



Projektantrag

Klimasensitivität von Forstgenressourcen in Deutschland (sensFORclim)

Endfassung vom 28. 3. 2019

Projektdauer: 01.07.2019 – 30.06.2022

Projektpartner:

1. Bayerisches Amt für forstliche Saat- und Pflanzenzucht (ASP)
Forstamtsplatz 1, 83317 Teisendorf
2. Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der TU München (TUM)
Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, 85354 Freising
3. Staatsbetrieb Sachsenforst, Kompetenzzentrum Wald und Forstwirtschaft, Bonnewitzer
Str. 34, 01796 Pirna (SBS)
Bonnewitzer Str. 34, 01796 Pirna
4. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA),
Wonnhaldestraße 4, 79100 Freiburg
5. ThüringenForst AÖR, Forstliches Forschungs- und Kompetenzzentrum Gotha (FFK),
Jägerstr. 1, 99867 Gotha

Kontaktdaten des Antragstellers:

Dr. Alwin Janßen (Koordinator)
Bayerisches Amt für forstliche Saat- und Pflanzenzucht
Forstamtsplatz 1, 83317 Teisendorf

0. Beantwortung der Auflagen

1. Ausgaben von Reisemitteln für Stammpersonal

Reisemittel für Stammpersonal kann nur in begründeten Ausnahmefällen über die Zuwendung abgerechnet werden. Begründete Ausnahmefälle liegen hier vor, betreffen aber nur einen kleinen Bruchteil der gesamten Reisemittel. So ist die geeignete Endauswahl aus Erntezulassungsbestände und Bestände in standörtlichen Grenzbereichen für das Projektziel essentiell. Daher soll die Endauswahl vor Ort durch Experten mit langjähriger Erfahrung unterstützt werden (Stammpersonal vom Fachgebiet für Waldernährung und Wasserhaushalt, TUM). Detaillierte Begründungen der Kosten sind in den Erläuterungen zum Finanzierungsplan im Anhang aufgeführt.

2. Meilensteine

Die Meilensteine wurden im Arbeitsplan (Abschnitt Zeitplan und Meilensteine; S. 21) fixiert. Der Zeitplan gibt eine tabellarische Übersicht der Arbeitspakete und Meilensteine mit Zuständigkeiten (S. 21).

3. Zuordnung der Aufgaben zu den Projektpartnern

Die Aufgaben der Verbundpartner wurde bereits im Abschnitt „Methodik und Lösungsweg“ (S. 14) beschrieben und im Abschnitt „Beitrag der einzelnen Verbundpartner zum Vorhaben; Zusammenarbeit mit Dritten“ (S. 19) weiter spezifiziert. Der Zeitplan gibt eine tabellarische Übersicht der Arbeitspakete mit Zuständigkeiten (S. 21).

4. Abgrenzung gegenüber „Herkunft“, „FitForClim“ und „AdaptForClim“

Das beantragte Projekt „sensFORclim“ ergänzt die Projekte „Herkunft“, „FitForClim“ und „AdaptForClim“. Im Vorhaben „Herkunft“ geht es um die Entwicklung eines großen Satzes moderner Genmarker für die Baumarten Fichte, Buche, Stieleiche und Traubeneiche. Mit diesen Genmarkern werden in 100 autochthonen Beständen jeweils 10 Bäume in Deutschland und im angrenzenden europäischen Ausland beprobt, um genetische Referenzdaten zur ursprünglichen, naturräumlichen genetischen Differenzierung der genannten Arten zu erhalten. Anhand der Referenzdaten sollen zugelassene Saatguterntebestände genetisch eingeordnet und Empfehlungen zur weiteren Verwendung des Saatgutes ausschließlich auf molekular-genetischer Basis gegeben werden. Im Unterschied dazu werden im Vorhaben „sensFORclim“ klimatolerante Herkünfte auf der Basis von Resilienzuntersuchungen und physiologischer Studien an Erntebeständen, Herkünften und Nachkommenschaften von Fichte und Buche identifiziert. Als Ausgangsbasis dienen zugelassene Saatguterntebestände sowie neue Bestände, die mit Hilfe des Projekt identifizierten bioklimatischen Gradienten ermittelt und ausgewählt werden. Während diese beiden Projekte auf die Populationsebene (Herkünfte) abzielen, werden im Vorhaben „FitForClim“ ausschließlich geeignete Bäume (Plusbäume) auf Grundlage der Ergebnisse von Herkunfts-, Nachkommenschafts- und Klonprüfungen innerhalb besonders geeigneter Populationen individuell ausgewählt. Das Vorhaben „AdaptForClim“ nutzt die Ergebnisse des Vorhabens „FitForClim“. Die dort ausgewählten Plusbäume, die in zunächst Klonarchiven gesichert werden, sind die Grundlage für den Aufbau hochwertiger Samenplantagen.

5. Dienstreisen

Die Untersuchungsbestände werden in den ersten Projektmonaten ausgewählt. Daher kann für die erforderlichen Kosten, insbesondere die Reisekosten, zum jetzigen Zeitpunkt nur eine qualifizierte Abschätzung erfolgen. Die Fahrstrecken wurden mithilfe des Routing-Services von Openstreetmap (<http://project-osrm.org>) unter Einsatz des R-Pakets ‚osrm‘ ermittelt. Hierbei wurde die durchschnittliche Entfernung zu zufällig ausgewählten Untersuchungsbeständen ermittelt (Grundgesamtheit = Erntezulassungsbestände der vier beteiligten Bundesländer). Die durchschnittliche Entfernung und die Reisetage pro Kampagne bilden die Grundlage für die Abschätzung der Reisekosten. Detaillierte Begründungen der Reisekosten sind in den Erläuterungen zum Finanzierungsplan im Anhang aufgeführt.

6. Stichprobenstrategie innerhalb der Untersuchungsbestände

Die Stichprobenahme im AP 2 für *Waldernährung* (TUM-WEL) erfolgt in den Untersuchungsbeständen (König et al. 2005) in der Lichtkrone dreier Bäume, die zu einer Mischprobe vereinigt werden. Die *Bodenprobenahme* (TUM-WEL) erfolgt tiefenstufenweise gem. Arbeitsanleitung der Bodenzustandserhebung an Satelliten (Wellbrock et al. 2006) im 10 m-Probekreis. Die Proben werden für die Analyse zu einer Mischprobe vereinigt. Die Stichprobennahme für die genetischen Analysen (AP 5) erfolgt nach einem systematisch über den Bestand gelegten Raster. Die Abstände zwischen den Probebäumen sollten mindestens 30 m betragen. Die Probenahme erfolgt bei Fichte und Tanne mittels Bohrung am Stammfuß, um Kambiumproben zu entnehmen. Bei Buche erfolgt die Probenahme mittels Stangenschere, um Blätter oder Knospen zu entnehmen.

7. Erkenntniswert Neutrale Marker für phänotypische Beobachtungen

Auch wenn durchaus eine signifikante Beziehung zwischen adaptiven und neutralen Markern bestehen kann (z.B. MERILÄ & CRNOKRAK 2001; HOLDEREGGER et al. 2006), hat die genetische Variation an neutralen Genorten i.d.R. keine direkte Beziehung zur Anpassung von Populationen. Die aus neutralen Markern abgeleiteten Verwandtschaftsbeziehungen zwischen den „klimatoleranten“ Populationen und weniger klimatoleranten Populationen in unserer Studie hat aber Implikationen für die Klimawandelanpassungsstrategie in der Praxis (SPERISEN et al. 2016). Wenn der Genfluss zwischen klimatoleranten Populationen und vom Klimawandel gefährdeten aber klimaintoleranten Populationen gering ist, wäre die gezielte Einbringung von klimatolerantem Saatgut und Pflanzmaterial in die gefährdeten Bestände dringend erforderlich („assisted migration“; MCLACHAN et al. 2007). Bei hohem Genfluss und geringer Gefährdung wären solche Maßnahmen dagegen nicht erforderlich.

Obwohl diese Daten uns weiterhin wertvolle Einblicke in das allgemeine Niveau der genetischen Variation in Populationen geben, wurden sie in den letzten Jahren zunehmend durch Daten aus der adaptiven genetischen Variation ergänzt. In den letzten Jahren hat das Wissen zur genetischen Anpassung von Baumarten deutlich zugenommen (Tanne, MOSCA et al. 2014; Buche, PLUESS et al. 2016, CUERVO-ALARCON et al. 2018; Fichte, HEER et al. 2016). Deshalb wollen wir nun adaptive Marker in unsere Studie einbeziehen. Eine Stärke unserer Studie besteht gerade in der Verknüpfung von Standortdaten mit der Genetik der Bestände. Auch wenn bei Bäumen, im Gegensatz zu vielen landwirtschaftlich genutzten Pflanzen, die Kenntnisse zu Genom-Umweltbeziehungen noch in den Anfängen stecken, sollte man sich vorerst auf die Analyse und Erhaltung der (anpassungsrelevanten) genetischen Vielfalt, die Förderung von Naturverjüngung und die Vernetzung der Bestände konzentrieren. So wird die Grundlage geschaffen, dass sich Bestände durch natürliche Prozesse an neue Umweltbedingungen anpassen können. Die Assoziation von Gen- und Umweltdaten kann einen Beitrag zur Klärung der genetischen Grundlagen für lokale Anpassung liefern (RELLSTAB et al. 2016).

8. Erweiterung NO-Tiefland

Unser Projekt bearbeitet die Hauptbaumarten des (herzynischen) Bergmischwaldes. Mit den beteiligten Partnern bzw. Bundesländern wird ein großer Teil des Hauptverbreitungsgebiets dieses submontan bis montan verbreiteten Waldtyps in Deutschland abgedeckt. In diesem geografischen Raum wird bereits im Flachland der warme und trockene Klimarand des Bergmischwaldes überschritten, denn die Dominanz der untersuchten Baumarten geht im kollinen bis planaren Bereich deutlich zurück. In den Niederungen und insbesondere in wärmebegünstigten, trockenen Lagen liegen regelmäßig Grenzertragsstandorte dieser Baumarten. Das für die Untersuchungsbaumarten repräsentative klimatische Spektrum kann daher im geplanten Zielgebiet gut abgebildet werden.

Die Ausdehnung der Untersuchungskulisse auf das NO-Tiefland, in dem aus klimatischen und historischen Gründen Kiefern und Eichen dominieren, wurde mit Experten des Landesbetriebs Forst Brandenburg besprochen, erwies sich letztlich aber nicht als zielführend.

9. Aussagekraft kurzfristiger physiologischer Untersuchungen

Die Aussagekraft der kurzfristigen physiologischen Untersuchungen ergibt sich aus der Kombination unterschiedlicher Untersuchungsansätze an ein und demselben Material (Erntebestände) und der

Verknüpfung unterschiedlicher ontogenetischer Stadien ein und desselben Ausgangsmaterials (Erntebestand, Nachkommen in älteren Herkunftsversuchen, Nachkommen aktueller Absaaten) unter Anwendung ein und desselben Methodenkataloges. Dieser Ansatz ist einmalig und erlaubt weitreichende Rückschlüsse auf die unmittelbare und mittelbare Reaktionsfähigkeit der untersuchten Baumarten auf die Veränderung relevanter klimatischer Parameter.

10. Versuchsaufbau Nachkommenschaftsprüfung

Das Projekt schafft die Grundlagen für die Anlage von Nachkommenschaftsprüfungen (NKP) der drei Baumarten. In Abweichung von der ursprünglichen Planung lässt sich eine NKP nicht in dem dreijährigen Projektzeitraum umsetzen.

In einem Folgeprojekt könnten 3 bis 4 Versuchsflächen je Baumart auf unterschiedlichen Standorten angelegt werden.

11. Dringlichkeit Baumart Fichte

Trotz der Gefährdungen an vielen Standorten wird die Fichte auf absehbare Zeit die häufigste und bedeutendste Wirtschaftsbaumart in Deutschland bleiben. Vor allem in den mittleren und höheren Lagen der Mittelgebirge und Alpen wird sie sich weiter behaupten können und einen wichtigen Bestandteil der natürlichen Waldbestockung zumindest als Mischbaumart darstellen. Aus diesem Grund sind die bioklimatischen Grenzen von gut angepassten und reaktionsfähigen Populationen dieser Baumart besonders interessant, um den zukünftigen Anbau der Fichte auf weiterhin geeigneten Standorten nachhaltig sicherzustellen. Mit der großen Anzahl und Verbreitung der Saatguterntebestände bietet sich sehr vielfältiges Potential für die Erzeugung von anpassungsfähigem Fichtenvermehrungsgut. Unabhängig davon wird von der Forstpraxis zunehmend von der Wissenschaft gefordert, nach trockenoleranten Fichten-Herkünften zu forschen und diese der Praxis zur Verfügung zu stellen.

12. Potentielle Einengung des Genpools

Die Untersuchungen dienen dazu Zusammenhänge zwischen unterschiedlichsten phänotypischen und genetischen Merkmalen zu ermitteln und die Reaktionsnormen innerhalb der untersuchten Baumarten in Bezug auf relevante klimatische und bodenkundliche Faktoren zu ermitteln. Die Ergebnisse werden Hinweise auf die grundsätzliche Eignung von Erntebeständen für die Saatguterzeugung geben, die wichtige Grundlagen für die zukünftige Beerntung dieser Bestände und Bestände unter vergleichbaren Bedingungen sowie für die Neuzulassung von Erntebestände bereitstellen. Die Gefahr einer genetischen Einengung durch die Konzentration der Erntemaßnahmen auf einzelne wenige Bestände besteht theoretisch, kann aber durch die Berücksichtigung einer Vielzahl von Beständen sowie die Beerntung einer ausreichenden Anzahl von Individuen je Bestand begegnet werden. Die größeren Verluste an genetischen Informationen sind jedoch durch den Verlust von Populationen und deren genetischen Informationen in Folge einer drastischen Selektion in Folge der klimabedingten Standortsveränderungen zu erwarten.

1. Projektziele

Ziel des Projektes ist es, nach klimatolerantem, heimischem Vermehrungsgut der Baumarten Fichte, Buche und Tanne zu forschen und für die Praxis verfügbar zu machen. Hierzu wird durch eine Kombination von weiterentwickelten ökologischen Nischenmodellen mit Methoden der Resilienzforschung und der ökologischen Genetik der in die Zukunft projizierte Einfluss des Klimawandels auf die Saatguterntebestände von Buche, Fichte und Tanne in den Bundesländern Sachsen, Thüringen, Bayern und Baden-Württemberg ermittelt.

Die Anpassung an lokale Umweltbedingungen ist bei keiner Pflanze so ausgeprägt wie bei den langlebigen Bäumen. Dies führt zu teilweise großen genetischen Unterschieden z.B. im Austriebsverhalten oder in der Kälte- und Trockenoleranz. Deutlich werden solche Variationsmuster anpassungsrelevanter Merkmale u.a. in Herkunftsversuchen, bei denen die Eigenschaften ver-

schiedener Provenienzen aus dem Verbreitungsgebiet einer Baumart auf gleichem Standort nebeneinander studiert werden können (KNUTZEN *et al.* 2015). Im Zuge eines sich schnell ändernden Klimas können Lokalanpassungen von Vorteil oder von Nachteil sein. So können bestimmte Baumpopulationen und damit die daraus gewonnen Forstgenressourcen (z.B. Saatgut und Forstpflanzen) ein hohes Anpassungspotenzial im Klimawandel aufweisen, andere dagegen nicht. Die Kenntnisse über die tatsächlich möglichen Reaktionsnormen der Bäume sind daher von grundlegender Bedeutung für die aktive Anpassung der Wälder im Klimawandel. Die Plastizität lokaler Populationen heimischer Baumarten auf Veränderungen in den Umweltbedingungen reagieren zu können, ist jedoch bis heute weitgehend unbekannt. Die Beurteilung der Eignung von forstlichem Vermehrungsgut hinsichtlich dessen Klimatoleranz ist daher bis heute nicht möglich.

Vielfach werden aktuell als Hilfestellung zur Baumartenwahl im Klimawandel ökologische Nischenmodelle angewendet (TAEGER UND KÖLLING 2015, ZIMMERMANN *et al.* 2013). Diese meist auf dem gesamten Verbreitungsgebiet einer Baumart basierenden Modelle berücksichtigen jedoch nicht die genetische Variationsbreite oder Lokalanpassungen bestimmter Populationen einer Art. Im Modell wird damit – vereinfacht - eine Hülle um die gesamte genetische Variationsbreite einer Art gelegt und diese damit nivelliert. Derartige Nischenmodelle sind daher zur Beurteilung des Klimaeinflusses auf die potenzielle Verbreitung einer Art geeignet, nicht jedoch für Aussagen über die Reaktionsnorm lokaler Populationen. Die tatsächlichen Klimafolgen für die Wälder in Deutschland können daher bis heute mittels Nischenmodellen nur eingeschränkt abgeschätzt werden.

