

Fachlicher Schlussbericht zum Projekt

Schweizweite Karten des lichtbedingten baumartenspezifischen Verjüngungspotentials

Florian Zellweger¹, Samuel Zürcher², Martin Brüllhardt³, Christian Ginzler¹, Peter Bebi⁴

¹Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf

²Fachstelle Gebirgswaldpflege GWP, Maienfeld

³Fachstelle Waldbau, Lyss

⁴WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos

Birmensdorf, im März 2026

Dieses Projekt wurde vom Wald- und Holzforschungsförderungsfond Schweiz (WHFF-CH) sowie den Kantonen AG, BE, FR, GR, SG, TI, UR, VD, VS, ZH und dem Fürstentum Liechtenstein finanziell unterstützt.



Inhaltsverzeichnis

Abstract	3
Zusammenfassung (gemäss adm. Schlussbericht)	3
Résumé	4
Ausgangslage	6
Projektziele und Forschungsfragen	7
Methoden	8
Feldaufnahmen und Lichtmodellierung	8
Ergebnisse	11
Kartierung der Schwellenwerte – Erstellung und Monitoring der Licht-bedingten Hinweiskarte des Verjüngungspotentials	14
Validierung der Ergebnisse	15
Limitierungen und wichtige Punkte für die Interpretation der Karte	16
Nutzen für die Praxis	17
Publikation und öffentlicher Zugang zur Karte	18
Schlussfolgerungen	18
Verdankung	19
Literaturverzeichnis	19
Anhang	19

Abstract

Es wurde eine Karte entwickelt, die aufzeigt, wo die Lichtverhältnisse für ausreichenden Höhenzuwachs der Verjüngung (≤ 300 cm) pro Baumartengruppe genügen. Grundlage sind Felddaten in 39 Forstrevieren der Schweiz sowie der aus LiDAR-Daten abgeleitete Kronenöffnungsgrad. Die Karte unterstützt Försterinnen und Waldbewirtschaftende bei der Planung von Verjüngungseingriffen, der Jungwaldpflege, der Baumartenwahl und beim zeitlichen und räumlichen Monitoring.

Une carte a été élaborée afin d'indiquer les zones où les conditions d'ensoleillement sont suffisantes pour garantir une croissance en hauteur suffisante (≤ 300 cm) pour chaque groupe d'essences. Elle se base sur des relevés effectués sur le terrain dans 39 triage forestiers suisses ainsi que sur le degré d'ouverture des couronnes dérivé des données LiDAR. La carte aide les forestiers et les gestionnaires forestiers à planifier les interventions de régénération, soins aux jeunes forêts, le choix des essences et le suivi temporel et spatial.

Zusammenfassung (gemäss adm. Schlussbericht)

Im Rahmen dieses Projekts wurde eine schweizweite Karte des baumartenspezifischen Verjüngungspotentials entwickelt, die aufzeigt, in welchen Waldgebieten die Lichtverhältnisse für das vitale Wachstum junger Bäume (≤ 300 cm) ausreichend sind. Hintergrund ist die hohe Bedeutung der Naturverjüngung für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung, insbesondere im Kontext des Klimawandels.

Die erfolgreiche Naturverjüngung hängt von verschiedenen Faktoren ab, darunter Boden, Wasserverfügbarkeit, Wildverbiss und Konkurrenzvegetation. Licht stellt jedoch einen zentralen Einflussfaktor dar, da unterschiedliche Baumarten spezifische Lichtansprüche haben und die Lichtverfügbarkeit gezielt mit forstlichen Eingriffen gesteuert wird. Bisherige Methoden zur Beurteilung des Verjüngungspotentials basieren meist auf aufwendigen Felddaten und liefern nur begrenzt Hinweise auf die Ursachen mangelnder Verjüngung.

Ziel des Projekts war es daher, das lichtbedingte Verjüngungspotential für die gesamte Waldfläche der Schweiz zu modellieren und als Karte darzustellen. Zudem sollte eine Grundlage für ein räumliches und zeitliches Monitoring des Verjüngungspotential geschaffen werden. Zentrale Forschungsfragen betrafen die Ableitung von baumartenspezifischen Lichtschwellenwerten, deren mögliche Differenzierung nach Höhenstufen sowie die Eignung verschiedener Lichtindikatoren.

Die Studie kombinierte Felddaten in 39 Waldgebieten mit modernen LiDAR-basierten Lichtmodellierungen. Vor Ort wurden Höhenwachstum und Standortbedingungen junger Bäume verschiedener Arten erfasst. Die Auswahl konzentrierte sich auf dominante, gesunde Individuen, um praxisrelevante Aussagen zu ermöglichen. Die Lichtverhältnisse wurden mithilfe von LiDAR-Daten modelliert. Dabei wurden insbesondere der Kronenöffnungsgrad (als Mass für diffuses Licht) sowie die direkte Sonneneinstrahlung berechnet. Ergänzend gaben Försterinnen und Förster für jeden Baum eine gutachtliche Einschätzung des Entwicklungspotentials in drei Klassen ab: ausreichend Licht, Licht wirkt limitierend, zu dunkel.

Die Analysen zeigten, dass der Höhenzuwachs mit zunehmender Lichtverfügbarkeit ansteigt, jedoch mit grosser Streuung. Daher konnten keine verlässlichen Lichtschwellenwerte direkt aus den Wachstumsdaten abgeleitet werden. Stattdessen wurden Schwellenwerte auf Basis der gutachtlichen Einschätzungen bestimmt. Die Baumarten wurden in vier Gruppen eingeteilt:

- Lärche, Birke, Stiel- und Traubeneiche, Waldföhre und Kirschbaum: Lichtbaumarten (Gruppe 1)
- Berg- und Spitzahorn: Halblichtbaumarten (Gruppe 2)
- Fichte, Sommer- und Winterlinde: Halbschattenbaumarten (Gruppe 3):
- Buche und Tanne: Schattenbaumarten (Gruppe 4)

Zusätzlich wurde eine Kategorie definiert, in der es für das Aufwachsen aller Baumarten zu dunkel ist. Die wesentlichen Erkenntnisse sind:

- Der Kronenöffnungsgrad ist der geeignetste Indikator zur Bestimmung von Lichtschwellenwerten
- Die Berücksichtigung von Höhenstufen brachte keine Verbesserung
- Eine nationale Unterteilung in genügend vs. ungenügend Licht erwies sich als am robustesten

Auf Basis der definierten Schwellenwerte wurde eine flächendeckende Karte des Verjüngungspotentials in hoher Auflösung (5 m) erstellt. Diese zeigt, welche Baumartengruppen unter den gegebenen Lichtverhältnissen gute Wachstumsbedingungen vorfinden.

Die Karte wurde durch Forstpraktiker validiert und insgesamt als realistisch und hilfreich beurteilt.

Einige Abweichungen wurden festgestellt, beispielsweise wurde in gewissen Gebieten eine Unterschätzung des Potentials für schattentolerante Baumarten festgestellt. Die Schwellenwerte wurden daraufhin geringfügig angepasst.

Ein besonderer Vorteil besteht darin, dass durch neue LiDAR-Daten ein kontinuierliches Monitoring der Lichtverhältnisse und damit des Verjüngungspotentials möglich ist.

Die Karte weist jedoch mehrere Einschränkungen auf:

- Sie berücksichtigt ausschliesslich Licht und keine anderen Einflussfaktoren
- Die tatsächliche Verjüngung vor Ort wird nicht dargestellt
- In Dickungen (ca. 3-7m Höhe) wird die Lichtverfügbarkeit überschätzt
- Direkte Sonneneinstrahlung (also Exposition und Hangneigung) wurde nicht berücksichtigt

Die Karte bietet eine hilfreiche Entscheidungsgrundlage für die Forstpraxis. Sie kann eingesetzt werden zur:

- Planung von Verjüngungseingriffen
- Auswahl geeigneter Baumarten
- Priorisierung von Massnahmen
- Kontrolle der Wirksamkeit von Eingriffen

Zudem lässt sie sich mit weiteren Datensätzen kombinieren und unterstützt so eine klimawandelangepasste Waldbewirtschaftung.

Das Projekt zeigt, dass durch die Kombination von Fernerkundung und forstlichem Expertenwissen eine praxistaugliche, schweizweite Einschätzung des Verjüngungspotentials möglich ist. Trotz bestehender Unsicherheiten stellt die Karte ein wichtiges Instrument für Planung, Monitoring und Anpassung der Wälder an zukünftige Bedingungen dar.

Résumé

Dans le cadre de ce projet, une carte nationale du potentiel de régénération par essence a été élaborée ; elle indique les zones forestières où les conditions de luminosité sont suffisantes pour assurer une croissance vigoureuse des jeunes arbres (≤ 300 cm). Cette initiative s'inscrit dans le contexte de l'importance capitale de la régénération naturelle pour une gestion durable des forêts, en particulier face au changement climatique.

La réussite du rajeunissement naturel dépend de divers facteurs, notamment le sol, la disponibilité en eau, l'abrutissement par le gibier et la végétation concurrente. La lumière constitue toutefois un facteur d'influence central, car les différentes essences ont des besoins spécifiques en lumière et la

disponibilité en lumière est contrôlée de manière ciblée par des interventions sylvicoles. Les méthodes utilisées jusqu'à présent pour évaluer le potentiel de régénération reposent généralement sur des relevés de terrain fastidieux et ne fournissent que des indications limitées sur les causes d'une régénération insuffisante.

L'objectif du projet était donc de modéliser le potentiel de régénération lié à la lumière pour l'ensemble de la superficie forestière de la Suisse et de le représenter sous forme de carte. Il s'agissait également de créer une base pour un suivi spatial et temporel du potentiel de régénération. Les questions de recherche centrales portaient sur la détermination de seuils de lumière spécifiques aux essences, leur différenciation possible selon les étages altitudinaux ainsi que la pertinence de différents indicateurs de lumière.

