

Zur Abhängigkeit der Zuwachsverteilung im Plenterwald von der Art und Größe der Bäume

*Torben Hilmers, Leonhard Steinacker und Hans Pretzsch
Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, TU München*

Zusammenfassung

Am Beispiel des Fichten-Tannen-Buchen Plenterwaldversuchs bei Freyung im Bayerischen Wald wurde die Abhängigkeit der Zuwachsverteilung von der Art und Größe der Bäume im Plenterwald detailliert analysiert. Der Plenterwaldversuch Freyung 129 (FRY 129) wurde seit seiner Gründung 1980 bis heute sieben Mal vollständig aufgenommen. Auf den sechs Teilparzellen der Versuchsfläche FRY 129 sind verschiedene Varianten der Vorratshaltung und Zielstärke realisiert. Zwei Parzellen sind vorratsarm (292 bzw. $360 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), zwei Parzellen vorratsgut (498 bzw. $572 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) und zwei Parzellen sind vorratsreich (767 bzw. $669 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$). Mit steigendem Vorrat steigt die Zielstärke. Untersucht wurde die Zuwachsverteilung auf drei verschiedenen Ebenen. Die Einzelbaumebene, und die Populationsebene, das sind alle Bäume einer Art, sollten zum Verständnis der Zuwachsverteilung zwischen Art und Größe der Bäume auf der Ebene des Bestandes insgesamt beitragen..

Unsere Ergebnisse zeigten bzgl. der Einzelbaumebene, dass es signifikante Unterschiede in der langfristigen Entwicklung der Einzelbaumzuwächse zwischen den drei Baumarten gab. Während die Einzelbaumzuwächse vor allem mittelstarker Buchen und Tannen seit 1980 zunahmen, nahmen die Einzelbaumzuwächse der Fichten stetige ab. Noch vor 40 Jahren zeigte die Tanne geringere Zuwächse, wenn Sie in direkter Nachbarschaft zu Fichte und Buche gewachsen war. In der letzten Aufnahme profitierten alle drei Baumarten auf Grund ihrer Komplementarität von der Nachbarschaft der jeweils anderen Baumarten. Dieser Effekt war bei der Fichte hingegen seit 1980 rückläufig.

Auf Populationsebene zeigten wir, dass die mittelstarken Bäume aller drei Baumarten überproportional zu ihren Einzelbaumvolumina zum Gesamtvolumenzuwachs beigetragen haben. Abhängig vom Vorrat des Bestandes zeigten die drei Baumarten jedoch verschiedene Ausprägungen dieser Zuwachsverteilung. Die charakteristische Gleichgewichtsverteilung im Plenterwald ist somit auch von der Artenzusammensetzung abhängig. Zwischen Bestandesvorräten von 500 bis $800 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ zeigten die untersuchten Plenterwälder erwartungsgemäß eine hohe Zuwachsresilienz. Auf den vorratsarmen Parzellen ging der Bestandeszuwachs letztlich jedoch zurück. Mit Hilfe der Ergebnisse auf Einzelbaum- und Populationsebene diskutieren wir mögliche Gründe für diese Zuwachsverluste.

1 Einleitung

Plenterwälder üben seit jeher eine große Faszination sowohl auf die forstliche Wissenschaft als auch auf die Praxis aus. Ein Plenterwald ist ein Wald aus Bäumen, deren Kronen sich seitlich meistens nicht berühren, jedoch den gesamten vertikalen Wuchsraum ausfüllen (SCHÜTZ, 2001). Der Plenterwald zeichnet sich durch eine hohe Arten- und Strukturvielfalt aus, die auf der gesamten Fläche und über lange Zeiträume ähnlich ist. Im Plenterwald kommen beispielsweise Fichten, Tannen und Buchen unterschiedlichsten Alters in enger Nachbarschaft gestuft und durchmischt vor. Das unterscheidet ihn grundlegend vom Altersklassenwald, der durch eine flächige Trennung von Baumarten und verschieden alter Bestände charakterisiert ist (PRETZSCH, 2019). Es ist für Plenterwälder typisch, dass die in kurzen Intervallen wiederkehrenden Eingriffe nicht nur Ernte-, sondern stets auch Verjüngungs- und Erziehungsmaßnahmen sind. Das Jugendwachstum der Plenterwaldbäume ist sowohl hinsichtlich des Höhen- als auch des Dickenwachstums außerordentlich langsam (FUCHS, 1996).

Aufgrund ihrer Fähigkeit, im Unterstand auszuharren, sind schattentolerante Baumarten wie die Tanne oder Buche besonders geeignet für Plenterwälder. Plenterwälder sehen zwar naturnah und geradezu urwaldartig aus. Plenterartige Strukturen entstehen von Natur aus aber nur dort, wo immer wiederkehrende Störungen auf das Waldgefüge einwirken, d.h. in der Kampfzone exponierter subalpiner Wälder (SCHÜTZ, 2001). Anderswo sind Plenterwälder auf kontinuierliche waldbauliche Eingriffe angewiesen, die ihre charakteristische Struktur erhalten.

Wird ein Plenterwald im Gleichgewicht gehalten, so variiert die Baumzahl-Durchmesser-Verteilung über der Zeit nur geringfügig, z. B. bedingt durch klimatische Schwankungen, Verschiebung der Baumartenanteile oder waldbauliche Eingriffe. Im Gleichgewichtszustand bleiben die Übergänge der

Bäume von Durchmesserstufe zu Durchmesserstufe, die Mortalität und Entnahmen über der Zeit ähnlich (PRETZSCH, 2019). Eine Voraussetzung für den dauerhaften Erhalt der Plenterstruktur ist eine kontinuierliche Ausstattung aller Durchmesserstufen mit Bäumen, wobei die Baumzahl in den unteren Stufen besonders hoch ist und mit zunehmender Durchmesserstufe etwa exponentiell abnimmt (Abbildung 1). Im Gleichgewichtszustand, bei etwa exponentieller Durchmesserverteilung, sind alle Höhenstufen vertreten. Unter diesen Voraussetzungen ist der Plenterwald selbsterneuernd und stabil. Die Verselbständigung der Bäume und die gute Kronenentwicklung verleihen den Plenterwaldbäumen eine hohe individuelle mechanische Stabilität (KERN, 1966). Plenterwälder zeigen aufgrund der Tatsache, dass nach Störungen genügend überlebende Bäume bestehen eine hohe Resistenz. Da diese verbleibenden Bäume außerdem den Zuwachsrückgang nach der Entnahme von Bäumen aus der Ober- und Mittelschicht in gewissem Umfang kompensieren können sind Plenterwälder weiter als äußerst resilient anzusehen. Durch Entnahmen entstehen kaum unbestockte Flächen. Das unterstreicht die große Zuwachsresilienz des Plenterwalds im Vergleich zu Altersklassenwäldern, in denen sich die Lücken nach Störungen durch seitlichen Einwuchs oder Ankommen von Verjüngung wesentlich langsamer schließen (ZINGG et al., 2009).

Im Gleichgewichtszustand bleiben, Standortsänderungen oder Schäden ausgenommen, die Baumhöhen-Durchmesserbeziehung sowie die unimodale Beziehung zwischen Durchmesserzuwachs und Durchmesser stationär.

