ETH zürich Research Collection

Report

Schlussbericht des Projektes «Adaptierte Ökogramme» im Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel»

Author(s):
Frehner, Monika; Huber, Barbara; Gubelmann, Päivi; Zürcher-Gasser, Nora; Zimmermann, Niklaus E.; Braun, Sabine; Scherler, Martin; Zischg, Andreas; Burnand, Jacques; Carraro, Gabriele; Bugmann, Harald; Psomas, Achilleas

Publication Date:
2019-04

Permanent Link:
https://doi.org/10.3929/ethz-b-000341108 →

Rights / License:
In Copyright - Non-Commercial Use Permitted →

This page was generated automatically upon download from the ETH Zurich Research Collection. For more information please consult the Terms of use.

ETH Library

Schlussbericht des Projektes «Adaptierte Ökogramme» im Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel»

Teil 3: «Vergleich verschiedener Modelle der Baumartenverbreitung»

Monika Frehner, Niklaus E. Zimmermann, Barbara Huber, Päivi Gubelmann, Harald Bugmann, Achilleas Psomas

Fachliche Unterstützung durch Ludwig Z'graggen

ABENIS AG
INGENIEURE + PLANER

ETH zürich

Monika Frehner Sargans

WSL

Februar 2017

Autoren

Monika Frehner[1], Niklaus E. Zimmermann[2], Barbara Huber[3], Päivi Gubelmann[3], Harald Bugmann[4], Achilleas Psomas[2]

[1] Forstingenieurbüro, Sixerstrasse 9, 7320 Sargans

[2] WSL, Zürcherstrasse 111, 8903 Birmensdorf

[3] Abenis AG Chur, Quaderstrasse 7, 7000 Chur

[4] ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich

Ein Projekt-Schlussbericht aus dem Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel» von BAFU und WSL
(www.wsl.ch/wald_klima)

Projektlaufzeit: 1.12.2014 bis 31.12.2016.

Zitierung

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. 105 Seiten.

Im pdf-Format zu beziehen über www.wsl.ch/wald_klima

Dank

Ohne die wertvolle Unterstützung durch Ludwig Z'graggen wäre die Durchführung dieses Teilprojektes in dieser Form nicht möglich gewesen. Durch seine grosse Mithilfe bei der Entwicklung und Erarbeitung der klimatologischen Grundlagen und der Modellierungen konnte die Grundlage für die Auswertungen gelegt werden. Ludwig Z'graggen trug zudem durch sein fundiertes Wissen bezüglich Standortskunde und klimatologischen Zusammenhängen wesentlich zum Gelingen des Teilprojektes bei. Wir sind ihnen zu grossem Dank verpflichtet.

Wir möchten uns beim BAFU/WSL-Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel» bedanken für die Finanzierung des Projektes. Ausserdem bedanken wir uns beim LFI-Team für den Erhalt der LFI-Daten.

©Abenis AG, Chur, 2017

Inhalt

Zusammenfassung ... 1
Summary ... 2
1 Einleitung ... 3
2 Methoden ... 5
2.1 Methode PorTree+ ... 5
2.2 Methode «Abenis» (Adaptierte Ökogramme) ... 6
2.3 Methode «ForClim» ... 10
2.4 Vorgehen bei der Synthese ... 12
3 Resultate: Vergleich von Modellierungen von PorTree+, Abenis und ForClim ... 13
3.1 Buche (Fagus sylvatica) ... 14
3.2 Weisstanne (Abies alba) ... 20
3.3 Fichte (Picea abies) ... 26
3.4 Lärche (Larix decidua) ... 32
3.5 Kirsche (Prunus avium) ... 38
3.6 Traubeneiche (Quercus petraea) ... 41
3.7 Stieleiche (Quercus robur) ... 47
3.8 Bergahorn (Acer pseudoplatanus) ... 53
3.9 Esche (Fraxinus excelsior) ... 58
3.10 Winterlinde (Tilia cordata) ... 63
3.11 Sommerlinde (Tilia platyphyllos) ... 68
4 Resultate: Weitere Potenzialkarten nach ForClim und Habitateignungskarten nach PorTree oder PorTree+ ... 74
4.1 Waldföhre (Pinus sylvestris) ... 75
4.2 Bergulme (Ulmus glabra) ... 79
4.3 Spitzahorn (Acer platanoides) ... 82
4.4 Grünerle (Alnus viridis) ... 84
4.5 Hängebirke (Betula pendula) ... 86
4.6 Hagebuche (Carpinus betulus) ... 88
4.7 Edelkastanie (Castanea sativa) ... 91
4.8 Arve (Pinus cembra) ... 94
5 Diskussion ... 98
5.1 Vergleich von PorTree+- und Abenis-Modellierungen ... 98
5.2 Anmerkungen zu ForClim ... 98
5.3 Umgang mit den Resultaten ... 99
5.4 Inputs vom Workshop «Non-analogue forest sites / Nicht-analoge Waldstandorte» vom 22.9.2016 ... 100
6 Schlussfolgerungen ... 100
7 Projektablauf ... 101
8 Ausblick ... 101
9 Literatur ... 103

