



Unsere Baumarten und Wälder unter Klimawandel – Versuch einer Synthese

Andreas Rudow, D-USYS, ETH Zürich

SDG-Fachtagung «Klimawandel – Bäume für die Zukunft»
14.03.2026, DUW Uni Basel

Inhalt

- Evolution
 - Metapopulationsdynamik
 - Anpassung und Angepasstheit
 - Ausblick Projekt TreeGD

- Ökologie
 - Interpretation von Absterbeereignissen
 - Interpretation von zukünftiger Realisation
 - Ausblick Dendrologie Wissensgrundlagen

- Forstliche Praxis
 - Forstliches Vermehrungsgut
 - Einheimische Baumarten vs. forstliche Exoten
 - Ausblick Praxisstandard TreeApp

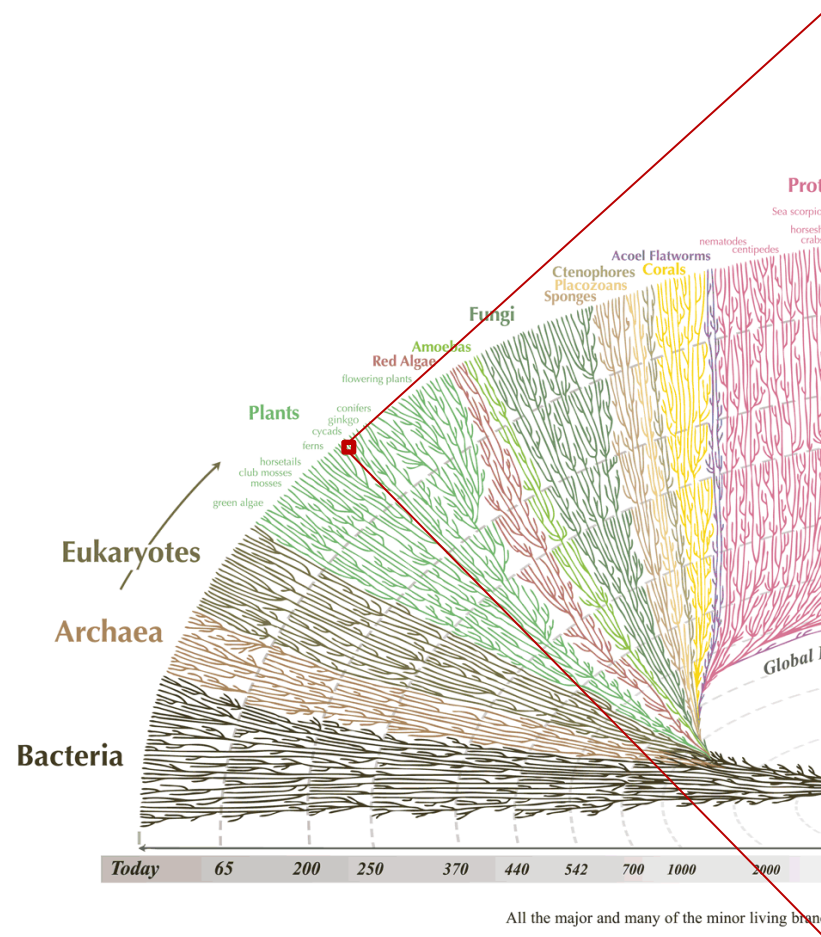
- Folgerungen

An aerial photograph of a lush green valley. The foreground and middle ground are filled with a dense forest of trees, likely oaks, with varying shades of green. The trees are scattered across a grassy slope. In the background, rolling hills rise under a clear, bright blue sky with a few wispy clouds. The lighting suggests a sunny day, with shadows cast by the trees.

1 Evolution

Orientbuche (Fagus orientalis), Goderzipass (Kleiner Kaukasus) Georgien

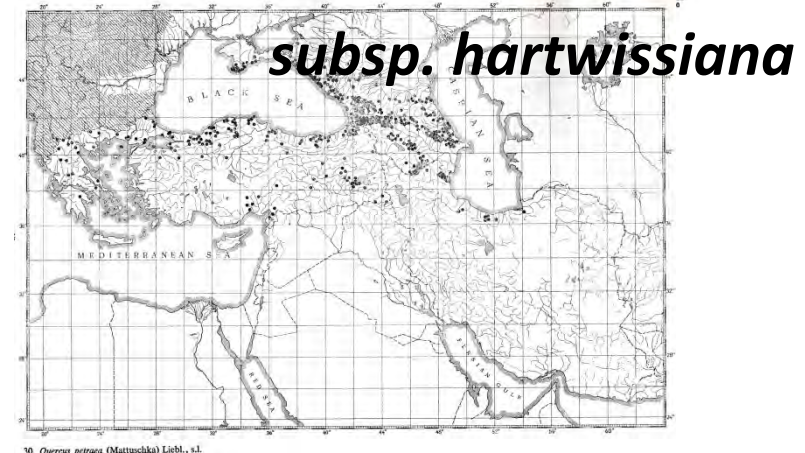
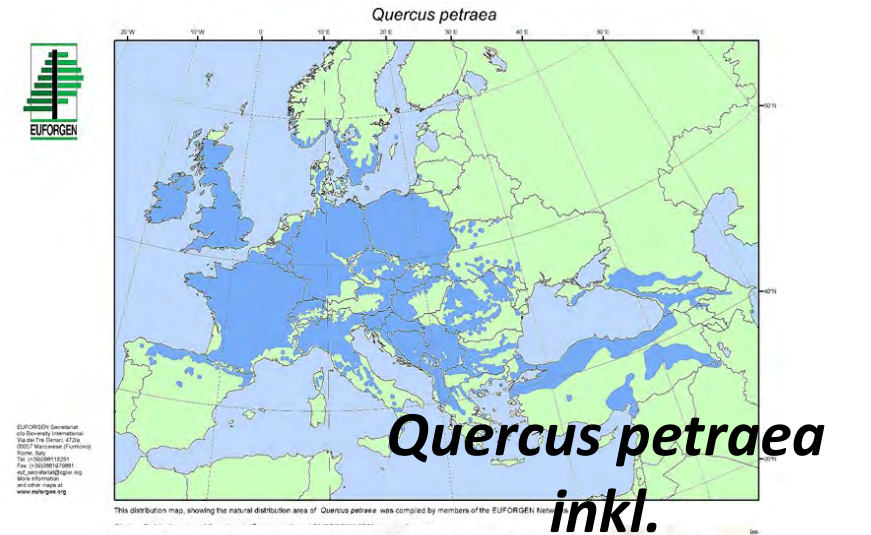
Metapopulationsdynamik



Metapopulationsdynamik =
grossräumige und langfristige Abfolge
von genetischer Differenzierung
und genetischer Vermischung
>> Erhalt der genetischen Diversität

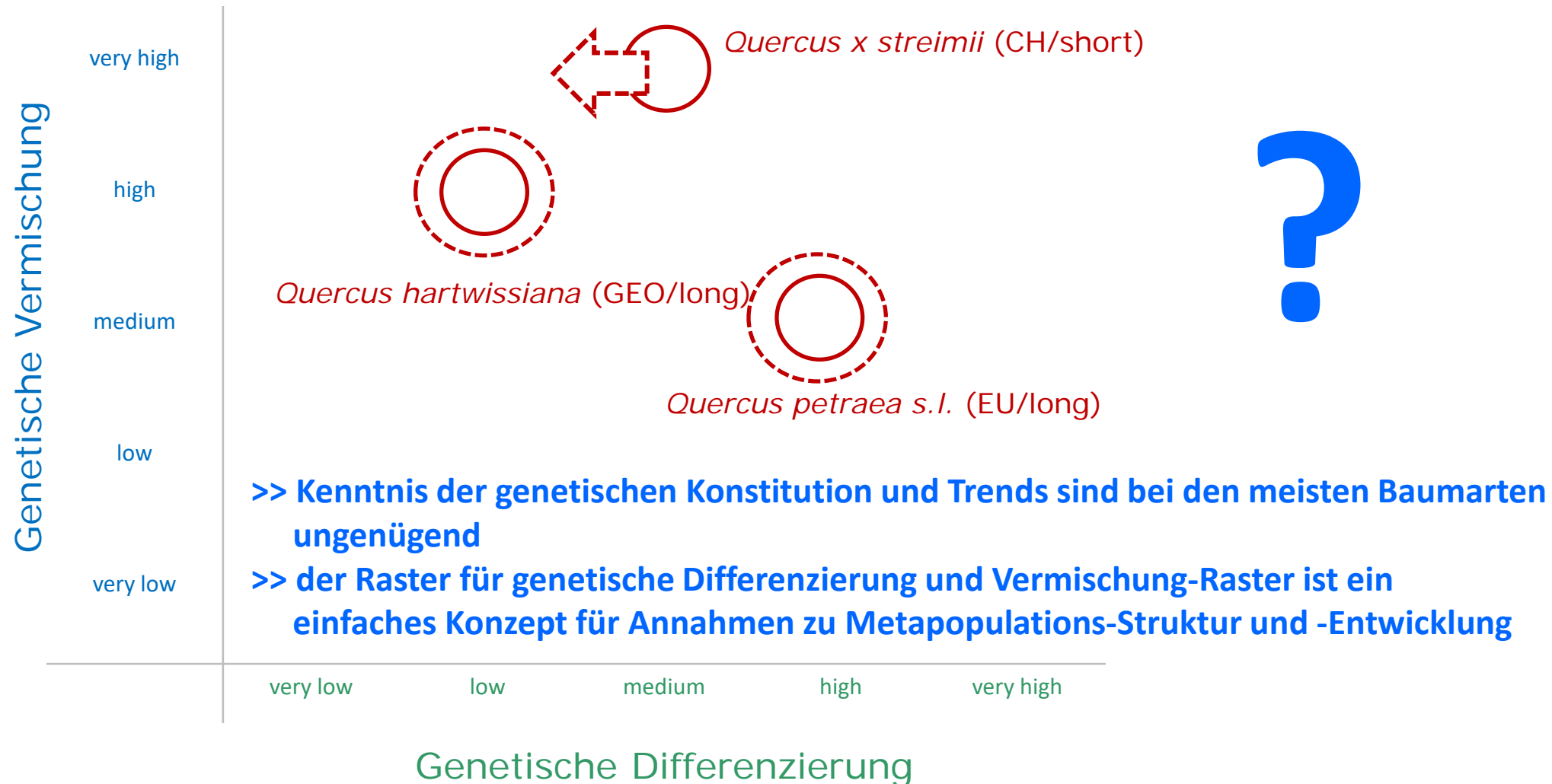
Graphik: Eisenberg 2008, Darwin 1859, Whigler 2019

