

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/368668025>

# Zukunftsfähigkeit der Baumartenzusammensetzung des Schweizer Waldes

Article in Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen · February 2023

DOI: 10.3188/szf.2023.0076

CITATIONS

4

READS

55

3 authors, including:



**Christian Temperli**

Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research

48 PUBLICATIONS 1,722 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Petia Simeonova Nikolova**

Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research

48 PUBLICATIONS 1,093 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

# Zukunftsfähigkeit der Baumartenzusammensetzung des Schweizer Waldes

Christian Temperli<sup>1,\*</sup>, Petia Nikolova<sup>1</sup>, Peter Brang<sup>1†</sup>

<sup>1</sup> Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL (CH)

† 1963–2022

## Abstract

Der Klimawandel verändert die Wuchsbedingungen der Waldbäume, weshalb langfristig markante Verschiebungen in der Baumartenzusammensetzung des Schweizer Waldes zu erwarten sind. Die TreeApp ist ein Werkzeug für die Forstpraxis zur Ermittlung von Baumarten, die für das zukünftige Klima wahrscheinlich geeignet sind. In dieser Arbeit vergleichen wir Empfehlungen der TreeApp mit der im 4. Landesforstinventar (LFI4) beobachteten Artenzusammensetzung der Bäume ( $\geq 12$  cm Brusthöhendurchmesser [BHD]) und der Verjüngung ( $< 12$  cm BHD), wobei wir auch die Präsenz von potenziellen Samenbäumen berücksichtigten. Wir stellen ein einfaches Bewertungsschema vor, mit dem wir die Stichprobenflächen des LFI in drei Stufen der Zukunftsfähigkeit (Grad der Anpassung an das Klima am Ende dieses Jahrhunderts) einteilen konnten. Schweizweit wurde der Wald auf 57% der Stichprobenflächen als zukunftsfähig, auf 23% als bedingt zukunftsfähig und auf 17% als nicht zukunftsfähig beurteilt. Dabei zeigte sich eine Häufung von nicht zukunftsfähigen Flächen in Fichtenwäldern in den Kantonen Graubünden und Wallis. Im Schutzwald der Voralpen, der Alpen und der Alpensüdseite wurde die Verjüngung auf 25% der Stichprobenflächen als nicht zukunftsfähig eingeschätzt, und auf 22% wurde keine Verjüngung beobachtet. Mit steigendem Fichtenanteil nahm der Anteil des Baumbestands ohne Zukunftsfähigkeit zu. Im Mittelland und im Jura wurde die Verjüngung auf einem grösseren Flächenanteil als zukunftsfähig eingeschätzt als der Baumbestand. Wenn Samenbäume berücksichtigt wurden, war der Stichprobenflächenanteil mit zukunftsfähiger Bestockung um bis zu 16 Prozentpunkte (Voralpen) höher, als wenn nur die Verjüngung betrachtet wurde. Diese Resultate unterstreichen die Notwendigkeit der Förderung einer zukunftsfähigen Verjüngung im Gebirgswald, bieten nützliche Grundlagen für die strategische Waldplanung und tragen so zur Anpassung des Waldes an den Klimawandel bei.

**Keywords:** Adaptation, climate change, decision support, Swiss national forest inventory, tree species suitability  
**doi:** 10.3188/szf.2023.0076

\* Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail christian.temperli@wsl.ch

**D**urch den projizierten Temperaturanstieg und Verschiebungen in der Niederschlagsverteilung werden sich die Wuchsbedingungen und das Störungsregime für Waldbäume markant ändern (Seidl et al 2017, Remund et al 2020). Forschungsergebnisse zeigen seit Jahren, dass sich Wälder dem rasanten Klimawandel nur begrenzt anpassen können (Lindner et al 2010). Dies kann zu vermindertem Baumwachstum (Frank et al 2017), zu erhöhter Anfälligkeit gegenüber Schadorganismen und Störungen wie Windwurf (Dobor et al 2020) sowie zu erhöhter trockenheitsbedingter Baummortalität führen (Etzold et al 2019).

In bewirtschafteten Wäldern ist flächiges Absterben von Bäumen unerwünscht, da dies Leistungen wie den Schutz vor Lawinen und Steinschlag,

die Holzproduktion oder die Erholung gefährdet (Abbildung 1). Die Forstwirtschaft kann mittels Jungwaldpflege und Pflanzungen, bei Durchforstungen und während der Holzernte auf die Baumartenzusammensetzung Einfluss nehmen. Dabei ist die Förderung der Baumartenvielfalt von grösster Wichtigkeit, um Klimarisiken möglichst breit zu verteilen (Brang et al 2016). Die Waldbewirtschaftenden fragen sich folglich, welche Baumarten die zukünftigen Umweltbedingungen ertragen und gefördert werden sollen. Um mögliche umsetzbare Antworten dafür zu liefern, wurden die adaptierten Ökogramme (Frehner & Zürcher-Gasser 2019) und die darauf beruhende Software TreeApp entwickelt.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> www.tree-app.ch



Abb 1 Wie sieht die Zukunft eines heute instabilen Fichtenbestands aus? Foto: C. Temperli

Die TreeApp liefert für jeden Punkt im Schweizer Wald eine Baumartenempfehlung. Dabei werden die Empfehlungen für die Standortstypen im heutigen Klima und unter einem mässigen (RCP4.5) und einem starken (RCP8.5) Klimawandelszenario verbunden. Der TreeApp liegen die Standortstypen nach NaiS (Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald) zugrunde, die einer Vegetationshöhenstufe zugeordnet sind und in einem Ökogramm bezüglich Feuchtigkeit und Boden-pH positioniert werden können. Unter der Annahme der Klimawandelszenarien und der damit einhergehenden Verschiebung der Vegetationshöhenstufen (meistens bergauf) sowie gleichbleibender weiterer Standortverhältnisse bzw. der Ökogrammposition, prognostiziert die TreeApp, welcher Standortstyp an einem bestimmten Ort zukünftig vorherrschen könnte (Zischg et al 2021). Die TreeApp empfiehlt eine Baumart, wenn sie im heutigen Klima eine dominante, beigemischte oder weitere Naturwaldbaumart ist und wenn sie auch für den NaiS-Standortstyp, der unter den Klimawandelszenarien prognostiziert wurde, empfohlen würde. Dabei ist zu beachten, dass die (teilweise gutachterliche) Herleitung von NaiS-Standortstypen, die Klimawandelszenarien und damit auch die TreeApp-

Empfehlungen mit nur schwer einzuschätzenden Unsicherheiten behaftet sind.

