, wie viel Prozent der errechneten Einzelbaum-Kennzahlen (Resistance, Recovery und Resilience; Kapitel 4.3.6) in den jeweiligen Mischparzellen höher sind als in den Reinparzellen. Fett gedruckte Werte: Die Lloret-Kennzahlen der Einzelbäume des Mischbestandes weisen in über 50% der Fälle höhere Werte (bessere Performance, vgl. Kapitel 4.3.6) als die Einzelbäume des Reinbestandes auf.

<b>Fichte 1976</b>	<b>Resistance misch &gt; rein</b>	<b>Recovery misch &gt; rein</b>	<b>Resilience misch &gt; rein</b>
1000	13%	<b>88%</b>	25%
2000	<b>74%</b>	16%	21%
3000	35%	<b>65%</b>	<b>65%</b>
<b>Lärche 1976</b>	<b>Resistance misch &gt; rein</b>	<b>Recovery misch &gt; rein</b>	<b>Resilience misch &gt; rein</b>
1000	42%	<b>53%</b>	<b>58%</b>
2000	<b>83%</b>	22%	33%
3000	<b>67%</b>	27%	40%

**Tabelle 9:** P-Werte des *Welch Two Sample T-Tests* zum Vergleich der Kennzahlen nach Lloret et al. (2011) der Rein- und Mischbestände für das Jahr 1976 (Kapitel 4.3.7). Fett gedruckte Werte: Signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen Rein- und Mischbestand. Sternchen\*: Mischbestand im Vorteil

<b>Fichte 1976</b>	<b>Resistance</b>	<b>Recovery</b>	<b>Resilience</b>
1000	<b>0.002133</b>	0.07057*	0.0997
2000	<b>0.008799*</b>	<b>0.0004591</b>	0.2205
3000	0.5937	<b>0.04051*</b>	0.05871
<b>Lärche 1976</b>	<b>Resistance</b>	<b>Recovery</b>	<b>Resilience</b>
1000	0.1141	0.2425*	0.7982*
2000	<b>0.002015*</b>	<b>0.004504</b>	0.5315
3000	0.4646*	0.1406	0.5748

*Resistance Trockenjahr 1980*

Die Fichten weisen in den Mischparzellen der Triplets 1000 und 2000 zu 61% und 89% höhere Resistance-Werte auf als auf den jeweiligen Reinparzellen. Im Triplet 2000 hat die Fichte in der Mischparzelle signifikant höhere Resistance-Werte ( $p=0,004978$ ) als auf der Reinparzelle.

Die Lärchen in den Mischparzellen sind auf keiner der drei Triplets hinsichtlich ihrer Resistance-Werte den Lärchen auf den Reinparzellen überlegen.

Bei der Fichte sind 2/3, bei der Lärche keine der Mischparzellen ihren jeweiligen Reinparzellen hinsichtlich der Resistance-Werte überlegen (Tabelle 10 und 11).

*Recovery Trockenjahr 1980*

Auf allen drei Triplets sind die Fichten in den Mischparzellen den Fichten in den Reinparzellen hinsichtlich der Recovery-Werte überlegen (56%, 63% und 65%).

Auch die Lärchen haben auf allen drei Triplets in den Mischparzellen höhere Recovery-Werte (63%, 67% und 60%) als die Lärchen auf den Reinparzellen. Auf dem Triplet 2000 ist diese Überlegenheit signifikant ( $p=0,03148$ ).

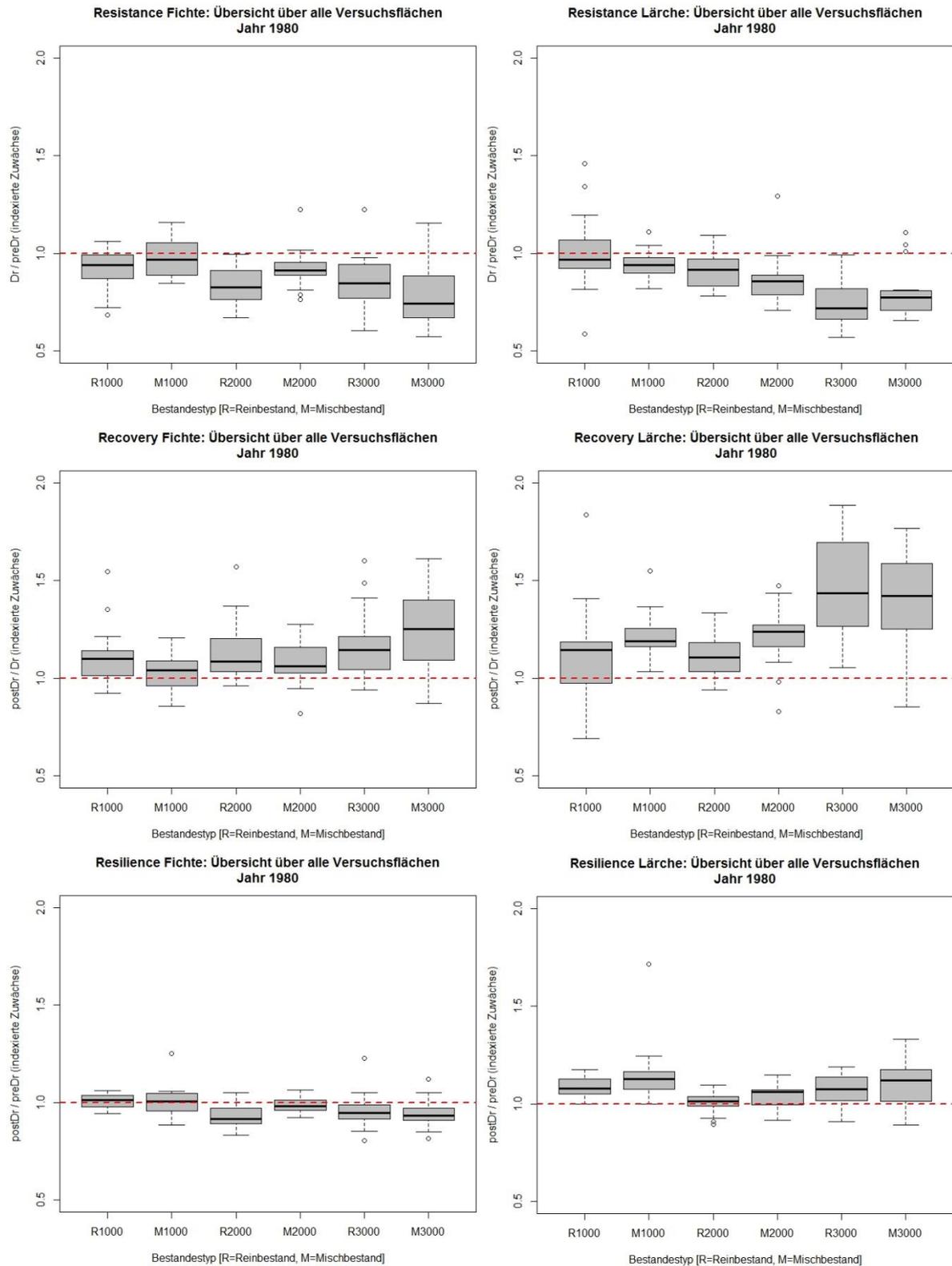
Bei der Fichte und ebenso bei der Lärche sind alle Mischparzellen ihren jeweiligen Reinparzellen hinsichtlich der Recovery-Werte überlegen (Tabelle 10 und 11).

*Resilience Trockenjahr 1980*

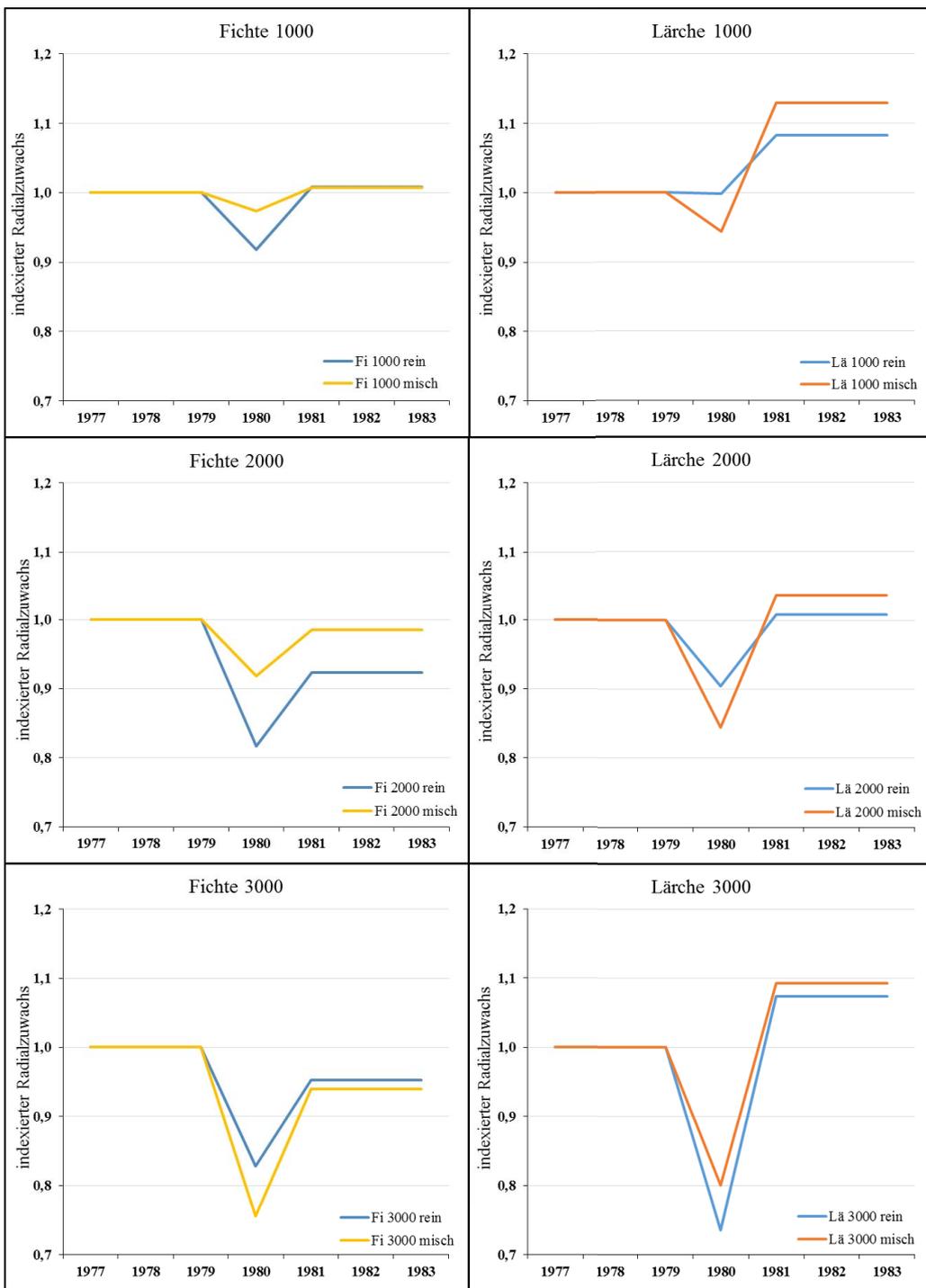
Einzig die Fichten-Mischparzelle des Triplets 2000 weist höhere (79%) Resilience-Werte als die der Reinparzelle auf. Diese Resilience-Werte unterscheiden sich signifikant ( $p=0,00234$ ) von den Werten der Reinparzelle.

Die Lärchen haben auf allen drei Triplets in den Mischparzellen höhere Resilience-Werte (68%, 72% und 60%) als die Lärchen auf den Reinparzellen.

Bei der Fichte sind 1/3, bei der Lärche 3/3 der Mischparzellen ihren jeweiligen Reinparzellen hinsichtlich der Resilience-Werte überlegen (Tabelle 10 und 11).



**Abbildung 18:** Boxplotdarstellung der errechneten Kennzahlen zur Quantifizierung von Zuwachsreaktionen auf Stressjahre (Resistance, Recovery und Resilience) nach Lloret et al. (2011) der Einzelbäume für das Jahr 1980. Darstellung getrennt nach Baumarten (links Fichte und rechts Lärche), nach Triplets (1000, 2000 und 3000), sowie nach Reinbeständen (R) und Mischbeständen (M).