Metapopulationsdynamik – Taxonomie *Quercus petraea*

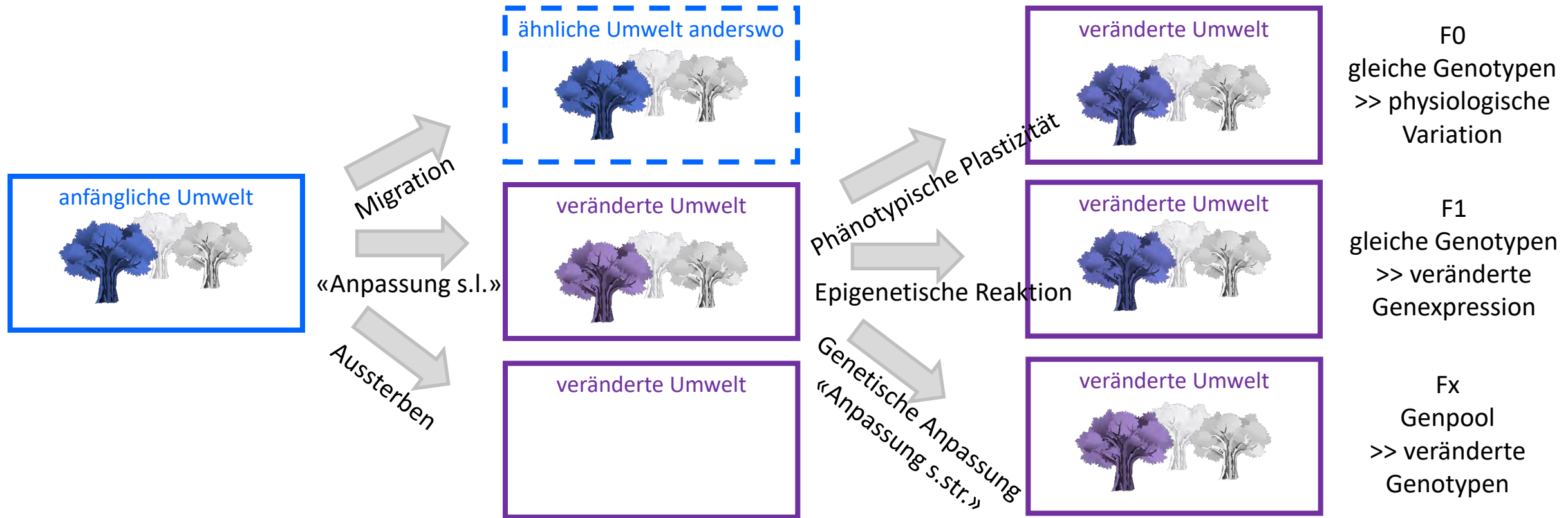




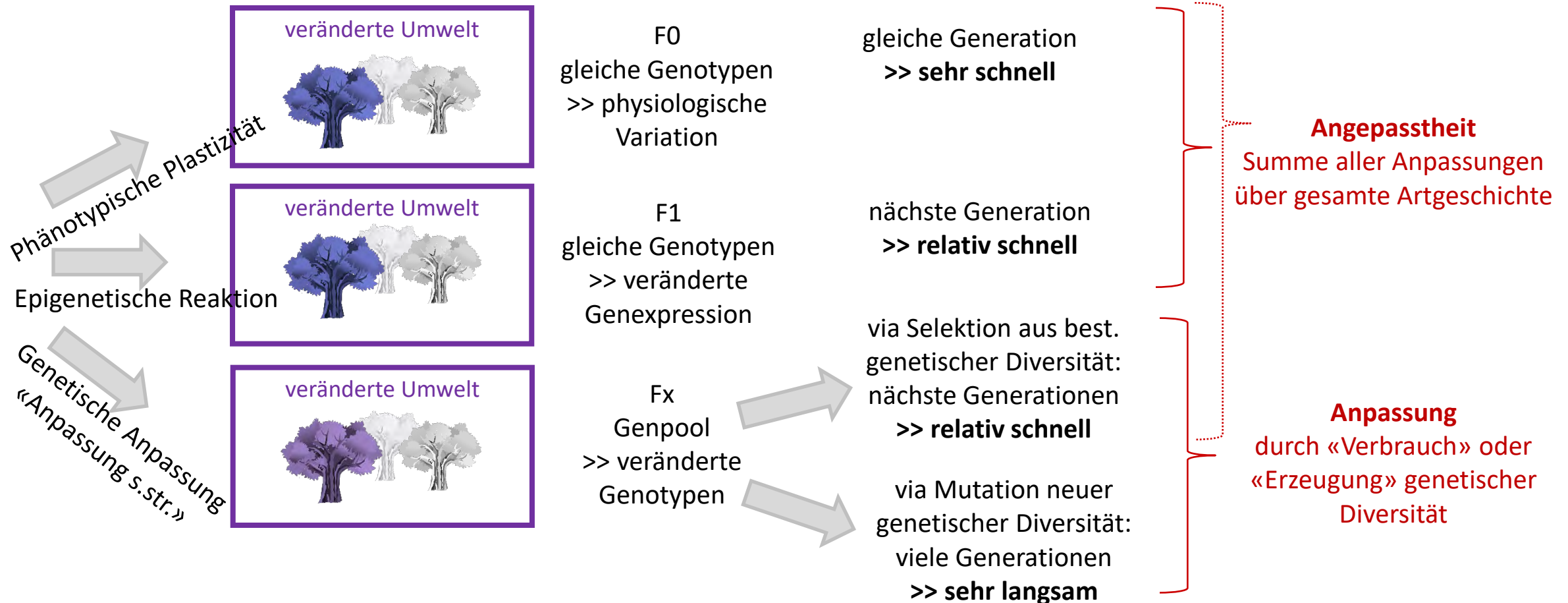
Metapopulationsdynamik – Raster für Struktur + Trend



Anpassung – drei Ebenen



Anpassung und Angepasstheit

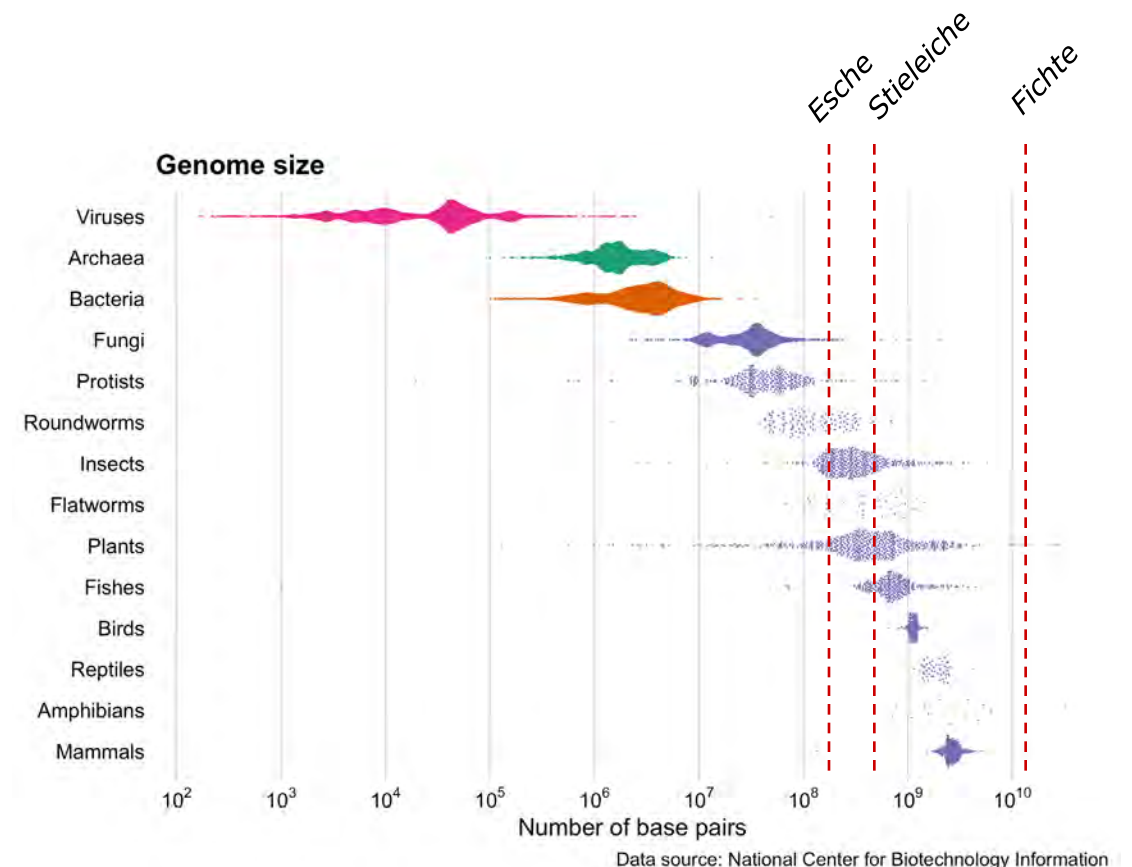




Baumarten sind Spezialisten der Anpassbarkeit

□ Stationäres Leben und hohe Langlebigkeit erfordern (vgl. Petit & Hampe 2006)

- grosse Genome (Anzahl Gene)
- grosse Populationen und spezielle Fortpflanzungssysteme (Genfluss, Persistenz etc.)
- hohe genetische Diversität
 - >> grosse phänotypische Plastizität = grosses physiologisches Potential
 - >> zudem grosses Potential zur raschen genetischen Anpassung via Selektion
- stabile Metapopulationen





