
Ernährungssituation und Wachstum der Fichte in Bayern

WOLFGANG FALK, ULRICH STETTER und HANS-JOACHIM KLEMMT

Die Zusammenlegung der Inventurnetze von Bodenzustandserhebung (BZE II), Bundeswaldinventur (BWI) und Kronenzustandserhebung (KZE) in Bayern erfolgte mit dem Ziel, themenübergreifende Auswertungen durchführen zu können. Sie ermöglicht flächenrepräsentative Erkenntnisse zu möglichen Kausalzusammenhängen zwischen Nährstoffverfügbarkeit, Nährstoffversorgung, Vitalität und Wachstum der Wälder in Bayern. In diesem Beitrag wird der Zusammenhang von Nährelementgehalten in den Nadeln von Fichten mit Wuchshöhenmessungen und Altersdaten dieser Baumart aus der BWI² beleuchtet. Die Baumart Fichte wurde als Untersuchungsgegenstand ausgewählt, da sie durch ihre weite Verbreitung in Bayern einen ausreichend großen Datensatz liefert.

Verknüpfung der Datenquellen BZE und BWI

Im Rahmen der BZE wurden an 281 Punkten des BWI-Netzes in Bayern Nadelproben von jeweils drei herrschenden oder vorherrschenden Fichten gewonnen. Die Bestimmung der Nährelementgehalte erfolgte an einer Mischprobe (siehe Beiträge „Die BZE II in Bayern“ und „Waldernährung in Bayern – Ergebnisse der BZE II“ in diesem Band). In die folgenden Auswertungen fließen die Daten für den ersten Nadeljahrgang ein. BZE-Probepflanzen und BWI-Bäume sind nicht zwingend deckungsgleich, da für die verschiedenen Messprogramme unterschiedliche Auswahlkriterien angewendet wurden. Ein Ansatz für die Erstellung eines gemeinsamen Datensatzes ist es, beide Inventuren als Stichprobe aus einem gemeinsamen Kollektiv – dem Bestand – aufzufassen. Das wichtigste Kriterium war dabei die Vergleichbarkeit des Brusthöhendurchmessers (BHD). Zum einen mussten die BHD-Unterschiede zwischen den drei Probepflanzen der BZE II gering sein, zum anderen mussten sie eine ähnliche Dimension aufweisen wie die Messbäume der BWI. Da bei der BWI Messwerte für Einzelbäume vorliegen, wurde für jeden „Messbaum“ einzeln geprüft, ob er einen ähnlichen Durchmesser hat wie das BZE II-Probepflanzen-Kollektiv. Das Ergebnis war ein gemeinsamer Datensatz, der 126 Traktecken für die Baumart Fichte umfasst. Da sich das Niveau der Nadelspiegelwerte von jungen und älteren Fichten bei einzelnen Elementen unterscheiden kann (SCHMIDT-VOGT 1991), wurden für die weitere Auswertung Bäume mit einem Alter größer 40 Jahre gewählt. Damit reduziert sich der Datensatz auf 113 Traktecken. Zur Analyse wurde per Zufallsstichprobe jeweils nur eine Fichte aus den BWI-Daten je Ecke ausgewählt, um Autokorrelation zu vermeiden. Man kann davon ausgehen, dass das Wachstum zweier benachbarter Bäume in einem Bestand in der Regel korreliert ist. Nähere Kennwerte der untersuchten Fichten sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Parameter	Minimum	25 %-Perzentil	Median	75 %-Perzentil	Maximum
BHD [cm]	25,3	40,4	47,5	55,1	81,9
Höhe [m]	19,1	27,4	31,0	34,8	41,1
Alter [Jahre]	47	80	99	118	185

Tabelle 1: BHD, Höhe und Alter der untersuchten 113 Fichten aus dem BWI-Datensatz.

