

Forstliche Genressourcen und Anpassung an den Klimawandel. Wissensstand und Handlungsbedarf

Bericht 2018 im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt
(EUFORGEN Basismandat)

Report

Author(s):

Rudow, Andreas

Publication date:

2018-08-08

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000313262>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

Forstliche Genressourcen und Anpassung an den Klimawandel

Wissensstand und Handlungsbedarf



Artspezifische Auswirkungen von Trockenstress in Buchenmischwald, August 2003, Baden AG

Bericht 2018

im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt
(EUFORGEN Basismandat)

Andreas Rudow

ETH Zürich, Terrestrische Ökosysteme, Universitätsstrasse 16, CHN G 75.2, 8092 Zürich
044 632 32 13, andreas.rudow@env.ethz.ch

Inhalt

Inhalt	2
Vorwort und Dank	2
1 Einleitung	3
2 Biologische Grundlagen	4
3 Anpassungsdruck	7
4 Anpassungsreaktion	10
5 Umgang mit Komplexität und Ungewissheit	14
6 Priorisierung und Handlungsbedarf	16
7 Schlussfolgerung	19
8 Quellen	21
Annex 1 – Priorisierung von Arten	25

Vorwort und Dank

Seit meiner Diplomarbeit zum populationsbiologisch äusserst interessanten hybridogenen Kleinarten-Aggregat von *Sorbus x latifolia*, und dem Abschluss des Studiums der Forstwissenschaften an ETH Zürich 1994 durfte ich mich in umsetzungsorientierten Forschungsprojekten weiter intensiv mit diversen Aspekten der Erhaltung und Förderung unserer Forstlichen Genressourcen und der Populationsbiologie und der Ökologie unserer Gehölzarten beschäftigen (Gattung *Salix*, *Castanea*-Sorten, Förderung seltener Baumarten/11 Arten, *Castanea*-Selvenrestauration/Sortenerhalt, Lehre in Dendrologie, Generhaltungsgebiete/14 Arten, paneuropäische Erhaltungsstrategien EUFORGEN/EUFGIS).

Die im Folgenden zusammenfassend dargelegten Wissenskonzepte und ihre Interpretation sind über all diese Jahre kontinuierlich gewachsen und gereift. Auch wenn einige Aspekte nicht den Mainstream der heutigen Forschungsfront abbilden und daraus obendrein ein fundamentaler Paradigmenwechsel gefolgert wird, erachte ich die vorliegende Synopsis aus grosser Flughöhe durchaus als stimmig und folgerichtig. Ich hoffe auf eine wohlwollende Prüfung des Berichts und der gemachten Vorschläge und auf entschlossene zukunftsweisende Schritte seitens der zuständigen Bundesbehörde.

Für das auf dem gesamten Weg und in allen Projekten entgegen gebrachte Vertrauen, die Unterstützung und die kritische Auseinandersetzung danke ich meinen Kollegen seitens der Auftraggeberin BAFU, Rolf Manser, Markus Bolliger, Silvio Schmid, Christian Küchli und Claudio de Sassi wie auch meinen Kollegen und Vorgesetzten an der ETHZ, Peter Rotach, Ottmar Holdenrieder und Harald Bugmann, ebenso wie den vielen weiteren involvierten Projektpartnern, Mitarbeitern und Freunden, die über die Jahre in unterschiedlichster Form am gesamten Prozess mitgewirkt haben.

Auf gutes Gelingen, Andreas Rudow

1 Einleitung

Hintergrund

Baumarten sind als Gerüstarten unserer Waldökosysteme von grosser Bedeutung. Sie bilden die Grundlage der Waldbiodiversitäts-Pyramide sowie der nachhaltigen Sicherung von Waldleistungen.

Die gesamte genetische Vielfalt der Waldbaumarten, also deren Artenvielfalt sowie ihre intraspezifische genetische Variation, wird als Forstliche Genressourcen bezeichnet. Waldbaumarten sind Wildarten, d.h. sie verfügen über natürliche Selbsterhaltungsmechanismen, die auf genetischer Variation und Anpassungsfähigkeit beruhen, um in einer sich ständig verändernden Umwelt bestehen zu können.

Durch Umwälzungen in Gesellschaft und Umwelt, welche durch unterschiedliche sich gegenseitig beeinflussende Faktoren angetrieben werden, wird aktuell der globale Wandel stark beschleunigt. Klimawandel ist ein zentraler Faktor des globalen Wandels. Aktuelle Prognosen lassen eine rasante Klimaerwärmung erwarten, die insbesondere die Baumarten mit ihren langen Lebenszyklen vor grosse Herausforderungen stellt.

Problemstellung

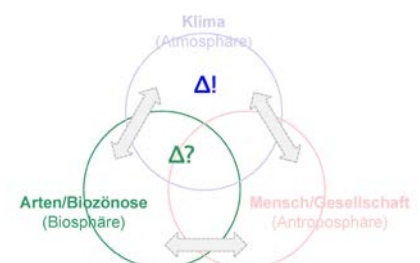
Dies führt zur generellen Frage, ob und wie unsere Baumarten und letztlich unsere Wälder den Klimawandel meistern können. Diese schlichte Frage umschliesst ein Wirkungsgefüge von höchster Komplexität. Im weiteren Sinn umfasst sie die drei systemischen Ebenen Atmosphäre (Klimawandel), Biosphäre (Anpassungspotential) und Antroposphäre (Wirkung auf Atmosphäre und Biosphäre). Alle Ebenen sind Gegenstand umfangreicher und vielfältiger aktueller Forschung auf internationaler wie auch auf nationaler Ebene. Im nationalen Forschungsprogramm Wald und Klimawandel (WSL/BAFU) konnten diverse Aspekte auf die Schweiz zugeschnitten bearbeitet und in einer gesamthaften Synthese integriert werden (Plüss et al. 2016). Neben neuen Erkenntnissen zu einzelnen Aspekten und Arten zeigen die Ergebnisse erhebliche verbleibende Unbekannte und damit einhergehende Ungewissheit auf.

Es zeigt sich, dass sich viele relevante Prozesse sowohl räumlich als auch zeitlich in sehr grossen Skalenbereichen abspielen (*long term large scale complexity*), wodurch ihre Wahrnehmung und Erforschung stark erschwert werden. Zudem wird Ungewissheit im Gesamtsystem kumuliert. Damit bleibt jedes noch so vollständige Kompendium des Wissens bruchstückhaft um bezüglich der Problemstellung verlässliche Handlungsoptionen vorzuschlagen. Andere hoch komplexe Forschungsfelder konnten in der Regel mit der Entwicklung eines entsprechenden Instrumentariums, einer Art Brille wie Teleskop oder Mikroskop erschlossen und letztlich gedanklich gefasst und gemeistert werden. Auch die vorliegende Problemstellung dürfte letztlich eine solche neue Sicht aufs Wirkungsgefüge erfordern.

Methodischer Ansatz

Auch wenn unser Wissensstand die immense Komplexität keiner der drei systemischen Ebenen ausreichend durchdringt, ist es nicht so, dass wir nichts wissen. Die Forschung zeigt durchaus ein Bild, das die Folgerung von plausiblen oder zumindest bestmöglich plausibilisierten Handlungsoptionen zulässt. Aus der Erkenntnistheorie ist bekannt, wie Entscheidungen unter Ungewissheit dazu beitragen können, Komplexität kontinuierlich zu verringern. Die aktuelle SZF-Nummer 4/2018 ist diesem Thema gewidmet und zeigt eine gewisse Tradition im Waldbereich mit *best guess* oder *best practice* Ansätzen - eine Art kontinuierliche Hypthesenerkundung/-prüfung. Dabei bildet Forschungsbedarf einen Teil des Handlungsbedarf ab, kann aber nicht losgelöst davon betrachtet werden.

Im Folgenden wird eine umfassende Übersicht aus grosser Flughöhe über den Wissensstand bezüglich der Anpassung Forstlicher Genressourcen an den Klimawandel gegeben. Der inhaltliche Fokus liegt auf dem biologischen System (Biosphäre) und den Fragen, wie sich Baumarten an bestimmte prognostizierte Klimaveränderungen anpassen, wie wir Wissen darüber erlangen können und was dafür zu tun ist. Der methodische Fokus liegt dabei ganz auf der Extraktion der Quintessenz, d.h. der relevanten Zusammenhänge für die Folgerung von Leitlinien einer zweckmässigen Ausrichtung von Politik, Praxis und Forschung.



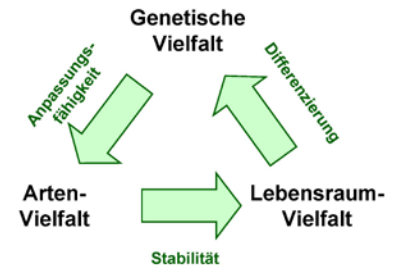
2 Biologische Grundlagen

Allgemeines

Biodiversität ist ein komplexes Phänomen, bei dem unterschiedliche biologische und ökologische Prozesse zusammen spielen. Allgemein gebräuchlich ist das 3-Ebenen-Modell der Biodiversität (Abb XY). Es zeigt, dass Biodiversität auf ganz unterschiedlichen Skalenbereichen der Biosphäre angelegt ist, sowie die Notwendigkeit einer entsprechend differenzierten Betrachtung.

Hinter dem vereinfachenden 3-Ebenen-Modell stehen entsprechende Erkenntnisse und Konzepte der Biologie:

- Vielfalt auf Ebene der Gene betrifft die Summe der genetisch codierten Verhaltensmöglichkeiten von Individuen in der Gesamtpopulation einer Art (intraspezifisch, physiologisches Potential). Sie bestimmt damit die Anpassungsfähigkeit und letztlich die Artenvielfalt massgeblich.
- Vielfalt auf Ebene der Arten betrifft die Summe von Arten mit deren kumulierten Verhaltensmöglichkeiten und Auswirkungen auf die Nutzungsmöglichkeiten durch den Menschen (Bedeutung, Wert) und die Struktur von Lebensräumen. Sie bestimmt damit die Stabilität von Lebensräumen und letztlich die Lebensraumvielfalt massgeblich.
- Vielfalt auf Ebene der Lebensräume, betrifft die in Lebensräumen und ihren Lebensgemeinschaften (Biotope und Biozöosen) kumulierten und den ökologischen Potentialen der Arten entsprechenden Nischenangebote. Sie bestimmt damit die Differenzierungsmöglichkeiten und letztlich die Genetische Vielfalt massgeblich.



Die Biologie vermag wesentliche Zusammenhänge der belebten Welt zu erklären. Insbesondere ihr evolutionsbiologischer Hintergrund ist von grundlegender Bedeutung für die Ausrichtung einer Strategie zur Sicherung Forstlicher Genressourcen, ebenso wie zur Erhaltung der Biodiversität im Allgemeinen.

Evolution

Die Evolutionstheorie stellt eine fundamentale Errungenschaft im Verständnis der belebten Welt dar. Sie gründet auf der Beobachtung evolutiver Prozesse (Darwin 1859). Diverse Aspekte der Evolutionstheorie wurden – und werden teils bis heute – kontrovers diskutiert und die Theorie gesamthaft zur Synthetischen Evolutionstheorie weiter entwickelt (z.B. Reznik et al 2009). Damit einher ging die Entdeckung wesentlicher biologischer Phänomene, z.B. der Gesetzmässigkeiten der Vererbung (Mendel 1866), der Chromosomentheorie der Vererbung (Sutton 1903), des biologischen Artbegriffs (Mayr 1942), der DNA als Trägerin genetischer Information (Watson & Crick 1953), der Nischentheorie (Hutchinson 1957), des Inselbiogeographie-Modells (MacArthur & Wilson 1967) etc.. Ausserdem beeinflusste die Evolutionstheorie Entdeckungen in anderen wissenschaftlichen Disziplinen mit globaler Perspektive, z.B. der Plattentektonik (Wegener 1915).

Im Zentrum der Evolutionstheorie steht die Entstehung von Arten (*speciation*), als eine kontinuierliche durch Selektion angetriebene Differenzierung von Populationen in unterschiedliche ökologische Nischen (*divergence*, *adaptive radiation*). Wir kennen entsprechende, die stammesgeschichtliche Entwicklung wiedergebenden Grafiken phylogenetischer „Stammbäume“ (*phylogenetics*, Übersicht *Plantae* z.B. Judd et al 2008). Die kontinuierliche Aufspaltung von Populationen zeigt, dass Arten als statische ökologische Potentiale auf Zeit nicht bestehen können. Erst über kontinuierliche Artbildung hat das Leben Wege aus einer fernen Vergangenheit in die Gegenwart gefunden. Alle unsere heutigen Arten lassen sich als sich über unzählige Generationenfolgen differenzierende dynamische „Organismen“ verstehen. Natürlich gab es auf diesem Weg aus der Vergangenheit in die Gegenwart ein Vielfaches an unterbrochenen Differenzierungssträngen, d.h. aussterbende Arten. Diese sind nicht Gegenstand der heutigen Biodiversität. Die heutige Artenvielfalt und genetische Vielfalt stellt die Summe aller ununterbrochenen Differenzierungsstränge dar, den aktuellen Stand von allem ununterbrochenen Leben. Der stete Wandel der Arten ist dabei die Regel.

Offenbar verfügen Arten über effektive Selbsterhaltungsmechanismen. Einerseits sind diese in der fortlaufenden Erzeugung von genetischer Diversität begründet, die den Verlust von genetischer Diversität

durch aussterbende Arten zu kompensieren vermag (s.u. Biodiversitätsmotor). Andererseits haben Arten Strategien entwickelt, die dezentral auf die Individuen der Gesamtpopulation verteilte Summe der genetisch codierten Verhaltensmöglichkeiten (ökologisches Potential) über eine genetische Vernetzung der Gesamtpopulation bestmöglich verfügbar zu halten (s.u. Metapopulationsdynamik).

Biodiversitätsmotor

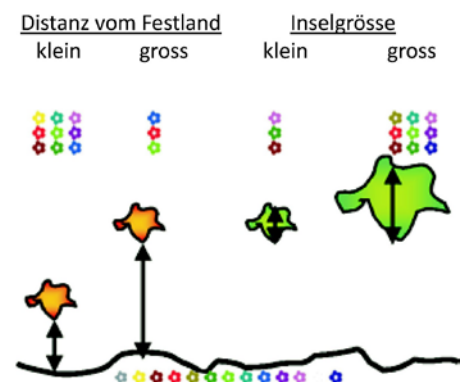
Schlüssel der Entstehung von Biodiversität ist die Genetische Differenzierung (s.o. Evolution). Dabei geht es um die gerichtete Etablierung von vorteilhaften Genvarianten bei der Besiedelung ökologischer Nischen. Durch zufällige Mutation entstehen laufend neue Genvarianten bei Verhaltens-bestimmenden, so genannten codierenden Genen. Wenn diese in der gegebenen Umwelt einen Vorteil bedeuten, bleiben sie in der Regel in den Nachkommen erhalten. Wenn nicht, verschwinden sie meist mit dem vorzeitigen Tod ihrer Träger-Individuen wieder. Dieser Vorgang der gerichteten Selektion codierender Gene ermöglicht es, dass sich in Teilpopulationen mit besonderen Umweltbedingungen sukzessive besonders gut an die Umwelt angepasste Verhaltensmöglichkeiten entwickeln (z.B. Frosthärte).