Um diesen stabilen Gleichgewichtszustand von Plenterwäldern zu erhalten, müssen regelmäßige forstliche Eingriffe stattfinden. Die Art der Baumentnahmen kann durch Vorgabe einer einzuhaltenden Baumzahl-Durchmesser-Verteilung definiert werden (BACHOFEN 1999). DE LIOCOURT (1898) zeigt, dass die Baumzahlen in Plenterwäldern, die im Gleichgewicht, also im stationären Zustand sind, von der niedrigsten bis zur höchsten Durchmesserstufe etwa einer geometrischen Reihe folgt. MEYER (1933) zeigt, dass diese Baumzahlabnahme auch über die fallende Exponentialkurve beschrieben werden kann. Gegenüber den im halblogarithmischen System linearen Gleichgewichtskurven von DE LIOCOURT (1898) oder MEYER (1933) schlägt SCHÜTZ (1997) einen detaillierten Algorithmus über Ein-, Auswuchs- und Nutzungsraten zur Bestimmung von Gleichgewichtskurven für Plenterwälder vor. Mit diesem Ansatz ergeben sich Soll-Verteilungen die i. d. R. geringfügig von der exponentiellen Kurvenform abweichen.

Beide Ansätze vernachlässigen jedoch die baumartenspezifischen Beiträge zur Baumzahl-Durchmesser-Verteilung. Es bleibt z. B. unberücksichtigt, wie sich die Arten in den Standraumansprüchen, Ein-, Auswuchs- und Nutzungsraten unterscheiden und auch interspezifisch beeinflussen. Außerdem fließen die die Interaktionen, z. B. zwischen Fichten, Tannen und Buchen, nicht in die bisherigen Ansätze zur Ableitung von Gleichgewichtskurven ein (PRETZSCH, 2019).

Anhand von Daten des langfristigen Plenterwaldversuchs Freyung 128 des Lehrstuhls für Waldwachstumskunde, TU München, untersuchten wir in diesem Beitrag beispielhaft die Wechselwirkungen zwischen Bestandesstruktur, Vorrat und Zuwachsverteilungen in einem Plenterwald aus Fichte, Tanne und Buche. Unsere Analysen erlauben Aussagen über das Zuwachsverhalten der drei Baumarten auf drei verschiedenen Ebenen. Auf der untersten Ebene, der Einzelbaumebene, zeigen wir (i) welchen langfristigen Zuwachstrend, seit 1980, die drei Baumarten zeigten, (ii) wie die drei Baumarten in Abhängigkeit von Größe, Konkurrenz und Nachbarschaft gewachsen und (iii) wie die drei Baumarten auf Freistellung reagierten. Auf der nächst höheren Ebene, der Populationsebene, zeigen wir (iv) wie sich der Bestandesvolumenzuwachs über die Arten und Größenstufen verteilt hat und (v) wie effizient die drei Baumarten Freiräume nutzen konnten. Die Ergebnisse auf den unteren Ebenen helfen uns zu verstehen was auf der obersten Ebene, der Bestandesebene, abläuft. Schließlich wird (vi) zusammengefaßt und diskutiert warum die Bestandesproduktivität bei Unterschreitung eines Vorrats von $500 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ in diesen Wäldern abnimmt.

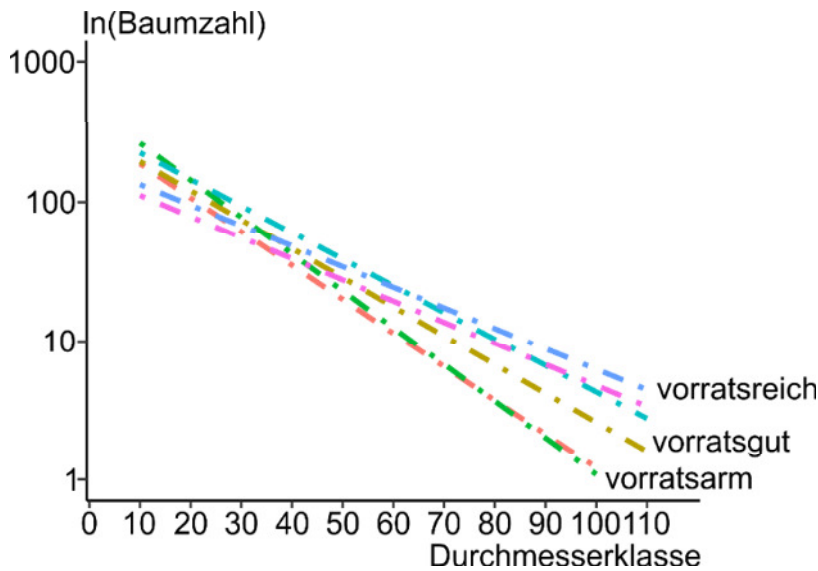


Abbildung 1: Variation des Zusammenhangs zwischen Stammdurchmesser (Zehnzentimeter-Durchmesserstufen) und Baumzahl ($d_{1,3} \geq 7\text{cm}$) auf der Plenterwaldversuchsfläche Freyung 129. Die gestrichelten Geraden resultieren aus einem regressionsanalytischen Ausgleich der Baumzahl-Durchmesser-Verteilung. Sie repräsentieren unterschiedliche Gleichgewichtskurven auf vorratsarmen bis vorratsreichen Parzellen.

2 Material und Methoden

2.1 Material

Tabelle 1: Standortmerkmale des Plenterwaldversuchs Freyung 129. WB, Wuchsbezirk; Ta, mittlere Jahrestemperatur; Tv, Mitteltemperatur in der Vegetationszeit; Na, Jahresniederschläge; Nv, Niederschläge in der Vegetationszeit.

| Versuch | WB | Ta | Tv | Na | Nv | Höhe | Neigung | Exposition |
|---------|---------|-----|----|-----------|-----|------|-----------|------------|
| | | °C | °C | mm | mm | mNN | Altgrad | Altgrad |
| FRY 129 | 09.11.3 | 6,5 | 13 | 1100-1300 | 700 | 720 | 2,0 – 5,0 | 135 |

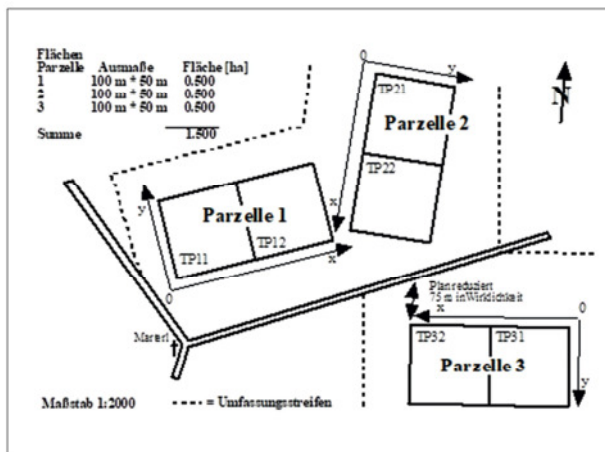
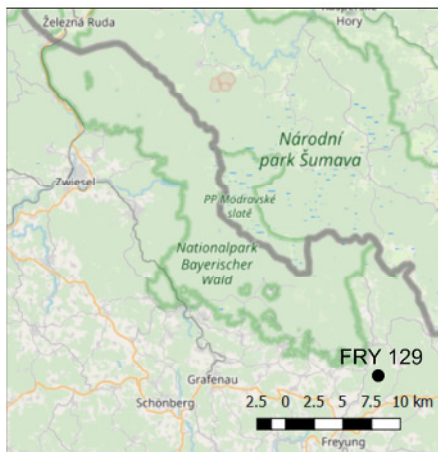


Abbildung 2: Links, Lage der Plenterwaldversuchsflächen Freyung 129 (schwarzer Punkt). Rechts, Lageplan und Flächengrößen der drei Parzellen mit sechs Teilparzellen (TP) der Plenterwaldversuchsfläche Freyung 129.

