



Potenzielle klein- und großräumiger genetischer Differenzierung bei heimischen Eichen

PD Dr. Charalambos Neophytou

FVA-Kolloquium (online), 05.02.2026

Abteilung Waldnaturschutz FVA

Arbeitsbereich Waldgenetik und forstliches Vermehrungsgut

Gliederung



01. | Einleitung: Die heimischen Eichenarten und deren Potenzial im Klimawandel

03. | Anpassung der Eichen: großräumig, regional und lokal. Erkenntnisse aus Feldversuchen

02. | Was prägte die genetische Struktur der Eichen? Erkenntnisse aus molekulargenetischen Studien

04. | Umsetzung der Ergebnisse: Schwerpunkte Generhaltung und forstliches Vermehrungsgut

1

Einleitung

Die heimischen Eichenarten und deren Potenzial im Klimawandel



Die heimischen Eichenarten



- Traubeneiche (*Q. petraea* Matt. Liebl.): auf gut drainierten Böden, etwas schattenertragender
- Stieleiche (*Quercus robur* L.): kann Staunässe ertragen, lichtbedürftig, Pioniercharakter ausgeprägter
- Flaumeiche (*Q. pubescens* Willd.): seltenes Vorkommen, trockenwarme Standorte, kalkhaltige Böden
- Wirtschaftliche Bedeutung: Trauben- / Stieleiche > Flaumeiche (teilweise auch standortsbedingt)

Potenzial der heimischen Eichen im Klimawandel

- Im Klimawandel: Übergang von rotbuchendominierten Wäldern hin zu Wäldern geprägt durch Trauben- und Stieleichen
- Wälder mit Flaumeiche werden häufiger in Mitteleuropa

nature climate change
LETTERS

PUBLISHED ONLINE: 23 SEPTEMBER 2012 | DOI: 10.1038/NCLIMATE1687

Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land

Marc Hanewinkel^{1,2*}, Dominik A. Cullmann³, Mart-Jan Schelhaas⁴, Gert-Jan Nabuurs⁵ and Niklaus E. Zimmermann⁶

European forests, covering more than 2 million km² or 32% of the land surface¹, are to a large extent intensively managed and support an important timber industry. Climate change is expected to strongly affect tree species distribution within these forests^{2,3}. Climate and land use are undergoing rapid changes at present⁴, with initial range shifts already visible⁵. However, discussions on the consequences of biome shifts have concentrated on ecological issues⁶. Here we show that forecasted changes in temperature and precipitation may have severe economic consequences. On the basis of our model results, the expected value of European forest land will decrease owing to the decline of economically valuable species in the absence of effective countermeasures. We found that by 2100—depending on the interest rate and climate scenario applied, this loss varies between 14 and 50% (mean: 38% ...)

The projections were conducted for the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) climate scenarios B2 and A1FI (ref. 9) by downscaling the output (temperature and precipitation) of four general circulation models and for A1B by downscaling the same variables of four regional circulation models (RCM) in combination with WorldClim¹⁰ present climate data from a coarse (10°) to a fine (1 km) resolution (Supplementary Table S1). We expressed future climate as anomalies of three time periods (2011–2040, 2041–2070, 2071–2100) relative to a climate normal period (1950–2000). The projections reveal a temperature increase in northern Europe in winter and in the Mediterranean and eastern Europe in summer. Precipitation is expected to increase in central and northern Europe in winter and to decrease in central and (south-) western Europe in summer. Trends are similar for all ...)

FVA PRAXISNAH
Baumarteneignung im Klimawandel
 Übersicht über aktuelle und klimadynamische Bewertungen in Baden-Württemberg
 HEFT 02

Originalartikel:
 Albert Axel, Michiels Hans-Gera, Kohnle Ulrich (2019):
 Baumarteneignung 2.0 und
 Vulnerabilitätskarten –
 Konzept und landesweite
 Hauptergebnisse. FVA-einblick
 2/2019, S. 9-14.
 Online-Version
 14.11.2019

FVA Redaktion
 Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg

Baumarten im Klimawandel: Buche und Tanne verlieren

Die FVA hat neue Karten zur Baumarteneignung und zur Vulnerabilität der Wälder erstellt. Ergebnis über alle Klimaszenarien hinweg: die Charakterbaumarten Buche und Tanne werden in Wirtschaftswäldern gegen Ende des 21. Jahrhunderts keine so dominierende Rolle mehr einnehmen.

Alternative Baumarten im Klimawandel
 Ebn-Steckbriefe
ARTENSTECKBRIEFE 2.0

- Auch in Baden-Württemberg nimmt die Bedeutung aller drei Eichenarten im Klimawandel zu

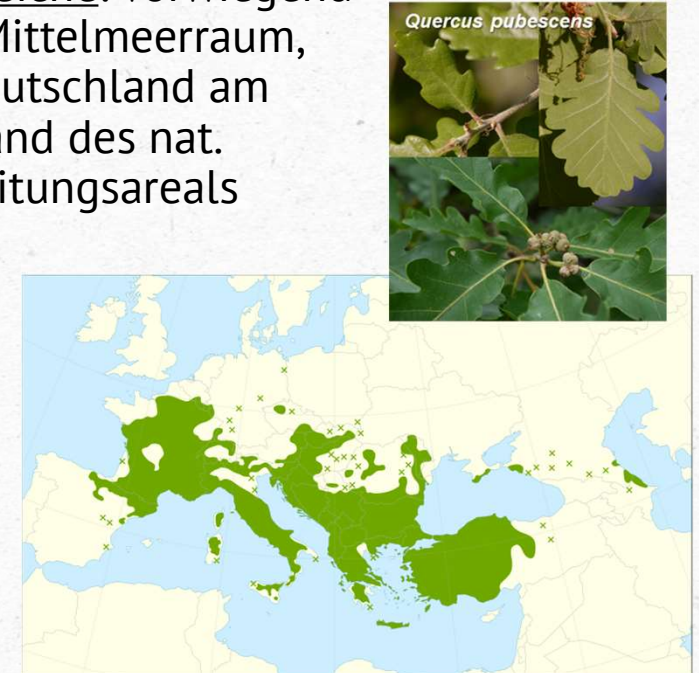
Areale, ökologische Amplitude und Anpassung



