

Praxis – Information

NR. 58-2025

Forschungsergebnisse zu Waldökologie,
Genetik und Baumartenwahl



Waldfonds
Republik Österreich

Eine Initiative des Bundesministeriums
für Land- und Forstwirtschaft,
Klima- und Umweltschutz,
Regionen und Wasserwirtschaft

BFW BUNDES
FORSCHUNGS
ZENTRUM
FÜR WALD

Impressum

ISSN 1815-3895

Die Abkürzung BFW und der Kurzname „Bundesforschungszentrum für Wald“ werden stellvertretend für den Langnamen „Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft“ verwendet.

Nachdruck mit Quellenangabe gestattet.

Die Urheberrechte von namentlich nicht gekennzeichneten Fotos und Grafiken liegen beim Erstautor.

PRESSERECHTLICH FÜR DEN INHALT VERANTWORTLICH:

DI Dr. Peter Mayer

Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum
für Wald, Naturgefahren und Landschaft
Seckendorff-Gudent-Weg 8
1131 Wien, Österreich
Tel. +43-1-87838 0

REDAKTION:

Christian Lackner, Silvio Schüler

LAYOUT:

Gerald Schnabel

DRUCK:

Print Alliance HAV Produktions GmbH, Druckhausstraße 1, 2540 Bad Vöslau

BEZUGSQUELLE:

Bibliothek des BFW
Tel. +43-1-87838 1216
E-Mail: bibliothek@bfw.gv.at
<https://shop.bfw.ac.at>

Vorwort

Der österreichische Wald steht vor großen Veränderungen: Steigende Temperaturen und längere Trockenperioden durch den Klimawandel stellen die Forst- und Holzwirtschaft vor neue Herausforderungen. Wissenschaftliche Erkenntnisse aus Genetik, Forstpflanzenproduktion und Waldökologie sind daher dringend nötig, um die Widerstandsfähigkeit unserer Wälder und deren nachhaltige Bewirtschaftung zu sichern.

Die vorliegende BFW-Praxisinformation 58, eine Kooperation zwischen BFW, BOKU University und dem österreichischen Walddialog, fasst zentrale Forschungsergebnisse zu „klimafitten Wäldern“ des Waldfonds zusammen. Sie behandelt wichtige Fragen der Waldbewirtschaftung: Wie können wir die genetische Vielfalt unserer Wälder nutzen, um sie an veränderte Klimabedingungen anzupassen? Welche Baumarten – von heimischen bis zu alternativen – eignen sich besonders für die Zukunft? Und wie lassen sich wissenschaftliche Erkenntnisse in die Praxis umsetzen, um eine nachhaltige und klimaresiliente Bewirtschaftung zu gewährleisten?

Die Ergebnisse dokumentieren die Bedeutung von genetischen Ressourcen, Saatgutqualität und Herkunftswahl für die Entwicklung klimafitter Wälder. Mit neuen Methoden der Genomforschung und der Hochleistungsphänotypisierung von Sämlingen konnte die Anpassungsfähigkeit wichtiger Baumarten wie Eiche, Tanne, Fichte und Co. untersucht werden. Zudem werden klimatische Analogregionen als Entscheidungshilfe für die Baumartenwahl vorgestellt und die Potenziale von Mischbeständen, Wildobst und alternativen Baumarten für die Steigerung der Biodiversität und Resilienz diskutiert. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der standortgerechten Bewirtschaftung, etwa bei der Holzernte.

Als Teil der Maßnahme 8 des Waldfonds des BMLUK sollen die hier vorgestellten Erkenntnisse dazu beitragen, um die Wälder nicht nur zu erhalten, sondern sie aktiv für die Herausforderungen des Klimawandels zu stärken.

Viele Freude beim Lesen und beim Umsetzen im Wald,

Peter Mayer, Mario Pesendorfer und Silvio Schüler



Waldfonds Republik Österreich

Eine Initiative des Bundesministeriums
für Land- und Forstwirtschaft,
Klima- und Umweltschutz,
Regionen und Wasserwirtschaft

Die hier vorgestellten Projekte wurden im Rahmen des Waldfonds, einer Initiative des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft, gefördert.

Der Waldfonds wurde als Rettungs- und Zukunftspaket für Österreichs Wälder im Jahr 2020 beschlossen und umfasst ein Gesamtbudget in der Höhe von 430 Mio. Euro.

Die Förderungen erfolgten im Rahmen der Maßnahme 8: Forschungsmaßnahmen zum Thema „Klimafitte Wälder“.

Ziel dieser Maßnahme ist es, wissenschaftliche Grundlagen und praxisnahe Lösungen zu entwickeln, um Österreichs Wälder besser auf die Herausforderungen des Klimawandels vorzubereiten.

Insgesamt wurden im Rahmen der Maßnahme 8 bereits 10 Calls durchgeführt und es werden Förderungen für Projekte im Gesamtausmaß von ca. 39 Millionen Euro gewährt.

Weitere Informationen zum Waldfonds und seinen Maßnahmen finden Sie unter:

www.waldfonds.at/

www.bmluk.gv.at/themen/wald/waldfonds/massnahme_8.html

Vorwort PETER MAYER, MARIO PESENDORFER, SILVIO SCHÜLER -----	3
Szenarien zur Entwicklung der steirischen Forst- und Holzwirtschaft bis 2100 SILVIO SCHÜLER, FORFORESTINNOVATION-PROJEKTTEAM -----	6
Diversität, Produktivität und Wertleistungspotenziale von laubbaumdominierten Mischbeständen im nördlichen Alpenvorland JEANINE JÄGERSBERGER, EDUARD HOCHBICHLER -----	9
WaldFIT: Herkunftswahl und Pflanzverfahren MARCELA VAN LOO, WALDFIT-PROJEKTTEAM -----	12
Alternative Baumarten zur Kompensation von Klimafolgen in Österreich: Untersuchungen an der Libanon-Zeder RAPHAEL KLUMPP, LENA GRIEBELING, SIMON JANSEN -----	15
Elsbeere, Speierling und Wildbirne als Chance für den Waldbau und die Biodiversität HEINO KONRAD, LILA AFIFI, SAMUEL ASPALTER, WILDOBST-PROJEKTTEAM -----	17
Saatgut für Österreichs klimafitte Wälder der Zukunft GEORG GRATZER, MARIO PESENDORFER, FORSEE-PROJEKTTEAM -----	20
Waldbewirtschaftung – ein Spagat zwischen Bodengesundheit und Wirtschaftlichkeit MAXIMILIAN BEHRINGER, KLAUS KATZENSTEINER, HOBO-TEAM -----	23
Konsequenzen des Klimawandels auf die Baumartenmischung des Wienerwaldes aufgrund historischer Trockenstressreaktionen TORSTEN W. BERGER, PROJEKTTEAM -----	26
Waldzukunft in Österreich: Identifikation von klimatischen Analogregionen und Baumartenwahl KATHARINA ENIGL, MATTHIAS SCHLÖGL, KONRAD MAYER, CARINA HEILING, SILVIO SCHÜLER -----	29
Die Klimafit-Gene der Tanne JONATHAN FEICHTER -----	32
Standardisiertes genetisches Monitoring für Eiche und Fichte THAPASYA VIJAYAN, CHRISTINA RUPPRECHT, SEBASTIAN SONNENBERG, BERTHOLD HEINZE, HARALD MEIMBERG -----	35
Genetische Vielfalt von Eichenarten: Schlüssel zur Klimaanpassung BERTHOLD HEINZE, AGATHE HUREL, AGLAIA SZUKALA, EICHEFIT-PROJEKTTEAM -----	37

Szenarien zur Entwicklung der steirischen Forst- und Holzwirtschaft bis 2100

SILVIO SCHÜLER
THERESA BOIGER
ESZTER BUCHERT
FORFORESTINNOVATION-PROJEKTTEAM

Der Klimawandel stellt Forst- und Holzwirtschaft vor bisher ungeahnte Herausforderungen. Die Baumartenwahl ist eine der zentralen Anpassungsmaßnahmen. Doch welche Folgen hat der Waldumbau auf die Leistungen der zukünftigen Wälder und was bedeutet das aus ökologischer, ökonomischer und gesellschaftlicher Sicht? Das Projekt ForForestInnovation hat diese Fragen erstmalig auf Basis der dynamischen Waldtypisierung für die Steiermark untersucht.

Wichtige Infos zu ForForestInnovation

- Waldentwicklung bis zum Jahr 2100 auf Basis der dynamischen Waldtypisierung und Waldinventurergebnissen simuliert.
- 10 Pilotflächen eingerichtet.
- 580 Waldbewirtschafter:innen bei 14 Innovationskreisläufen (bei Online-Events und auf den Pilotflächen) über klimafitten Waldumbau informiert.
- 80 Schüler:innen von landwirtschaftlichen Fachschulen über klimafitten Waldumbau informiert.
- Mehr als 1.000 Posts on Social Media erreichten insgesamt rund eine halbe Million Waldbewirtschafter:innen und am Wald Interessierte.

Das Bundesforschungszentrum für Wald (BFW) entwickelt und betreut seit langem den Waldwachstumssimulator CALDIS. Dieser simuliert auf Basis von Daten der Waldinventur das Wachstum und die Entwicklung österreichischer Wälder für wissenschaftliche Fragen und internationale Berichte. Im aktuellen Projekt wurde dieses Modell erstmal in eine 3D-Visualisierung umgesetzt, die Waldbesitzer:innen und breiter Öffentlichkeit zugänglich ist.

Unter www.forforestinnovation.com kann man erleben, wie sich die steirischen Wälder bis zum Ende des 21. Jahrhunderts verändern und welche Auswirkung das auf die Leistungen des Waldes hat.

Zukunft des Dauerwaldes in der Steiermark

Die Grundlage aller Projektaktivitäten bilden Szenarien für Waldumbau und dessen Bewirtschaftung. Eine Anpassungsmaßnahme ist die kleinflächige Bewirtschaftung von Plenterwäldern. Diese Wälder gelten als sehr resilient, da der vorhandene Jungwuchs im Falle einer Störung schnell die Lücken schließt und die Waldfunktionen sichert. Der Erfolg der Plenterwaldbewirtschaftung hängt jedoch vom Vorkommen der Weißstanne und anderer schattentoleranter Arten, einer geringen Hangneigung und dem Vorhandensein eines dichten Forststraßennetzes ab. Analysen zeigen, dass derzeit bis zu 28 % der steirischen Wälder für Plenterwirtschaft geeignet sind. Mit dem Klimawandel sinkt diese Fläche auf 19–26 % und verschiebt sich von tieferen in mittlere und hohe Lagen, weil sich die Standortbedingungen für die plenterwaldfähigen Baumarten verändern.

Klimafitter Nadel- oder Laubmischwald?

Für die klimafitte Baumartenwahl dienten die Ergebnisse der dynamischen Waldtypisierung im Klimawandelszenario RCP8.5 als Grundlage für zwei Umwandlungsszenarien:

1. klimafitter Laubmischwald (75 % klimafittes Laubholz + 25 % klimafittes Nadelholz);
2. klimafitter Nadelmischwald (75 % klimafittes Nadelholz + 25 % klimafittes Laubholz).

Die wichtigsten Baumarten sind die Laubhölzer Stieleiche, Hainbuche, Birke und Buche und die Nadelhölzer Weißkiefer, Weißstanne, Lärche, Douglasie und Fichte. Aufgrund der veränderten Wachstumsbedingungen im Klimawandel sanken in allen aktiven Bewirtschaftungsszenarien (Business as usual, Laubholz-Szenario und Nadelholz-Szenario) die Vorräte. Den geringsten Rückgang verzeichnete der klimafitte Nadelmischwald (Abb. 1).

Kosten und Erträge von Waldumbau

Um die Kosten des Waldumbaus und die zu erwartenden Holzerlöse besser abzuschätzen, wurden die Waldbaukosten für die Umwandlung sowie die zu erzielenden Erlöse durch

den Holzverkauf erfasst. Sie berücksichtigen dabei Kostenfaktoren wie die Aufforstung von neuen Baumarten, den Schutz vor Wildverbiss und Jungwuchs- und Dickungspflege. Für die Erlöse wurden u.a. Ernteverfahren, die baumarten spezifischen Holzsortimente sowie die Holzpreise erfasst. Die Waldbaukosten liegen in beiden Umwandlungsszenarien deutlich über den Kosten der bisherigen Bewirtschaftung. Bei den Erlösen und dem Deckungsbeitrag I bewegen sich alle aktiven Bewirtschaftungsszenarien auf einem ähnlichen Niveau, da die Erntemengen hauptsächlich aus den bereits heute etablierten Wäldern stammen. Allerdings gibt es deutliche Unterschiede zwischen den Wuchsgebieten.

Konsequenzen des Waldumbaus für die Wertschöpfungskette

Um die weitreichenden Konsequenzen von Klimawandel und Waldumbau für die Wertschöpfungskette der Forst- und Holzwirtschaft zu verstehen, simulierten die Forscher:innen die Szenarien mit dem Holzmarktmodell FOHOW. In allen Szenarien steigt die Nachfrage nach Holzprodukten. Das Angebot bleibt jedoch durch die Ressourcen aus dem Wald begrenzt, was die Gefahr birgt, dass die Nachfrage, insbesondere nach Nadelhägerundholz, nicht mehr vollständig gedeckt werden kann. Eine zusätzliche Nachfrage, etwa aus dem Holzbau, verschärft dieses Problem.

Im Laubholz-Szenario steigt zwar das Laubholzaufkommen, doch die Knappheit an Nadelholz kann aufgrund der langen Zeiträume des Waldumbaus nicht ausgeglichen werden. Zudem fehlen in vielen Bereichen der Holzwirtschaft bisher stoffliche Verwendungen für Laubholz. Dies macht Innovationen im Bereich der Laubholznutzung notwendig.

Pilotflächen und zukünftige Waldwirtschaftspläne

Die wissenschaftliche Analyse des Waldumbaus endet aber nicht bei Simulationen und 3D-Visualisierungen. Sie wurde explizit mit den Waldbesitzer:innen der Steiermark diskutiert und erprobt: Grundlage dafür waren zehn Pilotflächen in allen Wuchsgebieten der Steiermark (Abb. 2). Auf diesen Flächen hatten die Waldbesitzer bereits Anpassungsmaßnahmen umgesetzt, was den persönlichen Austausch mit den Bewirtschaftenden der Regionen erleichterte. Der klimafitte Waldumbau stellt die forstliche Planung jedoch vor neue Herausforderungen. Deshalb fand ein breiter Fachdialog zum „WALD:wirtschaftsplan der Zukunft“ statt, bei dem in vier Veranstaltungen die Anforderungen an zeitgemäße Waldwirtschaftspläne formuliert wurden.

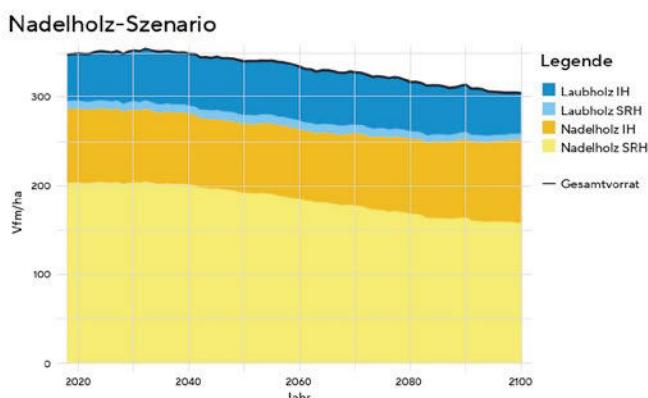
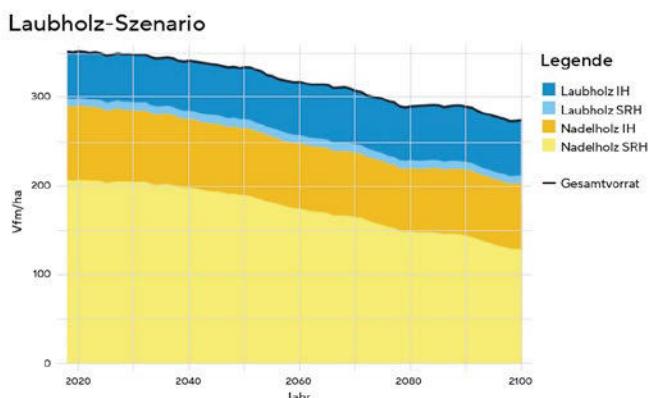
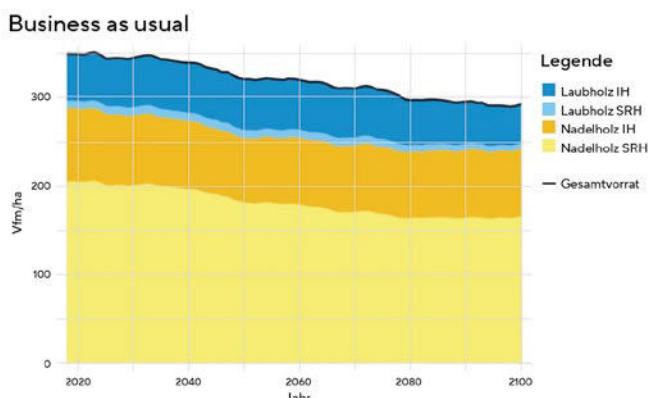


Abb. 1: Vorratsentwicklung

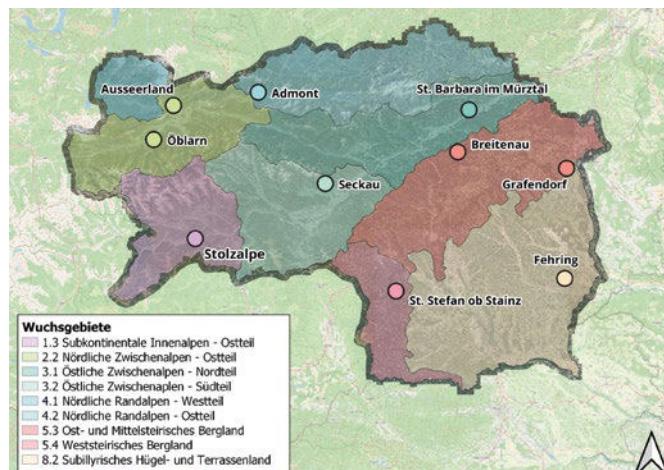


Abb. 2: Übersicht über die ForForestInnovation-Pilotflächen

Projektteam:

Dr. Silvio Schüler¹, Dr. Theresa Boiger², Eszter Buchert¹, DI Stefan Ebner¹,
DI Claudia Fetscher¹, DI Elena Haeler¹, DI Maximilian Handlos³, DI Renate
Haslinger⁴, Univ.-Prof. Dr. Hubert Hasenauer⁵, DI Magdalena Langmaier¹,
Priv.-Doz. Dr. Thomas Ledermann¹, Dr. Mathias Leiter⁵, Dr. Gerhard Pelz-
mann⁶, Mag. Alexander Pinter⁷, DI Jana Pirolt⁸, DI Thomas Puster⁷,
DI Gerald Rotleitner⁸, Univ.-Prof. Dr. Tobias Stern², Florian Winter¹,
Fö. Anna Zettl³

¹ BFW, ² Universität Graz, ³ Waldverband Steiermark, ⁴ BIOSA Austria,

⁵ BOKU University, ⁶ Landwirtschaftskammer Steiermark,

⁷ Holzcluster Steiermark, ⁸ Land & Forstbetriebe Österreich



Ausblick auf den steirischen Wald im Jahr 2051



Teilnehmer eines Impuls-Innovationsevents bei der Besichtigung der Pilotflächen

Diversität, Produktivität und Wertleistungspotenziale von laubbaumdominierten Mischbeständen im nördlichen Alpenvorland

JEANINE JÄGERSBERGER

EDUARD HOCHBICHLER

Die Frühjahrstürme „Vivian“ und „Wibke“ verursachten 1990 europaweit rund 100 Mio. m³ Schadholz. In Österreich fielen zirka 8 Mio. Festmeter an – besonders im nördlichen Alpenvorland und in den nördlichen Randalpen. Diese Katastrophe nutzte man, um ehemals fichtendominierte Bestände in Mischbestände umzuwandeln. Im Rahmen eines Waldfonds-Projekts wurde untersucht, was sich 30 Jahre nach der Wiederbewaldung getan hat.