Rückblick Projekte & Ausblick Projekt TreeGD

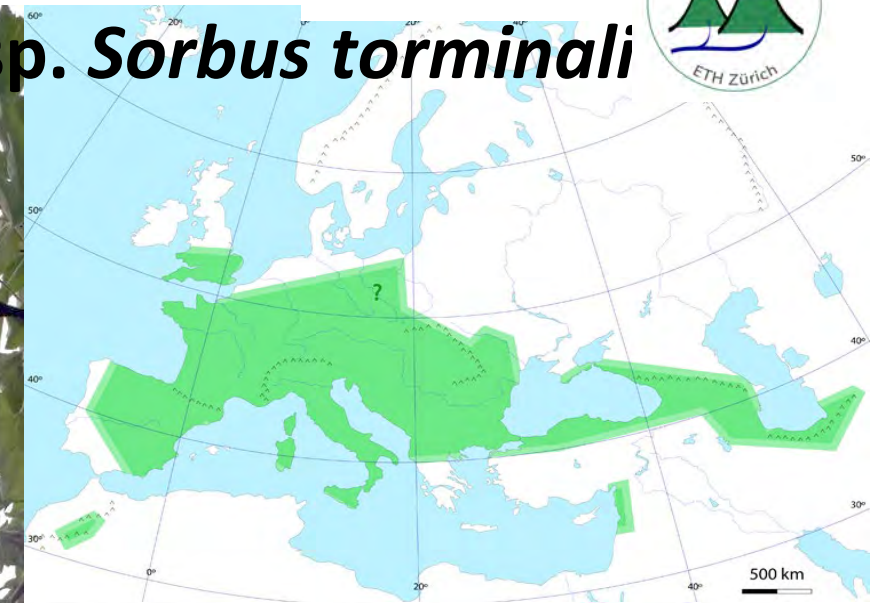
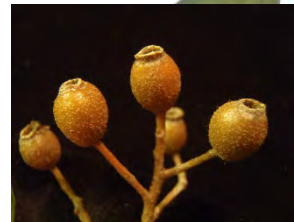
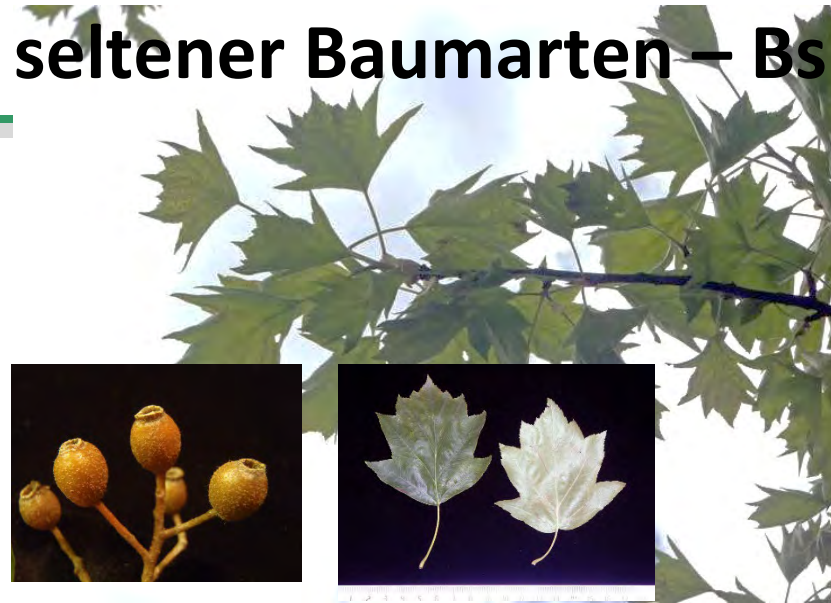
- Förderung seltener Baumarten SEBA (1996-2007) ETHZ/BAFU
 - Verbreitungsinventur und hypothetische Populationsbildung (10+2 Baumarten)
 - Ableitung von nationalen Förderstrategien (Kerngebiete, Vernetzungsgebiete)
 - Sensibilisierung und Weiterbildung Waldfachleute (Forstpraxis)

- Generhaltungsgebiete Schweiz GCU (2013-2027) ETHZ/BAFU
 - Hypothetische Metapopulationsstruktur (aktuell 3. Serie, 21 Baumarten)
 - Zielpopulationen für Generhaltungsgebiete und genetisches Monitoring
 - Enge Zusammenarbeit mit Kantonen, Sensibilisierung Waldbehörde

- Genetische Diversität einheimischer Baumarten TreeGD (2015-2030) WSL/ETHZ/BAFU
 - Ganzgenomanalyse, effektive Metapopulationsstruktur, neutral+adaptiv (5 Baumarten)
 - Validierung Zielpopulationen und Generhaltungsebiere + Genetische Aspekte der Samenernte

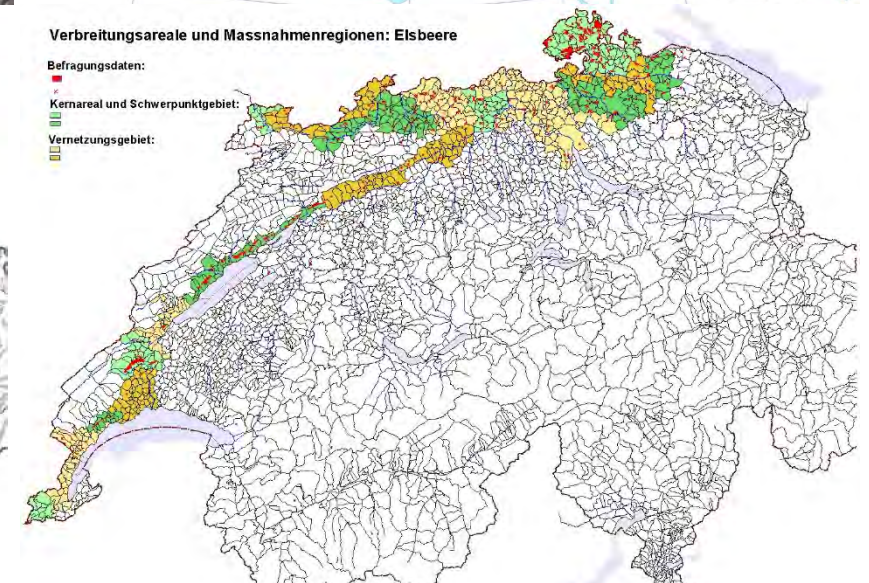
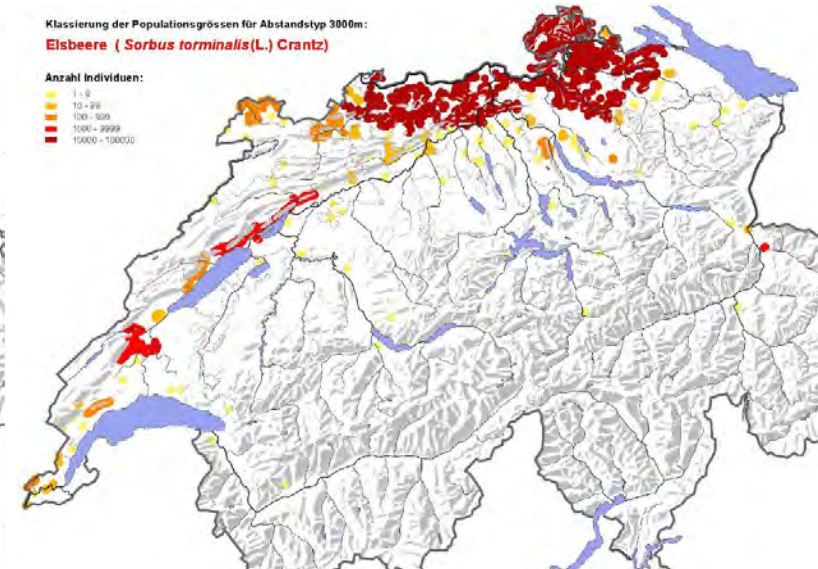
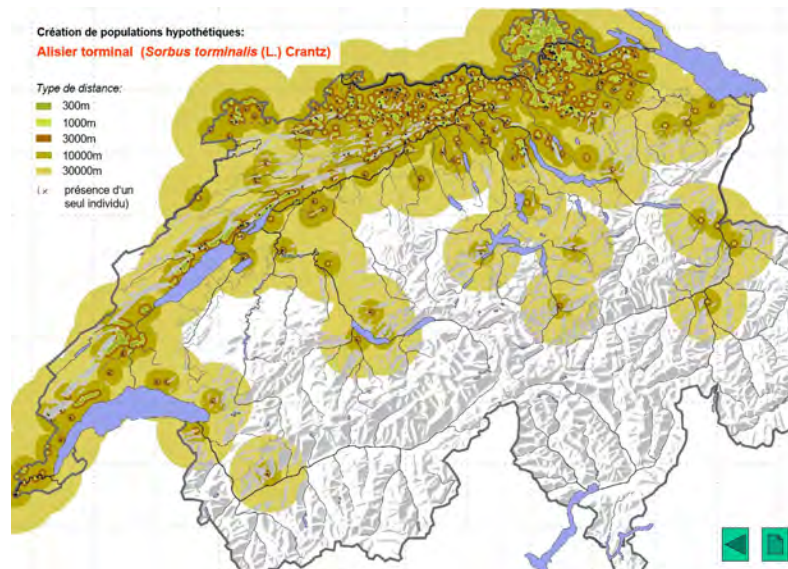
1 Evolution

