

Langfristige Ertragskundliche Versuchsflächen in Wäldern – Idee, Nutzen und Perspektiven

Hans Pretzsch

Technische Universität München, Lehrstuhl für Waldwachstumskunde

1. Einleitung

Wenn von der Forstwissenschaft Wachstumstrends quantifiziert oder Wuchsmodelle parametrisiert werden, und die Forstwirtschaft Pflegerichtlinien entwickelt oder Anschauungsflächen für Fachexkursionen oder das Waldbaustraining benötigt, wird ganz selbstverständlich auf Langfristige Ertragskundliche Versuchsflächen zurückgegriffen. Wenn allerdings für deren Erhalt, Weiterentwicklung und Erneuerung Finanzierungsbedarf besteht, wird regelmäßig der Nutzen langfristiger Versuchsflächen in Frage gestellt. Besonders kritisch wird es dann, wenn die bestehenden Versuchsflächen nicht umgehend Antworten auf umweltpolitisch gerade aktuelle Fragestellungen liefern können. So langfristige Unternehmungen, wie die Messung von Bäumen oder Beständen über ihre gesamte Lebenszeit hinweg, oder zumindest bis zur Hiebsreife, scheinen aufgrund der langen Zeitspanne zwischen Fragestellung und Antwort kaum in die schnelllebige Gegenwart zu passen. Aber langfristige Organismen erfordern nun einmal langfristige Forschung.

Im Folgenden werden die Geschichte des Langfristigen Ertragskundlichen Versuchswesens skizziert, die bisher wichtigsten Ergebnisse benannt, und die Alleinstellungsmerkmale von Ertragskundlichen Versuchsflächen diskutiert, welche diese auch in der Gegenwart und Zukunft so wertvoll und unverzichtbar machen. Ein Abschnitt beschäftigt sich mit der konsequenten Weiterentwicklung der Konzepte, Methoden und Interaktionen mit Biologie und Ökologie. Durch eine kontinuierliche Förderung und Finanzierung sollte das Ertragskundliche Versuchswesen als unverzichtbare empirische Basis der nachhaltigen Forstwirtschaft gefördert und gestärkt werden. Seine Zukunft und Finanzierung sollte nicht vom umweltpolitischen Tagesgeschäft, von thematischen Strohfeuern oder organisatorischen Strukturreformen abhängig gemacht werden. Denn das hieße, den wichtigsten Fundus der Forstwissenschaft zu gefährden, Referenzflächen, die den starken Fußabdruck des Menschen auf den Wald quantifizieren, zu beseitigen und eine einzigartige wissenschaftlich-kulturelle Errungenschaft in Frage zu stellen.

2. Kurze Geschichte der Langfristigen Ertragskundlichen Versuchsflächen. Von Ideen zum praktischen forstlichen Nutzen

Die ab den 1870er Jahren gegründeten forstlichen Versuchsanstalten organisierten sich 1872 zum Verein Deutscher Forstlicher Versuchsanstalten, der auf eine Förderung des forstlichen Versuchswesens durch standardisierte Arbeitspläne, Vereinheitlichung von Methoden und gemeinsame Auswertungen zielte. Aus dem Verein Deutscher Forstlicher Versuchsanstalten ging im Jahre 1892 der internationale Verband Forstlicher Versuchsanstalten hervor. Die Gründerväter des Versuchswesens (*Abbildung 1*) bereiteten damit die Gründung des Internationalen Verbandes Forstlicher



Abbildung 1: Versammlung des Vereins Deutscher Forstlicher Versuchsanstalten im September 1891 in der Schweiz mit internationaler Beteiligung (nach A. Milnik 1999, S. 123). Sitzende v. l.: F. von Baur, B. Danckelmann, K. Schuberg, J. Friedrich, C. Ney, A. Schwappach, B. Bleuler. Stehend v. l.: C. Heck, C. Lorey, R. Meß, Kast, P. Danckelmann, Bühler, Boppe, Flury, Zschokke.

Forschungsanstalten (IUFRO) im Jahre 1929 vor. Nach dem Zweiten Weltkrieg wurde schließlich 1951 durch die Gründung des Deutschen Verbandes Forstlicher Forschungsanstalten eine Nachfolgeinstitution des Vereins Deutscher Forstlicher Versuchsanstalten geschaffen, die bis heute die forstlichen Forschungsinstitutionen in Deutschland zusammenführt. Die unter dem Dach des Deutschen Verbandes Forstlicher Forschungsanstalten (DVFFA) neu formierte Sektion »Ertragskunde« entwickelt die Forschungslinie des Vereins Deutscher Forstlicher Versuchsanstalten seitdem konsequent weiter.

Dass in den meisten Ländern der Erde der Baumdurchmesser auf Versuchsflächen in der Höhe 1,3 m gemessen, unter einer mäßigen Hochdurchforstung immer dasselbe verstanden wird und Ertrags tafeln und andere Baum- bzw. Bestandesmodelle einen international einheitlichen Aufbau haben, resultiert aus dem Standard, den die nationalen und internationalen ertragskundlichen Forschungsorganisationen geschaffen haben. Aus der geschilderten Geschichte des forstlichen Versuchswesens, die mit der Organisation der langfristigen Versuchsflächenarbeit Mitte des 19. Jahrhunderts ihren Anfang nahm, resultiert, dass an zahlreichen forstlichen Landesanstalten bis in die Gegenwart die Waldwachstumsforschung die Traditionsabteilung bildet und noch häufig mit dem forstlichen Versuchswesen begrifflich gleichgesetzt wird.

2.1 Entwicklung des Versuchsflächennetzes und gegenwärtiger Flächenstand am Beispiel von Bayern

Seit den 1870er Jahren hat die Waldwachstumsforschung ein in Beobachtungsdauer und räumlicher Ausdehnung einmaliges Netz von Versuchsflächen aufgebaut. Dieses umfasst allein in Bayern etwa 1.000 Einzelflächen, von denen die ältesten seit über 150 Jahren unter Beobachtung stehen.

Abbildung 2 zeigt, wie sich die Versuchsneuanlagen seit 1870 mit den jeweils vorherrschenden Interessen und Fragen von Forstwirtschaft und Forstwissenschaft wandelten (Pretzsch et al. 2002). In der Anfangszeit des Ertragskundlichen Versuchswesens (1870–1919) standen Durchforstungs- und Standraumversuche in Reinbeständen im Vordergrund. Durchforstungsversuche verfolgen die Wachstumsreaktionen auf Durchforstungseingriffe unterschiedlicher Art, Stärke und Intensität.

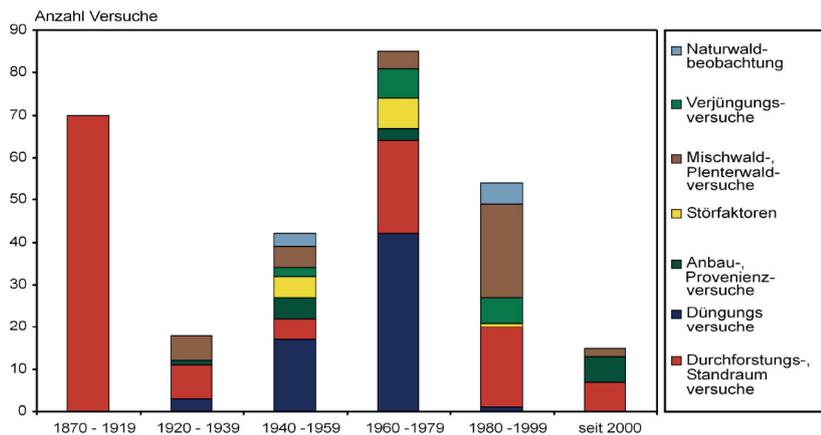


Abbildung 2: Übersicht über die Neuanlage langfristiger Versuchsflächen seit 1870 (Stand 01.05.2012). Versuche zu den Themenbereichen Durchforstung und Standraum (rot), Düngung (dunkelblau), Anbau- und Provenienz (schwarz), Störfaktoren (gelb), Mischwald- und Plenterversuche (braun), Verjüngungsversuche (grün) und Naturwaldbeobachtung (hellblau)

In der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts deutete sich eine Konjunktur von Anbau-, Provenienz- und Düngungsversuchen an. Während Anbauversuche forstwirtschaftliche Möglichkeiten und Grenzen einer Baumart im Allgemeinen sondieren, gehen Provenienzversuche einen Schritt weiter. Sie quantifizieren Wachstum, Qualität und Widerstandsfähigkeit verschiedener Herkünfte unter verschiedenen Standortbedingungen und waldbaulichen Behandlungen (Schober 1961). Düngungsversuche streben die Identifizierung von Gesetzmäßigkeiten zwischen Art, Menge und Turnus ausgebrachter Dünger und dem mit ihnen erzielten Ertrag an. Als Referenz dienen dabei unbehandelte Parzellen der Versuchsanlage. Die Mehrzahl der mitteleuropäischen Düngungsversuche geht auf die 1960er und 1970er Jahre zurück.

Mit der seit der Nachkriegszeit prosperierenden Volkswirtschaft stieg die Einflussnahme des Menschen auf den Wald an, unter anderem durch Trassenaufhiebe, Grundwasserabsenkungen oder Emissionen aus Großfeuerungsanlagen. Deshalb wurden im Rahmen von Beweissicherungsverfahren in den 1950er bis 1980er Jahren zahlreiche Versuchsflächen zur Diagnose von Störfaktoren angelegt (Preuhsler 1990). Solche Versuche zielen auf den Nachweis und die Quantifizierung des Effektes von Störeinflüssen (z. B. Randschaden, Salzscha-den, Grundwasserstandsabsenkungen, Rauchscha-den) auf das Waldwachstum.

Seit Mitte des zurückliegenden Jahrhunderts, nach zahlreichen Rückschlägen in der Reinbestandswirtschaft, rückten Mischbestände immer mehr in den Mittelpunkt von Forstwissenschaft und Forstwirtschaft. Deshalb wurden im Ertragskundlichen Versuchswesen in Bayern seit Mitte der 1990er Jahre vermehrt Mischbestandsversuche angelegt. Sie zielen auf die Quantifizierung der Wechselwirkung zwischen vergesellschafteten Baumarten. Mit dem Übergang von der künstlichen zur natürlichen Verjüngung von Waldbeständen, insbesondere bei den Baumarten Fichte und Buche, rückten Verjüngungsversuche im Flachland und im Bergmischwald in den Fokus. Verjüngungsversuche prüfen die Wirkung definierter Behandlungen auf das Ankommen, die Dynamik der Baumartenzusammensetzung und die Qualität der Verjüngung (Preuhsler 1979).