Die Versuchsfläche Freyung 129, im Folgenden mit der Versuchsflächenkennung FRY 129 abgekürzt, liegt im Kreuzberger Forst, welcher - an der Südwestgrenze des Wuchsbezirkes 11.3 „Innerer Bayerischer Wald“ gelegen - der submontanen Zone des Grenzgebirges zuzuordnen ist (Abbildung 2). Der Versuch ist in etwa 720 m Höhe über NN an einem leicht südöstlich geneigten Hang gelegen (Tabelle 1). In dieser Höhenlage treffen Fichte, Tanne und Buche zusammen, Baumarten also, die in dieser Zone vitale Konkurrenten sind. Der vorherrschende Bodentyp ist hier eine schwach podsolige frische Braunerde mit reichen Skelettanteilen. Bei einem Jahresmittel der Lufttemperatur von ca. 6,5 Grad Celsius fallen 1100 bis 1300 mm Niederschlag pro Jahr, davon 700 mm während der Vegetationsperiode von Mai bis Oktober (Tabelle 1). Um Wechselwirkungen zwischen Bestandesstruktur, Vorrat und dem Zuwachs zu untersuchen, verfolgt der Versuch FRY 129 verschiedene langfristige Zielvorräte auf sechs Teilparzellen (Abbildung 2). Auf den Teilparzellen 11, 12, 21, 22, 31 und 32 werden die Zielvorräte zu experimentellen Zwecken langfristig auf 300, 400, 500, 600,

700 und 800 m³ ha⁻¹ eingestellt. Die Parzellen 11 und 21 sind vorratsarm, 12 und 31 vorratsgut und 22 und 32 vorratsreich. Mit zunehmender Vorratshöhe steigt die Zielstärke. Alle Bäume mit einem Brusthöhendurchmesser > 6,5 cm wurden seit Versuchsanlage im Jahre 1980 auf den 0,25 ha großen Teilparzellen insgesamt 7-mal vermessen.

2.2 Methoden

Für eine detaillierte Analyse der Zuwachsverteilung im Plenterwald FRY 129 wurde das Zuwachsverhalten auf drei verschiedenen Ebenen untersucht. In einem ersten Schritt wurden die Grundflächenzuwächse auf Einzelbaumebene untersucht. Im zweiten Schritt haben wir Zuwachsmuster auf Populationsebene, das heißt aller Bäume innerhalb einer Art, untersucht. Im dritten Schritt wurde das Zuwachsverhalten gesondert nach den Arten Fichte, Tanne und Buche analysiert. Das übergeordnete Ziel dieser Herangehensweise ist, dass sichtbare Veränderungen der Bestandesebene durch das Wissen über die Einzelbaum- und Populationsebene hergeleitet werden kann.

2.2.1 Einzelbaumebene

Welchen langfristigen Zuwachstrend zeigten die drei Baumarten seit 1980?

Um die langfristige Entwicklung der Grundflächenzuwächse seit 1980 zu untersuchen, wurden baumartenweise (Fichte, Tanne und Buche) Regressionen gerechnet. Grundflächenzuwächse (z_g) auf Einzelbaumebene wurden in Abhängigkeit der Ausgangsdimension (Grundfläche g) und dem Kalenderjahr geschätzt ($\log(z_g) = f(\log(g), \text{Kalenderjahr})$).

Wie wuchsen die drei Baumarten in Abhängigkeit von Größe, Konkurrenz und Nachbarschaft?

Mit Hilfe artenweiser Regressionen wurde der Einfluss der Ausgangsdimension (g), der Konkurrenzsituation sowie der Nachbarschaft auf den Grundflächenzuwachs auf Einzelbaumebene mit folgendem Model geschätzt:

$z_g = f(g, \text{lokaler SDI, Anteil Fremdbaumart am SDI})$

Als Konkurrenzindex wurde lokale Stand-Density-Indizes (SDI; Reineke, 1933) mit einem Suchradius von Brusthöhendurchmesser * 20 verwendet. Der relative Anteil der Fremdbaumart am SDI, war der Anteil der jeweilig anderen Baumarten verschieden vom Zentralbaum. Bei einer Fichte als Zentralbaum waren die Fremdbaumarten Buche und Tanne, bei einer Tanne als Zentralbaum Buche und Fichte usw. Um den unterschiedlichen Standraumbedarf der drei Baumarten zu berücksichtigen, wurden die SDI-Werte anhand von Äquivalenzkoeffizienten transformiert (PRETZSCH und BIBER, 2016).

Wie haben die drei Baumarten auf Freistellung reagiert?

Während der letzten beiden Aufnahmen des Versuchs FRY 129 erfolgten zum Teil stärkere Eingriffe, um die Parzellen den Zielvorräten anzunähern. Wie die Baumarten bzw. Bäume welcher Größe auf diese Freistellung reagierten, wurde ebenfalls mit einer artenweisen Regression untersucht: $z_g = f(g, \text{KKL}, \Delta \text{KKL})$.

Hierin war z_g der Grundflächenzuwachs, g die Grundfläche des Baumes, KKL der Kronenkonkurrenzindex um Licht (Pretzsch, 1997) nach Durchforstung und ΔKKL die Differenz der Konkurrenzindizes vor (KKL_{VD}) und nach (KKL_{ND}) der Durchforstung ($\Delta \text{KKL} = \text{KKL}_{\text{VD}} - \text{KKL}_{\text{ND}}$).

2.2.2 Populationsebene

Wie war der Volumenzuwachs über Arten und Bäume unterschiedlicher Größe verteilt?

Bei der klassischen Herleitung von Plentergleichverteilungskurve wird i.d. R. keine Unterscheidung nach Arten vorgenommen. Da der artspezifische Durchmesserklassenzuwachs aber durchaus heterogen verläuft, ist die Gleichgewichtsverteilung direkt von der Artenzusammensetzung abhängig. Um zu untersuchen, ob sich die drei Baumarten in der Verteilung des Zuwachses auf die Durchmesserklassen unterscheiden, haben wir den Growth Dominance Coefficient (GDC; BINKLEY et al., 2006) baumartenweise berechnet. Eine Veränderung der Zuwachsverteilungen unter vorratsarmen bis vorratsreichen Verhältnissen wurde mit folgender artenweiser Regression nachgegangen: $\text{GDC} = f(V)$. Hierin war V der Vorrat des verbleibenden Bestandes.

Wie effizient konnten die drei Baumarten Freiräume nutzen?

Bei zwei der insgesamt sieben Aufnahmen des Versuchs FRY 129 wurden neben BHD- und Höhenmessungen außerdem Ablotungen der Kronen in acht Himmelsrichtungen durchgeführt. Diese Aufnahmen konnten wir nutzen, um zu untersuchen wie effizient die drei beteiligten Baumarten Fichte, Tanne und Buche gewonnene Freiräume nutzen konnten. Mit der Hilfe artenweiser Regressionen haben wir den Einfluss des Vorrats des verbleibenden Bestands (V) und der Kronenschirmfläche in m^2 auf den durchschnittlichen laufenden jährlichen Volumenzuwachs (ZV) der drei Baumarten untersucht: $ZV = f(V, \text{Kronenschirmfläche})$.

3 Ergebnisse

3.1 Einzelbaumebene

Zeigten die drei Baumarten seit 1980 einen Wachstumstrend?

