

Systematische Suche nach klimaplastischen Herkünften in Bayern

Karl H. Mellert, Andreas Hahn, Yves-Daniel Hoffmann, Gerhard Schmied, Muhidin Šeho

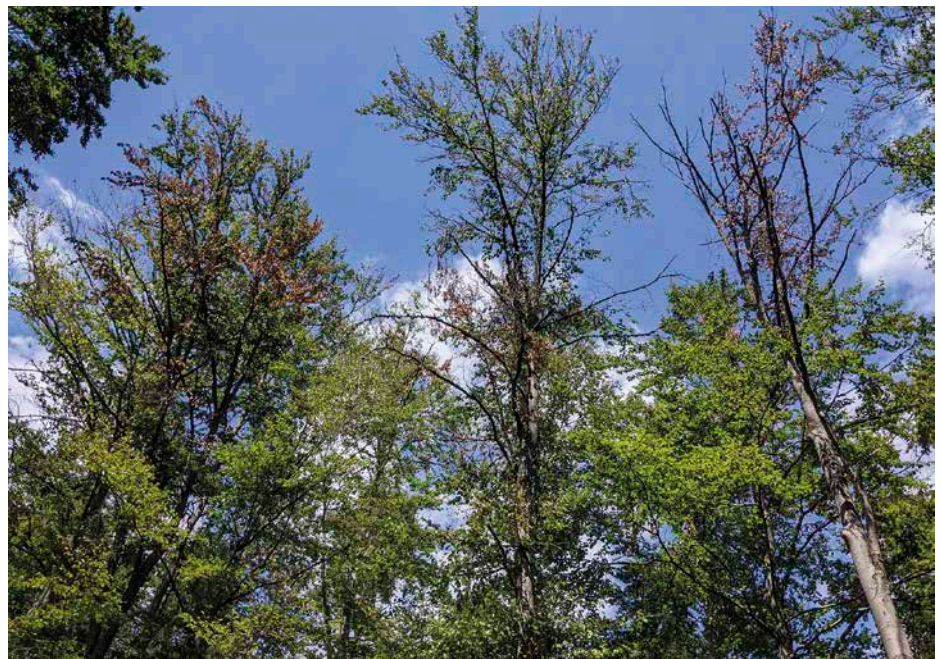
Die Dürreereignisse im letzten Jahrzehnt haben deutliche Spuren im Wald hinterlassen und zu Schäden und Vitalitätsverlusten bei fast allen heimischen Baumarten geführt. Die Dringlichkeit von Waldumbau- und Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel wird dadurch immer deutlicher. Wir zeigen hier, wie die Kombination aus Schadbeobachtungen und Standortanalysen für eine systematische Suche nach widerstandsfähigen Baumpopulationen genutzt werden kann.



Im letzten Jahrzehnt gab es wiederholt extreme Dürreereignisse in Bayerns Wäldern. Diese Witterungsbedingungen haben nicht nur die Wasserversorgung und damit das Wachstum der Bäume beeinträchtigt, sondern auch ihre Widerstandsfähigkeit gegenüber forstlich relevanten Schadorganismen verringert. Baumarten, die einst als robust und vital galten, wie etwa die Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.), zeigten an vielen Waldorten, insbesondere in Unterfranken, Anzeichen von starkem Trockenstress. Diese reichten von vorzeitigem Laubabwurf über Kronenschäden bis hin zu einer erhöhten Sterblichkeit (Abbildung 1). Ausmaß und Intensität der Schadsymptome haben in forstlichen Kreisen teilweise zu einer Unsicherheit hinsichtlich ihrer Interpretation geführt (Klemmt et al. 2023): Sollten beispielsweise die Schadsymptome bei der Rotbuche als individuelle Anpassung an neue Umweltbedingungen bewertet werden, oder müssen die standörtlichen Ansprüche dieser Baumart grundsätzlich anders eingeschätzt werden?