Zusammenfassung

Das Ziel des vorliegenden Projektteils war, mit unterschiedlichen Methoden erarbeitete Karten der Habitateignung für ausgewählte Baumarten und das Gebiet der Schweiz zu vergleichen. Dafür berechnete Zimmermann Potentialkarten für verschiedene Baumarten mit den detaillierten Klimakarten von Huber et al. (2015) neu (im Folgenden «PorTree$^+$-Karten» genannt). Frehner und Gubelmann erstellten Verbreitungskarten («Abenis-Karten») auf der Grundlage der modellierten Höhenstufen und Areale (Resultate aus Teil 1 des Projektes «Adaptierte Ökogramme» [Gubelmann et al. 2019]) und mit Expertenwissen zu regionalen und geologischen Einschränkungen. Für folgende Baumarten wurden Verbreitungskarten für das heutige Klima und die Periode 2070-2099 (Klimamodelle ECHAM5/CLM [MPI] und ECHAM5/RegCM3 [ICTP]; A1B-Emissionsszenario) verglichen: Buche, Weisstanne, Fichte, Lärche, Bergahorn, Esche, Traubeneiche, Stieleiche, Kirsche, Winter- und Sommerlinde. Diese Karten wurden miteinander und soweit als möglich mit Karten der bioklimatischen Limitierung von Bugmann («ForClim-Karten») verglichen.
Die Karten von PorTree$^+$ und Abenis ergaben meist eine sehr gute Übereinstimmung, v.a. bei den häufigen Baumarten, wobei zu geringe LFI-Stichprobenmengen bei PorTree$^+$ am Verbreitungsrand zu Ungenauigkeiten führen. Die mit dem Modell ForClim berechneten Karten weisen meist grössere Areale auf.

Summary

This project aimed at comparing habitat suitability maps for selected tree species in Switzerland that were developed with different methods. Zimmermann modelled species distribution maps for different tree species using detailed climate maps of Huber et al. (2015) (below mentioned as «PorTree$^+$ maps»). Frehner and Gubelmann developed distribution maps («Abenis maps») based on modelled altitudinal vegetation belts and species distribution ranges, and using expert knowledge concerning regional and geological limitations (results of part 1 of the project «Adapted Ecograms» [Gubelmann et al. 2019]). For the following tree species, distribution maps for the current climate and the period 2070 – 2099 (climate models ECHAM5/CLM [MPI] and ECHAM5/RegCM3 [ICTP]; A1B emission scenario) were compared: European beech, silver fir, Norway spruce, European larch, Sycamore maple, ash, sessile oak, pedunculate oak, wild cherry, broad-leaved lime and small-leaved lime. These maps were compared with each other, as well as with maps of the bioclimatic limitation of Bugmann («ForClim maps»).

Maps of PorTree$^+$ and Abenis usually matched very well, especially for the most frequent tree species. PorTree$^+$ maps showed inaccuracies at the distribution edge if the NFI sample size was too low. ForClim maps usually show larger species distribution.

