

---

# Überlegungen zur Weiterentwicklung des Ertragskundlichen Versuchswesens in Bayern

Enno Uhl, Christian Kölling und Hans Pretzsch

**Schlüsselwörter:** Klimawandel, Mischbestand, Produktivität, Resilienz, kombinierte Versuchsanlagen, multifaktorielles Versuchsdesign

---

**Zusammenfassung:** Das seit mehr als 140 Jahren bestehende Ertragskundliche Versuchswesen in Bayern hat in hohem Maße zum Verständnis von Waldökosystemen beigetragen und liefert kontinuierlich wichtige Erkenntnisse zum Wachstum von Bäumen und Waldbeständen als Grundlage für die Entwicklung von Bestandsbehandlungs- und Pflegekonzepten. Der Klimawandel und der waldbauliche Perspektivenwechsel von der Reinbestandswirtschaft zu strukturierten Mischbeständen werfen neue Fragen zur standortabhängigen künftigen Leistungsfähigkeit, Stabilität und Widerstandsfähigkeit der Waldbestände auf, denen durch angepasste Versuchsansätze Rechnung getragen werden muss. Der Beitrag fasst hierzu erste konzeptionelle Überlegungen zusammen.

---

## Wandel und Beständigkeit im Ertragskundlichen Versuchswesen

Einst mit der Zielsetzung begründet, die Forstwissenschaft auf eine quantitative Grundlage zu stellen und waldbauliches Wissen nicht auf lokalen, standörtlichen Zufällen beruhen zu lassen, ist das Ertragskundliche Versuchswesen in Bayern bisher seinen Ansprüchen voll gerecht geworden. Dass der ertragskundliche Datenfundus seit nunmehr 140 Jahren kontinuierlich und regelmäßig anwächst, ist hierbei ein eindeutiges Indiz, aber mit Sicherheit kein geeigneter Maßstab. Vielmehr ist es der Zugewinn an ökologischem Systemwissen, der sich aus den Versuchsflächen speist und vom Erfolg des Versuchswesens zeugt, indem er in den vergangenen hundert Jahren der Forstwissenschaft und Forstwirtschaft einen enormen Fortschritt beschert hat. Ertragskundliche Versuche unterscheiden sich von rein wissenschaftlichen Experimenten durch ihren hohen Praxisbezug, der sich sowohl in den hinterlegten Versuchsfragen als auch in der Versuchskonzeption niederschlägt und nach einer Möglichkeit sucht, die gefundenen Ergebnisse verallgemeinern zu können. So wurden beispielsweise aus der Beobachtung

der Wuchsdynamik unterschiedlich aber definiert behandelte Bestände auf den Versuchsflächen Ertrags tafeln entwickelt, die bis in die heutige Zeit als waldbauliche Planungs- und Steuerungsinstrumente Anwendung finden (z.B. Schwappach 1912 und 1929; Wiedemann 1949; Schober 1975). Grundlegende Wuchsgesetzmäßigkeiten von Einzelbäumen und Waldbeständen, beispielsweise der Zusammenhang zwischen Grundflächenhaltung und Bestandsproduktivität, wurden entschlüsselt (Assmann 1961) und unterstützen die Entwicklung baumartenspezifischer Handlungsrichtlinien. Auch die steuernden Algorithmen in modernen Waldwachstumssimulatoren, die für Szenariorechnungen eingesetzt werden, wurden mit Daten des Versuchswesens parametrisiert. Dabei ist das Ertragskundliche Versuchswesen sicherlich kein Selbstläufer. Aufgrund der natürlichen Alterung der Versuchsbestände und Schädigungen z.B. durch Windwurf, Schneebruch oder Insektenfraß scheiden immer wieder Versuchsflächen aus und müssen gegebenenfalls nach Abwägung ihrer Erfordernis durch neue ersetzt werden.

Aber das bloße Vorhandensein langfristiger Versuchsflächen, ihre kontinuierliche Vermessung und Auswertung garantieren noch nicht, dass sie ihren Zweck auch dauerhaft erfüllen. Da die Anlage von Versuchsflächen stets mit einer konkreten forstlichen Fragestellung verknüpft ist, ist ihre Verwendung für neu entstehende weitergehende Untersuchungen meist nur eingeschränkt möglich. Deshalb ist es auch Aufgabe des Versuchswesens, an neue Fragestellungen angepasste Versuchskonzepte und -anlagen zu entwerfen und umzusetzen und somit diesen Forschungszweig beständig weiter zu entwickeln. Musterbeispiele dafür lassen sich in der Historie des Versuchswesens anhand verschiedener Phasen von Neuanlagen von Versuchsserien häufig finden (Abbildung 1). Genannt seien die Anlagenschwerpunkte von Anbau- und Provenienzversuchen ab etwa 1950 und Düngerversuche ab etwa 1960. Diese wurden notwendig, weil Fragen der Produktivitätssteigerung von Waldbeständen durch Einbringung wuchskräftiger Herkünfte heimischer oder nicht heimischer Baumarten oder durch die aktive Standortverbesserung durch Düngung jeweils in den Fokus

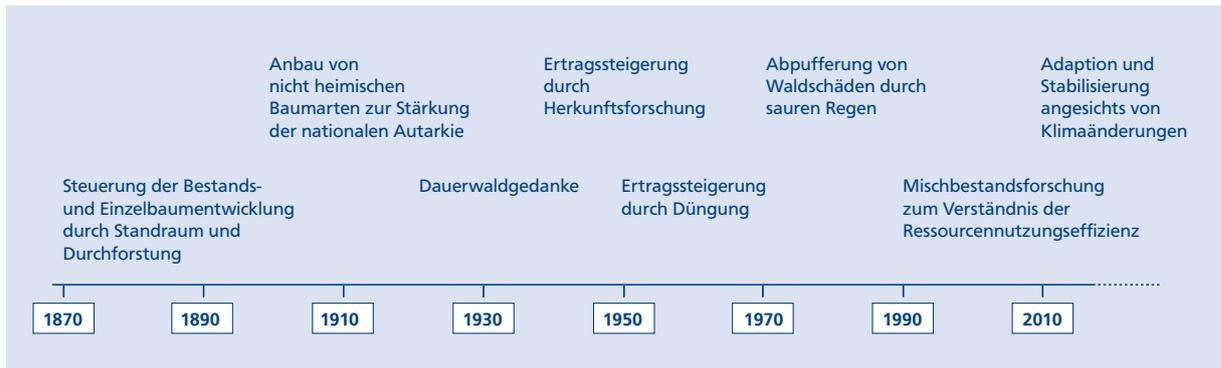


Abbildung 1: Zeitliche Erweiterung der Versuchsfragen im Ertragskundlichen Versuchswesen in Bayern.