In diesem Beitrag nutzen wir die TreeApp-Empfehlungen, um einen Überblick über die Zukunftsfähigkeit des Schweizer Waldes zu gewinnen. Zukunftsfähige Baumarten und Wälder sind solche, die nach heutigen Erkenntnissen an die klimatischen Bedingungen der Zukunft (hier: Ende des 21. Jahrhunderts) angepasst sind (siehe auch Allgaier Leuch et al 2017). Grundlage für unsere Untersuchung sind neben den TreeApp-Empfehlungen rund 6000 Stichprobenflächen des vierten Landesforstinventars (LFI4, 2009–2017, Brändli et al 2020). Der Beitrag soll folgende Fragen beantworten:

1. Auf welchem Anteil der Waldfläche ist die Artenzusammensetzung des Baumbestands und der Verjüngung zukunftsfähig, und gibt es regionale Unterschiede?
2. Unterscheidet sich der Anteil zukunftsfähiger Waldfläche in von unterschiedlichen Baumarten dominierten Wäldern?
3. Wie unterscheidet sich die Zukunftsfähigkeit des Waldes inner- und ausserhalb des Schutzwaldes?

Um diese Fragen zu beantworten, sollen die auf den LFI-Stichprobenflächen vorhandenen Baumarten (separat für den Baumbestand und für die Verjüngung) mit der TreeApp-Empfehlung verglichen und dann die Zukunftsfähigkeit der Baumartenzusammensetzung beurteilt werden.

## Methoden

### LFI-Daten

Wir berücksichtigten die LFI-Stichprobenflächen mit Jungwaldaufnahme im zugänglichen Wald. Dies schliesst Flächen mit ein, auf denen keine Verjüngung vorhanden war. Gebüschwald, Schneisen und Böschungen wurden ausgeschlossen (total 5778 Stichprobenflächen). Für 5778 LFI-Stichprobenflächen wurden die vorkommenden Baumarten mit Brusthöhendurchmesser (BHD)  $\geq 12$  cm auf einem 200-m<sup>2</sup>- und mit BHD  $\geq 36$  cm auf einem 500-m<sup>2</sup>-Probekreis gemessen und deren Grundflächenanteile aufgelistet. Die Verjüngung wurde nach vier Grössenklassen auf konzentrischen Probekreisen erhoben: Baumhöhe 10–39 cm (2.5 m<sup>2</sup>), Baumhöhe 40–129 cm (7.1 m<sup>2</sup>), Baumhöhe 130 cm–3.9 cm BHD (19.6 m<sup>2</sup>) und 4.0–11.9 cm BHD (50.3 m<sup>2</sup>). Für jede Grössenklasse wurde die Anzahl Jungbäume pro Baumart gezählt. Sträucher wurden ausgeschlossen, ausser sie wurden von der TreeApp auf mindestens einer Stichprobenfläche empfohlen (z.B. *Pinus mugo*, *Alnus viridis*, *Ilex aquifolium*).

### Klimaszenarien

Für die Ermittlung der Verschiebung der Vegetationshöhenstufen unter dem Klimawandel wur-



den die Klimaszenarien CH2018 (National Centre for Climate Services 2018) verwendet. Diese umfassen eine Reihe von Emissionsszenarien (Representative Concentration Pathways, RCP). Unter dem mässigen Szenario (RCP4.5) werden für die Jahre 2070–2099 im Vergleich zur Normperiode 1981–2010 für die Nord- und die Südschweiz ein Anstieg der Sommertemperatur (April–August) von 1.8 °C bzw. 2.3 °C und ein Rückgang des Sommerniederschlags von –4.0% bzw. –0.5% prognostiziert. Für das starke Szenario (RCP8.5) ist der Temperaturanstieg beidseits der Alpen 4.4 °C und der Niederschlagsrückgang –17.0% bzw. –24.9%. Die Temperatur- und Niederschlagsdaten wurden von der ursprünglichen 2×2-km-Auflösung auf eine Auflösung von 250 × 250 m skaliert (Remund et al 2020).

**Baumartenempfehlung gemäss TreeApp**

Die Baumartenempfehlung der TreeApp für einen Kartenpunkt (hier LFI-Stichprobenflächen) setzt sich aus der Baumartenempfehlung für den NaiS-Standorttyp im heutigen Klima und den Baumartenempfehlungen für die prognostizierten NaiS-Standorttypen unter dem mässigen RCP4.5 und dem starken RCP8.5 Klimawandelszenario zusammen. Dabei werden die dominanten, wichtige beige-mischte und weitere Naturwaldbaumarten (NWBA) der drei NaiS- Standorttypen berücksichtigt. NWBA sind Baumarten, die im standorttypischen Naturwald vorkommen, wobei Naturalwald «nur so weit menschlich beeinflusst ist, dass sich Baumarten-mischung und Struktur innerhalb einer Baumgeneration in den ursprünglichen Zustand zurückentwickeln können» (Frey et al 2021). Die genauen Regeln zur Zusammensetzung der drei Baumartenempfehlungen sind an anderer Stelle beschrieben.<sup>2</sup> Da für die zusammengesetzte (synthetische) Baumartenempfehlung die Baumartenempfehlungen für das heutige Klima und für die beiden Klimawandelszenarien verwendet werden, kann sie nicht nach mäs-

sigen und starkem Klimawandel differenziert werden. Auf fast der Hälfte der LFI-Stichprobenflächen wurden mehrere (2 bis 7) NaiS-Standorttypen identifiziert. Für jeden dieser NaiS-Standorttypen wurde die synthetische Baumartenempfehlung ermittelt. Wir verwendeten die Vereinigungsmenge der Baumarten über alle synthetischen Empfehlungen einer LFI-Stichprobenfläche.

**Bewertung der Zukunftsfähigkeit**

Wir unterschieden drei Stufen der Zukunftsfähigkeit: «zukunftsfähig», «bedingt zukunftsfähig» und «nicht zukunftsfähig». Dazu beurteilten wir drei Komponenten: 1) die Artenzusammensetzung des Baumbestands mit ≥12 cm BHD, 2) die Zusammensetzung der Verjüngung (<12 cm BHD) und 3) die Zusammensetzung der Verjüngung zusammen mit der Präsenz von potenziellen Samenbäumen (Verjüngung + Samenbäume), die näherungsweise als empfohlene NWBA ≥30 cm BHD auf der LFI-Stichprobenfläche erfasst wurden (Tabelle 1). Zur räumlichen Visualisierung wurde die Beurteilung der Zukunftsfähigkeit des Baumbestands und der Verjüngung + Samenbäume, d.h. der Komponenten 1 und 3, in einer Bewertung kombiniert (Tabelle 2).

Die einleitenden Fragen wurden mit folgenden Auswertungen beantwortet: 1) Wir berechneten die prozentualen Anteile an LFI- Stichprobenflächen mit zukunftsfähiger, bedingt zukunftsfähiger und nicht zukunftsfähiger Waldbestockung nach den LFI-Produktionsregionen (Jura, Mittelland, Voralpen, Alpen und Alpensüdseite) und nach 400-m-Höhenklassen. 2) Hinweise über den Einfluss der Baumartenzusammensetzung auf die Zukunftsfähigkeit sollen folgendes liefern: a) Für die Alpen prüften wir, ob mit zunehmendem Fichtengrundflächenanteil der Anteil LFI- Stichprobenflächen mit zukunftsfähiger Bestockung abnimmt. b) Für das Mittelland prüften wir, wie der Anteil an zukunftsfähiger Bestockung mit den Hauptbaumarten der Bestände (Fichte, Buche, Eiche) variiert. 3) Schliesslich berechneten wir für die Voralpen, die Alpen und die Alpensüdseite die Zukunftsfähigkeitsanteile der LFI- Stichprobenflächen, die sich in- und ausserhalb des SilvaProtect-Schutzwaldperimeters befinden (Losey & Wehrli 2013).