L'étude a combiné des relevés sur le terrain réalisés dans 39 zones forestières avec des modélisations lumineuses modernes basées sur le LiDAR. Sur place, la croissance en hauteur et les conditions de station de jeunes arbres de différentes espèces ont été enregistrées. La sélection s'est concentrée sur des individus dominants et sains afin de permettre des conclusions pertinentes pour la pratique. Les conditions de luminosité ont été modélisées à l'aide de données LiDAR. Le degré d'ouverture de la canopée (comme mesure de la lumière diffuse) ainsi que le rayonnement solaire direct ont notamment été calculés. En complément, les forestiers ont fourni pour chaque arbre une évaluation experte du potentiel de développement selon trois classes : lumière suffisante, lumière limitante, trop sombre.

Les analyses ont montré que la croissance en hauteur augmente avec la disponibilité croissante de la lumière, mais avec une grande dispersion. Par conséquent, aucun seuil de lumière fiable n'a pu être directement déduit des données de croissance. À la place, des seuils ont été déterminés sur la base des évaluations d'expertise. Les essences ont été réparties en quatre groupes :

- Mélèze, bouleau, chêne pédonculé et chêne pubescent, pin sylvestre et cerisier : essences de lumière (groupe 1)
- Érable sycomore et érable plane : essences de mi-lumière (groupe 2)
- Épicéa, tilleul à grandes feuilles et tilleul à petites feuilles : essences de mi-ombre (groupe 3) :
- Hêtre et sapin : essences d'ombre (groupe 4)

Une catégorie supplémentaire a été définie, dans laquelle l'environnement est trop sombre pour la croissance de toutes les essences. Les principales conclusions sont les suivantes :

- Le degré d'ouverture de la couronne est l'indicateur le plus approprié

Sur la base des seuils définis, une carte exhaustive du potentiel de régénération en haute résolution (5 m) a été établie. Celle-ci indique quels groupes d'essences bénéficient de bonnes conditions de croissance dans les conditions de luminosité données.

La carte a été validée par des professionnels de la sylviculture et jugée globalement réaliste et utile. De légers écarts ont été constatés ; par exemple, dans certaines zones, on a observé une sous-estimation du potentiel pour les essences tolérantes à l'ombre. Les seuils ont alors été légèrement ajustés.

Un avantage particulier réside dans le fait que les nouvelles données LiDAR permettent un suivi continu des conditions de luminosité et, par conséquent, du potentiel de régénération.

La carte présente toutefois plusieurs limites :

- Elle ne tient compte que de la lumière et d'aucun autre facteur d'influence
- Le rajeunissement réel sur le terrain n'est pas représenté
- Dans les fourrés (environ 3 à 7 m de hauteur), la disponibilité de la lumière est surestimée
- Le rayonnement solaire direct (c'est-à-dire l'exposition et la pente) n'a pas été pris en compte

La carte offre une base décisionnelle utile pour la pratique forestière. Elle peut être utilisée pour :

- planifier les interventions de régénération

- sélectionner les essences appropriées
- hiérarchiser les mesures
- contrôler l'efficacité des interventions

De plus, elle peut être combinée avec d'autres ensembles de données et favorise ainsi une gestion forestière adaptée au changement climatique.

Ce projet montre que la combinaison de la télédétection et de l'expertise forestière permet d'obtenir une évaluation pratique du potentiel de régénération à l'échelle nationale. Malgré les incertitudes existantes, cette carte constitue un outil important pour la planification, le suivi et l'adaptation des forêts aux conditions futures.

Ausgangslage

Zielkonforme Naturverjüngung ist eine Schlüsselkomponente in der nachhaltigen und multifunktionalen Waldbewirtschaftung und stellt Waldeigentümer und Forstbetriebe im Rahmen des Klimawandels vor grosse Herausforderungen. Für eine erfolgreiche Etablierung und den Höhenzuwachs der Naturverjüngung spielen neben anderen Standortseigenschaften (u. a. Boden und Topographie), Samenverfügbarkeit, Verbissintensität und der Konkurrenz durch die Bodenvegetation vor allem die kleinräumigen, mikroklimatischen Temperatur-, Licht- und Feuchtigkeitsverhältnisse, an welche die verschiedenen Baumarten jeweils unterschiedliche Ansprüche haben, eine wichtige Rolle. In subalpinen Fichtenwäldern wird beispielsweise angenommen, dass für genügend Wachstum des Fichtenjungwuchses an Nordhängen 1.5 bis 2 Stunden direkte Sonnenscheindauer im Juni nötig sind (Frehner, 1989). Eine ähnliche Faustregel gilt auch für die Lärche, für welche man von 4 Stunden benötigter Sonnenscheindauer ausgeht (Ott et al., 1997). In tieferen Lagen wiederum wirkt meist das diffuse Licht limitierend auf die Entwicklung der Verjüngung und direkte Sonneneinstrahlung ist dort nicht zwingend notwendig (Lüscher, 1989). Weitere Beobachtungen zeigen jedoch, dass die Verjüngung von schattentoleranten Baumarten unter schwachen Lichtverhältnissen überleben und leicht wachsen kann, die sich relativ stark von den optimalen Wachstumsbedingungen unterscheiden. Für die Interpretation des standortspezifischen Verjüngungspotentials ist es für die forstliche Praxis deshalb wichtig zu wissen, in welchen Beständen entweder zu wenig Licht für das längerfristige Überleben der Jungbäume vorhanden ist oder zwar ein lichtbedingtes Verjüngungspotential vorhanden ist, jedoch mit einem forstlichen Eingriff genügend Licht für den notwendigen Höhenzuwachs geschaffen werden sollte. Andererseits ist es hilfreich, jene Waldgebiete ausscheiden zu können, in welchen bereits genügend Licht für ausreichenden Höhenzuwachs der Zielbaumarten vorhanden ist und allenfalls Jungwaldpflegemassnahmen nötig sind oder werden.

Das standortspezifische Potential für die Etablierung und den Höhenzuwachs der Verjüngung einzelner Baumarten wird (ergänzend zu den rein gutachtlichen Beurteilungen durch die lokalen Waldbewirtschaftenden) bis anhin vor allem über Informationen der Verjüngungspräsenz und Verjüngungsentwicklung aus wiederholten Stichprobenaufnahmen abgeleitet. Dies ist sehr aufwändig und oft erlauben solche Aufnahmen keine Aussagen über die Gründe von ungenügender Verjüngung und damit auch nicht zu Ansatzpunkten für waldbauliche Verbesserungen: Fehlendes Samenangebot? Ungenügende Lichtverhältnisse? Wildeinfluss? Konkurrenzvegetation?

Eine grossflächige Erfassung und Beurteilung der Lichtverfügbarkeit in Kombination mit den artspezifischen Lichtansprüchen ist bis anhin nicht praxistauglich verfügbar. Neben der tatsächlich vorhandenen Verjüngung wird klassischerweise der Holzvorrat als Indikator für sowohl Verjüngungspotenzial als auch Verjüngungs-Bedarf verwendet. Dabei werden hohe Durchschnittsvorräte als Hinweis auf ungenügendes Verjüngungspotenzial interpretiert. Diverse Praxisbeispiele zeigen jedoch, dass dies in strukturreichen Wäldern oft nicht zutrifft und hohe Durchschnittsvorräte durchaus mit genügender Verjüngung einhergehen können.

Schweizweit flächendeckende und räumlich detaillierte Angaben zum lichtbedingten Verjüngungspotential würden somit eine wichtige Grundlage für die Planung von Massnahmen zur Einleitung und die Förderung von Naturverjüngung bieten. Ein vielversprechender Ansatz für die Entwicklung solcher Karten ist die statistische Kombination von punktuell gemessenen oder gutachtlich erhobenen Verjüngungsdaten mit flächendeckend vorhandenen Karten der Lichtverfügbarkeit. So können die punktuell gewonnen Erkenntnisse zum lichtbedingten Verjüngungspotential für die ganze Schweiz kartiert werden. Dank neuesten Entwicklungen in den Bereichen Fernerkundung und Lichtmodellierung sind wir nun in der Lage, die für die Verjüngung relevanten Lichtverhältnisse flächendeckend hochaufgelöst zu quantifizieren. Zum Beispiel hat Webster et al. (2023) eine Methode entwickelt, die es erlaubt, die Kronenöffnung und das damit zusammenhängende diffuse Licht, sowie die direkte Sonneneinstrahlung im Wald präzise aus 3D Light Detection and Ranging (LiDAR) Daten herzuleiten und zu kartieren (Abbildung 1). Damit sind die methodischen Voraussetzungen für die Modellierung und detaillierte Kartierung des lichtbedingten Verjüngungspotentials gegeben.