Wichtige Schlussfolgerungen

- Das ursprüngliche Ziel von 1991/92, mindestens 30 % Laubbaumanteil zu erreichen, wurde erfolgreich umgesetzt.
- Die Standorte im Alpenvorland zeigen hohes natürliches und wirtschaftliches Leistungsvermögen für die Laubbaumbewirtschaftung. Mit gezielter Pflege können die angestrebten Zieldurchmesser von mindestens 60 cm erreicht werden.
- Der weitere Erfolg hängt entscheidend von der konsequenten Förderung der Zukunftsbäume (Z-Bäume) ab, insbesondere durch rechtzeitige Durchforstung und Astung.
- In nadelholzdominierten Beständen muss der Laubbaumanteil erhalten und gesteigert werden.

Förderungen und ein spezielles Beratungsprogramm halfen, die Schadflächen mit standortgerechten Baumarten und einem entsprechenden Laubholzanteil wieder aufzuforsten. Das Ziel war, einen Laubbaumanteil auf den Windwurfflächen von mindestens 30 % anzustreben.

Eine erste Evaluierung der Flächen in Nieder- und Oberösterreich im Jahr 2002 ergab:

- 29 Baumarten auf den Flächen,
- 55 % Laubbaumanteil, 45 % Nadelbaumanteil (davon 34 % Fichte),
- vielfach jedoch mangelhafte Laubholzqualität, wodurch die Wertholzproduktion gefährdet war.
- Darauf aufbauend wurden Mischungsregulierungen und Astungen empfohlen.

Zielsetzung und Methodik

Das Projekt hatte das Ziel, in den 31-jährigen Beständen eine Wiederholungsinventur in Nieder- und Oberösterreich sowie eine Erstaufnahme und Anlage von Demonstrationsflächen in Salzburg, Tirol und Vorarlberg durchzuführen. Die For-scher:innen analysierten vorrangig das standörtliche-baumartenspezifische Wuchsverhalten (Produktivität), die Beziehungen zwischen Bestandes- und Baummerkmalen (Konkurrenz und Stammqualität), die Diversität der Bestände sowie deren Erfolgspotenziale. Sie leiteten waldbauliche Empfehlungen für die Behandlung der Bestände ab und passten bei Bedarf bisherige Strategien an.

Im Rahmen des Projektes nahmen die For-scher:innen je 40 Flächen in Nieder- und Oberösterreich (470 Stichprobenflächen) wiederholt auf und legten 10 Demonstrationsflächen in Salzburg (2), Tirol (2) und Vorarlberg (6) an.

Ergebnisse

Die Untersuchungsflächen in Niederösterreich weisen im Bestandesalter von 31 Jahren eine mittlere Stammzahl von 1032 N/ha und in Oberösterreich von 886 N/ha auf. Bei einer mittleren Grundfläche von 35 m²/ha schwankt der mittlere Vorrat zwischen 335 und 352 Vfms/ha. In den Beständen wurde eine stehende Totholzmenge von 1 bis 2,3 Vfms/ha vorgefunden, ein liegender Totholz- und Stockholzvorrat im Rahmen von 5,6 m³/ha und 4,8 m³/ha. Die mittleren Gesamt-wuchsleistungen in beiden Bundesländern betragen 379 Vfms/ha (NÖ) und 437 Vfms/ha (OÖ) und somit errech-nen sich mittlere Gesamzuwächse von 12 bis 14 Vfms/ha/y.

Baumartenzusammensetzung

Abbildung 1 zeigt, dass in Nieder- und Oberösterreich der Mischbaumartenanteil, geprägt von den Laubäumen, aktuell bei rund 30 bis 40 % liegt, und die Fichte die dominierende Baumart ist. Insgesamt ist die Baumartenvielfalt (21 Baumarten) in beiden Bundesländern hoch. Der laubholzdominierte Mischungstyp nimmt im Mittel einen Flächenanteil von 21 % ein, während der Laub-Nadelbaummischtyp einen Anteil

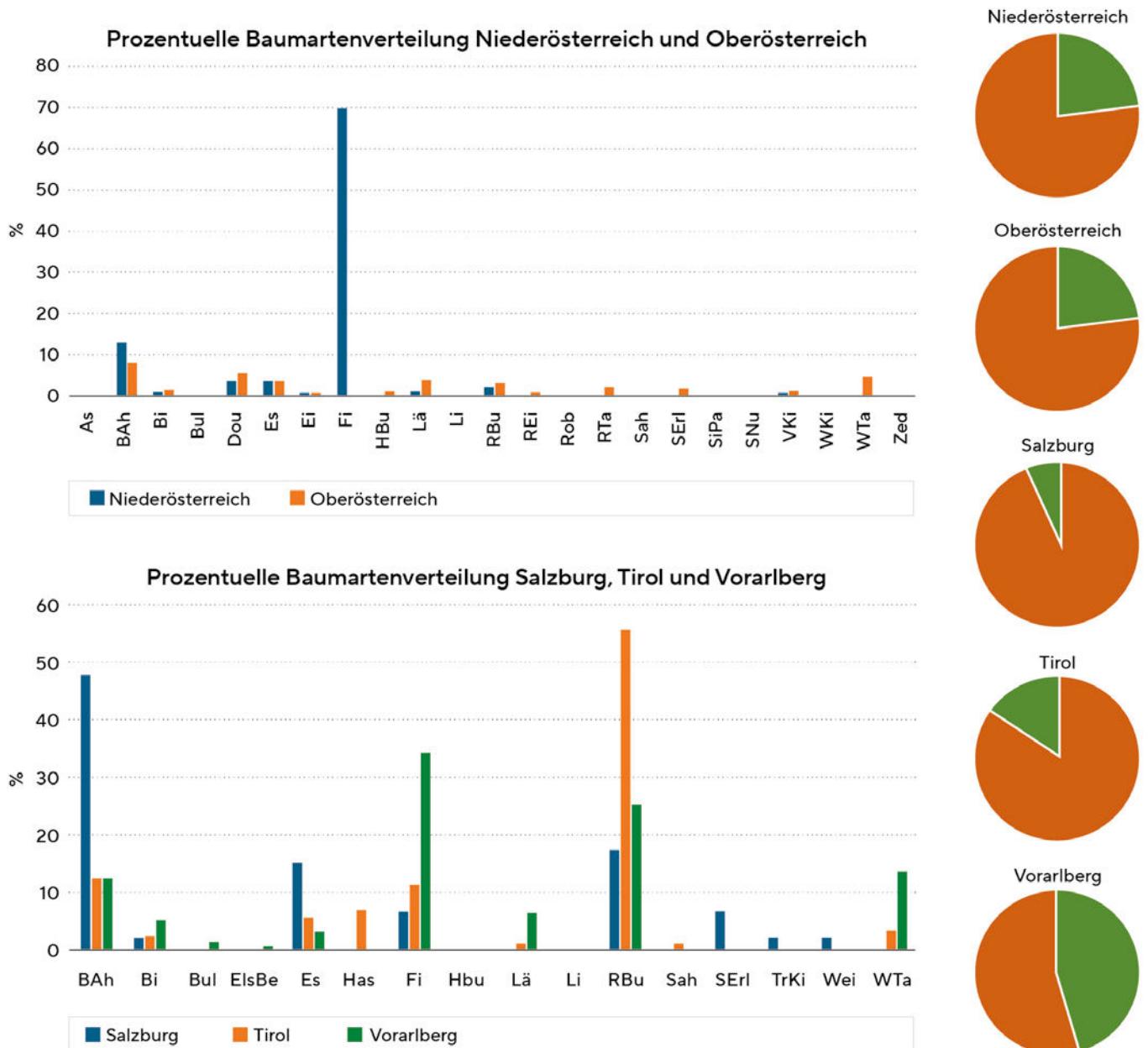


Abb. 1: Prozentuelle Baumartenzusammensetzung und prozentuelle Verteilung von Laubholz und Nadelholz anhand der Grundfläche für die Bundesländer Niederösterreich, Oberösterreich, Salzburg, Tirol und Vorarlberg.

von 12 % hat. In den westlichen Bundesländern (Salzburg, Tirol, Vorarlberg) ist der Laubbaumanteil deutlich höher bei ebenfalls hoher Baumartenvielfalt.

Z-Bäume

Die mittlere Anzahl an Z-Bäumen und Z-Baumanwärtern beträgt in Niederösterreich 15 Stämme/ha und in Oberösterreich 22 Stämme/ha. Für die Beurteilung der Zielerreichung hinsichtlich der Anzahl der Z-Bäume ist deren Verteilung nach Mischungstypen aussagekräftiger. Beim

Laubholztyp wurden in Niederösterreich 28 Stämme/ha und in Oberösterreich 44 Stämme/ha ermittelt. Berücksichtigt man auch die noch vorhandenen potentiellen Z-Bäume bei unmittelbarer Astung, errechnen sich 39 Stämme/ha sowie 63 Stämme/ha. Bei einer angestrebten Z-Baumanzahl von 70 Stämme/ha (60–80 Stämme/ha) ergeben sich Erfolgsquoten von 56 % in Niederösterreich und 90 % in Oberösterreich.

Auf den Demonstrationsflächen in Salzburg finden sich 8 Z-Bäume pro ha. Deutlich höhere mittlere Stammzahlen von Z-Bäumen und Z-Baumanwärtern finden sich in Tirol mit

70 N/ha und in Vorarlberg mit 40 N/ha.

Schlussfolgerungen

Die Wiederholungsinventur unterstreicht das hohe naturale und wirtschaftliche Leistungsvermögen der Standorte im Alpenvorland für die Laubbaumbewirtschaftung. Das Ziel von 1991/92, einen Laubbaumanteil von mindestens 30 % anzustreben, wurde erfolgreich umgesetzt. Mit gezielter Pflege können die angestrebten Zieldurchmesser von mindestens 60 cm (+) bei mittleren baumartenspezifischen Jahrtringbreiten von 3 (2) bis 4 mm in 50 (40) Jahren bei Schwarzerle und Vogelkirsche und 80-100 (110) Jahren bei Eiche, Buche und Bergahorn erreicht werden. Zentral für den weiteren Erfolg ist die konsequente Förderung von Z-Bäumen, insbesondere durch rechtzeitige Durchforstungseingriffe zur Wuchsraumförderung und Astungsmaßnahmen. In nadelholzdominierten Beständen gilt es, den Laubbaumanteil zu erhalten und zu steigern, um Stabilität und Klimaanpassungsfähigkeit zu sichern.

Für Aufforstungen und Bestandesumwandlungen bleibt

eine standortangepasste Baumartenwahl und eine sorgfältig Herkunftswahl entscheidend. Gruppen- bis horstweise Mischungsformen haben sich als besonders wirksam erwiesen, um den gewünschten Laubbaumanteil langfristig zu sichern.

Insgesamt zeigt das Projekt, dass die nach dem Sturmeignis von 1990/91 begründeten Mischbestände ein enormes Potenzial für die Entwicklung klimafitter, stabiler Wälder mit hoher Wertleistung besitzen – vorausgesetzt, die notwendigen waldbaulichen Pflegemaßnahmen werden weiter konsequent umgesetzt.

Autor:innen:

Univ.-Prof. Dr. Eduard Hochbichler,
DI Jeanine Jägersberger, BOKU University
eduard.hochbichler@boku.ac.at

WaldFIT: Herkunftswahl und Pflanzverfahren

MARCELA VAN LOO
WALDFIT-PROJEKTTEAM

Fitness ist nicht nur beim Lifestyle gefragt, sondern auch bei Waldbäumen, die für die Herausforderungen des Klimawandels gerüstet sein müssen. Im Waldfonds-Projekt WaldFIT werden Strategien und Optionen dafür erforscht.

Teilprojekte von WaldFIT

- Herkunftsversuche mit Fichte aus Ost- und Südosteuropa zur Bewertung der Klimaanpassung und Assisted Migration.
- Terpenoide als Biomarker für die Trockentoleranz von Fichten.
- Herkunftsversuche zur Klimaanpassung des Bergahorns in Österreich.
- Erforschung neuer Herkünfte und Standorte der Douglasie, um den Anbau in mittleren und höheren Lagen unter Klimawandelbedingungen zu optimieren und praxisnahe Empfehlungen abzuleiten.
- Erkenntnisse zu Herkunft, genetischer Diversität und Anpassungsfähigkeit österreichischer Douglasienbestände für eine nachhaltige Forstwirtschaft.
- Praxisnahe Empfehlungen für den Anbau nicht-heimischer Baumarten in Österreich, um Chancen und Risiken aufzuzeigen und standortspezifische Entscheidungen sowie Erkenntnisse aus langfristigen Versuchsflächen zu unterstützen.
- Hydrogele und Düngemittel als Bodenzusätze bei der Pflanzung, um die Mortalität von Setzlingen zu reduzieren.

Die Forstwirtschaft fragt sich, auf welche Baumarten und Herkünfte sie künftig setzen soll. Die Waldgenetik kann darauf Antworten liefern, etwa durch verbesserte Herkunfts-empfehlungen wichtiger Baumarten. Innerhalb einer Baumart gibt es Unterschiede zum Beispiel bei der Trockentoleranz und genetischer Diversität. Ein anderer Ansatz konzentriert sich auf das Pflanzverfahren, das den Anwuchs entscheidend beeinflusst.

Das umfangreichste der Waldfonds-Genetikprojekte bündelt sechs Teilprojekte unter der Leitung des Bundesforschungszentrums für Wald (BFW) und der BOKU University.

Sie beschäftigen sich mit der Anlage neuer Herkunftsflächen für Fichte, Ahorn und Douglasie, der Qualität und genetischen Vielfalt der Douglasie, der Dokumentation und Analyse bisheriger Pflanzungen nicht-heimischer Waldbauarten, der Trockentoleranz der Fichte und dem Einsatz von Hydrogele und Dünger bei Pflanzung.

FichteFIT: Anlage neuer Herkunftsversuche mit Fichte mit Herkünften aus Ost- und Südosteuropa

Österreichs lange Forsttradition führte dazu, dass man große Flächen mit Fichten aufforstete, oft außerhalb ihres natürlichen Verbreitungsgebiets und mit ungewisser Saatgutherkunft. In der Diskussion um die Zukunft der Fichte übersieht man oft, dass sie auf rund 60 % ihrer heutigen Fläche, also einem Drittel der österreichischen Waldfläche (1,3 Mio. ha), zur natürlichen Vegetation zählt. Trotz abnehmender Eignung bleibt sie auch im künftigen Klima die wirtschaftlich wichtigste und häufigste Baumart Österreichs. Es besteht jedoch besonderer Anpassungsbedarf, um die ökonomische und ökologische Funktion der Fichte auf geeigneten Standorten zu sichern. Das Teilprojekt FichteFIT zielt darauf ab, neue Herkunftsversuche mit Fichte, besonders aus Ost- und Südosteuropa, anzulegen. Die Auswahl der Herkünfte basierte auf Analysen der natürlichen Verbreitung, vor allem am Arealrand am Balkan und in den Karpaten mit extremen (vor allem trockeneren) Klimabedingungen. Daraus wurden 14 Herkünfte (Rumänien (3), Bulgarien (4) und Serbien (1), Polen (2), Slowakei (4) sowie auch aus Österreich (3) als Referenz ausgewählt. Das langfristige Ziel ist es, ihre Klimaanpassung zu prüfen und als Grundlage für eine mögliche unterstützte Migration zu nutzen. Die bislang angezogenen mehr als 23.000 Setzlinge werden 2026 auf mehreren Flächen in ganz Österreich ausgepflanzt.

FichteTerpenoide: Terpenoide als Biomarker für Bestimmung der Trockentoleranz der Fichtenherkünfte

Trockenstress bedroht die künftige Verbreitung der Fichte. In diesem Teilprojekt untersuchten Forscher:innen, ob Terpenoide als Biomarker zur Bewertung und Vorhersage der



Abb. 1: Fichtensämlinge unter Trockenstress (FichteTerpenoide)



Abb. 2: Angezogene Herkünfte von Bergahorn (AhornFIT)

Trockentoleranz verschiedener Herkünfte dienen können. Sie analysierten 4.000 Keimlinge aus 66 Fichtenpopulationen mithilfe einer neu entwickelten Multi-Sensor-Plattform und gezielter Metabolomik. Die Ergebnisse zeigten eine starke natürliche Variation in der Trockentoleranz. Stoffwechselprofile bestätigten die Rolle bekannter, mit Trockenstress assoziierter Marker wie Glutathion-Derivate, Xanthophylle, Carotinoide und Tocopherole. Monoterpane und Sesquiterpene unterschieden die Populationen deutlich anhand ihrer photosynthetischen Leistung unter Trockenstress. Diese Verbindungen zeigten unterschiedliche physiologische Reaktionsstrategien der Fichte in verschiedenen Klimazonen. Ein erwarteter Gradientenverlauf der Trockentoleranz entlang des Breitengrades konnte jedoch nicht nachgewiesen werden. Im nächsten Schritt sollen diese Marker in natürlichen Beständen validiert werden, um gemeinsam mit DNA-Markern eine selektionsbasierte Anpassung zu ermöglichen.

AhornFIT: Herkunftsversuche mit Bergahorn

Der Bergahorn zählt in Österreich zu den wertvollsten Mischbaumarten und ist nach der Stieleiche die zweithäufigste Laubaufforstungsart (ca. 570.000 Stück/Jahr). Er wächst vor allem in mittleren Höhenlagen bis 1.600 m, wobei seine Vitalität mit der Seehöhe zunimmt. In tieferen, trockenen Lagen leidet er jedoch unter Trockenheit und Schwächerreger. Da er in Südosteuropa auch bei höheren Temperaturen und geringeren Niederschlägen vorkommt, gelten diese Herkünfte als vielversprechend für die Züchtung trockentoleranter Bäume. In Österreich fehlten bisher aussagekräftige Herkunftsversuche mit Material aus der Balkan- bzw. Karpatenregion. Deshalb testete man nun in Herkunftsversuchen Vermehrungsgut aus Südosteuropa und österreichischen Samenplantagen auf Klimaanpassung und Selektionsmöglichkeiten. Im Teilprojekt AhornFIT zog man über 30.000 Setzlinge aus acht österreichischen Samenplantagen sowie aus

Ungarn (1 Herkunft), Rumänien (4), Bulgarien (2) und Serbien (3) heran. Diese prüft man in drei Herkunftsversuchen in Österreich auf ihre Anbaeignung. Die erste Versuchsfäche entstand im Herbst 2024 in Niederösterreich, weitere folgen 2026 in Oberösterreich und der Steiermark.