Bei starkem Selektionsdruck kann die Differenzierung ohne Isolation der Teilpopulation (sympatrisch) erfolgen. In der Regel läuft sie aber in isolierten Teilpopulationen ab (allopatrisch), weil dadurch ein Überprägen noch nicht ausdifferenzierter neuer Eigenschaften durch den gesamten Genpool verhindert werden kann. Die Shifting-Balance-Theorie zeigt auf, dass bei Differenzierungsprozessen Isolation und genetische Verarmung von Teilpopulationen eine wesentliche Rolle spielen, indem diese verstärkt zur Erschliessung neuer Nischen zwingen (*adaptive valley*) (Wright 1932, Barton & Whitlock 1997). Werden Genvarianten und entsprechende Eigenschaften in isolierten Teilpopulationen über viele Generationen vollständig ausdifferenziert und fliessen später in die Kernpopulation zurück (*hybridization*), so wird die betreffende Art um diese neuen Genvarianten und entsprechende Verhaltensmöglichkeiten bereichert. Bei Hybridisierung weitgehend differenzierter Teilpopulationen ohne vollständig ausgebildete Kreuzungsbarrieren kann es zur Vervielfachung des Chromosomensatzes kommen (*polyploidy*), welche direkt zur Artbildung führen kann. Isolation von Teilpopulationen kann also positive und sogar essentielle Wirkung auf die genetische Vielfalt und die Artenvielfalt haben.

Artbildungsprozesse verlaufen graduell und erstrecken sich bis zu ihrer Bewährung und Konsolidierung durch Ausbildung physiologischer Kreuzungsbarrieren über Zehntausende von Jahren. Im Grunde bleibt der Status der involvierten Teilpopulationen vage. Taxonomisch können sie durch die innerartlichen taxonomischen Stufen der Unterart, Varietät und Form grob gefasst werden. Ausserdem können sie aufgrund besonderer Eigenschaften typisiert werden (Ökotypen, Morphotypen). Beide Gliederungsansätze sind nur unvollständig umgesetzt und die Qualität entsprechender Informationen ist heterogen und lückenhaft. Deshalb sind effektive Differenzierung und taxonomischer Status teils nicht kongruent. Das heisst Artenlisten oder darauf aufbauende Werke wie Rote Listen sind stark von der taxonomischen Interpretation der Teilpopulationen von Metapopulationen abhängig und entsprechend unscharf. Sie bedürfen einer Überarbeitung nach über die Landesgrenzen hinaus gehenden evolutionären Kriterien.

Metapopulationsdynamik

Das Konzept der Inselbiogeographie (MacArthur & Wilson 1967) besagt, dass die Artenzahl auf Inseln sinkt, je kleiner besiedelte Inseln sind und je weiter diese vom Festland entfernt liegen. Gründe dafür sind die erhöhte Aussterberate kleiner Populationen (kleine Inseln, >> 3.2 Gefährdung) und die verminderte Einwanderungsrate (entfernte Inseln). Ähnlich verhält es sich mit spezialisierten Arten spezieller Habitats (z.B. Quellfluren, Trockenwiesen), die wie Lebensraum-Inseln in der Landschaft liegen. Anhand solcher Arten wurde das Konzept der Metapopulation entwickelt (Übersicht z.B. Hanski 1999).



Übertragen auf den Skalenbereich der Gesamtverbreitung von Arten bildet die Gesamtpopulation einer Art mit all ihren potentiell in Raum und Zeit verbundenen Teilpopulationen eine Metapopulation. Die räumliche Verbindung wird durch Genfluss in Form von Pollen- oder Samentransport realisiert. Durch Genfluss wird ein Netz aus verbundenen Teilpopulationen erzeugt (*stepping stone model of population*) (Kimura & Weiss 1964). Metapopulationen bestehen aus individuenreichen und langfristig stabilen Kernpopulationen (*core population*) sowie aus Satellitenpopulationen (*satellite population*), die durch periodische Einwanderung aus Kernpopulationen erhalten oder nach Aussterbeereignissen wieder besiedelt werden können (*core-satellite species hypothesis*) (Hanski & Gyllenberg 1993).

Wesentliche Prozesse der Metapopulationsdynamik sind demnach

- Besiedelung neuer Gebiete (*colonization*)
- Wiederbesiedelung von Gebieten mit sporadisch aussterbenden Satellitenpopulationen (*rescue effect, recolonization*)
- Latente Verbindung von Kernpopulationen durch Satellitenpopulationen als Trittsteinpopulationen (*gene flow through stepping stone populations, periodical gene flow*)
- Verbindung langfristig isolierter und mehr oder weniger differenzierter Teilpopulation untereinander und mit Kernpopulationen (*hybridization*).

Die Gesamtpopulation einer Art wird durch die Metapopulationsdynamik zusammen gehalten. Die Metapopulation ist mehr als die Summe ihrer Teilpopulationen. Sie ist ausserdem die im Lauf der Geschichte realisierte Abfolge von Trennung und Verbindung der Teilpopulationen – sowohl in der Vergangenheit als potentiell auch in der Zukunft (*species history*). Die Perspektive auf evolutionäre Prozesse hinter Artenvielfalt und genetischer Vielfalt zeigt, dass Arten dynamisch sind. In etlichen Fällen dürften aktuelle Abtrennungen von von Unterarten und Varietäten zu eigenen Art-Taxa einer fernen zukünftigen Realität nicht entsprechen (z.B. Übersicht europäische Weisseichen-Arten, *sect. Quercus*, Petit et al 2002).

Folgerung von Leitlinien

Evolution	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Arten bleiben nicht stehen. Um zu bestehen, muss sich ihr ökologisches Potential fortlaufend wandeln. ➤ Arten verfügen über effektive Selbsterhaltungsmechanismen.
Biodiversitätsmotor	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Die genetische Vielfalt von morgen ist das Produkt fortlaufender Artbildungsprozesse von heute. ➤ Räumlich/ökologisch isolierte Teilpopulationen können ein erhöhtes Differenzierungspotential aufweisen und Träger wertvoller spezieller genetischer Vielfalt sein (Unterart, Varietät, Ökotyp).
Metapopulationsdynamik	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Kernpopulationen einer Art sind meist Träger maximaler genetischer Vielfalt, beinhalten aber nicht die speziellen Genvarianten aus isolierten Teilpopulationen mit erhöhtem Differenzierungspotential. ➤ Die Art ist ein Organismus mit Metapopulationsdynamik, dem grossräumigem langfristigen Muster aus Differenzierung und Hybridisierung. Wer Einfluss auf die Artgeschichte nehmen will, muss diese Muster verstehen.



- 1. Anzeigt ist eine langfristig angelegte dynamische Erhaltung durch Förderung von Selbsterhaltungsmechanismen – keine statische Erhaltung.**
- 2. Zur Erfassung und zum Verständnis der Metapopulationen der relevanten Gehölzarten ist ein langfristig koordiniertes demographisches und genetisches Monitoring notwendig.**

3 Anpassungsdruck

Allgemeines

Für Arten und Populationen ergibt sich Anpassungsdruck aus Gefährdungen (z.B. Kremer 2007, Aitken *et al* 2008). Gefährdung wirkt durch die direkte Eliminierung von Individuen (z.B. Übernutzung, Pathogene, extreme Verbissbelastung), durch die Eliminierung von Habitaten (z.B. Zerstörung, Verschmutzung, Umweltveränderungen) sowie durch genetische Verarmung (z.B. Fragmentierung, genetische Drift) (Kelleher *et al* 2015). Diese Gefährdungsprozesse verstärken sich gegenseitig. Aufgrund einhergehender Verminderung der Populationsgrösse bewirken sie letztlich alle eine genetische Verarmung, durch die Populationen weiter abnehmen. Durch diese positive Rückkopplung werden unterhalb einer minimalen Populationsgrösse (*minimal viable population*) die genetische Diversität und Anpassungsfähigkeit so stark eingeschränkt, dass es für die Population meist kein Zurück mehr gibt. Man spricht unterhalb dieser Schwelle vom einsetzenden Aussterbestrudel (*vortex effect*) (Franklin 1980, Gilpin & Soulé 1986).

Generelle Gefährdung

Aufgrund der Rückkopplung von Gefährdungsprozessen dürften auch Gefährdungsursachen aufgrund von Klimawandel primär verstärkend auf bestehende oder generelle Gefährdungsursachen wirken. Um den Einfluss des Klimawandels abschätzen zu können, ist deshalb von der bisherigen Gefährdungsdiskussion der Arten mit den bereits bestehenden, d.h. generellen Gefährdungsursachen auszugehen.

Da das Ausmass von Gefährdung nicht direkt messbar ist, muss Gefährdung über unterschiedliche mit den Gefährdungsursachen verknüpfte Indikatoren abgeschätzt werden (z.B. Potter & Crane 2010, IUCN 2012). Für die generelle Gefährdungseinschätzung sind folgende vier Indikatoren besonders relevant (Kelleher *et al* 2015):

- Geringe genetische Diversität: Bei Baumarten ist die genetische Diversität innerhalb von Teilpopulationen in der Regel hoch und zwischen den Populationen geringer, was einem hohen Mass an Genfluss über grosse Distanz entspricht (*long distance gene flow*) (Hamrick 2004, Kremer *et al* 2012, Alberto *et al* 2013).
- Geringe oder abnehmende Populationsgrösse: Populationsgrösse ist einer der Hauptindikatoren der IUCN-Kriterien (IUCN 2012), da sie zuverlässig erfasst werden kann. Doch deren Veränderung über Generationszyklen sind bei den langlebigen Baumarten nur durch lange Zeitreihen zu ermitteln.
- Fehlende Verjüngung und eingeschränkte Ausbreitung: Ausfall von Verjüngung bei langlebigen Arten (z.B. Wildverbiss, Trockenstress-anfällige Verjüngungsphase) führt zu einem nicht nachhaltigen Altersklassenaufbau und einem verzögerten Rückgang der Population.
- Starke Fragmentierung: Durch die Fragmentierung der Metapopulation wird genetische Drift und damit die genetische Verarmung erhöht. Für einige seltene und zerstreute Baumarten wird vermutet, dass sie mit relativ grossem Ausmass an Fragmentierung umgehen können.

Gefährdung aufgrund von Klimawandel

Klimawandel beeinflusst Arten und Habitate und kann für Arten direkt oder indirekt zur Gefährdung werden. Eine direkte Gefährdung durch den Klimawandel entsteht für diejenigen Populationen, die sich am Rand der artspezifischen fundamentalen Nische befinden (physiologische Grenze). Zur Einschätzung von Gefährdung bei voraussichtlicher Klimaerwärmung mit vermehrter Sommertrockenheit sind insbesondere folgende vier mit Gefährdungsursachen verknüpfte Indikatoren relevant (Kelleher *et al* 2015):

- grosse Empfindlichkeit gegenüber Trockenstress: Bei prognostizierter Klimaerwärmung mit erhöhter Sommertrockenheit sind insbesondere Populationen an der artspezifischen Trockengrenze betroffen (z.B. Allen *et al.*, 2010; Choat *et al.*, 2012).
- Migrationshindernisse: Die grossräumige Topographie der Landschaft kann potentielle Migrationsrouten entlang zentraler Gradienten einschränken. Darunter fallen für Tieflagenarten unüberwindbare Gebirgsketten wie die Alpen. Aber auch grosse Ebenen können Hindernisse darstellen für Arten, deren Verbreitung bereits durch azonale vertikale Pufferung in Gebirgen (*vertical buffer*) geprägt ist (z.B. Mittelland für *Picea abies* im Alpenraum).

- Begrenzung auf seltene azonale Habitats: Ist die Kapazität eines azonalen vertikalen Puffers erschöpft, kann dieser zur Sackgasse werden (z.B. *Pinus cembra* in den nördlichen und südlichen Randalpen sowie in den Karpaten). Generell vermindert die standörtliche Bindung an seltene oder begrenzte Habitats die Möglichkeit von Migration.
- Verstärkung ökologischer Interaktionen: Aufgrund von Klimaveränderung werden ökologische Gleichgewichte gestört. In der Folge von Trockenstress kann eine Verstärkung von Störungsregimes wie Ausbreitung von Pathogenen und invasiven Arten, Schädlings-Gradationen und Waldbrand beobachtet werden (z.B. Simberloff 2013, Allen *et al.* 2010).

Die Ergebnisse aus dem Forschungsprogramm Wald und Klimawandel bestätigen und ergänzen bestehendes Wissen und Vermutungen (Arend *et al.* 2016): Der Einfluss von Sommertrockenheit wirkt sich insbesondere in Tieflagen deutlich aus. Die Toleranz gegenüber Trockenstress variiert sowohl artspezifisch (z.B. *Acer pseudoplatanus* besonders anfällig) als auch provenienzspezifisch (z.B. inneralpine Buchenprovenienzen). Aus der artspezifischen Strategie betreffend trockenheitsbedingtem Versagen des hydraulischen Systems (*hydraulic failure*) aufgrund von Kavitation (*embolism*) ergeben sich Unterschiede in der Anfälligkeit gegenüber Trockenstress (Übersicht z.B. Klein *et al.* 2014). Dabei wirkt ein komplexes Zusammenspiel von frühzeitigem Einstellen der Transpiration (Schliessen der Stomata), verstärktes Wurzelwachstum (Erschliessen von Wasser), generell erhöhte Kavitationsresistenz (z.B. einige zerstreutporige Arten wie *Prunus avium*, *Fagus sylvatica* und ringporige Arten wie *Quercus petraea*, *Fraxinus excelsior*) und erhöhter Kavitationsresilienz (Erholung nach Kavitation) (Arend *et al.* 2016). In Hochlagen ergibt sich keine relevante Auswirkung von Sommertrockenheit. Dagegen wird aufgrund der Erwärmung und einhergehender Verlängerung der Vegetationsperiode in Hochlagen mit einer positiven Wirkung auf das Baumwachstum gerechnet (Arend *et al.* 2016).

Auswirkungen des Klimawandels auf ökologische Interaktionen haben eine grosse Bedeutung. Ähnlich der positiven Rückkopplung von Populationsrückgang und Verlust genetischer Vielfalt verhält es sich auch mit Klimawandel und einigen ökologischen Interaktionen, die dadurch zu Störungsregimes aufgeschaukelt werden können. Auch eine Beeinträchtigung wesentlicher mutualistischer Beziehungen (z.B. Mykorrhiza, Samenverktoren) gehören in den Bereich ökologische Interaktionen. Die Auswirkung auf Arten können sehr stark sein, doch sind spezifische Eintretenswahrscheinlichkeiten nicht zuverlässig abschätzbar. Generell können aber insbesondere Arten mit kleinen Populationen oder kleinem Verbreitungsareal durch Störungsregimes so stark dezimiert werden, dass sie aufgrund der generellen Gefährdungsursachen in einen Aussterbestrudel geraten (s.o.).