**Abbildung 19:** Graphische Darstellung der bestandesweise errechneten Kennzahlen (Mittelwerte aller Bäume auf der jeweiligen Versuchsparzelle) zur Quantifizierung von Zuwachsreaktionen auf Stressjahre (Resistance, Recovery und Resilience; Kapitel 4.3.6) nach Lloret et al. (2011) für das Jahr 1980. Darstellung getrennt nach Triplets (1000, 2000 und 3000), Baumart (links Fichte und rechts Lärche) und nach Reinbeständen (blau) und Mischbeständen (Fichte gelb und Lärche orange).

### Zusammenfassung Trockenjahr 1980

Die Mischbestände der Fichte reagieren auf das Trockenjahr 1980 wesentlich stabiler als die Reinbestände. Dies zeigt sich auf 2/3 der Mischparzellen durch geringere Zuwachseinbußen im Trockenjahr 1980. Die Fichte auf der Mischparzelle des Triplets 2000 dämpft den trockenheitsinduzierten Zuwachseinbruch signifikant besser als der Reinbestand ab. Im Triplet 3000 erleiden die Fichten auf der Mischparzelle höhere Zuwachseinbußen als auf der Reinparzelle. Auffallend ist, dass in den Triplets 2000 und 3000 (Rein- und Mischparzelle) nicht mehr das Wuchsniveau wie vor dem Stressereignis erreicht wird. Im Triplet 1000 wird das Wuchsniveau nur knapp wieder erreicht (Abbildung 18 und 19).

Die Lärchen erleiden auf den Mischparzellen der Triplets 1000 und 2000 höhere Zuwachseinbußen als auf den jeweiligen Reinparzellen. Das Reaktionsmuster auf das Trockenjahr 1980 gestaltete sich sowohl auf der Misch-, als auch auf der Reinparzelle des Triplets 3000, sehr ähnlich. Die Lärchen auf allen drei Mischparzellen haben gemein, dass sie eine schnellere Erholungsfähigkeit als auf den Reinparzellen offenbaren. Zudem erreichen sie ein höheres Wuchsniveau nach dem Stressereignis als auf den jeweiligen Reinparzellen (Abbildung 18 und 19)

**Tabelle 10:** Gegenüberstellung der errechneten Kennzahlen nach Lloret et al. (2011) der Einzelbäume in den Rein- und Mischparzellen für das Jahr 1980. Die Werte geben Aufschluss darüber, wie viel Prozent der errechneten Einzelbaum-Kennzahlen (Resistance, Recovery und Resilience; Kapitel 4.3.6) in den jeweiligen Mischparzellen höher sind als in den Reinparzellen. Fett gedruckte Werte: Lloret-Kennzahlen der Einzelbäume des Mischbestandes weisen in über 50% der Fälle höhere Werte (bessere Performance, vgl. Kapitel 4.3.6) als die Einzelbäume des Reinbestandes auf.

<b>Fichte 1980</b>	<b>Resistance misch &gt; rein</b>	<b>Recovery misch &gt; rein</b>	<b>Resilience misch &gt; rein</b>
1000	<b>61%</b>	<b>56%</b>	44%
2000	<b>89%</b>	<b>63%</b>	<b>79%</b>
3000	30%	<b>65%</b>	35%
<b>Lärche 1980</b>	<b>Resistance misch &lt; rein</b>	<b>Recovery misch &gt; rein</b>	<b>Resilience misch &gt; rein</b>
1000	32%	<b>63%</b>	<b>68%</b>
2000	22%	<b>67%</b>	<b>72%</b>
3000	47%	<b>60%</b>	<b>60%</b>

**Tabelle 11:** P-Werte des *Welch Two Sample T-Tests* zum Vergleich der Kennzahlen nach Lloret et al. (2011) der Rein- und Mischbestände für das Jahr 1980 (Kapitel 4.3.7). Fett gedruckte Werte: Signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen Rein- und Mischbestand. Sternchen\*: Mischbestand im Vorteil

<b>Fichte 1980</b>	<b>Resistance</b>	<b>Recovery</b>	<b>Resilience</b>
1000	0.09414*	0.09055*	0.9298
2000	<b>0.004978*</b>	0.2281*	<b>0.00234*</b>
3000	0.1676	0.1326*	0.5691
<b>Lärche 1980</b>	<b>Resistance</b>	<b>Recovery</b>	<b>Resilience</b>
1000	0.2156	0.1562*	0.09346*
2000	0.2409	<b>0.03148*</b>	0.1658*
3000	0.2341	0.4722*	0.4559*

## 6 Diskussion

Ziel der vorliegenden Arbeit war der eingehende Vergleich von Rein- und Mischbeständen der Fichte und Lärche im südtiroler Vinschgau hinsichtlich Produktivität, langfristigen Wuchsverhalten und Klimasresilienz. Einleitend (Kapitel 3) wurden hierzu drei Fragen gestellt:

- (1) Inwiefern unterscheidet sich die Produktivität von Fichte und Lärche im Mischbestand von den jeweiligen Reinbeständen?
- (2) Reagieren Fichte und Lärche im Mischbestand anders auf unterschiedlich günstige Jahre als im Reinbestand?
- (3) Reagieren Fichte und Lärche im Mischbestand anders auf Extremjahre als im Reinbestand?

Im folgenden Kapitel wird nun die Bedeutung der in Kapitel 5 dargelegten Ergebnisse im Hinblick auf diese drei Fragestellungen diskutiert.

### 6.1 Diskussion des Materials und der Methodik

#### *Besonderheiten im Triplet 2000*

Vor der Beantwortung der oben gestellten Fragestellungen, bedarf es einer näheren Betrachtung und genauen Einordnung der erzielten Ergebnisse der Fichte im Rein- und Mischbestand im Triplet 2000.

Wie die Ergebnisse aus Kapitel 5.1 zeigen, leistet die Fichte hier im Mischbestand mit etwa  $14 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$  mehr als 150% des erwarteten Zuwachses. Dieser stark vom Erwartungswert abweichende laufende Volumenzuwachs, hat auf die Interpretation der gesamten ersten Fragestellung großen Einfluss. Womit lässt sich diese hohe Abweichung vom kalkulierten laufenden Volumenzuwachs erklären?

In Kapitel 4.3.4 wurde bereits beschrieben, dass bei der Flächenanlage und bei der Flächenaufnahme im Sommer 2014 der Umstand nicht erkannt wurde, dass im Triplet 2000 die Versuchspartellen nicht dasselbe Alter aufweisen. Die Fichten-Reinparzelle ist mit 121 Jahren etwa doppelt so alt wie die Lärchen-Reinparzelle (60 Jahre) und die Mischparzelle (65-70 Jahre), siehe Tabelle 3. Es liegt keine Altershomogenität innerhalb des Triplets vor, wobei die flächenbezogenen Ertragswerte aller Versuchspartellen vergleichbare Werte aufweisen (Tabelle 5). Dies lässt die Folgerung zu, dass die Fichten-Reinparzelle auf einem

anderen Standort als der Rest des Triplets lokalisiert ist, welcher als vergleichsweise ungünstig (ähnlich zum Standort der Triplets 1000 und 3000) charakterisiert werden kann. Als Folge daraus resultiert die (für das Alter von 121 Jahren) verminderte Bestandesentwicklung (Oberhöhen, laufender Volumenzuwachs, usw.) bei gleichzeitig immer noch hoher Stammzahl der Fichten-Reinparzelle. Es liegt die Vermutung nahe, dass sich die Mischparzelle, sowie die Lärchen-Reinparzelle des Triplets 2000 auf einer Moränendecke (Kapitel 4.2.1) mit deutlich geänderten Bodenverhältnissen befinden, welche sich in einem im Vergleich zur Fichten-Reinparzelle deutlich gesteigerten Ertragsniveau äußert.

Auf Grundlage des 121 Jahre alten Fichten-Reinbestands, wurde der laufende Volumenzuwachs als Referenzwert berechnet. Dieser wurde anschließend mit den gewichteten Mittel des Zuwachses des 70 Jahre alten Mischbestandes verglichen (Kapitel 4.3.5). Hieraus entstand die Abweichung des laufenden Volumenzuwachses der Fichte im Mischbestand von 152% vom Erwartungswert. Im Kapitel 5.1 wurde deshalb der Abbildung 13a die Abbildung 13b beigelegt, um die Ergebnisse ohne die verzerrten Werte der Fichte des Triplets 2000 darzustellen.

Die Ergebnisse der Lärche im Triplet 2000 sind hingegen konsistent und vergleichbar, wodurch sie sich weiterhin für eine Gegenüberstellung mit den Ergebnissen der Lärchen der anderen Triplets eignen.

#### *Diskussion der Methodik zur Ermittlung der flächenbezogenen Ertragswerte*

Vor der Diskussion der Ergebnisse aus Kapitel 5.1 bedarf es einer kritischen Betrachtung der Methodik zur Ermittlung der flächenbezogenen Bestandeskennwerte (Tabelle 5 und 16).

In Kapitel 4.1 wurde dargelegt, dass sich die Anlage der Versuchspartellen hauptsächlich am Vorhandensein von mindestens 20 herrschenden Bäumen orientierte. Aus diesen 20 herrschenden Bäumen wurden im Anschluss die Bohrkerne entnommen (Kapitel 4.3.1). Im beprobten Stammkollektiv (je Versuchspartelle) sind beherrschte und unterständige Bäume kaum repräsentiert. Die Rekonstruktion der BHDs der nicht gebohrten Bäume erfolgte (je Versuchspartelle) auf der Datengrundlage dieser 20 herrschenden Bäume (Kapitel 4.3.4). Es wurden also vergleichsweise hohe Jahrringbreiten für nicht gebohrte Bäume kalkuliert, die unter Umständen nicht den natürlich bedingten, geringeren Jahrringbreiten beherrschter Bäume entsprechen. Dieser Methodik der BHD-Rekonstruktion aus den Bohrkerne herrschender Bäume liegt die Gefahr zugrunde, dass ermittelte flächenbezogene

Ertragswerte überschätzt werden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, dass aufgrund der natürlichen Mortalität der Bestände, flächenbezogene Ertragswerte überschätzt werden. Darunter ist zu verstehen, dass unter Umständen mittlerweile abgestorbene Bäume (fälschlicherweise) weiterhin als lebend betrachtet werden, und diese trotzdem zur Bestandesproduktivität beitragen.

Diese dargelegten Gründe, welche zur Überschätzung der flächenbezogene Ertragswerte führen können, sollten jedoch die in dieser Arbeit gezeigten Ergebnisse nicht maßgeblich verzerrt haben.

#### *Auswahl der Trockenjahre*

Die Auswahl der zu untersuchenden Trockenjahre bildete die Grundlage für die Beantwortung der dritten Fragestellung (Kapitel 3), inwieweit Fichten und Lärchen im Mischbestand anders auf Extremjahre als im Reinbestand reagieren. Diese Auswahl hat sich als durchaus schwierig herausgestellt (Kapitel 4.2.2). Die Herausforderung bestand darin, Jahre mit stark verminderten Niederschlägen während der Vegetationszeit zu finden, welche auf allen neun Versuchspartzen gleichzeitig zu Zuwachseinbrüchen geführt haben (Abbildung 10 und 25). Im Versuchsgebiet werden jedoch Zuwachseinbrüchen in Trockenjahren teilweise durch periodisch auftretende biotische Schädigungen überlagert und verstärkt (vgl. Griess und Knoke 2011). Die Recherche und Überprüfung der Forstschadensmeldungen des Forstinspektorates Schlanders ergab, dass im Versuchsgebiet Nördersberg vor allem das Auftreten von *Zeiraphera diniana* (Grauer Lärchenwickler), *Chrysomyxa* spp. (Fichtennadelrost), *Thaumetopoea pinivora* (Kiefernprozessionsspinner) und *Ips typographus* (Buchdrucker) häufig zu verminderten Zuwächsen in den Beständen führen. Da in der vorliegenden Arbeit der Einfluss von rein trockenheitsinduzierten Zuwachseinbrüchen untersucht werden soll, schieden deshalb mehrere Trockenjahre aus. Die Jahre 1976 und 1980 stellten sich als „reine“ Trockenjahre ohne biotische „Schadensüberlagerung“ heraus. Aus zwei Gründen stellen sich die untersuchten Jahre jedoch ebenfalls als problematisch heraus. Zum einen liegen zwischen den Trockenjahren 1976 und 1980 nur vier Jahre, sodass die post Dr-Periode des Jahres 1976 gleichzeitig die pre Dr-Periode von 1980 darstellt (Kapitel 4.3.6). Die Bestände befinden sich also vor dem Trockenereignis von 1980 noch in ihrer Regenerationsphase, was eventuell Einfluss auf ihr Reaktionsverhalten und -muster nimmt (Pretzsch et al. 2012). Zum anderen sind die Bestände der Triplets 1000 und 2000 zum Zeitpunkt der Trockenjahre 1976 und 1980 mit

einem Durchschnittsalter von etwa 35 Jahren (vgl. Kapitel 4.3.4, Tabelle 3) noch sehr jung. In dieser Arbeit können deshalb nur Aussagen über das Reaktionsverhalten und -muster auf Trockenheit von Jung- und Altbeständen getroffen werden.

