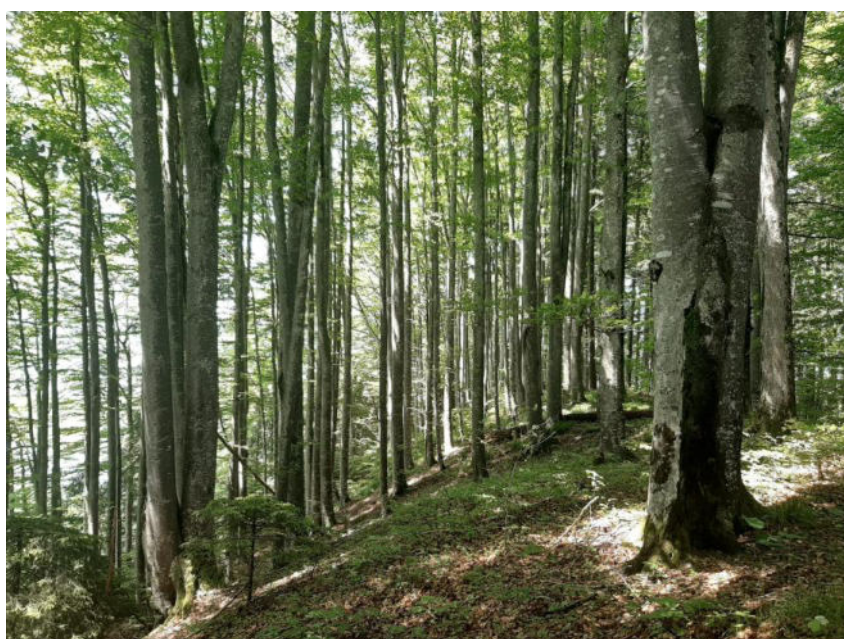


Schlussbericht des Forschungsprojektes „Erarbeitung von Baumartenempfehlungen, Bestimmung von klimasensitiven Standorten und Beständen für die Schweiz“

Andreas Zischg, Monika Frehner & Barbara Huber



März 2026

Hinweis: Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer/die Autoren verantwortlich.

Die Forschungsergebnisse stellen eine wissenschaftliche Grundlage dar. Die Ergebnisse berücksichtigen die Waldfunktionen nicht und beinhalten keine Dringlichkeitsbewertung. Weitere Forschung ist benötigt, um die Massnahme H2M3 des Bundesratsberichts „Anpassung des Waldes an den Klimawandel“ (BAFU 2022) umzusetzen und einen konkreten waldbaulichen Handlungsbedarf abzuleiten.

Auftragnehmer und Autoren:

Andreas Zischg¹, Monika Frehner², Barbara Huber³

¹ Geographisches Institut der Universität Bern, Hallerstrasse 12, 3012 Bern

² Forstingenieurbüro, Sixer 9, 7320 Sargans

³ Forstingenieur- & Ökobüro, Oberfeldstrasse 1, 7430 Thusis

Auftraggeber und Finanzierung:

Bundesamt für Umwelt BAFU, Abt. Wald, CH-3003 Bern. Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Begleitung BAFU (Projektleitung): Oliver Wolf

Fachliche Begleitung durch:

Robert Jenni, Kathrin Kühne, Timothy Thrippleton, Stefan Beyeler, Verena Liedschulte (Bundesamt für Umwelt; BAFU); Samuel Zürcher (Fachstelle Gebirgswaldpflege); Peter Ammann (Fachstelle Waldbau); Beat Fuchs (Amt für Wald und Natur, Kanton Schwyz); Nadine Kunz (Amt für Wald und Naturgefahren, Kanton Bern); Julia Schwarz (Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL); Jürgen Bauhus (Universität Freiburg, DE).

Projektlaufzeit:

August 2023 bis März 2026

Zitierung:

Zischg, A., Frehner, M. & Huber, B. (2026) Erarbeitung von Baumartenempfehlungen, Bestimmung von klimasensitiven Standorten und Beständen für die Schweiz. Geographisches Institut der Universität Bern, Bern. 109 Seiten.

Titelfoto: B. Huber

Zusammenfassung

Um die Waldleistungen langfristig auch in einem sich verändernden Klima aufrecht erhalten zu können, braucht es Grundlagendaten zu den möglichen Auswirkungen der Klimaveränderung auf die Ökologie des Waldes. In diesem Projekt wurden auf Basis eines forstökologischen und wissenschaftlichen Ansatzes die Waldstandorte und Waldbestände identifiziert und lokalisiert, die sensitiv auf den Klimawandel reagieren können. Neu stehen den Entscheidungsträgern in der Schweiz Karten zu den klimasensitiven Standorten, Karten zur Klimasensitivität der heutigen Bestände bezüglich der Fichte und Karten zu den Baumartenempfehlungen zur Verfügung. Diese Karten wurden auf Basis der CH2018 Klima-Szenarien (CH2018, 2018) für die Zeitperiode 2070-2099 erstellt – einerseits aufgrund der Vorgaben vom BAFU – andererseits, da die Förderung von zukunftsfähigen Baumarten und Herkünften (oder zumindest das Aufbringen von Samenbäumen) ausreichend Zeit erfordert. Dabei wurden die beiden folgenden Modellkombinationen verwendet: Für einen „mässigen“ Klimawandel das RCP4.5 (SMHI-RCA_MPIESM_EUR44; mittlere Temperaturzunahme von April bis September um 3,1 °C, Abnahme der Niederschlagssumme um 2%) und für einen „starken“ Klimawandel das RCP8.5 (CLMCOM-CCLM5_HADGEM_EUR44; mittlere Temperaturzunahme von April bis September um 4,3 °C, Abnahme der Niederschlagssumme um 19%). Die Forschungsergebnisse stellen eine wissenschaftliche Grundlage dar, als Zielgruppe gelten ExpertInnen von Bund und Kantonen. Das vorliegende Forschungsprojekt liefert flächige, möglichst schweizweite Daten, welche somit auch als Grundlagenkarten und für GIS-Anwendungen in den Kantonen verwendet werden können. Weitere Forschung wird benötigt, um den konkreten waldbaulichen Handlungsbedarf abzuleiten. Zudem sind weitere Arbeiten zur Berücksichtigung der Waldfunktionen und Dringlichkeitsstufen notwendig, um die Massnahme H2M3 „Identifikation klimasensitiver Waldbestände“ gemäss Bundesratsbericht „Anpassung des Waldes an den Klimawandel“ umzusetzen.

Klimasensitive Standorte sind Flächen, in denen die Übereinstimmung zwischen Baumarten, die heute vorkommen können (aufgrund von Standortkartierungen oder Waldstandort-Hinweiskarten) und Baumarten, die in Zukunft erwartet werden, gering ist. Klimasensitive Standorte sind unabhängig vom aktuellen Bestand. Auf klimasensitiven Standorten sind meistens klimasensitive Bestände vorhanden, ausser es ist schon ein grosser Anteil von Baumarten vorhanden, die nicht klimasensitiv sind, oft sind das Pionierbaumarten wie Birke.

Die Analysen zeigen, dass im RCP4.5 Szenario (Periode 2070-2099) ca. 61% der untersuchten Waldflächen nicht klimasensitiv gegenüber dem Klimawandel reagieren. Gemäss Analysen reagieren ca. 21% der Waldflächen teilweise klimasensitiv, ca. 3% langfristig klimasensitiv und ca. 15% klimasensitiv. Letzteres sind Flächen, bei denen wir annehmen, dass die Änderungen eher kurzfristig eintreten werden, z.B. aufgrund von Schadorganismen. Langfristig klimasensitiv heisst, dass die Anpassungen durch Veränderung der Konkurrenzverhältnisse entstehen, z.B. beim Übergang der Arvenwälder in Fichtenwälder. Dies dauert je nach Zustand des Bestandes unterschiedlich lang (oft deutlich länger als bis zum Ende des Jahrhunderts). Im RCP8.5 Szenario (Periode 2070-2099) reagieren ca. 42% der untersuchten Waldflächen nicht sensitiv, ca. 19% teilweise klimasensitiv, ca. 3% langfristig klimasensitiv und ca. 36% klimasensitiv.

Klimasensitive Bestände sind Flächen, in denen die Übereinstimmung zwischen Baumarten, die heute im Bestand real vorhanden sind und Baumarten, die in Zukunft empfohlen werden, gering ist. Für deren Herleitung werden der absolute Deckungsgrad einer Baumart in der Oberschicht berücksichtigt. In diesem Projekt wird die Klimasensitivität der heutigen Bestände bezüglich Fichte analysiert, da umfassende Datensätze zu weiteren Baumarten noch nicht vorhanden sind/nicht schweizweit vorhanden sind. Die Fichte konnte dank dem Nadelholzanteil im Waldmischungslayer (WSL 2025; nach Abzug des Tannen- und Lärchenanteils [LFI] pro Höhenstufe und Kanton sowie der Waldföhren-, Bergföhren- und Arvenwald-Standorte) hergeleitet werden.

Die heutigen Bestände sind im Szenario RCP4.5 zu 39% nicht, zu 22% schwach, zu 9% mittel und zu 10% stark klimasensitiv bezüglich der Fichte. Die Zuteilung in schwach, mittel und stark klimasensitiv ist abhängig von den Kategorien der Baumartenempfehlungen und dem heutigen Deckungsgrad der Baumart. Im Szenario RCP8.5 sind die heutigen Bestände zu 21% nicht, zu 25% schwach, zu 15% mittel und zu 20% stark klimasensitiv bezüglich der Fichte.

Durch die Identifikation und Lokalisierung von klimasensitiven Standorten und Beständen ist eine grossflächige Sichtweise auf die potenziellen Auswirkungen der Klimaveränderung auf den Schweizer Wald möglich. Die Karten weisen noch leere Flächen auf bei Kantonen, wo noch keine flächige Waldstandortkartierung (oder Waldstandort-Hinweiskarte) vorhanden ist (VS, UR, ZG, JU) oder eine solche fehlt (TI). Zusammen mit anderen Planungsgrundlagen (z.B. TBk, „Toolkit zur Erarbeitung von Bestandeskarten aus Fernerkundungsdaten“) können mit den Ergebnissen dieses Forschungsprojekts mögliche klimasensitive Waldstandorte und -bestände erkannt werden. Da noch nicht alle Kantone flächige Waldstandortkartierungen aufweisen, sind die Resultate noch nicht schweizweit berechenbar. Einige wichtige Inputdaten sind zudem noch in Überarbeitung, wie die NaiS-Grundlagen („Umwelt Wissen: Standorttypen; Grundlagen“; BAFU [Hrsg.], in Erarbeitung) und die Projektionswege (Tabelle zur Herleitung der Baumartenempfehlungen für die Zukunft). Da zudem seit dem Projektabschluss neue wichtige Inputdaten verfügbar sind, wie die Baumartenmatrix, welche die möglichen Baumarten pro NaiS-Standorttyp gemäss „Umwelt Wissen: Standorttypen; Grundlagen“ (BAFU [Hrsg.], in Erarbeitung) auflistet, sowie die neuen Klimaszenarien CH2025, wird durch die AutorInnen empfohlen, die Modellierung der Baumartenempfehlungen, klimasensitiven Standorte und Bestände zu gegebener Zeit zu aktualisieren.

Wir zeigen auf, welche Standorttypen in Zukunft bei den gewählten Klimaszenarien am Ende des Jahrhunderts erwartet werden und leiten mit dem Vergleich zum heute vorhandenen Standorttyp Baumartenempfehlungen ab. Welches Klimaszenario eintreten wird und wie schnell sich die Baumartenzusammensetzung ändern wird, ist ungewiss. Stark mitentscheidend wird ein tragbarer Wildtiereinfluss sein – wenn das Aufkommen von wichtigen Zukunftsbaumarten nicht in ausreichender Menge möglich ist, könnte es auch zu einer verzögerten Bestandesüberführung, zu einer Verbuschungsphase kommen oder es verjüngt sich nochmals hauptsächlich eine in Zukunft nicht mehr geeignete Baumart, z.B. wenn sich hochmontan nur die Fichte verjüngt, obwohl ein Wechsel zu kollin erwartet wird. Die Ergebnisse zeigen nicht auf, wo in Zukunft z.B. Buchenbestände überleben werden, sondern wo die klimatischen Bedingungen für die heute vorkommenden Baumarten auch in Zukunft noch gegeben sein sollten (evtl. auch erst bei der Folgeverjüngung – mit jungen Bäumen mit tiefreichenderem Wurzelsystem oder solchen, die physiologisch besser an Trockenheit angepasst sind oder mit veränderter Baumhöhe).

Die Modellierung kann als Grundlage für Entscheide auf Bestandesebene genutzt werden, zum Beispiel zusammen mit weiteren Grundlagen (z.B. Schutzwaldausscheidung und Bestandeskartierung) als Hilfe zur Bestimmung der Dringlichkeit für Eingriffe. Das angewandte Modell ist nur so gut wie die verwendeten Inputdaten – je besser die Klimaszenarien werden und je mehr für den Wald relevante Klimagrössen qualitativ gut berechnet werden und einfließen können, desto besser werden die Ergebnisse.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	Projektziele und Produkte	7
1.2	Ausgangslage und Kontext	8
1.3	Gesetzliche und politische Würdigung	8
1.4	Bezug zu bestehenden (Wissens-)Grundlagen und laufenden Forschungsarbeiten mit Relevanz für das vorliegende Forschungsprojekt	9
1.4.1	Klimaszenarien von CH2018 und Aufbereitung der Klimadaten für die Modellierung der Vegetationshöhenstufen	9
1.4.2	Forschungsprogramm „Wald und Klimawandel“, Projekt „Adaptierte Ökogramme“ und Folgeprojekte	10
1.4.3	Berücksichtigung der Adaptationsprinzipien	11
1.4.4	Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald NaiS	12
1.4.5	Tree App	15
1.5	Aufbau der Forschungsarbeit und Vorgehen Gesamtprojekt	16
2	Methoden	17
2.1	Methodenteil 1. Arbeitspaket „Vorabklärungen“	17
2.1.1	Kantonale Anfragen und weitere Abklärungen	17
2.1.2	Bildung einer fachlichen Begleitgruppe	17
2.1.3	Nachfrage bei Waldschutz Schweiz	17
2.1.4	Untersuchung der Möglichkeit für den Einbezug der Struktur und der Baumartenvielfalt als Kriterien für klimasensitive Bestände	17
2.1.5	Fazit: TBk-CH-Version Sommer 2025 (Toolkit zur Erarbeitung von Bestandeskarten aus Fernerkundungsdaten)	22
2.2	Methodenteil 2. Arbeitspaket: „Erarbeitung von Baumartenempfehlungen, Bestimmung von klimasensitiven Standorten sowie Erstellung der Karte „Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte“	22
2.2.1	Verwendete Datengrundlagen	22
2.2.2	Vorgehen - Übersicht über alle Berechnungsschritte	26
2.2.3	Berechnung der Baumartenempfehlungen	33
2.2.4	Herleitung von klimasensitiven Standorten	39
2.2.5	Herleitung der Klimasensitivität heutiger Bestände	42
2.2.6	Datenbeschrieb	47
3	Resultate	48
3.1	Resultate 1. Arbeitspaket „Vorabklärungen“	48
3.1.1	Kantonale Rückmeldungen	48
3.1.2	Aktueller Stand der kantonalen Kartierungsgrundlagen	48
3.1.3	Waldstandort-Hinweiskarten (Modellierungen mit Expertenbeizug)	51
3.1.4	Aktueller Stand der kantonalen Bestandeskarten	51
3.1.5	Toolkit Bestandeskartierung (TBk)	51
3.2	Resultate 2. Arbeitspaket: Erarbeitung von Baumartenempfehlungen, Bestimmung von klimasensitiven Standorten sowie Erstellung der Karte „Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte“	52
3.2.1	Baumartenempfehlungen	52
3.2.2	Klimasensitive Standorte	74
3.2.3	Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte	82
3.2.4	Berücksichtigung der Bestandesstruktur	90

3.2.5	Fazit	93
4	Diskussion und Schlussfolgerungen aus Sicht der AutorInnen	93
4.1	Kritische Würdigung der Resultate.....	93
4.1.1	Aussagekraft der Resultate	93
4.1.2	Limitationen.....	93
4.2	Einbindung Toolkit Bestandeskartierung	94
4.3	Umkehrschluss von klimasensitiven Standorten und Beständen zu angepassten und resilienten Standorten und Bestände.....	94
4.4	Fazit	94
5	Ausblick; Empfehlungen aus Sicht der AutorInnen für das weiteres Vorgehen	96
5.1	Einbindung von neuen CH2025 Klimaszenarien.....	96
5.1.1	Einbindung von neuen Grundlagen.....	97
5.2	Weitere Empfehlungen der Experten der Begleitgruppe dieses Forschungsprojekts	97
6	Literatur	98
7	Anhang.....	102
7.1	ReadMe Github Repository	102
7.2	Datenbeschreibung der abgegebenen Geodaten	103
7.3	Kommentare zu kantonalen Übersetzungen nach NaiS.....	104
7.4	Umfragebogen und Informationsschreiben an Kantone	106
7.5	Liste der Baumarten, für welche bei den Baumartenempfehlungen Karten erstellt werden können.....	107

Weitere digitale Grundlagen:

- GIS-Daten (Klimasensitive Standorte, Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte, Baumartenempfehlungen für je zwei Klimaszenarien)
- Programm-Code auf Github-repository <https://github.com/zischg/sensitivewaldstandorteCH>
- Übersetzungstabellen der kantonalen_Waldstandorttypen in NaiS-Standorttypen (je Kanton, auf github)
- Tabelle mit den verwendeten Projektionswegen (Frehner & Zürcher-Gasser 2019; wird in der Tree App Version 2.5.1 verwendet)
- Verwendete Baumartenmatrix (mögliche Baumarten pro NaiS Standorttyp, auf dem Github-repository)

1 Einleitung

1.1 Projektziele und Produkte

Ziel des Forschungsauftrags ist es, eine erste, möglichst flächige Bestimmung von klimasensitiven Standorten und Beständen sowie flächige Baumartenempfehlungen für die Schweiz zu schaffen. Dazu wird die Methodik von Frehner et al. (2021) verfeinert und flächendeckend für die Schweiz auf die bestehenden Waldstandort-Daten und Bestandesdaten angewandt. Basierend darauf wird eine erste nationale Übersicht über klimasensitive Standorte und Bestände sowie Baumartenempfehlungen ermöglicht werden. So wird eine Wissensbasis für die langfristige und gezielte Erbringung der Waldleistungen geschaffen.

Für die Berechnungen wurden die aktuellen kantonalen Grundlagen (Waldstandortkartierungen und Waldstandort-Hinweiskarten, Kap. 3.1.3) und eine schweizweite Bestandeskarte (TBk-Layer, Kap. 3.1.5) genutzt. Die Kompatibilität mit der Standortssystematik in der Vollzugshilfe (BAFU [Hrsg.] 2024) und den dazugehörigen Umwelt Wissen (BAFU [Hrsg.], in Erarbeitung) sowie der Tree App (Brang et al. 2020) wurde sichergestellt.

Konkrete Projektziele:

- **Möglichst flächige Baumartenempfehlungen** für die Schweiz für die CH2018 Klimaszenarien, RCP4.5 (mässige Erwärmung) und RCP8.5 (starke Erwärmung, ohne Massnahmen) (Zeitperiode 2070-2099; NCCS [Hrsg.] 2018; Remund et al. 2020), sowie deren Kombination gemäss der Methode von der Tree App (Brang et al. 2020).
- Möglichst schweizweite Übersicht von **sensitiven Standorten** (Definition: Flächen, in denen die Übereinstimmung zwischen Baumarten, die heute vorkommen können [aufgrund von Standortkartierung] und Baumarten, die in Zukunft erwartet werden, gering ist; unabhängig vom aktuellen Waldbestand).
- Möglichst schweizweite Übersicht von **sensitiven Beständen** (Flächen, in denen die Übereinstimmung zwischen Baumarten, die heute im Bestand vorhanden sind und Baumarten, die in Zukunft erwartet werden, gering ist).
- Integration der heutigen Bestandesstruktur als zusätzliches Kriterium bei der Eruierung von klimasensitiven Beständen.

Produkte (jeweils für die Szenarien RCP4.5, RCP8.5 (Zeitperiode 2070-2099):

- Möglichst flächendeckende Modellierung der Projektionswege für die Schweiz nach Tree App auf Basis von kantonalen Waldstandortkartierungen oder -modellierungen (zukünftige Standorttypen).
- Möglichst flächendeckende Karten für die Schweiz der Baumartenempfehlungen (84 Baumarten) pro Szenario plus Kombination beider Szenarien gemäss der Methode vom Tree App.
- Möglichst flächendeckende Karten für die Schweiz der klimasensitiven Standorte.
- Möglichst flächendeckende Karten für die Schweiz der Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich der Fichte (für alle bearbeiteten Kantone).
- Methodik: Die verwendete Methodik ist als automatisiertes und wiederverwendbares Skript auf Basis einer OpenSource Umgebung (Python und QGIS) bereitgestellt, um bei Bedarf ein Update oder eine Ergänzung der Studie zu einem späteren Zeitpunkt (z.B. bei neuer Datenverfügbarkeit) zu ermöglichen.

1.2 Ausgangslage und Kontext

Der Klimawandel ist bereits heute im Wald sichtbar (siehe Zwischenergebnisse des fünften Landesforstinventars [LFI5]; LFI/WSL 2023). Es bestehen grosse Unsicherheiten betreffend der künftigen Entwicklung der Waldbestände. Als Beispiel ist im Schutzwald entscheidend, wie widerstands- und anpassungsfähig die heutigen Bestände sind und sein werden. Bisher fehlt dazu eine flächige Übersicht auf nationalem Level. Das vorliegende Projekt soll einen ersten Beitrag zum Schliessen dieser Lücke leisten.

Für die Herleitung von flächigen Baumartenempfehlungen sowie klimasensitiven Standorten und Beständen werden kantonale Grundlagen benötigt in Form von Waldstandortkarten und Bestandeskarten. Da (noch) nicht alle Kantone eine Waldstandortkartierung aufweisen, werden einzelne Lücken bestehen bleiben. Auch besitzen nicht alle Kantone aktuelle Bestandeskarten, deshalb durften wir die neu entwickelte, schweizweite TBk von Rosset & Horneber (2025) für die Berechnungen verwenden.

Die Arbeiten werden mit den aktuell erhältlichen Klimadaten (CH2018, 2018) und einer verbesserten Höhenstufenmodellierung durchgeführt (Zischg et al. 2021). Bei den Höhenstufenmodellierungen wurden die entscheidenden Klimafaktoren berücksichtigt (Zischg et al. 2019). Dazu wurden im Rahmen des Forschungsprogramm „Wald und Klimawandel“ landesweit hochaufgelöste Kartengrundlagen zu Lufttemperatur, thermischer Kontinentalität, relativer Luftfeuchtigkeit, Verdunstung und Föhnlagen erarbeitet (Huber et al. 2015; auf map.geo.admin.ch einsehbar) und wo möglich in die Zukunft transferiert (Zischg et al. 2019; inkl. Niederschlagsdaten von MeteoSchweiz).

Im Projekt „Adaptierte Ökogramme“ (Teil 3; Frehner et al. 2017) wurden Karten der Habitateignung für ausgewählte Baumarten, welche mit unterschiedlichen Methoden erarbeitet wurden, so weit als möglich miteinander verglichen:

- Verbreitungskarten auf der Grundlage der modellierten Höhenstufen und Areale (Resultate aus Teil 1 des Projektes „Adaptierte Ökogramme“ [Gubelmann et al. 2019], Vorgängerprojekt von Zischg et al. 2021);
- Potenzialkarten für verschiedene Baumarten („PorTree+-Karten“ von N. Zimmermann, WSL);
- Karten der bioklimatischen Limitierung („ForClim-Karten“ von H. Bugmann, ETH).

Die Karten von „PorTree+“ und „Adaptierte Ökogramme“ ergaben meist eine sehr gute Übereinstimmung, vor allem bei den häufigen Baumarten, wobei zu geringe LFI-Stichprobenmengen bei PorTree+ am Verbreitungsrand von Baumarten zu Ungenauigkeiten führten. Die mit dem Modell ForClim berechneten Karten wiesen meist grössere Areale auf (da ohne Berücksichtigung der Baumartenkonkurrenz) (Frehner et al. 2017).

1.3 Gesetzliche und politische Würdigung

Gemäss dem Waldgesetz (WaG) Artikel 1 Absatz c. hat der Bund dafür zu sorgen, „(...) dass der Wald seine Funktionen, namentlich seine Schutz-, Wohlfahrts- und Nutzfunktion (Waldfunktionen) erfüllen kann“¹ - dies auch unter veränderten Klimabedingungen (WaG, Art. 28a²⁶). Anpassungsfähige und resiliente Wälder können mit den sich verändernden Klimabedingungen am besten umgehen und so langfristig ihre Funktionen erfüllen und Leistungen erbringen (BAFU 2022).

Durch die erste möglichst flächige Bestimmung von sensitiven Standorten und Beständen sowie der Schaffung von flächigen Baumartenempfehlungen wird eine Wissensbasis für den nachhaltigen und

¹ [Bundesgesetz über den Wald](#)

adaptiven Waldbau, die forstliche Planung und so zur Anpassung des Schweizer Waldes an den Klimawandel geschaffen. So leistet das Forschungsprojekt einen Beitrag zum gesetzlichen Auftrag (vgl. WaG Art. 1, Art. 28a²⁶) und dem in der „Waldpolitik: Ziele und Massnahmen 2021–2024“ ausformulierten Ziel 2: „(...) *Der Schweizer Wald bleibt als resilientes, anpassungsfähiges Ökosystem erhalten und erbringt die von der Gesellschaft geforderten Leistungen auch unter veränderten Klimabedingungen (Anpassung)*“. Zudem kann das Forschungsprojekt einen Beitrag zur Realisierung des Bundesratsberichts in Erfüllung der Motion 19.4177 Engeler (Hêche) vom 25.09.2019 und des Postulates 20.3750 Vara vom 18.06.2020 „Anpassung des Waldes an den Klimawandel“ leisten. Dies betrifft spezifisch die Umsetzung der Massnahme 2 „Identifikation klimasensitiver Waldbestände“ des festgelegten Handlungsfelds 2 „Klimaangepasste resiliente Wälder und Biodiversität fördern“². Zur Umsetzung dieser Massnahme müssen jedoch noch weitere Kriterien, v.a. bezüglich der Waldfunktionen und der Dringlichkeitsstufen, berücksichtigt werden, welche im vorliegenden Projekt nicht einbezogen wurden.

1.4 Bezug zu bestehenden (Wissens-)Grundlagen und laufenden Forschungsarbeiten mit Relevanz für das vorliegende Forschungsprojekt

Im Rahmen des Forschungsprogramms „Wald und Klimawandel“ (BAFU & WSL, Zeitraum 2009-2018) wurden mehrere wichtige fachliche Grundlagen für die Praxis erarbeitet (Kap. 1.4.2 und 1.4.3). Zurzeit wird das Standardwerk „Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald Nais“ (BAFU [Hrsg.] 2024 und BAFU [Hrsg.], in Erarbeitung) von Grund auf überarbeitet und die Tree App (Brang et al. 2020) laufend aktualisiert und ergänzt. All diese Neuerungen werden im vorliegenden Projekt berücksichtigt (Kap. 2.2.1).

1.4.1 Klimaszenarien von CH2018 und Aufbereitung der Klimadaten für die Modellierung der Vegetationshöhenstufen

2018 wurden die CH2018 Szenarien (NCCS 2018) veröffentlicht. Im November 2025 erschienen die neuen CH2025 Szenarien (NCCS 2025), welche aber noch aufbereitet werden müssen, bevor sie für Forschungsprojekte verwendet werden können (Kap. 5.1). Die CH2018 Szenarien umfassen Gitterdaten mit einer räumlichen Auflösung von ca. 2 km sowie Punktdaten für MeteoSchweiz Messstandorte (herunterskalierte Tageswerte) für diverse Szenarien. Eine Expertengruppe (Meteotest, MeteoSchweiz, BAFU- und WSL-Vertreter) wählte drei Klimamodelle für die Szenarien RCP2.6, 4.5 und 8.5 aus (Vorgehen siehe Remund et al. 2020; Ergebnisse zu den gewählten Szenarien siehe Remund et al. 2020). Für das Szenario RCP2.6 wurde die Modellkombination **DMI_HIRHAM_ECEARTH_EUR11** (entspricht etwa der Einhaltung des 2°C Zieles des Pariser Abkommens) ausgewählt. Für das RCP4.5 Szenario kam die Modellkombination **SMHI-RCA_MPIESM_EUR44** (mittlerer Klimawandel) den „Zielwerten“ (Remund et al. 2020; z.B. was die regionale Verteilung der Niederschläge betrifft) am nächsten, für das RCP8.5 Szenario wurde die Modellkombination **CLMCOM-CCLM5_HADGEM_EUR44** (starker Klimawandel) ausgewählt. Die Modellkombinationen wurden dann auf 250 m Auflösung heruntergerechnet und die abgeleiteten Anomalien-Karten für die Simulation der Vegetationshöhenstufen auf die Auflösung von 25 m x 25 m gebracht. Da das Erreichen von Szenario RCP2.6 von vielen Fachleuten als sehr herausfordernd eingeschätzt wird (Hausfather & Peters 2020), wurde auf die Szenarien RCP4.5 und RCP8.5 fokussiert und nur diese wurden in die Modellierungen integriert (Quelle: Zischg et al. 2021). Nachfolgend werden die Anomalien der Sommerwerte (April – August; inkl. RCP2.6) exemplarisch vorgestellt.

² [Bericht Anpassung des Waldes an den Klimawandel](#)

Tab. 1: Anomalien der Sommerwerte (April – August) RCP2.6 für die Periode 2070-2099, Modell DMI_HIRHAM_ECE-ARTH_EUR11 im Vergleich zur Referenzperiode 1981-2010 für Aarau und Locarno. Legende: Tas = Lufttemperatur, Pr = Niederschlag. Diff. Tas Anom. / Pr Anom. = Differenzen der Temperatur (Tas)- und des Niederschlags (Pr)- Anomalien, d.h. wie stark sich die Anomalie von einem bestimmten Modell vom gewünschten Wert der Anomalie unterscheidet. Quelle: Remund et al. 2020.

Ort	Tas [°C]	Pr [mm]	Tas Anomalie [°C]	Pr Anomalie [%]	Trocken-tage Anomalie [N]	Letzter Frosttag Anomalie [d]	Diff. Tas Anom. [°C]	Diff. Pr Anom. [%]
Aarau	15.4	509.7	1.0	-2.1	-0.8	1.3	0.0	-0.4
Locarno	18.0	918.3	0.8	1.7	-0.7	-6.2	-0.2	-3.4

Tab. 2: Anomalien der Sommerwerte (April – August) RCP4.5 für die Periode 2070-2099, Modell SMHI-RCA_MPIESM_EUR44 im Vergleich zur Referenzperiode 1981-2010 für Aarau und Locarno. Legende: Tas = Lufttemperatur, Pr = Niederschlag. Diff. Tas Anom. / Pr Anom. = Differenzen der Temperatur (Tas)- und des Niederschlags (Pr)- Anomalien, d.h. wie stark sich die Anomalie von einem bestimmten Modell vom gewünschten Wert der Anomalie unterscheidet. Quelle: Remund et al. 2020.

Ort	Tas [°C]	Pr [mm]	Tas Anomalie [°C]	Pr Anomalie [%]	Trocken-tage Anomalie [N]	Letzter Frosttag Anomalie [d]	Diff. Tas Anom. [°C]	Diff. Pr Anom. [%]
Aarau	15.2	486.2	1.8	-4.0	1.6	-5.5	-0.1	-1.9
Locarno	17.9	831.7	2.3	-0.5	2.3	-19.1	0.2	7.9

Tab. 3: Anomalien der Sommerwerte (April – August) RCP8.5 für die Periode 2070-2099, Modell CLMCOM-CCLM5_HAD-GEM_EUR44 im Vergleich zur Referenzperiode 1981-2010 für Aarau und Locarno. Legende: Tas = Lufttemperatur, Pr = Niederschlag. Diff. Tas Anom. / Pr Anom. = Differenzen der Temperatur (Tas)- und des Niederschlags (Pr)- Anomalien, d.h. wie stark sich die Anomalie von einem bestimmten Modell vom gewünschten Wert der Anomalie unterscheidet. Quelle: Remund et al. 2020.

Ort	Tas [°C]	Pr [mm]	Tas Anomalie [°C]	Pr Anomalie [%]	Trocken-tage Anomalie [N]	Letzter Frosttag Anomalie [d]	Diff. Tas Anom. [°C]	Diff. Pr Anom. [%]
Aarau	15.3	491.6	4.4	-17.0	3.4	-28.8	0.0	0.7
Locarno	18.0	933.5	4.4	-24.9	4.4	-34.2	-0.4	2.4

Da die Vegetationshöhenstufen wichtige Inputdaten für das Forschungsprojekt darstellen, werden diese im Kap. 2.2.1.1 kurz vorgestellt (Auszug aus Zischg et al. 2021, detaillierte Angabe zur Erstellung derselben siehe Projektbeschreibung).

1.4.2 Forschungsprogramm „Wald und Klimawandel“, Projekt „Adaptierte Ökogramme“ und Folgeprojekte

Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) und die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) haben im Jahr 2009 das Forschungsprogramm „Wald und Klimawandel“ gestartet. Das Programm hatte zum Ziel, für die vielfältigen Waldstandorte in der Schweiz Grundlagenwissen zu erarbeiten, damit die Akteure – Forstdienste, Betriebsleitende, Waldeigentümer und Waldeigentümerinnen, politische Entscheidungsträger – die mit dem Klimawandel verbundenen Risiken besser einschätzen sowie Verjüngung und Pflege der Wälder auf erhöhte Anpassungsfähigkeit und Resilienz ausrichten können (Pluess, Augustin, Brang (Red.) 2016). Das vorliegende Projekt stützt sich auf Arbeiten aus dem Forschungsprogramm, v.a. auf Teilprojekte des Projekts „Adaptierte Ökogramme“ (Frehner & Huber et al. 2019; v.a. Frehner & Zürcher-Gasser 2019, siehe nachfolgendes Kap. 1.4.2.1), Folgeprojekte (v.a. Zischg et al. 2021, siehe Kap. 2.2.1.1) und auf weitere Erkenntnisse daraus (Kap. 1.4.3). Auch

die Tree App (Kap. 1.4.5) baut auf den erstellten Grundlagen des Projekts „Adaptierte Ökogramme“ und seinen Folgeprojekten (Zischg et al. 2021) auf. Das Vorgehen zur Bestimmung der sensitiven Standorte und Bestände sowie die dazu benötigten Höhenstufenverschiebungen der Zukunft (siehe Kap. 2.2.1.1) basieren auf den entwickelten Methoden von M. Frehner, A. Zischg und B. Huber (Frehner et al. 2021a, Zischg et al. 2021 und Huber et al. 2021). Die Methodik wurde bereits in den Kantonen Graubünden, St. Gallen, Schwyz, Jura, Bern und im Fürstentum Liechtenstein angewendet.

1.4.2.1 Herleitung von regional optimierten Baumartenempfehlungen (Projekt Adaptierte Ökogramme, Teil 5)

Kurzfassung (aus Frehner & Zürcher-Gasser 2019): *„Ziel dieses Projektteils ist es, eine Methode zu entwickeln, um aus Vorarbeiten zum Einfluss des Klimawandels auf die Vegetationshöhenstufen und Baumartenareale Baumartenempfehlungen pro Standorttyp herzuleiten. Die Empfehlungen zielen darauf ab, dass die Baumarten in einem Standorttyp in der Periode 2070 – 2099 gut an zwei Klimaszenarien („mässige Klimaänderung“ = weniger trocken, „starke Klimaänderung“ = trockener, Frehner & Huber 2019) angepasst sind. Dazu wurden zuerst pro NaiS-Standorttyp die möglichen Baumarten, d.h. jene, die gedeihen und sich natürlich verjüngen können, aus bestehenden standortkundlichen Grundlagen auf Bundes- und Kantonsebene zusammengestellt und an einem Workshop auf Widersprüche und Fehler überprüft und angepasst. Zudem wurde die Herleitung der Baumartenempfehlungen, die in den NaiS-Anforderungsprofilen Standort (Frehner et al. 2005/2009) dargestellt sind, dokumentiert. In der Periode 2070 - 2099 werden nicht überall in der Schweiz Standortsbedingungen erwartet, die schon heute anderswo in der Schweiz vorkommen. Für diese „nicht analogen Standorte“ (Huber et al. 2017) wurden neue Einheiten definiert und es wurden für letztere gutachtlich Baumartenempfehlungen hergeleitet, ohne weitere Beschreibung der übrigen Vegetation.“*

Das Projekt lieferte die Herleitung der Baumartenempfehlungen für die Zukunft (Projektionswege: Tabelle zur Herleitung der Baumartenempfehlungen für die Zukunft; Kap. 2.2.2.3) sowie die erste Fassung der Baumartenmatrix (mögliche Baumarten pro NaiS Standorttyp; Kap. 2.2.3.1).

1.4.3 Berücksichtigung der Adaptationsprinzipien

Mit waldbaulichen Massnahmen lassen sich die Widerstandskraft des Waldes gegenüber Störungen, seine Erholungsfähigkeit nach Störungen sowie seine Anpassungsfähigkeit an ein sich änderndes Klima erhöhen. Die Massnahmen sollten sich dabei an fünf Handlungsprinzipien orientieren (Brang et al. 2016; Abb. 1) und den Prinzipien des naturnahen Waldbaus Rechnung tragen (Huth et al. 2025). Die ersten zwei der fünf Adaptationsprinzipien (Baumartenvielfalt und Strukturvielfalt; Brang et al. 2016) werden bei der Eruierung der sensitiven Bestände berücksichtigt. Die übrigen drei Adaptionsprinzipien (genetische Vielfalt, Störungsresistenz der Einzelbäume, Umtriebszeit bzw. des Zieldurchmesser) konnten nicht berücksichtigt werden, da dazu keine schweizweiten Daten bestehen. Die heutige Baumartenvielfalt wurde im vorliegenden Projekt noch nicht ausreichend berücksichtigt aufgrund von meist fehlenden kantonalen Daten. Die Klimasensitivität von Beständen wurde vorerst mit dem Fichtenanteil schweizweit berechnet (Kap. 2.1.5, Kap. 2.2.5). Die Struktur (TBk-Layer, Kap. 2.2.5.3) wird auf Basis von Diskussionen mit der fachlichen Begleitgruppe als separater Layer in die Kartengrundlagen integriert.



Abb. 1: Adaptation im Wald im Klimawandel: Ziele, strategische Stossrichtungen, Adaptationsprinzipien und waldbauliche Massnahmen (Quelle: Brang et al. 2016).

1.4.4 Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald NaiS

Der Schutzwald ist in der Schweiz die wichtigste biologische Massnahme zum Schutz vor Naturgefahren. „Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald NaiS Vollzugshilfe für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion“ (Stand 2024) zeigt auf, wie mit möglichst geringem Pflegeaufwand eine nachhaltige Schutzwirkung erreicht werden kann. Die Anhänge von NaiS sind in Überarbeitung. Als Ersatz des Anhang 2 werden folgende zwei Umwelt Wissen-Publikationen erarbeitet: „Standorttypen: Grundlagen“ sowie „Standorttypen: Anforderungen Schutzwald“. Im Umwelt Wissen „Standorttypen: Grundlagen“ (BAFU [Hrsg]; in Erarbeitung) werden die Standorttypen, die bei ARGE Frehner et al. 2020 beschrieben wurden, sowie einige für die Biodiversität oder den Mittellandwaldbau wichtige Standorttypen integriert. Die Baumarten pro Standorttyp werden bei allen Standorttypen überarbeitet und zusätzlich werden die Baumarten der heute noch nicht in der Schweiz vorkommenden Standorttypen überarbeitet und integriert. Das vorliegende Projekt übernimmt die Standorttypen vom Umwelt Wissen „Standorttypen: Grundlagen“, damit es mit NaiS kompatibel ist. Im Umwelt Wissen „Standorttypen: Grundlagen“ (BAFU [Hrsg]; in Erarbeitung) wurden auch die Standortregionen, Tannenareale, krankheitsgefährdeten Baumarten und weitere Themen überarbeitet, diese werden im vorliegenden Projekt übernommen. Die Baumarten pro NaiS-Standorttyp konnten leider nicht vom neuen Umwelt Wissen übernommen werden, da diese Tabelle zu spät geliefert wurde. Deshalb wurde die Baumartentabelle „Matrix_Baum_inkl_collin_20210412_mit AbkuerzungenCLEAN.xlsx“ verwendet, die auch im Tree App Version 3.0 verwendet wird.

1.4.4.1 Erklärungen zu den Definitionen „Standort“ und „Standorttyp“

Die Standorte werden von verschiedenen Faktoren bestimmt, die sich kontinuierlich ändern können. Deshalb wird zwischen Standort und Standorttyp (Ott et al. 1996) unterschieden:

Definition Standort: Unter dem „Standort“ eines Baumbestandes verstehen wir die Gesamtheit aller Einflüsse, die auf die Bäume des Waldbestandes wirken (z. B. Klima, Bodeneigenschaften, Lawinen, Steinschlag).

Definition Standorttyp: Aus der Betrachtung realer Waldstandorte abgeleitete idealisierte Beschreibung eines Waldstandorttyps. In dieser Beschreibung kann ein ähnlicher realer Standort erkannt werden. Der Standorttyp wird durch floristische aber auch durch standörtliche und strukturelle Merkmale charakterisiert. Ursprünglich war für die Ausscheidung von Waldstandorttypen die Krautschicht sehr

wichtig. So waren z.B. auch die Pflanzenarten der Krautschicht sehr wichtig für die Abgrenzung der Höhenstufen. Seit Ott et al. (1996) werden die Standorttypen auf die Anwendung im Waldbau optimiert, für die Abgrenzung der Höhenstufen werden vor allem Baumarten verwendet.

Die NaiS-Standorttypen basieren auf Frehner et al. (2005/2009) und sind eine Synthese der bestehenden Grundlagen, die vor allem aus den kantonalen Standortbeschreibungen bestehen. Im Rahmen vom Projekt „NaiS-LFI: Zuordnung der LFI-Stichprobenpunkte zu Waldgesellschaften“ des BAFU wurden diese so weit ergänzt, dass alle LFI-Probeflächen der Schweiz einem NaiS-Standorttyp zugeordnet werden können. Zudem wurden sie so weit unterteilt, dass die dominierenden Baumarten klar ersichtlich sind. Die Entwicklung in der Standortkunde und die Entstehung der NaiS-Standorttypen ist in Frey et al. (2021) dargestellt.

1.4.4.2 Änderungen bei der neuen NaiS-Version und wo diese in das vorliegende Projekt einfließen

In Tab. 4 wird aufgeführt, welche Neuerungen bei NaiS (BAFU [Hrsg.] 2024, BAFU [Hrsg.] in Erarbeitung) erarbeitet wurden und inwiefern diese in das vorliegende Projekt übernommen und eingebaut wurden. Abb. 2 zeigt zudem die neuen Standortregionen an (neu inkl. Tannenareale, kein separater Layer mehr nötig) und Abb. 3 die neuen Höhenstufeneinteilung für die Schweiz.

Tab. 4: Änderungen bei NaiS (BAFU [Hrsg.], in Erarbeitung) und deren Auswirkungen auf das vorliegende Projekt.

Neuerungen bei NaiS 2024-2026	Zusammenhang mit Sensi CH
Neue Standortregionen (neu inkl. eingebauter Tannenareale); Korrekturen bei den Tannen- und Buchenarealgrenzen	Im vorliegenden Projekt wichtig bei der Zuteilung von Waldstandorttypen und Höhenstufen
Neue Standorttypengruppen (statt Anforderungsprofile)	Grundlage für Vereinfachung von Baumartenempfehlungen, im vorliegenden Projekt nicht umgesetzt
Aktualisierung krankheitsgefährdeter Baumarten	Kann zusammen mit der Baumartenmatrix von NaiS (BAFU [Hrsg.], in Erarbeitung) in einem Folgeprojekt von Sensi CH umgesetzt werden
Angaben zu Oberhöhe und Wüchsigkeit pro Waldstandorttyp	Im vorliegenden Projekt wichtig für die Integration der Struktur

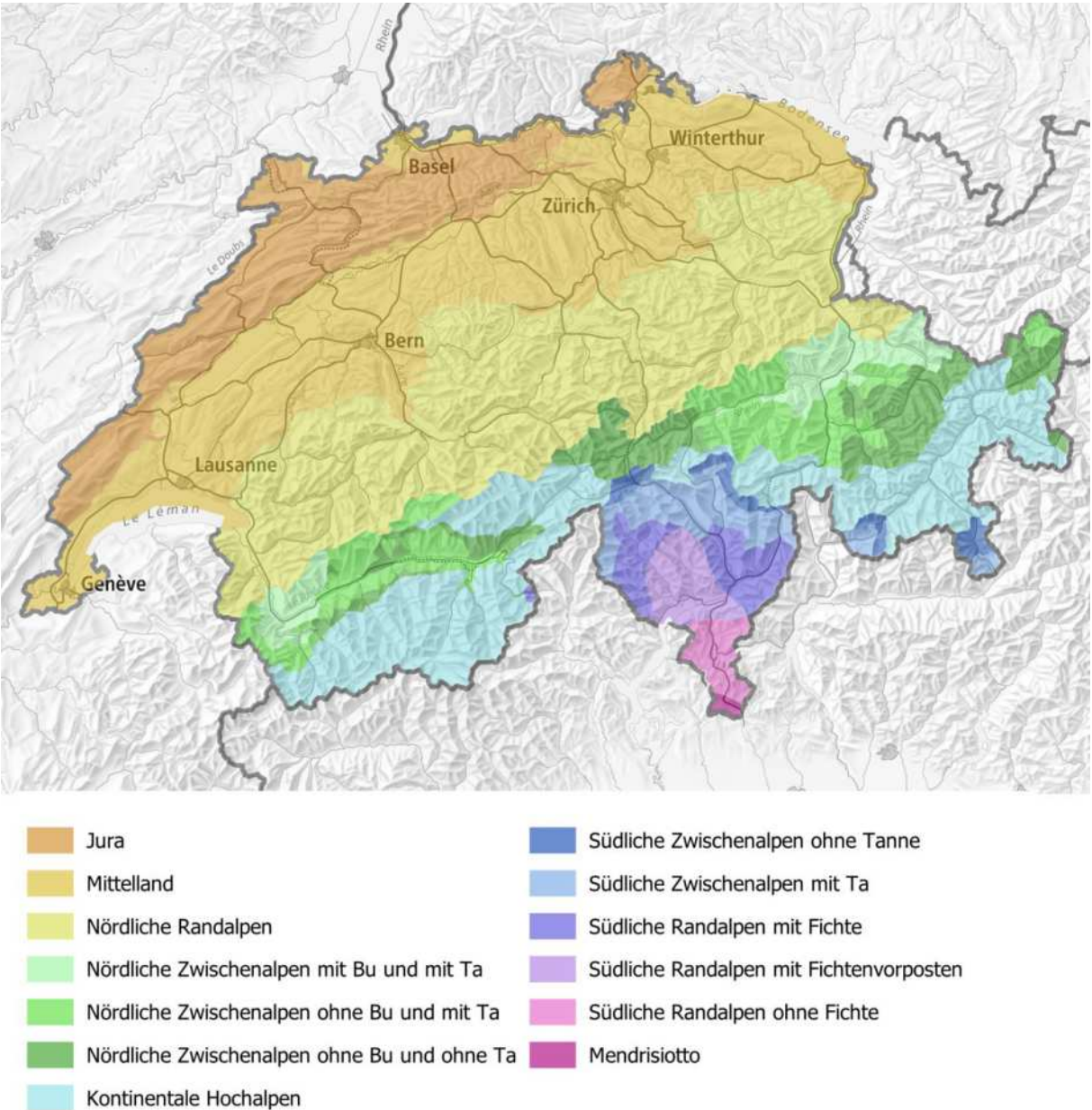


Abb. 2: Neue Standortregionen, inkl. Tannen- und Buchenareale (NaiS; BAFU [Hrsg.] 2024, BAFU [Hrsg.], in Erarbeitung).

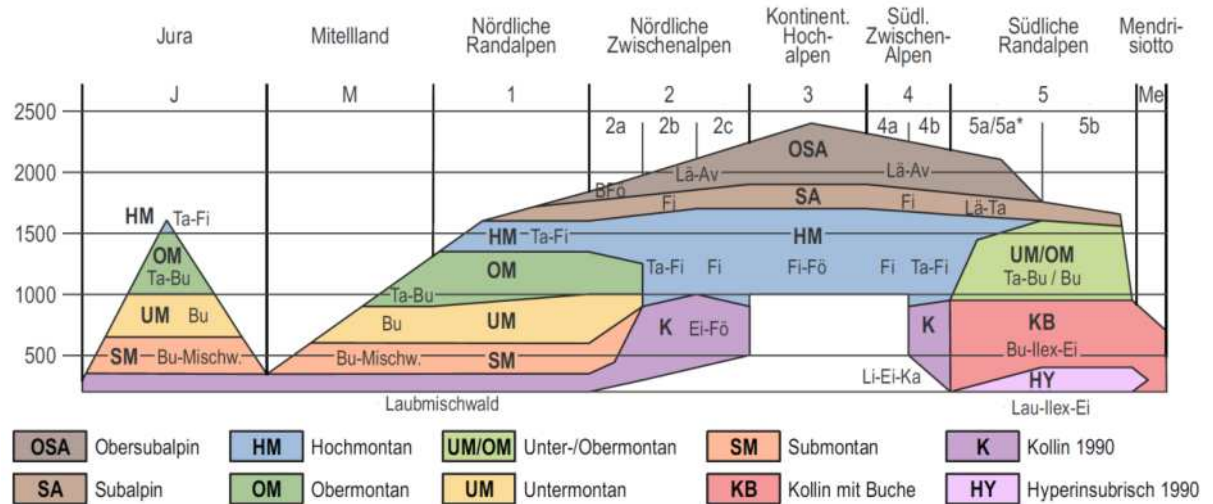


Abb. 3: Neue Höhenstufendarstellung für die Schweiz (NaiS; BAFU [Hrsg.] 2024, BAFU [Hrsg.], in Erarbeitung).

Neu wird es Standorttypengruppen geben, anstatt dass für mehrere Standorttypen zusammen das gleiche Anforderungsprofil formuliert wird. Dies ist relevant für allfällige Zusammenfassungen und Vereinfachungen der Daten je Standortregion nach Abschluss dieses Projekts.

NaiS – Bsp. Strukturangaben

Beim Umwelt Wissen „Standorttypen: Grundlagen“ (BAFU [Hrsg]; in Erarbeitung) bestehen neu einige Angaben, welche für Aussagen zur Strukturierung von Waldstandorttypen als Vergleichsbasis beigezogen werden können (Tab. 5).

Tab. 5: Angaben zu Schlussgrad, Wüchsigkeit, Baumhöhe und Vorkommen von Bäumen mit BHD > 50cm pro Waldstandorttyp. Schlussgrad: wenn keine Angabe: Schlussgrad gedrängt bis locker (abhängig von Entwicklungsstufe, Verjüngungsverfahren, etc.).

Standorttyp	Code	Schlussgrad	Wüchsigkeit	Bestandeshöhe	Bäume mit BHD > 50 cm
basische-Wald-föhrenwälder	61	locker-bis-aufgelöst	sehr-schlecht-wüchsig	8-15 m	selten
	62	locker	sehr-schlecht-wüchsig	10-18 m	selten
	64	locker-bis-aufgelöst	sehr-schlecht-wüchsig	8-15 m	selten
	65	locker-bis-aufgelöst	sehr-schlecht-wüchsig	10-17 m	selten
	65*	locker-bis-aufgelöst	sehr-schlecht-wüchsig	7-15 m	selten
	65* Q	räumig-bis-aufgelöst	sehr-schlecht-wüchsig	7-10 m	selten
	66	locker-bis-aufgelöst	sehr-schlecht-wüchsig	10-18 m	selten
	66L	locker-bis-aufgelöst	sehr-schlecht-wüchsig	10-18 m	selten
	67*	locker-bis-aufgelöst	sehr-schlecht-wüchsig	12-18 m	selten
saure-Wald-föhrenwälder	68	locker-bis-aufgelöst	sehr-schlecht-wüchsig	10-18 m	selten
	68*	locker-bis-aufgelöst	sehr-schlecht-wüchsig	10-15 m	selten
	68* V	locker-bis-räumig	sehr-schlecht-wüchsig	10-18 m	selten

1.4.5 Tree App

Die Tree App (ausführliche Informationen zur Tree App siehe <https://www.tree-app.ch/info>) ist ebenfalls ein Produkt des Forschungsprogramms Wald und Klimawandel von BAFU und WSL. Die Tree App unterstützt den Anwender, genau wie das vorliegende Projekt, bei der Wahl geeigneter Baumarten für zwei Annahmen über das Klima: Mässiger Klimawandel (RCP4.5) und starker Klimawandel (RCP8.5) für die Zeitperiode 2070-2099. Beide Arbeiten bauen auf den gleichen Grundlagenwerken (Zischg et al. 2021 und Frehner & Zürcher-Gasser 2019) auf. Die beiden Arbeiten unterscheiden sich wie folgt: Die Tree App liefert Punktinformationen; Hauptzweck ist die Unterstützung von einem waldbaulichen Entscheid in einem Bestand. Das vorliegende Forschungsprojekt liefert flächige, möglichst schweizweite Daten, welche somit auch als Grundlagenkarten und für GIS-Anwendungen in den Kantonen verwendet werden können. Hauptzweck ist eine Unterstützung bei der Planung. Auch die Tree App übernimmt das Baumartenset von NaiS (BAFU [Hrsg.] 2024; BAFU [Hrsg.], in Erarbeitung), die Abfrageergebnisse der Tree App sind somit weitgehend identisch mit den vorliegenden Ergebnissen. Dank den NaiS-Übersetzungen von Umwelt Wissen „Standorttypen: Grundlagen“ (BAFU [Hrsg]; in Erarbeitung; Stand 2025) der kantonalen Standortkartierungen (Kap. 2.2.2.2) können die aktuellen kantonalen Versionen in die Tree App eingebunden werden, sobald die Tree App an den Stand 2025 angepasst ist.