Das Netz Langfristiger Ertragskundlicher Versuchsflächen in Bayern umfasst gegenwärtig 151 Versuche mit 934 Parzellen, die eine Fläche von insgesamt rund 181 ha ausmachen (Abbildung 3). Davon entfallen 95 Versuche mit 329 Parzellen auf Durchforstungs- und Standraumversuche (Fläche 45,8 ha), 31 Versuche mit 147 Parzellen auf Mischwald- und Plenterwaldversuche (51,5 ha), 20 Versuche mit 179 Parzellen auf Düngungsversuche (23,5 ha), 14 Versuche mit 203 Parzellen auf Anbau- und Provenienzversuche (36,9 ha), 12 Versuche mit 37 Parzellen auf Verjüngungsversuche (12,4 ha), 9 Versuche mit 24 Parzellen auf Versuche zu Störfaktoren (3,6 ha) und 6 Versuche mit 15 Parzellen auf Naturwaldbeobachtungen (7,8 ha). Der überwiegende Teil der Versuchsflächen liegt im Staatswald des Freistaates Bayern, der von den Bayerischen Staatsforsten (BaySF) bewirtschaftet wird. Durch die langjährige, kooperative Zusammenarbeit zwischen den Institutionen wird der Vorrang von Wissenschaft und Forschung auf diesen Flächen gewährleistet.

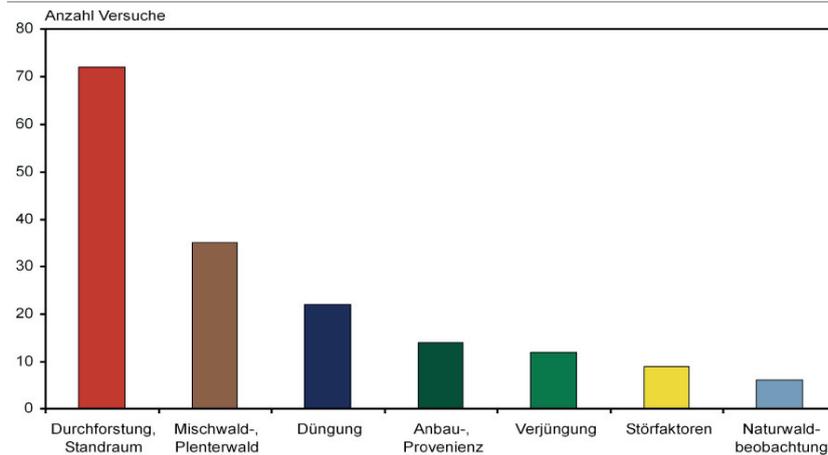


Abbildung 3: Anzahl der Versuchsflächen des Ertragskundlichen Versuchswesens in Bayern gegliedert nach Versuchsarten (Stand 01.05.2012)

3. Alleinstellungsmerkmale und allgemeiner ökologischer und biologischer Beitrag

Langfristige Ertragskundliche Versuche haben folgende Alleinstellungsmerkmale, die ihren einzigartigen Beitrag für die Forstwirtschaft und forstwissenschaftliche, ökologische und biologische Forschung ausmachen:

(i) Standardisierung der Anlagen, Messungen und Auswertungen:

Wie langfristige Versuchsflächen angelegt werden (z. B. mit dauerhafter Numeration der Bäume auf der Fläche und Randbäume, mit Winkelgräben zur dauerhaften Auffindbarkeit, Pufferstreifen zur Abgrenzung gegen anders behandelte Nachbarparzellen und angrenzenden standardmäßig behandelten Wald) wurde seit Gründung des Vereins Deutscher Forstlicher Versuchsanstalten immer weiter standardisiert und präzisiert (z. B. Ganghofer 1881, Deutscher Verband Forstlicher Versuchsanstalten 1954, 1986a und b). Das gleiche gilt für die Messung von Bäumen (Standards für die Messung von Höhe, Kronenansatzhöhe, Qualitätsansprache). Hier wurden zuvor gutachtliche Ansprachen systematisch durch Messungen ersetzt (z. B. Schober 1961). Besonders große Fortschritte wurden seit der Gründerzeit durch Nutzung von Datenbanken, EDV, Biometrie und elektronischer Vernetzung zwischen den Institutionen bei der Vereinheitlichung der Versuchsauswertung erzielt (Johann 1993, Neumann und Rössler 2016, Deutscher Verband Forstlicher Versuchsanstalten 2000).

Solche Standardisierungen bilden eine wichtige Voraussetzung für die zusammenfassende und Institutionen-übergreifende Auswertung von Versuchsflächendaten. Die beitragenden Institutionen liefern hierfür zumeist Metadaten über das Wachstum auf Bestandesebene. Nur wenn die Berechnung der Bestandesdaten aus den Baumvariablen klaren Standards folgt (z. B. DESER Norm nach Johann 1993) lassen sich die Bestandesdaten für übergreifende Auswertungen bedenkenlos zusammenfassen. Denn je nach gewähltem Auswertungsweg, z. B. Ansatz des Durchmesser-Höhenausgleichs, der Formzahlberechnung oder dem rechnerischen Umgang mit dem ausscheidenden Bestand, können aus einem gegebenen Satz von Baumvariablen sehr unterschiedliche Bestandescharakteristika resultieren. Nur mit standardisiert ausgewerteten Bestandesaufnahmen kann beispielsweise der Effekt von Durchforstungen, das Abschneiden unterschiedlicher Provenienzen oder die Produktivität von Mischbeständen in Abhängigkeit von den Standortbedingungen erfolgreich untersucht werden. Wirklich fundierte Erkenntnisse sind von solchen Querschnittsstudien nur dann zu erwarten, wenn den übergreifenden Auswertungen standardisierte Anlagen, Messungen und Auswertungen zugrunde liegen.

Bezogen sich die Arbeitspläne und Empfehlungen in der Gründerzeit vorwiegend auf die Planung, Anlage und Aufnahme langfristiger Versuchsflächen, so wurden in der Folgezeit auch Empfehlungen

zur Versuchsauswertung und Modellbildung entwickelt. Beispiele hierfür sind die Empfehlungspapiere zu den Themenkomplexen ausländischer Holzarten (Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten 1954), Düngungsversuche (Hausser et al. 1969), Freistellungsversuche (Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten 1986a und b), Waldschäden und Zuwachs (Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten 1988), Versuchsauswertung (Johann, 1993) und Waldwachstums-simulatoren (Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten 2000)

(ii) Langfristigkeit der Versuchsführung und der resultierenden Messreihen:

Die ältesten Versuchflächen in Fichten- und Buchenbeständen gehen auf die 1870iger Jahre zurück und liefern Messreihen der Bestandes- und Baumentwicklung über etwa eine Umtriebszeit. Auf langfristigen Versuchflächen werden in Zeitintervallen von circa 3 bis 15 Jahren die wichtigsten Baumdimensionen des verbleibenden und ausscheidenden Bestandes registriert. Bei einer Beobachtungszeit von nur wenigen Jahren oder Jahrzehnten bliebe unbemerkt, dass sich z. B. verschiedene Arten und Provenienzen erst im mittleren oder fortgeschrittenem Alter unterscheiden (*Abbildung 4*), dass Durchforstungs- und Düngungsreaktionen nach wenigen Jahren wieder abklingen können, oder dass es in Mischbeständen über längere Zeit zur Konkurrenzierung und zum Ausfall einer Art oder mehrerer unterlegener Arten kommen kann. Der Ersatz echter durch künstliche Zeitreihen, so genannte Wuchsreihen, bleibt immer mit dem Mangel bzw. der Unsicherheit behaftet, ob die künstlich zusammengefügte, räumlich nebeneinander liegenden Parzellen, in der Geschichte, dem Standort, der Behandlung und genetischen Ausstattung ausreichend ähnlich sind, um als Analogie für das zeitliche Nacheinander angesehen werden zu können (Pretzsch 2010, S. 145-148).

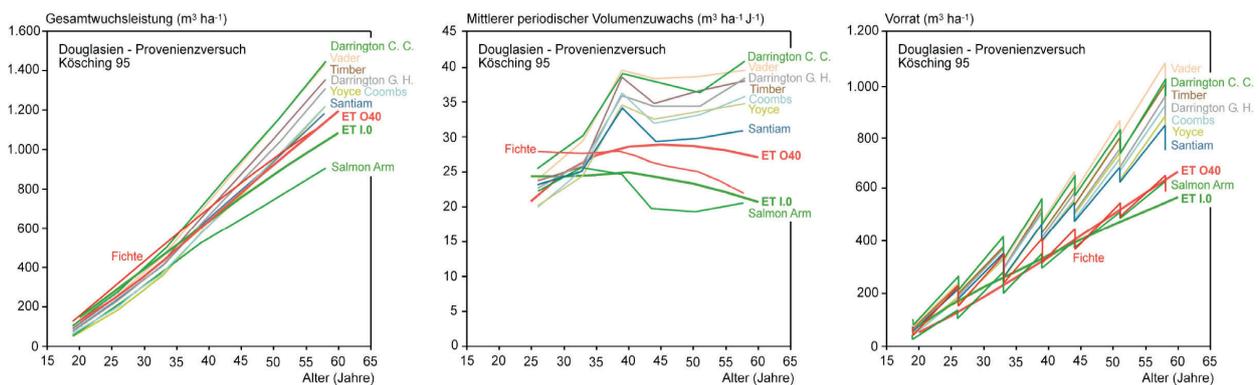


Abbildung 4: Langfristige Überlegenheit von Douglasien unterschiedlicher Provenienzen im Vergleich zur Fichte auf dem Provenienzversuch Kösching 95. Dargestellt sind Gesamtwuchsleistung, mittlerer periodischer Volumenzuwachs und Vorrat von Douglasien verschiedener Provenienzen und der Fichte im Vergleich zu den Ertragstafeln für die Douglasie von Bergel (1985) (ET I.0, grün) und Fichte von Assmann und Franz (1963) (ET O40, rot)

(iii) Räumliche explizite Vermessung von Baum- und Bestandesstruktur:

Seit den 1950er Jahren werden auf vielen langfristigen Versuchflächen Stammfußkoordinaten, Kronenradien und Kronenansatzhöhen erhoben, so dass die dreidimensionale Struktur der Bestände bekannt ist. Viele Aspekte der Walddynamik (z. B. Zuwachsverteilung zwischen den Bäumen einer Population, Durchforstungsreaktionen, Mischungseffekte, natürliche Verjüngung) resultieren aus der Struktur. Die Struktur determiniert aber auch viele Leistungen und Funktionen des Waldes, wie u. a. Habitate, Erholungsfunktion, Schutzfunktion und Landschaftsästhetik. Mit der Erweiterung des Aufnahmeprogrammes auf Strukturvariable gelingt deshalb der Zugang zur Beschreibung, Modellierung und Prognose auch solcher Variablen, die über dendrometrische Aussagen zum Holzvorrat weit hinausgehen (Biber et al. 2015). Damit liefert die wiederholte räumlich explizite Erfassung der langfristigen Versuchflächen ansonsten nicht verfügbare Informationen für das Verstehen und Modellieren der Bestandesdynamik (Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten 2000, Nagel et al. 2012).