Stiel-, Traubeneiche:
~europaweit verbreitet,
SW-Deutschland in der
Mitte vom heutigen
Areal, große Standorts-
amplitude auch intra-
regional



Flaumeiche: vorwiegend
im N Mittelmeerraum,
SW-Deutschland am
Nordrand des nat.
Verbreitungsareals



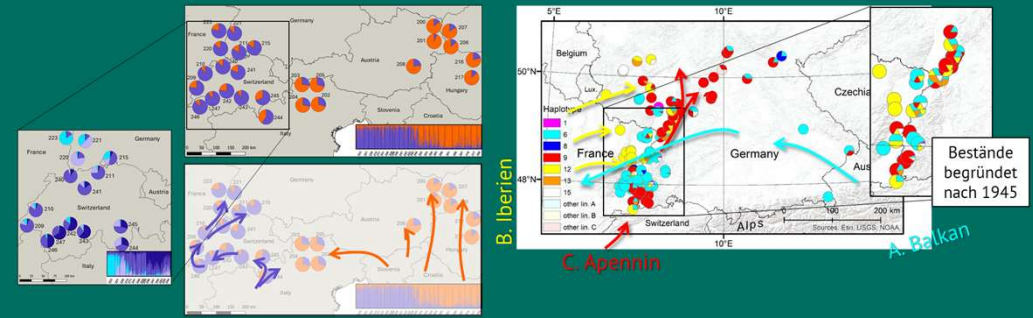
Karten: Caudullo et al. (2017) Data in Brief 12, 662-666
Fotos: Ch. Neophytou

- Genetische Vielfalt innerhalb der Art: Untersuchung, Erhaltung und Nutzung im Klimawandel

2

Spuren von Evolutionsprozessen und menschlichen Einflüssen

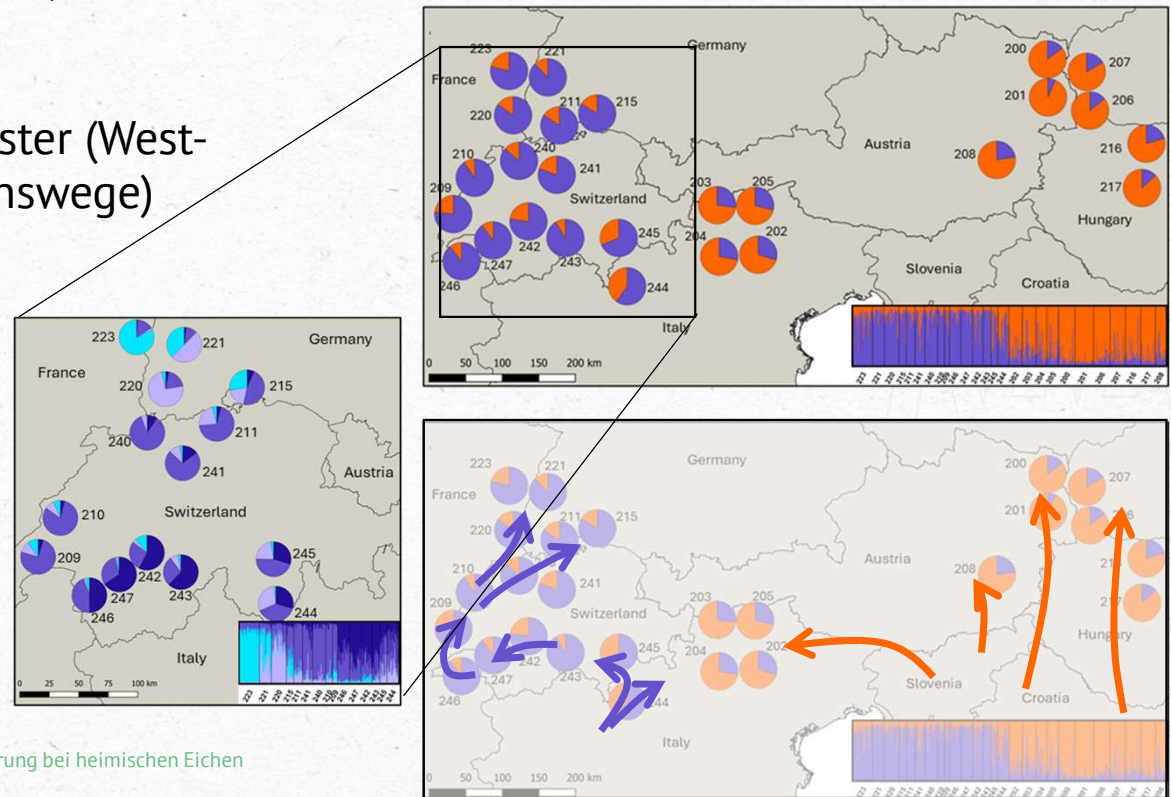
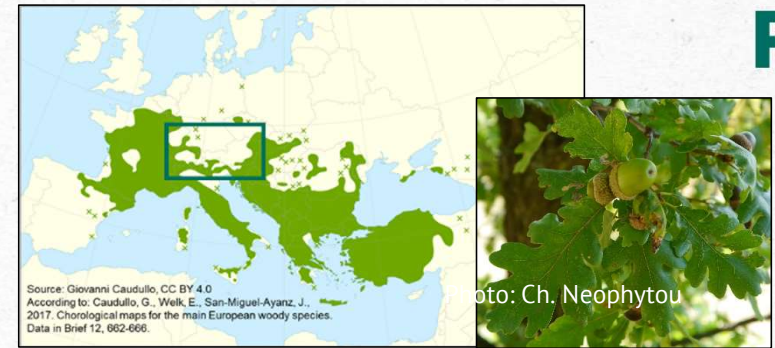
Erkenntnisse aus molekulargenetischen Studien



