Klimafreundliche Waldbewirtschaftung: Baumphysiologie als Grundlage

Authors

Arthur Gessler [1], Andreas Rigling [2]

[1] Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL
[2] Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

Citation

Gessler A., Rigling A. (2026) Klimafreundliche Waldbewirtschaftung: Baumphysiologie als Grundlage. Waldwissen.net WSL. doi.org/10.55419/wsl:43612

Dieser Beitrag entstand in Zusammenarbeit mit dem Netzwerk TriNational ForestLab.

https://doi.org/10.55419/wsl:43612
This work is licensed under Creative Commons Attribution 4.0 International.

Klimafreundliche Waldbewirtschaftung: Baumphysiologie als Grundlage

Ökophysiologisch fundierte Waldbewirtschaftung ist kein Rezept, sondern ein Denkmuster: Wer versteht, warum Bäume bei Hitze und Dürre absterben, kann Massnahmen gezielt an Schwachstellen ausrichten. Was das konkret heisst – und warum ohne Standortkenntnis nichts greift.

Abb. 1. Trockenheitsgeschädigter Bestand mit Kronenverlichtung und Nadelvergilbung. Hitze und Dürre schädigen Bäume über zwei Hauptmechanismen: hydraulisches Versagen und Kohlenstoffmangel. Foto: Andreas Rigling (ETHZ)

Der Klimawandel verändert unsere Wälder schneller, als sich Bäume auf natürliche Weise anpassen können. Das über Generationen gewachsene empirische Wissen der Forstpraxis verliert dabei zunehmend an Verlässlichkeit – nicht, weil es falsch wäre, sondern weil es auf Voraussetzungen beruht, die so nicht mehr gelten. Das Verständnis der Baumphysiologie liefert die wissenschaftlichen Grundlagen, um diese Lücke zu schliessen: Wer weiss, warum Bäume unter Hitze und Dürre absterben, kann Bewirtschaftungsentscheidungen gezielt auf diese Schwachstellen ausrichten, statt nach der einen «klimaresistenten» Baumart zu suchen.

Klimastress: Schäden und Handlungsansätze

Der Klimawandel wirkt sich auf drei Arten auf die Bäume aus: Temperaturstress, Wasserstress und erhöhter Schädlings- und Krankheitsdruck (Abb. 2).