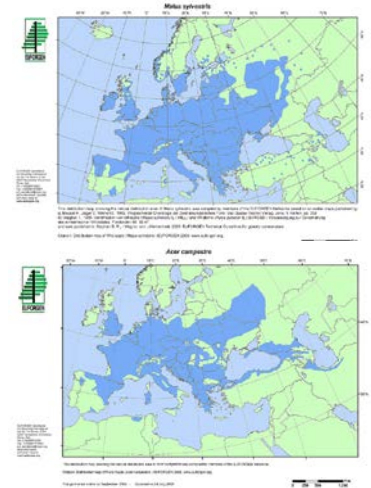
Baumarten haben aufgrund ihrer Langlebigkeit ausgeprägte Lebensphasen mit stark variierender Anfälligkeit gegenüber Gefährdungsursachen. Während der Dauer von Keimung und Anwuchs ist die Anfälligkeit gegenüber Trockenstress besonders hoch. Lange bevor Symptome an etablierten Altbäumen einer Art auftreten, kann Verjüngung verunmöglicht werden, d.h. Standorte und Jahre möglicher Verjüngung stark eingeschränkt. Auch einige ökologische Interaktionen wirken besonders stark in der frühen Jugendphase. Insbesondere Pilzkrankungen und starker Wildverbiss können als Dauereinfluss auftreten und Verjüngung über Jahre oder Jahrzehnte verhindern (z.B. Wildverbiss bei *Taxus baccata*, Keimlingsfäulen durch *Phytophthora spec*). Die Folge davon ist ein nicht nachhaltiger Altersklassenaufbau, der sich erst stark verzögert auf die effektive Populationsgrösse auswirkt (*effective population size*, N_e) und so erst spät bemerkt werden könnte.

Gefährdete Teilpopulationen

Isolierte Populationen randständiger oder disjunkter Teile der Verbreitung können exklusive genetische Variation enthalten, die bei der Meisterung gefährdender Einflüsse massgeblich sein könnte. Dabei sind insbesondere am rückseitigen Verbreitungsrand liegende isolierte Populationen relevant (*rear edge population*, Hampe *et al.* 2005), wobei sich Rückseite auf die mutmassliche Migrationsrichtung entlang ökologischer Gradienten bezieht (vgl. 4 Anpassungsreaktion, Migration).

Entsprechende Populationen sollen in die Erhaltungsstrategie des europäischen Netzwerk zur Erhaltung forstlicher Genressourcen (EUFORGEN) aufgenommen werden (Kelleher *et al.* 2015). Im Anschluss an die COST Action FP1202 *Strengthening conservation: a key issue for adaptation of marginal/peripheral populations of forest trees to climate change in Europe* (MaP-FGR) werden nun auf europäischer Ebene Kriterien dafür erarbeitet (Serra-Varela *et al.* in press) und diese in die paneuropäische Datenbank forstlicher Genressourcen (EUFGIS) integriert (Rudow *et al.* in press).

Für eine populationsbiologische Analyse von Verbreitungsmustern sind vollständige, hochaufgelöste Verbreitungsinformationen sowie ein populationsbiologisches Klassierungssystem für Verbreitungsqualitäten notwendig, wie sie z.B. für die Interpretation der Tannenverbreitung in der Schweiz angedacht wurden: konjunktes Hauptareal, disjunktes Nebenareal, Reliktareal mit isolierten Senkenpopulation (Frey 2003). Die Datenlage zur Verbreitung von Baumarten ist dafür unzureichend. Das hängt mit den grossen Unterschieden der Verbreitungsmuster und Dichteverteilungen der Arten zusammen. Was ähnlich aussieht, kann bezüglich Populationsdichte um Zehnerpotenzen schwanken und bildet Verbreitungslücken meist sehr ungenau ab (z.B. Verbreitungskarten rechts: oben *Malus sylvestris*, unten der in Mitteleuropa rund 100x häufigere *Acer campestre*, EUFORGEN 2009).



Auch die Datenlage zur Gefährdung von Baumarten ist ungenügend. Zur oben genannten Unschärfe chorologischer/demografischer Grundlagen kommt zum einen die Tatsache, dass die Baumarten über lange Zeit floristisch wenig beachtet wurden, und zum anderen, dass ihre Langlebigkeit die Wahrnehmung chorologischer und demographischer Veränderungen stark erschwert. Bei der bisherigen Praxis zur Erstellung von Gefährdungsübersichten in Roten Listen werden deshalb Metapopulationsstrukturen kaum einbezogen. Die Regionalisierung der Gefährdungsansprache sagt wenig über die Metapopulationsstruktur der Verbreitung aus. So werden in der Schweizer Roten Liste der Gefässpflanzen, fragliche Gefährdungseinschätzungen von Baumarten aufgeführt (BAFU 2007, auf Grundlage von BAFU 2002: z.B. *Populus alba*, *Pyrus pyraeaster* und *Salix fragilis* als LC *least concern* (ungefährdet), obwohl ihre Populationen klein, stark fragmentiert und zudem potentiell von Introgression betroffen sind (Rudow & Schwab 2006).

Folgerung von Leitlinien

Gefährdung aufgrund von Klimawandel	➤ Bereits generell gefährdete Arten (geringe genetische Diversität, geringe Populationsgrösse, fehlende Verjüngung, starke Fragmentierung) sind besonders durch zusätzliche Gefährdungsursachen wie z.B. aufgrund von Klimawandel betroffen.
Gefährdung aufgrund von Klimawandel	➤ Anpassungsdruck durch Gefährdung aufgrund von Klimawandels wirkt insbesondere auf Arten mit Empfindlichkeit gegenüber Trockenstress. ➤ Wesentliche Gefährdungsursachen wirken sich besonders auf die frühe Jugendphase von Arten aus und erfordern deshalb beim demographischen Monitoring eine gezielte Erfassung der Verjüngung. ➤ Durch Klimawandel ausgelöste ökologische Interaktionen oder verstärkte Störungsregime können einzelne Arten massiv gefährden, sind aber kaum vorhersehbar.
Gefährdete Teilpopulationen	➤ Gefährdungseinschätzungen und Förderungsmassnahmen für Baumarten und Teilpopulationen benötigen räumlich hoch aufgelöste demographische und genetische Informationen zu Zustand und Entwicklung der Metapopulation.



3. **Auch im Hinblick auf den Klimawandel liegt der Fokus primär auf bereits heute gefährdeten und potentiell gefährdeten Arten.**
4. **Durch Klimawandel ausgelöste ökologische Interaktionen oder verstärkte Störungsregime, die zu massiver Gefährdung führen, erfordern zusätzlich punktuell rasche zielgerichtete Massnahmen zur Sicherung der genetischen Diversität.**
5. **Notwendig ist ein langfristig koordiniertes demographisches und genetisches Monitoring zur Erfassung und zum Verständnis der Metapopulationen der Arten, inkl. Erfassung von Teilpopulationen und Erfassung von Verjüngung.**

4 Anpassungsreaktion

Allgemeines

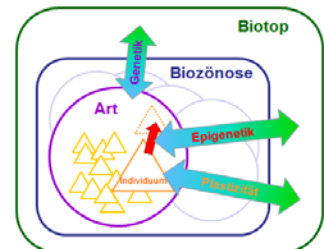
Für Arten gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten, um auf gefährdende Einflüsse zu reagieren und ein Aussterben zu verhindern: Adaptation und Migration (z.B. Kremer 2007, Aitken *et al* 2008).

Aus Klimamodellen kann die räumliche Geschwindigkeit von Klimaveränderung, bzw. die Geschwindigkeit entsprechender Verschiebungen von Klimazonengrenzen abgeleitet werden (z.B. Loarie *et al* 2009, Ordonnez & Williams 2013). Sie entspricht dem zunehmenden Anpassungs- oder Migrationsdruck auf die Arten. Dies insbesondere an den Verbreitungsgrenzen. Bisherige Anpassungs- und Migrationsprozesse können teilweise durch paläobotanische Methoden (Pollen, Makroreste), molekular-genetische Methoden (mt-DNA) und Kombinationen davon abgeschätzt werden. Dies allerdings nur in groben Zügen und meist nur auf die nacheiszeitliche Einwanderungsgeschichte nach der letzten Eiszeit (Holozän) beschränkt (z.B. Ordonnez & Williams 2013).

Adaptation

Adaptation bedeutet die Erschließung ökologischer Nischen durch Anpassung des ökologischen Verhaltens, was auch als Reaktion auf die Limitierung einer bisherigen ökologischen Nische verstanden werden kann, z.B. bezüglich physiologisch limitierender Faktoren wie Trockenheit oder Minimumtemperatur. Adaptationsvorgänge laufen auf drei verschiedenen Ebenen ab (Übersichten z.B. Kelleher *et al* 2015, Gugerli *et al* 2016):

- Anpassung durch Plastizität (Ebene Individuum, Genotyp unverändert): Die phänotypische Plastizität meint die gesamte physiologische Toleranz gegenüber limitierenden Faktoren, die es einem Individuum einer Baumart ermöglicht, Umweltextreme und Umweltschwankungen über die gesamte Lebensspanne von bis zu mehreren Jahrhunderten zu überdauern. Neuere Untersuchungen weisen auf eine hohe Plastizität bei Baumarten hin, was aufgrund ihrer Langlebigkeit zu erwarten ist.
- Epigenetische Anpassung (Ebene Generationenfolge von Individuen, Genotyp unverändert): Die epigenetische Anpassung meint die Steuerung der Genexpression bei den Nachkommen hinsichtlich limitierender Faktoren, denen die Eltern ausgesetzt waren (An-/Abschaltung, bzw. Stilllegung genetisch vorhandener Verhaltensmöglichkeiten, *gene silencing*) (z.B. Schueler *et al* 2013). Bezüglich Klimaerwärmung ist eine entsprechende Steuerung phänologischer Eigenschaften wie z.B. des Austriebszeitpunkts anzunehmen.
- Genetische Anpassung (Ebene Art/Population, Genotyp verändert): Bei der genetischen Anpassung wird die codierende oder adaptive genetische Diversität einer Art/Population durch gerichtete Selektion differenziert. Dabei werden langfristig bezüglich limitierender Faktoren günstige Genvarianten angesammelt. Die relativ hohe adaptive genetische Variation in Populationen vieler Baumarten weist darauf hin, dass es in der Vergangenheit Phasen diversifizierender Selektion gab (Savolainen *et al* 2007, Alberto *et al* 2013) (vgl. 2 Biologische Grundlagen, Biodiversitätsmotor).



Die Datenlage bezüglich Quantifizierung adaptiver genetischer Diversität ist noch sehr gering. Viele bisherige genetische Studien betreffen neutrale genetische Variation, die keine Schlüsse auf Anpassungsfähigkeit zulässt, da sie nicht mit adaptiver genetischer Variation korreliert (Holderegger *et al* 2006). Um adaptive genetische Variation zu erfassen, werden quantitativ-genetische Studien auf der Basis von Feldversuchen (*common garden experiments*) oder molekular-genetische Studien mit etablierten Markern codierender Gene benötigt.

Das Forschungsprogramm Wald und Klimawandel fasst bisherige quantitativ-genetische Erkenntnisse zusammen und ergänzt diese durch neue Studien aus der Schweiz (Gugerli *et al* 2016): Experimente mit einigen wichtigen Hauptbaumarten ergeben starke Differenzierung bezüglich Höhenlage/Temperatur z.B. bei *Picea abies* und Trockenheit z.B. bei den Eichenarten (*Quercus spec.*). Phänologische Eigenschaften wie Austrieb von Provenienzen unterschiedlicher Höhenlagen lassen für einige Laubbaumarten ebenfalls genetische

Differenzierung vermuten, was aber nicht auf alle Arten übertragbar ist, da der Phänologie unterschiedliche artspezifische Steuerungsmechanismen (Photoperiodizität, Temperatursumme) zugrunde liegen.

Ein wesentlicher Nachteil quantitativ-genetischer Studien ist die lange Dauer entsprechender Feldversuche. Sicher geben Keimungs- und Anwuchsphase bereits wertvolle Hinweise auf mögliche Differenzierung in den ersten Lebensjahren. Diese frühe Jugendphase ist bezüglich einiger limitierender Faktoren besonders relevant. Doch werden möglicherweise weitere wesentliche Verhaltenseigenschaften der Aufwuchsphase sowie der Fortpflanzungsvorgänge nicht abgebildet. Ausserdem bleibt stets die Frage im Raum, welche der beobachteten Verhaltenseigenschaften eigentlich epigenetisch ausgeprägt sind, denen also gar keine genetische Variation zugrunde liegt. Diese Unsicherheit kann nur durch über zwei Generationen angelegte Feldversuche oder durch die Bestätigung quantitativ-genetischer Indizien mit molekular-genetischen Methoden ausgeräumt werden.

Zwar werden im Zug von Genom-Scans vermehrt adaptive genetische Marker etabliert (Holderegger *et al.*, 2008; Kremer *et al.*, 2011), doch kann heute genetische Anpassungen damit erst ansatzweise erfasst werden. Mit unterschiedlichen Ansätzen können potentielle adaptive Gene (*candidate genes*) eruiert werden (Gugerli *et al* 2016). Die Verlinkung von deren Allelfrequenzen mit ökologischen Faktoren ergibt bei den Eichenarten Korrelationen mit Temperatur- und Niederschlags-bezogenen Faktoren. Demnach scheint *Quercus robur* besser auf wärmere Temperaturen vorbereitet zu sein, *Quercus petraea* und *Quercus pubescens* dagegen besser auf zunehmende Trockenheit. Bei *Fagus sylvatica* zeigt sich trotz der hohen Populationsdichte genetische Differenzierung auf Kandidatengenens insbesondere bezüglich Niederschlag und Trockenheit, was auf unerwartet hohen lokalen Selektionsdruck schliessen lässt. Die weitere Erforschung adaptiver genetischer Variation dieser und weiterer Arten ist unabdingbar, um die genetische Differenzierung unserer Baumarten und deren ökologische Potentiale besser zu verstehen. Aktuell läuft dazu die paneuropäische auf 12 Baumarten ausgerichtete Studie GENTREE, an der sich auch die Schweiz beteiligt (www.gentree-h2020.eu).