Spuren vergangener Migration im Genpool der Flaumeiche

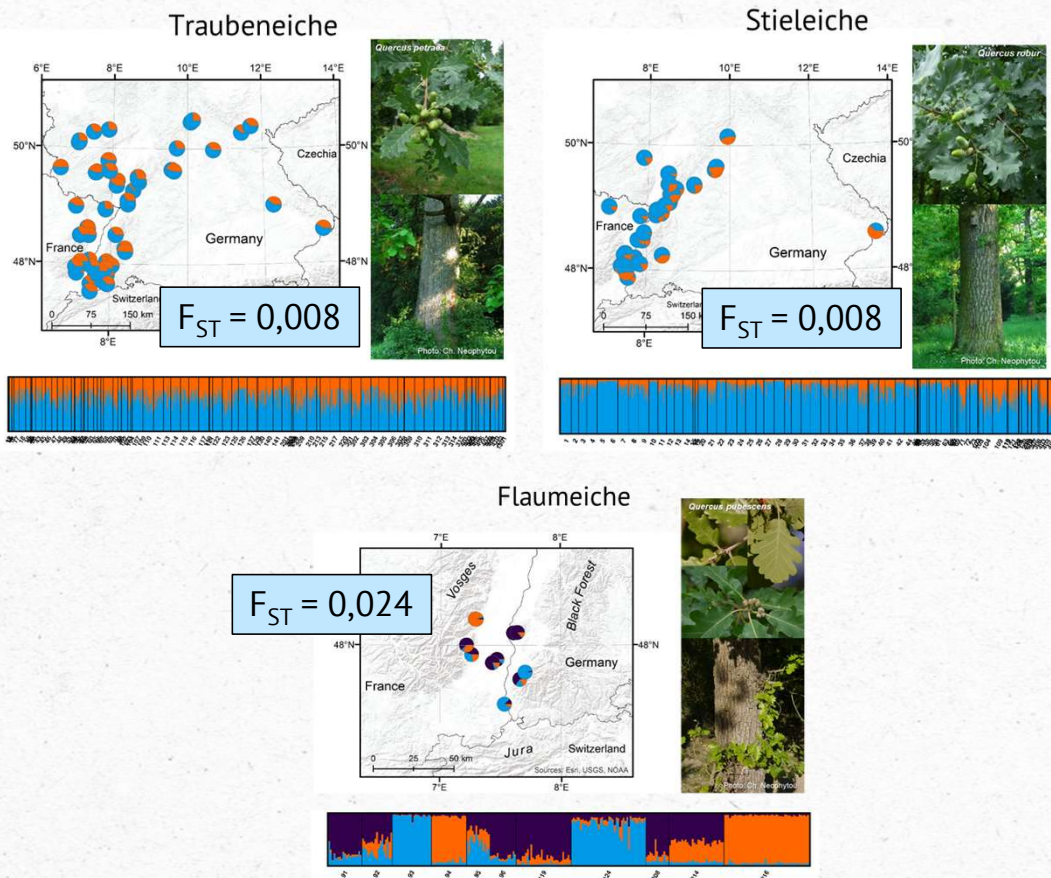
- Nacheiszeitliche Rückwanderungswege prägten den Genpool (Kern-DNA) der heutigen Wälder (26 Bestände, Projekt ACORN)
- Zwei stark differenzierte genetische Cluster (West-Ost) der Flaumeiche (untersch. Migrationswege)
- Weitere genetische Struktur (innerhalb der Cluster): geprägt durch das Relief der Alpen, kleine Populationsgröße und Isolation der Teilvorkommen

Pütz et al. (2025)
Annals of Botany



Heimische Eichen: Stiel- und Traubeneiche sind genetisch homogener als die Flaumeiche

Neophytou et al. (2024)
Forest Ecology and
Management



- Trauben- und Stieleiche: große Populationen, große Konnektivität in Mitteleuropa:
→ niedrige genetische Differenzierung
- Flaumeiche: am Rand des Areal, Populationen kleiner und isolierter
→ genetische Differenzierung zwischen Vorkommen
- Studie mit 154 Beständen (Projekte QREG und AQUAREL)
- Diese Information ist relevant für die Erhaltung und Nutzung von Genressourcen der jeweiligen Art

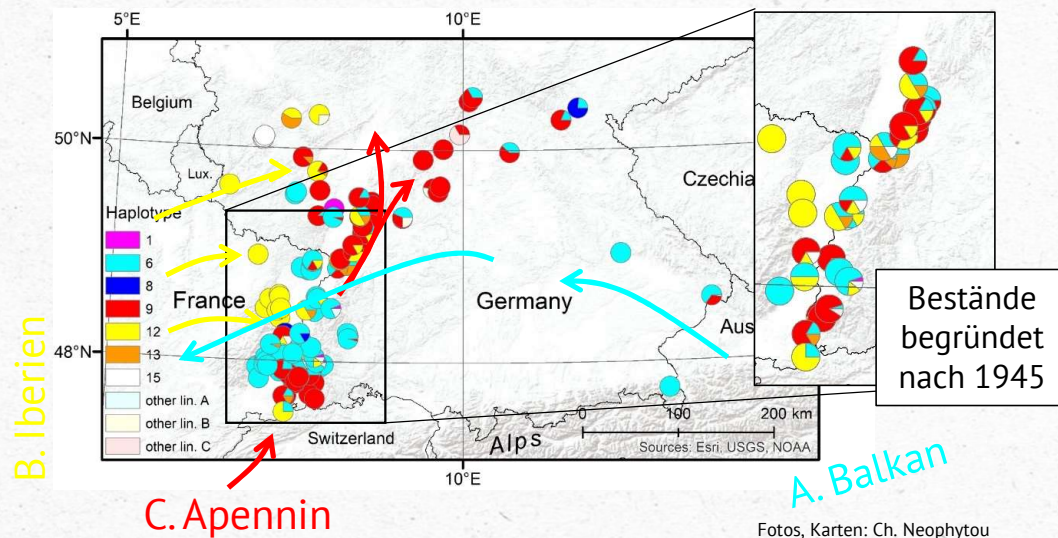
Heimische Eichen: Mütterliche Abstammungslinien zeugen von deren Autochthonie