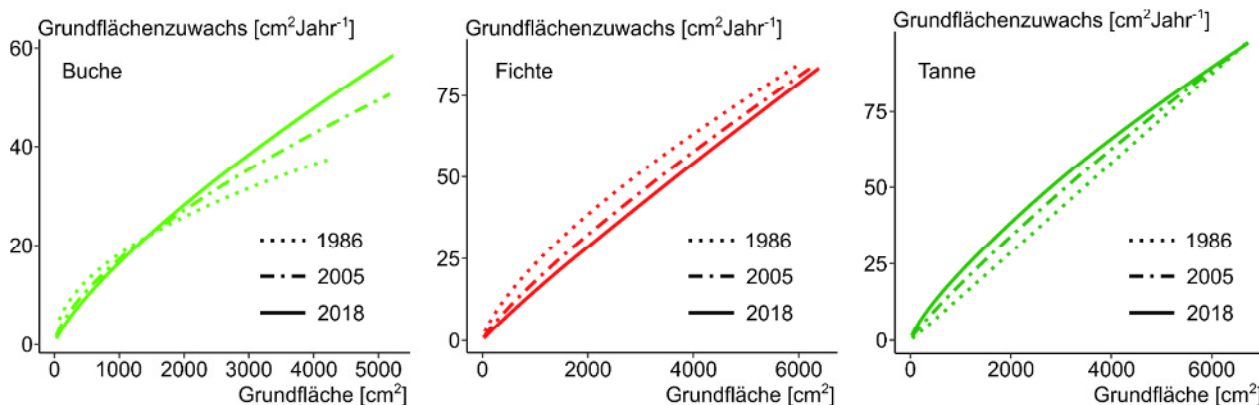


Abbildung 3: Mittlere jährliche Grundflächenzuwächse über der Grundfläche der drei Baumarten Buche (links), Fichte (Mitte) und Tanne (rechts) auf der Plenterwaldversuchsfläche Freyung 129. Dargestellt für die Aufnahmezeitpunkte 1986, 2005, 2018.

Abbildung 3 zeigt den durchschnittlichen Grundflächenzuwachs der Baumarten Fichte, Tanne und Buche über der Einzelbaumgrundfläche in den Aufnahmezeitpunkten 1986, 2005 und 2018. Buchen mit einer Grundfläche $> 2000 \text{ cm}^2$ ($d_{1,3}$) zeigten seit der Versuchsflächenanlage im Jahr 1980 stetig steigende Grundflächenzuwächse bei gleicher Grundfläche. Buchen mit kleinerer Grundfläche zeigten keine Veränderungen im Wachstumsmuster. Die Fichte verlor in allen Grundflächenbereichen seit 1980 an Grundflächenzuwachs. Mittelstarke Fichten zeigten die größten Zuwachsverluste. Diejenigen Fichten am dicken Ende des Größenspektrums zeigten vergleichsweise wenig Zuwachsrückgänge. Im Gegensatz zur Fichte zeigte die Tanne im gesamten Größenspektrum steigende Grundflächenzuwächse. Vor allem die Tannen der mittleren Stärkeklasse zeigten die größten Zuwachsgewinne. Tannen am dicken Ende des Größenspektrums wuchsen seit der Versuchsflächenanlage auf einem ähnlichen Niveau.

Einfluss der Nachbarschaft

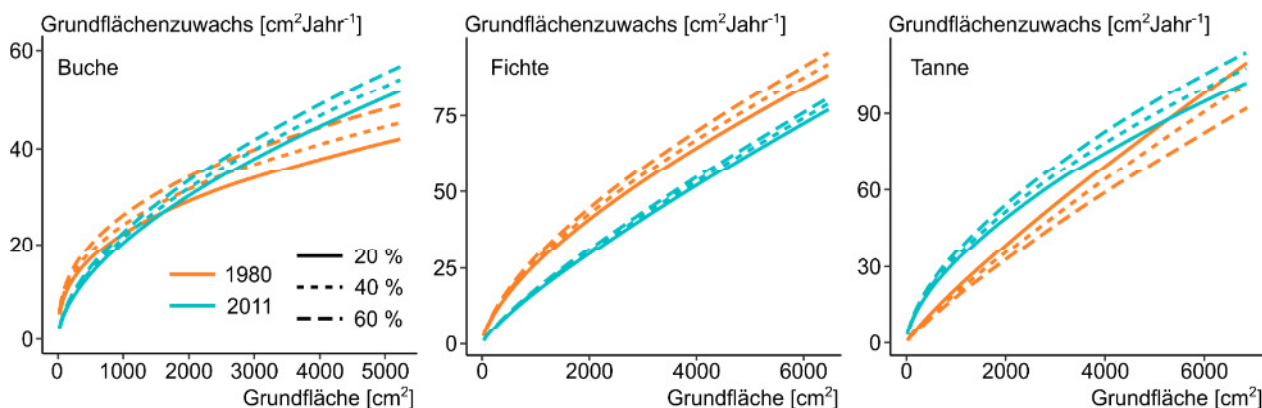


Abbildung 4: Durchschnittliche jährliche Grundflächenzuwächse in Abhängigkeit vom Kalenderjahr und dem Anteil an Fremdbaumarten am lokalen Stand-Density-Index über der Grundfläche der drei Baumarten Buche (links), Fichte (Mitte) und Tanne (rechts). Rot, Kalenderjahr 1980; blau, Kalenderjahr 2011. Durchgezogene, gepunktete und gestrichelte Linien repräsentieren einen Anteil an Fremdbaumarten am lokalen SDI von 20, 40 und 60 %.

Die Untersuchungen zum Einfluss der Nachbarschaft zeigten, dass alle drei Baumarten in der letzten Aufnahme von der Nachbarschaft der anderen Baumarten profitierten (Abbildung 4). Die größten Zuwachsgewinne erreichen diejenigen Bäume am dicken Ende des Größenspektrums. Werden die beiden Aufnahmezeitpunkte 1980 bzw. 2011 verglichen so zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen den Baumarten. Eine Tanne, welche vor 40 Jahren von Fichten und Buchen in der direkten Nachbarschaft umgeben war, zeigte geringere Durchmesserzuwächse als eine Tanne, welche von anderen Tannen umgeben war. Im Gegensatz dazu profitierten in der letzten Aufnahmeperiode Tannen von der direkten Nachbarschaft von Bäumen anderer Baumarten. Die Fichte hingegen zeigte neben dem langfristigen negativen Trend im Grundflächenzuwachs auch, dass Sie in der letzten Aufnahme weniger von der Nachbarschaft anderer Baumarten profitierte als in den 80er Jahren. Die Buche konnte das Zuwachsniveau steigern und profitierte sowohl in der letzten Aufnahme als auch vor 40 Jahren von der direkten Nachbarschaft der anderen Baumarten.