Projekt Förderung seltener Baumarten – Bsp. *Sorbus torminalis*



Projekt Förderung seltener Baumarten (SEBA), ETHZ/BAFU
www.seba.ethz.ch

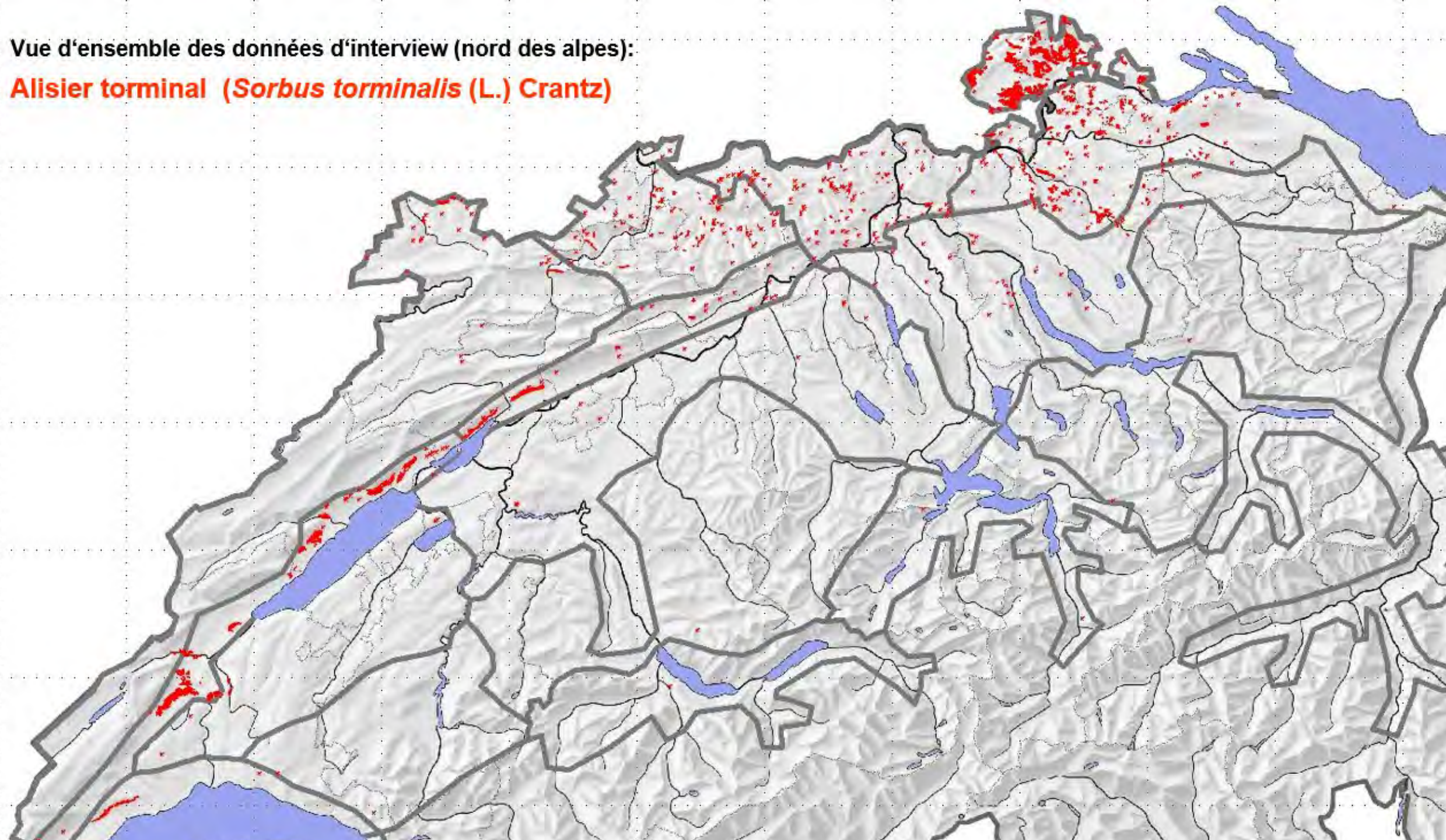
graph: Rudow & Klingenberg 2011



graph: Rudow & Schwab 2000

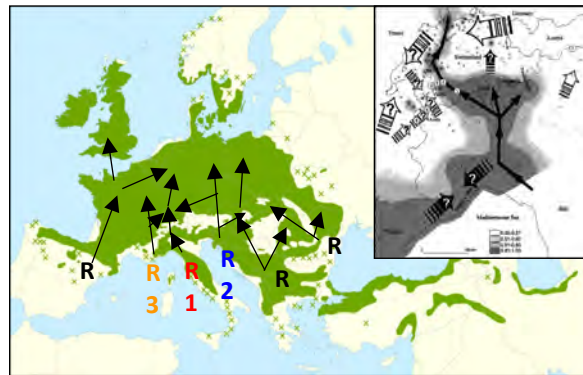
Vue d'ensemble des données d'interview (nord des alpes):

Alisier torminal (*Sorbus torminalis* (L.) Crantz)

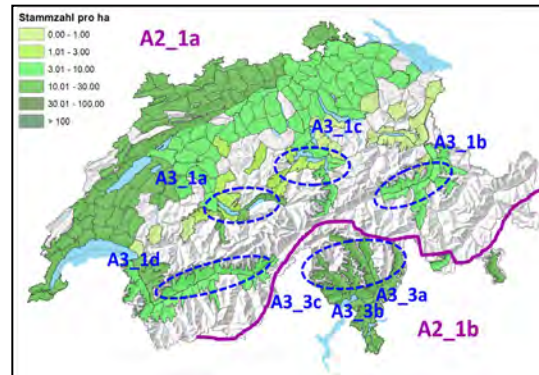


1 Evolution

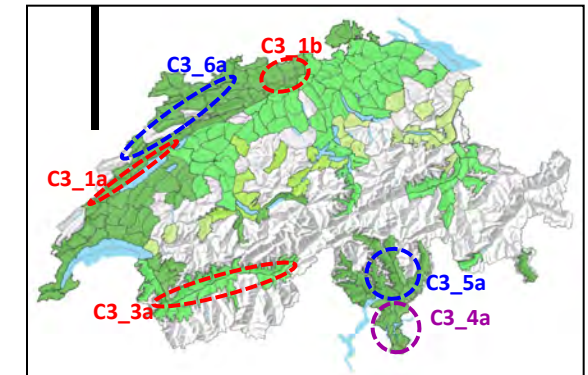
Projekt Generhaltungsgebiete Schweiz – Bsp. *Quercus petraea*



Mögliche Einwanderungslinien aufgrund von Paläobotanik und ggf. Genetik

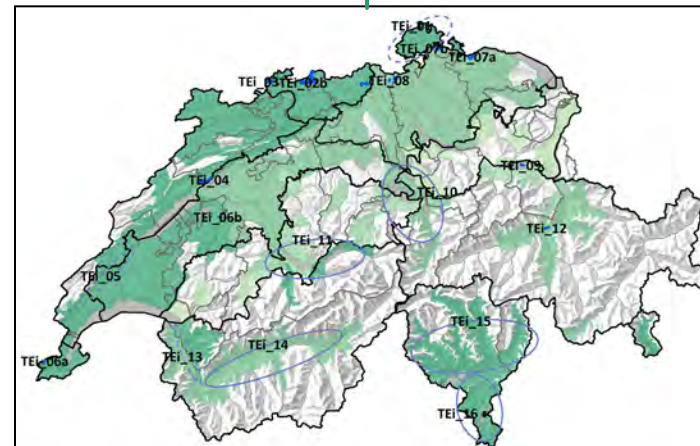


Mögliche wertvolle Randpopulationen aufgrund von Verbreitungsmuster/Fragmentierung



Mögliche genetische Differenzierung aufgrund spezieller Standortsbedingungen

Zielpopulationen	Kanton	TEi 07*	TG
TEi_01	SH	TEi_08	AG
TEi_02	AG	TEi_09	SG
TEi_02*	AG	TEi_10	LU/NW/UR/SZ
TEi_03	BL	TEi_11	BE
TEi_04	BE/NE	TEi_12	GR
TEi_05	VD	TEi_13	VD/VS
TEi_06	GE	TEi_14	VS
TEi_06*	FR	TEi_15	TI
TEi_07	TG	TEi_16	TI



Projekt Generhaltungsgebiete Schweiz (GCU), ETHZ/BAFU
www.genres.ethz.ch

□ Auftrag BAFU im Rahmen der Umsetzung der Strategie Biodiversität Schweiz

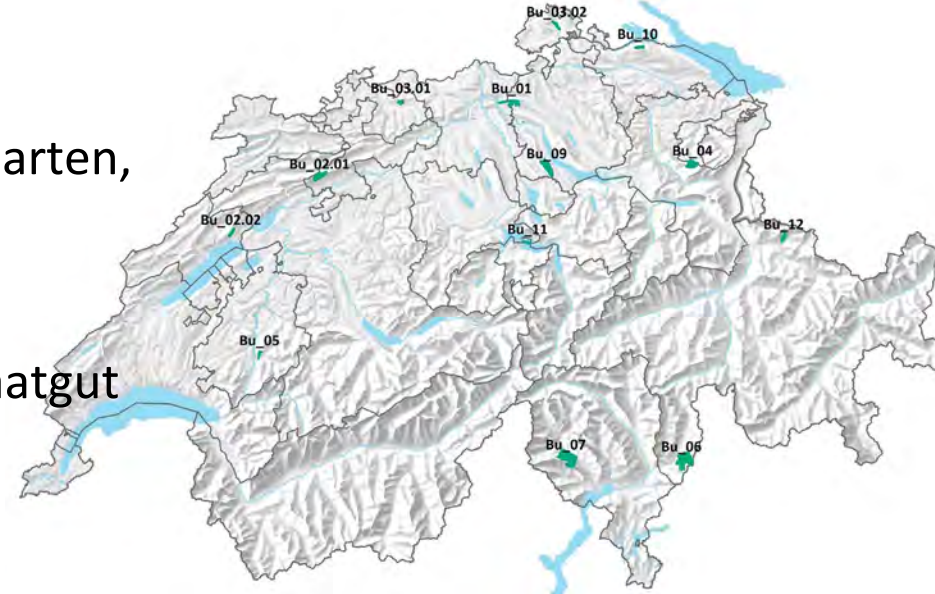
- Aktionsplan II Biodiversität (AP-SBS II) – Massnahme 1: Biodiverser und resilienter Wald

□ Ziele

- Dokumentation der genetischen Vielfalt von Nebenbaumarten, inkl. Anpassungspotenzial (Ganzgenomanalyse)
- Repräsentativität der artspezifischen GCU-Netzwerke
- Empfehlungen zur Gewinnung von genetisch diversem Saatgut

□ Baumarten

- 2 seltene und 2 weniger seltene Nebenbaumarten
Quercus pubescens, *Sorbus torminalis*, *Acer platanoides*, *Tilia cordata**/*platyphyllos*
- 1 Trockenheits-sensitive Hauptbaumart *Fagus sylvatica* + 1 Nebenbaumart für Genetik Saatgut*