Migration

Migration bedeutet das Erschliessen von im Raum vorhandenen ökologischen Nischen, was angesichts von Gefährdung auch als ein räumliches Ausweichen in Zonen mit geringerer Gefährdung verstanden werden kann. Für Migration werden demnach Ausbreitungsmechanismen für Pollen und Samen benötigt sowie entsprechende besiedelbare Habitats. Im Rahmen von Klimaerwärmung verläuft Migration primär zonal, d.h. entlang eines Breitengrad-Gradienten (horizontal, latitudinal). Der in Wanderrichtung gelegene Verbreitungsrand wird als *leading* oder *front edge* bezeichnet, der entgegengesetzte, sich zurückziehende Verbreitungsrand als *trailing* oder *rear edge* (Hampe *et al* 2005). Heute wird angenommen, dass bei Migration insbesondere Ereignisse von Samenausbreitungen über grosse Distanz (*long-distance dispersal*) eine wesentliche Rolle spielen und Wandergeschwindigkeiten von Arten erhöhen (Alberto *et al* 2013). In der Regel verläuft das Vordringen am *leading edge* schneller als die Zurückdrängung am *trailing edge* (Expansion). Doch sind mögliche Nischen am *leading edge* besetzt und verdrängen gleichzeitig einwandernde Arten eine Population am *trailing edge* verhält es sich umgekehrt (Kontraktion).

Die Wanderung kann auch azonal, d.h. entlang eines Höhengradienten erfolgen (vertikal, altitudinal), bei der Erhebungen und Gebirgszüge als Puffer zur Kompensation von horizontalem Migrationsdruck wirken (*vertical buffer*). Gebirgen kommt deshalb bezüglich Gefährdungen aufgrund von Klimaerwärmung eine grosse Bedeutung zu, wie dies Gebirgsvorkommen am aktuellen südlichen Verbreitungsrand vieler Arten eindrücklich zeigen. Damit die Pufferwirkung nachhaltig ist, muss allerdings die Pufferkapazität des Gebirges (Höhengradient) und/oder dessen latitudinale Ausdehnung (Nord-Süd-Erstreckung) der erwarteten Klimaerwärmung entsprechen, damit der vertikale Puffer nicht zur Sackgasse für eine später dennoch erforderliche horizontale Migration wird.

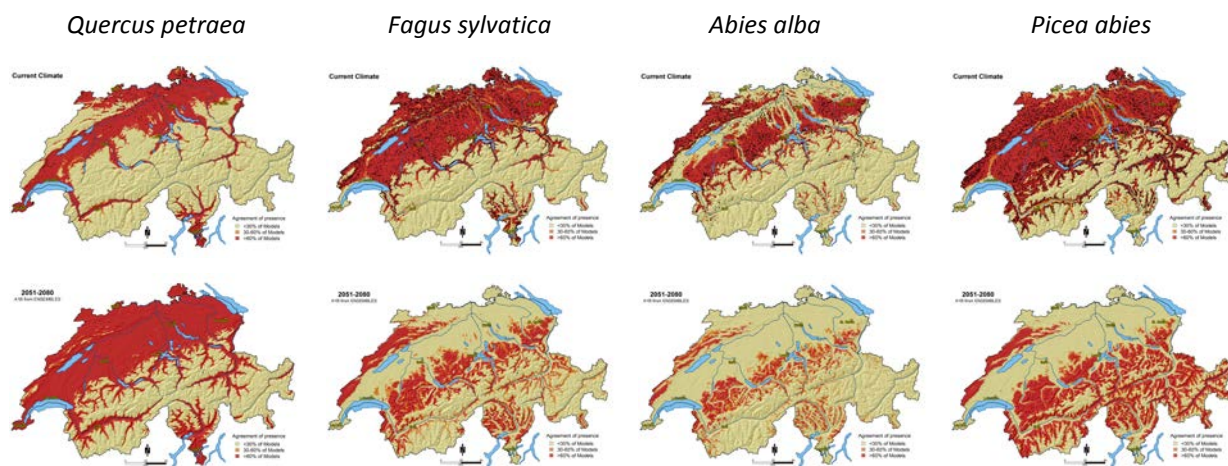
Das Forschungsprogramm Wald und Klimawandel fasst bisherige Erkenntnisse zu Wanderbewegungen von Baumarten zusammen und modelliert aufgrund aktueller Verbreitungsdaten potentielle Verbreitungen von 33 Baumarten unter Klimawandel (Zimmermann *et al* 2016, Zimmermann *et al* 2014): Aufgrund von 11 Variablen lassen sich die aktuellen Verbreitungen gut erklären. Es wird festgehalten, dass dabei vor allem die Extremwerte von Trockenheit sowie die absoluten Temperaturminima an der Höhenverbreitungsobergrenze und teils Temperaturmaxima an der -untergrenze wirksam sind – weniger die Mittelwerte. Allerdings bilden die bisher gemessenen Minima die nur vereinzelt über lange Zeitabschnitte von 100 und mehr Jahren verteilt auftretenden Extremereignisse erst ungenügend ab. Für Baumarten kühltemperater Laubwälder stimmt die Höhenverbreitungsobergrenze weniger mit den Wintertemperaturminima (Winterhärte) überein, als mit den Temperaturminima zur Zeit des Blattaustriebs (Spätfrosttoleranz). Dies zeigt, wie vielfältig die tatsächlich

wirkenden Prozesse sein können. Ausserdem können Effekte von Föhn und Kälteseen zu Anomalien in Bezug auf Austrocknung und Temperaturminima führen.

Eine mittlere altitudinale Temperaturabnahme (-0.4 bis -0.7°C pro 100m) und der bisherige Temperaturanstieg in der Schweiz (ca. 1.8°C seit 1864) entspricht einem Anstieg der Höhenverbreitung von rund 100m pro 50 Jahre. Eine Auswertung der über zwei Jahrzehnte dauernden Messreihe des Landesforstinventars und ein Datensatz mit nach sieben Jahrzehnten wiederholten Messungen zeigen, dass die mittlere Verschiebung der Höhenverbreitung der Klimaentwicklung leicht, doch die Verschiebung der Verbreitungsgrenzen stark hinterher hinken (Küchler et al 2013). Der obere Verbreitungsrand erreicht mit 50-75m pro 50 Jahre nur rund zwei Drittel der erwarteten Verschiebung, der untere Verbreitungsrand mit 25-50m pro 50 Jahre nur rund einen Drittel. Dies dürfte mit den Lebenszyklen der Baumarten zu tun haben, da am oberen Rand (*leading edge*) vor allem kürzere Verjüngungszyklen und am unteren Rand (*trailing edge*) eher längere Alterungs- und Mortalitätszyklen wirksam sind.

Modellierung

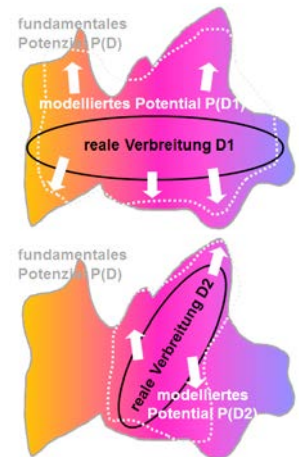
Die Modellierung der Verbreitungsentwicklung für Klimaszenario A1B (Mittlung von 6 Klimamodellen x 6 Verbreitungsmodellen) zeigen artspezifisch unterschiedliche potentielle Verbreitungsentwicklungen (Zimmermann et al 2016). Demnach werden montane und subalpine Arten in der Regel eher Arealgrösse einbüßen (z.B. *Fagus sylvatica*, *Ulmus glabra*, *Acer pseudoplatanus*, *Abies alba*, *Picea abies*, *Pinus cembra*). Dies insbesondere bei Verdrängung aus dem Mittelland (an deren unterem Verbreitungsrand, *trailing edge*). Andere Arten werden dagegen ihr Areal eher ausdehnen können (z.B. *Quercus*, *petraea*, *Quercus pubescens*, *Quercus robur*, *Carpinus betulus*, *Acer camperstre*, *Ostrya carpinifolia*). Dies insbesondere wegen der flächigen Ausbreitung im Mittelland (an deren oberen Verbreitungsrand, *leading edge*). Vgl. die Verbreitungen für vier Hauptbaumarten nach Current Climate (oben) und 2050-2080 (unten) (Zimmermann et al. 2014):



Ein wesentliches Problem entsprechender Visualisierungen ist, dass sie oft als zukünftige Verbreitungen missverstanden werden, dabei handelt es sich lediglich um hypothetische Verbreitungspotentiale, die mit grossen Unsicherheiten behaftet sind. Einmal abgesehen von Unsicherheiten bezüglich der Klimaentwicklung, zeigen nacheiszeitliche Migrationsmuster, dass sich einzelne Baumarten bei der nacheiszeitlichen „Rückwanderung“ kaum oder unabhängig von Temperaturgradienten, teilweise sogar diametral dazu bewegt haben (Ordonnez & Williams 2013). Wir staunen auch bis heute darüber, dass die aktuell dominierende Hauptbaumart Buche (*Fagus sylvatica*) zwar in vorhergehenden Warmzeiten in Mitteleuropa einwanderte, dies aber offenbar ohne hier zur Dominanz zu gelangen, und stattdessen die entsprechende ökologische Nische mehrheitlich der aktuellen Nebenbaumart Hainbuche (*Carpinus betulus*) überliess (Lang 1994).

Der Grund für solche Phänomene liegt in vielfältigen Ungewissheiten bezüglich der Klimaentwicklung, der artspezifischen Plastizität und Anpassungsreaktionen, der Einflüsse vielfältiger ökologischer Interaktionen und der Entwicklungsgeschichte der Art (*species history*) sowie in der Kumulation all dieser Ungewissheiten (Lindner et al. 2014).

Hinzu kommt eine methodische Unschärfe, die sich aus der Ableitung zukünftiger potentieller Verbreitungen aus aktuell realisierten Verbreitungen ergibt. Denn ebenso wie zukünftige Verbreitungen, waren auch die aktuellen Verbreitungen den Einflüssen vielfältiger ökologischer Interaktionen und der *species history* unterworfen. Jede Art hat ein bezüglich dem einen oder anderen Umweltfaktor (rechts durch Farbgradient angedeutet) breites fundamentales Potential (P(D). Je besser eine aktuelle Realisation (D1, D2) das fundamentale Potential einer Art (P(D)) repräsentiert, desto zuverlässiger (P(D1) oben) oder weniger zuverlässig (P(D2) unten) lassen sich potentielle zukünftige Verbreitungen abschätzen. Eine zusätzliche Unschärfe ergibt sich daraus, dass weit in der Vergangenheit liegende Einflüsse noch nicht durch Anpassung und Migration ausgeglichen sein könnten (*non-equilibrium*) (Kramer 2010, Zimmermann et al 2016).



Übersichten über ökologische Interaktionen geben z.B. Kremer 2007, Savolainen *et al* 2007, Aitken *et al* 2008. Einerseits gehören dazu einschränkende biotische Einflüsse, insbesondere Konkurrenz durch andere Baumarten (bei Migration auch die bisher anwesenden Arten), Parasitismus durch Pathogene, Räuber-Beute-Beziehungen durch Samenprädatoren oder Herbivoren (Wildverbiss) sowie auch das Fehlen wesentlicher mutualistischer Beziehungen wie Mykorrhiza-Partner, Bestäuber und Samenvektoren. Andererseits können abiotische Einflüsse durch stochastische Grossereignisse wie z.B. Vulkanausbrüche auftreten. Zu dieser Gruppe werden bisher meist auch abiotische Störungsregime wie Waldbrand, Trockenheits- oder Kälteextreme gezählt, doch besteht bei diesen je nach zeitlicher Auflösung der Betrachtung ein gradueller Übergang zu den kontinuierlichen Standortfaktoren.

In der Einwanderungsgeschichte können weitere Gründe für Unterschiede zwischen Realisation und Potential liegen. Es muss in der Geschichte einen Weg, d.h. eine räumlich-zeitliche Abfolge geeigneter Nischen, gegeben haben, um das heutige Verbreitungsareal zu realisieren. So können topographische Hindernisse wie Gebirge oder Meere sowie weit in der Vergangenheit liegende ausschliessende ökologische Interaktionen die Migration behindert und die Verbreitung nachhaltig beeinflusst haben (*species history*).



Folgerung von Leitlinien

Adaptation	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Aufgrund ihrer Langlebigkeit ist bei Baumarten eine hohe Plastizität zu erwarten. ➤ Die Verquickung von Plastizität und epigenetischer Steuerung und die aufgrund der langen Lebensdauer zu betrachtenden Zeiträume erschweren eine zuverlässige Erfassung der genetischen Anpassung.
Migration	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Verbreitungsanalysen ergeben analoge treibende Faktoren für Migrationsbewegungen wie sie aus physiologischen und genetischen Studien für die Treiber von Anpassungsvorgängen hervorgehen, nämlich insbesondere Winterkälte und Sommertrockenheit. ➤ Gebirge stellen Migrationspuffer dar, deren nachhaltige Pufferwirkung mit dem Gesamtausmass des Höhengradienten und dem Gesamtausmass der Nord-Süd-Erstreckung zunimmt.
Modellierung	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Verbreitung ist das Produkt aus fundamentalem Potenzial, ökologischen Interaktionen und <i>species history</i>. ➤ Vorsicht bei Karten extrapolierter zukünftiger Verbreitungen! Das Zusammenspiel obiger drei Bereiche ist äusserst komplex und kann derzeit weder durch Verbreitungs- noch Sukzessionsmodelle zuverlässig abgeschätzt werden.



- 6. Baumarten haben ein beträchtliches Potential zur raschen Anpassung durch Plastizität.**
- 7. Die Schweiz verfügt mit Jura und Alpen über mächtige Migrationspuffer.**
- 8. Längerfristige genetische Anpassungen sowie Migrationsprozesse sind aufgrund vielfältiger ökologischer Überlagerungen nicht zuverlässig abschätzbar.**
- 9. Zum besseren Verständnis (epi-)genetischer Anpassungsvorgänge sowie von Migrationsprozessen ist ein langfristig angelegtes genetisches Monitoring für exemplarische Zielarten notwendig.**

5 Umgang mit Komplexität und Ungewissheit

Allgemeines

Die bis hierher beleuchteten Aspekte zeigen, dass den Forstlichen Genressourcen ein biologisches und ökologisches System von ungeheurer Komplexität zugrunde liegt. Die Ergebnisse des Projektes Wald und Klimawandel sind wertvolle Bausteine zum Verständnis der Interaktionen mit dem Klima, sollen aber nicht darüber hinweg täuschen, dass offene Fragen derzeit nicht abschliessend beantwortet werden können. Grosse Ungewissheiten hinsichtlich Ursachen (Klimamodelle) und Wirkung auf die Baumarten (Anpassung, Migration) und deren ökologische Nischen (ökologische Interaktionen) bleiben bestehen (z.B. Gugerli et al 2016).