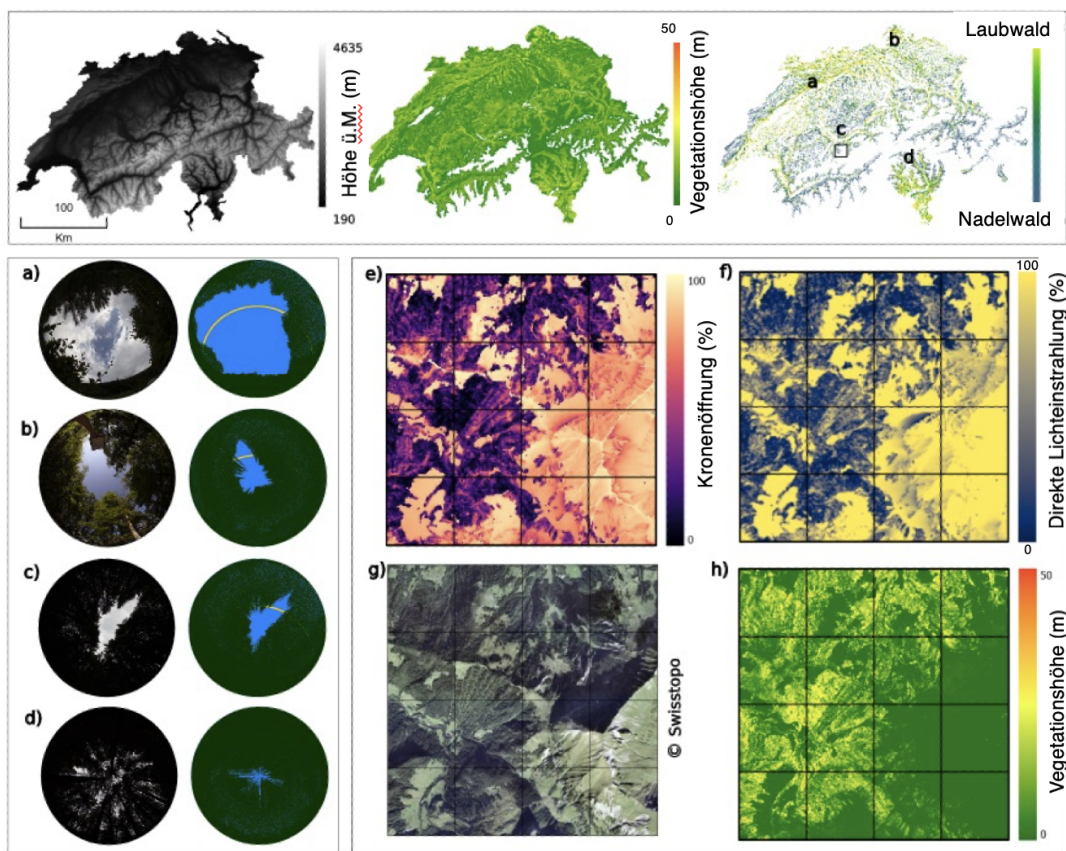


Abbildung 1: Mit der Methode von Webster et al. (2023) werden mittels LiDAR Daten hemisphärische Bilder abgeleitet. a - d zeigen den Vergleich von aus LiDAR abgeleiteten Bildern (rechts) mit im Feld aufgenommenen Bildern (links). Aus den LiDAR-basierten Bildern werden in einem zweiten Schritt die Kronenöffnung und das damit zusammenhängende diffuse Licht, sowie das direkt einfallende Licht berechnet. Dieses Verfahren wird dann für die ganze Waldfläche der Schweiz in einem Fünf-Meter-Raster angewendet, um die Kronenöffnung (e) und die direkte Lichteinstrahlung (f) zu kartieren.

Projektziele und Forschungsfragen

Das übergeordnete Ziel dieses Projekts war, das lichtbedingte, baumartenspezifische Verjüngungspotential für die gesamte Waldfläche der Schweiz zu modellieren und für die Praxis

in Kartenform zugänglich zu machen. Zusätzlich sollte die Methodik und Kartierung so entwickelt werden, damit ein möglichst verlässliches Monitoring des Verjüngungspotentials möglich wird.

Unsere Forschungsfragen lauteten wir folgt:

Frage 1: Lassen sich anhand von Höhenzuwachsmessungen baumartenspezifische Schwellenwerte in der Lichtverfügbarkeit ableiten, um eine Unterteilung der Waldflächen in genügende versus ungenügende Lichtverhältnisse vorzunehmen? Falls nicht: Können die Lichtschwellenwerte anhand gutachtlicher Einschätzungen des Entwicklungspotentials definiert werden?

Frage 2: Verbessern sich die Resultate, wenn die Lichtschwellenwerte höhenstufenspezifisch hergeleitet werden?

Frage 3: Anhand welcher Lichtindikatoren – Kronenöffnungsgrad oder direktes Sonnenlicht – können die Lichtschwellenwerte am konsistentesten definiert werden?

Methoden

Feldaufnahmen und Lichtmodellierung

Um Daten über das Höhenwachstum und Entwicklungspotential der Verjüngung verschiedener Baumarten zu erheben, haben wir 39 Waldgebiete der Schweiz in Höhenlagen zwischen 333 und 1797 Metern über dem Meeresspiegel aufgesucht (Abbildung 2). Die durchschnittliche Jahrestemperatur an diesen Standorten lag zwischen 0,6 und 12,7 °C, während die jährliche Niederschlagsmenge zwischen 736 und 2455 mm variierte (Karger et al., 2021, 2017). Die Auswahl der Waldgebiete erfolgte so, dass die biogeografische Vielfalt der Schweizer Wälder umfassend repräsentiert war, einschliesslich des Vorkommens seltenerer Baumarten innerhalb unserer Zielartengruppe. Mit Unterstützung lokaler Förster wurden innerhalb jedes Waldgebiets bestimmte Gebiete ausgewählt, um die unterschiedlichen Lichtverhältnisse bestmöglich abzudecken und die lokale Baumartenvielfalt in der Verjüngungsschicht so umfassend wie möglich darzustellen. Die Ortskenntnisse der Förster erleichterte auch die Erfassung von Individuen seltenerer Arten, die nur sporadisch oder in lokalen Populationen vorkommen.

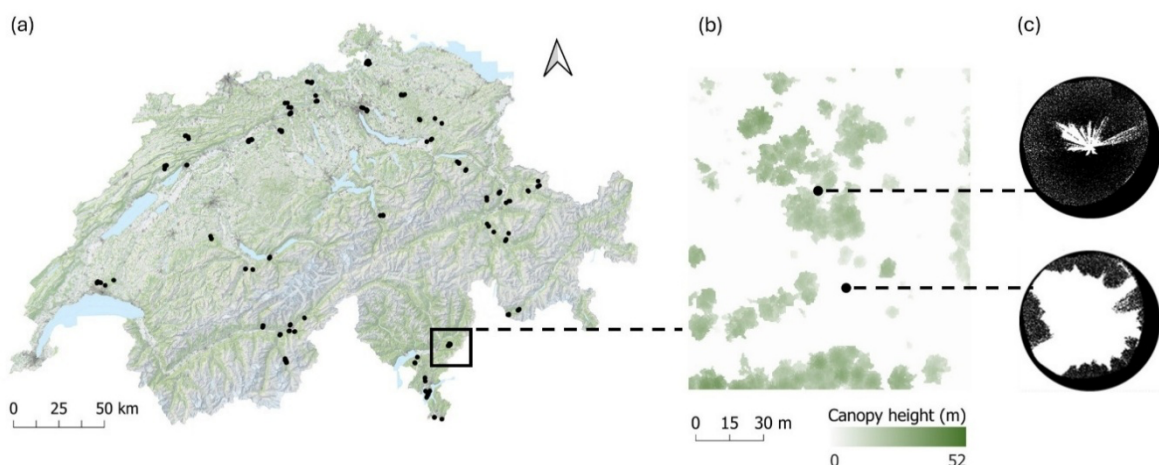


Abbildung 2. Standorte für die Feldaufnahmen und Lichtmodellierung. (a) Karte mit der Verteilung der Untersuchungsstandorte (schwarze Punkte). Grundkarte: Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2024c). (b) Beispielregion mit zwei Baumstandorten. Der Hintergrund zeigt das Vegetationshöhenmodell, das zur Abschätzung der lokalen Lichtverhältnisse verwendet wurde. (c) Modellierte digitale hemisphärische Bilder an den beiden Baumstandorten.

Unsere primären Zielbaumarten lauteten wie folgt: Douglasie, Europäische Buche, Europäische Lärche, Sommerlinde, Fichte, Stieleiche, Waldföhre, Traubeneiche, Hänge-Birke, Weisstanne, Winterlinde, Bergahorn und Wildkirsche (Tabelle 1). Die Datenerhebung zu einzelnen Bäumen erfolgte von August bis Oktober 2024. Für die Messungen wurden nur dominante Baumindividuen mit einer Gesamthöhe zwischen 30 cm und 300 cm ausgewählt, wobei darauf geachtet wurde, dass die untersuchten Bäume ein gerades Wachstum und keine sichtbaren Schäden aufwiesen. In einigen Fällen wurden Individuen mit geringfügigen Schäden gemessen, was protokolliert und später in der Ausreisseranalyse berücksichtigt wurde. Es wurden nur Bäume berücksichtigt, die in erster Linie durch Lichtkonkurrenz aus der umgebenden Baumkronenschicht beeinflusst waren. Bäume wurden ausgeschlossen, wenn sie von Unterholzvegetation überragt oder umgeben waren, die ihre eigene Höhe überstieg, da diese Art der Konkurrenz mit dem angewandten Lichtmodellierungsansatz nicht vollständig erfasst werden konnte (siehe unten). Die Konzentration auf dominante Individuen schränkt die ökologische Repräsentativität und Vergleichbarkeit mit anderen Studien ein, die die gesamte Populationsstruktur abdecken. Sie erhöht jedoch die praktische Relevanz für die Forstwirtschaft, da sie die Auswahl zukünftiger Z-Bäume widerspiegelt.

Für jedes ausgewählte Individuum wurden die Baumhöhe und die Länge des Endtriebs für das aktuelle Jahr (2024) – und, wenn möglich, für die beiden Vorjahre – mit einem Lineal gemessen. Die effektive Baumhöhe wurde vom Baumfuss bis zur Spitze des Endtriebs einschliesslich der Endknospe gemessen. Das Wachstum des Endtriebs im laufenden Jahr wurde anhand der Narbe der Endknospe des Vorjahres und bei Laubbäumen auch anhand des Vorhandenseins von direkt aus dem Stamm austreibenden Blättern bestimmt. Das Höhenwachstum der Vorjahre wurde gemessen, wenn es anhand der Knospenschalen-Narben eindeutig identifizierbar war. Wenn Johannistriebe (zweiter bis x-ter Trieb) vorhanden waren, wurden diese bei der Wachstumsmessung des laufenden Jahres berücksichtigt. In solchen Fällen wurden die Wachstumszuwächse der Vorjahre aufgrund der hohen Wahrscheinlichkeit von Messfehlern nicht erfasst.