Dürreschäden mit geeigneten Herkünften abmildern

Diese abiotisch bedingten Schäden verdeutlichen die Dringlichkeit von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel, um die Resilienz von Waldbeständen zu stärken. Die Suche nach resilienten Herkünften und deren Nutzung im Zuge einer »Assisted Migration« (Fady et al. 2016) wäre eine wichtige Maßnahme zur Steigerung der Widerstandskraft von Wäldern. In diesem Beitrag zeigen wir



1 Absterbende Buchen in Unterfranken. Fotos: Yves-Daniel Hoffmann, AWG, Andreas Hahn, LWF

am Beispiel der Rotbuche, wie Daten aus dem Waldschutzmeldewesen der Bayerischen Forstverwaltung und punktgenaue Beobachtungen zu Wachstum, Vitalität sowie der Wasser- und Nährstoffversorgung bei dieser Suche helfen können. Das in der sensFOR-Projektreihe anhand dieser Daten entwickelte Suchschema ist aussichtsreich und sollte weiterentwickelt werden.

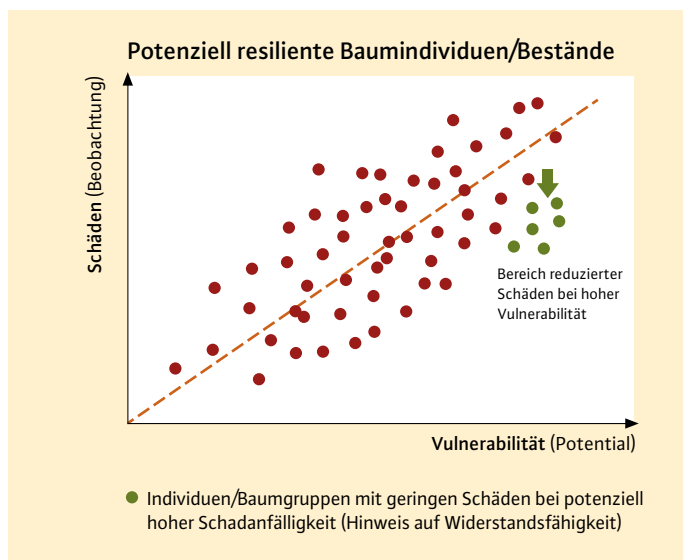
Gezielte Suche nach resilienten Buchenpopulationen

Beobachtungen aus der forstlichen Praxis zeigen, dass einzelne Bäume und Baumgruppen auch unter widrigen Umweltbe-

dingungen ihre Vitalität aufrechterhalten können. Ein Einfluss standortbedingter Faktoren auf die Baumvitalität wird dabei häufig beobachtet und gilt als ökophysiologisch plausibel.

Die Suche nach geeigneten Erntebeständen beginnt genau bei solchen äußerlich erkennbar gesunden – d. h. phänotypisch resilienten – Baumpopulationen. Schließlich legt die beobachtete phänotypische Widerstandskraft von Populationen genetische Ursachen nahe (klimaplastischer Genotyp). Das Suchschema baut daher auf dem Abgleich der Schadenintensität bzw. des Schadensumfangs von Populationen bzw. Baumgruppen und deren Vul-

2 Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Waldschadensmeldungen (beobachtete Schäden) und potentieller standortbedingter Vulnerabilität/Schadanfälligkeit. Die Zusammenwirkung der Standorteigenschaften wie Wasser- und Nährstoffversorgung oder das lokale Klima bestimmen die potentielle Schadanfälligkeit eines Standorts.



nerabilität auf, die durch Klima und lokale Standortbedingungen bestimmt wird. Die Beziehung zwischen Schaden und Vulnerabilität kann graphisch dargestellt werden (Abbildung 2). Eine besondere Eignung unter Klimawandelbedingungen lassen jene Baumgruppen oder -individuen erwarten, die auch während einer Dürrperiode nur geringe Schäden trotz hoher standortbedingter Schadanfälligkeit zeigen (Abbildung 2, grüne Punkte). Für die systematische Suche nach resilienten Buchenpopulationen müssen also Daten zur potenziellen Vulnerabilität von Beständen und beobachtete Schäden zusammengeführt und fachübergreifend analysiert werden. In Bayern stehen Daten zu Schäden und Schadanfälligkeit zur Verfügung, gewonnen aus dem Waldschutzmeldewesen (Schißlbauer et al. 2022), aus Klimadaten (Fick & Hijmans 2017) und aus Informationen zum Standort (Mellert et al. 2023).