**Resultate**

**Zukunftsfähigkeit nach Produktionsregionen und Höhenklassen**

Schweizweit wurde der Baumbestand auf etwas mehr als der Hälfte (52%) der LFI-Stichprobenflächen als zukunftsfähig eingestuft (Abbildung 2).

| Kategorie             | Baumbestand: Grundflächenanteil von dominanten und wichtigen beigemischten NWBA* | Verjüngung: Stammzahlanteil von dominanten und wichtigen beigemischten NWBA* | Verjüngung + Samenbäume: Präsenz von dominanten und wichtigen beigemischten NWBA* |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Nicht zukunftsfähig   | <10%                                                                             | <10%                                                                         | Verjüngung nicht zukunftsfähig UND Samenbäume nicht präsent                       |
| Bedingt zukunftsfähig | 10–49%                                                                           | 10–49%                                                                       | Verjüngung bedingt zukunftsfähig ODER empfohlene NWBA <30 cm BHD präsent          |
| Zukunftsfähig         | ≥50%                                                                             | ≥50%                                                                         | Verjüngung zukunftsfähig ODER Samenbäume mit BHD ≥30 cm präsent                   |

\* Dominante und wichtige beigemischte NWBA wurden gleichwertig behandelt.

Tab 1 Bewertungsschema für Zukunftsfähigkeit.

2 [www.wsl.ch/de/projekte/baumartenempfehlungen-im-klimawandel.html](http://www.wsl.ch/de/projekte/baumartenempfehlungen-im-klimawandel.html)

Downloaded from <http://meridian.allenpress.com/szf/article-pdf/174/2/76/3195417/2235-1469-174-2-76.pdf> by Lib4RI user on 07 March 2023

| Kategorie              | Fall | Beschreibung der Bewertung                                                            |
|------------------------|------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Nicht zukunfts-fähig   | 1    | Baumbestand und Verjüngung + Samenbäume nicht zukunfts-fähig                          |
|                        | 2    | Baumbestand nicht zukunfts-fähig und keine Verjüngung und keine Samenbäume vorhanden. |
| Bedingt zukunfts-fähig | 1    | Baumbestand und Verjüngung + Samenbäume bedingt zukunfts-fähig                        |
|                        | 2    | Baumbestand zukunfts-fähig und Verjüngung + Samenbäume bedingt zukunfts-fähig         |
|                        | 3    | Entweder Baumbestand oder Verjüngung + Samenbäume nicht zukunfts-fähig                |
|                        | 4    | Baumbestand bedingt zukunfts-fähig und keine Verjüngung vorhanden                     |
|                        | 5    | Baumbestand zukunfts-fähig und keine Verjüngung vorhanden                             |
|                        | 6    | Baumbestand nicht zukunfts-fähig und keine Verjüngung, aber Samenbäume vorhanden      |
| Zukunfts-fähig         | 1    | Baumbestand und Verjüngung + Samenbäume zukunfts-fähig                                |
|                        | 2    | Baumbestand bedingt Zukunfts-fähig und Verjüngung + Samenbäume zukunfts-fähig         |
| Keine Aussage          | 1    | Keine Beobachtung von Bäumen $\geq 12$ cm BHD (N = 132)                               |

**Tab 2** Bewertungsschema zur Zukunftsfähigkeit, basierend auf der Kombination des Baumbestands und der Verjüngung + Samenbäume.

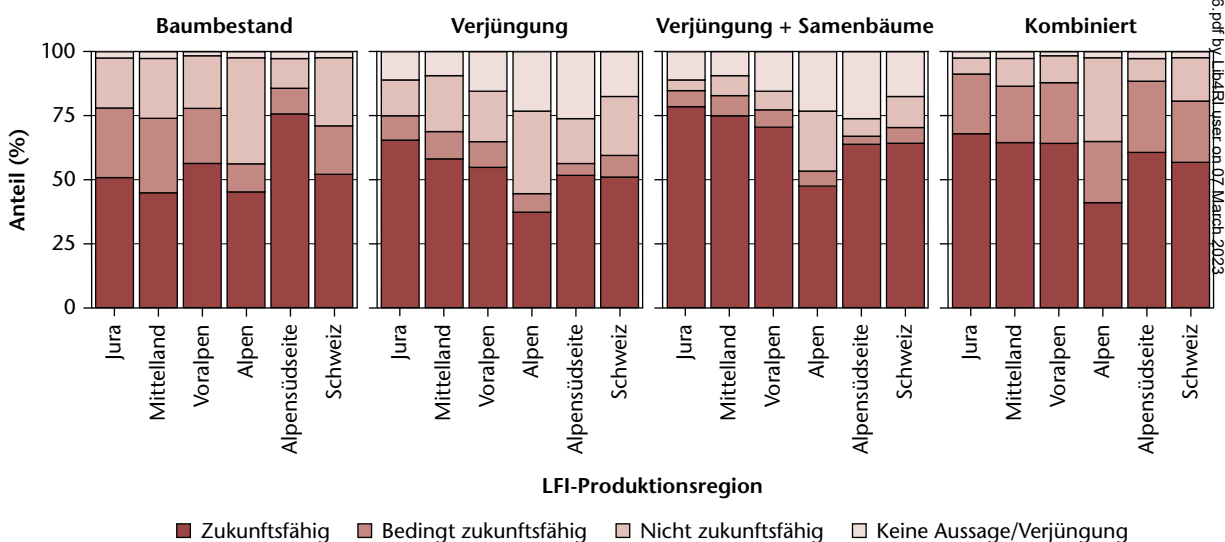
Die regionalen Unterschiede waren jedoch beträchtlich. Auf der Alpensüdseite war der Baumbestand auf 76% und im Mittelland und in den Alpen nur auf 45% der Stichprobenflächen zukunfts-fähig. Im Jura und im Mittelland war ein relativ grosser Anteil (27 bzw. 29%) bedingt zukunfts-fähig. Auffallend ist die Häufung von nicht zukunfts-fähigen Baumbeständen in den Alpen (42%).

Die Verjüngung wurde schweizweit auf 51% der LFI-Stichprobenflächen als zukunfts-fähig eingeschätzt (Abbildung 2). Im Jura waren 66% zukunfts-fähig, in den Alpen jedoch nur 37%. In den Alpen fällt auch der hohe Anteil (32%) an nicht zukunfts-fähiger Verjüngung auf, und es wurde, wie auch auf der Alpensüdseite, auf vielen LFI-Stichprobenflächen (23% bzw. 26%) keine Verjüngung registriert.