(iv) Versuchssteuerung auf quantitativer Grundlage, inklusive Extremvarianten:

Seit der Gründerzeit des Vereins Deutscher Forstlicher Versuchsanstalten wurden die Behandlungsrichtlinien für Versuchsflächen quantitativ formuliert. Beispiele dafür sind die Verwendung von Baumklassen für die Charakterisierung der Durchforstungsart und Durchforstungsstärke wie z. B. A-, B-, C-Grade Durchforstung, LI und LII-Grade der Lichtung und D-, E-Grade der Hochdurchforstung (Verein Deutscher Forstlicher Versuchsanstalten 1873, 1902). Diese Vorgehensweisen waren so standardisiert, dass auch bei der Konstruktion der Ertragstafeln diese Grade (Kombination aus Durchforstungsart und -stärke) der Behandlung übernommen werden konnten (Assmann 1961). In der Folgezeit fanden Sollgrundflächen (Pretzsch 2010, S. 153), Baumzahlleitkurven und A-Werte (Deutscher Verband Forstlicher Versuchsanstalten 1986a und b), Mischungsanteile und Mischungsform (Wimmenauer 1914, Zimmerle 1949) oder Düngermengen (Hausser et al. 1969) für die Steuerung von Versuchen, Verwendung. Durch die quantitative Formulierung der Behandlung können subjektive Einflüsse weitgehend ausgeschaltet werden, was insbesondere bei koordinierten Versuchsanlagen mehrerer Institutionen besonders wichtig ist. Erst auf diese Weise können Versuche erfolgreich gemeinsam ausgewertet, Effekte definierter Behandlungen auf unterschiedlichen Standorten verglichen, und die Ergebnisse solcher Versuche in die forstliche Praxis in Form von wiederum quantitativ formulierten Pflegerichtlinien transferiert werden.

(v) Mitführung von unbehandelten oder nur schwach durchforsteten Referenzflächen:

Viele langfristige Versuchsflächen umfassen A-Grade (schwache Durchforstung) oder 0-Flächen (völlig unbehandelte Parzellen), die auf gleiche Art und Weise begründet wurden wie die aktiv behandelten Parzellen. Sie dienen als Referenz, spiegeln also die maximale Dichte, die natürlichen Konkurrenzrelationen oder Effekte von Klimaänderungen wider, ohne Überlagerungen von waldbaulichen Eingriffen durch den Menschen. Sie dienen häufig als Referenz (100 %), und die aktiv behandelten Flächen werden z. B. demgegenüber in der Bestandesdichte abgestuft gesteuert (z. B. 80 %, 50 %). Auch für die Entwicklung neuer waldbaulicher Behandlungsprogramme, die das aktuelle Wuchspotential der Wälder berücksichtigen, sind unbehandelte Referenzflächen essentiell. Insbesondere in dicht besiedelten und intensiv bewirtschafteten Regionen auf der Erde gibt es solche unbehan-

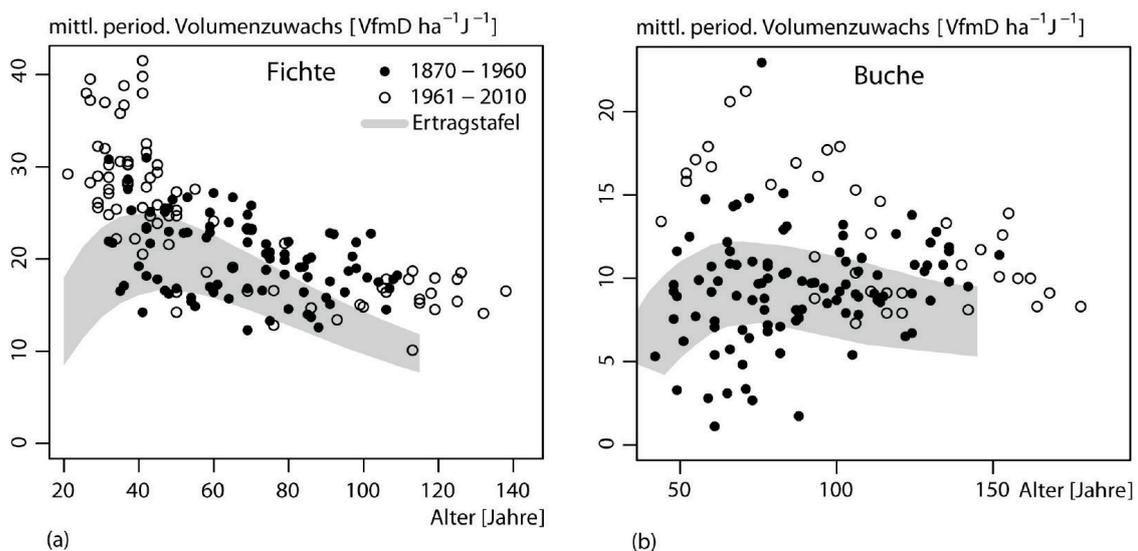


Abbildung 5: Die Volumenzuwächse von Fichte und Buche liegen gegenwärtig oft über den Werten der Ertragstafeln (grau dargestellte Bereiche). Diese Tendenz hat seit 1960 deutlich zugenommen (Pretzsch et al. 2014). Dargestellt sind auf langfristigen Versuchsflächen gemessene und den Tafeln nach erwartete Zuwächse von Fichte und Buche seit 1870. Dargestellt sind der gemessene periodische Volumenzuwachs ($m^3 ha^{-1}J^{-1}$) bis 1960 (ausgefüllte Symbole) und nach 1960 (leere Symbole) verglichen mit gebräuchlichen Ertragstafeln für die Fichte (Oberhöhenbonitäten 32 – 40) und für die Buche (Ertragsklassen I – IV) nach (Assmann und Franz (1963) bzw. Schober R. (1967)).

delten Referenzflächen ansonsten kaum. Ohne solche Referenzflächen hätte kaum aufgedeckt werden können, dass das Waldsterben nur regional zu größeren Zuwachsverlusten führte (Kenk et al. 1991), und die Wälder seit den 1960er Jahren überwiegend signifikant schneller wachsen und dichter werden können als in den Jahrzehnten davor (z. B. Pretzsch et al. 2014a). Referenzflächen der langfristigen Versuche dokumentieren damit den bioklimatologischen Fußabdruck des Menschen auf das Waldwachstum, ihre Aufgabe würde eine essentielle Grundlage für den Nachweis und die Quantifizierung von Umweltveränderungen leichtfertig beseitigen (*Abbildung 5*).

(vi) Ceteris paribus Bedingungen:

Bis auf die Versuchsfaktoren (z. B. Durchforstung, Düngung, Mischung) können auf langfristigen Versuchsflächen bei sorgfältiger Auswahl und Anlage alle anderen Faktoren konstant gehalten werden. Es bestehen also experimentelle Bedingungen. Etwaige Wachstumsreaktionen können dann ursächlich klar den zugrunde liegenden Versuchsfaktoren zugeordnet werden. Im Unterschied dazu erbringen Auswertungen von Inventuren oder Wuchsreihen allenfalls korrelative Zusammenhänge. Denn bei Inventuren oder Wuchsreihen können sonstige Einflussgrößen nicht experimentell ausgeschaltet werden. Wächst ein Bestand mit Ozonbegasung anders als ein unbehandelter Bestand auf gleichem Standort, so lassen sich festgestellte Zuwachsverluste eindeutig dem Ozonstress zuordnen. Werden dagegen Bestände mit starker Ozonbelastung in Höhenlagen mit geringer belasteten Beständen in den Tieflagen verglichen, dann können eventuelle Zuwachsdifferenzen nicht zweifelsfrei der Ozonbelastung zugeschrieben werden, sondern auch aus den ungünstigeren Standortbedingungen in den Höhenlagen resultieren.

(vii) Versuchswiederholungen unter unterschiedlichen Standortbedingungen:

Die Gründerväter des Versuchswesens hatten vor allem im Sinne, identische Versuchsanlagen (d.h. Versuche mit gleichem Versuchsaufbau, gleichen Versuchsfaktoren, gleichem Messprogramm) auf unterschiedlichen Standorten anzulegen; und zwar über die Grenzen von Institutionen, Ländern und Kontinenten hinweg. Beispielsweise wurden in der Gründerzeit Versuche mit A-, B- und C-Graden (schwacher, mäßiger und starker Niederdurchforstung) in vielen Gegenden Europas angelegt, um den Effekt der Standortbedingungen auf die Durchforstungsreaktion zu verstehen. Daraus resultierte beispielsweise die von Assmann (1961) und Assmann und Franz (1963) beschriebene uni-modale Dichte-Zuwachs-Beziehung und deren Verflachung mit abnehmender Standortgüte bei der Fichte. Das Potential dieser und anderer standörtlich gestreuten Versuche wurde bisher nicht annähernd für das Verständnis der Standortabhängigkeit der Baum- und Bestandesdynamik ausgeschöpft. Andere Datenquellen stehen für solche kausalen Analysen nicht zur Verfügung. So repräsentieren beispielsweise Inventurflächen meist nicht annähernd die Bandbreite der auf Versuchen abgedeckten Faktorenstufe (z. B. Dichte, Mischungsanteile), sie bieten keine ceteris paribus Bedingungen, und bilden allenfalls einige wenige Jahrzehnte der Bestandesentwicklung ab.