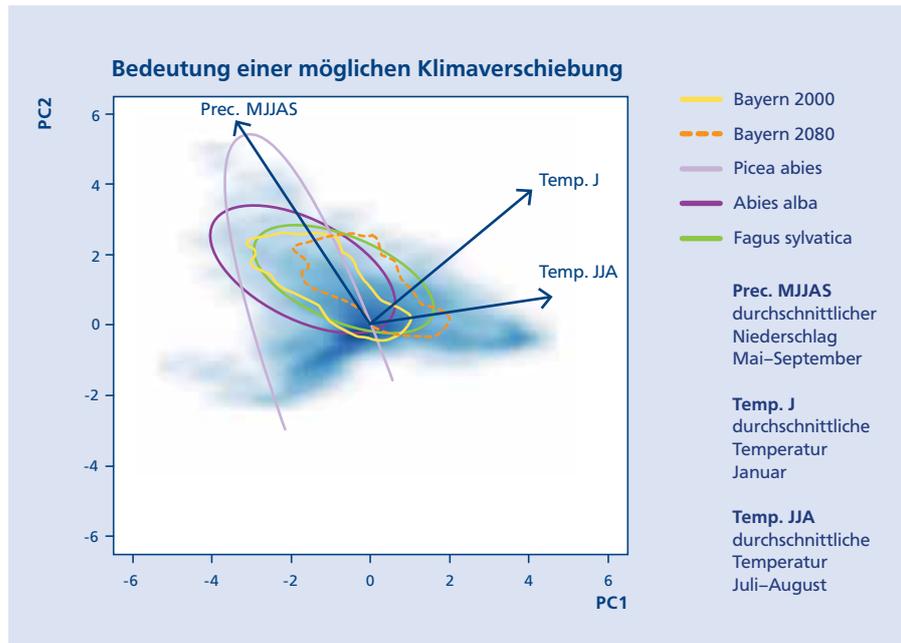
rückten und mit bestehenden Versuchsflächen nicht beantwortet werden konnten. Aber nicht nur forstliche Fragestellungen erfuhren im vergangenen Jahrhundert eine stete Erweiterung. Auch Erhebungsverfahren und statistische Auswertungsmethoden wurden beständig weiter entwickelt. So haben ertragskundliche Versuchsflächen durch die in den letzten Jahrzehnten entwickelten und auf großer Fläche eingerichteten Inventuren, zum Teil in Form permanenter Stichprobenverfahren konzipiert, sozusagen Konkurrenz erhalten. Es stellt sich auch die Frage, ob Versuchsflächendaten durch diese, zudem mit hoher Flächenrepräsentanz versehenen, Informationen ersetzt werden könnten. Da jedoch im Rahmen von Inventuren die Bestandsbehandlung nicht dokumentiert wird, sind Rückschlüsse auf die Wechselwirkungen zwischen steuernden Eingriffen und Baum- bzw. Bestandswachstum nicht möglich. Gerade die Analyse von Ursache-Wirkungs-Beziehungen ist ein zentrales Anliegen des Versuchswesens, wo Wachstum unter kontrollierten Bedingungen abläuft. Dennoch haben beide Datenquellen ihre spezifischen Vorteile, die zusammen mit deren synergistischen Effekten beispielsweise in Nagel et al. (2012) ausführlich diskutiert wurden.

Grundsätzlich hat sich also an der Zweckbestimmung des Ertragskundlichen Versuchswesens seit seiner Gründung nichts Wesentliches verändert. Großregional wirksame Veränderungen mit starkem Einfluss auf Wälder und Forstwirtschaft lassen jedoch die Bedeutung von langfristigen ertragskundlichen Beobachtungsflächen steigen und erfordern gleichzeitig eine Weiterentwicklung der Versuchskonzepte.

### Aktuelle Herausforderungen an das Ertragskundliche Versuchswesen

Gegenwärtig prägen zwei zentrale, eng im Zusammenhang stehende Themenkomplexe die forstwissenschaftliche Diskussion um die zukünftige Zusammensetzung und Bewirtschaftung unserer Wälder. Aufgrund des Klimawandels und der damit möglichen Standortveränderungen sind Auswirkungen auf die langfristige standörtliche Eignung der einzelnen, bisher am Waldaufbau beteiligten Baumarten zu erwarten (z. B. Kölling et al. 2007). In Abbildung 2 ist die Bedeutung einer möglichen Klimaverschiebung für die Baumarten Fichte, Tanne und Buche beispielhaft dargestellt. Der aktuelle europäische Klimaraum wird dabei durch die blaue Punktwolke beschrieben. Sie ist das Ergebnis einer Transformation echter Klimawerte (Hijmans et al. 2005) auf Hauptkomponenten. Diese wurden aus den drei wichtigsten wachstumssteuernden Klimagrößen (Durchschnittstemperatur der Monate Juni bis August, Niederschlagssumme der Monate Mai bis September sowie der durchschnittlichen Januartemperatur) ermittelt. Die erste Hauptkomponente (PC1) beschreibt dabei im Wesentlichen den Grad der Wärme, die zweite (PC2) repräsentiert einen Feuchtegradienten. Der bayerische Klimaraum nimmt aufgrund seiner regionalen Unterschiede von den warmen Hügellagen Unterfrankens bis hin zu den höchsten Lagen der Bayerischen Alpen ein relativ weites Segment ein (gelbe Linie). Die Verschiebung des bayerischen Klimaraums auf Basis des Klimaszenarios B2A für das Jahr 2080 (IPCC 2007) wird durch die orange-gestrichelte Linie in Abbildung 2 verdeutlicht. Es zeigt sich im Wesentlichen eine Zunahme der Sommertemperaturen (Verschiebung in positiver Richtung der PC1-Achse). Für die Baumarten Fichte, Tanne und Buche sind die Klimabereiche ihrer derzeitigen Verbreitung, ermittelt auf Basis der europäischen Level-I-Flächen, durch farbige Ovale skizziert (Fichte:

Abbildung 2: Ausprägung des europäischen Klimaraumes über die ersten beiden Hauptkomponenten PC1 und PC2. Der aktuelle bayerische Klimaraum ist mit der gelben Linie eingezeichnet. Mögliche Verschiebungen aufgrund des Klimawandels (ermittelt auf Basis des Klimaszenarios B2A für das Jahr 2080) sind durch die orange gestrichelte Linie wiedergegeben. Für die Baumarten Fichte (*Picea abies*: flieder), Tanne (*Abies alba*: violett) und Buche (*Fagus sylvatica*: grün) sind die Klimabereiche ihrer derzeitigen Verbreitung eingezeichnet. Weitere Erläuterungen im Text.



flieder, Tanne: violett, Buche: grün) eingezeichnet. Während der Klimabereich der Baumart Buche auch im für 2080 projizierten Klima in Bayern nicht verlassen wird, rückt das Klima für die Fichte weiter in ungünstige Bedingungen. Insgesamt wird sich die Relevanz einzelner Baumarten in der Waldzusammensetzung verschieben. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage nach der Plastizität und Anpassungsfähigkeit von Baumarten in Bezug auf sich ändernde Wuchsbedingungen sowie nach der Anpassungsnotwendigkeit von Waldbeständen zur nachhaltigen Sicherung der Waldfunktionen.

In den letzten Jahrzehnten hat sich, zunächst unabhängig vom Klimawandel, ein Perspektivenwechsel im waldbaulichen Leitbild von der reinbestandsbetonten Bewirtschaftung hin zu naturnahen, gemischten Wäldern vollzogen. Dieser findet nicht nur Niederschlag in neuen Behandlungsrichtlinien, sondern zeigt bereits jetzt deutliche Spuren im aktuellen Waldaufbau in Bayern. Gerade die Eigenschaft von Mischwäldern im Vergleich zu Reinbeständen, Störungsereignisse besser abpuffern und Risiken durch klimabedingte Schadereignisse reduzieren zu können (Griess und Knoke 2012), betont die Bedeutung dieses Richtungswechsels.

Aus ertragskundlicher Sicht ergibt sich im Rahmen der Mischbestands- und Klimafolgenforschung eine Reihe an Fragen mit hoher Relevanz für die waldbauliche Praxis. Produktionsökologisch interessiert zunächst die *Leistungsfähigkeit* gemischter Bestände. Neben

interspezifischer Konkurrenz beeinflussen im Mischbestand auch weitere Faktoren, beispielsweise Nischenkomplementarität (Tiefwurzler/Flachwurzler) und Prozesse gegenseitiger Förderung (Basenpumpe sei als Beispiel für Faszilitation genannt) die Bestandsproduktivität. Dabei führt die Wechselwirkung zwischen Konkurrenz und Faszilitation, je nach Standortgüte und Baumartenmischung, zu unterschiedlichen Auswirkungen auf die Produktivität der beteiligten Arten und des Gesamtbestands. Auf ungünstigen Standorten kommt es beispielsweise in Mischbeständen aus Fichte und Buche in der Regel zu einer höheren Produktivität als in entsprechenden Reinbeständen. Im Wesentlichen wird hier die Fichte durch die Beimischung der Buche begünstigt. Auf gut versorgten Standorten profitiert hingegen die Buche durch die



Abbildung 3: Umbau fichtenreicher Bestände mit Laubböhlern im Stadtwald Traunstein Foto: L. Steinacker

Kombination mit der Fichte (Pretzsch et al 2010). Auch für Mischungen aus Eiche und Buche liegt die Massenproduktion häufig über der der Reinbestände, wobei der Effekt stärker hervortritt, je schlechter die Standorte mit Ressourcen versorgt sind (Pretzsch et al. 2013). Für zahlreiche andere Baumartenmischungen fehlen dazu bisher entsprechende Ergebnisse. Detailliertere Kenntnisse über die Ertragsleistung von Mischbeständen sind aber nicht nur aus forstbetrieblichen Gründen notwendig, sondern auch für die Einschätzung der Senkenwirkung von Wäldern im Rahmen der CO<sub>2</sub>-Bilanzierung.

Eng verbunden mit der Frage nach der Leistungsfähigkeit, insbesondere unter dem Gesichtspunkt der langen forstlichen Produktionszeiträume für Wälder in Mitteleuropa, ist zwangsläufig die Frage nach der *Stabilität* und *Widerstandsfähigkeit* von Beständen. Bestandsstabilität gewährt Planungssicherheit und garantiert eine kontinuierliche Erfüllung der Waldfunktionen. Wie reagieren Mischbestände auf Störungen, beispielsweise Trockenheit? Kann die Zuwachsresilienz bestimmter Baumarten, deren Anbauisiko durch den Klimawandel steigt, durch Mischung mit anderen Baumarten gegebenenfalls erhöht werden? Abbildung 4 zeigt ein Beispiel der unterschiedlichen Ausprägung des Zuwachsverhaltens von Buche in Abhängigkeit von der beigemischten Baumart. Dargestellt ist das Resistenz- und Resilienzverhalten während und nach dem extre-

men Trockenereignis 1976 im Verhältnis zum Zuwachs davor. Dabei zeigt die Buche in Mischung mit Eiche eine höhere Resistenz und Resilienz als in Mischung mit der Fichte bzw. im Reinbestand. Dass dies nicht zu Lasten beispielsweise der Eiche geht, zeigt die Abbildung auf der rechten Seite, wo sich die Reaktion der Eiche zwischen dem Mischbestand und dem Reinbestand nicht unterscheidet (Pretzsch et al. 2013).

Bereits August von Ganghofer postulierte im 19. Jahrhundert, als er zusammen mit anderen Forstwissenschaftlern das Ertragskundliche Versuchswesen konzipierte (von Ganghofer 1877, 1881), die Berücksichtigung des *Standorteffekts* als tragendes Element der forstlichen Ertragsforschung. Nur durch die Variation der Wuchsbedingungen zwischen ansonsten gleichen Versuchsanlagen lassen sich beispielsweise Muster der intra- und interspezifischen Ressourcenverteilung, die Plastizität von Baumarten hinsichtlich der Wuchsbedingungen und die gegenseitigen Wechselwirkungen von Bäumen auf Baum- und Bestandesebene in Abhängigkeit der Standortbedingungen (z. B. del Rio et al. 2014) in ausreichendem Maße aufdecken. Sie erlauben den Brückenschlag zur Kausalanalytik und die Ableitung verallgemeinerbarer, generell gültiger Wuchsgesetzmäßigkeiten. Die Frage nach dem Einfluss von Standortfaktoren auf Wuchsdynamik und Widerstandsfähigkeit von Waldbeständen erlangt vor dem Hintergrund des Klimawandels neue Brisanz.