1 Einleitung

Aufgrund der Klimaänderung wird erwartet, dass sich die Baumartenzusammensetzung ändert und dass in den unteren Lagen neue Baumarten geeignetes Habitat finden werden. Deshalb sind Kenntnisse über die zukünftige Habitateignung von Baumarten wichtig. Diese werden mit verschiedenen Baumartenverbreitungskarten modelliert. Während PorTree^{+} und die Karten vom Team «Frehner/Abenis» (nachfolgend werden die Karten der Einfachheit halber als «Abenis-Karten» benannt) heutige Artverbreitungskarten und zukünftige Habitateignungskarten für Baumarten erstellen, bildet ForClim die fundamentale Nische der Baumarten (Verjüngung und Altbestand) ab.

Für die längerfristige Waldbewirtschaftung und deren Planung unter Klimawandel werden u.a. zwei Modell-Ansätze zu Hilfe genommen: populationsdynamische Waldsukzessionsmodelle und statisch-statistische Artverbreitungsmodelle, deren Eigenschaften und Anwendungsbereiche, sowie deren Anwendungsgrenzen für die Wälder der Schweiz Zimmermann & Bugmann (2008) beschrieben haben.

Nach Bugmann enthalten die meisten dynamischen Waldmodelle, welche heute für die Simulation von Beständen mit mehreren Arten (d.h. mit Ausnahme von Waldwachstumsmodellen, die auf Reinbestände ausgerichtet sind) verwendet werden, Annahmen über die *fundamentale* Nische der Baumarten (z.B. Köhler et al. 2003; Seidl & Lexer 2013; Bircher et al. 2015). Dieses Konzept geht zurück auf Siccama et al. (1969) und unterscheidet sich darin von Artverbreitungsmodellen (vgl. Guisan & Zimmermann 2000; Booth et al. 2014). Im Grunde genommen wird in dynamischen Waldmodellen eine *a priori*-Hypothese aufgestellt, welche abiotischen und/oder edaphischen Faktoren die Populationsdynamik und/oder das Wachstum der Baumarten begrenzen, d.h. die fundamentale Nische wird modelliert und in der Simulation dann durch Konkurrenz-Effekte überlagert (Botkin et al. 1972; Bugmann 2001).

In Artverbreitungsmodellen («species distribution models», SDMs) hingegen wird ein möglichst guter statistischer Zusammenhang zwischen der heutigen (oder auch vergangenen) Verbreitung einer Art und Variablen hergestellt, welche das Klima, die Bodeneigenschaften etc. beschreiben (z.B. Maiorano et al. 2013), d.h. die *realisierte* Nische wird parametrisiert, basierend auf einigen sehr starken Annahmen (Araújo & Guisan 2006). Diese Analysen sind nur selten durch Hypothesen getrieben, sondern es wird in erster Linie ein möglichst guter «Fit» zwischen Prädiktor-Variablen und Verbreitungsdaten gesucht. Simulationen der fundamentalen Nische mit dynamischen Modellen sollten demzufolge zu anderen Ergebnissen führen als Verbreitungskarten aus SDMs. Es müsste insbesondere so sein, dass die simulierte fundamentale Nische grösser ist als die simulierte realisierte Nische.

Die statistische Verbreitungsmodellierung geht davon aus, dass eine Stichprobe der heutigen Verbreitung einer Baumart und der dort beobachtenden ökologischen Bedingungen ein gutes Indiz dafür ist, wie sich die Art in Zukunft verhalten wird. Dort, wo in Zukunft dieselben Bedingungen auftreten, unter welchen die Art heute vorkommt, wird die Baumart auch in Zukunft gedeihen können. Daher werden die Karten, welche das Resultat der Verbreitungsmodellierung darstellen, auch als «potentielle Verbreitungsgebiete» bezeichnet. Wenn also mit diesem Modellansatz eine Projektion für «das Jahr 2100» gemacht wird, dann wird ausgesagt, wie das Potentialgebiet einer Baumart im Raum verteilt sein wird. Einzelne Regionen werden in Zukunft nicht mehr geeignet sein, andere bleiben geeignet, und wiederum andere werden erst mit fortschreitendem Klimawandel für eine bestimmte Baumart geeignet werden.