Die Koordinaten jedes Baumes wurden mit dem GNSS-Empfänger ppm10xx erfasst, der in der Regel eine Positionsgenauigkeit im Dezimeterbereich unter Verwendung von Echtzeit-Kinematikkorrekturen erreicht (ppm – Precise Positioning Management GmbH, o. J.). Wir haben nur nachwachsende Bäume in Beständen gemessen, in denen sich laut Angaben des örtlichen Försters die Kronenstruktur seit der LiDAR-Datenerfassung nicht verändert hat (z. B. keine neuen Holzschläge), um mögliche Diskrepanzen zwischen den vor Ort beobachteten Lichtverhältnissen und denen aus der LiDAR-basierten Lichtmodellierung zu vermeiden. In einigen Fällen konnten wir eine mögliche Abweichung von der tatsächlichen Waldsituation aufgrund nicht erfasster natürlicher oder anthropogener Eingriffe in das Kronendach nicht ausschliessen. Wir haben diese Fälle notiert und bei der Ausreisseranalyse berücksichtigt. Vereinfachend wurde davon ausgegangen, dass die Kronendachstruktur ohne solche Störungen seit der LiDAR-Datenerfassung unverändert geblieben ist.

Um die Lichtverhältnisse am Standort jedes gemessenen Baumes zu bestimmen, haben wir ein kürzlich entwickeltes, frei zugängliches Strahlungstransfermodell angewendet (i.e. CanopyHeightModel2Radiation (C2R, CanRad) (Webster et al., 2023)). In einem ersten Schritt berechneten wir digitale hemisphärische Bilder auf der Grundlage eines Baumkronenhöhenmodells mit einer Auflösung von 1 m, das aus LiDAR-Daten abgeleitet wurde, die zwischen 2019 und 2023 vom Bundesamt für Landestopografie swisstopo landesweit erhoben und vom LFI verarbeitet wurden (Abbildung 1). Aus diesen Bildern wurde einerseits der Kronenöffnungsgrad und andererseits das direkt einfallende Sonnenlicht berechnet. Das Modell berücksichtigt sowohl die Abschattung der umliegenden Baumkronen, als auch die Abschattung durch das lokale und regionale Gelände (Webster et al., 2023). Der Kronenöffnungsgrad wurde anhand einer 180° Perspektive ermittelt, was dazu führt, dass die Werte nicht direkt vergleichbar sind mit Schätzungen im Feld, welche meistens auf einem kleineren Sichtradius basieren. Die direkt einfallende, potenzielle Sonnenstrahlung wurde anhand der mittleren Lichtdurchlässigkeit der Baumkronenschicht und Topographie im Juni zwischen 9 Uhr morgens und 16

Uhr abends berechnet. Die Ergebnisse von C2R wurden wiederholt durch Feldmessungen validiert und es zeigte sich, dass sie die Lichtverhältnisse sehr gut abbilden (Webster et al., 2023).

Zusätzlich zu den Höhenzuwachsmessungen und den Lichtmodellierungen wurden die lokalen Produktivitätswerte sowie die Dichte der Unterholzvegetation erhoben. Die lokalen Produktivitätswerte (erwarteter Zuwachs in Kubikmeter pro Hektare) wurden von den Förstern geliefert. In den untersuchten Waldgebieten im Kanton Tessin lagen solche Daten nicht vor, sodass stattdessen ein vom LFI veröffentlichter Wert für die entsprechende Region verwendet wurde. Die Dichte der Unterholzvegetation wurde in einem Umkreis von 2 Metern um den untersuchten Baum bewertet, indem der Anteil der mit Gehölzen (z. B. Sträuchern oder natürlicher Baumverjüngung) bewachsenen Fläche geschätzt wurde. Bei einer Bedeckung von <5 % wurde die Bewertung 1 vergeben, bei einer Bedeckung von 5–25 % die Bewertung 2 und bei einer Bedeckung von >25 % die Bewertung 3. Diese Variable steht für die lokale Dichte der Gehölzvegetation und erfasst sowohl die Konkurrenz als auch die Standortbedingungen um die untersuchten Jungbäume herum. Der Einfluss sämtlicher erhobener Variablen (Lichtverfügbarkeit, Gesamthöhe des Bäumchens, Produktivität, lokale Dichte der Gehölzvegetation, Höhe in Meter über Meer) auf den Höhenzuwachs der Verjüngung wurde im Rahmen von Angela Braun's Masterarbeit detailliert analysiert (siehe Anhang 1). Da sich diese Analyse aber nicht direkt für die Festlegung der Schwellenwerte gemäss Fragestellung eignet, gehen wir hier nicht näher darauf ein. Eine ausführliche Dokumentation dieser Analysen und entsprechenden Resultate sind im Anhang 1 ersichtlich. Dieser wird nun in einem wissenschaftlichen Journal zur Publikation eingereicht.

Die Anzahl der Waldbezirke, in denen Individuen gemessen wurden, variiert je nach Baumart, ebenso wie die Anzahl der Datenpunkte pro Art (Tabelle 1). Diese Abweichungen sind auf Unterschiede in der Verbreitung und Häufigkeit der Arten zurückzuführen. Es gilt zu beachten, dass wir neben den Baumarten in Tabelle 1 auch Daten zur Douglasie und Kastanie erhoben haben. Da die räumliche Abdeckung dieser beiden Baumarten jedoch relativ klein war und sich die Resultate unter Einbezug dieser beiden Baumarten verschlechtert haben, entschlossen wir uns, diese beiden Baumarten von den Analysen auszuschliessen.

Tabelle 1: Anzahl der untersuchten Individuen und Anzahl der untersuchten Waldgebiete pro Art/Artgruppe.

Art / Artgruppe	Individuen (n)	Forstbezirke (n)
Europäische Lärche	147	22
Waldföhre	97	18
Birke	115	28
Stieleiche & Traubeneiche	153	23
Kirschbaum	88	26
Fichte	328	36
Sommer- und Winterlinde	90	18
Berg- und Spitzahorn	204	33
Buche	260	32
Weisstanne	202	33

Um eine gutachtliche Einschätzung des Entwicklungspotentials jedes Baumes zu erheben, wurden die involvierten FörsterInnen gebeten, für jeden Baum eine Einschätzung abzugeben, ob (1) genügend Licht für ausreichenden Höhenzuwachs ohne zusätzliche Massnahmen vorhanden ist (**genügend Licht, Lichtklasse 1**); oder (2) genügend Licht vorhanden ist für das Anwachsen und Überleben über einige Jahre, jedoch bald Massnahmen für die Förderung der Verjüngung erforderlich sind (**Licht wirkt limitierend, Lichtklasse 2**); oder (3) die Lichtverfügbarkeit für das längerfristige Überleben des Baumes nicht ausreicht (**zu dunkel, Lichtklasse 3**)

Ergebnisse

Wie im Korrelationsdiagramm (Abbildung 3) dargestellt, nimmt der Höhenzuwachs erwartungsgemäss mit zunehmendem Kronenöffnungsgrad (mehr Licht) zu. Die Streuung der Punkte ist jedoch sehr gross, was darauf hindeutet, dass der Höhenzuwachs neben der Lichtverfügbarkeit von vielen weiteren Faktoren abhängt. Zudem verläuft die Beziehung zwischen Höhenzuwachs und Kronenöffnungsgrad für alle Baumarten mehr oder weniger linear, vor allem im Wertebereich < 50% Kronenöffnungsgrad, wo die meisten Punkte liegen. Dieselbe Schlussfolgerung ergab sich auch, wenn anstatt des Kronenöffnungsgrads das direkt einfallende Sonnenlicht berücksichtigt wurde, allerdings war dort der Zusammenhang schwächer ausgeprägt als mit dem Kronenöffnungsgrad. Daraus folgt, dass wir den ersten Teil unserer Forschungsfrage 1 – ob sich anhand von Höhenzuwachsmessungen baumartenspezifische Schwellenwerte in der Lichtverfügbarkeit ableiten lassen – verneinen müssen. Zur Beantwortung des zweiten Teils der Forschungsfrage 1 – ob sich Lichtschwellenwerte anhand gutachtlicher Einschätzungen des Entwicklungspotentials definieren lassen – haben wir eine Gruppierung der Baumarten in vier Klassen unter Berücksichtigung der baumartenspezifischen Lichtbedürfnisse vorgenommen. Die Klassierung lautet wie folgt:

Lärche, Birke, Stiel- und Traubeneiche, Waldföhre und Kirschbaum: Lichtbaumarten (Gruppe 1)

Berg- und Spitzahorn: Halblichtbaumarten (Gruppe 2)

Fichte, Sommer- und Winterlinde: Halbschattenbaumarten (Gruppe 3):

Buche und Tanne: Schattenbaumarten (Gruppe 4)

Zu dunkel für das Aufwachsen sämtlicher Baumarten (Gruppe 5)

Wir haben auch getestet, ob andere Klassierungen, z. B. die Aufteilung der Lichtbaumarten in Lichtbaumarten und ausgesprochene Lichtbaumarten (in Anlehnung an die Klassierung in Ammann et al. 2024) zu besseren Resultaten führt. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die Klassierung in fünf Klassen wie oben erwähnt, die konsistentesten Resultate liefert.