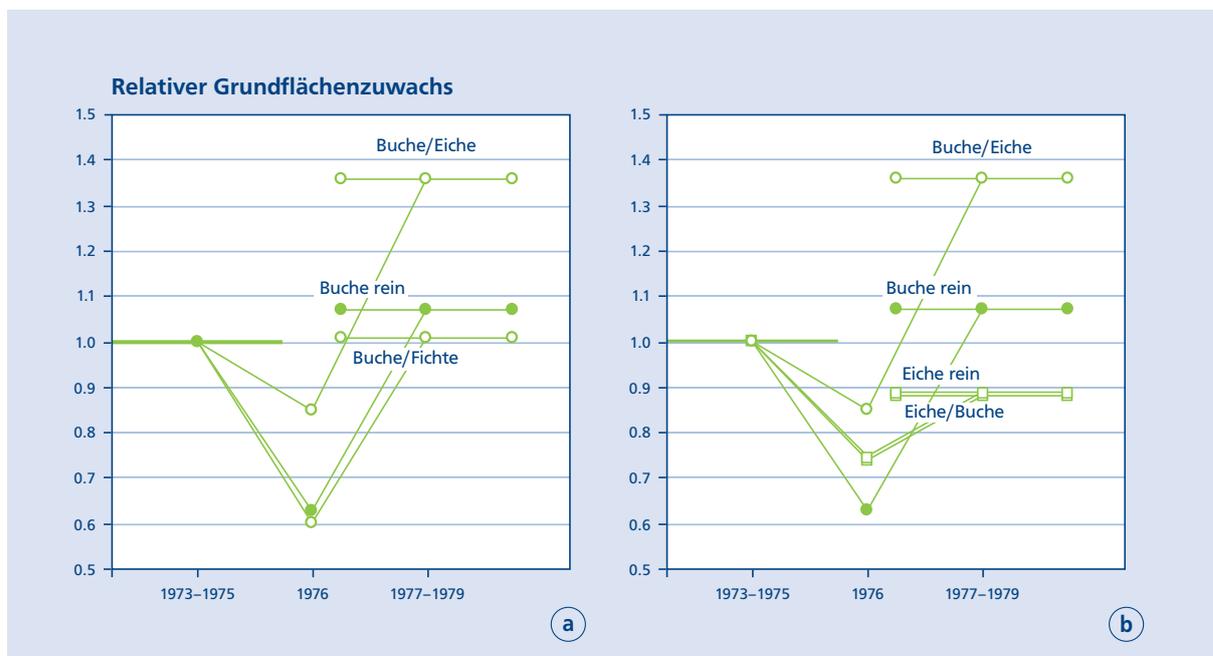


Abbildung 4: Resistenz und Resilienzverhalten auf Trockenheitsereignisse von Buche im Reinbestand und in Mischung mit Fichte oder Eiche (a), sowie von Buche und Eiche jeweils im Rein- und im Mischbestand (b) (nach Pretzsch et al. 2012, verändert).

### Baum- und versuchsartenbezogene Schwerpunkte neuer Versuchsanlagen

Aus den vorher genannten Überlegungen heraus und unter Einbezug des aktuellen Bestands an Versuchsflächen im bayerischen Ertragskundlichen Versuchswesen ergibt sich ein Bedarf an neuen, langfristigen ertragskundlichen Versuchsanlagen zu verschiedenen Baumarten bzw. Baumartenmischungen. Dieser als vorläufige Einschätzung zu betrachtende Bedarf (Tabelle 1) wurde im Rahmen mehrerer Arbeitstreffen mit Vertretern der forstlichen Betriebsführung, aus der Verwaltung und aus der Wissenschaft eruiert.

Das Hauptaugenmerk konzentriert sich zunächst auf Versuchsflächen zur Baumart *Buche*. Die Buche spielt aus standortökologischer Sicht eine zentrale Rolle für den bayerischen Raum (Walentowski et al. 2001). Sie entfaltet auf dem überwiegenden Teil der bayerischen Standorte gegenüber allen anderen Baumarten eine hohe Konkurrenzkraft. Auch in Verbindung mit den aktiven Waldumbaumaßnahmen in allen Waldbesitzarten der letzten Jahrzehnte hat deshalb der Buchenanteil in der Verjüngung stark zugenommen. Vermutlich wird sich das Anbaurisiko der Buche aufgrund des Klimawandels bis auf wenige Ausnahmen in Bayern nicht zu ihren Ungunsten verschieben. Die Buchenbewirtschaftung wird sich aber nicht allein auf die Begründung und Erziehung von Buchenreinbeständen beschränken. Regional bildet die Buche beispielsweise mit Eiche, Edellaubhölzern oder in Form des Bergmischwalds natürliche, stabile Mischbestände aus. Aus Sicht der Diversifizierung des Holzangebots ist zudem eine angemessene Beteiligung ertragsstarker Baumarten in Buchenbeständen sinnvoll. Hierfür spricht einerseits die bestandsstabilisierende Wirkung der Buche. Andererseits kann die flächenbezogene Produktivität entsprechender Mischbestände aus Buche und Nadelbaumarten auf vielen Standorten gegenüber Reinbeständen (z.B. Pretzsch et al. 2012) gesteigert

werden. Die Beobachtung und Analyse der Wuchsdynamik von Buchenrein- und Buchenmischbeständen ist deshalb von hohem aktuellem und künftigem Interesse.