Bei der Erstellung der Verbreitungskarten (heutiger Zustand) und den Habitateignungskarten (Zukunft) durch das Team «Frehner/Abenis» wurde ein weiterer Ansatz verwendet, der Erfahrungswissen (zu regionalen Vorkommen, sowie zu regionalen und geologischen Einschränkungen) mit Resultaten von Modellierungen (Teil 1 des Projektes «Adaptierte Ökogramme» [Gubelmann et al. 2019]) verwendete.
Sowohl der Ansatz der statistischen Verbreitungsmodellierung (PorTree^{+}) als auch der von Frehner/Abenis erlauben keine Aussagen darüber, bis wann eine Baumart das Potentialgebiet besiedelt haben wird, oder wie lange eine Baumart noch an einem Wuchsort verweilt, bevor sie lokal ausstirbt.

Projektziele

Im Projekt wurden folgende Ziele verfolgt:

- Vergleich und Verifizierung von Ergebnissen des Modells PorTree^{+}, des Ansatzes «Frehner/Abenis» und von ForClim.
- Durch die Synthese der verschiedenen Modellansätze sollen Aussagen über zukünftige Verbreitungsgebiete von Baumarten erstellt werden, die das Erarbeiten von Baumartenempfehlungen unterstützen.

Für folgende Baumarten wurden Verbreitungskarten für das heutige Klima und die Periode 2070-2099 (Klimamodelle ECHAM5/CLM [MPI] und ECHAM5/RegCM3 [ICTP]; A1B-Emissionsszenario) z.T. neu erstellt und miteinander verglichen: Buche, Weisstanne, Fichte, Lärche, Bergahorn, Esche, Traubeneiche, Stieleiche, Kirsche, Winter- und Sommerlinde. Es wurden diese Baumarten ausgewählt, da sie aus Sicht der Autoren für den zukünftigen Waldaufbau sehr wichtig sind.
Das Projekt wurde in zwei Phasen durchgeführt (Vorprojekt: von 2014 bis 2015 und Hauptprojekt: von 2016 bis 2017), deren Ergebnisse hier zusammengefasst werden.

2 Methoden

2.1 Methode PorTree+

Die Methode der Verbreitungsmodellierung erklärt die heutige Verbreitung mittels moderner statistischer Regressions- und Klassifikationsmethoden anhand von Klima- und anderen ökologischen Grössen.
Im Projekt PorTree (Zimmermann et al. 2016) wurde die Verbreitung von über 30 Baumarten anhand von Verbreitungsdaten (nationale Inventuren im Alpenraum, der Schweiz) und von Klimadaten (von Dritten bezogen oder selber berechnet) und Geologiedaten, sowie weniger zusätzlicher Geodaten modelliert, um zukünftige Potenzialgebiete der Baumarten zu erhalten. Für das vorliegende Projekt und aufgrund der neuberechneten Klimakarten aus Teil 1 wurde beschlossen, die Verbreitungskarten für die Baumarten nochmals neu zu berechnen. Folgende Modifikationen wurden für PorTree+ vorgenommen:

- Verwendung der Klimakarten von Abenis,
- Verwendung von nur noch 2 Klimamodellen (CLM und RegCM3),
- Ausschliessliche Verwendung von Baumartenverbreitungsdaten aus der Schweiz (da Klimakarten von Abenis nur die Schweiz abdecken),
- Leichte Modifizierung des gesamten Vorgehens (aber immer noch unter Verwendung von 6 statistischen Modellen).

Es konnten nicht alle Abenis-Klimadaten für die statistischen Modelle verwendet werden, da diese teils hochkorreliert sind. Aufgrund der neu zugrundeliegenden Klimadaten (räumliche Auflösung 25 m) entstanden in PorTree+ leicht andere Verbreitungsmuster als im PorTree:

- Die Unterschiede zwischen den Karten von PorTree und PorTree+ sind gering; In PorTree+ sind aber die Potenzialgebiete regional oft leicht realitätsnäher modelliert.
- Die neuen Klimadaten helfen, die Tal-Enden etwas besser zu modellieren.