1.5 Aufbau der Forschungsarbeit und Vorgehen Gesamtprojekt

Das Projekt wurde in zwei Arbeitspaketen durchgeführt:

- 1. Arbeitspaket „Vorabklärungen“ (siehe Kap. 2.1 und 3.1), inkl. Umfrage Kantone und Partizipationsverfahren (Begleitgruppensitzungen),
- 2. Arbeitspaket: Erarbeitung von Baumartenempfehlungen, Bestimmung von klimasensitiven Standorten sowie Erstellung der Karte „Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte“ (siehe Methodenbeschreibung, Kap. 2.2).

2 Methoden

2.1 Methodenteil 1. Arbeitspaket „Vorabklärungen“

Im ersten Arbeitspaket wurden folgende Vorabklärungen getätigt: Einbezug der Kantone und Anfrage bezüglich kantonalen Daten; Abklärungen, welche weiteren Datengrundlagen für das Projekt als Inputdaten verwendet werden könnten. Die erfolgten Schritte sind nachfolgend beschrieben.

2.1.1 Kantonale Anfragen und weitere Abklärungen

Alle Kantone wurden bei Projektstart im November 2023 angeschrieben, ob ihr Kanton beim Projekt berücksichtigt werden soll und ob der Kanton bereit wäre, seine kantonalen Daten zur Verfügung zu stellen. Dazu wurde ein Fragebogen versandt und ein Kurzbeschrieb der Studie (Anhang 7.4) mit abgeliefert.

Danach wurde abgeklärt, wie NaiS-kompatibel die kantonalen Daten sind (Informationen dazu bestanden bereits vom Projekt ARGE Frehner et al. 2020; weitere getroffene Anpassungen bei den kantonalen Übersetzungen befinden sich im Anhang 7.3) und ob bereits eine Übersetzung in NaiS-Einheiten (z.B. für die Einbindung in die Tree App) besteht.

2.1.2 Bildung einer fachlichen Begleitgruppe

In Zusammenarbeit mit der BAFU-Projektleitung wurde eine fachliche Begleitgruppe - bestehend aus BAFU internen und externen Experten - zusammengestellt. An 4 Sitzungsterminen erfolgte ein Austausch und die ausgeführten Arbeiten wurden von der Begleitgruppe beurteilt. Sämtliche Erkenntnisse und Ergebnisse wurden mit der Begleitgruppe fachlich diskutiert. Ebenfalls haben die BAFU internen Experten fachliche Rückmeldungen zur Darstellung des Kartenmaterials (Farbgebung) und bei der Wahl der Begrifflichkeiten abgegeben. Der Methodenteil wurde der Begleitgruppe zur Information während der Forschungsarbeit abgegeben und auch die getroffenen Schwellenwerte (Kap. 2.2.4 und 2.2.5) wurden mit der Begleitgruppe diskutiert.

2.1.3 Nachfrage bei Waldschutz Schweiz

Für das Umwelt Wissen „Standorttypen: Grundlagen“ (BAFU [Hrsg.], in Erarbeitung) wurde mit Waldschutz Schweiz die Liste der krankheitsgefährdeten Baumarten überarbeitet. Im vorliegenden Projekt wird diese neue Liste noch nicht übernommen, sondern es wird jene von der aktuellen Tree App verwendet, bei welcher Esche, Bergulme, Feldulme und Kastanie auf Grund der Empfehlung von Waldschutz Schweiz als krankheitsgefährdet bezeichnet werden.

2.1.4 Untersuchung der Möglichkeit für den Einbezug der Struktur und der Baumartenvielfalt als Kriterien für klimasensitive Bestände

Auf Wunsch der Begleitgruppe und der Projektleitung wurden Abklärungen getroffen bezüglich möglicher externer Projektgrundlagen, welche als Input für die Bestandesstruktur oder für die Baumartenanteile verwendet werden könnten. Dies, da die kantonalen Bestandeskartierungen (sofern vorhanden) sehr unterschiedlich sind im Detaillierungsgrad, vor allem bezüglich Baumartenangaben und in der Aktualität der Daten (Kap. 3.1.2). Die Struktur und die Baumartenvielfalt sind zentrale Elemente der Adaptationsprinzipien (Kap. 1.4.3). In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die untersuchten

Möglichkeiten für den Einbezug der Struktur und der Baumartenanteile als weiteres Kriterium für klimasensitive Bestände kurz umschrieben, wie auch die entsprechende Anwendbarkeit für das vorliegende Projekt. Zum Abschluss wird ein Fazit gezogen. Die Tab. 6 zeigt eine Übersicht der geprüften Möglichkeiten.

Tab. 6: Übersichtstabelle der geprüften Möglichkeiten (Details siehe Kap. 2.1.4.1 bis 2.1.4.7).

Produkt / Projekt	Quelle
TBk: Toolkit zur Erarbeitung von Bestandeskarten aus Fernerkundungsdaten	BFH-HAFL
Arborizer - Baumartenerkennung	Kt. AG
„Baumartenkarte der Schweiz“ sowie Karte „Nadelgehölzklassifikation“	WSL
Tree species identification (Projekt SNSF-COST)	ETH
Modellierung von Gehölzartenverbreitung im Landesforstinventar (Projekt MoGLI)	WSL
Sentinel-2 Vegetationshöhenmodelle	WSL
NDVI: Hinweiskarten zur Vitalität	BFH-HAFL

2.1.4.1 TBk: Toolkit zur Erarbeitung von Bestandeskarten aus Fernerkundungsdaten

Kontakt: Berner Fachhochschule (BFH) - Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL).

Kurzfassung (aus <https://www.planfor.ch/tools/9>): „Das Toolkit zur Erarbeitung von Bestandeskarten aus Fernerkundungsdaten (TBk) ist ein kurz gefasster Programmcode mit dem eine Bestandeskarte basierend auf allgemein zugänglichen Fernerkundungsdaten ([swissSurface3D](https://www.swissimage.ch/); LiDAR) erzeugt werden kann. Die Abgrenzung der Bestände erfolgt aufgrund der räumlichen Verteilung der dominierenden Bäume bzw. aufgrund der maximalen Höhe pro Flächeneinheit (z.B. eine Are) eines Vegetationshöhenmodells (VHM Inputraster). Zudem wird für jeden Bestand die Oberhöhe (hdom), die maximale Höhe (hmax) und der Deckungsgrad (DG) der Hauptschicht ermittelt.“

Hauptoutput (aus <https://www.planfor.ch/tools/9>): „Bestandeskarte: Abgrenzung und Beschreibung (hmax, hdom, Deckungsgrad, ev. Laubholzanteil)“.

Besondere Stärke dieses Tools (aus <https://www.planfor.ch/tools/9>): „Funktioniert mit allgemein zugänglichen Fernerkundungsdaten“.

Einschätzung zur Verwendung von der TBk im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit: siehe Kap. 2.1.5.

2.1.4.2 Arborizer - Baumartenerkennung

Kontakt: Amt für Wald Kanton Aargau

Kurzfassung (aus <https://www.planfor.ch/tools/27>): „Die Abteilung Wald des Kantons Aargau hat einen Algorithmus entwickelt, der basierend auf dem SwissimageRS von 2018 zuerst eine Baumkronenabgrenzung vornimmt und die gefundenen Baumkronen dann in 14 Baumartenklassen klassifiziert. Der Algorithmus wurde für Bäume ab dem Baumholz entwickelt (Vegetationshöhe > 21m). (Weitere Infos unter <https://github.com/RaffiBienz/arborizer>).“

Einschätzung zur Verwendung vom Arborizer im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit: Gemäss Expertenaussage wäre eine Übertragung des Arborizers auf die Schweiz sehr aufwendig, bisher wurde der Arborizer im Kanton Aargau angewendet und im Kanton Freiburg bereits angepasst und angewendet. Für die schweizweite Bearbeitung nötig wäre ein eigenes Projekt notwendig, deshalb wurde dieses Verfahren hier nicht weiter in Betracht gezogen.

2.1.4.3 Testversionen der „Baumartenkarte der Schweiz“ sowie der Karte „Nadelgehölzklassifikation“ (WSL)

Kontakt: WSL. Quelle: Koch, T., Hobi, M., Morsdorf, F., Waser, L. (2024). Tree species map of Switzerland. EnviDat. <https://doi.org/10.16904/envidat.506>.

Kurzfassung (gemäss <https://doi.org/10.16904/envidat.506>, übersetzt): „Die „Baumartenkarte der Schweiz“ bietet eine hochauflösende Übersicht der dominanten Baumarten in den Schweizer Wäldern mit einer räumlichen Auflösung von 10 Metern im Koordinatensystem ETRS89-extended / LAEA Europe (EPSG 3035). Sie basiert auf Sentinel-2 Satellitenbild-Zeitreihen aus dem Jahr 2020, einem digitalen Höhenmodell und Referenzdaten aus der Schweizerischen Landesforstinventur. Insgesamt wurden 15 Baumarten kartiert (), darunter Weissstanne, Bergahorn, Schwarzerle, Grauerle, Hängebirke, Edelkastanie, Buche, Esche, Fichte, Arve, Bergföhre, Waldföhre, Traubeneiche, Stieleiche und Vogelbeere.“

Für die Modellierung wurden verschiedene Datensätze verwendet:

- Daten der Schweizerischen Landesforstinventur (Bestände mit über 60% Dominanz in der Oberschicht; auf mindestens mehr als 9 Probeflächen dominant),
- Sentinel-2 Zeitreihen (2020; Indizes: CCI, CIRE, NDMI, EVI, NDVI),
- Digitales Höhenmodell (swissalti3d, 5m),
- Biogeografische Regionen (Bundesamt für Umwelt BAFU),
- Waldmaske 2017 (Annäherung; Waser et al. 2015).

Ein Random-Forest-Modell mit vorwärtsgerichteter Merkmalsauswahl identifizierte die aussagekräftigsten Variablen zur Unterscheidung der Baumarten. Zur Vermeidung von Overfitting wurde eine 10-fache räumliche Kreuzvalidierung angewendet. Das endgültige Modell erreichte eine Gesamtgenauigkeit von 75,9%. Die Karte wurde innerhalb der Waldmaske von 2017 erstellt, wobei Bereiche mit unvollständigen Sentinel-2 Zeitreihen ausgeschlossen wurden. Es ist zu beachten, dass die Karte bisher nur mit den Trainingsdaten validiert wurde; eine unabhängige Validierung steht noch aus.

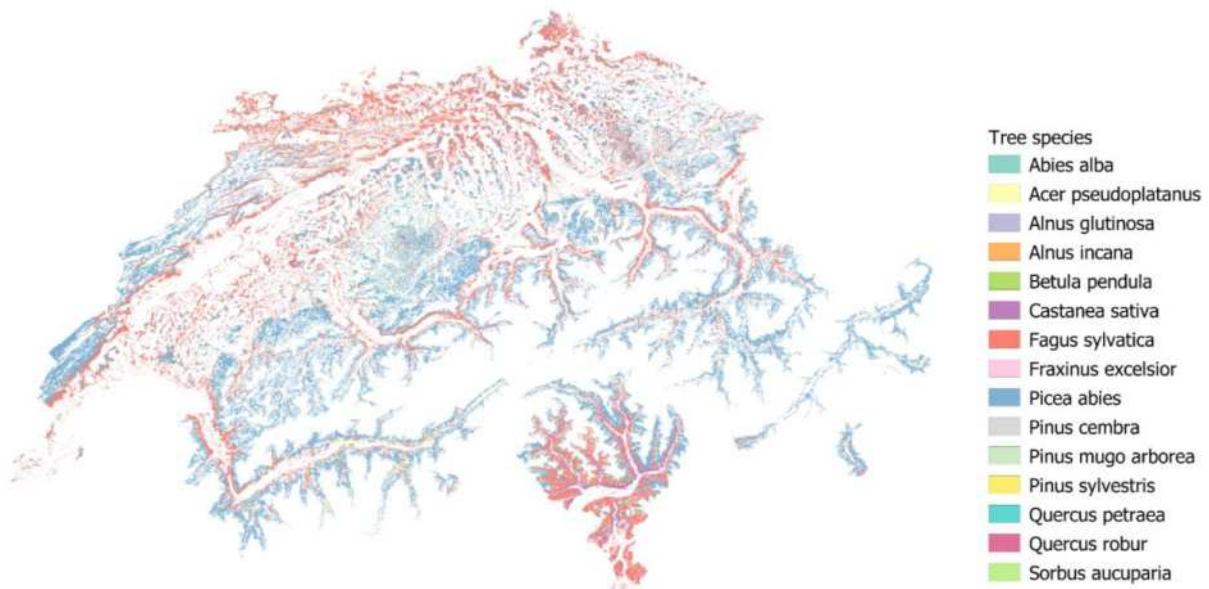


Abb. 4: Testversion der „Baumartenkarte der Schweiz“ (Quelle: WSL; Januar 2025).

Einschätzung zur Verwendung der Baumartenkarte (WSL) im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit: Die Karte ist aktuell noch in Entwicklung. Nach Prüfung der aktuellen Kartenversion „Baumartenkarte der Schweiz“ zeigte sich, dass noch Verbesserungen nötig wären, damit wir die Karte als Input für die TBk verwenden könnten. Insbesondere bei der Verbreitung der Buche zeigte es teils noch fehlerhafte Gebiete / Abweichungen zur Realität auf (modelliertes Buchenvorkommen in buchenfreien Gebieten wie Bergell, Puschlav, Domleschg, Unterengadin, Wallis), ebenso bei der Fichte (modelliertes Vorkommen im Oberengadin) und bei der Waldföhre (zu geringe Modellierung im Albulatal). Daraufhin erhielten wir eine Testversion der Karte „Nadelgehölzklassifikation“ (Stand März 2025; WSL), diese wird aber noch verbessert und validiert werden. Auch diese Karte basiert auf der Random Forest - Klassifikation auf S1/S2 Aufnahmen der Jahre 2021-2023 sowie Labels digitalisiert auf Swisimage RS (2021-2023). Leider waren dies gemäss L. Waser wettertechnisch schlechte Jahre und es hatte sehr lange Schnee bis unter die Waldgrenze. Die Testversion eignete sich leider noch nicht für die Eruierung des Tannenanteils pro Bestand (Kap. 2.2.5.1), nach definitiver Fertigstellung der Kartengrundlagen wäre eine Kombination dieser Karten mit der TBk aber eine sehr wertvolle Hilfe (für die Eruierung der Baumartenanteile der Nadelbäume).

2.1.4.4 Tree species identification (ETH, Projekt SNSF-COST)

Kontakt: ETH. Quelle: Beloiu, M.; Heinzmann, L.; Rehush, N.; Gessler, A.; Griess, V.C. (2023): Individual Tree-Crown Detection and Species Identification in Heterogeneous Forests Using Aerial RGB Imagery and Deep Learning. Remote Sens. 2023, 15, 1463. <https://doi.org/10.3390/rs15051463>.

Kurzfassung (gemäss <https://form.ethz.ch/research/tree-species-identification.html>, übersetzt): „Das Forschungsprojekt „Tree Species Identification“ der ETH Zürich zielt darauf ab, Modelle und Algorithmen zu entwickeln, die eine präzise Erkennung von Baumarten sowohl in der oberen als auch in der unteren Baumschicht ermöglichen. Im Einzelnen sollen dabei Deep-Learning-Modelle basierend auf hochauflösenden Fernerkundungsbildern für die Identifikation von Baumarten in der Oberschicht entwickelt werden. Zudem wird die Übertragbarkeit dieser Modelle auf grössere Gebiete untersucht und die Möglichkeiten des terrestrischen Laserscannings zur Identifikation von Jungbäumen in der Unterschicht evaluiert. ... Das Ergebnis dieser Forschung wird das erste automatische Modell zur Erkennung von Baumarten sein, das geografisch übergreifend anwendbar ist. Diese automatische Artenerkennung dient als Grundlage für verbesserte Inventurplanungen, die Planung von Forstbetrieben und gezielte Managementmassnahmen für widerstandsfähigere Wälder.“

Einschätzung zur Verwendung der Grundlage im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit: Da bisher erst Daten für Einzelbäume und für die Nordwestschweiz und das Mittelland vorhanden sind (tel. Mitt. von M. Beloiu), können wir diese Projektdaten nicht nutzen.

2.1.4.5 Modellierung von Gehölzartenverbreitung im Landesforstinventar (WSL, Projekt MoGLI)

Kontakt: WSL. Quelle: Wüest, R. O., Bergamini, A., Bollmann, K. & Baltensweiler, A.: MoGLI: Hochauflösende Verbreitungskarten für die häufigsten Gehölzarten im Schweizer Wald. Eine Zusammenfassung von Methoden und Resultaten.

Kurzfassung (aus https://www.lfi.ch/media/documents/maps/MoGLI_Verbreitungskarten.pdf, zusammengefasst): Das Ziel des MoGLI-Projekts ist es, die **potenzielle Verbreitung von Baumarten** auf Basis von Standortfaktoren darzustellen. Dabei wird modelliert, wo bestimmte Arten wahrscheinlich vorkommen, **nicht** wo sie tatsächlich stehen. Verwendet wurde ein **Random-Forest-Algorithmus**, trainiert mit LFI-Daten (3. und 4. Inventur), kombiniert mit Umweltvariablen wie Klima, Boden, Höhenlage und Topografie. Die Karten zeigen jeweils die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Art in Prozent (von 0 bis 100%). Für über 40 Baumarten (u. a. Fichte, Buche, Tanne, Eiche, Esche, Bergahorn, Lärche, Föhre, Kastanie, Erle, Vogelbeere) wurden Karten erstellt, die deren potenzielles Vorkommen schweiz-

weit in einem Raster von 25×25 m darstellen. Die Karten sind keine exakten Vorkommenskarten, sondern basieren auf Wahrscheinlichkeitsmodellen – nützlich z. B. für forstliche Planung, Biodiversitätsanalysen oder Klimafolgenabschätzungen.

Einschätzung zur Verwendung des Kartenmaterials vom Projekt MoGLI im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit: Die Karten vom Projekt MoGLI konnten wir nicht nutzen, da es sich um **potenzielle Verbreitungskarten von Baumarten** handelt und nicht um reale, aktuelle Verbreitungskarten (es fehlen prozentuale Baumartenanteile). Die Ausbreitungsgrenzen der Baumarten sind gut modelliert (mit diesen könnte evtl. die Testversion der Baumartenkarte der WSL (Kap. 2.1.4.3) verbessert werden). Ebenfalls können wir die MoGLI-Karten für unser Forschungsprojekt nicht verwenden, da sie im Mittelland überall die Fichte, Tanne, Douglasie, etc. als „wahrscheinlich“ anzeigen (bspw. Karte „*Picea abies* (Fichte)“: <https://www.lfi.ch/de/karten/mogli?mapX=2658855.5933&mapY=1194276.2238&zoom=3.7657350146896196&species=Picea+abies&lang=de>; oder Karte „*Abies alba* (Weisstanne)“: <https://www.lfi.ch/de/karten/mogli?mapX=2660000&mapY=1194276.2238&zoom=3.7657350146896196&species=Abies+alba&lang=de>).

2.1.4.6 Sentinel-2 Vegetationshöhenmodelle (WSL)

Kontakt: WSL. Quelle: <https://www.wsl.ch/en/projects/sentinel-2-vegetation-height-models/>

Kurzfassung (aus <https://www.wsl.ch/en/projects/sentinel-2-vegetation-height-models/>, übersetzt und zusammengefasst): *Das LFI erstellt seit 2012 Vegetationshöhenmodelle (VHM) für die Schweiz. Die Vegetationshöhe wird bisher mittels photogrammetrischer Methoden aus den Stereo-Luftbildern auf einer hohen räumlichen Auflösung von 0.5 m modelliert. Eine landesweite Aktualisierung des VHM ist wegen der Aufnahmestrategie der Luftbilder jedoch nur alle 6 Jahre möglich.*

Basierend auf den optischen Satellitenaufnahmen von Sentinel-2 und eines Convolutional Neural Network (CNN) ist es möglich, jährlich ein VHM für die gesamte Schweiz zu generieren. Da die Aufnahmen von Sentinel-2 eine räumliche Auflösung von 10-20 m haben, wird die Vegetationshöhe aber dementsprechend auf einer Auflösung von 10 m modelliert.

Einschätzung zur Verwendung des Vegetationshöhenmodells im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit: Die Karte ist für unsere Zwecke sehr gut verwendbar (da genügend detailliert) und die Version 2025 wird durch das TBk-Team in die schweizweite TBk eingebaut werden (Kap. 2.1.5 und Kap. 3.1.5).

2.1.4.7 NDVI: Hinweiskarten zur Vitalität

Kontakt: BFH-HAFL. Quelle: http://wiki.waldmonitoring.ch/index.php/Use_Case_3_-_Hinweiskarten_zur_Vitalit%C3%A4t

Kurzfassung (aus http://wiki.waldmonitoring.ch/index.php/Use_Case_3_-_Hinweiskarten_zur_Vitalit%C3%A4t, zusammengefasst): *Die Vitalität von Waldflächen kann mit Sentinel-2-Satellitenbildern grob erfasst werden. Durch den Vergleich des aktuellen Vegetationszustandes mit den Vorjahren lassen sich daraus Hinweiskarten zur Veränderung der Vitalität erstellen. Auch hier handelt es sich allerdings noch um einen ersten Test und eine ausführliche Validierung der Methode steht noch aus.*

*Mit den zeitlich hochaufgelösten Fernerkundungsdaten wird eine mehrjährige Zeitreihe von Vegetationsindizes (v. a. **NDVI** – Normalized Difference Vegetation Index) aufgebaut. Zur Erkennung von Veränderungen in der Vitalität werden zwei Hauptansätze verwendet:*

1. **Zeitreihenanalyse:** NDVI-Werte werden über Jahre hinweg analysiert, um **negative Trends** (z. B. abnehmende Blattflächen) zu erkennen.

2. **Referenzvergleich:** Die aktuelle Vegetationsausprägung wird mit einem mehrjährigen Mittel verglichen – so lassen sich **Auffälligkeiten in einem bestimmten Jahr** erkennen.

Diese Veränderungen werden schließlich in Karten mit dem Fokus auf „auffällig/unauffällig“ überführt und sie können helfen, Gebiete mit möglichem **Vitalitätsverlust, Sturmwurf, Dürreschäden oder Schädlingsbefall zu identifizieren. Ob es sich bei einer Veränderung um Borkenkäferbefall, Trockenstress oder einen Holzschlag handelt, wird nicht unterschieden. So können z.B. negative Werte sowohl einen Holzschlag wie auch eine vorzeitige Herbstverfärbung beschreiben.** Es wird daher von Hinweiskarten gesprochen und für die Interpretation ist immer auch Expertenwissen über die Wälder und gegebenenfalls eine Feldbegehung notwendig. Bei der finalen Hinweiskarte wurden zudem diejenigen Pixel ausmaskiert, für die innerhalb der Monitoring-Periode für die Berechnung des Medians weniger als 6 wolkenfreie Aufnahmen (Pixel) vorhanden sind (somit keine flächige Karte).

Einschätzung zur Verwendung der Hinweiskarten zur Vitalität im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit: Solche Daten könnten als Hilfsmittel für die Kantone zur Priorisierung bezüglich Störungen dienlich sein, für das vorliegende Projekt sind die Daten aber nicht verwendbar aufgrund eines anderen Zeithorizontes und da wir flächendeckende Karten benötigen.

2.1.5 Fazit: TBk-CH-Version Sommer 2025 (Toolkit zur Erarbeitung von Bestandeskarten aus Fernerkundungsdaten)

Von den zahlreichen Abklärungen resultierte, dass die TBk (inkl. Einbau des Vegetationshöhenmodells, Kap. 2.1.4.6) am besten als Inputdatensatz schweizweit verwendbar ist, da die Daten pro Bestand aufbereitet werden und bereits in mehreren Kantonen angewendet/geprüft wurden. Das TBk-Team erklärte sich bereit, uns für die ganze Schweiz einen TBk-Layer (inkl. Einbau des Vegetationshöhenmodells und des Waldmischungsgrades der WSL) zu berechnen (siehe Kap. 3.1.5). Zudem vereinfacht es das weitere Vorgehen, wenn alle Daten schweizweit pro Bestand bereits aufbereitet sind. Diese werden in einem aktuell laufenden Projekt durch die BFH und HAFL erarbeitet und durch das BAFU finanziert (<https://www.bfh.ch/de/forschung/forschungsprojekte/2022-676-228-175/>).

2.2 Methodenteil 2. Arbeitspaket: „Erarbeitung von Baumartenempfehlungen, Bestimmung von klimasensitiven Standorten sowie Erstellung der Karte „Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte“

Nachfolgend werden die in die Modellierungen eingeflossenen Datengrundlagen, das konkrete Vorgehen und die angewandte Methodik des 2. Arbeitspaketes bezüglich der Erarbeitung von Baumartenempfehlungen, Bestimmung von klimasensitiven Standorten sowie der Erstellung der Karte „Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte“ detailliert erläutert. In diesem Projekt wird die Klimasensitivität der heutigen Bestände bezüglich Fichte analysiert, da umfassende Datensätze zu weiteren Baumarten noch nicht vorhanden sind/nicht schweizweit vorhanden sind.

2.2.1 Verwendete Datengrundlagen

Folgende Daten wurden für die Berechnungen verwendet:

- Kantonale Kartierungen (Feldkartierungen [Tab. 21] oder Waldstandort-Hinweiskarten; Kap. 3.1.3),
- Aktuelle Vegetationshöhenstufenkarte der Schweiz (Zischg et al. 2021; Kap. 2.2.1.1),
- Vegetationshöhenstufenkarten der Schweiz für CH2018, Periode 2070-2099, Emissions-Szenarien RCP4.5 und RCP8.5 (Zischg et al. 2021; Kap. 2.2.1.1),

- TBk-CH (<https://www.bfh.ch/de/forschung/forschungsprojekte/2022-676-228-175/>; siehe Kap. 3.1.5),
- Waldmischungsgrad LFI (BAFU; WSL L. Waser; Teil von TBk, Kap. 3.1.5),
- Kantonale Bestandeskarten mit Baumartenanteilen (nur von GR, AG, FR, ZH vorhanden).

Da die von Zischg et al. (2021) modellierten Vegetationshöhenstufen eines der wichtigsten Elemente der Berechnungen sind, werden diese im folgenden Kapitel kurz vorgestellt.

2.2.1.1 Modellierte Vegetationshöhenstufen der Schweiz für die heutigen Waldbestände (Klimaperiode 1961-1990) sowie der Repräsentativen Konzentrationspfade RCP4.5 und RCP8.5 für die Periode 2070-2099

Die Vegetationshöhenstufen der Schweiz (heute und Zukunft) wurden im Projekt „Berechnung der Vegetationshöhenstufen auf der Grundlage der CH2018 Szenarien für die Schweiz“ (Zischg et al. 2021) erstellt ([LINK](#); detaillierte Angaben zum Vorgehen siehe Projektbericht); sowie in der Tree App abgebildet ([LINK](#)). Zur Herleitung der Höhenstufen wurden die in Frehner et al. (2005 / 2009) definierten Höhenstufen mithilfe von kantonalen Kartierungen quantifiziert und verfeinert, wobei ihre jeweiligen oberen Grenzen modelliert und mit Modellierungen des Buchenareals sowie der Tannenareale (Haupt-, Neben- und Reliktareale) kombiniert wurden. Als Grundlage wurden durch A. Zischg und L. Z'graggen berechnete Klimaparameter (für heute und für die Zukunft, [LINK](#)) und geologische Grundlagen verwendet. Die obere Waldgrenze wurde durch Könz et al. (2021; Hochwald, ohne Gebüschwald) für die ganze Schweiz modelliert.

Die Höhenstufengrenzen in der Vegetationshöhenstufenkarte der Schweiz (Abb. 6, Zischg et al. 2021) entsprechen dem Klima der Normperiode 1961-1990. Inzwischen hat schon eine Erwärmung stattgefunden. In der Schweiz betrug diese bis zur Normperiode 1991 – 2020 schon 1.3 °C (Abb. 5).

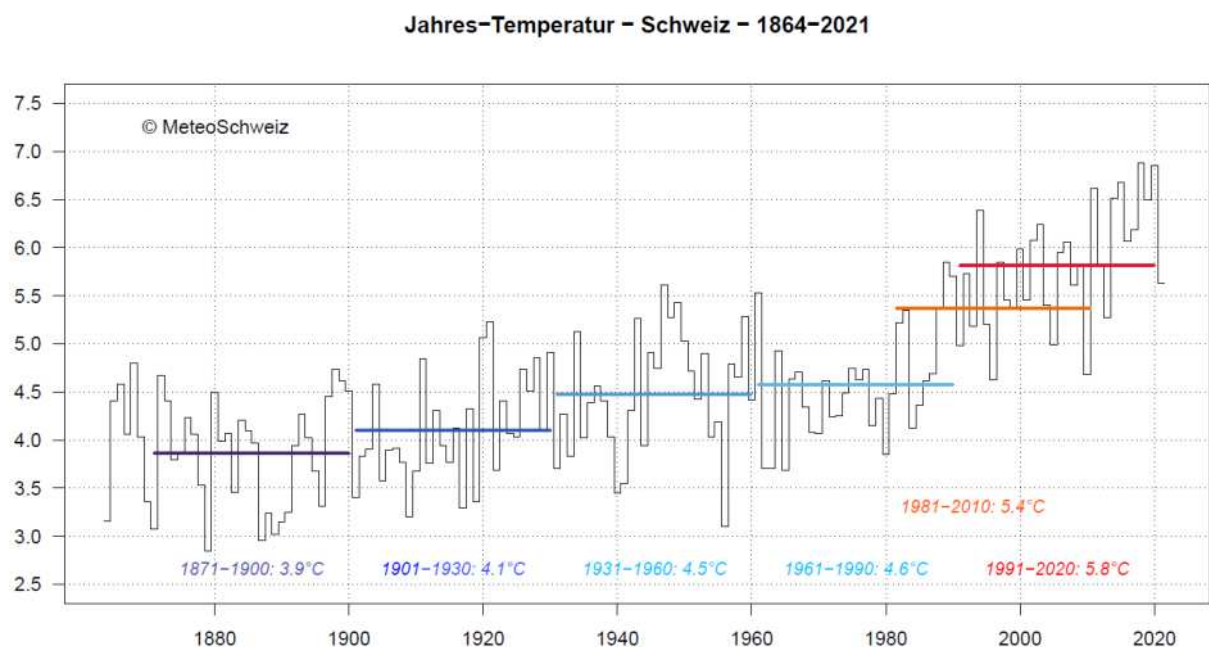


Abb. 5: Jahrestemperatur Schweiz 1864 – 2020 mit Normperioden. Quelle MeteoSchweiz, Medienmitteilung, 20. Januar 2022.

Da die Höhenstufengrenzen anhand der Baumarten im Baumholz bestimmt werden, sind auch heute noch im Gelände mehrheitlich die Höhenstufengrenzen der Normperiode 1961-1990 zu sehen. Hingegen kann die Kraut-, Strauchschicht und Baumverjüngung schon auf die Klimaveränderung reagiert

haben, im Vergleich zum Klima 1961-1990 gibt es schon eine Verschiebung von etwa 200 Höhenmeter bergwärts.

Im Folgenden werden die Karten der Vegetationshöhenstufen (Kombination von Höhenstufen und Arealmodellierungen) zu den zwei Repräsentativen Konzentrationspfade RCP4.5 und RCP8.5 für die Periode 2070-2099 dargestellt. Die Veränderungen der Modellierungen der beiden RCP's gegenüber heute (Abb. 6) sind zum Teil stark. Im Durchschnitt verschieben sich die ursprünglichen Höhenstufen der Periode 1961-1990 beim Szenario RCP4.5 um ca. 360 Höhenmeter nach oben, beim Szenario RCP8.5 sogar um 620 Höhenmeter.

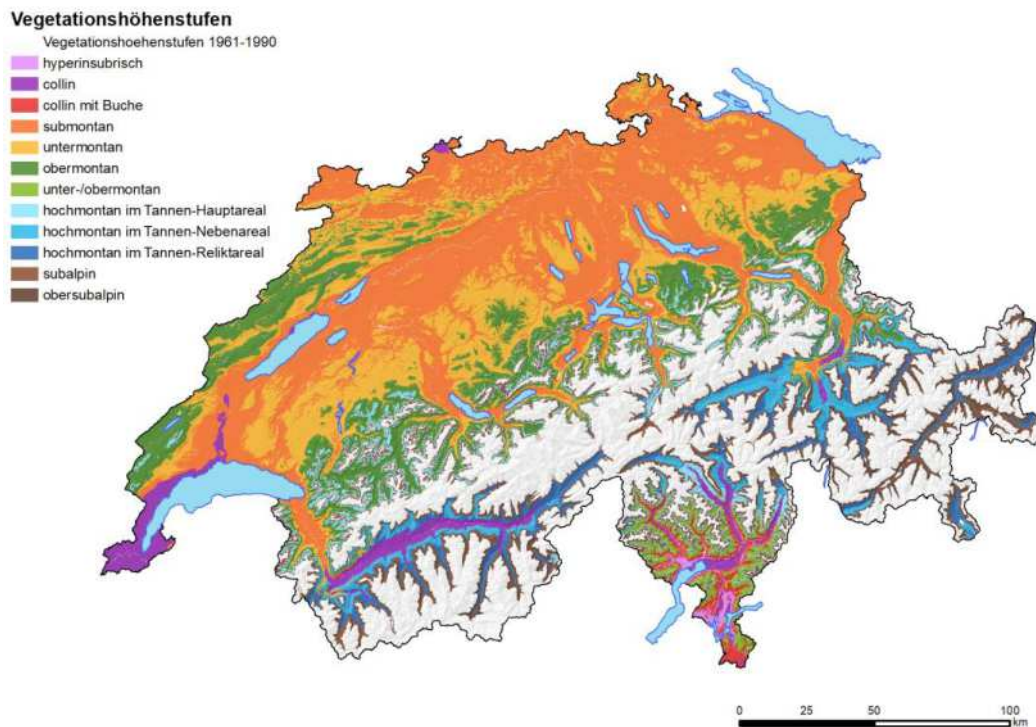


Abb. 6: Vegetationshöhenstufenkarte der Schweiz, modelliert für die Periode 1961-1990 (Zischg et al. 2021).

Während beim RCP4.5 vor allem submontane und in geringerem Masse unter- und obermontane Flächen modelliert wurden und nur noch in den höchsten Lagen hochmontan und ganz wenig subalpin erscheint (Abb. 7), wurde beim RCP8.5 (Abb. 8) ein Grossteil der Fläche der Schweiz als submontan modelliert und fast nur noch in den Alpen kommen weitere Höhenstufen wie unter-, ober- oder hochmontan oder subalpin vor. Diese Veränderungen erscheinen sehr extrem, aber bei einem Anstieg um ca. 360 bis 620 Höhenmeter (siehe oben) machen diese Änderungen bei der Höhenstufenverteilung Sinn.

Vegetationshöhenstufen

Vegetationshöhenstufen RCP 4.5 2070 2099

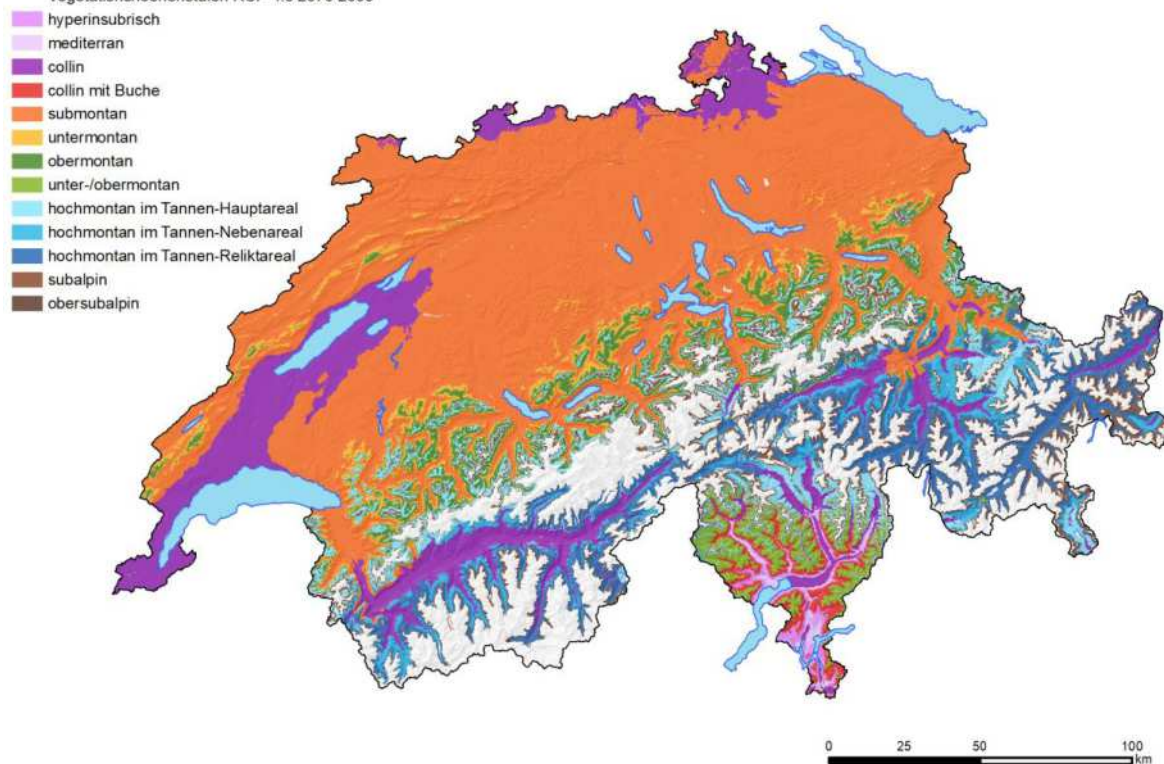


Abb. 7: Vegetationshöhenstufenkarte der Schweiz, modelliert für die Periode 2070-2099, Repräsentativer Konzentrationspfad RCP4.5 (Zischg et al. 2021).

Vegetationshöhenstufen

Vegetationshöhenstufen RCP 8.5 2070 2099

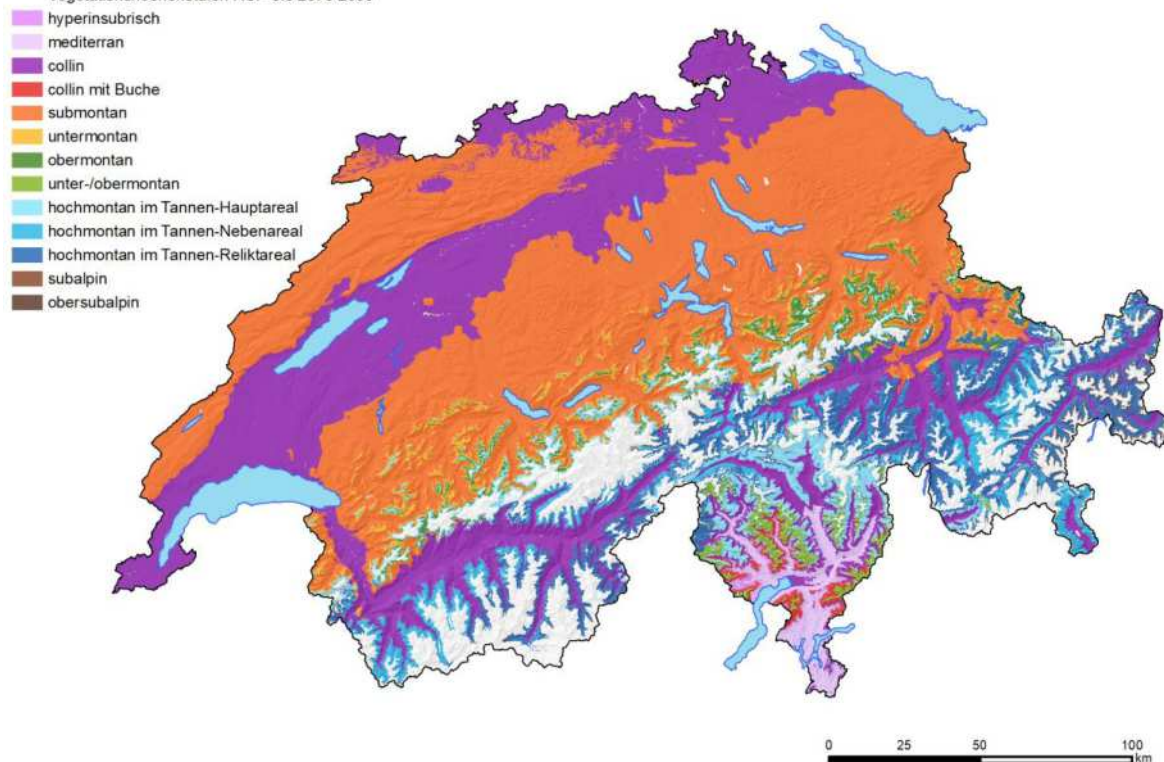


Abb. 8: Vegetationshöhenstufenkarte der Schweiz, modelliert für die Periode 2070-2099, Repräsentativer Konzentrationspfad RCP8.5 (Zischg et al. 2021).

2.2.2 Vorgehen - Übersicht über alle Berechnungsschritte

Die einzelnen Schritte des Vorgehens und entsprechend angewandten Methoden für die Berechnung der Baumartenempfehlungen, der klimasensitiven Standorte sowie der Karte „Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte“ werden in den nachfolgenden Unterkapiteln detailliert beschrieben.

In Abb. 9 wird das gesamte Vorgehen für die Aufbereitung der Inputdaten und die Berechnungen der Baumartenempfehlungen, der klimasensitiven Standorte sowie der Karte „Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte“ Schritt für Schritt aufgezeigt.

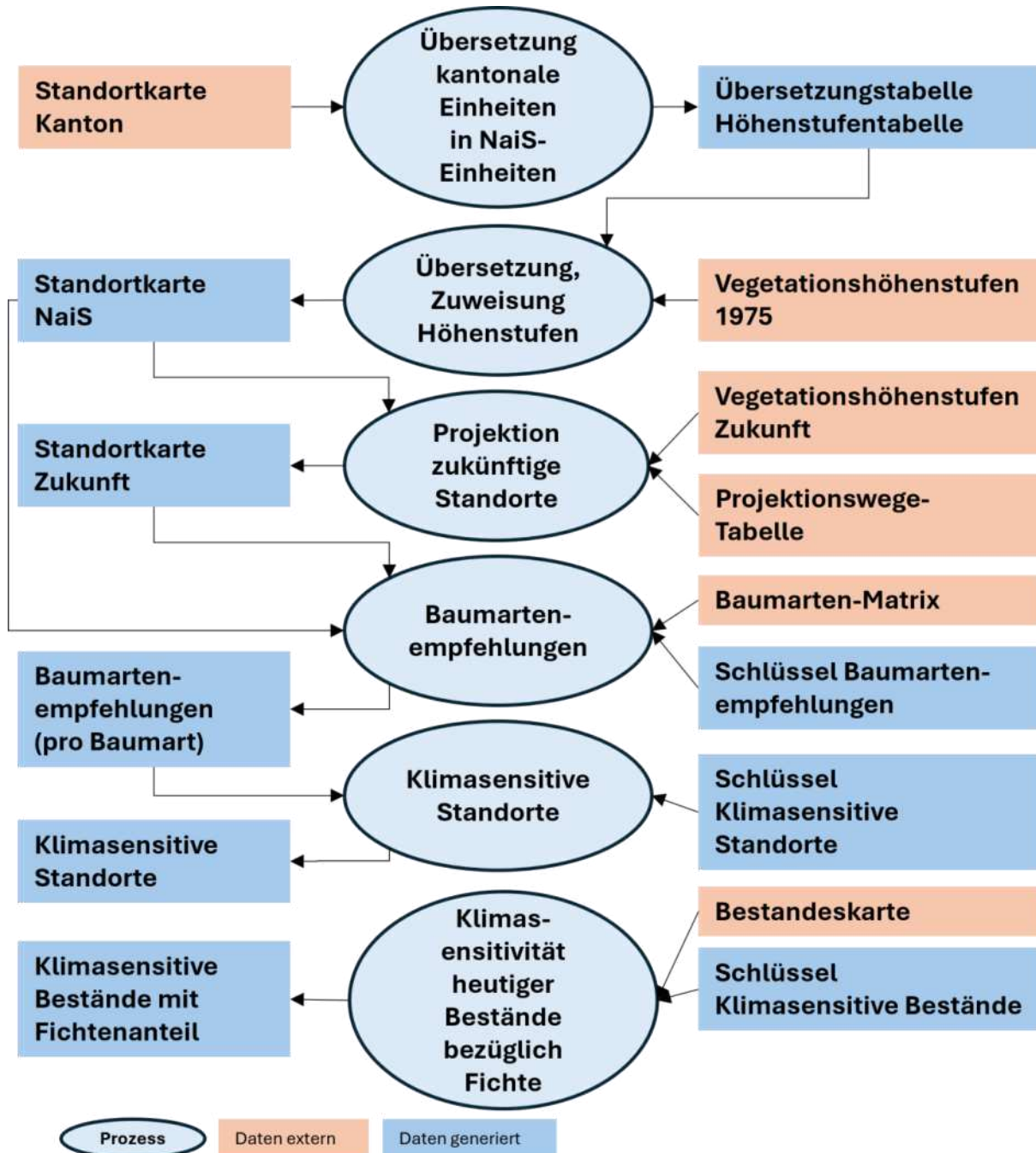


Abb. 9: Datenfluss-Diagramm und Übersicht über alle Berechnungsschritte bei der Modellierung. Schlüssel Baumartenempfehlungen siehe Tab. 9, Schlüssel „Klimasensitive Standorte“ siehe Abb. 16, Schlüssel „Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte“ siehe Tab. 16.

Das Vorgehen lässt sich kurz in folgende Berechnungsschritte zusammenfassen:

1. Übersetzung und Höhenstufenzuweisung: Von 25 Kantonen wurden die Standorttypen-Einheiten der kantonalen Waldstandortkarte oder Waldstandort-Hinweiskarte in NaiS-Standorttypen gemäss Umwelt Wissen „Standorttypen: Grundlagen“ (BAFU [Hrsg.], in Erarbeitung) übersetzt. Den NaiS-Standorttypen wurden mögliche Höhenstufen zugewiesen. Mit Hilfe der heutigen Vegetationshöhenstufen wurde die Höhenstufe für jedes Polygon festgelegt.
2. Berechnung der zukünftigen Waldstandorte: Mittels Überlagerung mit der Karte der zukünftigen Vegetationshöhenstufen und der Projektionsvegetabelle von Frehner & Zürcher-Gasser 2019 (zur Herleitung der Baumartenempfehlungen für die Zukunft) werden die zukünftigen Standorttypen ermittelt.
3. Berechnung der Baumartenempfehlungen: Der Vergleich zwischen heutigem und zukünftigem Standorttyp und den jeweiligen Baumarten (Version 2021) ergibt die Baumartenempfehlungen.
4. Berechnung der klimasensitiven Standorte: Die klimasensitiven Standorte ergeben sich aus der Kombination der heutigen und zukünftigen Baumartenempfehlungen. Der Schlüssel zur Klassifikation der Klimasensitivität (Abb. 16) wurde neu erarbeitet.
5. Berechnung der Klimasensitivität heutiger Bestände: Diese ergeben sich aus der Überlagerung der Bestandeskarten mit den klimasensitiven Standorten. Die Berechnung wurde auf zwei verschiedenen Wegen durchgeführt: a) Schweizweite flächendeckende Berechnung der klimasensitiven Bestände bezüglich der Fichte mit Hilfe der TBk (HAFL) und dem Waldmischungsgrad (WSL) und b) Berechnung der klimasensitiven Bestände mit Baumartenanteilen am Beispiel des Kantons Freiburg.

2.3.3 Aufbereitung und Berechnung der Inputdaten für die Erstellung der Baumartenempfehlungen, der klimasensitiven Standorte sowie der Karte „Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte“

Nachfolgend (Abb. 10) werden die vorbereitenden Schritte für die Berechnung der Baumartenempfehlungen (Kap. 2.2.3), der klimasensitiven Standorte (Kap. 2.2.4) sowie der Karte „Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte“ (Kap. 2.2.5.1) aufgezeigt und erklärt.

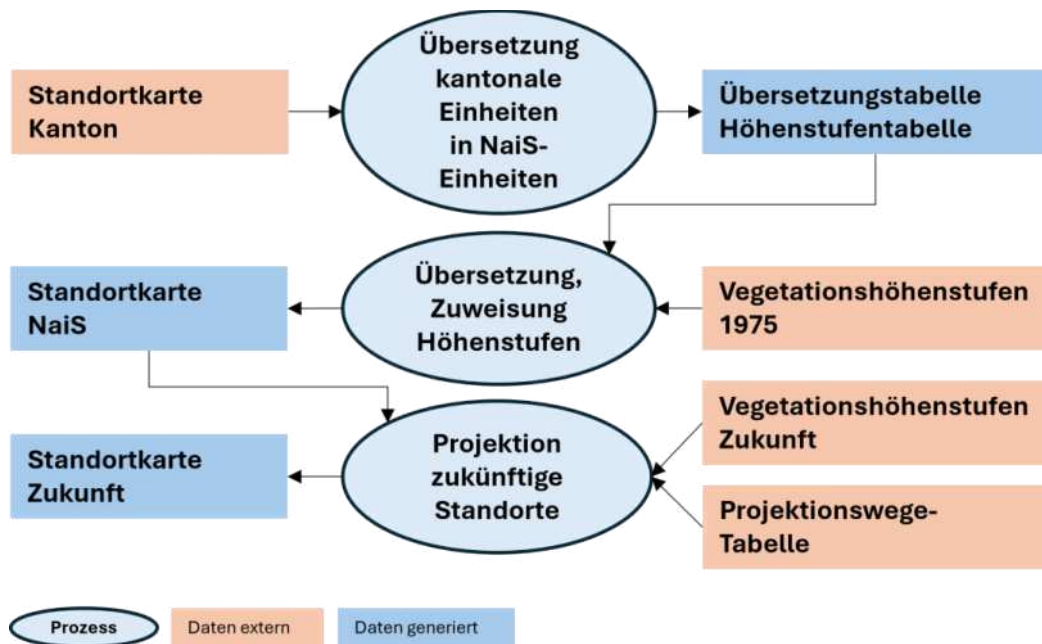


Abb. 10: Vorbereitende Schritte für die Aufbereitung und Berechnung der Baumartenempfehlungen, die klimasensitiven Standorte sowie die Karte „Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte“. Die wichtigsten Zwischenschritte sind die Übersetzung der kantonalen Einheiten in NaiS-Einheiten und die Zuweisung der Höhenstufen. Dies ergibt die Standortkarte nach NaiS und die zukünftige Standortkarte für das jeweilige Klimaszenario.

2.2.2.1 Berücksichtigte Fläche

Die Modellierungen werden innerhalb der heutigen Waldmaske gemacht, die von den kantonalen Waldstandort-Karten abgedeckt ist. Die Methode der Projektion der zukünftigen Standorttypen basiert auf den heutigen Standorttypen und der Verschiebung der Vegetations-Höhenstufen. Obwohl die obere Waldgrenze in die Höhe wandern wird, wurde die Neubewaldung dieser Flächen nicht berücksichtigt, da dort heutige Vergleichsdaten fehlen. Es wird nur die Transformation eines Waldstandortes in einen neuen Standorttyp berücksichtigt.

2.2.2.2 Übersetzung in NaiS-Standorttypen und Höhenstufenzuweisung

Um die Berechnungen ausführen zu können, mussten anfangs die kantonalen Einheiten in NaiS-Standorttypen übersetzt werden, da die Tabelle mit den Projektionswegen (Kap. 2.2.2.3) und die Baumartentabelle (Kap. 2.2.3) auf NaiS-Standorttypen aufbauen. Bei einigen kantonalen Standorttypen wurden Vereinfachungen vorgenommen, da die Übersetzungen in NaiS-Standorttypen mehrere mögliche Einheiten (jeweils abgetrennt durch „()“ oder „/“) ergaben und für die Automation der Baumartenempfehlungen nur einzelne Einheiten und keine Mehrfachnennungen verwendet werden konnten. Wo möglich, wurden aber Aufteilungen mit Hilfe von Bedingungen gemacht, der Standorttyp 53 wird in NaiS bei obermontan und hochmontan zu 53Ta und subalpin zu 53 (dito bei 60*/60*Ta). Die Excel-Files pro Kanton auf dem Github Repository dokumentieren die Bedingungen im Detail. Z.T. wurden die Waldstandortregionen bei der Übersetzung der kantonalen Einheiten verwendet. Es wurden keine inhaltlichen Korrekturen der kantonalen Waldstandortkarten ausgeführt (nicht Teil des Projektes).

In einem zweiten Schritt wurden die NaiS-Standorttypen den Höhenstufen zugeteilt. Mithilfe der resultierenden NaiS-Übersetzungstabelle wurde der kantonale Layer mit NaiS-Standorttypen dargestellt und eine Plausibilitätskontrolle ausgeführt. Wenn bei einem NaiS-Standorttyp mehrere Höhenstufen möglich sind, nimmt das Modell jeweils die Höhenstufe aus der schweizweiten Vegetationshöhenstufenkarte oder die höher gelegene Höhenstufe (bspw. bei NaiS-Standorttyp 1 ist „sm“ (submontan) und „um“ (untermontan) möglich, das Modell nimmt „um“, da es gegen oben keine Projektionen hat).