Neophytou et al. (2024)
Forest Ecology and
Management



Quercus petraea (Matt.) Liebl. Traubeneiche
Quercus pubescens Willd. Flaumeiche
Quercus robur L. Stieleiche

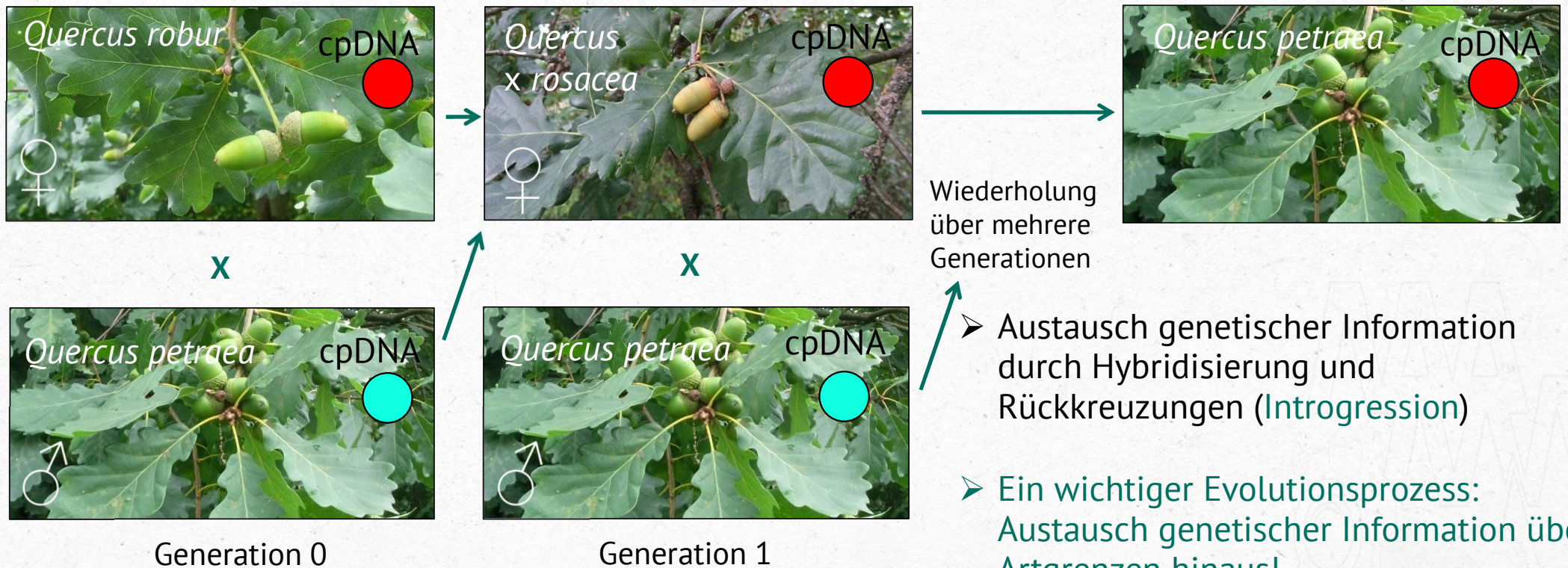
- Mütterlich vererbte Chloroplasten-DNA (cpDNA) → Ausbreitung durch Samen (Fußabdruck der Migration bleibt über Generationen erhalten)
- Mitteleuropa: Ein Treffpunkt verschiedener nach-eiszeitlicher Migrationsrouten
- Jüngere Bestände: Pflanzungen (v.a. in den Nachkriegsjahren) → Einführung ortsuntypischer Varianten konnte nachgewiesen werden
- Erhaltung der Autochthonie teilweise wegen Reliktcharakters, aber auch durch traditionelle Betriebsarten (Nieder-, Mittelwald)!



Fotos, Karten: Ch. Neophytou

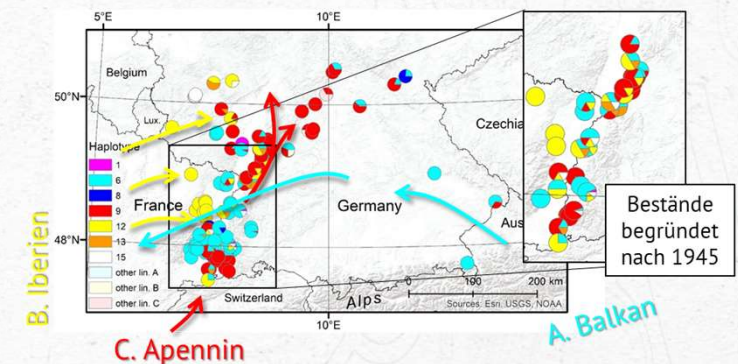
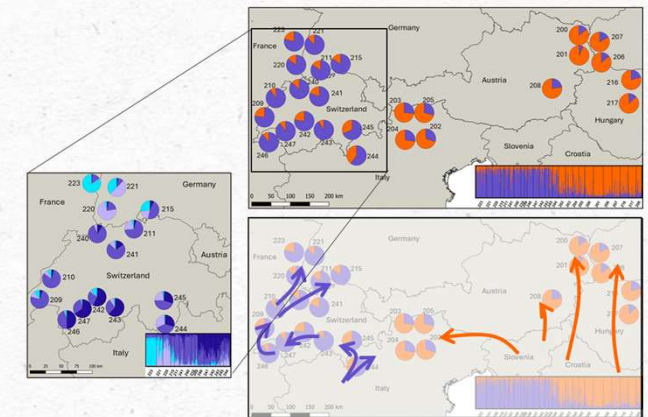
Hybridisierung: Austausch genetischer Information (cpDNA) zwischen Arten