Auch für PorTree+ wurden sechs statistische Modelle und mehrere Wiederholungen (statistisches Resampling der Verbreitungsdaten) berechnet, wobei zwei regionale Klimamodell-Datensätze (CLM und RegCM3) für das A1B Szenario verwendet wurden. Anhand der sechs statistischen Modelle wurde die heutige Verbreitung als Funktion des heutigen Klimas statistisch erklärt. Anschliessend wurde jedes der sechs statistischen Modelle auf zukünftiges Klima angewandt, wodurch 12 zukünftige Potentialkarten erzeugt wurden. Diese wurden in sogenannten «Modell-Ensembles» so aufbereitet, dass sie den Trend der zukünftigen Verbreitung sowie die damit einhergehenden Unsicherheiten aufzeigen (Details siehe Anhang 1). Für die Darstellungen der simulierten Verbreitung wurden drei Zonen ausgeschieden:

- Das Habitat wird als geeignet eingestuft, wenn mindestens 60 % der Modell-/Resampling Karten die Art als «Vorkommen» klassieren (dunkelrote Farbe bei Abbildungen).
- Die Habitateignung wird als unsicher eingestuft, wenn zwischen 30 und 60 % der Modell-/Resampling Karten die Art als «Vorkommen» klassieren (orange Farbe bei Abbildungen).

- Das Habitat wird als ungeeignet eingestuft, wenn weniger als 30 % der Modell-/Resampling Karten die Art als «Vorkommen» klassieren (hellgelbe Farbe bei Abbildungen).

Die entsprechenden Datengrundlagen und statistischen Methoden der hier dargestellten Resultate sind im Anhang 1 erläutert.

2.2 Methode «Abenis» (Adaptierte Ökogramme)

Die Areale für die verschiedenen Baumarten wurden aus den Modellierungen der Höhenstufen und den Arealmodellen für die Buche, die Weisstanne oder die colline Stufe aus Teil 1 (Gubelmann et al. 2019) erstellt. Die Angaben zu den Baumarten beziehen sich dabei auf die Version 12 vom 11.8.2016 und nicht auf die Darstellung im Schlussbericht zu Teil 1, bei welcher gewisse Stufen neu zusammengefasst wurden und eine Begrenzung bezüglich oberer Waldgrenze eingebaut wurde. Abb. 1 zeigt die Karte mit der Version 12 (Höhenstufen/Buchenareal). Die Angaben zur Verbreitung der Baumarten in den jeweiligen Höhenstufen wurden von Frehner abgeleitet, die dazu folgende Grundlagen verwendete:

- Vorkommen der Baumarten in den einzelnen NaiS-Standortstypen (aus BAFU Projekt «Beziehung zwischen Pflanzen und NaiS-Standortstypen», welches noch nicht abgeschlossen ist).
- Brändli (1996)
- Höhenstufen nach NaiS (aus dem BAFU-Projekt Nais-LFI: «Zuordnung der LFI-Stichprobenpunkte zu Waldgesellschaften», welches noch nicht abgeschlossen ist).

Die Verbreitung jeder Baumart wurde dabei jeweils für die Regionen Jura (J), restliche Nordschweiz (N) und Südschweiz (S) angegeben, da die Höhenstufen für diese drei Regionen separat modelliert wurden. Das Verbreitungsareal wurde für jede Baumart für die heutige Verbreitung abgebildet und verifiziert. Für die Verbreitung der Baumart in der Zukunft werden die entsprechenden Höhenstufen, das Tannen-Haupt- und Nebenareal und das Buchenareal aus den Modellierungen mit den Klimazukünften RegCM3 und CLM verwendet.
Wenn das Areal einer Baumart nicht exakt mit der Grenze einer Höhenstufe abgebildet werden kann, wurde die Grenze des Areals an eine modellierte Höhenstufe «angehängt» und mit Hilfe von Temperaturgradienten nach unten oder oben verschoben. Das genaue Vorgehen wird im Folgenden kurz beschrieben. Die obere Grenze einer Höhenstufe wird modelliert, indem die modellierte Temperatur an dieser Höhenstufengrenze mit der realen Temperaturkarte verglichen wird (siehe Teil 1). Um die obere Grenze einer bestimmten Baumart tiefer oder höher zu modellieren, wurde die modellierte Temperatur mit einem Temperaturgradienten korrigiert. Der verwendete Temperaturgradient hängt davon ab, welche Temperatur für die Modellierung der Höhenstufe verwendet wurde. Wenn die Höhenstufe mit der Jahresmitteltemperatur (tjahrmean) berechnet wurde, wird der Temperaturgradient 0.5°C pro 100 Höhenmeter verwendet. Für alle anderen Temperaturkarten (z.B. mittlere Höchstwerte der Lufttemperatur im Jahr, tjahrmax) wurde aufgrund der Temperaturkarten ein genauer Temperaturgradient für jeden Pixel berechnet. In diesen Fällen wurden jeweils diese Gradienten verwendet. Welche Temperaturkarte für die Berechnung der jeweiligen Höhenstufe pro Region verwendet wurde, kann dem Teil 1 entnommen werden.
Die Angaben zu den Lithologien beziehen sich jeweils auf die Einteilung in die sieben Lithologieklassen, welche im Teil 1 bei der Modellierung der Höhenstufen verwendet wurde.