Freistellungseffekte

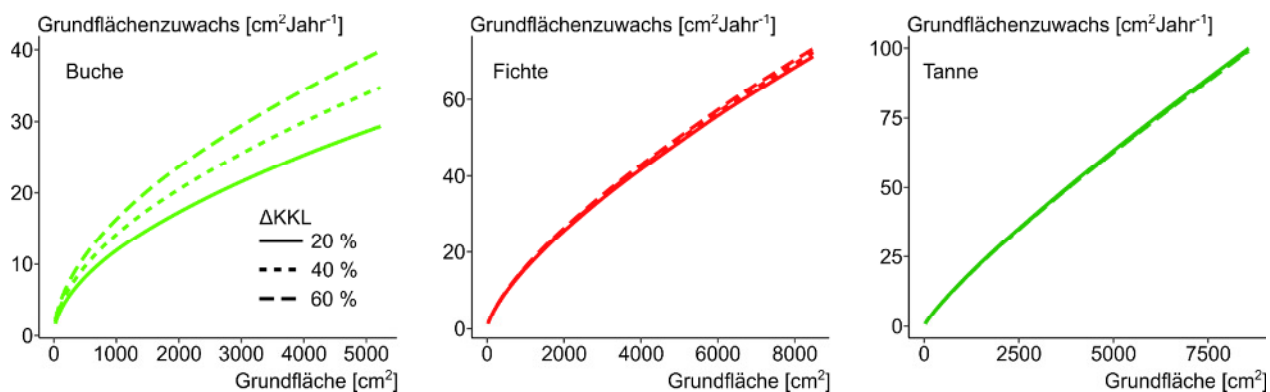


Abbildung 5: Durchschnittliche jährliche Grundflächenzuwächse über der Anfangsgrundfläche, dargestellt für Bäume mit veränderter Konkurrenzsituation nach Durchforstung. Dargestellt sind die Zusammenhänge für die Baumarten Buche (links), Fichte (Mitte) und Tanne (rechts). Durchgezogene, gepunktete und gestrichelte Linien repräsentieren eine Verkleinerung des Konkurrenzindizes KKL um 20, 40 und 60 Prozent im Vergleich KKL vor Durchforstung und KKL nach Durchforstung.

Unsere Untersuchungen zum Einfluss der Freistellung auf das Zuwachsverhalten der drei Baumarten zeigte, dass allein die Buche schnell auf Freistellungen reagieren konnte (Abbildung 5). Buchen, welche infolge einer Durchforstung von Bedrängern befreit wurden, zeigten signifikant höhere Grundflächenzuwächse im Vergleich zu weniger stark freigestellten Buche. Die größten Buchen zeigten auch den größten positiven Effekt der Freistellung auf den Zuwachs. Für die Fichte und die Tanne konnten wir keine oder nur sehr geringen Effekte nachweisen.

3.2 Populationsebene

Wie wurde der Volumenzuwachs über Arten und Größenstufen verteilt?

Nach unseren Ergebnissen trugen bei allen drei Baumarten die mittelstarken Bäume überproportional zum Volumenzuwachs der gesamten Population bei (Abbildung 6). Das wird dadurch erkennbar, dass alle drei Baumarten unabhängig von der Vorratssituation des Gesamtbestandes (vorratsarm, vorratsgut, vorratsreich) negative Werte im GDC hatten, was ein Indikator für ihren überproportionalen Beitrag ist. Die Ausprägung variierte jedoch stark in Abhängigkeit des Vorrats des verbleibenden Bestandes und zwischen den Baumarten. Während in vorratsreichen Beständen ($V = 600 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$) die mittelstarken Bäume der Buche und Tanne stark überproportional zu ihrer Größe zum Zuwachs beigetragen haben ($\text{GDC} < -0.2$) war bei der Fichte eine fast ausgeglichene Situation zwischen den Baumstärken vorzufinden ($\text{GDC} = -0.08$). In vorratsarmen Beständen hingegen zeigten die mittelstarken Bäume der Fichte einen überproportionalen Beitrag ($\text{GDC} = -0.25$) während die Kurven der Buche und der Tanne sich der Winkelhalbierenden annäherte und somit alle Stärkeklassen nahezu proportional zu ihrem Einzelbaumvolumina zum Gesamtvolumenzuwachs beigetragen haben ($\text{GDC} = -0.07$ bzw. -0.12).

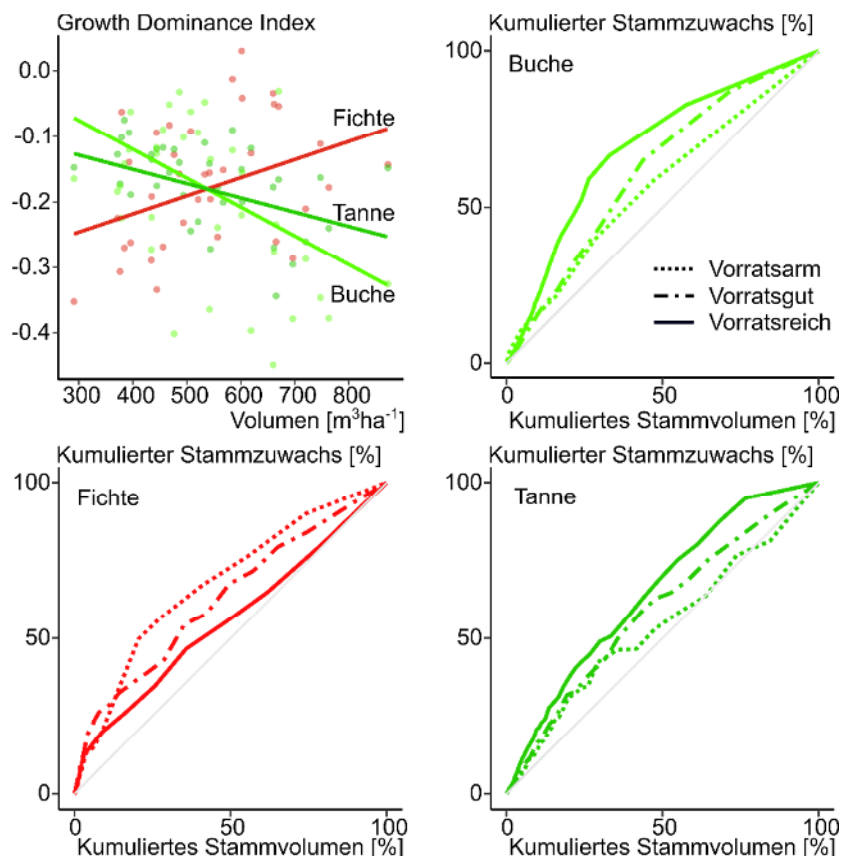


Abbildung 6: (A) Growth-Dominance-Koeffizient, dargestellt über dem Volumen des verbleibenden Bestands der drei Baumarten Fichte (rot), Tanne (dunkelgrün) und Buche (hellgrün). (B), (C), (D) kumulierter Stammzuwachs in Prozent über kumuliertes Stammvolumen in Prozent der drei Baumarten Buche (B), Fichte (C) und Tanne (D). Durchgezogene, gestrichelte und gepunktete Linien repräsentieren die Lorenzkurven unter vorratsreichen, vorratsguten und vorratsarmen Verhältnissen.

Wie effizient konnten die drei Baumarten Freiräume nutzen?

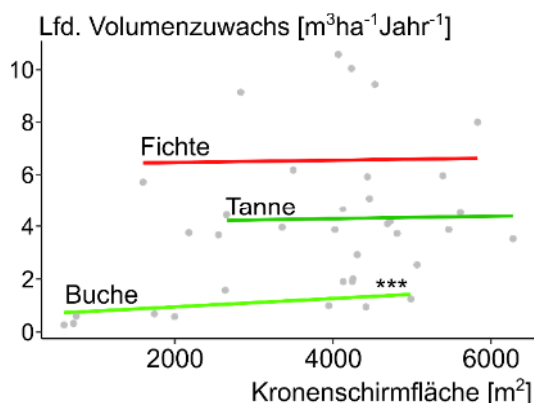


Abbildung 7: Laufender jährlicher Volumenzuwachs in $\text{m}^3\text{ha}^{-1}\text{Jahr}^{-1}$ über der Kronenschirmfläche in m^2 für die drei Baumarten Fichte (rot), Tanne (dunkelgrün) und Buche (hellgrün). Sternchen zeigen einen signifikanten Einfluss der Kronenschirmfläche auf den laufenden jährlichen Volumenzuwachs an.