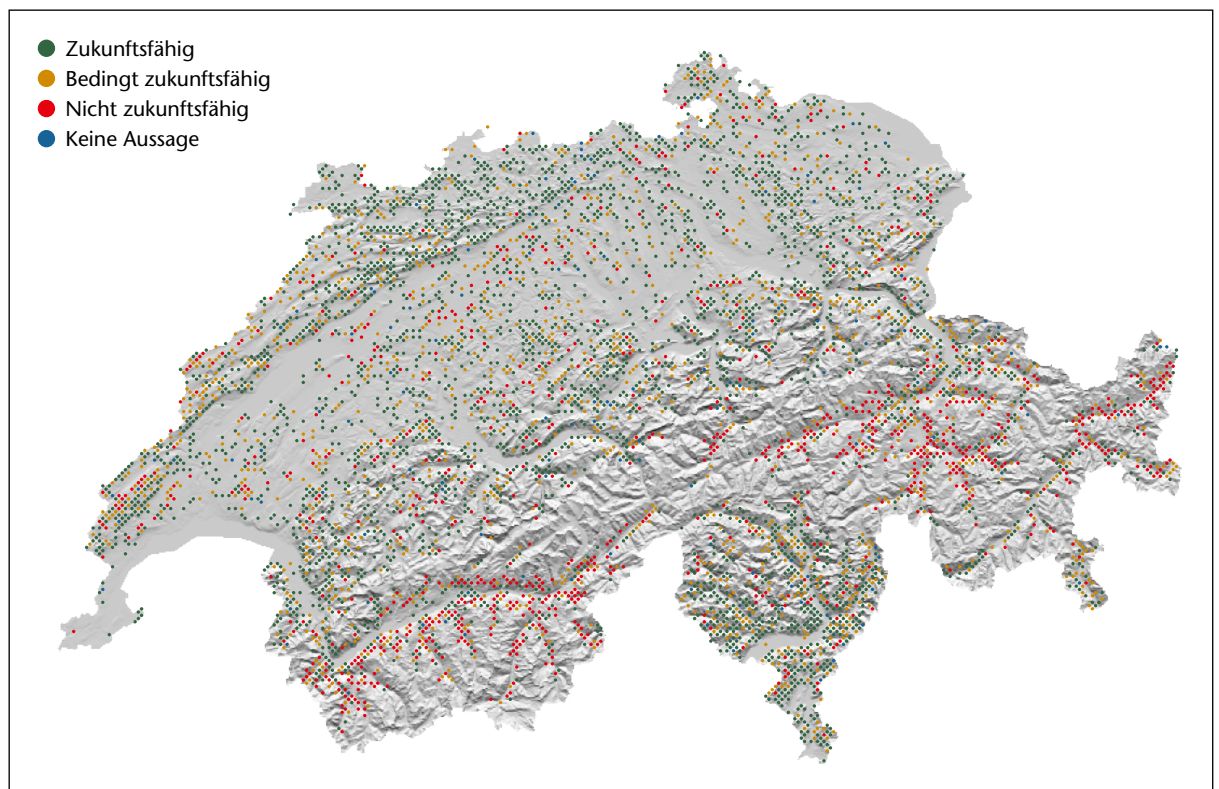
Die Berücksichtigung von Samenbäumen erhöhte den zukunfts-fähigen Waldanteil, weil zusätzlich Stichprobenflächen mit bedingt (N = 286) und nicht zukunfts-fähiger (N = 477) Verjüngung aufgrund

der vorhandenen Samenbäume als zukunfts-fähig beurteilt wurden (Abbildung 2). Dadurch betrug der LFI-Stichprobenflächenanteil mit zukunfts-fähiger Verjüngung schweizweit 64%. In den Voralpen erhöhten die Samenbäume den Anteil um 16 Prozentpunkte auf 71%. In den anderen Regionen, insbesondere in den Alpen (+10 Prozentpunkte auf 48%), war diese Zunahme geringer.

Die kombinierte Beurteilung des Baumbestands und der Verjüngung + Samenbäume ergab eine ausgeglichene Verteilung der Zukunftsfähigkeit, als wenn die einzelnen Beurteilungskriterien gesondert betrachtet wurden. So war der Wald auf schweizweit 57% der LFI-Stichprobenflächen zukunfts-fähig, auf 23% bedingt zukunfts-fähig und auf 17% nicht zukunfts-fähig (Abbildung 2). Die Karte zeigt, insbesondere im Wallis, im Unterengadin, in der Surselva und im Viamala- und Albulagebiet, eine Häufung von LFI-Stichprobenflächen mit nicht zukunfts-fähigen Wäldern (Abbildung 3).



**Abb 2** Anteil LFI-Stichprobenflächen (%) nach Zukunftsfähigkeit bezüglich des Baumbestands, der Verjüngung, der Verjüngung + Samenbäume, der kombinierten Beurteilung und nach Region. Auf 132 von 5778 LFI-Stichprobenflächen ist keine Aussage möglich, da dort keine lebenden Bäume  $\geq 12$  cm BHD gemessen wurden. Auf 932 von 5778 LFI-Stichprobenflächen wurde keine Verjüngung beobachtet, und auf 77 LFI-Stichprobenflächen wurden nur strauchartige Schösslinge (häufig *Corylus avellana*, *Prunus padus* und *Laburnum anagyroides*) gezählt (Insgesamt 1009 LFI-Stichprobenflächen ohne Verjüngung).

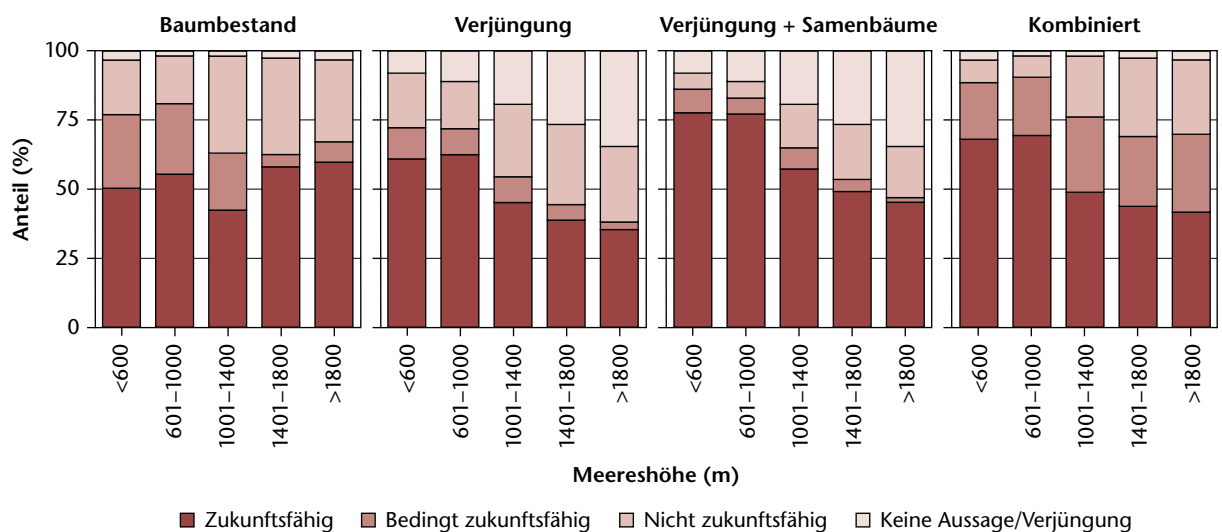


**Abb 3** Zukunftsfähigkeit der LFI-Stichprobenflächen mit kombinierter Bewertung von Baumbestand und Verjüngung + Samenbäume.