Relevante Themenfelder mit „leichter“ beantwortbaren Fragen werden durch die Forschung i.d.R. rasch abgearbeitet. Mehr und mehr verschiebt sich damit die Erkenntnisnachfrage hin zu immer komplexeren Systemen und Fragestellungen. Um die Grenzen unserer Erkenntnisfähigkeit entsprechend auszuweiten wird ein anderer Ansatz zur Erkenntnisgewinnung benötigt. Wie die Geschichte zeigt, können komplexe Systeme durch Stetigkeit, gewissermassen als Generationenprojekt, erfolgreich erschlossen werden. Auf der Metaebene solcher Prozesse geben Konzepte des Komplexitätsmanagements und der Entscheidungstheorie Aufschluss, wie offene Fragen und Probleme angegangen werden können.

Komplexitätsmanagement und Entscheidungstheorie

Anders als die in der theoretischen Informatik entwickelten Komplexitätstheorie (*computational complexity theory*) zielen die Konzepte des Komplexitätsmanagements (*complexity management*) auf nicht berechenbare Probleme (z.B. Malik 2006). Komplexität bedeutet hier, dass in einem System mehr Elemente vorliegen als durch kausale Beziehungen erklärt werden können. Für unser extrem komplexes System Biodiversität-Umwelt-Klima trifft diese Voraussetzung mit Sicherheit zu. Selbst wenn wir alle Elemente im System (Umweltfaktoren, Arten, Teilpopulationen, Gene, Interaktionen zwischen Arten) identifizieren könnten, würden wir längst nicht über ausreichend präzise Verknüpfungen verfügen, um sie systemisch fassen und ihr Verhalten näherungsweise berechnen zu können.

Komplexitätsmanagement orientiert sich am natürlichen menschlichen Verhalten gegenüber nicht berechenbarer Komplexität. Zur Bewältigung der Komplexität werden Kausalitäten zwischen Elementen willkürlich konstruiert. Solche konstruierte Kausalitäten sind Behauptungen oder Thesen, deren Wirkung überprüft und ggf. bestätigt oder verworfen werden kann. Sie vermögen komplexe Systeme zu stabilisieren, unabhängig davon ob sie wahr sind. Denn sie bilden stabile sogenannte Quasi-Objekte aus, die bestimmte Funktionen erfüllen und damit Instrumente darstellen (z.B. Kriterien, Indikatoren, Methoden, Datensammlungen, Entscheidungsbaum etc.), die durch ihre Verwendung auf Plausibilität geprüft werden können.

Derart konstruierte Instrumente helfen uns, auch unter Ungewissheit notwendige Entscheidungen zu treffen. Es geht dabei nicht darum, ob die Entscheidung richtig oder falsch, sondern ob sie günstiger oder ungünstiger ist und dass daraus gelernt werden kann. Die Entscheidungstheorie (*decision theory*, Übersichten z.B. Bitz 1981, Resnik 1987) spricht von Entscheidung unter Unsicherheit, wenn unklar ist, welches von einer Reihe möglicher Szenarios eintreten wird, und von Entscheidung unter Ungewissheit, wenn dabei auch die Wahrscheinlichkeiten dieser Szenarios unbekannt sind. Bei Entscheidung unter Ungewissheit wird in der Regel das Indifferenzprinzip angewendet, welches jeder Möglichkeit die gleiche Wahrscheinlichkeit zuordnet (wie z.B. bei der arithmetischen Mittlung von Klima-Szenarios, *multi model ensemble*, Zimmermann et al 2016).

Im Kontext von Erkenntnistheorie (*epistemology*) und heuristischer Problemlösungsmethode von Versuch und Irrtum (*trial and error*) sind Entscheidungen unter Ungewissheit der Treiber empirischer Erkenntnisgewinnung in der Wissenschaft (Falsifikationismus, Hume 1748). Sie bilden damit ein wesentliches Standbein der heutigen Wissenschaft und des Erkenntnisfortschritts dar.

Ein weiteres Konzept der Entscheidungstheorie ist das des Einbezugs der Flexibilität bezüglich Entscheidungen. Die Möglichkeit, zu einem späteren Zeitpunkt zu entscheiden, stellt darin eine zusätzliche Option dar. Entscheidungsoptionen, die die Flexibilität bezüglich zukünftigen Entscheidungen erhöhen, erhalten dadurch einen zusätzlichen Wert (z.B. bei der Bewertung dringlicher Erhaltungsmaßnahmen).

Kybernetik ist die Disziplin, die integral das Instrumentarium obiger Ansätze zur Bewältigung von Komplexität umfasst. Das Sinnbild des Steuermanns (grich. *kybernos*) trifft den Kern der Sache, nämlich die Verschiebung des Fokus weg von einer (vermeintlichen) Beherrschung eines Systems hin zur Kunst des Steuerns durch sich aufgrund von Komplexität ergebende Ungewissheiten. Dieser hier erkenntnistheoretisch begründete Paradigmenwechsel vollzieht sich im Lauf der Menschheitsgeschichte sukzessive durch alle Lebensbereiche, die von Komplexität geprägt sind: z.B. Regierung/Politik, Ökonomie, Management, heute vermehrt auch zu naturwissenschaftlichen Fragen. Die Erkenntnis der immensen Komplexität des Zusammenspiels von Umweltveränderungen, Migrationsvorgängen, Anpassungsvorgängen und der Überlagerung durch ökologische Interaktionen gewinnt mehr und mehr an Kontur. Nun ist es an der Zeit, diesen Paradigmenwechsel auch im Bereich der Biodiversität, bzw. des Biodiversitätsmanagements zu vollziehen.

Monitoring

Durch Entscheiden unter Ungewissheit kann Wissen und Orientierung erzeugt werden, sofern entsprechende Parameter bewusst beobachtet und festgehalten werden. Die entsprechende Umweltbeobachtung (*environmental monitoring*) ist insbesondere in Naturschutz, Landschaftsplanung, Forstwirtschaft und anderen umweltrelevanten Planungsaufgaben bereits heute von Bedeutung:

- Florenwerke (Artverbreitung, z.T. Abundanz)
- Landesforstinventar (Repräsentative Übersicht Artverbreitung und Abundanz häufiger Arten)
- Biodiversitätsmonitoring (Fokus auf wenige Indikator-Arten, wenig Gehölzarten)

Durch die technische Entwicklung in der Informatik können heute mit relativ geringem Aufwand immense Datenmengen verwaltet und ausgewertet werden. Dies ermöglicht zunehmend den Aufbau grossräumig und langfristig angelegter Datenbanken (*geographic information system*, GIS) und den Aufbau entsprechender gross und offen angelegter Monitorings. Damit stehen wir heute an einem Wendepunkt, an dem es möglich ist, das komplexe System Biodiversität-Umwelt-Klima durch fortlaufende gerichtete Datensammlung kontinuierlich zu entschlüsseln. Durch ein entsprechendes langfristig und grossräumig koordiniertes demographisches und genetisches Artenmonitoring kann längerfristig eine völlig neue Sicht auf das oben beschriebene hoch komplexe Wirkungsgefüge rund um die Biodiversität geschaffen werden.

Aktuelle Entwicklungen bei der Erhaltung forstlicher Genressourcen wie z.B. der Übergang von einer statischen zu einer dynamischen Generhaltung und der Aufbau eines entsprechenden Monitorings in Generhaltungsgebieten als massgebliches Steuerungsinstrument weisen in diese Richtung (EUFORGEN-Strategien, de Vries et al 2015, Rudow et al (in Vorbereitung)).

Folgerung von Leitlinien

Komplexitätsmanagement und Entscheidungstheorie	➤ Strategische und operationelle Entscheidungen/Massnahmen unter Ungewissheit sind die Grundlage für die iterative Entwicklung eines zuvor unbekanntes Lösungswegs.
Monitoring	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Das Monitoring der Entwicklung forstlicher Genressourcen und der Wirkung von Entscheidungen oder Massnahmen in dynamischen Generhaltungsgebieten ist dabei essentielles Instrument für den Erkenntnisfortschritt. ➤ Aufgrund der technischen Entwicklung in der Informatik ist ein entsprechend grossräumig und langfristig angelegtes Monitoring heute technisch möglich.



10. Angesichts der Komplexität der Erhaltung Forstlicher Genressourcen unter Klimawandel ist ein Paradigmenwechsel hin zu einem kybernetischen Ansatz bei der Generhaltung angezeigt.

11. Notwendig ist ein grossräumig angelegtes Netz aus Generhaltungsgebieten sowie ein entsprechend koordiniertes langfristiges und grossräumiges demographisches und genetisches Monitoring der Zielpopulationen dieser Generhaltungsgebiete. Aufgrund der jüngsten Entwicklung in der Informatik sind die dazu nötigen Datenbanksysteme technisch machbar.

6 Priorisierung und Handlungsbedarf

Effektivität und Priorisierung

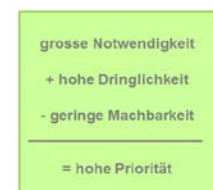
Für das Generationenprojekt Erhaltung Forstlicher Genressourcen, inkl. der dafür notwendigen Erkenntnisgewinnung, stehen begrenzte Mittel zur Verfügung. Diese Mittel bestimmen letztlich die Machbarkeit. Um die Machbarkeit zu verbessern gilt es, die Effektivität des Mitteleinsatzes zu optimieren und die Etappierung des Mitteleinsatzes zweckmässig zu priorisieren.

Um maximale Effektivität des Mitteleinsatzes (Wirksamkeit) zu erreichen, sind sowohl Optimalität der ergriffenen Massnahmen (Zielkonformität) als auch deren Effizienz (Wirtschaftlichkeit) zu maximieren. Oft wird dabei die Optimalität ausser Acht gelassen, doch kommt ihr ebenso grosse Bedeutung zu. Denn Massnahmen die nur preiswert aber nicht zielführend sind, können keine Effektivität des Mitteleinsatzes entfalten. Um die Optimalität von Massnahmen zu überprüfen ist ein Monitoring im Sinn einer Wirksamkeitskontrolle notwendig (\neq Ausführungskontrolle).



Bei der zweckmässigen Priorisierung von Massnahmen geht es darum eine Rangfolge zu erstellen, die eine Staffelung des Mitteleinsatzes ermöglicht (Erreichen von Machbarkeit) und dabei die höchste Wirksamkeit bezüglich den gesetzten Zielen verspricht. Standardmässig sind demnach folgende drei Kriterien für die verschiedenen Optionen abzuwägen, wobei zwischen diesen Abhängigkeiten bestehen:

- Notwendigkeit steigt mit zunehmendem Nutzen oder Wert (z.B. besondere Teilpopulation von bedeutender Hauptbaumart). Notwendigkeit stellt die Grundvoraussetzung von Massnahmen dar und liefert die Basis der Rangfolge.
- Dringlichkeit steigt mit dem Risiko von Wertverlust oder Handlungsoptionen (z.B. Auslöschung einer gefährdeten Teilpopulation). Dringlichkeit sollte immer auf der Basis von Notwendigkeit oder potentieller Notwendigkeit aufbauen. Sonst besteht die Gefahr von suboptimalem Mitteleinsatz, wenn allein aufgrund von Dringlichkeit entschieden wird („Feuerwehrübung“)
- Machbarkeit steigt mit der den zur Verfügung stehenden Ressourcen (Finanzen, Wissen). Machbarkeit wird durch um dieselben Mittel konkurrierende Themen/Massnahmen vermindert und durch Massnahmen zur Optimierung (Effektivität) oder durch Schaffung von Wissensgrundlagen erhöht.



Priorisierung von Arten

Übertragen auf die drei Ebenen der Biodiversität kann keine generelle Priorisierung vorgenommen werden. Denn diese drei Ebenen, Lebensraumvielfalt, Artenvielfalt und genetische Vielfalt, sind aufgrund ihrer gegenseitigen Abhängigkeiten prinzipiell gleichermassen bedeutend. Innerhalb der Ebene Artenvielfalt kann aber durchaus unterschiedlich gewichtet werden.

Übertragen auf die unsere Forstlichen Genressourcen bildenden Arten ergibt dies in Anlehnung an die bisherige Priorisierung (Rudow et al 2013) und zusätzliche Gewichtung der bezüglich Klimawandel relevanten Trockenheitstoleranz folgende Priorisierung unserer Gehölzarten:

- | | | |
|--|----------|-----------------------------------|
| 1. 1a Häufig bestandesbildende einheimische Hauptbaumarten | 3 Arten | z.B. <i>Fagus sylvatica</i> |
| 1b Trockenheitstolerante einheimische Hauptbaumarten | 4 Arten | z.B. <i>Quercus petraea</i> |
| 2. 2a Übrige einheimische Hauptbaumarten | 5 Arten | z.B. <i>Larix decidua</i> |
| 2b Trockenheitstolerante einheimische Nebenbaumarten | 8 Arten | z.B. <i>Sorbus aria</i> |
| 2b+2c (sowohl trockenheitsertragend als auch gefährdet) | 5 Arten | z.B. <i>Pyrus pyraeaster</i> |
| 2c Gefährdete einheimische Nebenbaumarten | 3 Arten | z.B. <i>Ulmus laevis</i> |
| 3. 3a Übrige einheimische Nebenbaumarten | 20 Arten | z.B. <i>Alnus glutinosa</i> |
| 3b Trockenheitstolerante einheimische Straucharten | 29 Arten | z.B. <i>Berberis vulgaris</i> |
| 3b+3c (sowohl trockenheitsertragend als auch gefährdet) | 10 Arten | z.B. <i>Rhamnus saxatilis</i> |
| 3c Gefährdete einheimische Straucharten | 15 Arten | z.B. <i>Salix myrtilloides</i> |
| 3d Trockenheitstolerante forstliche Exoten | 3 Arten | z.B. <i>Pseudotsuga menziesii</i> |

4. 4a Übrige einheimische Straucharten	>50 Arten	z.B. <i>Sambucus nigra</i>
4b Übrige forstliche Exoten	13 Arten	z.B. <i>Quercus rubra</i>
5. 5a Übrige exotische Baumarten	>50 Arten	z.B. <i>Aesculus hippocastanum</i>
6. 6a Übrige exotische Straucharten	>50 Arten	z.B. <i>Mahonia aquifolium</i>

Die Priorisierung ergibt 7 Arten 1. Priorität, 28 Arten 2. Priorität und 77 Arten 3. Priorität. Die Artenliste ist bezüglich Straucharten (Halbsträucher, Zwergsträucher, windende Gehölze) und bezüglich übrigen exotischen Arten (alle Gartenexoten) nicht abschliessend (vgl. Annex 1).