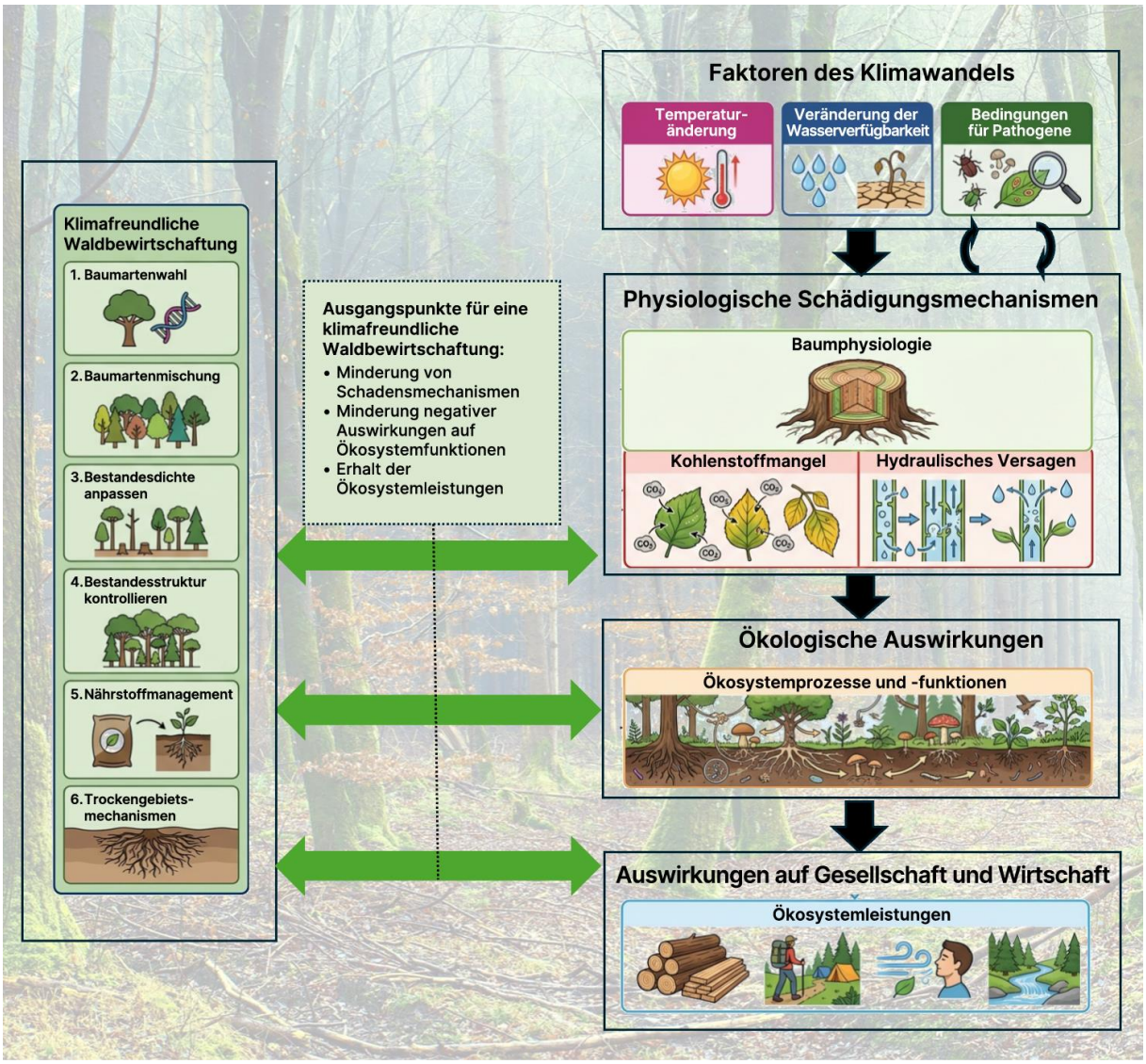

Abb. 2. Klimawandelbedingter Stress beeinflusst die Baumphysiologie über definierte Schadensmechanismen, die Ökosystemfunktionen und Waldleistungen beeinträchtigen. Klimafreundliche Waldbewirtschaftung setzt an diesen Mechanismen an. Quelle: Gessler *et al.* (2026), New Phytologist, verändert.

Die ersten beiden lösen zwei physiologische Hauptschädigungsmechanismen aus:

- **Kohlenstoffmangel:** Um Wasser zu sparen, schliessen Bäume ihre Spaltöffnungen. Damit bricht aber auch die Photosynthese ein. Die Energiereserven schwinden, bis weder Stoffwechsel noch Abwehr von Krankheitserreger aufrechterhalten werden können.
- **Hydraulisches Versagen:** Wenn ein hohes Wasserdampfsättigungsdefizit der Atmosphäre (Hitze) mit unzureichender Bodenwasserverfügbarkeit zusammentrifft, blockieren Luftblasen (Embolien) das Wassertransportsystem im Xylem. Der Baum vertrocknet von innen. Verstopfte Gefässe sind zudem Einfallstore für pathogene Pilze.

Beide Mechanismen verstärken sich gegenseitig und machen geschwächte Bäume noch anfälliger für biotische Angriffe. Eine wirksame klimaangepasste Forstwirtschaft setzt genau hier an, indem sie Bewirtschaftungsmassnahmen gezielt auf diese Schadensmechanismen ausrichtet, anstatt eine pauschale «Klimaresistenz» anzustreben, von der nicht klar ist, wie sie erreicht werden kann.

Baumartenwahl unter Klimawandel

Bäume aus trockeneren Regionen haben Merkmale entwickelt, die sie widerstandsfähiger gegen hydraulisches Versagen machen: dichteres Holz mit kleineren wasserführenden Gefässen, ein widerstandsfähigeres Wasserleitungssystem sowie eine effizientere Stomata-Regulierung. Solche Merkmale lassen sich bei der Artenauswahl und bei der Wahl von Herkünften gezielt berücksichtigen.