Demgegenüber stehen Forderungen aus der Praxis nach trockenoleranten Herkünften (z.B. „Fränkische Trockentanne“) oder Fragen, ob sog. „Trockenfichten-Herkünfte“ existieren. Auch seitens der Wissenschaft werden zunehmend die gezielte Auswahl und Vermehrung von toleranten Herkünften vorgeschlagen (BOLTE 2016).

Nach Erkenntnissen der Antragsteller wurde ein interdisziplinärer Ansatz, der die Anwendung ökologischer Nischenmodelle auf die Saatguterntebestände, deren Untersuchung mittels Methoden der Resilienzforschung (z.B. Dendroökologie) und schließlich eine gezielte Überprüfung der Toleranz an daraus gewonnen Pflanzen mittels ökophysiologischer Methoden vorsieht, bislang in keiner anderen Studie verwirklicht.

Beitrag des Projektes zu den förderpolitischen Zielen der Richtlinie zur Förderung des Waldklimafonds

Die Saatgut-Erntebestände dienen als Modell für Waldökosysteme im Allgemeinen und im Speziellen für wertvolle Forstgenressourcen in Deutschland. Der innovative Forschungsansatz leistet einen essentiellen Beitrag zur Abschätzung der Vulnerabilität der Wälder in Deutschland gegenüber dem Klimawandel und ermöglicht Aussagen zur künftigen Eignung von forstlichem Vermehrungsgut für den Wald der Zukunft. Nicht zuletzt trägt das Projekt zur Versachlichung der Diskussion über die Aussagekraft der ökologischen Nischenmodelle bei.

Das Projekt hat die künftige Anpassungsfähigkeit der Wälder an die Folgen des Klimawandels im Focus und erfüllt damit die Fördergrundbedingungsvoll. Es dient insbesondere dem **Schwerpunkt 4** der Förderrichtlinie „Forschung einschließlich Monitoring zur Unterstützung der in den Nummern 2.1, „Anpassung der Wälder an den Klimawandel“, und 2.2, „Sicherung der Kohlenstoffspeicherung und Erhöhung der CO₂-Bindung von Wäldern“ aufgeführten Förderziele“. Mit dem Forschungsansatz wird vor allem den unter **2.4 b)** aufgeführten Maßnahmen Rechnung getragen „(...) Vorhaben zur Erforschung der Anpassungsfähigkeit insbesondere natürlich vorkommender Baumarten und Herkünfte (inkl. genetische Grundlagen, Genmarker für Angepasstheit bzw. Anpassungsfähigkeit), sowie Anbauversuche hinsichtlich Klimastabilität und Trockenheitsresistenz (...)“. Des Weiteren werden Maßnahmen unter **2.4 f)** „Begleitforschung zur Anpassung forstbetrieblicher Maßnahmen und Arbeitsverfahren/-abläufe aufgrund klimabedingter Veränderungen“ abgedeckt.

Die Nutzung ökologischer Nischenmodelle zur Vorselektion von Herkünften und deren physiologischer Überprüfung unter veränderten Umweltbedingungen ist ein Novum. Der Ansatz ermöglicht es, die Effekte des Klimawandels auf Baumarten zu untersuchen und besonders angepasste Herkünfte bzw. Saatguterntebestände herauszuarbeiten. Generalisten, die auch unter variablen Umweltbedingungen gut zurechtkommen und eine hohe Trockentoleranz aufweisen, stehen hierbei besonders im Fokus.

Bezug des Projekts zu Nachhaltigkeit und Bioökonomie

Der Klimawandel zählt gegenwärtig zu den zentralen Herausforderungen der Forstwirtschaft wie die Ereignisse des letzten Jahres durch die Kombination von Sturmereignissen, Dürre, Nassschnee und Borkenkäferkalamitäten eindrücklich zeigen. Holz kommt als umweltfreundlichen, Kohlendioxid speichernden und ressourcenschonenden Rohstoff bei den Anstrengungen, den unerwünschten Folgen des Klimawandels entgegenzuwirken, eine besondere Bedeutung zu. Holz wird daher vom Energiesektor (Wärmebereich, Stromerzeugung, Biokraftstoffe) verstärkt nachgefragt, zunehmend auch im stofflich-mechanischen und im chemischen Bereich. Strategien zur Identifikation und Bereitstellung mit hochwertigem forstlichem Saatgut (LIESEBACH *et al.* 2013) ist eine zentrale Aufgabe von Institutionen wie dem Bayerischen Amt für forstliche Saat- und Pflanzenzucht (ASP). Ein Weg dazu ist die Bereitstellung von Vermehrungsgut durch Forstpflanzenzüchtung, das anpassungsfähig und leistungsstark genug ist, um den erwarteten Umweltänderungen bei der Erfüllung aller Waldfunktionen gerecht zu werden. Dieser Weg bedarf allerdings eines längeren Vorlaufes und wird erst mittel- bis langfristig wirksam. Standortsangepasste und überlebensfähige Forstpflanzen mit einem hohen Maß an Anpassungsfähigkeit sind jedoch eine unverzichtbare Voraussetzung für einen Umbau der Wälder als Grundlage für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung auch in Zukunft. Das Forstvermehrungsgut für einen Waldumbau stammt noch zu ca. drei Vierteln von Erntebeständen der Kategorie „Ausgewählt“ ab. Das Vorhaben erarbeitet die Grundlagen und wissenschaftlichen Voraussetzungen für Identifikation und Ausweisung von Erntebeständen der Hauptbaumarten des herzynisch-karpatischen Bergmischwaldes, die bereits jetzt ein hohes Maß der genannten Eigenschaften wie Anpassung, Überlebens- und Anpassungsfähigkeit auf marginalen Standorten aufweisen. Durch die Klärung der grundsätzlichen Eignung solcher Erntebestände kann durch eine konsequente Übertragung auf weitere zugelassene Erntebestände die Versorgung der Forstwirtschaft aller Waldbesitzarten mit Forstvermehrungsgut genannter Qualität aufgebaut und sichergestellt werden. Das Vorhaben leistet somit einen unmittelbaren Beitrag zur Sicherstellung der Waldfunktionen durch die Etablierung von stabilen, widerstandsfähigen und resilienten Wäldern mit hoher Leistungsfähigkeit. Dies ist für die Nachhaltigkeit des Clusters Wald-Forst-Holz einschließlich der holzverarbeitenden Industrie und des Handwerks, die von dem nachwachsenden Rohstoff Holz abhängig sind, von existenzieller Bedeutung auch unter Aspekten der CO₂-Neutralität der Produktion.

2. Erkenntnisstand

Ausgangslage

Der Klimawandel wird mit hoher Wahrscheinlichkeit einen erheblichen Einfluss auf die Wälder Mitteleuropas haben. Mit ihren langen Produktionszeiträumen und einer starken Abhängigkeit von den am Standort herrschenden Umweltbedingungen ist die Forstwirtschaft in besonderem Maße vom Klimawandel betroffen. Der Zunahme von Trockenperioden wird hierbei der Haupteinfluss zugerechnet (HLÁSNY *et al.* 2014). Die Forstpraxis muss dem unvermeidlichen Wandel mit entsprechenden Anpassungsmaßnahmen begegnen. In erster Linie wird hierbei die Wahl von Baumarten angesehen, die an zukünftige Bedingungen besser angepasst sind (KÖLLING *et al.* 2009; AITKEN UND BEMMELS 2015).

Ein wichtiges Hilfsmittel bei der Baumartenwahl bilden ökologische Nischenmodelle. Diese beschreiben das potentielle Vorkommen einer Art in Abhängigkeit vom heutigen Klima (GUISSAN UND THUILLER 2005; PETERSON *et al.* 2011). Die daraus abgeleitete Vorkommenswahrscheinlichkeit kann in eine klimatische Zukunft z.B. im Jahr 2100 übertragen werden (z.B. FALK UND MELLERT 2011, HANEWINDEL *et al.* 2013). Neueste Modelle berechnen die klimatische Marginalität als Distanz zur Verbreitungsgrenze (MELLERT *et al.* 2015; MELLERT *et al.* 2016) und erlauben Rückschlüsse auf die Baumarteneignung im Hinblick auf die prognostizierte Erwärmung. In Summe haben sich diese Modelle vielfach in der Praxis durchgesetzt, um Waldbesitzer bei der Wahl der geeigneten, klimatoleranten Baumarten zu unterstützen.

In den genannten Modellierungsansätzen zur Baumartenwahl werden intraspezifische Unterschiede in der Genetik nicht berücksichtigt und damit die Angepasstheit und die Anpassungsfähigkeit lokaler Populationen durch ihre geringe Vorkommenswahrscheinlichkeit möglicherweise unterschätzt (Nivellierungseffekt s.u.). Die Angepasstheit erlaubt Bäumen gewisse Umweltveränderungen im Rahmen ihrer phänotypischen Plastizität während ihrer Lebenszeit zu überstehen. Die Anpassungsfähigkeit von Einzelbäumen in Populationen ermöglicht Evolution bzw. langfristige Anpassung an neue Umweltbedingungen durch Selektionsvorgänge. Es besteht jedoch die Gefahr, dass die Intensität des Klimawandels zum einen trotz vorhandener Plastizität die Toleranzgrenze übersteigt und zum anderen, dass die Geschwindigkeit des Klimawandels die Möglichkeit der Anpassung von lokalen Populationen übersteigt (MÁTYÁS *et al.* 2010).

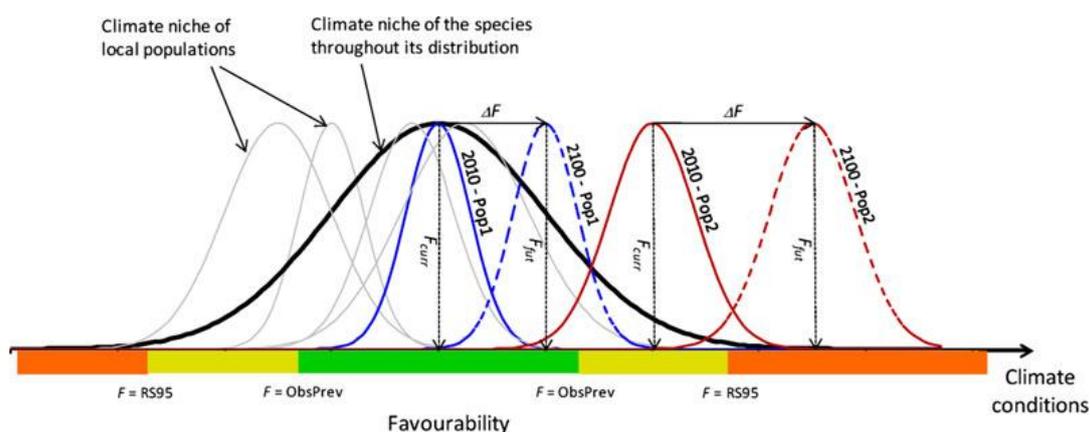


Abbildung 1: Schematische Darstellung der von lokalen Populationen besetzten klimatischen Nischen von Baumarten im Vergleich zur Klima-Nische der Gesamtpopulation (Quelle: SCHÜLER *et al.* 2014).

Die Baumarten verfügen jedoch über eine Vielzahl von Lokalanpassungen, die in einer sich ändernden Umwelt von Vorteil oder auch von Nachteil sein können. So gibt es eine große genetische Variabilität innerhalb europäischer Provenienzen (Abb. 1), mit z.B. dem bekannt starken klimatisch bedingten Selektionsdruck auf das Austriebsverhalten. Bei Nischenmodellen basierend auf Verbreitungsdaten spielt die Häufigkeit von Populationen innerhalb der Gesamtart eine große Rolle. Pop1 und Pop2 in Abb. 1 (rote Kurve) zeigt die klimatische Nische, den „Wohlfühlbereich“ einer lokalen Population einer Baumart unter heutigen Bedingungen. Relativ zum Valenzbereich der „Gesamtart“ (schwarze fette Linie) erreicht Pop1 ihr Optimum (F_{curr}) in zentraler Position, Pop2 dagegen erst an einer marginalen Nischenposition. Hierdurch entsteht ein Nivellierungseffekt: Die Eignung (Vorkommenswahrscheinlichkeit) der „Gesamtart“ wird als gering eingeschätzt, obwohl Pop2 hier eine hohe Favorability erreicht.

Die im Modell gezeigte mögliche Verschiebung (ΔF) der von einer lokalen Population potentiell zu besetzenden ökologischen Nische ist bis heute in der Natur weitgehend unbekannt. Diese kann

jedoch zu groß sein, um Anpassung in der Zukunft zu ermöglichen (SCHÜLER *et al.* 2014). Dies gilt vor allem für Populationen am Rand ihrer heutigen Verbreitung (vgl. rote Linie Pop2).

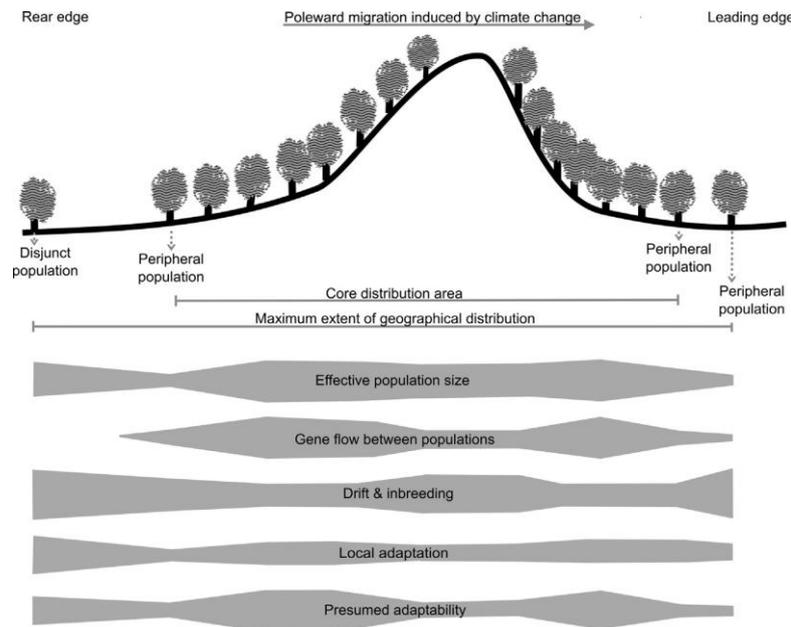


Abbildung 2: Demografische und genetische Prozesse innerhalb des Verbreitungsgebietes von Population (Quelle: FADY *et al.* 2016).

Gerade für diese Populationen am Verbreitungsrand wird eine geringe zukünftige Anpassungsfähigkeit vermutet (vgl. Abb. 2 unten). Hierbei wird auch eine Abhängigkeit von den räumlichen Verhältnissen, sprich der Heterogenität der Landschaft angenommen, da vielfältige Umweltbedingungen eher eine Verschiebung und ein Ausweichen auf günstigere Standorte erlauben, als monotone Landschaften (LOARIE *et al.* 2009). Tiefer gelegene, homogene Lagen können daher stärker vom Klimawandel betroffen sein, als Gebirgslagen, die mit ihrem Standortmosaik ein höheres lokales „Ausweichpotenzial“ für Baumarten bieten (BIRCHER *et al.* 2015).

Aufgrund des hohen Einflusses der genetischen Eigenschaften auf mögliche Umweltreaktionen, setzen daher mögliche Anpassungsmaßnahmen im Klimawandel – nach der Wahl der geeigneten Baumart - auf dem Niveau der Herkunftswahl an. Beispielsweise unterscheiden sich Baumarten im Allgemeinen hinsichtlich ihrer Reaktion gegenüber Trockenereignissen (ZANG *et al.* 2012). Je nach Typus der stomatären Steuerung des Wasserpotenzials werden isohydrische und anisohydrische Eigenschaften unterschieden (KLEIN 2014). Der erste Typ, dem beispielsweise die Fichte angehört strebt nach einem gleichbleibenden Wasserpotenzial im Leitgewebe und schließt deshalb die Stomata während länger anhaltender Trockenheit. Baumarten des zweiten Typs (z. B. Buche) nehmen eine Absenkung des Wasserpotenzials in Kauf und bleiben auch während einer Trockenheit länger photosynthetisch aktiv. Neben der interspezifischen Variation der Trockenstressreaktion deuten Untersuchungen auch auf eine intraspezifische Bandbreite möglicher Trockenstressreaktionen hin (TAEGER *et al.* 2013). Diese werden mit der Anpassung von Rassen an lokale Klimabedingungen in Verbindung gebracht.