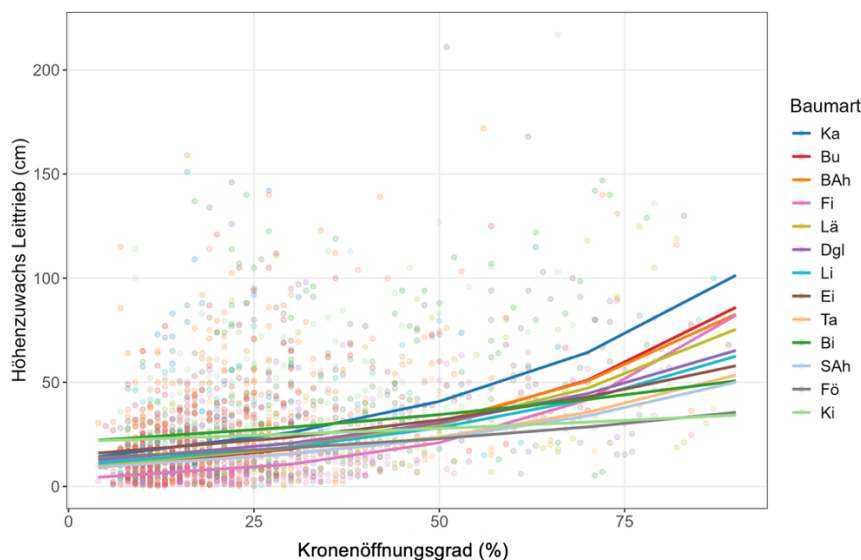


Abbildung 3. Veränderung des Höhenzuwachses in Abhängigkeit des Kronenöffnungsgrads. Wie oben erwähnt, haben wir die Daten zu Douglasie und Kastanie aufgrund derer relativ geringen räumlichen Abdeckung und schlechteren statistischen Resultaten von den weiteren Analysen ausgeschlossen.

Die Verteilungen der Höhenzuwächse pro Lichtklasse zeigen, dass die Höhenzuwächse einerseits in der Lichtklasse 1 (genügend Licht) deutlich höher sind als in den Lichtklassen 2 (Licht wirkt limitierend) und 3 (zu dunkel) (Abbildung 4). Weiter ist ersichtlich, dass die Höhenzuwächse mehr oder weniger kontinuierlich zunehmen mit den steigenden Lichtbedürfnissen der Baumarten gemäss unserer

Gruppierung oben. Beispielsweise haben Lichtbaumarten einen höheren Höhenzuwachs in der Lichtklasse 1 als Schattenbaumarten, was durchaus den Erwartungen entspricht. Abbildung 4 zeigt zudem, dass die Bäume in höheren Lagen (> 1000 müM) generell weniger schnell wachsen als in Tieflagen (< 1000 müM), wobei in höheren Lagen die Unterschiede zwischen den Baumartengruppen weniger konsistent sind.

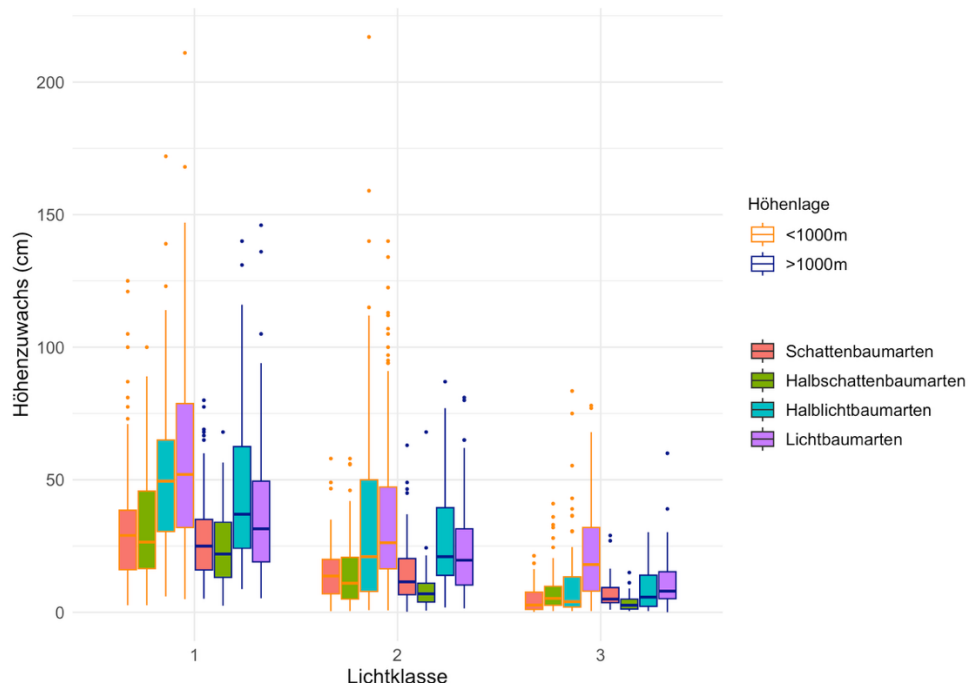


Abbildung 4. Verteilung des Höhenzuwachses pro Lichtklasse und Höhenlage.

Als nächsten Schritt haben wir analysiert, wie sich die Lichtbedingungen pro Lichtklasse und Baumartengruppe und Höhenlage verändern (Abbildung 5). Die Lichtbedingungen werden hier durch den Kronenöffnungsgrad repräsentiert. Erwartungsgemäss zeigt sich, dass in der Lichtklasse 1 wesentlich mehr Licht verfügbar ist als in den Lichtklassen 2 und 3. Die Resultate für die verschiedenen Baumartengruppen sind intuitiv auch stimmig: Die Lichtverhältnisse nehmen generell mit zunehmender Lichtbedürftigkeit der Baumarten zu. Aus diesen Ergebnissen lässt sich schliessen, dass die gutachtlich erhobene Einschätzung des Entwicklungspotentials mit den modellierten Lichtverhältnissen relativ gut übereinstimmen, was eine Grundvoraussetzung für die Bestimmung der Licht-Schwellenwerte ist.

Die Verteilungen der Daten in Abbildung 5 zeigen jedoch auch, dass die Unterschiede in der Lichtverfügbarkeit zwischen den Lichtklasse 2 und 3 gering sind. Dies hat zur Folge, dass eine verlässliche Bestimmung eines Schwellenwertes für die Unterscheidung dieser beiden Klassen nicht möglich ist. Deshalb haben wir uns entschieden, die Lichtklassen 2 und 3 in eine neue Lichtklasse 2 zusammenzufassen, wodurch sich zwei Lichtklassen ergeben: Lichtklasse 1 (genügend Licht) und Lichtklasse 2 (ungenügende Lichtverhältnisse) (siehe Abbildung 6). Ausserdem ergeben sich wenig konsistente Unterschiede zwischen den Höhenlagen, was darauf hindeutet, dass sich die Daten nicht für eine Unterteilung in verschiedene Höhenlagen eignen. Somit haben wir uns für die Bestimmung der Licht-Schwellenwerte auf die Dateneinteilung gemäss Abbildung 6 gestützt.

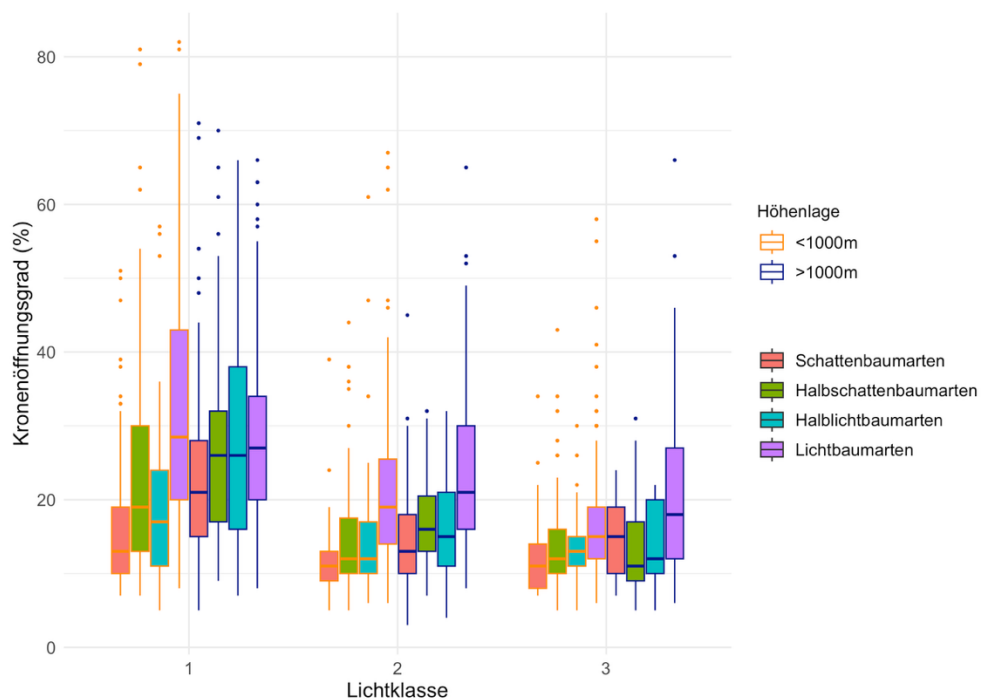


Abbildung 5. Verteilung des Kronenöffnungsgrads pro Lichtklasse und Höhenlage.