Weil Bäume, die heute gepflanzt werden, sowohl den heutigen als auch zukünftigen Klimabedingungen standhalten müssen, reicht die klassische standortbasierte Artenauswahl nicht mehr aus. Das Konzept der **assistierten Migration** bietet drei abgestufte Optionen: die Verschiebung von Herkünften innerhalb des bestehenden Verbreitungsgebiets einer Art, die Ausweitung des Anbaus leicht über das historische Areal hinaus und – als weitreichendste Massnahme – die Einführung von Arten aus deutlich wärmeren oder trockeneren Regionen. Vor dem Einsatz nicht-einheimischer Arten sollten seltene einheimische Arten geprüft werden, die forstlich bislang wenig beachtet wurden.

Zwei Kompromisse sind stets mitzudenken: Trockenresistente Arten wachsen in günstigen Jahren oft langsamer und sind im Wettbewerb benachteiligt. Arten aus wärmeren Herkünften können zudem frostempfindlicher sein, ein Risiko, das mit der zunehmenden Vorverlegung des Frühlings und häufigeren Spätfrösten zunimmt.

Artenverbreitungsmodelle als Entscheidungshilfe

Webbasierte Tools wie tree-app.ch (Schweiz) oder klimafitterwald.at (Österreich) unterstützen die Artenauswahl auf der Basis von Klimaprognosen und Habitateignungsmodellen. Es ist aber wichtig, deren Grenzen zu kennen: Extremereignisse, lokale Standortbedingungen und die Anpassungsfähigkeit der Bäume werden in der Regel nicht berücksichtigt. Sie geben wichtige Orientierung, können aber das Urteilsvermögen erfahrener Forstfachleute nicht ersetzen

Widerstandsfähige Mischwälder fördern

Mischwälder können Trockenstress über drei Mechanismen abpuffern:
Der **Portfolioeffekt**verteilt das Risiko auf Baumarten, die unterschiedlich auf Stress reagieren. **Nischenkomplementarität,** zum Beispiel mit unterschiedlichen Wurzeltiefen verschiedener Arten, ermöglicht eine effizientere Nutzung des verfügbaren Bodenwassers. Und durch **hydraulische Umverteilung** transportieren tiefwurzelnde Bäume nachts Wasser aus feuchten Tiefenschichten in obere, trockene Horizonte, wovon auch benachbarte Pflanzen und Sämlinge profitieren.

Abb 3. Strukturreicher Mischbestand mit mehreren Baumarten und Altersklassen. Mischwälder können Trockenstress über Nischenkomplementarität, hydraulische Umverteilung und den Portfolioeffekt abpuffern – ob und wie stark, hängt jedoch von den lokalen Standortbedingungen ab. Foto: Andreas Rigling (ETHZ)

Ob und wie stark diese Vorteile auf natürliche Weise zum Tragen kommen, hängt entscheidend von der Dürrehistorie des Standorts ab. Durch die aktive Wahl der Baumartenzusammensetzung können diese

Mechanismen jedoch gefördert werden. Wo Feuer ein Risiko darstellt, bietet die Beimischung feuerresistenter Laubbäume in Nadelholzbeständen einen zusätzlichen Schutz.

Dürrehistorie bestimmt den Mischungseffekt

Artenvielfalt verringert Trockenstress in Wäldern mit regelmässiger Dürre in der Vergangenheit. In Wäldern ohne regelmässigen Wasserstress kann sie hingegen die Anfälligkeit erhöhen. Baumarten, die an feuchte Standorte angepasst sind, verfügen eher über oberirdische Wettbewerbsstärke als tiefe Wurzelsysteme. Wenn Bestände aus solchen Baumarten unter Dürre geraten, kann das ungünstige Wurzel-Spross-Verhältnis den Stressdruck erhöhen. Durch die Beimischung von Arten mit tieferen Wurzelsystemen verbessert die Nischenkomplementarität gezielt. Auch hier ist zu beachten, dass Arten, die an Trockenheit angepasst sind in Zeiten guter Wasserverfügbarkeit möglicherweise konkurrenzschwächer sind. Hier müssen die waldbaulichen Massnahmen möglicherweise für eine Konkurrenzreduktion sorgen.