Neophytou et al. (2024)
Forest Ecology and
Management



Zwischenfazit: Erkenntnisse aus molekulargenetischen Studien

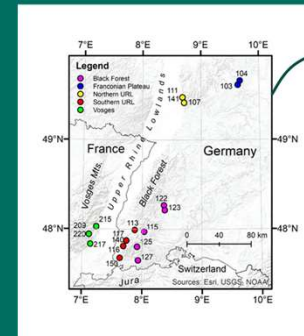
- Nach dem Ende der letzten Kaltzeit (vor ca. 11 000 Jahren) wanderten die Eichen ein. Seitdem wurde deren Autochthonie bewahrt (auch durch traditionelle Bewirtschaftungsformen)
- Reproduktion in großen, gut vernetzten Vorkommen führte zu genetischem Austausch und Homogenität bei Trauben- und Stieleiche. Bei Flaumeiche sind die kleinen und isolierten Vorkommen genetisch stärker differenziert
- Hybridisierung führte zu genetischem Austausch zwischen den Arten
- Welche Auswirkungen hatte die natürliche Selektion / Anpassung über die Generationen?



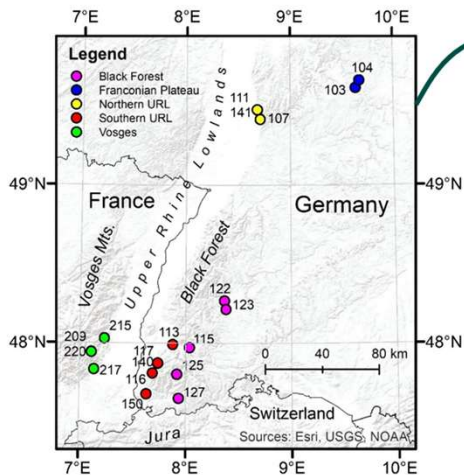
3

Anpassung der Eichen: großräumig, regional und lokal

Erkenntnisse aus Feldversuchen



Juveniles Wachstum und Phänologie der Traubeneiche (Projekt AQUAREL)



Losch et al. (2025)
Silvae Genetica



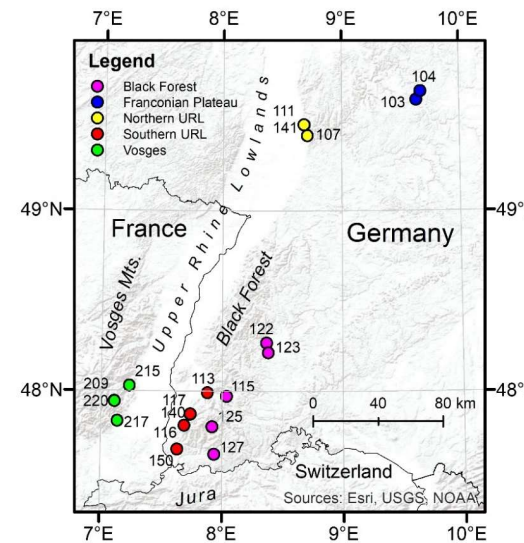
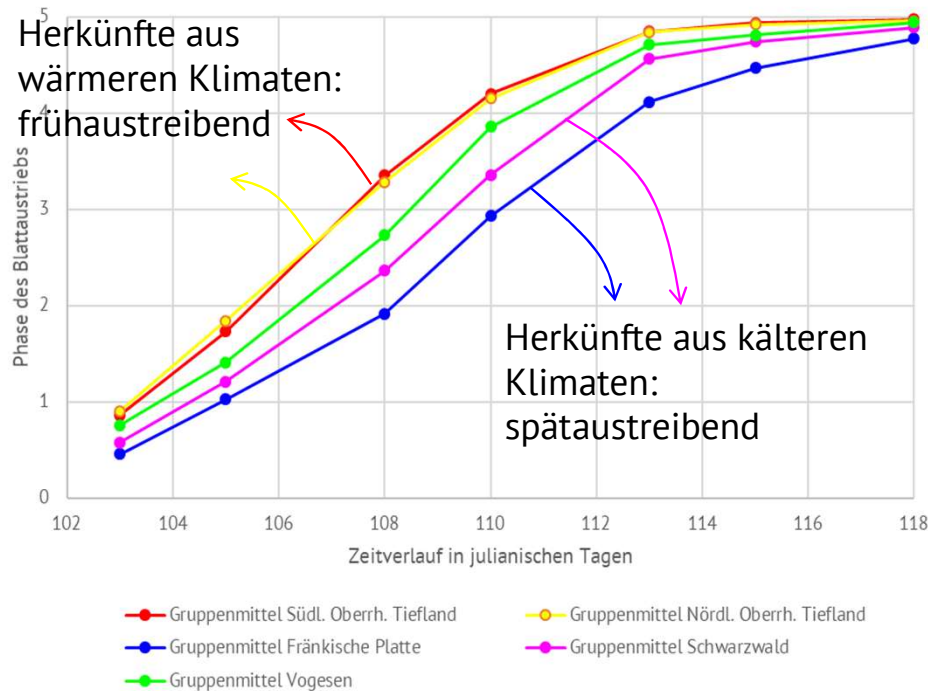
- Saatguternte Herbst 2020, Saat im Frühjahr 2021 in Freiburg
- 25 Herkünfte (18 Bestände aus Reliktstandorten, 7 frisch)
 - Zwei Versuchsorte (Pflanzung Frühling 2023) am Oberrhein und ein weiterer auf der Schwäbischen Alb
- In der Baumschule: Untersuchung des Verlaufs von Blattaustrieb (Frühling 2022) und Herbstfärbung (Herbst 2022)