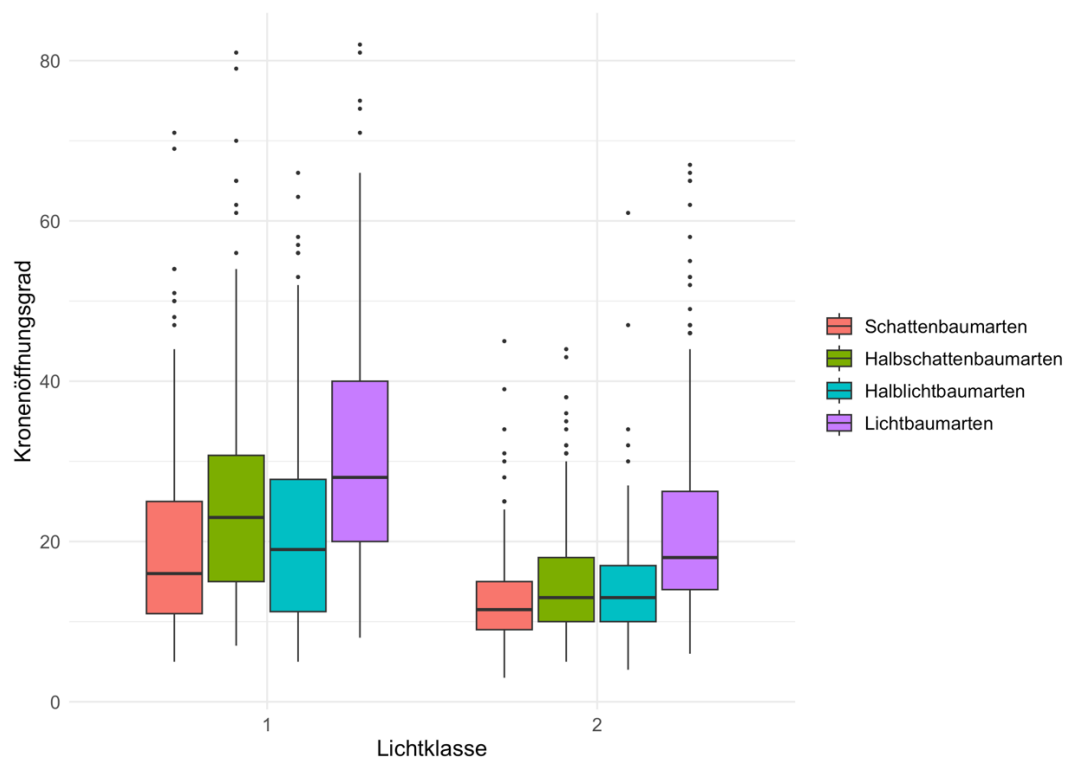


Abbildung 6. Verteilung des Kronenöffnungsgrads gemäss definitiver Dateneinteilung.

Um die Licht-Schwellenwerte für die Abgrenzung der Lichtklasse 1 (genügend Licht) gegenüber der Lichtklasse 2 (ungenügende Lichtverhältnisse) zu bestimmen, haben wir eine Receiver Operating Characteristic (ROC) Kurve berechnet. Daraus kann der Area Under the Curve (AUC) Wert hergeleitet werden, welcher eine Aussage über die statistische Güte des Schwellenwerts macht. Der

Schwellenwert ist somit jener Wert des aus LiDAR berechneten Kronenöffnungsgrads (%), der die Lichtklasse 1 am besten von der Lichtklasse 2 abgrenzt. Die AUC-Werte werden gemeinhin wie folgt interpretiert: AUC > 0.8 = sehr gut, AUC zwischen 0.7 und 0.8 = gut, AUC zwischen 0.65 und 0.7 = mässig, AUC < 0.65 wenig aussagekräftig. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Generall fallen die AUC Werte mässig bis gut aus, wobei unter Berücksichtigung des direkten Lichts auch wenig aussagekräftige Schwellenwerte vorkommen. Aus diesen Resultaten ist es nicht einfach, eine konsistente Aussage für die ganze Schweiz über alle Baumartengruppen und Höhenlagen zu machen. Beispielsweise weist die Höhenlagen-spezifische Analyse für einige Baumartengruppen relative gute AUC Werte auf, jedoch nicht für alle. Zusätzlich machen die errechneten Licht-Schwellenwerte nicht immer Sinn. Zum Beispiel ist es irreführend, dass die Schwellenwerte im Kronenöffnungsgrad für die Höhenlage > 1000 müM über alle Baumartengruppen sehr ähnlich sind und sich damit keine sinnvolle kartographische Unterteilung ergeben würde. Ähnliches gilt auch für die Schwellenwerte beim direkten Licht: Das Resultat, dass Lichtbaumarten in höheren Lagen weniger direktes Licht benötigen als in tieferen Lagen stimmt mit der gängigen forstlichen Erfahrung nicht überein. Nach ausführlichen Diskussionen mit dem Projektausschuss haben wir uns sodann entschieden, für die nationale Kartierung die Schwellenwerte des Kronenöffnungsgrads für die ganze Schweiz zu verwenden. Dort sind die AUC Werte im akzeptablem Bereich und die Schwellenwerte zwischen den Baumartengruppen folgen in etwa den Erwartungen.

Folglich lautet die Antwort auf unsere Forschungsfrage 2 – Verbessern sich die Resultate, wenn die Lichtschwellenwerte höhenstufenspezifisch hergeleitet werden? – nein. Weiter können wir festhalten, dass sich der Kronenöffnungsgrad am besten eignet, um die Lichtschwellenwerte national am konsistentesten herzuleiten, wodurch unsere Forschungsfrage 3 – Anhand welcher Lichtindikatoren, Kronenöffnungsgrad oder direktes Sonnenlicht, können die Lichtschwellenwerte am konsistentesten definiert werden? – auch beantwortet ist.

Tabelle 2. AUC und Licht-Schwellenwerte (in Prozent) für die Unterscheidung der Lichtklassen 1 (genügend Licht) und 2 (ungenügende Lichtverhältnisse).

	Bu, Ta SchattenBA		Fi, Li HalbschattenBA		Ah (BAh + Sah) HalblightBA		Lä, Bi, Ei, Fö, Ki LichtBA	
	AUC	Schwellen- wert	AUC	Schwellen- wert	AUC	Schwellen- wert	AUC	Schwellen- wert
Kronenöffnungsgrad								
Ganze Schweiz	0.69	14.5	0.74	18.5	0.66	21.5	0.69	26.5
<1000 m.ü.M.	0.67	12.5	0.75	12.5	0.63	13.5	0.71	27.5
>1000 m.ü.M.	0.76	18.5	0.76	20.5	0.75	21.5	0.64	21.5
Direktes Licht								
Ganze Schweiz	0.65	21.3	0.71	22.8	0.57	42.8	0.71	51.2
<1000 m.ü.M.	0.69	12.4	0.71	22.8	0.57	23.7	0.74	51.3
>1000 m.ü.M.	0.69	32.6	0.75	59.6	0.61	57.2	0.65	50.9

Kartierung der Schwellenwerte – Erstellung und Monitoring der Lichtbedingten Hinweiskarte des Verjüngungspotentials

Anhand der oben errechneten Schwellenwerte konnten wir für jede Waldfläche eine Einteilung vornehmen, ob es genügend oder ungenügend Licht für die jeweilige Baumartengruppe hat und daraus die schweizweite Licht-bedingte Hinweiskarte des Verjüngungspotentials erstellen. Als Basis für diese Einteilung diente der Kronenöffnungsgrad, den wir mit dem Licht-Modellierungstool CanRad für die ganze Schweiz in einer 5m-Auflösung gerechnet haben. Diese Arbeiten haben im Rahmen der flächendeckenden Produkte des LFI stattgefunden und waren mit erheblichem Aufwand verbunden. Für die Berechnungen haben wir den Code auf dem High-Performance-Cluster Euler der ETH laufen

lassen, was den Vorteil hat, dass die Berechnungen jederzeit mit aktualisierten LiDAR-Daten wiederholt werden können, um ein Monitoring der Lichtbedingungen im Schweizer Wald zu gewährleisten. In der Karte des Kronenöffnungsgrads wurden somit sämtliche Gebiete anhand der Schwellenwerte in die fünf definierten Gruppen eingeteilt und farblich voneinander abgegrenzt (Abbildung 7):

Gruppe 1: Lärche, Birke, Stiel- und Traubeneiche, Waldföhre und Kirschbaum (Lichtbaumarten)

Gruppe 2: Berg- und Spitzahorn (Halblichtbaumarten)

Gruppe 3: Fichte, Sommer- und Winterlinde (Halbschattenbaumarten)

Gruppe 4: Buche und Tanne (Schattenbaumarten)

Gruppe 5: Zu dunkel für das Aufwachsen sämtlicher Baumarten

Die resultierende Karte wurde anschliessend auf die Waldflächen gemäss der fernerkundungs-basierten Waldmaske LFI reduziert und die Waldstrassen so gut wie möglich ausmaskiert.

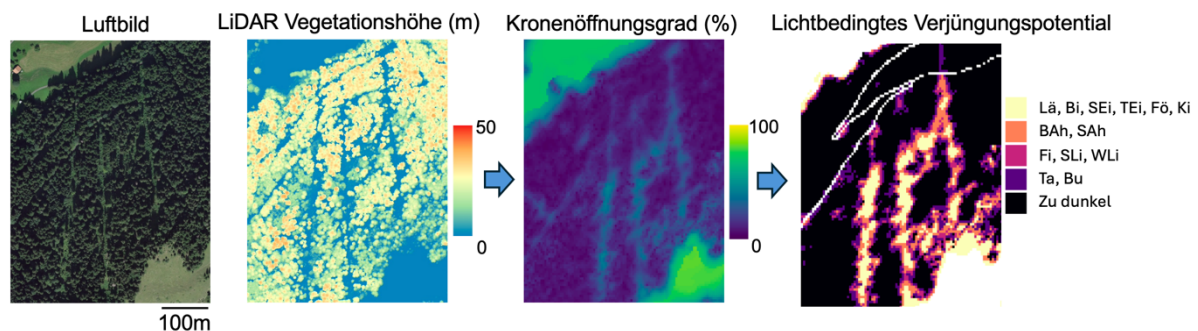


Abbildung 7. Methodischer Ablauf für die Berechnung des lichtbedingten Verjüngungspotential.

Sobald neue LiDAR-Daten verfügbar werden, kann das Verjüngungspotential nun aktualisiert und ein Monitoring in Raum und Zeit gewährleistet werden. Dieses Monitoring wird in Zukunft automatisch vom wissenschaftlichen Dienst des LFI zur Verfügung gestellt.