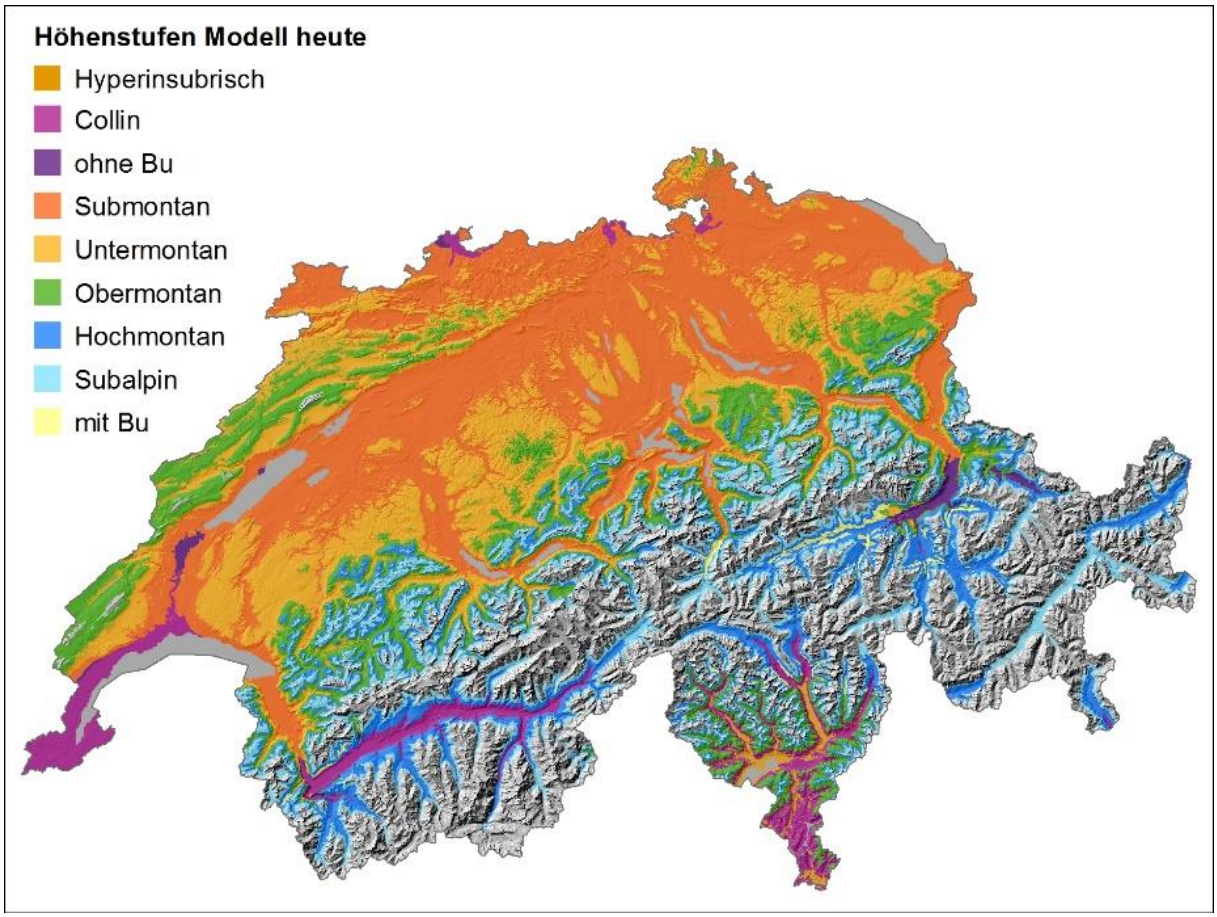

Abb. 1: Höhenstufen (Modell heute, Version 12); Höhenstufenmodellierungen und Verschnitt mit der Buchenarealmodellierung.

Für die Herleitung der Baumartenareale wurde die Version 12 vom Höhenstufenmodell (Abb. 1) verwendet. Die Unterschiede zu den Karten «Modellierte Höhenstufen» in Teil 1 sind in Tab. 1 dargestellt.

Tab. 1: Unterschiede zwischen den hier verwendeten modellierten Höhenstufen Version 12 und den modellierten Höhenstufen im Teil 1.

Beschreibung	Version 12	Teil 1
In diesen Regionen kommen gemäss der Standortsregionenkarte nach NaiS keine Buchen vor, aber im Buchenarealmodell werden Buchen modelliert (bei den Modellen heute, bei CLM oder RegCM3 für die Periode 2070-2099)	mit Buche	ober-, unter- und submontan
In diesen Regionen kommen gemäss der Standortsregionenkarte nach NaiS Buchen vor, aber im Buchenarealmodell werden keine Buchen modelliert (bei den Modellen heute, bei CLM oder RegCM3 für die Periode 2070-2099)	ohne Buche	Teil der collinen Stufe
In den Südtälern wird nicht zwischen unter- und obermontan unterschieden	montan	unter-/obermontan
Colline Stufe in den Südtälern	collin	unterteilt in «collin» und «collin mit Buche»

Im Folgenden wird für jede Baumart angegeben, wie ihr Verbreitungsareal abgebildet wurde.

Buche:
Das Areal der Buche wird für die ganze Schweiz mit dem Buchenarealmodell aus Teil 1 abgebildet (Grenzwert 0.65). In den Regionen, wo heute gemäss Standortsregionenkarte die Buche vorkommt, werden zusätzlich für die Nordschweiz die obermontane Stufe und für die Südschweiz die montane Stufe dazu genommen. Dies deshalb, weil das Buchenarealmodell aus Teil 1 gegen oben bei 1300 m ü. M. begrenzt ist.

Weisstanne:
Die Verbreitung der Weisstanne wird aufgeteilt in ein Hauptareal und ein Nebenareal. Das Hauptareal wird folgendermassen abgebildet: Im heutigen Tannen-Hauptareal gemäss Standortsregionenkarte reicht das Areal bis zur Obergrenze der hochmontanen Stufe, wobei das colline Areal nicht dazugezählt wird. Im heutigen Neben-/Reliktareal gemäss Standortsregionenkarte zählt zusätzlich das Areal aus dem Tannen-Hauptarealmodell (Grenzwert 0.7) mit zum Hauptareal dazu. Für die Abbildung des Nebenareals der Weisstanne werden die drei regionalen Tannen-Nebenarealmodelle (aus Teil 1) verwendet. Diese Modelle sind nur für die Regionen Tannen-Neben-/Reliktareal gemäss heutiger Standortsregionenkarte gerechnet. Bei jedem Modell wird der entsprechende Grenzwert, der im Teil 1 festgelegt wurde, angewendet. Was weder im Hauptareal noch im Nebenareal liegt, wird als Reliktareal bezeichnet.

Fichte:
Im Jura besteht das Areal aus den Stufen submontan, «ohne Buche», untermontan und obermontan. In der restlichen Nordschweiz kommen zusätzlich die Stufen hochmontan, subalpin und die Stufe «mit Buche» dazu. In der Südschweiz besteht das Areal aus den Stufen montan, hochmontan, «mit Buche» und «ohne Buche». In der Region 4 (Standortsregionenkarte) kommt zusätzlich die Stufe subalpin dazu.