In einem weiteren Schritt wurde den Waldstandorten noch weitere Attribute hinzugefügt: Standortregion, Tannenareal, Sonnenhang/Schattenhang, Lage (Hanglage, Ebene), Neigung. Diese Daten kommen aus dem Umwelt Wissen „Standorttypen: Grundlagen“ (BAFU [Hrsg.], in Erarbeitung), aus Zischg et al. (2019), oder von Swisstopo. Um die ursprüngliche Geometrie der kantonalen Waldstandortkarten zu erhalten, wurde bei der Übersetzung der Waldstandortkarten in NaiS-Standorttypen das ursprüngliche Polygon möglichst nicht verändert. Das heisst, dass bei der Attributierung der Waldstandortkarten für die Berechnung der Projektionswege ein Polygon als Ganzes entweder ein Sonnen- oder ein Schattenhang wird und die mittlere Neigung über das ganze Polygon für die Bedingungen verwendet wird. Aus diesem Grund der Beibehaltung der ursprünglichen Polygon-Form wird der Layer nicht mit den Kuppen verschnitten. Das sind meist einzelne Pixelreihen. Das heisst, dass die Bedingung „Kuppe“ und „Mulde“ bei der Berechnung der Projektionswege nicht verwendet wird. Die Hangneigung wird als mittlere Hangneigung über das gesamte Polygon verwendet. Flache Lagen und Ebenen werden in der Ermittlung der Projektionswege verwendet.

2.2.2.3 Berechnung der zukünftigen Waldstandorttypen

Die sogenannten „**Projektionswege**“ (Tabelle zur Herleitung der Baumartenempfehlungen für die Zukunft) aus Tree App wurden automatisiert und werden auf jede kantonale Waldstandortkarte angewandt. Sie basieren generell auf der Überlagerung des heutigen Standorttyps (in NaiS-Standorttypen) und der heutigen Höhenstufe mit einer zukünftigen Vegetationshöhenstufenkarte (Abb. 11). Aus der Veränderung der Höhenstufe wird der zukünftige Waldstandorttyp abgeleitet (Abb. 12).

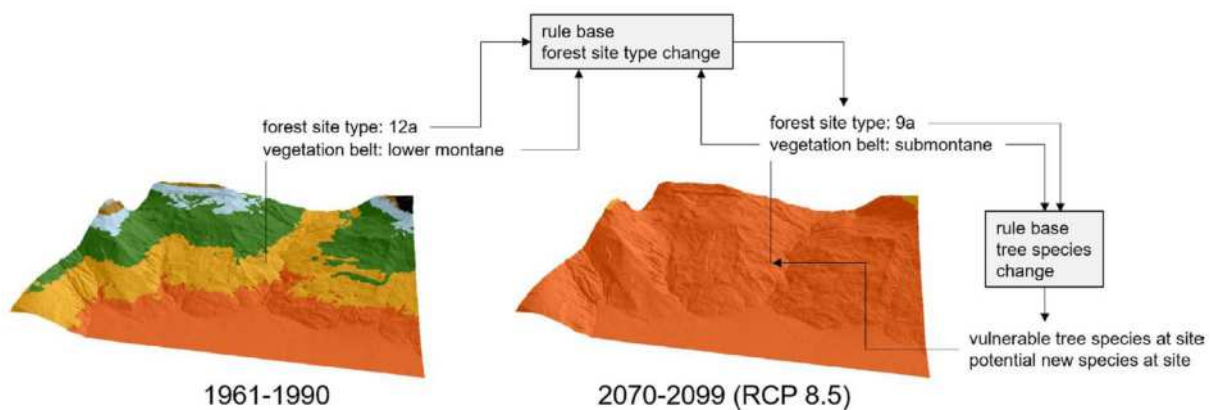


Abb. 11: Verschiebung der Vegetationshöhenstufen in höhere Lagen. Quelle: Zischg et al. (2021).

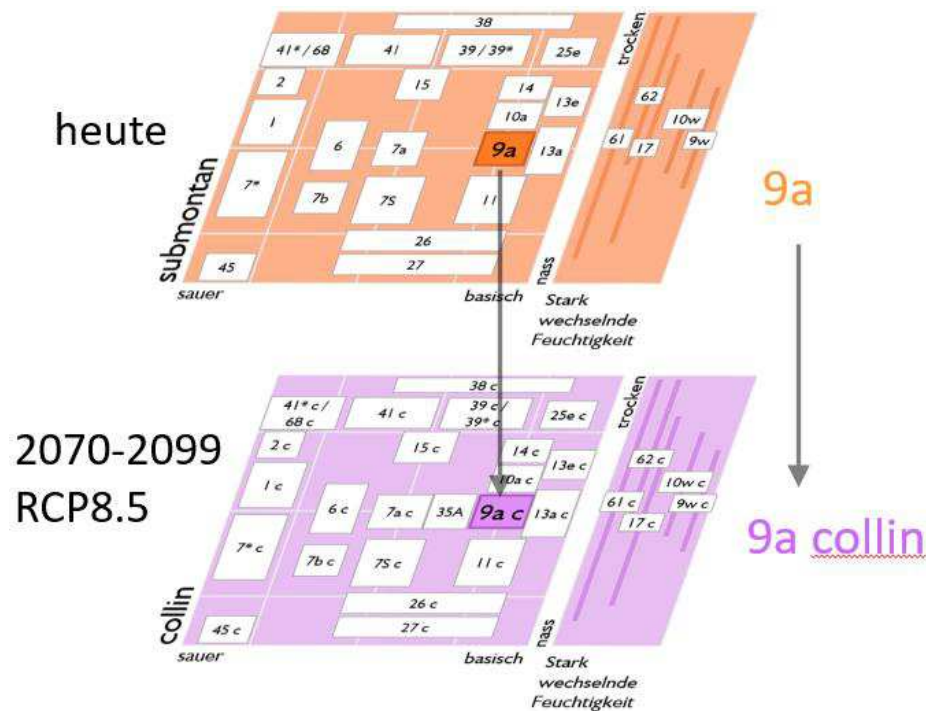


Abb. 12: Vereinfachte Darstellung der Projektionswege (sogenannte Durchstichmethode, es kann angenommen werden, dass sich die Lage im Ökogramm auf der Feuchteachse und beim pH nicht wesentlich verändert gemäss Frehner et al. 2017 und Braun et al. 2022).

Die Polygone der Waldstandortkarten werden mit den zukünftigen Vegetationshöhenstufen verschnitten (RCP4.5 oder RCP8.5). Dies sind vektorisierte Rasterkarten, d.h. bei diesem Verschnitt können z.T. Randeffekte entstehen, welche aufgrund des geringen Flächenanteils nicht weiter berücksichtigt werden.

Für die Modellierung der Projektionswege sind neben der zukünftigen Höhenstufe noch die im vorhergehenden Schritt attribuierten Lageparameter erforderlich. Das Ergebnis ist ein Datensatz, der die heutigen kantonalen Standorttypen und NaiS-Standorttypen, die heutige und zukünftige Höhenstufe und die Lageparameter enthält. Diese Überlagerung wird für beide Klimaszenarien gemacht (RCP4.5 und RCP8.5, Periode 2070-2099). Die Klimaszenarien sind in der zukünftigen Vegetationshöhenstufenkarte abgebildet.

Die heutigen Höhenstufen werden als Ausgangs-Höhenstufe für die Berechnung der Projektionswege verwendet. Bei Übergängen können gegebenenfalls zwei verschiedene Höhenstufen zutreffen. Diese Grundlage kann auch verwendet werden, um die kantonalen Waldstandortkarten in die Tree App (www.tree-app.ch) einzubinden.

Im nächsten Schritt werden die zukünftigen Waldstandorte (Standorttypen) hergeleitet. Dies erfolgt auf Basis der Tabelle „L_Projektionswege_im_Klimawandel_18022020_export.xlsx“ aus dem Projekt „Adaptierte Ökogramme“, Teil 5 (Frehner & Zürcher-Gasser 2019), ergänzt in ARGE Frehner et al. (2020).

Für folgende neue NaiS-Standorttypen gibt es noch keine Projektionswege: 7d, 7e, 7f, 7g, 8e, 8f, 8g, 27a, 27f, 38C, 47P, 63, 64, 65*O, 66L, 68*V, 70*. Für diese Standorttypen werden im Jahr 2026 bei der Überarbeitung der Projektionswege noch neue Projektionswege erstellt (siehe Tab. 7).

Tab. 7: Neu zu erstellende Projektionswege.

Projektionswege für SensiCH Region J, M, 1, 2, 3								
subalpin	hochmontan	obermontan	untermontan	submontan	kollin Zukunft		kollin	kollin Zukunft
				7d	7d-kol		38C	68*-kol
			8e	7e	7e-kol		38S	65*-kol
			8f	7f	7f-kol		65*O	65*O-kol
			8g	7g	7g-kol			
		49	27a	27a	27a-kol			
		27h	27f	27f	27f-kol			
	47P	47P	34*	34*	34*-kol			
			47P	34*	34*-kol			
		63	61	61	61-kol			
				64	64-kol			
				65*O	65*O-kol			
			66L	66L	66L-kol			
68*V	68*V				68*V-kol			
	70*	70*	65	65	65-kol			

Nach der Berechnung der Projektionswege und der zukünftigen Waldstandorttypen wurden alle möglichen Kombinationen für jeden Kanton kontrolliert (auf xls-Zusammenzug). Fehler wurden in einem zweiten Modelldurchgang behoben.

In einem Excel-File (L_Projektionswege_im_Klimawandel_18022020.xlsx, Tab. 8) im GitHub-Repository sind alle möglichen bekannten Veränderungen der Standorttypen in Abhängigkeit von der Höhenstufenverschiebung und den Lageparametern zusammengefasst. Für jede Parameter-Kombination sind die Regeln der Baumartenprojektionen im Excel-File abgelegt und die Projektion kann umgesetzt werden. Falls die Höhenstufe um mehr als eine Klasse ändert, müssen die jeweiligen Projektionswege hintereinander berechnet werden. Als Ergebnis gibt die Funktion den zukünftigen Standorttyp für jedes Klimawandelszenario zurück.

Tab. 8: Ausschnitt aus dem Regelset der Baumartenprojektionen zur Herleitung der zukünftigen Waldstandorte.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Standortsregionen	Hoehenstufe_heute	Standortstyp_heute	Hangneigung	Tannenareal_Zukunft	Standortsregion	Relief	Weitere	Hoehenstufe_Zukunft	Standortstyp_Zukunft
R, J, M, 1, 2, 3 osa bis co	untermontan	1						submontan	1
R, J, M, 1, 2, 3 osa bis co	submontan	1			J, M, 1, 2a			collin Zukunft	1 collin
R, J, M, 1, 2, 3 osa bis co	untermontan	2						submontan	2
R, J, M, 1, 2, 3 osa bis co	submontan	2			J, M, 1, 2a			collin Zukunft	2 collin
R, J, M, 1, 2, 3 osa bis co	untermontan	3						submontan	3
R, J, M, 1, 2, 3 osa bis co	submontan	3			J, M, 1, 2a			collin Zukunft	1 collin
R 5	unter- & obermontan	3					normal	collin Zukunft	42V
R 5	unter- & obermontan	3					tiefgründig	collin Zukunft	34a
R 5	unter- & obermontan	3					normal	collin mit Buche Zukunft	42V
R 5	unter- & obermontan	3					tiefgründig	collin mit Buche Zukunft	34a
R 5	unter- & obermontan	3					normal	hyperinsubrisch Zukunft	42V
R 5	unter- & obermontan	3					tiefgründig	hyperinsubrisch Zukunft	34a
R, J, M, 1, 2, 3 osa bis co	untermontan	4						submontan	4
R, J, M, 1, 2, 3 osa bis co	submontan	4			J, M, 1, 2a			collin Zukunft	6 collin
R 5	unter- & obermontan	4						collin Zukunft	3L/4L
R 5	unter- & obermontan	4						collin mit Buche Zukunft	3L/4L
R 5	unter- & obermontan	4						hyperinsubrisch Zukunft	3L/4L
R, J, M, 1, 2, 3 osa bis co	submontan	6			J, M, 1, 2a			collin Zukunft	6 collin
R, J, M, 1, 2, 3 osa bis co	submontan	6			J, M, 1, 2a			collin Zukunft	6 collin
R, J, M, 1, 2, 3 osa bis co	submontan	11			J, M, 1, 2a			collin Zukunft	11 collin
R, J, M, 1, 2, 3 osa bis co	untermontan	14						submontan	14
R, J, M, 1, 2, 3 osa bis co	submontan	14			J, M, 1, 2a			collin Zukunft	14 collin
R, J, M, 1, 2, 3 osa bis co	untermontan	15						submontan	15
R, J, M, 1, 2, 3 osa bis co	submontan	15			J, M, 1, 2a			collin Zukunft	15 collin
R, J, M, 1, 2, 3 osa bis co	untermontan	16						submontan	25e
R, J, M, 1, 2, 3 osa bis co	untermontan	16			J, M			submontan	39
R, J, M, 1, 2, 3 osa bis co	untermontan	16			1, 2, 3			submontan	40*
R, J, M, 1, 2, 3 osa bis co	untermontan	17						submontan	17
R, J, M, 1, 2, 3 osa bis co	submontan	17			J, M, 1, 2a			collin Zukunft	17 collin
R, J, M, 1, 2, 3 osa bis co	obermontan	18						untermontan	8a
R, J, M, 1, 2, 3 osa bis co	obermontan	19						untermontan	8d
R, J, M, 1, 2, 3 osa bis co	obermontan	20						untermontan	85
R, J, M, 1, 2, 3 osa bis co	hochmontan	21						hochmontan Reliktareal der Tanne	23H
R, J, M, 1, 2, 3 osa bis co	hochmontan	21						hochmontan Hauptareal der Tanne	21
R, J, M, 1, 2, 3 osa bis co	hochmontan	21						hochmontan Nebenareal der Tanne	21
R, J, M, 1, 2, 3 osa bis co	hochmontan	21						obermontan	20
R, J, M, 1, 2, 3 osa bis co	obermontan	21						untermontan	85
R, J, M, 1, 2, 3 osa bis co	hochmontan	21			2b, 3			collin Zukunft	23H collin

2.2.3 Berechnung der Baumartenempfehlungen

Mit Hilfe der in die Zukunft projizierten Höhenstufen der Schweiz (Zischg et al. 2021) werden die NaiS-Standorttypen für ein zukünftiges Klima berechnet (Methode gemäss Frehner & Zürcher-Gasser 2019). Aufbauend auf diesen Grundlagen und berechneten Veränderungen der Standorttypen werden **Baumartenempfehlungen für die Zukunft** erstellt (dito Tree App, dieses baut auf denselben Grundlagen auf, liefert aber nur Empfehlungen für ausgewählte Standorte, nicht flächig). Pro Baumart wird eine Karte pro RCP-Szenario erstellt plus zusätzlich dieselbe Kombination wie beim Tree App (Kombination aus RCP4.5 und RCP8.5), mit derselben Kategorisierung wie im Tree App. Die Karten zeigen auf, welche Baumarten in Zukunft an einem Standort ausfallen oder neu aufkommen können.

2.2.3.1 Herleitung der Baumartenempfehlungen

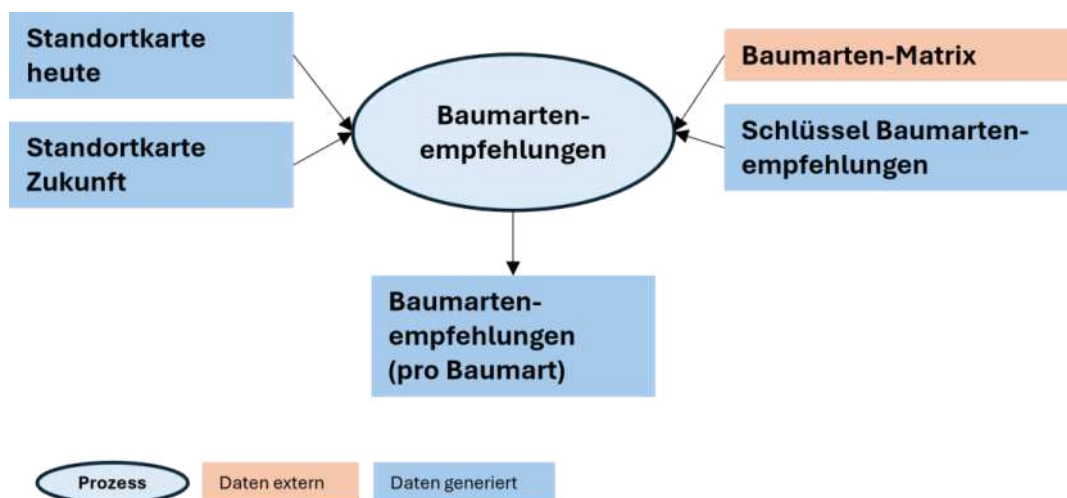


Abb. 13: Berechnung der Baumartenempfehlungen. Schlüssel „Baumartenempfehlungen“ siehe Tab. 9.

Nach der Ableitung des zukünftigen Waldstandorts können die Baumartenempfehlungen berechnet werden. Dabei wird aus den Baumartenempfehlungen für den heutigen und den zukünftigen Standorttyp abgeleitet, welche Baumart heute und in Zukunft für den Standort geeignet ist (Abb. 13). Die Baumartenmatrix, die für jeden Standorttyp die potenziell vorkommenden Baumarten sowie deren Dominanz (im jeweiligen Standorttyp) angibt, entspricht der Version 2021 und wird auch in der Tree App Version 3.0 verwendet. So wird bei jeder Baumart pro Standorttyp angegeben, ob die jeweilige Baumart im Standorttyp „xy“:

- eine dominante Naturwaldbaumart (a),
- eine wichtige beigemischte Naturwaldbaumart (b),
- oder eine weitere Baumart (c) ist.

Beim Umwelt Wissen „Standorttypen: Grundlagen“ (BAFU [Hrsg.], in Erarbeitung) werden die Baumarten künftig in einheimische, europäische, aussereuropäische Baumarten und invasive Neophyten eingeteilt.

Ergebnis des Schritts „Herleitung der Baumartenempfehlungen“ ist ein Kartenlayer „Baumartenempfehlungen“ für jedes Klimaszenario (RCP4.5, RCP8.5) und jede Baumart (84 Baumarten, Anhang 7.5). Die Karte zeigt, ob die jeweilige Baumart an einem Standort an die heutigen und/oder zukünftigen Standortbedingungen angepasst ist (Kategorien siehe unten):

Tab. 9: Kategorien bei den Baumartenempfehlungen (Schlüssel „Baumartenempfehlungen“, siehe Abb. 9 und Abb. 13). Flächen, wo aufgrund noch fehlender Informationen keine Berechnung möglich war, wurden bei den Abbildungen und Auswertungen weggelassen. Legende: * = einzeln berechnen für die beiden Klimaszenarien RCP4.5 und RCP8.5. ** = siehe Baumartenmatrix (Kap. 2.2.3.1). Angaben zu „a“, „b“ und „c“ siehe Text oben.

Baumartenempfehlung (pro Baumart und Klimaszenario*)	
Heute erwähnt = Baumart beim Standorttyp entweder als dominante Naturwaldbaumart (a), wichtige beigemischte Naturwaldbaumart (b) oder weitere Baumart (c) aufgeführt**. Heute nicht erwähnt = Baumart beim Standorttyp nicht aufgeführt**.	
Empfehlung	Beschreibung
Keine Angabe	Dies sind alles Flächen, für die in der Baumartentabelle keine Information vorhanden ist. D.h. die Baumart ist weder beim Standorttyp heute noch beim Standorttyp Zukunft als dominierende oder wichtige beigemischte Naturwaldbaumart oder als weitere Baumart aufgeführt.
Empfohlen	Standorttyp Zukunft: dominierende oder wichtige beigemischte Naturwaldbaumart Standorttyp heute: erwähnt <i>Gemäss Tree App soll diese Baumart gefördert werden (sie ist heute und in Zukunft eine wichtige Baumart).</i>
Bedingt empfohlen	Standorttyp Zukunft: weitere Baumart Standorttyp heute: erwähnt <i>Gemäss Tree App kann diese Baumart gefördert werden (jedoch besser in Kombination mit weiteren Baumarten).</i>
Gefährdet	Standorttyp Zukunft: nicht erwähnt Standorttyp heute: erwähnt Wechsel wird infolge Störungen (z. B. Trockenstress, Käfer) schubartig erwartet. <i>Gemäss Tree App soll diese Baumart nicht gefördert werden, da sie klimatisch zunehmend gefährdet ist.</i>
langfristig gefährdet	Standorttyp Zukunft: nicht erwähnt Standorttyp heute: erwähnt Wechsel wird kontinuierlich und sehr langsam erwartet (Spezialfall Arve und subalpine / obersubalpine Lärchenstandorte)
In Zukunft empfohlen	Standorttyp Zukunft: dominierende oder wichtige beigemischte Naturwaldbaumart Standorttyp heute: nicht erwähnt <i>Gemäss Tree App ist das heutige Klima für die Baumart noch ungeeignet, in Zukunft ist diese Baumart aber als dominierende Baumart im Bestand möglich.</i>
In Zukunft bedingt empfohlen	Standorttyp Zukunft: weitere Baumart Standorttyp heute: nicht erwähnt <i>Gemäss Tree App ist das heutige Klima für die Baumart noch ungeeignet, in Zukunft ist diese Baumart aber als weitere Baumart im Bestand möglich.</i>

Tab. 11 zeigt einen Ausschnitt aus der Baumartenmatrix zur Bestimmung der Bedeutung der Baumarten für die Standorttypen. Die Karte der Baumartenempfehlungen pro Klimaszenario bildet die Grundlage für die Herleitung der sensitiven Standorte. **Im Tree App werden die Baumartenempfehlungen für eine Kombination der Klimaszenarien (RCP4.5 und 8.5) dargestellt, nicht wie hier separat pro Klimaszenario.** Diese Kombination wird in der Karte „Baumartenempfehlung (pro Baumart und 2 Klimaszenarien)“ dargestellt (Erklärungen dazu Tab. 10).

Tab. 10: Erklärungen zur Kombination der Klimaszenarien bei Baumartenempfehlungen (dito Tree App). Legende: ** = siehe Baumartenmatrix (Kap. 2.2.3.1). Angaben zu „a“, „b“ und „c“ siehe Text oben.

Baumartenempfehlung (pro Baumart und 2 Klimaszenarien)	
Wie Empfehlung Tree App (www.tree-app.ch): im Tree App werden die Baumartenempfehlungen für eine Kombination der Klimaszenarien (RCP4.5 und 8.5) dargestellt, nicht separat pro Klimaszenario Heute erwähnt = Baumart beim Standorttyp entweder als dominante Naturwaldbaumart (a), wichtige beigemischte Naturwaldbaumart (b) oder weitere Baumart (c) aufgeführt**. Heute nicht erwähnt = Baumart beim Standorttyp nicht aufgeführt**.	
Empfehlung	Beschreibung
Empfohlen	Standorttyp Zukunft: entweder in beiden Klimaszenarien dominante oder wichtige beigemischte Naturwaldbaumarten oder dies trifft entweder bei „mässigem“ oder „starkem“ Klimawandel zu, während sie im anderen Klimaszenario nur als weitere Baumart aufgeführt ist. Standorttyp heute: erwähnt <i>Gemäss Tree App soll diese Baumart gefördert werden (sie ist heute und in Zukunft eine wichtige Baumart).</i>
Bedingt empfohlen	Standorttyp Zukunft: entweder bei beiden Klimaszenarien weitere Baumart oder nur in einem Klimaszenario dominante oder wichtige beigemischte Naturwaldbaumart. Standorttyp heute: erwähnt <i>Gemäss Tree App kann diese Baumart gefördert werden (jedoch besser in Kombination mit weiteren Baumarten).</i>
Gefährdet	Standorttyp Zukunft: bei einem Standorttyp nicht erwähnt und beim anderen nicht erwähnt oder als weitere Baumart aufgeführt. Standorttyp heute: erwähnt Wechsel wird infolge Störungen (z. B. Trockenstress, Käfer) schubartig erwartet. <i>Gemäss Tree App soll diese Baumart nicht gefördert werden, da sie klimatisch zunehmend gefährdet ist.</i>
langfristig gefährdet	Standorttyp Zukunft: bei einem Standorttyp nicht erwähnt und beim anderen nicht erwähnt oder als weitere Baumart aufgeführt. Standorttyp heute: erwähnt Wechsel wird kontinuierlich und sehr langsam erwartet (Spezialfall Arve und subalpine / obersubalpine Lärchenstandorte).
In Zukunft empfohlen	Standorttyp Zukunft: entweder in beiden Klimaszenarien dominante oder wichtige beigemischte Naturwaldbaumarten oder dies trifft entweder bei „mässigem“ oder „starkem“ Klimawandel zu, während sie im anderen Klimaszenario nur als weitere Baumart aufgeführt ist. Standorttyp heute: nicht erwähnt <i>Gemäss Tree App ist das heutige Klima für die Baumart noch ungeeignet, in Zukunft ist diese Baumart aber als dominierende Baumart im Bestand möglich.</i>
In Zukunft bedingt empfohlen	Standorttyp Zukunft: entweder bei beiden Klimaszenarien weitere Baumart oder nur in einem Klimaszenario dominante oder wichtige beigemischte Naturwaldbaumart. Standorttyp heute: nicht erwähnt <i>Gemäss Tree App ist das heutige Klima für die Baumart noch ungeeignet, in Zukunft ist diese Baumart aber als weitere Baumart im Bestand möglich.</i>

Falls sich an einem Standort die Höhenstufe in Zukunft nicht verändert (Karten der Vegetationshöhenstufen von heute und den Zukunftsszenarien siehe Kap. 2.2.1.1), weil der Standort heute z.B. schon submontan ist und auch in Zukunft submontan bleibt (da es gemäss Vegetationshöhenmodell (Zischg et al. 2021) z.B. auch in Zukunft genügend Feuchtigkeit hat für die Buche) ändert sich auch das Baumartenportfolio bei den Baumartenempfehlungen nicht. Hier gilt dasselbe wie beim Tree App: **„Hier ändert sich zwar die Höhenstufe nicht; unter den empfohlenen Baumarten sollen aber diejenigen bevorzugt werden, die Wärme und Trockenheit am besten ertragen“**. Da unsere submontane Stufe nach den Wasserbedürfnissen der Buche abgegrenzt wurde, kann sie deutlich wärmer werden als die heutige submontane Stufe, solange genügend Wasser verfügbar ist (im Modell von Zischg et al. 2021 sind dazu folgende Faktoren enthalten: mittlerer Niederschlag Juni bis August, relative Luftfeuchtigkeit, jährliche Föhnfrequenz, ETa/ETp -Verhältnis). Bei den meisten Baumarten im Portfolio nehmen wir an, dass sie weiterhin gedeihen können, evtl. mit veränderten Konkurrenzverhältnissen. Zudem werden neue, heute noch nicht in der Schweiz vorkommende Baumarten möglich sein, die nicht im Portfolio drin sind. Da es aber im Portfolio schon viele Baumarten hat, die heute in der Schweiz vorkommen, erachten wir das nicht als Problem. Die Fichte ist ein Ausnahmefall, da wir wissen, dass die Verbreitung des Buchdruckers mit der Wärme zunimmt, deshalb erwarten wir, dass die Fichte in einer submontanen Stufe, die wärmer ist als heute, wegen dem Buchdrucker grosse Ausfälle haben wird. Bei diesen Standorten wird die Fichte bei den Karten „Baumartenempfehlungen Fichte FI RCP8.5“ und „Baumartenempfehlungen Fichte FI RCP4.5“ als „gefährdet“ angezeigt (Formel: WENN Fichte heute = a, b oder c UND Höhenstufe heute = submontan UND Höhenstufe Zukunft = submontan DANN Baumartenempfehlung FI = „Gefährdet“).

Tab. 11: Ausschnitt aus der Baumartentabelle. Legende: a = dominierende Baumart, b = wichtige Naturbaumart, c = weitere Baumart, ex oder leer = Baumart, die kaum oder nicht vorkommt.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Namelat	Namedt	Namefrz	Nameit	SISF-Nr	1	1h	2	3	3s	3LV	3L/4L
2	Abies alba	Tanne	Sapin	Abete bianco	0000100	c	a	ex	b	ex	c	c
3	Acer campestre	Feldahorn	Érable champêtre	Acero oppio, Loppio	0000300	ex	ex	ex	ex	ex	ex	c
4	Acer opalus	Schneeballblättriger Ahorn	Érable à feuilles d'obier	Acero alpino	0000600	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex
5	Acer platanoides	Spitzahorn	Érable plane	Acero riccio	0000700	ex	ex	ex	c	ex	ex	c
6	Acer pseudoplatanus	Bergahorn	Érable sycomore	Acero di monte	0000800	ex	ex	ex	c	ex	ex	c
7	Aesculus hippocastanum	Roskastanie	Marronnier	Ippocastano	0006900							
8	Ailanthus altissima	Götterbaum	Ailante	Ailanto	0009500	c		c			c	c
9	Alnus glutinosa	Schwarzerle	Aulne glutineux	Ontano comune	0025200	ex	ex	ex	ex	ex	ex	c
10	Alnus incana	Grauerle	Aulne blanc	Ontano bianco	0025300	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex
11	Alnus viridis	Alpenerle	Aulne vert	Ontano verde	0025400	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex
12	Betula pendula	Hängebirke	Bouleau	Betulla verrucosa	0060400	b	c	b	c	b	c	c
13	Betula pubescens	Moorbirke	Bouleau pubescent	Betulla pubescente	0060500							
14	Carpinus betulus	Hagebuche	Charme	Carpino comune	0096900	b	ex	b				c
15	Castanea sativa	Kastanie	Châtaignier	Castagno comune	0097200	b	ex	b	b	c	b	b
16	Cedrus atlantica	Atlaszeder	Cèdre de l'Atlas		0097750							
17	Cedrus libani	Libanonzeder	Cèdre du Liban		0097760							
18	Celtis australis	Zürgelbaum	Micocoulier	Bagolaro	0097800							
19	Chamaecyparis lawsoni	Lawsons Zypresse	Cyprès de Lawson	Cipresso di Lawson	0107150							
20	Cinnamomum glandulifera	Drüsiger Kampferbaum	Cannelier glanduleux	Cinnamomo ghiandoloso	0113350						c	c
21	Cinnamomum camphora	Kampferbaum	Camphrier		0113399							
22	Corylus colurna	Baumhasel	Noisetier de Byzance		0121610							
23	Diospyros lotus	Lotuspflaume	Plaqueminier lotier	Albero di Sant' Andrea	0137700							c
24	Fagus sylvatica	Buche	Hêtre	Faggio comune	0165000	a	a	a	a	a	a	a
25	Ficus carica	Feige	Figuier	Fico	0172200							
26	Fraxinus excelsior	Esche	Frêne	Frassino comune	0174200	ex	ex	ex	c	ex	ex	c
27	Fraxinus ornus	Blumenesche	Frêne à fleurs	Frassino da manna	0174300							
28	Ilex aquifolium	Stechpalme	Houx	Agrifoglio	0213300	c		c	c	c	a	a
29	Juglans regia	Nussbaum	Noyer	Noce comune	0217500	ex	ex	ex	ex	ex	ex	c
30	Juglans nigra	Schwarznuß	Noyer noir		0217510							
31	Juniperus communis	Gewöhnlicher Wacholder	Genévrier commun	Ginepro comune	0220400							
32	Laburnum alpinum	Alpen-Goldregen	Cytise des Alpes	Maggiociondolo di montagna	0224200				c			
33	Laburnum anagyroides	Goldregen	Cytise faux ébénier	Maggiociondolo comune	0224300							
34	Larix decidua	Lärche	Mélèze	Larice comune	0227200	c	b	c	c	c	c	c
35	Laurus nobilis	Edellorbeer	Laurier noble	Alloro, Lauro	0231500						c	c
36	Ligustrum lucidum	Baum-Liguster	Troène de Chine		0238050							c

Nachfolgend ein Beispiel mit denselben Einheiten wie in Abb. 12, entscheidend ist die Schnittmenge der möglichen Baumarten pro Standorttyp:

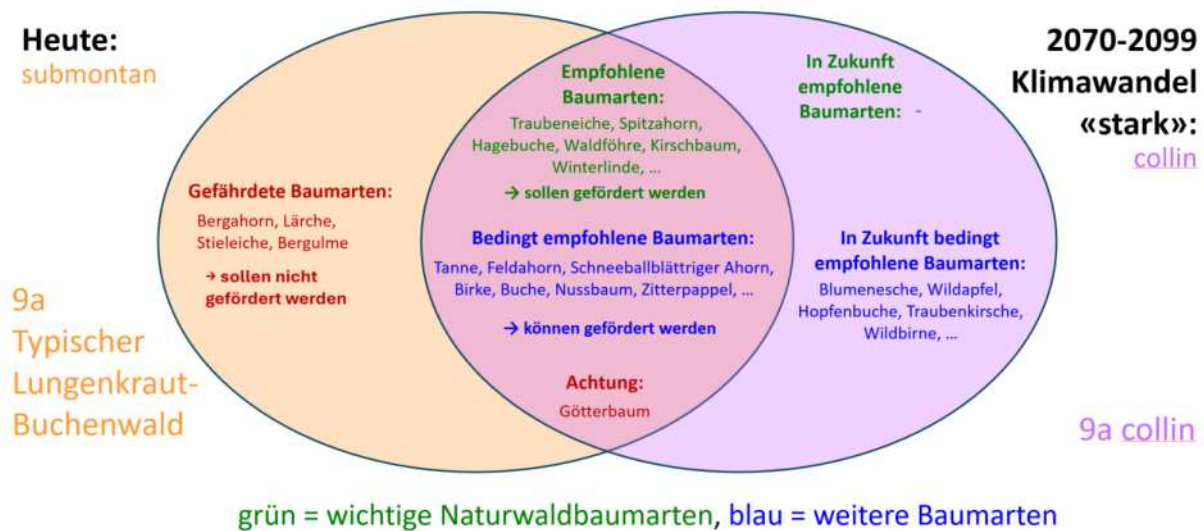


Abb. 14: Vereinfachte Darstellung der Herleitung der Baumartenempfehlungen durch die Überlagerung der heute im Standorttyp „9a“ vorhandenen/möglichen Baumarten und der in Zukunft im Standorttyp „9a collin“ möglichen Baumarten. Baumarten, die nur im heutigen Standorttyp vorkommen können, gelten in Zukunft als gefährdete Baumarten. Baumarten, die heute und in Zukunft vorkommen können, gelten als „empfohlene“ oder „bedingt empfohlene“ Baumarten und Baumarten, die erst in Zukunft in „9a collin“ vorkommen können, gelten als „in Zukunft empfohlene / bedingt empfohlene Baumarten“.

Standorttypen, die bei der NaiS-Übersetzung Übergänge enthalten, werden nach einem speziellen Verfahren behandelt. Zuerst wird jeder der beiden Standorttypen separat berechnet, anschliessend wird die Baumartenempfehlung für beide Standorttypen des Übergangs-Standorttyp kombiniert (Tab. 12).

Tab. 12: Herleitung der möglichen Baumarten bei einem Übergang zwischen zwei NaiS-Standorttypen (aus Frehner & Zürcher-Gasser 2019). Legende: a = dominante Naturwaldbaumart, b = wichtige beigemischte Naturwaldbaumart, c = weitere Baumart.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Nanetlat	Nanedi	Nanefiz	Nanetit	5/5/10	1	1h	2	3	3s	3LV	3L/4L
2	Abies alba	Tanne	Sapin	Abeto bianco	0000100	c	a	ex	b	ex	c	c
3	Acer campestre	Feldahorn	Érable champêtre	Acerio oppio, Loppio	0000300	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex
4	Acer opalus	Schneeballblättriger Ahorn	Érable à feuilles d'obier	Acerio alpino	0000600	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex
5	Acer platanoides	Spitzahorn	Érable plane	Acerio riccio	0000700	ex	ex	ex	c	ex	ex	ex
6	Acer pseudoplatanus	Bergahorn	Érable sycomore	Acerio di monte	0000800	ex	ex	ex	c	ex	ex	ex
7	Aesculus hippocastanum	Roskastanie	Marronnier	Ippocastano	0000900	ex	ex	ex	c	ex	ex	ex
8	Ailanthus altissima	Götterbaum	Ailante	Ailanto	0009500	c	ex	ex	ex	ex	ex	ex
9	Alnus glutinosa	Schwarzerle	Aulne glutineux	Ontano comune	0025200	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex
10	Alnus incana	Grauerle	Aulne blanc	Ontano bianco	0025300	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex
11	Alnus viridis	Alpenrle	Aulne vert	Ontano verde	0025400	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex
12	Betula pendula	Hängebirke	Bouleau	Betulla verrucosa	0060400	b	c	c	c	ex	ex	ex
13	Betula pubescens	Moorbirke	Bouleau pubescent	Betulla pubescente	0060500	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex
14	Carpinus betulus	Hagebuche	Charme	Carpino comune	0096900	b	ex	ex	ex	ex	ex	ex
15	Castanea sativa	Kastanie	Châtaignier	Castagno comune	0097200	b	ex	ex	ex	ex	ex	ex
16	Cedrus atlantica	Atlaszeder	Cèdre de l'Atlas		0097500	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex
17	Cedrus libani	Libanonzeder	Cèdre du Liban		0097760	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex
18	Celtis australis	Zürgelbaum	Micocoulier	Bagolaro	0097800	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex
19	Chamaecyparis lawsoni	Lawson's Zypresse	Cypres de Lawson	Cipresso di Lawson	0107150	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex
20	Cinnamomum glandulif	Drüsiger Kampferbaum	Cannellier glanduleux	Cinnamomo ghiandoloso	0113350	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex
21	Cinnamomum camphor	Kampferbaum	Camphrier		0113399	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex
22	Corylus colurna	Baumhasel	Noisetier de Byzance		0121610	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex
23	Diospyros lotus	Lotuspflaume	Plaqueminier lotier	Albero di Sant' Andrea	0137700	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex
24	Fagus sylvatica	Buche	Hähe	Faggio comune	0166880	a	a	a	a	a	a	a
25	Ficus carica	Feige	Figuier	Fico	0172200	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex
26	Fraxinus excelsior	Esche	Frêne	Frassino comune	0174200	ex	ex	ex	c	c	c	c
27	Fraxinus ornus	Blumenesche	Frêne à fleurs	Frassino da manna	0174300	ex	ex	ex	c	c	c	c
28	Ilex aquifolium	Stechpalme	Houx	Agrifoglio	0213300	c	c	c	c	c	c	c
29	Juglans regia	Nussbaum	Noyer	Noce comune	0217500	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex
30	Juglans nigra	Schwarznuß	Noyer noir		0217510	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex
31	Juniperus communis	Gewöhnlicher Wacholder	Genévrier commun	Ginepro comune	0220400	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex
32	Laburnum alpinum	Alpen-Goldregen	Cytise des Alpes	Maggiociondolo di mon	0224200	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex
33	Laburnum anagyroides	Goldregen	Cytise faux ébénier	Maggiociondolo comun	0224300	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex
34	Larix decidua	Lärche	Mélèze	Larice comune	0227200	c	b	c	c	c	c	c
35	Laurus nobilis	Edellorbeer	Laurier noble	Alloro, Lairo	0231500	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex
36	Ligustrum lucidum	Baum-Liguster	Troëne de Chine		0238050	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex

→ Diese Vorgaben werden z.Z. noch überarbeitet/in der collinen Stufe mit neuen Baumarten ergänzt

Tab. 12: Herleitung der möglichen Baumarten bei einem Übergang zwischen zwei NaiS-Standorttypen (aus Frehner & Zürcher-Gasser 2019). Legende: a = dominante Naturwaldbaumart, b = wichtige beigemischte Naturwaldbaumart, c = weitere Baumart.

Standorttyp X	Standorttyp Y	Übergang X(Y)
a	a	a
a	b	a
a	c	b
a	ex	c
b	a	b
b	b	b
b	c	b
b	ex	c
c	a	b
c	b	c
c	c	c
c	ex	ex
ex	a	c
ex	b	c
ex	c	ex
ex	ex	ex

Die Tabelle von Frehner & Zürcher-Gasser (2019, Version 2021) enthält auch Angaben, ob es sich um eine krankheitsgefährdete Baumart oder um eine gebietsfremde Baumart handelt. Der Götterbaum wird zudem als unerwünschte invasive Baumart bezeichnet, die gemäss Vollzughilfe des Bundes behandelt werden soll. Diese Angaben werden von der Tree App übernommen. Diese Baumarten können in den Kartenlegenden entsprechend gekennzeichnet werden und sind bei der Beurteilung zu berücksichtigen. Ob eine Baumart nur regional vorkommt (und somit überprüft werden sollte, ob die Baumart auch in einer anderen Region vorkommen könnte (z.B. *Acer opalus*), kann mit den Baumartenportraits hergeleitet werden (<https://www.gebirgswald.ch/baumarten-portraits.html>).

2.2.4 Herleitung von klimasensitiven Standorten

Auf Basis der Karten zu den Baumartenempfehlungen werden die Karten der **klimasensitiven Standorte** erstellt (Methode gemäss Frehner et al. 2021a). Diese können direkt aus den Baumartenempfehlungen abgeleitet werden. Für die Herleitung der klimasensitiven Standorte wird die Abb. 16 benötigt, wobei sich die Erklärungen zu den Kategorien in der Tab. 13 befinden.

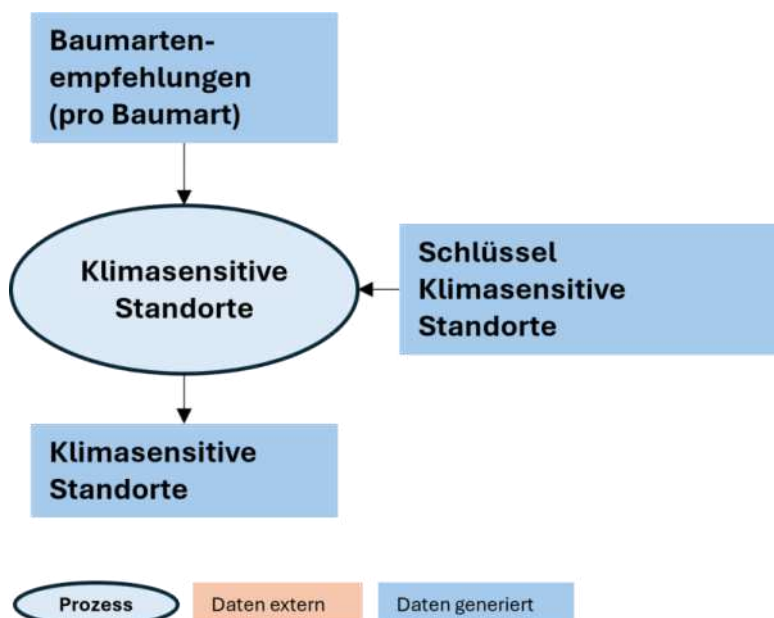


Abb. 15: Berechnung der klimasensitiven Standorte. Schlüssel „Klimasensitive Standorte“ siehe Abb. 16.

Begriffserklärung:

- Klimasensitive Standorte sind Flächen, in denen die Übereinstimmung zwischen Baumarten, die heute vorkommen können (aufgrund des Standorttyps) und Baumarten, die in Zukunft erwartet werden, gering ist.
- Klimasensitive Standorte sind unabhängig vom aktuellen Bestand. Es ist aber normalerweise so, dass auf klimasensitiven Standorten klimasensitive Bestände vorhanden sind, falls alle relevanten Baumarten berücksichtigt werden.

Die Karten der **klimasensitiven Standorte** ermöglichen die Abgrenzung von Waldflächen, die besonders sensitiv auf den Klimawandel reagieren werden. In höheren Lagen werden v.a. Standorte angezeigt, wo heute zu wenige Ersatzbaumarten vorkommen, und in tiefen Lagen wird aufgezeigt, wo am meisten Baumartenwechsel prognostiziert werden. Daraus kann der Handlungsbedarf für notwendige Eingriffe abgeleitet werden.

Die Herleitung der klimasensitiven Standorte wird jeweils für RCP4.5 und für RCP8.5 nach Abb. 16 gemacht. Die drei Kategorien sind auch in Tab. 13 erläutert, sowie zusätzlich die nicht abgebildeten Kategorien „teilweise klimasensitiver Standort“ und „langfristig klimasensitiver Standort“.

Herleitung klimasensitiver Standorte

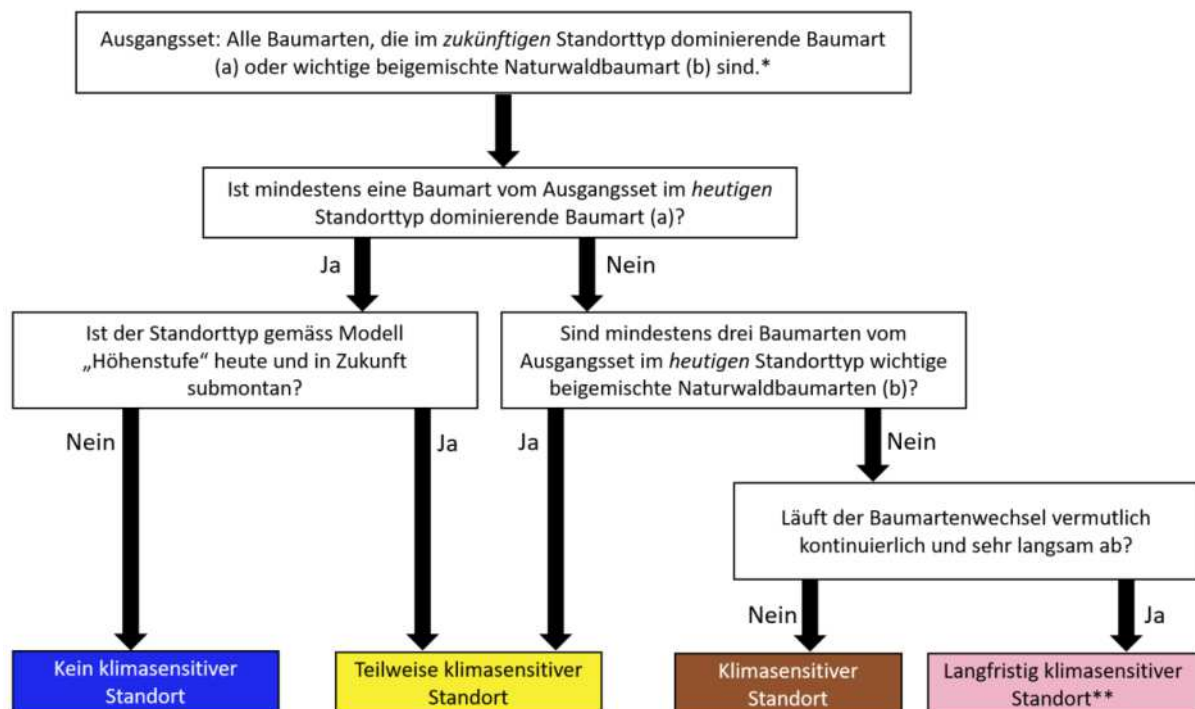


Abb. 16: Herleitung klimasensitiver Standorte (Schlüssel „Klimasensitive Standorte“, siehe Abb. 9). Als zukünftiger Standorttyp wird entweder der Standorttyp nach RCP4.5 oder der Standorttyp nach RCP8.5 verwendet. Legende: Angaben zu „dominierend“ (a), „wichtige beigemischte Naturwaldbaumart“ (b) siehe Baumartentabelle und Kap. 2.2.3. * = Die krankheitsgefährdeten Baumarten Esche, Bergulme, Feldulme und Kastanie werden dabei nicht berücksichtigt. ** = betrifft Arven und subalpine / obersubalpine Lärchenstandorte.

Tab. 13: Kategorien bei den klimasensitiven Standorten.

Klimasensitive Standorte (pro Klimaszenario)	
Klimasensitivität	Beschreibung
Kein klimasensitiver Standort	Mindestens 1 Baumart, die im Standorttyp Zukunft dominierende oder wichtige beigemischte Naturwaldbaumart ist, ist heute eine dominierende Naturwaldbaumart
Teilweise klimasensitiver Standort	Mindestens 3 Baumarten, die im Standorttyp Zukunft dominierende oder wichtige beigemischte Naturwaldbaumart sind, sind heute eine wichtige beigemischte Naturwaldbaumart
Teilweise klimasensitiver Standort	Nach Definition kein klimasensitiver Standort. Gemäss Modell ist die Höhenstufe heute und in Zukunft submontan. Aufgrund der insgesamt wärmeren Bedingungen wird die Konkurrenzkraft der Buche eher zurückgehen, die Bedeutung der wichtigen beigemischten Baumarten wird zunehmen und es werden weitere Baumarten dazukommen. Die Gefahr von Buchdrucker-Kalamitäten in fichtenreichen Partien wird tendenziell noch grösser werden.
Klimasensitiver Standort	Von den Baumarten, die im Standorttyp Zukunft dominierende oder wichtige beigemischte Naturwaldbaumart sind, ist heute keine eine dominierende Naturwaldbaumart und höchstens 2 sind eine wichtige beigemischte Naturwaldbaumart.
Langfristig klimasensitiver Standort	Nach Definition klimasensitiver Standort. Spezialfall Arvenwälder. Gemäss Modell findet ein Wechsel vom obersubalpinen Arven- und Lärchenwald zum subalpinen Fichtenwald oder zum hochmontanen Fichten- oder Tannen-Fichtenwald statt. Schon vorhandene Arven und Lärchen gedeihen weiterhin gut. Fichte und evtl. Tanne werden konkurrenzstark und können Arven zurückdrängen. Die Verjüngung der Arve wird erschwert durch Nassschnee und Lichtmangel. Der Baumartenwechsel läuft vermutlich kontinuierlich und sehr langsam ab.

Nachfolgend einige Beispiele zur Herleitung der klimasensitiven Standorte auf unterschiedlichen NaiS-Standorttypen (Tab. 14):

Tab. 14: Beispiele für Kombinationen von NaiS-Standorttypen heute und Zukunft. 1), 2) = Bedingungen aus Abb. 16. Legende: a = dominante Naturwaldbaumart, b = wichtige beigemischte Naturwaldbaumart.

NaiS-Standorttyp heute	NaiS-Standorttyp Zukunft	1) Baumarten mit a bei heutigem Standorttyp und a oder b beim Standorttyp Zukunft	2) Baumarten mit b bei heutigem Standorttyp und a oder b beim Standorttyp Zukunft	Falls weniger als 3 Baumarten die Bedingung 2) erfüllen, gilt der Standort als sensitiv
18M	9a	Buche	Bergahorn, Esche	nicht klimasensitiv
50	8S	Tanne	Bergahorn	nicht klimasensitiv
50	7S	-	Bergahorn	klimasensitiv
50*	9a	-	Bergahorn	klimasensitiv
51	6	-	-	klimasensitiv

Das heisst, wenn heute in der obermontanen Stufe der Standort 18M (Karbonat-Tannen-Buchenwald) kartiert wurde und in Zukunft (bei RCP4.5 und 8.5) der Standort in der submontanen Stufe zu liegen kommt, ergibt dies ein 9a (Platterbsen-Buchenwald). Gemäss Baumartentabelle erfüllt bei den Standorttypen 18M und 9a nur die Buche die Bedingung „1)“ der Tab. 14, das heisst, hier wird die erste Bedingung der Abb. 16 erfüllt („Ist mindestens eine Baumart vom Ausgangsset im heutigen Standorttyp dominierende Baumart?“ → ja). Wenn hingegen heute in der hochmontanen Stufe der Standort

50 (Hochstauden-Tannen-Fichtenwald) kartiert wurde und in Zukunft (bei RCP4.5 und 8.5) der Standort in der submontanen Stufe zu liegen kommt, ergibt dies ein 7S (Feuchter Waldmeister-Buchenwald). Gemäss Baumartentabelle erfüllt bei den Standortstypen 50 und 7S keine Baumart die Bedingung „1)“ der Tab. 14 und nur eine Baumart (der Bergahorn) die Bedingung „2)“ der Tab. 14. Somit wird die zweite Bedingung in der Abb. 16 nicht erfüllt („Sind mindestens drei Baumarten vom Ausgangsset im heutigen Standorttyp wichtige beigemischte Naturwaldbaumarten?“ → nein) und der Standort gilt als klimasensitiv. Die Informationen zu den dominanten Naturwaldbaumarten (a) und den wichtigen beigemischten Naturwaldbaumarten (b) können auch im Tree App abgefragt (und exportiert) werden (Tab. 15), das vorliegende Forschungsprojekt und die Tree App liefern somit identische Ergebnisse. Nachfolgend wird die Handhabung beim Tree App kurz erklärt: Durch das Anklicken eines Ortes in der Karte und dem Eingeben des Standorttyps zeigt das Tree App durch Anklicken des Reiters „Empfehlung“ (unten in der Mitte) danach die dominanten (a) oder wichtigen beigemischten Naturwaldbaumarten (b) an für den Standorttyp 18M (in der Bildmitte den Reiter „18M obermontan, Klima heute“ drücken) oder für die zukünftigen Standorttypen (Reiter rechts davon drücken; z.B. „9a submontan, mässiger und starker Klimawandel“).

Tab. 15: Erklärungsbeispiel zum Entscheidungsbaum in Abb. 16 anhand der heutigen Einheit 18M (Karbonat-Tannen-Buchenwald) und der künftigen Einheit 9a (Platterbsen-Buchenwald) (Tabelle exportiert aus Tree App). Legende: † = Baumart, die krankheitsgefährdet ist und daher trotz bedingter Standortseignung nicht gefördert werden soll; * = Pionierbaumart; ° = gebietsfremde Baumarten.

	18M obermontan Klima heute	9a submontan mässiger und starker Klimawandel
Dominante Naturwaldbaumart	Tanne, Buche	Buche
Wichtige beigemischte Naturwaldbaumart	Bergahorn, Esche†, Fichte, Bergulmet†	Spitzahorn, Bergahorn, Esche†, Kirschbaum, Traubeneiche
Weitere Baumarten	Grauerle*, Hängebirke*, Lärche, Zitterpappel*, Kirschbaum, Salweide*, Mehlbeere, Vogelbeere, Winterlinde, Sommerlinde	Tanne, Feldahorn, Schneeballblättriger Ahorn, Grauerle*, Hängebirke*, Hagebuche, Stechpalme, Nussbaum, Lärche, Waldföhre, Zitterpappel*, Stieleiche, Salweide*, Mehlbeere, Vogelbeere, Speierling, Elsbeere, Eibe, Winterlinde, Sommerlinde, Bergulmet†, Götterbaum°, Schwarzföhre°, Robinie°

Die zugrundeliegenden Höhenstufenverschiebungen können in der Karte durch Anklicken des Ikons „Kartenebenen“ (oben in der Mitte) und „Höhenstufen“ nachverfolgt werden.