Die Baumart *Eiche* mit ihrer höheren Trockenheitstoleranz im Vergleich zur Buche wird in der planarkollinen Höhenstufe angesichts des Klimawandels regional in Bayern eine stärkere Bedeutung erfahren. Je nach Wasserverfügbarkeit werden Eichen-Buchen-Mischbestände bzw. Eichen-Hainbuchen-Wälder eine standortgerechte und stabile Waldaufbauform sein. Zahlreiche, in den letzten Jahrzehnten durch Sturmwurf entstandene Freiflächen wurden insbesondere im südbayerischen Raum mit starker Beteiligung der Eiche wieder aufgeforstet. Gerade für diese in vielen Fällen gut wasserversorgten Standorte existiert aufgrund fehlender Versuchsanlagen wenig gesichertes Wissen über Entwicklungsdynamik und Steuerungsmöglichkeit.

Auch wenn ihr Flächenanteil kontinuierlich zurückgeht, spielt die *Kiefer* noch eine wichtige Rolle im Waldaufbau und in der Holzwirtschaft in Bayern. Auf großer Fläche weisen heute die ehemaligen Kiefernreinbestände auch aufgrund der allgemeinen Standortverbesserung eine Unter- und Zwischenschicht aus anderen Baumarten (z. B. Fichte) auf. Um auch in Zukunft die Kiefer in gewissem Umfang am Waldaufbau zu beteiligen und zeitnah Entwicklungspfade und Behandlungsmöglichkeiten der Kiefern-mischbestände zu untersuchen, sind langfristige Versuchsanlagen zu diesem Thema notwendig.

Baumart/Waldtyp	Bestandstyp	Beispiele für Mischungstypen
Buche	Mischbestand Reinbestand	Bu-Fi, Bu-Ta, Bu-Elbh, Bu-Dgl, Bu-Lä
Eiche	Mischbestandsversuch	Ei-Bu, Ei-Hbu
Bergmischwald	Mischbestandsversuch	Fi-Ta-Bu-(Elbh)
Kiefer	Mischbestandsversuch	Kie-Bu, Kie-Fi, Kie-Dgl
nicht heimische Baumarten	Mischbestand Reinbestand	Bu-Dgl, Bu-RLb, Bu-Jlä

Tabelle 1: Mittelfristiger Bedarf an baumarten- und versuchsartenbezogenen Versuchsflächen.

Der *Bergmischwald* hat im bayerischen Alpenraum als natürliche Waldaufbauform eine flächenrelevante Bedeutung. Die Mischbestände aus Fichte, Tanne und Buche gewähren ein hohes Maß an Schutzfunktion. Der Klimawandel kann hier zu einer Verschiebung des Konkurrenzgefüges der beteiligten Arten führen, die sich auf Produktivität und Schutzfähigkeit auswirkt. Gegebenenfalls kann es auch zu einer Entmischung bestehender Bestände kommen (Kölling und Ewald 2013). Bestehende Versuchsanlagen im Bergmischwald spiegeln die Auswirkungen einer Klimaverschiebung auf die Bestandsentwicklung nur langfristig wider und erlauben kaum kurzfristige Aussagen über die waldbauliche Anpassungsnotwendigkeit zur Aufrechterhaltung der Multifunktionalität. In diesem Zusammenhang erscheint es notwendig, Versuche in existierenden Beständen aus Fichte, Tanne und Buche auf solchen Standorten neu anzulegen, die bereits heute für den Alpenraum vorhergesagte, künftige Klimabedingungen aufweisen. Legen wir die gemäß Abbildung 2 transformierten Klimawerte für das Szenario B2A für das Jahr 2080 für den Bergmischwald zugrunde, so ergibt

sich eine aktuelle Suchkulisse (Abbildung 5). Sie umfasst weite Teile des Tertiären Hügellands, des Vorderen Bayerischen Waldes und Teile der südlichen Frankenalb.

Ertragskundliche Versuchsanlagen zu *nicht heimischen Baumarten* liegen in Bayern nur in geringem Umfang vor. Es existieren lediglich Versuche mit Douglasie, Roteiche, Esskastanie und verschiedenen Nussbaumarten. Die Mehrzahl der Versuchsanlagen wurde jedoch als Anbau- bzw. Provenienzversuch in Form von Reinbeständen konzipiert. Häufig wurde die Beobachtung nach wenigen Jahren wieder eingestellt. Nur in wenigen Fällen wurden Durchforstungs- oder Mischbestandsversuche mit standörtlicher Variabilität angelegt, die es erlauben, die Flexibilität und Leistungsfähigkeit der Baumarten zu untersuchen. Dies gilt auch für heimische Baumarten unterschiedlicher regionaler bzw. überregionaler Herkunft. Die Eignung der an spezielle Standortbedingungen angepassten Herkünfte für die Anpassung der Wälder an den Klimawandel kann derzeit auf Basis von ertragskundlichen Versuchsanlagen nur begrenzt beantwortet werden.

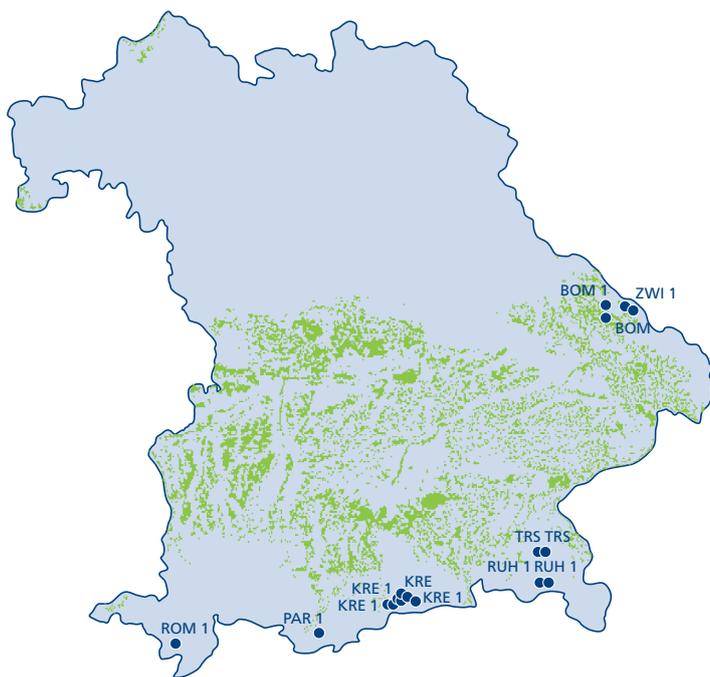


Abbildung 5: Standorte in Bayern mit klimatischen Wuchsbedingungen, die für das derzeitige Verbreitungsgebiet des Bergmischwalds auf Basis des Klimaszenarios erwartet werden (grün). Bestehende Versuchsfelder zu Bergmischwäldern sind durch blaue Punkte markiert.