Die Priorisierung aufgrund der für forstliche Genressourcen spezifischen Kriterien kontrastiert mit der Liste der National Prioritären Arten (BAFU 2011), die auch als Richtlinie für Fördermassnahmen im Bereich Waldbiodiversität verwendet wird. So sind von den obigen 7 Arten 1. Priorität 0 Arten, von den 21 Arten 2. Priorität 2 Arten (*Sorbus domestica* und *Pyrus nivalis*) und von den 77 Arten 3. Priorität 22 Arten (mehrheitlich Straucharten der Gattungen *Rosa* und *Salix*) auf der aktuellen Liste der National Prioritären Arten. Dies ist durch den strikten Fokus auf nationale Gefährdung, unabhängig von der funktionalen Bedeutung von Arten und unabhängig von der Bedeutung der Schweizer Verbreitung für die gesamte Metapopulation, begründet. Funktionale Bedeutung schlägt sich demnach überhaupt nicht nieder, obwohl viele funktional bedeutende Gehölzarten als Gerüstarten unserer Waldökosysteme die Basis der Waldbiodiversitätspyramide bilden, von der eine grosse Zahl National Prioritärer Arten abhängt. *Nota bene*, weder Biber und Hirsch, Dreizehenspecht und Pirol, Prachtkäfer und Eichenzipfelfalter, Lungenflechte und Kammkelchmoos sind vor unseren Hauptbaumarten in Mitteleuropa eingewandert. Die funktional bedeutende Gehölzarten (obige Priorisierung) sind unbedingt als zusätzliche Artengruppe und Priorisierungs-Kategorie in die Liste der National Prioritären Arten zu integrieren.

Priorisierung von Handlungsbedarf

Übertragen auf den Handlungsbedarf bezüglich Erhaltungs- und Fördermassnahmen sind je nach ökologischem Potential, Konstitution der Metapopulation und aufgrund der Gefährdungsdiskposition der Art bei der Priorisierung ganz verschiedene Kriterien einzubeziehen. Aktuell wird durch eine EUFORGEN-Arbeitsgruppe ein konsistentes Entscheidungssystem entwickelt, das auf Stufe Population aufgrund eines konsistenten polyvalenten Kriterienkatalogs Massnahmen aus Gefährdungsdiskpositionen ableitet (*decision support tool*, Rudow et al (in Vorbereitung)).

Im Rahmen der Erarbeitung des ersten FAO-Länderberichts der Schweiz zu forstlichen Genressourcen (Rudow et al 2013) wurde bereits ein Vorschlag für prioritäre Massnahmen formuliert. Diese „provisorische“ Strategie wurde wie folgt ergänzt zu folgendem prioritären Handlungsbedarf:

1. Entwicklung einer nationalen langfristigen Strategie zur Erhaltung Forstlicher Genressourcen
 - o Entwicklung einer Strategie Forstliche Genressourcen 2019-2030 und Umsetzung in den relevanten Vollzugs-Instrumenten des Bundes
 - o Aufnahme der Kategorie funktional bedeutende Gehölzarten in die Liste prioritäre Arten
2. Umsetzung wichtiger *in situ*-Generhaltungsmassnahmen
 - o Einbezug der Waldbehörde/Forstpraxis in gesamten Evaluations- und Etablierungsprozess von Generhaltungsgebieten (Sensibilisierung, Mitwirkung)
 - o Etablierung von Generhaltungsgebieten gemäss entsprechender EUFORGEN-Strategie (*core network of dynamic gene conservation units (GCU)*, de Vries et al 2015) (Fortsetzung des laufenden nationalen Umsetzungsprojekts: je 5-10 Zielpopulationen für 14 Zielarten, Rudow 2016)
 - o Aufnahmen der Generhaltungsgebiete in einen Nationalen Kataster und Übertrag in die paneuropäische Datenbank (EUFGIS) und das paneuropäische *GCU core network* (EUFORGEN)
 - o Weiterentwicklung der Prozesskette Forstliches Vermehrungsgut (Frank et al 2017) und Umsetzung in den relevanten Vollzugs-Instrumenten des Bundes
3. Umsetzung wichtiger *ex situ*-Generhaltungsmassnahmen
 - o Unterhalt bestehender *ex situ* Erhaltungsplantagen (14 Klonsammlungen)
 - o Erweiterung bestehender Erhaltungsplantagen (min. Anzahl Klone) und Ergänzung um Erhaltungsplantagen für gefährdete einheimische Nebenbaumarten (8 Arten)

4. Forschung und Wissensgrundlagen

- Aufbau einer nationalen GIS-Datenbank zur Sicherung der Forstlichen Genressourcen: Generhaltungsgebiete, Erhaltungsplantagen, inkl. bestehende Provenienzversuche und neue Testpflanzungen, wenn möglich inkl. Samenerntebestände und Forstliches Vermehrungsgut
- Ersterhebung der Zielpopulationen in Generhaltungsgebieten (demographisches Monitoring, Übertrag in paneuropäische Datenbank EUFGIS und ins *GCU core network*)
- Evaluation von ergänzenden Generhaltungsgebieten (*MaP populations*, sobald Kriterien/Mechanismus etabliert) und Übertrag in EUFGIS und ggf. *GCU core network*)
- Mitwirkung im Projekt GENTREE (Marker für adaptive genetische Variation)
- Genetischen Monitorings in nationalen Generhaltungsgebieten (Ersterhebung)
- Koordination der Forschungsarbeiten zur Populationsbiologie und Populationsgenetik (Verbreitung, ökotypische Variation, genetische Variation) prioritärer Baumarten

Dazu sind wichtige Schnittstellen zwischen den Politikbereichen auf nationaler Ebene zu koordinieren. Da grossräumig und langfristig angelegtes Umweltmonitoring zunehmend als internationale Aufgabe verstanden wird, sind Mitwirkung und Vertretung in den wichtigsten pan-europäisch angelegten Netzwerken und Programmen essentiell und sollten unbedingt weiter geführt werden. Folgende Schnittstellen sind von Bedeutung:

- Entwicklung/Umsetzung nationaler Strategien: v.a. Biodiversitätsstrategie (BAFU 2012 a), Anpassung an den Klimawandel (BAFU 2012 b, 2014, 2015 a), Waldpolitik 2030 (BAFU 2013), NFA-Programme (2015 b, 2015 c), weitere? (BAFU u.a., Kantone)
- Rote Liste und Liste prioritäre Arten (BAFU 2011) (Infoflora, BAFU)
- Waldreservate-Kataster (online www.map.geo.admin.ch) (impuls, BAFU)
- Generhaltungsgebiete und Generhaltungsgebiete-Kataster (Rudow 2016) (ETHZ, BAFU)
- Erhaltungsplantagen und Samenerntebestände-Kataster (online www.nks.admin.ch) (Kantone, BAFU)
- Forstliches Vermehrungsgut (Frank et al 2017) (Baumschulen?, Kantone?, WSL?, BAFU?)
- EUFORGEN/EFI: Mitgliedschaft (BAFU), Vertretung/*National Coordinator* (ETHZ, Peter Rotach)
- EUFGIS: via EUFORGEN-Mitgliedschaft (BAFU), Vertretung/*National Focal Point* (ETHZ, Andreas Rudow)
- GENTREE: Forschungszusammenarbeit, Vertretung (WSL, Felix Gugerli)

Folgerung von Leitlinien

Effektivität und Priorisierung	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Mitteleinsatz ist immer auch auf Zielkonformität/Optimalität der Massnahmen zu prüfen (Effektivität = Optimalität x Effizienz), dazu gehört auch eine zweckmässige Wirksamkeitskontrolle. ➤ Priorisierung erlaubt ein iteratives Vorgehen und eine Staffelung des Mitteleinsatzes. Dabei gilt die Faustregel: Notwendigkeit vor Dringlichkeit (Notwendigkeit + Dringlichkeit – Machbarkeit).
Handlungsbedarf	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Eine nationale Strategie Forstliche Genressourcen 2019-2030 ist notwendig. Ein substanzieller Vorschlag für die Priorisierung von Handlungsbedarf, inkl. Forschungsbedarf, liegt vor. ➤ Der Fokus der Erhaltung forstlicher Genressourcen liegt auf 35 einheimischen Arten 1.+2. Priorität, inkl. besonders trockenheitstoleranten und besonders gefährdeten Baumarten. ➤ Die Liste National Prioritärer Arten ist um die Kategorie funktional bedeutender Gehölzarten und die entsprechenden Baumarten zu ergänzen.



12. Der Mitteleinsatz kann mit Fokus auf das Kriterium Notwendigkeit und durch eine Wirkungskontrolle optimiert sowie zweckmässig gestaffelt werden.

13. Der Vorschlag für die Priorisierung von Handlungsbedarf, inkl. Forschungsbedarf, muss in die Entwicklung einer nationalen Strategie Forstliche Genressourcen 2019-2030 einfließen und deren Umsetzung nun zügig an die Hand genommen werden.

7 Schlussfolgerung

Leitlinien

Biologische Grundlagen

1. Angezeigt ist eine langfristig angelegte dynamische Erhaltung durch Förderung von Selbsterhaltungsmechanismen – keine statische Erhaltung.
2. Zur Erfassung und zum Verständnis der Metapopulationen der relevanten Gehölzarten ist ein langfristig koordiniertes demographisches und genetisches Monitoring notwendig.

Anpassungsdruck (Gefährdung)

3. Auch im Hinblick auf den Klimawandel liegt der Fokus primär auf bereits heute gefährdeten und potentiell gefährdeten Arten.
4. Durch Klimawandel ausgelöste ökologische Interaktionen oder verstärkte Störungsregime, die zu massiver Gefährdung führen, erfordern zusätzlich punktuell rasche zielgerichtete Massnahmen zur Sicherung der genetischen Diversität.
5. Notwendig ist ein langfristig koordiniertes demographisches und genetisches Monitoring zur Erfassung und zum Verständnis der Metapopulationen der Arten, inkl. Erfassung von Teilpopulationen und Erfassung von Verjüngung.

Anpassungsreaktion (Selbsterhaltung)

6. Baumarten haben ein beträchtliches Potential zur raschen Anpassung durch Plastizität.
7. Die Schweiz verfügt mit Jura und Alpen über mächtige Migrationspuffer.
8. Längerfristige genetische Anpassungen sowie Migrationsprozesse sind aufgrund vielfältiger ökologischer Überlagerungen nicht zuverlässig abschätzbar.
9. Zum besseren Verständnis (epi-)genetischer Anpassungsvorgänge sowie von Migrationsprozessen ist ein langfristig angelegtes genetisches Monitoring für exemplarische Zielarten notwendig.

Umgang mit Komplexität und Ungewissheit

10. Angesichts der Komplexität der Erhaltung Forstlicher Genressourcen unter Klimawandel ist ein Paradigmenwechsel hin zu einem kybernetischen Ansatz bei der Generhaltung angezeigt.
11. Notwendig ist ein grossräumig angelegtes Netz aus Generhaltungsgebieten sowie ein entsprechend koordiniertes langfristiges und grossräumiges demographisches und genetisches Monitoring der Zielpopulationen dieser Generhaltungsgebiete. Aufgrund der jüngsten Entwicklung in der Informatik sind die dazu nötigen Datenbanksysteme technisch machbar.

Priorisierung und Handlungsbedarf

12. Der Mitteleinsatz kann mit Fokus auf das Kriterium Notwendigkeit und durch eine Wirkungskontrolle optimiert sowie zweckmässig gestaffelt werden.
13. Der Vorschlag für die Priorisierung von Handlungsbedarf, inkl. Forschungsbedarf, sollte nun in die Entwicklung einer nationalen Strategie Forstliche Genressourcen 2019-2030 einfließen und deren Umsetzung nun zügig an die Hand genommen werden.

Fazit

Die Synopsis der direkt aus den einzelnen thematischen Kapiteln gefolgerten Leitlinien zum Wissensstand und Handlungsbedarf liest sich bereits wie ein Fazit.

Darin zeigt sich einerseits, dass unsere Forstlichen Genressourcen bezüglich Anpassung an den Klimawandel durchaus über substanzielle Potenziale verfügen. In ihrer Summe dürften unsere Gehölzarten auch längerfristig den Bestand unserer Wälder sicher stellen. Andererseits wird klar, dass wir über das Verhalten der einzelnen Arten und ihr Zusammenspiel in einer sich verändernden Umwelt kaum konkrete Aussagen machen können, solange wir die demographischen und genetischen Strukturen der Metapopulation aller Arten und ihre darauf aufbauenden Interaktionen nicht genauer kennen und verstehen.

Gleichzeitig sind heute erstmals die Voraussetzungen genau dafür gegeben: wir verfügen inzwischen über ein ausreichendes theoretisches Verständnis des biologischen Systems und neuerdings auch über die Möglichkeit, immense Datenmengen rationell zu speichern und zu verarbeiten. Das erlaubt uns, zu einem kybernetischen Ansatz bei der Generhaltung zu wechseln und sukzessive ein konkretes explizites Verständnis aller realen Elemente des Systems zu erlangen.

Das grossräumig und langfristig ausgerichtete Monitoring in einem repräsentativen Netz von Generhaltungsgebieten und die entsprechende Datenbank bilden das notwendige Instrumentarium für die Erschliessung der zu diesem System gehörigen grossräumigen und langfristigen Prozesse. Monitoring wird als zentrales Element in vier der dreizehn Leitlinien genannt. Tatsächlich besteht die einleitend erwähnte erforderliche spezielle Brille aus Monitoring-Daten, die grossräumig und über längere Zeiträume wiederholt erhoben werden. Diese Zeitreihendaten werden in Zukunft ein explizites Systemverständnis ermöglichen und für unser Verständnis des komplexen biologischen Systems das sein, was das Teleskop und das Radioteleskop für das Verständnis des Weltraums oder was das Mikroskop und das Elektronenrastermikroskop für die Zellbiologie bedeuten.

Entsprechend der letzten gefolgerten Leitlinie gilt es nun, diese Chance und Herausforderung zu packen und Strategieentwicklung und Umsetzung zu forcieren. Der vorliegende Bericht liefert einen Überblick über den aktuellen Handlungsbedarf, der nun angegangen werden kann und soll. Da unsere Nachbarländer vor ähnlichen Weichenstellungen stehen, bietet sich eine internationale Zusammenarbeit im europäischen Programm für Forstliche Genressourcen EUFORGEN an und dürfte erhebliche Synergien mit sich bringen.



Der mächtige Migrationspuffer der Alpen beherbergt seit langem, ursprünglich aus dem borealen Nadelwald stammende, inzwischen zu eigenen Arten ausdifferenzierte typische Alpenendemiten, Oktober 2010, Pontresina GR.