Wegen der hohen Bedeutung der Erbanlagen für die Anpassungsfähigkeit und die Angepasstheit von forstlichem Vermehrungsgut, wurden für dessen Erzeugung und den Verkehr internationale, europäische und nationale Regelungen getroffen. Verbindliche Grundlage für die Erzeugung und das Inverkehrbringen von forstlichem Vermehrungsgut wichtiger heimischer und eingebürgerter Baumarten ist auf europäischer Ebene die Richtlinie 1999/105/EG. Diese Richtlinie gilt für 47 Baumarten innerhalb der gesamten EU. Ländergesetze setzen in den einzelnen EU-Staaten die Richtlinie in nationales Recht um. In Deutschland geschieht dies durch das Forstvermehrungsgutgesetz (FoVG). Im FoVG wurden schließlich 28 der 47 Baumarten aus der EU-Liste eine besondere forstliche Bedeutung in Deutschland zugeschrieben. Das FoVG regelt die Zulassung von Ausgangsmaterial, die Erzeugung, das Inverkehrbringen, die Ein- und Ausfuhr sowie die Herkunfts-

und Identitätssicherung von forstlichem Vermehrungsgut dieser Baumarten. Das Gesetz bezieht sich auf Saatgut, Pflanzgut und Pflanzenteile von Baumarten und Hybriden, die für forstliche Zwecke von Bedeutung sind. Das FoVG bildet damit seit 2003 die rechtliche Grundlage für die Sicherstellung der Herkunftsidentität und der genetischen Vielfalt bei Gewinnung und Inverkehrbringen von forstlichem Vermehrungsgut.

Die Verwendung angepasster und anpassungsfähiger Populationen bzw. Herkünfte bei künstlicher Verjüngung gemäß den Herkunftsempfehlungen der einzelnen Bundesländer gilt dabei nach wie vor als eine wichtige Grundlage der nachhaltigen Forstwirtschaft. Die Beachtung der Herkunftsempfehlungen bildet in vielen Bundesländern die Voraussetzung zur Inanspruchnahme einer forstlichen Förderung.

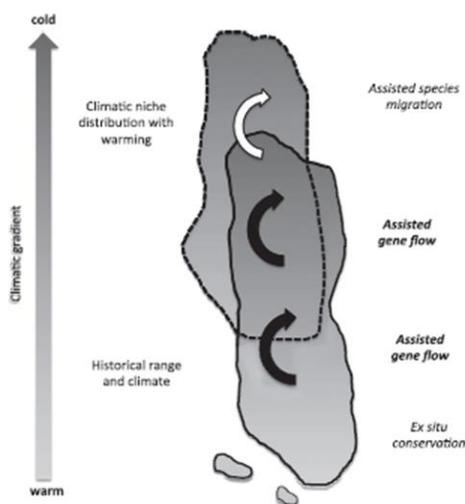


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Managementoptionen „assisted gene flow“ und „assisted migration“ entlang eines Gradienten von warmem zu kaltem Klima (Quelle: AITKEN UND BEMMELS 2015).

Dagegen werden von der Wissenschaft die oben beschriebenen, althergebrachten Erkenntnisse der Praxis, wie „lokale Herkünfte sind das Beste“ für Neukulturen zunehmend in Frage gestellt und alternative Managementoptionen für die Waldbaupraxis vorgeschlagen (MARRIS 2009; AITKEN UND BEMMELS 2015; MATYAS UND KRAMER 2016). Insbesondere sollen Maßnahmen wie „assisted migration“ oder „assisted gene flow“ die Anfälligkeit von lokalen Populationen gegenüber dem Klimawandel vermindern.

Beim sog. „assisted gene flow“ sollen lokale, evtl. gefährdete Populationen innerhalb des heutigen Areals einer Baumart aktiv mit einzelnen nicht-lokalen, vermutlich angepassten Genotypen (meist aus südlich gelegenen, wärmeren Regionen) auf Kulturflächen gemischt werden. Nach dem Motto „die Natur wird das Beste ausselektieren“ soll damit die Anpassungsfähigkeit in der Zukunft unterstützt und erhöht werden. Beim „assisted migration“ werden neue Waldgenerationen im prognostizierten, künftigen Verbreitungsgebiet mit Pflanzen aus Herkünften begründet, die mutmaßlich an die zu erwartenden Klimaverhältnisse angepasst sind (vgl. Abb. 3).

Handlungsbedarf

Bis heute sind in den meisten Bundesländern die Standortseigenschaften der Erntebestände unter anderem auch in Hinsicht auf klimarelevante bodenphysikalische Parameter unbekannt. Die Reaktion von Erntebeständen auf bisherige Klimaextreme ist bisher nicht oder nur in Ausnahmefällen untersucht worden. Wie öffentliche Diskussionen und Anfragen am ASP zeigen, werden in der Forstpraxis zwar häufig besondere tolerante Herkünfte wie beispielsweise eine „Fränkische Trockentanne“ diskutiert und nachgefragt. Ob es diese heimische, besonders klimatoleranten Lokalanpassungen tatsächlich gibt, kann bis heute nicht beurteilt werden. Für die Waldbaupraxis stehen damit keine solchen Pflanzen zur Verfügung.

Aktuell geforderte Alternativmaßnahmen, wie das oben beschriebene „assisted gene flow“ oder das „assisted migration“, könnten große Risiken bergen. Die Erfahrungen der forstlichen Praxis mit dem großräumigen Transfer sind vielfältiger Natur und nicht immer von Erfolg gekrönt (siehe u. a. ROHMEDER 1972). Durch die künstliche Translokation von forstlichem Vermehrungsgut über weite Distanzen kann es zu Abweichungen von der ursprünglichen genetischen Struktur im Verbreitungsgebiet der Art kommen. Dies kann in Folge die künftige Dynamik genetischer Prozesse nicht im gewünschten Sinne beeinflussen. Daher ist es unverzichtbar, zunächst zu prüfen, inwieweit lokale, in Deutschland und den einzelnen Bundesländern vorhandene Forstgenressourcen eine besondere Klimatoleranz aufweisen.

Die Aussagekraft ökologischer Nischenmodelle sollte verfeinert und um eine genetische Komponente ergänzt werden. So zeigen aktuelle Studien, dass bestimmte Lokalanpassungen z.B. bei der Buche nur eine geringe Plastizität gegenüber Umweltveränderungen aufweisen oder eine Anpassung an Trockenheit nicht in allen Buchenpopulationen wärmerer Klimate gegeben sein muss (PEUKE *et al.* 2002; STOJNIC *et al.* 2015). Dagegen ergaben Klimatransfersversuche, dass zentrale Populationen (vgl. Abb. 1) eine sehr große genetische und phänotypische Variationsbreite aufweisen können (STOJNIC *et al.* 2015) und die genetische Variationsbreite einen Haupteinfluss auf Unterschiede im Anpassungspotenzial hat (BOLTE *et al.* 2016). Auch bei der Eiche weisen neuere Befunde in diese Richtung (ARAB UND SEEGMÜLLER 2016).

In der Studie von STOJNIC *et al.* 2015 wurden beispielsweise junge Buchen aus dem Inneren Bayerischen Wald (5°C Jahresdurchschnittstemperatur, 1.200 mm Jahresniederschlag) an einem Buchengrenzstandort (sog. „marginal population“) in Serbien (11,1°C Jahresdurchschnittstemperatur, 624 mm Jahresniederschlag) ausgebracht. Trotz der enormen Veränderungen in den Umweltbedingungen (rd. 6°C Erhöhung der Jahresmitteltemperatur und Halbierung der Jahresniederschläge), zeigte diese Buchenherkunft aus dem Bayerischen Wald eine enorme Anpassung an Trockenheit (z.B. durch die Ausbildung skleromorpher Blätter) und die höchste Plastizität in ihrer Reaktionsfähigkeit (berechnet anhand eines Indexes). Diese Buchenpopulation aus dem Bayerischen Wald scheint daher an ihrem Ursprungsort nicht durch den Klimawandel gefährdet und gut für den Einsatz in künftig wärmeren Regionen Deutschlands geeignet zu sein. Wie dieses Beispiel zeigt, müssen nicht zwingend Herkünfte aus südlichen, wärmeren Gebieten die beste Quelle für klimatolerantes forstliches Vermehrungsgut sein.

Konkrete Zielsetzung

Die Verwendung von forstlichem Vermehrungsgut bei Anpassungsmaßnahmen im Klimawandel bedarf einer vertiefenden Analyse und einer stärkeren Berücksichtigung genetischer Aspekte (Lokalanpassungen). Neben der Verfeinerung der Nischenmodelle ist es zwingend erforderlich zu klären, welches heimische forstliche Vermehrungsgut künftig im Klimawandel besonders erfolgversprechend erscheint.

In der Studie sollen im Einzelnen folgende Ziele bzw. Arbeitspakete umgesetzt werden:

(0) Projektkoordination

Laufende Kommunikation über den Fortschritt der Partner in den Arbeitspaketen. Dokumentation der erreichten Ziele bzw. der Abweichungen vom Projektfortschritt mindestens zum Ende eines Projektjahres.

(1) Zuordnung von Standortdaten zu den Erntebeständen. In den meisten Bundesländern liegen keine digitalen Standortinformationen zu den zugelassenen Erntebeständen vor. Den in den Erntezulassungsregistern in den Bundesländern Bayern, Baden-Württemberg, Sachsen und Thüringen geführten Erntebeständen werden daher zunächst Standortattribute zugeordnet. Auf diese Weise wird der Standort der Erntebestände umfassend charakterisiert. Die Erfassung, Digitalisierung, Harmonisierung und Zusammenführung der Standortdaten in einer Datenbank bildet die Basis für Modellierung (2), Stratifizierung und Auswahl der Untersuchungsbestände (3).

(2) Ermittlung der Vulnerabilität (Marginalität) der Erntebestände gegenüber dem Klimawandel auf Basis ökologischer Nischenmodelle. Als Prädiktoren für die Nischenmodelle wurden bislang ausschließlich Klimavariablen (Makroklima) verwendet (z.B. Jahresmitteltemperatur, maximale Temperatur des wärmsten Monats etc.) (MELLERT *et al.* 2016). Durch die Integration von Standortdaten (siehe (1)) und bioklimatischen Parametern mit engerem, physiologischem Bezug soll die lokale Aussagekraft der Modelle auf Ebene der Erntebestände verbessert werden. Die Standortdaten und Modellergebnisse bilden die Grundlage für die Stratifizierung und Auswahl der Untersuchungsbestände (3).

(3) Stratifizierung des ökologischen Raumes und Auswahl von zusätzlichen marginalen Populationen für die Modellbaumarten Buche, Fichte und Tanne. Der im Modell für die jeweilige Baumart aufgespannte und prognostizierte ökologische Raum wird in einen Optimums-, Intermediär- und einen Marginalbereich des künftigen Vorkommens aufgeteilt. An den Rändern mit der geringsten künftigen Überlebenswahrscheinlichkeit, werden zusätzlich marginale Populationen (auf ungünstigeren Standorten) in regionaler Nachbarschaft ausgewählt, standörtlich charakterisiert und als sog. „Grenzbereiche“ in das Kollektiv der Untersuchungsbestände integriert.

Über diesen Schritt kann, zusätzlich zum direkten Einfluss des Klimawandels, das Anpassungspotenzial in der Landschaft (z.B. via Genfluss zwischen den benachbarten, jedoch verschieden stark vom Klimawandel betroffenen Beständen) abgeschätzt werden.

(4) Resilienzstudien. Ziel dieses Arbeitsschritts ist, die Bandbreite und Plastizität von Trockenstressreaktionen einer Baumart zu beschreiben und in den Kontext mit den jeweiligen Standortbedingungen zu setzen. Mithilfe retrospektiver Jahrringanalyse wird die lang- und kurzfristige Zuwachsdynamik der Baumarten Buche, Tanne und Fichte entlang eines ökologischen Gradienten von gut bis ungünstig wasserversorgten Standorten (Optimums-, Intermediär-, Marginal- und Grenzbereich) analysiert. Pro Standortstratum und je Baumart sollen bis zu fünf verschiedene Populationen untersucht werden. An einer Auswahl besonders resilienter Herkunftspopulationen werden vertiefende Studien hinsichtlich der Ausprägung ausgewählter morphologisch-anatomischer (Blatt-, Gefäß- und Holzdichtestrukturen) Merkmale durchgeführt. Weiterhin wird für diese Populationen der Ernährungsstatus mittels Blatt- und Nadelspiegelwerten ermittelt. Damit kann beurteilt werden, wie plastisch die untersuchten Populationen in der Vergangenheit auf Trockenstress reagierten und wie hoch die Reaktionsnormen innerhalb der Populationen sind. Damit wird herausgearbeitet, welche Populationen innerhalb der einzelnen Straten besonders stresstolerant sind.

(5) Erfassung der genetischen Variation an hochvariablen, neutralen Genorten der Kern-DNA. Die untersuchten Bäume der Versuchsbestände (siehe (4)) werden genetisch charakterisiert. Pro Bestand werden ca. 50 Bäume analysiert und die Daten der Bestände verglichen. Die genetische Variation an neutralen Markern gibt Auskunft über die genetische Basis und die historische Entwicklung eines Bestandes. Damit kann abgeschätzt werden wie groß das Anpassungspotential ist und ob ggf. evolutionäre Prozesse wie Genetische Drift die Bestände beeinflusst haben.

(6) Die tatsächliche phänotypische Plastizität und genetischen Strukturen der Modellbaumarten Buche, Fichte und Tanne werden mittels ökophysiologischer Untersuchungen an ausgewählten Erntebeständen und deren Nachkommenschaften im Vergleich zur Gesamtvariation überprüft. Anpassungsrelevante Genorte sind bereits in Ansätzen für die drei Modellbaumarten verfügbar. Zusammen mit phänotypische Studien (z.B. im Rahmen klassischer Feld-, Gewächshaus- oder Klimakammerversuche) können sie Unterschiede in der Anpassung von Lokalpopulationen einer Art aufgedeckt werden (LIEPE *et al.* 2016). Es sollen zum einen innerhalb der untersuchten Straten möglichst drei besonders plastische Populationen je Baumart und deren Nachkommenschaften mit unterschiedlichen ökophysiologischen Methoden untersucht werden. Zum anderen wird die Gesamtvariation der jeweiligen Art durch Untersuchungen an ausgewählten Herkunftsorten aus dem gesamten Verbreitungsgebiet festgestellt. Diese Datengrundlage ist am ASP weitestgehend vorhanden. Vereinzelt könnten diese durch die Beprobung von Herkunftsversuchen oder natürlichen Beständen im Ursprungsgebiet vervollständigt

werden. Die Gesamtvariation dient als Bewertungsmaßstab für die Einordnung der untersuchten Erntebestände und deren Nachkommenschaften in Hinsicht auf deren Plastizität und Anpassungsfähigkeit.

(7) Überprüfung der Aussagekraft der ökologischen Nischenmodelle. In diesem Arbeitspaket werden die modellhaft prognostizierte Vulnerabilität der Forstgenressourcen (APe 2 und 3), die tatsächlichen ökophysiologischen Reaktionsnormen von Altbeständen (AP 4) und von deren Nachkommen (AP 6), sowie deren Abhängigkeit von genetischen Eigenschaften (AP 5) in einer Gesamtschau betrachtet und die Ergebnisse verglichen und für die Weiterentwicklung der Modelle genutzt.

(8) Ausweisung von Erntebeständen zur Bereitstellung von klimatolerantem Vermehrungsgut. In diesem Arbeitsschritt werden Aussagen zur künftigen Eignung von forstlichem Vermehrungsgut für den Wald der Zukunft konkretisiert. Die retrospektive Betrachtung der Reaktion der Altbestände auf Umweltextreme (AP 4) und die vertiefenden ökophysiologischen Studien an Nachkommen von besonders plastischen Populationen (AP 6), erlauben es, besonders geeignete Erntezulassungsbestände für den Wald der Zukunft zu identifizieren. In diesen kann klimatolerantes Saatgut für die Forstpraxis produziert werden. Die Ergebnisse insbes. der ökophysiologischen Studien können mittelfristig auch in die gezielte Neuzulassung von Saatguterntebeständen in den sog. Grenzbereichen münden.

(9) Erstellung einer Suchkulisse als Grundlage für künftige Klimawandel-Anpassungs-Feldversuche. In einem letzten Schritt werden die erarbeiteten Modelle regionalisiert und Regionen mit vergleichbaren Standortbedingungen (sog. Analogregionen) abgegrenzt. Damit wird im vorliegenden Projekt eine Basis für künftige Translokationsversuche mit nationalen und internationalen Partnern gelegt. Hierbei könnten bspw. Feldversuche mit klimatoleranten Herkünften aus Deutschland ergänzt werden und dabei das Wachstum und die Qualität von unterschiedlichen heimischen sowie von heimischen und ausländischen Provenienzen verglichen werden.

Eigene Vorarbeiten

Als Sonderbehörde der Bayerischen Forstverwaltung ist das **Bayerische Amt für forstliche Saat- und Pflanzenzucht (ASP)** für den Erhalt forstlicher Genressourcen und für das forstliche Vermehrungsgut in Bayern (hoheitliche Aufgaben – Landesstelle FoVG, Erarbeitung von Herkunftsempfehlungen für das Staatsministerium, Samenplantagenprogramm, Anlage von Feldversuchen) zuständig.