DouglasieFIT: Anlage neuer Herkunftsversuche der Douglasie

Die Douglasie spielt in Mitteleuropa eine wichtige Rolle als wichtige alternative Wirtschaftsbaumart im Klimawandel. Derzeit konzentriert sich der Anbau vor allem auf tiefere Lagen. Modellierungen zeigen jedoch, dass diese Standorte bei steigenden Temperaturen gefährdet sind, während mittlere und höhere Lagen bis über 1.000 m an Bedeutung gewinnen könnten. Für Höhenlagen über 1.000 m fehlen bislang konkrete Herkunftssempfehlungen. Auch in mittleren und tieferen Lagen könnten künftig zusätzliche Herkünfte relevant werden. Das Teilprojekt DouglasieFIT hat das Ziel, mindestens drei Herkunftsversuche anzulegen, die eine breite Standortamplitude abdecken. Es werden verschiedene Herkünfte getestet, insbesondere aus Süd-Oregon und Kalifornien sowie Samenplantagen aus Frankreich. Zudem sollen neue Versuchsfächen in mittleren und höheren Lagen entstehen, um die möglicherweise zukünftig bedeutsamen Standortsverhältnisse für die Douglasie zu prüfen und praxisnahe Anbauempfehlungen abzuleiten.

DouglasieBEST: „Douglasie made in Austria“

Im 19. Jahrhundert nach Europa gebracht, spielt Douglasie heute eine wichtige Rolle in der heimischen Forstwirtschaft. In Nordamerika ist sie weit verbreitet, was zu stark differenzierten Unterarten und Populationen mit unterschiedlichen Wuchs- und Anpassungsmerkmalen führte. Da über die Herkunft österreichischer Saatguterntebestände wenig bekannt



Abb. 3: Fichte, Douglasie und Küstentanne in der Verjüngung (ExoticDATA)

ist, untersuchte das Teilprojekt DouglasieBEST diese mittels molekularer Genmarker auf Herkunft und genetische Diversität. Zudem wurde die Weitergabe genetischer Variation zwischen Generationen exemplarisch geprüft. Ergebnisse zeigen, dass alle untersuchten Bestände der Küstendouglasie zuzuordnen sind, mit Hauptursprung im Nordwesten der USA. Während die genetische Diversität weitgehend heimischen Quellen entspricht, fand sich eine große Variation der reproduktiven Beteiligung innerhalb der Bestände. Diese Erkenntnisse tragen wesentlich zur praxisrelevanten Bewertung der genetischen Konstitution und Anpassungsfähigkeit bei, um die nachhaltige Nutzung der Douglasie in Österreich und international zu sichern.

Anbauempfehlungen für nicht-heimische Baumarten

Im Teilprojekt ExoticDATA wurden nicht-heimische Baumarten in Österreich durch Felderhebungen systematisch erfasst, bewertet und in einer Datenbank dokumentiert. Ziel war es, Praktiker:innen praxisrelevante Erkenntnisse zu vier Baumarten zu liefern. Die Forscher:innen untersuchten Douglasie und Küstentanne in höheren Lagen sowie Gelbkiefer und Griechische Tanne auf trockenen Standorten. Die Ergebnisse zeigen: Douglasie und Küstentanne können auch oberhalb von 900 m wüchsige Bestände bilden und bieten damit eine Alternative zur klimatisch gefährdeten Fichte. Die kaum vorhandene Verjüngung deutet zudem darauf hin, dass sich diese Arten ohne



Abb. 4: Aufforstung im Schutzwald mit Bodenzusätzen

forstliche Förderung kaum ausbreiten werden. Auch die Gelbkiefer weist gute Zuwächse auf und verjüngt sich nicht. Die Griechische Tanne erwies sich als die anpassungsfähigste Art mit hoher Verjüngungsfreudigkeit, bleibt aber durch Konkurrenzdruck und unzureichender Pflege sehr eingeschränkt. Die Analyse bestehender Aufforstungen bietet eine wichtige Basis für standortspezifische Anbauentscheidungen, ersetzt jedoch keine langfristigen Versuchsflächen.

Hydrogele: Anwendung der Bodenzusätze in der Aufforstung

Der Klimawandel erschwert die Wiederherstellung von Wäldern, da er Trockenheit verstärkt und Setzlinge schlechter überleben. Dieses Teilprojekt untersuchte, ob Hydrogele und Düngemittel als Bodenzusätze bei der Pflanzung die Mortalität von Setzlingen unter realen Bedingungen im Feld senken. Zudem testeten wir verschiedene Pflanztechniken (manuell/ maschinell), wurzelackte Setzlinge und Containerpflanzen sowie Frühjahrs- und Herbstpflanzungen – insgesamt bei sechs häufig gepflanzten Baumarten. Die meisten Behandlungen verbesserten die Überlebensrate nicht oder erhöhten sogar die Sterblichkeit, besonders bei Lärche, Kiefer und Douglasie. Nur die Eiche zeigte bei den meisten Behandlungen bessere Überlebensraten. Modelle zur Setzlingssterblichkeit, die Wetter- und Bodeneigenschaften berücksichtigen, sollen aufzeigen, welche Faktoren gezielt beeinflusst werden können, um die Überlebensrate besonders in Bergregionen zu steigern.

Projektteam:

Dr. Marcela van Loo, DI Anton Aigner, Jakob Ernst MSc., DI Florian Irauschek, Dr. Simon Jansen, Univ.-Prof. Dr. Raphael Klumpp, Julia Konic MSc., Dr. Heino Konrad, Mag.^a Maria Lambropoulus, Dr. Katharina Lapin, Ing. Rudolf Lebenits, Ahmad Muhammad PhD, Priv.-Doz. Dr. Charalambos Neophytou, Dr. Boris Rewald, Priv.-Doz. Dr. Hans Sandén, Erik Szamosvari MSc., Dr. Carlos Trujillo-Moya, Ing. Lambert Weissenbacher, Dr. Silvio Schüler

Alternative Baumarten zur Kompensation von Klimafolgen in Österreich: Untersuchungen an der Libanon-Zeder

RAPHAEL KLUMPP
LENA GRIEBELING
SIMON JANSEN
PROJEKTTEAM

Kann die Libanon-Zeder für Österreich eine alternative Baumart zur Kompensation der Klimafolgen sein? Und welche Herkünfte sind für Österreich empfehlenswert?

Kurzinfos zu Waldfonds-Projekt CEDRUS4clim

- Atlas-Zeder-Herkunft CAT 900 weist im westlichen Oberösterreich besonders niedrige Mortalitätsraten auf.
- Die türkische Herkunft „Mersin-Arslanköy“ zeigt zwar schnelles Wachstum, leidet aber unter hohen Ausfallsraten in der kritischen Kulturphase.
- Aufgrund kurzer Projektlaufzeit sind nur vorläufige Ergebnisse vorhanden. Zuverlässige Aussagen aus Herkunftsversuchen werden erstmal nach zehn Jahren möglich sein. Die Versuchsdauer für die Versuchsfächen beträgt 30 Jahre.
- Folgeprojekte werden empfohlen, die Zeder-Mischbestände mit heimischen Baumarten testen und die waldbaulichen Versuche auch auf die klimawandelbetroffenen Bundesländer Steiermark und Kärnten ausweiten sollten.

Im Zentrum des CEDRUS4clim-Projekts steht die Frage, ob die Libanon-Zeder künftig in Österreichs Wäldern wachsen könnte. Dazu verfolgt das Projekt drei Ansätze:

- a. Analyse der genetischen Variation im Ursprungsgebiet mittels Genmarker,
- b. Anlage von Herkunftsversuchen in Österreich,
- c. Anlage von waldbaulichen Demonstrationsversuchen.

Der Klimawandel stellt die österreichischen Wälder und die Forstwirtschaft vor große Herausforderungen: Wiederkehrende Trockenperioden verursachen großflächige Waldschäden und werfen die Frage auf, ob sich lokale Baumpopulationen schnell genug an die sich ändernden Klimabedingungen anpassen können. Daher rückt der Einsatz alternativer Baumarten in den Fokus, darunter mediterrane Arten wie die Libanon-

Zeder aus der Türkei oder die Atlas-Zeder aus Nordafrika.

Die Libanon-Zeder (*Cedrus libani* A. Rich.) gilt als ökologisch gut integrierbar und verträgt langanhaltende Trockenperioden im Sommer. In ihrem natürlichen Areal kommt sie meist in Mischbeständen vor, wobei sie sowohl mit Licht- als auch Schattenbaumarten assoziiert ist. Während die Mittelmeäränder schon seit 25 Jahren die Zedern erforschen und testen, blieb ihr Anbau in Mitteleuropa – abgesehen von wenigen Ausnahmen – bislang marginal. Erste Versuchsanbauten weisen jedoch auf ein gutes Wachstumspotenzial hin. Zudem ist das aromatische Holz hochpreisig, wasserbeständig und vielseitig verwendbar, wodurch die Libanon-Zeder eine vielversprechende Erweiterung des heimischen Baumartenportfolios darstellt.

Am Institut für Waldbau der BOKU University erforscht man seit Jahren die Libanonzeder. Dr. Senitza widmete ihr eine Dissertation über Zedern-Urwälder bei Antalya, und Univ.-Prof. Dr. Klumpp startete 2004 erste Experimente. Im Rahmen des Waldfonds-Projekt CEDRUS4clim laufen nun in Zusammenarbeit mit Waldbesitzer:innen, der Landesforstdirektion Burgenland und der Forstabteilung der Landwirtschaftskammer Oberösterreich neue Versuche in Oberösterreich, Niederösterreich und dem Burgenland.

Herkunftsversuche

Zwei Versuchsfächen wurden bereits angelegt: in Aistersheim (Oberösterreich) und Neckenmarkt (Burgenland). Dort testet man neun Herkünfte der Libanonzeder (Abb. 1) sowie die Atlas-Zeder CAT 900 als Vergleichsstandard. CAT900 ist eine Sammelherkunft aus ausgewählten französischen Beständen und wird in Europa häufig verwendet. Die Versuchsanlage für Niederösterreich wird im Winter 2025/26 erfolgen. Die Provenienzversuche erfolgen im Pflanzraster 2x3 m mit 100 Pflanzen pro Versuchszelle (Herkunft) und drei Wiederholungen je Versuch. So lassen sich die Wechselwirkungen zwischen Herkunft und Umwelt an jedem Standort wissenschaftlich auswerten. In den ersten 10 Versuchsjahren analysiert man vor allem die natürliche Mortalität der Versuchspflanzen und das mögliche Auftreten von Krankheiten, ab dem Versuchsalter 10 rückt die Wuchsdynamik in den Fokus.



Abb. 1: Verbreitungsgebiet der Libanon-Zeder in der Türkei (nach EUFORGEN, grün) und Lage der untersuchten Populationen in der Türkei.

Die Versuche sind auf mindestens 30 Jahre ausgelegt.

Waldbauliche Demonstrationsversuche

In den Bundesländern Burgenland, Oberösterreich und Niederösterreich wurden jeweils zwei waldbauliche Demonstrationsversuche angelegt. Die Versuchsflächen sind 0,5 Hektar groß und wurden mit einer Herkunft im Verband 2x3 Meter bepflanzt. In Hornstein und Stoob (Burgenland) erweiterten die Eigentümer die Flächen auf 1 Hektar und variierten den Pflanzenabstand im Erweiterungsteil auf 2x6 Meter. Ziel der Demonstrationsflächen ist es, Erfahrungen zur Kulturgegründung auf unterschiedlichen Standorten in Österreich zu sammeln.

Laboranalysen mit molekularen Genmarkern (Typ: nSSR)

Das Projekt verwendet neue, leistungsfähige molekulare Genmarker für das Genom des Zellkerns (nSSR). Diese Marker ermöglichen es, bestimmte Genabschnitte innerhalb des Gen-Pools zu finden, vergleichbar mit dem Einsatz spezialisierter Hunde, die etwa bei der Jagd Niederwild aufspüren. Mit dem ausgewählten Marker-Set können wir beispielsweise die in Abbildung 1 dargestellten Herkünfte in der Türkei nach geographischen Gruppen unterscheiden. Weitere Analysen sind in Arbeit und sollen später den Handel mit Saatgut und Pflanzgut überprüfen.

Schlussfolgerung und Ausblick

Die Versuchsanlagen im Wald werden im Winter 2025/26 analysiert, sodass im Frühjahr 2026 erste Ergebnisse vorliegen. Auffallend ist bis jetzt der Erfolg der Atlas-Zeder-Herkunft CAT 900 im westlichen Teil Oberösterreichs, wo sie geringe Mortalitätsraten zeigt. Aus türkischen Versuchen ist



Abb. 2: Libanon-Zeder: Herkunft Mersin-Arslanköy, Pflanze als 2/0 Sämling gepflanzt Mai 2014, Baumhöhe im November 2020 etwa 4 m, Höhenzuwächse ab 2019 zwischen 80-100 cm/Jahr. Mitarbeiter Hans Hable zeigt den Höhenzuwachs 2019 mit dem Spatenstiel.

bekannt, dass die Herkunft „Mersin-Arslanköy“ ein schnelles Wachstum aufweist („Top-Herkunft“), aber gleichzeitig unter hohen Ausfallsraten leidet. Die hohen Ausfallsraten von „Mersin-Arslanköy“ in der Kulturphase scheinen sich nicht nur in den neuen CEDRUS4clim-Versuchen zu bestätigen, sondern sind auch aus dem Baumartenversuch in Bruckneudorf (Anlage 2014, Dr. Klumpp) bekannt (Abb. 2).

Das Projekt CEDRUS4clim kann in der kurzen Laufzeit nur vorläufige Ergebnisse liefern, die mit Vorsicht zu interpretieren sind. Die Beobachtung der Versuchsflächen in den kommenden Jahren wird jedoch zuverlässige Daten über das Potential der Zeder als alternative Baumart in Österreich liefern. Wünschenswert wäre überdies ein Folgeprojekt, um Zedern-Mischbestände mit heimischen Baumarten zu testen und diese waldbaulichen Versuche auch in den vom Klimawandel betroffenen Bundesländern Steiermark und Kärnten zu etablieren.

Projektteam:

Ass.-Prof. Dr. Raphael Th. Klumpp, Dr. Simon Jansen, DI Lena Griebeling, Priv.-Doz. Dr. Charalambos Neophytou, BOKU University, Institut für Waldbau.

Elsbeere, Speierling und Wildbirne als Chance für den Waldbau und die Biodiversität

HEINO KONRAD

LILA AFIFI

SAMUEL ASPALTER

WILDOBST-PROJEKTTEAM

Wärmeliebende Wildobstarten wie Wildbirne, Elsbeere und Speierling profitieren vom Klimawandel. Ihr Verbreitungsgebiet wird sich voraussichtlich ausdehnen. Diese Baumarten können langfristig helfen, die Folgen des Klimawandels im Wald abzufedern und den Verlust der Biodiversität zu bremsen. Im Waldfonds-Projekt WILDOBST wurden dazu Grundlagen erarbeitet und praxisnahe Empfehlungen entwickelt.

Schlussfolgerungen aus dem WILDOBST-Projekt

- Wildbirne, Elsbeere und Speierling werden ihre Verbreitungsgebiete in Österreich durch den Klimawandel voraussichtlich ausdehnen können.
- Die genetische Untersuchung von über 1600 Wildobstbäumen zeigt, dass trotz fragmentierter Vorkommen bei Elsbeere und Wildbirne noch hohe genetische Vielfalt vorhanden ist, während diese beim Speierling um etwa ein Drittel geringer ausfällt.
- Handlungsbedarf bei Saatgutversorgung: Für diese Baumarten fehlen gesetzliche Qualitätsvorgaben. Wir benötigen geeignete Erntebestände und weitere Samenplantagen.
- Projektteam: BFW, Verein Regionale Gehölzvermehrung, die Österreichischen Bundesforste, die BOKU University und der Biosphärenpark Wienerwald.

Wildbirne, Elsbeere und Speierling, deren Früchte essbar sind, spielten bisher im österreichischen Wald und in der Forstwirtschaft nur eine geringe Rolle. Da sie an warme Klimazonen angepasst sind, steigt ihr Potenzial im Zuge des Klimawandels. Ihr Anbau könnte die Biodiversität fördern, da sie zahlreichen Organismen Nahrung und Lebensraum bieten. Zudem bereichern sie mit ihrer auffälligen Blüte und Herbstfärbung das Landschaftsbild. Die Wildobstarten sind noch dazu wertholzfähig - das gefärbte Holz von Elsbeere, Speierling und Wildbirne gilt als hart und ist sehr gesucht. Darüber

hinaus eignen sie sich für die Gewinnung von Nicht-Holzprodukten (Fruchtnutzung).

Genetisch hochwertiges Pflanzgut gesucht

Für eine Ausweitung des Anbaus ist es entscheidend, klimafittes und genetisch hochwertiges Pflanzgut zu verwenden, um die Anpassungsfähigkeit der Arten an künftige Klimaveränderungen zu sichern. Derzeit sind die Vorkommen oft stark fragmentiert und möglicherweise bereits genetisch verarmt. Hinzu kommt, dass diese Baumarten nicht dem forstlichen Vermehrungsgutgesetz unterliegen. Es gibt daher keine gesetzlichen Vorgaben zur Qualität des Saat- und Pflanzguts oder zur Anzahl der Samenbäume. Käufer müssen deshalb besonders darauf achten, wo und von wie vielen Mutterbäumen das Saatgut für die Anzucht stammt.

Forscher:innen untersuchten die genetische Variation dieser Waldbauarten, um die zerstreuten Vorkommen hinsichtlich ihrer genetischen Variation sowie ihrer Eignung als Saatguterntebestände bzw. als Generhaltungswälder zu bewerten. Sie wollten auch den Wissensstand über regional geeignete Provenienzen erweitern. Zunächst kartierten und beprobten sie die größten verfügbaren Vorkommen. Anschließend analysierten sie ausgewählte Bestände mit molekulargenetischen Methoden, um die genetische Vielfalt der Ursprungsbestände zu bewerten und den Austausch zwischen den verstreuten Vorkommen einzuschätzen. Zusätzlich untersuchten sie Saatgutplantagen von Elsbeere, Speierling und Wildbirne, um deren genetische Vielfalt zu erfassen und zu prüfen, ob dort die natürliche Vielfalt auch ausreichend erfasst ist.

Über 1600 Wildobstbäume untersucht

Im Projekt WILDOBST wurden etwa 1000 Elsbeeren, 250 Speierlinge und 400 Wildbirnen aus dem gesamten Verbreitungsgebiet in Österreich gesammelt. Das Projektteam untersuchte 24 natürliche und sechs gepflanzte Elsbeer-Populationen, wobei sie versuchten, für alle Populationen 30 Individuen zu beprobten. Beim Speierling wurden 13 Vorkommen beprobzt, davon waren zehn natürliche und drei

Tabelle 1: Alle Regionen mit der durchschnittlichen beobachteten Heterozygosität (HI), der erwarteten Heterozygosität (HS) und der Inzucht (FIS) pro Baumart. Die roten Werte stehen für Regionen mit der höchsten Inzucht.