2.2.5 Herleitung der Klimasensitivität heutiger Bestände

Begriffserklärung:

Klimasensitive Bestände sind Flächen, in denen die Übereinstimmung zwischen Baumarten, die heute im Bestand real vorhanden sind, und Baumarten, die in Zukunft empfohlen werden, gering ist. Für deren Herleitung wird der absolute Deckungsgrad einer Baumart in der Oberschicht benötigt.

Für die Herleitung der Klimasensitivität heutiger Bestände benötigt man flächige Bestandskartierungen mit den Deckungsgraden der vorkommenden Baumarten. Nicht alle Kantone haben Bestandskartierungen und teils geben die Bestandskarten jeweils nur einen Deckungsgrad für Nadelholz und einen Deckungsgrad für Laubholz an. Somit fehlen bei einer Mehrzahl der Kantone detaillierte Anteils-

schätzungen (Anteil am Deckungsgrad in der Oberschicht) pro Baumart. Aufgrund der fehlenden kantonalen / schweizweiten Grundlagen können wir die klimasensitiven Bestände vorerst nur für die Fichte erstellen (Kap. 2.2.5.1).

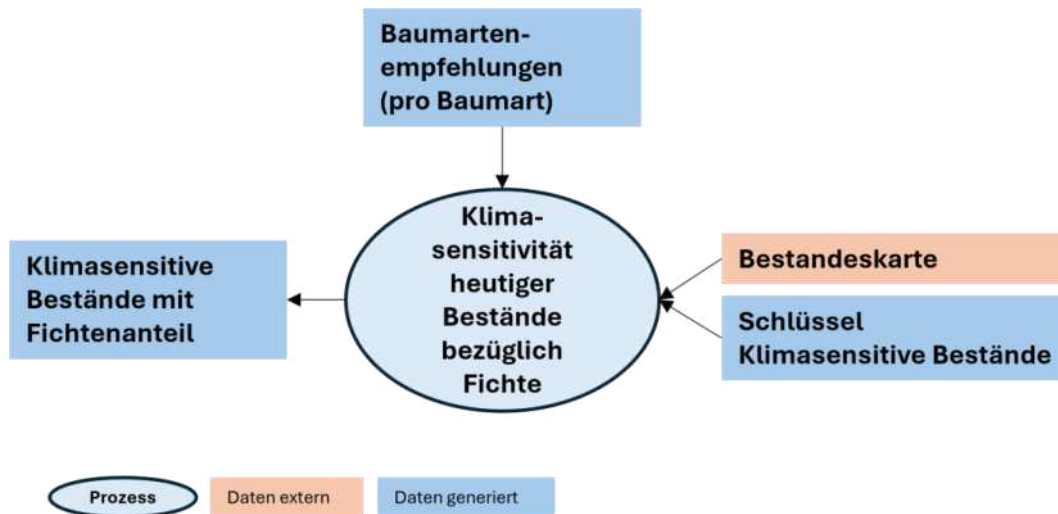


Abb. 17: Berechnung der Karte „Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte“. Schlüssel „Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte“ siehe Tab. 16.

2.2.5.1 Herleitung der Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich der Fichte

Die klimasensitiven Bestände für die Baumart Fichte wurde auf der Basis des Anteils des Nadelholzes berechnet (abgezogen wird der Tannen- und Lärchenanteil mit Hilfe von LFI-Daten pro Region/Höhenstufe). Ausgeschlossen von dieser Berechnung sollen die Wald-, Bergföhren- und Arvenbestände werden, diese sind aus der Waldstandortkartierung ableitbar.

Der Fichtenanteil wird mit Hilfe der auf map.geo.admin aufgeschalteten Karte „Waldmischungsgrad LFI“ (WSL, Version 2025) ermittelt. Aus der Baumartenstatistik des LFI wird für jeden Kanton und jede Höhenstufe der mittlere Nadelholzanteil gerechnet. Der mittlere Fichtenanteil wird durch den Nadelholzanteil dividiert. Dieser Quotient wird mit dem Nadelholzanteil der WSL-Karte multipliziert. Dies ergibt den Fichtenanteil pro Bestand.

Aufgrund der oft fehlenden kantonalen Daten zu den Anteilsschätzungen pro Baumart wird somit eine schweizweite Karte mit der Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich der Fichte erstellt.

Für die **Klassierung der Klimasensitivität der Fichte in den heutigen Beständen** werden Schwellenwerte verwendet, die bereits bei früheren Projekten gutachtlich festgelegt und getestet wurden (Frehner et al. 2021a, Huber et al. 2021, Huber & Zischg 2023). Dabei werden die unterschiedlichen Klassierungen der Baumartenempfehlungen RCP4.5 / RCP8.5 bei der Fichte (Kategorien „empfohlen“, „bedingt empfohlen“ und „gefährdet“; Erklärungen dazu siehe Tab. 9) berücksichtigt.

Tab. 16: Kategorien bei den klimasensitiven Beständen pro Baumart und Klimaszenario (Schlüssel „Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte“, siehe Abb. 9). Legende: %-Angaben = Deckungsgrad pro Baumart und Bestand (Altbestand).

Klimasensitivität heutiger Bestände (pro Baumart und Klimaszenario)			
Empfohlen = empfohlen und in Zukunft empfohlen gemäss Baumartenempfehlung			
Bedingt empfohlen = bedingt empfohlen und in Zukunft bedingt empfohlen gemäss Baumartenempfehlung			
Gefährdet = gefährdet gemäss Baumartenempfehlung			
Klimasensitivität	Beschreibung		
	Empfohlen	Bedingt empfohlen	Gefährdet
	Empfohlen Zukunft	Bedingt empfohlen Zukunft	
Nicht klimasensitiv	0 bis ≤ 95%	0 bis ≤ 20%	> 0 bis ≤ 10%
Schwach klimasensitiv	> 95%	> 20% bis ≤ 70%	> 10% bis ≤ 20%
Mittel klimasensitiv		> 70% bis ≤ 95%	> 20% bis ≤ 40%
Stark klimasensitiv		> 95% stark sensitiv	> 40%

Beurteilt werden die Flächen, die aus dem Verschnitt der Standortkarten mit den Baumarteninformationen entstehen. Wenn auf einer Fläche für die Fichte die Kategorie „empfohlen“ oder „empfohlen Zukunft“ gilt, wird die Fläche als „nicht klimasensitiv“ bezeichnet, ausser bei Fichten-Reinbeständen, dann wird die Fläche als „schwach klimasensitiv“ bezeichnet, da die Baumartenvielfalt fehlt (Schwellenwert >95%). Die Baumartenvielfalt ist ein wichtiges Element bei der Anpassung unserer Wälder an den Klimawandel, da bei der Prognose der Entwicklung der Wälder grosse Unsicherheiten vorhanden sind (Wahl von Emissionsszenarien und Klimamodellen, ungewisse Reaktion der Bäume) und zudem damit gerechnet werden muss, dass in Zukunft weitere Baumarten krankheitsgefährdet sein können.

Wenn auf einer Fläche für die Fichte die Kategorie „bedingt empfohlen“ oder „bedingt empfohlen Zukunft“ gilt, dann wird diese Fläche als „nicht klimasensitiv“ bezeichnet, wenn die Fichten in kleineren Mengen (Schwellenwert ≤ 20%) vorkommen. Wenn die Fichten in grossen Mengen vorkommen (Schwellenwert >70%) werden die Bestände als „mittel klimasensitiv“ bezeichnet, dazwischen als „schwach klimasensitiv“. Fichten-Reinbestände (Schwellenwert >95%) werden als „stark klimasensitiv“ bezeichnet.

Wenn auf einer Fläche für die Fichte die Kategorie „gefährdet“ gilt, werden diese Bestände als „nicht klimasensitiv“ bezeichnet, wenn die Fichten nur in geringen Mengen (Schwellenwert ≤10%) vorkommen. Bei kleineren Mengen (Schwellenwert ≤ 20%) werden die Bestände als „schwach klimasensitiv“ beurteilt, bei mittleren Mengen (Schwellenwert ≤ 40%) als „mittel klimasensitiv“ und darüber als „stark klimasensitiv“. Hier handelt es sich um Bestände, bei denen man in Zukunft erwartet, dass das Ausfallsrisiko bei der Fichte sehr hoch ist. Deshalb spielt bei der Festlegung der Schwellenwerte die Überlegung eine Rolle, wie der Bestand aussehen wird, wenn die Fichte ganz ausfallen würde. Resultat ist eine Karte der Klimasensitivität der heutigen Bestände bezüglich der Fichte.

Beispiele zu klimasensitiven Beständen im Kanton Freiburg:

Beispiel Subalpin, hoher Fichtenanteil

Tab. 17: Beispiele zu klimasensitiven Beständen im Kanton Freiburg: Beispiel Subalpin, hoher Fichtenanteil. RCP4.5 und 8.5 gelten für Periode 2070-2099. TBk FR / TBk CH = TBk-Bestandeskarte Kt. Freiburg / Schweiz.

	heute	RCP4.5	RCP8.5
Höhenstufe	subalpin	obermontan	submontan
NaiS-Standorttyp	60	20	7S
Baumartenempfehlung Fichte		Empfohlen	Bedingt empfohlen
Fichtenanteil TBk FR und Schwellenwert RCP4.5/8.5	100%	> 95%	> 40%
Klimasensitivität TBk FR		Schwach klimasensitiv	Stark klimasensitiv
Fichtenanteil TBk CH und Schwellenwert RCP4.5/8.5	99%	> 95%	> 40%
Klimasensitivität TBk CH		Schwach klimasensitiv	Stark klimasensitiv

Beispiel Submontan, hoher Fichtenanteil

Tab. 18: Beispiele zu klimasensitiven Beständen im Kanton Freiburg: Beispiel Submontan, hoher Fichtenanteil. RCP4.5 und 8.5 gelten für Periode 2070-2099. TBk FR / TBk CH = TBk-Bestandeskarte Kt. Freiburg / Schweiz.

	heute	RCP4.5	RCP8.5
Höhenstufe	submontan	submontan	collin
NaiS-Standorttyp	7a	7a	7a collin
Baumartenempfehlung Fichte		Gefährdet	Gefährdet
Fichtenanteil TBk FR und Schwellenwert RCP4.5/8.5	90%	> 40%	> 40%
Klimasensitivität TBk FR		Stark klimasensitiv	Stark klimasensitiv
Fichtenanteil TBk CH und Schwellenwert RCP4.5/8.5	46.9%	> 40%	> 40%
Klimasensitivität TBk CH		Stark klimasensitiv	Stark klimasensitiv

Beispiel Submontan, mittlerer Fichtenanteil

Tab. 19: Beispiele zu klimasensitiven Beständen im Kanton Freiburg: Beispiel Submontan, mittlerer Fichtenanteil. RCP4.5 und 8.5 gelten für Periode 2070-2099. TBk FR / TBk CH = TBk-Bestandeskarte Kt. Freiburg / Schweiz.

	heute	RCP4.5	RCP8.5
Höhenstufe	submontan	submontan	collin
NaiS-Standorttyp	7a	7a	7a collin
Baumartenempfehlung Fichte		Gefährdet	Gefährdet
Fichtenanteil TBk FR und Schwellenwert RCP4.5/8.5	58%	> 40%	> 40%
Klimasensitivität TBk FR		Stark klimasensitiv	Stark klimasensitiv
Fichtenanteil TBk CH und Schwellenwert RCP4.5/8.5	14.3%	> 10% bis ≤ 20%	> 10% bis ≤ 20%
Klimasensitivität TBk CH		Schwach klimasensitiv	Schwach klimasensitiv

In der subalpinen Stufe ist der Fichtenanteil in den subalpinen Fichtenwäldern meistens hoch und es gibt deshalb höchsten wenige Unterschiede zwischen TBk FR und TBk CH (Beispiel Subalpin, hoher Fichtenanteil). In der submontanen Stufe gibt es je nach Bestand unterschiedliche Fichtenanteile (insbesondere auf wüchsigen Standorten [7a] im Wirtschaftswald, wenn zusätzliche Nadelbaumarten wie Waldföhre, Douglasie, etc. beigemischt werden, welche wir mit unserer Methode nicht erfassen können, siehe Kap. 2.2.5.1, erster Abschnitt), das kann dazu führen, dass die Resultate von TBk FR und TBk CH unterschiedlich sind (Beispiel Submontan, mittlerer Fichtenanteil), in diesen Fällen entspricht TBk FR eher der Realität.

2.2.5.2 Sensitivitätsanalyse zu den Schwellenwerten: Fichtenanteil pro Bestand

Für die Berechnung der „Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte“ ist eine detaillierte Bestandeskarte erforderlich, die den Fichtenanteil pro Bestand beinhaltet. Da diese Information nur für einzelne Kantone vorhanden war, wurde versucht, den Fichtenanteil pro Bestand (TBk) aus der Kombination der folgenden Datengrundlagen zu ermitteln:

- Karte des Laubholz- bzw. Nadelholzanteils WSL (Waldmischungsgrad LFI, WSL; Teil der TBk-Lieferung);
- Auswertung des durchschnittlichen Nadelholz- und Fichtenanteils pro Höhenstufe und Kanton (LFI 5).

Mithilfe der Karte des Nadelholzanteils wird für jeden Bestand (Polygon der Standortkarte) der mittlere Nadelholzanteil berechnet. Für die LFI-Auswertung wurde ein Geodatensatz erstellt, der pro Höhenstufe und Kanton den Fichtenanteil am Nadelholzanteil beinhaltet. Diese beiden Geodatensätze wurden räumlich miteinander verschnitten. Dies ergibt den Fichtenanteil pro Polygon der Standortkarte. Mit diesen Werten wurde die Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich der Fichte mit den entsprechenden Schwellenwerten berechnet. Im Folgenden wird dieser Datensatz „Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte nach LFI“ genannt.

Die TBk grenzt die Bestände räumlich ab und gibt für jedes Bestandespolygon einen Nadelholzanteil. Mit Hilfe dieses Datensatzes konnte die Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich der Fichte direkt berechnet werden. Der Fichtenanteil am Nadelholzanteil wird aus der LFI-Auswertung pro Höhenstufe

und Kanton genommen. In dezidierten Arven-, Föhren- und Lärchen-Standorten wurde der Fichtenanteil auf Null gesetzt. Im Folgenden wird dieser Datensatz „Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte nach TBk“ genannt.

Da im Kanton Freiburg eine genauere TBk besteht, die auch die Anteile verschiedener Baumarten enthält, wurde dort ein Vergleich der Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte zwischen den beiden Methoden TBkFR und dem Fichtenanteil hergeleitet mit dem Waldmischungsgrad LFI und dem durchschnittlichen Fichtenanteil pro Höhenstufe und Kanton gemacht (Kap. 3.2.3.1).

2.2.5.3 Berücksichtigung der Struktur bei der Eruierung der klimasensitiven Bestände

Die Struktur wird nach Absprache mit der Begleitgruppe nicht direkt ins Modell eingebunden (zu viele Einflussfaktoren [siehe Tab. 20 mit Beispielen: es gibt Fälle, in denen viel Struktur günstig ist für die Anpassung an den Klimawandel und es gibt Fälle, in denen homogene Bestände günstig sind für die Anpassung an den Klimawandel] erschweren die Interpretation der Daten) sondern als separater Layer hinzugefügt/integriert. Die Struktur kann berücksichtigt werden durch die Überlagerung eines separaten Strukturlayers (Teil der CH-TBk-Lieferung), bei welchem die AutorInnen folgende Kategorisierung vorschlagen:

Tab. 20: Vorschlag der AutorInnen bezüglich der möglichen Kategorisierung des Strukturlayers der TBk.

Bezeichnung in Dauerwaldlayer	Vorschlag für Einteilung Struktur	Bemerkung zum Schlussgrad des Altbestandes
Code 0 Stabilisierung	einschichtig	geschlossen
Code 1 Nachwuchsförderung Code 4 Struktur geht verloren Code 5	zweischichtig	locker bis aufgelöst
Code 2 Strukturierung Code 3 Gleichgewicht	stufig	locker bis räumig

2.2.6 Datenbeschreibung

Das Ergebnis ist ein Open-Data-Geodatenatz für den Bund mit einer nationalen Übersicht der identifizierten klimasensitiven Standorte und Bestände sowie Baumartenempfehlungen. Die dazu verwendete Methodik wurde als ein Set von wiederverwendbaren Python-Skripts bereitgestellt, um ein Update oder eine Ergänzung der Studie zu einem späteren Zeitpunkt bei neuer Datenverfügbarkeit mit Open-Source-Software (Python und QGIS) zu ermöglichen.

Es sind Geodaten zu den klimasensitiven Standorten und Beständen sowie zu den Baumartenempfehlungen im Format Geopackage im Koordinatensystem LV95 (EPSG2056). Die Datenstruktur wird hier im Bericht beschrieben. Die Daten wurden auf kantonaler Basis prozessiert. Am Schluss wurde eine Zusammenführung der Daten auf nationaler Ebene gemacht (PostgreSQL und PostGIS), um eine Auswertung auf nationalem Level und auf Stufe Waldstandortregionen zu machen. In dieser Zusammenführung wurden nur mehr die NaiS-Einheiten verwendet, die kantonalen Einheiten sind nur auf den kantonalen Datensätzen erhalten geblieben.

3 Resultate

Im Folgenden werden die Projektergebnisse beschrieben und diskutiert. Dabei wird zwischen den zwei Arbeitspaketen „Vorabklärungen“ und „Erarbeitung von Baumartenempfehlungen, Bestimmung von klimasensitiven Standorten sowie Erstellung der Karte „Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte““ des Projekts unterschieden.

3.1 Resultate 1. Arbeitspaket „Vorabklärungen“

3.1.1 Kantonale Rückmeldungen

Sämtliche Kantone stellten die erforderlichen kantonalen Daten, soweit vorhanden, für das Forschungsprojekt (Standortkartierung und Bestandeskarten) zur Verfügung. Für die Berechnungen wurden schlussendlich nur die Daten der kantonalen Standortkartierungen benötigt, da bis im Herbst 2025 ein schweizweiter TBk-Layer erstellt wurde (durch BFH und HAFL). Für 25 Kantone existieren Waldstandortkarten (teils aber nicht flächig und in unterschiedlicher Genauigkeit).

Die Kantone können betreffend Datenverfügbarkeit der Waldstandortkartierung in Gruppen unterteilt werden (detaillierte Angaben in Tab. 21):

- Bei mindestens acht Kantonen existieren flächige (ganzer Kanton), NaiS-nahe Feldkartierungen,
- Bei mindestens fünf Kantonen wurden bereits Teilflächen NaiS-nah kartiert (AI, JU, UR, VS, ZG),
- Bei fünf Kantonen sind keine Feldkartierungen, jedoch eine Waldstandort-Hinweiskarte (Modell) vorhanden (BE, SZ, OW, VD, GR).

Betreffend kantonalen Grundlagen zu Waldbestandeskartierungen zeigte sich, dass wenige Kantone aktuelle Bestandeskartierungen inkl. Baumartenanteilen haben (siehe auch Kap. 3.1.4; Kanton Graubünden, Aargau, Zürich und Freiburg).

3.1.2 Aktueller Stand der kantonalen Kartierungsgrundlagen

Die Datengrundlagen der Kantone sind unterschiedlich aktuell und vollständig (Tab. 21).

Tab. 21: Übersicht zum Stand der Waldstandortkarten und der Bestandeskarten der Kantone. Die %-Angaben beziehen sich auf die Waldfläche des entsprechenden Kantons. Legende: BA = Baumarten; LN = Laub- und Nadelholzanteil; k.A. = keine Angabe. Quelle der Spalten 2-5: ARGE Frehner et al. 2020. Quelle der übrigen Einträge: Angaben der Kantone.

Kanton	Flächenanteil NaiS-naher Kartierungen	Kartierungen mit Abweichungen bei den Höhenstufen	Kartierung nicht direkt in NaiS übersetzbar	Kartierung deutlich genereller als NaiS	Waldstandort-Hinweiskarte (Modell) vorhanden	Erstellungszeitraum	In Tree App integriert	Weitere Anmerkungen zu den Waldstandortkartierungen	Bestandeskarte vorhanden	Angaben zu LH/NH (LN) oder Baumartenanteilen (BA)	Angaben zu Entwicklungsstufen	Angaben zu Bestandesstruktur	Erstellungsjahr
AG	100%					1958-2001			ja	BA	ja	ja	Update alle 15 J.
AI	mind. 25%					ab 2021		wird z.Z. kartiert	nein, in Planung 1)				
AR	100%					2012			ja	nein	ja	nein	2019
BE		10%			ja	2022			ja	LN	ja	ja	2014
BL/BS	100%					1999	ja		ja		ja	nein	2021
FR		100%				1996	ja		ja	BA	ja	ja	2023
GE			100%			1944-2023		die neuesten Versionen basieren auf einem Analysemodell von Fotos	nein	nein	nein	nein	-
GL		100%				ca. 2005		Korrekturen durch M. Frehner 2025	ja	LN	ja	ja, 2)	2022
GR					ja	2020		wird noch überarbeitet	ja	BA	ja	ja	laufende Aktualisierung
JU	mind. 40%					divers	ja		ja	LN	3)	3)	2022
LU	100%					2014/ 2021	ja	2021 Anpassung an NaiS	ja	LN	ja	ja	2018
NE				100 %		ca. 1960	ja	viele NaiS-Standorttypen zusammengefasst	nein	5)	4)	4)	-
NW		70%				1991-2023			ja, nicht flächig	BA ohne Anteile	ja	ja	2004-2023

Kanton	Flächenanteil Nais- naher Kartierungen	Kartierungen mit Ab- weichungen bei den Höhenstufen	Kartierung nicht di- rekt in Nais übersetz- bar	Kartierung deutlich genereller als Nais	Waldstandort-Hin- weis Karte (Modell) vorhanden	Erstellungszeitraum	In Tree App integriert	Weitere Anmerkun- gen zu den Wald- standortkartierungen	Bestandeskarte vor- handen	Angaben zu LH/NH (LN) oder Baumarten- anteilen (BA)	Angaben zu Entwick- lungsstufen	Angaben zu Bestan- desstruktur	Erstellungsjahr
OW				100 %	ja	1981/2025			ja	LN	k.A.	k.A.	2014
SG	100%					1990-2008	ja		ja	LN, teils BA, 6)	ja	ja	2009
SH	100%					ca. 1985- 2005	ja		ja	k.A.	ja	ja	ca. 2005- 2023
SO	100%					2015	ja		ja, nicht flächig	LN in 4 Stufen	ja	nein	2012-2019
SZ	15%				ja	2022	ja		ja	LN	k.A.	k.A.	ab 1996
TG	100%					ca. 2000			nein				
TI	1%								nein, in Pla- nung (mit HAFL)				
UR	mind. 20%					1989-2023		wird z.Z. kartiert	ja	LN	ja	ja	2008-2017
VD	5%				ja	1995-2023 / 2025	ja		nein, in Pla- nung				
VS	mind. 60%					in Bearb.		wird z.Z. kartiert	nein, in Pla- nung				
ZG	mind. 60%					bis 2026		Schutzwald wird z.Z. kartiert	ja, wird nicht mehr aktuali- siert	7)	7)	7)	2006
ZH		100%				1982-1988	ja		ja	BA	ja	ja	2000-2022

3.1.3 Waldstandort-Hinweiskarten (Modellierungen mit Expertenbeizug)

Die Kantone Graubünden, Bern, Schwyz, Obwalden und Waadt liessen in den letzten Jahren eine Waldstandort-Hinweiskarte modellieren aufgrund von fehlenden aktuellen Feldkartierungen. Bei den kantonalen Waldstandort-Hinweiskarten wurde der wahrscheinlichste Waldstandort an einem Ort anhand einer Modellierung abgeschätzt (siehe Huber et al. 2021). Es ist eine „Hinweiskarte“ und nicht mit einer Genauigkeit einer Feldkartierung vergleichbar. Es sind zumeist keine im Feld überprüften Daten, sondern Modelle, welche mithilfe von regionalen Experten kontrolliert und korrigiert wurden. Aufbauend auf den Waldstandort-Hinweiskarten wurden im vorliegenden Forschungsprojekt die Baumartenempfehlungen berechnet.

Bei den heutigen Waldstandort-Hinweiskarten werden in einigen Kantonen die Modellierungen von im Feld kartierten Gebieten überlagert, so soll der Förster sich an den Feldkartierungen orientieren (wo vorhanden) und nicht am Modell. Das Modell ersetzt keine Feldkartierungen. Bei der Berechnung der Baumartenempfehlungen und der klimasensitiven Standorte und Bestände wird aber flächig von der Waldstandort-Hinweiskarte ausgegangen, die Feldkartierungen werden nicht berücksichtigt (da diese kleinflächig, anders aufgebaut und nicht in den Datensatz eingebunden werden konnten).

3.1.4 Aktueller Stand der kantonalen Bestandeskarten

Details zu den kantonalen Bestandeskarten sind in Tab. 21 ersichtlich. Die Datengrundlagen sind unterschiedlich aktuell und umfassend. Da sich die kantonalen Daten in ihrer Aktualität und ihrem Detaillierungsgrad stark unterscheiden, wurde im Rahmen dieses Forschungsprojekts entschieden, dass mit einer schweizweiten Lösung (TBk, inkl. Waldmischungsgrad LFI) gearbeitet werden soll. Deshalb wird darauf verzichtet, detailliertere Angaben aufzulisten, welche Bestandesmerkmale (z.B. Bestandesstruktur [einschichtig, zweischichtig, stufig], Entwicklungsstufe, Schlussgrad, etc.) pro Kanton in welcher Aktualität vorhanden sind. Insgesamt vier Kantone (AG, FR, GR, ZH; Tab. 21) besitzen eine Bestandeskarte mit detaillierten, flächigen Baumartenanteilen. Bei drei Kantonen ist eine solche in Planung (Tessin und Wallis Zusammenarbeit mit HAFL; Waadt Bestandesangaben im 100x100m-Raster). Mindestens elf Kantone (BE, GL, JU, LU, OW, SG, SH, SO, SZ, UR, ZG) besitzen eine Bestandeskarte mit Angaben zu Nadelholz- und Laubholz-Anteilen, z.T. sind diese Angaben nicht flächig vorhanden (SO, UR). Die Aktualität der Daten ist sehr unterschiedlich (Tab. 21).

3.1.5 Toolkit Bestandeskartierung (TBk)

Das TBk-Team (BFH-HAFL) lieferte uns Ende September 2025 die TBk Bestandeskarte CH mit Angaben bezüglich Bestandesgrenzen, Oberhöhe, räumlicher Verteilung Oberschicht, Entwicklungsstufen, Deckungsgrad, Mischungsverhältnis (Laub- bzw. Nadelholzanteil) sowie Dauerwald und Struktur (Überführungsphasen + Deckungsgrad pro Schicht) und Grundstruktur (bereitgestellt als Geopackage [.gpkg]; Details siehe „Produktinfo: TBk Bestandeskarte“, Rosset et al. 2024).

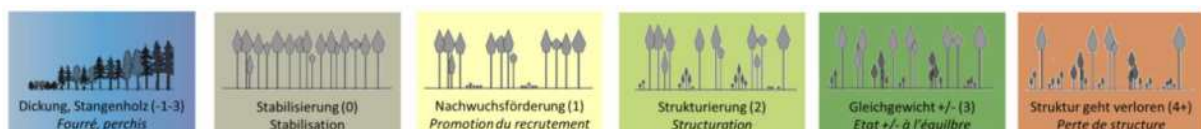


Abb. 18: Die vier Phasen der direkten Umwandlung von gleichaltrigen Beständen in Dauerwald (0 bis 3) nach Schütz (1999), ergänzt durch Vorbereitungsphasen (-1 bis -3; zu junge Bestände für Dauerwald, werden nicht integriert; JW, StH, Gebüschwald) und Phasen des Verlusts des demografischen Gleichgewichts (4+). Quelle: Rosset et al. (2023).

Für detaillierte Informationen zu den Strukturen (Dauerwald-Code) siehe Rosset, et al. (2023) sowie im geplanten SZF-Artikel (Rosset et al., in Bearb.) und https://admin.planfor.ch/uploads/documents/FoWaLa_342_CRosset_DLRFY4z.pdf.

3.2 Resultate 2. Arbeitspaket: Erarbeitung von Baumartenempfehlungen, Bestimmung von klimasensitiven Standorten sowie Erstellung der Karte „Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte“

Ergebnis dieses Arbeitsschrittes war ein Set von Karten zu den klimasensitiven Standorten, Baumartenempfehlungen und zur Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich der Fichte. Die Karten sind jeweils für die Klimaszenarien RCP4.5 und RCP8.5 berechnet. Bei allen Karten und Auswertungen wurden jene Flächen weggelassen, welche aufgrund noch fehlender Angaben nicht berechnet werden konnten. Dies sind v.a. die neu hinzugekommenen NaiS-Einheiten, sowie Einheiten, für welche noch keine Projektionswege bestehen, oder Einheiten, für die es keinen Eintrag in der Baumartenmatrix gibt. Allgemein gilt, dass bei den meisten kantonalen Standortkarten Abweichungen zu den CH-Höhenstufen bestehen können. Dies bedeutet, dass nur mit den CH-Höhenstufen gerechnet wurde und es somit leichte Abweichungen zu den kantonalen Klassifikationen geben kann.

3.2.1 Baumartenempfehlungen

Das Ergebnis des ersten Zwischenschrittes (siehe Methoden Kap. 2.2.3) bei der Herleitung der Baumartenempfehlungen ist eine Waldstandortkarte mit NaiS-Standorttypen für heute und für jedes der beiden Klimaszenarien RCP4.5 oder RCP8.5. Die Information über den zukünftigen Standorttyp ist in den Spalten „NAISzukunft1“ und „NAISzukunft2“ des Datensatzes zu den Baumartenempfehlungen gespeichert. Die Spalte „NAISzukunft1“ beschreibt den zukünftigen Standorttyp in der NaiS-Klassifikation. Wenn es in der Spalte „NAISzukunft2“ einen Wert hat, so stellt der zukünftige Standorttyp einen Übergang zwischen zwei Standorttypen dar.

Der Datensatz des Verschnitts zwischen der Standortkarte und den Höhenstufen enthält die Ergebnisse der Projektionswege (zukünftige Standorttypen) und die folgenden Angaben (Spalten):

Tab. 22: Enthaltene Angaben im Datensatz „zukünftige Standorttypen“.

Spaltenangaben	Erklärungen
ta	NaiS-Standorttyp aus der Waldstandortkarte heute
taue	NaiS-Standorttyp eines Übergangs oder Mosaiks aus der Waldstandortkarte heute (zweiter Teil des Übergangs)
tahs	Höhenstufe heute
tauehs	Höhenstufe heute, Übergangsstandort
hszukcor	Höhenstufe Zukunft, korrigiert
naiszuk1	NaiS-Standorttyp in Zukunft
naiszuk2	NaiS-Standorttyp in Zukunft, Übergangsstandort

Das Hauptergebnis ist eine Karte mit den Baumartenempfehlungen für jeden Wald der Schweiz mit Standortkarte oder Standort-Hinweiskarte. Dieser Datensatz enthält für jeden Standorttyp die Baumartenempfehlungen nach der Methode Frehner & Zürcher-Gasser (2019), wie sie auch in der Tree App umgesetzt wurden, aber aufgetrennt nach Klimaszenario und Baumart. Jede Baumart hat eine eigene Spalte, die Spaltennamen sind nach den Kürzeln der Baumarten benannt. Für jede Baumart ist die Erstellung eines Kartenlayers möglich (insgesamt wurden 84 Baumarten behandelt).

Bei allen nachfolgenden Abbildungen für die Baumartenempfehlungen, klimasensitiven Standorte und Bestände gilt für tiefer gelegene Gebiete, wo die Höhenstufe heute und in Zukunft dieselbe bleibt (v.a. geltend für die submontane Höhenstufe), derselbe Grundsatz wie bei der Tree App und Umwelt Wissen „Standorttypen: Grundlagen“ (BAFU [Hrsg.], in Erarbeitung): **„Hier ändert sich zwar die Höhenstufe nicht; unter den empfohlenen Baumarten sollen aber diejenigen bevorzugt werden, die Wärme und Trockenheit am besten ertragen“.** Die Fichte wird dort als gefährdet bezeichnet, falls sie beim Tree App erwähnt wird.

3.2.1.1 Schweizweite Übersicht

Es werden folgende Baumarten als Auswahl aller 84 berechneten Baumartenempfehlungen dargestellt (siehe LINK GITHUB für alle Baumartenempfehlungen):

- Buche: häufigste Laubbaumart der Schweiz
- Fichte und Tanne: die beiden häufigsten Nadelbaumarten der Schweiz
- Traubeneiche und Winterlinde: Baumarten, deren Verbreitung nach den Modellen in Zukunft stark zunimmt.

Zu allen in NaiS2019 aufgeführten Baumarten sind GIS Daten vorhanden (Anhänge 7.1 und 7.2), mit denen man die gleichen Auswertungen wie für diese fünf Baumarten machen kann.

Buche:

Bei RCP4.5 (mässiger Klimawandel, Periode 2070-2099; Abb. 19) gilt die Buche in den tiefen und mittleren Lagen meistens als „empfohlen“, v.a. in der Westschweiz teils auch als „bedingt empfohlen“. Auf den bedingt empfohlenen Flächen wird erwartet, dass die Buche wegen den gut wasserversorgten Böden noch wachsen kann, aber dass sie weniger konkurrenzstark wird. Bei RCP8.5 (starker Klimawandel, Periode 2070-2099; Abb. 20) gilt die Buche in einem Streifen der tiefen Lagen zwischen Genfersee und Kanton Schaffhausen nur noch als „bedingt empfohlen“ oder bereits als „gefährdet“. In hohen Lagen gilt die Buche bei beiden Szenarien in den nördlichen Randalpen meist als „in Zukunft empfohlen“. In den kontinentalen Hochalpen wird sie weiterhin nur in geringem Ausmass erwartet.

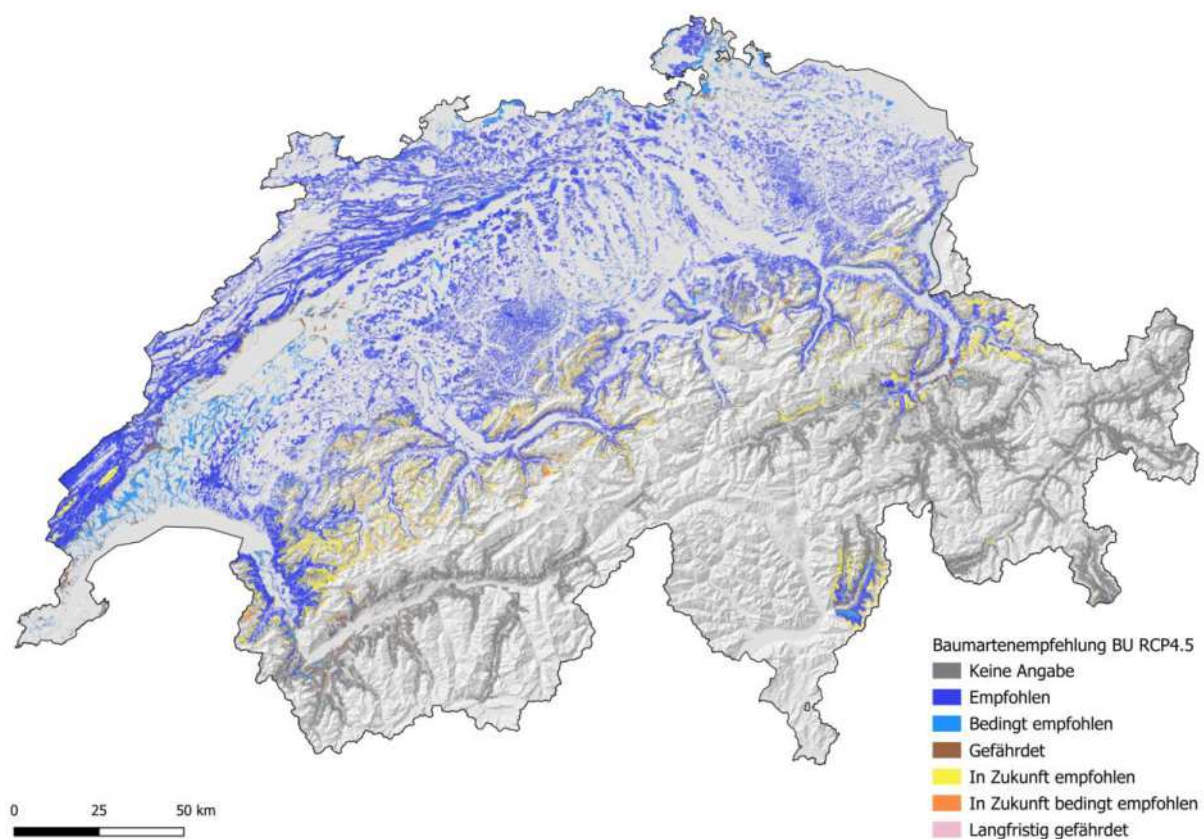


Abb. 19: Karte der Baumartenempfehlungen, dargestellt am Bsp. der Buche im Klimaszenario RCP4.5 (mässiger Klimawandel), Periode 2070-2099. Informationen zu den Kategorien siehe Tab. 9.

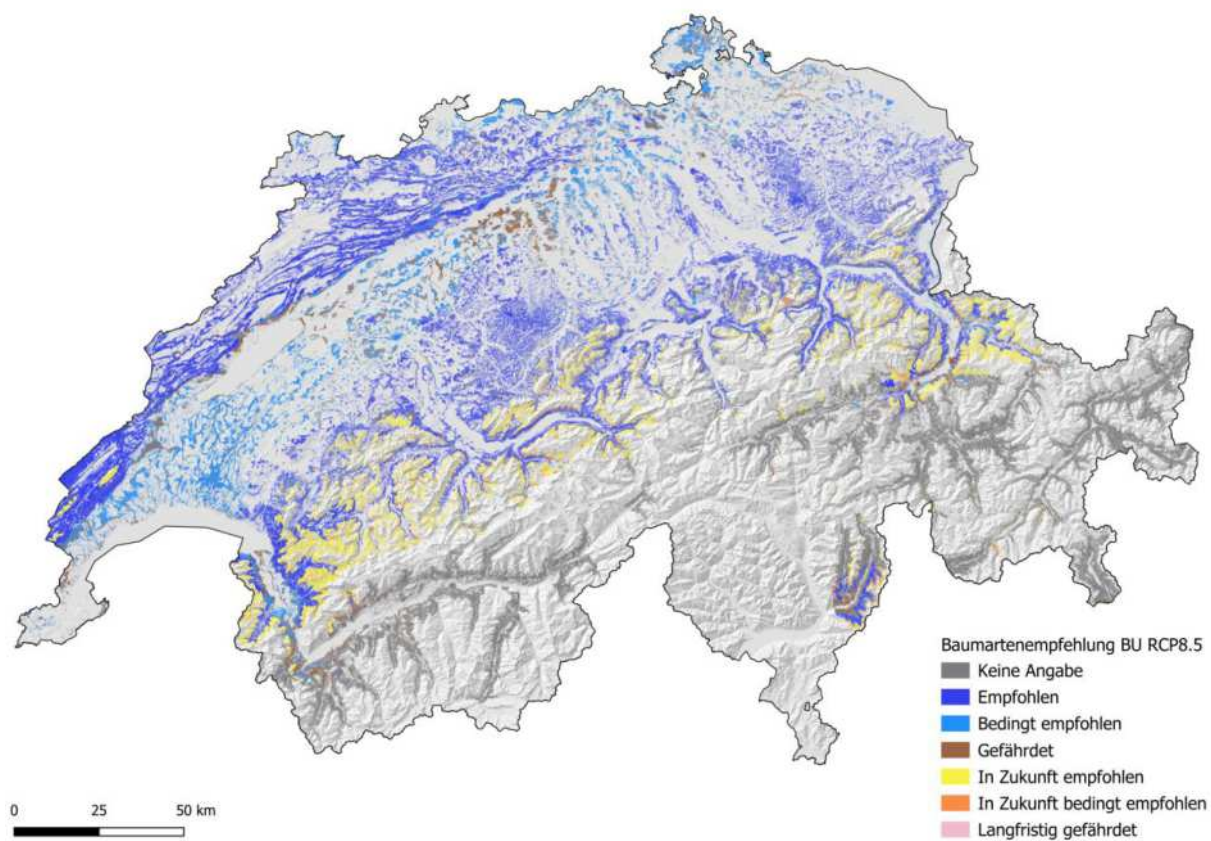


Abb. 20: Karte der Baumartenempfehlungen, dargestellt am Bsp. der Buche im Klimaszenario RCP8.5 (starker Klimawandel), Periode 2070-2099. Informationen zu den Kategorien siehe Tab. 9.

Fichte:

Die Fichte wird beim mässigen Klimawandel (RCP4.5, Periode 2070-2099; Abb. 21) in hohen Lagen noch „empfohlen“, in den mittleren Lagen „bedingt empfohlen“, in den tiefen Lagen gilt sie meist als „gefährdet“ (oder die Flächen sind grau eingefärbt, das heisst, die Fichte wird sowohl beim heutigen wie auch beim zukünftigen Standorttyp nicht aufgeführt). Es wird erwartet, dass die Fichte mit der Erwärmung stärker vom Buchdrucker (*Ips typographus*) befallen wird, somit sollte dort eher auf Fichten verzichtet werden. Deshalb ist die Fichte auf Flächen, die heute und in Zukunft submontan modelliert sind als gefährdet eingetragen, auch wenn sie noch unter den weiteren Baumarten erwähnt ist. Beim starken Klimawandel (RCP8.5, Periode 2070-2099; Abb. 22) gilt die Fichte meist als „gefährdet“ oder wird nur noch „bedingt empfohlen“.

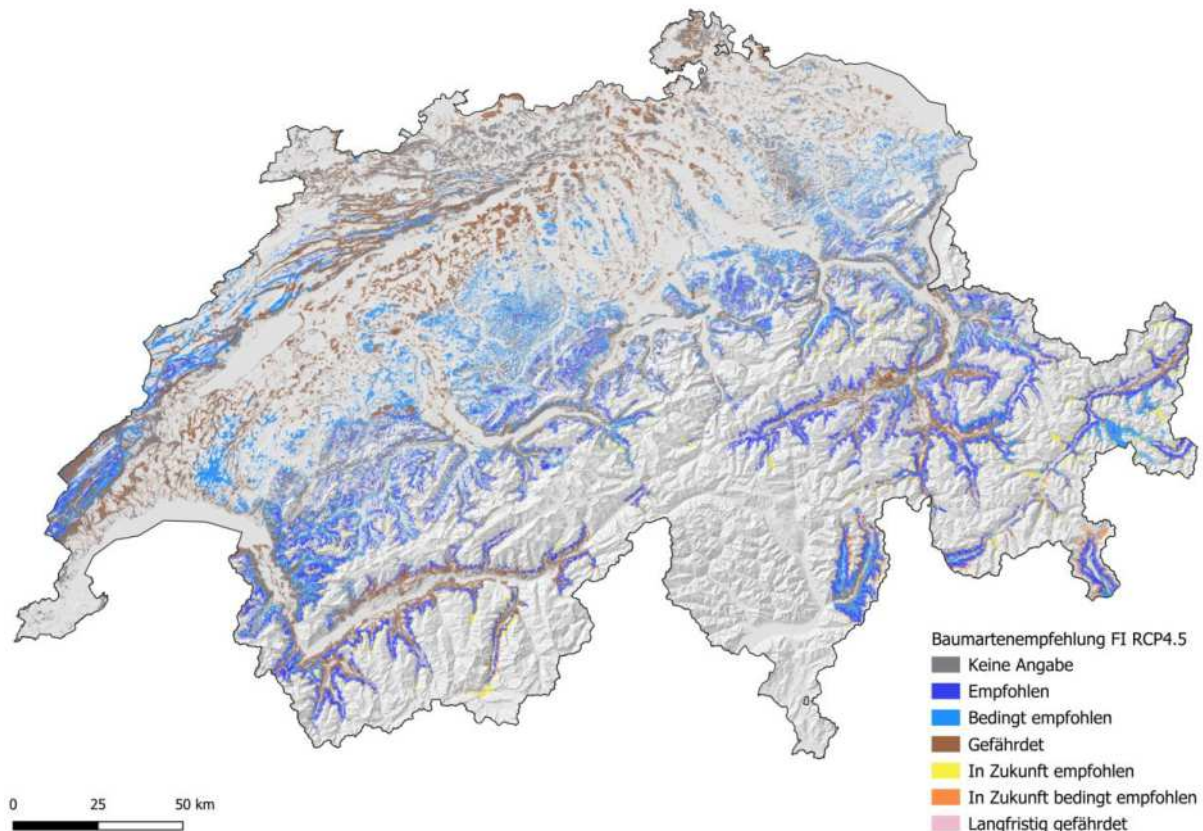


Abb. 21: Karte der Baumartenempfehlungen, dargestellt am Bsp. der Fichte im Klimaszenario RCP4.5 (mässiger Klimawandel), Periode 2070-2099. Informationen zu den Kategorien siehe Tab. 9.

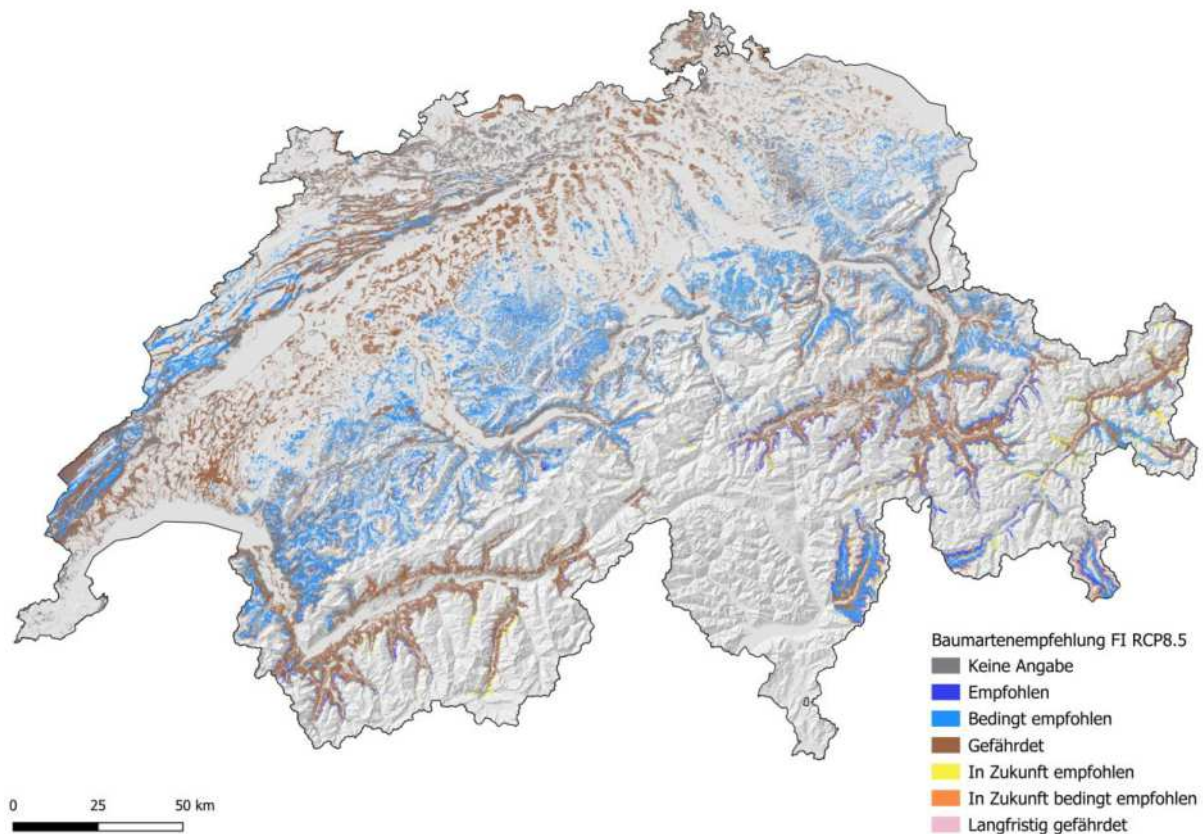


Abb. 22: Karte der Baumartenempfehlungen, dargestellt am Bsp. der Fichte im Klimaszenario RCP8.5 (starker Klimawandel), Periode 2070-2099. Informationen zu den Kategorien siehe Tab. 9.

Tanne:

Die Tanne gilt sowohl bei mässigem (RCP4.5, Periode 2070-2099; Abb. 23) als auch bei starkem Klimawandel (RCP8.5, Periode 2070-2099; Abb. 24) grossflächig noch als „bedingt empfohlen“ (heute vorkommend, in Zukunft aber nur als „weitere Baumart“ evtl. noch möglich) und bei RCP4.5 in den hohen Lagen als „empfohlen“ oder „in Zukunft empfohlen“. Bei der Tanne gibt es wahrscheinlich in den tiefsten Lagen (in Zukunft submontane Stufe), vor allem auf den frischen bis trockenen Standorten mit der Erwärmung ein erhöhtes Risiko wegen vermehrtem Mistelbefall und dem Krummzahnigen Tannenborckenkäfer (*Pityokteines curvidens*).

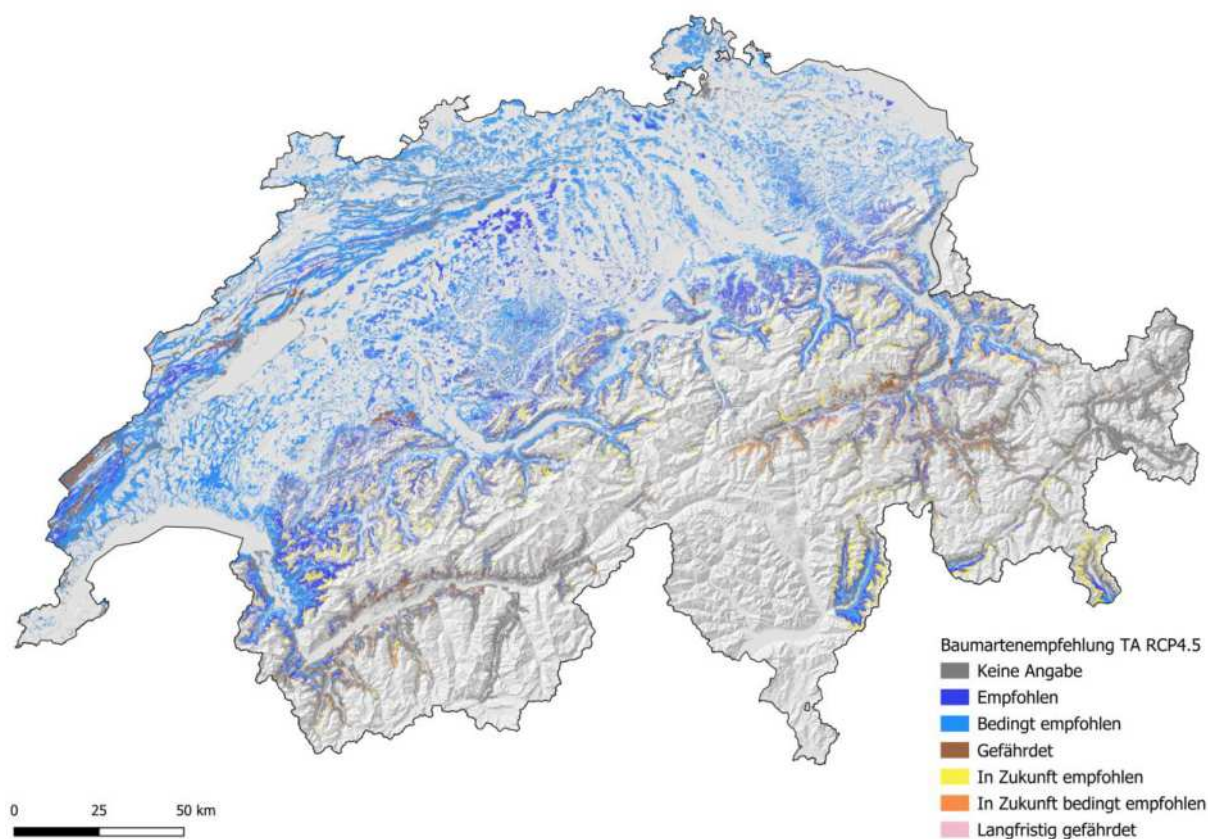


Abb. 23: Karte der Baumartenempfehlungen, dargestellt am Bsp. der Tanne im Klimaszenario RCP4.5 (mässiger Klimawandel), Periode 2070-2099. Informationen zu den Kategorien siehe Tab. 9.