Kulisse für die systematische Suche

Für eine großräumige Darstellung der standortabhängigen Vulnerabilität wurden Klimadaten für Bayern herangezogen und eine Klimaerwärmung von +2,5 °C angenommen. Auf dieser Basis wurde die »klimatische Marginalität« (CMI) der Rotbuche berechnet (Abbildung 3). Die resultierende Flächenprognose des CMI wurde jeweils in einen Optimal-, Intermediär- und Marginalbereich aufgeteilt. Zur Prüfung, inwieweit die vorgenommene klimatische Einteilung mit den im Beobachtungszeitraum 2018–2021 aufgetretenen Trockenschäden korrespondiert, haben wir Daten zu Buchen-Tro-

ckenschäden in bayerischen Privat- und Körperschaftswäldern herangezogen. Diese basieren auf Meldungen der Ämter für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (ÄELF) im Waldschutzmeldewesen

(WSM) der Bayerischen Forstverwaltung. Nachfolgend wurde geprüft, ob zwischen diesen Schadmeldungen und der klimatischen Marginalität (CMI) eine Beziehung besteht, wie in Abbildung 2 unterstellt. Zweitens wurde analysiert, ob mit den Klassen der klimatischen Vulnerabilität eine sinnvolle Einteilung erzielt wurde. Ein Zusammenhang zwischen der Vulnerabilität und den Schäden ist zwar plausibel, kann aber nicht zwingend erwartet werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die verwendeten Nischenmodelle auf historischen Klimadaten (Periode 1970–2000) und einer prognostizierten Klimaerwärmung von +2,5 °C beruhen, während in den WSM-Meldungen die jährlich aktuellen Schäden wiedergegeben werden. Man kann diese Analyse daher als Test auffassen, ob großräumige ökologische Parameter wie die Marginalität bzw. Vulnerabilität überhaupt als Maß für die potenzielle Schadanfälligkeit geeignet sind.

Methodische Grundlagen des Suchschemas

Nischenmodelle

Die klimatische Vulnerabilität der Erntebestände wurde im Projekt sensFORclim als klimatische Marginalität (CMI) auf der Basis von Nischenmodellen mittels statistischer Modelle ermittelt. Die Baumvorkommen stammen aus dem Datensatz der LWF (2020). Um das klimatische Potenzial einer Baumart voll auszuschöpfen, wurde bereits bei einem Vorkommen innerhalb eines 16 x 16 km Rasters die Buche als präsent gewertet. Als Klimadaten wurden WorldClim-Daten (FICK & HIJMANS 2017) verwendet. Ebenso wie in Mellert et al. (2015) wurden die Variablen BIO6 (Minimumtemperaturen im kältesten Monat), BIO10 (Mittlere Sommertemperaturen) und BIO18 (Sommerniederschlag) für die Klimaperiode 1970–2000 als Basis für die Modellierung der Marginalität herangezogen. Für die großräumige Darstellung der Vulnerabilität wurden die Klimadaten für Bayern herangezogen, eine Klimaerwärmung von +2,5 °C angenommen und die resultierende Flächenprognose der Marginalität (CMI) mit den Schwellenwerten (CMI < 0,4 → marginal; CMI 0,4 – 0,7 → intermediär; CMI > 0,7 → optimal) zur Vulnerabilität (1–CMI) klassifiziert.