(viii) Vor- und Folgebestände auf demselben Standort:

Wenn möglich, werden auf langfristigen Versuchsflächen nach Erreichen der Umtriebszeit und Ernte oder nach Ausfall durch Windwurf am selben Wuchsort mit genetisch gleichem Material (Absaat durch Beernten der Altbäume) und gleichem Versuchskonzept (z. B. wieder A-, B-, C-, D- und E-Grad) Folgeversuche angelegt. Der Vergleich zwischen der Entwicklung von Vor- und Folgegenerationen kann Aufschluss über die langfristige Veränderung der Wuchsbedingungen durch Nährstoffverarmung (Wiedemann 1923) oder Klimaänderungen (Kenk et al. 1991) geben. Nur bei einer solchen Kombination von Vor- und Folgebeständen kann ausgeschlossen werden, dass die Folgebestände nicht aufgrund veränderter Bestandesbegründung, waldbaulicher Behandlung, oder genetischer Ausstattung anders wachsen als ihre Vorgeneration. Derartige generationenübergreifende Versuche haben maßgeblich zum Verständnis der Variabilität der Standortbedingungen und der Verwerfung der zuvor angenommenen Standortkonstanz beigetragen (*Abbildung 5*).

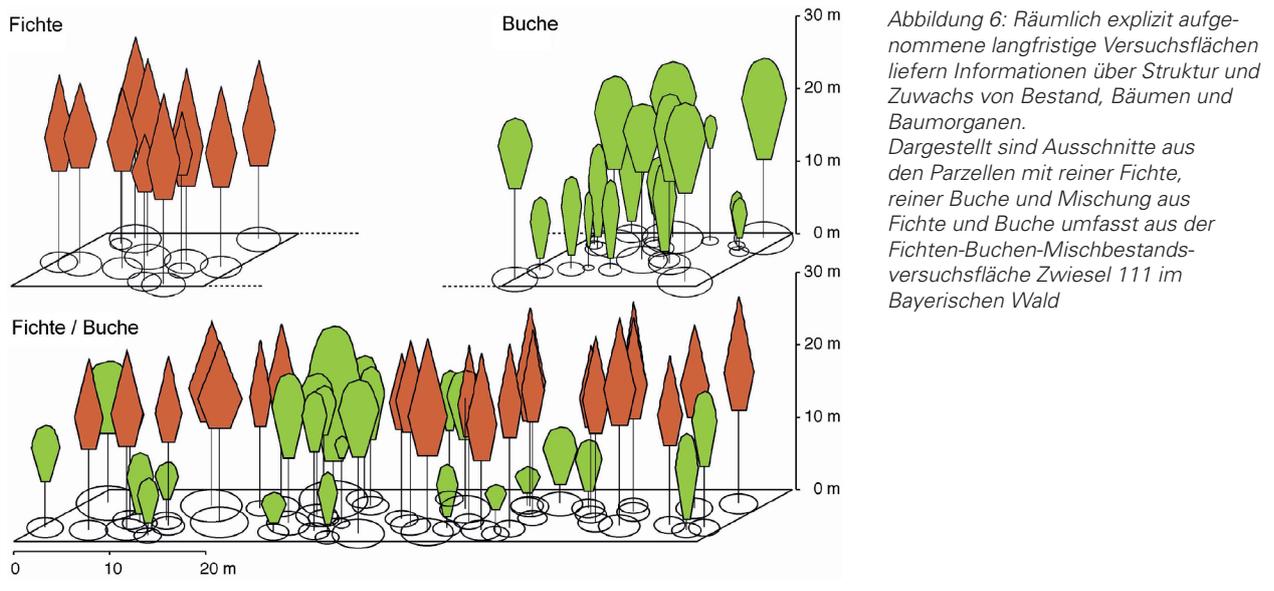


Abbildung 6: Räumlich explizit aufgenommene langfristige Versuchsflächen liefern Informationen über Struktur und Zuwachs von Bestand, Bäumen und Baumorganen. Dargestellt sind Ausschnitte aus den Parzellen mit reiner Fichte, reiner Buche und Mischung aus Fichte und Buche umfasst aus der Fichten-Buchen-Mischbestandsversuchsfläche Zwiesel 111 im Bayerischen Wald

(ix) Integration der Organisationsebenen Baum, Bestand und Baumorgane:

Ein Verstehen und Modellieren von Phänomenen auf einer gegebenen Ebene wird in den Naturwissenschaften durch Analyse der zugrundeliegenden Prozesse und Strukturen auf der nächst höheren (räumlichen oder zeitlichen) Auflösungsebene erreicht, also durch ebenenübergreifende Untersuchungsansätze. So wird z. B. die Bestandesdynamik verständlich aus dem Wachstum von Einzelbäumen (Baumebene), deren Mortalität resultiert aus der Populationsdichte (Bestandesebene). Von vielen langfristigen Versuchsflächen liegen Variablen von mindestens drei hierarchischen Ebenen vor (Abbildung 6), z. B. die Bestandeskennwerte (z. B. Stammzahl, Mitteldurchmesser, Vorrat, Volumenzuwachs), die Größen von Einzelbäumen (z. B. Durchmesser, Höhe, Volumenzuwachs, Absterbezeitpunkt) und die Morphologie von Baumorganen (z. B. Kronenbreite, Kronenlänge, Verlagerung der Kronenansatzhöhe, Jahrringaufbau des Stammes nach Stammanalyse).

Durch eine mehrere Organisationsebenen übergreifende Aufnahme können die langfristigen Effekte von Durchforstung, Artenmischung oder Trockenheit von der Bestandesebene bis zur Baum- und Organebene verfolgt werden. Auf Durchforstungsversuchen zeigt der skalenübergreifende Ansatz den essentiellen trade-off zwischen der Steigerung des Durchmesserwachstums von ausgewählten Einzelbäumen und der Abnahme der Gesamtwuchsleistung des Bestandes (Pretzsch 2006). Auf Mischbestandsversuchen können Mehrzuwächse auf Bestandesebene erklärt werden durch den dichteren Stand und die stärkere horizontale Strukturierung von Einzelbäumen, die mit einer größeren Kronenplastizität und -ausdehnung, einem größeren Kronen/Wurzel-Verhältnis und einer geringeren Holzdichte verbunden sein kann (Pretzsch und Rais 2016). Der auf der Ebene von vorherrschenden Einzelbäumen evidente Effekt von Dürre kann auf Bestandesebene an Relevanz abnehmen, weil herrschende und kleinere, weniger sonnenexponierte Bäume geringer an Wasserstress leiden und die Zuwachsverluste der stärker betroffenen Nachbarn teilweise kompensieren können. In allen Beispielen trägt der skalenübergreifende Ansatz zur Klärung bei, welche der gemessenen Effekte für die langfristige Bestandesdynamik relevant werden und welche bei räumlich oder zeitlich hoch aufgelöster Messung zwar evident sind, aber abgepuffert werden können, und sich nicht bis zur Bestandesebene durchpausen.

(x) Standardisierte Datenverwaltung, Austauschformate:

Einige Versuchsanstalten arbeiten noch an der Digitalisierung ihrer Versuchsflächendaten. Das ist die zentrale Voraussetzung für eine effiziente Datenhaltung, rasche standardisierte Versuchsaus-

wertung, für den Datenaustausch mit Partnerinstitutionen und auch für übergreifende Analysen, wie sie schon die Gründerväter des Versuchswesens im Blick hatten.

Einen wesentlichen Schritt der Standardisierung stellt die von Johann (1993) entwickelte Norm für die Auswertung und Dokumentation von Bestandesdaten (Meta-Daten) der Versuchsfelder dar. Diese Standardisierung hat bereits viele übergreifende Auswertungen ermöglicht, denn seitdem werden die wesentlichen Bestandescharakteristika einheitlich hergeleitet, standardisiert abgespeichert und können deshalb auch für gemeinsame Auswertungen einfach ausgetauscht und zusammengefasst werden.

Von einer Arbeitsgruppe der Sektion Ertragskunde im Deutschen Verband Forstlicher Forschungsanstalten wurde ein allgemeines Datenaustauschformat definiert, das auf dem Standard XML (Extensible Markup Language) beruht. Die Vorzüge von XML in diesem Kontext sind seine Systemunabhängigkeit, seine Lesbarkeit in Texteditoren und seine Anbindungsfähigkeit an beliebige Datenbank- und Auswertungssysteme. Der an den einzelnen Institutionen anfallende technische Aufwand kann damit minimiert und die Arbeit auf die fachlichen Inhalte konzentriert werden (Nagel und Sprauer 2016).

4. Synergien von ertragskundlichen Versuchsfeldern und Waldinventuren

Seit den 1970er Jahren wird der Waldzustand in zunehmendem Umfang durch Waldinventuren erhoben. Angesichts der Verfügbarkeit solcher Inventurdaten wurde der Nutzen langfristiger ertragskundlicher Versuchsfelder wiederholt diskutiert (von Gadow 1999, Nagel et al. 2012). Inventuren und langfristige Versuchsfelder dienen unterschiedlichen Zwecken, erbringen unterschiedliche Informationen und können sich ergänzen, aber nicht gegenseitig ersetzen.

Der wesentliche Unterschied zwischen beiden Informationsquellen besteht darin, dass langfristige ertragskundliche Versuche Experimente darstellen, in denen Ursache-Wirkungs-Beziehungen aufgedeckt werden. Inventuren hingegen zielen auf unverzerrte Schätzungen des großregionalen Zustandes und der Entwicklung von Wäldern, indem sie beispielsweise ausgewählte Variablen erfassen (z. B. die Baumartenzusammensetzung, das Bestandesvolumen, die Benadelungsdichte oder den Totholzvorrat). Inventuren repräsentieren dabei normalerweise mittlere Bedingungen (z.B. mittlere Bestandesdichten, Mischungsverhältnisse, Wachstum ohne aktive Düngung) und decken kaum Extremsituationen (z. B. Solitärbedingungen, maximale Bestandesdichte) ab. Diese sind aber für das Verstehen und die Modellierung des Baum- und Bestandeswachstums besonders nützlich und können auf langfristigen Versuchsfeldern gewonnen werden.