Das ASP übernimmt fachlich die Zulassung von Erntebeständen und es ist hier das Erntezulassungsregister für Bayern angesiedelt. Damit besteht ein direkter Zugriff auf die Daten der Erntebestände. Auf die Daten der verwaltungsinternen Standortdaten kann an der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) über das Bayerische Standortinformationssystem (BaSIS) zugegriffen werden. Durch die Ansiedelung der Landesstelle am ASP bestehen enge Kontakte zur Forstpraxis. Dies ist besonders positiv für deren Information über Projektinhalte und –ergebnisse. Die vier Kontrollbeamten nach FoVG des ASP, die aufgrund ihrer Tätigkeit in der Fläche sehr gute Ortskenntnisse haben, werden bei der Auswahl der Flächen sowie bei der Beerntung (Genetik, Saatgut) eine wertvolle Unterstützung sein.

Das ASP verfügt über Labore auf dem neuesten technischen Stand für biochemisch-genetische und molekulargenetische Untersuchungen als feste Einrichtung. Hier werden serienmäßig, je nach Fragestellung, genetische Untersuchungen an verschiedensten Baum- und Straucharten durchgeführt. Besonders für Buche, Tanne und Fichte gibt es am Institut gut etablierte genetische Analysemethoden, die im Projekt zur Anwendung kommen sollen.

Das hier beantragte Vorhaben schließt fachlich an das Projekt MARGINS (Spezifizierung der Schwellenwerte für den klimagerechten Anbau von Waldbaumarten durch die Untersuchung von marginalen Vorkommen) an. Ziel dieses Kooperationsprojektes von HSWT, LWF, TUM sowie des ASP war es, für die wichtigen Baumarten Fichte, Kiefer, Buche, Tanne, sowie Stiel- und

Traubeneiche das Anbaurisiko in Bayern unter künftigen Klimabedingungen, v.a. bei sommerlicher Trockenheit, genauer abzuschätzen (DORADO et al. 2018). Die zwei wichtigsten Methoden waren dabei Nischenmodellierung und umfangreiche Geländeaufnahmen bei denen u.a. die Wachstumsreaktionen und die Genetik von Beständen am warmen Nischenrand innerhalb Europas untersucht wurden. Arbeitsschwerpunkt des ASP war die Erfassung und Beschreibung der genetischen Zusammensetzung dieser Baumarten an diesen Verbreitungsgrenzen. Durch die Integration der Projektergebnisse in Konzepte zur Marginalität ist es möglich, Konsequenzen für die wichtigsten einheimische Wirtschaftsbaumarten im Klimawandel abzuleiten (MELLERT et al. 2015, MELLERT et al. 2016, DORADO et al. 2018). Die Marginalität wurde bereits in weiteren Studien aufgegriffen und mit Erfolg eingesetzt (HEINRICHS et al. 2016).

Der **Lehrstuhl für Waldwachstumskunde (TUM)** verfügt über langjährige Erfahrung in der Jahrring-gestützten Zuwachsanalyse von Einzelbäumen und Beständen, die mit zahlreichen Veröffentlichungen hinterlegt ist (PRETZSCH et al. 2012, THURM 2016). Die Thematik ist seit Jahren ein Schwerpunkt der Forschungsstrategie am Lehrstuhl. Eine entsprechende Laborausstattung zur Bohrkernaufbereitung und -analyse ist am Lehrstuhl vorhanden und kann im Rahmen des beantragten Projekts entgeltfrei genutzt werden. Im Rahmen zahlreicher zum Teil abgeschlossener, zum Teil noch laufender Projekte (W40, W44, DFG KRoof), wurden zudem zahlreiche Auswertungsroutinen zur Analyse von Trockenstressreaktionen auf Basis von Jahrringwerten entwickelt bzw. verfeinert die für das beantragte Projekt zur Verfügung stehen.

Auch bei dem Projektpartner **Staatsbetrieb Sachsenforst (SBS)**, Kompetenzzentrum Wald und Forstwirtschaft werden bereits seit mehreren Jahrzehnten Arbeiten zur Identifizierung und Charakterisierung des genetischen Potentials von Bäumen und Baumpopulationen der Gattungen Douglasie, Lärche, Fichte, Kiefer und Tanne sowie Ahorn, Buche, Eiche, Kirsche, Linde, Pappel, Robinie und Weide durchgeführt. Dies erfolgt durch morphologische, phänologische, öko-physiologische und genetische Untersuchungen sowie durch die Anlage von Feldversuchen zur Prüfung von Provenienzen, Nachkommenschaften und Einzelbäumen.

Das Referat Forstgenetik/Forstpflanzenzüchtung hat sich in Zusammenarbeit mit verschiedenen Institutionen wie dem Institut für Forstbotanik der TU Dresden wiederholt mit den Reaktionen von Herkünften und Klonen der Rotbuche, Douglasie, Fichte und Weißtanne auf abiotische Faktoren wie Frost und Trockenheit befasst (NOWATZKI 1998, JANNOCH 1999, DONNARUMMA 2000, HESSE 2008, MÖHRING 2009, WITTIG 2011, GOTTER 2013, WOLF 2012, WOLF et al. 2016). Bei den Untersuchungen zum Beispiel zur Frostresistenz der Douglasie konnte dabei auf die Vorarbeiten von SCHEUMANN (1962, 1968) sowie SCHÖNBACH und SCHMIEDEL (1973) zur Entwicklung von Frühtestverfahren zurückgegriffen werden. Verschiedene Verfahren zur Erfassung der Trockenresistenz in Feld-, Gewächshaus- und Laborversuchen wurden an Pappeln in den BMEL-Verbundvorhaben „FastWOOD I bis III“ sowie an Lärchen und Douglasien in den BMEL-Verbundvorhaben „Dendromax I und II“ in die routinemäßige Anwendung überführt (SCHILDBACH et al. 2012, SCHILDBACH 2014, HARTMANN et al. 2015, WOLF et al. 2016). Die für die Untersuchungen erforderliche Infrastruktur und Geräteausstattung ist vorhanden.

Das **Forstliche Forschungs- und Kompetenzzentrum Gotha (FFK)** mit der angeschlossenen Darre ist als forstliche Ressortforschungseinrichtung des Freistaates Thüringen seit mehr als 25 Jahren die zentrale Forschungs-, Service- und Dienstleistungseinrichtung für Wald und Forstwirtschaft in Thüringen. Entsprechend des Thüringer Gesetzes über die Errichtung der Anstalt öffentlichen Rechts „ThüringenForst“ und die Aufgabenzuordnung ist das FFK Gotha u.a. zuständig für Standorterkundung, Waldschutz, Waldbiotop- und Naturraumkartierung sowie das forstliche Monitoring und die Durchführung des forstlichen Forschungs- und Versuchswesens. Dabei ist das Forschungs- und Versuchswesen ausgerichtet auf eine anwendungsorientierte, praxisnahe Forschung mit den Schwerpunkten Waldbau, Klimaanpassung, Fernerkundung und Digitalisierung im Forstbereich. Darüber hinaus ist das FFK Gotha verantwortlich für eine Reihe von betriebsinternen Aufgaben für die Landesforstanstalt (IT, Forsteinrichtung im Landeswald, Datenbereitstellung/Waldinformations-systeme, Weiterentwicklung der waldbaulichen und forstlichen Bewirtschaftungsstrategien für den Landeswald und Unterstützung der Forstämter). Mit einem breiten Schulungsprogramm und der Ausrichtung von Fachtagungen und Kolloquien

unterstützt das FFK Gotha den Wissenstransfer von angewandter Forschung in die forstliche Praxis. Die Verantwortung für die Projektarbeiten innerhalb des FFK Gotha liegt bei Herrn Ingolf Profft.

3. Arbeitsplan

Methodik und Lösungsweg

Dieses Vorhaben konzentriert sich auf die Modellbaumarten Rotbuche (*Fagus sylvatica*), Fichte (*Picea abies*) und Tanne (*Abies alba*). Die **Rotbuche** ist die häufigste natürliche Laubbaumart in Deutschland und gehört zu den wirtschaftlich bedeutendsten Laubhölzern Europas. Die Buche ist eine der Hauptbaumarten beim Waldumbau in klimatolerante Wälder. Sie weist eine hohe Variation ihrer Erbanlagen auf, was für die Anpassungsfähigkeit im Zuge des Klimawandels positiv sein kann (z.B. COMPS *et al.* 1990). Untersuchungen zeigen, dass die geografisch-genetische Variation einen hohen Einfluss auf die künftige Klimatoleranz haben kann (STOJNIC *et al.* 2015; MATYAS UND KRAMER 2016)). Die in den Erntezulassungsregistern erfassten Buchenbestände decken dabei ein breites ökologisches Spektrum ab. Die **Fichte** ist aktuell die häufigste Baumart der deutschen Forstwirtschaft. Ihr Vorkommen in Deutschland ist in einigen Regionen am klimatischen Nischenrand (KÖLLING *et al.* 2009). Allerdings lassen KÖLLING *et al.* (2009) bei ihren Ausführungen die genetische Variation innerhalb der Baumart Fichte unberücksichtigt, die sich in einer Vielzahl von Herkunftsversuchen bis in den heutigen Tag immer wieder herausgestellt hat (siehe u. a. LIESEBACH *et al.* 2001, 2010, SCHMIDT-VOGT 1987, SCHÖNBACH UND WEISS 1971). Mit dem Klimawandel steigt in warm-trockenen Gebieten ihr Betriebsrisiko bis hin zum Totalausfall. Trotz der Gefährdungen an vielen Standorten wird die Fichte auf absehbare Zeit die häufigste und bedeutendste Wirtschaftsbaumart in Deutschland bleiben. Zudem wird von der Forstpraxis zunehmend von der Wissenschaft gefordert, nach trockenoleranten Fichten-Herkünften zu forschen und diese der Praxis zur Verfügung zu stellen.

Die **Tanne** ist eine leistungsstarke Baumart mit enormer standörtlicher Amplitude. Sie könnte daher eine wichtige Nadelbaumart im Klimawandel, auch auf trockeneren Standorten sein (Fichtenersatz), bei gleichzeitig geringer Prädisposition gegenüber biotischen und abiotischen Schädigungen (z.B. Borkenkäfer, Sturmwurf) (TINNER *et al.* 2016). Die Eiche wurde nicht als Modellbaumart ausgewählt, da diese bereits in anderen Waldklimafondsprojekten (z.B. zu Reliktorkommen auf Trockenstandorten) mit Bezug zum Klimawandel untersucht wird. Auf vertiefende Untersuchungen zur Wald-Kiefer im Klimawandel wird ebenfalls verzichtet. Die Wald-Kiefer ist eine boreal-kontinentale Baumart kalt-trockener Klimate, deren Konkurrenzfähigkeit gegenüber Laubbäumen weiter ab- und ihre Anfälligkeit für Krankheitserreger im Klimawandel zunehmen werden. Ein langfristiges Überleben der Reliktorkommen erscheint damit fraglich (WALENTOWSKI *et al.* 2007). Zudem kommt es aktuell nach dem Trockensommer 2015 zu massiven Absterbeerscheinungen in Wald-Kiefernforsten. Die Eignung als klimatolerante Baumart ist daher von vorneherein fraglich.

Dieses Vorhaben soll in den Bundesländern Sachsen, Thüringen, Bayern und Baden-Württemberg durchgeführt werden. Der Untersuchungsraum deckt damit eine weite ökologische Amplitude von kalt-kontinentalem (Sachsen, Thüringen) über gemäßigt-subozeanischen Mittelgebirgs- (Bayern) bis hin zum warm-submediterranen (Kaiserstuhl, Baden-Württemberg) Klima ab. Diese Region ist nicht nur repräsentativ für Deutschland, die Heterogenität in den Umweltbedingungen bietet auch die Möglichkeit zur Ausbildung von zahlreichen, möglicherweise im Klimawandel interessanter Lokalanpassungen.

Für die Untersuchungen stehen ca. 3.000 Erntebestände der zu untersuchenden Baumarten in den beteiligten Bundesländern zur Verfügung. Die Untersuchungen können sich selbstverständlich nur auf einen Teil dieser Erntebestände konzentrieren. Die Untersuchungen dienen dazu Zusammenhänge zwischen unterschiedlichsten phänotypischen und genetischen Merkmalen zu ermitteln und die Reaktionsnormen innerhalb der untersuchten Baumarten in Bezug auf relevante klimatische und bodenkundliche Faktoren zu ermitteln. Die Ergebnisse werden Hinweise auf die

grundsätzliche Eignung von Erntebeständen für die Saatguterzeugung geben, die wichtige Grundlagen für die zukünftige Beerntung dieser Bestände und Bestände unter vergleichbaren Bedingungen sowie für die Neuzulassung von Erntebestände bereitstellen.

Im **Arbeitspaket 1** (AP 1) werden zur umfassenden ökologischen Charakterisierung der in den beteiligten Institutionen gelisteten Erntebeständen Standortdaten zugeordnet. Dieses Arbeitspaket wird zusammen mit den Projektpartnern TUM-WEL, FVA Baden-Württemberg, LWF als Unterauftragnehmer des ASP, SBS und FFK bearbeitet. Federführung, Koordination und die Erstellung einer gemeinsamen Datenbank liegen beim ASP. Diese Zuordnung der Standortattribute zu den Erntebeständen ist wesentliche Voraussetzung für die Auswahl der Untersuchungsbestände und die Modellierung. Ähnlich dem zweistufigen Verfahren der Standortkartierung (AK STANDORTSKARTIERUNG 2016) werden regionale Information zu Geologie und Makroklima durch lokale Standortinformationen zum Meso-/Mikroklima sowie zur Bodenphysik (z.B. Wasserspeicherkapazität) sowie Bodenchemie (z.B. Nährstoffstatus/Basentyp) ergänzt. Mithilfe der Standortdaten kann zudem die lokale Aussagekraft der ökologischen Nischenmodelle verbessert werden. Diese verwenden bislang standardmäßig WorldClim-Daten (Version 1.4). Einige dieser Variablen haben sich als gute Prädiktoren für die Klimahülle/Marginalität herausgestellt. Eine Präzisierung der Modelle wird in dem Projekt durch die Integration von Umweltvariablen mit stärkerem Bezug zur Physiologie (wie z.B. growing-degree-days, chilling-degree-days) und Lokalität, (Standortparameter wie z.B. nutzbare Feldkapazität oder Basentyp), erreicht. Deshalb werden hierbei verschiedene Datenquellen (z.B. ClimateEU, Worldclim 2.0) und verschiedene Modellierungsverfahren (z.B. GAM, MaxEnt) getestet. Um die Relevanz dieser Prädiktoren zu testen bzw. die Ergebnisse allgemein abzusichern, sollen – soweit möglich – auch einschlägige forstliche Leistungsparameter aus Forstinventurdaten (insbes. Bundeswaldinventur) zur Validierung herangezogen werden. Das Arbeitspaket beinhaltet die hierzu nötige Akquirierung, Prozessierung und Generierung physiographischer Standort-Geodaten sowie Ableitung ökophysiologischer Daten als Grundlage für die Verschneidung von Freiland- und Experimentaldaten.

Bisher liegen den zuständigen Stellen, wenn überhaupt, nur sehr lückenhafte Standortinformationen vor. In Bayern können die Daten der Erntebestände (GIS Flächen-Daten) den BaSIS-Standortinformationen zugeordnet werden. In den weiteren Bundesländern sind die Standortdaten und die Abgrenzungen der Erntebestände teilweise ebenfalls als Geoinformationen verfügbar. Allerdings sind die Standortinformationen nicht in einer allumfassenden Datenbank zusammengefasst und zum Teil noch nicht digitalisiert, sodass auch auf analoge Datenquellen zurückgegriffen werden muss. Des Weiteren liegen die Flächeninformationen in unterschiedlichen Maßstäben (räumliche Präzision) vor. Dies erfordert einen Abgleich der Geoinformationen mit den tatsächlichen örtlichen Standortverhältnissen. Um eine zutreffende Stratifizierung der Flächen sicher zu stellen, ist ein Abgleich von Standortinformationen vor Ort v.a. bei Datenlücken oder bei kleinmaßstäbigen Kartengrundlagen (z.B. BaSIS) erforderlich. Daher gehen wir davon aus, dass ein Teil der ausgewählten Untersuchungsbestände für den Abgleich nacherkundet werden muss. Aus Zeitgründen wird die Nacherkundung über eine längere Periode gestreckt werden müssen. Die Ergebnisse von AP1 bis AP3 werden entsprechend aktualisiert. Für den Standortabgleich wird ein Katalog von Prüfkriterien erarbeitet, der eine effiziente Charakterisierung und Zuordnung der Standorte ermöglichen wird. Zur Absicherung der Standortklassifikation werden soweit möglich Wachstumsparameter (z.B. Bonitäten) einbezogen.