## Neue Ansätze in der Versuchskonzeption für die Mischbestandsforschung

### Versuchsplan

Ausgehend von den skizzierten Herausforderungen liegt ein Schwerpunkt der Weiterentwicklung des Versuchswesens auf der Konzeption neuer Versuchsanlagen zu Mischbeständen. Diese sollten die Analyse der Mischungsinteraktionen zwischen den beteiligten Arten und deren Abhängigkeit vom Standort ermöglichen. Mischungseffekte steuern die Raumbesetzung und Ressourcenerschließung bzw. -nutzungseffizienz von Bäumen und beeinflussen dadurch die Produktivität und die Strukturierung der Bestände. Entsprechende Versuchsaufbauten sind deshalb weitaus komplexer als herkömmliche Reinbestandsversuche. Sie müssen die Artkombination und die Mischungsintensität als zusätzliche Versuchsfaktoren integrieren. Die Mischungsintensität kann grundsätzlich als eine Kombination aus dem Mischungsverhältnis und der Mischungsform aufgefasst werden und beschreibt die Nachbarschaftsverhältnisse und Konkurrenzsituation der Einzelbäume. Gleichzeitig müssen die Versuche Varianten mit unterschiedlichen Bestandsdichten beinhalten. Letztere erlauben Rückschlüsse auf die Wechselwirkungen zwischen bodengebundenen Ressourcen und Lichtangebot und deren Effekte auf die

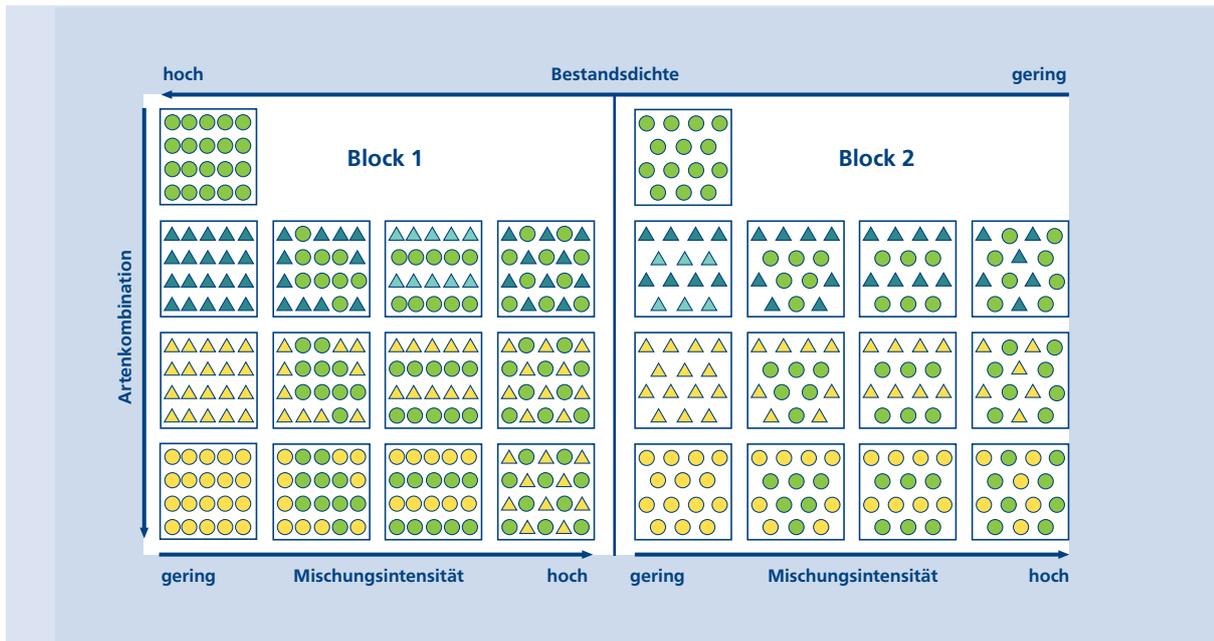


Abbildung 6: Beispiel einer möglichen, dreifaktoriellen Versuchsanlage zur Untersuchung von Mischungs- und Durchforstungseffekten in Rein- und Zwei-Arten-Mischbeständen aus Buche (dunkelgrüne Kreise) und Nadelbaumarten (Dreiecke) bzw. anderen Laubbaumarten (Kreise) mit den Versuchsfaktoren Bestandsdichte (hoch – niedrig), Baumartenkombination (Arten 1–4) und Mischungsintensität (ohne, Gruppen-Einzelmischung).

Ressourcenverteilung und Zuwachseleistung, welche zur Ableitung waldbaulicher Steuerungsmöglichkeiten für Mischbestände genutzt werden können.

In Abbildung 6 ist ein möglicher Versuchsaufbau am Beispiel von Buchenmischbeständen schematisch dargestellt. Das Konzept repräsentiert einen dreifaktoriellen Versuchsaufbau unter Berücksichtigung der Faktoren Baumart, Mischungsintensität und Bestandsdichte. Zur Begrenzung der Versuchsglieder sollten zunächst Mischungen aus zwei Arten untersucht werden. Die Buche wird dabei mit verschiedenen Nadel- bzw. Laubbaumarten kombiniert. Bedeutende Mischbaumarten sind beispielsweise Fichte, Tanne, Lärche, Eiche und Edellaubbaumarten. Aber auch Mischungen zwischen Buche und nicht heimischen Baumarten (z. B. Douglasie und Riesenlebensbaum) können integriert werden. Jede beteiligte Baumart wird dabei in unterschiedlichen Intensitätsstufen mit der Buche gemischt. Die Mischungsintensitäten müssen einen Gradienten von gering (Reinbestand) bis hoch abdecken. Aufgrund der unterschiedlichen lichtökologischen Eigenschaften von Baumarten kann der Grad der maximalen Mischungsintensitäten zwischen den Baumartenkombinationen variieren. Die Reinbestandspartellen für jede beteiligte Baumart sind auch als Referenz zur Bewertung des Mischungseffekts notwendig. Die Variation der Bestandsdichte umfasst unbehandelte Versuchsglieder, die

die ungestörte Bestandsentwicklung widerspiegeln, sowie verschiedene Abstufungen in der Grundflächenhaltung. Durch diese Art der Versuchsanlage wird die Möglichkeit eröffnet, Rein- und Mischbestandsversuche in einer Versuchsanlage zu kombinieren. Gleichzeitig deckt sie ein breites Spektrum der oben genannten (Tabelle 1) Baumarten und Baumartenmischungen ab.