Klassifiziertes relatives Wachstum als Zielgröße

Die Verwendung von Inventurdaten beinhaltet Bäume unterschiedlichen Alters. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die wachstumsbeeinflussenden Umweltbedingungen, wie z. B. Stoffeinträge, Nutzungsformen u. ä., im Laufe der zurückliegenden Jahre und Jahrzehnte geändert haben. So erreichen beispielsweise Fichten auf grundsätzlich vergleichbaren Standorten höhere Zuwächse und Oberhöhen in den jüngeren Altersklassen, da sie von „Düngeeffekten“ durch Stickstoffdeposition, Wegfall von Streunutzung und ähnlichem profitiert haben (PRETZSCH 1992; RÖHLE 1997). Abhängig vom „Keimjahr“ wachsen Bäume in Bayern also unterschiedlich. Um diesen Alters-

effekt zu eliminieren, haben wir den Datensatz durch die Darstellung „Höhe über Alter“ mit Hilfe der Wachstumsfunktion nach Chapman-Richards in vier gleich große Teile (Quartile) longitudinal aufgeteilt: Die Funktionsparameter der Chapman-Richards-Funktion wurden durch Minimierung der Abweichungsquadrate in einem vorgegebenen Rahmen im Anhalt an KLEMMT (2007) bestimmt. Mit Hilfe desjenigen Parameters, der Einfluss auf das Maximum der Funktion und somit die maximale Wuchshöhe hat, wurde die Kurve so verschoben, dass der Datensatz in vier gleichgroße Kollektive aufgeteilt wurde (Abbildung 1). Das Höhenwachstum über dem Alter wurde somit in vier relative Wuchsklassen eingeteilt, die unabhängig vom Altereffekt sind, da immer nur Bäume gleichen Alters verglichen werden. Zielgröße ist somit die relative Wachstumsklasse (größtes relatives Wachstum, überdurchschnittliches relatives Wachstum, unterdurchschnittliches relatives Wachstum, geringstes relatives Wachstum), die wir mit den Nährelementgehalten der Fichtennadeln der BEZ II in Beziehung gesetzt haben.

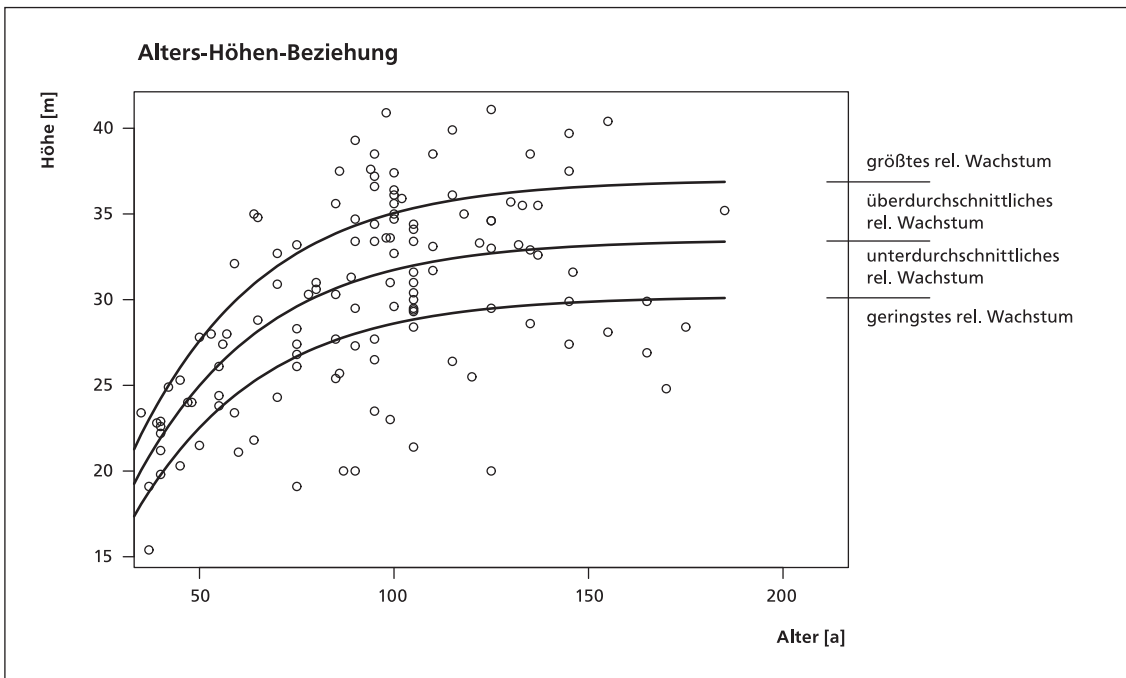


Abbildung 1: Höhe über dem Alter. Stichprobe aus dem Kollektiv der Messbäume der BWI-Traktecken, Baumart Fichte. Einteilung der Höhenmesswerte in vier gleich große Gruppen mit Hilfe von Chapman-Richards-Funktionen. Die mittlere Funktion wurde über die Minimierung von Abweichungsquadraten angepasst und nach oben bzw. unten verschoben, um jeweils 25 % der Daten zu definieren, die das relativ beste bzw. schwächste Wachstum zeigen. Der Datensatz umfasst 113 Fichten, die älter als 40 Jahre sind.