Region	Elsbeere			Speierling			Wildbirne		
	H_o	H_E	F_{IS}	H_o	H_E	F_{IS}	H_o	H_E	F_{IS}
Pannonicischer Nord	0,84	0,83	0	0,59	0,64	0,09	0,73	0,75	0,01
Pannonicischer Süden	0,84	0,83	-0,01	0,54	0,60	0,09	0,75	0,78	0,04
Bucklige Welt	0,81	0,83	0,03	0,6	0,67	0,12	0,75	0,82	0,09
Subillyrisches Hügel- und Terrassenland	0,79	0,8	0,02				0,74	0,78	0,04
Südöstliche Steiermark	0,86	0,87	-0,01						
Südalpen							0,70	0,76	0,09
Kultiviert	0,78	0,8	0,03	0,56	0,6	0,05	0,75	0,75	0,05

gepflanzte Populationen, mit dem Ziel, pro Vorkommen mindestens 20 Individuen zu erfassen. Von der Wildbirne, die sehr verstreut vorkommt, wurden schließlich 27 natürliche und drei gepflanzte Populationen beprobt, wobei 15 Populationen weniger als zehn Individuen aufwiesen. Genetische Untersuchungen ergaben, dass Elsbeere und Wildbirne trotz fragmentierter Vorkommen noch eine hohe genetische Vielfalt besitzen. Beim Speierling ist diese Vielfalt jedoch um etwa ein Drittel geringer. Die größten und genetisch vielfältigsten Populationen befinden sich zumeist im Nordosten (zum Beispiel im Biosphärenpark Wienerwald und im Weinviertel). Westliche Populationen der Wildbirne könnten durch Einkreuzung von Kulturbirnen beeinflusst sein. Um die Saatgutversorgung dieser Baumarten in Österreich zu sichern, sollen geeignete Erntebestände ausgewiesen und Samenplantagen erweitert oder neu angelegt werden.

Die Kartierungsarbeiten im Wildobst-Projekt verfeinerten die historischen Verbreitungsgebiete der Arten. Ein weiteres Ziel war, die Beratung und Artenempfehlung um den Aspekt der Klimatauglichkeit zu erweitern. Im Zuge der Auswertung der Klimamodelle mit Hilfe des EVA-Projektes (in Kooperation mit der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, LWF) wurden neue Areale identifiziert, die klimatisch für künftige Aufforstungen mit den drei Baumarten geeignet sind. Nach Bewertung der Chancen und Risiken können nun unter Berücksichtigung der Ansprüche an den Boden Standort- und Herkunftsempfehlungen für die Praxis geliefert und veröffentlicht werden.

Alle drei Wildobstarten werden Verbreitungsareal vergrößern

Modellierungen zeigen, dass die drei Baumarten durch den Klimawandel ihr Verbreitungsgebiet in Österreich ausweiten könnten; die Elsbeere könnte allerdings im Osten des Landes, wo sie heute zahlreich vorkommt, unter Druck geraten.

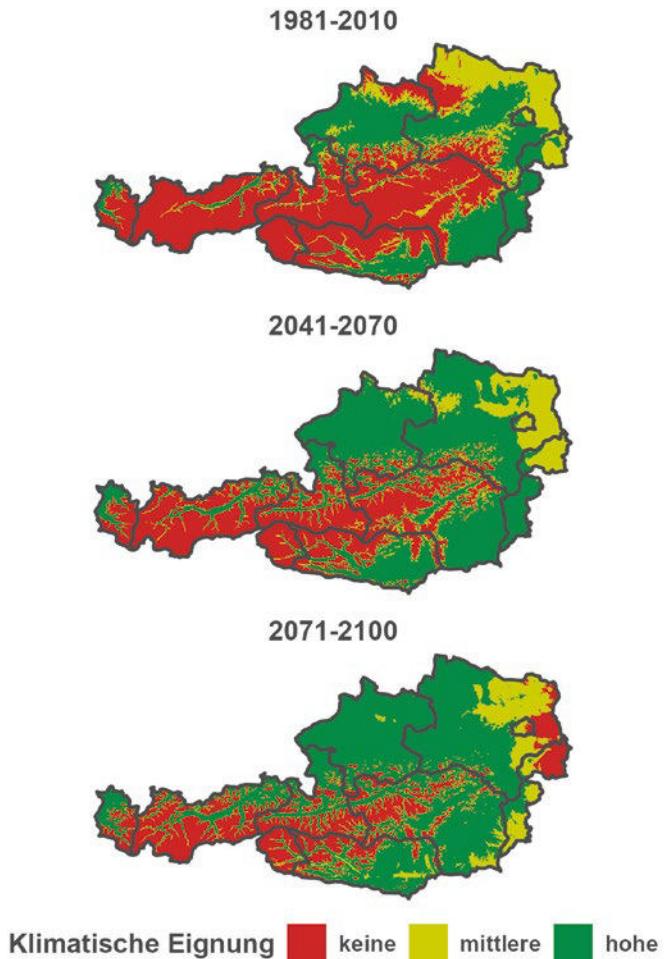


Abb. 1: Ergebnisse der Klimamodellierungen für die Elsbeere (*Sorbus torminalis*). Die grünen Bereiche sind gut geeignet, die gelben nur mit Einschränkung, die roten Bereiche werden als nicht geeignet eingestuft. Neben der Referenzperiode basierend auf aktuellem Klima handelt es sich bei beiden Vorhersagen um das pessimistischere Klimaszenario (RCP 8.5) zu unterschiedlichen Perioden. Für die ferne Zukunft wird in RCP 8.5 mit österreichweit ca. + 4,0 °C eine wesentlich stärkere Temperaturzunahme als in RCP 4.5 (ca. + 2,3 °C) erwartet deren Vorhersage der Darstellung für RCP 8.5 im Jahr 2050 ähnelt.

Vorkommen der Elsbeere im Südosten Österreichs sind wiederum durch Fragmentierung stark gefährdet; umso wichtiger sind Maßnahmen der forstlichen Generhaltung für diese Populationen. Auch die Wildbirne könnte bei Fortschreitens des Klimawandels im Osten Probleme bekommen, obwohl sie dort heute am häufigsten vorkommt. Für den Speierling verschlechtert sich die Eignung im Osten kaum, was ihn zu einem Gewinner des Klimawandels macht.

Im Zuge des Projektes wurden Informationsveranstaltungen durchgeführt, eine informative Broschüre gestaltet und

ein dreiteiliger Podcast publiziert – alle Informationen dazu unter <https://www.bfw.gv.at/anbau-wildobst-foerderung/>.

Projektteam:

Dr. Heino Konrad, Dr. Lila Afifi, Samuel Aspalter MSc. (alle BFW), DI Klaus Wanninger (Verein Regionale Gehölzvermehrung), DI Alexandra Wieshaider (Österreichische Bundesforste), Univ.-Prof. Dr. Raphael Klumpp (BOKU University) und DI Harald Brenner (Biosphärenpark Wienerwald)



Abb. 2: Die Elsbeere kann in Österreich künftig in höheren Lagen als bisher angepflanzt werden, kommt aber im sommerwarmen Osten durch den Klimawandel auch unter Druck. Foto: Heino Konrad

Saatgut für Österreichs klimafitte Wälder der Zukunft

GEORG GRATZER
MARIO PESENDORFER
KLAUS KATZENSTEINER
FORSEE-PROJEKTTEAM

Durch den notwendigen Waldumbau steigt der Bedarf an forstlichem Saatgut, gleichzeitig nimmt die Qualität des Saatguts ab. Um die Versorgung mit hochqualitativem forstlichem Saatgut in Österreich zu verbessern und für die Zukunft zu gewährleisten, erforschte das Projekt FORSEE die biologischen Grundlagen der Samenproduktion, Aspekte der Verjüngung in Waldbäumen und das System der Forstsaatgutversorgung.

Schlussfolgerungen aus dem FORSEE-Projekt

- Wetterbasierte Prognosen können die Saatgutplanung revolutionieren. Standortspezifische Vorhersagen der Baumsamenproduktion mit einem Horizont von etwa einem Jahr sind möglich, wenn Ertragsdaten der Vorjahre schnell verfügbar sind.
- Ältere Bestände (150+ Jahre) und größere, weniger isolierte Populationen weisen höhere Keimraten auf, da sie weniger Inzucht zeigen. Saatgutplantagen liefern qualitativ besseres Material als natürliche Erntebestände.
- Österreichs Saatgutsystem benötigt mehr Eigenständigkeit, ist derzeit stark von internationalen Partnern bei Technologie und Fachwissen abhängig.

Die forstliche Saatgutproduktion ist derzeit zeitintensiv: Saatgutproduzent:innen beobachten dezentral die Blüte und Samenentwicklung, um den möglichen Ernteertrag abschätzen zu können. Diese Beobachtungen sind für regionale Modelle und Vorhersagen nicht verwendbar. Deshalb werden transparente, regionalisierte Vorhersagen der jährlichen Baumsamenproduktion, insbesondere von Mastsaaten und Leermasten, benötigt, da damit Ernteunternehmen, Klengen, Baumschulen und Waldbewirtschafter:innen planen könnten.

Welches Wetter begünstigt Mastsaaten?

Das FORSEE-Projekt untersuchte den Zusammenhang zwischen jährlichen Wetteränderungen und der Saatgutproduktion verschiedener Baumarten, um Vorhersagen für die kommenden Jahre zu ermöglichen. Die Resultate zeigen, dass für die bisher sechs beforschten Baumarten standortspezifische Prognosen in Mastkategorien mit einem Vorhersagehorizont von etwa einem Jahr möglich sind, wenn die Daten zum Saatgutertrag der Vorjahre rasch verfügbar sind (Abb. 1).

Welche Faktoren beeinflussen die Saatgutqualität der Tanne?

Neben der Menge ist auch die Qualität des Saatguts wichtig, welche sich in den letzten Jahren laut Praktiker:innen z.B. bei Tanne verschlechtert hat. Der Tanne wird aber im Klimawandel als Hoffnungsbäumart gesehen, weil sie Trockenphasen besser übersteht als die Fichte. Um die treibenden Faktoren von Keimraten zu verstehen, wurden Tannensamen von mehr als 60 Saatguterntebeständen und 2 Plantagen untersucht. Samen aus Plantagen waren von höherer Qualität als die aus Erntebeständen. Das Bestandesalter ist ein bestimmender Faktor für die Keimraten – Bestände mit 150 Jahren und mehr hatten höhere Keimraten. Genetische Analysen zeigten, dass kleine und isolierte Bestände mehr Selbstbestäubung und Inzucht aufweisen, weil der Pollen von einer geringeren Anzahl an Vätern abstammt, was auch zu reduzierten Keimraten führt.

Können Düngung, Lagerungs- und Verarbeitungsprozesse von Baumsamen verbessert werden?

Saatgutplantagen werden künftig eine wichtige Rolle spielen. Eine Herausforderung ist, die Bäume effizient zu düngen sowie durch strategische Ernte, Verarbeitung (Klengung) und Lagerung die Qualität und Haltbarkeit des Saatguts zu optimieren. Dazu wurden Experimente in Saatgutplantagen durchgeführt, sowie Lagerungsversuche bei Weißtanne und Stieleiche unternommen. Bei Tanne konnte durch gezielte Düngung Nährstoffmangel behoben werden, bei Stieleiche

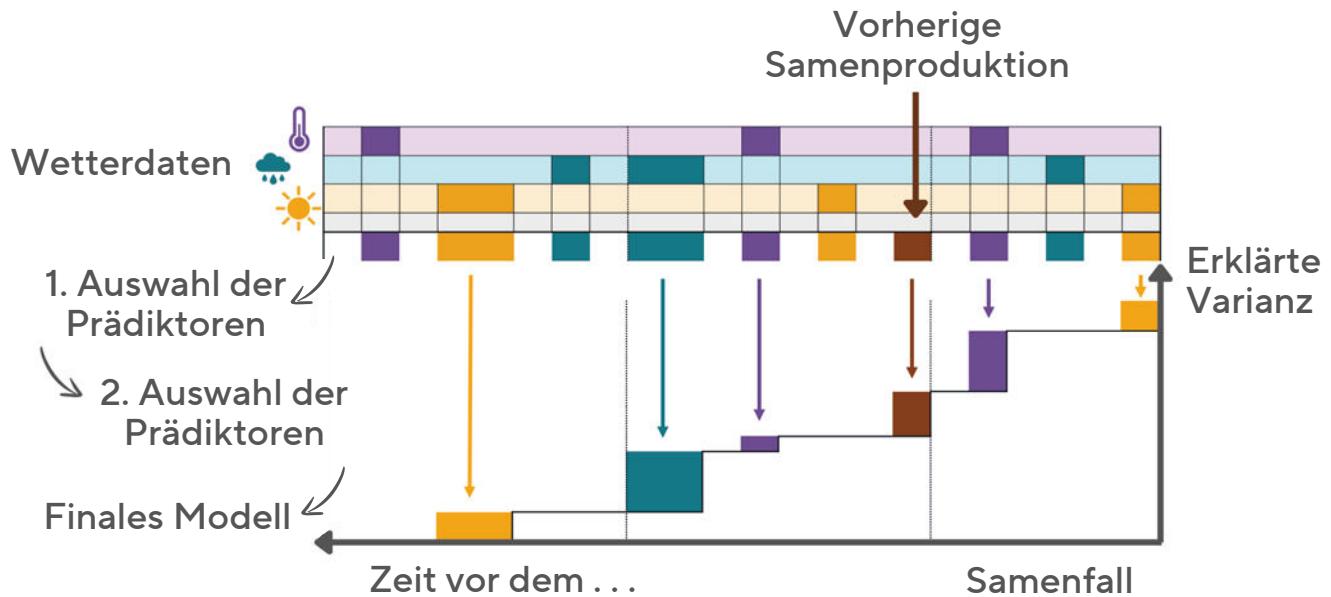


Abb. 1: Schematische Darstellung der Modelle, welche die Samenproduktion mit dem Wetter in den Monaten davor korrelieren und als Basis für Saatgutprognosen dienen.

war dies aufgrund der guten Versorgung in der untersuchten Samenplantage nicht notwendig. Die Nährstoffversorgung der Plantagenbäume unterschied sich zwischen den Untersuchungsjahren erheblich, unabhängig von der Düngegabe. Basierend auf den Projektergebnissen wurden Düngeempfehlungen für die beiden untersuchten Baumarten abgeleitet. Stickstoffgaben sollten vorsichtig erfolgen, da bei Überversorgung die Blühbereitschaft leidet.

Zusätzlich konnte für Weißtanne ein optimiertes Protokoll für einen Keimversuch am BFW-Samenlabor etabliert werden, dieser soll künftig neben der Lebensfähigkeit des Saatgutes auch durchgeführt werden. Hinsichtlich Weißtanne und Stieleiche sind die Einhaltung von artspezifischen Wassergehalten und die Temperatur der Einlagerung entscheidend für die erfolgreiche Lagerung. Regelmäßige Kontrollen und die Infrastruktur für die Lagerung von Stieleichensaatgut sind aufwendig, aber unverzichtbar.

Haben Samenräuber Präferenzen?

Bei der Naturverjüngung und der Direktsaat spielen die Fraßpräferenzen von Samenräubern eine wichtige Rolle. In sogenannten Cafeteria-Versuchen wurden Insekten, Kleinsäugern und Vögeln Samen von Buchen und Tannen präsentiert, um zu ermitteln, ob Samenräuber Saatgut und Keimlinge aus gedüngten und bewässerten Plantagen natürlichen Samen vorziehen. Buchensamen wurden von Säugern und Vögeln komplett aufgefressen, unabhängig von Herkunft, blieben aber von Insekten verschont. Tannensamen wurden hingegen von allen Tieren gefressen und hatten sehr

niedrige Überlebensraten. Bei den Keimlingsversuchen im ersten Jahr zeigten sich große Unterschiede der Überlebensraten von Eiche und Buche zwischen den Versuchstandorten, aber keine systematischen Effekte, die verschiedene Räubergilden oder Samenbehandlungen zugeordnet werden konnten. In einer Literaturstudie wurde das historische und aktuelle Wissen zu Samenfraß von Insekten für Praktiker:innen zusammenfasst.

Wie sieht das forstliche Saatgutsystem Österreichs aus?

Um zu verstehen, welche Faktoren die Verfügbarkeit und die Preise von forstlichem Saatgut in Österreich bestimmen, wurden die relevantesten Akteur:innen des forstlichen Saatgutsystems identifiziert und ihre Aktivitäten erörtert (Abb. 2). In Workshops und mit einer Netzwerkanalyse ließen sich Herausforderungen identifizieren und Interventionspunkte zur Systemverbesserung ermitteln.

Österreichs Saatgutsystem ist stark von internationalen Partner:innen abhängig, dies gilt besonders für das Wissen und den Technologiebedarf in der Baumsamenaufbereitung und -lagerung sowie in der Beerntung. So werden etwa viele heimische Samen und Keimlinge in Deutschland verarbeitet, bevor sie in Österreichs Baumschulen kommen. Zudem verfügen nur wenige Akteur:innen über das Wissen und die Technologie, es profitieren somit nur wenige österreichische Systemakteur:innen von diesen Kooperationen.

Deshalb bräuchte es einen inklusiven, fairen Wissens- und Technologietransfers, z.B. durch eine formale und

systematische Dokumentation von Wissen zur Baumsamen-aufbereitung und -lagerung. Dazu könnten etwa die Lehrpläne der land- und forstwirtschaftlichen Fachschulen um die Saatgutproduktion erweitert und Fachkräfte entlang der Wertschöpfungskette ausgebildet werden.

Univ.-Prof. Dr. Michael Grabner³, Dr. Heino Konrad⁴, DI Anton Aigner⁴, Dr. Silvio Schüler⁴

¹ Institut für Waldökologie und ² Institut für Wildtierökologie und Jagdwirtschaft, Department für Ökosystemmanagement, Klima und Biodiversität, BOKU University.

³ Institut für Holztechnologie und Nachwachsende Rohstoffe, Department für Naturwissenschaften und nachhaltige Rohstoffe, BOKU University.