Eine sinnvolle Kombination von Inventurdaten und Wissen aus ertragskundlichen Versuchsfeldern kann folgendermaßen erreicht werden: Langfristige ertragskundliche Versuchsfelder spiegeln für ein breites Spektrum von Standortbedingungen und Behandlungsvarianten die Zuwachsreaktion auf Baum- und Bestandesebene wider. Sie dienen dem Verstehen und Parametrisieren von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen (z. B. zwischen Bestandesdichte und Baum- und Bestandeswachstum). Inventurdaten ermöglichen die Kalibrierung solcher Zusammenhänge für Regionen, die nicht explizit über ertragskundliche Versuchsfelder abgedeckt sind. Damit ermöglichen Inventuren die Hochskalierung von punktuell gewonnenem Wissen auf die Landschaftsebene (Nagel et al. 2012).

5. Zum Informationspotential langfristiger Versuche für aktuelle Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Drei Beispiele

5.1 Langfristige Beschleunigung des Wachstums der Wälder in Mitteleuropa

Übergreifende Analysen auf unbehandelten und nur mäßig durchforsteten langfristigen Versuchsflächen zeigen, dass Waldbestände in Mitteleuropa gegenwärtig schneller wachsen als in der Vergangenheit (Kenk et al. 1991, Pretzsch et al. 2014b). Kausalanalysen führen die Beschleunigung primär auf die großregionale Temperaturerhöhung, die Verlängerung der Vegetationszeit, Nährstoffeinträge und Erhöhung der atmosphärischen CO₂-Konzentration zurück (Pretzsch et al. 2014a).

Ertragstafeln basieren überwiegend auf Daten langfristiger Versuchsflächen und repräsentieren die Wuchsbedingungen und Bestandesdynamik der letzten ein bis zwei Jahrhunderte. Der Vergleich zwischen den gegenwärtig auf langfristigen Versuchsflächen gemessenen Zuwachswerten und den Ertragstafeln zeigt insbesondere für die Wachstumsraten und den stehenden Vorrat nach 1960 Überschreitungen der Ertragstafelwerte um 50 % bis 100 % (*Abbildung 5*). Diese Abweichungen zeigen grundlegende Veränderungen der Wuchsbedingungen an und stellen die Gültigkeit der Ertragstafeln in Frage.

Derartige Nachweise von großregionalen Veränderungen der Wuchsbedingungen sind besonders fundiert, weil das historische und gegenwärtige Wachstum auf langfristigen Versuchen ohne oder mit gleich bleibender geringfügiger waldbaulicher Behandlung, gleicher Provenienz und auf gleichem Standort basiert. Damit können Veränderungen der Begründung, Bewirtschaftung und genetischen Ausstattung als Ursachen für die angestiegenen Zuwachsraten ausgeschlossen werden. Insbesondere die unbehandelten langfristigen Versuchsflächen werden so zu wertvollen Referenzflächen, die anthropogen bedingte Klima- und Standortveränderungen auf das Waldwachstum dokumentieren. Langfristige Versuchsflächen tragen so u. a. zum Biomonitoring bei, vermitteln Veränderungen der Zuwachs- und Nutzungssätze, und legen eine erhöhte C-Fixierung und Speicherung der Wälder nahe.

Tabelle 1 zeigt für vier Baumarten die Erhöhung der Volumenzuwächse im Vergleich zu dem Zeitraum vor 1960, in welchem nahezu alle gängigen Ertragstafeln entwickelt wurden. Die in *Tabelle 1* angegebenen Korrekturfaktoren von 1,10-1,30 sind als konservative Richtwerte zu verstehen. Werden die Volumenzuwächse der Ertragstafeln mit ihnen multipliziert, so ergeben sich wirklichkeitsnähere Volumenzuwächse. Die Befunde zur Erhöhung der Volumenzuwächse und Ableitung von Korrekturfaktoren gründen auf schwach und mäßig durchforsteten langfristigen Versuchsflächen in Mitteleuropa. Auf fruchtbareren Standorten und in jüngeren Beständen liegt die Zuwachsbeschleunigung und damit auch der Korrekturbedarf eher höher als auf ärmeren Standorten und in älteren Beständen.

Baumart	Fichte	Kiefer	Eiche	Buche	Mittel
Erhöhung (± SE) in %	10 (± 9)	33 (± 7)	18 (± 5)	30 (± 17)	20
Korrekturfaktor	1,10	1,30	1,10	1,20	1,20

Tabelle 1: Mittlere Erhöhung des Volumenzuwachses im Vergleich zur Ertragstafel in % (± SE). Bei den empfohlenen Faktoren zur Korrektur der Ertragstafelwerte handelt es sich um eher konservative Richtwerte (Pretzsch 2016)

5.2 Mehrzuwachs durch Baumartenmischung

Zahlreiche neuere Untersuchungen auf Langfristigen Ertragskundlichen Versuchsflächen belegen, dass der Zuwachs und die Bestandesdichte von Mischbeständen über dem gewichteten Mittel von benachbarten Reinbeständen liegen können (Pretzsch et al. 2010, 2015a). Artenmischung kann den Zuwachs im Vergleich zum gewichteten Mittel der Reinbestände im Mittel um 11-30 % erhöhen (Tabelle 2). Werden Baumarten mit relativ ähnlichen ökologischen Nischen gemischt (z. B. Fichte und Buche, Fichte und Tanne), so liegen die Mehrzuwächse eher im unteren Bereich des genannten Rahmens (Multiplikation der Tafelwerte mit 1,10). In sehr komplementären Mischungen (z. B. Kiefer und Buche, Lärche und Buche) werden deutlich höhere Werte erreicht (Multiplikation der Tafelwerte mit 1,20).

Tabelle 2 zeigt auf Versuchsflächen gemessene Zuwachserhöhungen und daraus abgeleitete, konservativ gewählte Korrekturfaktoren gegenüber dem Zuwachs in Reinbeständen. Demnach sollten die Zuwachswerte der Reinbestandsertragstafeln bei Anwendung auf Mischbestände mit einem Faktor von 1,10 bis 1,20 multipliziert werden. Die Korrekturfaktoren wurden aus Beständen abgeleitet, in denen beide Baumarten etwa zu gleichen Anteilen vertreten und in Einzel- bis Gruppenmischung assoziiert sind. Die durch Mischung verursachten Mehrzuwächse kommen zu den zuvor gezeigten Zuwachserhöhungen durch veränderte Wuchsbedingungen hinzu.

Baumartenkombination	Fichte/Buche	Kiefer/Buche	Eiche/Buche	Buche/Dougl.	Kiefer/Fichte	Lärche/Fichte	Fichte/Tanne	Mittel
Erhöhung (± SE) in %	21 (± 3)	30 (± 9)	20 (± 3)	11 (± 8)	21 (± 11)	25 (± 6)	13 (± 6)	
Korrekturfaktor	1,10	1,20	1,10	1,10	1,20	1,20	1,10	1,10

Tabelle 2: Mischungseffekte auf den Volumenzuwachs verschiedener Baumartenkombinationen und Korrekturfaktoren für die Anpassung von Zuwachswerten von Reinbeständen (Pretzsch 2016)

diesen Faktoren handelt es sich um grobe Richtwerte, die der weiteren Präzisierung in ihrer Abhängigkeit von Baumartenkombination, Bestandesalter und Standortbedingungen bedürfen. Die hier dargestellten Mischungseffekte wurden auf langfristigen Versuchsflächen in Mitteleuropa gemessen, und sie stimmen in der Größenordnung mit Ergebnissen weltweiter Meta-Analysen, die Mehrzuwächse von 10-30 % berichten, gut überein (Liang et al. 2016).

Derartige, überschlägige Korrekturen eignen sich selbstverständlich nur für gleichaltrige und einschichtige Mischbestände. Die Zuwachsleistung von ungleichaltrigen, mehrschichtigen Mischbeständen sollte auf keinen Fall aus Ertragstafeln abgeleitet werden, weil Ungleichaltrigkeit und Mehrschichtigkeit weitere inner- und zwischenartliche Interaktionen auslösen, die in Ertragstafeln keinerlei Berücksichtigung finden.

Aufgrund der Gleichheit der Standorte und der waldbaulichen Behandlung reiner und gemischter Parzellen, erlauben langfristige Mischbestandsversuche, im Unterschied zu Inventurdaten, die experimentelle Trennung echter Mischungseffekte von Dichte oder Behandlungseffekten. Ferner können sowohl die Mischungsanteile als auch die Mischungsstrukturen systematisch variiert und über langfristige Zeiträume quantitativ gesteuert werden. Die unbehandelten oder nur schwach durchforsteten Versuchspartellen sind von besonderem Wert, weil sie den Effekt der Mischung auf die maximale Bestandesdichte und Tragfähigkeit des Standortes abbilden. Auf Parzellen mit stärkeren waldbaulichen Eingriffen und Dichteabsenkungen werden signifikante Anteile des Mischungseffektes, nämlich die Produktivitätssteigerungen durch Erhöhung der maximalen Dichte, eliminiert (Forrester und Pretzsch 2015, Pretzsch et al. 2015a).

Auf diesem Wege liefern langfristige Mischbestandsversuche die notwendigen Informationen für eine zielorientierte Begründung, Steuerung und Nutzung von Mischbeständen. Sie zeigen, dass Mischbestände neben den viel genannten Vorzügen in Ökosystemdienstleistungen für Schutz und Erholung, Biodiversität und Stabilität, auch eine höhere Produktivität erbringen können.

5.3 Entwicklung von Einzelbaummodellen für Rein- und Mischbestände

Permanente Stichproben und Waldwachstumssimulatoren liefern gegenwärtig für einen Großteil der Wälder verlässliche ertragskundliche Basisdaten für die Inventur und Planung. Einzelbaumsimulatoren geben der forstlichen Planung Informationsgrundlagen zu Rein- und Mischbeständen aller Alterszusammensetzungen und für ein breites Spektrum unterschiedlicher waldbaulicher Behandlungen an die Hand (Nagel 1999, Pretzsch et al. 2002).