Die Zusammenhänge zwischen Wachstum und Nährelementgehalten sowie Temperatur werden in Form von Boxplots in Abbildung 2 gezeigt. Diese stellen den Median, das 2. und 3. Quartil als Box und Ausreißer als einzelne Punkte dar. Jeder einzelne von vier Boxplots in einem Diagramm repräsentiert aufgrund der vergleichsweise geringen Stichprobengröße nur 25 – 30 Werte. Zusätzlich wird in der Abbildung mithilfe von Einkerbungen der Boxen ein Hinweis darauf gegeben, ob sich die Mediane deutlich unterscheiden. Haben die Einkerbungen keinen Überlappungsbereich, so ist mit hoher Wahrscheinlichkeit davon auszugehen, dass die Mediane signifikant verschieden sind (CHAMBERS 1983).

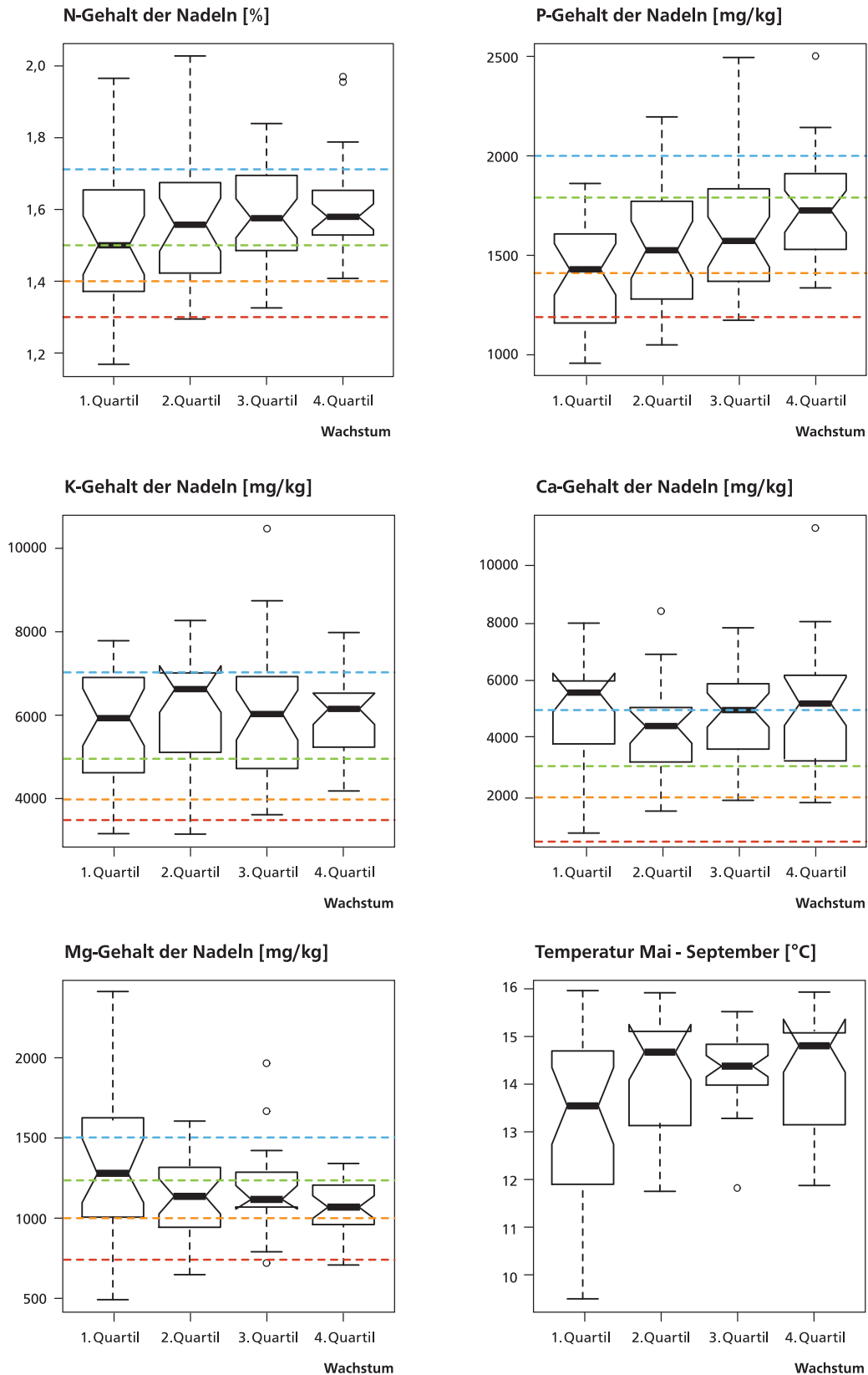


Abbildung 2: Zusammenhang zwischen relativem Wachstum (1. – 4. Quartil von gering bis hoch) und Nadelspiegelwerten sowie der mittleren Temperatur der Periode Mai – September (gemittelt für 1971 – 2000). Horizontale farbige Linien zeigen Ernährungsclassen laut WOLFF und RIEK (1997). Unterhalb der roten Linie ist die Nährelement-Versorgung sehr gering (mangelhaft), zwischen roter und oranger Linie gering (ausreichend), zwischen oranger und grüner Linie mittel, zwischen grüner und blauer Linie hoch (mittel + hoch = optimal) und oberhalb der blauen Linie sehr hoch (übersorgt).

Wachstum ist bei sehr geringer Versorgung reduziert

Die geringe Stichprobe, die teils deutlichen Streuungen der Parameter und die Tatsache, dass die komplexe Reaktion des Baums auf Umweltbedingungen, die das Wachstum steuern, mit univariaten Auswertungen nicht umfassend beschrieben werden können, schränken die Aussagekraft zum direkten Zusammenhang zwischen Ernährung und Wachstum der Fichte ein. Die Ergebnisse zeigen Tendenzen auf, liefern also qualitative und keine quantitativen Aussagen, und erbringen damit Anhaltspunkte für weitergehende Forschungsaktivitäten.

Die Ernährungssituation der untersuchten Fichten ist überwiegend ausreichend bis optimal. Nur an einer geringen Anzahl von Punkten finden sich Mängel in der Nährelementversorgung (vgl. hierzu auch den Beitrag „Waldernährung in Bayern – Ergebnisse der BZE II“ in diesem Band). Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen können insgesamt folgende Erkenntnisse aus der Auswertung gewonnen werden:

- Die Stickstoff- und Phosphorgehalte in den Nadeln zeigen einen Zusammenhang mit den Wachstumsklassen.
- Der Unterschied der Mediane zwischen den Klassen „geringstes und größtes Wachstum“ beim Phosphor kommt klar zum Ausdruck.
- Die übrigen Nährelementgehalte zeigen keinen klaren Zusammenhang mit den Wachstumsklassen auf.
- Bei Mangelversorgung gibt es nur in den wenigsten Fällen überdurchschnittliches Wachstum (3. und 4. Quartil).
- Das beste Wachstum setzt überwiegend mittlere bis hohe Versorgung mit allen Nährstoffen voraus.
- Geringes Wachstum gibt es über große Bereiche der Nadelspiegelwerte.
- Niedrige Temperaturen limitieren das Wachstum, bei höheren Temperaturen wirken andere Faktoren begrenzend.

Abbildung 3 stellt das Wachstum und die Phosphorversorgung in Bayern räumlich dar. Obwohl es zwischen den das Wachstum beeinflussenden Größen meist Wechselwirkungen gibt, also nicht nur ein einzelner Faktor wie z. B. Nährstoffmangel das Wachstum limitiert, sind auch bei dem dargestellten einfachen Zusammenhang räumliche Muster zu erkennen. Deutlich sticht der Alpenraum hervor, in dem überwiegend kleine Kreise zu finden sind, die geringes Höhenwachstum verdeutlichen. Dies ist auf die klimatische Situation (Temperaturen) in dieser Region zurückzuführen. Gleichzeitig sind dort aber auch die Kreise rot bis orange gefärbt, was eine geringe Phosphor-Versorgung der Fichten anzeigt, da Phosphate in den Kalkalpen durch das hohe Calciumangebot in der Bodenlösung als schwerlösliche Calcium-Phosphate gebunden werden und somit wenig pflanzenverfügbarer Phosphor zur Verfügung steht. Eine optimale Phosphorverfügbarkeit läge im Bereich zwischen pH 6,0 und 6,5 (BLUME et al. 2010, S. 417). Zu ähnlichen Ergebnissen kommen EWALD und MELLERT (2013) sowie EWALD und MELLERT (2014b) für den Alpenraum, allerdings auf Basis anderer Daten und Methoden. Im Bayerischen Wald sind auf saurem Ausgangsgestein wüchsige Fichten mit mittleren bis hohen Phosphorernährungsklassen zu finden. Insgesamt wird die Limitierung des Wachstums durch eine mangelhafte P-Ernährung auch dadurch veranschaulicht, dass im untersuchten Datensatz in ganz Bayern kein hohes Wachstum (große Kreise) bei gleichzeitig sehr geringer P-Ernährungs-kategorie (rote Farbe) zu finden ist.