Austriebsphänologie: angepasst an die lokalen Klimabedingungen

Losch et al. (2025)
Silvae Genetica



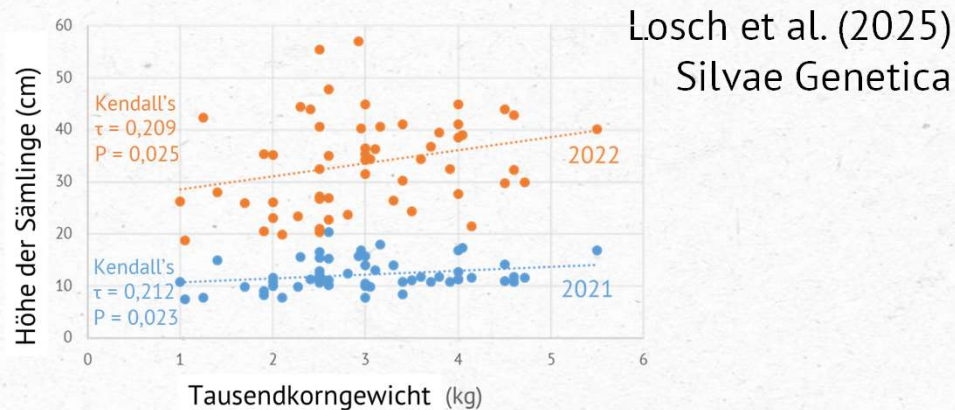
Blattaustrieb im Frühling



Seneszenz (Blattverfärbung im Herbst):
Unterschiede zwischen Einzelstammabsaaten (genetische Vielfalt zwischen Mutterbäumen), aber nicht kein signifikanter regionaler Trend

Juveniles Wachstum: in den ersten zwei Jahren geprägt durch die Samenmasse

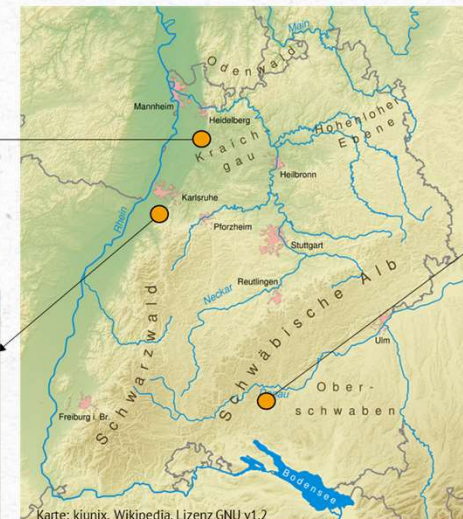
- Signifikanter Effekt sowohl im 1. als auch im 2. Jahr
- Kein Zusammenhang zu Umweltparametern im 1. u. 2. Jahr
- Was ist im erwachsenen Alter zu erwarten? Dauerbeobachtung auf drei verschiedenen Standorten (teilweise sehr trocken)
- Schwerpunkt: Trockentoleranz (Nachkommen schwachwüchsiger Reliktvorkommen werden u.a. geprüft)



Mildes Klima,
Sand



Mildes Klima,
Lehm



Kaltes Klima,
Lehm

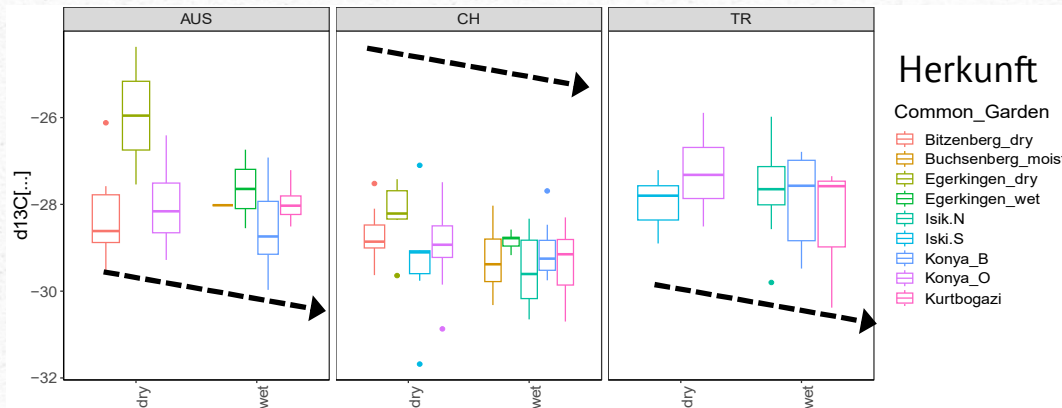
Fotos: J. Wittkamp

Gibt es auch kleinräumige Anpassung? Ergebnisse aus Flaumeichenbeständen

- Nachkommen aus Bestandespaaren (trocken vs. frisch in räumlicher Nähe)



Kleinräumige Unterschiede bei Wassernutzungseffizienz ($\delta^{13}C$)



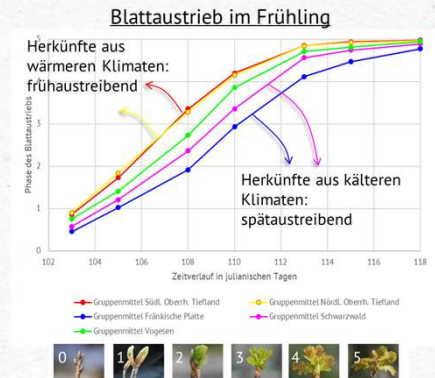
Rellstab et al. (2023)
EvolTree Conference
Braşov, Romania



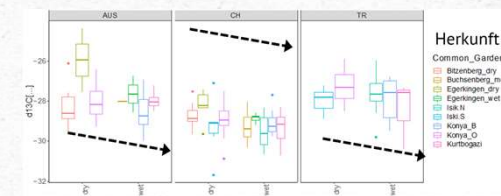
- Bei Flaumeiche vier Paare: Kaiserstuhl (Büchsenberg-Bitzenberg), Jura (Egerkingen, CH), zwei Paare Türkei (Isik dağı, Konya)
- Drei Versuchsorte: Ankara, Wien, Zürich
- Hinweise auf kleinräumige Anpassung der Herkünfte!