8 Quellen

- Aitken, S.N., Yeaman, S., Holliday, J.A., Wang, T. & Curtis-McLane, S. 2008. Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evolutionary Applications* 1: 95–111.
- Alberto, F.J., Aitken, S.N., Alía, R., González-Martínez, S.C., Hänninen, H., Kremer, A., Lefèvre, F., Lenormand, T., Yeaman, S., Whetten, R., Savolainen, O. 2013. Potential for evolutionary responses to climate change – evidence from tree populations. *Global Change Biology* 19(6): 1645-1661.
- Allen, C.D., Macalady, A.K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D.D., Hogg, E.H., Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J.H., Allard, G., Running, S.W., Semerci, A., Cobb, N., 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *For. Ecol. Manage.* 259, 660–684.
- Aravanopoulos, F.A., Tollesrud, M.M., Graudal, L., Koskela, J., Kätzel, R., Soto, A., Nagy, L., Pilipovic, A., Zhelev, P., Božic, G., Bozzano, M. 2015. Development of genetic monitoring methods for genetic conservation units of forest trees in Europe. European Forest Genetic Resources Programme (EUFORGEN), Bioversity International, Rome, Italy. xvi+46 S.
- Arend, M., Braun, s., Buttler, A., Siegwolf, R.T.W., Signarbiweux, C., Körner, C., 2016. Ökophysio-logie: reaktionen von Waldbäumen auf Klimaänderungen. In: Plüss, A.R., Augustin, s., Brang, P. (Red.): Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien. Bundesamt für Umwelt, Bern und Eidgenössischer Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf; Haupt, Bern. S. 77-91.
- BAFU (Hrsg.), 2011: Liste der National Prioritären Arten. Vollzugshilfe zum Artenmanagement. Bundesamt für Umwelt, Bern. 132 S.
- BAFU (Hrsg.), 2012 a. Strategie Biodiversität Schweiz. Zur besseren Lesbarkeit gestaltete Version der entsprechenden Strategie des Bundesrats. Bundesamt für Umwelt, Bern. PDF-Download Nr. 1060: 89 S.
- BAFU (Hrsg.), 2012 b. Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz. Ziele, Herausforderungen und Handlungsfelder. Erster Teil der Strategie des Bundesrates vom 2. März 2012. Bundesamt für Umwelt, Bern. 64 S.
- BAFU (Hrsg.), 2013. Waldpolitik 2020: Visionen, Ziele und Massnahmen für eine nachhaltige Bewirtschaftung des Schweizer Waldes. Bundesamt für Umwelt, Bern. 66 S.
- BAFU (Hrsg.), 2014. Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz. Aktionsplan 2014–2019. Zweiter Teil der Strategie des Bundesrates vom 9. April 2014. Bundesamt für Umwelt, Bern. 100 S.
- BAFU (Hrsg.), 2015 a. Anpassung an den Klimawandel. Bedeutung der Strategie des Bundesrates für die Kantone. Bundesamt für Umwelt, Bern. 48 S.
- BAFU (Hrsg.) 2015 b. Biodiversität im Wald: Ziele und Massnahmen. Bundesamt für Umwelt, Bern. 100 S. Umwelt-Vollzug. 286 S.
- BAFU (Hrsg.) 2015 c. Handbuch Programmvereinbarungen im Umweltbereich 2016-2019. Bundesamt für Umwelt, Bern. 100 S. Umwelt-Vollzug. 266 S.
- Barton, N.H., Whitlock, M.C., 1997. The evolution of metapopulations. In: Hanski, I.A., Gilpin, M.E. (eds) 1997: Metapopulation biology. (1997): 183-214. Academic Press, San Diego.
- Bitz, M., 1981. Entscheidungstheorie. Vhalen München. 439 S.
- Bonfils, P., Bolliger, M. (Red.), 2003. Wälder von besonderem genetischen Interesse (BGI-Wälder). Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Bern (heute BAFU, Bern). Vollzug Umwelt. 60 S.
- Chaot, B., Jansen, S., Brodribb, T.J., Cochard, H., Delzon, S., Bhaskar, R., Bucci, S.J., Feild, T.S., Gleason, S.M., Hacke, U.G., Jacobsen, A.L., Lens, F., Maherali, H., Martinez-Vilalta, J., Mayr, S., Mencuccini, M., Mitchell, P.J., Nardini, A., Pittermann, J., Pratt, R.B., Sperry, J.S., Westoby, M., Wright, I.J., Zanne, A.E., 2012. Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature, Research Letters*, 491: 752-755.

de Vries, S.M.G., Alan, M., Bozzano, M., Burianek, V., Collin, E., Cottrell, J., Ivankovic, M., Kelleher, C.T., Koskela, J., Rotach, P., Vietto, L., Yrjänä, L., 2015. Pan-European strategy for genetic conservation of forest trees and establishment of a core network of dynamic conservation units. European Forest Genetic Resources Programme (EUFORGEN), Bioversity International, Rome, Italy. xii + 40 S.

EUFORGEN, 2010 ff. EUFGIS-Portal. Online: portal.eufgis.org.

EUFORGEN, 2009. Distribution map of *Malus sylvestris*. And: Distribution map of *Acer campestre*. EUFORGEN 2009, www.euforgen.org.

EUFORGEN, 2010 ff. EUFGIS-Portal. Online: portal.eufgis.org.

European commission, Preparatory action on EU plant and animal genetic resources (AGRI-2013-EVAL-7), 2015. FGR in Europe in a changing climate: challenges and needs for conservation. Workshop report, 29 S.

Frank, A., Brang, P., Sperisen, c., Heiri, C., 2017. Umgang mit forstlichem Vermehrungsgut in einem sich ändernden Klima (FoVeKlim). Schlussbericht des Pilotprojektes. Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf. 113 S.

Franklin, I.R., 1980. Evolutionary change in small populations. In: Soulé M.E., Wilcox, B.A. (eds.): Conservation Biology: An evolutionary-Ecological Perspective. Sinauer, Sunderland, p. 135–150.

Frey, H.-U., 2003. Die Verbreitung und die waldbauliche Bedeutung der Weisstanne in den Zwischenalpen. Ein Beitrag für die waldbauliche Praxis. Schweiz. Z. Forstwes. 154, 3-4: 90-98.

Gilpin M.E., Soulé M.E., 1986. Minimum Viable Populations: Processes of Species Extinction. In: Soulé M.E.: Conservation Biology: The Science of Scarcity and Diversity. Sinauer, Sunderland, p. 19–34.

Gugerli, F., Frank, A., Rellstab, C., Pluess, A.R., Moser, B., Arend, M., Sperisen, C., Wohlgemuth, T., Heiri, C., 2016. Genetische Variation und lokale Anpassung bei Waldbaumarten im Zeichen des Klimawandels. In: Plüss, A.R., Augustin, s., Brang, P. (Red.): Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien. Bundesamt für Umwelt, Bern und Eidgenössischer Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf; Haupt, Bern. S. 93-113.

Hampe, A. & Petit, R.J. 2005. Conserving biodiversity under climate change: the rear edge matters. Ecology Letters 8(5): 461–7.

Hamrick, J.L. 2004. Response of forest trees to global environmental changes. Forest Ecology and Management, 197(1-3): 323-335.

Hanski, I., Gyllenberg, M., 1993. Two general metapopulation models and the core-satellite species hypothesis. Am. Nat. 142: 17-41.

Hanski, I., 1999. Metapopulation Ecology. Oxford Series in Ecology and Evolution. 313 S.

Holderegger, R., U. Kamm, F. Gugerli, 2006. Adaptive vs. neutral genetic diversity: implications for landscape genetics. Landscape Ecology 21(6): 797-807.

Holderegger, R., Herrmann, D., Poncet, B., Gugerli, F., Thuiller, W., Taberlet, P., Gielly, L., Rioux, D., Brodbeck, S., Aubert, S., Manel, S., 2008. Land ahead: using genome scans to identify molecular markers of adaptive relevance. Plant Ecology & Diversity 1(2): 273-283.

Hume, D., 1748. An Enquiry Concerning Human Understanding. ?

IUCN 2012. IUCN Red List Categories and Criteria: Version 3.1. Second edition. Gland, Switzerland and Cambridge, UK. IUCN. Iv + 32 p.

Judd, W.S., Campbell, C.S., Kellog, E.A., Stevens, P.F., Donoghue, M.J., 2008. Plant systematics: a phylogenetic approach. Sinauer Associates, Sunderland. 611 p.

Kelleher, C. T., de Vries, S.M.G., Baliuckas, V., Bozzano, M., Frýdl, J., Gonzalez Goicoechea, P., Ivankovic, M., Kandemir, G., Koskela, J., Koziol, C., Liesebach, M., Rudow, A., Vietto, L., Zhelev Stoyanov P., 2015. Approaches to the Conservation of Forest Genetic Resources in Europe in the Context of Climate Change. European Forest Genetic Resources Programme (EUFORGEN), Bioversity International, Rome, Italy. xiv+46 S.

Kimura, M., Weiss, G.H., 1964: The Stepping Stone Model of Population Structure and the Decrease of Genetic Correlation with Distance. Genetics, 49(4): 561-576.

- Klein, T., Yakir, D., Buchmann, N., Grünzweig, J.M., 2014. Towards an advanced assessment of the hydrological vulnerability of forests to climate change-induced drought. *New Phytologist*, 201/3: 712-716.
- Kramer, K., van der Werf, D.C., 2010: Equilibrium and non-equilibrium concepts in forest genetic modelling: population- and individually-based approaches. *Forest Systems* 19(SI). 100-112.
- Kremer, A., 2007. How well can existing forests withstand climate change? In: *Climate change and forest genetic diversity: Implications for sustainable forest management in Europe*. Rome: Bioversity International; 2007. p. 3–17.
- Kremer, A., Vinceti, B., Alia, R., Burczyk, J., Cavers, S., Degen, B., Finkeldey, R., Fluch, S., Gömöry, D., Gurgerli, F., Koelewijn, H.P., Koskela, J., Lefèvre, F., Morgante, M., Mueller-Starck, G., Plomion, C., Taylor, G., Turok, J., Savolainen, O., Ziegenhagen, B., 2011. Forest ecosystems genomics and adaptation:: EVOLTREE conference report. *Tree Genetics & Genomes* (2011) 7:869-875.
- Kremer, A., Ophélie, R., Robledo-Arnuncio, J.J., Guillaume, F., Bohrer, G., Nathan, R., Bridle, J.R., Gomulkiewicz, R., Klein, E.K., Ritland, K., Kuparinen, A., Gerber, S., Schueler, S., 2012. Long-distance gene flow and adaptation of forest trees to rapid climate change. *Ecology Letters* 15: 378-392.
- Küchler, M., Küchler, H., Bedolla, A., Wohlgemuth, T., 2015: Response of Swiss forest to management and climate change in the last 60 years. *Ann. For. Sci.* 72: 311-320
- Lang, G., 1994. Quartäre Vegetationsgeschichte Europas. Fischer, Jena. 462 S.
- Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., Garcia-Gonzalo, J., Seidl, R., Delzon, S., Corona, P., Kolström, M., Lexer, M., Marchetti, M., 2009. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* 259: 698-709
- Loarie, S. R., Duffy, P.H., Hamilton, H., Asner, G.P., Field, C.B., Ackerly, D.D., 2009. The velocity of climate change. *Nature* 462: 1052-1055.
- MacArthur, R.H., Wilson, E.O., 1967. *The Theory of Island Biogeography*. Princeton University Press, Princeton.
- Mayr, E., 1942. *Systematics and the origin of species: From the viewpoint of a zoologist*. Columbia University Press, New York.
- Mendel, G., 1866. Versuche über Pflanzenhybriden. *Verhandlungen des Naturforschenden Vereines in Brünn*. Bd. IV: 3-47.
- Ordoñez, A., Williams, J.W., 2013. Climatic and biotic velocities for woody taxa distributions over the last 16000 years in eastern North America. *Ecology Letters* 16: 773-781.
- Potter, K.M., Crane, B.S., 2010. *Forest Tree Genetic Risk Assessment System: A Tool for Conservation Decision-Making in Changing Times*. User Guide Version 1.2, USDA Forest Service, 47 p.
- Petit, R.J., Csaikl, U.M., Bordacs, S., Burg, K., Coart, E., Cottrell, J., van Dam, B., Deans, J.D., Dumolin-Lapègue, S., Fineschi, S., Finkeldey, r., Gillies, a., Glaza, I., Goicoechea, P.G., Jensen, J.S., König, A.O., Lowe, A., Madsen, S.F., Matyas, G., Munro, R.C., Olalde, M., Pemongea, M.-H., Popescu, F., Slade, D., Tabbener, H., Taurichinii, D., de Vries, S.G.M., Ziegenhagen, b., Kremer, A., 2002. "Chloroplast DNA variation in European white oaks: Phylogeography and patterns of diversity based on data from over 2600 populations." *Forest Ecology and Management* 156(1–3): 5-26.
- Plüss, A.R., Augustin, s., Brang, P. (Red.), 2016: *Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien*. Bundesamt für Umwelt, Bern und Eidgenössischer Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf; Haupt, Bern. 447 S.
- Resnik, M.D., 1987: *Choices. An introduction to decision theory*. Minnesota Press, Minneapolis. 221 S.
- Reznik, D.N., Ricklefs, R.E., 2009: Darwin's bridge between microevolution and macroevolution. *Nature* 457: 837-842.
- Rudow, A., Schwab, P., 2006: *EFFOR2-Grundlagen. Baumartenvielfalt + genetische Ressourcen*. Bundesamt für Umwelt, Bern und Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich. EFFOR2 (heute NFA Waldbiodiversität) Projektordner („oranger Ordner“). 62 S.
- Rudow, A., Rotach, P., Küchli, C., Dürr, C., Schmid, S., Bolliger, M., 2013: *The State of the World's Forest Genetic Resources*. FAO Country Report Switzerland 2012. Bundesamt für Umwelt, Bern und Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich. 52 S.

- Rudow, A., 2016. Generhaltung in bestehenden Waldreservaten. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 167/6: 344-347.
- Rudow, A., Westergren, M., Aliona, M., Baliuckas, V., Buiteveld, J., Buriánek, V., Cengel, B., Cottrell, J., de Dato, G., Ducci, F., Järve, K., Kajba, D., Kelleher, C., Kundrotas, V., Lefèvre, F., Liesebach, M., Nagy, L., Stojnić, S., Villar, M., Yrjänä, L., Bozzano, M., (in Vorbereitung): Decision support tool for the management of dynamic genetic conservation units. European Forest Genetic Resources Programme (EUFORGEN), European Forest Institute, Bonn, Germany.
- Savolainen O, Pyhäjärvi T, Knürr T., 2007. Gene Flow and Local Adaptation in Trees. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics 38(1):595–619.
- Schueler, S., Kapeller S., 2013: Effects of Weather Conditions During Seed Maturation on the Adaptive Performance of Seedlings an its contribution to the Adaptation of Trees to Future Climates. Talk at ClimTree conference, Zurich.
- Serra-Varela, M.J., Westergren, M., Marchi, M., Picard, N., Cavers, S., Notivol, E., Piotti, A., Alizoti, P., Bozzano, M., González-Martínez, S., Ducci, F., Grivet, D., Aravanopoulos, F., Fady, B., Vendramin, G.G., Alía, R., (in Vorbereitung). Marginality indexes in European tree species (working title).
- Simberloff, D., 2013: Introduced Species, Impacts and Distribution of. Encyclopedia of Biodiversity, p.357-368.
- Sutton, W.S., 1903: The chromosomes in heredity. Biol. Bull. 4: 231-251.
- Wegener, A., 1915: Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. Serie Sammlung Vieweg, 23: 94 S.
- Wright, S., 1932. The roles of mutation, inbreeding, crossbreeding and selection in evolution. Proceedings of the 6th International Congress of Genetics: 356-366.
- Zimmermann, N.E., Schmatz, D.R., Gallien, L., Körner, C., Huber, B., Frehner, M., Küchler, M., Psomas, A., 2016. Baumartenverbreitung und Standorteignung. In: Plüss, A.R., Augustin, s., Brang, P. (Red.): Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien. Bundesamt für Umwelt, Bern und Eidgenössischer Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf; Haupt, Bern. S. 199-221.