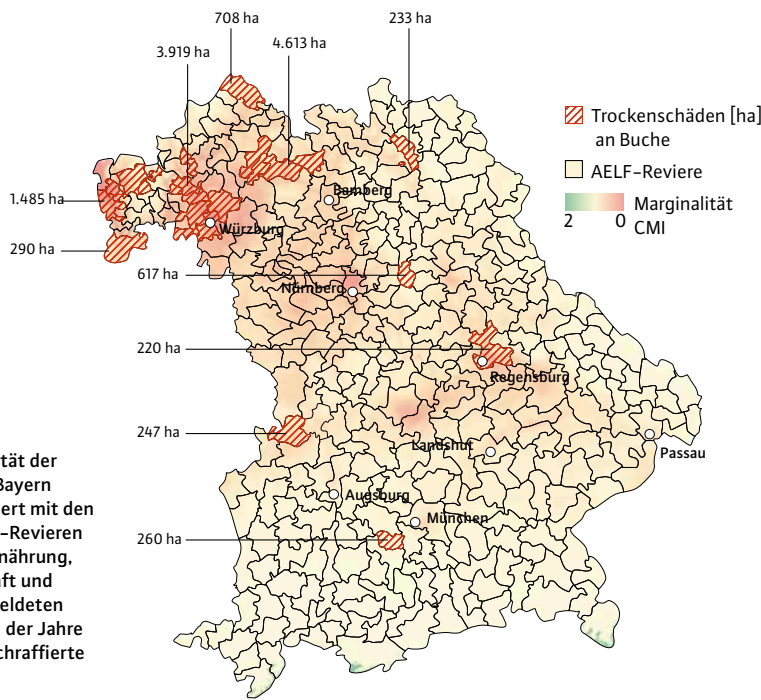
Waldschutzmeldewesen (WSM)

Für das Waldschutzmeldewesen der Bayerischen Forstverwaltung wurden im Zeitraum 2018–2021 waldschutzrelevante Schäden

im halbjährlichen Turnus bei den ÄELF und den Revieren der Bayerischen Staatsforsten (BaySF) erhoben (Schißlbauer et al. 2022). In der Schadkategorie Trockenschäden (Bestand) wurden Buchenflächen mit auffälligen Absterbeerscheinungen in der Oberkrone erfasst – wobei die Buchen nicht komplett abgestorben sein mussten.

Modell zum Entlaubungsgrad von Buchen

Die Daten stammen aus sensFORbeech (Schmied et al. 2024) und beinhalten Daten zum Entlaubungsgrad von zwölf Rotbuchenbeständen in Bayern sowie zu Bestand, Klima und Boden. Als Zielgröße des statistischen Modells dient der Entlaubungsgrad, als Einflussgrößen wurden die Marginalität (Marginal-/Grenzbestand, $p < 0,05$), die Wasserspeicherkapazität (nFK, $p < 0,05$) und der Basenzustand ($p < 0,05$) herangezogen. Der Standort und die Bestandhöhe wurden als Kontrollvariablen mitgeführt, um etwaigen Standorts- oder Managementeffekten Rechnung zu tragen. Mit diesem Beispiel soll das Vorgehen bei der Identifikation klimaplastischer Bäume und Bestände veranschaulicht werden. Es sei hier aber ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Daten nur zur Veranschaulichung der Herangehensweise verwendet werden. Für eine echte Identifikation resilienter Bestände wird eine Erhebung von weiteren Daten benötigt.



3 Marginalität der Rotbuche in Bayern (CMI) überlagert mit den aus den AELF-Revieren (Ämter für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten) gemeldeten Schadflächen der Jahre 2018–2021 (schraffierte Polygone).

Standortbedingte Anfälligkeit für Schäden

Wie Abbildung 3 zeigt, besteht bereits ein klarer Zusammenhang zwischen dem CMI und den gemeldeten Schadflächen der Reviere. Die statistische Analyse der Beziehung zwischen beiden Parametern gibt genaueren Aufschluss (Abbildung 5). Die Korrelation zwischen beiden Größen ist signifikant (nichtparametrische Korrelationsanalyse: Kendall's tau = -0,2; $p < 0.001$). Je geringer der CMI, also je marginaler der Bestand, desto größer sind die Schäden. Das Streudiagramm in Abbildung 5 zeigt, dass die größten Schäden in Revieren in Unterfranken auftreten – einem klimatisch hochvulnerablen Gebiet (Marginalbereich). Im Optimalbereich kommen dagegen weniger Schäden vor (s. a. Abbildung 3). Dies zeigt, dass die vorgenommene Stratifizierungsmethode unter Zuhilfenahme von Nischenmodellen grundsätzlich geeignet ist, um die klimatische Vulnerabilität von Beständen einzuschätzen.