Der Flächenanteil mit zukunftsfähigem Baumbestand war zwischen 1001 und 1400 m ü.M. mit 42% am niedrigsten (Abbildung 4). In den anderen Höhenstufen lag dieser Anteil zwischen 50% und 60%. Der Anteil an zukunftsfähiger Verjüngung nahm mit steigender Höhe ab. Auffallend ist auch der geringere Anteil der LFI-Stichprobenflächen mit Baumbestand und Verjüngung von geringer Zukunftsfähigkeit in höheren Lagen, insbesondere über 1400 m ü.M. Der Anteil der LFI-Stichprobenflächen mit Baumbestand und Verjüngung ohne Zukunftsfähigkeit war über 1400 m ü.M. generell höher.

#### Zukunftsfähigkeit und Baumartenzusammensetzung

In den Alpen nahm mit steigendem Fichtenanteil der Anteil der LFI-Stichprobenflächen mit nicht zukunftsfähigem Baumbestand von 38% auf 47% stetig zu (Tabelle 3). Der Flächenanteil mit zukunftsfähigem Baumbestand im Wald mit hohem Fichtenanteil war tiefer als im Waldteil mit niedrigem Fichtenanteil (32% vs. 51%). In LFI-Stichprobenflächen mit sehr hohem Fichtenanteil waren 51% des Baumbestands zukunftsfähig, aber nur 2% bedingt zukunftsfähig. In LFI-Stichprobenflächen mit



**Abb 4** Anteil LFI-Probenflächen (%) nach Meereshöhe und nach Zukunftsfähigkeit und Bewertungskriterium. Beachte: Auf 132 von schweizweit 5778 LFI-Stichprobenflächen wurden keine Probabäume ( $\geq 12$  cm BHD) gemessen, sodass dort keine Aussage möglich ist. Auf 1009 LFI-Stichprobenflächen wurde keine Verjüngung beobachtet.

| Fichtenanteil (%) | Zukunftsfähig | Bedingt zukunfts-fähig | Nicht zukunfts-fähig |
|-------------------|---------------|------------------------|----------------------|
| ≤20: niedrig      | 51            | 11                     | 38                   |
| 21–50: mittel     | 40            | 19                     | 40                   |
| 51–80: hoch       | 32            | 24                     | 43                   |
| 81–100: sehr hoch | 51            | 2                      | 47                   |

**Tab 3** Anteil LFI-Stichprobenflächen (%) in den Alpen nach Anteil Fichte an der Grundfläche und Zukunftsfähigkeit des Baumbestands. Es wurden nur LFI-Stichprobenflächen mit Bäumen ≥12 cm BHD berücksichtigt (N = 1859). Werte wurden auf ganze Zahlen gerundet und können daher zu 99% statt 100% addieren.

hohem Fichtenanteil lag dieser Anteil bei 24%. Die Zukunftsfähigkeit der Verjüngung war ähnlich wie diejenige des Baumbestands in die Fichtenanteils-klassen verteilt (nicht dargestellt).

Im Mittelland war der Anteil des zukunfts-fähigen Baumbestands in fichtendominierten LFI-Stichprobenflächen mit 5% deutlich geringer als in Buchen- (82%), Eichen- (74%) oder von anderen Arten dominierten (48%) LFI-Stichprobenflächen. Da-gegen war die Verjüngung in fichtendominierten LFI-Stichprobenflächen mit 52% nur geringfügig weniger zukunfts-fähig als in Buchen- (64%), Eichen- (68%) und von anderen Arten dominierten (58%) LFI-Stichprobenflächen (Tabelle 4).

## Zukunftsfähigkeit im Schutzwald

Im Schutzwald der Voralpen, der Alpen und der Alpensüdseite wurde ein leicht höherer Waldflä-chenanteil (56% vs. 53% bzw. 46% vs. 43%) mit zu-kunfts-fähigem Baumbestand und zukunfts-fähiger Verjüngung ermittelt als ausserhalb des Schutzwald-perimeters (Tabelle 5). Bemerkenswert ist jedoch, dass im Schutzwald der Baumbestand und die Ver-jüngung auf 29% bzw. 25% der Fläche als nicht zu-kunfts-fähig eingeschätzt wurden und dass zusätzlich auf 22% der Fläche keine Verjüngung beobachtet werden konnte.

## Diskussion

Die Zukunftsfähigkeit des Waldes, seine Kli-maeignung und seine Klimasensitivität wurden schon in einer Reihe von Studien abgeschätzt (Falk et al 2013, Frehner et al 2021, Huber et al 2021, Nitschke & Innes 2008). Generell wird wie auch hier eine Verschiebung der Eignung der meisten Baum-arten in höhere Lagen und Breiten vorhergesagt. Häu-fig wird dabei die aktuelle Verbreitung der Baumarten aufgrund von Standortfaktoren modelliert und dann mit der unter veränderten Standortfaktoren

| Dominante Baumart | Bewertungskriterium | Zukunftsfähig | Bedingt Zukunfts-fähig | Nicht Zukunfts-fähig | Keine Verjüngung |
|-------------------|---------------------|---------------|------------------------|----------------------|------------------|
| Buche (255 PF)    | Baumbestand         | 82            | 8                      | 10                   | –                |
|                   | Verjüngung          | 64            | 9                      | 21                   | 5                |
|                   | Verj. + Samenbäume  | 84            | 4                      | 6                    | 5                |
| Eiche (31 PF)     | Baumbestand         | 74            | 10                     | 16                   | –                |
|                   | Verjüngung          | 68            | 6                      | 23                   | 3                |
|                   | Verj. + Samenbäume  | 90            | 3                      | 3                    | 3                |
| Fichte (265 PF)   | Baumbestand         | 5             | 48                     | 48                   | –                |
|                   | Verjüngung          | 52            | 10                     | 24                   | 14               |
|                   | Verj. + Samenbäume  | 62            | 12                     | 12                   | 14               |
| Andere (536 PF)   | Baumbestand         | 48            | 33                     | 20                   | –                |
|                   | Verjüngung          | 58            | 12                     | 21                   | 9                |
|                   | Verj. + Samenbäume  | 77            | 7                      | 6                    | 9                |

**Tab 4** Anteil LFI-Stichprobenflächen (%) im Mittelland nach dominanter Baumart (Eiche: *Quercus petraea*, *Q. robur* und *Q. pubescens*) nach Zukunftsfähigkeit und nach Bewertungskriterium. Es wurden nur LFI-Stichprobenflächen mit Bäumen ≥12 cm BHD berücksichtigt (N = 1087). Auf insgesamt 102 LFI-Stich-probe-flächen wurde keine Verjüngung beobachtet. Werte wurden auf ganze Zahlen gerundet und können daher zu 99% statt 100% addieren.