Der Zusammenhang mit weiteren Klimagrößen außer der gezeigten mittleren Temperatur Mai bis September und Bodendaten ist unklar. Ein Grund dafür ist beispielsweise, dass sich in den Kalkalpen die Effekte Wärmemangel und die teilweise geringe Verfügbarkeit von einzelnen Nährstoffen in der bis in den Oberboden mit Calcium gesättigten Bodenlösung überlagern und ein klares Bild verhindern. Dies führt dazu, dass auch für ganz Bayern keine klaren Zusammenhänge zu finden sind. Ein weiteres Stratifizieren der Daten ist bei dem geringen Stichprobenumfang nicht zielführend.

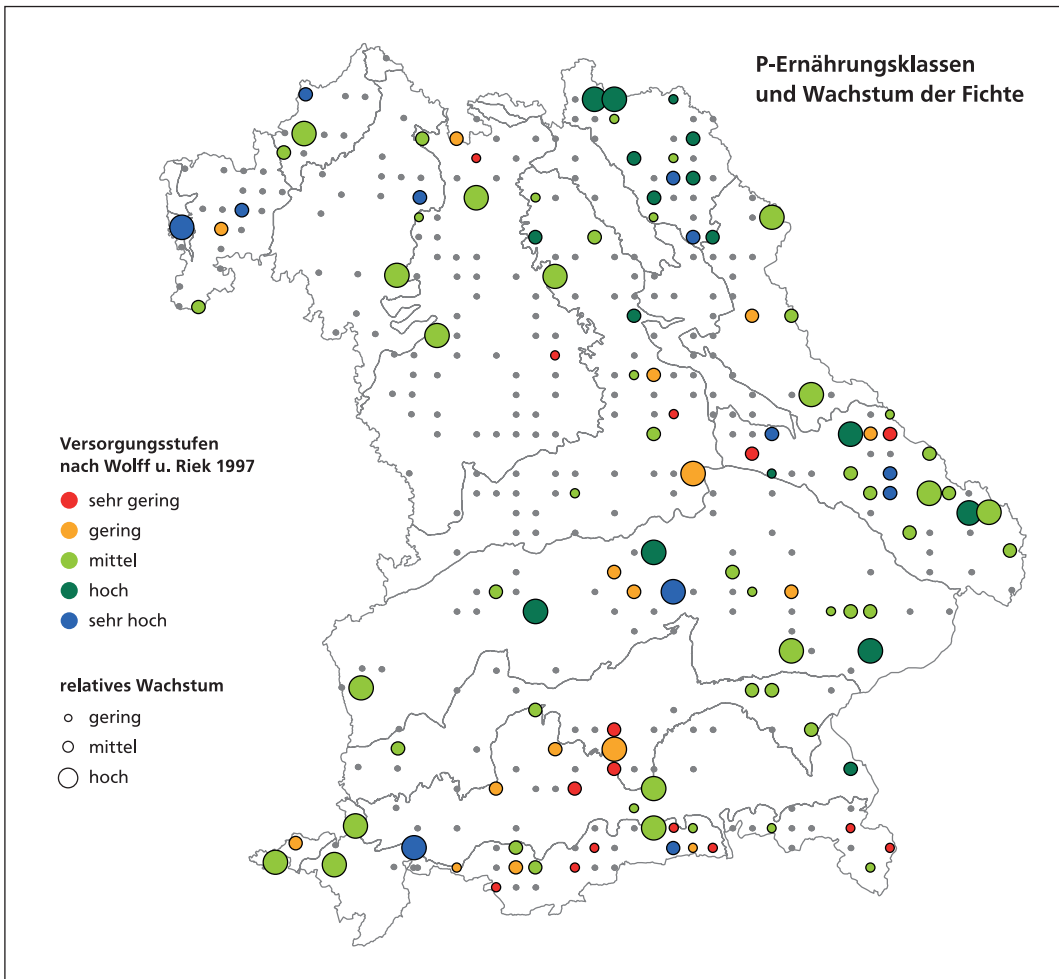


Abbildung 3: Räumliche Darstellung des Zusammenhangs von Phosphor-Versorgung der Fichte (Bewertung laut WOLFF und RIEK (1997), Farben rot bis blau) und relativem Wachstum. Wachstums-klassen: 1. und 4. Quartil („gering“ und „hoch“), 2. und 3. Quartil zusammengefasst als „mittel“, Darstellung über Durchmesser der Kreise. Graue Punkte sind BZE II-Punkte, die nicht in der Analyse betrachtet wurden.

Diskussion: Beim Wachstum gilt das Minimumprinzip

DOBBERTIN (2005) fasst in einem Übersichtsartikel zusammen, was ein Baum für das Wachstum benötigt: CO₂, Wasser und Mineralien werden als Rohmaterial, Licht als Energiequelle benötigt, Sauerstoffverfügbarkeit und geeignete Temperaturen sind eine Grundbedingung für Wachstumsprozesse. Die Kapazitäten für Photosyntheseprozesse und die Konkurrenz um Ressourcen beschränken das Wachstum. Wachstumsprozesse bei Bäumen können in einer Reihenfolge ihrer Bedeutung von hoch zu niedrig eingestuft werden: Nadel- oder Blattwachstum, Wurzelwachstum, Knospenbildung, Anlage von Speichergewebe, Höhen- und Dickenwachstum, Bildung von Abwehrstoffen und zuletzt reproduktives Wachstum (WARING 1987 in DOBBERTIN 2005). Unter Stress könnte die Photosynthese und