2 Ökologie

Trockenstress bei Buche (Fagus sylvatica) und Traubeneiche (Quercus petraea), Twann BE

(Fehl-)Interpretation von Absterbeereignissen

□ Bäume sind Spezialisten mit sekundärem Dickenwachstum

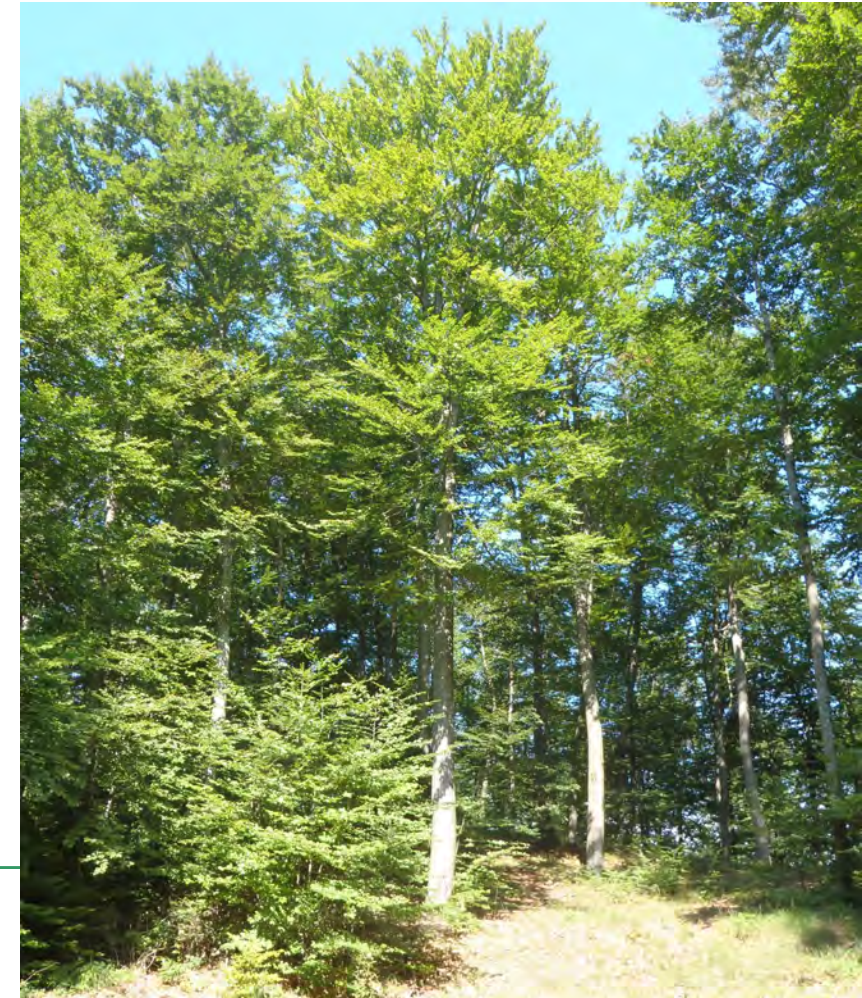
- sukzessive Stabilisierung der Sprossachse und Aufbau grosser langlebiger Körper (Baumhöhe + Anzahl Module)

>> Ausgesprochene Konkurrenzstrategen

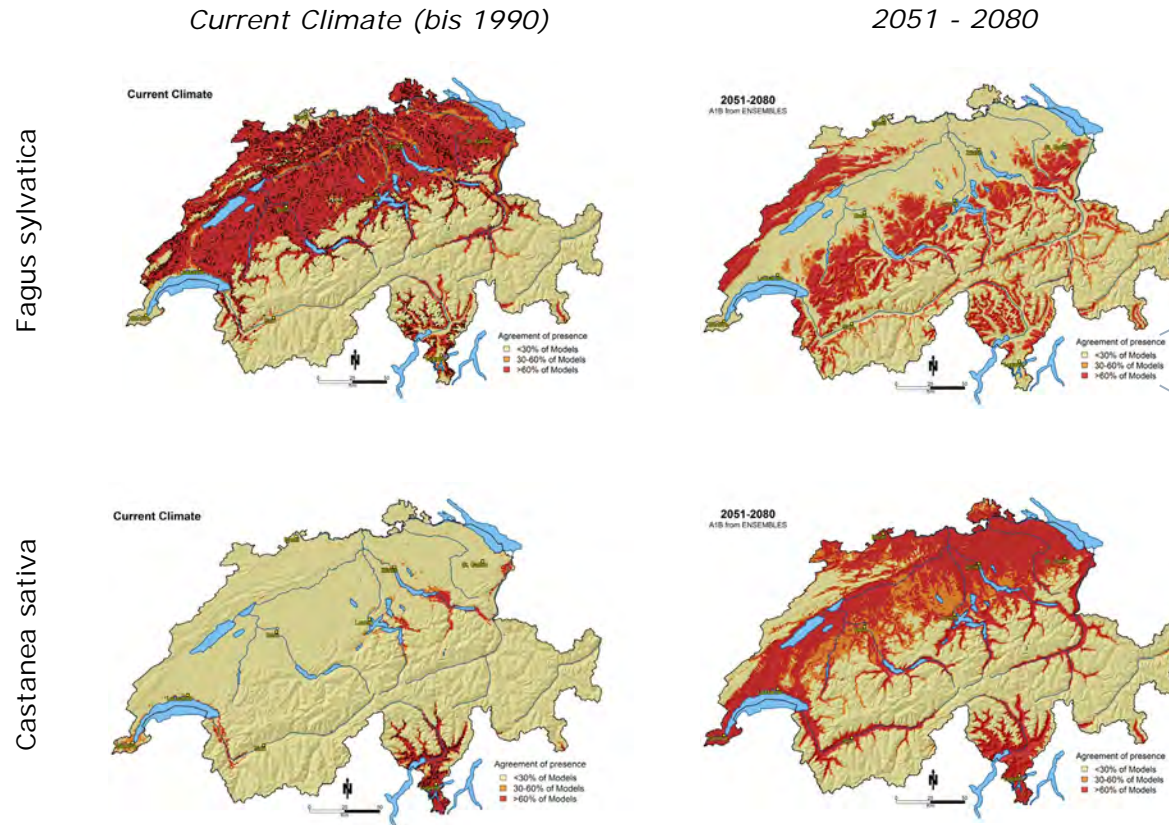
□ Phänotypische Plastizität im Lebensverlauf

- Sukzessive Reduktion des Reaktionsvermögens aufgrund immer anspruchsvollerer Versorgung (z.B. Wasserversorgung bei erreichter Oberhöhe)

>> Umweltstress wie Trockenheit betrifft primär alte, bzw. grosse Bäume – Altersschwäche überlagert Anpasstheit!
ggf. sind junge Bäume bestens angepasst



(Fehl-)Interpretation zukünftiger Realisation



□ Mittel aus Modellrechnungen (*ensemble technique*)
 >> vgl. Legende!

Agreement of presence

- <30% of Models
- 30-60% of Models
- >60% of Models

□ von aktueller Realisation wurde Potential und davon zukünftige Realisation abgeleitet!?

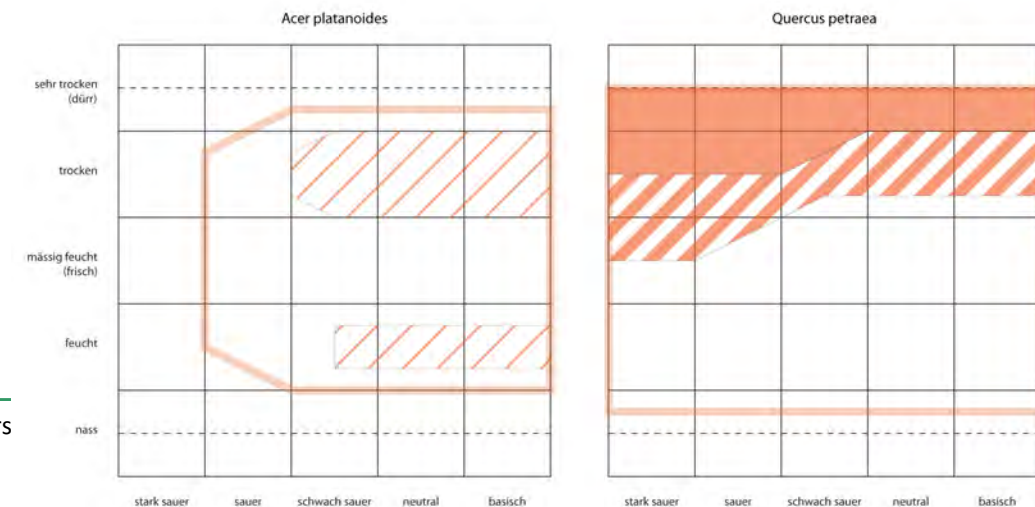
>> zwar bestmögliche Annäherung

>> aber nicht zuverlässig!

(Zimmermann et al 2016, PorTree project, www.wsl.ch/lud/portree)

Potential ≠ Realisation

- Potential = Toleranz gegenüber Umweltextremen (≠ Jahresmittel)
 - Wärmehaushalt: Kältetoleranz, Hitzetoleranz
 - Wasserhaushalt: Trockenheitstoleranz, Nässetoleranz, Überflutungstoleranz
 - Nährstoffhaushalt: Nährstoffarmutstoleranz, Basentoleranz etc.
- Potential = physiologische Fähigkeiten (fundamentale Nische)
>> Potential ≠ Realisation!
- Realisation
= Potential x Synökologie x Artgeschichte
(ökologische Nische)
>> vgl. unrealisierte Potentiale im Ökogramm!