Von Trockenwäldern lernen

Ökosysteme in ariden Regionen haben im Laufe der Evolution Mechanismen entwickelt, die Bäumen das Überleben unter extremer Trockenheit ermöglichen. Einige davon sind auch in gemässigt-borealen Wäldern nachweisbar und können durch gezielte Bewirtschaftung gefördert werden.

- **Hydraulische Umverteilung:** lässt sich durch die Wahl tiefwurzelnder Arten, etwa verschiedener Eichenarten, gezielt stärken. In gemässigten und subtropischen Wäldern mit regelmässigen Trockenperioden wurden hydraulisch umverteilte Wassermengen von rund einem Drittel der Gesamtwasseraufnahme grosser Bäume gemessen.
- **Wasseraufnahme über Blätter und Rinde:** Viele Baumarten können Wasser direkt aus Nebel, Tau und leichtem Regen aufnehmen – nachgewiesen auch für Europäische Buche, Spitzahorn und verschiedene Kiefernarten. Über die Blätter aufgenommenes Wasser kann über den Baum bis in die Wurzeln transportiert werden und wirkt als zusätzlicher Puffer in Trockenperioden.
- **Kronendach-Konvektoreffekt:** Raue, mehrschichtige Kronenoberflächen erzeugen Luftturbulenzen, die Wärme durch sensiblen Wärmefluss an die Atmosphäre abgeben, ohne Wasser zu verbrauchen. Dieser Mechanismus wird relevant, wenn die transpirationsbasierte Kühlung durch Wassermangel eingeschränkt ist, und schützt Blätter vor kritischen Überhitzungstemperaturen.

Für die Bewirtschaftung heisst das: Arten mit Merkmalen, die diese Mechanismen begünstigen, sollten bei Artenwahl und Bestandesbegründung bewusst berücksichtigt werden. Strukturell diverse, mehrschichtige Bestände, ohnehin ein Ziel naturnaher Waldbewirtschaftung, fördern den Konvektoreffekt zusätzlich.

Bestandesdichte, Struktur und Produktionszeit

Eine Reduktion der Bestandesdichte senkt den Gesamtwasserbedarf und erhöht die Wasserverfügbarkeit für die verbleibenden Bäume. In trockenen Regionen verbessert Durchforstung die Trockenresistenz zuverlässig. In feuchten, gut versorgten Beständen ist Vorsicht geboten: Nach dem Eingriff investieren Bäume zunächst stark in die Kronenausdehnung, bevor das Wurzelsystem nachgewachsen ist. Tritt in diesem Zeitfenster eine Dürre auf, sind die Bäume aufgrund des ungünstigen Wurzel-Spross-Verhältnisses besonders exponiert (temporäres Kronenübergewicht). Wiederholte, moderate Eingriffe sind daher einzelnen intensiven Durchforstungen vorzuziehen, auch wenn sie höhere Bewirtschaftungskosten verursachen.

Abb 4. Durchforsteter Bestand mit erhöhtem Kronenschluss der verbleibenden Bäume. Durch die Reduktion der Bestandesdichte sinkt der Gesamtwasserbedarf – an trockenen Standorten ein wirksames Mittel zur Steigerung der Trockenresistenz. An feuchteren Standorten ist hingegen Zurückhaltung geboten, um ein strukturelles Kronenübergewicht zu vermeiden. Foto: Hubert Schmid (WSL)

Grössere und höhere Bäume sind grundsätzlich anfälliger für hydraulisches Versagen: Wasser muss über längere Strecken gegen die Schwerkraft transportiert werden, und die Kronen sind Hitze, Wind und atmosphärischer Trockenheit stärker ausgesetzt. Ein niedrigeres Verhältnis von Baumhöhe zu Stammdurchmesser – erreichbar durch frühzeitige und wiederholte Durchforstung – verringert dieses Risiko und erhöht gleichzeitig die Stabilität gegen Sturm und Schnee.