| SilvaProtect-Perimeter | Bewertungskriterium | Zukunftsfähig | Bedingt Zukunfts-fähig | Nicht Zukunfts-fähig | Keine Aussage / Verjüngung |
|------------------------|---------------------|---------------|------------------------|----------------------|----------------------------|
| Ausserhalb             | Baumbestand         | 53            | 13                     | 30                   | 4                          |
|                        | Verjüngung          | 43            | 8                      | 27                   | 21                         |
|                        | Verj. + Samenbäume  | 56            | 7                      | 16                   | 21                         |
| Innerhalb              | Baumbestand         | 56            | 14                     | 29                   | 1                          |
|                        | Verjüngung          | 46            | 7                      | 25                   | 22                         |
|                        | Verj. + Samenbäume  | 58            | 5                      | 15                   | 22                         |

**Tab 5** Anteil LFI-Stichprobenflächen (%) der Produktionsregionen Voralpen, Alpen und Alpensüdseite in- und ausserhalb des SilvaProtect-Schutzwaldperime-ters nach Zukunftsfähigkeit und Bewertungskriterium. Auf 132 von schweizweit 5778 LFI-Stichprobenflächen wurden keine Probabäume (≥12 cm BHD) ge-messen, sodass dort keine Aussage möglich ist. Auf 1009 LFI-Stichprobenflächen wurde keine Verjüngung beobachtet. Werte wurden auf ganze Zahlen ge-rundet und können daher zu 99% statt 100% addieren.



modellierten Verbreitung verglichen. Im Unterschied dazu verwendeten wir Beobachtungen aus dem LFI zur Beschreibung der aktuellen Baumartenzusammensetzung. Dies erlaubt eine genaue lokale Beurteilung auf der LFI-Stichprobenfläche und, aufgrund des systematischen und relativ dichten Messnetzes des LFI, auch regional repräsentative Aussagen.

Die geringe Zukunftsfähigkeit der Fichtenwälder in tiefen (Mittelland) und mittleren Lagen (1001–1400 m ü.M.) deckt sich mit mechanistischen Modellsimulationen (Huber et al 2021), die mit dem Klimawandel eine nahezu komplette Auswechslung der Baumarten in der hochmontanen Zone (Buche anstatt Fichte und Tanne) vorhersagen. Die der Tree-App zugrunde liegenden adaptierten Ökogramme wurden auch für die Erstellung von Baumarteneignungskarten verwendet. Wo die Fichte in Graubünden unter starkem (RCP8.5) Klimawandel gefährdet ist, liegen auch die LFI-Stichprobenflächen, auf denen in unserer Arbeit die Bestockung als nicht zukunftsfähig beurteilt wurde (Frehner et al 2021). Stark fichtendominierte Wälder in den Alpen waren nur zu 2% bedingt zukunftsfähig, was mit der geringen Baumartenvielfalt erklärt werden kann. Mit hoher Wahrscheinlichkeit wurden diese Wälder entweder als zukunftsfähig oder nicht zukunftsfähig klassiert, je nachdem, ob die Fichte empfohlen wurde. In artenreicheren Wäldern kann schon ein geringer (jedoch >10%) Anteil von empfohlenen Baumarten zu einer bedingten Zukunftsfähigkeit führen. Wir vermuten, dass dies vor allem Pionierbaumarten wie Birke, Vogelbeere, Pappeln und Weiden sind. Dies und welche Rolle Pionierbaumarten für die Resilienz und die Erfüllung der Waldleistungen in Zukunft spielen, sollte weiter untersucht werden (Rothkegel et al 2020).

Die Verjüngung war in den Alpen nur auf 37% der Waldfläche zukunftsfähig. Im Schutzwald wurde die Verjüngung auf 25% der Fläche als nicht zukunftsfähig eingestuft und auf weiteren 22% war sie nicht vorhanden. Dies weist auf eine prekäre Situation hinsichtlich der Resilienz des Gebirgswaldes gegenüber Störungen hin. Für eine fehlende Ansamung und eine Entwicklungshemmung der Verjüngung können je nach Standort verschiedene Faktoren und deren Kombinationen verantwortlich sein: In dichten und überalterten Beständen fehlt oftmals das Licht (Streit et al 2009); Verbiss durch Schalenwild kann die Verjüngung einzelner Baumarten (z.B. Tanne) grossflächig verhindern (Kupferschmid et al 2019); Hochstauden und Gräser können Baumsämlinge in höheren Lagen konkurrenzieren und so eine Verjüngung über Jahrzehnte verzögern (Kalt et al 2021). Da klimabedingte Baum mortalität vielerorts die Schutzwirkung verringern wird (Moos et al 2021), ist eine an zukünftige Klimabedingungen angepasste Verjüngung unerlässlich (Brang et al 2016), damit sich die Schutzwirkung möglichst schnell wieder erholen und langfristig erhalten werden kann.

Im Mittelland war der Baumbestand in Fichtenwäldern nur zu 5% zukunftsfähig, die Verjüngung jedoch wurde zu 52% als zukunftsfähig beurteilt. Dies deutet auf eine dem Klimawandel angepasste Laubholzverjüngung in vielen Fichtenbeständen der tieferen Höhenlagen hin, wobei Störungen diese Baumartenverschiebung beschleunigen können (Scherrer et al 2022).

Die Berücksichtigung von zukunftsfähigen Samenbäumen erhöhte den Anteil der als zukunftsfähig beurteilten Waldfläche. Dies bildet die wichtige Rolle von Samenbäumen für das Potenzial des Waldes, sich durch Naturverjüngung dem ändernden Klima anzupassen, ab (Allgaier Leuch et al 2017). Für die Ausscheidung von Samenbäumen wählten wir einen Schwellenwert von 30 cm BHD, um möglichst alle Baumarten miteinzubeziehen. Idealerweise müsste dieser Schwellenwert baumartenspezifisch sein, um die Unterschiede im Erreichen der Blühreife abzubilden. Leider standen uns dazu keine belastbaren Daten zur Verfügung. Ausserdem wollten wir die Beurteilungskriterien möglichst einfach halten. Um den Effekt dieses Schwellenwertes auf die Beurteilung der Zukunftsfähigkeit zu ermitteln, wiederholten wir die Berechnungen mit einem Schwellenwert von 20 cm BHD. Dies führte zu einem schweizweit um 3 Prozentpunkte höheren Anteil der zukunftsfähigen Waldfläche (67% vs. 64% mit 30-cm-BHD-Schwellenwert). Für eine allfällige Verfeinerung unseres Ansatzes empfehlen wir, für Pionierbaumarten wie die Birke und die Vogelbeere einen tieferen Schwellenwert (z.B. 20 cm BHD) zu wählen. Auch wäre der Einfluss der artspezifischen Samenausbreitungsdistanz auf die Wirkung der Samenbäume zu prüfen und allenfalls zu berücksichtigen. Da wir nur die potenziellen Samenbäume auf den LFI-Stichprobenflächen und keine in deren Nähe berücksichtigen konnten, muss unsere Abschätzung des Einflusses der Samenbäume als konservativ verstanden werden.