## 6.2 Volumenzuwächse im Rein- und Mischbestand

Nach der Stress-Gradienten-Hypothese (Callaway und Walker 1997) treten positive Mischungseffekte vor allem auf ärmeren Standorten zutage. Der Grund hierfür ist, dass sich dabei das Konkurrenz-Begünstigungs-Verhältnis deutlich in Richtung Begünstigung bewegt (Vandermeer 1992; Callaway und Walker 1997; Holmgren et al. 1997). Synergieeffekte in Mischbeständen können durch eine komplementäre Nischenbesetzung und durch eine daraus folgende verbesserte ober- und unterirdische Ressourcenausnutzung entstehen (Morin et al. 2011). Ein Grund können Begünstigungseffekte wie beispielsweise hydraulischer Wasseraufstieg (Dawson 1993) durch unterschiedliche Wurzelsysteme sein. Wie sind die Ergebnisse (Kapitel 5.1) der ersten Fragestellung, inwiefern sich die Produktivität von Fichte und Lärche im Mischbestand von den jeweiligen Reinbeständen unterscheidet, vor diesem Hintergrund einzuordnen?

Der Standort des Triplets 1000 ist vom Ertragsniveau als eher schwach einzuordnen (Ertragsklasse 4-9, Tabelle 3). Die Fichte leistet hier in Mischung etwa 10% mehr Zuwachs als erwartet. Die Lärche leistet etwa 22% mehr Volumenzuwachs als prognostiziert (Abbildung 12 und Tabelle 17). Die Produktivität des gesamten Mischbestandes liegt 16% über dem Erwartungswert und leistet dabei nur knapp kein transgressiveoveryielding (Pretzsch 2010: 353). Es wird deutlich, dass Synergieeffekte auf der Mischparzelle auftreten, von welchen beide Baumarten durch erhöhte Volumenzuwächse profitieren (Overyielding). Die Stress-Gradienten-Hypothese (Callaway und Walker 1997) bietet hier einen plausiblen Erklärungsansatz für den zutage getretenen Mehrzuwachs in der Mischparzelle. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass sich auf der Mischparzelle im Triplet 1000 das Konkurrenz-Begünstigungs-Verhältnis (Vandermeer 1992; Callaway und Walker 1997; Holmgren et al. 1997) deutlich in Richtung von Begünstigung bewegt.

Der Standort der Fichten-Lärchen-Mischparzelle und der Lärchen-Reinparzelle des Triplets 2000 ist als durchaus leistungsfähig (Ertragsklasse 9-14, Tabelle 3) und günstig einzuordnen. Die Lärchen auf der Mischparzelle leisten 13,1% weniger Zuwachs als der prognostizierte Erwartungswert (Abbildung 12 und Tabelle 17). Dieses Ergebnis lässt die Hypothese zu, dass im Triplet 2000 erhöhte Konkurrenzeffekte und verminderte Synergieeffekte zu

Minderzuwachsen der Lärche in Mischung führen (Vandermeer 1992; Callaway und Walker 1997; Holmgren et al. 1997). Ob die Fichte von der Mischung mit Lärche im Triplet 2000 profitiert, kann nicht geklärt werden (Kapitel 6.1).

Der Standort des Triplets 3000 ist von der Standortgüte und vom Ertragsniveau (Ertragsklasse 3-6, Tabelle 3) mit dem des Triplets 1000 vergleichbar. Die Lärche profitiert von der Mischung mit Fichte und leistet ein Zuwachsplus von 25%. Dieser hohe Zuwachs der Lärche geht teilweise auf Kosten der Fichte, welche in Mischung 11% weniger Volumenzuwachs leistet. Auch hier bietet die Stress-Gradienten-Hypothese (Callaway und Walker 1997) einen guten Erklärungsansatz für die Mehrzuwächse der Lärche. Welche Kausalität dem Minderzuwachs der Fichte zugrunde liegt, kann hier nicht geklärt werden.

Auf die Frage inwiefern sich die Produktivität von Fichte und Lärche im Mischbestand von den jeweiligen Reinbeständen unterscheidet, kann resümierend geantwortet werden, dass am Nördersberg auf ärmeren Standorten (Triplet 1000 und 3000) vor allem die Lärche von der Mischung profitiert. Auf besseren Standorten (Triplet 2000) ist hingegen der Lärchen-Reinbestand produktiver. Ein ähnliches Bild zeichnet sich bei der Fichte ab. So profitiert die Fichte ebenfalls auf ärmeren Standorten von der Mischung mit der Lärche, wobei sich dieser Mischungseffekt nur im jungen Bestand zeigt (Triplet 1000). Im Altbestand (Triplet 3000) leidet die Produktivität der Fichte unter der Mischung mit Lärche. Diese Ergebnisse unterstreichen die Stress-Gradienten-Hypothese von Callaway und Walker (1997). Die Fichte leistet am Nördersberg im Mischbestand zwischen -11% und +10% mehr Zuwachs als im Reinbestand, die Lärche zwischen -13% und +25% (Abbildung 12 und Tabelle 17). Zöhler (1969) hat im salzburger Lungau ein Plus von 10-25% an Volumenzuwächsen in Fichten-Lärchen-Mischbeständen beschrieben. Im Lungau offenbarte sich ein Optimum der Gesamtwuchsleistung der Mischbestände bei einem Fichtenanteil von 25-45% am Bestockungsgrad. Der Mehrzuwachs im Mischbestand wurde überwiegend durch die Fichte geleistet. Für die unter gewissen Umständen vergleichbare Baumartenmischung aus Fichte und Kiefer, wurde ebenfalls eine erhöhte Zuwachsleistung der Mischbestände nachgewiesen (Bielak 2013; Wellhausen 2015), wobei auch hier der Mehrzuwachs hauptsächlich durch die Fichte geleistet wurde. Am vinschgauer Nördersberg wird der Mehrzuwachs im Mischbestand größtenteils durch die Lärche (Triplet 1000 und 3000) erbracht.

### 6.3 Variabilität von Mischungseffekten bei variierenden Wuchsbedingungen

In klimatisch ungünstigen Jahren (geringe Niederschläge, hohe Temperaturen) werden die Wuchsbedingungen dahingehend modifiziert, dass selbst auf ansonsten günstigen Standorten das Konkurrenz-Begünstigungs-Verhältnis deutlich in Richtung Begünstigung verschoben wird (Zang et al. 2011; Pretzsch et al. 2013a; Pretzsch 2013). Somit beschränkt sich die Stress-Gradienten-Hypothese nicht nur auf den Standort, sondern auch auf die jährlich variierenden Umwelt- und Wuchsbedingungen. Zang et al. (2011: 105) haben beim Vergleich mehrerer Baumarten vor allem für die Fichte, bei der langfristigen Beziehung zwischen Klima und Wachstum, eine deutliche Abhängigkeit von ausreichend Niederschlägen in den Sommermonaten nachgewiesen. Von allen untersuchten Baumarten wies die Fichte die deutlichsten Zuwachseinbrüche in klimatisch ungünstigen Jahren auf.

Das Reaktionsmuster der Fichte im Triplet 1000 offenbart ein klares Ergebnis (Kapitel 5.2.1, Abbildung 14). Die signifikant negative Korrelation zwischen  $I_{r_{diff}}$  und  $I_{r_r}$  verdeutlicht, dass in ungünstigen Jahren der Mischbestand, in günstigen Jahren der Reinbestand, mehr Zuwächse leistet. Dieses Ergebnis lässt sich erneut sehr gut durch die Stress-Gradienten-Hypothese erklären. Im Triplet 3000 treten keine messbaren Synergie- oder Konkurrenzeffekte auf. Die nicht signifikante, nahezu horizontal verlaufende Korrelation zwischen  $I_{r_{diff}}$  und  $I_{r_r}$ , deutet darauf hin, dass kein Unterschied zwischen Rein- und Mischbestand hinsichtlich Variabilität von Mischungseffekten, bei variierenden Wuchsbedingungen, besteht. Das hochsignifikante Ergebnis der linearen Regression aller Fichten am Nördersberg muss vorsichtig bewertet werden, da in diesem Modell auch die Ergebnisse der Fichte aus dem Triplet 2000 eingeflossen sind.

Die Lärche weist im Triplet 1000 eine nicht signifikant positive Korrelation zwischen  $I_{r_{diff}}$  und  $I_{r_r}$  auf. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass in ungünstigen Jahren der Reinbestand, in günstigen Jahren der Mischbestand, hinsichtlich Wuchsleistung überlegen ist (Kapitel 5.2.1, Abbildung 14). Dieses Ergebnis weicht vom ansonsten vorgefundenen Reaktionsmuster im Versuchsgebiet ab und lässt sich nicht durch die Stress-Gradienten-Hypothese erklären. Im Triplet 2000 deutet eine hochsignifikant negative Korrelation zwischen  $I_{r_{diff}}$  und  $I_{r_r}$  auf einen sehr deutlichen Wachstumsvorteil der Lärche im Mischbestand in ungünstigen Jahren hin. In günstigen Jahren leistet der Reinbestand mehr Zuwachs. Hier zeigt sich, dass selbst auf dem besseren Standort (Kapitel 6.1 und 6.2) des

Triplets 2000 eine Variabilität von Mischungseffekten zutage tritt. Im Triplet 3000 offenbart sich bei der Lärche ein sehr ähnliches Bild wie bei der Fichte: Die nicht signifikante, ebenfalls nahezu horizontal verlaufende Korrelation zwischen  $I_{r_{diff}}$  und  $I_{r_r}$  (Kapitel 5.2.1, Abbildung 14), ist ein Indikator für eine von der Mischungsform nicht modifizierte Wachstumsreaktion auf unterschiedlich günstige Wuchsbedingungen. Im Gesamtmodell mit allen Lärchen am Nördersberg offenbart sich ein nur knapp nicht signifikanter Vorteil der Mischparzellen in ungünstigen Jahren.

Abschließend lässt sich die Frage ob Fichte und Lärche im Mischbestand anders auf unterschiedlich günstige Jahre als im Reinbestand reagieren, bestätigen. Es zeigt sich am Nördersberg vor allem im Triplet 1000 und 2000 ein deutlicher Vorteil der Fichten-Lärchen-Mischbestände in ungünstigen Jahren. Im Triplet 3000 wurden keine Synergie- oder Konkurrenzeffekte bei variierenden Umweltbedingungen im Misch- oder Reinbestand erkannt.