In **Arbeitspaket 2** wird die Vulnerabilität der Erntebestände gegenüber dem Klimawandel wird auf Basis ökologischer Nischenmodelle als klimatische Marginalität (MELLERT *et al.* 2015, 2016) ermittelt. In Kombination mit den Standortdaten können die Bestände bereits anhand erster Modellergebnisse eingestuft werden. Durch die Integration von Standortdaten (siehe AP 1) und bioklimatischen Parametern mit engerem physiologischem Bezug wird der Standortsbezug geschärft und die Aussagekraft der Modelle auf Ebene der Erntebestände zudem weiter verbessert. Dazu wird ein äquivalenter Kalibrierungsdatensatz auf europäischer Ebene erstellt, der das Standortsspektrum der Baumart einschließlich der Verbreitungsgrenzen weitgehend abdeckt. Mit diesem Instrumentarium werden schließlich die Marginalitäten, das ist die Entfernung des Erntebestandes vom ökologischen Nischenrand, berechnet. Zusätzlich wird das Risiko modelliert,

mit dem der Bestand künftig den günstigen Nischenbereich verlässt bzw. den Klimawandel nicht überlebt.

Die Untersuchung soll in zugelassenen Erntebeständen und neue ausgewählten Beständen in standörtlichen Grenzbereichen durchgeführt werden. Die Probebestände sollen einen breiten standörtlichen Gradient abdecken. In **Arbeitspaket 3** wird für die Modellbaumarten Buche, Fichte und Tanne dazu der im Modell für die jeweilige Baumart aufgespannte und prognostizierte ökologische Raum in einen Optimums-, Intermediär- und einen Marginalbereich des künftigen Vorkommens aufgeteilt. Aufgrund der Zulassungskriterien für Saatguterntebestände werden die Bereiche an der Grenze/außerhalb des künftigen Überlebens vermutlich unterrepräsentiert sein (aufgrund der großen Bedeutung von Qualität und Wachstum werden Erntebestände bevorzugt auf besseren Standorten zugelassen). An den ermittelten Rändern mit der geringsten künftigen Überlebenswahrscheinlichkeit, werden daher zusätzlich marginale Populationen (auf ärmeren Standorten) in regionaler Nachbarschaft ausgewählt, standörtlich charakterisiert und in das Modell (AP 2) als sog. „Grenzbereiche“ integriert. Insgesamt werden damit für unsere Untersuchung also vier Straten gebildet (Optimums-, Intermediär-, Marginal-, Grenzbereich). Als Grundlage für die Recherche werden hierbei zunächst Untersuchungsbestände aus dem Bestand der BWI oder BZE einbezogen. Diese Auswahl an zusätzlichen Beständen innerhalb der Projektländer sollte bevorzugt durch deren Kontrollbeamte erfolgen, da diese die größte Erfahrung in dem Fachgebiet haben. Gerade diese neu ausgewählten Bestände auf den edaphischen Sonderstandorten können eine besondere Anpassung an Trockenperioden aufweisen. In diesem ersten Auswahlschritt wird angestrebt, pro Standortstratum und Baumart fünf Populationen im Altersbereich zwischen 70 und 100 Jahren (Probebestände) auszuwählen.

In **Arbeitspaket 4** werden vom Lehrstuhl für Waldwachstumkunde pro Probebestand temporäre Versuchsflächen angelegt (Größe ca. 0,1 bis 0,2 ha). Zur Untersuchung der Zuwachsreaktionsmuster auf Klimaextreme in der Vergangenheit unter Berücksichtigung der langfristig wirkenden Standortbedingungen werden pro Probebestand (temporäre Versuchsfläche) von ca. 20 Bäumen (jeweils zwei) Bohrkerne gewonnen und dendroökologisch analysiert. Die Widerstandsfähigkeit von Bäumen gegenüber Trockenstress kann mittelbar über das Zuwachsverhalten im Trockenjahr selbst bzw. in den darauffolgenden Jahren quantifiziert werden. So beschreibt die Resistenz den Zuwachseinbruch während eines Trockenjahres gegenüber einer vorherigen Vergleichsperiode. Die Resilienz gibt Auskunft darüber ob (LLORET 2011) und in welcher Zeitspanne (THURM *et al.* 2016) sich der Zuwachs wieder auf das Vergleichsniveau einpendelt. Die Probebäume werden über das Durchmesserpektrum des Probebestands verteilt, um größenabhängige Zuwachsreaktionsmuster zu berücksichtigen (ZANG *et al.* 2012) und um eine retrospektive Einschätzung der Bestandsproduktivität zu ermöglichen. Da sich der Verlauf der Witterungsbedingungen während der Vegetationsperiode zwischen einzelnen Trockenjahren deutlich unterscheiden kann (z. B. Beginn, Dauer der Trockenheit) können sich auch die jeweiligen physiologischen Reaktionen (Zellbildung, Zellexpansion) zwischen den Trockenjahren unterscheiden mit entsprechenden Auswirkungen auf das Resilienzverhalten. Trockenheitsinduzierte Veränderungen der Zellentwicklung schlagen sich im Dichteverlauf eines Jahrrings als Dichteschwankungen (IADF: intra-annual density fluctuations) nieder (DE MICCO *et al.* 2016). Für ausgewählte Provenienzen werden deshalb mit Hilfe der Ligno-Station intraanuelle Dichteprofile erstellt. Geeignete Parameter wie Länge von Dichteschwankung oder zeitliche Verortung im Jahrringverlauf werden dann mit den Resilienzindizes korreliert. Über regressionsanalytische Ansätze werden die gefundenen Reaktionsmuster mit den Standortdaten sowie den Ergebnissen der genetischen Untersuchungen verschnitten. Damit kann die Plastizität der drei Baumarten im Hinblick auf ihr lang- und kurzfristiges Anpassungspotenzial im Klimawandel beschrieben werden. Neben den Bohrkernen werden auf den Versuchsflächen die Dimensionsgrößen (BHD, Höhe) erhoben. Diese Erhebung erlaubt in Verbindung mit den Jahrringdaten eine retrospektive Analyse der bestandsbezogenen Produktivität.

In **Arbeitspaket 5** werden vom Bayerischen Amt für forstliche Saat- und Pflanzenzucht insbesondere die in AP 4 innerhalb der Straten als resilient eingestuften Untersuchungsbestände genetisch untersucht. Als Probematerial dient je nach Zugänglichkeit Blätter/Nadeln, Knospen oder Holz. Bei 20 Individuen/Flächen werden die Proben von denselben Individuen entnommen, von

denen auch Bohrkerne für die Jahrringanalysen entnommen wurden. Die übrigen Proben stammen von weiteren Individuen auf der Probefläche. Nach dem Eintreffen am ASP wurden die Proben registriert und gefriergetrocknet oder bei 20° C eingefroren. In diesem Zustand wurden sie bis zur Analyse aufbewahrt. Im Genlabor werden die Populationen mittels molekularer Marker genotypisiert, um wichtige Erkenntnisse über deren räumlich-genetische Strukturen zu erhalten (z. B. Hinweise auf die Herkunft durch die Verteilung der Chloroplasten-DNA-Varianten). DNA-Genmarker sind bei Buche, Fichte und Tanne serienmäßig am ASP etabliert und wurden bereits zur Lösung verschiedener Fragestellungen erfolgreich eingesetzt. Zudem steht für alle drei Baumarten ein großer Satz an Vergleichsdaten zur Verfügung. Folgende Parameter werden nach Erhebung der genetischen Daten berechnet: Genetische Diversität (z. B. Ne, Heterozygotie), Genetische Vielfalt (z.B. Allelic richness, Anzahl der genetischen Typen, Erfassung seltener genetischer Typen), paarweiser genetischer Abstand zwischen verschiedenen Kollektiven, Genetische Differenzierung. Insgesamt werden rund 1.700 Proben für neutrale Genorte (bis zu 36 Bestände) sowie rund 200 Proben für adaptive Genorte (ausgewählte Populationen) untersucht.

Das Referat Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung im Kompetenzzentrum für Wald und Forstwirtschaft des Staatsbetriebes Sachsenforst (SBS) wählt in **Arbeitspaket 6** je Stratum ca. drei Populationen aus, die als besonders resilient eingeschätzt werden, um sowohl an diesen als auch an deren Nachkommenschaften vertiefende ökophysiologische Studien durchzuführen. Bei drei Baumarten, vier Straten und drei Populationen, ergeben sich insgesamt bis zu 36 zu überprüfende Erntebestände/Herkünfte. Deren mögliche Reaktion und Plastizität im Klimawandel wird durch die Ermittlung der Xylemleitfähigkeit an bis zu drei Zweigabschnitten je Probebaum sowie des Leitfähigkeitsverlustes nach der Erzeugung künstlicher Embolien (RUST 1999, CRUIZIAT *et al.* 2002) sowie durch einfach zu handhabender Schnelltestverfahren, wie von WAGNER (1990) beschrieben, eingeschätzt. Ergänzend werden blatt/nadel-morphologische-anatomische Merkmale an bis zu fünf unbeschädigten grünen Blättern bzw. Zweigabschnitten je Baum nach standardisierten Verfahren erhoben, die Hinweise auf eine Angepasstheit auf Trockenheit geben können wie Dichte der Stomata, Dicke der Epidermis und Dicke des Mesophylls (GRUNDMANN 2009). Die Untersuchungen werden an ein und denselben Bäumen je Bestand durchgeführt, die sowohl dendroökologisch (AP 4) als auch genetisch (AP 5) analysiert worden sind.

Da der Ernährungszustand der Bäume, hier vor allem die Versorgung mit dem Nährelement Kalium, ebenfalls einen Einfluss auf die Fähigkeit, Trockenheit widerstehen zu können, besitzt, wird der Ernährungszustand der ausgewählten Baumpopulationen erfasst. Dies geschieht entsprechend der Methoden der Bodenzustandserhebung im Labor des Fachgebietes Waldernährungslehre und Wasserhaushalt der TU München. Die dazu erforderlichen Probennahmen können parallel zu anderen Probenahmen zum Beispiel für die ökophysiologischen, morphologischen oder ernährungskundlichen Untersuchungen gewonnen werden.

In Abhängigkeit von dem zur Verfügung stehenden Vermehrungsgut (Saatgut, Pflanzgut, Wildlinge) werden Nachkommen derjenigen Erntebestände, die sowohl dendroökologisch (AP 4) als auch genetisch (AP 5) und in AP 6 untersucht wurden, in Austrocknungsversuchen im Gewächshaus sowie in Klimakammerversuchen auf ihre Reaktion gegenüber Trockenheit und Frost zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Vegetationsperiode bzw. der Vegetationsruhe untersucht. Die Reaktionen werden zum einen grundsätzlich mit Bonituren zur Ausbildung von Schäden in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte bzw. der Temperatur, zum anderen an ausgewählten Pflanzen intensiv in Hinsicht auf verschiedene pflanzenphysiologische Parameter wie zum Beispiel die Xylem-Leitfähigkeit, Chlorophyllfluoreszenz, Stomata-Leitfähigkeit, Transpiration, Assimilation oder die Wassernutzungseffizienz beobachtet. Letztere Arbeiten werden in Verbindung mit Abschlussarbeiten der TU Dresden bzw. durch Vergabe von Tätigkeiten an qualifizierte Auftragnehmer durchgeführt. Analog zu den oben genannten Begleituntersuchungen an den Erntebeständen werden auch an den Nachkommenschaften blattmorphologische-anatomische und ernährungskundliche Merkmale erhoben.

Parallel zu den genannten Arbeiten werden in vorhandenen, älteren Herkunftsversuchen von Buche, Fichte und Tanne in Bayern, Baden-Württemberg und Sachsen repräsentative Herkünfte

identifiziert und ebenfalls mit Hilfe vergleichbarer morphologisch-anatomischer, physiologischer ertrags- und ernährungskundlicher Merkmale und Methoden untersucht.

Die physiologischen Untersuchungen werden wie oben bereits beschrieben auf unterschiedlichen Ebenen durchgeführt. Auf der Ebene der Erntebestände soll zunächst die Variation der untersuchten Merkmale auf dem gegebenen Standort zwischen den untersuchten Individuen des Bestandes zu einem bestimmten Zeitpunkt ermittelt werden. Da diejenigen Individuen untersucht werden sollen, die in die dendroökologischen und genetischen Untersuchungen einbezogen sind, kann die ermittelte Reaktionsfähigkeit in unmittelbarem Bezug zu der retrospektiv ermittelten Reaktionsfähigkeit gesetzt werden und festgestellt werden, ob die erfasste physiologische Reaktion mit der dendroökologischen Reaktionsfähigkeit korrespondiert.

Auf der Ebene der Herkunftsversuche und der Nachkommenschaften der Erntebestände wird ebenfalls die Variation der untersuchten Merkmale innerhalb der und zwischen den untersuchten Herkünfte (Populationen) erfasst. Durch den Vergleich unterschiedlicher genetischer Einheiten auf ein und demselben Standort sind im Unterschied zur Ebene der Erntebestände einerseits grundsätzlich Aussagen zur Spannweite der Reaktionsfähigkeit möglich. Andererseits kann die Reaktionsfähigkeit der unmittelbaren Nachkommen der Erntebestände mit derjenigen der Erntebestände in Relation gesetzt werden. Wenn möglich sollen in den älteren Versuchen Herkünfte mit untersucht werden, deren Erntebestände noch existieren und in die oben genannten Untersuchungen einbezogen wurden.

Die Aussagekraft der ökologischen Nischenmodelle wird in **Arbeitspaket 7** am ASP getestet, auf der Basis der prognostizierte Vulnerabilität der Forstgenressourcen (AP 2 und AP 3), der tatsächlichen ökophysiologischen Reaktionsnormen von Altbeständen (AP 4) und von deren Nachkommen (AP 6). Zum einen ist es damit möglich, einen Überblick über die entlang der untersuchten Standortgradienten auf die Baumpopulationen wirkenden Faktoren zu gewinnen. Zum anderen werden die Ergebnisse der Nischenmodelle bzgl. der Klimasensitivität von Waldbäumen (Vorkommenswahrscheinlichkeit, Marginalität) durch die Kombination der unterschiedlichen Baumarteneigenschaften und Responsegrößen anhand experimentell gewonnener Resultate überprüfbar. Die Testergebnisse sollen zudem zur Verfeinerung und Präzisierung der Aussagekraft der Nischenmodelle genutzt werden. Die modellbasierten Vulnerabilitätsabschätzungen erhalten durch die Synthese der Ergebnisse bereits einen Bezug zu gemessenen Responsegrößen. Dadurch können die Nischenbereiche (Straten) mit physiologischen Kennwerten verknüpft werden. Außerdem setzen wir in diesem Arbeitspaket die genetischen Mustern der Populationen, insbesondere die anpassungsrelevanten Genorte aus der Unterstichprobe mit Umweltfaktoren des Standortgradienten und mit der Marginalität in Beziehung (Umweltassoziationsanalyse). Je nach Ausgangslage sollen darüber hinaus verschiedene Möglichkeiten der Integration der neu gewonnen Erkenntnisse in Nischenmodelle geprüft werden: (1) Integration der Herkunftsstruktur in die Modelle; (2) Fortentwicklung durch Rekalibrierung auf der Basis neuer, als wichtig erkannter Einflussfaktoren bzw. Schwellenwerte (vgl. BUCKLEY et al., 2011); (3) Integration einfacher mechanistischer Nischenmodelle (HIJMANS & GRAHAM 2006, DORMANN et al. 2012).

In **Arbeitspaket 8** werden nach Auswertung der Resilienzstudien an den Alt-/Erntebeständen (AP 4) und der physiologischen Studien (z.B. zu Trockenstress) an deren Nachkommenschaften (AP 6) eine Beziehungen zwischen den Altbeständen und deren Nachkommen in Hinsicht auf deren Widerstandsfähigkeit gegenüber klimarelevanten Faktoren und somit auf die Übertragbarkeit der Ergebnisse von Jung- auf Altpflanze abgeleitet werden. Die Ergebnisse der stressphysiologischen Studien an den Jungpflanzen erlauben es, deren Eignung für den klimatoleranten Wald der Zukunft zu beurteilen. Mit der Identifikation resilienter und stresstoleranter Populationen wird die Grundlage für die Bereitstellung von klimasicherem Vermehrungsgut geschaffen. Dabei könnten neben bereits zugelassenen Erntebeständen potentielle Kandidaten für Neuzulassungen aus der Untersuchung von Beständen auf Grenzstandorten hinzukommen.

Die Erstellung einer Suchkulisse als Grundlage für künftige Klimawandel-Anpassungs-Feldversuche ist Gegenstand von **Arbeitspaket 9**. Der besondere Vorzug von Nischenmodellen liegt darin, dass die Algorithmen auf Geodaten angewendet werden können. Erkenntnisse zu den Steuerungsfaktoren der Baumartennische können so auf die Waldfläche eines beliebigen Raumes als potentielle Verbreitungskarten projiziert werden. Hierbei sind insbesondere Regionen interessant in denen heute schon Bedingungen herrschen, wie wir sie in unseren Untersuchungsgebieten künftig erwarten. Auf diese Weise werden die im Projekt erstellten Modelle dafür genutzt einen Link zwischen gegenwärtigen und künftigen Bedingungen an einem Standort herzustellen (Raum für Zeit Ersatz durch sog. Analogregion, OHLEMÜLLER et al. 2006, KÖLLING 2011). Das Konzept der Klima-Analog-Räume (climate analogue approach) kann sowohl über Ähnlichkeitsanalysen (z.B. OZOLINČIUS et al. 2014) als auch über die Technik von Nischenmodellen bzw. deren Kombination realisiert werden.