damit die Kohlenstoff-Allokation so geändert werden, dass die weniger wichtigen Prozesse inklusive Stammwachstum zuerst reduziert werden. Nährstoffmangel kann als Stress aufgefasst werden und hätte damit Auswirkungen auf das Stammwachstum, ein Nährstoffungleichgewicht beeinflusst die Photosynthese dabei indirekt (DOBBERTIN 2005). Neben Nährstoffmangel verursachen beispielsweise Wassermangel, zu hohe Temperaturen oder Schadorganismen Stress und können sich auf das Wachstum auswirken. Die in Abbildung 2 dargestellten Daten beinhalten einige Fichten, die sehr geringe Nährelementgehalte aufweisen und die der Grund für das gleichzeitig relativ geringe Wachstum sein könnten.

Carl Sprengel und im Anschluss Justus von Liebig haben den Stress für Pflanzen durch knappe Ressourcen und die Auswirkungen auf das Wachstum in dem sogenannten „*Minimumgesetz*“ im 19. Jahrhundert beschrieben (LIEBIG 1855, S. 121-122): Das Wachstum von Pflanzen wird durch die im Verhältnis knappste Ressource (Nährstoffe, Wasser, Licht etc.), dem Minimumfaktor, eingeschränkt. Eine Ressource darf dabei nicht unabhängig von anderen betrachtet werden. Daher wurde das Minimumgesetz gegen Ende des 19. Jahrhunderts von Georg Liebscher mit dem Optimumgesetz ergänzt: Die Pflanzen nutzen den im Minimum vorhandenen Produktionsfaktor zu umso größerer Substanzproduktion aus, je mehr die anderen Produktionsfaktoren in optimalen Verhältnissen vorliegen. Diese Zusammenhänge, die auch in Abbildung 2 aufscheinen, sind in der forstlichen Literatur mehrfach belegt. SPIECKER (1990, zitiert in DOBBERTIN 2005) führt Fichten im Schwarzwald auf, die zwar nicht durch Stickstoff aber durch Calcium und Phosphor im Wachstum limitiert sind. Zugaben an Calcium bzw. Calcium und Phosphor führten zu einer länger anhaltenden Zunahme des Wachstums.