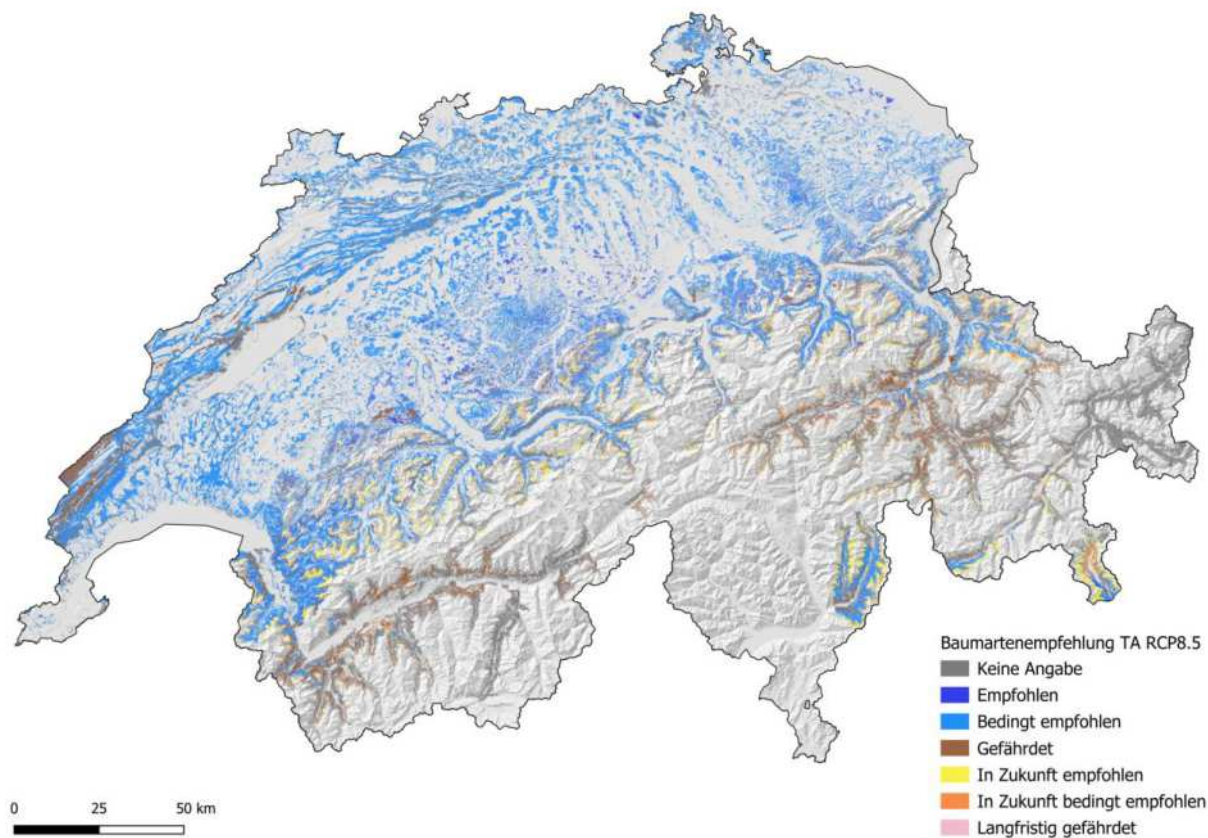


Abb. 24: Karte der Baumartenempfehlungen, dargestellt am Bsp. der Tanne im Klimaszenario RCP8.5 (starker Klimawandel), Periode 2070-2099. Informationen zu den Kategorien siehe Tab. 9.

Traubeneiche:

Die Traubeneiche gilt bei mässigem Klimawandel (RCP4.5, Periode 2070-2099; Abb. 25) im Mittelland und im Jura grossflächig als „empfohlen“, in den nördlichen Randalpen und kontinentalen Hochalpen v.a. als „in Zukunft empfohlen“ oder „in Zukunft bedingt empfohlen“. Bei starkem Klimawandel (RCP8.5, Periode 2070-2099; Abb. 26) gilt die Traubeneiche im Mittelland, Jura und den nördlichen Randalpen grossflächig als „bedingt empfohlen“ (heute vorkommend, in Zukunft aber nur als „weitere Baumart“ evtl. noch möglich) und in den hohen Lagen und den kontinentalen Hochalpen meist als „gefährdet“ oder es bestehen keine Angaben (die Flächen sind grau eingefärbt, das heisst, die Traubeneiche wird sowohl beim heutigen wie auch beim zukünftigen Standorttyp nicht aufgeführt). Dies bedeutet, dass die klimatischen Bedingungen für die Traubeneiche beim RCP8.5 noch zu kühl sind, dass noch zu oft Frostereignisse eintreten.

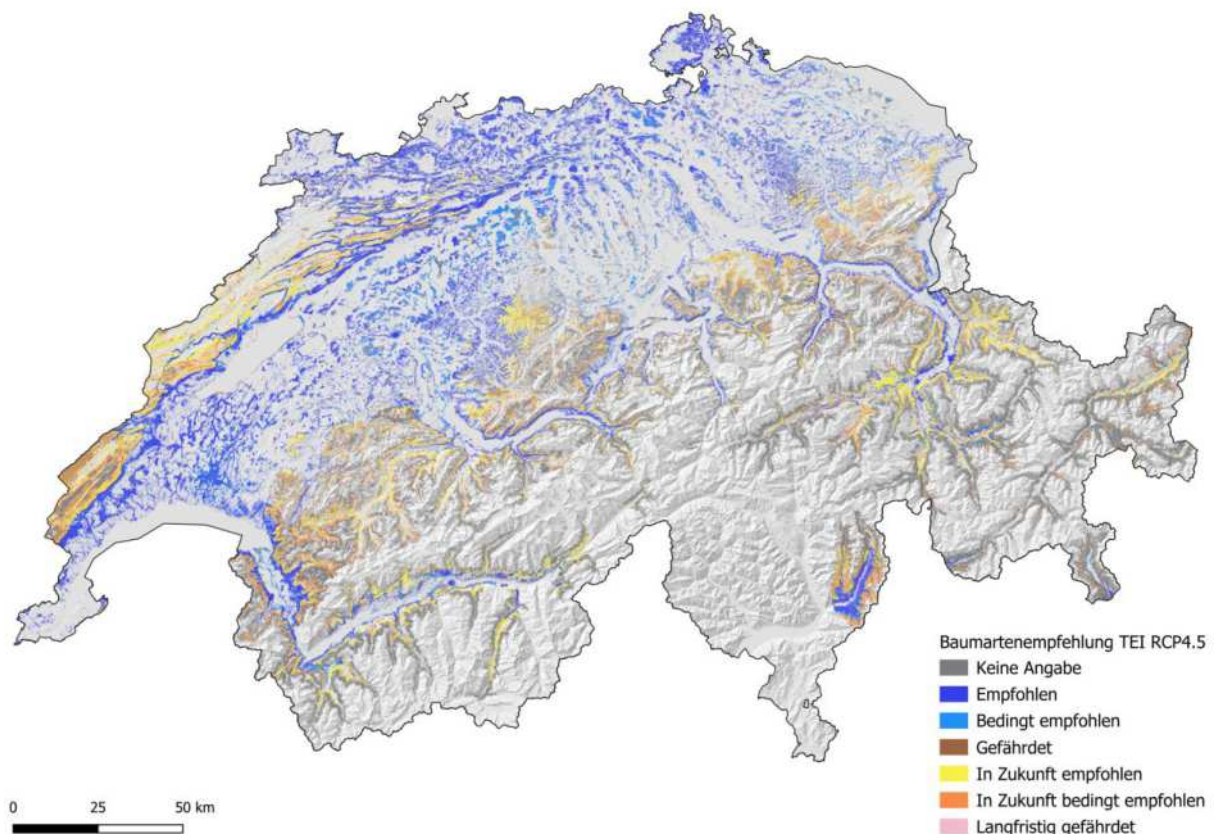


Abb. 25: Karte der Baumartenempfehlungen, dargestellt am Bsp. der Traubeneiche im Klimaszenario RCP4.5 (mässiger Klimawandel), Periode 2070-2099. Informationen zu den Kategorien siehe Tab. 9.

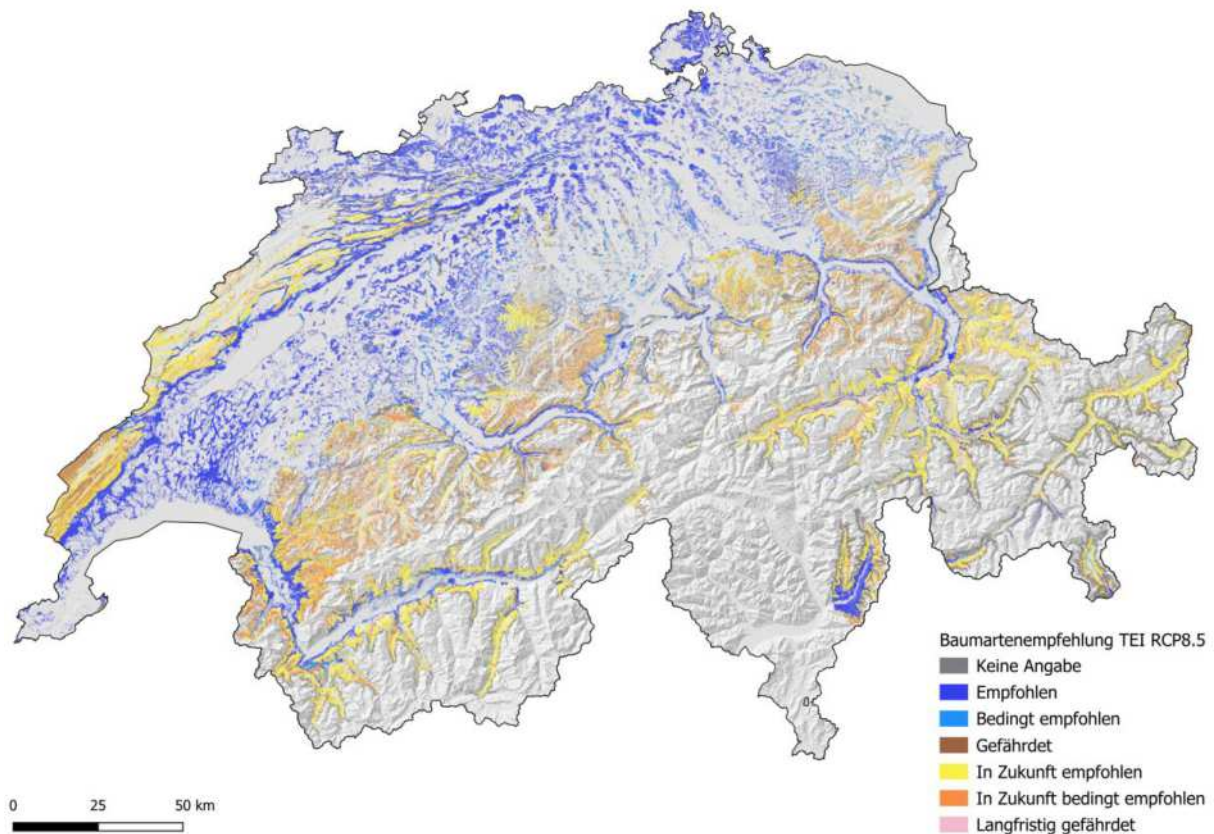


Abb. 26: Karte der Baumartenempfehlungen, dargestellt am Bsp. der Traubeneiche im Klimaszenario RCP8.5 (starker Klimawandel), Periode 2070-2099. Informationen zu den Kategorien siehe Tab. 9.

Winterlinde:

Die Winterlinde gilt bei mässigem Klimawandel (RCP4.5, Periode 2070-2099; Abb. 27) im Mittelland und im Jura grossflächig als „bedingt empfohlen“, ebenso in den tieferen Lagen der nördlichen Randalpen. Bei starkem Klimawandel (RCP8.5, Periode 2070-2099; Abb. 28) gilt die Winterlinde im Mittelland, Jura und den nördlichen Randalpen grossflächig als „empfohlen“ oder „bedingt empfohlen“ (heute vorkommend, in Zukunft aber nur als „weitere Baumart“ evtl. noch möglich). In den höheren Lagen der nördlichen Randalpen sowie in den kontinentalen Hochalpen gilt die Winterlinde bei beiden Szenarien als „in Zukunft empfohlen“ oder „in Zukunft bedingt empfohlen“.

Bei Abb. 27 und Abb. 28 werden nach dem Update mit CH2025 weniger Flächen hellblau (bedingt empfohlen), dafür mehr Flächen dunkelblau (empfohlen) sein. Dies, da die Winter- und Sommerlinde bei der Baumartenmatrix neu vermehrt als dominierende oder wichtige beigemischte Baumart vorkommen werden.

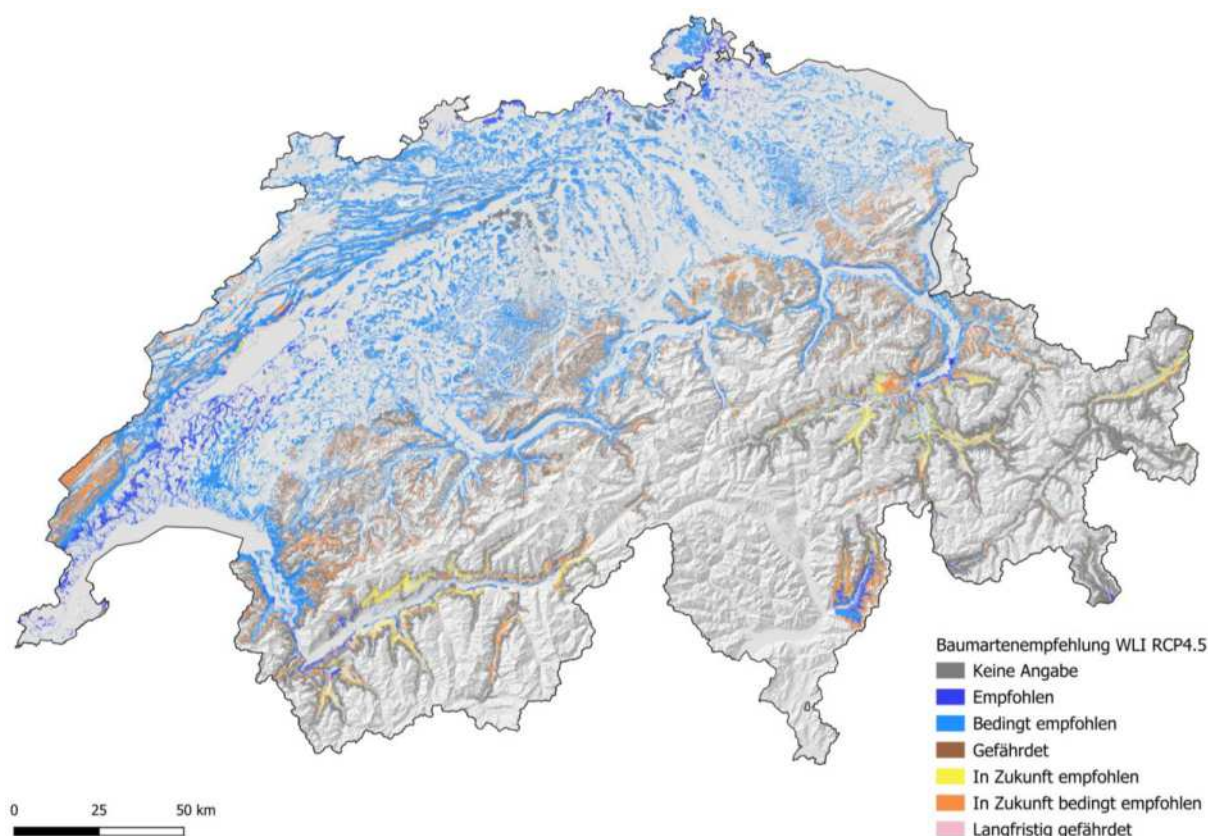


Abb. 27: Karte der Baumartenempfehlungen, dargestellt am Bsp. der Winterlinde im Klimaszenario RCP4.5 (mässiger Klimawandel), Periode 2070-2099. Informationen zu den Kategorien siehe Tab. 9.

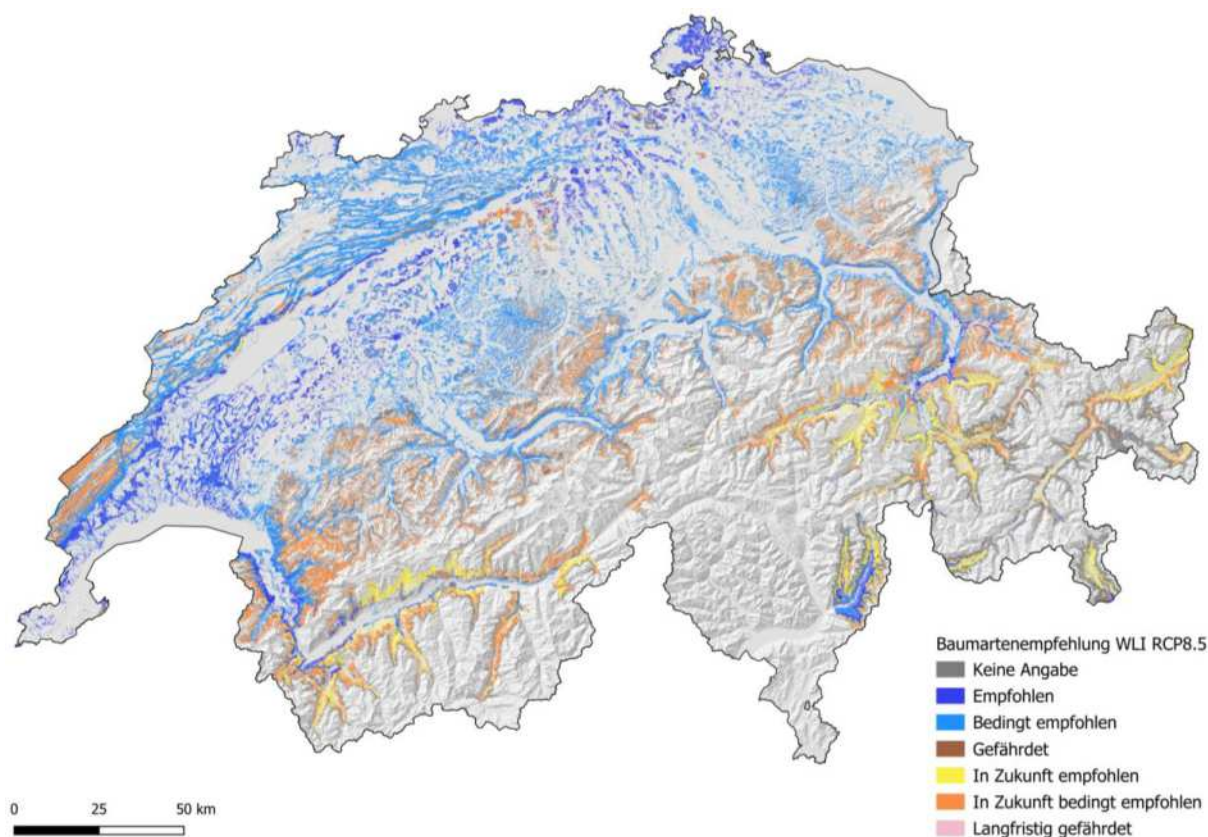
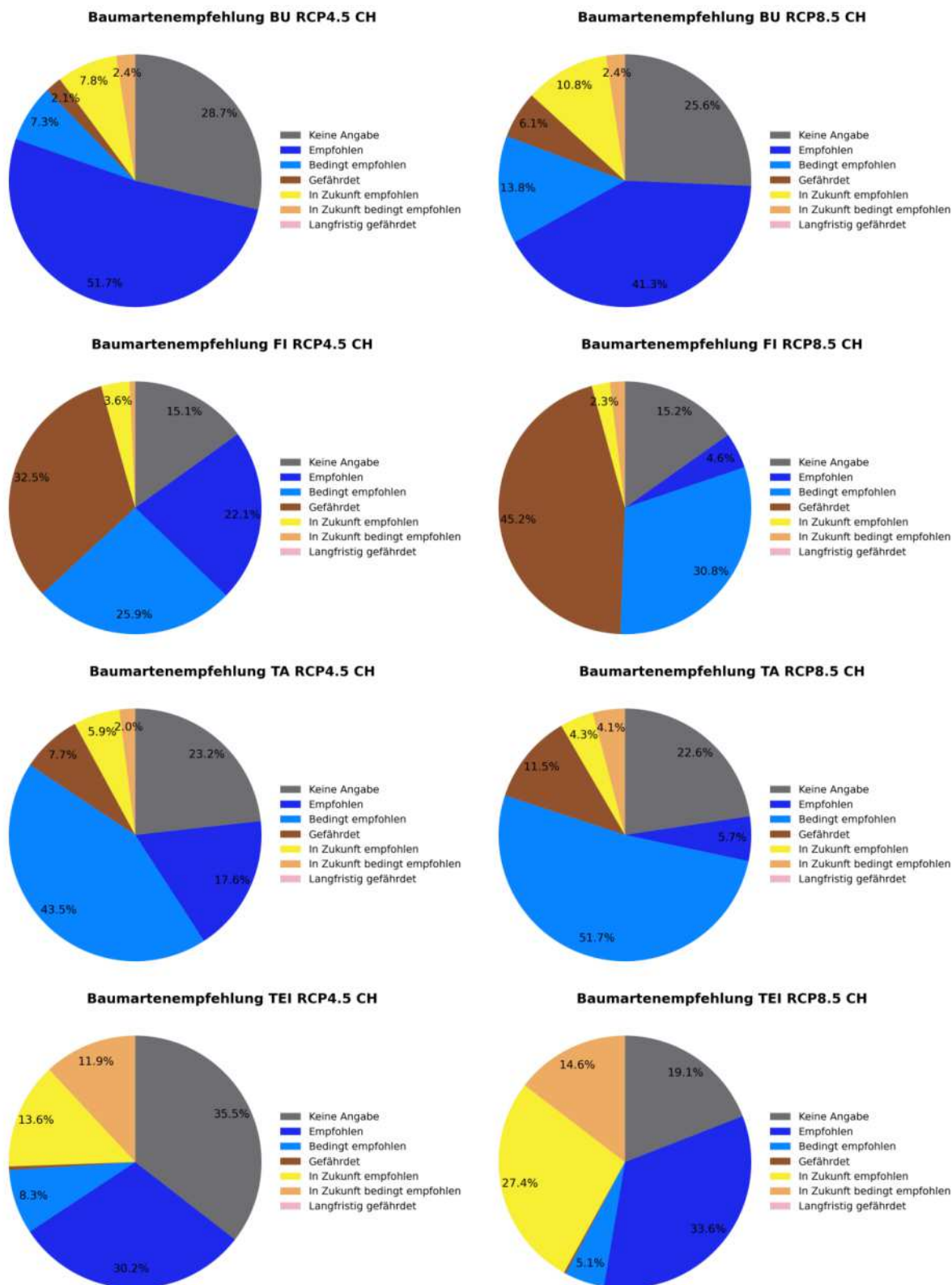


Abb. 28: Karte der Baumartenempfehlungen, dargestellt am Bsp. der Winterlinde im Klimaszenario RCP8.5 (starker Klimawandel), Periode 2070-2099. Informationen zu den Kategorien siehe Tab. 9.



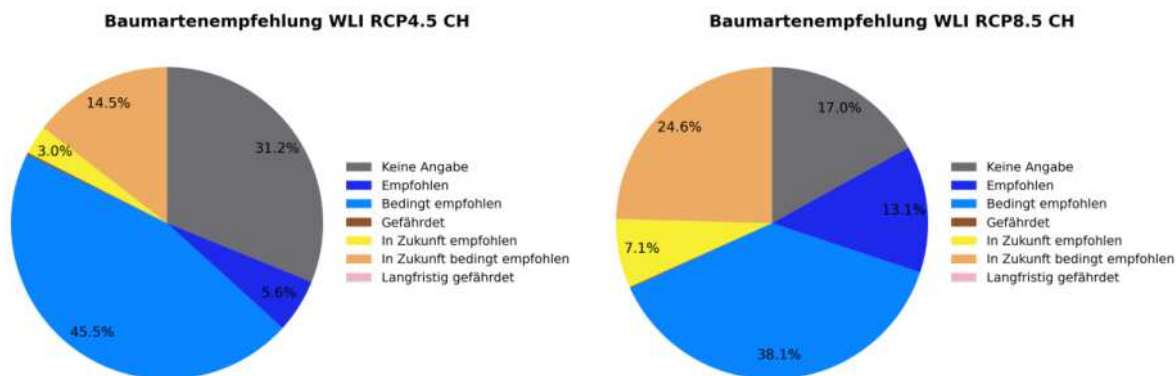
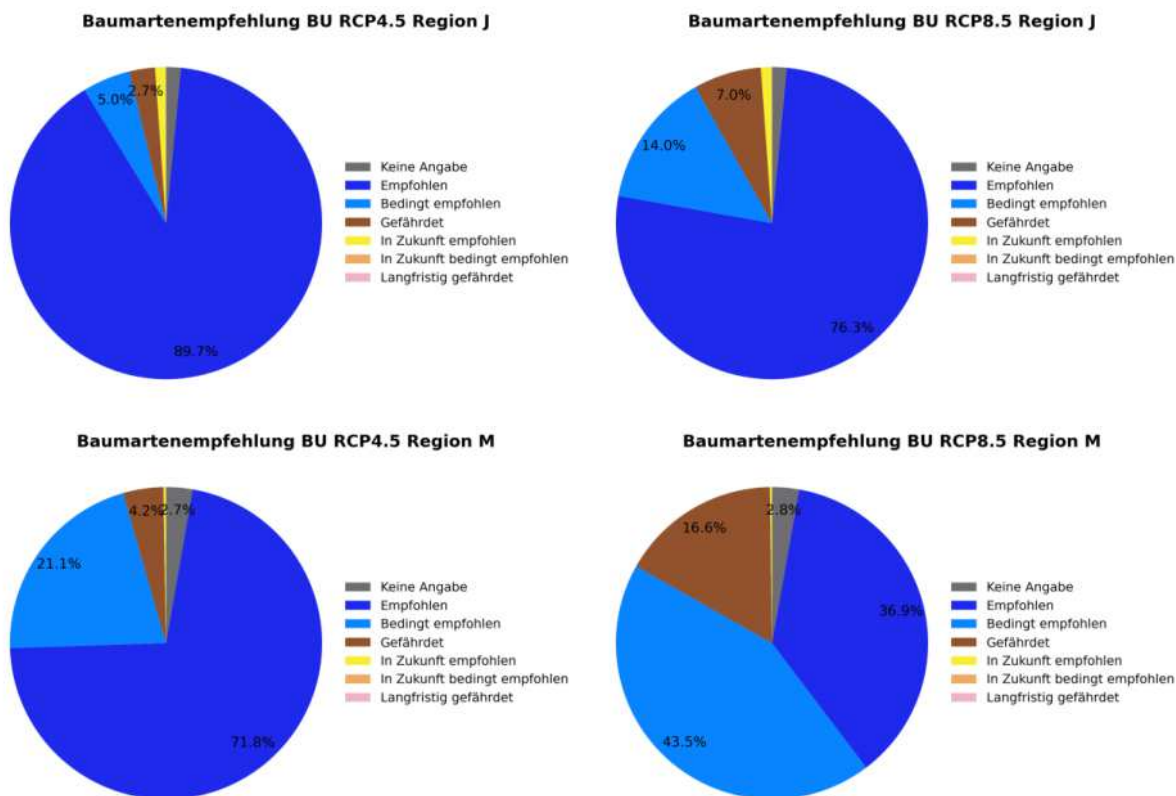


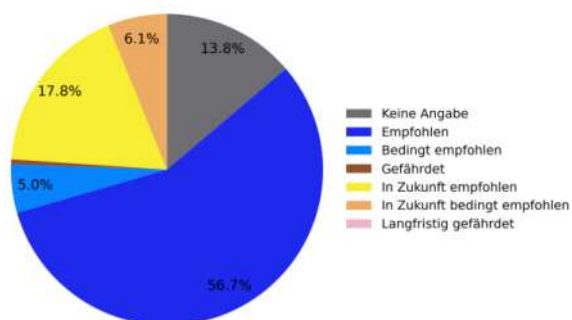
Abb. 29: Kuchendiagramme der Baumartenempfehlungen für die Baumarten Buche (BU), Fichte (FI), Tanne (TA), Traubeneiche (TEI) und Winterlinde (WLI), dargestellt pro Baumart und pro Klimaszenario (links RCP4.5, mässiger Klimawandel; rechts RCP8.5, starker Klimawandel; Periode 2070-2099, gesamte Schweiz). Informationen zu den Kategorien siehe Tab. 9.

3.2.1.2 Übersicht nach Standortregionen

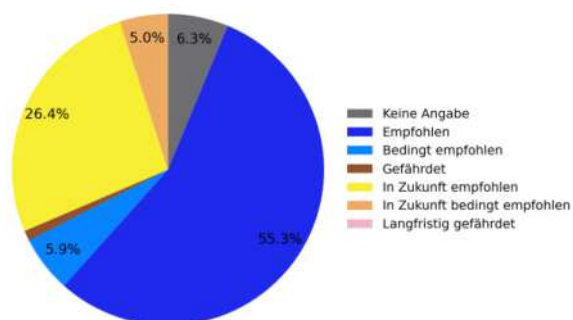
Bei den folgenden Abbildungen werden Kuchendiagramme der Baumartenempfehlungen, dargestellt am Bsp. der Buche, Fichte, Tanne, Traubeneiche und Winterlinde, pro Standortregion (Abb. 2; Kap. 1.4.4.2) und Klimaszenario (RCP4.5 und RCP8.5, Periode 2070-2099) dargestellt. Die Standortregionen der Schweiz (Abb. 2) werden in den Abbildungen unten wie folgt abgekürzt: Legende Standortregionen: J = Jura, M = Mittelland, 1 = Nördliche Randalpen, 2a = Nördliche Zwischenalpen mit Buche und mit Tanne, 2b = Nördliche Zwischenalpen ohne Buche und mit Tanne, 2c = Nördliche Zwischenalpen ohne Buche und ohne Tanne, 3 = Kontinentale Hochalpen, 4 = Südliche Zwischenalpen ohne Tanne (4a) / mit Tanne (4b), 5a = Südliche Randalpen mit Fichte.



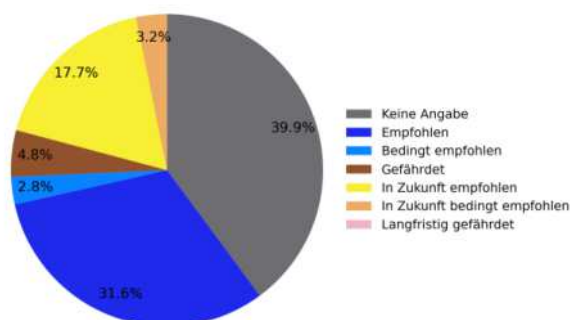
Baumartenempfehlung BU RCP4.5 Region 1



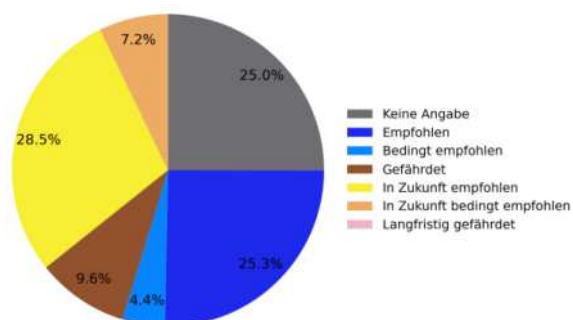
Baumartenempfehlung BU RCP8.5 Region 1



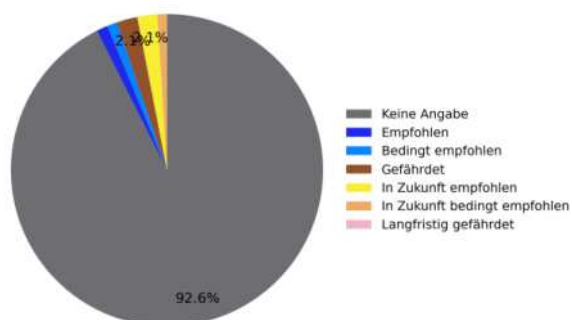
Baumartenempfehlung BU RCP4.5 Region 2a



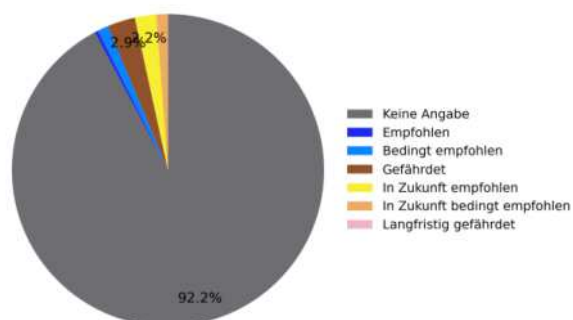
Baumartenempfehlung BU RCP8.5 Region 2a



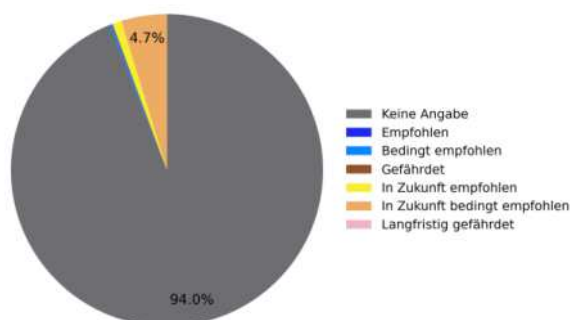
Baumartenempfehlung BU RCP4.5 Region 2b



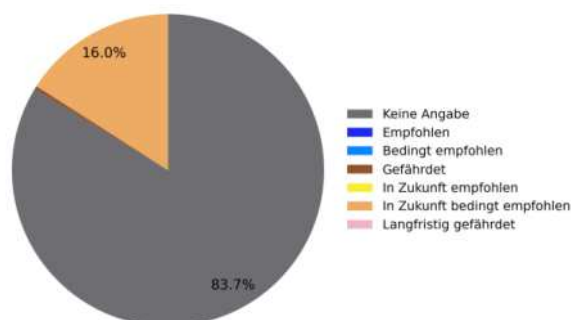
Baumartenempfehlung BU RCP8.5 Region 2b



Baumartenempfehlung BU RCP4.5 Region 2c



Baumartenempfehlung BU RCP8.5 Region 2c



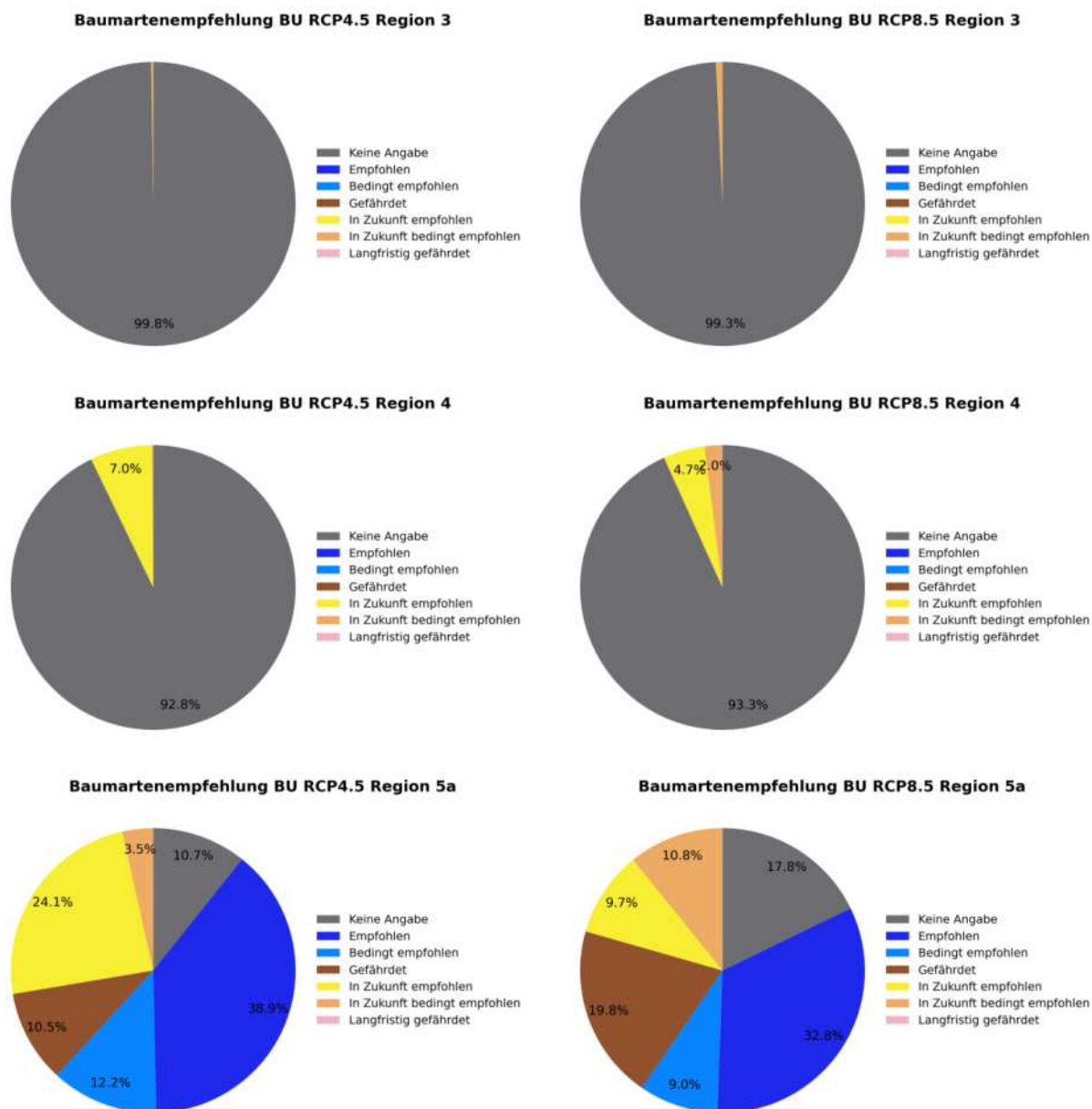
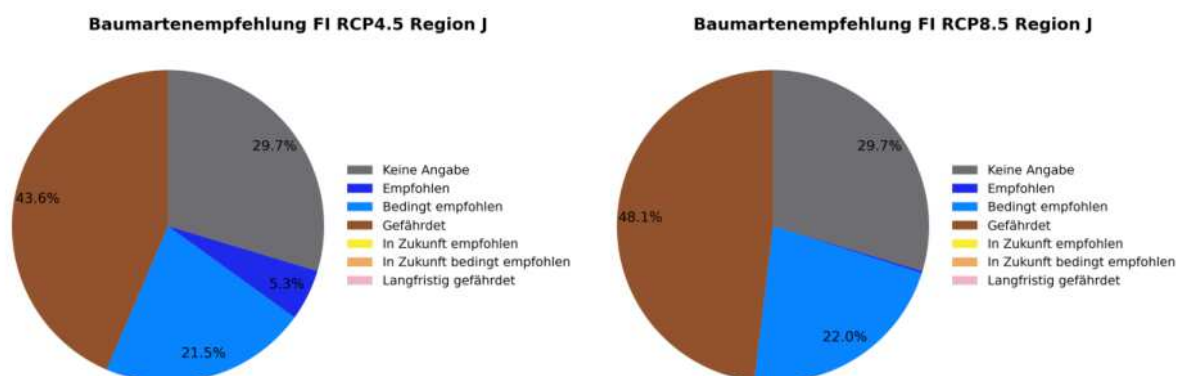
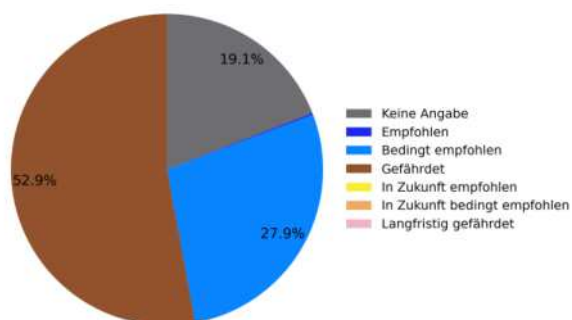


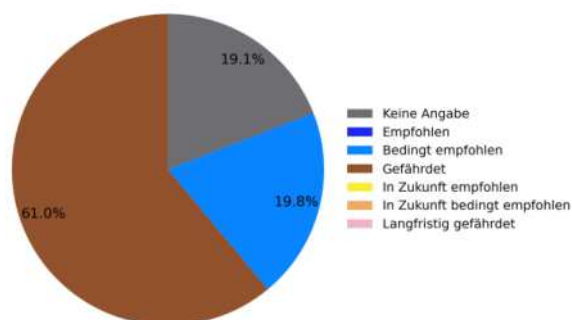
Abb. 30: Kuchendiagramme der Baumartenempfehlungen, dargestellt am Bsp. der Buche (BU), pro Standortregion und Klimaszenario (links RCP4.5, rechts Klimawandel; unten RCP8.5, starker Klimawandel; Periode 2070-2099). Legende Standortregionen siehe Abb. 2. Die Regionen 2b, 2c, 3 und 4 liegen ausserhalb vom aktuellen Buchenareal. Informationen zu den Kategorien siehe Tab. 9.



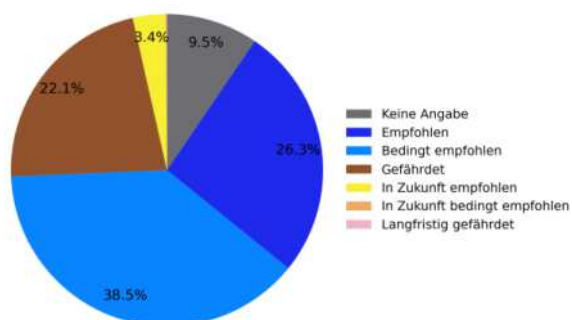
Baumartenempfehlung FI RCP4.5 Region M



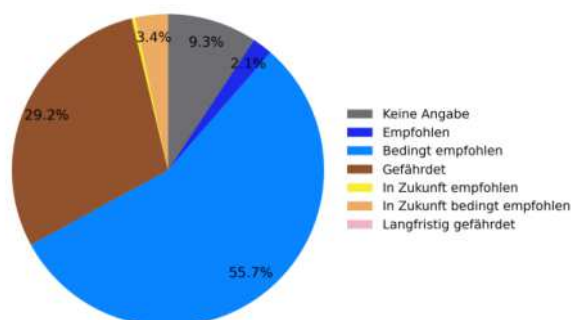
Baumartenempfehlung FI RCP8.5 Region M



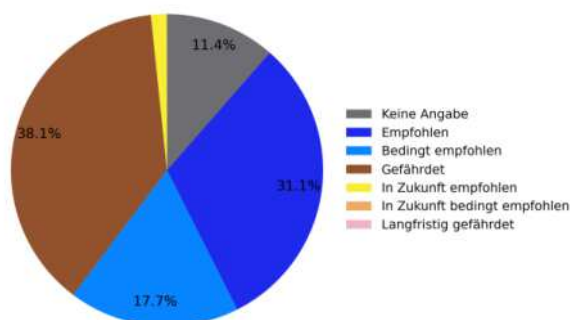
Baumartenempfehlung FI RCP4.5 Region 1



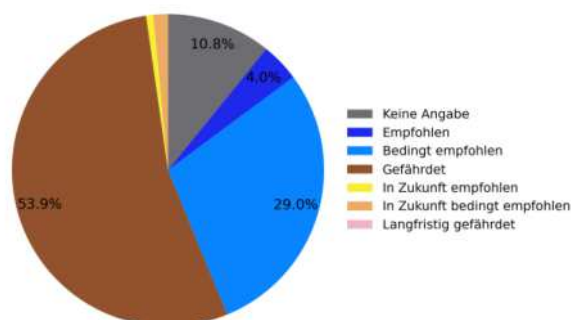
Baumartenempfehlung FI RCP8.5 Region 1



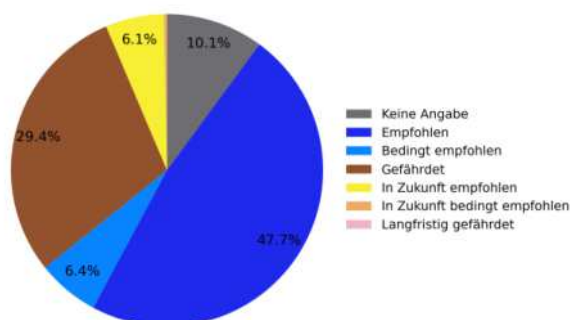
Baumartenempfehlung FI RCP4.5 Region 2a



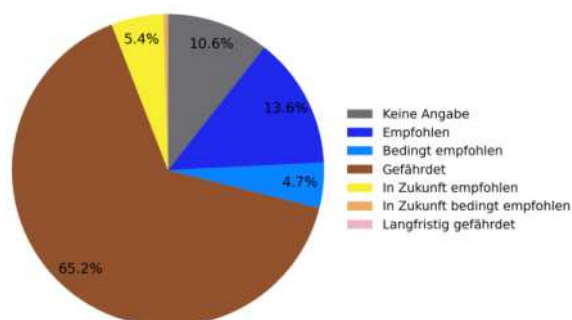
Baumartenempfehlung FI RCP8.5 Region 2a



Baumartenempfehlung FI RCP4.5 Region 2b



Baumartenempfehlung FI RCP8.5 Region 2b



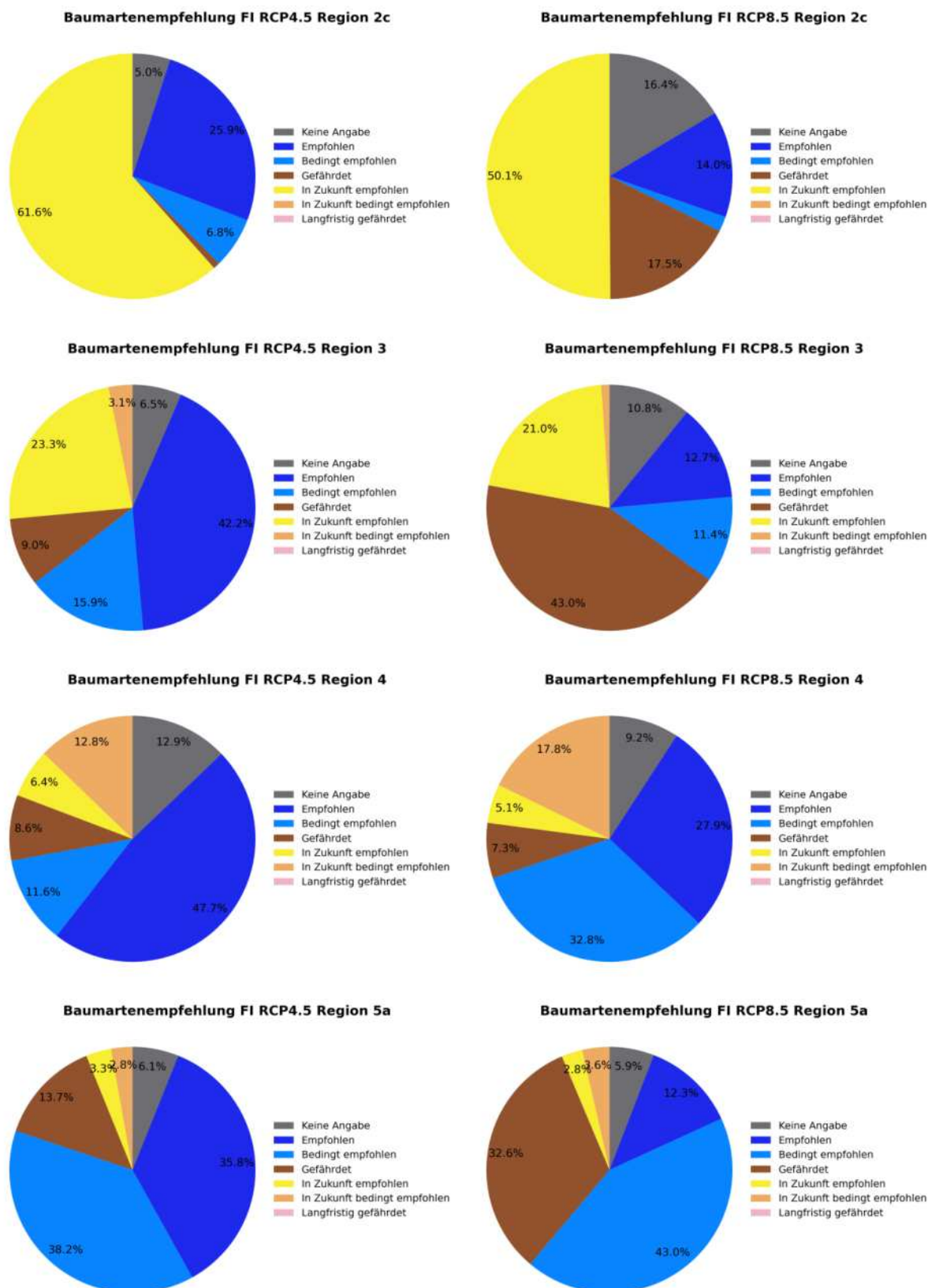
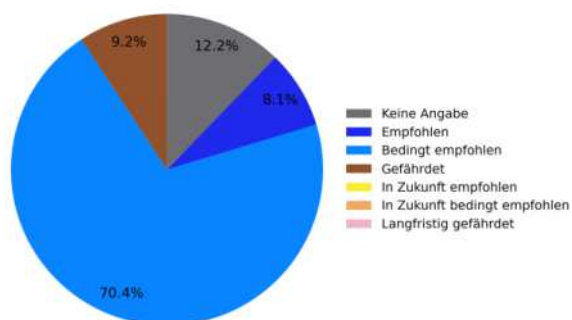
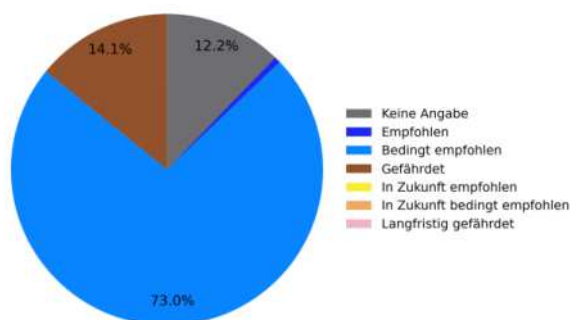


Abb. 31: Kuchendiagramme der Baumartenempfehlungen, dargestellt am Bsp. der Fichte (FI), pro Standortregion und Klimaszenario (links RCP4.5, mässiger Klimawandel; rechts RCP8.5, starker Klimawandel; Periode 2070-2099). Legende Standortregionen siehe Abb. 2. Informationen zu den Kategorien siehe Tab. 9.