Ein besonderes Merkmal räumlich expliziter Einzelbaummodelle besteht in ihrer Nachbildung des Baumwachstums in Abhängigkeit von der räumlichen Wuchskonstellation innerhalb des Bestandes. Damit erlauben solche Modelle auch die Nachbildung des Effektes langer Unterdrückung, abrupter Freistellung und verschiedenartiger Baumartenmischung auf die Dynamik von Oberstand und Verjüngung. Möglich wird das durch ihre Parametrisierung auf der Grundlage von langfristigen Versuchsflächen, die räumlich explizit aufgenommen werden (Stammfußkoordinaten, Kronenradien, Verjüngungsinventuren in Rasterquadraten), die auch extreme Wuchskonstellationen abdecken (Solitärstellung, maximale Dichte) und die Wachstumsreaktionen auf ein breites Spektrum von Behandlungsvarianten umfassen.

Einzelbaumsimulatoren haben in den letzten Jahrzehnten in vielem die Ertragstafeln als Planungsinstrument abgelöst. Sie dienen u. a. der Entwicklung neuer waldbaulicher Behandlungsprogramme, der nachhaltigen Hiebssatzplanung im Rahmen der Forsteinrichtung und der Szenarioanalyse in der Klimafolgenforschung für den Wald. Die Parametrisierung der biometrischen Funktionen in Einzelbaummodellen basiert auf langfristigen Versuchsflächen. Die auf langfristigen Versuchsflächen über Jahrzehnte und Jahrhunderte gesammelten Daten und das daraus resultierende Wissen werden also in den Parametern in Modellen und Simulatoren verdichtet und auf diesem Wege für die Wissenschaft und Praxis nutzbar gemacht.

6. Perspektiven für die Weiterentwicklung und die interdisziplinäre Vernetzung des Langfristigen Ertragskundlichen Versuchswesens

6.1 Perspektiven für die Weiterentwicklung

Das ertragskundliche Versuchswesen und die Waldwachstumforschung haben aufgrund ihrer frühen Etablierung, langen Geschichte, Standardisierung und pragmatischen Ausrichtung auf die forstwirtschaftliche Anwendung, Methoden, Konzepte und Modellvorstellungen entwickelt, die mitunter eine Kooperation und Integration mit jüngeren Disziplinen wie der Ökologie oder Physiologie erschweren. Im Folgenden wird an einer Reihe von Beispielen gezeigt (*Abbildung 7, a-e*), wie eventuelle Hürden der Zusammenarbeit mit der Biologie als gegenwärtiger Leitwissenschaft, durch Weiterentwicklung des Versuchswesens überwunden werden können.

Seit dem 19. Jahrhundert verwendet die Forstwissenschaft die Baumhöhe bei gegebenem Alter, also die Höhenbonität, zur Quantifizierung der Standortgüte und für die Prognose der Produktivität (*Abbildung 7a*). Mit Nachbardisziplinen, die solche Schätzungen direkt auf den Treibkräften gründen, ist ein solcher dendrometrischer Ansatz schwer vereinbar. Folgende Grenzen dieses dendrometrischen Ansatzes der Leistungsschätzung werden gegenwärtig immer deutlicher. In strukturreichen Mischbeständen kann diese Art der Bonitierung zur Unterschätzung der Standortgüte führen, wenn

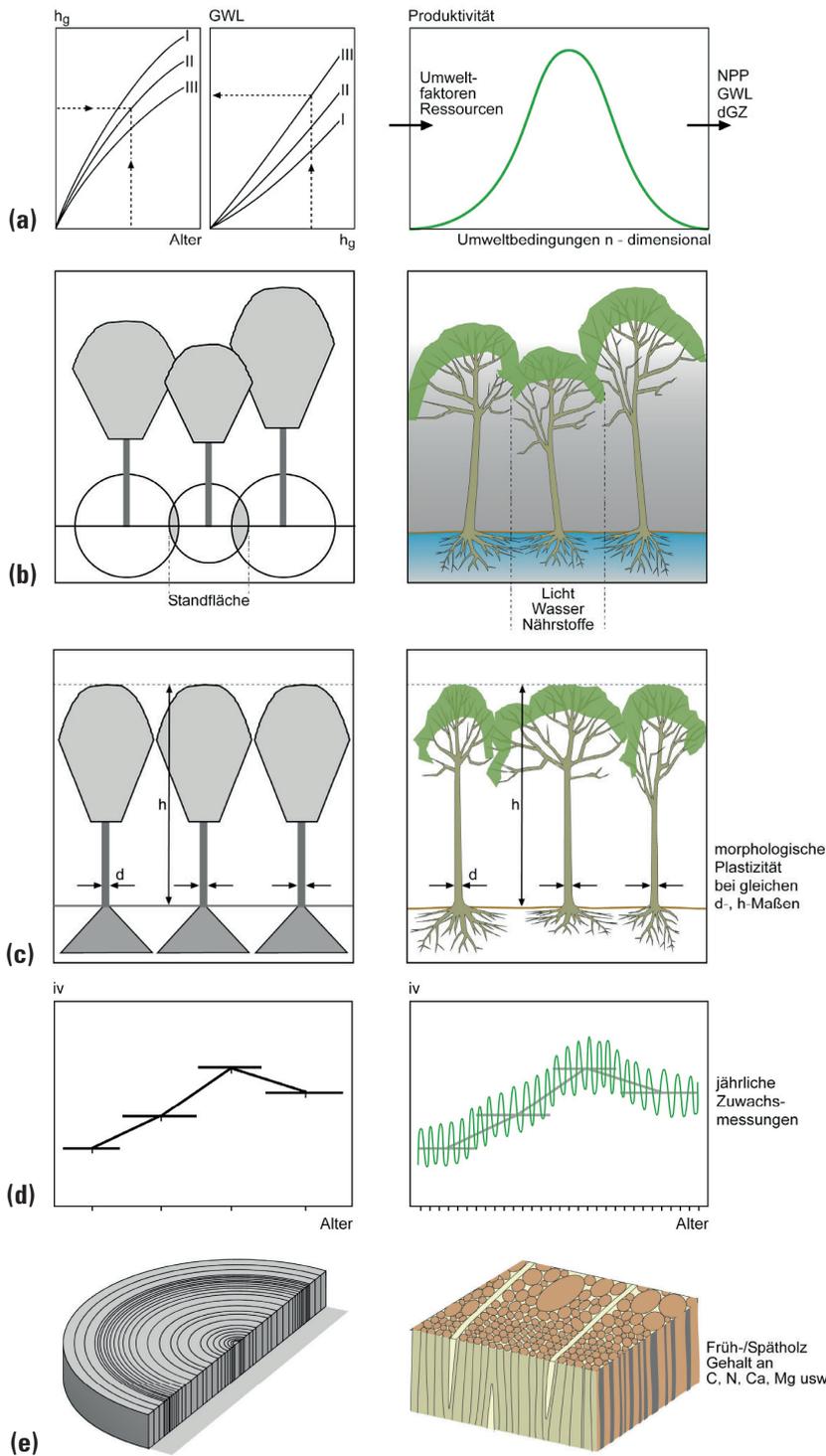


Abbildung 7: Durch Weiterentwicklung der Konzepte, Modellvorstellungen und Messungen kann das Informationspotential Langfristiger Ertragskundlicher Versuche für die ökologische und biologische Forschung erschlossen werden. Folgende Übergänge könnten den Beitrag zur interdisziplinären Forschung weiter verbessern

(a) von dendrometrischen zu biogeochemischen Konzepten der Produktivitätsschätzung

(b) von der Standfläche zur Ressourcenversorgung bei der Quantifizierung der Konkurrenz

(c) von vereinfachten zu konkurrenzabhängigen Struktur- und Allometrie-modellen von Bäumen

(d) von periodischer zu jährlicher Messung des Zuwachses

(e) von der Messung der Jahringbreite zur Differenzierung zwischen Früh- und Spätholz, Analyse von C- und mineralischen Nährelementgehalten

die Baumhöhenentwicklung durch längeres Warten im Unterstand abgebremst wird. Die Baumhöhe charakterisiert nur den vertikalen Aspekt des Bestandeswachstums; auch bei gleicher Höhenbonität kann das Leistungsvermögen aufgrund unterschiedlicher maximaler Bestandesdichte noch stark (um $\pm 20\%$ der Gesamtwuchsleistung) variieren.

Anders als in der Entstehungszeit der Höhenbonitierung stehen für die Abschätzung und die Prognose der Produktivität von Waldböden gegenwärtig umfangreiche Charakteristika der Ressourcenverfügbarkeit und Umweltfaktoren zur Verfügung. Informationen über das Waldwachstum und

die zugrunde liegenden Umweltbedingungen lassen sich für den Übergang von der dendrometrischen zur mechanistischen Produktivitätsschätzung und -modellierung verwenden (*Abbildung 7a*). Durch eine solche Weiterentwicklung kann z. B. die Abbildung von Stoffflüssen, der Effekt der Behandlung auf die Kohlenstoffspeicherung und die Prognose der Waldentwicklung bei Klimaänderungen von einer eher statischen, auf eine variable, mechanistische Grundlage überführt werden.

Die Standfläche oder der Standraum von Bäumen werden im Versuchswesen und der forstwissenschaftlichen Forschung als unspezifische Maße für ihre Ressourcenversorgung und Konkurrenzsituation verwendet (*Abbildung 7b*). So basieren auch Standraum, Durchforstung und Lichtwuchsregulierung auf Maßen wie Abstand, Fläche oder auf Konkurrenzindizes, die aus Flächen- oder Abstandswerten errechnet werden. Dabei bleibt unberücksichtigt, hinsichtlich welcher Ressourcen ein Baum mit großer oder kleiner Standfläche überhaupt begünstigt oder limitiert wird. Auf feuchten, nährstoffreichen Standorten steht eine gegebene Standfläche für die Verfügbarkeit von Licht, auf trockenen Standorten eher für die Verfügbarkeit von Wasser und Nährstoffen. Je nachdem welche Ressource auf einem Standort limitierend ist, hat eine gegebene Standfläche also eine unterschiedliche Qualität.

Zum besseren Verständnis der Ressourcennutzung und der ressourceneffizienten Begründung und Pflege von Rein- und Mischbeständen sollte das Konzept der Standfläche oder des Standraumes untermauert werden durch die Ressourcenversorgung, die mit dieser Standfläche verbunden ist. Räumlich explizite Messungen von Strahlung, Bodenfeuchte und Nährstoffgehalten in den Baumorganen können eine erste wichtige Grundlage für diesen Übergang bilden (*Abbildung 7b*).