Annex 1 – Priorisierung von Arten

Ergänzte und aktualisierte Artenliste des FAO-Länderberichts Schweiz (Rudow et al 2013), sortiert nach Priorität aufgrund von allgemeiner Bedeutung (G, general) sowie spezieller ökonomischer Bedeutung (V, value), Gefährdung (T, threat) und Trockenheitstoleranz (drought tolerance, D). Vergleich der Priorität mit der Liste der National Prioritären Arten (BAFU 2011).

Species	prio BAFU 2011	rank group	G prio	V	V prio	T	T prio	D	D prio
<i>Abies alba</i>		1a	2	V1	-1				
<i>Fagus sylvatica</i>		1a	2	V1	-1				
<i>Picea abies</i>		1a	2	V1	-1				
<i>Fraxinus excelsior</i>		1b	2					D2	-1
<i>Pinus sylvestris</i>		1b	2					D2	-1
<i>Pinus uncinata</i>		1b	2					D2	-1
<i>Quercus petraea</i>		1b	2					D2	-1
<i>Acer pseudoplatanus</i>		2a	2						
<i>Castanea sativa</i>		2a	2						
<i>Larix decidua</i>		2a	2						
<i>Pinus cembra</i>		2a	2						
<i>Quercus robur</i>		2a	2					D3	
<i>Acer opalus</i>		2b	3			T3		D2	-1
<i>Celtis australis</i>		2b	3			T3		D2	-1
<i>Fraxinus ornus</i>		2b	3			T3		D2	-1
<i>Ostrya carpinifolia</i>		2b	3					D2	-1
<i>Quercus cerris</i>		2b	3			T3		D2	-1
<i>Quercus pubescens</i>		2b	3			T3		D2	-1
<i>Sorbus aria</i>		2b	3					D2	-1
<i>Taxus baccata</i>		2b	3			T3		D2	-1
<i>Pyrus nivalis</i>	4	2b/2c	3			T2	-1	D2	-1
<i>Pyrus pyraeaster</i>		2b/2c	3			T1	-1	D2	-1
<i>Sorbus domestica</i>	3	2b/2c	3			T1	-1	D2	-1
<i>Sorbus torminalis</i>		2b/2c	3			T2	-1	D2	-1
<i>Sorbus x latifolia</i>		2b/2c	3			T2	-1	D2	-1
<i>Malus sylvestris</i>		2c	3			T2	-1		
<i>Populus alba</i>		2c	3			T2	-1		
<i>Ulmus laevis</i>		2c	3			T1	-1		
<i>Acer campestre</i>		3a	3					D3	
<i>Acer platanoides</i>		3a	3						
<i>Alnus glutinosa</i>		3a	3						
<i>Alnus incana</i>		3a	3						
<i>Betula pendula</i>		3a	3						
<i>Betula pubescens</i>		3a	3						
<i>Carpinus betulus</i>		3a	3						
<i>Juglans regia</i>		3a	3						

Species	prio BAFU 2011	rank group	G prio	V	V prio	T	T prio	D	D prio
<i>Populus nigra</i>		3a	3			T3			
<i>Populus tremula</i>		3a	3						
<i>Populus x canescens</i>		3a	3						
<i>Prunus avium</i>		3a	3						
<i>Salix alba</i>		3a	3						
<i>Salix caprea</i>		3a	3						
<i>Salix fragilis</i>		3a	3			T3			
<i>Sorbus aucuparia</i>		3a	3						
<i>Tilia cordata</i>		3a	3					D3	
<i>Tilia platyphyllos</i>		3a	3					D3	
<i>Ulmus glabra</i>		3a	3					D3	
<i>Ulmus minor</i>		3a	3			T3		D3	
<i>Amelanchier ovalis</i>		3b	4					D2	-1
<i>Arctostaphylos uva-ursi</i>		3b	4					D2	-1
<i>Berberis vulgaris</i>		3b	4					D2	-1
<i>Buxus sempervirens</i>		3b	4					D2	-1
<i>Colutea arborescens</i>		3b	4			T3		D2	-1
<i>Cotinus coggygria</i>		3b	4			T3		D1	-1
<i>Cotoneaster integerrimus</i>		3b	4					D1	-1
<i>Cotoneaster tomentosus</i>		3b	4					D1	-1
<i>Cytisus scoparius</i>		3b	4					D2	-1
<i>Daphne alpina</i>		3b	4			T3		D2	-1
<i>Daphne laureola</i>		3b	4					D2	-1
<i>Daphne striata</i>		3b	4					D2	-1
<i>Erica carnea</i>		3b	4					D2	-1
<i>Hippocrepis emerus</i>		3b	4					D2	-1
<i>Hippophaë rhamnoides</i>		3b	4					D2	-1
<i>Juniperus communis</i>		3b	4					D2	-1
<i>Juniperus sabina</i>		3b	4					D2	-1
<i>Loiseleuria procumbens</i>		3b	4					D2	-1
<i>Pinus mugo</i>		3b	4					D2	-1
<i>Polygala chamaebuxus</i>		3b	4					D2	-1
<i>Prunus mahaleb</i>		3b	4					D1	-1
<i>Prunus spinosa</i>		3b	4					D2	-1
<i>Rhamnus alpinus</i>		3b	4					D2	-1
<i>Rhamnus catharticus</i>		3b	4					D2	-1
<i>Rhamnus pumila</i>		3b	4					D1	-1
<i>Rosa canina</i>		3b	4					D2	-1
<i>Ruscus aculeatus</i>		3b	4					D2	-1
<i>Sorbus chamaemespilus</i>		3b	4					D2	-1
<i>Viburnum lantana</i>		3b	4					D2	-1

Species	prio BAFU 2011	rank group	G prio	V	V prio	T	T prio	D	D prio
<i>Daphne cneorum</i>	3	3b/3c	4			T1	-1	D1	-1
<i>Ephedra helvetica</i>	1	3b/3c	4			T2	-1	D1	-1
<i>Rhamnus saxatilis</i>	4	3b/3c	4			T2	-1	D1	-1
<i>Rosa chavinii</i>	3	3b/3c	4			T2	-1	D2	-1
<i>Rosa gallica</i>	3	3b/3c	4			T1	-1	D2	-1
<i>Rosa majalis</i>	2	3b/3c	4			T2	-1	D2	-1
<i>Rosa obtusifolia</i>	4	3b/3c	4			T2	-1	D2	-1
<i>Rosa rhaetica</i>	4	3b/3c	4			T2	-1	D2	-1
<i>Rosa stylosa</i>	4	3b/3c	4			T2	-1	D2	-1
<i>Staphylea pinnata</i>	4	3b/3c	4			T2	-1	D2	-1
<i>Betula humilis</i>	1	3c	4			T1	1		
<i>Betula nana</i>	3	3c	4			T2	-1		
<i>Empetrum nigrum</i>	4	3c	4			T2	-1		
<i>Lonicera periclymenum</i>		3c	4			T3	1		
<i>Mespilus germanica</i>		3c	4			T3	1	D3	
<i>Myricaria germanica</i>		3c	4			T3	1		
<i>Rosa mollis</i>	2	3c	4			T1	-1	D3	
<i>Salix alpina</i>	2	3c	4			T1	-1		
<i>Salix apennina</i>	3	3c	4			T2	-1		
<i>Salix glabra</i>	4	3c	4			T1	-1		
<i>Salix laggeri</i>	1	3c	4			T2	-1		
<i>Salix myrtilloides</i>	1	3c	4			T1	-1		
<i>Salix phylicifolia</i>	2	3c	4			T1	-1		
<i>Salix x hegetschweileri</i>	1	3c	4			T1	-1		
<i>Vitis sylvestris</i>	2	3c	4			T1	-1		
<i>Pinus nigra</i>		3d	5	V1	-1			D2	-1
<i>Pseudotsuga menziesii</i>		3d	5	V1	-1			D2	-1
<i>Robinia pseudoacacia</i>		3d	5	V1	-1			D2	-1
<i>Alnus viridis</i>		4a	4						
<i>Andromeda polifolia</i>		4a	4						
<i>Arctostaphylos alpina</i>		4a	4						
<i>Calluna vulgaris</i>		4a	4						
<i>Clematis alpina</i>		4a	4						
<i>Clematis vitalba</i>		4a	4						
<i>Cornus mas</i>		4a	4						
<i>Cornus sanguinea</i>		4a	4					D3	
<i>Corylus avellana</i>		4a	4					D3	
<i>Crataegus laevigata</i>		4a	4					D3	
<i>Crataegus monogyna</i>		4a	4					D3	
<i>Daphne mezereum</i>		4a	4						
<i>Dryas octopetala</i>		4a	4					D3	
<i>Euonymus europaea</i>		4a	4					D3	
<i>Frangula alnus</i>		4a	4						

Species	prio BAFU 2011	rank group	G prio	V	V prio	T	T prio	D	D prio
<i>Hedera helix</i>		4a	4						
<i>Ilex aquifolium</i>		4a	4						
<i>Laburnum alpinum</i>		4a	4					D3	
<i>Laburnum anagyroides</i>		4a	4					D3	
<i>Ligustrum vulgare</i>		4a	4					D3	
<i>Lonicera alpigena</i>		4a	4						
<i>Lonicera caerulea</i>		4a	4						
<i>Lonicera nigra</i>		4a	4						
<i>Lonicera xylosteum</i>		4a	4					D3	
<i>Prunus cerasifera</i>		4a	4					D3	
<i>Prunus cerasus</i>		4a	4						
<i>Prunus padus</i>		4a	4						
<i>Rhododendron ferrugineum</i>		4a	4						
<i>Rhododendron hirsutum</i>		4a	4						
<i>Ribes alpinum</i>		4a	4						
<i>Ribes petraeum</i>		4a	4						
<i>Ribes uva-crispa</i>		4a	4						
<i>Rosa sherardii</i>	4	4a	4			T3		D3	
<i>Rubus fruticosus</i>		4a	4						
<i>Rubus idaeus</i>		4a	4						
<i>Salix appendiculata</i>		4a	4						
<i>Salix aurita</i>		4a	4						
<i>Salix bicolor</i>		4a	4						
<i>Salix breviserrata</i>		4a	4						
<i>Salix caesia</i>	4	4a	4			T3			
<i>Salix cinerea</i>		4a	4						
<i>Salix daphnoides</i>		4a	4						
<i>Salix eleagnos</i>		4a	4						
<i>Salix foetida</i>		4a	4						
<i>Salix glaucosericea</i>		4a	4						
<i>Salix hastata</i>		4a	4						
<i>Salix helvetica</i>		4a	4						
<i>Salix herbacea</i>		4a	4						
<i>Salix myrsinifolia</i>		4a	4						
<i>Salix pentandra</i>		4a	4						
<i>Salix purpurea</i>		4a	4						
<i>Salix repens</i>		4a	4			T3			
<i>Salix reticulata</i>		4a	4						
<i>Salix retusa</i>		4a	4						
<i>Salix serpillifolia</i>		4a	4						
<i>Salix triandra</i>		4a	4						

Species	prio BAFU 2011	rank group	G prio	V	V prio	T	T prio	D	D prio
<i>Salix viminalis</i>		4a	4						
<i>Salix waldsteiniana</i>		4a	4						
<i>Sambucus nigra</i>		4a	4						
<i>Sambucus racemosa</i>		4a	4						
<i>Vaccinium myrtillus</i>		4a	4						
<i>Vaccinium oxycoccos</i>		4a	4			T3			
<i>Vaccinium uliginosum</i>		4a	4						
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>		4a	4					D3	
<i>Viburnum opulus</i>		4a	4					D3	
<i>Viscum album</i>		4a	4						
<i>Abies grandis</i>		4b	5	V1	-1				
<i>Abies nordmaniana</i>		4b	5	V1	-1				
<i>Chamaecyparis lawsoniana</i>		4b	5	V1	-1			D3	
<i>Cryptomeria japonica</i>		4b	5	V1	-1				
<i>Juglans nigra</i>		4b	5	V1	-1				
<i>Larix kaempferi</i>		4b	5	V1	-1				
<i>Pinus strobus</i>		4b	5	V1	-1				
<i>Populus balsamifera</i>		4b	5	V1	-1				
<i>Populus deltoides</i>		4b	5	V1	-1				
<i>Populus x euramericana</i>		4b	5	V1	-1				
<i>Quercus rubra</i>		4b	5	V1	-1				
<i>Sequoiadendron giganteum</i>		4b	5	V1	-1				
<i>Thuja plicata</i>		4b	5	V1	-1			D3	
<i>Acer monspessulanum</i>		5a	5					D2	-1
<i>Aesculus hippocastanum</i>		5a	5						
<i>Ailanthus altissima</i>		5a	5					D1	-1
<i>Buddleja davidii</i>		5a	5					D2	-1
<i>Catalpa bignonioides</i>		5a	5						
<i>Corylus colurna</i>		5a	5					D3	
<i>Cydonia oblonga</i>		5a	5						
<i>Ficus carica</i>		5a	5					D2	-1
<i>Ginkgo biloba</i>		5a	5						
<i>Liriodendron tulipifera</i>		5a	5						
<i>Malus domestica</i>		5a	5						
<i>Olea europaea</i>		5a	5					D2	-1
<i>Paulownia tomentosa</i>		5a	5						
<i>Picea sitchensis</i>		5a	5						
<i>Platanus orientalis</i>		5a	5						
<i>Platanus x hispanica</i>		5a	5						
<i>Populus trichocarpa</i>		5a	5						

Species	prio BAFU 2011	rank group	G prio	V	V prio	T	T prio	D	D prio
<i>Prunus armeniaca</i>		5a	5					D3	
<i>Prunus domestica</i>		5a	5						
<i>Pyrus communis</i>		5a	5					D3	
<i>Trachycarpus fortunei</i>		5a	5						
<i>Tsuga heterophylla</i>		5a	5						
<i>Cornus sericea</i>		6a	6						
<i>Lonicera henryi</i>		6a	6						
<i>Lonicera japonica</i>		6a	6						
<i>Mahonia aquifolium</i>		6a	6						
<i>Prunus laurocerasus</i>		6a	6						
<i>Prunus serotina</i>		6a	6					D3	
<i>Rhus typhina</i>		6a	6					D2	-1
<i>Ribes nigrum</i>		6a	6						
<i>Ribes rubrum</i>		6a	6						
<i>Rubus armeniacus</i>		6a	6						
<i>Vaccinium microcarpum</i>	2	6a	6						
<i>Viburnum rhytidophyllum</i>		6a	6						
<i>Vitis vinifera</i>		6a	6					D3	