Zwischenfazit: Erkenntnisse aus quantitativgenetischen Studien (Feldversuchen)

- Die Eichen konnten sich unter dem Einfluss der natürlichen Selektion über die Generationen an die lokalen Bedingungen anpassen
- Variation von Wachstumsmerkmalen (phänologische Merkmale, Wuchsleistung, ...) kommt arealweit (Ducousso et al. 1996, Sáenz-Romero et al. 2017), aber auch regional vor (hier präsentierte Studie, Wunderlich et al. 2017)
- Wie kleinräumig kann Anpassung sein? Frage relevant bei den heimischen Eichen, da sie teilweise extreme Standorte besiedeln. Erste Hinweise aus Sämlingen am Bsp. der Flaumeiche. Nachkommenschaftsprüfung im AQUAREL-Projekt sucht nach Antworten (mittel- und langfristig)



Kleinräumige Unterschiede bei Wassernutzungseffizienz ($\delta^{13}C$)



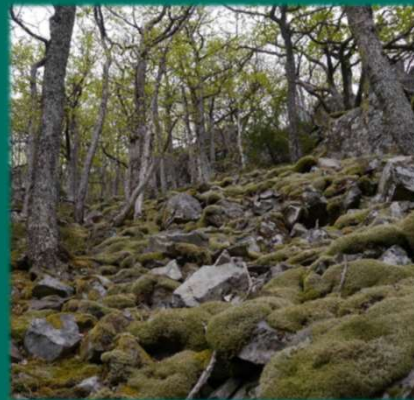
Ducousso et al. (1996) *Annals of Forest Science* 53, 775-782
 Sáenz-Romero et al. (2017) *Global change Biology* 23, 2831-2847
 Wunderlich et al. (2017) *Allg. Forst- Jagdztg.* 188, 153-168

Fotos: Ch. Neophytou

4

Umsetzung der Ergebnisse

Schwerpunkte Generhaltung und
forstliches Vermehrungsgut



Anwendungen der Forstgenetik



Genetische Vielfalt ist eine wichtige Grundlage für die zukünftige Anpassung und das Erbe einer langen Evolutionsgeschichte. Deshalb...

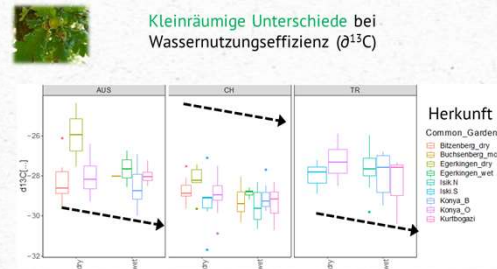
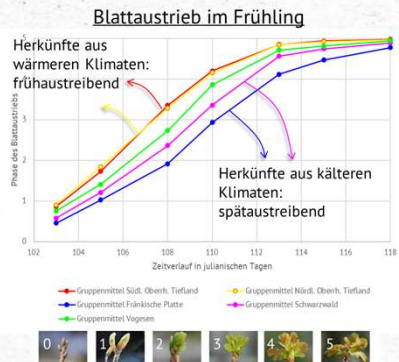
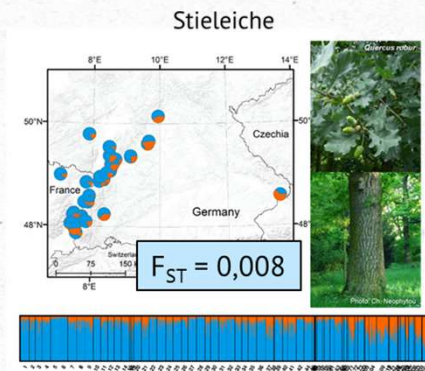
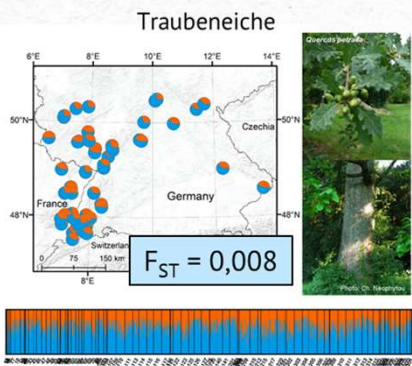
- ...sind genetische Ressourcen der Waldbäume zu identifizieren und zu erhalten (**Generhaltung**)
- ...ist die genetische Vielfalt und Anpassungsfähigkeit zu erforschen und zu nutzen / fördern (**forstliches Vermehrungsgut, Forstpflanzenzüchtung**)



→ Ergebnisse aus molekular- und quantitativgenetischen Studien bilden beide eine wichtige Grundlage für die Erhaltung und Nutzung forstlicher Genressourcen