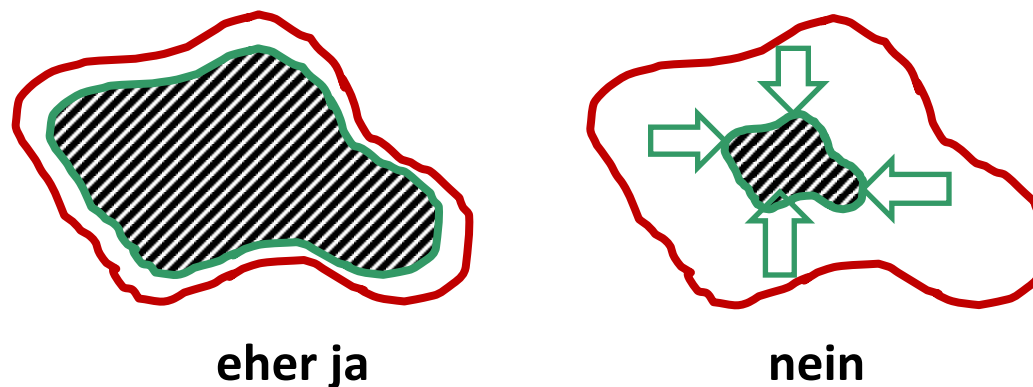
Potential ≠ Realisation



Kann von der **Realisation**
auf das **Potenzial**
geschlossen werden?

>> nur bedingt, abhängig von der
Repräsentativität der Realisation

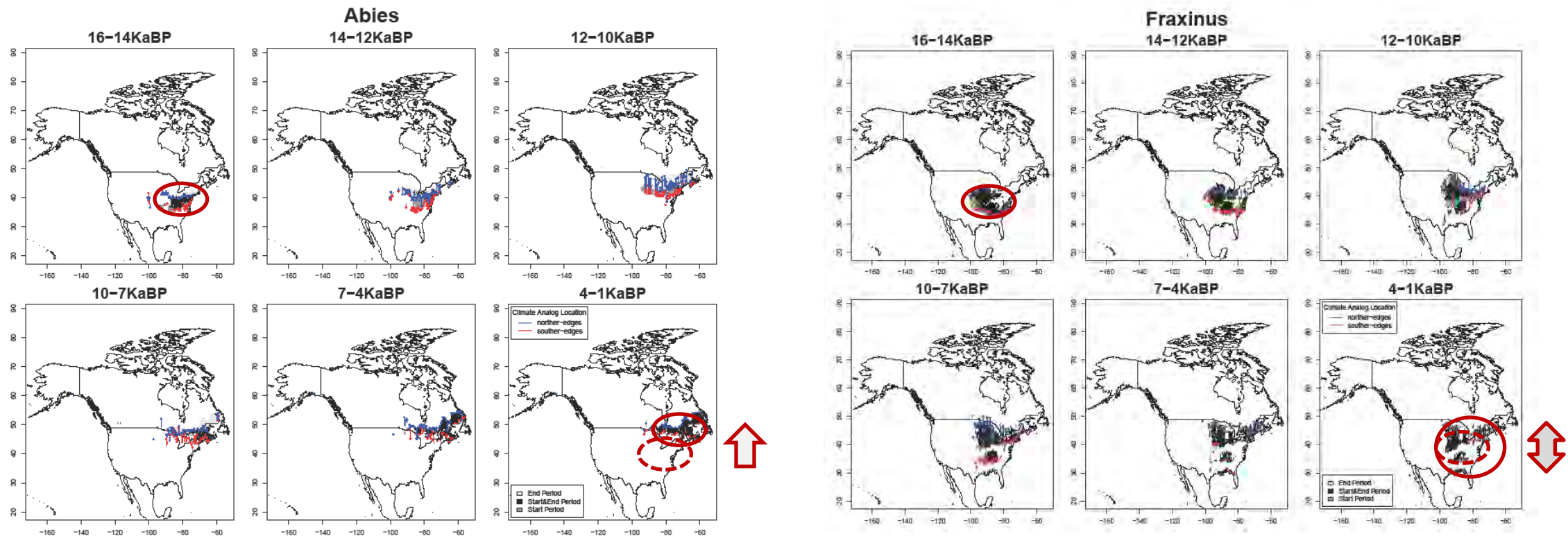
z.T. massive Einschränkung
der Realisation durch:



Synökologie
+
Species history
+
Anthropogene Einflüsse

Interpretation zukünftiger Realisation

- Postglaziale Migrationsbewegungen aufgrund von Pollendaten von 30 Gattungen in Nordamerika, 6 Zeitstände, Beispiel *Abies* und *Fraxinus*



(Ordóñez et al 2013)



Ausblick Dendrologie Wissensgrundlagen – neue Portraits

The collage features several dendrology cards, each providing a comprehensive profile of a tree species. Key cards include:

- Abies alba:** Details on its distribution, morphology, and ecological requirements.
- Pinus cembra:** Information on its range and characteristics.
- Quercus cerris:** Data on its growth and habitat preferences.
- Weisstanne (Abies alba):** Focuses on its vertical distribution and specific ecological traits.
- Feldahorn (Acer campestre):** Describes its life form and root system strategy.
- Waldföhre (Pinus sylvestris):** Provides details on its pollen dispersal and seed dispersal.
- Spitzahorn (Acer platanoides):** Includes information on its growth and ecological characteristics.

Each card typically includes a distribution map, a photograph of the tree, and a table of ecological parameters such as shade tolerance, cold tolerance, and drought tolerance. Some cards also feature growth curves and detailed descriptions of their life forms and strategies.

-> www.dendro.ethz.ch

(Rudow 2024, www.dendro.ethz.ch)

(Rudow et al 2024, www.dendro.ethz.ch, www.gebirgswald.ch)

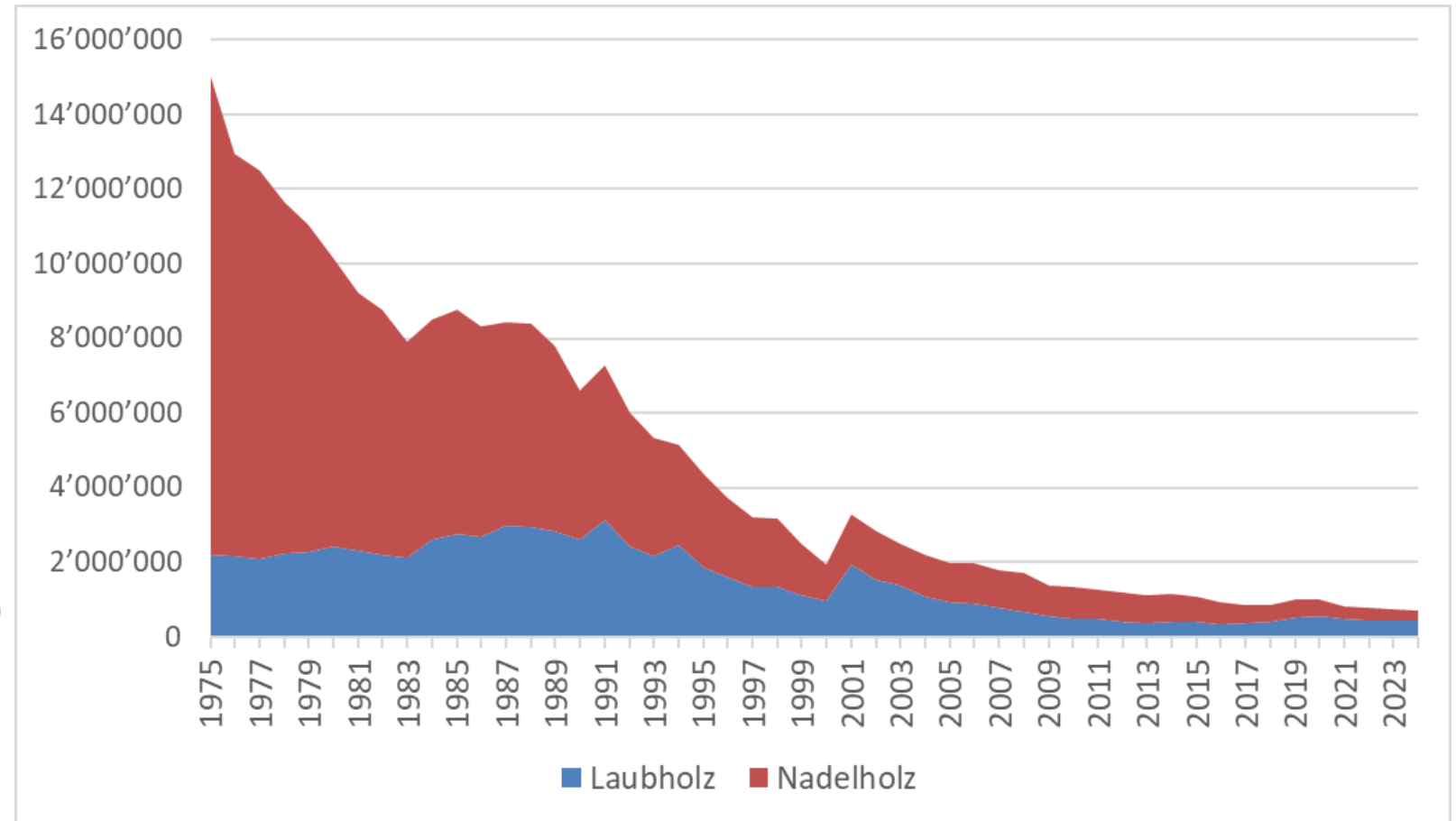
3 Forstliche Praxis

Blühende Blumenesche (Fraxinus ornus), San Salvatore, Lugano TI



Forstliches Vermehrungsgut – Bedarf an Pflanzmaterial

- Wiederaufforstung (1850-1920)
- Waldverjüngung (heute)
 - grossmehrheitlich Naturverjüngung
 - punktuell, ergänzend Pflanzung/Kultur
- Pflanzenmaterial
 - Kernwüchse (aus Samen)
 - Ballen/Container



Bundesamt für Statistik 2025

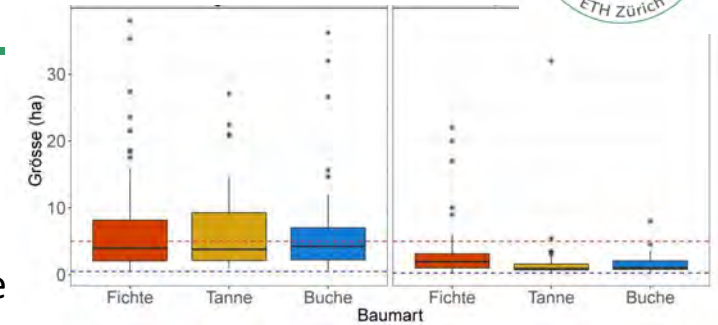
Forstliches Vermehrungsgut

- Nationaler Samenerntekataster (NKS)
 - Hauptbaumarten: viele meist kleine Samenerntebestände
 - Nebenbaumarten: wenige (oder keine) meist sehr kleine Samenerntebestände