In der vorliegenden Arbeit bleibt die mögliche Wirkung von Faktoren, die sich neben den klimatischen Variablen verändern könnten, nicht berücksichtigt. So kann sich infolge von häufigerem Starkregen und Bodenerosion die Humusaufgabe und damit die Bodenwasser- und die Nährstoffverfügbarkeit langfristig verringern (Olleck et al 2021). Für den Prognosezeitraum (bis ca. 2080) scheint uns aber die Annahme, dass die Standortverhältnisse bzw. die Position der LFI-Stichprobenflächen im Ökogramm konstant bleiben, plausibel.

## Schlussfolgerungen

Die TreeApp-Empfehlungen beruhen auf der klimabedingten Verschiebung von Vegetationshöhenstufen. Dies ist ein Raum-für-Zeit-Ansatz, der auf



die Baumarteneignung unter dem projizierten Klima gegen Ende dieses Jahrhunderts hinweist. Jedoch sind keine Aussagen über die Geschwindigkeit der Anpassung an den Klimawandel möglich. So kann ein Baumartenwechsel graduell und kleinräumig oder durch eine flächige Störung und darauffolgende Neubesiedlung mit angepassten Baumarten erfolgen. Bei der Wahl der zu fördernden Baumarten müssen die Waldbewirtschaftenden neben der Klimateignung die kleinräumigen Standortbedingungen, die Bestandstruktur, ökonomische Umstände sowie nachgefragte und zugewiesene Waldökosystemleistungen berücksichtigen. Die TreeApp-Empfehlungen und die hier dargestellte Zukunftsfähigkeit können unter Berücksichtigung der Unsicherheiten diesen Entscheidungsprozess wissenschaftlich fundiert unterstützen und so Entscheidungen weniger vom «Bauchgefühl» abhängig machen.

Um die Schutzwirkung möglichst zu erhalten, sind in Waldflächen mit fehlender zukunftsfähiger Verjüngung Bewirtschaftungsmassnahmen und Ressourcen für deren Realisierung nötig. Dazu gehört auch die Kontrolle der Schalenwildpopulation, die einen entscheidenden Einfluss auf die Verjüngung, insbesondere von verbissempfindlichen Baumarten wie der Tanne hat. Zukunftsfähige Samenbäume können das Potenzial für eine Ansammler einer klimaangepassten Verjüngung in der Zukunft sichern. Zurzeit laufende Untersuchungen (z.B. WSL-Projekt «Testpflanzungen») werden weitere Hinweise zur Eignung von zu fördernden (Gast-)Baumarten liefern.

Weitere Auswertungen, z.B. aufgelöst nach Vegetationshöhenstufen, einzelnen (häufigen) NAI-Standorttypen und Störungs- und Bewirtschaftungsgeschichte, oder eine vertiefte Analyse der Artenzusammensetzung einer zukunftsfähigen Verjüngung wären möglich und sollten Teil zukünftiger Forschungsprojekte sein. Nichtsdestotrotz bieten wir mit dieser Arbeit nützliche Grundlagen für die strategische Waldplanung und die Waldpolitik auf kantonaler und Bundesebene und hoffen damit zur Anpassung des Waldes und der Waldbewirtschaftung an den Klimawandel beizutragen.

Eingereicht: 16. September 2022, akzeptiert (mit Review): 20. Januar 2023

## Dank

An das Projekt «MountEx» im WSL-Forschungsprogramm «Extremes» für die Unterstützung.

## Literatur

- ALLGAIER LEUCH B, STREIT K, BRANG P (2017) Naturnaher Waldbau im Klimawandel. Merkblatt für die Praxis 59:8. Birmensdorf: Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL.
- BEBI P, PUTALLAZ J-M, FANKHAUSER M, SCHMID U, SCHWITTER R, ET AL (2015) Die Schutzfunktion in Windwurfflächen. Schweizer Z Forstwes 166: 168–176. doi: 10.3188/szf.2015.0168

- BRÄNDLI U-B, ABEGG M, ALLGAIER LEUCH B (2020) Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der vierten Erhebung 2009–2017. Birmensdorf: Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. Bern: Bundesamt für Umwelt.
- BRANG P, KÜCHLI C, SCHWITTER R, BUGMANN H, AMMANN P, ET AL (2016) Waldbauliche Strategien im Klimawandel. In: Pluess AR, Augustin S, Brang P, editors. Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptionsstrategien. Bern: Bundesamt für Umwelt. Birmensdorf: Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. Bern, Stuttgart, Wien: Haupt. pp. 341–367.
- DOBOR L, HLÁSNY T, ZIMOVÁ S (2020) Contrasting vulnerability of monospecific and species-diverse forests to wind and bark beetle disturbance: The role of management. Ecol and Evol 10: 12233–12245. doi: 10.1002/ece3.6854
- ETZOLD S, ZIEMIŃSKA K, ROHNER B, BOTTERO A, BOSE A, ET AL (2019) One Century of Forest Monitoring Data in Switzerland Reveals Species- and Site-Specific Trends of Climate-Induced Tree Mortality. Front Plant Sci. doi: 10.3389/fpls.2019.00307
- FALK W, MELLERT KH, BACHMANN-GIGL U, KÖLLING C (2013) Bäume für die Zukunft: Baumartenwahl auf wissenschaftlicher Grundlage. LWF aktuell 94: 8–11.
- FRANK A, HOWE GT, SPERISEN C, BRANG P, CLAIR JB, ET AL (2017) Risk of genetic maladaptation due to climate change in three major European tree species. Global Change Biol 23: 5358–5371. doi: 10.1111/gcb.13802
- FREHNER M, HUBER B, KÖNZ G, ZISCHG AP (2021) Ermittlung von sensiblen Standorten und Beständen. Zürcher Wald 3: 19–24.
- FREHNER M, ZÜRCHER-GASSER N (2019) Schlussbericht des Projektes «Adaptierte Ökogramme» im Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel», Teil 5: Herleitung von regional optimierten Baumartenempfehlungen. Sargans: Forstingenieur-büro Frehner.
- FREY H-U, FREHNER M, BURNAND J, CARRARO G, RUTISHAUSER U (2021) Zur Entstehung der NAI-Standorttypen. Schweiz Z Forstwes 172 (3): 146–155. doi.org/10.3188/szf.2021.0146
- HUBER N, BUGMANN H, CAILLERET M, BIRCHER N, LAFOND V, ET AL (2021) Stand-scale climate change impacts on forests over large areas: transient responses and projection uncertainties. Ecol Appl 31: e02313. doi.org/10.1002/eap.2313
- KALT T, NIKOLOVA P, GINZLER C, BEBI P, EDELKRAUT K, ET AL (2021) Kurzes Zeitfenster für die Fichtennaturverjüngung in Gebirgsnadelwäldern. Schweiz Z Forstwes 172: 156–165. doi: 10.3188/szf.2021.0156
- KUPFERSCHMID AD, BÜTIKOFER L, HOTHORN T, SCHWYZER A, BRANG P, ET AL (2019) Quantifying the relative influence of terminal shoot browsing by ungulates on tree regeneration. Forest Ecol Manag 446: 331–344. doi: 10.1016/j.foreco.2019.05.009
- LINDNER M, MAROSCHEK M, NETHERER S, KREMER A, BARBATI A, ET AL (2010) Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. Forest Ecol Manag 259: 698–709. doi: 10.1016/j.foreco.2009.09.023
- LOSEY S, WEHRLI A (2013) Schutzwald in der Schweiz: Vom Projekt SilvaProtect-CH zum harmonisierten Schutzwald. Bern: Bundesamt für Umwelt.
- MOOS C, GUIBAN A, RANDIN CF, LISCHKE H (2021) Climate Change Impacts the Protective Effect of Forests: A Case Study in Switzerland. Front For Glob Change 4: 682923. doi: 10.3389/ffgc.2021.682923
- NATIONAL CENTRE FOR CLIMATE SERVICES (2018) CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report. Zürich: National Centre for Climate Services.
- NITSCHKE CR, INNES JL (2008) Integrating climate change into forest management in South-Central British Columbia: An assessment of landscape vulnerability and development of a climate-smart framework. Forest Ecol Manag 256: 313–327. doi: 10.1016/j.foreco.2008.04.026