#### **6.4 Zuwachsvergleich der Rein- und Mischbestände in Trockenjahren**

##### *Zuwachsreaktionen auf Trockenstress*

Trockenjahre (Kapitel 4.2.2) führen in Waldbeständen neben Wasserlimitierung auch häufig zu Nährstoffknappheit, was unter anderem zu Zuwachseinbrüchen führt (Bréda et al. 2006; Rennenberg et al. 2004; Rennenberg et al. 2006). Griess und Knoke (2011) erkannten, dass Trockenereignisse in Koniferen-Reinbeständen zusätzlich die Gefahr von biotischen und abiotischen Sekundär-Schädigungen erhöhen. Durch Baumartenmischung können diese trockenstressinduzierten Sekundärschäden gemindert werden (Jactel und Brockerhoff 2007). Die Fichte erleidet während Dürreperioden starke Zuwachseinbrüche, erholt sich danach aber auch schnell wieder (Pretzsch et al. 2012: 9). Hartmann (2010) erklärt die rasche Erholung der isohydrischen Baumart Fichte nach Trockenstress damit, dass der Wasserverbrauch durch Stomataschluss bereits im frühen Stadium der Dürre vermindert wird. Dadurch werden in Trockenjahren weniger Wasser und Nährstoffe im Wurzelraum verbraucht und stehen nach dem Trockenereignis im erhöhten Maße zur Verfügung. In Mischung kann eine andere Baumart unter Umständen während der Dürreperiode von diesen Ressourcen profitieren. McCarthy und Enquist (2007) beschreiben eine trockenheitsinduzierte Veränderung des Spross-Wurzel-Verhältnisses von Bäumen (allometrische Theorie zum Spross-Wurzel-Verhältnis). So wird in Trockenjahren auf

Kosten der oberirdischen Zuwachsbildung hauptsächlich im Wurzelraum Zuwachs geleistet. Nach der Dürre balanciert der Baum das veränderte Spross-Wurzel-Verhältnis durch erhöhten oberirdischen Zuwachs wieder aus. Bei kurz hintereinander auftretenden Trockenereignissen, kann die Reaktion der Rein- und Mischbestände im Vergleich zu länger auseinander liegenden Trockenereignissen, geringer ausfallen (Pretzsch et al. 2012: 9). Diese mögliche, verminderte Reaktion auf kurz hintereinander auftretende Trockenjahre spielt bei der Diskussion der Ergebnisse aus Kapitel 5.3 vermutlich eine Rolle.

#### *Trockenjahr 1976 - Fichte*

Im Kapitel 5.3 wird gezeigt, dass es auf den Mischparzellen der Triplets 1000 und 3000 zu höheren Zuwachseinbrüchen als auf den Reinparzellen kommt. Bemerkenswert ist, dass der Zuwachs der Fichten-Reinparzelle des Triplets 1000 während des Trockenereignisses nicht einbricht, sondern sogar erhöht ist (Abbildung 16 und 17). Die Ursachen hierfür können an dieser Stelle nicht geklärt werden. Die Zuwachseinbrüche auf den Mischparzellen der Triplets 1000 und 3000 werden nach dem Trockenjahr 1976 durch ein erhöhtes Wuchsniveau kompensiert. Die Ariditätsindizes (Tabelle 12) nach De Martonne (1926) der Jahre 1977 bis 1979 deuten auf günstigere klimatische Wuchsbedingung hin. Darin könnte eine Erklärung der guten Resilience-Werte aller Fichten-Versuchspartellen liegen. Des Weiteren liegt die Vermutung nahe, dass die oben gezeigten artspezifischen Reaktionsmuster der Fichte auf Trockenereignisse (McCarthy und Enquist 2007; Hartmann 2010; Pretzsch et al. 2012), für den erhöhten Zuwachs nach der Trockenperiode 1976 verantwortlich sind.

#### *Trockenjahr 1976 - Lärche*

Die Lärchen auf den Mischparzellen der Triplets 1000 und 2000 erleiden im Trockenjahr 1976 geringere Zuwachseinbrüche als auf den Reinparzellen. Im Triplet 2000 besteht sogar ein signifikanter Unterschied der Misch- und Reinparzellen. Das Reaktionsmuster der Fichten und Lärchen im Triplet 3000 gestaltet sich im Misch- und Reinbestand sehr ähnlich. Hier kommt es zu keinerlei Wuchsbeeinträchtigung während der Dürreperiode. Auffallend ist, dass im Triplets 2000 das Wuchsniveau von den Jahren vor 1976 nur knapp wieder erreicht wird. Im Triplet 1000 erholt sich der Mischbestand deutlich besser vom Trockenjahr (Abbildung 16 und 17). Der geringere Zuwachseinbruch der Lärchen auf den Mischparzellen

in den Triplets 1000 und 2000 während der Dürreperiode 1976, könnte damit zusammenhängen, dass durch die verminderte Respiration der Fichten mehr Wasser und Nährstoffe im Wurzelraum für die Lärchen zur Verfügung stehen (Hartmann 2010).

#### *Trockenjahr 1980 - Fichte*

Den Zuwachseinbruch des Trockenjahres 1980 puffern die Fichten-Mischbestände der Triplets 1000 und 2000 deutlich besser ab als die Reinbestände. Im Triplet 3000 gibt es im Mischbestand einen höheren Zuwachseinbruch als im Reinbestand. Sehr auffällig ist, dass auf allen drei Triplets, sowohl im Rein- als auch im Mischbestand, das Wachstumsniveau aus der Periode vor dem Trockenjahr 1980 nicht mehr, oder nur noch knapp (Triplet 1000), erreicht wird. Auf den Mischparzellen der Triplets 1000 und 2000 erholen sich die Fichten jedoch deutlich besser als auf den Reinparzellen (Abbildung 18 und 19). Unter Umständen profitieren die Fichten im Mischbestand (Triplet 1000 und 2000) im Trockenjahr vom hydraulischen Wasseraufstieg (Dawson 1993) der tiefwurzelnden Lärchen (Schütt et al. 2002), was zu verminderten Zuwachseinbrüchen führt. Die schlechtere Recovery- und Resilience-Performance aller Fichten-Versuchspartellen könnte darin begründet sein, dass vier Jahre vorher bereits ein Trockenereignis stattgefunden hat. Durch häufiger hintereinander auftretende Trockenereignisse können Zuwachsreaktionen der Fichte auf Dürreperioden geringer ausfallen (Pretzsch et al. 2012).

#### *Trockenjahr 1980 - Lärche*

Die Lärchen erleiden auf den Mischparzellen des Triplets 1000 und 2000 höhere Zuwachseinbußen als auf den jeweiligen Reinparzellen. Im Triplet 3000 erleiden die Lärchen im Mischbestand geringere Zuwachseinbrüche. Die Mischbestände aller Triplets regenerieren sich jedoch schneller als die Reinbestände und erreichen nach dem Trockenjahr 1980 ein höheres Wuchsniveau als in den Jahren vor der Dürre (Abbildung 18 und 19). Die Ariditätsindizes (Tabelle 12) nach De Martonne (1926) der Jahre 1981 bis 1983 deuten auf günstigere klimatische Wuchsbedingungen hin. Es scheint, dass die Lärchen im Mischbestand auf diese günstigen Wuchsbedingungen mit besseren Wuchsleistungen reagieren können als die Lärchen im Reinbestand. Unter Umständen profitieren die Lärchen im Mischbestand im Trockenjahr von den zur Verfügung stehenden Ressourcen (Wasser und Nährstoffe) der Fichten (Hartmann 2010). Zudem wird deutlich, dass Lärchen im Mischbestand auf häufiger

hintereinander auftretenden Trockenstress (1976 und 1980) ihre Reaktionsfähigkeit, im Vergleich zur verminderten Reaktionsfähigkeit der Fichten (Pretzsch et al. 2012: 9), beibehalten.

## 6.5 Ökologische Bewertung der Mischung aus Fichte und Lärche

Nicht ohne Grund nehmen Fichtenwälder in Mischung mit Lärche in den Alpen auf montan-subalpiner Höhenstufe von Natur aus eine so bedeutende Position ein (Mayer 1974; Ellenberg 1996). Die Erklärung für die vorherrschende Rolle dieser Waldgesellschaft, liegt einerseits an ihrer Angepasstheit an die biotischen und abiotischen Gegebenheiten in dieser Höhenstufe. Sowohl die Fichte als auch die Lärche zeichnen sich durch eine sehr hohe Kältetoleranz aus. Beide Baumarten sind in den meisten Fällen gut gegen abiotische Störfaktoren wie erhöhte Strahlung, Sturm, Eisanhang und Nassschnee adaptiert (Mayer und Ott 1991; Schütt et al. 2002). Zum anderen unterscheiden sich Fichten und Lärchen in ihrer ökologischen Nischenbesetzung und nutzen dabei unterschiedliche Ressourcenreservoirs. Die Lärche besiedelt als Licht- und Pionierbaumart brach liegende Flächen sehr rasch, die Fichte kann sich als Halbschattenbaum auch noch unter lockerem Schirm verjüngen. Die Fichte verfügt über ein Senkerwurzelsystem, die Lärche über ein Herzwurzelsystem (Schütt et al. 2002). Hieraus entsteht eine intensivere Bodendurchwurzelung und unter Umständen hydraulischer Wasseraufstieg (Dawson 1993). Auch in der Kronenmorphologie und -physiologie sind Fichte und Lärche komplementäre Mischungspartner. Die tiefreichende Krone der Fichte und die hoch sitzende Krone der Lärche, erlauben beiden Baumarten eine optimale Lichtausnutzung bei gleichzeitig hoher Bestandesdichte (Assmann 1961). Im Frühjahr kann die Fichte schon früher eine positive Assimilationsleistung als die noch unbenadelte Lärche erbringen. Auch die Humusbildung profitiert von einer Mischung aus Fichten- und Lärchenstreu (Zöhner 1969).

Diese unterschiedliche Nischenbesetzung (Nischenkomplementarität; Morin et al. 2011) schlägt sich in erhöhter Produktivität und Klimaresilienz der Mischbestände gegenüber den Reinbeständen nieder.

*Schlussfolgerung Lärche*

Hinsichtlich Produktivität offenbart sich am vinschgauer Nördersberg, dass die Lärche von der Baumartenmischung profitiert (Fragestellung 1). Bei der Untersuchung der Variabilität von Mischungseffekten bei variierenden Wuchsbedingungen (Fragestellung 2), konnte gezeigt werden, dass in klimatisch ungünstigen Jahren besonders die jungen Mischbestände den Reinbeständen hinsichtlich Wuchsleistung überlegen sind. Diese Erkenntnisse unterstreichen die Ergebnisse der 3. Fragestellung: Vor allem die Lärche reagiert auf die zwei rasch hintereinander auftretenden Trockenjahre 1976 und 1980 in Mischung mit gesteigerten Zuwächsen nach den Ereignissen. Im Angesicht der Tatsache, dass im Versuchsgebiet biotische (periodisch auftretender Insektenbefall) und abiotische (Trockenereignisse, Wind- und Schneebruch) Störungen in einer hohen Frequenz auftreten, könnte die gesteigerte Produktivität der Lärche im Mischbestand erklärt werden. Dies lässt die Vermutung zu, dass es bei sehr häufig hintereinander auftretenden Störereignissen zu erhöhten Synergieeffekten bei der Lärche in Mischbeständen kommt.

*Schlussfolgerung Fichte*

Die Fichten-Mischbestände profitieren etwas weniger von der Mischung als die Lärchen-Mischbestände (Fragestellung 1). Bei der Untersuchung der Variabilität von Mischungseffekten bei variierenden Wuchsbedingungen (Fragestellung 2), offenbarte sich, genauso wie bei der Lärche, ein deutlicher Vorteil der Mischbestände. Die Fichten-Mischbestände lieferten bei der Reaktion auf die Trockenjahre 1976 und 1980 überwiegend eine bessere Wachstumsperformance als die Reinbestände (Fragestellung 3). Anders als bei der Lärche zeigt sich jedoch, dass die Fichten auf die rasch hintereinander auftretenden Trockenereignisse sensibler reagieren. All diese Punkte erlaubt die Hypothese, dass (genauso wie bei der Lärche) Synergieeffekte bei der Fichte am Nördersberg in Mischbeständen mehr zutage treten als in Reinbeständen.

## 7 Literaturverzeichnis

- Assmann E (1961) Waldertragskunde. Organische Produktion, Struktur, Zuwachs und Ertrag von Waldbeständen. BLV Verlagsgesellschaft, München, Bonn, Wien, 490 S.
- Biber P (2013) Kontinuität durch Flexibilität – Standardisierte Datenauswertung im Rahmen eines waldwachstumskundlichen Informationssystems. Allg Forst- und Jagdzeitung 184:167–176.
- Bielak K (2013) Produktivität der Kiefer ( *Pinus sylvestris* L .) in Mischung mit Fichte ( *Picea abies* ( L .) Karst .) im Vergleich zum Reinbestand auf langfristigen Versuchsflächen Polen. DVFFA, Sekt Ertragskd Beiträge zur Jahrestagung 2013 16–24.
- Bréda N, Huc R, Granier A, Dreyer E (2006) Temperate forest trees and stands under severe drought : a review of ecophysiological responses , adaptation processes and long-term consequences. *Ann For Sci* 63:625–644.
- Callaway RM (1998) Competition and Facilitation on Elevation Gradients in Subalpine Forests of the Northern Rocky Mountains, USA. *Oikos* 82:561–573.
- Callaway RM, Walker LR (1997) Competition and facilitation: A synthetic approach to interactions in plant communities. *Ecology* 78:1958–1965.
- Cook ER, Kairiukstis LA (eds) (1992) *Methods of dendrochronology: Applications in the environmental sciences*. Kluwer, Dordrecht, 394 S.
- Crawley MJ (2007) *The R Book*. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, 942 S.
- Dawson TE (1993) Hydraulic lift and water use by plants: implications for water balance, performance and plant-plant interactions. *Oecologia* 95:565–574.
- De Martonne E (1926) Une nouvelle fonction climatologique. L'indice d'aridité. *La Meteorol* 449–458.
- del Rio M, Schütze G, Pretzsch H (2014) Temporal variation of competition and facilitation in mixed species forests in Central Europe. *Plant Biol* 16:166–176.
- Ellenberg H (1996) *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht: 170 Tabellen, 5., stark*. Eugen Ulmer, Stuttgart, 1096 S.