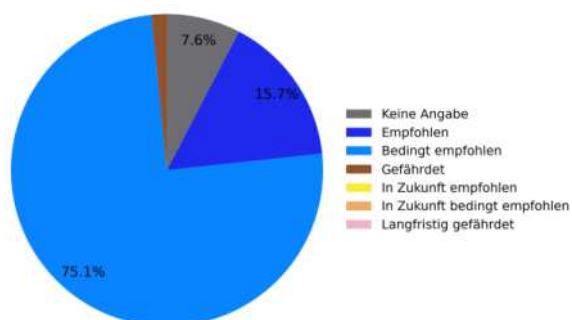
Baumartenempfehlung TA RCP4.5 Region J



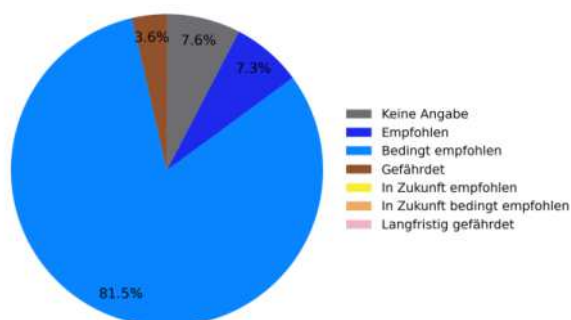
Baumartenempfehlung TA RCP8.5 Region J



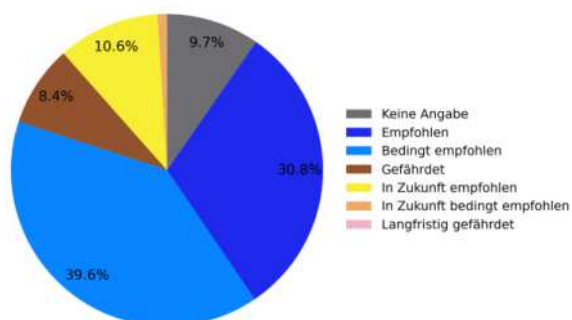
Baumartenempfehlung TA RCP4.5 Region M



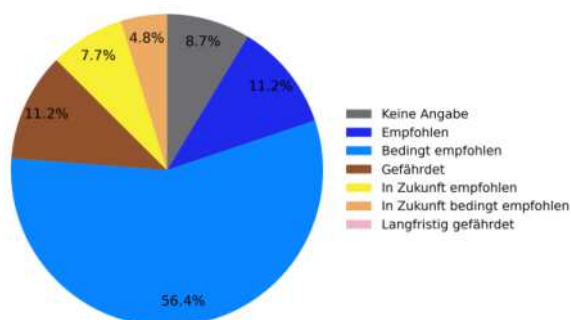
Baumartenempfehlung TA RCP8.5 Region M



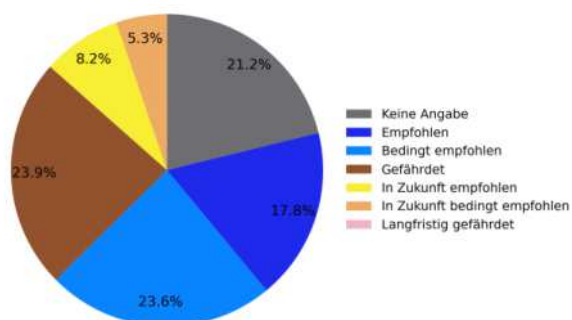
Baumartenempfehlung TA RCP4.5 Region 1



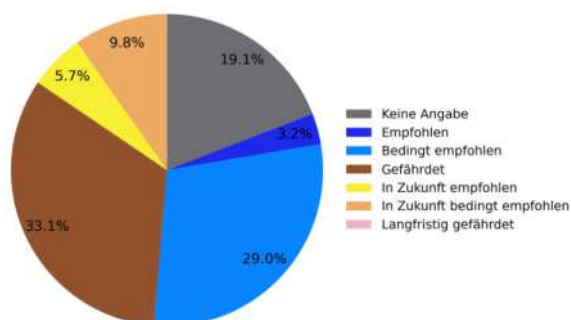
Baumartenempfehlung TA RCP8.5 Region 1



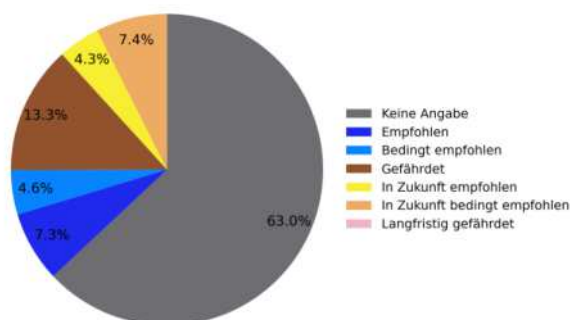
Baumartenempfehlung TA RCP4.5 Region 2a



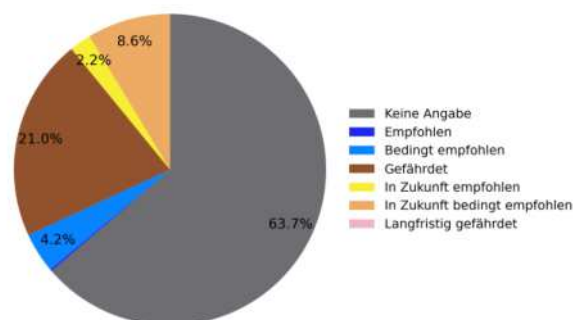
Baumartenempfehlung TA RCP8.5 Region 2a



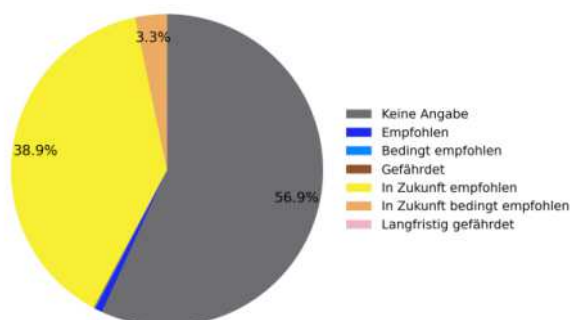
Baumartenempfehlung TA RCP4.5 Region 2b



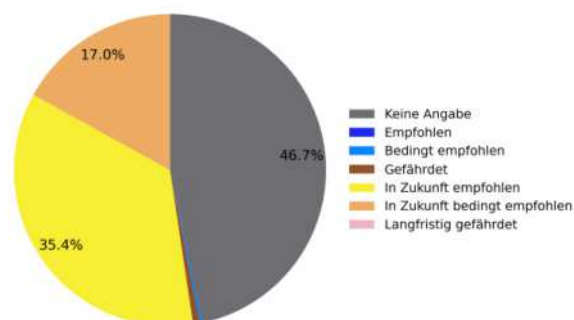
Baumartenempfehlung TA RCP8.5 Region 2b



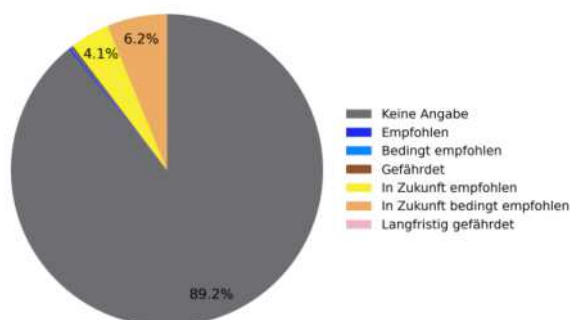
Baumartenempfehlung TA RCP4.5 Region 2c



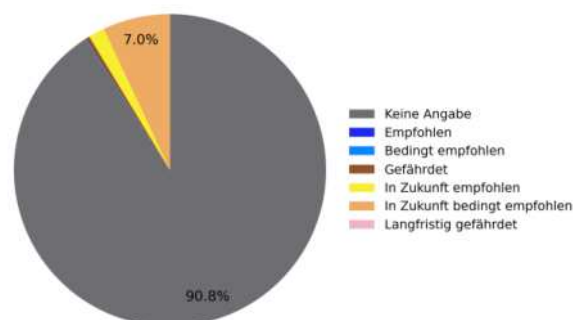
Baumartenempfehlung TA RCP8.5 Region 2c



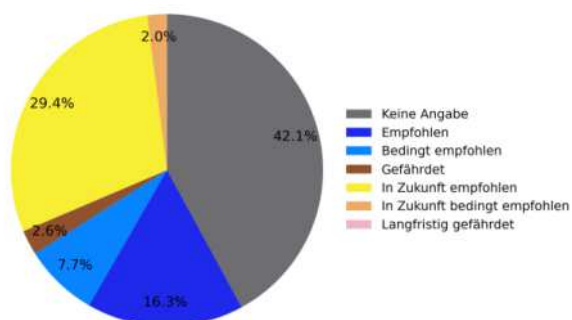
Baumartenempfehlung TA RCP4.5 Region 3



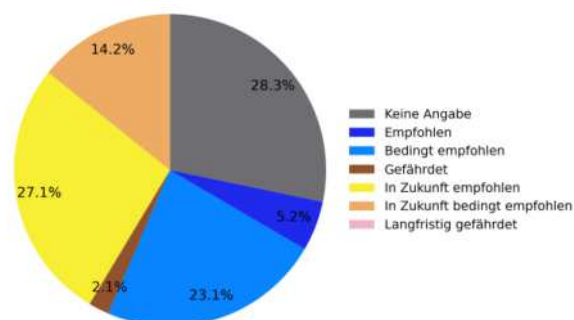
Baumartenempfehlung TA RCP8.5 Region 3



Baumartenempfehlung TA RCP4.5 Region 4



Baumartenempfehlung TA RCP8.5 Region 4



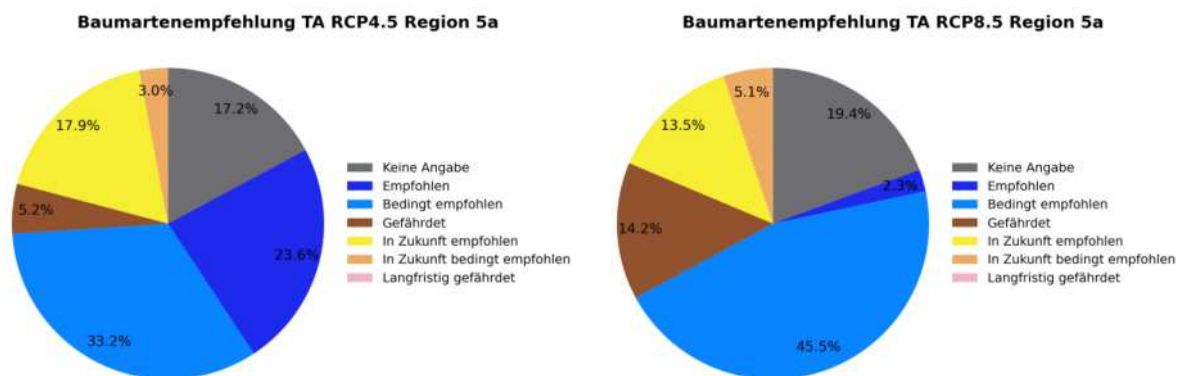
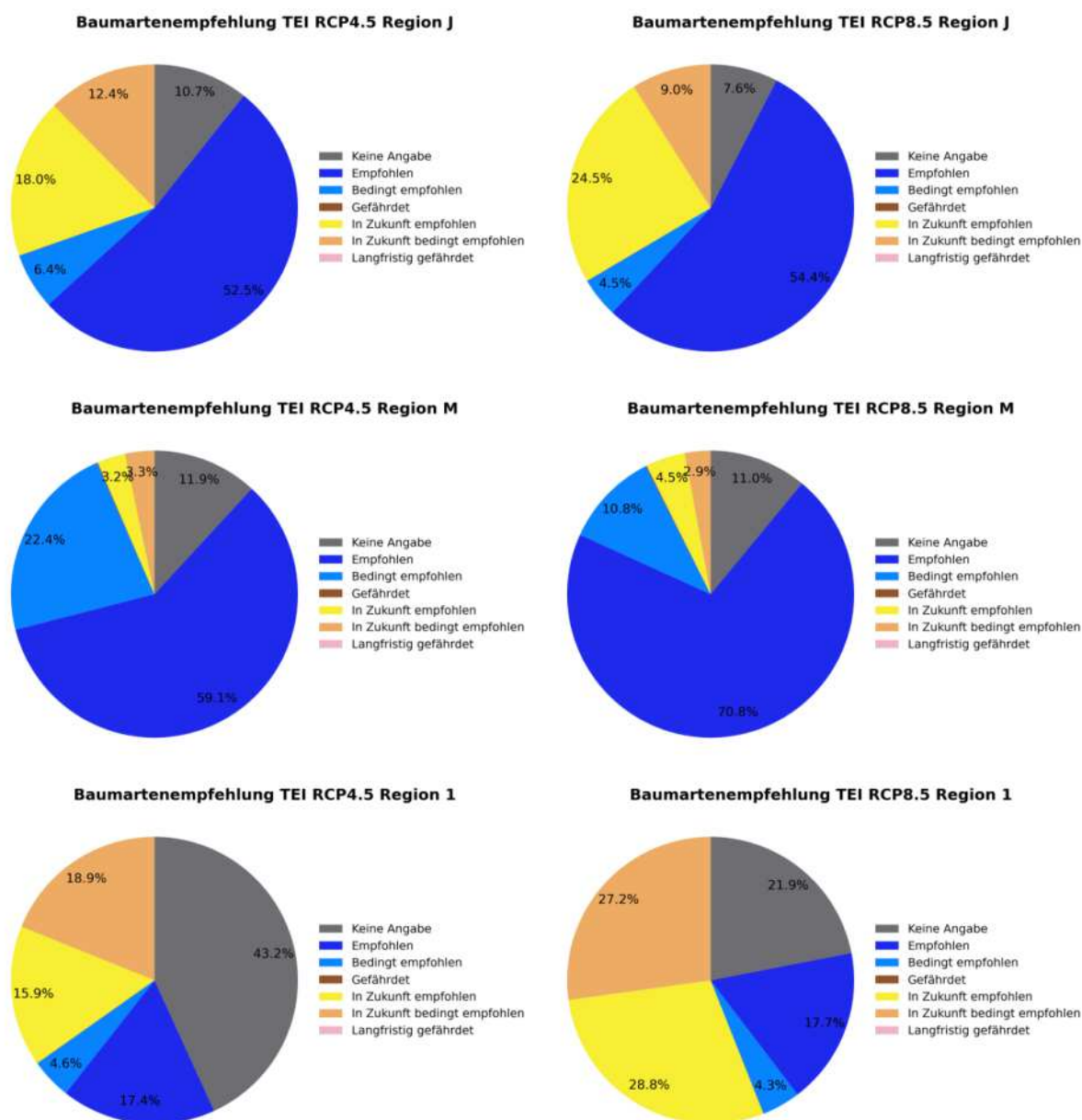
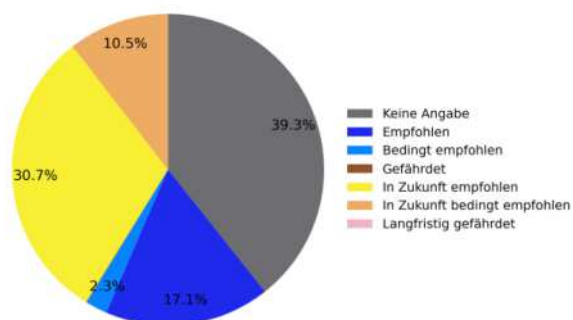


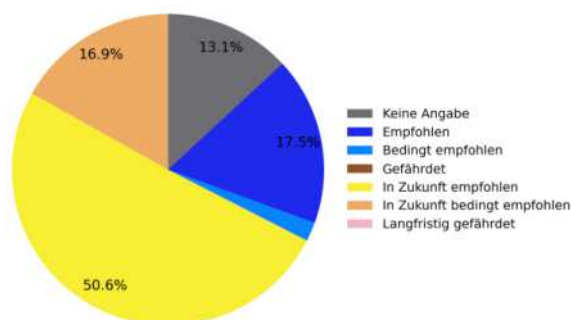
Abb. 32: Kuchendiagramme der Baumartenempfehlungen, dargestellt am Bsp. der Tanne (TA), pro Standortregion und Klimaszenario (links RCP4.5, mässiger Klimawandel; rechts RCP8.5, starker Klimawandel; Periode 2070-2099). Legende Standortregionen siehe Abb. 2 und Abb. 3. Die Regionen 2c und 3 liegen ausserhalb vom aktuellen Tannenareal. Informationen zu den Kategorien siehe Tab. 9.



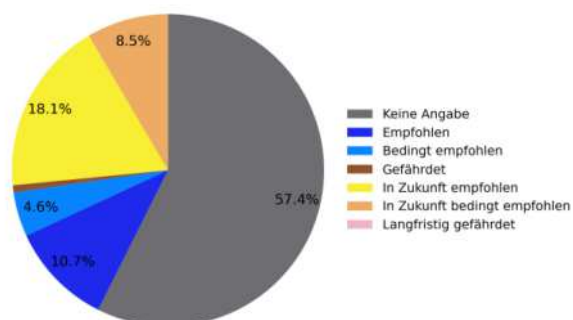
Baumartenempfehlung TEI RCP4.5 Region 2a



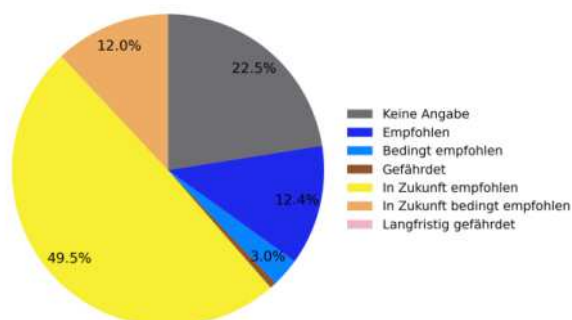
Baumartenempfehlung TEI RCP8.5 Region 2a



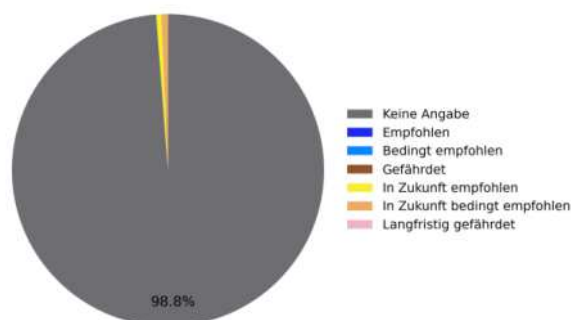
Baumartenempfehlung TEI RCP4.5 Region 2b



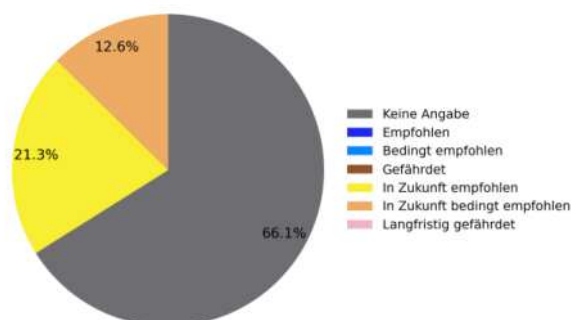
Baumartenempfehlung TEI RCP8.5 Region 2b



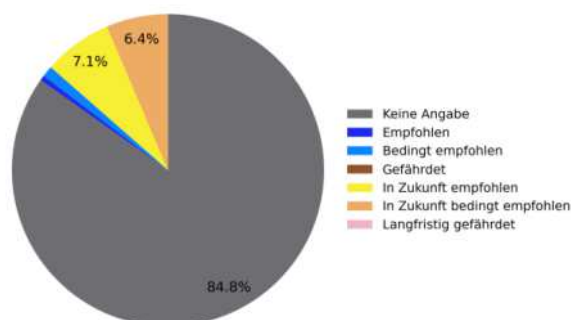
Baumartenempfehlung TEI RCP4.5 Region 2c



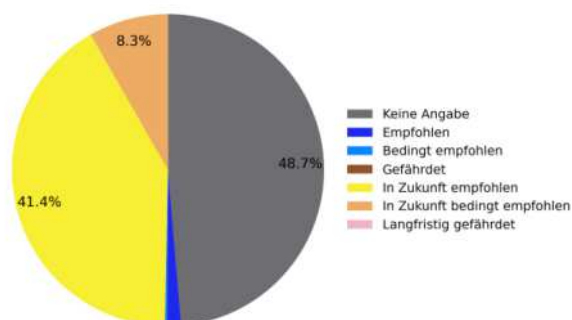
Baumartenempfehlung TEI RCP8.5 Region 2c



Baumartenempfehlung TEI RCP4.5 Region 3



Baumartenempfehlung TEI RCP8.5 Region 3



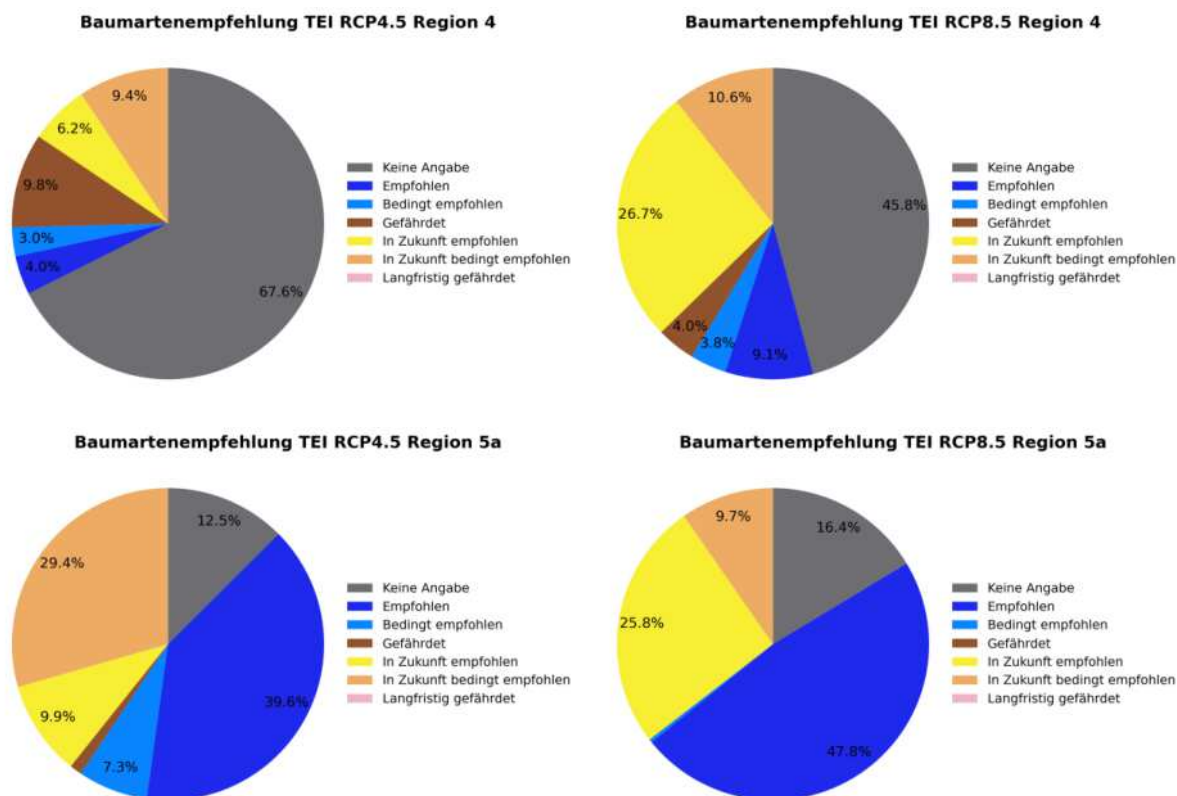
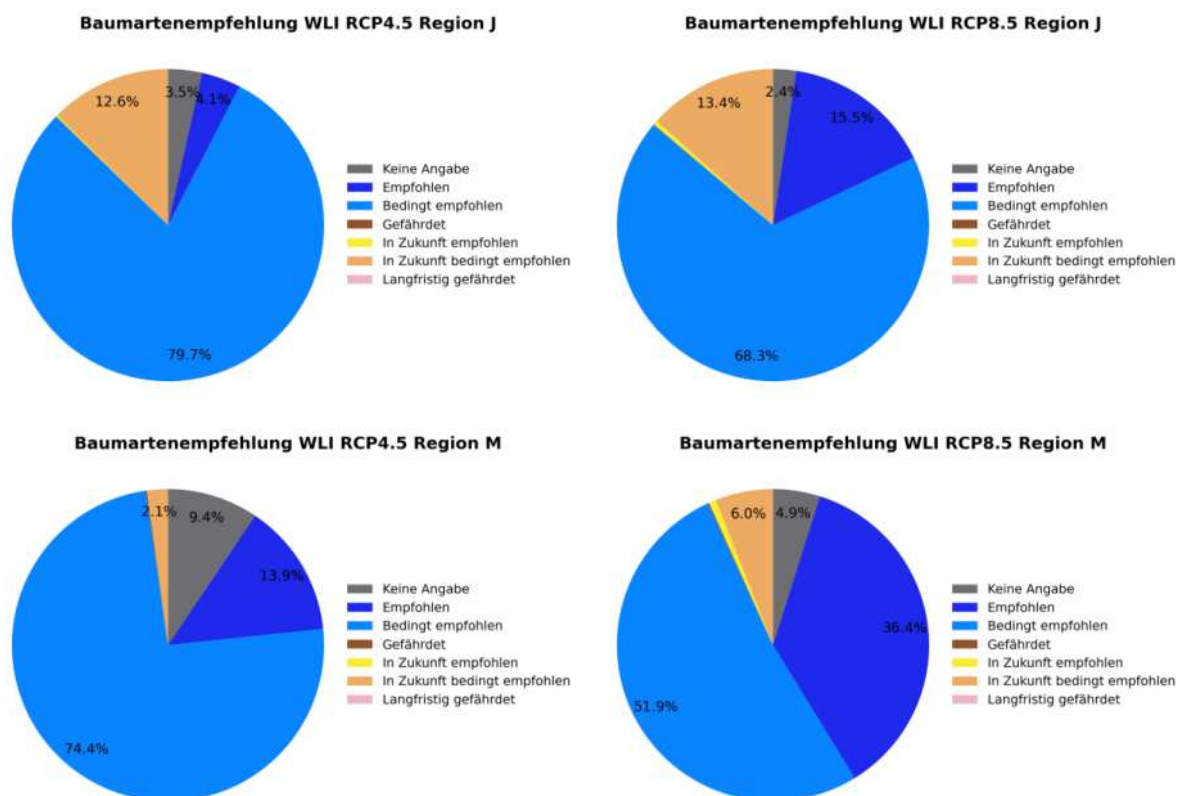
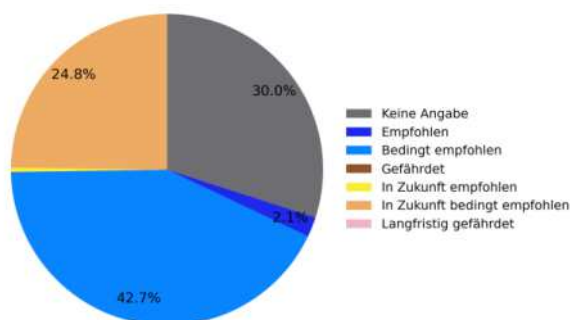


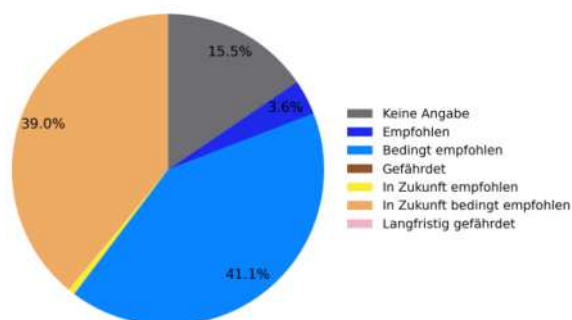
Abb. 33: Kuchendiagramme der Baumartenempfehlungen, dargestellt am Bsp. der Traubeneiche (TEI), pro Standortregion und Klimaszenario (links RCP4.5, mässiger Klimawandel; rechts RCP8.5, starker Klimawandel; Periode 2070-2099). Legende Standortregionen siehe Abb. 2 und Abb. 3. Informationen zu den Kategorien siehe Tab. 9.



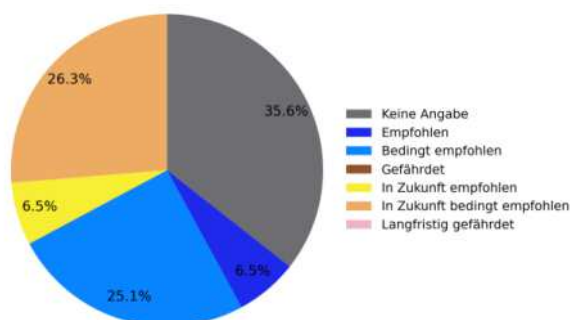
Baumartenempfehlung WLI RCP4.5 Region 1



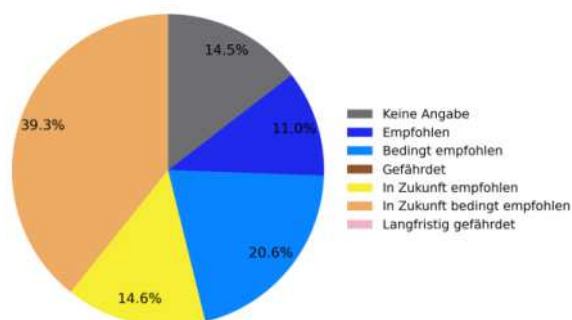
Baumartenempfehlung WLI RCP8.5 Region 1



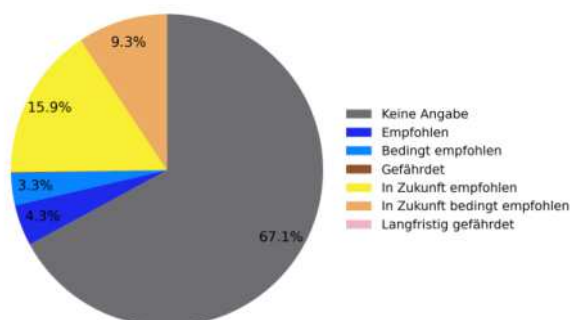
Baumartenempfehlung WLI RCP4.5 Region 2a



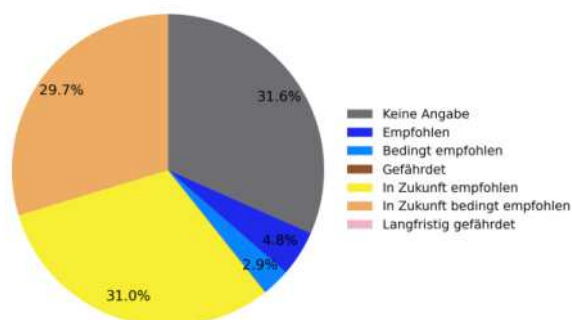
Baumartenempfehlung WLI RCP8.5 Region 2a



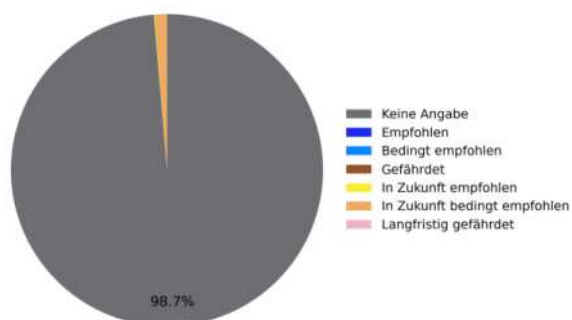
Baumartenempfehlung WLI RCP4.5 Region 2b



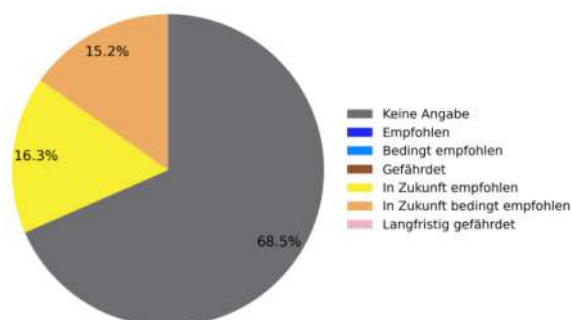
Baumartenempfehlung WLI RCP8.5 Region 2b



Baumartenempfehlung WLI RCP4.5 Region 2c



Baumartenempfehlung WLI RCP8.5 Region 2c



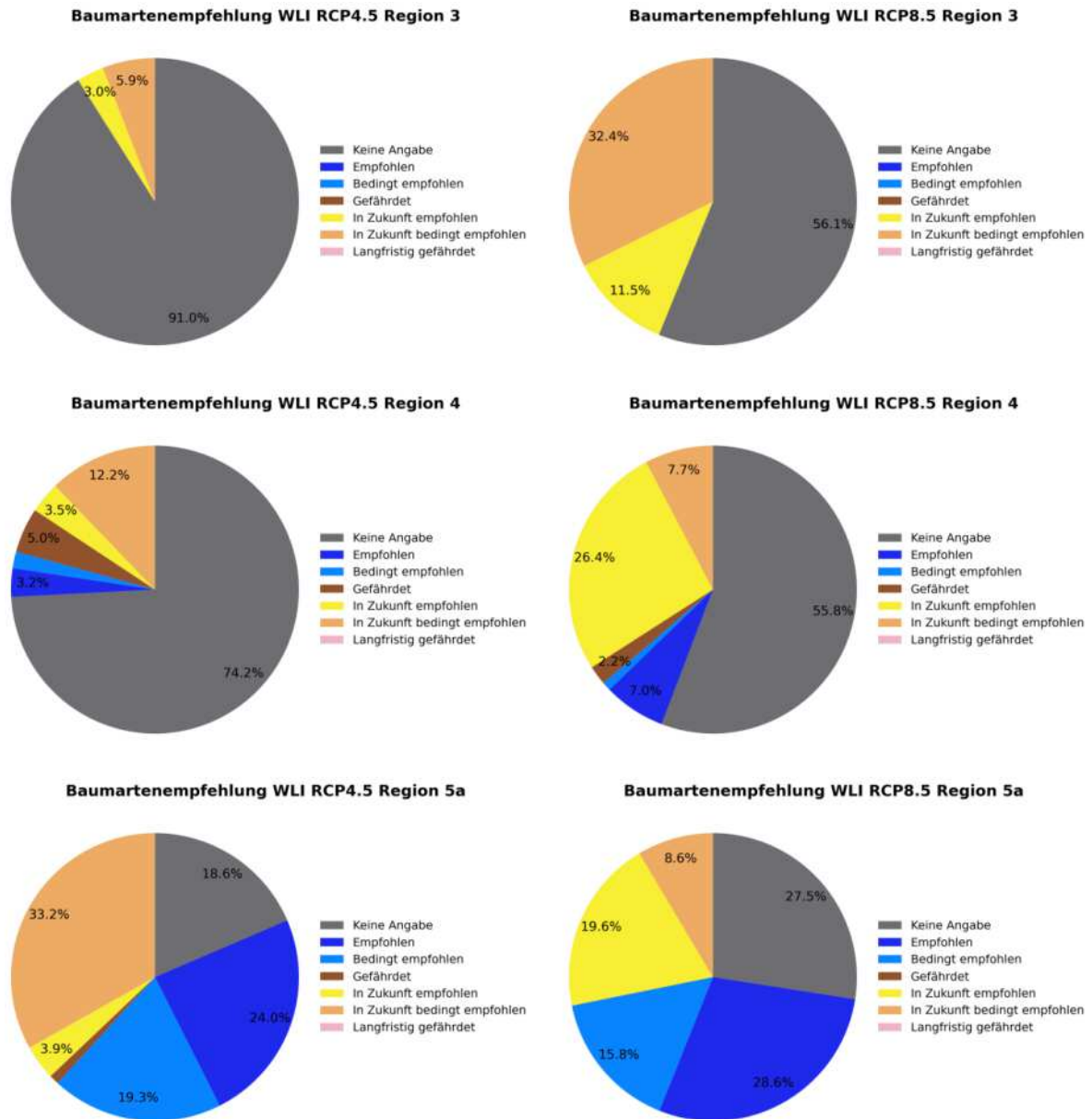


Abb. 34: Kuchendiagramme der Baumartenempfehlungen, dargestellt am Bsp. der Winterlinde (WLI), pro Standortregion und Klimaszenario (links RCP4.5, mässiger Klimawandel; rechts RCP8.5, starker Klimawandel; Periode 2070-2099). Legende Standortregionen siehe Abb. 2 und Abb. 3. Informationen zu den Kategorien siehe Tab. 9.

3.2.2 Klimasensitive Standorte

3.2.2.1 Schweizweite Übersicht

Zu den klimasensitiven Standorten gibt es je einen Layer für RCP4.5 (Abb. 35) und RCP8.5 (Abb. 36) für die Periode 2070-2099.

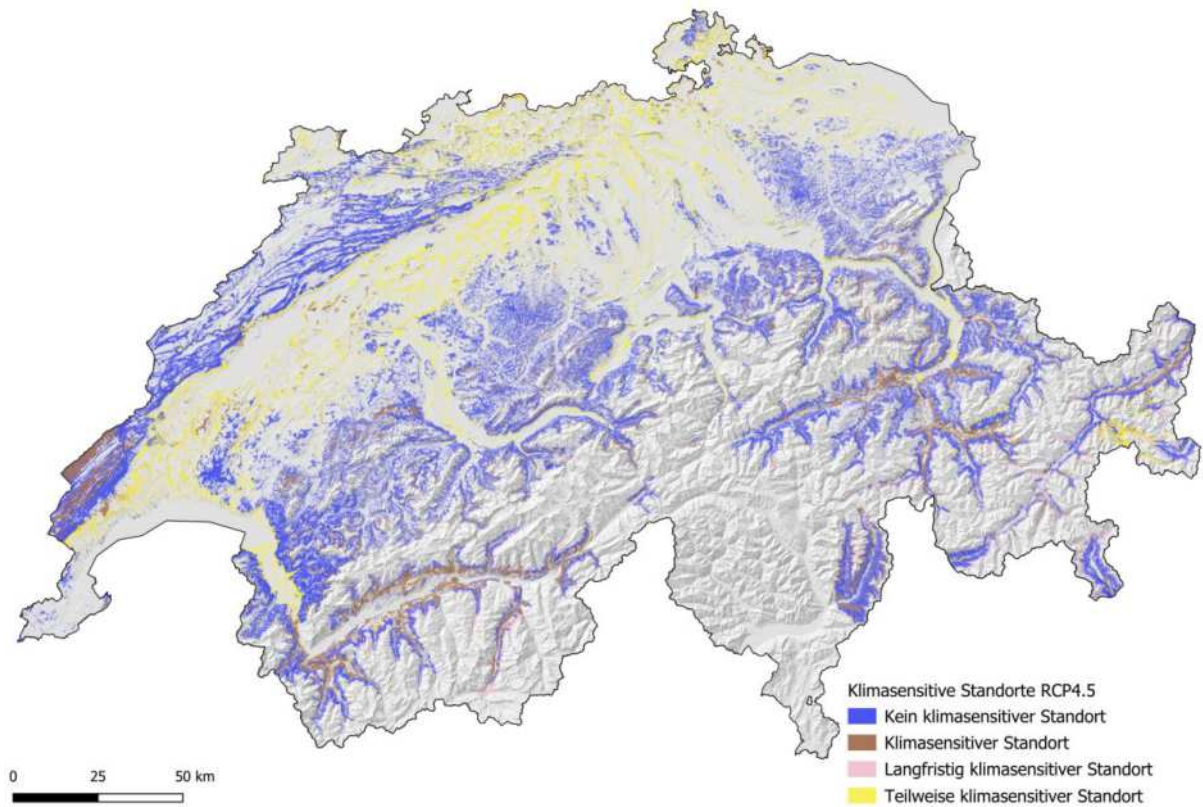


Abb. 35: Karte der klimasensitiven Standorte für das Klimaszenario RCP4.5 (mässiger Klimawandel), Periode 2070-2099. Detaillierte Angaben zu Kategorien siehe Tab. 13.

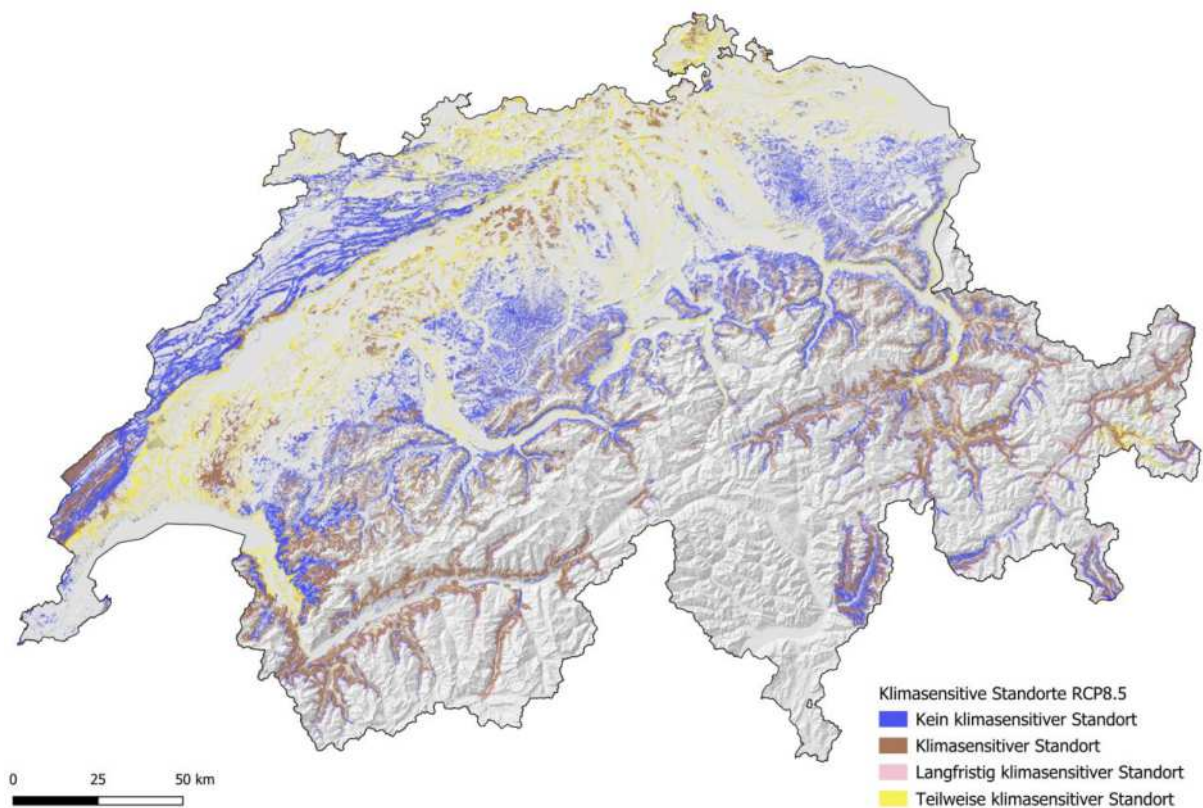


Abb. 36: Karte der klimasensitiven Standorte für das Klimaszenario RCP8.5 (starker Klimawandel), Periode 2070-2099. Detaillierte Angaben zu Kategorien siehe Tab. 13.

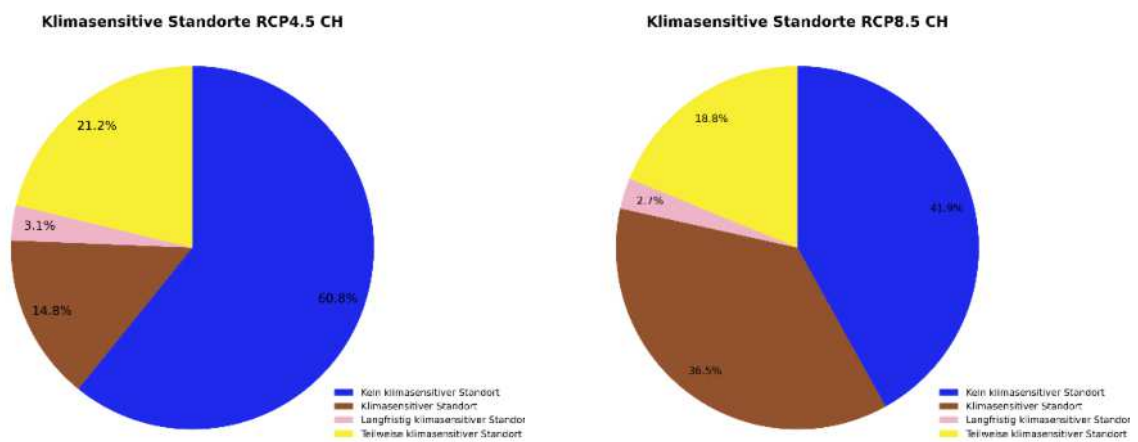


Abb. 37: Kuchendiagramme der klimasensitiven Standorte pro Klimaszenario (links RCP4.5, mässiger Klimawandel; rechts RCP8.5, starker Klimawandel; Periode 2070-2099, gesamte Schweiz). Detaillierte Angaben zu Kategorien siehe Tab. 13.

Beim Szenario eines mässigen Klimawandels (RCP4.5, Periode 2070-2099; Abb. 35) entstehen v.a. in den höchsten Lagen klimasensitive Standorte – dies, da in den höchsten Lagen nur noch einzelne Baumarten vorkommen, was bei einem Ausfall einer Baumart zu grösseren Problemen führen würde (fehlende Ersatzbaumarten). Hingegen gibt es in den tieferen Lagen wegen der hohen Baumartenvielfalt nur wenige klimasensitive Standorte. Bei starkem Klimawandel (RCP8.5, Periode 2070-2099; Abb. 36) sind auch grossflächig heutige Fichtenwaldgebiete im Flyschgebiet in den nördlichen Randalpen sowie in den kontinentalen Hochalpen als sensitiv klassiert - es gibt nur noch eine kleine Schnittmenge zwischen den Baumarten des heutigen Standorttyps und des zukünftigen Standorttyps – das heisst,

die meisten Baumarten, die in Zukunft dort erwartet werden, fehlen heute (z.B. die Buche nördlich der Alpen sowie Eichen und Linden inneralpin).

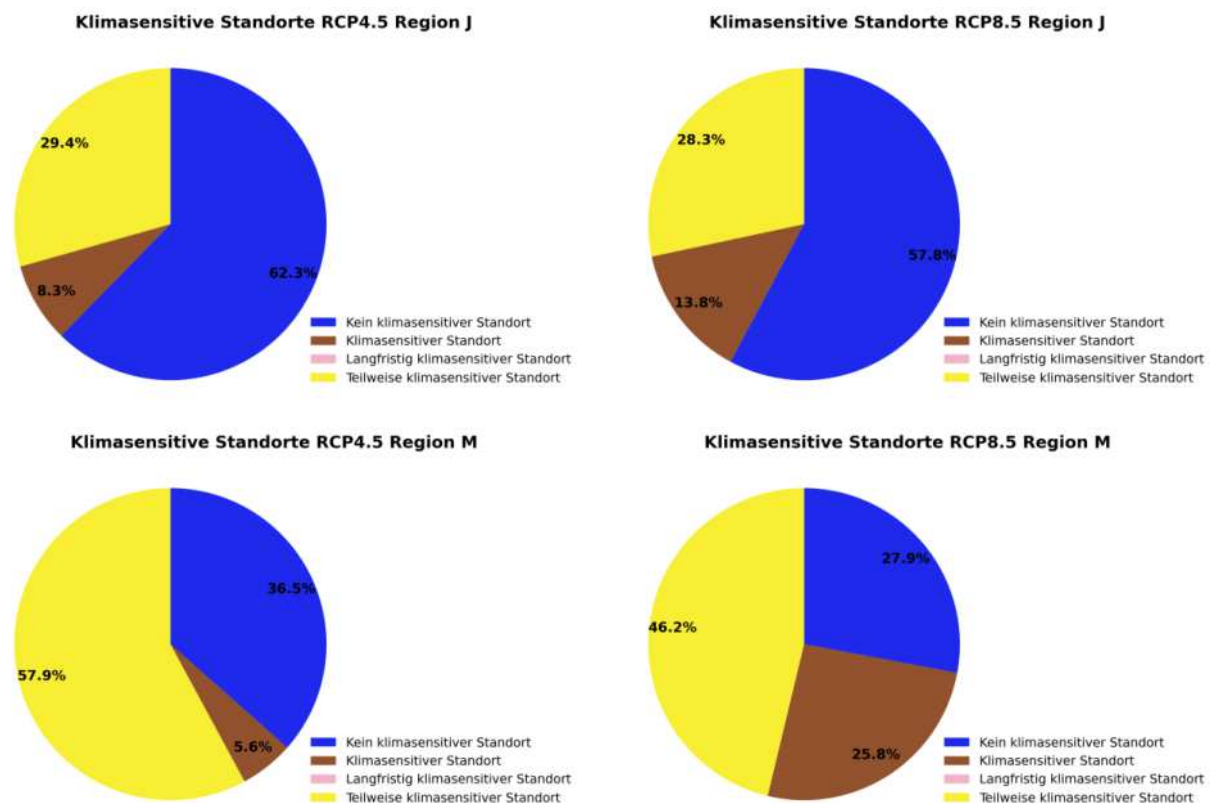
Grosse klimasensitive Flächen entstehen, wenn die heutige hochmontane und subalpine Stufe in Zukunft zur sub- oder untermontanen Stufe wechseln, diese Fälle sind bei RCP8.5 deutlich häufiger als bei RCP4.5, dies ist auch in Tab. 23 ersichtlich.

Tab. 23: Flächenverteilung (relative Flächenangaben zur gesamten Waldfläche der kantonalen Waldstandortkarten) der klimasensitiven Standorte in der Schweiz. Detaillierte Angaben zu den Kategorien siehe Tab. 13.

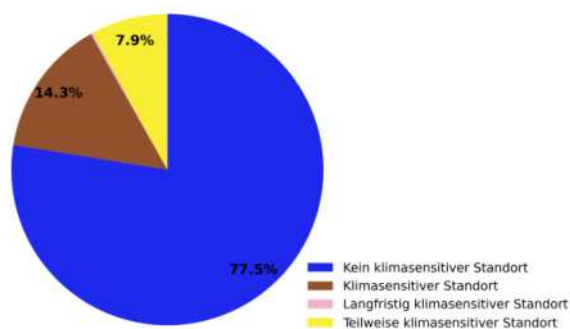
Legende	RCP4.5 [km ²]	RCP4.5 [%]	RCP8.5 [km ²]	RCP8.5 [%]
Kein klimasensitiver Standort	6215	60.8	4284	42.0
Klimasensitiver Standort	1514	14.8	3735	36.5
Langfristig klimasensitiver Standort	320	3.1	279	2.7
Teilweise klimasensitiver Standort	2170	21.2	1921	18.8
Flächen ohne Zuteilung (fehlende Inputdaten)	653		653	

3.2.2.2 Übersicht nach Standortregionen

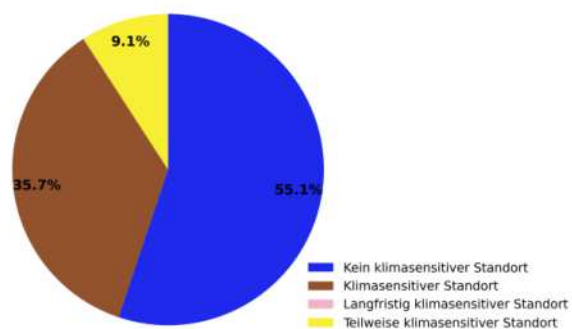
Bei den folgenden Abbildungen werden die Standortregionen der Schweiz (Abb. 2 und Abb. 3) wie folgt abgekürzt: Legende Standortregionen: J = Jura, M = Mittelland, 1 = Nördliche Randalpen, 2a = Nördliche Zwischenalpen mit Buche und mit Tanne, 2b = Nördliche Zwischenalpen ohne Buche und mit Tanne, 2c = Nördliche Zwischenalpen ohne Buche und ohne Tanne, 3 = Kontinentale Hochalpen, 4 = Südliche Zwischenalpen ohne Tanne (4a) / mit Tanne (4b), 5a = Südliche Randalpen mit Fichte.



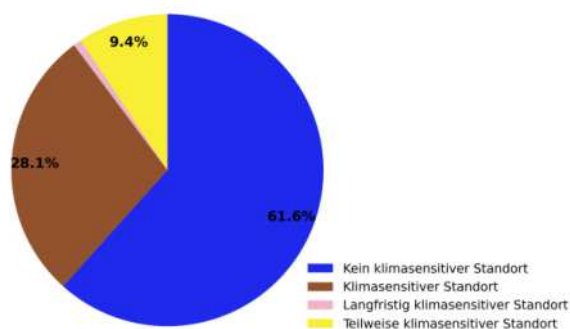
Klimasensitive Standorte RCP4.5 Region 1



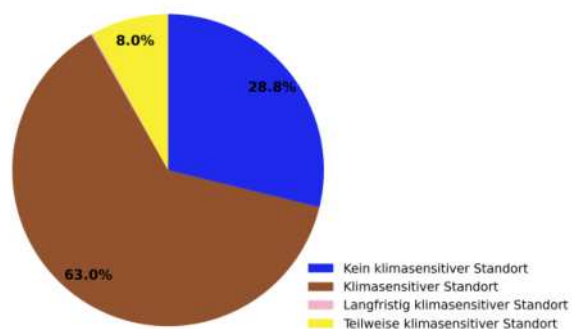
Klimasensitive Standorte RCP8.5 Region 1



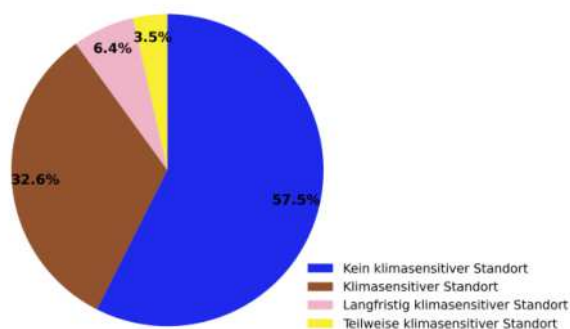
Klimasensitive Standorte RCP4.5 Region 2a



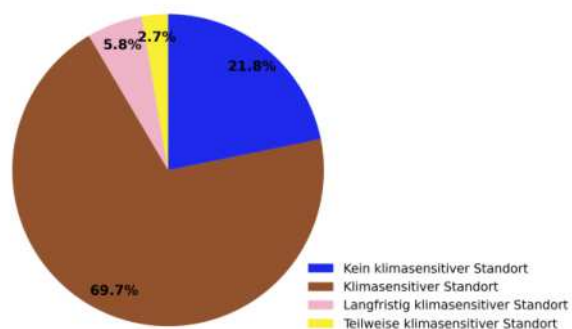
Klimasensitive Standorte RCP8.5 Region 2a



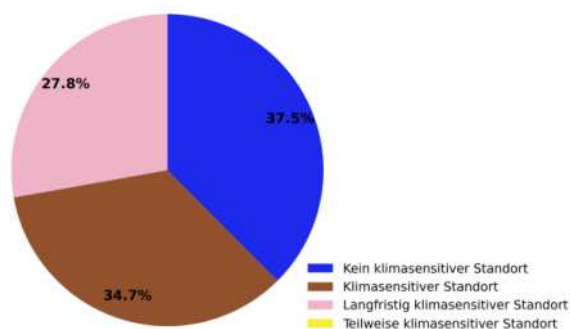
Klimasensitive Standorte RCP4.5 Region 2b



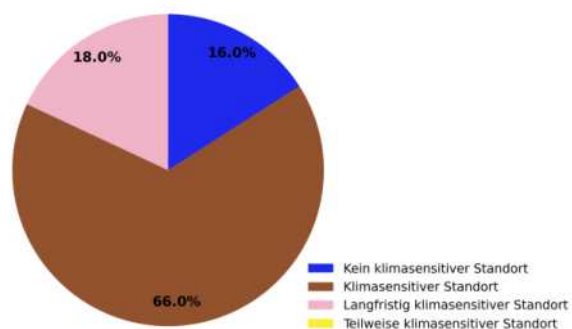
Klimasensitive Standorte RCP8.5 Region 2b



Klimasensitive Standorte RCP4.5 Region 2c



Klimasensitive Standorte RCP8.5 Region 2c



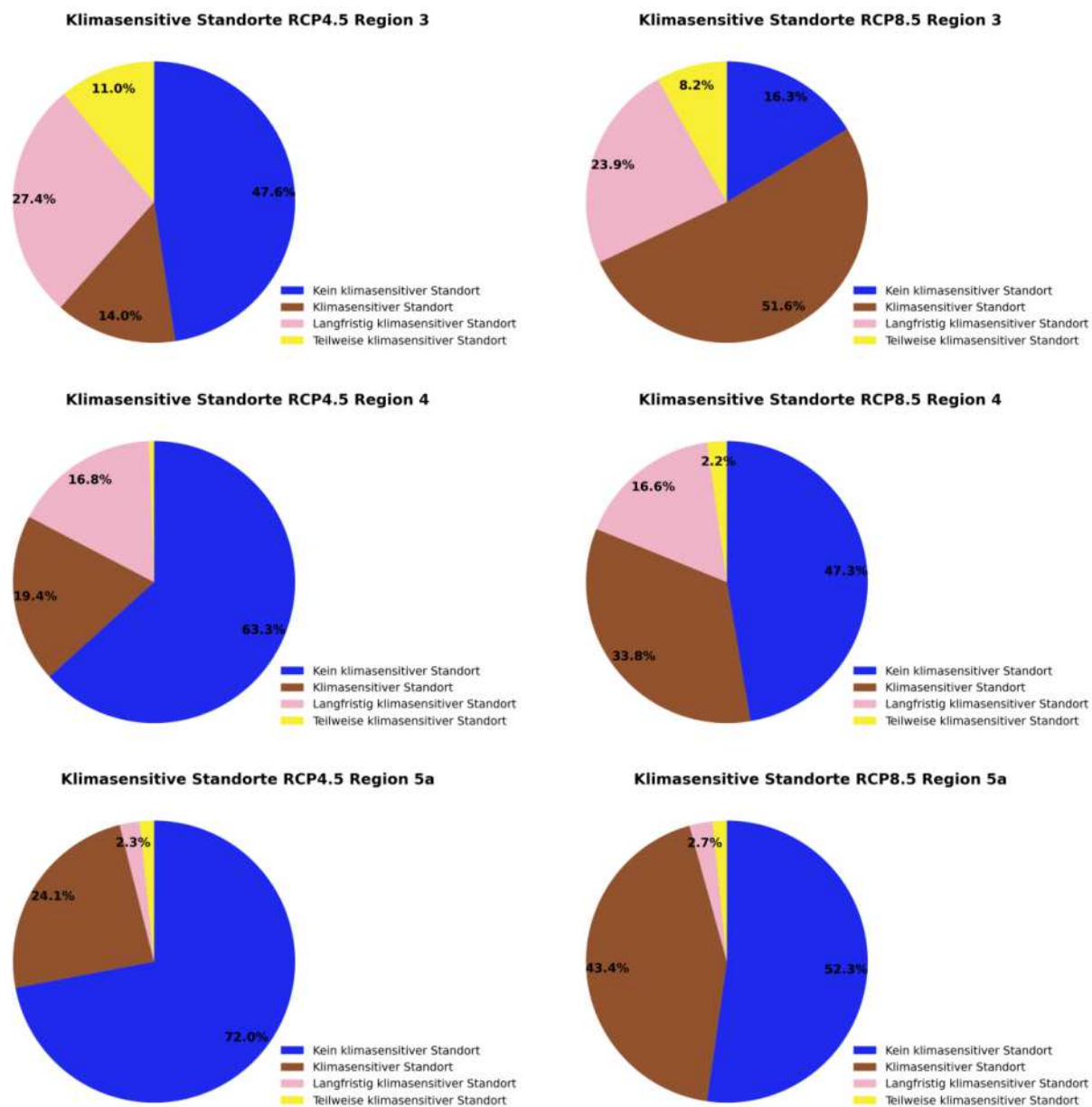


Abb. 38: Kuchendiagramme der klimasensitiven Standorte pro Klimaszenario (links RCP4.5, mässiger Klimawandel; rechts RCP8.5, starker Klimawandel; Periode 2070-2099, pro Standortregion). Legende Standortregionen siehe Abb. 2 und Abb. 3. Detaillierte Angaben zu Kategorien siehe Tab. 13.