Die nach Baumarten getrennte Untersuchung des Einflusses der Kronenschirmfläche zeigte, dass die Buche Freiräume signifikant nutzen konnte, um den laufenden jährlichen Volumenzuwachs zu steigern (Abbildung 7). Fichten und Tannen konnten ihren laufenden jährlichen Volumenzuwachs mit größeren Kronenschirmflächen nicht steigern.

3.3 Bestandesebene

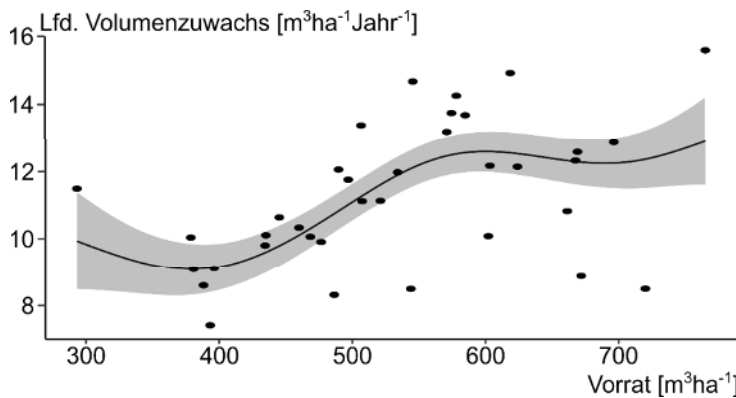


Abbildung 8: Laufender jährlicher Volumenzuwachs in $\text{m}^3\text{ha}^{-1}\text{Jahr}^{-1}$ über dem Vorrat des verbleibenden Bestandes in m^3ha^{-1} der 6 Teilparzellen der Bergmischwaldversuchsfläche Freyung 129 aus insgesamt 7 Aufnahmen. Die schwarze Linie repräsentiert die geschätzten Mittelwerte des mittleren periodischen Volumenzuwachses aus einem generalisierten additiven gemischten Model (GAMM). Der graue Bereich zeigt das 95% Konfidenzintervall.

Die Abbildung 8 zeigt den durchschnittlichen laufenden jährlichen Volumenzuwachs auf Bestandesebene, also den summarischen Zuwachs aller drei Baumarten, über dem Vorrat des verbleibenden Bestandes. Es wird deutlich, dass die laufenden jährlichen Volumenzuwächse in den Bereichen zwischen 500 und 800 m^3ha^{-1} stabil sind. Die Zuwächse lagen bei Vorräten zwischen 800 und 500 m^3ha^{-1} im Mittel bei 12 $\text{m}^3\text{ha}^{-1}\text{Jahr}^{-1}$. Bei geringeren Vorräten (Vorrat < 500 m^3ha^{-1}) sank der laufende jährliche Volumenzuwachs des Gesamtbestandes jedoch auf im Mittel 10 $\text{m}^3\text{ha}^{-1}\text{Jahr}^{-1}$ ab.

4 Diskussion

Unsere Ergebnisse zur Analyse der Zuwachsverteilung der Plenterwaldversuchsfläche Freyung 129 zeigten, dass die Grundflächenzuwächse der Tanne und der Buche auf der Ebene der einzelnen Bäume seit 1980 konstant gestiegen sind. Die Grundflächenzuwächse der Fichte waren demgegenüber bis heute rückläufig. Bei allen drei Baumarten waren es vor allem die mittelstarken Bäume welche ihr Wachstum beschleunigt bzw. verlangsamt haben (i). Alle drei Baumarten profitierten bei der letzten Aufnahme von der direkten Nachbarschaft der jeweils anderen Baumarten. Hatte die Tanne in den 80er Jahren noch geringere Zuwächse in der Nachbarschaft von Fremdbaumarten so zeigte sie in der letzten Aufnahme (2018) höhere Zuwächse als Tannen in intraspezifischer Nachbarschaft. Wieder waren es vor allem die mittelstarken Bäume welche am stärksten reagierten (ii). Zuwachsgewinne durch Befreiung von Konkurrenten konnte alleine die Buche erzielen. Hier waren es vor allem die größten Buchen (iii). Auf der nächst höheren Ebene, der Populationsebene, konnten wir zeigen, dass die mittelstarken Bäume aller drei Baumarten überproportional zu ihren Einzelbaumvolumina zum Gesamtvolumenzuwachs beigetragen haben. Die Ausprägung variierte jedoch in Abhängigkeit des Vorrats des verbleibenden Gesamtbestands zwischen den Arten. Während die Volumenzuwächse der Fichte in vorratsarmen Beständen stark überproportional von den mittelstarken Fichten getragen wurden, waren es in vorratsreichen Beständen die mittelstarken Tannen und Buchen welche stark überproportional zum Gesamtwuchs beitragen haben. Die Fichte zeigte in vorratsreichen Beständen eine Tendenz zur proportionalen Verteilung der Volumenzuwächse über der Größe (iv). Freiräume in vorratsarmen Beständen konnten nur durch die Buchen signifikant genutzt werden. Die Buche war die einzige Baumart, welche mit zunehmender Kronenschirmfläche auch ihre Produktivität signifikant steigern konnte (v). Auf Bestandesebene konnte die charakteristisch hohe Zuwachsresilienz von Plenterwäldern bei Vorräten des verbleibenden bestand von 500 bis 800 m^3ha^{-1} bestätigt werden. Ab einem Vorrat von ca. 500 m^3ha^{-1} sank die Bestandesproduktivität schließlich.

4.1 Die Einzelbaumebene

Unsere Ergebnisse zeigen für die Fichte seit Versuchsanlage 1980 einen stetigen Zuwachsrückgang. Tannen und Buchen hingegen konnten die Grundflächenzuwächse von Periode zu Periode steigern. Verluste der Fichte konnten demnach durch Zugewinne der Tannen im Zuwachs kompensiert werden. Unsere Ergebnisse zur Fichte und Tanne decken sich mit den Ergebnissen von HILMERS et al. (2019) welche in einer europaweiten Studie zur Produktivität von Bergmischwäldern ein ähnliches Muster der drei Baumarten auf Bestandesebene zeigen konnte. Ein möglicher Erklärungsansatz für die Zuwachs-

gewinne der Tanne sind die gesunkenen Schwefeldioxidemissionen (UHL ET AL., 2013) sowie höhere Temperaturen bei gleichzeitig hohen Niederschlagsmengen (BÜNTGEN ET AL., 2014). Da die Tanne und die Fichte ähnliche ökologische Nischen besetzen, scheint das Wiedererstarken der Tanne zu Lasten der Fichte zu gehen (HILMERS ET AL., 2019; UHL ET AL., 2013).

Bei beiden Baumarten (Fichte und Tanne) sind es vor allem die mittelstarken Bäume welche Zuwachsgewinne, bzw. Zuwachsverluste gezeigt haben. Wasser- und Nährstoffversorgung ist auf der Versuchsfläche FRY 129 ausreichend gegeben (vgl. Tabelle 1) und sollte nicht limitierend auf den Zuwachs gewirkt haben. Daher war vermutlich Licht der das Wachstum limitierende Faktor. Für einen Plenterwald typisch haben die dicken und somit auch hohen Bäume nur noch einen geringeren seitlichen Konkurrenzdruck. Sie sind daher von der Konkurrenzverschiebung zwischen den Baumarten weniger betroffen und zeigten nur geringe Veränderungen im Zuwachsverhalten. Im Gegensatz dazu sind aber die mittelstarken Bäume einer großen seitlichen Konkurrenz ausgesetzt. Eine Konkurrenzverschiebung zwischen den Baumarten machte sich vermutlich deshalb bei diesen mittleren Durchmesserklassen besonders deutlich bemerkbar.