- Franz F (1971) Funktionen und Tabellen der Derbholzformhöhen für die wichtigsten Baumarten in Bayern. München, Manuskriptdruck, unveröffentlicht.
- Franz F, Bachler J, Deckelmann E, et al (1973) Bayerische Waldinventur 1970/71. Inventurabschnitt I: Großrauminventur Aufnahme- und Auswertungsverfahren. Forstl Versuchsanstalt München 11:143 p.
- Gamfeldt L, Snäll T, Bagchi R, et al (2013) Higher levels of multiple ecosystem services are found in forests with more tree species. *Nat Commun* 4:1340.
- Griess VC, Knoke T (2011) Growth performance, windthrow, and insects: meta-analyses of parameters influencing performance of mixed-species stands in boreal and northern temperate biomes. *Can J For Res* 41:1141–1158.
- Hartmann H (2010) Will a 385 million year-struggle for light become a struggle for water and for carbon? - How trees may cope with more frequent climate change-type drought events. *Glob Chang Biol* 17:642–655.
- Hector A, Bagchi R (2007) Biodiversity and ecosystem multifunctionality. *Nature* 448:188–190.
- Holmgren M, Scheffer M, Hustan MA (1997) The interplay of facilitation and competition in plant communities. *Ecology* 78(8):1966–1975.
- Isbell F, Calcagno V, Hector A, et al (2011) High plant diversity is needed to maintain ecosystem services. *Nature* 477:199–202.
- Jactel H, Brockerhoff E (2007) Tree diversity reduces herbivory by forest insects. *Ecol Lett* 10:835–848.
- Johann K (1993) DESER-Norm 1993. Normen der Sektion Ertragskunde im Deutschen Verband Forstlicher Forschungsanstalten zur Aufbereitung von waldwachstumskundlichen Dauerversuchen. Berichte der Jahrestagung des Dtsch Verbandes Forstl Forschungsanstalten, Sekt Ertragskd 96–104.
- Kennel R (1972) Die Buchendurchforstungsversuche in Bayern von 1870 bis 1970. Forstliche Versuchsanstalt München. Vol 7.
- Knoke T, Stimm B, Ammer C, Moog M (2005) Mixed forests reconsidered: A forest economics contribution on an ecological concept. *Eco Mngt* 213:102–116.
- Kohnle U, Klädtke J (2010) Drei Jahrzehnte naturnaher Waldbau in Baden-Württemberg. *AFZ-Der Wald* 65:22–25.

- Kramer H, Akça A (2008) Leitfaden der Waldmesslehre, 5. überarb. J.D. Sauerländer's Verlag. Frankfurt am Main, 226 S.
- Leibundgut H (1987) Ziele und Wege der naturnahen Waldwirtschaft. Schweiz. Z Forstwes 137:245–250.
- Lloret F, Keeling EG, Sala A (2011) Components of tree resilience: Effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests. *Oikos* 120:1909–1920.
- Matyssek R, Fromm J, Rennenberg H, Roloff A (2010) Biologie der Bäume. Von der Zelle zur globalen Ebene. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 349 S.
- Mayer H (1974) Wälder des Ostalpenraumes. Standort, Aufbau und waldbauliche Bedeutung der wichtigsten Waldgesellschaften in den Ostalpen samt Vorland. Band 3: Ökologie der Wälder und Landschaften. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 344 S.
- Mayer H, Ott E (1991) Gebirgswaldbau Schutzwaldpflege. Ein waldbaulicher Beitrag zur Landschaftsökologie und zum Umweltschutz, 2. vollstä. Stuttgart: G. Fischer, 587 S.
- McCarthy MC, Enquist BJ (2007) Consistency between an allometric approach and optimal partitioning theory in global patterns of plant biomass allocation. *Funct Ecol* 21:713–720.
- Mitscherlich EA (1948) Die Ertragsgesetze. Deutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Vorträge und Schriften 31, Akademie-Verlag, Berlin, 42 S.
- Morin X, Fahse L, Scherer-Lorenzen M, Bugmann H (2011) Tree species richness promotes productivity in temperate forests through strong complementarity between species. *Ecol Lett* 14:1211–1219.
- Noggler W (1989) Das Wachstum der Fichte im Vinschgau. Diplomarbeit. Institut für forstliche Ertragslehre an der Universität für Bodenkultur, Wien
- Pretzsch H (2002) Grundlagen der Waldwachstumsforschung. Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin, Wien, 414 S.
- Pretzsch H (2009) Produktivitätsrelation zwischen Fichte und Fichte/Buche – Konsequenzen angesichts des Klimawandels. *LWF Wissen* 63:44–55.
- Pretzsch H (2010) Forest Dynamics, Growth and Yield, First soft. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 664 S.

- Pretzsch H (2013) Räumliche und zeitliche Variation von Mischungseffekten in Abhängigkeit von Umweltbedingungen. DVFFA, Sekt Ertragskd Beiträge zur Jahrestagung 2013 44–55.
- Pretzsch H, Bielak K, Bruchwald A, et al (2013a) Mischung und Produktivität von Waldbeständen. Ergebnisse langfristiger ertragskundlicher Versuche. Allg Forst- und Jagdzeitung 184:177–196.
- Pretzsch H, del Río M, Ammer C, et al (2015) Growth and yield of mixed versus pure stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) analysed along a productivity gradient through Europe. *Eur J For Res* 134:927–947.
- Pretzsch H, Rötzer T, Matyssek R, et al (2014) Mixed Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst) and European beech (*Fagus sylvatica* [L.]) stands under drought: from reaction pattern to mechanism. *Trees* 28:1305–1321.
- Pretzsch H, Schütze G (2009) Transgressive overyielding in mixed compared with pure stands of Norway spruce and European beech in Central Europe: Evidence on stand level and explanation on individual tree level. *Eur J For Res* 128:183–204.
- Pretzsch H, Schütze G, Uhl E (2012) Resistance of European tree species to drought stress in mixed versus pure forests: evidence of stress release by inter-specific facilitation. *Plant Biol*. doi: DOI: 10.1111/j.1438- 8677.2012.00670.x
- Pretzsch H, Schütze G, Uhl E (2013b) Resistance of European tree species to drought stress in mixed versus pure forests: Evidence of stress release by inter-specific facilitation. *Plant Biol* 15:483–495.
- R CoreTeam (2016) A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>
- Reineke LH (1933) Perfecting a stand density index for even aged - aged forests. *J Agric Res* 46:627–638.
- Rennenberg H, Loreto F, Polle A, et al (2006) Physiological responses of forest trees to heat and drought. *Plant Biol* 8:556–571.
- Rennenberg H, Seiler W, Matyssek R, et al (2004) European beech (*Fagus sylvatica* L.) - a forest tree without future in the south of Central Europe. *Allg Forst und Jagdzeitung* 175:210–224.

- Scherer-Lorenzen M, Körner C, Schulze ED (2005) Forest diversity and function. Temperate and Boreal Systems. In: Ecological Studies 176. Berlin, Heidelberg: Springer,
- Schütt P, Schuck HJ, Stimm B (2002) Lexikon der Baum- und Straucharten. Das Standardwerk der Forstbotanik ; Morphologie, Pathologie, Ökologie und Systematik wichtiger Baum- und Straucharten. Nikol, Hamburg, 581 S.
- Spellmann H (1995) Vom strukturarmen zum strukturreichen Wald - Waldbauliche Planungs- und Handlungsaspekte für die Nds. Landesforstverwaltung. Forst u Holz 50:35–44.
- Sterba H, del Rio M, Brunner A, Condes S (2014) Effect of species proportion definition on the evaluation of growth in pure vs. Mixed stands. For Syst 23:547–559.
- Tumler H (1992) Das Wachstum der Lärche in Südtirol. Diplomarbeit. Institut für forstliche Ertragslehre an der Universität für Bodenkultur, Wien
- Vacik H, de Jel S, Ruprecht H, et al (2010a) Walddtypisierung Südtirol. Band 1. Walddtypen, Wuchsgebiete, Bestimmungsschlüssel. Abteilung Forstwirtschaft; Amt für Forstplanung, Autonome Provinz Bozen - Südtirol. 2 Bände. Bozen, 311 S.
- Vacik H, de Jel S, Ruprecht H, et al (2010b) Walddtypisierung Südtirol. Band 2. Walddgruppen, Naturräume, Glossar. Abteilung Forstwirtschaft; Amt für Forstplanung, Autonome Provinz Bozen - Südtirol. 2 Bände. Bozen, 310 S.
- Vandermeer J (1992) The ecology of intercropping. Cambridge University Press
- Wellhausen K (2015) Produktivität und Klimasensitivität von Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) und Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) im Rein- und Mischbestand - Untersuchungen entlang eines ökologischen Gradienten. DVFFA, Sekt Ertragskd Beiträge zur Jahrestagung 2015 122–139.
- Zang C, Rothe A, Weis W, Pretzsch H (2011) Zur Baumarteneignung bei Klimawandel: Ableitung der Trockenstress-Anfälligkeit wichtiger Walddbaumarten aus Jahrringbreiten. Allg Forst- und Jagdzeitung 182:98–112.
- Zöhner F (1969) Bestandeszuwachs und Leistungsvergleich montaner, subalpiner Lärchen-Fichten-Mischbestände. Forstwissenschaftliches Cent 88:41–61.

## 8 Anhang

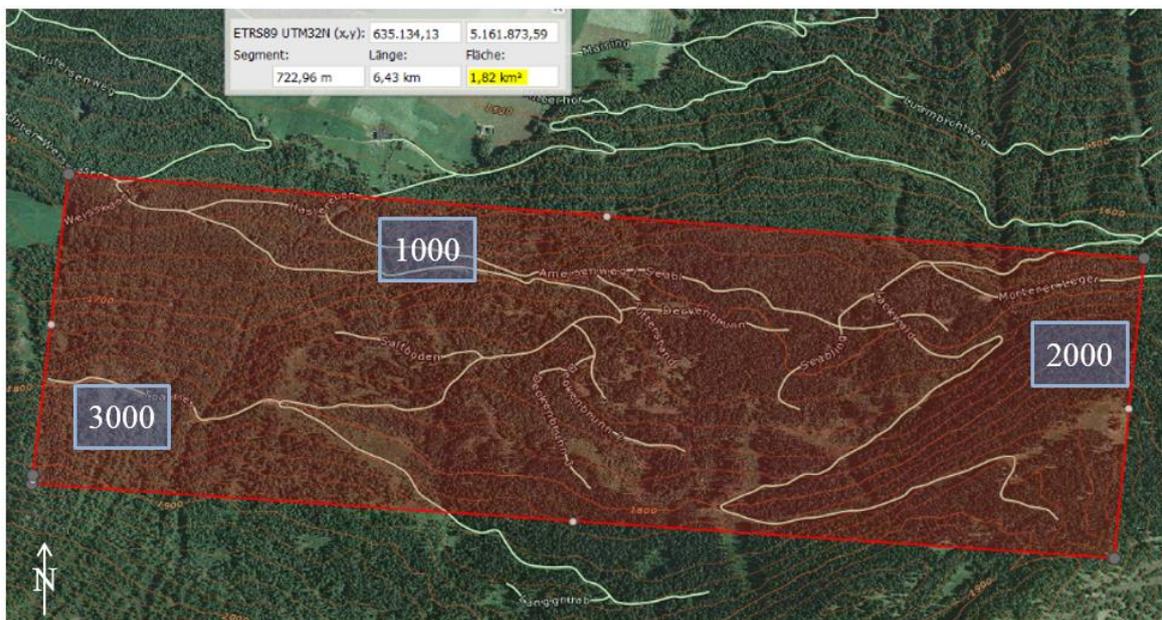


Abbildung 20: Genaue Lage der drei Triplets am Nördersberg. Die Triplets befinden sich innerhalb eines 182 ha großen Areal<sup>2</sup>.