Tab. 24: Flächenverteilung der klimasensitiven Standorte pro Standortregion für Klimaszenario RCP4.5 (mässiger Klimawandel) und RCP8.5 (starker Klimawandel), Periode 2070-2099. Detaillierte Angaben zu den Kategorien der klimasensitiven Standorte siehe Tab. 13. %-Anteile: Relative Flächenangaben zur gesamten Waldfläche der kantonalen Waldstandortkarten pro Standortregion. Legende Standortregionen siehe Abb. 2 und Abb. 3.

Standort-region	Kategorie sensativer Standort	Klimasensitivität RCP4.5, Fläche [km ²]	Klimasensitivität RCP4.5, Fläche [%]	Klimasensitivität RCP8.5, Fläche [km ²]	Klimasensitivität RCP8.5, Fläche [%]
J	Kein klimasensitiver Standort	1136	62.3	1054	57.8
	Klimasensitiver Standort	151	8.3	252	13.8
	Teilweise klimasensitiver Standort	536	29.4	517	28.3
M	Kein klimasensitiver Standort	762	36.5	583	27.9
	Klimasensitiver Standort	117	5.6	538	25.8
	Teilweise klimasensitiver Standort	1207	57.9	965	46.2
1	Kein klimasensitiver Standort	2672	77.5	1900	55.1
	Klimasensitiver Standort	492	14.3	1231	35.7
	Langfristig klimasensitiver Standort	9	0.3	1	0.0
	Teilweise klimasensitiver Standort	273	7.9	314	9.1
2a	Kein klimasensitiver Standort	229	61.6	107	28.8
	Klimasensitiver Standort	105	28.1	234	63.0
	Langfristig klimasensitiver Standort	3	0.8	1	0.2
	Teilweise klimasensitiver Standort	35	9.4	30	8.0
2b	Kein klimasensitiver Standort	829	57.5	315	21.8
	Klimasensitiver Standort	470	32.6	1005	69.7
	Langfristig klimasensitiver Standort	93	6.4	83	5.8
	Teilweise klimasensitiver Standort	51	3.5	39	2.7
2c	Kein klimasensitiver Standort	2	37.5	1	16.0
	Klimasensitiver Standort	2	34.7	3	66.0
	Langfristig klimasensitiver Standort	1	27.8	1	18.0
3	Kein klimasensitiver Standort	272	47.6	93	16.3
	Klimasensitiver Standort	80	14.0	296	51.6
	Langfristig klimasensitiver Standort	157	27.4	137	23.9
	Teilweise klimasensitiver Standort	63	11.0	47	8.2
4	Kein klimasensitiver Standort	201	63.3	150	47.3
	Klimasensitiver Standort	61	19.4	107	33.8
	Langfristig klimasensitiver Standort	53	16.8	53	16.6
	Teilweise klimasensitiver Standort	2	0.6	7	2.2

Standort-region	Kategorie sensativer Standort	Klimasensitivität RCP4.5, Fläche [km ²]	Klimasensitivität RCP4.5, Fläche [%]	Klimasensitivität RCP8.5, Fläche [km ²]	Klimasensitivität RCP8.5, Fläche [%]
5a	Kein klimasensitiver Standort	112	72.0	81	52.3
	Klimasensitiver Standort	37	24.1	68	43.4
	Langfristig klimasensitiver Standort	4	2.3	4	2.7
	Teilweise klimasensitiver Standort	3	1.6	3	1.6
Schweiz	Kein klimasensitiver Standort	6215	60.8	4284	41.9
	Klimasensitiver Standort	1514	14.8	3735	36.5
	Langfristig klimasensitiver Standort	320	3.1	279	2.7
	Teilweise klimasensitiver Standort	2170	21.2	1921	18.8

3.2.2.3 Erwartete Dynamik auf klimasensitiven Standorten

Auf den klimasensitiven Standorten dominiert heute keine Baumart, die in Zukunft als dominante oder wichtige beigemischte Baumart erwartet wird und es sind heute höchstens zwei wichtige beigemischte Baumarten vorhanden, die in Zukunft als dominante oder wichtige beigemischte Baumart erwartet werden. Die Baumarten, die heute gedeihen, können aus unterschiedlichen Gründen in der Zukunft nicht mehr erwartet werden. **Beispiele zu den wichtigsten Auswirkungen der Höhenstufenverschiebungen sind in den nachfolgenden Tabellen zu finden:**

Kein klimasensitiver Standort:

Tab. 25: Die wichtigsten Auswirkungen der Höhenstufenverschiebung: Kein Klimasensitiver Standort.

Höhenstufe heute	Höhenstufe Zukunft	Anteil an berücksichtigter Waldfläche in % bei RCP4.5	Anteil an berücksichtigter Waldfläche in % bei RCP8.5	Erwartete Auswirkungen
subalpin	hochmontan	7	3	klein
	obermontan	2		
hochmontan	hochmontan	6		
	obermontan	4		
obermontan	untermontan	5		
obermontan	submontan	12	17	
untermontan	submontan	19	16	

Klimasensitiver Standort:

Tab. 26: Die wichtigsten Auswirkungen der Höhenstufenverschiebung: Klimasensitiver Standort.

Höhenstufe heute	Höhenstufe Zukunft	Anteil an berücksichtigter Waldfläche in % bei RCP4.5	Anteil an berücksichtigter Waldfläche in % bei RCP8.5	Erwartete Auswirkungen
subalpin	hochmontan	1		Mittel, kontinuierlicher Wechsel von Bergföhre zu Waldföhre
	obermontan	1		
	submontan		3	Gross, wegen Störungen (z. B. Buchdruckerbefall, Trockenstress) nicht kontinuierlicher Wechsel von Fichte zu Buchen-, Linden- oder Eichenmischwäldern
	kollin		1	
hochmontan	submontan	1	7	Sehr gross, wegen Störungen (z. B. Buchdruckerbefall, Trockenstress) nicht kontinuierlicher rascher Wechsel von Fichte zu Buchen-, Linden- oder Eichenmischwäldern
	kollin	4	9	
obermontan	submontan	2	4	Mittel (falls viel Tanne) bis sehr gross (falls viel Fichte). Mit viel Tanne kontinuierlicher Wechsel und mit viel Fichte wegen Störungen (z. B. Buchdruckerbefall, Trockenstress) nicht kontinuierlicher, rascher Wechsel von Tanne und Fichte zu Buchenmischwäldern
untermontan	kollin	1	4	Gross, wegen Störungen (z. B. Trockenstress) nicht kontinuierlicher Wechsel von Buchenmischwald zu Linden- oder Eichenmischwäldern
submontan	kollin	1	4	

Langfristig klimasensitiver Standort:

Tab. 27: Die wichtigsten Auswirkungen der Höhenstufenverschiebung: Langfristig klimasensitiver Standort.

Höhenstufe heute	Höhenstufe Zukunft	Anteil an berücksichtigter Waldfläche in % bei RCP4.5	Anteil an berücksichtigter Waldfläche in % bei RCP8.5	Erwartete Auswirkungen
obersubalpin	hochmontan	2	2	Mittel, kontinuierlicher Wechsel von Arve oder Lärche zu Fichte
subalpin	hochmontan	1	1	Mittel, kontinuierlicher Wechsel von Arve zu Fichte

Teilweise klimasensitiver Standort:

Tab. 28: Die wichtigsten Auswirkungen der Höhenstufenverschiebung: Teilweise klimasensitiver Standort.

Höhenstufe heute	Höhenstufe Zukunft	Anteil an berücksichtigter Waldfläche in % bei RCP4.5	Anteil an berücksichtigter Waldfläche in % bei RCP8.5	Erwartete Auswirkungen
submontan	submontan	16	8	Mittel, Buche bleibt stark, Konkurrenz durch andere Laubbäume nimmt zu
	kollin	3	9	Mittel, wegen Störungen (z. B. Trockenstress) nicht kontinuierlicher Wechsel von Buche zu Linden- oder Eichenmischwäldern möglich, viele zukünftigen Laubbäume können aber heute schon gut gedeihen.

3.2.3 Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte

3.2.3.1 Vergleich Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichten mit TBkFR und LFI

Um das Vorgehen gemäss Kap. 2.2.5.2 zu prüfen, wurde eine Sensitivitätsanalyse zu den Schwellenwerten (Fichtenanteil pro Bestand) ausgeführt (Tab. 29). Am Beispiel der Bestandeskarte des Kantons Freiburg wurden die Annahmen am Fichtenanteil zwischen zwei Varianten verglichen. Die Variante „TBkFR“ ist dabei der Benchmark. Die TBk weist den Fichtenanteil direkt für jedes Bestandespolygon aus. Bei der Variante „LFI“ wird der Fichtenanteil aus den LFI-Erhebungen abgeleitet. Hier ist der Fichtenanteil am Nadelholzanteil für jede Höhenstufe bekannt. Diese Variante hat damit einen über den Kanton und jeweilige Höhenstufe gemittelten Fichtenanteil, und nicht einen pro Bestandespolygon gemittelten Fichtenanteil.

Tab. 29: Zusammenstellung der Ergebnisse der Sensitivitätsstudie zu den Schwellenwerten (Kap. 2.2.5.2). „Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte nach LFI“, Anteil an Gesamtfläche des Waldes im Kanton FR. Bei der TBkFR ergeben die Summen weniger als 100%, da die Flächen etwas kleiner sind als die Flächen der „Karte der Baumartenempfehlungen, dargestellt am Bsp. der Fichte im Klimaszenario RCP4.5 (mässiger Klimawandel), Periode 2070-2099“ und der „Karte der Baumartenempfehlungen, dargestellt am Bsp. der Fichte im Klimaszenario RCP4.5 (mässiger Klimawandel), Periode 2070-2099“.

Variante:	Nicht klimasensitiv [% vom Anteil der Gesamtwaldfläche FR]	Schwach klimasensitiv [% vom Anteil der Gesamtwaldfläche FR]	Mittel klimasensitiv [% vom Anteil der Gesamtwaldfläche FR]	Stark klimasensitiv [% vom Anteil der Gesamtwaldfläche FR]
RCP4.5 LFI	25.65	48.25	11.81	14.29
RCP4.5 TBkFR	29.18	25.58	13.22	19.06
RCP8.5 LFI	14.8	47.83	17.18	20.2
RCP8.5 TBkFR	22.64	23.26	15.78	25.31

Der Vergleich zeigt, dass die vereinfachte Version mit LFI im Vergleich zu TBkFR mit den detaillierteren Grundlagen die „Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte“ unterschätzt. Die grössten Unterschiede zeigen sich in der Kategorie „schwach klimasensitiv“, die kleinsten in der Klasse „mittel klimasensitiv“. Im Projekt wurde der Waldmischungsgrad anstatt direkt vom LFI von TBk übernommen, was eine leichte Verbesserung ergibt.

3.2.3.2 Schweizweite Übersicht

Die Karte der Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte resultiert aus dem Verschnitt der Karte „Baumartenempfehlungen, dargestellt am Bsp. der Fichte“ (Abb. 21 und Abb. 22) mit dem Nadelholzanteil pro TBk-Bestand (Berechnung des Fichtenanteils siehe Kap. 2.2.5.2). Auch hier gibt es einen Layer für RCP4.5 und RCP8.5. Um genauere Informationen zur Ursache der Klimasensitivität zu erhalten, kann bei jeder Fläche im GIS die „Baumartenempfehlung Klimawandel“ mit den vergleichbaren Informationen wie in der Tree App abgerufen werden.

Tab. 30: Kategorien der Karte (GIS-Layer) der Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte.

Kategorie	Definition / Kartenlegende
-999	keine Angabe (keine Baumartenempfehlung)
0	nicht klimasensitiv
1	schwach klimasensitiv
2	mittel klimasensitiv
3	stark klimasensitiv

Nachfolgend werden Karten der Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte für die Klimaszenarien RCP4.5 (mässiger Klimawandel) und RCP8.5 (starker Klimawandel; beide Periode 2070-2099) einander gegenübergestellt. Bei den Karten der „Klimasensitivität der Bestände bezüglich Fichte“ (Abb. 39 und Abb. 40) zeigt sich, dass auch beim mässigen Klimawandel bereits viele Bestände als schwach bis stark klimasensitiv gelten, beim starken Klimawandel ist dies noch stärker der Fall. Beim mässigen Klimawandel gelten die Bestände in den höheren Lagen noch als „nicht klimasensitiv“, beim stärkeren Klimawandel gelten zunehmend auch diese Bestände als „stark klimasensitiv“. Auch hier zeigt sich, dass nicht die tiefen Lagen grossflächig klimasensitive Bestände aufweisen, sondern eher die hohen Lagen mit wenigen oder fehlenden Ersatzbaumarten. In den tiefen Lagen sind zwar Wälder mit grösseren Fichtenanteilen gefährdet, aufgrund der vielen Ersatzbaumarten fällt dies hingegen weniger ins Gewicht.

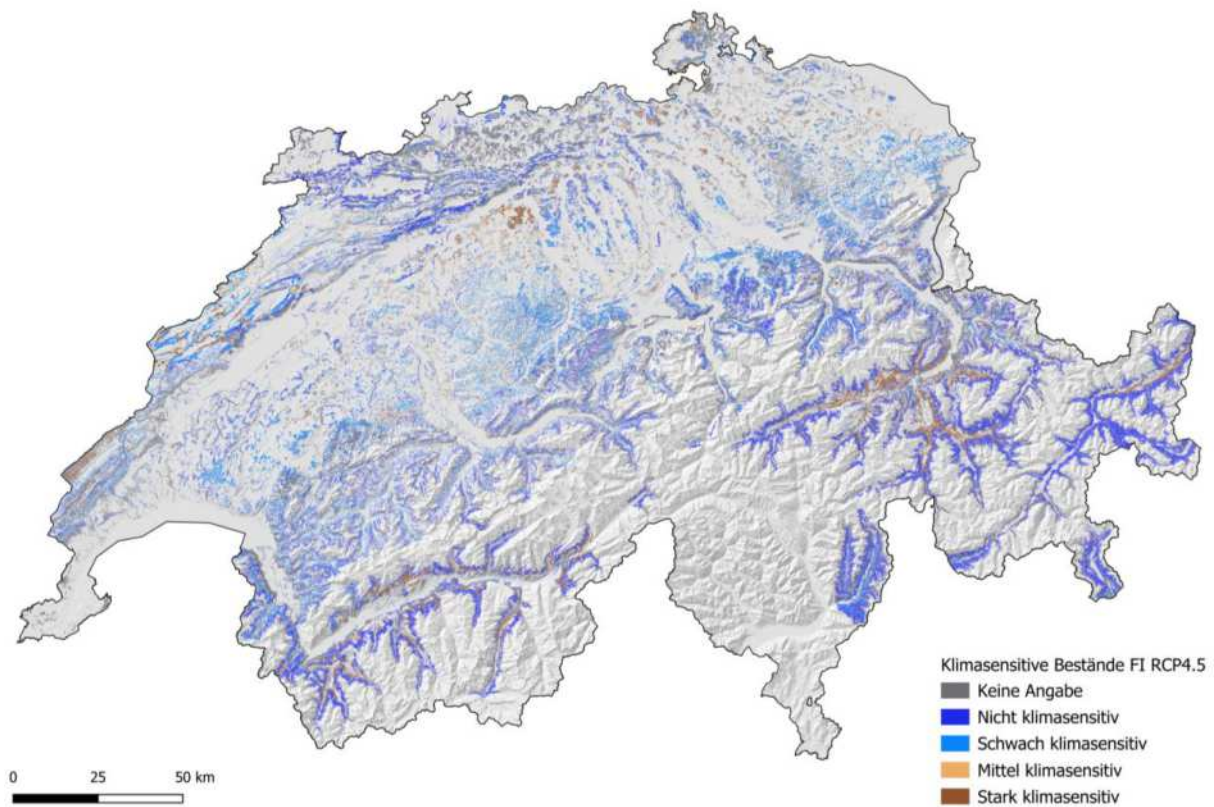


Abb. 39: Karte der Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte für das Klimaszenario RCP4.5 (mässiger Klimawandel), Periode 2070-2099. Detaillierte Angaben zu Kategorien siehe Tab. 16.

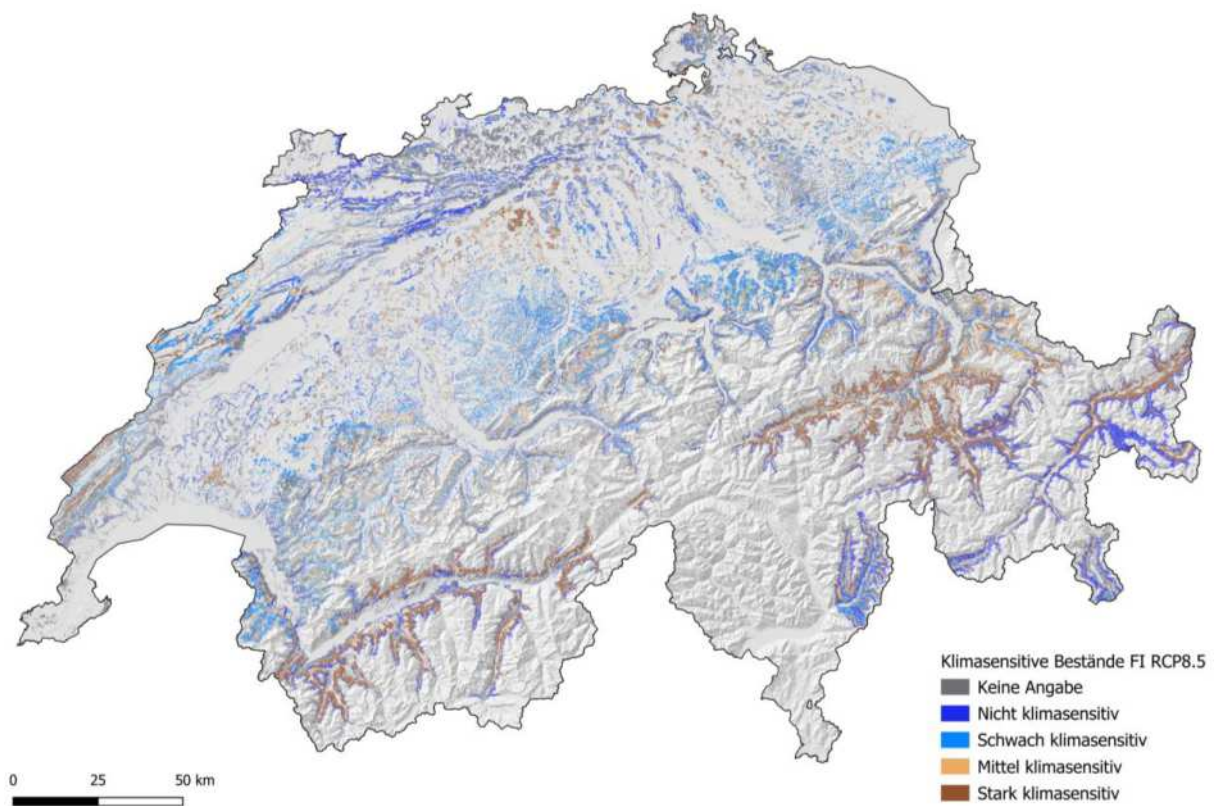


Abb. 40: Karte der Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte für das Klimaszenario RCP8.5 (starker Klimawandel), Periode 2070-2099. Detaillierte Angaben zu Kategorien siehe Tab. 16.

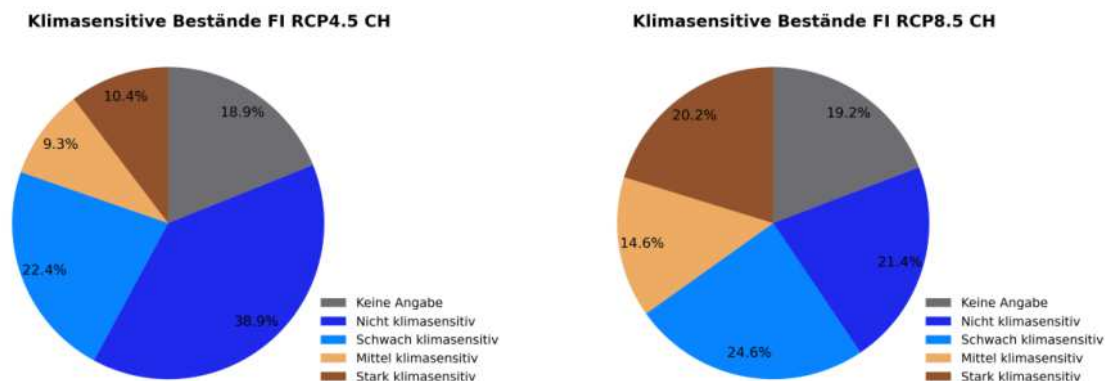
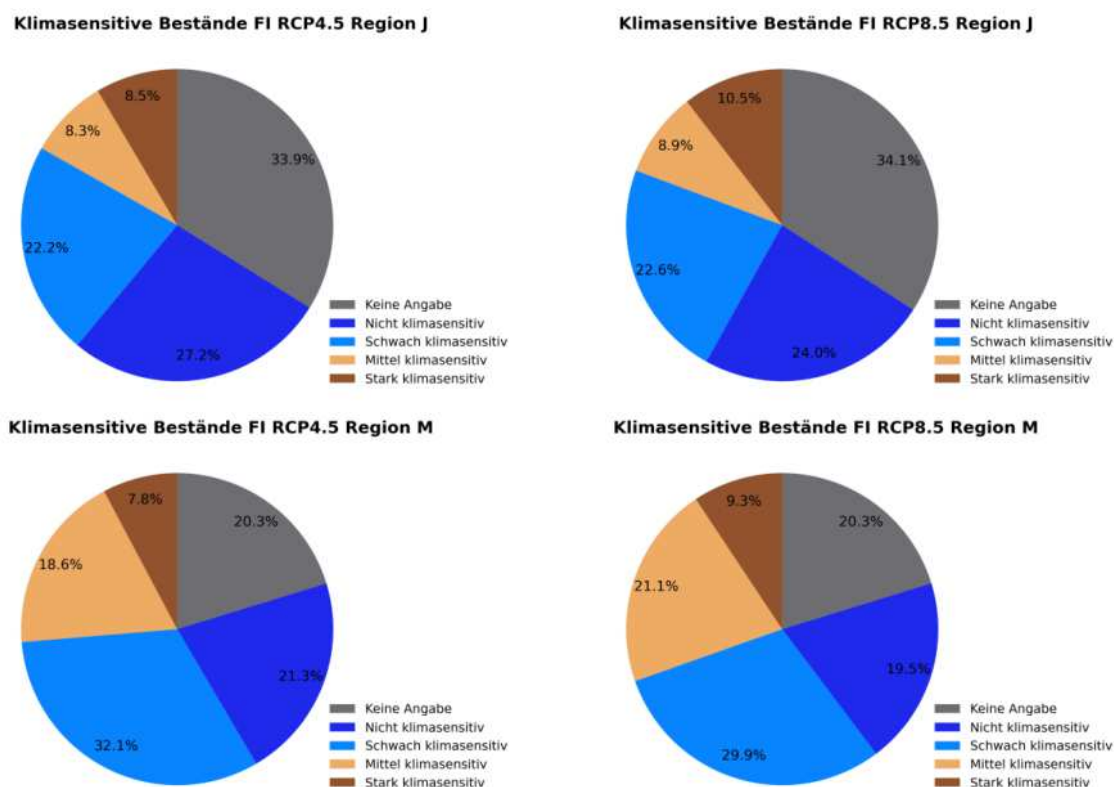


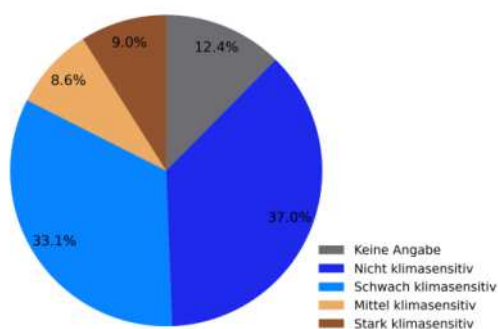
Abb. 41: Kuchendiagramme der Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte (FI) pro Klimaszenario (links RCP4.5, mässiger Klimawandel; rechts RCP8.5, starker Klimawandel; Periode 2070-2099, gesamte Schweiz). Detaillierte Angaben zu Kategorien siehe Tab. 16.

3.2.3.3 Übersicht nach Standortregionen

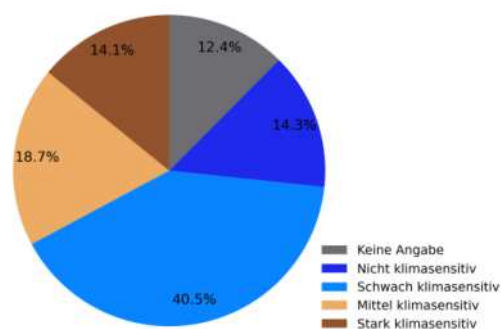
Bei den folgenden Abbildungen werden die Standortregionen der Schweiz (Abb. 2 wie folgt abgekürzt: Legende Standortregionen: J = Jura, M = Mittelland, 1 = Nördliche Randalpen, 2a = Nördliche Zwischenalpen mit Buche und mit Tanne, 2b = Nördliche Zwischenalpen ohne Buche und mit Tanne, 2c = Nördliche Zwischenalpen ohne Buche und ohne Tanne, 3 = Kontinentale Hochalpen, 4 = Südliche Zwischenalpen ohne Tanne (4a) / mit Tanne (4b), 5a = Südliche Randalpen mit Fichte.



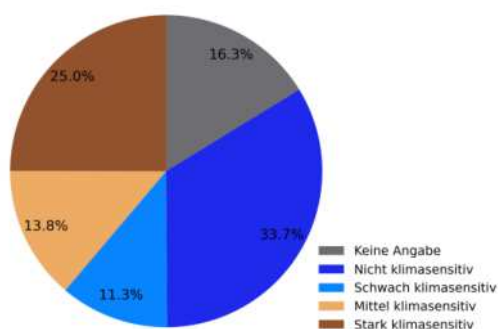
Klimasensitive Bestände FI RCP4.5 Region 1



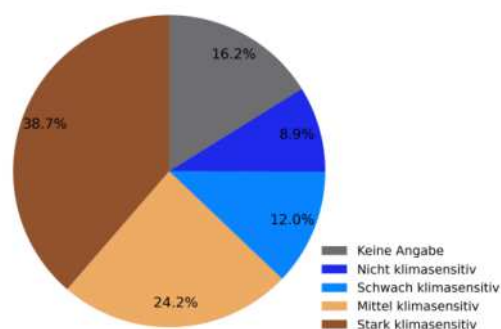
Klimasensitive Bestände FI RCP8.5 Region 1



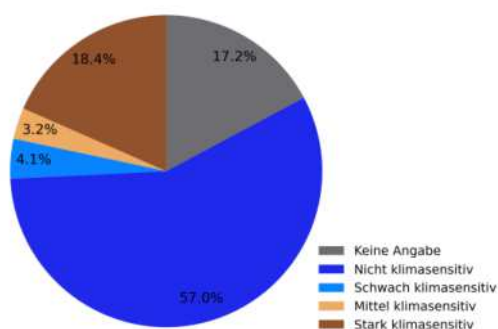
Klimasensitive Bestände FI RCP4.5 Region 2a



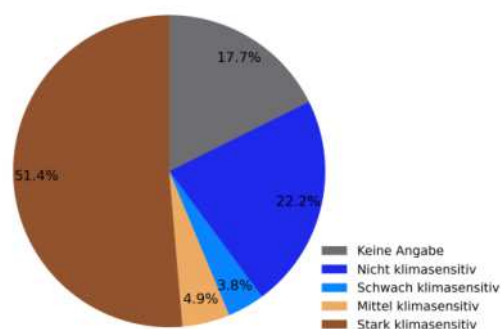
Klimasensitive Bestände FI RCP8.5 Region 2a



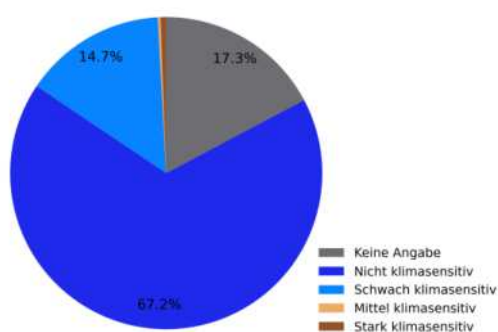
Klimasensitive Bestände FI RCP4.5 Region 2b



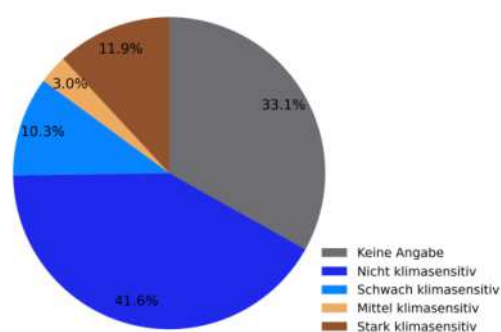
Klimasensitive Bestände FI RCP8.5 Region 2b



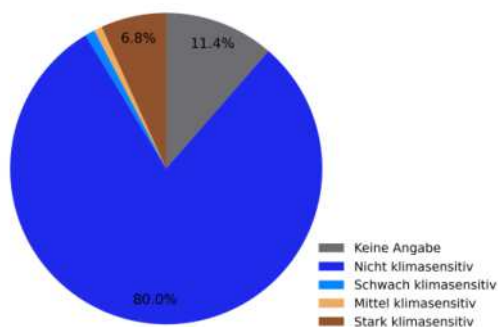
Klimasensitive Bestände FI RCP4.5 Region 2c



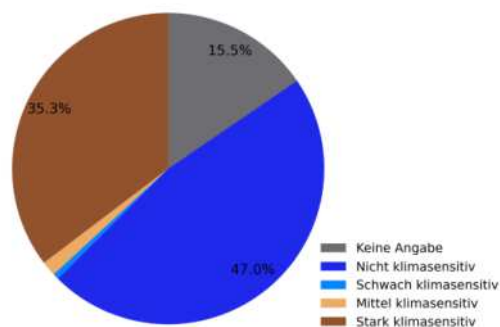
Klimasensitive Bestände FI RCP8.5 Region 2c



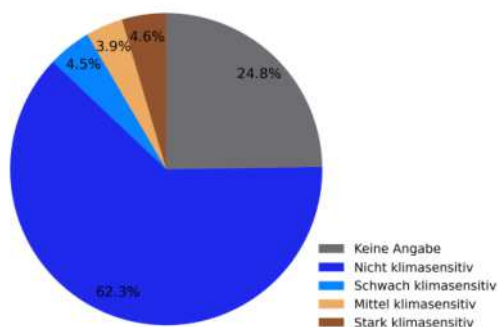
Klimasensitive Bestände FI RCP4.5 Region 3



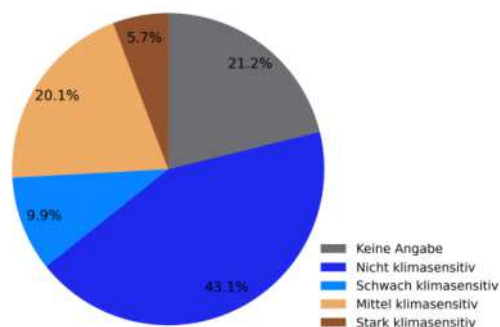
Klimasensitive Bestände FI RCP8.5 Region 3



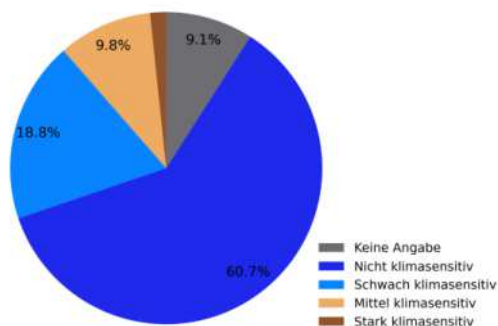
Klimasensitive Bestände FI RCP4.5 Region 4



Klimasensitive Bestände FI RCP8.5 Region 4



Klimasensitive Bestände FI RCP4.5 Region 5a



Klimasensitive Bestände FI RCP8.5 Region 5a

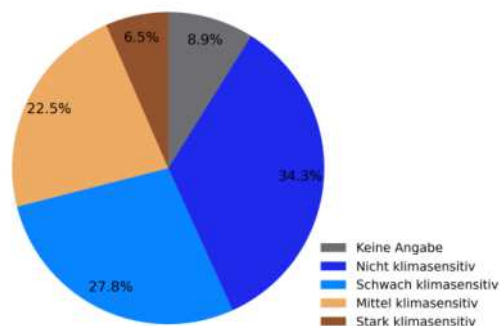


Abb. 42: Kuchendiagramme der Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte pro Klimaszenario RCP4.5 (links RCP4.5, mässiger Klimawandel; rechts RCP8.5, starker Klimawandel; Periode 2070-2099, pro Standortregion). Legende Standortregionen siehe Abb. 2. Detaillierte Angaben zu Kategorien siehe Tab. 16.

Tab. 31: Flächenverteilung (relative Flächenangaben zur gesamten Waldfläche der kantonalen Waldstandortkarten) der Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte pro Standortregion und Klimaszenario RCP4.5 (mässiger Klimawandel) und RCP8.5 (starker Klimawandel), Periode 2070-2099. Legende Standortregionen siehe Abb. 2 und Abb. 3. Detaillierte Angaben zu den Kategorien der klimasensitiven Standorte siehe Tab. 16.

Standort-region	Kategorie Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte	Klimasensitivität RCP4.5, Fläche [km ²]	Klimasensitivität RCP4.5, Fläche [%]	Klimasensitivität RCP8.5, Fläche [km ²]	Klimasensitivität RCP8.5, Fläche [%]
J	keine Angabe	473	33.9	473	34.1
	nicht klimasensitiv	379	27.2	332	24.0
	schwach klimasensitiv	310	22.2	313	22.6
	mittel klimasensitiv	116	8.3	123	8.9
	stark klimasensitiv	119	8.5	145	10.5
M	keine Angabe	336	20.3	336	20.3
	nicht klimasensitiv	353	21.3	323	19.5
	schwach klimasensitiv	533	32.1	496	29.9
	mittel klimasensitiv	308	18.6	350	21.1
	stark klimasensitiv	129	7.8	155	9.3
1	keine Angabe	312	12.4	311	12.4
	nicht klimasensitiv	933	37.0	357	14.3
	schwach klimasensitiv	833	33.1	1012	40.5
	mittel klimasensitiv	216	8.6	468	18.7
	stark klimasensitiv	226	9.0	353	14.1
2a	keine Angabe	53	16.3	52	16.2
	nicht klimasensitiv	109	33.7	29	8.9
	schwach klimasensitiv	37	11.3	39	12.0
	mittel klimasensitiv	45	13.8	78	24.2
	stark klimasensitiv	81	25.0	125	38.7
2b	keine Angabe	218	17.2	223	17.7
	nicht klimasensitiv	721	57.0	281	22.2
	schwach klimasensitiv	52	4.1	49	3.8
	mittel klimasensitiv	41	3.2	62	4.9
	stark klimasensitiv	233	18.4	649	51.4
2c	keine Angabe	1	17.3	1	33.1
	nicht klimasensitiv	3	67.2	2	41.6
	schwach klimasensitiv	1	14.7	0	10.3
	mittel klimasensitiv	0	0.3	0	3.0
	stark klimasensitiv	0	0.6	0	11.9

Standort-region	Kategorie Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte	Klimasensitivität RCP4.5, Fläche [km ²]	Klimasensitivität RCP4.5, Fläche [%]	Klimasensitivität RCP8.5, Fläche [km ²]	Klimasensitivität RCP8.5, Fläche [%]
3	keine Angabe	56	11.4	76	15.5
	nicht klimasensitiv	394	80.0	232	47.0
	schwach klimasensitiv	5	1.0	3	0.6
	mittel klimasensitiv	4	0.8	8	1.5
	stark klimasensitiv	33	6.8	174	35.3
4	keine Angabe	66	24.8	57	21.2
	nicht klimasensitiv	166	62.3	115	43.1
	schwach klimasensitiv	12	4.5	26	9.9
	mittel klimasensitiv	10	3.9	54	20.1
	stark klimasensitiv	12	4.6	15	5.7
5a	keine Angabe	12	9.1	12	8.9
	nicht klimasensitiv	82	60.7	47	34.3
	schwach klimasensitiv	25	18.8	38	27.8
	mittel klimasensitiv	13	9.8	30	22.5
	stark klimasensitiv	2	1.7	9	6.5
Schweiz	keine Angabe	1527	18.9	1541	19.2
	nicht klimasensitiv	3140	38.9	1716	21.4
	schwach klimasensitiv	1808	22.4	1976	24.6
	mittel klimasensitiv	753	9.3	1173	14.6
	stark klimasensitiv	835	10.4	1626	20.2

3.2.4 Berücksichtigung der Bestandesstruktur

Nachfolgend wird ein Ausschnitt der Karte „Sensitive Standorte“ und der Karte „Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte“ mit dem Strukturlayer (TBk, BFH & HAFL) überlagert.

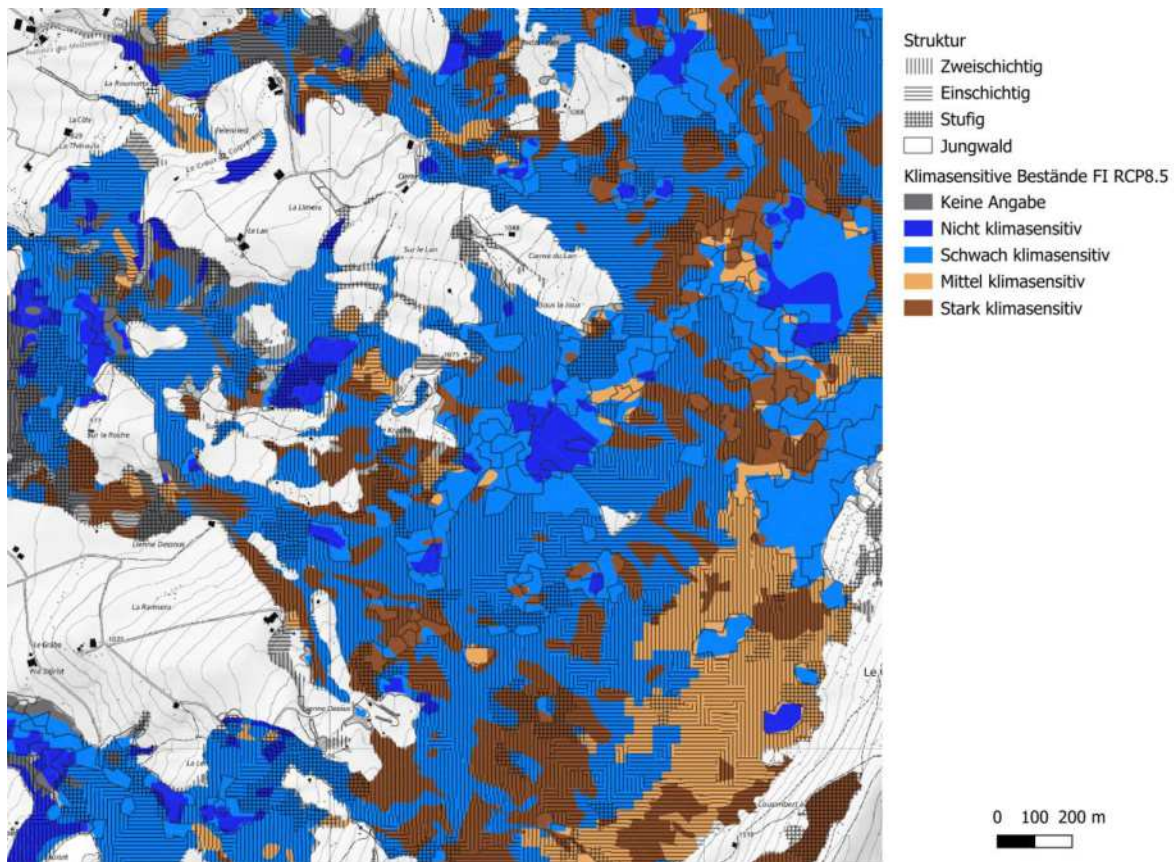


Abb. 43: Ausschnitt mit Überlagerung der beiden Karten „Strukturlayer (TBk)“ und „Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte“ für das Klimaszenario RCP4.5 (mässiger Klimawandel), Periode 2070-2099“. Detaillierte Angaben zu Kategorien siehe Tab. 16.

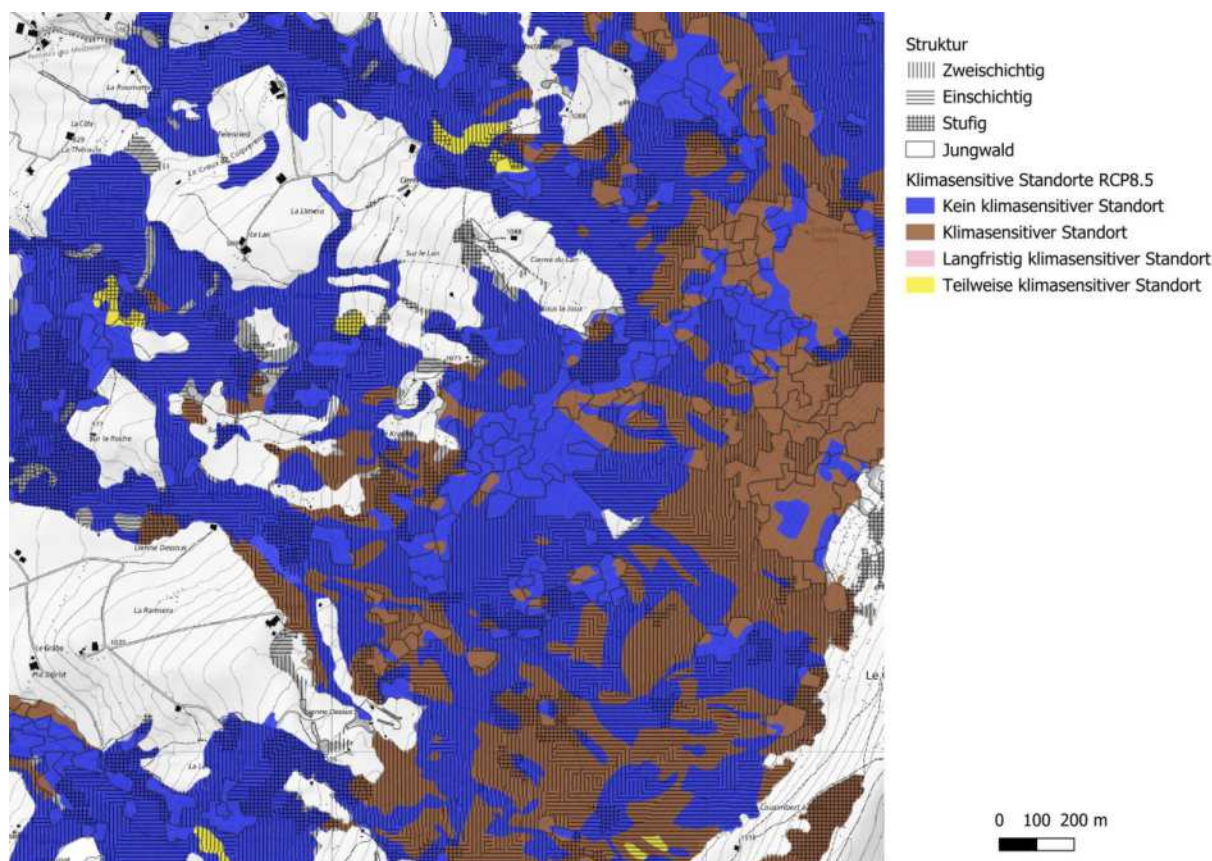


Abb. 44: Ausschnitt mit Überlagerung der beiden Karten „Strukturlayer (TBk)“ und „Karte der klimasensitiven Standorte für das Klimaszenario RCP8.5 (starker Klimawandel), Periode 2070-2099“. Detaillierte Angaben zu Kategorien siehe Tab. 16.

Je nach Ausgangssituation kann eine stufige Struktur die Anpassung an den Klimawandel erleichtern oder erschweren, siehe folgende Beispiele.

Beispiele Auswirkung Klimawandel mit tragbarem Wildeinfluss:

Tab. 32: Beispiele bezüglich des Einflusses der Bestandesstruktur auf die Anpassungsfähigkeit der Waldbestände auf den Klimawandel (Annahme: tragbarer Wildeinfluss).

Ausgangssituation			
Pfäfers, 50 Typischer Hochstauden-Tannen-Fichtenwald, Schutzwald, heute hochmontan, 2070-2099 bei mäßigem Klimawandel obermontan und starkem Klimawandel submontan			
Bestand	Struktur	Optionen für Anpassung Klimawandel	Anpassung an Klimawandel
Geschlossener Tannen-Fichtenbestand ohne Verjüngung.	einschichtig	Bei grösserflächigem Windwurf/Käferschaden starke Abnahme der Schutzwirkung. Falls genügend stabile Bäume vorhanden sind, kann der Bestand mit Eingriffen aufgelockert werden, so dass sich viel Tannen- und etwas Fichtenverjüngung einstellt.	erschwert
Stufiger Tannen-Fichtenbestand mit Gruppenplenterung, mit viel Tannenverjüngung, etwas Fichten- und Vogelbeerverjüngung und einzelnen Buchen in der Strauchschicht.	stufig	Bei grösserflächigem Windwurf/Käferschaden Abnahme der Schutzwirkung, die schon vorhandene Verjüngung entwickelt sich rasch. Die Naturverjüngung ist gemischt, mit viel Tanne, aber auch Fichte und Vogelbeere. Die Buche entwickelt sich mit der Erwärmung immer besser. Mit Eingriffen kann die Baumartenmischung gut gesteuert werden.	gut möglich

Tab. 33: Beispiele bezüglich des Einflusses der Bestandesstruktur auf die Anpassungsfähigkeit der Waldbestände auf den Klimawandel (Annahme: tragbarer Wildeinfluss).

Ausgangssituation			
Fiesch, 55 Ehrenpreis-Fichtenwald, Schutzwald, heute hochmontan, 2070-2099 bei mässigem und starkem Klimawandel kollin			
Bestand	Struktur	Optionen für Anpassung Klimawandel	Anpassung an Klimawandel
Geschlossener Fichtenbestand ohne Verjüngung. Samenbäume von anderen Baumarten als Fichte weit entfernt	einschichtig	Bei grösserflächigem Windwurf/Käferschaden starke Abnahme der Schutzwirkung, die Verjüngung von Pionierbaumarten erfolgt wegen mangelnden Samenbäumen verzögert. In Naturverjüngung dominiert Fichte. Auch bei Eingriffen dominiert Fichte in der Verjüngung.	erschwert
Aufgelockerter Fichtenbestand mit Verjüngung von Fichte, Birke, Vogelbeere, Salweide und Kirschbaum	zweischichtig	Bei grösserflächigem Windwurf/Käferschaden Abnahme der Schutzwirkung, die schon vorhandene Verjüngung entwickelt sich rasch und dazu kommt weitere Verjüngung der schon vorhandenen Baumarten. Die Naturverjüngung ist gemischt, mit viel Birke, Vogelbeere, Salweide, Fichten und Kirschbaum. Mit Eingriffen kann die Baumartenmischung gut gesteuert werden.	gut möglich

Tab. 34: Beispiele bezüglich des Einflusses der Bestandesstruktur auf die Anpassungsfähigkeit der Waldbestände auf den Klimawandel (Annahme: tragbarer Wildeinfluss).

Ausgangssituation			
Lausanne, 7a Typischer Waldmeister Tannen- Buchenwald, Holzproduktion, heute submontan, 2070-2099 bei mässigem und starkem Klimawandel kollin			
Bestand	Struktur	Optionen für Anpassung Klimawandel	Anpassung an Klimawandel
Geschlossener Buchenbestand ohne Verjüngung	einschichtig	Mit der Öffnungsgrösse beim Eingriff kann gesteuert werden, welche Baumarten gut gedeihen können. Auch Lichtbaumarten können gut verjüngt (und gepflanzt) werden	gut möglich
Stufiger Buchenbestand mit klassischem Dauerwaldbetrieb mit viel Buchenverjüngung	stufig	Die Buchenverjüngung ist eine starke Konkurrenz für die Verjüngung von anderen Baumarten, auch wenn auf grösserflächige Eingriffe gewechselt wird.	erschwert

3.2.5 Fazit

Die Analysen zeigen, dass im RCP4.5 Szenario (mässiger Klimawandel, Periode 2070-2099, Abb. 37, links) ca. 61% der untersuchten Waldflächen keine klimasensitiven Standorte, ca. 21% teilweise klimasensitive Standorte, ca. 3% langfristig klimasensitive Standorte und ca. 15% klimasensitive Standorte sind. Im RCP8.5 Szenario (starker Klimawandel, Periode 2070-2099, Abb. 37, rechts) reagieren ca. 42% der untersuchten Waldflächen nicht, ca. 19% teilweise, ca. 3% langfristig und ca. 36% sensitiv gegenüber dem Klimawandel. Die heutigen Bestände sind im Szenario RCP4.5 gemäss berechneten Analysen zu 39% nicht, zu 22% schwach, zu 9% mittel und zu 10% stark klimasensitiv bezüglich der Fichte (Abb. 41, links). Im Szenario RCP8.5 sind die heutigen Bestände zu 21% nicht, zu 25% schwach, zu 15% mittel und zu 20% stark klimasensitiv bezüglich der Fichte (Abb. 41, rechts).

4 Diskussion und Schlussfolgerungen aus Sicht der AutorInnen

4.1 Kritische Würdigung der Resultate

4.1.1 Aussagekraft der Resultate

Durch die Eruierung von klimasensitiven Standorten und Beständen ist eine grossflächige, nachvollziehbare Sichtweise möglich. Zusammen mit anderen Planungsgrundlagen können mögliche Problemzonen erkannt und mögliche Prioritäten gesetzt werden.

Die Methode / Vorgehensweise hat sich bewährt und ist inzwischen mehrfach erprobt (Frehner et al. 2021a, Frehner et al. 2021b, Huber & Zischg 2022). Die Schwellenwerte für die Eruierung der „Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte“ sind gemäss Experteneinschätzung überzeugend, weder zu pessimistisch, noch zu optimistisch. Da aber noch einige Inputdaten unvollständig (kantonale Kartierungen), in Überarbeitung (NaiS-Grundlagen, Kap. 2.2.2.3) oder erst nach Projektabschluss veröffentlicht worden sind (neue Klimaszenarien CH2025), sind die Ergebnisse einerseits noch nicht flächig vorhanden (fehlende Gebiete in den Kantonen VS, UR, ZG, JU und TI) oder weisen Flächen mit keinen Daten bei den neu bei NaiS eingeführten Einheiten auf (Kap. 2.2.2.3). Da inzwischen auch die Baumartenmatrix von Frehner & Zürcher-Gasser 2019 (neu Teil von BAFU [Hrsg.], in Erarbeitung) geändert hat (konnte nicht mehr einbezogen werden, Kap. 1.4.4) und es wahrscheinlich ziemliche Abweichungen bei CH2025 gegenüber CH2018 ergeben wird – empfehlen die AutorInnen ein Downscaling der CH2025-Szenarien (gemäss Remund et al. 2020) und auf die Ergebnisse von NaiS (v.a. Ergänzung der Projektionswege, BAFU [Hrsg.], in Erarbeitung) zu warten und dann die Modellierung der Baumartenempfehlungen, klimasensitiven Standorte und Bestände nochmals neu zu rechnen. Aus Sicht der AutorInnen wäre gut, wenn dies möglichst bald erfolgen würde, bevor die Ergebnisse durch die Kantone weiter verwendet werden – nicht, dass aufgrund der unterschiedlichen Klimaszenarien (CH2025, CH2018) zwei verschiedene Versionen bestehen.