⁴ Bundesforschungszentrum für Wald

Projektteam:

Univ.-Prof. Dr. Georg Gratzer¹, Univ.-Prof. Dr. Mario Pesendorfer¹,
Univ.-Prof. Dr. Klaus Katzensteiner¹, DI Iris Oberklammer¹, Martina Perzl MSc.¹,
Jerneja Harmel¹ MSc., Sonja Menges¹, Ass.-Prof. Dr. Ursula Nopp-Mayr²,
Elias Gall², Jasmin Barl MSc.², Mag.^a Dr. Margit Zohmann-Neuberger²,

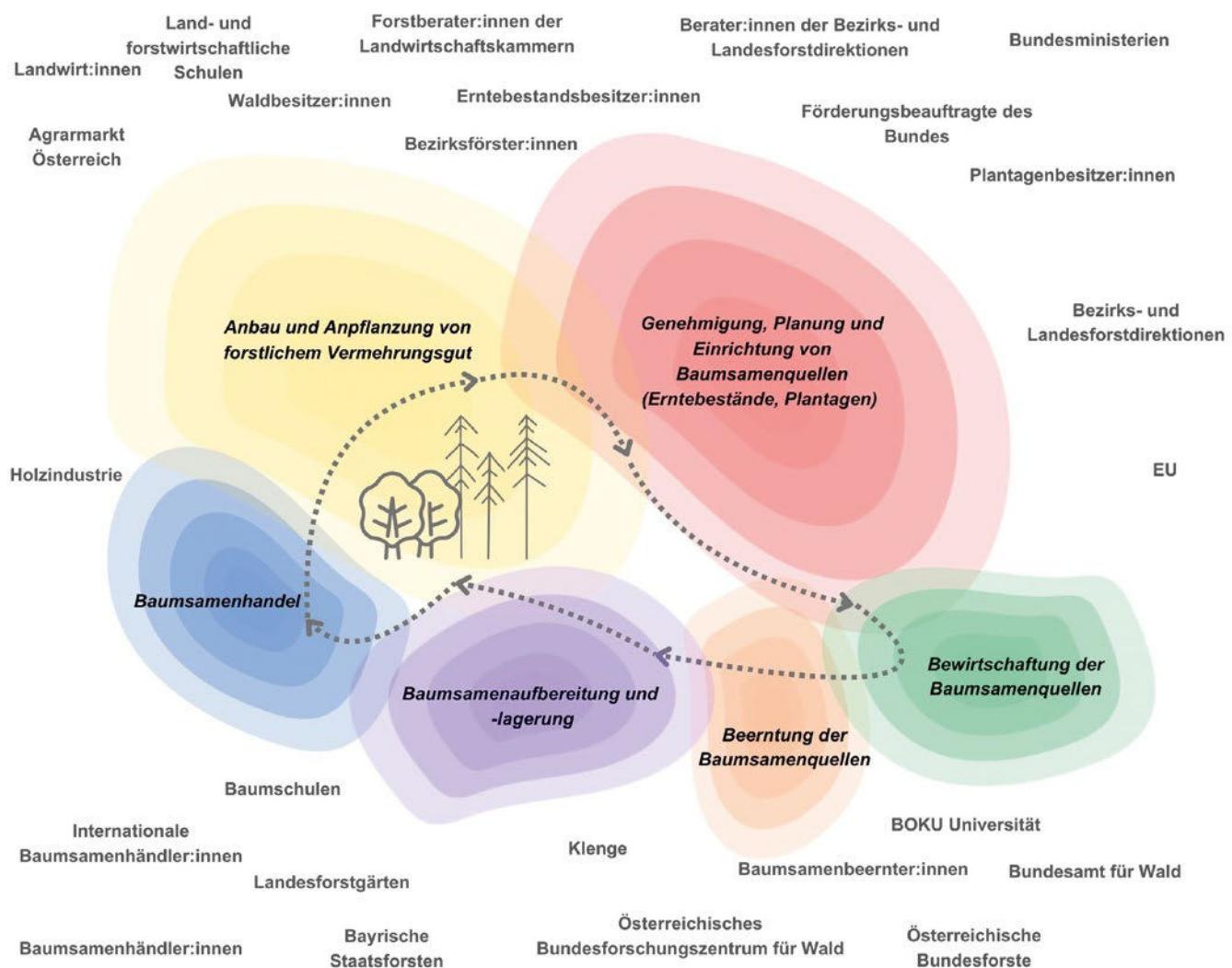


Abb. 2: Wertschöpfungskette-Praktiken mit Akteur:innen des österreichischen Baumsamensystems.

Waldbewirtschaftung – ein Spagat zwischen Bodengesundheit und Wirtschaftlichkeit

MAXIMILIAN BEHRINGER
LISA GASSER
KLAUS KATZENSTEINER
HOBO-TEAM

Wie können Wälder nachhaltig genutzt werden, ohne empfindliche Böden langfristig zu schädigen? Diese Frage stand im Zentrum des HoBo-Projekts, das die Auswirkungen unterschiedlicher Holzerntetechnologien auf verdichtungsanfälligen Böden untersuchte. Das Projektteam von HoBo (Sicherung der Bodenfunktionen von Waldökosystemen durch standortgerechte Holzernte) analysierte Holzerntemaßnahmen der letzten 20 Jahre, einschließlich kontrollierter Nutzungen, um praxisnahe Empfehlungen zu entwickeln. Der Fokus lag auf den Folgen von Bodenverdichtung für Wasserhaushalt, Bodenleben sowie Treibhausgasemissionen.

Schlussfolgerungen aus dem HoBo-Projekt

- Bodenschäden durch Holzernte wirken über lange Zeiträume und lassen sich nur schwer rückgängig machen
- Nachhaltige Waldbewirtschaftung erfordert strategische Planung von Erntezeitfenstern, ein dauerhaft festgelegtes Rückwegenetz und angepasste Technik.
- Größere Gassenabstände können Bodenschäden begrenzen. Unter schwierigen Bedingungen ist motormanuelle Fällung und Seilrückung einer vollmechanisierten Ernte vorzuziehen.
- Zielkonflikte zwischen Bodenschutz, Sicherheit, Kosten und Leistung müssen miteinander abgewogen werden, um ökologische Bodenfunktionen wie Wasserspeicherung und Kohlenstoffbindung zu erhalten.
- Konsortium: BOKU University, BFW, ÖBF

Die Ergebnisse verdeutlichen: Ein dauerhaftes Rückwegenetz, Erntezeitpunkt und -system sind entscheidend für den Bodenschutz. Unter schwierigen Bedingungen ist motormanuelle Fällung und Seilrückung einer vollmechanisierten Ernte vorzuziehen.

Walböden reagieren sehr empfindlich auf Befahrung, besonders wenn sie feucht oder nicht gefroren sind – Bedingungen, die durch den Klimawandel im Winter häufiger auftreten.

Auf einer Versuchsfläche im Flysch-Wienerwald verglichen die Forscher:innen drei Holzerntesysteme:

- (I). Harvester und Forwarder (H-),
- (II). Harvester und Forwarder mit Bändern (H+), sowie
- (III). motormanuelles Fällen und Seilgerät (MC) (Abb. 1).

Harvester und Forwarder wurden mit einer Traktionshilfswinde unterstützt. Die Harvesterleistung lag bei 68,4 Efm/PSH₁₅, die des Forwarders bei 18,9 Efm/PSH₁₅. PSH₁₅ steht für die produktiven Systemstunden inklusive kurzer Unterbrechungen bis zu 15 Minuten. Deutlich geringer war die Produktivität bei motormanueller Fällung und Seilbringung (9,7 bzw. 16,1 Efm/PSH₁₅). Dabei traten hier – teilweise durch andere Faktoren bedingt – deutlich geringere Bestandsschäden auf als bei Vollmechanisierung.

Langfristige Veränderung der Bodenstruktur

Die Versuche im Wienerwald zeigen gravierende Bodenverdichtung in Rückgassen. Die Variante mit Bändern (H+) beeinflusst die Lagerungsdichte und gesättigte hydraulische Leitfähigkeit im Oberboden etwas weniger stark. Ab etwa 15 cm Tiefe gleichen sich die Unterschiede zwischen H+ und H- jedoch an (Abb. 2). Auf einer Versuchsfläche in der Molasse-Zone ließ sich der Verdichtungseffekt durch Holzernte während einer markanten Trockenperiode deutlich verringern. Bei nassen Bedingungen verringert der Einsatz eines Seilgeräts die negativen Effekte noch stärker: Verdichtung tritt dort fast ausschließlich im Oberboden auf, während tiefere Horizonte weitgehend unversehrt blieben (Abb. 2). Der Schutz der tieferen Bodenschichten ist entscheidend, da ihre Regeneration sehr langsam verläuft. Nach 18 Jahren waren in Rückgassen nur die oberen 10 cm vollständig erholt, darunter hatte sich die Struktur nur zu ca. 50 % regeneriert (Abb. 3).

Der Verlust an Makroporen, die für die Durchlüftung und den Wasserhaushalt des Bodens entscheidend sind, hat erhebliche Folgen. In Starkregenexperimenten (100 mm/h) nahmen ungestörter Waldboden sowie Flächen auf Seiltrassen das gesamte Wasser auf. Auf Rückgassen hingegen flossen 56 % (H-) bzw. 66 % (H+) des Niederschlags oberflächlich ab. Selbst 20 Jahren nach Befahrung betrug der Oberflächenabfluss

noch 23 %. Dadurch sinkt der Wasserrückhalt. Gleichzeitig entsteht Staunässe in den Rückegassen – mit negativen Auswirkungen auf den Lebensraum Boden.

Wurzeln und Regenwürmer

In Rückegassen (Erntesystem H-) wurden im Jahr nach der Befahrung bis zu 61 % weniger Feinwurzeln festgestellt. Auch Regenwürmer fehlten dort nahezu vollständig. Mit Bändern waren die Effekte zwar schwächer, aber weiterhin deutlich sichtbar, während die Seilrückung die geringsten Beeinträchtigungen zeigte. Langfristig tritt eine Teil-Regeneration ein: In 18 Jahre alten Rückegassen war in den oberen 10 cm eine deutliche Erholung des Bodenlebens erkennbar. Die Feinwurzelbiomasse hatte sich weitgehend erholt, und Regenwürmer waren hier sogar zahlreicher als auf ungestörten Flächen. Lediglich tief grabende erwachsene Regenwürmer blieben reduziert, und auch die Wurzelbiomasse in tieferen Schichten erreichte nicht das Niveau ungestörter Böden. Dies bestätigt, was die Bodenstruktur zeigt: In den oberen Bodenschichten bildet sich eine biologisch aktive Zone, die jedoch weiterhin durch die tieferliegende Verdichtung beeinflusst wird.

Treibhausgase und Mikroorganismen

Die physikalischen Veränderungen des Bodens beeinflussen die Lebensbedingungen für Mikroorganismen. Die Holzernte verändert zwei zentrale Steuergrößen: die Verfügbarkeit organischen Materials und die Sauerstoffversorgung über Poren. In Rückegassen ohne Bänder sinken die CO₂-Emissionen nach der Ernte, was auf den Verlust an organischem Material hinweist (Abb. 2). Mit Bändern wird organisches Material stärker zerkleinert und eingearbeitet, was langfristig zu höheren CO₂-Emissionen führt. Gleichzeitig treten dort ähnlich viele

Mikroorganismen wie in ungestörten Beständen auf, was die Erholung der H+ Rückegassen begünstigen könnte.

Normalerweise sind Waldböden eine Methansenke. In Rückegassen schwächt Sauerstoffmangel diesen Effekt jedoch ab oder kehrt ihn sogar um. Am stärksten zeigt sich dies in Rückegassen mit Bändern, gefolgt von solchen ohne Bänder und schließlich den Seiltrassen. Die Lachgas-Emissionen steigen langfristig und deutlich an und erreichen teilweise das Niveau von gedüngten Ackerflächen.

Fazit

Die Ergebnisse des HoBo-Projekts zeigen deutlich: Bodenschäden durch Holzernte wirken langfristig und lassen sich schwer rückgängig machen. Doch es gibt technische und organisatorische Möglichkeiten, sie zu begrenzen. Nachhaltige Waldbewirtschaftung erfordert daher eine vorausschauende Planung der Erntezeitfenster (Trockenperioden oder gefrorener Boden), des Rückewegenetzes (dauerhaft über Umtriebszeiten hinweg festgelegt) sowie der Technik (größere Gassenabstände mit seitlichen Zufällen, vermehrter Einsatz von Seilgeräten). Dabei müssen Zielkonflikte zwischen Sicherheit, Leistung und Kosten im Vergleich zum Bodenschutz abgewogen werden. So bleiben zentrale ökologische Funktionen wie Wasserspeicherung, Nährstoffkreisläufe und Kohlenstoffbindung erhalten – und die Wälder widerstehen den Herausforderungen des Klimawandels. Dabei müssen Zielkonflikte zwischen Bodenschutz, Sicherheit, Kosten und Leistung miteinander abgewogen werden

Weitere Informationen

<https://drive.boku.ac.at/d/f6a1fd3bb4924e4eb82a>

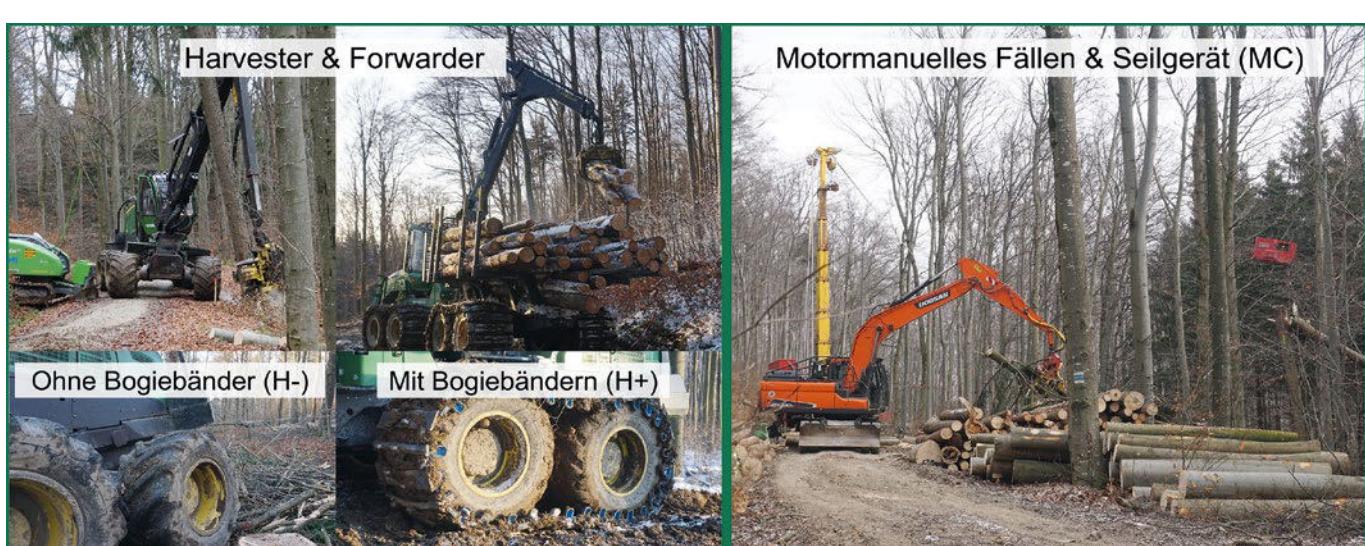


Abb. 1: Die auf den Versuchsflächen im Wienerwald eingesetzten Holzerntesysteme

Projektteam:

Maximilian Behringer BSc., DI Lisa Gasser, DI Julian Grünberg,
 Univ.-Prof. Klaus Katzensteiner, Priv.-Doz. Dr. Christian Scheidl,
 Priv.-Doz. Dr. Martin Kühmaier (alle BOKU), Christoph Haas MSc.,
 Dr. Barbara Kitzler, Dr. Gerhard Markart, Armin Malli MA (BFW),
 DI Monika Kanzian, DI Alexandra Wieshaider (ÖBF),
 Priv.-Doz. Mag. Dr. Gertraud Meißl (Universität Innsbruck)

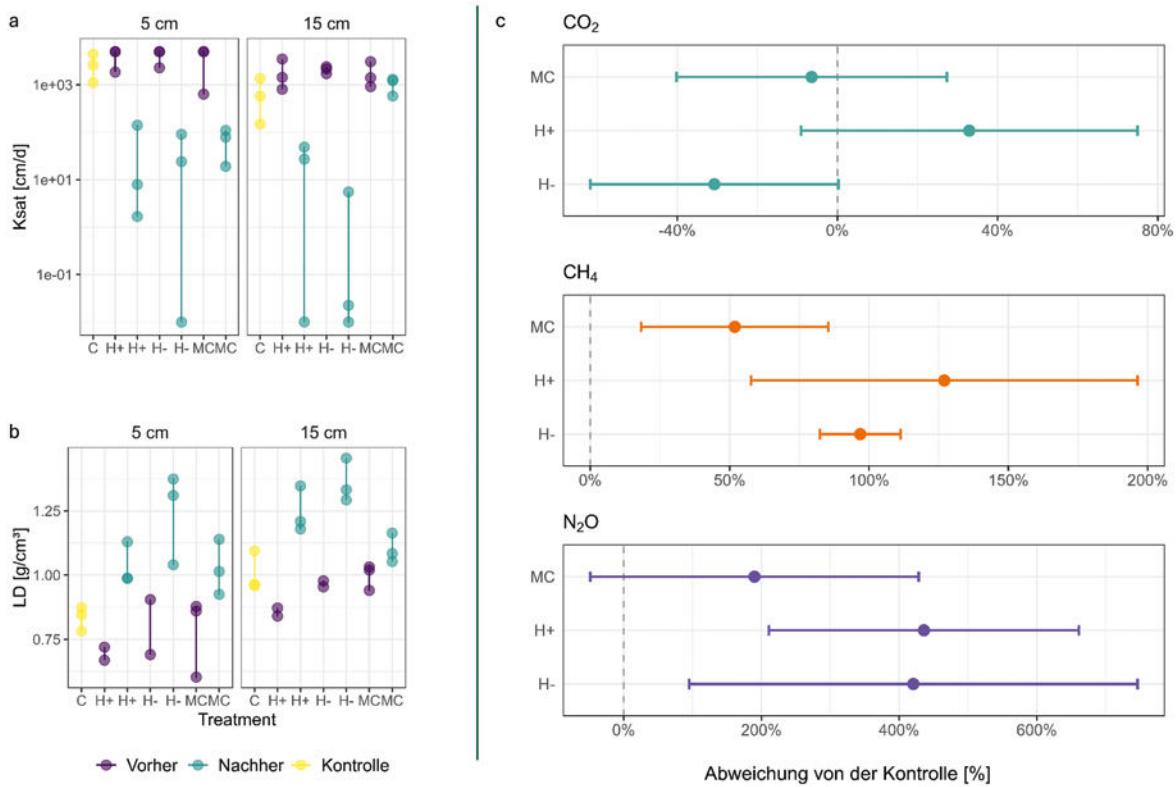


Abb. 2: Der Effekt der Holzernte auf (a) gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (Ksat), (b) Lagerungsdichte (LD) und (c) Treibhausgase. C bezeichnet Kontrolle, H+ Harvester und Forwarder mit Bändern, H- Harvester und Forwarder ohne Bänder, MC motormännuelles Fällen und Seilgerät.

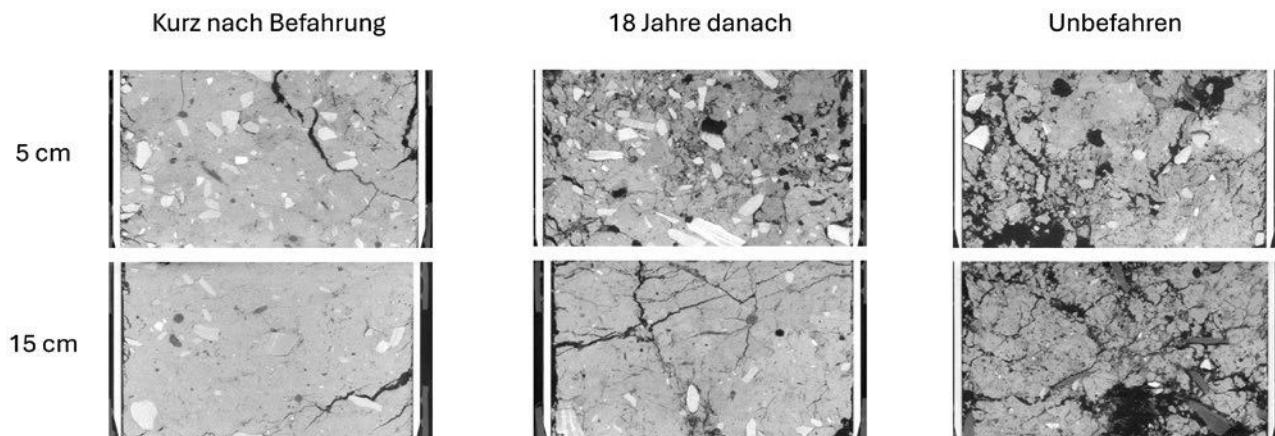


Abb. 3: CT-Scans von Bodenproben zeigen die langsame Erholung der Bodenstruktur nach Befahrung. Poren erscheinen schwarz/dunkelgrau, etwas heller ist organisches Material abgebildet. Dominiert werden die Bilder von Bodenmatrix, die in einem mittleren grau erscheint. Gestein ist aufgrund der höheren Dichte hellgrau.