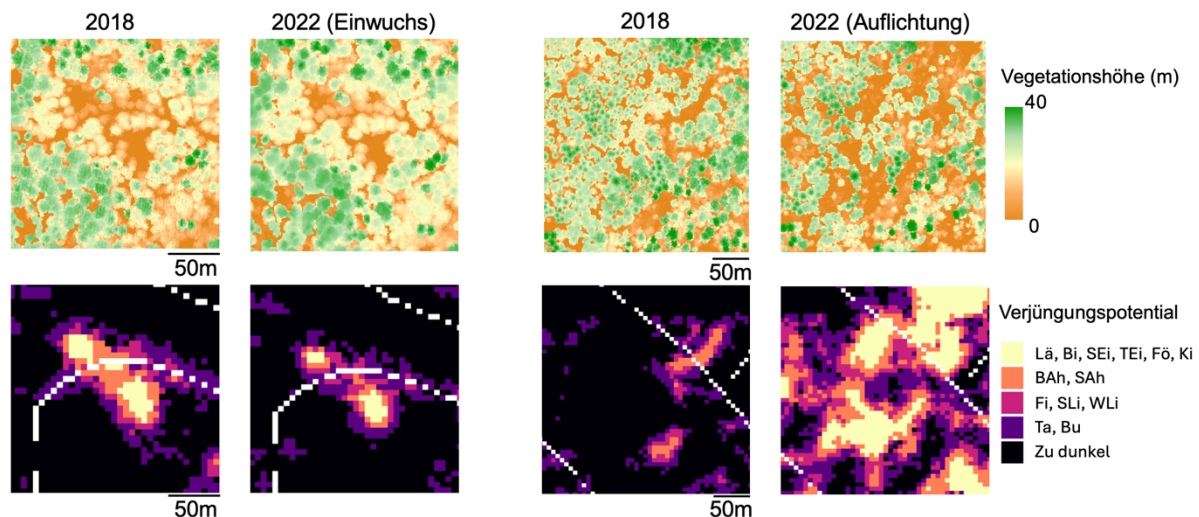


Abbildung 8. Aktualisierte LiDAR Daten erlauben ein Monitoring: Entwicklung der Vegetationshöhen (oben) und des daraus abgeleiteten Verjüngungspotentials (unten) zwischen den LiDAR-Befliegungsjahren 2018 und 2022 für zwei Gebiete im Mittelland.

Validierung der Ergebnisse

Die resultierende Verjüngungspotentialkarte wurde anschliessend eingehend mit Fachpersonen aus der Praxis im Feld validiert. Zusätzlich zu den Einschätzungen der Projektleitung haben wir eine Rückmeldung von 20 FörsterInnen und Praktikern aus unterschiedlichen Regionen der Schweiz erhalten. Die allgemeine Einschätzung war, dass die Karte die im Feld beobachteten Verhältnisse oft gut darstellt und die Karte einen Mehrwert für die Planung und Wirkungskontrolle bringt. Einige

Personen haben bemerkt, dass das Verjüngungspotential von Buche und Tanne (Gruppe 4) tendenziell etwas unterschätzt wird, das heisst der Schwellenwert wohl etwas zu hoch ist. Es gab auch vereinzelte Hinweise, dass auch das Potential für Halbschatten und Halblichtarten möglicherweise unterschätzt wird. Betreffend der Gruppe 1 (Lichtbaumarten) gab es unterschiedliche Rückmeldungen. Viele finden die gelben Gebiete seien gut abgebildet, einige denken, das Potential für Lichtbaumarten werde eher überschätzt, z. B. an Nordhängen. Punktuell wirft die Ausmaskierung mit der LFI Waldmaske Fragen auf (z. B. im Grünerlenbeständen/Gebüschwald im Gebirge, in ganz locker bestockten Beständen oder Hochstammobstplantagen, wo die LFI-Waldmaske nicht immer den Erwartungen im Feld entspricht). Aufgrund dieser Rückmeldungen haben wir die in Tabelle 2 genannten Schwellenwerte wie folgt leicht angepasst:

Schwellenwerte gemäss Tabelle 2: 14.5, 18.5, 21.5, 26.5

Schwellenwerte angepasst nach Validierung: 12.5, 18.5, 22.5, 28.5

Das heisst, die Lichtverhältnisse von Schattenbaumarten wurden leicht reduziert und jene der Halblicht- und Lichtbaumarten leicht erhöht. Diese Anpassungen befinden sich alle im statistischen Unsicherheitsbereich, haben die Karte jedoch punktuell besser mit den Einschätzungen aus der Praxis in Einklang gebracht. Allerdings lässt sich sagen, dass trotz dieser Anpassungen gewisse Gebiete immer noch als zu dunkel für Schattenbaumarten ausgewiesen sind, obwohl es in diesen Gebieten nach Einschätzung der Förster genügend Licht für Tanne und Buche hat. Es war somit schwierig, allen Einschätzungen und Erwartungen der Praxis ganz gerecht zu werden. Es ist daher wichtig, die Hinweiskarten auch für schattentolerante Arten bezüglich des Höhenzuwachses zu beurteilen und nicht bezüglich des Überlebens und der etwaigen zukünftigen Reaktionsmöglichkeit (vgl. direkt nachfolgende Definition für Flächen mit genügend Licht).

Limitierungen und wichtige Punkte für die Interpretation der Karte

Die Ausscheidung von Flächen mit «genügend Licht» für eine Baumartengruppe bedeutet, dass zum Zeitpunkt der LiDAR-Aufnahme das Lichtangebot für ein vitales Bäumchen im Jungwuchs reicht, um innert nützlicher Frist ins Stangenholz aufwachsen zu können. Folgende Punkte müssen jedoch beachtet werden:

- Dies bedeutet nicht, dass die Lichtbedürfnisse z. B. für die Holzproduktion mit den entsprechenden Baumarten ideal sind. Hierfür ist oft mehr Licht sinnvoll.
- Die Lichtbedingungen verändern sich durch das Wachstum in der Oberschicht teilweise schnell, v.a. bei kleinen Lücken in Laubholzbeständen. Die umliegenden grösseren (Laub-) Bäume schliessen den Kronenraum rasch wieder (Zuwachsen der Lücken) (Abbildung 8). Dies ist in der Karte nicht berücksichtigt, Es ist daher möglich, dass bereits früher Eingriffe nötig resp. sinnvoll sind, um das in der Karte angedeutete Wachstumspotential beizubehalten.
- Die meisten Baumarten können auch mit weniger Licht Keimen und Anwachsen. Entsprechend ist „Vorverjüngung“ auch in den schattigeren Klassen (inkl. Klasse 5) möglich – diese braucht dann rechtzeitig mehr Licht, um sich halten und entwickeln zu können. Jedoch beeinträchtigt die Präsenz von Vorverjüngung von Schattenbaumarten vor einer Auflichtung das Aufwachsen von lichtbedürftigeren Baumarten. Dies kann das in der Karte angezeigte Potenzial übersteuern.
- Die Karte sagt nichts aus über Konkurrenzverhältnisse und den Bedarf an Jungwaldpflege-Massnahmen zur Begünstigung weniger konkurrenzstarker Baumarten.
- Es wurde nur das verfügbare Licht berücksichtigt, andere Faktoren wie Bestandesgeschichte, Samenangebot, Verbiss und Bodeneigenschaften wurden nicht berücksichtigt. Die Karte sagt daher nicht, ob an einem Ort effektiv Verjüngung der angezeigten Baumarten vorkommt oder nicht.

Die Beschattung von Bäumen und Sträuchern von ca. 3-7 m Höhe sind nicht berücksichtigt.

- In Beständen mit Bäumen und Sträuchern von ca. 3-7 m Höhe werden die Lichtbedingungen in der Unterschicht überschätzt, d. h. die Karte zeigt in solchen Fällen ein hohes Potential, die Verjüngung hat sich jedoch bereits als Dickung oder Stangenholz etabliert (Abbildung 9). Um das angezeigte Wachstumspotential an diesen Standorten für Bäume kleiner als 3 m auszunutzen, müsste vorhandener Jungwald oder Sträucher entfernt werden.
- Wir gehen davon aus, dass es mit künftig vorhandenen, schweizweiten Daten (z. B. TBK) möglich sein wird, betroffene Flächen gezielt auszumaskieren, um dieses Problem zu reduzieren.

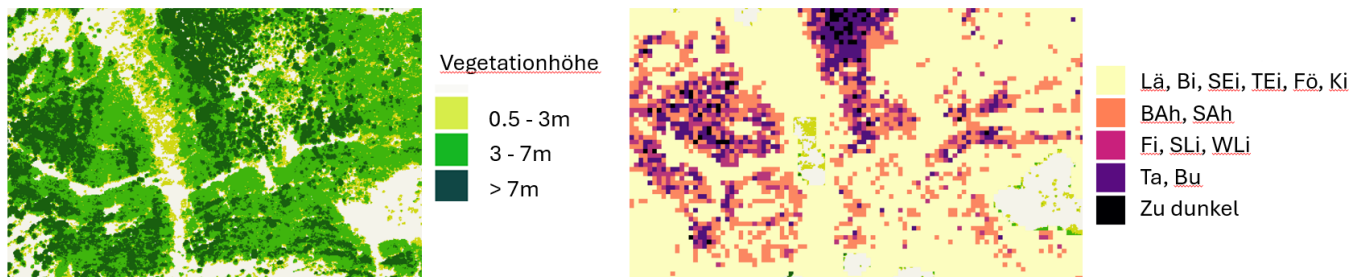


Abbildung 9. Die Lichtverfügbarkeit im Unterwuchs von Beständen mit Bäumen und Sträuchern von ca. 3-7 m Höhe wird überschätzt.

Unterschiedlich aktuelle Datengrundlagen und Maskierung

- Die Karte zeigt das Verjüngungspotential zum Zeitpunkt der LiDAR-Befliegung, welche für die Herleitung des Kronenöffnungsgrads verwendet wurden. Eine Karte mit den Jahresangaben der verwendeten LiDAR Daten ist zusammen mit der Verjüngungspotentialkarte online verfügbar. Sobald neue LiDAR-Daten verfügbar sind, wird die Karte wie oben erwähnt aktualisiert, um ein Monitoring zu gewährleisten.
- Die Karte wurde auf die Waldfläche gemäss Fernerkundung LFI reduziert und Waldstrassen wurden so gut wie möglich ausmaskiert. Für regionale oder kantonale Analysen empfiehlt es sich, die Karte mit einer Bestandskarte zu verschneiden, um die Waldflächenausscheidung regional zu vereinheitlichen und allenfalls unproduktive Waldflächen herauszufiltern.