4.1.2 Limitationen

Wir zeigen auf, welche Standorttypen in Zukunft bei den gewählten Klimaszenarien am Ende des Jahrhunderts erwartet werden und leiten mit dem Vergleich zum heute vorhandenen Standorttyp Baumartenempfehlungen ab. Welches Klimaszenario eintreten wird, wie sich die Situation bei den häufigeren Extremwetterereignissen entwickeln wird und wie schnell sich das Baumartenportfolio ändern wird, ist ungewiss. Die Modellierung kann als Entscheidungshilfe genutzt werden. Das Modell ist nur so gut wie die verwendeten Inputdaten – je besser die Klimaszenarien werden und je mehr für den Wald relevante Klimagrössen einfließen und berechnet werden, je besser werden die Ergebnisse. Die Ergebnisse zeigen nicht auf, wo in Zukunft z.B. Buchenbestände überleben werden, sondern wo die klimatischen Bedingungen für die Baumarten auch in Zukunft noch gegeben sein sollten (evtl. auch

erst bei der Folgeverjüngung – mit jungen Bäumen mit tieferreichenderem Wurzelsystem oder solchen, die physiologisch besser an Trockenheit angepasst sind).

Stark mitentscheidend wird ein tragbarer Wildtiereinfluss sein (Kupferschmid & Frei, 2025) – wenn das Aufkommen von wichtigen Zukunftsbaumarten nicht in ausreichender Menge möglich ist, könnte es auch zu einer verzögerten Bestandesüberführung oder einer Verbuschungsphase kommen.

Die Forschungsergebnisse stellen eine wissenschaftliche Grundlage dar. Die Ergebnisse berücksichtigen die Waldfunktionen nicht und beinhalten keine Dringlichkeitsbewertung. Weitere Forschung ist benötigt, um die Massnahme H2M3 des Bundesratsberichts „Anpassung des Waldes an den Klimawandel“ (BAFU 2022) umzusetzen und einen konkreten waldbaulichen Handlungsbedarf abzuleiten.

4.2 Einbindung Toolkit Bestandeskartierung

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde entschieden, dass die Bestandesstruktur nur zur Visualisierung verwendet werden soll. Dies, da es Fälle gibt, in denen viel Struktur günstig ist für die Anpassung an den Klimawandel und es Fälle gibt, in denen homogene Bestände günstig sind für die Anpassung an den Klimawandel. Die Bestandesstruktur kann jedoch als Zusatzinformation verwendet werden, durch Einblendung als zusätzlicher Layer. Die Bestandesstruktur wurde nicht in die Berechnung der sensitiven Bestände mit einbezogen, da der Mehrwert der Struktur als begrenzt eingeschätzt wird und als schwierig interpretierbar. Die Struktur sollte man differenziert betrachten und sie sollte evtl. in möglichen weiteren Schritten nach Projektabschluss weiter untersucht werden. Die Aufnahme der Struktur in der Bewertung sollte allenfalls in einem späteren Schritt (kantonal) weiterverfolgt werden.

4.3 Umkehrschluss von klimasensitiven Standorten und Beständen zu angepassten und resilienten Standorten und Bestände

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde zudem untersucht, in welcher Form ein „Umkehrschluss“ – eine Übersicht der (aus heutiger Sicht) „klimafitten Bestände“ („angepasste und resiliente Bestände“) – möglich ist bzw. sein soll (evtl. auch unterteilt in verschiedene Kategorien). Dies wäre möglich, wenn Informationen zu wichtigen Baumarten vorhanden wären (wie bei Kt. GR, AG, FR, ZH) – bei diesen Kantonen wäre es möglich, eine Gesamtsensitivität zu berechnen. Als angepasst und resilient könnten jene Bestände gelten, welche bei allen Baumarten keine hohe Sensitivität haben, somit „nicht klimasensitiv“ oder „schwach klimasensitiv“ sind (unabhängig vom Deckungsgrad der Baumarten). Die in diesem Forschungsprojekt entwickelte und verwendete Methode ist nicht darauf abgestimmt. Wenn man einen Umkehrschluss machen möchte, müsste man die Methode anpassen.

4.4 Fazit

Diese Modellierungen zeigen, wo bei den gewählten Klimaszenarien in der Zukunft (Periode 2070-2099) **ähnliche klimatische Bedingungen vorherrschen wie heute** und leiten daraus Baumartenempfehlungen ab. Welches Klimaszenario eintreten wird und wie schnell sich das Baumartenportfolio ändern wird, ist ungewiss.

Allgemein gilt, dass die Höhenstufenmodelle eher auf Standorte mit mittlerer Feuchtigkeit ausgerichtet sind als auf Extremstandorte, die sehr trocken oder nass sind. In Kombination mit weiteren Hilfsmitteln, wie den Ökogrammen, sollte aber bei diesem Genauigkeitsgrad eine „Vorhersage“ an vielen Orten funktionieren. Es wurden die wichtigsten klimatischen Parameter erkannt.

Durch das Ermitteln von klimasensitiven Standorten und Beständen ist eine grossflächige nachvollziehbare Sichtweise möglich. Zusammen mit anderen Planungsgrundlagen können mögliche Problemzonen erkannt und Prioritäten gesetzt werden. Die Klimaveränderung bis zum Ende des Jahrhunderts ist

nicht sicher vorhersagbar. Vor allem die Annahmen zum zukünftigen Ausstoss von Treibhausgasen (Emissionsszenarien) machen Vorhersagen unsicher, insbesondere bezüglich Niederschlag und Trockenheit. Die komplexe Topografie in den Alpen beeinflusst die Ergebnisse zusätzlich. Es ist möglich, dass eine Baumart an einem Ort weiterhin überleben kann, ihre Wüchsigkeit aber wegen vermehrter Trockenheit abnimmt. Das bedeutet, dass diese Bäume in der Oberschicht vermutlich Vitalitätsverluste erleiden werden, die Verjüngung aber noch gedeihen kann und Folgebestände eine geringere Oberhöhe erreichen. Bei wenig bis keiner Übereinstimmung zwischen den heute vorhandenen Baumarten und den in Zukunft als geeignet erwarteten Baumarten, muss vermehrt damit gerechnet werden, dass bei klimatischen Extremereignissen innert kurzer Zeit grössere Ausfälle entstehen. Mit einer hohen Vielfalt von geeigneten Baumarten (mindestens als Samenbaum) steigt die Resilienz. Das heisst, die Wahrscheinlichkeit, dass nach Störungen Baumarten vorhanden sind, die sich natürlich verjüngen können und dass sich neue Waldbestände selbständig in passender Baumartenzusammensetzung bilden, wird grösser. Immer entscheidender wird sein, ob unter dem Schirm der Altbestände bereits genügend Vorverjüngung aufkommen konnte, damit der Wettlauf mit der Konkurrenzvegetation auf Schadflächen / Freiflächen möglichst von kurzer Dauer ist und der Vorsprung im Höhenwachstum bereits genügend gross ist. Dazu sollte die Vorverjüngung zum richtigen Zeitpunkt waldbaulich gefördert werden. Voraussetzung dazu sind tragbare Wildbestände, die eine hohe Baumartenvielfalt in der Verjüngung erlauben.

Eine hohe Baumartenvielfalt ist auch wichtig, um Ausfälle zu ersetzen, falls in Zukunft weitere Baumarten krankheitsbedingt fast komplett ausfallen würden, wie z.B. in den letzten Jahren die Esche. Die krankheitsgefährdeten Baumarten (Esche, Bergulme, Feldulme und Kastanie) wurden in Absprache mit Waldschutz Schweiz ausgeschieden. Diese werden beim Ermitteln von klimasensitiven Standorten gesondert berücksichtigt. Es ist möglich, dass in Zukunft weitere Baumarten als „krankheitsgefährdet“ betrachtet werden.

Wichtig bleiben das beobachtende Auge und der Sachverstand der Bewirtschaftenden. **Die Standortkunde sollte künftig in allen forstlichen Ausbildungsgängen einen höheren Stellenwert erhalten.** Sie sollte auch bodenkundliche Grundlagen enthalten und Klimakunde vermitteln, damit die FörsterInnen der Zukunft die rasanten Änderungen in unserer Umwelt besser meistern.

Die Klimasensitivität heutiger Bestände konnte bisher nur bezüglich der Fichte gerechnet werden und der Fichtenanteil am Nadelholzanteil wurde mit LFI-Daten pro Kanton und Höhenstufe geschätzt. Sobald qualitativ gute Karten mit Baumartenanteilen vorhanden sind, kann dasselbe auch für andere Baumarten gerechnet werden und allenfalls zu einer Gesamtsensitivität zusammengefasst werden. Hierzu fehlen aber zurzeit noch verlässliche Inputdaten. Die Fichte ist sicher die relevanteste Baumart bezüglich klimasensitiven Flächen, im Mittelland und Jura könnte die Buche aber auch relevant sein, vor allem dort, wo wegen mangelnder Feuchtigkeit ein Wechsel zur kollinen Stufe erwartet wird.

Wir zeigen auf, welche Standorttypen in Zukunft bei den gewählten Klimaszenarien am Ende des Jahrhunderts erwartet werden und leiten mit dem Vergleich zum heute vorhandenen Standorttyp Baumartenempfehlungen ab. Welches Klimaszenario eintreten wird und wie schnell sich die Baumartenzusammensetzung ändern wird, ist ungewiss. Die Ergebnisse berücksichtigen die Waldfunktionen nicht und beinhalten keine Dringlichkeitsbewertung. Weitere Forschung ist benötigt, um die Massnahme H2M3 des Bundesratsberichts „Anpassung des Waldes an den Klimawandel“ (BAFU 2022) umzusetzen und einen konkreten waldbaulichen Handlungsbedarf abzuleiten. Die Modellierung können die Kantone als Grundlage für Entscheide auf Bestandesebene nutzen, zum Beispiel zusammen mit weiteren Grundlagen (z.B. Schutzwaldausscheidung, Waldschutz-Problemgebiete und Bestandeskartierung) als Hilfe zur Bestimmung der Dringlichkeit für Eingriffe.

5 Ausblick; Empfehlungen aus Sicht der AutorInnen für das weiteres Vorgehen

5.1 Einbindung von neuen CH2025 Klimaszenarien

Im November 2025 erschienen die neuen Klimaszenarien (NCCS 2025). Aus Sicht der AutorInnen wäre wichtig, die Sensi-CH-Modelle mit den neuen CH2025 Szenarien zu aktualisieren. Dazu ist die Erstellung von neuen Höhenstufen CH2025 (dito CH2018, Kap. 2.2.1.1, Zischg et al. 2021) notwendig. Damit die CH2025-Daten für ein Sensi-CH-Update genutzt werden können, sind aus Sicht der AutorInnen mehrere Schritte notwendig:

- Auswahl von Klimaszenarien bzw. Modellläufen durch ein Fachgremium (BAFU/MeteoSchweiz inkl. Waldvertretern), welche künftig für alle Waldprojekte verwendet werden sollen (damit Ergebnisse von verschiedenen Projekten auch in Zukunft miteinander kombinierbar / vergleichbar sind – wie beim Projekt „Wald und Klimawandel“ (siehe Remund et al. 2020).
- Downscaling von den drei ausgewählten Szenarien für die neue Referenzperiode 1991-2020 und die Zukunftsperiode 2070-2099 auf 200 m (siehe Remund et al. 2020).
- Analyse der Anomalien und Delta-Werte (Werte, mit welchen die bestehenden Temperatur- und Niederschlagskarten in die Zukunft gerechnet werden können) zur bisherigen Referenzperiode 1981-2010 (siehe Remund et al. 2020).

Für die Erstellung der neuen Höhenstufen CH2025 sind aus Sicht der AutorInnen noch weitere Produkte und Schritte notwendig:

- Korrektur der aktuellen Höhenstufen (Kap. 2.2.1.1) bei bekannten Schwachstellen. Dazu gehören folgende Arbeiten (in Klammern wird eine Priorisierung bezüglich Notwendigkeit/Dringlichkeit angegeben):
 - Verbesserung der heutigen Höhenstufenkarte mithilfe von neuen Stichproben aus aktuellen Feldkartierungen (Eichung/Validierung; Priorität 1).
 - Einbezug von neuen geologischen Grundlagen (neue harmonisierte Geocover; Priorität 2).
 - Austauschen der Grenzen der Waldstandortregionen (BAFU [Hrsg.], in Erarbeitung) und Neuberechnung der Tannen- und Buchenareale für heute und Zukunft (Priorität 1).
 - Neuberechnung der Höhenstufenkarten für heute und für die Zukunft (mit CH2025), Arrondierung / Homogenisierung (Priorität 1).
- Berechnung der Klimakarten (25m Raster) für die neue Referenzperiode 1991-2020 mit dem Delta-Ansatz (analog zu Remund et al. 2021; detaillierte Angaben, welche Klimakarten pro Höhenstufe sowie für das Buchen- und Tannenareal benötigt werden, befinden sich in Zischg et al. 2021).
- Berechnung der Klimakarten (25m Raster) für die drei Modelle von CH2025, 2070-2099.
- Berechnung von ETA/ETP (Verhältnis aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, Referenzperiode 1991-2020 und CH2025, Periode 2070-2099; Remund et al. 2020).
- Berechnung der oberen Waldgrenze für die neue Referenzperiode 1991-2020 und CH2025, Periode 2070-2099 (Modell vorhanden, Koenz et al. 2019; die obere Waldgrenze muss für alle Szenarien neu gerechnet werden, wenn man die Höhenstufen der Zukunft nicht auf der heutigen Waldgrenze abschneiden möchte).

5.1.1 Einbindung von neuen Grundlagen

Gleichzeitig erscheint es den AutorInnen als wichtig, dass auch weitere, bis dahin möglicherweise abgeschlossene Grundlagen, mit eingebaut werden.

- Projektionspfade mit neuen Einheiten (BAFU [Hrsg.], in Erarbeitung; Kap. 1.4.4).
- neue Baumartenmatrix (BAFU [Hrsg.], in Erarbeitung; Kap. 1.4.4).
- Allfällige neu kartierte Kantonsflächen (VS/ZG/AI/UR/...) sowie Updates der Standort-Hinweiskarten GR und SZ, allfällige Korrekturen bei den Übersetzungen bei den Kantonen.
- Vorlage für die Kantone, wie die Ergebnisse vom Sensi-CH-Projekt praxistauglich aufbereitet / vereinfacht werden können (dito Bsp. SZ, in Bearb.).

Falls bis dahin der Baumartenlayer der WSL (Kap. 2.1.4.3; zumindest Nadelholzkarte) abgeschlossen ist, könnte dieser ebenfalls noch mit einfließen.

Danach könnte aus Sicht der AutorInnen ein Update auch der Tree App (mit den neuen Projektionspfaden, der neuen Baumartenmatrix und den neuen Höhenstufen CH2025) in Betracht gezogen werden, damit die Baumartenempfehlungen weiterhin mit den Sensi-CH-Angaben kompatibel bleiben. Die neu zu erarbeitenden Höhenstufen 2025 (siehe oben) wären auch die Grundlage für das „NaiS-Formular2 Klimawandel“.

5.2 Weitere Empfehlungen der Experten der Begleitgruppe dieses Forschungsprojekts³

Folgende Empfehlungen wurden an der Schlusssitzung von der Begleitgruppe noch eingebracht:

- Es sollte punktuell mit Förstern geschaut werden, auf welcher Stufe die Sensi CH Karten nützlich sind, nur auf Kantonsebene oder auch auf Betriebsebene.
- Es könnte beim Anteil der Fichten am Nadelholzanteil noch nach Tannenarealen unterschieden werden.
- Die Erhöhung der Benutzerfreundlichkeit der Methodik / der Daten wäre gut.
- Eine Weiterentwicklung und Evaluierung (Validierung) des Struktur-Indikators (TBk) wäre wünschenswert, insbesondere um Klimasensitivität von Beständen in hohen Lagen genauer zu bewerten (in Hochlagen scheint die Information Struktur einen wesentlichen Mehrwert zu bieten).
- Eine Einordnung zur Sensitivität / Unsicherheit bezüglich verschiedener Annahmen bei den Schwellenwerten wäre sinnvoll (zwecks Einordnung der vorgestellten Sensitivitätsanalyse).
- Die Aspekte „Waldfunktionen“ und „Dringlichkeitsstufen“ wären als nächste Schritte für die Umsetzung des Handlungsfelds H2M3 „Anpassung des Waldes an den Klimawandel“ zu integrieren.

³ Diese wiedergeben keine konsolidierte Meinung aller Experten, sondern Ansichten einzelner Experten.

6 Literatur

- Abegg, M., Ahles, P., Allgaier Leuch, B., Cioldi, F., Didion, M., Düggelein, C., Fischer, C., Herold, A., Meile, R., Rohner, B., Rösler, E., Speich, S., Temperli, C. & Traub, B. (2023): Schweizerisches Landesforstinventar - Ergebnistabelle Nr. 1325691. Birmensdorf, Swiss Federal Research Institute WSL. <https://doi.org/10.21258/1821006>
- ARGE Frehner, M., Dionea SA & IWA – Wald und Landschaft AG (2020): NaiS-LFI – Zuordnung der LFI-Stichprobenpunkte zu Waldgesellschaften. Erläuternder Schlussbericht und Anhang C. Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU, 68 S. https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/468765/NaiS_LFI_Schlussbericht_20200925.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- BAFU (Hrsg.) (2020): Forschungskonzept Umwelt 2021 – 2024. Forschungsbereiche und prioritäre Forschungsthemen. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Info Nr. 2009: 82 S.
- BAFU (2022): Waldfunktionen und Waldleistungen. Merkblatt.
- BAFU (Hrsg.) (2024): Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald NaiS. Vollzugshilfe für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. 1. aktualisierte Auflage 2024. Erstausgabe 2005. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 2409.
- BAFU (Hrsg.; in Erarbeitung): Standorttypen: Grundlagen. Ein Modul zur Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald NaiS. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt Wissen.
- BAFU (Hrsg.; in Erarbeitung): Standorttypen: Anforderungen an den Schutzwald. Ein Modul zur Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald NaiS. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt Wissen.
- Brang, P., Küchli, C., Schwitter, R., Bugmann, H., Ammann, P. (2016): Waldbauliche Strategien im Klimawandel. In: Pluess, A.R., Augustin, S., Brang, P. (Red.). Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien. Bern: Haupt. pp. 341–365.
- Brang, P., Erhardt, E., Frehner, M., Huber, B., Rutishauser, U. (2020): Eine App für die Baumartenwahl im Klimawandel. Wald und Holz, Wald und Holz 10/2020 S. 27 – 29.
- Braun, S., Frehner, M., Rihm, B. & Augustin, S. (2022): Feuchteachse von Ökogrammen: Quantifizierung und Abschätzung zukünftiger Veränderungen. Schweiz Z Forstwes, in Bearb.
- Breiman, L. (2001): Random Forests. Machine Learning 45, S. 5–32, 2001. Kluwer Acad. Publ. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Bundesrat (2020): Anpassung des Waldes an den Klimawandel. Bericht des Bundesrats in Erfüllung der Motion 19.4177 Engler (Hêche) vom 25.09.2019 und des Postulates 20.3750 Vara vom 18.06.2020.
- CH2018 (2018): CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report. National Centre for Climate Services, Zurich, 271 S. <https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/schweizer-klimaszenarien/technical-report.html>
- Frehner, M., Wasser, B. & Schwitter, R. (2005/2009): Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion, Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 564 S. <https://www.gebirgswald.ch/de/nais-download.html>
- Frehner, M. & Huber, B. Mit Beiträgen von Gubelmann, P. (Teil 1 und 3), Zürcher-Gasser, N. (Teil 4 und 5), Zimmermann, N.E. (Teil 3), Braun, S. (Teil 2), Scherler, M. (Teil 2), Zischg, A. (Teil 1), Burnand, J. (Teil 1), Carraro, G. (Teil 1), Bugmann, H. (Teil 3), Psomas, A. (Teil 3) (2019): Schlussbericht des Projektes „Adaptierte Ökogramme“ im Forschungsprogramm „Wald und Klimawandel“: Übersicht über die Teilberichte. Sargans, Forstingenieurbüro Frehner und Chur, Abenis AG. <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/341108>

Frehner, M. & Zürcher-Gasser, N. (2019): Schlussbericht des Projektes „Adaptierte Ökogramme“ im Forschungsprogramm „Wald und Klimawandel“, Teil 5: Herleitung von regional optimierten Baumartenempfehlungen. Sargans, Forstingenieurbüro Frehner & Rabius, Gadola AG. 24 S. https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/341108/AdaptierteOekogramme_EndberichtTeil5_20190430.pdf?sequence=8&isAllowed=y

Frehner, M., Scherler, M. & Braun, S. (2017): Schlussbericht des Projektes „Adaptierte Ökogramme“ im Forschungsprogramm „Wald und Klimawandel“, Teil 2: Quantifizierung der Lage von Standorttypen im Ökogramm. Sargans. 39 S. https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/341108/AdaptierteOekogramme_EndberichtTeil2_20190506.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Frehner, M., Zimmermann, N. E., Huber, B., Gubelmann, P., Bugmann, H., Psomas, A. (2017): Schlussbericht des Projektes „Adaptierte Ökogramme“ im Forschungsprogramm „Wald und Klimawandel“, Teil 3: „Vergleich verschiedener Modelle der Baumartenverbreitung“. Chur, Abenis AG.

Frehner, M., Huber, B., Zischg, A. & Könz, G. (2021a): Schlussbericht des Gesamtprojektes „Sensitive Standorte und Bestände, Teil 3: Modellierung von sensiblen Standorten und Beständen für den Kanton Graubünden“ im Forschungsprogramm „Wald und Klimawandel“. Sargans, Forstingenieurbüro Frehner, Chur, Abenis AG & Bern, Universität Bern. 93 Seiten.

Frehner, M., Zischg, A. & Gubelmann, P. (2021b): Schlussbericht des Projektes „Baumartenempfehlungen Klimawandel und Ergänzung Standortkarte FL“. Sargans, Forstingenieurbüro Frehner, Universität Bern, Chur, Abenis AG & Bern.

Frey, H.-U., Frehner, M., Burnand, J., Carraro, G. & Rutishauser, U. (2021): Zur Entstehung der NaiS-Standorttypen. Schweiz Z Forstwes 172 (2021) 3: 146–155. [http://www.monikafrehner.ch/joomla/SZF%20172%20\(2021\)%2003%20Web_Frey.pdf](http://www.monikafrehner.ch/joomla/SZF%20172%20(2021)%2003%20Web_Frey.pdf)

Geurts, P., Ernst, D. & Wehenkel, L. (2006): Extremely randomized trees. Machine Learning 63, S. 3–42 (2006). <https://doi.org/10.1007/s10994-006-6226-1>

Gubelmann, P., Huber, B., Frehner, M., Zischg, A., Burnand, J. & Carraro, G. (2019): Schlussbericht des Projektes „Adaptierte Ökogramme“ im Forschungsprogramm „Wald und Klimawandel“, Teil 1: Quantifizierung und Verschiebung der Höhenstufengrenzen sowie des Tannen- und Buchenareals in der Schweiz mit zwei Klimazukünften. Chur, Abenis AG. 194 Seiten.

Hausfather, Z. & Peters, G. P. (2020): Emissions – the ‘business as usual’ story is misleading. Nature, 577(7792), 618-620. <https://www.nature.com/articles/d41586-020-00177-3>.

Huber, B., Zischg, A., Frehner, M., Carraro, G. & Burnand, J. (2015): Mit welchen Klimaparametern kann man Grenzen plausibel erklären, die in NaiS (Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald) verwendet werden, um Ökogramme auszuwählen? Schlussbericht November 2015. Ein Bericht aus dem Forschungsprogramm „Wald und Klimawandel“. Chur, Abenis AG, 149 S. <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/341122>

Huber, B., Zischg, A., Frehner, M., Carraro, G. & Burnand, J. (2015): Neu entwickelte Klimakarten für den Wald im Klimawandel. Schweiz Z Forstwes 166 (6): 432-434.

Huber, B., Frehner, M., Zimmermann, N. E., Gubelmann, P. & Wüest, R. O. (2017): Vorarbeiten für Baumartenempfehlungen von Standorttypen, die in der Schweiz heute noch nicht vorkommen. Ein Bericht aus dem Projekt „Adaptierte Ökogramme“ im Forschungsprogramm „Wald und Klimawandel“. Chur, Abenis AG. 49 S.

Huber, B., Zischg, A., Frehner, M., Könz, G., Frey H.-U., Vanoni, M. (2021): Neue Waldstandort-Hinweiskarte Graubündens zur Ermittlung sensibler Standorte und Bestände. Schweiz. Zeitschr. Forstwes. (172) Nr. 3, S. 186-189. <http://www.monikafrehner.ch/joomla/index.php/publikationen>

Huber, B., Zischg, A. & Frey, H.-U. (2020): Schlussbericht des Gesamtprojektes „Sensitive Standorte und Bestände, Teil 2: Waldstandort-Hinweiskarte Graubünden“. Teil des Gesamtprojektes „Sensitive Standorte und Bestände“ im Forschungsprogramm „Wald und Klimawandel“. Chur, Abenis AG & Geographisches Institut der Universität Bern, Bern. 34 S.

Huber, B. & Zischg, A. (2022): Erarbeitung von Baumartenempfehlungen, Bestimmung von sensiblen Standorten und Beständen für den Kanton Schwyz. Geographisches Institut der Universität Bern, Bern.

Huth, F., Tischer, A., Nikolova, P., Feldhaar, H., Wehnert, A., Hülsmann, L., Bauhus, J., Heer, K., Vogt, J., Ammer, C., Berger, U., Bernhardt-Römermann, M., Böhme, M., Bugmann, H., Buse, J., Demant, L., Dörfler, I., Ewald, J., Feldmann, E., Fichtner, A., Gossner, M. M., Grams, T. E., Häberle, K.-H., Häge, J., Hartmann, H., Herzog, S., Kahmen, A., Kohnle, U., Krabel, D., Krämer-Klement, K., Kreyling, J., Manthey, M., Mellert, K., Meyer, P., Mölder, A., Muffler-Weigel, L., Ohse, B., Opgenoorth, L., Rewald, B., Rothe, A., Ruehr, N., Scharnweber, T., Scherer-Lorenzen, M., Schmeddes, J., Schmerbeck, J., Schmidt, M., Seidel, D., Thomas, F. M., Tiebel, M., Oheimb, G. von, Wagner, S., Weigel, R., Wilmking, M., Zang, C. & Schuldt, B. (2025): Ecological assessment of forest management approaches to develop resilient forests in the face of global change in Central Europe, *Basic and Applied Ecology*, 86, 66-100, doi:10.1016/j.baae.2025.05.001.

Könz, G., Huber, B., Frehner, M. & Zischg, A. (2021): Ermittlung und Modellierung der oberen Waldgrenze für die Normperiode 1961-1990 und die Zukunftsperiode 2070-2099. Abenis AG, Chur.

Kupferschmid, A. D. & Frei, E. R. (2025): Einfluss des Verbisses auf die Baumverjüngung in der Schweiz: Überblick basierend auf kantonalen Daten. *Schweiz. Zeitschr. Forstwes.* (176), Nr. 3, S. 146-157.

LFI/WSL (2023): Zwischenergebnisse des 5. Landesforstinventars (LFI5). Stand 30.5.2023, WSL, Birmensdorf. https://www.wsl.ch/fileadmin/user_upload/News/Archiv_Migration_2023/News-WSL/2023/05_LFI_Zwischenresultate/240909_Zwischenergebnisse_LFI_print_final.pdf.

NCCS (Hrsg.) 2025. CH2025 – Klimaszenarien für die Schweiz. National Centre for Climate Services, Zürich.

NCCS (Hrsg.) 2018. CH2018 – Klimaszenarien für die Schweiz. National Centre for Climate Services, Zürich.

Ott, E., Frehner, M., Frey, H. U., Lüscher P. (1997): Gebirgsnadelwälder. Ein praxisorientierter Leitfaden für eine standortgerechte Waldbehandlung. Verlag Paul Haupt Bern Stuttgart Wien.

Pluess, A.R., Augustin, S., Brang, P. (Red.) (2016): Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern; Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf; Haupt, Bern, Stuttgart, Wien. 447 S.

Remund, J., Schmutz, M., Graf, P. & Cattin, R. (2020): Downscaling CH2018. Berechnung von Meteorologischen und Trockenheitsindizes für die Waldforschung. Methoden und Resultate – Vers. 2. Meteotest, 25 S.

Rosset, C., Horneber, H. & Dumollard, G. (2025): TBk Benutzerhandbuch. Version TBk DE, erarbeitet im Rahmen der Erstellung der Bestandeskarte 2024/25. BFH / HAFL, Version 1.1, 1.9.2025.

Rosset, C. Horneber, H., Boncina, A. & Weber, D. (in Vorber.): Automatische und praktische Bestandeskartierung basierend auf Fernerkundungsdaten mit TBk. SZF.

Rosset, C., Horneber, H. & Sciacca, S. (2025): TBk-Bestandeskarte: einfach, praktisch und vielseitig. Bündner Wald, 78/2025.

Rosset, C. & Horneber, H. (2025): Produktinfo: TBk Bestandeskarte. BFH / HAFL.

Rosset, C., Kurt, M. & Horneber, H. (2021, Update 2023): Utilité et limites de TBk pour la description des futaies irrégulières. BFH / HAFL.

Zischg, A., Huber, B. & Frehner, M. (2021): Berechnung der Vegetationshöhenstufen auf der Grundlage der CH2018 Szenarien für die Schweiz. Abenis AG, Chur; Universität Bern, Bern & Forstingenieurbüro Monika Frehner, Sargans. https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/519584/1/Bericht_CH2018_20210628.pdf

Zischg, A., Gubelmann, P., Frehner, M. & Huber, B. (2019): High Resolution Maps of Climatological Parameters for Analyzing the Impacts of Climatic Changes on Swiss Forests, Forests, 10, 617, doi:10.3390/f10080617.

7 Anhang

7.1 ReadMe Github Repository

<https://github.com/zischg/sensitivewaldstandorteCH>

Klimasensitive Waldstandorte und Bestände Schweiz

Dieses Code Repository dokumentiert die Arbeiten zur Entwicklung einer Karte der Baumartenempfehlungen im Klimawandel, einer Karte zu den klimasensitiven Waldstandorten und einer Karte zu den klimasensitiven Bestände. Die Methode folgt der Prozedur von Tree App (<https://www.tree-app.ch>) und wird mit folgenden Schritten umgesetzt:

1. Extraktion aller Waldstandorttypen einer kantonalen Waldstandortkarte und Ableitung einer Tabelle zu allen kartierten Standorttypen (script XX_hoehenstufen_preprocessing.py mit output XX_nais_einheiten_unique.xlsx, XX_ steht für das Kantonskürzel)
2. Alle kantonalen Standorttypen werden in einen NaiS-Standort übersetzt. Dies erfolgt gutachterlich durch M. Frehner und B. Huber (output XX_nais_einheiten_unique_mf.xlsx)
3. Die Tabelle mit den Übersetzungen und Höhenstufenzuweisungen wird mit der kantonalen Standortkarte verknüpft (script XX_hoehenstufen.py). Output ist eine Waldstandortkarte mit den kantonalen Einheiten, den NaiS-Einheiten und zugewiesenen Höhenstufen.
4. Die übersetzte und harmonisierte Karte der Waldstandorttypen wird mit verschiedenen Attributen angereichert (Muldenlagen, Hanglagen, Ebenen, Sonnen- und Schattenhänge, Neigung, Standortregion, Tannenareal), die es zur Berechnung der Projektionswege braucht. Anschließend wird folgendes berechnet (script X_sensi_treeapp.py): -Die zukünftige Höhenstufe wird für jedes Klimaszenario durch räumliche Überlagerung bestimmt, -der zukünftige Standorttyp wird auf Basis der Projektionswegetabelle von NaiS (L_Projektionswege_im_Klimawandel_18022020_export.xlsx) und dem zukünftigen Standorttyp berechnet, -der Vergleich der Baumartenzusammensetzung des heutigen und zukünftigen Waldstandortstyps ergibt die Karte der Baumartenempfehlungen (NaiS-Matrix Baumartentabelle Matrix_Baum_inkl_col_lin_20210412_mit_AbkuerzungenCLEAN.xlsx) -auf Basis der Baumartenempfehlungen werden die klimasensitiven Standorte berechnet
5. Die beiden Klimaszenarien RCP4.5 und RCP8.5 werden miteinander kombiniert (script XX_sensi_treeappCombiRCP45RCP85.py)
6. Die klimasensitiven Bestände werden berechnet (CH_sensitiveBestaende_Fichte_TBk.py)

7.2 Datenbeschrieb der abgegebenen Geodaten

Baumartenempfehlungen

Datensätze: **baumartenempfehlungen_rcp45.gpkg, baumartenempfehlungen_rcp85.gpkg**

Das Geopackage beinhaltet den Code (1 bis 5) der Baumartenempfehlung für jede Baumart. Die Spaltennamen, in denen der Code geschrieben ist, sind die Abkürzungen der Baumarten nach der NaIS Matrix. Die kartographische Darstellung der Baumartenempfehlungen für jede Baumart einzeln kann mit diesem Geodatensatz gemacht werden. Die Legende ist auf die entsprechende Spalte (Baumart-Abkürzung) anzuwenden. Damit kann für jede der 84 berücksichtigten Baumarten eine Darstellung der Baumartenempfehlungen gemacht werden.

Es gibt ein Geopackage je Klimaszenario RCP4.5 und RCP8.5.

In diesem Geodatensatz sind ausserdem die Informationen zu den zukünftigen Standorttypen drin (siehe Tabelle 20).

Spalten:

Baumart, z.B. „FI“ Baumartenempfehlung für diese Baumart (-999 Keine Angabe, 1 Empfohlen, 2 Bedingt empfohlen, 3 Gefährdet, 4 In Zukunft empfohlen, 5 In Zukunft bedingt empfohlen, 6 Langfristig gefährdet)

Klimasensitive Standorte

Datensätze: **klimasensitive_standorte_rcp45.gpkg, klimasensitive_standorte_rcp85.gpkg**

Es gibt ein Geopackage je Klimaszenario RCP4.5 und RCP8.5.

Wichtige Spalten:

Sensisto: Wichtigste Spalte, endgültige Klassifikation der sensitiven Standorte (0...Kein klimasensitiver Standort, 2... Klimasensitiver Standort, 3 Langfristig klimasensitiver Standort, 4 Teilweise klimasensitiver Standort)

Lenzuka... Anzahl an Haupt- und Neben-Baumarten in Zukunft

Lenheua... Anzahl an Haupt- und Neben-Baumarten heute

Lenheua... Anzahl an Haupt-Baumarten heute

Lenheub... Anzahl an Neben-Baumarten heute

Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichte

Datensätze: **klimasensitive_bestaende_fi_rcp45.gpkg, klimasensitive_bestaende_fi_rcp85.gpkg**

Verschnitt der Baumartenempfehlungen mit der Bestandeskarte; **Klimasensitive Bestände.**

Wichtige Spalten:

sbFI ... Sensitiver Bestand Fichte (-999 keine Angabe, 0 Nicht klimasensitiv, 1 Schwach klimasensitiv, 2 Mittel klimasensitiv, 3 Stark klimasensitiv)

maxsens ... maximale Sensitivität über alle Baumarten (-999 keine Angabe, 0 Nicht klimasensitiv, 1 Schwach klimasensitiv, 2 Mittel klimasensitiv, 3 Stark klimasensitiv)

FlantTBk ... Fichtenanteil aus TBk Nadelholzanteil und Fichtenanteil am Nadelholzanteil aus LFI

FlantNHant... Fichtenanteil am Nadelholzanteil aus LFI

NH ... Nadelholzanteil aus TBk

7.3 Kommentare zu kantonalen Übersetzungen nach NaiS

Allgemein gilt, dass bei den meisten Kantonen leichte Abweichungen zu den CH-Höhenstufen (Modell) bestehen können.

Für alle Kantone geltend: Für folgende neue NaiS-Standorttypen gibt es noch keine Projektionswege: 7d, 7e, 7f, 7g, 8e, 8f, 8g, 27a, 27f, 38C, 47P, 63, 64, 65*O, 66L, 68*V, 70* - diese Einheiten werden z.Z. noch nicht berechnet (leere Flächen in den Karten der Baumartenempfehlungen, sensitiven Standorten und den Karten der „Klimasensitivität heutiger Bestände bezüglich Fichten“).

Kommentare zu einigen kantonalen Eigenheiten / Abweichungen bei NaiS-Übersetzungen (wenn Kanton nicht aufgeführt wird, gab es keine Unstimmigkeiten bei den Übersetzungen):

Kt.	Bemerkungen
BE	Auf Wunsch von R. Delarze und P. Steiger wurde die BE-Einheit 70* (bisher gab es im Berner Jura 69* <i>Huperzio-Plinetum unicatae</i> = 69 bei NaiS-LFI) neu in NaiS aufgenommen, wobei 70* nur im Jura vorkommt (dies wurde bei der Erstellung der Waldstandort-Hinweiskarte aber noch nicht berücksichtigt). Neue NaiS-Übersetzungen für BE-Einheiten: 66 BD = 66L NaiS. 60* in HM BE = 60* Ta NaiS; 32 BE = 32C oder 32V (je nach Höhenstufe); NaiS. 38 BE = 39 (in SM und koll bei NaiS), 39 BE = 39* (in SM und UM bei NaiS). Die Wald- und Bergföhrenwälder wurden bei der Waldstandort-Hinweiskarte separat abgegrenzt. Für die Baumartenempfehlungen wurden diesen Flächen aber ebenfalls noch Höhenstufen zugeteilt.
GE	Es erfolgten einige hypothetische Annahmen, um eine Übersetzung in NaiS-Einheiten zu erhalten (erarbeitete Daten evtl. fehlerhaft). Verwendete NaiS-Einheiten für GE: 9a, 26, 28, 29A/26, 31, 35A, 35M, 39, 43, 44, 62.
GL	Bemerkungen zu neuen NaiS-Übersetzungen und neu in GL verwendeten Einheiten siehe „Kurzbericht zu Korrekturen der Waldstandortkarte GL“ von M. Frehner, Februar 2025.
GR	Bei GR wird die Waldstandort-Hinweiskarte im Winter 2025/2026 nochmals überarbeitet (noch nicht definitive Daten). Die Wald- und Bergföhrenwälder wurden bei der Waldstandort-Hinweiskarte separat abgegrenzt. Für die Baumartenempfehlungen wurden diesen Flächen aber ebenfalls noch Höhenstufen zugeteilt.
JU	Neue NaiS-Übersetzungen für JU-Einheiten (Korrektur der Übersetzungstabelle von 2019): 18c JU = 18M(19) NaiS anstatt 18(19); 18ab JU = 18M NaiS anstatt 18.
LU	Neue NaiS-Übersetzungen für LU-Einheiten: 18c LU = 18(46) NaiS. Falls es im Übergang vorkommt wird es als NaiS 19 übersetzt (feuchter Teil von NaiS 19), ausser im Übergang mit 18, 19, 46, 46t. Falls 18c LU im Mosaik mit mind. 3 Einheiten vorkommt wurde es weggelassen. 50d LU = 50(46) NaiS. Falls es im Übergang vorkommt wird es als NaiS 51 übersetzt (feuchter Teil von NaiS 51), ausser im Übergang mit 51. Falls 50d LU im Mosaik mit mind. 3 Einheiten vorkommt wird es weggelassen. Be Übergängen über mehr als eine Höhenstufe wird die Höhenstufe der zweiten Einheit angepasst.
NE	Pro Einheit NE gibt es oft mehrere Einheiten bei NaiS. Im Tree App wurde das so gelöst, dass jeweils die möglichen NaiS-Standorttypen erscheinen und die Anwender einen Standorttyp auswählen. Bei Sensi CH ist das nicht möglich. Soweit möglich wurden diese Flächen mit Hilfe der Höhenstufen 1961-1990 unterteilt. Falls dann immer noch mehrere NaiS-Standorttypen

Kt.	Bemerkungen
	möglich sind, wurde jene Einheit ausgewählt, die vermutlich am häufigsten ist und die Flächen deshalb am besten repräsentiert. Die Einheit 27 NE (Mosaik) konnte nicht zugeordnet werden. Die Einheiten NE 7, 10 und 28 sind in der Originaltabelle nicht drin, M. Frehner hat sie am Schluss noch hinzugefügt.
OW	Angepasste kantonale Höhenstufen (v.a. leicht tiefere Grenze OM/HM im Flyschgebiet). Neue NaiS-Übersetzungen für OW-Einheiten: 32V bei NaiS nicht im Subalpin vorkommend; bei Entwässerungen 49 OW = 49(20) oder 49(50) NaiS. Die Wald- und Bergföhrenwälder wurden bei der Waldstandort-Hinweiskarte separat abgegrenzt. Für die Baumartenempfehlungen wurden diesen Flächen aber ebenfalls noch Höhenstufen zugeteilt.
SG	Neue NaiS-Übersetzungen für SG-Einheiten: 27 SG = 27a, 27f NaiS; 49(32C) SG = 49(32*) NaiS. 24Fe SG = 24 NaiS. 21G SG = 21 NaiS.
SZ	Angepasste kantonale Höhenstufen (v.a. leicht tiefere Grenze OM/HM im Flyschgebiet). Die von H.-U. Frey eingeführte „Eichenstufe“ wird der SM-Stufe zugeteilt. Neue NaiS-Übersetzungen für SZ-Einheiten: 32V bei NaiS nicht im Subalpin vorkommend; bei Entwässerungen 49 SZ = 49(20) oder 49(50) NaiS. Die Wald- und Bergföhrenwälder wurden bei der Waldstandort-Hinweiskarte separat abgegrenzt. Für die Baumartenempfehlungen wurden diesen Flächen aber ebenfalls noch Höhenstufen zugeteilt.
UR	Für die Einheit 47 wurde für die Nordalpen bei den aktuellen Projektionswegen wie in den Südalpen 19L und 3 als Projektionsweg genommen.
VD	Neue NaiS-Übersetzungen für VD: 66 VD = 66L NaiS; 27 VD = 27f NaiS; 69 VD JU = 70* NaiS; bei Entwässerungen 49 VD = 49(20) oder 49(50) NaiS. Die Wald- und Bergföhrenwälder wurden bei der Waldstandort-Hinweiskarte separat abgegrenzt. Für die Baumartenempfehlungen wurden diesen Flächen aber ebenfalls noch Höhenstufen zugeteilt.
VS	Neue NaiS-Übersetzungen für VS-Einheiten: Für die Einheit 47 wurde für die Nordalpen bei den aktuellen Projektionswegen wie in den Südalpen 19L und 3 als Projektionsweg genommen. Für folgende Standorttypen (nais1) gibt es keine Einträge in der aktuellen Projektionswegetabelle: ['47HLä', '58Ta', '27f', '38C', ' ', '57VMTa', '65*O', '25C', '58BILä', '53*Lä', '50*Lä', '66L', '53*sTa', '53ALä', '57VMLä', '52ReG', '47P', '46MLä', '51Lä', '59LG', '58CLä', '59CLä', '68*V', '58CG', '60G', '27a', '55Ta', '50Lä', '47Lä', '58BITa', '58*', '40PBIG'].
ZG	Als Referenz für die Übersetzung wird die Spalte „Beschriftung“ verwendet. Falls dort nichts steht, wird die Spalte „Nummer“ verwendet. Die höchste Stelle vom Kanton Zug ist 1580 m über Meer. Deshalb wird bei den NaiS-Standorttypen keine subalpine Stufe ausgeschieden. Die im Schlüssel ZG beschriebenen Strukturen „Fichtenwald mit Rottenstruktur“ können auch in (ehemaligen) Weidwäldern entstehen. Deshalb wurde 57C in 46, 60 in 50 umgewandelt und alle 60* in 60*Ta. Neue NaiS-Übersetzungen für ZG-Einheiten: 18d ZG = 19 NaiS, da Säurezeiger (Heidelbeere) vorhanden; 18as ZG = 20(18) NaiS, da grauer Alpendost vorhanden; 18g ZG = 20(18M) NaiS, da grauer Alpendost vorhanden; 50d ZG = 50(51) NaiS; 27w ZG = 27f(61) NaiS.

7.4 Umfragebogen und Informationsschreiben an Kantone

Folgender Fragebogen wurde, inkl. Kurzbeschreibung der Studie, an alle Kantone versandt:

Ist Ihr Kanton interessiert, sich am Projekt zu beteiligen, indem er für die Berechnungen dem BAFU folgende kantonalen Grundlagen zur Verfügung stellt?: ____

- *Waldstandortkarte: Ja / Nein, Erstellungsjahr: __, allfällige weitere Angaben: ____.*
- *Bestandeskarte: Ja / Nein, Erstellungsjahr: __, Angaben zum Detaillierungsgrad (Erhebung von Entwicklungsstufen): Ja / Nein, Bestandesstruktur: Ja / Nein, einzelnen Baumarten oder nur Angaben zu NH-/LH-Anteilen: ____.*
- *Ist eine Veröffentlichung der Projektergebnisse erlaubt (Ja / Nein) oder sollen die erhaltenen Daten nur intern (Ja / Nein) verwendet werden dürfen?*
- *Wer wäre die Kontaktperson für Rückfragen und den Bezug der Daten: ____?*

7.5 Liste der Baumarten, für welche bei den Baumartenempfehlungen Karten erstellt werden können

Lat. Name	Abkürzung	Name dt	Name frz	Name it
<i>Abies alba</i>	TA	Weisstanne	Sapin	Abete bianco
<i>Acer campestre</i>	FAH	Feldahorn	Érable champêtre	Acero oppio, Loppio
<i>Acer opalus</i>	OAH	Schneeballblättriger Ahorn	Érable à feuilles d'obier	Acero alpino
<i>Acer platanoides</i>	SAH	Spitzahorn	Érable plane	Acero riccio
<i>Acer pseudoplatanus</i>	BAH	Bergahorn	Érable sycomore	Acero di monte
<i>Aesculus hippocastanum</i>	RKA	Roskastanie	Marronnier	Ippocastano
<i>Ailanthus altissima</i>	GO	Götterbaum	Ailante	Ailanto
<i>Alnus glutinosa</i>	SER	Schwarzerle	Aulne glutineux	Ontano comune
<i>Alnus incana</i>	WER	Grauerle / Weisslerle	Aulne blanc	Ontano bianco
<i>Alnus viridis</i>	AER	Alpenerle	Aulne vert	Ontano verde
<i>Betula pendula</i>	HBI	Hängebirke	Bouleau	Betulla verrucosa
<i>Betula pubescens</i>	MBI	Moorbirke	Bouleau pubescent	Betulla pubescente
<i>Carpinus betulus</i>	HBU	Hagebuche	Charme	Carpino comune
<i>Castanea sativa</i>	KA	Edelkastanie	Châtaignier	Castagno comune
<i>Cedrus atlantica</i>	AZE	Atlaszeder	Cèdre de l'Atlas	
<i>Cedrus libani</i>	LZE	Libanonzeder	Cèdre du Liban	
<i>Celtis australis</i>	ZUE	Zürgelbaum	Micocoulier	Bagolaro
<i>Chamaecyparis lawsoniana</i>	LZY	Lawsons Zypresse	Cyprès de Lawson	Cipresso di Lawson
<i>Cinnamomum glanduliferum</i>	DKA	Drüsiger Kampferbaum	Cannelier glanduleux	Cinnamomo ghiandoloso
<i>Cinnamomum camphora</i>	KA	Kampferbaum	Camphrier	
<i>Corylus colurna</i>	BHA	Baumhasel	Noisetier de Byzance	
<i>Diospyros lotus</i>	LPF	Lotuspflaume	Plaqueminier lotier	Albero di Sant' Andrea, Loto falso
<i>Fagus sylvatica</i>	BU	Buche	Hêtre	Faggio comune
<i>Ficus carica</i>	FEIG	Feige	Figuier	Fico
<i>Fraxinus excelsior</i>	ES	Esche	Frêne	Frassino comune
<i>Fraxinus ornus</i>	BES	Blumenesche	Frêne à fleurs	Frassino da manna
<i>Ilex aquifolium</i>	STP	Stechpalme	Houx	Agrifoglio
<i>Juglans regia</i>	NU	Nussbaum	Noyer	Noce comune
<i>Juglans nigra</i>	SNU	Schwarznuss	Noyer noir	
<i>Juniperus communis</i>	WAH	Gewöhnlicher Wacholder	Genévrier commun	Ginepro comune
<i>Laburnum alpinum</i>	LABA	Alpen-Goldregen	Cytise des Alpes	Maggiociondolo di montagna
<i>Laburnum anagyroides</i>	LAB	Goldregen	Cytise faux ébénier	Maggiociondolo comune
<i>Larix decidua</i>	LA	Lärche	Mélèze	Larice comune
<i>Laurus nobilis</i>	LOR	Edellorbeer	Laurier noble	Alloro, Lauro
<i>Ligustrum lucidum</i>	BLIG	Baum-Liguster	Troène de Chine	
<i>Liriodendron tulipifera</i>	TUL	Tulpenbaum	Tulipier de Virginie	
<i>Malus sylvestris</i>	ABA	Wildapfel	Pommier sauvage	Melo selvatico

Lat. Name	Abkuer- zung	Name dt	Name frz	Name it
<i>Olea europaea</i>	OLIV	Ölbaum	Olivier	Olivo
<i>Ostrya carpinifolia</i>	OST	Hopfenbuche	Charme houblon	Carpino nero
<i>Paulownia tomentosa</i>	BGL	Blauglockenbaum	Paulownia	Paulownia
<i>Picea abies</i>	FI	Fichte	Epicéa	Abete rosso, Peccio
<i>Pinus cembra</i>	AR	Arve	Arolle	Pino cembro, Cirmolo
<i>Pinus mugo</i>	LFO	Legföhre	Pin couché	Pino mugo, Parancio
<i>Pinus uncinata</i>	BFO	Bergföhre	Pin à crochets	Pino uncinato
<i>Pinus nigra</i>	SFO	Schwarzföhre	Pin noir	Pino nero, Pino austriaco
<i>Pinus strobus</i>	WEY	Strobe / Weymouths- föhre	Pin Weymouth	Pino strobo
<i>Pinus sylvestris aggr.</i>	WFO	Waldföhre	Pin sylvestre	Pino sylvestre, Pino rosso
<i>Platanus x hispanica</i>	PL	Platane	Platane d'Espagne	Platano di Spagna
<i>Populus alba</i>	WPA	Silberpappel / Weiss- pappel	Peuplier blanc	Pioppo bianco, Gattice
<i>Populus nigra</i>	SPA	Schwarzpappel	Peuplier noir	
<i>Populus tremula</i>	AS	Zitterpappel / Aspe	Tremble	Pioppo tremulo
<i>Prunus avium</i>	KI	Kirschbaum	Cerisier	Ciliegio
<i>Prunus mahaleb</i>	FKI	Felsenkirsche	Merisier odorant	Ciliegio canino
<i>Prunus padus</i>	TKI	Traubenkirsche	Merisier à grappes	
<i>Prunus serotina</i>	HTKI	Herbst-Traubenkirsche	Merisier tardif	Pruno autunnale
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	DO	Douglasie	Douglas	Abete di Douglas
<i>Pyrus pyraeaster</i>	BBA	Wildbirne	Poirier sauvage	Pero selvatico
<i>Quercus cerris</i>	ZEI	Zerreiche	Chêne chevelu	Quercia cerro
<i>Quercus ilex</i>	STEI	Steineiche	Chêne vert	Leccio
<i>Quercus petraea</i>	TEI	Traubeneiche	Chêne sessile	Quercia rovere
<i>Quercus pubescens</i>	FEI	Flaumeiche	Chêne pubescent	Quercia pubescente, Ro- verella
<i>Quercus robur</i>	SEI	Stieleiche	Chêne pédonculé	Quercia comune, Farnia
<i>Quercus rubra</i>	REI	Roteiche	Chêne rouge	Quercia rossa
<i>Quercus suber</i>	KOEI	Korkeiche	Chêne-liège	
<i>Rhus typhina</i>	EBA	Essigbaum	Sumac vinaigrier	Sommacco maggiore
<i>Robinia pseudoacacia</i>	RO	Robinie	Robinier	Robinia
<i>Salix alba</i>	WWEI	Weissweide	Saule blanc	Salice comune
<i>Salix caprea</i>	SAWEI	Salweide	Saule marsault	Salice delle capre
<i>Salix daphnoides</i>	RWEI	Reifweide	Saule pruneux	Salice dafnoide
<i>Salix elaeagnos</i>	LWEI	Lavendelweide	Saule drapé	Salice ripaiolo
<i>Salix foetida</i>	STWEI	Stinkweide	Saule fétide	Salice fetido
<i>Salix euxina</i>	BWEI	Bruchweide	Saule fragile	Salice fragile
<i>Salix purpurea L.</i>	PWEI	Purpurweide	Osier rouge	Salice rosso
<i>Sorbus aria</i>	MBE	Mehlbeere	Alisier blanc	Sorbo montano, Farinac- cio
<i>Sorbus aucuparia</i>	VBE	Vogelbeere	Sorbier des oisel- eurs	Sorbo degli ucellatori
<i>Sorbus domestica</i>	SPE	Speierling	Cormier	Sorbo comune
<i>Sorbus mougeotii</i>	MMBE	Mougeots Mehlbeere	Sorbier de Mougeot	Sorbo di Mougeot
<i>Sorbus torminalis</i>	EBE	Elsbeere	Alisier torminal	Sorbo torminale

Lat. Name	Abkuerzung	Name dt	Name frz	Name it
<i>Sorbus x latifolia</i> (Lam.) Pers.	BMBE	Breitblättriger Mehlbeerbaum	Sorbier à larges feuilles	Sorbo maggiore
<i>Taxus baccata</i>	TAX	Eibe	If	Tasso comune
<i>Thuja occidentalis</i>	RLB	Riesen-Lebensbaum	Thuya d'Occident	Tuia occidentale
<i>Tilia cordata</i>	WLI	Winterlinde	Tilleul à petites feuilles	Tiglio selvatico
<i>Tilia platyphyllos</i>	SLI	Sommerlinde	Tilleul à larges feuilles	Tiglio nostrano
<i>Tilia tomentosa</i>	SILI	Silberlinde	Tilleul argenté	Tiglio tomentoso
<i>Trachycarpus fortunei</i>	HPAL	Hanfpalme	Palmier à chanvre	Palma di Fortune
<i>Ulmus glabra</i>	BUL	Bergulme	Orme de montagne	Olmo di montagna
<i>Ulmus laevis</i>	FLUL	Flatterulme	Orme lisse	Olmo bianco
<i>Ulmus minor</i>	FUL	Feldulme	Orme champêtre	Olmo comune