Konsequenzen des Klimawandels auf die Baumartenmischung des Wienerwaldes aufgrund historischer Trockenstressreaktionen

TORSTEN W. BERGER
EMILIA WINTER ARTUSIO
KLAUS DOLSCHAK
PROJEKTTEAM

Kenntnisse über die Trockenstressreaktionen heimischer Baumarten sind entscheidend, um klimabedingte Verschiebungen ihrer Verbreitungsgebiete abzuschätzen. Die Rotbuche, dominierende Baumart im Wienerwald, wird jedoch als besonders empfindlich auf Bodentrockenheit und hohe Lufttemperaturen beschrieben. Zahlreiche, andere Baumarten sind derzeit nur in geringem Ausmaß beigemischt.

Schlussfolgerungen aus dem WiwaKonKlim-Projekt

- Mittlere Zuwachsreaktionen auf akuten Trockenstress zeigen, dass Lärche und Schwarzkiefer am trockenresistentesten sind. Die Buche im Wienerwald rangiert am viertletzten Platz von 14 untersuchten Baumarten.
- Auf frischen Standorten mit optimaler Nährstoffversorgung ist die Anfälligkeit der Buche für Trockenstress erhöht.
- Langfristige Wachstumsprognosen für zukünftige Klimaszenarien zeigen jedoch neutrale Reaktionen für Buche und Traubeneiche. Klarer Gewinner ist die Zerreiche. Abnehmendes Wachstum zeigen Lärche, Schwarzkiefer, Rotkiefer, Fichte und Bergahorn.

Im Projekt WiwaKonKlim werden Standortfaktoren, dendrochronologische und dendrochemische Analysen sowie ökohydrologische Modelle mit einem einzigartigen Datensatz aus Boden- und Blattdaten der Jahre 1984, 2012 und 2022 verschnitten. Die zentrale Arbeitshypothese lautet, dass der Klimawandel Vitalität und Wachstum der gegenwärtig dominierenden Buche im Wienerwald negativ beeinflusst, und dass Anpassungen in der zukünftigen Baumartenmischung notwendig sind, um wesentliche Ökosystemfunktionen zu sichern.

Die Forschung konzentrierte sich auf folgende Fragen:

- Wie sensibel reagiert die Buche im Vergleich zu den anderen vorkommenden Baumarten auf Trockenstress?
- Wie beeinflussen Standortsfaktoren (Klima, Boden, Lage) die baumartenspezifische Empfindlichkeit?
- Kann man anhand retrospektiver Analysen historischer Trockenstressreaktionen und Wachstumsbedingungen die Zukunftsfähigkeit verschiedener Baumarten unter veränderten Klimabedingungen modellieren?

Der Wienerwald im sommerwarmen Osten von Österreich, der häufig unter Trockenperioden leidet, bietet ideale Bedingungen für diese Untersuchungen. Das allgemeine Ziel ist es, Grundlagen für eine klimafitte Bewirtschaftung von Laubwäldern zu erstellen.

Methodik

1984 wurden 152 Altbuchenbestände erfasst. 2012 untersuchte man bei 97 verbliebenen Beständen erneut Boden- und Blattproben (Berger et al., 2016). Diese Standorte wurden 2022 im Rahmen dieses Projektes erneut aufgesucht, wobei 62 Standorte für eine Wiederholungsaufnahme verfügbar waren. Erstmal berücksichtigten wir auch beigemischte Baumarten (jeweils 7 Bäume pro Standort). Am häufigsten beigemischt waren Traubeneiche, Zerreiche und Lärche, die auf 27, 12 bzw. 12 der 62 Standorte vorkommen. Ein Versuchsstandort mit Buche, Fichte, Lärche und Douglasie wurde zusätzlich aufgenommen. Mit 5 mm-Zuwachsbohrern entnahm man von allen „Baumgruppen“ (sieben Bäume einer Art, zwei Wiederholungen pro Baum) etwa 2200 Stammbohrkerne. Deren Jahrringe wurden für die dendrochronologische Untersuchung datiert und vermessen. Für Hainbuche, Linde und Spitzahorn war eine Datierung nicht möglich, wohl aber für die 14 in Tabelle 1 aufgelisteten Arten. Zur Bestimmung des Trockenstresses wurde eine bodenhydrologische Modellierung durchgeführt (Dolschak et al., 2019). Das Modell simuliert den Wasserhaushalt auf den einzelnen Standorten in täglichen Schritten. Anhand der simulierten Bodenfeuchte, verschiedener Transpirationsparameter

Tabelle 1: Rangmittel der drei Trockenheitsreaktionen Resistenz, Erholung und Resilienz für 14 Baumarten, standardisiert auf das Wachstum der Buche (*Fagus sylvatica*) am selben Standort (Differenz). Die Farbskala hebt die am meisten (blau) und am wenigsten (rot) trockenresistenten Baumarten hervor. N ist die Anzahl der verwendeten datierten Stammbohrkerne pro Baumart (modifiziert aus Winter Artusio et al., 2025).

Baumart	N	Rangmittel
Bergahorn	13	11,00
Buche	855	9,00
Douglasie	14	11,67
Esche	49	12,67
Fichte	69	6,00
Lärche	155	2,00
Roteiche	14	7,00
Rotkiefer	40	4,33
Schwarzerle	21	8,67
Schwarzkiefer	74	7,33
Tanne	32	7,00
Traubeneiche	313	7,67
Vogelkirsche	14	4,67
Zerreiche	155	6,00

sowie der klimatischen Wasserbilanz nach Jahr, Standort und saisonalen Beobachtungszeiträumen konnten folgende vier Trockenjahre für die weitere Analyse identifiziert werden: 1983, 2000, 2003 und 2015. Die zwei Jahre vor bzw. nach dem Trockenjahr wurden als Vor- bzw. Nachperiode definiert.

Zuwachsreaktion auf Trockenstress von Buche im Vergleich zu 13 beigemischten Baumarten

Die Trockenheitsreaktion einer Baumart lässt sich in drei Komponenten unterteilen:

- Resistenz: Wie stark bricht das Wachstum während einer Trockenperiode ein? (= Jahrringbreite während der Trockenheit / Jahrringbreite während der Vorperiode),
- Erholung: Wie gut erholt sich der Baum nach einer Trockenperiode im Vergleich zur Dürrephase? (= Jahrringbreite während der Nachperiode / Jahrringbreite während der Trockenheit),
- Resilienz: Wie nah kommt das Wachstum nach einer Trockenphase wieder an das Vorniveau heran? (= Jahrringbreite der Nachperiode / Jahrringbreite der Vorperiode).

Es wurden die mittleren jährlichen Medianwerte der Trockenheitsreaktionen von 13 Baumarten und der Vergleich zur Buche (Differenzwerte auf denselben Standorten) berechnet. In allen Fällen ist die Resistenz kleiner als Null, was darauf

hinweist, dass die bodenhydrologisch identifizierten vier Trockenjahre tatsächlich mit einer reduzierten Jahrringbreite verbunden sind. Diese drei Parameter ermöglichen es, unterschiedliche physiologische Reaktionsmuster der Baumarten zu erkennen. Beispielsweise zeigt die Schwarzkiefer eine geringe Resistenz (0,75), erholt sich jedoch schnell (1,70). Die Buche reagiert schwach auf Trockenheit (alle drei Parameter liegen zwischen 0,93 und 0,96), zeigt aber unter feuchten Bedingungen stark positive Wachstumsraten. Für die Analyse wurden die drei Parameter zunächst separat für die 14 Baumarten (standardisiert auf das Wachstum der Buche am selben Standort) gereiht. Anschließend wurden die drei Einzelränge pro Baumart gemittelt und in Tabelle 1 dargestellt. Die daraus resultierende Gesamtreihe der Baumarten von sehr trockenresistent zu wenig trockenresistent lautet: Lärche > Rotkiefer > Vogelkirsche > Fichte = Zerreiche > Tanne = Roteiche > Schwarzkiefer > Traubeneiche > Schwarzerle > Buche > Bergahorn > Douglasie > Esche.

Wechselwirkung zwischen Standort und Trockenstress

Der Zusammenhang zwischen Standortsfaktoren und Trockenstress wurde bisher kaum untersucht. Beobachtungen zeigen, dass die Buche auf nährstoffarmen (Abb. 1a) und trockenen Standorten (Abb. 1b) weniger sensibel auf Trockenheit reagiert. Dies deutet auf eine bemerkenswerte Anpassungsfähigkeit hin. Bei Stickstoffmangel und bei Wasserknappheit investiert sie stärker in eine intensive und tiefreichende Durchwurzelung als in oberirdische Biomasse. Auf frischen Standorten mit optimaler Nährstoffversorgung erhöht sich hingegen die Anfälligkeit der Buche für Trockenstress.

Auch die Böden sind vom Klimawandel betroffen. Dies konnte anhand der Veränderung der Kohlenstoffvorräte bis in 90 cm Bodentiefe über einen Zeitraum von knapp vier Jahrzehnten nachgewiesen werden (Abb. 2). Unsere Ergebnisse zeigen eine Zunahme im Oberboden, möglicherweise durch höheren Streueintrag infolge gesteigerten Zuwachses. Ein Düngungseffekt durch stetig steigendes atmosphärisches CO_2 und hohe Stickstoffeinträge ist möglich. In 20-50 und 50-90 cm Bodentiefe hingegen nahmen die Kohlenstoffvorräte signifikant ab. Diese Verluste lassen sich unter anderem auf das zunehmend wärmere und feuchtere Klima und dem damit beschleunigten mikrobiellen Abbau zurückführen. Zudem vermuten wir einen geringeren Streueintrag abgestorbener Wurzeln in tiefere Bodenhorizonte. Insgesamt überstiegen die Verluste die Zunahmen deutlich. Der mittlere Nettoverlust an Kohlenstoff zwischen 1984 und 2022 betrug rund 17 t/ha, wobei die Abnahmen im letzten Jahrzehnt (2012-2022) etwa ebenso groß waren wie in den drei Jahrzehnten (1984-2012) zuvor.

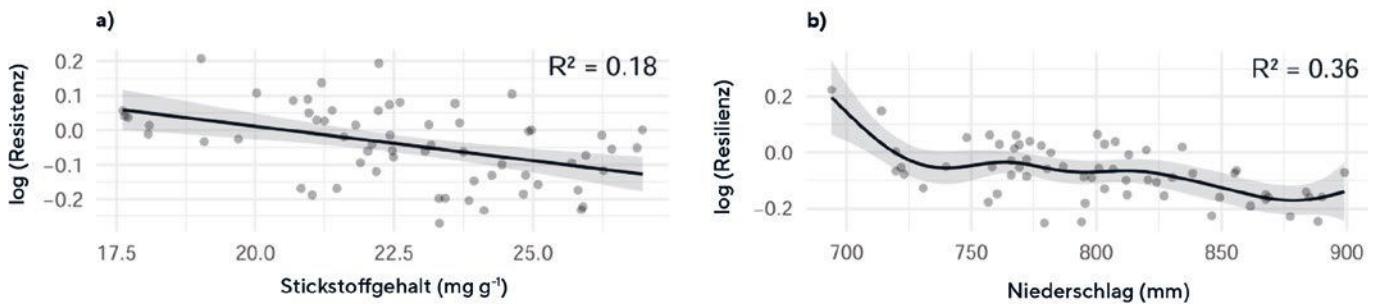


Abb. 1: a) Resistenz der Buche gegenüber Trockenstress in Abhängigkeit vom Stickstoffgehalt der Blätter und b) Resilienz der Buche nach Trockenstress in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe für alle 63 Standorte.

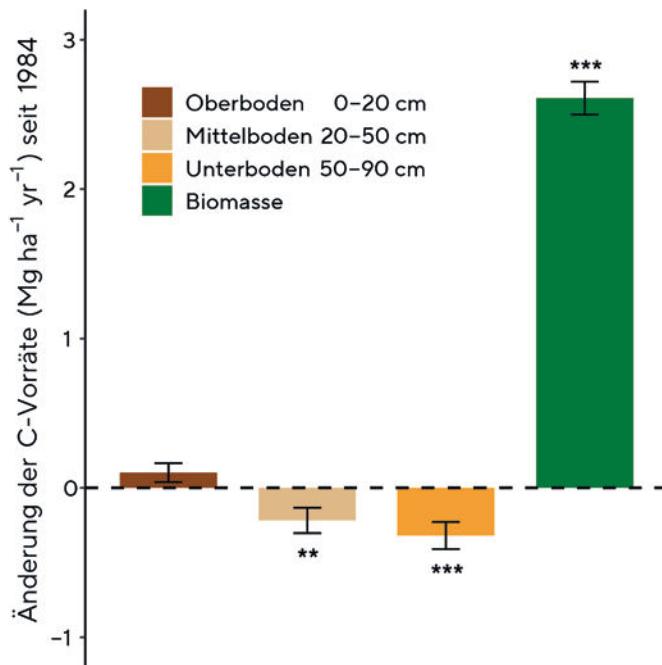


Abb. 2: Änderung der organischen Kohlenstoffvorräte im Mineralboden und der oberirdischen Biomasse in Buchenbeständen des Wienerwaldes (Mittel \pm Standardfehler, $N = 62$) zwischen 1984 und 2022. Signifikante Abweichungen von Null: *** $p < 0.001$; ** $p < 0.01$ (modifiziert aus Mayer et al., 2025).

Zukunftsfähigkeit der verschiedenen Baumarten unter sich veränderten Klimabedingungen

Wir analysierten die historischen Wachstumsbedingungen von acht der 14 Baumarten für den Zeitraum 1931–2022. Es wurde der Alterstrend aus den Jahrringchronologien entfernt, um die mittleren standörtlichen Wachstumsbedingungen der jeweiligen Jahre zu ermitteln. Parallel dazu wurden auf Basis meteorologischer Tagesdaten verschiedene Wachstumsfaktoren berechnet: Lufttemperatur, Transpirationssumme und -defizit, klimatische Wasserbilanz, modellierte Bodenfeuchte sowie verfügbarer Wassergehalt.

Anschließend wurden die Korrelationskoeffizienten zwischen den Jahrringabweichungen von der Mittellinie und den Wachstumsfaktoren bestimmt. Auf dieser Basis modellierten wir die Jahrringabweichungen unter zukünftigen Klimabedingungen bis 2100. Dafür wurden drei Klimaszenarien berücksichtigt: Baseline (keine Klimaänderung), RCP 4.5 (moderate Treibhausgasreduktionen) und RCP 8.5 (keine Treibhausgasreduktionen). Die Ergebnisse zeigen, dass die Zerr-eiche als einzige Baumart durchgehend positiv auf die projizierten Klimabedingungen reagiert und somit als klarer Gewinner hervortritt. Buche und Traubeneiche waren weitgehend neutral ohne deutliche Unterschiede zwischen den Szenarien. Lärche, Schwarzkiefer, Rotkiefer, Fichte und Bergahorn wiesen hingegen deutlich negative Wachstumsreaktionen auf, insbesondere unter RCP 8.5. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass sich die kurzfristige Wachstumsreaktion auf akuten Trockenstress (z.B., Lärche ist klarer Gewinner) von der langfristigen Wachstumsprognose (Lärche als einer der Verlierer) unterscheiden kann.

Literatur

Kann beim Erstautor angefordert werden:
torsten.berger@boku.ac.at

Projektteam:

Univ.-Prof. Dr. Torsten W. Berger ^{1,*}, Emilia Winter Artusio BSc. ^{1,2}, Dr. Klaus Dolschak ¹, Dr. Mathias Mayer ¹, Univ.-Prof. Dr. Michael Grabner ², Dr. Michael Tatzber ³, Dr. Iftekhar U. Ahmed ³, Elisabeth Wächter ², Isolde K. Berger ¹, Univ.-Prof. Dr. Wolfgang Wanek ⁴, Ing. Pétra Berger ^{1,4}

¹Institut für Waldökologie, BOKU

²Institut für Holztechnologie und Nachwachsende Rohstoffe, BOKU

³Abteilung Immissions- und Pflanzenanalyse, BFW

⁴Zentrum für Mikrobiologie und Umweltwissenschaften, Universität Wien

*E-Mail: torsten.berger@boku.ac.at

Waldzukunft in Österreich: Identifikation von klimatischen Analogregionen und Baumartenwahl

KATHARINA ENIGL
MATTHIAS SCHLÖGL
CARINA HEILING
PROJEKTTEAM

Österreichs Wälder stehen vor Herausforderungen: Borkenkäfer, Trockenheit und extreme Wetterereignisse setzen den Bäumen massiv zu. Besonders stark betroffen ist die Fichte, doch auch alternative Baumarten wie Kiefer, Douglasie, Eiche und Buche zeigen zunehmend Anzeichen nachlassender Vitalität. Das Projekt „Waldzukunft in Österreich“ sucht nun nach wissenschaftlich fundierten Entscheidungsgrundlagen für die Auswahl möglicher Alternativbaumarten für die österreichischen Wuchsgebiete.

- Der Klimawandel wirkt vor allem über Extremereignisse wie Hitzewellen, Dürreperioden und Schneelast auf den Wald.
- Die großen klimatischen Unterschiede zwischen den neun Wuchsgebieten führen zu verschiedenen Klimaanalogregionen und damit zu unterschiedlichen geeigneten Alternativbaumarten. Während in alpinen Wuchsgebieten europäische Arten dominieren, zeigen in tieferen Lagen vor allem nordamerikanische Arten eine hohe klimatische Eignung.
- Zusätzlich zur Prüfung der rechtlichen, phytosanitären und ökologischen Rahmenbedingungen sind für die identifizierten Alternativbaumarten zunächst kontrollierte Anbauversuche erforderlich, um eine sichere Datenbasis zu schaffen und negative Auswirkungen auf heimische Ökosysteme zu vermeiden.

Ein Schwerpunkt des Projektes war die Auswahl und Entwicklung erweiterter Klimaindikatoren, die Extremereignisse (z. B. Dürre, Schneelast) berücksichtigen. Diese Indikatoren bilden die Grundlage, um Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge der in den letzten Jahrzehnten beobachteten Waldschäden zu modellieren. Die Identifikation sogenannter klimatischer Analogregionen erfolgte separat für die neun Hauptwuchsgebiete Österreichs (Abb. 1) und dient der Auswahl von 15–25

potenziell geeigneten Baumarten je Wuchsgebiet. Zudem bewerteten wir für 30 wichtige potenzielle Alternativbaumarten, die auf Basis der Klimaanalogregionen identifiziert wurden, die rechtlichen und phytosanitären Voraussetzungen für deren Anbau in Österreich, ebenso für die potentielle Einfuhr von Saat- und Pflanzgut nach Österreich. Eine umfassende Literaturstudie untersuchte die holztechnologischen Eigenschaften, mögliche Verwendungen und die Auswirkungen auf heimische Ökosysteme.