- OLLECK M, KOHLPAINTNER M, MELLERT K H, REGER B, GÖTTLEIN A, ET AL (2021) Thick Forest Floors in the Calcareous Alps – Distribution, Ecological Functions and Carbon Storage Potential. *Catena* 207: 105664. doi.org/10.1016/j.catena.2021.105664
- REMUND J, SCHUMTZ M, GRAF P, CATTIN R (2020) Downscaling CH2018: Berechnung von Meteo- und Trockenheitsindizes für die Waldforschung, Methoden und Resultate. Bericht im Auftrag des Bundesamts für Umwelt. Bern: Bundesamt für Umwelt.
- ROTHKEGEL W, RUPPERT O, KLEMMT H-J (2020) Pionierbaumarten im Klimawandel – standörtliche und waldbauliche Aspekte. *LWF aktuell* 4: 20–23.
- SCHERRER D, ASCOLI D, CONEDERA M, FISCHER C, MARINGER J, ET AL (2022) Canopy Disturbances Catalyse Tree Species Shifts in Swiss Forests. *Ecosystems* 25: 199–214. doi: 10.1007/s10021-021-00649-1
- SEIDL R, THOM D, KAUTZ M, MARTIN-BENITO D, PELTONIEMI M, ET AL (2017) Forest Disturbances under Climate Change. *Nature Clim Change* 7: 395–402. doi.org/10.1038/nclimate3303.
- STREIT K, WUNDER J, BRANG P (2009) Slit-shaped gaps are a successful silvicultural technique to promote *Picea abies* regeneration in mountain forests of the Swiss Alps. *Forest Ecol Manag* 257 (9): 1902–1909. doi: 10.1016/j.foreco.2008.12.018
- ZISCHG AP, FREHNER M, GUBELMANN P, AUGUSTIN S, BRANG P, ET AL (2021) Participatory modelling of upward shifts of altitudinal vegetation belts for assessing site type transformation in Swiss forests due to climate change. *Appl Veg Sci* 24: e12621. doi: 10.1111/avsc.12621

## Viabilité future de la composition des essences de la forêt suisse

Le changement climatique modifie les conditions de croissance des arbres forestiers, raison pour laquelle il faut s'attendre à long terme à des changements importants dans la composition des essences de la forêt suisse. Avec TreeApp, un outil a été mis à la disposition des praticiens forestiers pour déterminer les essences adaptées au climat futur. Dans ce travail, nous avons comparé les recommandations de TreeApp avec la composition des essences du peuplement des arbres ( $\geq 12$  cm de diamètre à hauteur de poitrine [dhp]) et du rajeunissement ( $< 12$  cm dhp) observée dans le 4<sup>e</sup> Inventaire forestier national (IFN), en tenant compte également de la présence d'arbres semenciers potentiels. Nous présentons un schéma d'évaluation simple qui nous a permis de classer les placettes d'échantillonnage de l'IFN en trois niveaux de viabilité future (degré d'adaptation au climat à la fin de ce siècle). A l'échelle de la Suisse, 57% des placettes ont été évaluées comme étant viables, 23% comme étant viables sous condition et 17% comme n'étant pas viables. Il en ressort une accumulation des placettes non viables dans les forêts d'épicéas des cantons des Grisons et du Valais. Dans les forêts protectrices des Préalpes, des Alpes et du sud des Alpes, le rajeunissement a été jugé non viable sur 25% des placettes d'échantillonnage et aucun rajeunissement n'a été observé sur 22% d'entre elles. Plus la part d'épicéas augmente, plus la proportion de placettes d'échantillonnage non viables augmente. Sur le Plateau et dans le Jura, le rajeunissement a été jugé viable sur une plus grande proportion de surfaces que le peuplement d'arbres. Lorsque les arbres semenciers étaient pris en compte, la proportion de placettes d'échantillonnage viables était jusqu'à 16 points de pourcentage plus élevée (Préalpes) que lorsque seul le rajeunissement était pris en considération. Ces résultats soulignent la nécessité d'agir pour promouvoir un rajeunissement viable dans les forêts de montagne, offrent des bases utiles pour la planification forestière stratégique et contribuent ainsi à l'adaptation des forêts au changement climatique.

## Future suitability of the tree species composition of the Swiss forest

Climate change affects tree growth conditions which is why striking shifts in the tree species composition of the Swiss forest are expected in the long term. The TreeApp is a tool for forestry practice to identify tree species likely suitable under future climate. In this paper we compared the recommendations from the TreeApp with the species composition of trees ( $\geq 12$  cm diameter at breast height [BHD]) and regeneration ( $< 12$  cm BHD) observed in the 4<sup>th</sup> National Forest Inventory (LFI4), also considering the presence of potential seed trees. We present a simple assessment scheme to classify the NFI sample plots into three levels of future suitability (degree of adaptation to climate at the end of this century). Across Switzerland, 57% of the plots were rated as suitable, 23% as partially suitable, and 17% as not suitable. Not suitable spruce forests accumulated in the cantons of Graubünden and Valais. In protective forests in the Prealps, the Alps and south of the Alps, regeneration was assessed as not suitable in 25% of the sample plots and no regeneration was observed on 22%. The proportion of sample plots with not suitable tree population increased with the proportion of spruce. In the Plateau and the Jura regions, regeneration was suitable for future conditions on a larger proportion of plots than the tree population. When seed trees were considered, the proportion of sample plots with suitable tree population was up to 16 percentage points higher than when only regeneration was considered. These results underline the need to promote future climate-adapted regeneration in mountain forests, inform strategic forest management planning, and thus contribute to forest adaptation to climate change.