Die Einschätzung und Modellierung der Produktivität richtete sich in Wäldern vor allem auf das oberirdische Stammvolumen (*Abbildung 7c*). Für Fragen der Bioenergie, der Holzqualität, C-Bilanzierung und auch Habitatvielfalt und Biodiversität entsteht ein zunehmender Bedarf an detaillierten Informationen über die gesamten ober- und unterirdischen Baumformen. Insbesondere interessiert die Abhängigkeit der Baumform von der Konkurrenzsituation und Behandlung. Dabei sind die strukturellen Eigenschaften von Baum und Bestand nicht nur aus ökonomischen Gründen von Interesse, sondern auch wegen ihres Effektes auf die Lebensräume und den Artenbesatz in Waldbeständen. Die bisher im Wesentlichen auf Durchmesser und Baumhöhe ausgerichteten Aufnahmen, die dann mit Hilfe von generalisierten Formzahlfunktionen oder Expansionsfaktoren zu Baum- und Bestandesvariablen gelangen, sollten also durch verfeinerte Aufnahmen und Schätzansätze ergänzt werden. Diese sollten berücksichtigen, dass die Morphologie von Bäumen in Rein- und Mischbeständen auch bei gegebenen Durchmesser- und Höhenwerten noch in breitem Rahmen als Reaktion auf die jeweilige Wuchskonstellation streuen kann. Künftige allometrische Funktionen sollten die Masse und Morphologie von Baumorganen deshalb in Abhängigkeit von dendrometrischen Basisgrößen (z. B. d , h) und der individuellen Umgebungssituation (z. B. Bestandesdichte, Artenzusammensetzung) modellieren und schätzen (*Abbildung 7c*).

Langfristige Versuchsflächen werden üblicherweise in Zeitintervallen von mehr als einem Jahr aufgenommen. Die aus Wiederholungsaufnahmen berechneten Zuwachswerte liefern also nur mittlere Aussagen über längere Perioden von z. B. circa 3 bis 15 Jahren (*Abbildung 7d*). Die periodischen Messungen verringern die Aufnahmetätigkeit. Und die Zuwachsraten sind vor allem in älteren Beständen ja auch nur noch so gering, dass angesichts von Messfehlern, jährliche Aufnahmen kaum gerechtfertigt erscheinen. Mehrjährige Intervalle haben allerdings den gravierenden Nachteil, dass die Wirkung externer Effekte, wie z. B. Schädlingsbefall, Witterungsextreme oder Durchforstungen nie direkt mit der Zuwachsreaktion in dem Jahr ihres Auftretens in Verbindung gebracht werden können. Ursache-Wirkungs-Analysen werden durch diese mangelnde Synchronität und Koinzidenz erschwert. Der mittlere periodische Zuwachs repräsentiert leider immer das Ergebnis einer ganzen Faktorenkombination, die umso unüberschaubarer wird, je länger die Dauer der Zuwachsperiode war. Gerade die gegenwärtig immer bedeutsamer werdende Klimafolgen- und Stressforschung erfordert synchron gemessene Zeitreihen an Umwelt und Zuwachswerten. Durch

Ausstattung langfristiger Versuchsflächen mit permanenten Umfangmessbändern (z. B. an ausgewählten Mittelstämmen oder Hohenadl'schen \bar{d}_{-sd} und \bar{d}_{+sd} Bäumen) könnten solche höher auflösenden Messreihen erzeugt werden. Permanente Messbänder reduzieren durch ihren Verbleib am Baum außerdem den Messfehler und können auch in älteren Beständen mit geringen Zuwachsraten genaue jährliche Raten liefern (*Abbildung 7d*).

Das Stammvolumen und der Volumenzuwachs, hergeleitet auf der Basis von Durchmesser, Höhe und Stammform, steht seit der Gründerzeit im Mittelpunkt des Versuchswesen (*Abbildung 7e*). Alle Nachbardisziplinen gründen ihre Analysen dagegen auf Biomasse. Viele forstwissenschaftliche Studien, Gesetzmäßigkeiten und Modelle sind mit ökologischen und biologischen Ansätzen schon alleine wegen der unterschiedlichen Zielvariablen nicht kompatibel. Eine bessere Verbindung zwischen dem dendrometrischen und biologischen Ansatz wäre möglich, wenn zumindest stichprobenweise neben Durchmesser oder Volumen auch die Holzdichte oder sogar Details des Jahrring- und Holzaufbaus gemessen würden. Das wäre auch retrospektiv über Bohrkernentnahmen an Bäumen im Umfangsbereich der Versuchspartellen möglich. Zusammen mit den unter *Abbildung 7c* behandelten allometrischen Modellen der Baummorphologie könnte dadurch der Weg für die Umrechnung des Stammvolumens in Biomasse, Kohlenstoff, oder sogar Vorräte an mineralischen Nährelementen geebnet werden (*Abbildung 7e*).

6.2 Beispiele für die interdisziplinäre Vernetzung

Im Folgenden wird an drei Beispielen skizziert, wie die Annäherung des Langfristigen Ertragskundlichen Versuchswesens an die ökologische und biologische Forschung erreicht werden kann, ohne dass die für das Langfristige Ertragskundliche Versuchswesen elementaren praxisrelevanten Aspekte vernachlässigt werden. Diese Annäherung läuft letztlich auf eine Erweiterung und Untermauerung des klassischen dendrometrischen Untersuchungs- und Auswertungsansatzes um biologische Variablen und mechanistische Aspekte hinaus.

Vorhandene langfristige Versuchsflächen können, zumindest stichprobenartig, mit permanenten Umfangmessbändern ausgestattet werden, um von periodischen zu jährlichen Messwerten zu gelangen. An ausgewählten Bäumen, möglichst im gleich behandelten Umfangsbereich, können Bohrkern für die Analyse der Holzdichte, Frühholz- und Spätholzanteile, Biomasse oder Nährelementgehalte entnommen werden. An Bäumen, die im Rahmen von Durchforstungen entnommen werden, können neben Stammanalysen auch Analysen der Kronen- und Wurzelmorphologie vorgenommen werden. Über Stammfußmessungen und Kronenablotungen hinausgehend, lassen sich durch Messungen von Licht, Bodenfeuchte und Nährelementgehalten in Blättern und Nadeln neben der Standfläche und dem Standraum der Bäume, auch Aussagen über ihre Versorgung mit Ressourcen ableiten. Aufnahmen der biogeochemischen Umweltbedingungen auf den Versuchen und Partellen ebnet, wenn sie auf einer großen Anzahl von Versuchen über ein breites Standortspektrum hinweg erhoben werden, die Datenbasis für eine Leistungsschätzung auf der Basis des Ressourcenangebotes und der Umweltfaktoren. So würde der Weg für eine mechanistische Untermauerung der bisher dendrometrischen Leistungsschätzung geebnet.

Musterbeispiele für die Annäherung an die biologische und ökologische Forschung bilden weiter bestehende langfristige Versuchsflächen, auf denen es gelingt, andere Fachdisziplinen für tiefergehende mechanistische Analysen einzubinden. Beispielsweise wurde die Fichten-Buchen-Mischbestandsversuchsfläche Freising 813 im Kranzberger Forst zu einem Dachexperiment ausgebaut (*Abbildung 8*). Die normal behandelten Partellen aus Fichte, Buche und Fichte-Buche dienen hier als Referenz für Partellen, die überdacht und ausgetrocknet werden. So kann geprüft werden, wie beide Baumarten auf Trockenstress reagieren, ob die Mischung den Trockenstress vermindert und wie eine Erholung nach längerer Austrocknung abläuft. Die interdisziplinäre Beteiligung erlaubt dann eine Instrumentierung, die noch weit über die im vorhergehenden Absatz genannte Ausstattung hinausgeht. Insbesondere wenn praxisrelevante Fragen, wie z. B. die Dürresistenz von Misch-



Abbildung 8: Ein Teil der Fichten-Buchen-Mischbestandsversuchsfläche 813 im Kranzberger Forst wird als interdisziplinärer Austrocknungsversuch weitergeführt. Bei Regen automatisch schließende Dächer halten von Rein- und Mischbeständen den Niederschlag ab, so dass analysiert werden kann, wie Fichte und Buche in Mischung im Vergleich zum Reinbestand auf Trockenheit reagieren

im Vergleich zu Reinbeständen im Mittelpunkt stehen, können solche Experimente wirkungsvoll sowohl zum Verständnis, also auch zur praktischen Bewirtschaftung von Waldbeständen beitragen.

Ein besonderes Potential für die Annäherung an die Grundlagenforschung bieten neue Versuchsfelder, wie sie z. B. in Bayern für die wichtigsten Baumartenmischungen angelegt werden. Zur Klärung der Standort-Leistungsbeziehung werden solche neuen Versuchsfelder von vorneherein über ein breites Standortspektrum gestreut. Auf ein und demselben Standort werden Rein- und Mischbestände aus unterschiedlichen Baumartenkombinationen wiederholt. Dabei werden die Mischungsanteile und Bestandesdichten variiert. Neben dendrometrischen Messungen werden Licht, Wasser und mineralische Nährstoffe räumlich explizit erfasst. Durch ausreichend häufige Wiederholung der Behandlungsvarianten stehen Bäume für die Bestimmung von u. a. Struktur und Morphologie, Holzqualität und Holzinhaltstoffen zur Verfügung. Daraus ergibt sich auf den ausgewählten Standorten ein relativ großer Flächenbedarf, es entfallen dann aber künftig die bisher über viele Standorte in Streulage verteilten unvollständigen Versuchsanlagen, wie sie heute vorherrschen.

7. Danksagung

Dank geht an das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten und die Bayerischen Staatsforsten (BaySF) für die Unterstützung des Projektes W07 „Betreuung der Langfristigen Ertragskundlichen Versuchsfelder“ durch Finanzierung bzw. Bereitstellung von Flächen und Personal.