- Herkunft = Provenienz = (lokaler bis regionaler) Ursprungsort von Saatgut/Pflanzenmaterial
 - bisher kleinskalige Einteilung (lokal + enges Höhenband +/- 200 m ü.M.)
 - Trend zu grösserskaliger Einteilung (von «local is best» zu «regional is best»)

- “Samenerntekomplexe”
 - aggregierte Samenerntebestände innerhalb regionaler Samenerntezonen

- “Samenerntezonen”
 - z.B. 14 CH Forstregionen (pauschal), teils zu verfeinern (12 VS, 13 GR, 14 VS ...)
 - Entspricht etwa dem Konzept hypothetischer Zielpopulationen des Projektes Generhaltungsgebiete Schweiz (10-20 Zonen/Art)



Abies alba



Genetische Aspekte der Samenernte

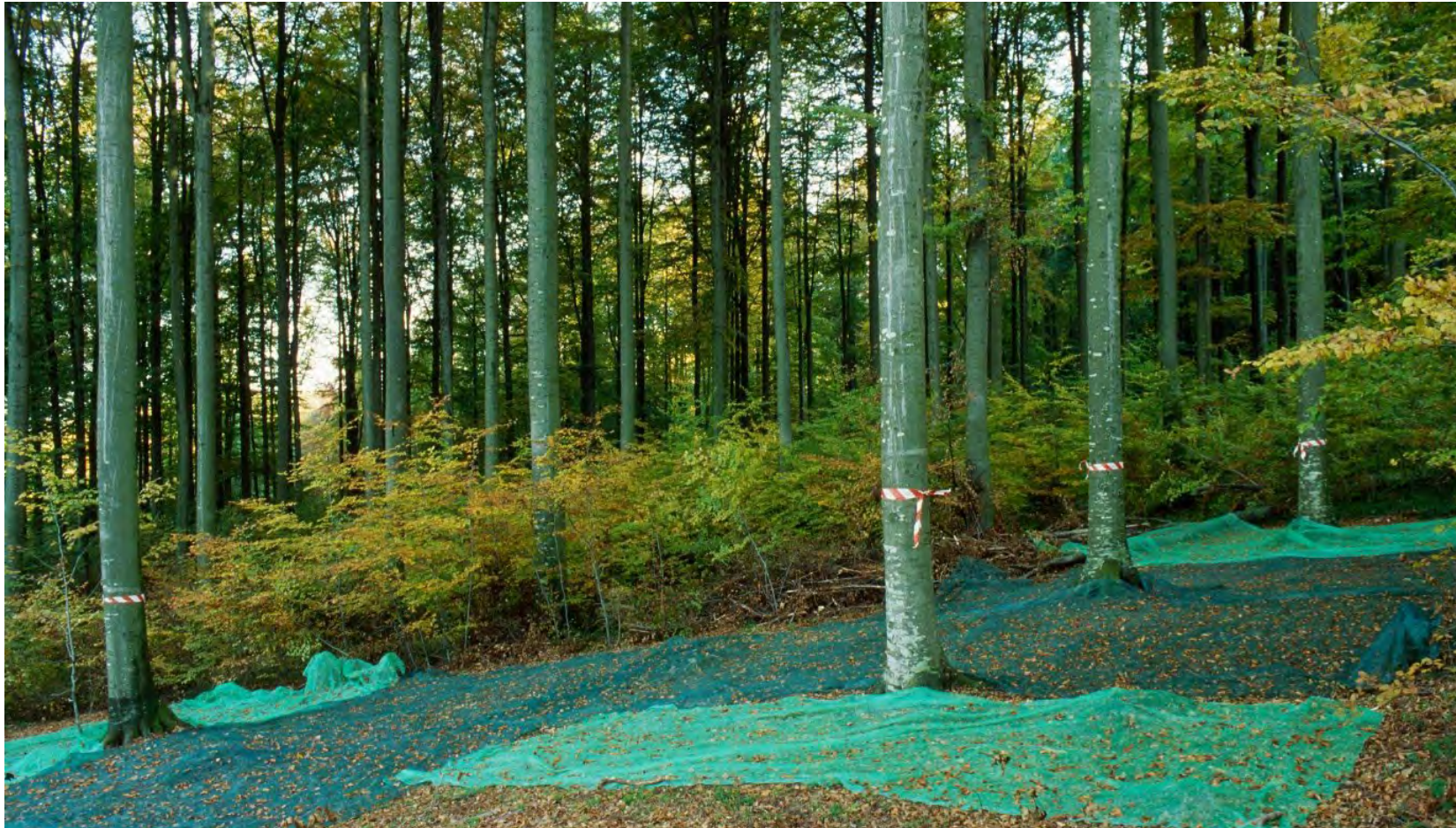
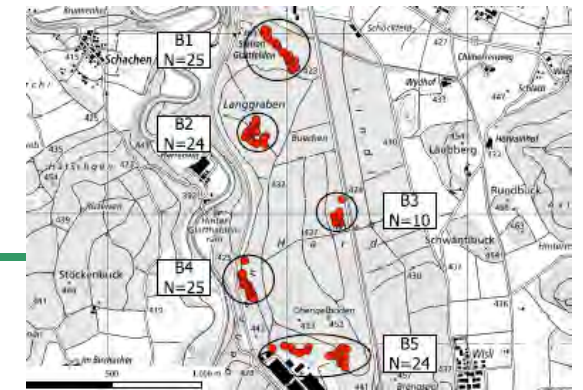


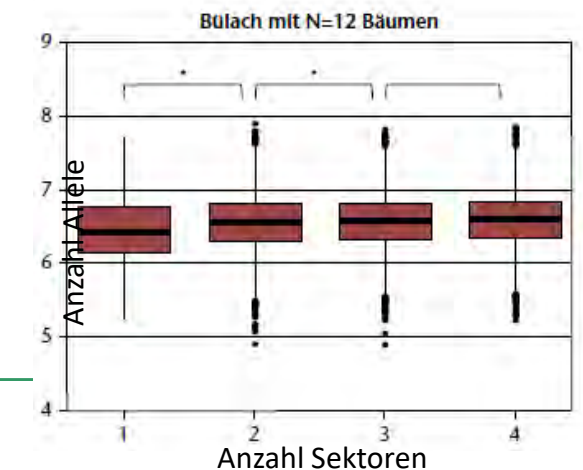
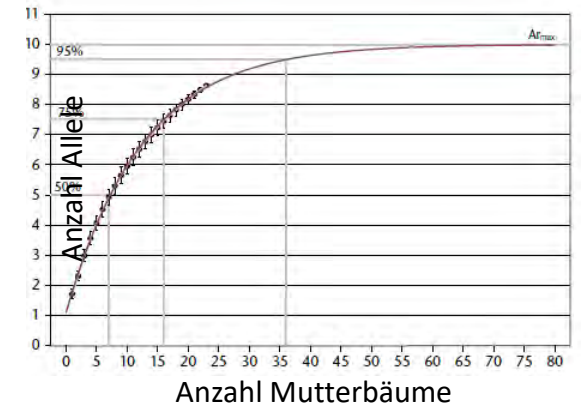
Foto: A. Burkart, WSL

Genetische Aspekte der Samenernte (SeedOpt)

- Beprobung von *Q. petraea*-“Samenerntekomplex“ in Bülach
 - 5 separate Sektoren, 10-25 Mutterbäume pro Sektor beprobt
 - zusätzlich von 14 Mutterbäumen je 200 Eicheln beprobt
- Genetische Analyse mit simuliertem Resampling
 - für 216 Mutterbäume und 1037 Eicheln
- Ergebnisse
 - 100 Samen pro Mutterbaum decken dessen genetische Diversität weitgehend ab
 - 36 beerntete Mutterbäume decken 95% der gesamten genetischen Diversität ab
 - dabei ist Verteilung der Mutterbäume auf Sektoren unbedeutend
 - dabei senkt Beerntung von Halbgeschwistern die gen. Diversität nur um ca. 10%



Probensamplingsdesign



Einheimische Baumarten vs. Forstliche Exoten

- Systematisches Testen von Arten und Provenienzen
 - 1920-1990 v.a. auf Wachstum ausgerichtet (Provenienzversuche, *provenance trial*)
 - 1990- heute v.a. auf Vitalität/Angewandtheit ausgerichtet (Testpflanzungen, *common garden exp.*)