Um von der makroökologischen Skala des Großklimas auf die Ebene des Standorts zu kommen, werden neben Daten zu Kleinklima und Boden geeignete Parameter zur Einschätzung der Vitalität benötigt. Exemplarisch verwenden wir hier Daten zum Entlaubungsgrad von Buchen, die im Projekt sensFORbeech mit anderer Zielsetzung erhoben wurden (Schmied et al. 2024). Die Daten wer-

den hier nur modellhaft genutzt, um das Vorgehen auf der Ebene des Bestandes bis hin zum Plusbaum zu veranschaulichen (weitere Details siehe Kasten und Schmied et al. 2024).

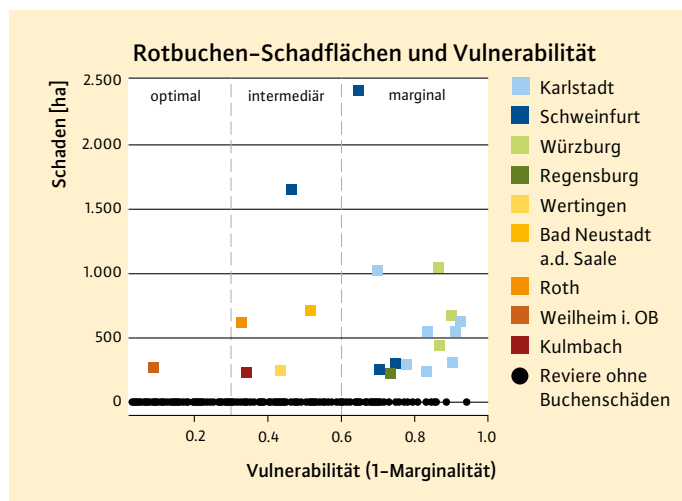
Als wesentlicher standörtlicher Faktor für die Vulnerabilität von Waldbeständen wird die nutzbare Feldkapazität (nFK) herangezogen, welche die Wasserspeicherkapazität von Standorten beschreibt (Mellert et al. 2023, Schmied et al. 2023, Schmied et al. 2024). Im Streudiagramm wurde der Entlaubungsgrad als Maß für trockenbedingte Schäden gegen die standortsbedingte Vulnerabilität aufgetragen, die durch die nFK charakterisiert ist. Bei Beurteilung der Baumpopulationen anhand der nFK wird der Schwel-



4 Starke Zeichnung der Buche infolge von Trockenheit im Hauptschadensgebiet.

Foto: Yves-Daniel Hoffmann

lenwert von 120 mm als Grenze für eine erhöhte standörtliche Vulnerabilität zugrunde gelegt; dieser impliziert eine mittlere bis geringe Speicherkapazität (AK STOK 2016). Nach diesem Bewertungsschema heben sich drei der zwölf Baumpopulationen vom durchschnittlichen Trend ab, symbolisiert durch die hervorgehobenen Fehlerbalken in Abbildung 6. Diese Populationen könnten daher klimaplastische Genotypen enthalten. Die auf diese Weise identifizierten Bestände sollten in weiteren Studien und Praxisanbauversuchen getestet werden. Das Vermehrungsgut derart geprüfter Bestände wäre ein wertvoller Beitrag zur Steigerung der Widerstandskraft und Stabilität von Wäldern.