Auf dieser Basis wird im vorliegenden Projekt eine Grundlage geschaffen für künftige Translokationsversuche sowohl mit Forschungspartnern innerhalb Deutschlands als auch mit internationalen Partnern. Eine zielführende Strategie für Anlage von Feldversuchen aufbauend auf den Ergebnisse dieser Studie wäre der Transfer von klimatoleranten Herkünften aus Deutschland in die durch die Suchkulisse identifizierten Analogregionen. In solchen Folgeprojekten könnte dann Überleben, Vitalität und Wuchsleistung von unterschiedlichen heimischen sowie von heimischen und ausländischen Provenienzen unter nach dem Analogprinzip spezifizierten Klimata verglichen werden.

Ziel derartiger Feldversuche mit Nachkommenschaften der genetisch und phänotypisch charakterisierten Erntebestände ist die Erfassung der langfristigen Reaktion der Nachkommen und ihrer Variation auf sich ergebende Umweltveränderungen. Damit würde neben den bereits genannten Ebenen der Untersuchung eine weitere Ebene eingeführt, die die retrospektive und die aktuelle Zeitebene um eine in die Zukunft gerichtete Zeitebene ergänzt.

Beitrag der einzelnen Verbundpartner zum Vorhaben; Zusammenarbeit mit Dritten

Das ASP wird die Gesamtkoordination des Projektes übernehmen. Schwerpunktmäßig umfasst dies folgende Aufgaben: Zusammenführung der Daten der Erntezulassungsregister (EZR) für die Baumarten Buche, Fichte und Tanne in den Bundesländern Thüringen, Sachsen, Bayern und Baden-Württemberg. Zusammenführung der verfügbaren Standortdaten. Ausweisung von zusätzlichen Beständen in Grenzbereichen und Erhebung der Standortdaten hierzu. Verbesserung der ökologischen Nischenmodelle, Validierung, Modellierung und Stratenbildung. Die Auswahl der Bestände für ökophysiologische Studien (Resilienz an Altbestände, Stressphysiologie an deren Nachkommenschaften) erfolgt in enger Abstimmung mit den Projektpartnern.

Die Datenbankarbeiten (EZR, BaSIS etc.) und Geländearbeiten (zu fehlenden Standortdaten) werden vom ASP koordiniert, jedoch in den Bundesländern arbeitsteilig durch die Partner durchgeführt (ASP: Bayern und Baden-Württemberg, Sachsenforst: Thüringen und Sachsen). Seit 2012 koordiniert das ASP im Rahmen eines Kooperationsvertrages auch die Arbeiten der FVA Baden-Württemberg in den Bereichen Forstgenetik, Forstpflanzenzüchtung und Generhaltung. Die Zusammenführung der Erntebestände und der Standortdaten in Baden-Württemberg erfolgt daher in Kooperation mit der FVA als Projektpartner. Für die physiologischen Studien an den Nachkommenschaften müssen ggf. Pflanzen angezogen werden.

Das für die Gesamtkoordination, die Zusammenführung der Daten und die Modellierung benötigte Personal wird im Rahmen des Projekts am ASP neu eingestellt, teilweise wird dazu aber auch Stammpersonal beschäftigt (Kontrollbeamte). Die Zuordnung der Standortdaten aus dem Bayer. Standortinformationssystem zu den Erntebeständen erfolgt an der Bayer. Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) im Rahmen eines Unterauftrages.

In Bayern liegen durch das digitale Standortinformationssystem BaSIS digitale Boden- und Klimainformationen in metrischen Größen sowie daraus abgeleiteten ordinalen Parametern vor (TAEGER UND KÖLLING 2015). Somit können an Geoinformation zur Lage der Erntebestände und der

neu ausgewählten Bestände physiographische Daten wie Klimawerte (Temperatur und Niederschlag) oder Bodendaten (z. B. nutzbare Feldkapazität, Basensättigung, Bodenart) angefügt werden. Bei Flächen mit heterogenen Standortseigenschaften müssten die Flächen anhand der Standortdaten disaggregiert werden bzw. Teilflächen für die weiteren Untersuchungen definiert werden. BaSIS hat einen methodisch bedingten Maßstab von 1:10.000 bis 1:25.000. Bei aufgrund von Probenahmen geplanten Geländebegängen könnten die jeweiligen Bodeneinheiten mit dem Bohrstock überprüft werden. Weitere zeitlich hochaufgelöste Klimadaten u.a. auch für die Resilienzstudien können aus den Ergebnissen des vom Waldklimafonds geförderten Projekts WP-KS-KW verwendet werden. Insgesamt ist Bayern bezüglich digitaler Standortdaten gut aufgestellt, so dass die Arbeiten zügig von in GIS geschultem Personal durchgeführt werden können.

Die DNA-Isolation und Genotypisierung mittels neutraler Marker (zur Untersuchung der Herkunft, Artzugehörigkeit und Populationsstruktur) wird im molekulargenetischen Labor des ASP stattfinden. Dafür ist die Beschäftigung einer Laborkraft (TA) im Rahmen des Projekts notwendig.

Die Arbeiten im Rahmen von Arbeitspaket 1 (Zuordnung von Standortdaten zu den Erntebeständen) werden an der TUM, Fachgebiet Waldernährungslehre und Wasserhaushalt (WEL), Prof. Dr. Dr. A. Göttlein durchgeführt, da dort das standortkundliche Fachwissen sowie geeignete Hilfskräfte aus der Studentenschaft der Studienfakultät Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement zur Verfügung stehen. Es wird zudem angestrebt die Arbeiten zum Teil als Abschlussarbeiten zu vergeben, um den wissenschaftliche Ertrag der Studie zu erhöhen. Wissenschaftlichen Hilfskräfte bzw. Absolventen werden von Herrn Prof. Göttlein und Dr. Mellert angeleitet und betreut. Die Blatt- und Nadelprobenahme erfolgt zusammen mit dem Projektpartner Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, TUM, die Analysen im Labor der TUM und die entsprechenden Datenauswertungen ebenfalls im Fachgebiet WEL.

Der Lehrstuhl für Waldwachstumskunde wird im Rahmen des Projekts die Resilienzuntersuchungen durchführen. Die oben beschriebene Infrastruktur wird zur Verfügung gestellt. Das Teilprojekt ist so konzipiert, dass es für den Bearbeiter zur Weiterqualifikation im Rahmen einer Dissertation genutzt werden kann.

SBS stellt für das Vorhaben die erforderlichen Daten (EZR, Standortdaten) über zugelassene Erntebestände der Buche, Fichte und Tanne in Sachsen zur Verfügung. SBS führt die genannten Untersuchungen an den Erntebeständen, den Nachkommenschaften und den ausgewählten Herkünften durch. Auswahl der Bestände, Gewinnung von Saatgut und Pflanzen sowie von Probematerial wird in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern erfolgen. Weiterhin wird SBS mit der TU Dresden, Fachrichtung Forstwissenschaften bei der Vergabe von Abschlussarbeiten zusammen arbeiten (Lehrauftrag Dr. Wolf). Weiterhin übernimmt SBS in Zusammenarbeit mit den Partnern die konzeptionelle Vorbereitung der vorgesehenen langfristigen Bestandes-Nachkommenschaftsprüfungen.

Das Forstliche Forschungs- und Kompetenzzentrum Gotha (FFK Gotha) bereitet die erforderlichen Daten (EZR, Standortdaten) über zugelassene Erntebestände der Buche, Fichte und Tanne in Thüringen auf und stellt sie für das Vorhaben zur Verfügung. Weiterhin gewinnt das FFK die für die vorgesehenen dendroökologischen, ernährungs- und bodenkundlichen, physiologischen und genetischen Untersuchungen erforderlichen Proben in der gewünschten Qualität und unterstützt die grundsätzlichen Arbeiten im Vorhaben u. a. durch die Organisation eines Jahrestreffens in Gotha.

Zeitplan und Meilensteine

Arbeitspaket (AP)	AP Nr.	Zuständigkeit	Jahr/Quartal														
			3.Q.	4.Q.	1.Q.	2.Q.	3.Q.	4.Q.	1.Q.	2.Q.	3.Q.	4.Q.	1.Q.	2.Q.			
			2019			2020			2021			2022					
Projektkoordination	AP 0	ASP		M1					M2								
Zuordnung von Standortdaten	AP 1	ASP, TUM-WEL, FFK, FVA		M1	M2												
Ermittlung der Vulnerabilität der Erntebestände (EB)	AP 2	ASP		M1		M2											
Stratifizierung des ökologischen Raums	AP 3	ASP		M1			M2										
Datenerhebung und Resilienzstudien an EB	AP 4	TUM-WWK							M1				M2				
genetische Charakterisierung der EB	AP 5	ASP							M1						M2		
Stressphysiologie Herkunftsversuche, EB und deren Nachkommenschaften	AP 6	SBS		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10				
Überprüfung Nischenmodelle mit Ergebnissen der Resilienzstudien und Nachkommenschaften	AP 7	ASP, TUM-WWK, SBS											M1			M2	
Ausweisung von EB zur Bereitsstellung von klimatolerantem Vermehrungsgut	AP 8	ASP, TUM-WWK, SBS													M1		M2
Erstellung Suchkulisse künftige Klimawandelversuche	AP 9	ASP													M1		M2
Veröffentlichungen: Zeitschriften/Internet	AP 10	ASP, TUM, SBS, FFK, FVA		M1					M2								M3
Berichterstattung	AP 11	ASP, TUM-WWK, SBS, FFK, FVA			M1					M2							M3

AP0 – Projektkoordination

Jährliche Projekttreffen zur Koordination und Vorbereitung der Berichterstattung.

Meilensteine: März 2020 (M1), März 2021 (M2), Juni 2022 (M3),

AP1 - Zuordnung von Standortdaten

Meilensteine:

M1 (Dezember 2019): Erfassung und ggf. Digitalisierung der Kartenwerke aus Bayern, Baden-Württemberg, Sachsen und Thüringen nach spezifischen standörtlichen Kriterien.

M2 (März 2020): Harmonisierung und Zusammenführung der Standortdaten in einer Datenbank

AP2 - Ermittlung der Vulnerabilität von Erntebeständen

Meilensteine:

M1 (Dezember 2019): Kompilierung aktueller Baumartenverbreitungs- und Klimadaten zur Nischenmodellierung. Kalibrierung bioklimatischer Modelle zur Ermittlung der Vulnerabilität der EB.

M2 (Juni 2020): Erweiterung der bioklimatischen Modelle durch die lokalen Standortinformationen der beteiligten Partner/Bundesländer.

AP3 – Stratifizierung des ökologischen Raumes

Meilensteine:

M1 (September 2019): Projektion des aktuellen und künftigen Vulnerabilität (Marginalität) der untersuchten Baumarten anhand einer ersten Tranche rasch verfügbarer Standortdaten und bereits existierender Nischenmodelle für die vorläufige Einordnung der Stratenzugehörigkeit.

M2 (Juni 2020): Projektion des künftigen Klimarisikos (Marginalität) der untersuchten Baumarten anhand neu entwickelter und validierter Nischenmodelle zur endgültigen Einordnung der Stratenzugehörigkeit.

AP4 – Datenerhebung und Resilienzstudien

M1 Abschluß der Datenerhebung im Gelände

M2 Abschluß der Probenauswertung

AP5 – Genetische Charakterisierung der Erntebestände

Meilensteine:

M1 (Dezember 2020): Analyse zum Stand der laufenden Genanalysen für die Berichterstattung 2020.
M2 (Dezember 2021): Analyse zum Stand der laufenden Genanalysen für die Berichterstattung 2021.

AP6 – Morphologie und Stressphysiologie Erntebestände und deren Nachkommenschaften sowie Herkunftsversuche

M1 (November 2019): Liste mit zu beprobenden Erntebeständen und Herkünften erstellt
M2 (März 2020): Erste Probenahme Physiologie (RBU/GFI/WTA) und Nährstoffe (GFI/WTA) Erntebestände und Herkunftsversuche abgeschlossen
M3 (Mai 2020): Konzept für Gewächshausversuche Bestandes-Nachkommenschaften erarbeitet
M4 (August 2020): Erste Probenahme Nährstoffe (RBU) Erntebeständen und Herkunftsversuche abgeschlossen
M5 (November 2020): Erste Ergebnisse Morphologie und Physiologie vorgelegt
M6 (März 2021): Zweite Probenahme Physiologie (RBU/GFI/WTA) und Nährstoffe (GFI/WTA) Erntebestände und Herkunftsversuche abgeschlossen
M7 (Juni 2021): Gewächshausversuche etabliert
M8 (August 2021): Zweite Probenahme Nährstoffe (RBU) Erntebeständen und Herkunftsversuche abgeschlossen
M9 (November 2021): Weitere Ergebnisse Morphologie und Physiologie vorgelegt
M10 (Mai 2022): Konzept Bestandes-Nachkommenschaftsprüfungen vorgelegt

AP7 – Überprüfung Nischenmodelle mit Ergebnissen der Resilienzstudien und Nachkommenschaften
Meilensteine:

M1 (Oktober 2021): Synthese der aus AP4 bis AP6 aufgelaufenen Ergebnisse und Zusammenfassung in einer Matrix.
M2 (März 2022): Aktualisierung der Ergebnisse aus AP4 bis AP6; Validierung und Fortentwicklung der Nischenmodelle.

AP8 – Ausweisung von Erntebeständen zur Bereitstellung von klimatolerantem Vermehrungsgut

M1 (Dezember 2021): Identifikation der klimatoleranten Erntebestände.
M2 (April 2022): Darstellung der künftigen Eignung von klimatolerantem Vermehrungsgut.

AP9 – Erstellung der Suchkulisse für künftige Klimawandelversuche

M1 (Dezember 2021): Prozessierung der Grundlagendaten für die Suchkulissen.
M2 (Mai 2022): Identifikation und Stratifizierung der Analogregionen anhand von Modellen.

AP10 – Veröffentlichungen - Zeitschriften/Internet

M1 (Juli 2019): Information der Öffentlichkeit zum Auftakt des Projekts
M2 (Dezember 2020): Ggf. Publikation geeigneter Zwischenergebnisse
M3 (Juli 2021): Publikation von Endergebnissen

AP11 – Berichte

M1 (März 2020): Zwischenbericht für 2019
M2 (März 2021): Zwischenbericht für 2020
M3 (Juli 2022): Schlussbericht

4. Verwertungsplan

Die meisten im Projekt verwendeten Methoden haben sich bereits in der Vergangenheit bewährt. Innovativ ist die Kombination der verschiedenen Disziplinen Forstgenetik, Standortkunde, Modellierung, waldwachstumskundliche Resilienzforschung und physiologische Studien an Alt- und Jungpflanzen. Da diese von Institutionen bearbeitet werden, die in ihren Fachbereichen jeweils führend sind, sind auch die Erfolgsaussichten des Projektes sehr hoch.

Durch das Projekt wird eine deutliche Versachlichung der Diskussion über die Eignung ökologischer Nischenmodelle erwartet. Die Fragen nach der Klimasensitivität der Forstgenressourcen in Deutschland und die Bereitstellung von klimatolerantem forstlichem Vermehrungsgut sind für die Praxis wie für die Wissenschaft von hoher Bedeutung.

Die vielfältigen Projektergebnisse werden daher laufend in referierten und nicht referierten, praxisorientierten Zeitschriften veröffentlicht. Sie werden sowohl im Rahmen von Fachtagungen, als auch bei einer Abschlusstagung präsentiert. Die Ergebnisse sollen vor allem für die Forstpraxis aufbereitet, jedoch auch in Fachgremien der Länder (z.B. gemeinsamer Gutachterausschuss Forstliches Vermehrungsgut, BLAG Forstgenressourcen) vorgestellt werden.

Das Projekt bildet zudem eine wertvolle Basis für hierauf aufbauende Forschungsarbeiten. Die Projektdauer erlaubt erste ökophysiologische Experimente an Jungpflanzen. Dagegen sind längerfristige Herkunftsfeldversuche ein seit Jahrhunderten bewährter Ansatz zur Überprüfung der Variabilität verschiedener Herkünfte aus dem Verbreitungsgebiet einer Art. Traditionell stehen hier Wachstum und Qualität von bewährten Herkünften im Zentrum der Aufmerksamkeit, da schließlich adäquate Vorschläge für die Forstpraxis gegeben werden sollten. Aufgrund dieser Art der Vorauswahl der Testglieder, die bestimmte Phänotypen, nicht jedoch bestimmte Standortbereiche berücksichtigt, sind traditionelle Herkunftsfeldversuche in der Regel weniger geeignet, um die Klimatoleranz bestimmter Herkünfte zu untersuchen. Abweichend vom bisherigen Vorgehen können über die Anwendung ökologischer Nischenmodelle und den nachfolgenden Studien in Zukunft gezielt Verjüngungspflanzen ausgewählter Herkünfte herangezogen werden. Der Effekt des Klimawandels auf die klimatische Plastizität der Baumarten kann dann in speziellen, mit diesen Pflanzen langfristig angelegten Klimawandel-Anpassungs-Feldversuchen („climate change adaption trials“) untersucht werden. Die Anlage von solchen Versuchsserien ermöglicht es, dass wichtige Erkenntnisse über das Potenzial von vermutlich an Trockenheit angepassten Herkünften möglichst rechtzeitig gewonnen werden können.