Kürzere Produktionszeiten reduzieren die Exposition gegenüber Extremereignissen und ermöglichen eine schnellere Anpassung des Baumartenportfolios. Ungleichaltrige Strukturen puffern Dürreepisoden auf Bestandesebene besser ab und erhalten die Wassernutzungseffizienz über längere Zeiträume. Kürzere Produktionszeiten haben aber ihren Preis: Sie verringern die Kohlenstoffspeicherung und können die Biodiversität beeinträchtigen, da viele Waldwerte an alte Bäume und Habitatkontinuität gebunden sind. Dem kann durch den gezielten Erhalt alter Waldflächen an geschützten Standorten wie schattigen Hängen oder feuchten Geländemulden entgegengewirkt werden.

Nährstoffversorgung im Klimawandel

Eine hohe Nährstoffverfügbarkeit fördert das oberirdische Wachstum auf Kosten der Wurzeln und erhöht damit die Trockenheitsanfälligkeit. Düngung verstärkt diesen Effekt: Sie stimuliert die oberirdische Biomasse, vermindert das Wurzel-Spross-Verhältnis und senkt die Häufigkeit von Mykorrhiza-Assoziationen. Auch hohe Stickstoffeinträge aus der Luft wirken in diese Richtung. Eine routinemässige Düngung in dürregefährdeten Beständen ist deshalb kontraindiziert. Die nachhaltigere Alternative ist die Kombination von Baumarten mit komplementären Nährstoffaufnahmestrategien. Kalkung kann die Erholung nach Dürren begünstigen, die

Wirkmechanismen sind jedoch noch unzureichend erforscht – ein grossflächiger Einsatz ist nicht anzuraten.

Fazit für die Praxis

Ökophysiologisch fundierte Waldbewirtschaftung ist kein Rezept, sondern ein Denkmuster: Verstehen, was Bäume unter Stress tötet, und Massnahmen wählen, die genau dort ansetzen (Abb. 5).