Alle drei Baumarten zeigten höhere Grundflächenzuwächse, wenn Sie in direkter Nachbarschaft der anderen beiden Baumarten gewachsen sind. Dieses Ergebnis unterstreicht die Ergebnisse von PRETZSCH und FORRESTER (2017) welche zeigen konnten, dass Bergmischwälder aus Fichte, Tanne und Buche einen Mehrzuwachs von 20% im Vergleich zu benachbarten Reinbeständen aufweisen können. Offenbar trägt die Komplementarität der drei Baumarten dazu bei den Zuwachs in der Mischung gegenüber Reinbeständen zu steigern.

4.2 Die Populationsebene

Bei allen drei Baumarten konnten wir zeigen, dass die mittelstarken Bäume überproportional zu ihrer Größe zum Gesamtvolumenzuwachs beigetragen haben. Abhängig vom Vorrat des verbleibenden Gesamtbestandes zeigten die drei Baumarten jedoch verschiedene Ausprägungen dieser Zuwachsverteilung. Die Fichte zeigte in vorratsarmen Beständen eine starke Ausprägung der überproportionalen Beiträge der mittelstarken Bäume, die Tanne und die Buche hingegen in vorratsreichen Beständen. Hier zeigte die Fichte eine Tendenz zu einer proportionalen Verteilung des Zuwachses. Bei der charakteristischen Plentergleichgewichtskurve wird i.d.R. nicht nach Arten unterschieden (DE LIOCOURT, 1898; MEYER, 1933; SCHÜTZ, 1997). Unseren Ergebnissen zufolge ist die charakteristische Geleichgewichtsverteilung in einem Plenterwald aber neben der Baumzahl-Durchmesserverteilung auch maßgeblich von der Artenzusammensetzung abhängig. Ähnlich den Ergebnissen auf Einzelbaumebene zeigten auch die Buchen auf populationsebene eine signifikante Produktivitätssteigerung mit größerer Kronenschirmfläche. Die Buche kann durch ihre Kronenplastizität die freigewordenen Räume schnell und effizient nutzen.

4.3 Die Bestandesebene

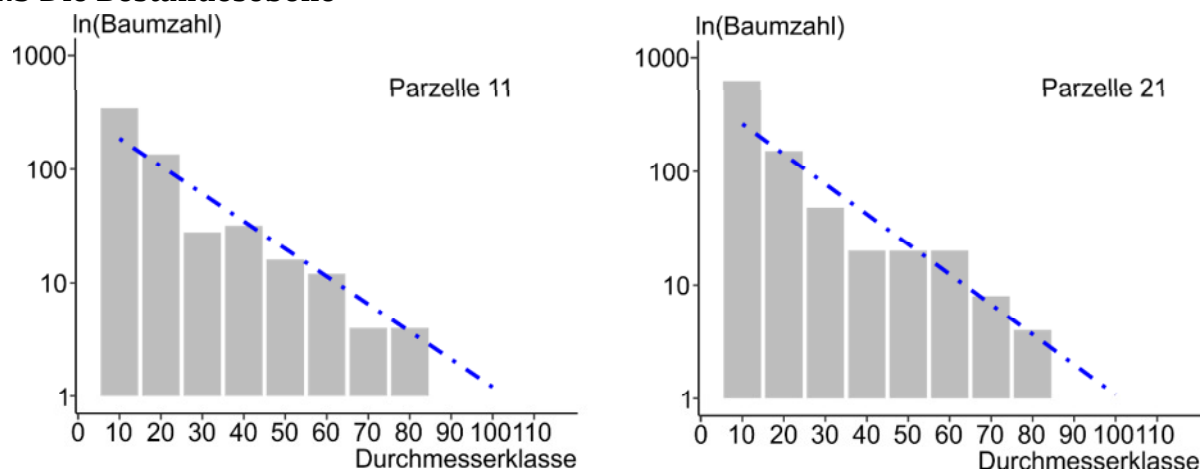


Abbildung 9: Zusammenhang zwischen Stammdurchmesser (Zehn-Zentimeter-Durchmesserstufen) und Baumzahlen ($d_{1,3} \geq 7$ cm) auf den vorratsarmen Teilparzellen 11 und 21 der Plenterwaldversuchsfläche Freyung 129 bei der Aufnahme 2018. Die gestrichelten Geraden resultieren aus einem regressionsanalytischen Ausgleich der Baumzahl-Durchmesser-Verteilungen.

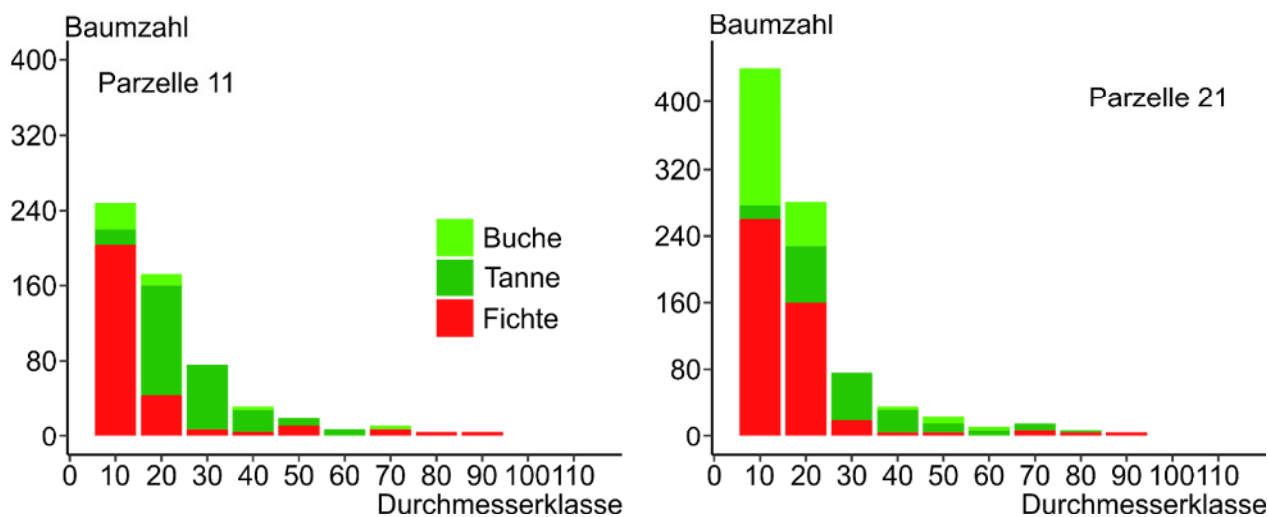


Abbildung 10: Verteilung der Baumzahlen der Bäume mit $d_{1,3} \geq 7$ cm über Zehn-Zentimeter Durchmesserstufen auf den vorratsarmen Teilparzellen 11 und 21 der Plenterwaldversuchsfläche Freyung 129 bei der Aufnahme im Jahr 2018. Hellgrün, Buche; dunkelgrün, Tanne; rot, Fichte.