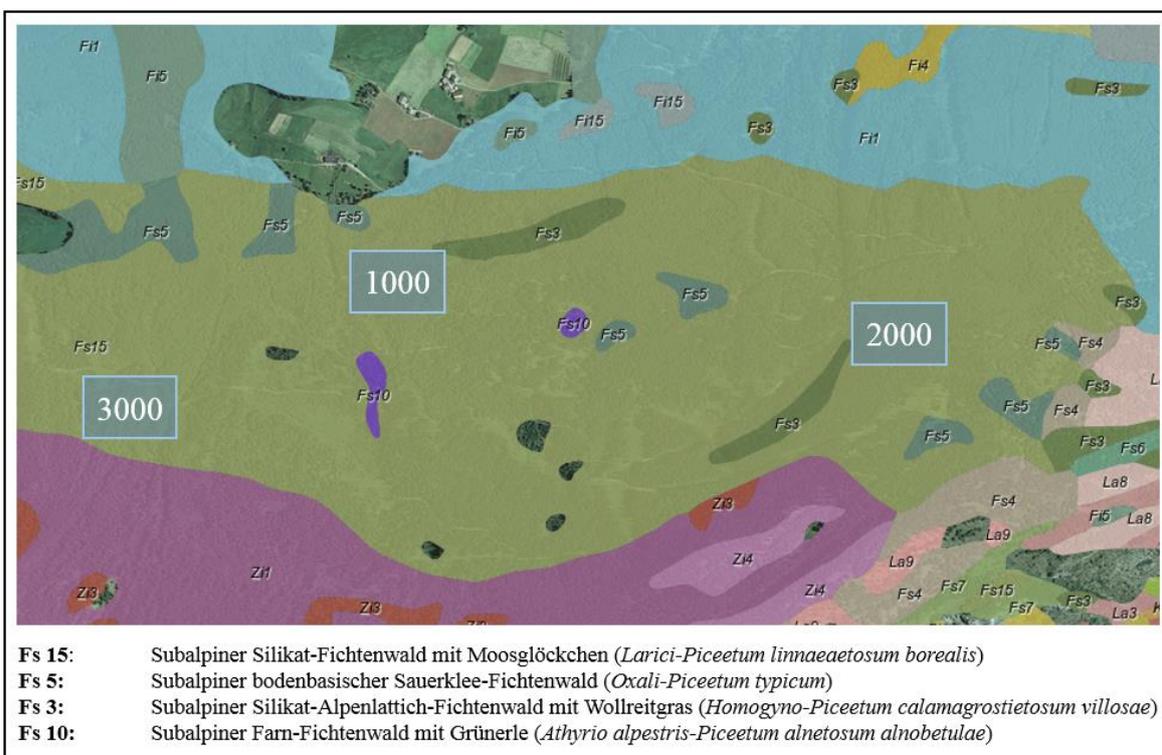


Abbildung 21: Übersicht der Triplets und der Waldgesellschaften auf subalpiner Höhenstufe am Nördersberg.

<sup>2</sup>Quelle: [http://gis2.provinz.bz.it/geobrowser/?project=geobrowser\\_pro&view=geobrowser\\_pro\\_atlas-b&locale=de](http://gis2.provinz.bz.it/geobrowser/?project=geobrowser_pro&view=geobrowser_pro_atlas-b&locale=de) [Stand: 03.05.2015]

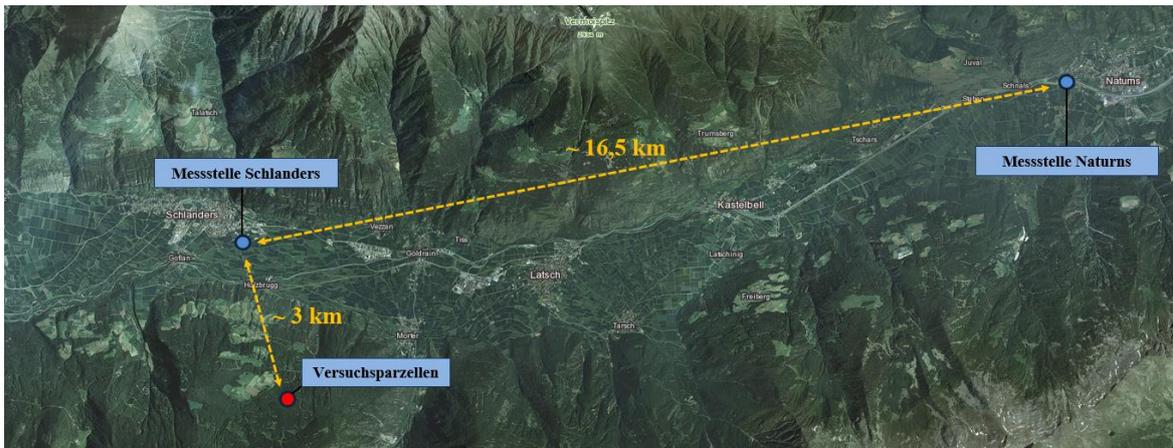


Abbildung 22: Entfernungen (Luftlinie) der Versuchspartellen und der Messstelle Naturns zur Messstelle Schlanders<sup>3</sup>.

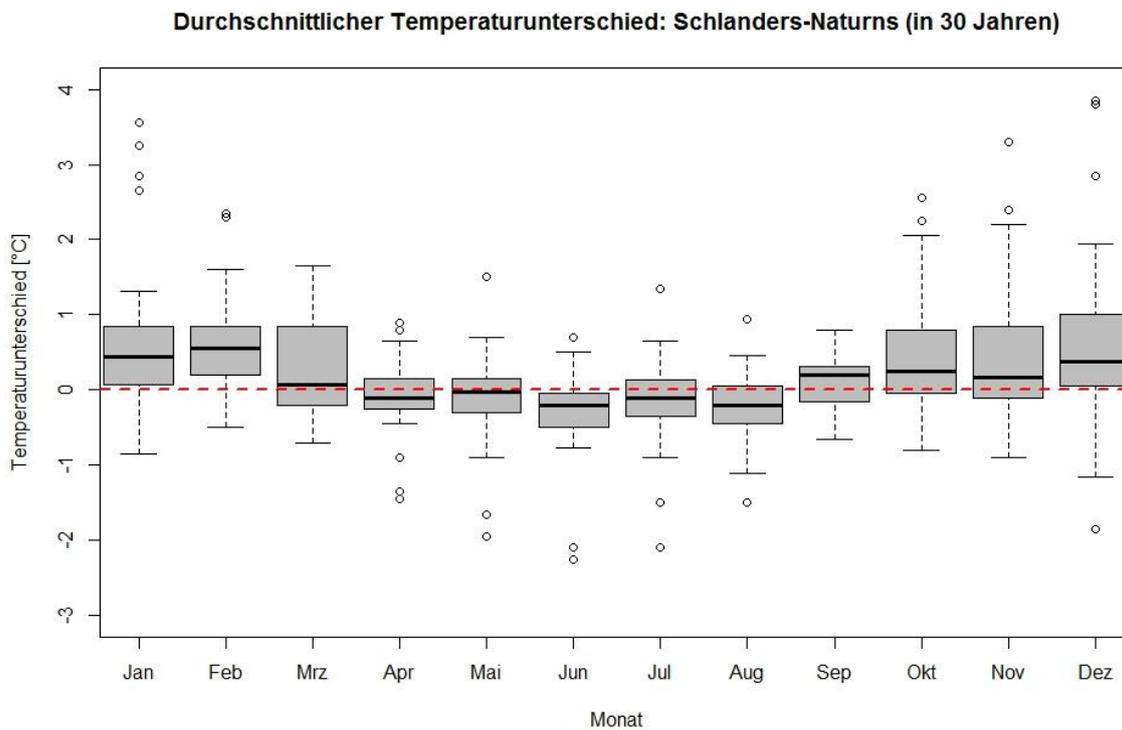


Abbildung 23: Boxplotdarstellung des durchschnittlichen Temperaturunterschiedes der Messstellen Schlanders und Naturns innerhalb einer 30 jährigen Referenzperiode.

<sup>3</sup>Quelle: [http://gis2.provinz.bz.it/geobrowser/?project=geobrowser\\_pro&view=geobrowser\\_pro\\_atlas-b&locale=de](http://gis2.provinz.bz.it/geobrowser/?project=geobrowser_pro&view=geobrowser_pro_atlas-b&locale=de) [Stand: 06.01.2016]

**Tabelle 12:** Ariditätsindizes nach De Martonne (1926) von 1970 bis 2013. Jeweils für das gesamte Jahr (Jahresmittel) und die Vegetationsperiode (Veg. Mai-Aug) berechnet, inkl. prozentueller Abweichung vom Durchschnittswert.

<b>Jahr</b>	<b>Jahresmittel</b>	<b>Veg. Mai-Aug</b>	<b>Jahresmittel</b>	<b>Veg. Mai-Aug</b>
1970	25,0	8,7	-2,7%	-5,4%
1971	19,4	7,8	-24,4%	-15,3%
1972	22,0	10,0	-14,4%	9,1%
1973	20,2	7,9	-21,6%	-14,3%
1974	20,8	7,5	-19,3%	-18,4%
1975	27,3	9,8	6,2%	7,0%
1976	23,7	6,4	-7,8%	-30,3%
1977	26,3	11,9	2,4%	30,0%
1978	23,0	8,0	-10,6%	-12,3%
1979	34,6	8,8	34,6%	-3,6%
1980	20,5	7,1	-20,2%	-22,5%
1981	30,5	11,7	18,6%	27,3%
1982	22,4	9,8	-12,9%	6,7%
1983	24,5	12,2	-4,6%	33,2%
1984	21,5	7,5	-16,5%	-18,3%
1985	24,3	11,3	-5,5%	22,8%
1986	25,9	9,7	0,6%	5,5%
1987	24,2	9,3	-5,8%	0,9%
1988	23,3	11,2	-9,3%	22,0%
1989	20,0	7,4	-22,4%	-19,6%
1990	22,3	6,8	-13,3%	-25,9%
1991	21,4	7,9	-16,7%	-14,1%
1992	28,2	8,6	9,6%	-5,8%
1993	25,7	7,9	0,0%	-14,1%
1994	27,5	9,8	7,1%	6,8%
1995	19,8	7,5	-22,9%	-18,0%
1996	27,9	10,8	8,5%	18,1%
1997	20,9	9,4	-18,8%	2,8%
1998	26,3	8,4	2,3%	-8,6%
1999	32,7	12,4	27,1%	35,2%
2000	37,9	11,3	47,4%	22,8%
2001	25,2	9,8	-2,0%	7,3%
2002	38,6	10,9	50,2%	18,5%
2003	24,5	9,3	-4,5%	1,3%
2004	26,6	9,5	3,3%	3,5%
2005	22,2	7,1	-13,8%	-23,1%
2006	24,1	9,5	-6,1%	4,0%
2007	24,2	11,6	-6,0%	26,2%
2008	36,3	12,9	41,1%	40,1%
2009	21,1	5,8	-17,8%	-37,0%
2010	32,4	9,5	25,9%	4,0%
2011	28,1	12,0	9,2%	30,3%
2012	28,5	8,2	10,7%	-10,3%
2013	31,7	10,0	23,1%	9,1%
<b>Σ</b>	<b>25,7</b>	<b>9,2</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>