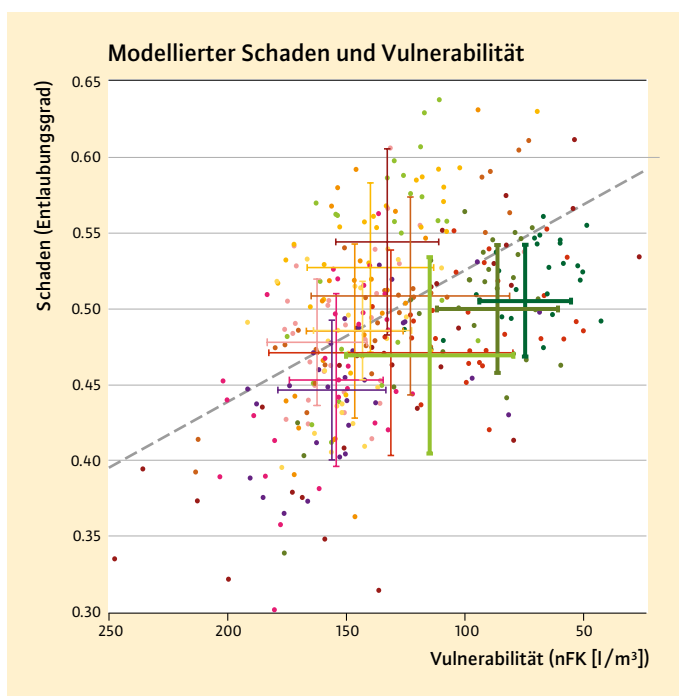
5 Gemeldete Schädflächengrößen der Rotbuche in Bayern stratifiziert nach Klassen der Vulnerabilität (V). Besonders Reviere in Unterfranken fallen mit hohen Schädflächen auf.

V < 0,3 = optimal
 V 0,3 – 0,6 = intermediär
 V > 0,6 = marginal

Fazit und Ausblick

Schadmeldungen auf Revierebene, wie z. B. die Meldungen im Waldschutzmeldewesen der Bayerischen Forstverwaltung geben einen guten Überblick über regionale Problemgebiete. Die Korrelation von Schadereignissen mit der standörtlichen Marginalität, die als Kriterium für die gebietsweise Schadensanfälligkeit der Wälder dient, belegt die makroklimatisch bedingten Dürreerisiken. Bestände mit geringen oder keinen Schäden in solchen Problemgebieten könnten auf resilientere Bestände hinweisen. Solche phänotypisch aussichtsreichen Kandidaten sollten in ein systematisches Prüfverfahren einbezogen werden, bei dem v.a. kleinstandörtliche Ursachen für eine erhöhte Resilienz ausgeschlossen werden. Eine derart identifizierte Baumpopulation erhöhter Resilienz könnte nach weiteren Prüfungen nach der FovG-Zulassungsverordnung – z. B. hinsichtlich ihrer Qualität und ihrer genetischen Anpassungsfähigkeit – als Erntebestand für klimaplastisches Vermehrungsgut ausgewiesen werden.

Die vorgestellten interdisziplinären Ansätze wurden in den Projekten sensFORclim und sensFORbeech entwickelt. Eine Intensivierung der Zusammenarbeit von Waldgenetik und Waldschutz ermöglicht Fortschritte bei der Identifikation von Baumpopulationen mit erhöhter Widerstandskraft. Das hier beschriebene Vorgehen könnte künftig mit umfangreicheren Daten weiterentwickelt werden: Dazu gehören beispielsweise Waldschutzdaten (Daten aus allen Waldbesitzarten, längere Zeitreihen), Daten aus der Waldzustandserhebung, aktualisierte Standortdaten (Mette et al. 2025), aber auch die hochaufgelöste Erfassung von Schadsymptomen mittels terrestrischem Laserscanning. Letzteres wird derzeit im Projekt beechGPT realisiert, das auf den genannten Schadensanalysen der Buche aufbaut und strukturelle sowie funktionale Veränderungen unter Trockenstress untersucht. Zudem bietet die zunehmende Verfügbarkeit von Fernerkundungsdaten – u. a. auch durch das in Bayern angesiedelte Projekt EO4CAM des DLR – für die forstlichen Zwecke ganz neue Chancen zur Bewertung der Vitalität von Baumpopulationen (DLR 2025) und deren Verschneidung mit Standortdaten. Erste Studien geben jedenfalls Anlass zum Optimismus (Pfenninger et al. 2025).