Solche Versuchsanlagen stellen hohe Ansprüche an die Auswahl geeigneter Versuchstandorte. Wegen der Variantenvielfalt entsteht je nach Anzahl beteiligter Arten ein hoher Flächenbedarf. Bei einer Versuchsanlage mit drei Mischbaumarten zur Buche, jeweils vier Mischungsintensitäten und drei Dichtestufen ergibt sich ein Bedarf von 39 Parzellen. Eine Wiederholung der Parzellen zur Steigerung der statistischen Absicherung und unter der Maßgabe einer Mindestflächengröße für eine Parzelle von 0,16 ha ergibt sich ein Flächenbedarf von ca. 12,5 ha. Aus Gründen der Flächenverfügbarkeit und Frostgefährdung sind Anlagen auf kalamitätsbedingten Freiflächen bzw. Erstaufforstungen als wenig erfolgversprechend einzustufen. Auch aus Gründen der Praxisnähe erscheinen Anlagen in mit Buche flächig verjüngten Altbeständen, die je nach Versuchsanlage mit entsprechenden Mischbaumarten angereichert werden, als zielführender.

### **Messprogramm und Auswertungsorientierung**

Um die Mischungsinteraktionen kausalanalytisch interpretieren zu können, muss auf den Versuchsflächen eine intensivere und kontinuierlichere Erfassung der Versorgung bzw. der Ausstattung mit Ressourcen erfolgen, als es bisher auf den Versuchsflächen üblich war. Dazu muss zunächst die Ausgangssituation hinsichtlich der Nährstoffausstattung und der Faktoren, die den Wasserhaushalt beeinflussen, durch eine detaillierte, bodenkundliche Analyse der Standorteigenschaften in Verbindung mit Nadelspiegelwerten festgehalten werden. Da das Wechselspiel zwischen bodengebundenen Ressourcen und Lichtgenuss je nach Baumartemischung die Konkurrenzverhältnisse und Mischungseffekte während der Bestandsentwicklung beeinflussen kann, müssen entsprechende Parameter in regelmäßigen Abständen erhoben werden. Dazu gehören standardmäßig die Klimawerte Temperatur und Niederschlag, aber auch regelmäßige Wiederholungsmessungen der Nadelspiegelwerte und der Lichtsituation, beispielsweise durch Blattflächenmessungen.

Mischungseffekte wirken zunächst auf die Entwicklung von Einzelbäumen. Sie schlagen sich in der Ressourcenverteilung auf einzelne Bestandsglieder und deren Strukturentfaltung nieder. Die Auswertung der Mischbestandsversuche erfordert deshalb einen einzelbaumorientierten Auswertungsansatz. Dies bedingt, dass auch eine detaillierte Erfassung von Dimensions- und Zuwachsgrößen auf Basis von Einzelbäumen erfolgen muss. Die Einmessung der Stammfußkoordinaten und die regelmäßige Erfassung der Kronenausdehnung der Einzelbäume ist zwingend notwendig, um die jeweiligen Konkurrenzverhältnisse beurteilen zu können. Die Entwicklung der Kronengröße dient auch zur Beurteilung der Raumbesetzung durch die Einzelbäume. Das bestandsbezogene Wachstum und Zuwachsverhalten kann dann aus den Einzelbaumergebnissen abgeleitet werden.

### **Standortwahl und Versuchsstreuung**

Die Flächen für Versuchsanlagen, wie sie oben beschrieben wurden, müssen homogene Standortbedingungen aufweisen. Zwar können durch heutige, statistische Auswertungsmethoden, durch zufällige kleinstandörtliche Variation entstehende Effekte auf die Einzelbaumentwicklung isoliert werden, große Standortunterschiede innerhalb der Versuchsanlage würden jedoch die Kausalbeziehungen zwischen den Faktoren Baumart, Mischungintensität und Bestandsdichte überprägen und die Interpretation der Ursachen-Wirkungs-Beziehung verhindern.

Die Versuchsanlagen müssen aber in Form von Versuchsserien die Standortbedingungen als weiteren Faktor im Versuchskonzept aufnehmen. Dies wird dadurch erreicht, dass die einzelnen Versuchsanlagen auf unterschiedlichen Standorten wiederholt werden. Der Standortgradient sollte dabei gute und ungünstige Standorte für die jeweiligen Baumarten umfassen. Da Mischungseffekte in Wechselbeziehung mit der Ressourcenversorgung stehen (del Rio et al. 2014), kann nur durch den Einbezug der Standortbedingungen beurteilt werden, ob sich die Mischungseffekte eher zugunsten oder zuungunsten einer Baumart auswirken. Erst aus dieser Erkenntnis heraus lassen sich standortübergreifende Regeln ableiten, die als Grundlage für die Entwicklung von Pflegekonzepten gebraucht werden.

In Abbildung 2 wurde gezeigt, dass sich die Standortbedingungen für Teile von Bayern aufgrund des Klimawandels deutlich verschieben können und dann für einzelne Baumarten nachteilige Wuchsbedingungen aufweisen. Es macht deshalb Sinn, Versuche auch auf ungünstigen Standortbedingungen anzulegen. Denn dann werden Aussagen über die Anpassungsfähigkeit von Baumarten an sich ändernde Standortbedingungen möglich, und es lässt sich beurteilen, ob eine Verschlechterung der Wuchsbedingungen durch Mischung abgepuffert werden kann. Hierbei sollten auch Standorte ins Auge gefasst werden, auf denen die Baumarten bisher nicht zu finden sind.