Der Zuwachs war auf den Parzellen mit $500-800 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ ziemlich ähnlich. Dieses Ergebnis unterstreicht die hohe Zuwachsresilienz von Plenterwäldern. Bei Unterschreitung eines Vorrates von circa $500 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ sank die Bestandesproduktivität jedoch (Abbildung 8). Unsere Ergebnisse aus den Analysen auf Einzelbaum- und Populationsebene lassen Rückschlüsse zu, warum die Bestandesproduktivität auf den vorratsarmen Bergmischwaldversuchflächen FRY 129 zurückgingen.

Unsere Untersuchungen auf der Baum- bzw. Populationsebene haben gezeigt, dass mit Ausnahme der Fichte, Bäume mit mittleren Durchmessern ihre Produktivität langfristig steigern konnten. Weiter sind es gerade diese mittleren Durchmesser welche überproportional zur Gesamtproduktivität beigetragen haben. Abbildung 9 macht deutlich, dass die vorratsarmen Teilparzellen 11 und 21 seit den Eingriffen und darauffolgenden Aufnahmen im Jahr 2018 eine Lücke in genau diesen mittleren Durchmesserklassen aufwiesen.

Wir haben außerdem gezeigt, dass die Buche sehr schnell und effizient auf freigewordene Räume reagieren konnte. Abbildung 10 zeigt, dass die Buche auf den vorratsarmen Teilparzellen zwar in den untersten Durchmesserklassen vorhanden war, in den mittleren und starken Durchmesserbereichen, eben den Bereichen, in welchen Sie schnell reagieren kann (vgl. Abbildung 5), aber fehlte. Das Fehlen der Buche in den starken Durchmesserklassen war vor allem dem Waldmanagement geschuldet. Aufgrund der Gefahr, dass die Buche die Verjüngung ausdunkelt wurde die Buche meist vor Erreichen der hohen Durchmesserklassen entnommen.

Wir konnten weiter zeigen, dass bei der Bewirtschaftung von vorratsarmen Plenterwäldern die Ausstattung mit zuwachsstarken mittleren Durchmessern im Besonderen zu beachten ist. Des Weiteren ist, auch wenn die Gefahr der Ausdunkelung der Verjüngung besteht, ein dem Standort entsprechender Buchenanteil zu empfehlen, um Zuwachsverluste durch starke Eingriffe schnell abzuf puffern.

Wir können anhand unserer Ergebnisse Aussagen über das Wachstum von Bäumen ≥ 7 cm BHD treffen und anhand dessen Rückschlüsse über das Zuwachsverhalten des Gesamtbestandes ziehen. Da wir aber lediglich Bäume mit einem BHD $\geq 6,5$ cm in unseren Analysen integriert haben, bleibt unberücksichtigt wieviel der vom Altbestand ungenutzten Ressourcen auf den vorratsarmen Teilparzellen von Bäumen $< 6,5$ cm BHD, also der Verjüngung, genutzt wird. Eine laufende Auswertung der langfristigen Verjüngungsaufnahmen wird zur Klärung beitragen, wie die Zuwachseinbußen durch starke Eingriffe längerfristig durch den Mehrzuwachs der Verjüngung abgepuffert werden können.

5 Danksagung

Dank geht an das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten für die Unterstützung des Projektes W07 „Betreuung der Langfristigen ertragskundlichen Versuchsflächen“ und an den Kreuzberger Rechtlerwald.

6 Literatur

- BACHOFEN, H. (1999). Gleichgewicht, Struktur und Wachstum in Plenterbeständen | Equilibrium, structure and increment in selection forest stands. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 150(5): 157-170.
- BINKLEY, D., KASHIAN, D.M., Boyden, S., Kaye, M.W., BRADFORD, J.B., ARTHUR, M.A., FORNWALT, P.J., RYAN, M.G., 2006. Patterns of growth dominance in forests of the Rocky Mountains, USA. *Forest Ecology and Management* 236, 193–201. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.09.001>
- Büntgen, U., Tegel, W., Kaplan, J.O., Schaub, M., Hagedorn, F., Bürgi, M., Brázdil, R., Helle, G., Carrer, M., Heussner, K.-U., Hofmann, J., Kontic, R., Kyncl, T., Kyncl, J., Camarero, J.J., Tinner, W., Esper, J., Liebhold, A., 2014. Placing unprecedented recent fir growth in a European-wide and Holocene-long context. *Frontiers in Ecology and the Environment* 12, 100–106. <https://doi.org/10.1890/130089>
- DE LIOCOURT, F.D., 1898. De l'aménagement des Sapiniers. *Bul Soc For Franche-Compte et Belfort* 4, 396–409.
- FUCHS, A., 1996. Forsteinrichtung im Kreuzberger Plenterwald. *Forstw Cbl* 115, 51–62. <https://doi.org/10.1007/BF02738584>
- Hilmers, T., Avdagić, A., Bartkowicz, L., Bielak, K., Binder, F., Bončina, A., Dobor, L., Forrester, D.I., Hobi, M.L., Ibrahimspahić, A., Jaworski, A., Klopčič, M., Matović, B., Nagel, T.A., Petráš, R., del Rio, M., Stajić, B., Uhl, E., Zlatanov, T., Tognetti, R., Pretzsch, H., 2019. The productivity of mixed mountain forests comprised of *Fagus sylvatica*, *Picea abies*, and *Abies alba* across Europe. *Forestry (Lond)*. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpz035>
- KERN, K., 1966. Wachstum und umweltfaktoren im schlag-und plenterwald.(Schriftenreihe der Forstlichen Abteilung der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br. Band 5). 232pp. München: Bayerischer Landwirtschaftsverlag. German with summary in French.
- MEYER, H.A., 1933. Eine mathematisch-statistische Untersuchung über den Aufbau des Plenterwaldes. Buchler & Company.
- PRETZSCH, H., 2019. Grundlagen der waldwachstumsforschung. Springer-Verlag.
- PRETZSCH, H., 1997. Analysis and modeling of spatial stand structures. Methodological considerations based on mixed beech-larch stands in Lower Saxony. *Forest Ecology and Management* 97, 237–253. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00069-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00069-8)
- PRETZSCH, H., BIBER, P., 2016. Tree species mixing can increase maximum stand density. *Canadian Journal of Forest Research* 46, 1179–1193. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0413>
- PRETZSCH, H., FORRESTER, D.I., 2017. Stand Dynamics of Mixed-Species Stands Compared with Monocultures, in: Pretzsch, H., Forrester, D.I., Bauhus, J. (Eds.), *Mixed-Species Forests*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 117–209. https://doi.org/10.1007/978-3-662-54553-9_4
- Reineke, L.H., 1933. Perfecting a stand-density index for evenaged forests. *Jouranl of Agricultural Research* 46, 0627–0638.
- SCHÜTZ, J.-P., 2001. Plenterwald und weitere Formen strukturierter und gemischter Wälder. Parey.
- SCHÜTZ, J.-P., 1997. *Sylviculture 2: la gestion des forêts irrégulières et mélangées*. PPUR presses polytechniques.
- UHL, E., AMMER, C., SPELLMANN, H., SCHÖLCH, M., PRETZSCH, H., 2013. Zuwachstrend und Stressresilienz von Tanne und Fichte im Vergleich. *Allg. Forst und Jagdzeitung* 11–12, 278–292.
- ZINGG, A., FRUTIG, F., BÜRGI, A., LEMM, R., ERNI, V., BACHOFEN, H., 2009. Ertragskundliche Leistung in den Plenterwald-Versuchsflächen der Schweiz | Yield performance in the plenter forest research plots in Switzerland. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 160, 162–174.