5. Unternehmerdaten

Wirtschaftliche Verhältnisse

Alle drei Projektpartner sind öffentliche Einrichtungen der Länder und des Bundes. In allen drei beteiligten Institutionen sind ausreichend Kapazitäten zur Durchführung des Projektes vorhanden.

Personelle und materielle Kapazitäten, Organisation, Infrastruktur, Beschreibung der Vorleistungen und Qualifikationen

Die Mitarbeiter in den Institutionen besitzen die für die Durchführung und Steuerung der Projektarbeiten erforderlichen Qualifikationen. Darüber hinaus weisen sie die notwendige Infrastruktur (inklusive waldwachstumskundlicher und pflanzenphysiologischer Messgeräte und genetischer Labore) zur erfolgreichen Bearbeitung des Projektes auf.

Die **Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt (FVA)** in Freiburg ist die forstliche Ressortforschungseinrichtung des Landes Baden-Württemberg. Ihre gesetzlichen und durch ein Statut fixierten Aufgaben sind die praxisnahe forstliche Forschung, das forstliche Umweltmonitoring

und der Wissenstransfer in die forstliche Praxis. Die FVA betreut ein landesweites Netz von Versuchs- und Monitoringflächen der Fachgebiete Waldwachstumskunde, Waldschutzgebietenforschung (Bann- und Schonwälder), Forstpflanzenzüchtung, Waldschutz sowie Bodenkunde und Hydrologie, deren Anlage teilweise bis auf die Gründungszeit der badischen und württembergischen Vorläufereinrichtungen zurückgeht.

An der FVA wird Herr Dr. Hans-Gerhard Michiels für das Vorhaben verantwortlich sein. Herr Dr. Michiels arbeitet seit 1999 an der FVA und besitzt langjährige Erfahrung in der Leitung von Projekten mit standortkundlichen, waldökologischen und waldhistorischen Forschungsinhalten (EWALD et al. 2013; LUDEMANN et al. 2004; MICHIELS 1998, 2014, MICHIELS et al. 2009), u.a als Mitautor der Karte der Potentiellen Natürlichen Vegetation von Baden-Württemberg (REIDL et al. 2013) sowie in der Klimafolgenforschung (HANEWINKEL et al. 2014).

Das **ASP** ist eine Sonderbehörde der Bayerischen Forstverwaltung und untersteht direkt dem Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Das Amt ist in die vier Sachgebiete „Herkunftssicherung und angewandte forstgenetische Forschung“, „Nachkommenschaftsprüfungen, Energiewald“, „Herkunftsforschung im Klimawandel“ und „Hoheitliche Aufgaben“ unterteilt. Seit 2005 wird am ASP der gesamte Themenkomplex „Forstvermehrungsgut / Forstgenressourcen“ in Feldversuchen und mit laborgenetischer Forschung bearbeitet. Das ASP verfügt über ein Netz an Versuchsflächen zu Herkunftsfragen, moderne Labore und ist heute fest in nationale und internationale Netzwerke mit anderen Forschungseinrichtungen, Universitäten und europäischen Gremien eingebunden. Das ASP nimmt sich heute schwerpunktmäßig den Herausforderungen des Klimawandels an. Die Teilnahme des ASP gewährleistet ein hohes wissenschaftliches Niveau bei gleichzeitig engem Praxisbezug.

Herr Dr. Alwin Janßen (ASP) wird für die Gesamtkoordination des Vorhabens verantwortlich sein. Er ist Leiter des ASP und Leiter der Landesstelle FoVG am ASP. Er besitzt langjährige Erfahrung in der Beantragung und Leitung von Projekten mit waldgenetischen Forschungsinhalten.

Für die Unterstützung bei der Projektkoordination, die Zusammenführung der Standortdaten und der Modellierung mittels ökologischer Nischenmodelle ist beabsichtigt, Herrn Dr. Karl Heinz Mellert am ASP zu beschäftigen. Herr Dr. Mellert ist ein ausgewiesener und anerkannter Fachmann in den Bereichen Standortkunde und ökologischer Modellierung (FALK UND MELLERT 2011; MELLERT et al. 2011; MELLERT et al. 2015; MELLERT et al. 2016; MELLERT et al. 2017).

Wegen des Arbeitsschwerpunkts im Bereich der Standorterfassung (Arbeitspaket 1) und der Koordinierungsaufgaben von Herr Dr. Mellert wird seine Dienststätte neben dem ASP in Teisendorf auch am Fachgebiet WEL angesiedelt. Von dort aus bestehen kurze Wege zum Lehrstuhl für Waldwachstumskunde. Ferner existiert dort ein einfacher Zugang zur wissenschaftlichen EDV-Struktur (Münchner Wissenschaftszentrum) und es ist ein enger Kontakt zur Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft möglich (Zugang zu BaSIS).

Der **Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der TUM (TUM-WWK)** ist Teil der Fakultät Wissenschaftszentrums Weihenstephan der Technischen Universität München. Er wird von Prof. Dr. Dr. h.c. Hans Pretzsch seit 1994 geleitet. Die Forschungsschwerpunkte am Lehrstuhl befassen sich mit Gesetzmäßigkeiten des Baum- und Bestandswachstums, Effekten der Baumartenmischung auf Produktivität und Vitalität, Wirkung von veränderten Wuchsbedingungen auf die Einzelbaum- und Bestandsentwicklung sowie mit Wachstum und Leistungen von Stadtbäumen. Der Lehrstuhl unterhält das seit 1870 bestehende bayerische Netz an langfristigen ertragskundlichen Versuchsflächen. Der Lehrstuhlleiter und weitere Mitarbeiter verfügen über langjährige Projekterfahrung in zahlreichen international (z.B. EU), national (z. B. DFG, BMBF, BMVEL, BMWi, FNR, DBU) und regional (z.B. bayerische Staatsministerien) geförderten Forschungsprojekten. Der Lehrstuhl kann auf umfangreiche Publikationen auch in hochrangigen Journalen (z.B. Nature Communication, Science) verweisen. Neben Prof. Pretzsch werden Dr. Peter Biber und FOR Enno Uhl das Projekt inhaltlich begleiten. Die notwendige labortechnische Infrastruktur (Jahrlinglabor, Ligno Station) wird zur Verfügung gestellt. Das **Fachgebiet für Waldernährung und Wasserhaushalt der TUM (TUM-WEL)** wird von Prof. Dr. Dr. Axel Göttlein geleitet.

Arbeitsschwerpunkt liegt im Bereich des Stoffhaushaltes von Waldökosystemen und standortkundlichen Fragestellungen u.a. im Hinblick auf Fragen des Klimawandels (z.B. MELLERT UND GÖTTLEIN 2018).

Das **Referat Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung** ist Bestandteil des **Kompetenzzentrums für Wald und Forstwirtschaft des Staatsbetriebes Sachsenforst (SBS)**. Das Referat ist landesweit und Waldbesitzarten übergreifend zuständig für die Erhaltung, phänotypische und genetische Charakterisierung sowie Bereitstellung forstlicher Genressourcen. Dazu steht dem Referat eine zeitgemäße materiell-technische Ausstattung einschließlich AnzuchtKapazitäten, Gewächshaus, Klimakammern, Laboratorien und Messgeräten zur Verfügung. Mit Ausnahme von Bergbaufolgelandschaften liegt für den Gesamtwald in Sachsen eine flächendeckende Standortskartierung auch in digitalisierter Form vor. Diese Daten stehen dem Vorhaben zur Verfügung.

Das Erntezulassungsregister des Freistaates Sachsen wird in der Abteilung „Obere Forst- und Jagdbehörde, Naturschutz im Wald“ des Staatsbetriebes Sachsenforst geführt. Auch auf diese Daten kann im Rahmen des Vorhabens durch das Referat Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung zurückgegriffen werden.

Herr Dr. Heino Wolf (SBS) wird für das Teilvorhaben Staatsbetrieb Sachsenforst verantwortlich sein. Herr Dr. Wolf leitet das Referat Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung und bearbeitet seit mehr als zwei Jahrzehnten Fragestellungen zur Erhaltung, phänotypischen und genetischen Charakterisierung sowie Bereitstellung forstlicher Genressourcen. Er verfügt über langjährige Erfahrung bei der Beantragung und Durchführung von Drittmittelprojekten mit Schwerpunkten unter anderem auf Untersuchungen zur Reaktion von Herkünften, Nachkommenschaften und Klonen unterschiedlichster Baumarten auf Trockenheit und Frost.

Das **Forstliche Forschungs- und Kompetenzzentrum Gotha (FFK)** mit der angeschlossenen Darre als Bestandteil der ThüringenForst AöR ist u. a. zuständig für Standorterkundung, Waldschutz, Waldbiotop- und Naturraumkartierung sowie das forstliche Monitoring und die Durchführung des forstlichen Forschungs- und Versuchswesens. Dabei ist das Forschungs- und Versuchswesen ausgerichtet auf eine anwendungsorientierte, praxisnahe Forschung mit den Schwerpunkten Waldbau, Klimaanpassung, Fernerkundung und Digitalisierung im Forstbereich. Darüber hinaus ist das FFK Gotha verantwortlich für eine Reihe von betriebsinternen Aufgaben für die Landesforstanstalt (IT, Forsteinrichtung im Landeswald, Datenbereitstellung/Waldinformationssysteme, Weiterentwicklung der waldbaulichen und forstlichen Bewirtschaftungsstrategien für den Landeswald und Unterstützung der Forstämter). Mit einem breiten Schulungsprogramm und der Ausrichtung von Fachtagungen und Kolloquien unterstützt das FFK Gotha den Wissenstransfer von angewandter Forschung in die forstliche Praxis. Die Verantwortung für die Projektarbeiten innerhalb des FFK Gotha liegt bei Herrn Ingolf Profft.

6. Begründung der Notwendigkeit der staatlichen Förderung

Die Überprüfung der Klimasensitivität ausgewählter Forstgenressourcen und die Bereitstellung von geeignetem Vermehrungsgut zur Anpassung und Stabilisierung der Wälder im Klimawandel ist überwiegend eine staatliche Aufgabe.

Die im Projekt geplanten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten kommen dem gesamten Wald in Deutschland über alle Besitzarten hinweg zugute. Die Ergebnisse werden zeigen, ob durch entsprechende Herkunftswahl von Buche, Fichte und Tanne deren Trockenresistenz auf künftig kritischen Standorten verbessert werden kann.

Aufgrund des hohen Kostenaufwands können die notwendigen Arbeiten nicht mit den vorhandenen Haushaltsmitteln der drei beteiligten Partnerinstitutionen durchgeführt werden.

7. Literaturverzeichnis:

- Aitken, S. N., und J. B. Bemmels, 2015 Time to get moving: Assisted gene flow of forest trees. *EvolutionaryApplications*.
- AK Standortkartierung 2016 Forstliche Standortaufnahme – Begriffe, Definitionen, Kennzeichnung, Erläuterungen, Einteilungen. IHW Verlag. 400 S.
- Arab und Seegmüller 2016 Posterbeitrag zur Forstwissenschaftlichen Tagung 2016. http://www.fowita.de/fileadmin/Anfahrtsskizzen/Programm/fowita16_abstractband.pdf
- Bircher, N., M. Cailleret, M. Huber und H. Bugmann, 2015 Sensitivity of typical Swiss forest stands to climate change. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 166: 408-419.
- Bolte, A., 2016 Chancen und Risiken der Buche im Klimawandel. *AFZ-DerWald*: 17-19.
- Bolte, A., T. Czajkowski, C. Cocozza, R. Tognetti, M. de Miguel et al., 2016 Desiccation and Mortality Dynamics in Seedlings of Different European Beech (*Fagus sylvatica* L.) Populations under Extreme Drought Conditions. *Frontiers in Plant Science* 7.
- Buckley, L. B., Waaser, S. A., MacLean, H. J., & Fox, R. 2011. Does including physiology improve species distribution model predictions of responses to recent climate change?. *Ecology*, 92(12), 2214-2221.
- Comps, B., B. Thiébaud, L. Paule, D. Merzeau und J. Letouze, 1990 Allozymic variability in beechwoods (*Fagus sylvatica* L.) over central Europe: Spatial differentiation among and within populations. *Heredity* 65: 407-417.
- Cruziat, P., H. Cochard und T. Améglio 2002 Hydraulic architecture of trees: main concepts and results. *Ann. For. Sci.* 59: 723–752.
- Cuervo-Alarcon, L.C.; Arend, M., Müller, M., Sperisen, C., Finkeldey, R., Krutovsky, K.V. 2018 Genetic variation and signatures of natural selection in populations of European beech (*Fagus sylvatica* L.) along precipitation gradients. *Tree Genet. Genomes* 14:84
- De Micco, V., Campelo, F., De Luis, M., Bräunig, A., Grabner, M., Battipaglia, G., Cherubini, P., 2016 Intra-annual density fluctuations in tree rings: how, when, where, and why? *International Association of Wood Anatomists Journal* 37(2):232-259
- Donnarumma, F., 2000 Erkenntnisse zur Reservestoffbildung trockengestresster Jungpflanzen der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) aus verschiedenen Herkunftsgebieten. Dipl. Arbeit unveröffentl. Institut für Forstbotanik und Forstzoologie der TU-Dresden. 67 S.

- Dorado-Liñán, I., Piovesan, G., Martínez-Sancho, E., Gea-Izquierdo, G., Zang, C., Cañellas, I., & Fernández-de-Uña, L., ... Ewald, J., ... Mellert, K.H., ... Menzel, A. 2018 Geographical adaptation prevails over species-specific determinism in trees' vulnerability to climate change at Mediterranean rear-edge forests. *Global change biology*.
- Dormann, C. F., Schymanski, S. J., Cabral, J., Chuine, I., Graham, C., Hartig, F., ... & Singer, A. 2012 Correlation and process in species distribution models: bridging a dichotomy. *Journal of Biogeography*, 39(12), 2119-2131.
- Ewald, J., Hennekens, S.M., Conrad, S., Wohlgemuth, T., Jansen, F., Jenssen, M., Cornelis, J., Michiels, H.-G., Kayser, J., Chytrý, M., 2013. Spatial and temporal patterns of Ellenberg nutrient values in forests of Germany and adjacent regions-a survey based on phytosociological databases. *Tuexenia* 33, 93–109.
- Fady, B., F. A. Aravanopoulos, P. Alizoti, C. Mátyás, G. von Wühlisch et al., 2016 Evolution-based approach needed for the conservation and silviculture of peripheral forest tree populations. *Forest Ecology and Management* 375: 66-75.
- Falk, W., K. H. Mellert 2011 Species distribution models as a tool for forest management planning under climate change: Risk evaluation of *Abies alba* in Bavaria. *Journal of Vegetation Science* 22: 621-634.
- Gotter, M. 2013 Wachstum und Trockenstresstoleranz von ausgewählten Herkünften des IUFRO-Weißtannen-Provenienzversuchs im Erzgebirge. Fachrichtung Forstwissenschaften, Fakultät Umweltwissenschaften, TU Dresden, Masterarbeit, 83 S. (unveröffentlicht).
- Grundmann, B., 2009 Determination des Anpassungspotenzials von autochthonen Eichenvorkommen in Sachsen an irreversible Klimaänderungen. Technische Universität Dresden, unveröffentlichter Bericht, 44 S.
- Guisan, A., W. Thuiller, 2005 Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters* 8: 993-1009.
- Hanewinkel, M., Cullmann, D.A., Michiels, H.-G., Kändler, G., 2014. Converting probabilistic tree species range shift projections into meaningful classes for management. *J. Environ. Manage.* 134, 153–165.
- Hanewinkel, M., D. A. Cullmann, M. J. Schelhaas, G. J. Nabuurs und N. E. Zimmermann, 2013 Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land. *Nature Climate Change* 3: 203-207.
- Hartmann K.-U., Schildbach M., Wolf H., 2015 Trockenheits- und Frostresistenz – Untersuchungsmethoden und Ergebnisse. In: Liesebach M. (ed.) *FastWOOD II.: Züchtung schnellwachsender Baumarten für die Produktion nachwachsender Rohstoffe im Kurzumtrieb – Erkenntnisse aus 6 Jahren FastWOOD*. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, Thünen Rep 26, 140-156.
- Heer K, Ullrich KK, Liepelt S, Rensing SA, Zhou J, Ziegenhagen B, Opgenoorth L 2016 Detection of SNPs based on transcriptome sequencing in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst). *Conservation Genet Resour* 8: 105. <https://doi.org/10.1007/s12686-016-0520-4>
- Heinrichs, S., Walentowski, H., Bergmeier, E., Mellert, K. H., Indreica, A., Kuzyakov, Y., ... & Teodosiu, M. (2016). Forest vegetation in western Romania in relation to climate variables: Does community composition reflect modelled tree species distribution?. *Annals of Forest Research*, 59(2), 219-236.
- Hesse, M., 2008 Reaktionen von ausgewählten Rotbuchen- (*Fagus sylvatica* L.) Herkünften auf Trockenheit. Diplomarbeit Fachrichtung Forst-wissenschaften, TU Dresden, unveröffentlicht, 95 S.