Sofern Nährstoffe wie beispielsweise Stickstoff aber im Überfluss vorhanden sind, kann das zum Einbruch des Wachstums und verringerter Vitalität führen (JUKNYS et al. 2002 in DOBBERTIN 2005, S. 328). Die in Abbildung 2 zu sehenden großen Bandbreiten der Ernährung müssen durch andere, nicht betrachtete Faktoren erklärt werden. Insbesondere die Fichten mit einer Stickstoffüberernährung, die gleichzeitig in der geringsten Wachstumsklasse sind, fallen dabei ins Auge. In diesem Zusammenhang muss auch für unsere Studie selbstkritisch angemerkt werden, dass lediglich versucht wird, Beziehungen zwischen Ernährungssituation und den oberirdisch leicht zu erfassenden Ergebnissen von Wachstumsprozessen bei der Baumart Fichte herzustellen. Wie z. B. LEDIG et al. (1970) oder in letzter Zeit PRETZSCH et al. (2012) für Waldbäume gezeigt haben, verteilen Waldbäume Ressourcen zwischen oberirdischen und unterirdischen Pflanzenteilen unter anderem in Abhängigkeit von der Standortgüte unterschiedlich. In diesem Zusammenhang gilt es für die Zukunft weitergehende Untersuchungen zur Wurzel-Spross-Allometrie in Abhängigkeit von Standortfaktoren, Konkurrenz und Mischung für bayerische Wuchsverhältnisse bzw. für beheimatete Baumarten zu etablieren.

Der grundsätzliche Zusammenhang von verbesserter Stickstoffversorgung und Zunahme des Höhenwachstums wird unter anderem auch von MELLERT et al. (2008b) für deutsche und österreichische Fichtenbeständen bestätigt. MELLERT und EWALD (2014a) zeigen an Daten aus den bayerischen Alpen, dass das Angebot an Makronährelementen wie Stickstoff, Phosphor und Kalium, zusammengefasst im Ellenberg-Zeigerwert „Stickstoffzahl“, einen Zusammenhang mit der Höhenwuchsleistung von Fichten im Alter 100 hat. Diese Ergebnisse decken sich mit der Auswertung der BZE II-Daten (Abbildung 2). Der Zusammenhang von Stickstoffeinträgen durch Deposition und Zunahme des Höhenwachstums wird auch durch die Ergebnisse des RECOGNITION Projekts (zitiert in DOBBERTIN 2005, S. 328) untermauert: 50-jährige Buchen sind in dieser Untersuchung ca. 30 % höher als es heute 150-jährige um 1900 im gleichen Baumalter (damals 50-jährig) waren. Als Hauptgrund für die beobachtete Zunahme des Höhenwachstums wird die Stickstoffdeposition genannt. Somit ist klar, dass ein Baum, der bezüglich der Stickstoffgehalte sehr gering versorgt ist, keine maximale Wuchshöhe erreicht und in der gezeigten Auswertung nicht in der Klasse mit dem relativ höchstem Wachstum zu finden ist. Die Auswertung hat aber genau aus diesem Grund auch ihre Grenzen. Es werden zwar nur gleichaltrige Fichten miteinander verglichen, dennoch haben sich bei älteren Bäumen die Wuchsbedingungen im Laufe der Jahrzehnte geändert. Mit der Veränderung der Standortfaktoren und der individuellen Wuchskonstellation (Konkurrenz) kann sich auch die Zugehörigkeit zu einer Wachstumsklasse mit dem Alter geändert haben. Eine Inventur, wie die BZE II, die nur zu einem Zeitpunkt den aktuellen Zustand erfasst, ist somit lediglich geeignet Muster für einen bestimmten Zeitpunkt zu beschreiben. Die klare Verknüpfung zwischen Ursache und Wirkung ist daher nicht ohne weiteres möglich und sollte aus der Verbindung von Querschnittsdaten (Forstinventur) und langfristig gewonnenen Längsschnittsdaten (Versuchsflächen, Dauerbeobachtungsflächen) gewonnen werden.

Ein großes Optimierungspotential böte die Betrachtung einer (längeren) Zeitreihe im Hinblick auf die Ernährungssituation der Einzelbäume. Leider sind derartige Daten selten bzw. für Bayern aktuell nicht flächendeckend verfügbar. Künftige Inventuren könnten alle Parameter an denselben Baum-Individuen erheben und damit eine solche Zeitreihe begründen. Zum jetzigen Zeitpunkt kann allerdings bereits resümiert werden, dass durch die räumliche Harmonisierung beider Messnetze Erkenntnisse über den Zusammenhang von Bodenzustand, Waldernährung und Wachstum von Wäldern in Bayern gewonnen werden können.