Waldschadensmodelle auf Basis von Schadens-, Klima- und Geländedaten

Der Klimawandel wirkt nicht unmittelbar durch die Erhöhung von Mittelwerten auf den Wald, sondern oft über Klimaextreme. Daher analysierte das Projekt umfangreiche Schadens-, Klima- und Geländedaten aus ganz Österreich. Ziel war es, mithilfe datenbasierter Modelle wie Random Forests besser zu verstehen, welche Faktoren zu Waldschäden wie Borkenkäferbefall, Schneedruck oder Trockenheit führen. Die Analyse ergab, dass für das Auftreten von Fichten-Schadholz besonders die Dauer von Hitzewellen, die Windexposition und die topographische Offenheit entscheidend sind. Zudem wiesen auch die Wuchsgebiete signifikante Unterschiede auf. Für das Auftreten von Schneebrech waren dagegen die

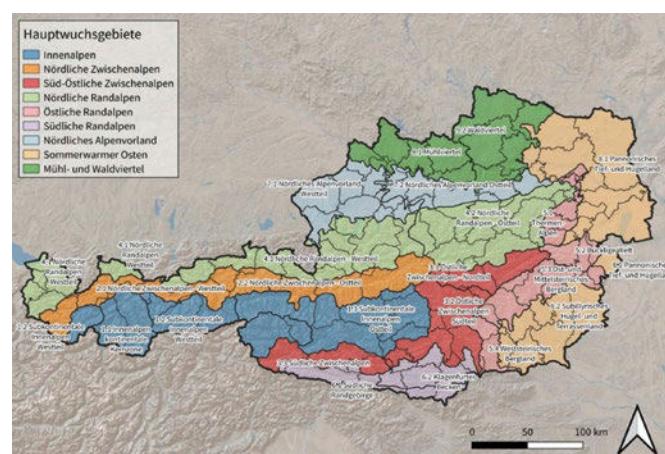


Abb. 1: Karte der österreichischen Hauptwuchsgebiete

jährlichen Maxima des täglichen Schnee-Wasser-Äquivalents und der Schneehöhen besonders aussagekräftig.

Klimaanalogregionen: große Unterschiede zwischen Wuchsgebieten

Klimaanalogregionen sind Gebiete, die heute ein Klima haben, das in Österreich und seinen Wuchsgebieten (WG) künftig erwartet wird. Im Projekt Waldzukunft wurden mittels hochauflösender Klimadaten Klimaanalogregionen für drei Klimaszenarien für die Zeiträume von 2041–2070 und 2071–2100 ermittelt. Wegen der großen klimatischen Unterschiede zwischen den Wuchsgebieten unterscheiden sich

auch die Klimaanalogregionen stark. Für das WG 8 liegen z.B. die größten Klimaanalogien im südlichen und südwestlichen Europa (Abb. 2); im Südosten Nordamerikas, im südöstlichen China und im Süden Japans. Für das WG 1 befinden sich die größten Klimaanalogien dagegen in den direkt angrenzenden Regionen Europas, dem Kaukasus, Japan und dem Nordosten der USA.

Auswahl potenzieller Zukunftsbaumarten

Für die Auswahl zukünftiger Alternativbaumarten wurden die Verbreitungsgebiete von 830 Baumarten aus Europa, Nordamerika und Asien mit den Klimaanalogregionen verschnitten

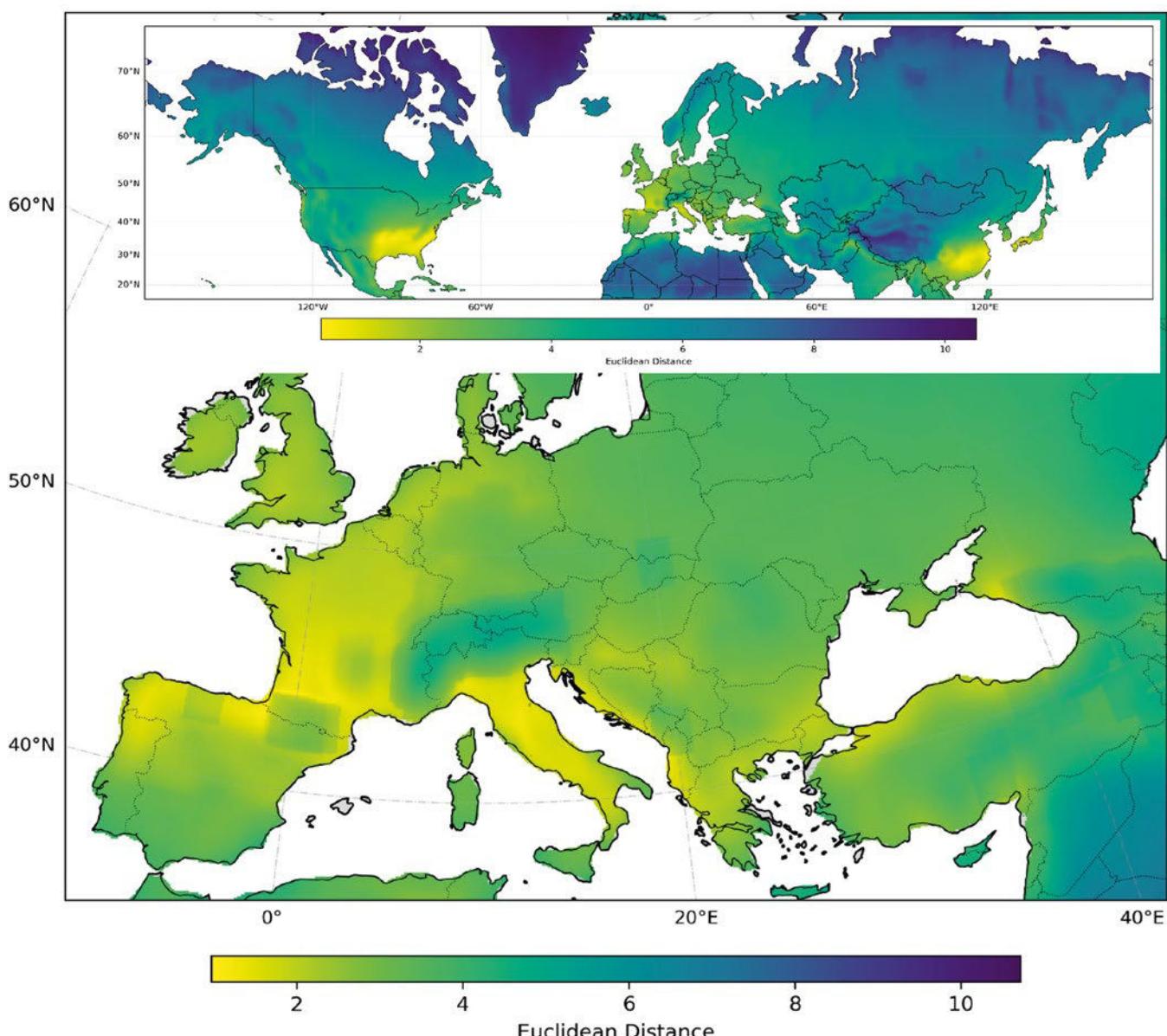


Abb. 1: Klimaanalogregionen für das Wuchsgebiet 8 (Sommerwarmer Osten) unter dem Szenario SSP3.70 in der fernen Zukunft (2071–2100) global und für Europa. Gelbe Regionen zeigen Gebiete mit hoher Ähnlichkeit (geringer euklidischer Distanz) zwischen den vergangenen klimatischen Bedingungen und den projizierten Bedingungen im WG8.

und daraus diejenigen ausgewählt, die zum zukünftigen Klima der Wuchsgebiete eine geringere klimatische Distanz aufweisen, als es für das Wuchsgebiet selbst erwartet wird. Für jedes Wuchsgebiet wurden die 30 klimatisch am besten geeigneten Baumarten bestimmt. In den alpinen Wuchsgebieten 1, 2 und 3 dominieren europäische Arten. In den tiefer gelegenen Wuchsgebieten 7, 8 und 9 zeigen vor allem nord-amerikanische Arten eine hohe Klimaanalogie.

Prüfung von rechtlichen und phytosanitären Einschränkungen und Auswirkungen auf Ökosysteme

Da die vorliegenden Baumartenlisten nicht direkt in Österreich anwendbar sind, prüften wir für 30 ausgewählte Baumarten die phytosanitären und rechtlichen Voraussetzungen zum Anbau oder zur Einführung. Dazu wurde die EU-Vermehrungsgutverordnung, das forstliche Vermehrungsgutgesetz 2002 idgF, das Forstgesetz 1975 und das Pflanzengesundheitsgesetz berücksichtigt. Zusätzlich analysierten wir die möglichen negativen Auswirkungen dieser Baumarten auf heimische Ökosysteme durch eine umfangreiche Literaturstudie. Auf Basis dieser Analysen könnten für ausgewählte Arten gezielt neue kontrollierte Anbauversuche in verschiedenen Wuchsgebieten Österreichs unternommen werden, um so langfristig eine sichere Datenbasis für zukünftige Anbauten zu schaffen.

Projektteam:

Dr. Silvio Schüler, DI Carina Heiling, Rosa Fuchs, Cornelia Amon MSc.,
Dr. Katharina Lapin, Priv.-Doz. Dr. Gernot Hoch, DI Stephanie Salzmann,
DI Hannes Krehan
Geosphere: Katharina Enigl MSc., DI Konrad Mayer (mittlerweile BOKU)
und Dr. Matthias Schlögl

Die Klimafit-Gene der Tanne

JONATHAN FEICHTER
JOHANNA REICH
PASchalina MATZIARLI
PROJEKTTEAM

Die Weißtanne gewinnt angesichts des Klimawandels an Bedeutung als wichtige Alternativbaumart zur Fichte in Österreichs Wäldern. Gleichzeitig müssen Herkunftsempfehlungen neu bewertet werden, da sich das Klima so rasch verändert, sodass lokale Bestände künftig nicht mehr die beste Wahl darstellen könnten. Hier bietet der genomische Werkzeugkasten neue Möglichkeiten, vorangepasste Provenienzen für zukünftiges Klima zu identifizieren.

Kurzinfo zum TannenGen-Projekt

- Projekt zielt auf die Entwicklung neuerer genomicscher Ressourcen für die Weißtanne ab, welche genutzt werden können, um Züchtungsprogramme zu beschleunigen, die Herkunftswahl zu unterstützen, oder um Generationsmaßnahmen zu setzen.
- Besonderes Augenmerk liegt auf der Identifikation von Genen, welche die klimatische Anpassung der Tanne steuern.

In der Humangenetik längst Alltag, galt die Anwendung in der Waldgenetik als Zukunftsmusik. Doch die DNA-Sequenzierung hat sich so weit entwickelt, dass wir sie nun mit vertretbarem Aufwand auch auf Waldbäume anwenden können. Ähnlich wie der polygenetische Risiko-Score die Anfälligkeit für bestimmte Erkrankungen beschreibt, können wir den genomicschen Versatz von Baumpopulationen bestimmen. Dieser gibt an, wie gut ein Bestand mit den prognostizierten Klimaszenarien klar kommt, und beschreibt das Risiko einer Fehlanpassung anhand des genomicschen Profils.

Erforschung von Genen für lokale Anpassungen und Mutationen

Dafür brauchen wir Wissen über Gene, die lokale Anpassungen steuern, sowie die technischen Voraussetzungen, um

Mutationen in diesen Genen in einer großen Anzahl von Populationen bestimmen zu können. Genau hier setzt das TannenGen-Projekt an: Erstmals sequenzierten Forscher:innen 20 Einzelbäume aus dem gesamten Verbreitungsgebiet vollständig (Abb. 1). Dies bildet eine wichtige Grundlage für die Entwicklung genomweiter Genmarker. Parallel dazu untersuchten sie in einem Herkunftsversuch, welche Gene die Ausprägung von Merkmalen steuern, die mit Dürreresistenz zusammenhängen.

Herkunftsversuche bleiben wichtig für Genotyp-Phänotyp-Assoziationen, sind aber zeit- und kostenintensiv und testen nur wenige Provenienzen. Durch die Kombination mit genomicschen Markern können wir die Erkenntnisse aus dem Herkunftsversuch nun auch auf neue Populationen übertragen, die wir kostengünstig im Hochdurchsatz sequenzieren.



Abb. 1: Wuchsig und höchst divers - Tannenbestände aus dem Südosten Europas.

Ergebnisse

Abb. 2 zeigt die Positionen von knapp 100 Populationen, die verwendet wurden, um die Beziehungen zwischen Genvarianten und relevanten Klimaparametern zu definieren. Die Färbung der Karte stellt den sogenannten Anpassungsindex dar. Dieser Index beschreibt die Zonierung der Klimaanpassungen und lässt unter anderem erkennen, dass Populationen aus Kalabrien und Kroatien, die sich bereits in Anbauversuchen in Österreich bewährt haben, ähnliche klimatische Anpassungen aufweisen.

Abb. 3 bewertet die im Herkunftsversuch getesteten Provenienzen und zeigt einen klaren Trend hinsichtlich der Eignung als Saatgutquelle von West nach Ost. Die berücksichtigten Indikatoren umfassen:

- die neutrale genetische Diversität, abgeleitet aus Ganzgenomsequenzen, die Rückschlüsse auf mögliche Flaschenhalseffekte in der Vergangenheit erlaubt.
- die adaptive Diversität, die als Maß für die Anpassungskapazität dient.
- die Häufigkeit von vorteilhaften Genvarianten in einer Population, die mit trockenresistenten Merkmalen assoziiert sind.
- die Wuchsgröße im Herkunftsversuch, gemessen als Brusthöhdurchmesser im Alter von 40 Jahren.
- die phänotypische Trockenanpassung, die anpassungsrelevante Merkmale von Nadel- und Jahrringproben in einem Index kombiniert.

In diesem Vergleich schnitten Herkünfte aus Südosteuropa und Kalabrien am besten ab, während die Pyrenäen-Herkunft das Schlusslicht bildete. Die Ergebnisse zeigten, dass die adaptive Diversität entlang der von uns identifizierten Kandidatengene einen wichtigen Faktor für die Wuchsgröße unter harschen Umweltbedingungen darstellt ($R^2 = 0.49$, $p = 0.02$). Eine vollständige Auflistung der genetischen Indikatoren aller untersuchten Populationen wird im Endbericht des Projekts veröffentlicht und kann künftig bei der Auswahl klimafitter Herkünfte von Nutzen sein.

Projektteam:

DI Jonathan Feichter, Johanna Reich, Paschalina Matziarli, Ing. Fatima Al-Awadi, Yuliia Bilonozhko, Jasmin Jaganjac, Dr. Agathe Hurel, Dr. Berthold Heinze (BFW)

Beraterteam:

Charalambos Neophytou, Michael Grabner, Christian Stauffer (BOKU) Besonderer Dank gilt den vielen großartigen Kollegen und Kolleginnen, die dieses Projekt durch die Bereitstellung von Proben, Daten, Bewilligungen und vieles mehr unterstützt haben: Randolph Schirmer & Barbara Fussi (AWG), Felix Gugerli & Christian Rellstab (WSL), Caroline Scotti-Saintagne & Ivan Scotti (INRAE), Marjana Westergren (SFI), Andrea Piotti & Camilla Avanzi (CNR), Dušan Gömöry (TUZVO), Dragos Postolache & Flaviu Popescu (INCDS), Petar Zhelev (LTU), Ina Aneva (BAS).

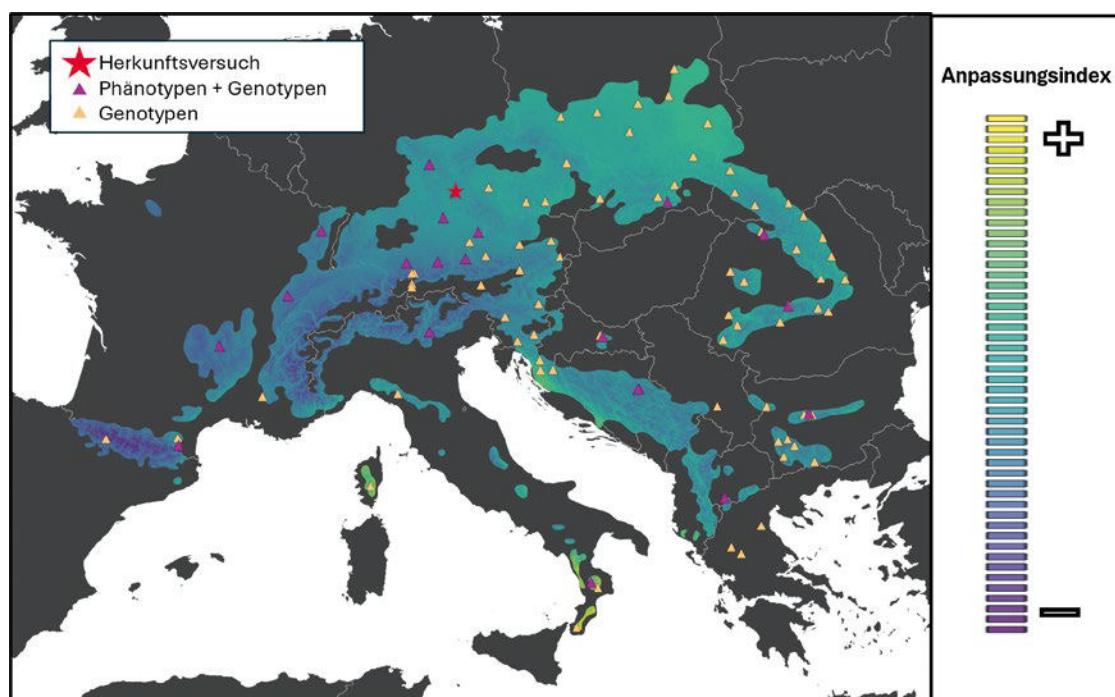


Abb. 2: Das Verbreitungsgebiet der Weißtanne umfasst verschiedene adaptive Zonen. Violette Dreiecke markieren Saatgutquellen, die im Herkunftsversuch bei Tännesberg (Bayern) getestet wurden. Gelbe Dreiecke markieren autochthone Populationen, die lediglich genotypisiert wurden.