8. Literatur

- ASSMANN, E. (1961): *Waldtragskunde. Organische Produktion, Struktur, Zuwachs und Ertrag von Waldbeständen*, BLV Verlagsgesellschaft, München, Bonn, Wien, 490 S.
- ASSMANN, E., FRANZ, F. (1963): *Vorläufige Fichten-Ertragstafel für Bayern*. Forstl. Forschungsanstalt München, Inst Ertragskd., 104 S.
- BERGEL, D. (1985): *Douglasien-Ertragstafel für Nordwestdeutschland*. Niedersächs Forstl Versuchsanstalt, Abt Waldwachstum, 72 S.
- BIBER, P., BORGES, J. G., MOSHAMMER, R., BARREIRO, S., BOTEQUIM, B., BRODRECHTOVÁ, Y., BRUKAS, V., CHIRICI, G., CORDERO-DEBETS, R., CORRIGAN, E., ERIKSSON, L O., FAVERO, M., GALEV, E., GARCIA-GONZALO, J., HENGVELD, G., KAVALIAUSKAS, M., MARCHETTI, M., MARQUES, S., MOZGERIS, G., NAVRÁTIL, R., NIEUWENHUIS, M., ORAZIO, C., PALIGOROV, I., PETTENELLA, D., SEDMÁK, R., SMRECEK, R., STANISLOVAITIS, A., TOMÉ, M., TRUBINS, R., TUCEK J., VIZZARRI, M., WALLIN, I., PRETZSCH, H., SALLNÁS, O. (2015): *How Sensitive Are Ecosystem Services in European Forest Landscapes to Silvicultural Treatment?* Forests 2015, 6(5): 1666-1695.
- DEUTSCHER VERBAND FORSTLICHER FORSCHUNGSANSTALTEN (1954): *Arbeitsplan für Anbauversuche mit ausländischen Holzarten*, Schleswig, Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 125. Jg., S. 327-331.
- DEUTSCHER VERBAND FORSTLICHER FORSCHUNGSANSTALTEN (1986a): *Empfehlungen für ertragskundliche Versuche zur Beobachtung der Reaktion von Bäumen auf unterschiedliche Freistellung*, Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 157. Jg., H. 3/4, S. 78-79.
- DEUTSCHER VERBAND FORSTLICHER FORSCHUNGSANSTALTEN (1986b): *Empfehlungen für Freistellungsversuche. Versuchsprogramm Fichte mit Z-Baum-Freistellung 1983*, Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 157. Jg., H. 3/4, S. 79-82.
- DEUTSCHER VERBAND FORSTLICHER FORSCHUNGSANSTALTEN (1988): *Empfehlungen zur ertragskundlichen Aufnahme- und Auswertungsmethodik für den Themenkomplex „Waldschäden und Zuwachs“*. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 159. Jg., H. 7, S. 115-116.
- DEUTSCHER VERBAND FORSTLICHER FORSCHUNGSANSTALTEN (2000): *Empfehlungen zur Einführung und Weiterentwicklung von Waldwachstumssimulatoren*, Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 171. Jg., H. 3, S. 52-57.
- FORRESTER, D.I., PRETZSCH, H. (2015): *Tamm Review: On the strength of evidence when comparing ecosystem functions of mixtures with monocultures*, Forest Ecology and Management, 356, 41-53.
- GADOW VON, K. (1999): *Datengewinnung für Baumhöhenmodelle – permanente und temporäre Versuchsflächen*, Intervallflächen. Centralblatt für das gesamte Forstwesen, 116(1/2): S. 81–90.
- GANGHOFER VON, A. (1881): *Das Forstliche Versuchswesen*, Band I. Augsburg, 1881, 505 S.
- HAUSSER, K., ASSMANN, E., FRANZ, F., GUSSONE, HA., KENNEL, R., MITSCHERLICH, G., SEIBT, G., ULRICH, B., WEIHE, J. (1969) *Empfehlungen für das Planen, Anlegen, Behandeln und Auswerten forstlicher Düngungsversuche*, Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 140 (6): 121-132.
- JOHANN, K. (1993) *DESER-Norm 1993, Normen der Sektion Ertragskunde im Deutschen Verband Forstlicher Forschungsanstalten zur Aufbereitung von waldwachstumskundlichen Dauerversuchen*, Proc Dt Verb Forstl Forschungsanst, Sektion Ertragskunde, in Unterreichenbach-Kapfenhardt, S. 96-104.

- KENK, G., SPIECKER, H., DIENER, G. (1991): *Referenzdaten zum Waldwachstum*. Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK-PEF 82, 59 S.
- LIANG, J., ... PRETZSCH, H., ... REICH, P.B. (2016): *Positive Biodiversity–Productivity Relationship Predominant in Global Forests*, Science, ISSN 0036-8075, in Press.
- NAGEL, J. (1999): *Konzeptionelle Überlegungen zum schrittweisen Aufbau eines waldwachstumskundlichen Simulationssystems für Nordwestdeutschland*, Schr Forstl Fak Univ Göttingen u. Niedersächs Forstl Versuchsanst 128, JD Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main, 122 S.
- NAGEL, J., SPRAUER, S., (2016): *Einheitliches Datenformat zum Austausch von Versuchsflächendaten der Sektion Ertragskunde des DVFFA*, Tagungsband 2016 der Sektion Ertragskunde des Deutschen Verbandes Forstlicher Forschungsanstalten.
- NAGEL, J., SPELLMANN, H., PRETZSCH, H. (2012): *Zum Informationspotenzial langfristiger forstlicher Versuchsflächen und periodischer Waldinventuren für die waldwachstumskundliche Forschung*, Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 183. Jg., 5/6, 111–116.
- NEUMANN, M. UND RÖSSLER, G. (2016): *Anlage, Aufnahme und Auswertung von Dauerversuchen*, BFW-Dokumentation, 22/2016, BFW Bunderforschungszentrum für Wald, Wien, 37 S.
- PRETZSCH, H. (2016): *Ertragstafel-Korrekturfaktoren für Umwelt- und Mischungseffekte*, AFZ-Der Wald, 187. Jg., 14: 47-50.
- PRETZSCH, H. (2010): *Forest dynamics, growth and yield. From measurement to model*, Berlin, Heidelberg, Springer, 688 S.
- PRETZSCH, H. (2006): *Von der Standflächeneffizienz der Bäume zur Dichte-Zuwachs-Beziehung des Bestandes. Beitrag zur Integration von Baum- und Bestandesebene*, Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 177 (10): 188-199.
- PRETZSCH, H. UND RAIS, A. (2016): *Wood quality in complex forests versus even-aged monocultures: review and perspectives*, Wood Science and Technology. 50:845-880.
- PRETZSCH, H., ... BRAVO-OVIEDO, A. (2015a): *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 Forest Res, 134 (5): 927-947.
- PRETZSCH, H., BIBER, P., SCHÜTZE, G., BIELAK, K. (2014a): *Changes of forest stand dynamics in Europe. Facts from long-term observational plots and their relevance for forest ecology and management*, Forest Ecology and Management 316: 65-77.
- PRETZSCH, H., BIBER, P., SCHÜTZE, G., UHL, E., RÖTZER, TH. (2014b): *Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870*, Nat. Commun. 5:4967 doi:10.1038/ncomms5967.
- PRETZSCH, H., ... ZINGG, A. (2010): *Comparison between the productivity of pure and mixed stands of Norway spruce and European beech along an ecological gradient*, Annals of Forest Science, 67 (7): 712.
- PRETZSCH, H., BIBER, P., DURSKEY, J. (2002): *The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation*, For. Ecol. Manage. 162: 3-21.
- PRETZSCH, H., UTSCHIG, H., BACHMANN, M. (2002): *Innovation durch Kontinuität – Das ertragskundliche Versuchswesen in Bayern*, Mitteilungen aus der Bayerischen Staatsforstverwaltung. Heft 51, Band II, S. 425–443, in: BLEYMÜLLER, H.; GUNDERMANN, E.; BECK, R. (Hrsg.) (2002): *250 Jahre Bayerische Staatsforstverwaltung – Rückblicke, Einblicke, Ausblicke – Bayerische Staatsforstverwaltung*, Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, München, 677 S.

- PREUHSLER, T. (1990): *Einfluß von Grundwasserentnahmen auf die Entwicklung der Waldbestände im Raum Genderkingen bei Donauwörth*, Forstl. Forschungsber., München 101, 95 S.
- PREUHSLER, T. (1979): *Ertragskundliche Merkmale oberbayerischer Bergmischwald-Verjüngungsbestände auf kalkalpinen Standorten im Forstamt Kreuth*, Forstl. Forschungsber., München 45, 372 S.
- SCHOBER, R. (1961): *Zweckbestimmung, Methodik und Vorbereitung von Provenienzversuchen*, Allgemeine Forst- und Jagdzeitung (2): S. 29–38.
- SCHOBER, R. (1967): *Buchen-Ertragstafel für mäßige und starke Durchforstung*, In: Schober, R. (Hrsg.) (1972) *Die Rotbuche 1971*. Schr Forstl Fak Univ Göttingen u Niedersächs Forstl Versuchsanst 43/44, JD Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main, 333 S.
- SPELLMANN, H., WAGNER, S., NAGEL, J., GUERICKE, M., GRIESE, F. (1996): *In der Tradition stehend, neue Wege beschreitend*, Forst und Holz 51 (11), S. 363–368.
- VEREIN DEUTSCHER FORSTLICHER VERSUCHSANSTALTEN (1873): *Anleitung für Durchforstungsversuche*, in: GANGHOFER A., (Hrsg.): *Das Forstliche Versuchswesen*, Bd. II, Schmid'sche Buchhandlung, 1884, S. 247-253.
- VEREIN DEUTSCHER FORSTLICHER VERSUCHSANSTALTEN (1902): *Beratungen der vom Vereine Deutscher Forstlicher Versuchsanstalten eingesetzten Kommission zur Feststellung des neuen Arbeitsplanes für Durchforstungs- und Lichtungsversuche*, Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 78. Jg., S. 180-184.
- WIEDEMANN, E. (1923): *Zuwachsrückgang und Wuchsstockungen der Fichte in den mittleren und unteren Höhenlagen der sächsischen Staatsforsten*, Kommissionsverlag W Laux, Tharandt, 181 S.
- WIMMENAUER, K. (1914): *Zur Frage der Mischbestände*, Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 90: 90-93.
- ZIMMERLE, H. (1949): *Zur Mischbestandsfrage*, Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 121: 20-29.