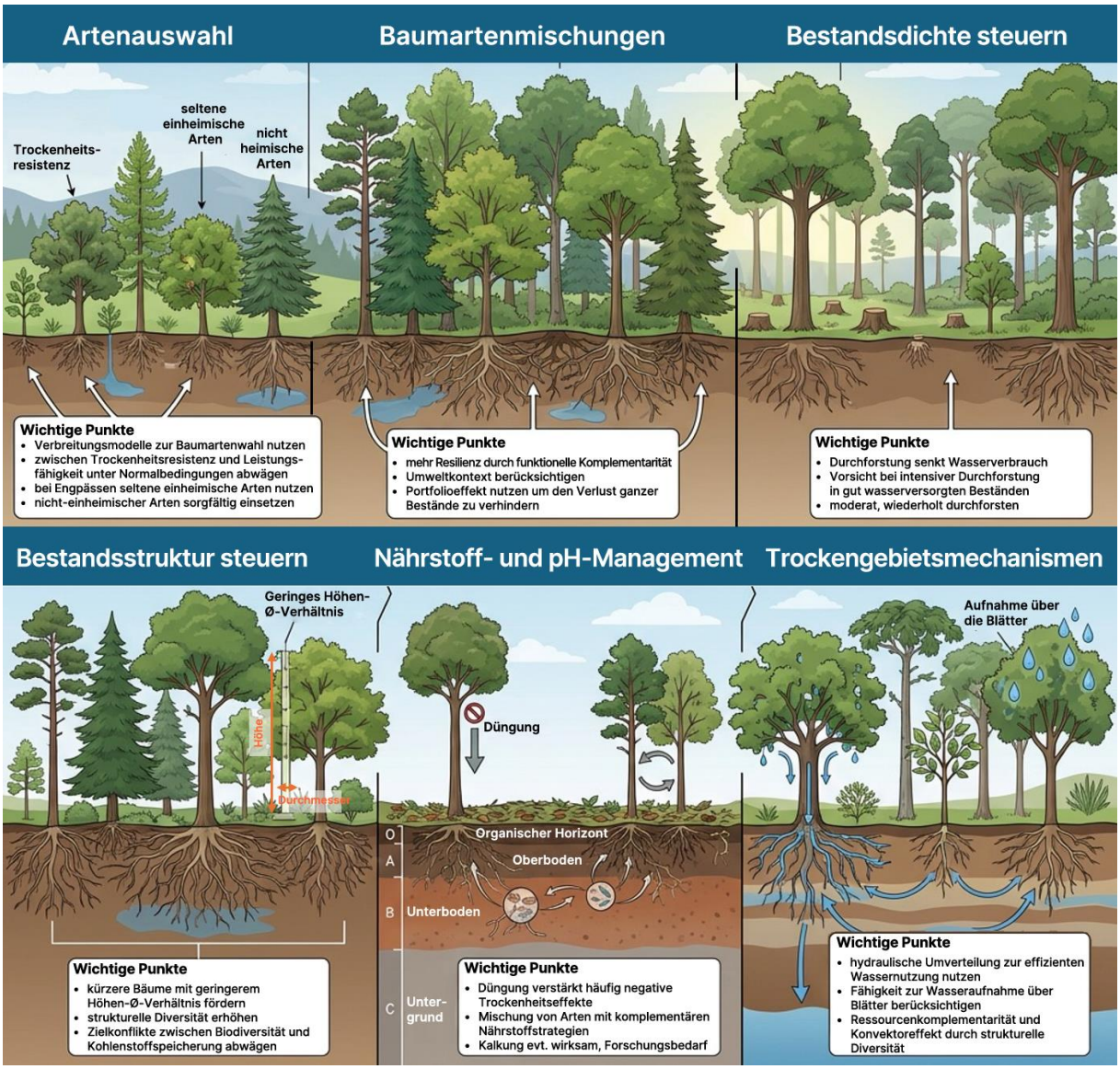

Abb. 5. Überblick über die wichtigsten klimafreundlichen Waldbewirtschaftungspraktiken und zentrale Abwägungen bei der Anpassung des Waldes an den Klimawandel. Quelle: Gessler *et al.* (2026), New Phytologist, verändert.

Die einzelnen Instrumente wie Baumartenwahl, Mischung, Durchforstung und Strukturvielfalt entfalten ihre Wirkung nicht isoliert, sondern im Zusammenspiel. Ihre Wirkung ist zudem immer standortabhängig: Was in trockenen Regionen Trockenresistenz aufbaut, kann auf feuchten Standorten vorübergehend das Gegenteil bewirken.

Drei Grundsätze leiten diesen Ansatz:

- **Diversifizieren**, also Arten, Herkünfte, Strukturen und funktionelle Merkmale so kombinieren, dass Vielfalt, Komplementarität und gegenseitige Pufferung entstehen.
- **Beobachten**, indem Baumreaktionen nach Eingriffen aktiv verfolgt, Abweichungen früh erkannt und korrigiert werden.
- **Standortgerecht handeln**, indem keine Massnahme ohne Einschätzung der lokalen Wasserverfügbarkeit, Dürregeschichte und Konkurrenzverhältnisse erfolgt.

Die Wälder, die wir heute begründen, werden das Klima der zweiten Jahrhunderthälfte erleben. Das verlangt keine Perfektion, sondern eine klare Richtung, die sich an der Baumphysiologie im ökologischen Kontext orientiert.

Literatur

Gessler A., Grünzweig J.M., Bigio L., Hartmann H., McDowell N., Krumm F., … Bottero A. (2026) Shaping future forests: how can ecophysiology support climate-smart forest management? New Phytologist. doi.org/10.1111/nph.71007

Dokumenteninfos

Autoren
Arthur Gessler (WSL), Andreas Rigling (ETHZ)

Redaktion
Eidg. Forschungsanstalt WSL

Kontakt
Arthur Gessler
arthur.gessler@wsl.ch

Eidg. Forschungsanstalt WSL
Wald- und Bodenökologie
Zürcherstrasse 111
CH - 8903 Birmensdorf

Zitierung
Gessler A., Rigling A. (2026) Klimafreundliche Waldbewirtschaftung: Baumphysiologie als Grundlage. Waldwissen.net WSL. doi.org/10.55419/wsl:43612

Open Access
Dieser Beitrag ist Open Access. Alle Inhalte, bei denen nichts anderes angegeben ist, unterliegen der Creative-Commons-Lizenz CC BY 4.0. Sie dürfen unter Angabe der Quelle frei vervielfältigt, verbreitet und bearbeitet werden.