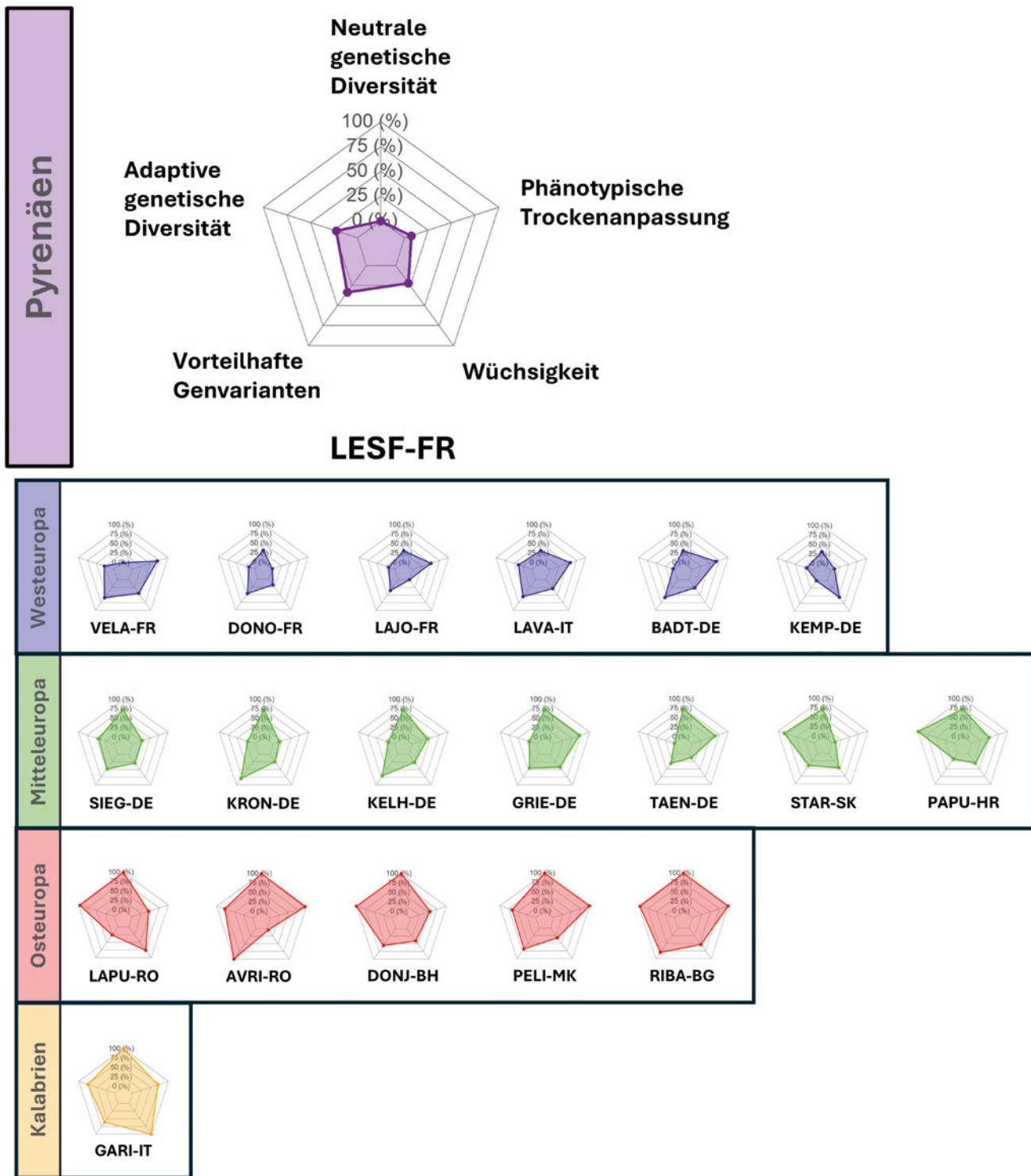


Abb. 3: Die Bewertung der getesteten Provenienzen erfolgte anhand genetischer und phänotypischer Indikatoren und wurde nach Genpools geordnet.

Standardisiertes genetisches Monitoring für Eiche und Fichte

THAPASYA VIJAYAN
BERTHOLD HEINZE
HARALD MEIMBERG
PROJEKTTEAM

Für den Herkunfts-nachweis von Waldbäumen, genetisches Monitoring und Saatgutkontrolle braucht es reproduzierbare genetische Methoden. Die derzeitigen Marker-Systeme wurden vor einiger Zeit standardisiert, so dass neue Entwicklungen in Sequenziertechniken noch nicht berücksichtigt sind. Damit stehen auch die Vorteile der neuen Techniken in Bezug auf Reproduzierbarkeit, Automatisierung und Durchsatz noch nicht zur Verfügung. GBAS (Genotypisierung durch Amplikon-Sequenzierung) setzt genau hier an.

Schlussfolgerungen des SSR-GBAS-Projekts

- Mit dem GBAS-System erfasst man kostengünstig viele Genorte und Proben parallel.
- Die automatisierte Auswertung liefert standardisierte Ergebnisse, die über Jahre vergleichbar bleiben.
- Diese Methode eignet sich auch für das genetische Monitoring und Bestände können in regelmäßigen Abständen gemessen werden.

Für Eiche und Fichte wurde ein durchgängiger, reproduzierbarer Workflow aufgebaut, in dem eine hohe Anzahl an vordefinierten Markern parallel gemessen werden können und eine benutzerfreundliche Pipeline die Allel-Bestimmung übernimmt. Die Ergebnisse können in einer standardisierten Allel-Matrise zusammengefasst werden und sind sofort mit gängigen Auswertungs-Tools nutzbar. Die Methode dient somit als Grundlage für belastbare Herkunfts-nachweise und Monitoring.

Der GBAS-Ansatz

Unser GBAS-Ansatz kombiniert zwei Markertypen:

- (1) SSR – sogenannte Mikrosatelliten, Wiederholungseinheiten, deren Länge sich zwischen Individuen unterscheidet;
- (2) EPIC-Marker, deren Primer-Erkennungssequenzen in konservierten Exons liegen und einen variablen Bereich überbrücken.

Im Labor werden alle Zielstellen in einer Multiplex-PCR gleichzeitig amplifiziert. Anschließend wird jede Probe indexiert und die Amplikons werden gemeinsam auf einer Illumina-Plattform sequenziert. Die Auswertung erfolgt über eine Software-Pipeline, die Allele anhand der vollständigen Sequenzinformation – und damit eindeutig – definiert.

GBAS-Marker für Stieleiche und Fichte

Im Rahmen des Projektes wurden für Stieleiche und Fichte GBAS Marker entwickelt, wobei das Eichen-Set auch für verwandte Eichenarten einsetzbar ist. Der Labor-Workflow ist skalierbar: Ein hoher Multiplexierungsgrad (bis ca. 120 Marker in einer Reaktion) und die Proben-Indexierung ermöglichen kosteneffizienten Routinebetrieb. Die Auswertung wird durch eine grafische Benutzeroberfläche unterstützt und führt in wenigen Schritten von der Rohsequenz zur Datentabelle. Da die Genotypen durch Sequenz-Daten klar definiert werden, können Datensätze über Jahre, Projekte und Labore hinweg verglichen werden. Software, Anleitung und geprüfte Allel-Listen für die Baumarten werden derzeit für die Veröffentlichung vorbereitet.

Als Nachweis der Anwendbarkeit unseres Systems wurden insgesamt 1 732 Eichen- und 863 Fichtenproben erhoben und ausgewertet. Die Proben decken vor allem Österreich und Deutschland ab und werden durch Proben angrenzender Regionen ergänzt. Auf dieser Grundlage wurde der Informationsgehalt der konstruierten Marker verifiziert, die Multiplex-Ansätze optimiert und der Workflow in einem „Proof of Concept“ validiert.

Die Untersuchung trennen Stiel- und Traubeneiche eindeutig. Innerhalb der einzelnen Arten werden auch reproduzierbare Unterschiede zwischen Populationen sichtbar, und

auch Hybridisierungen lassen sich zuverlässig erkennen. Damit eignet sich SSR-GBAS für wiederholbares genetisches Monitoring von Eichenbeständen – von der Ausgangserhebung bis zur Kontrolle nach Maßnahmen. Da die sequenzbasierte Allel-Liste mit jeder Anwendung aktualisiert werden kann, bleiben bestehende Datensätze mit neuen kompatibel.

Anderer Zugang bei Fichte

Bei der Fichte sind herkömmliche Genotyp-Analysen nur schwer durchführbar, aufgrund der sehr hohen Variabilität und des sehr großen Genoms mit vielen duplizierten Genorten. Diese Phänomene erschweren bei Fichte die Anwendung von Markern für populationsgenetische Untersuchungen. Bei Fichte stand daher im Vordergrund, inwieweit die größere Zahl an Markern, die unser System bietet, sowie die geringere Variabilität der EPIC-Marker, eine Unterscheidung zwischen Populationen ermöglicht. Dies konnte nachgewiesen werden: Das System bildet Unterschiede zwischen Beständen ab und trennt Saatgutpartien. Herkunfts-nachweise, Qualitätssicherung und Zertifizierung sollten daher möglich sein, wenn auch weniger klar als bei dem Eichendatensatz. Insgesamt liefert SSR-GBAS Informationen für Saatgutkontrolle, Herkunftsprüfung und ist für die Untersuchung von Bestandsdynamiken geeignet.

Schlussfolgerung für die Anwendung

Proben lassen sich mit dem GBAS-System kostengünstig in großer Zahl erfassen, die Auswertung ist automatisiert und da die Ergebnisse standardisiert sind, über Jahre hinweg vergleichbar. Ebenso ist die Methode für das genetische Monitoring geeignet und Bestände können in regelmäßigen Abständen gemessen werden. So werden Populationsstruktur, genetische Vielfalt und ihre Veränderung sichtbar, z. B. nach Sturm, Kalamitäten oder durch langfristige Bewirtschaftung. Damit liefert GBAS eine verlässliche Grundlage für die Planung von Maßnahmen, die die genetische Diversität im Wald beeinflussen können.

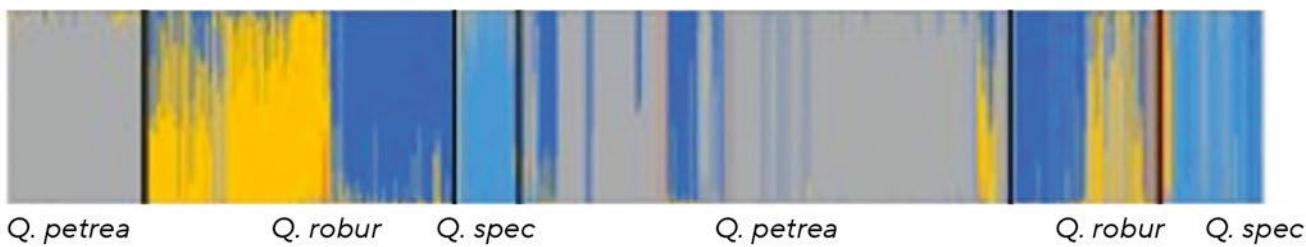
Projektteam:

BOKU: Univ.-Prof. Harald Meimberg (Leitung, meimberg@boku.ac.at), Christina Rupprecht MSc., Sebastian Sonnenberg MSc., Thapasya Vijayan MSc.

BFW: Dr. Berthold Heinze

Web: ssr-gbas.boku.ac.at

Eiche



Fichte

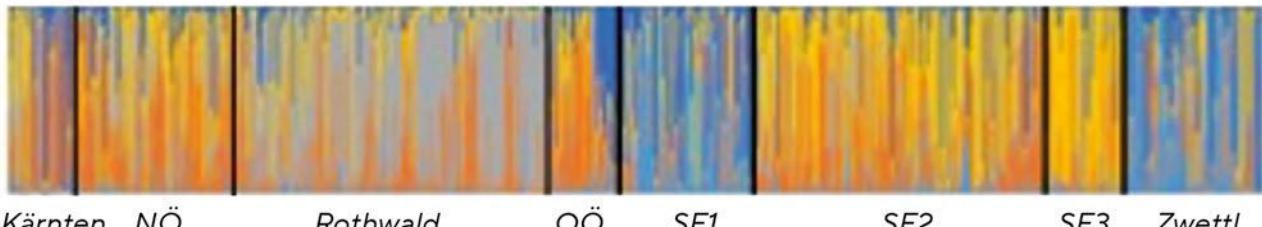


Abb. 1: Gruppenzuordnung einzelner Genotypen im Vergleich zu ihren Populationen analysiert mit dem Programm „structure“ unter Annahme von 5 Gruppen (K=5). Bei Eichen sind die verschiedenen Arten klar getrennt, aber auch innerhalb einer Art (Q. robur) sind klar 2 Gruppen erkennbar. Bei Fichte ist dies weniger deutlich. Die Analyse zeigt jedoch, dass auch hier die Populationen verschiedenen Gruppen zugeordnet werden können. Dies gilt auch für Samenfamilien (SF), die somit ihren Herkünften zugeordnet werden können.

Genetische Vielfalt von Eichenarten: Schlüssel zur Klimaanpassung

BERTHOLD HEINZE
AGATHE HUREL
AGLAIA SZUKALA
EICHEFIT-PROJEKTTEAM

Eichen werden zu den „Gewinnern“ im Klimawandel gezählt. Unter natürlichen Bedingungen ohne Eingriff der Menschheit in die Natur würden sich die Eichenwaldzonen in höhere Lagen und generell nordwärts ausbreiten. Würde das alle Eichenarten gleich betreffen, und alle Herkünfte innerhalb der Arten? Das Waldfonds-Projekt EicheFIT geht genau dieser Frage nach.

Kurzinfos zu EicheFit

- Untersuchungen zu Zerreichen aus Österreich im Vergleich zu Südosteuropa, ausgewählten Stiel- und Traubeneichen für Saatgutplantagen, Flaumeichen, „Kleinarten“ und möglichen Hybriden, und zur Roteiche aus Nordamerika.
- Einsatz modernster Gen-Marker Analysen, Bedachtnahme auf zukünftige Klima-Szenarien für Österreich
- Bei Einsatz von Eichenarten als „Gewinner“ im Klimawandel auf die Art und auf die Herkünfte schauen!
- Von den Forschungsergebnissen ausgehend sollte in der Praxis begonnen werden, in größerem Rahmen Erfahrungen mit diesen Arten und Herkünften zu sammeln.

Die Zerreiche (*Quercus cerris*) ist relativ tolerant gegenüber Temperaturextremen und Trockenheit, eignet sich somit für Problemstandorte. Im Osten Österreichs erreicht sie derzeit ihre natürliche Verbreitungsgrenze. Das wird sich aber in einer wärmeren Zukunft ändern. Wir identifizierten drei klimatisch unterschiedliche Cluster innerhalb des Verbreitungsgebiets der Art und nahmen Proben von jeweils 300 Bäumen aus repräsentativen Standorten in Kroatien, Ungarn und Slowenien. Die Holzkernproben wurden analysiert, um Reaktionen auf Dürrejahre zu ermitteln. Zusammen mit Modellen, die Wachstumseigenschaften mit Klima-Variablen in Beziehung setzen, zeigten die Ergebnisse populationsspezifische Reaktionsmuster auf Dürre und unterschiedliche Anpassungsmuster.

Für künftige österreichische Standorte wurde von Klimaszenarien ausgegangen und verglichen, wie deren Klima mit den Klima-Clustern zusammenpassen würde. Da ein simpler Klima-Vergleich „Jetzt gegenüber Zukunft“ aber erfahrungsgemäß für fundierte Herkunftsempfehlungen nicht ausreicht, werden noch die Gene näher unter die Lupe genommen: Sind vorteilhafte Varianten in den österreichischen Zerreichen schon vorhanden oder müsste man sie erst aus Süd-/Südosteuropa „nachholen“? Ein neu entwickeltes, umfangreiches Gen-Marker-Set wurde verwendet, das viele tausend Genorte gleichzeitig analysiert und zeigen soll, ob die österreichischen Zerreichen schon „klimafit“ sind.

Alternativarten und Herkünfte für eine bessere Klimaanpassung

Das EicheFit-Team untersuchte die drei österreichischen Hauptarten Stiel-, Trauben- und Flaumeiche sowie deren Unterarten und Hybriden, um ihr genetisches Potenzial für Anpassung an Trockenheit und Wärme zu erfassen. Diese „Weißeichen“ zeichnen sich durch eine sehr hohe morphologische und genetische Diversität aus, was ihre taxonomische Einordnung erschwert, aber eine ausgezeichnete Grundlage für die Klimaanpassung bietet. Die Forscher:innen sammelten rund 500 Proben aus Österreich und mehreren südosteuropäischen Ländern und analysierten diese genetisch und morphologisch. Die Analysen lieferten wertvolle Erkenntnisse zu Artenabgrenzung, Hybridisierung und klimarelevanten Anpassungen sowie potenzielle Diagnosemerkmale der Blattmorphologie. Kreuzungsexperimente und Saatgutsammlungen unterstützen langfristige Versuchsflächen, Saatgutplantagen, genetische und phänotypische Untersuchungen sowie die forstliche Praxis.

Trockentoleranz und Wachstum: heimische Stieleichen im Klimatest

In Herkunftsversuchen zeigten vielversprechende österreichische Herkünfte der Stieleiche (*Quercus robur*) gute Wuchs- und Formleistung für neue Samenplantagen. Ziel war es, zu prüfen, ob diese – und in geringerem Umfang



Stieleichen im Trockenstress – kontrollierte Bedingungen (Foto: van Loo).



Saatguternte der Traubeneiche: links zwei Mitarbeitende bei der Sammlung im Bestand, rechts die bereits geernteten und in Kartons verpackten Eicheln. (Foto: BFW)

auch jene der Traubeneiche (*Q. petraea*) – autochthon sind, über ausreichende genetische Vielfalt verfügen und welche Plastizität der Wuchsleistung sie bei unterschiedlichen Klimabedingungen zeigen, auch im Vergleich zu ausländischen Herkünften. Zudem testeten wir die Trockentoleranz einiger Stieleichenfamilien – ein im Klimawandel zunehmend wichtiges Kriterium.

Die Mehrheit der 22 untersuchten Herkünfte erwies sich als genetisch autochthon. An den fünf Versuchsstandorten schnitten österreichische Herkünfte von *Q. robur* meist besser ab als ausländische. *Q. petraea* zeigte geringere Leistungen; die besseren stammten hier vor allem aus Ungarn und Slowenien.

Zuchtwertanalysen identifizierten wertvolle Mutterbäume. Samengewicht und Keimzeitpunkt der Eicheln wirkten sich nur kurzfristig auf die Wuchsleistung aus. In Trockenstress-Experimenten zeigte sich mittels Chlorophyll-Fluoreszenz eine signifikante, familienabhängige physiologische Plastizität (Fv/Fm). Diese Familien werden derzeit genomisch und metabolisch weiter untersucht. Zudem entwickeln wir neue Selektionsstrategien, wie den sogenannten „genomic offset“ – ein genetisches Frühwarnsystem, das helfen soll, die zukünftige Klimaanpassung heutiger Saatgutbestände einzuschätzen.

Hoffnungsträger Roteiche?

Die Roteiche (*Quercus rubra* L.), die in Nordamerika heimisch ist, bietet der österreichischen Laubbaumwirtschaft im Klimawandel eine interessante Alternative. Sie kombiniert hohe Wuchsleistung mit breiter Standorttoleranz. Unser Wissen über die innerartliche Variation sowie den Ursprung österreichischer Bestände ist jedoch begrenzt. Die For-scher:innen untersuchten die genetische Vielfalt und

Herkunft österreichischer Bestände mit Hilfe von markerbasierten Analysen. Diese Analysen zeigten, dass das eingeführte Saatgut meist aus dem nördlichen Verbreitungsgebiet im Nordosten der USA stammt. Zusätzlich setzen die For-scher:innen sequenzbasierte Analysen ein, um Anpassungsmechanismen entlang eines Umweltgradienten zu untersuchen. Sie bewerten das Anpassungspotenzial der Roteiche an österreichischen Standorten. Die Ergebnisse sollen die Auswahl anpassungsfähiger Saatgutquellen unterstützen und wichtige Informationen über die genetische Konstitution heutiger Bestände liefern.

Projektteam:

Dr. Agathe Hurel, Dr. Berthold Heinze (BFW, Zerreiche); Dr. Heino Konrad, Dr. Aglaia Szukala, Dr. Soňa Píšová, Dipl.-Ing. Anton Aigner (BFW, Arten und Hybride); Dr. Marcela van Loo, Dr. Roman Ufimov, Dr. Ahmad Muhammad, Ing. Lambert Weissenbacher, Dr. Carlos Trujillo-Moya, Dr. Silvio Schüler (BFW, Stiel- und Traubeneiche); Dr. Simon Jansen, Loc Sze Florence Lee, Dr. Raphael Klumpp, Dr. Charalambos Neophytou (BOKU, Roteiche)



Zerreichen sind relativ tolerant bezüglich Standort, können aber auch vergleichsweise rasch beachtliche Dimensionen erreichen.