Fotos: Charalambos Neophytou

Klein- und großräumige genetische Differenzierung der heimischen Eichen



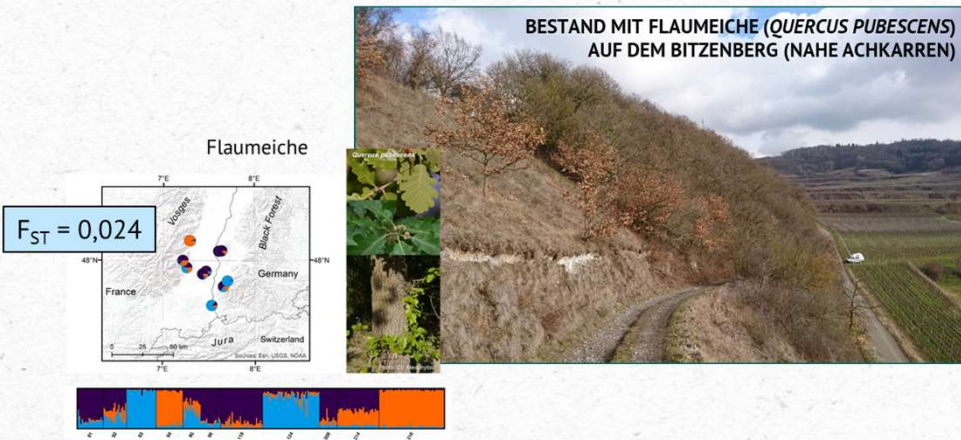
- Stiel- und Traubeneiche: genetisch homogener als die Flaumeiche (molekulargenetische Studien)
- Flaumeiche: die Vorkommen sind genetisch differenziert
- Aber: alle Arten haben sich an ihre Umwelt angepasst (quantitativgenetische Studien)
- Beide Informationen sind wichtig, um genetische Ressourcen (Erhaltung) und Herkunftsgebiete (Nutzung von forstlichem Vermehrungsgut) abzugrenzen

Umsetzung der Ergebnisse in der forstlichen Praxis: wie? (1) **FVA**



- Bei Trauben- und auch Stieleiche späterer Knospenaustrieb von Herkünften aus wärmebegünstigten Standorten / Höhenzonen
- Wuchsleistung: montane Herkünfte sind leistungsschwächer, insbesondere wenn sie in tieferen Lagen gepflanzt werden
- Mit Blick auf den Klimawandel wird empfohlen nach Möglichkeit:
 - i) Vermehrungsgut aus tieferen Lagen zu verwenden (nicht anders herum!)
 - ii) Bei solchem Transfer einen Höhenunterschied von 400 m nicht zu überschreiten (Spätfrostgefährdung wegen Frühaustrieb von „tieferen“ Herkünften)

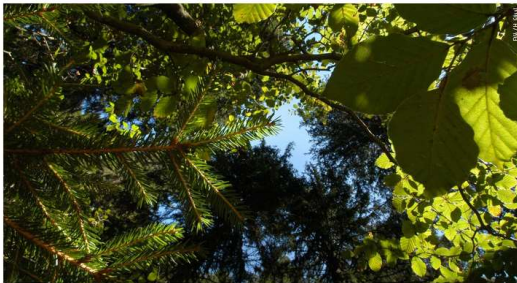
Umsetzung der Ergebnisse in der forstlichen Praxis: wie? (2) FA



- Bei der Auswahl von Beständen für Generhaltung (ex-situ, in-situ): ist **genetische Struktur** und adaptive Variation gut abgedeckt?
- Ergebnisse von großangelegten Herkunftsversuchen weisen auf die Herkünfte mit Potenzial im Klimawandel hin (**assisted migration**)
- Versuchsflächen auch zur **Auslese von herausragenden Phänotypen und Züchtung** → große genetische Vielfalt innerhalb der Bestände, Spielraum für Züchtung (Schwerpunkte: Wuchseigenschaften, aber auch Trocken- und Pathogentoleranz)

MIGFOREST

MIGFOREST UNTERSTÜTZT WALDBAUMARTEN IN NORDWESTEUROPA



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Förderung:



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung



Vielen Dank: an alle, die an den vorgestellten Projekten gearbeitet haben (im Feld, im Gewächshaus, im Pflanzgarten, im Labor oder im Büro)

Vielen Dank: an alle Geldgeber, die diese Forschung ermöglicht haben

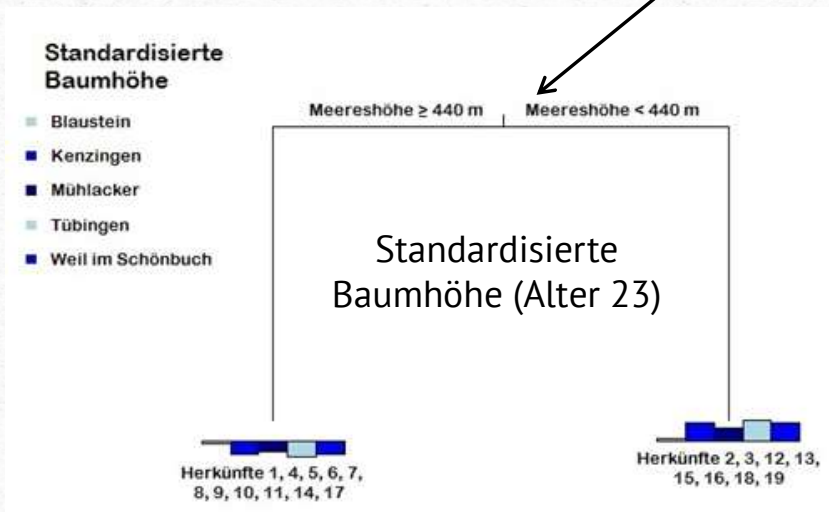
Adultes Wachstum: Ergebnisse von älteren Feldversuchen (Nachkommenschaftsprüfungen) der Stieleiche

- Nachkommen aus 19 zugelassenen Erntebeständen von Baden-Württemberg geprüft auf 5 Standorten

Wunderlich et al. (2017)
Allg. Forst- und
Jagdzeitung



Höhenlage des Ursprungs



Quercus robur L.

- Herkünfte aus Tieflagen sind allgemein leistungsstärker (v.a. an tief gelegenen Versuchsorten)
- Herkünfte aus höheren Lagen „halten mit“ am höchsten / kältesten Versuchsort (Blaustein)
- Anpassung entlang eines Höhengradienten (=klinale Variation)