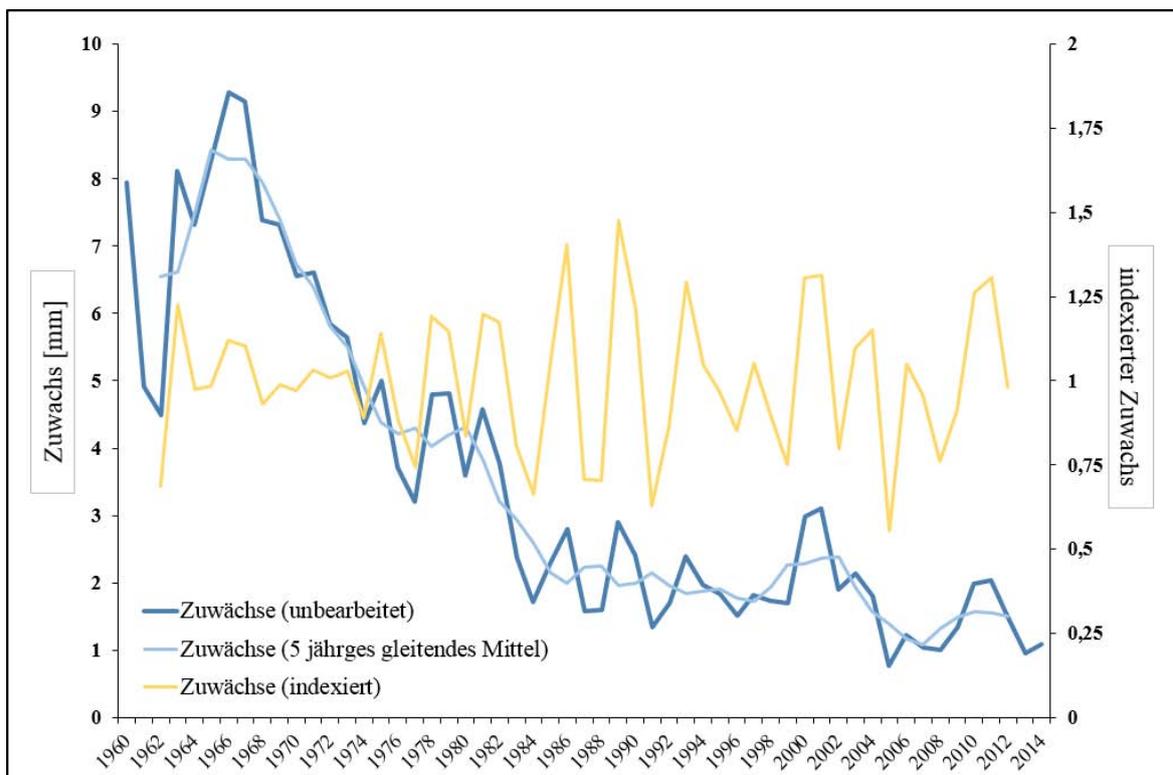
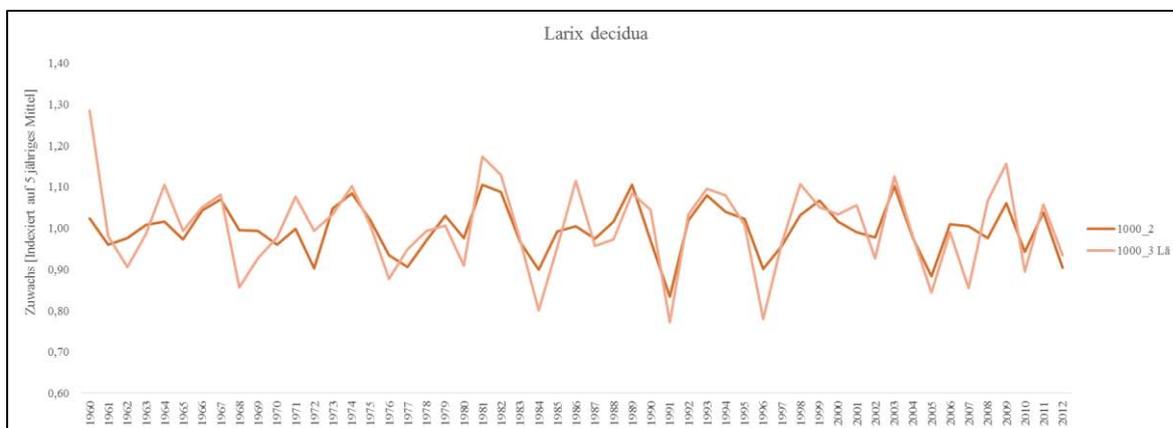
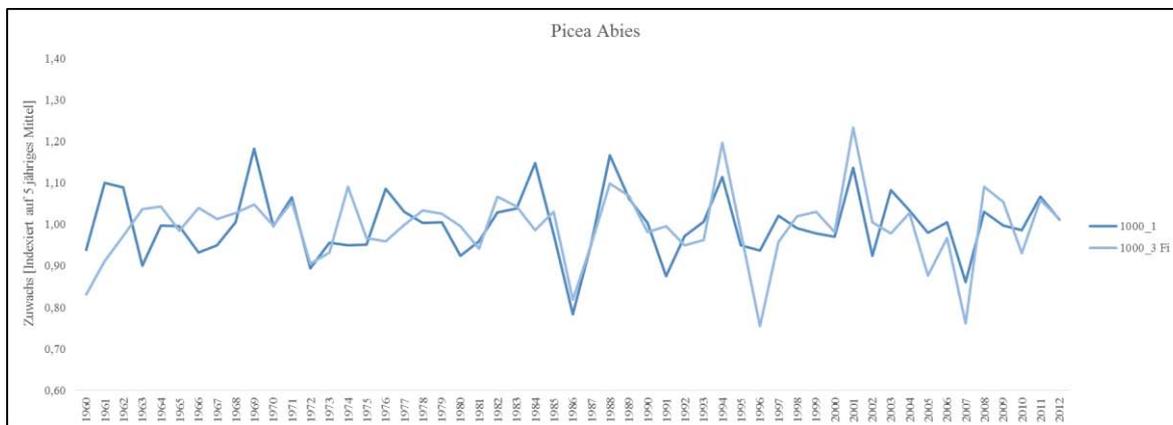


Abbildung 24: Graphische Übersicht der Bearbeitungsschritte von Zuwachsmessreihen.



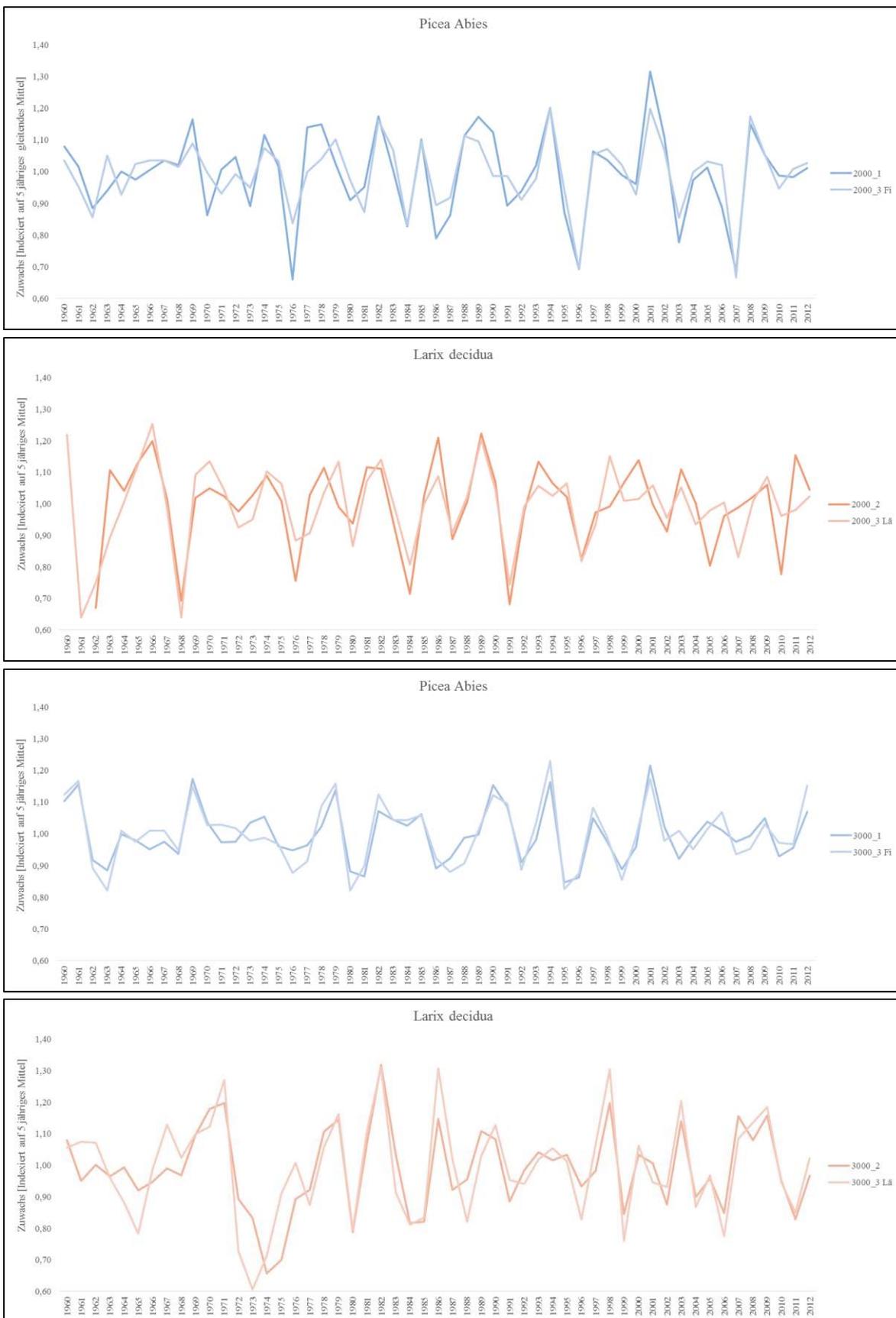


Abbildung 25: Indexierte baumartspezifische Zuwachsreihen der Rein- und Mischparzellen.

**Tabelle 13:** Übersicht der gemessenen Brusthöhendurchmesser, Höhen, Kronenansätze (inkl. Standardabweichung) und der Gesamtanzahl der ertragskundlich erfassten Bäume je Versuchsparzelle (n). In Klammern: Anzahl der gebohrten Bäume.

Triplet	Parzelle	Anzahl [n]	BHD [cm]	Höhe [m]	Kronenansatz [m]
1000	1 Fi	28 (20)	15,0 ± 4,9	12,7 ± 2,2	5,4 ± 1,9
1000	2 Lä	30 (20)	16,6 ± 5,6	13,4 ± 2,5	8,6 ± 2,3
1000	3 Fi	32 (20)	16,4 ± 4,8	12,7 ± 3,1	6,6 ± 2,5
1000	3 Lä	31 (21)	20,0 ± 6,2	15,3 ± 2,4	10,7 ± 1,2
2000	1 Fi	54 (20)	22,6 ± 9,3	16,2 ± 3,3	8,8 ± 2,7
2000	2 Lä	44 (20)	22,6 ± 9,8	18,8 ± 4,5	12,1 ± 2,8
2000	3 Fi	30 (20)	25,0 ± 10,9	17,5 ± 5,6	10,6 ± 3,0
2000	3 Lä	31 (22)	25,8 ± 8,0	21,0 ± 4,4	16,2 ± 1,4
3000	1 Fi	25 (22)	44,9 ± 12,3	27,7 ± 4,5	13,6 ± 3,6
3000	2 Lä	27 (20)	54,8 ± 10,9	30,3 ± 2,8	15,4 ± 4,4
3000	3 Fi	30 (20)	44,7 ± 13,1	24,6 ± 6,2	9,6 ± 2,9
3000	3 Lä	23 (20)	56,1 ± 9,6	28,0 ± 2,6	18,2 ± 2,0

**Tabelle 14:** Anzahl der Kernbohrungen je Baumart und Triplet

Triplet	1000		2000		3000	
	rein	misch	rein	misch	rein	misch
<b>Fichte</b>	11	10	11	9	10	5
<b>Lärche</b>	12	9	7	12	3	3

**Tabelle 15:** Übersicht der verwendeten Höhenkurven-Funktionen der einzelnen Versuchspartellen.

Funktion	Versuchspartelle
Petterson 1955	1000_1, 2000_1, 2000_2, 2000_3_Fi, 2000_3_Lä, 3000_2
Prodan 1944	1000_2, 1000_3_Fi, 1000_3_Lä, 3000_1
Michailoff 1943	3000_3_Fi, 3000_3_Lä

**Tabelle 16:** Flächenbezogene Ertragswerte der Jahre 2014, 2009, 2004 und 1999 nach Johann (1993) und Pretzsch (2002). Geordnet nach Triplet und Versuchsparzelle: Bestandesalter, Stammzahl (N), Oberhöhe (hdom), Oberdurchmesser (ddom), Höhe des Grundflächenmittelstammes (hg), Durchmesser des Grundflächenmittelstammes (dg), Grundfläche (G), Vorrat (V), laufender jährlicher Grundflächenzuwachs der letzten fünf Jahre (IG) und laufender jährlicher Volumenzuwachs der letzten fünf Jahre (IV).