S. Aitken, Univ. BC

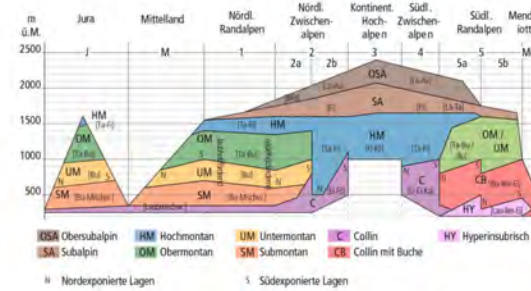


Einheimische Baumarten vs. Forstliche Exoten

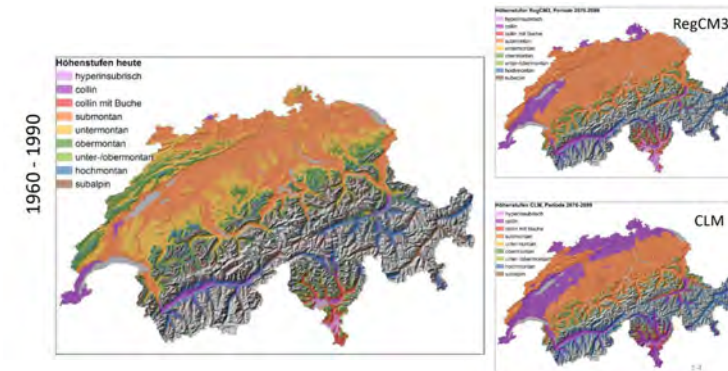
- “Assisted migration” aufgrund der Antizipierung von Klimaerwärmung
 - Assisted geneflow = Verschiebung von Provenienzen innerhalb des Verbreitungsgebiets der Art
 - Assisted translocation = Verschiebung von Arten über ihr Verbreitungsgebiet (Forstliche Exoten)
 - Geringe Distanz: zwischen Nachbarländern (z.B. *Pinus nigra*), über Höhenstufen (z.B. *Larix decidua* im Mittelland)
 - Grosse Distanz: > 1000 km (z.B. *Cedrus atlantica*), über Kontinente (z.B. *Cryptomeria japonica*, *Pinus strobus*)
- Faustregel O’Neill aus US-Provenienzversuchen (Verschiebung von Provenienzen)
 - bei Antizipierung von Umweltveränderungen >20 J. überwiegen negative Effekte
z.B. ungenügende Kältetoleranz, Abwehr von Pathogenen oder Fehlende Mykorrhiza (Synökologie)
- Baumartenwahl mit langfristiger Risikoabwägung – Vorschlag künftige forstliche Praxis
 1. Primärer Fokus auf 49 einheimische Baumarten
 2. «nahe» Exoten bestandesweise/flächig, systematisches Testen (z.B. submediterrane *Quercus spec*)
 3. «ferne» Exoten nicht grossflächig, idealerweise nur beigemischt (auch *Pseudotsuga menziesii*)

Ausblick aktueller Praxisstandard TreeApp

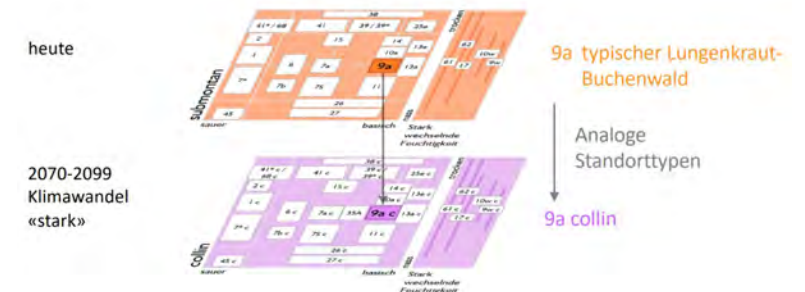
□ NaiS-Höhenstufen-Modell



□ Höhenstufenveränderung aufgrund von Klimamodellen



□ Verschiebung zu analogen Standorttypen der tieferen Stufe



>> Baumartenempfehlungen für erwartete zukünftige Standorttypen

A large, gnarled pine tree with a thick, twisted trunk and dense green needles stands prominently in the foreground. The tree's branches spread out across the frame, some reaching towards the right. The background features a vast, hilly landscape with rolling green mountains and valleys. The sky is bright and clear. The overall scene is a natural, scenic view of a mountainous region.

4 Folgerungen

Trockenstandort mit Waldföhre, Traubeneiche, Mehlbeere und Buche, Oberbuchsiten SO



Baumartenwahl unter Klimawandel

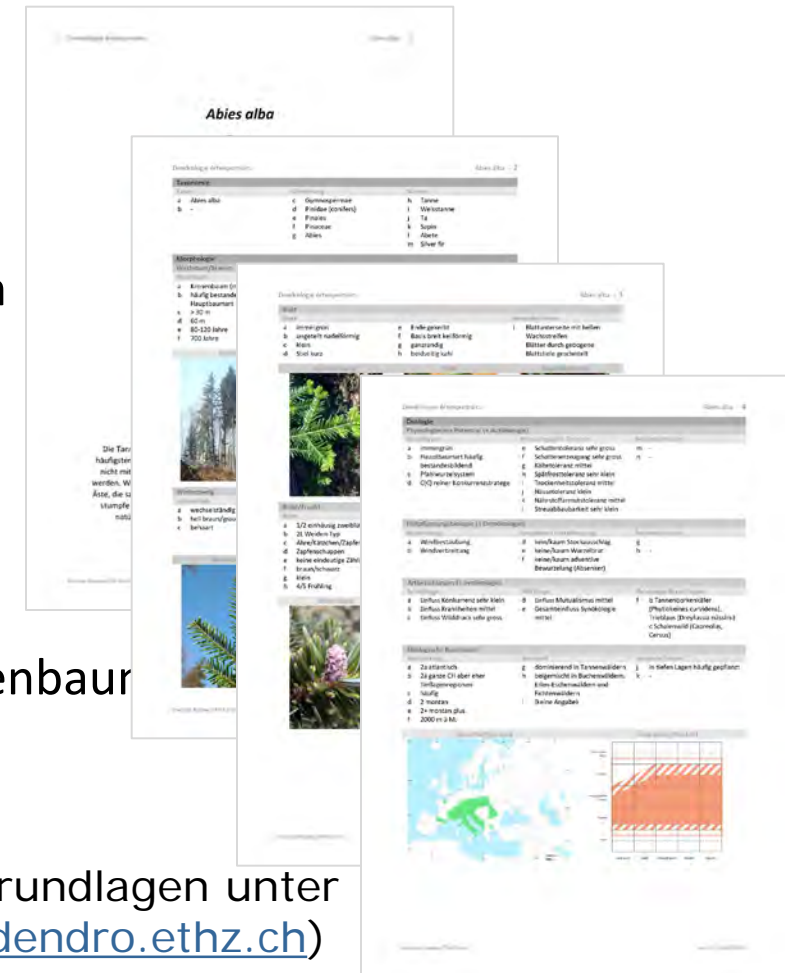
- «gute Art, schlechte Art» greift zu kurz
 - > Potentiale unserer Arten sind sehr gross (grosse fundamentale Nischen), d.h. vieles ist möglich
 - > bei der Interpretation von Absterbeereignissen das Alter der Individuen berücksichtigen
 - > Modellierung zukünftiger Verbreitung nicht als Fakt sondern als Annahme/«best guess» verstehen

- Erhöhung der Optionen und Reduktion der Risiken
 1. Primärer Fokus auf 49 einheimische Baumarten
 2. «nahe» Exoten bestandesweise/flächig, systematisches Testen (z.B. submediterrane *Quercus spec*)
 3. «ferne» Exoten nicht grossflächig, idealerweise nur beigemischt (auch *Pseudotsuga menziesii*)
 - > Wegen erhöhter (Alters-)Mortalität, einstellen auf Reduktion der Umtriebszeit
 - > Stützpunktvorkommen begründen für Samenangebot/Naturverjüngung in der Folgegeneration
 - > Angebot Forstliches Vermehrungsgut aller Arten und Provenienzen ist zentrale Voraussetzung

- Systematisches Beobachten und Erfassen für weiteren Erkenntnisgewinn
 - > Dokumentation der Pflanzungen und Naturverjüngungen von Zielbaumarten (DokuTool u.a.)

Vielseitige einheimische Gehölzartenvielfalt

- Einheimische Artenpalette berücksichtigen
 - 49 einheimische Baumarten
 - >200 einheimische Straucharten
- darunter etliche wertvolle, starkwüchsige Nebenbaumarten
 - *Tilia cordata*, *Tilia platyphyllos*, *Acer platanoides*
 - *Ulmus glabra*, *Ulmus minor*, *Ulmus laevis*
 - *Prunus avium*, *Juglans regia*, *Castanea sativa*
 - Feuchtstandorte *Alnus glutinosa*, *Salix alba*, *Populus nigra*, *P. alba*
 - Pioniere *Betula pendula*, *Populus tremula*, *Salix caprea* u.a.m.
- und viele attraktive, sehr wertvolle, schwachwüchsige Nebenbaumarten
 - Wildobst s.str. *Malus sylvestris*, *Pyrus pyraster*
 - *Sorbus aria*, *S. torminalis*, *S. domestica*, *S. aucuparia*
 - *Acer campestre*, *Acer opalus*, *A. monspessulanum*
 - *Fraxinus ornus*, *Ostrya carpinifolia* u.a.m.



vgl. Grundlagen unter www.dendro.ethz.ch)

A high-angle photograph of a mountain valley. In the foreground, a small, clear lake is surrounded by a dense forest of evergreen trees. The middle ground shows a steep, rocky slope covered in green vegetation and scattered rocks. In the background, more rugged mountain peaks are visible under a clear blue sky. The overall scene is bright and vibrant, suggesting a sunny day in a high-altitude environment.

**Danke
für Ihre Aufmerksamkeit**

Nordalpen-Arvenwald auf Bergsturzmaterial, mit Arve (Pinus cembra), Murg SG

Quellen

Frank, A., Brang, P., Sperisen C., Heiri C., 2017: Schlussbericht des Pilotprojektes Umgang mit forstlichem Vermehrungsgut in einem sich ändernden Klima (FoVeKlim) im Forschungsprogramm Wald und Klimawandel. Birmensdorf, WSL; Bern, BAFU; 112 S.

Haldemann, C., Rudow, A., Bonfils, P., De Boni, A., Reiss, G., Streit, K., Studhalter, S., Rellstab, C., 2024: Einfluss der Erntestrategie auf die genetische Vielfalt des Saatguts bei Eichen. Schweiz. Zeitschrift für Forstwesen 175/3: 116–123.

Ordonez, A., Williams, J.W., 2013: Climatic and biotic velocities for woody taxa distributions over the last 16 000 years in eastern North America. Ecology Letters 16: 773-781.

Petit, R.J., Hampe, A. 2006: Some Evolutionary Consequences of Being a Tree. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics 37: 187-214.

Rudow, A., Muheim, L., 2022: Generhaltungsgebiete Schweiz (ETHZ/BAFU). Grundlagen zu Baumarten, Quercus petraea. Zürich, ETH. www.genres.ethz.ch.

Rudow, A., 2024: Dendrologie Artenportraits. Morphologische und ökologische Eigenschaften der Baumarten Mitteleuropas. Gruppe Dendrologie und Vegetationskunde, Professur für Waldökologie, ETH Zürich. 197 S. www.dendro.ethz.ch



**Unsere Baumarten und Wälder
unter Klimawandel –
Versuch einer Synthese**

Fragen?