- Hlásny, T., C. Mátyás, R. Seidl, L. Kulla, K. Merganičová et al., 2014 Climate change increases the drought risk in Central European forests: What are the options for adaptation? *Forestry Journal* 60: 5-18.
- Hijmans, R. J., & Graham, C. H. 2006. The ability of climate envelope models to predict the effect of climate change on species distributions. *Global change biology*, 12(12), 2272-2281.
- Hlásny, T., C. Mátyás, R. Seidl, L. Kulla, K. Merganičová et al., 2014 Climate change increases the drought risk in Central European forests: What are the options for adaptation? *Forestry Journal* 60: 5-18.
- Holderegger, R., Kamm, U., & Gugerli, F. 2006 Adaptive vs. neutral genetic diversity: implications for landscape genetics. *Landscape Ecology*, 21(6), 797-807.
- Jannoch, A., 1999 Untersuchungen zur Reaktion von Jungpflanzen der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) aus verschiedenen Herkunftsgebieten auf spätsommerlichen Trockenstreß. Dipl. Arbeit unveröffentl. Institut für Forstbotanik und Forstzoologie der TU-Dresden. 178 S.
- Klein, T., 2014 The variability of stomatal sensitivity to leaf water potential across tree species indicates a continuum between isohydric and anisohydric behaviours. *Functional Ecology* 28(6): 1313-1320
- Knutzen, F., I. C. Meier und C. Leuschner, 2015 Does reduced precipitation trigger physiological and morphological drought adaptations in European beech (*Fagus sylvatica* L.)? Comparing provenances across a precipitation gradient. *Tree Physiology* 35: 949-963.
- Kölling, C. 2011 Klimawandel – eine Herausforderung für Forstwirtschaft und Forstwissenschaft. *AFZ-DerWald*, 13, 14-17.
- Kölling, C., E. Dietz, W. Falk und K.-H. Mellert, 2009 Provisorische Klima-Risikokarten als Planungshilfen für den klimagerechten Waldumbau. *LWF-Wissen* 63: 31-39.
- König, N., Blum, U., Symosseck, F., Bussian, B., Ellinghaus, R., Furtmann, K., Gärtner, A., Gutwasser, F., Hauenstein, M., Kiesling, G., 2005. *Handbuch forstliche Analytik*. Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft, Bonn.
- Liepe, K. J., A. Hamann, P. Smets, C. R. Fitzpatrick und S. N. Aitken, 2016 Adaptation of lodgepole pine and interior spruce to climate: Implications for reforestation in a warming world. *Evolutionary Applications*.
- Liesebach, M., König, A.O., Ujavari-Jarmay, E. 2001 Provenance-environment interactions of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) on German and Hungarian test sites. In: Müller-Starck, G., Schubert, R. (Eds.): *Genetic Response of Forest Systems to Changing Environmental Conditions*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 353-363.
- Liesebach, M., Rau, H.-M., König, A.O. 2010 Fichtenherkunftsversuch von 1962 und IUFRO-Fichtenherkunftsversuch von 1972. *Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt*, Bd. 5, Universitätsverlag Göttingen, 467 S.
- Liesebach, M. et al. 2013 Strategie zur mittel- und langfristigen Versorgung mit hochwertigem forstlichem Vermehrungsgut durch Züchtung in Deutschland, Thünen Report, No. 7, ISBN 978-3-86576-107-1, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:253-201311-dn052664-9>
- Liesebach, M., Ahrenhövel, W., Janßen, A., Karopka, M., Rau, H.-M., Rose, B., Schirmer, R., Schneck, D., Schneck, V., Steiner, W., Schüler, S., Wolf, H. 2017 Planung, Anlage und Betreuung von Versuchsflächen der Forstpflanzenzüchtung : *Handbuch für die*

Versuchsanstellung. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 80 p, Thünen Rep 49, DOI:10.3220/REP1496222427000

- Lloret, F., Keeling, E.G., Sala, A., 2011 Components of tree resilience: effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests. *Oikos* 120, 1909–1920
- Loarie, S. R., P. B. Duffy, H. Hamilton, G. P. Asner, C. B. Field et al., 2009 The velocity of climate change. *Nature* 462: 1052-1055.
- Ludemann, T., Michiels, H.-G., Nölken, W., 2004. Spatial patterns of past wood exploitation, natural wood supply and growth conditions: indications of natural tree species distribution by anthracological studies of charcoal-burning remains. *Eur. J. For. Res.* 123, 283–292.
- Marris, E., 2009 Planting the forest of the future. *Nature* 459: 906-908.
- Mátyás, C., I. Berki, B. Czúcz, B. Gálos, N. Móricz et al., 2010 Future of beech in Southeast Europe from the perspective of evolutionary ecology. *ActaSilvaticaetLignariaHungarica* 6: 91-110.
- Matyas, C., und K. Kramer, 2016 Climate change affects forest genetic resources: consequences for adaptive management, FOREGER Policy Brief 2016. 4 S.
- McLachlan, J. S., Hellmann, J. J., & Schwartz, M. W. 2007 A framework for debate of assisted migration in an era of climate change. *Conservation biology*, 21(2), 297-302.
- Merilä, J., and P. Crnokrak. 2001 Comparison of genetic differentiation at marker loci and quantitative traits. *Journal of Evolutionary Biology* 14.6: 892-903.
- Mellert, K. H., J. Ewald, D. Hornstein, I. Dorado-Liñán, M. Jantsch et al., 2016 Climatic marginality: a new metric for the susceptibility of tree species to warming exemplified by *Fagus sylvatica* (L.) and Ellenberg's quotient. *European Journal of Forest Research* 135: 137-152.
- Mellert, K. H., V. Deffner, H. Küchenhoff und C. Kölling, 2015 Modeling sensitivity to climate change and estimating the uncertainty of its impact: A probabilistic concept for risk assessment in forestry. *Ecological Modelling* 316: 211-216.
- Mellert, K., V. Fensterer, H. Küchenhoff, C. Kölling, B. Reger et al., 2011 Hypothesis-driven species distribution models for tree species in the Bavarian Alps. *Journal of Vegetation Science* 22: 635-646.
- Mellert, K. H., Lenoir, J., Winter, S., Kölling, C., Čarni, A., Dorado-Liñán, I., ... & Juvan, N. 2017 Soil water storage appears to compensate for climatic aridity at the xeric margin of European tree species distribution. *European Journal of Forest Research*, 1-14.
- Mellert, K.H., Göttlein, A. 2018 Kommt ein Engpass bei der Baumartenwahl im Klimawandel? *AFZ/DerWald* 20, 30-33.
- Michiels, H.-G., 1998 Der Standortswald im südwestdeutschen standortkundlichen Verfahren. Dissertation. *Mitteilungen des Vereins für Forstl. Standortskd. u. Forstpflanzenzüchtung* 39, 73–80.
- Michiels, H.-G., Aydin, C.T., Bolte, A., Hein, S., Hussendorfer, E., Muhlethaler, U., Reif, A., Schmidt, W., 2009 Ökologischer Steckbrief und waldbauliche Bewertung der Buche. *Forst und Holz* 64, 18.
- Michiels, H.-G., 2014 Überarbeitung der standortkundlichen regionalen Gliederung von Baden-Württemberg. *standort.wald* 48, 7–40.
- Möring, A., 2009 Untersuchungen zur Trockenresistenz von ausgewählten Douglasienherkünften (*Pseudotsugamenziesii* (Mirb.) Franco). Diplomarbeit, Fachrichtung Forstwissenschaften Tharandt, TU Dresden, unveröffentlicht, 116 S.

- Mosca, E., Gonzáles-Martínez, S. C., Neale, D. B. 2014 Environmental versus geographical determinants of genetic structure in two subalpine conifers. *New Phytologist*, 201(1), 180-192.
- Nowatzki, O., 1998 Untersuchungen zur Frostresistenz an ausgewählten Einzelbaumnachkommenschaften von Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco). Tharandt : TU Dresden, Fachrichtung Forstwissenschaften, Diplomarbeit, unveröffentlicht, 76 S.
- Ohlemüller, R., Gritti, E. S., Sykes, M. T., & Thomas, C. D. 2006 Towards European climate risk surfaces: the extent and distribution of analogous and non-analogous climates 1931–2100. *Global ecology and biogeography*, 15(4), 395-405.
- Ozolinčius, R., Lekevičius, E., Stakėnas, V., Galvonaitė, A., Samas, A., & Valiukas, D. 2014 Lithuanian forests and climate change: possible effects on tree species composition. *European Journal of Forest Research*, 133(1), 51-60.
- Peterson, A. T., J. Soberón, R. G. Pearson, R. P. Anderson, E. Martínez-Meyer et al., 2011 *Ecological Niches and Geographic Distributions*. Princeton University Press.
- Peuke, A. D., C. Schraml, W. Hartung und H. Rennenberg, 2002 Identification of drought-sensitive beech ecotypes by physiological parameters. *New Phytologist* 154: 373-387.
- Pluess, A. R., Frank, A., Heiri, C., Lalagüe, H., Vendramin, G. G., & Oddou-Muratorio, S. 2016 Genome–environment association study suggests local adaptation to climate at the regional scale in *Fagus sylvatica*. *New Phytologist*, 210(2), 589-601.
- Pretzsch, H., Schütze, G., Uhl, E., 2012 Resistance of European tree species to drought stress in mixed versus pure forests: evidence of stress release by inter-specific facilitation. *Plant Biology* 15:483-495.
- Reidl, K., Suck, R., Bushart, M., Herter, W., Koltzenburg, M., Michiels, H.-G., Wolf, T., 2013 Potentielle natürliche Vegetation von Baden-Württemberg (Potential natural vegetation of Baden-Württemberg), LUBW – Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Naturschutz - Spectrum Themen 100, Karlsruhe.
- Rellstab, C., Pluess, A. R., & Gugerli, F. 2016 Lokale Anpassung bei Waldbaumarten: genetische Prozesse und Bedeutung im Klimawandel. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 167(6), 333-340.
- Rohmeder, E., 1972 *Das Saatgut in der Forstwirtschaft*. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, 273 S.
- Rust, St., 1999 *Hydraulische Architektur und Wasserhaushalt von Kiefer (Pinus sylvestris L.) mit begleitenden Untersuchungen an Fichte (Picea abies (L.) Karst.), Buche (Fagus sylvatica L.) und Balsampappelklonen*; Dissertation, Brandenburg. TU Cottbus, Cottbuser Schriften
- Scheumann, W. und H. Schmiedel 1972 muss heißen
- Scheumann, W., 1962 Untersuchungen zur Frostresistenz der Douglasie (*Pseudotsuga taxifolia* (Pior.) Britton) und Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.). *Tagungsberichte AdL* 53: 155 - 162.
- Scheumann, W., 1968 Die Dynamik der Frostresistenz und ihre Bestimmung an Gehölzen im Massentest. *Tagungsberichte DAL* 100: 45 - 54.
- Schildbach, M., 2014 Untersuchungen zur abiotischen Resistenz von Pappeln. *Landbauforsch - ApplAgricForestry Res* 64: 85-98.

- Schildbach, M.; Wolf, H.; Hartmann, K.-U. 2012 Untersuchung zur abiotischen Resistenz schnellwachsender Baumarten. In Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen, Versuchsanstalt Band 8: Züchtung und Ertragsleistung schnellwachsender Baumarten im Kurzumtrieb. Erkenntnisse aus drei Jahren FastWOOD, ProLoc und Weidenzüchtung. Universitätsverlag Göttingen, 237-256.
- Schmidt-Vogt, H. 1987 Die Fichte. Vol. II/1. Parey-Verlag, Hamburg/Berlin, 647 S..
- Schönbach, H., H. Schmiedel, 1973 Verhalten von Rasse-Hybriden der Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) unter Frosteinwirkung und frostfreien Bedingungen. Beiträge für die Forstwirtschaft 7: 93-96.
- Schönbach, H.; Weiss, M. 1971 Genetische Fragen der Fichtenwirtschaft im Mittelgebirge. In: Blanckmeister, J.; Hengst, E. (Hrsg.): Die Fichte im Mittelgebirge. Neumann Verlag, Radebeul, 218- 241.
- Schueler, S., W. Falk, J. Koskela, F. Lefèvre, M. Bozzano et al., 2014 Vulnerability of dynamic genetic conservation units of forest trees in Europe to climate change. *Global Change Biology* 20: 1498-1511.
- Sperisen, C., Pluess, A. R., Arend, M., Brang, P., Gugerli, F., & Heiri, C. 2016 Erhaltung genetischer Ressourcen im Schweizer Wald–Heutige Situation und Handlungsbedarf angesichts des Klimawandels. *Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien*. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, Haupt, Bern, Stuttgart, Wien, 367-383.
- Stojnić, S., S. Orlović, D. Miljković, Z. Galić, M. Kebert et al., 2015 Provenance plasticity of European beech leaf traits under differing environmental conditions at two Serbian common garden sites. *European Journal of Forest Research* 134: 1109-1125.
- Taeger S., Kölling C., 2015 BaSIS für die Baumartenwahl. Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt 22, 28 - 29
- Taeger, S., Zang, C., Liesebach, M., Schneck, V., Menzell, A., 2013 Impact of climate and drought events on the growth of Scots pine (*Pinussylvestris* L.) provenances, *Forest Ecology and Management*, 307:30-42
- Thurm, E.A., Uhl, E., Pretzsch, H., 2016 Mixture reduces climate sensitivity of Douglas-fir stem growth. *Forest Ecology and Management* 376:205-220
- Tinner W., Conedera M., Bugmann H., Colombaroli D., Gobet E., Vescovi E., Heiri O., Joos F., Luterbacher J., La Mantia T., Pasta S., Untenecker J., Henne P.D. 2016 Europäische Wälder unter wärmeren Klimabedingungen. *AFZ-Der Wald* 18/2016, S. 45-49.
- Wagner, I., 1990 Ökophysiologische Untersuchungen an verschiedenen Klonen der Baumart Fichte (*Piceaabies* [L.] Karst.) mit dem Schwerpunkt Trockenresistenz unter Prüfung von Jugend-Alters-Korrelationen. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme Reihe A*, Bd 68, Walentowski, H., C. Kölling und J. Ewald, 2007 Die Waldkiefer – bereit für den Klimawandel? *LWF Wissen* 57: 37-46.
- Walentowski, H., C. Kölling und J. Ewald, 2007 Die Waldkiefer – bereit für den Klimawandel? *LWF Wissen* 57: 37-46.
- Wellbrock, N., 2006. Arbeitsanleitung für die zweite bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II), Arbeitsanleitung für die Außenaufnahmen. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Bonn.
- Winter, M. B., R. Baier und C. Ammer, 2015 Regeneration dynamics and resilience of unmanaged mountain forests in the Northern Limestone Alps following bark beetle-induced spruce dieback. *European Journal of Forest Research* 134: 949-968.

- Wittig, H., 2011 Die Variation der Frosthärte von unterschiedlichen Douglasien-Herkünften (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco). Tharandt : TU Dresden, Fachrichtung Forstwissenschaften, Diplomarbeit, unveröffentlicht, 113 S.
- Wolf, H., 2012 Austrieb und Reaktion auf Trockenstress von Douglasien- (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco)-Bestandesnachkommen aus Deutschland im Vergleich zu Provenienzen aus Nordamerika – Erste Ergebnisse. *Forstarchiv* 83:75-84
- Wolf, H., M. Dacasa-Rüdinger, K.-U. Hartmann, M. Schildbach und A. Zeibig 2016 Zur Variation von anpassungsrelevanten Merkmalen der abiotischen Resistenz zwischen Klonen und Nachkommenschaften der Pappel, Lärche, Douglasie und Fichte. Posterbeitrag zur Forstwissenschaftlichen Tagung 2016. http://www.fowita.de/fileadmin/Anfahrtsskizzen/Programm/fowita16_abstractband.pdf
- Zang, C., Pretzsch, H., Rothe, A., 2012 Size-dependent responses to summer drought in Scots pine, Norway spruce and common oak. *Trees - Structure and Function* 26(2):557-569
- Zimmermann NE, Jandl R, Hanewinkel M, Kunstler G, Kölling C, Gasparini P, Breznikar A, Meier ES, Normand S, Ulmer U, Gschwandtner T, Veit H, Naumann M, Falk W, Mellert, KH, Rizzo M, Skudnik M, Psomas A 2013 Potential Future Ranges of Tree Species in the Alps. In: Management Strategies to Adapt Alpine Space Forests to Climate Change Risks. Eds.: Gillian Ann Cerbu, Marc Hanewinkel, Giacomo Gerosa and Robert Jandl. Intech, ISBN 978-953-51-1194-8. <http://dx.doi.org/10.5772/5627>.