Triplet	Parzelle	Jahr	Bestand	Baumart	Alter [Jahre]	N [n ha <sup>-1</sup> ]	hdom [m]	ddom [cm]	hg [m]	dg [cm]	G [m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> ]	V [m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ]	IG [m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup> ]	IV [m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup> ]
1000	1	1999	rein	Fichte	63	1846	10,5	29,1	9,0	14,5	30,6	128		
1000	1	2004	rein	Fichte	68	1908	11,1	20,0	9,8	13,4	27,0	120	1,9	13,7
1000	1	2009	rein	Fichte	73	1908	13,3	21,3	11,9	14,7	32,4	178	1,1	11,6
1000	1	2014	rein	Fichte	78	1908	14,9	23,7	13,2	16,0	38,2	239	1,2	12,2
1000	2	1999	rein	Lärche	59	1720	13,2	34,3	11,6	16,4	36,5	188		
1000	2	2004	rein	Lärche	64	1474	13,9	27,1	12,2	15,4	27,3	148	1,2	10,8
1000	2	2009	rein	Lärche	69	1572	15,9	28,4	13,8	15,9	31,2	194	0,8	9,2
1000	2	2014	rein	Lärche	74	1622	17,3	30,0	15,0	16,6	35,3	241	0,8	9,4
1000	3	1999	misch	Fichte	57	944	9,8	27,1	8,6	14,7	15,9	62		
1000	3	2004	misch	Fichte	62	917	11,2	22,3	10,2	15,4	17,0	79	0,7	6,2
1000	3	2009	misch	Fichte	67	806	13,5	24,2	12,2	16,6	17,4	99	0,4	5,3
1000	3	2014	misch	Fichte	72	806	15,5	26,3	13,8	17,5	19,4	127	0,4	5,6
1000	3	1999	misch	Lärche	50	833	12,4	37,8	11,3	19,4	24,7	125		
1000	3	2004	misch	Lärche	55	806	13,5	28,3	12,4	18,4	21,4	120	0,8	7,9
1000	3	2009	misch	Lärche	60	778	15,4	29,5	14,2	19,7	23,7	153	0,5	6,7
1000	3	2014	misch	Lärche	65	778	17,0	31,2	15,5	20,7	26,2	186	0,5	6,6
1000	3	1999	misch	Gesamt		1777					40,7	187		
1000	3	2004	misch	Gesamt		1723					38,4	199	1,5	14,2
1000	3	2009	misch	Gesamt		1584					41,0	252	0,8	12,0
1000	3	2014	misch	Gesamt		1584					45,6	313	0,9	12,2
2000	1	1999	rein	Fichte	106	1268	17,1	35,8	14,6	20,7	42,6	304		
2000	1	2004	rein	Fichte	111	1268	18,1	38,7	15,5	21,9	47,7	362	1,0	11,5
2000	1	2009	rein	Fichte	116	1244	19,1	40,2	16,3	22,7	50,2	401	0,6	8,5
2000	1	2014	rein	Fichte	121	1244	19,9	41,9	17,1	23,5	54,1	452	0,8	10,2
2000	2	1999	rein	Lärche	45	1438	19,6	36,9	18,4	20,1	45,7	383		
2000	2	2004	rein	Lärche	50	1438	21,8	39,5	20,3	21,7	53,2	493	1,5	22,0
2000	2	2009	rein	Lärche	55	1406	23,8	41,0	22,0	23,0	58,4	587	1,1	19,0
2000	2	2014	rein	Lärche	60	1438	25,5	42,6	23,4	24,0	65,1	698	1,3	22,1
2000	3	1999	misch	Fichte	55	542	15,0	39,9	14,1	25,4	27,4	185		
2000	3	2004	misch	Fichte	60	542	17,6	41,4	16,4	26,4	29,7	235	0,5	10,0
2000	3	2009	misch	Fichte	65	479	20,3	42,3	19,0	28,6	30,9	282	0,3	10,0
2000	3	2014	misch	Fichte	70	458	22,6	43,5	21,2	30,0	32,4	330	0,8	14,0
2000	3	1999	misch	Lärche	50	583	19,6	35,2	18,5	23,7	25,8	218		
2000	3	2004	misch	Lärche	55	583	21,6	36,8	20,4	25,0	28,6	266	0,6	9,6
2000	3	2009	misch	Lärche	60	521	23,5	38,0	22,2	26,7	29,2	295	0,4	8,6
2000	3	2014	misch	Lärche	65	500	25,1	39,6	23,6	28,3	31,3	337	0,5	8,7
2000	3	1999	misch	Gesamt		1125					53,2	403		
2000	3	2004	misch	Gesamt		1125					58,3	501	1,0	19,6
2000	3	2009	misch	Gesamt		1000					60,1	577	0,8	18,6
2000	3	2014	misch	Gesamt		958					63,8	667	1,2	22,7
3000	1	1999	rein	Fichte	207	417	29,5	53,9	28,7	41,1	55,2	730		
3000	1	2004	rein	Fichte	212	401	29,6	56,3	28,9	42,9	58,0	765	0,7	9,1
3000	1	2009	rein	Fichte	217	370	29,8	58,6	29,2	44,9	58,7	775	0,7	10,0
3000	1	2014	rein	Fichte	222	355	30,0	61,1	29,4	47,1	61,9	816	0,8	10,2
3000	2	1999	rein	Lärche	198	369	29,3	64,7	28,8	48,7	68,8	822		
3000	2	2004	rein	Lärche	203	356	29,6	65,6	29,2	50,3	70,6	851	0,5	7,3
3000	2	2009	rein	Lärche	208	356	30,0	67,0	29,5	51,4	73,7	896	0,6	9,0
3000	2	2014	rein	Lärche	213	356	30,4	68,1	30,0	52,2	76,3	938	0,5	8,2
3000	3	1999	misch	Fichte	217	292	30,0	57,6	29,1	40,5	37,7	505		
3000	3	2004	misch	Fichte	222	234	30,3	59,6	29,5	43,5	34,7	466	0,4	5,8
3000	3	2009	misch	Fichte	227	212	30,4	61,3	29,8	45,7	34,7	465	0,4	4,8
3000	3	2014	misch	Fichte	232	212	30,5	62,9	29,9	46,9	36,7	491	0,4	5,1
3000	3	1999	misch	Lärche	226	175	27,6	59,6	27,3	49,4	33,7	385		
3000	3	2004	misch	Lärche	231	154	28,0	61,0	27,7	53,0	33,9	390	0,3	4,4
3000	3	2009	misch	Lärche	236	146	28,2	62,8	28,0	54,9	34,6	400	0,4	4,9
3000	3	2014	misch	Lärche	241	146	28,6	64,3	28,4	56,2	36,3	423	0,3	4,5
3000	3	1999	misch	Gesamt		467					71,4	890		
3000	3	2004	misch	Gesamt		388					68,6	856	0,7	10,2
3000	3	2009	misch	Gesamt		358					69,3	865	0,7	9,6
3000	3	2014	misch	Gesamt		358					73,0	913	0,7	9,6

**Tabelle 17:** Gegenüberstellung der erwarteten Zuwächse ( $\hat{p}$ ) und tatsächlich ermittelten Zuwächse ( $p$ ); getrennt nach Baumarten und Triplets.

Parzelle		$p$ [m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup> ]	$\hat{p}$ [m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup> ]	$p - \hat{p}$ [m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup> ]	$p : \hat{p}$ [%]
Fichte	1000	5,610	5,111	0,499	9,8%
	2000	14,012	5,563	8,449	151,9%
	3000	5,097	5,720	-0,624	-10,9%
Lärche	1000	6,637	5,462	1,176	21,5%
	2000	8,722	10,038	-1,316	-13,1%
	3000	4,521	3,607	0,914	25,3%
Gesamt	1000	12,247	10,573	1,674	15,8%
	2000	22,734	15,601	7,133	45,7%
	3000	9,618	9,327	0,290	3,1%

**Tabelle 18:** Ergebnisse der statistischen Analyse (Kapitel 4.3.7) der zeitlichen Wuchsvariabilität von Fichte und Lärche im Rein- und Mischbestand.

Fichte	Parzelle	Estimate	Standardfehler	t value	Pr(> t )	Sig.
	1000	-0.3960	0.1191	-3.326	0.00152	**
	2000	-0.35688	0.06684	-5.339	1.56e-06	***
	3000	0.04609	0.06713	0.686	0.495	
	Alle Fichten	-0.27231	0.04793	-5.681	5.26e-08	***
Lärche	1000	0.2140	0.1787	1.198	0.236	
	2000	-0.31990	0.07933	-4.032	0.000193	***
	3000	0.004761	0.084179	0.057	0.955	
	Alle Lärchen	-0.10195	0.05960	-1.711	0.0890	.

## **9 Eidesstattliche Erklärung zur selbstständigen Anfertigung der Arbeit**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne Verwendung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen sind, wurden als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Tassilo Odysseus Heller

Freising & Wien, am 29. Februar 2016

## *Danksagung*



Foto: Quirin Stimm

Nach all der empirischen Sachlichkeit sollen nun an dieser Stelle der Arbeit noch einige herzliche Wörter des Dankes und der Wertschätzung an alle Personen gerichtet werden, welche mich während des gesamten Bearbeitungszeitraums begleitet und unterstützt haben...

Bei **Herrn Pretzsch** bedanke ich mich dafür, dass er mir ermöglicht hat meine Masterarbeit über den Wald in den Bergen Südtirols zu schreiben. Für sein stets offenes Ohr, für seine Anregungen, für die zahlreichen guten Gespräche und für die Freiheit bei der zeitlichen und logistischen Gestaltung die er mir für die Bearbeitung eingeräumt hat. **Herrn Sterba** danke ich für sein allseits freundliches Entgegenkommen, für seine Ratschläge und Hilfestellungen, für seine stets offene Tür und für seine erstklassige Bereuung.

Bei **Herrn Uhl** bedanke ich mich für seine organisatorische Hilfestellung, für seine Anregungen und nicht zuletzt für seine kurzfristige Flexibilität gegen Ende der Arbeit. Bei **Michael Heym** bedanke ich mich für seine immerzu freundliche Unterstützung und für die wunderbare Zusammenarbeit. Ein großer Dank geht an **Frau Felsl**, die sich stets freundlich und aufmerksam um meine Anliegen gekümmert hat. Für seine uneingeschränkt herzliche, loyale und hilfsbereite Zusammenarbeit, will ich mich bei **Gerhard Schütze** bedanken. **Gerald Dirnberger** und **Helga Fellner** danke ich für ihre Hinweise und ihre Anmerkungen.

**Herrn Unterthiner** und **Herrn Andriolo** vom Amt für Forstplanung Bozen danke ich für ihre unkomplizierte und konstruktive Zusammenarbeit. Vielen Dank für die mir eröffneten Möglichkeiten und Freiheiten. Zudem gilt mein Dank **Herrn Klotz** von der Forststation Schlanders. Bei **Manfred Hohenegger** und **Klaus Bliem** bedanke ich mich für die Zeit, die sie sich für mich genommen haben, für ihre forstwissenschaftlichen Anregungen und Hilfestellungen und nicht zuletzt für die südtiroler Herzlichkeit, die sie mir entgegengebracht haben!

Bei meinem Bergfreund **Quirin Stimm** bedanke ich mich für seine Hilfe in Südtirol, für seine ausdauernde und erstklassige Arbeit und für zahlreiche gemeinsame Brotzeiten! Bei **Leonie Freiling** bedanke ich mich für ihre Hilfe bei der Ausarbeitung, für ihre Anregungen und vor allem für ihre Geduld. **Joachim & Christine Heller** danke ich für ihre Korrekturen, Anmerkungen und für ihre Zeit. Und bei **Gabriele Heller** bedanke ich mich für ihre logistische und menschliche Hilfe, ohne die ich diese Arbeit wahrscheinlich nicht in dieser Form bearbeiten hätte können.