6 Modellhafte Darstellung zur Identifikation klimaplastischer Bäume (N=332) bzw. Bestände (N=12): Modellierter Schaden (Entlaubungsgrad einzelner Rotbuchen im August 2022) vs. kleinstandörtliche Vulnerabilität (nFK). Fehlerbalken visualisieren die Streuung der Einzelwerte und zeigen in welchem Bereich ein Bestand einzuordnen ist. Erhöhte Klimaplastizität liegt bei unterdurchschnittlichen Schäden vor (Bestände unterhalb der gestrichelten Regressionslinie). Aussichtsreiche Bäume bzw. Bestände liegen vor, wenn bei hoher Vulnerabilität nur geringe Schäden auftreten (hergehobene Fehlerbalken in Grüntönen).

Zusammenfassung

Wiederholte Dürreereignisse im letzten Jahrzehnt haben bei der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) insbesondere in Unterfranken zu Vitalitätsverlusten und Absterben von ganzen Beständen geführt. Zur Identifikation von geeignetem Pflanz- und Saatgut für künftige Waldumbaumaßnahmen werden Saatguterntebestände gesucht, die auch unter warm-trockenen Bedingungen widerstandsfähig bleiben. Der vorliegende Beitrag stellt eine systematische Methode zur Identifizierung von klimaresilienten Buchenpopulationen in Bayern vor. Dafür werden zum ersten Mal Daten aus dem Waldschutzmeldewesen, Klimamodellen sowie Standortdaten gemeinsam ausgewertet.

In der Pilotstudie konnte ein signifikanter Zusammenhang zwischen der modellierten klimatischen Marginalität und den tatsächlich gemeldeten Dürreschäden nachgewiesen werden.

Die Methode der Stratifizierung mittels Nischenmodellen und Schadensdaten erwies sich als geeignet, um gefährdete Gebiete zu identifizieren. Das Vorgehen ermöglicht die gezielte Suche nach jenen (phänotypisch) gesunden Bäumen oder Populationen, die auch unter hoher standortbedingter Vulnerabilität (z. B. geringe nFK) wenig Schäden zeigen. Diese Bestände werden als besonders »klimaplastisch« eingestuft und sollen zukünftig als Saatguterntebestände dienen.

Projekte

Im Projekt »sensFORclim« identifizierten Institutionen aus vier Bundesländern (Bay. Amt für Waldgenetik, Forstliche Versuchsanstalt Baden-Württemberg, Staatsbetrieb Sachsenforst, ThüringenForst, Technische Universität München) klimatolerante Saatguterntebestände von Fichte, Buche und Tanne, um Vermehrungsgut für die Praxis verfügbar zu machen. Das Projekt (Laufzeit 2020 bis 2023) wurde vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) durch die Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) gefördert.

Im Projekt »sensFORbeech« (Bay. Amt für Waldgenetik, Technische Universität München) wurde die Situation der Buche infolge der Dürrejahre ab 2018 in Bayern untersucht. Dabei standen trocken geschädigte Buchenbestände insbesondere im fränkischen Raum im Fokus. Das Projekt wurde durch das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten gefördert (Förderkennzeichen klifWo2o) und im Nachfolgeprojekt »beechGPT« weitergeführt (Förderkennzeichen ST402).

Autoren

Karl Heinz Mellert und Yves-Daniel Hoffmann sind Mitarbeiter im Sachgebiet »Erhalten und Nutzen forstlicher Genressourcen« des Bayerischen Amts für Waldgenetik. Andreas Hahn leitet die Abteilung »Waldschutz« der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Gerhard Schmiech ist Wissenschaftler an der Professur für Tree Growth and Wood Physiology, TUM School of Life Sciences, Technische Universität München. Muhidin Seho leitet das Sachgebiet »Erhalten und Nutzen forstlicher Genressourcen« des Bayerischen Amts für Waldgenetik.

Kontakt: Karlheinz.Mellert@awg.bayern.de

Yves-Daniel.Hoffmann@awg.bayern.de

Muhidin.Seho@awg.bayern.de, gerhard.schmiech@tum.de