Direkte Sonneneinstrahlung und höhenspezifische Unterschiede konnten bisher nicht berücksichtigt werden.

- Das Verjüngungspotential wurde ausschliesslich aufgrund des Kronenöffnungsgrads berechnet, der die Abschattung durch die umliegenden Baumkronen und das Gelände berücksichtigt.
- Die direkte Sonneneinstrahlung wurde bisher nicht berücksichtigt, da damit statistisch weniger gute Ergebnisse erreicht werden. Somit kann auch die Hangexposition oder die Ausrichtung der Lücken bisher nicht berücksichtigt werden.
- Höhenstufen-spezifische Unterteilungen sind nicht enthalten, da das verwendete nationale Modell in den statistischen Tests sowohl die gemessenen Höhenzuwächse, als auch die gutachtliche Einschätzung des Entwicklungspotentials besser repräsentiert.

Nutzen für die Praxis

Die Karte kann FörsterInnen und WaldbewirtschafterInnen bei der Planung und Wirkungskontrolle von Verjüngungseingriffen unterstützen. Mithilfe der Karte können Waldgebiete mit ungenügenden Lichtbedingungen für die entsprechende Baumartengruppe identifiziert werden, um gezielte Eingriffe zu planen und mit prioritären Waldfunktionen (z. B. Schutzwald) abzustimmen. Für Massnahmen zum Schutz der Verjüngung kann es hilfreich sein, sich auf Bestände zu fokussieren, in denen gemäss der

Karte bereits genügend Licht für die Zielbaumarten in der Verjüngung vorhanden ist. Ob ein Eingriff den gewünschten Effekt für die Lichtbedürfnisse verschiedener Zielbaumarten hatte, kann mithilfe von laufend aktualisierten Versionen der Karte im Rahmen einer Wirkungskontrolle überprüft werden (Monitoring, siehe Abbildung 8). Umgekehrt kann es auch interessant sein, aktuell dunkel gehaltene Bestände ohne Vorverjüngung zu identifizieren. Dies ist die Voraussetzung, Lichtbaumarten gezielt zu verjüngen und das Dunkelhalten als Vorbereitung der Verjüngung von Lichtbaumarten eine wichtige Bewirtschaftungsentscheidung.

Ein Vorteil der Karte besteht darin, dass sie flächendeckend, konsistent und empirisch hergeleitet wurde und sich somit für grossflächige Analysen eignet. Die Karte kann beispielsweise mit Angaben zu Zukunftsbaumarten aus der TreeApp sowie mit Angaben aus Bestandeskarten kombiniert werden, um abzuleiten, wo und wie viele Flächen mit ausreichenden Lichtbedingungen für die gewünschten Zukunftsbaumarten bereits vorhanden sind und wie sich diese Flächenanteile und deren räumliche Verteilung mit der Zeit verändern. So können auch Zielwerte für die Flächenanteile von verjüngungsgünstigen Waldgebieten mit den vorhandenen Flächenanteilen in der Karte verglichen werden, um den Handlungsbedarf besser abschätzen zu können. Für ein Monitoring der effektiv vorhandenen Verjüngung liefert die Karte die Grundlagen, um Ressourcen effizient einzusetzen, indem bei Feldaufnahmen auf Flächen fokussiert wird, wo man aufgrund der Lichtbedingungen davon ausgehen kann, dass die Verjüngung auch gut wachsen kann.

Publikation und öffentlicher Zugang zur Karte

Die schweizweite Hinweiskarte zum Licht-bedingten Verjüngungspotential in 5 m Auflösung kann unter folgendem Link heruntergeladen werden: <https://envidat.ch/#/metadata/schweizweite-hinweiskarten-des-lichtbedingten-verjuengungspotentials> (Zellweger et al. 2026). Auf diesem Link ist neben der Karte auch eine Kurzbeschreibung und eine Karte mit den LiDAR-Befliegungsjahren erhältlich. Die Karte mit dem Kronenöffnungsgrad (0-100%) ist ebenfalls öffentlich verfügbar, unter diesem Link: <https://envidat.ch/#/metadata/switzerland-wide-maps-of-sky-view-factor-canopy-openness-in-forests-at-5-m-resol> (Bischof et al. 2026).

Beide Produkte sind uneingeschränkt unter einer CC-BY-4.0 Lizenz für die Öffentlichkeit nutzbar (auch für kommerzielle Zwecke). Die beiden Karten werden bald auch im Rahmen der flächendeckenden LFI-Produkte auf dem offiziellen Geodatenportal des Bundes ersichtlich sein und zum Download zur Verfügung stehen. Damit werden sie für Praktiker:innen auch direkt über <https://map.geo.admin.ch/> abrufbar und können über Geodienste (WMS) beispielsweise in betriebliche GIS-Anwendungen integriert werden.

Schlussfolgerungen

Anhand gutachtlicher Erhebungen des Entwicklungspotentials der Verjüngung sowie der neusten Entwicklungen in der Lichtmodellierung im Wald konnten wir das Licht-bedingte Verjüngungspotential für eine breite Palette an Baumarten erfolgreich modellieren und in Kartenform der Praxis zugänglich machen. Dies bringt erheblichen Nutzen für die Planung und Wirkungskontrolle von Verjüngungseingriffen. Nebst den weitverbreiteten Hauptbaumarten konnten wir auch weniger häufige, im Rahmen des Klimawandels jedoch zunehmend wichtige Baumarten wie Eichen, Linden, Ahorne und Birken berücksichtigen. Dies führt gerade in Bezug auf die Anpassung des Schweizer Waldes an den Klimawandel zu einer verbesserten Planungsgrundlage für die Praxis. Ausserdem haben wir mit diesem Projekt die Voraussetzungen geschaffen, das Verjüngungspotential künftig mit aktualisierten Daten weiter zu monitoren.

Gleichzeitig zeigt das Projekt die Grenzen unseres Ansatzes auf. So konnten wir den Einfluss des direkt einfallenden Sonnenlichts nicht wie gewünscht miteinbeziehen, da die erhobenen Daten keine eindeutigen Zusammenhänge zwischen dem Entwicklungspotentials und des direkten Lichts

hervorbrachten. Dies ist gerade in höheren Lagen eine Schwäche der Karte und schränkt deren Nutzen für die Praxis ein. Wir sind uns dessen bewusst und diskutieren bereits künftige Ansätze, um die Methode in dieser Hinsicht zu verbessern.

Ebenso war es nicht möglich, Schwellenwerte für genügend Licht aus den gemessenen Höhenzuwächsen abzuleiten. Die verwendete Unterteilung in genügend versus ungenügend Licht beruht auf den gutachtlichen Einschätzungen der lokalen Förster:innen – welche subjektiv geprägt und somit variabel sind. Die daraus statistisch ermittelten Grenzwerte wurden aufgrund von Praxis-Rückmeldungen gutachtlich angepasst. Die vorliegende Karte widerspiegelt somit eine konsolidierte Durchschnittseinschätzung der befragten PraktikerInnen und stellt den aktuell bestmöglichen schweizweiten Kompromiss dar.

Verdankung

Wir sind sämtlichen involvierten FörsterInnen und den kantonalen Vertretern der Kantone AG, BE, FR, GR, SG, TI, UR, VD, VS, ZH, sowie Liechtenstein sehr dankbar für ihre Hilfe bei der Erhebung der Daten im Feld und der Validierung der Resultate. Weiter bedanken wir uns herzlich bei unserem Feldteam, bestehend aus Francesco Rota, Kathrin Saxer, Louise Fetz, Marisa Boos, Valerio Brügger und Nils Roling, sowie bei Angela Leonie Braun für ihr grosses Engagement und ihre ausgezeichnete Masterarbeit im Rahmen dieses Projekts.

Literaturverzeichnis

Ammann, P., Brüllhardt, M., Guggisberg, D., Junod, P. (2024). Welche Lückengrösse für die Verjüngung von Lichtbaumarten? *Wald und Holz*, 3/24.

Bischof, S., Ginzler, C., Marty, M., Zellweger, F. (2026). Switzerland-wide maps of sky view factor (canopy openness in forests) at 5 m resolution (as of NFI VHM 2024). *EnviDat*. <https://www.doi.org/10.16904/envidat.744>.

Frehner, M., (1989). Beobachtungen zur Einleitung der Naturverjüngung an einem nordexponierten Steilhang im subalpinen Fichtenwald. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 140, 11.

Lüscher, P., (1989). Untersuchungen zur Höhenentwicklung der Fichtennaturverjüngung im inneralpinen Gebirgswald. Dissertation ETH Zürich Nr. 8879.

Ott, E., Frehner, M., Frey, H.U., Lüscher, P., Gebirgsnadelwälder: praxisorientierter Leitfaden für eine standortgerechte Waldbehandlung. Verlag Paul Haupt, Bern.

Webster, C., Essery, R., Mazzotti, G., Jonas, T., (2023). Using Just a Canopy Height Model to Obtain Lidar-Level Accuracy in 3D Forest Canopy Shortwave Transmissivity Estimates. *Agricultural and Forest Meteorology* 338: 109429.

Zellweger, F., Brüllhardt, M., Bischof, S., Ginzler, C., Zürcher, S. (2026). Switzerland-wide maps of light-induced regeneration potential (as of NFI VHM 2024). *EnviDat*. <https://www.doi.org/10.16904/envidat.736>.

Anhang

Braun et al. (2026). Manuskript mit Titel „Species-specific tree regeneration height growth along light gradients“.