### **Perspektiven**

Vor 140 Jahren wurde der Grundstein für ein forstliches Versuchswesen gelegt, das Forstwissenschaft und Forstpraxis seitdem mit wertvollem Datenmaterial und Ökosystemverständnis versorgt. Die Gründer taten dies auch in dem Wissen, dass sie selbst wenig Nutzen daraus ziehen würden, sondern folgten bei ihrem Ansinnen der am gesellschaftlichen Gemeinwohl orientierten, langfristigen Vision, das Wissen über die Wälder und ihre Steuerungsmöglichkeit dauerhaft und kontinuierlich zu mehren. In diesem Sinne sind alle Beteiligten, von der Forstwissenschaft, den Waldbesitzern und -bewirtschaftern und von der Forstpolitik, aufgerufen, dieses Erbe inhaltlich und institutionell weiter zu führen und weiter zu entwickeln. Nur so garantieren wir künftigen Generationen die Möglichkeit, zeitnah Antworten auf drängende und gegenwärtige Fragen der Forstwirtschaft zu finden.

Unter Federführung des Lehrstuhls für Waldwachstumskunde der Technischen Universität München erarbeitet derzeit eine Arbeitsgruppe aus Vertretern des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, dem Bayerischen Amt für forstliche Saat- und Pflanzenzucht und dem Lehrstuhl für Waldbau ein Konzept für die zukunftsorientierte Weiterentwicklung des langfristigen forstlichen Versuchswesens. Der vorliegende Aufsatz berichtet zum ersten Mal über die laufenden Arbeiten.

Die Umsetzung neuer ertragskundlicher Versuchsanlagen, wie sie hier beschrieben wurden, ist ein ehrgeiziges Ziel und fordert einen langen Atem und ein hohes Maß an Bereitschaft aller Beteiligten. Die skizzierten Versuchsanlagen sind flächenintensiv. Gleichzeitig sind die Anlage und kontinuierliche Betreuung und Auswertung der Flächen mit einem großen finanziellen und personellen Aufwand verbunden.

Im Unterschied zu historischen Versuchsanlagen müssen künftige Versuche einen interdisziplinären und länderübergreifenden Ansatz verfolgen. Es gilt, Schnittstellen und Synergien mit langfristigen Versuchsanlagen anderer Fachbereiche wie Waldbau, Forstgenetik oder Waldernährungslehre stärker zu nutzen. Die am Ort der Versuchsanlage wirkenden Standortkräfte sind mitsamt ihrer räumlichen Varianz und zeitlichen Dynamik in entsprechenden Kooperationen zu erfassen und in einen überregionalen Kontext zu stellen. Aufgrund der natürlichen Ausstattung einzelner Länder mit Standorttypen wird in den wenigsten Fällen innerhalb einer Zuständigkeit eine ausreichende Amplitude an Standorten abgebildet werden können, die zur Abschätzung der Variabilität einer Baumart notwendig ist. Dies macht konzertierte Versuchsserien über Ländergrenzen hinweg erforderlich.

## Literatur

- Assmann, E. (1961): Waldertragskunde. Organische Produktion, Struktur, Zuwachs und Ertrag von Waldbeständen. BLV Verlagsgesellschaft, München, Bonn, Wien, 490 S.
- Ganghofer, v. A. (1877): Das forstliche Versuchswesen. München, im Selbstverlag des Herausgebers, B. 1, H. 1, 176 S.
- Ganghofer, v. A. (1881): Das Forstliche Versuchswesen. Band I. Augsburg, 505 S.
- Griess, V.; Knoke, T. (2012): Bioeconomic modeling of mixed Norway spruce – European beech stands: economic consequences of considering ecological effects. *Eur J Forest Res* 132, S. 511–522
- Hijmans, R.J.; Cameron, S.E.; Parra, J.L.; Jones, P.G.; Jarvis, A. (2005): Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25 (15); S. 1965–1978
- IPCC (2007): Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Working Group I Report. The Physical Science Basis. Geneva
- Kölling, C.; Ewald, J. (2013): Bergmischwälder im Klimawandel: Ausgangslage, Gefährdung, Anpassungsmaßnahmen. *Jahrbuch des Vereins zum Schutz der Bergwelt*, München, 78. Jg., S. 45–56
- Kölling, C.; Zimmermann, L.; Walentowski, H. (2007): Klimawandel: Was geschieht mit Buche und Fichte? *AFZ-DerWald* 11, S. 584–588
- 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, S. 111–116
- Pretzsch, H.; Bielak, K.; Block, J.; Bruchwald, A.; Dieler, J.; Ehrhart, H.P.; Kohnle, U.; Nagel, J.; Spellmann, H.; Zasada, M.; Zingg, A. (2013): Productivity of mixed versus pure stands of oak (*Quercus pretraea* (Matt.) Liebl. and *Quercus robur* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) along an ecological gradient. *European Journal of Forest Research*, 132 (2), S. 263–280
- Pretzsch, H.; Block, J.; Dieler, J.; Dong, P.H.; Kohnle, U.; Nagel, J.; Spellmann, 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, S. 712
- Pretzsch, H.; Schütze, G.; Uhl, E. (2013): Resistance of European tree species to drought stress in mixed versus pure forests: evidence of stress release by inter-specific facilitation. *Plant Biology* 15(3); S. 483–495
- Rio del, M.; Schütze, G.; Pretzsch, H. (2014): Temporal variation of competition and facilitation in mixed species forests in Central Europe. *Plant Biology* 16(1), S. 166–176

Schober, R. (1975): Ertragstabeln wichtiger Baumarten. J. D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a. M., 154 S.

Schwappach, A.F. (1912): Ertragstabeln der wichtigeren Holzarten. Verlag Neumann, Neudamm, 75 S.

Schwappach, A.F. (1929): Ertragstabeln der wichtigeren Holzarten in tabellarischer und graphischer Form. Verlag Neumann, Neudamm, 73 S.

Walentowski, H.; Gulder, H.J.; Kölling, C.; Ewald J.; Türk, W. (2001): Die regionale natürliche Waldzusammensetzung Bayerns. Freising, LWF Wissen 32, 99 S.

Wiedemann, E. (1949): Ertragstabeln der wichtigen Holzarten bei verschiedener Durchforstung. Verlag M. & H. Schaper, Hannover, 100 S.

**Keywords:** climate change, mixed stand, productivity, resilience, combined yield trials, multi-factorial design

---

**Summary:** Since more than 140 years the Bavarian network of long term growth and yield trials has been contributing substantially to forest ecosystem understanding. It continuously provides relevant information on growth dynamics of single trees and forest stands. Now, climate change and the modification of silvicultural perspectives preferring mixed stands over pure stands raise new issues concerning site dependent productivity, stability and resilience of forests. These issues require new concepts in trial design. The article summarises first conceptual considerations in that context.

---