Lärche:
Die Lärche ist eine Pionierbaumart. Der Kern ihres Verbreitungsgebiets befindet sich in den kontinentaleren Gebieten. Ausserhalb dieses Gebietes ist sie vor allem wegen Pflanzung und waldbaulichen Pflegemassnahmen vertreten. Die Abgrenzung ihres Areals ist verschwommen und mit Klimadaten schwer zu erfassen. Sie wird deshalb hier nicht modelliert.

Kirsche:
Für die Kirsche wurden zwei Klassen modelliert. In der Klasse 1 kann die Kirsche im Bestand beigemischt sein; in Klasse 2 kommt sie höchstens noch vereinzelt oder an Waldrändern vor. Das Areal der Kirsche in der Klasse 1 besteht im Jura und in der restlichen Nordschweiz aus den Stufen collin, submontan und der Stufe «ohne Buche». In der Südschweiz besteht das Areal aus der hyperinsubrischen und der collinen Stufe. Das Areal der Klasse 2 besteht im Jura aus den Stufen untermontan und obermontan. In der restlichen Nordschweiz besteht das Areal mindestens aus der untermontanen Stufe. Die oberen Grenzen des Areals wurden je nach Region gemäss Standortsregionenkarte unterschiedlich festgelegt. In der Region Mittelland (M) reicht das Areal bis auf ca. 100 m[1] an die obere Grenze der obermontanen Stufe.

[1] Diese Werte sind hier (wie auch im folgenden Text) Höhenangaben

In der Region 1 wird die gesamte obermontane Stufe zum Areal gezählt. In der Region 2b bleibt das Areal ca. 200 m unter der oberen Grenze der hochmontanen Stufe. In der Region 3 reicht das Areal bis auf ca. 100 m an die obere Grenze der hochmontanen Stufe. In der Südschweiz wird das Areal für die Region 4 und 5 gemäss Standortsregionenkarte verschieden definiert. In der Region 4 reicht das Areal bis ca. 200 m unterhalb der oberen Grenze der hochmontanen Stufe. In der Region 5 besteht das Areal aus der montanen Stufe.

Traubeneiche:
Das Areal besteht im Jura und in der Nordschweiz aus den Stufen collin, submontan, «ohne Buche» und untermontan. In Graubünden reicht das Areal bis zur untermontanen Stufe. Ausserdem wird in Graubünden zusätzlich das Buchenareal dazu gezählt. In der Südschweiz besteht das Areal aus der hyperinsubrischen, der collinen und der montanen Stufe. Die Stufe «mit Buche» zählt ebenfalls dazu.

Stieleiche:
Das Areal der Stieleiche besteht im Jura und in der Nordschweiz aus den Stufen collin, submontan, «ohne Buche» und untermontan. In der Südschweiz besteht das Areal aus der hyperinsubrischen und der collinen Stufe. Ausserdem kommt die Stieleiche in der gesamten Schweiz nie auf Trockenstandorten vor. Als Trockenstandorte gelten alle Pixel, bei denen das Verhältnis der aktuellen zur potenziellen Evapotranspiration (Karte von Remund; vergl. Teil 1) kleiner als 60 ist.

Bergahorn:
Das Areal besteht im Jura aus den Stufen submontan, «ohne Buche», untermontan und obermontan. In der restlichen Nordschweiz besteht das Areal aus den Stufen submontan, «ohne Buche», untermontan, obermontan und hochmontan. In der Südschweiz besteht das Areal aus den Stufen collin und «mit Buche». Auf Kalk wurde zusätzlich die montane Stufe dazugenommen.

Esche:
Das Areal der Esche entspricht dem der Kirsche. Im Gegensatz zur Kirsche wird jedoch keine Unterscheidung in zwei verschiedene Klassen vorgenommen.

Winterlinde:
Im Jura besteht das Areal aus den Stufen collin, submontan, «ohne Buche» und untermontan. In der restlichen Nordschweiz besteht das Areal aus den Stufen collin, submontan, «ohne Buche» und untermontan. In den Regionen Jura und Nordschweiz reicht das Areal zudem auf Kalk bis auf 200 m an die obere Grenze der obermontanen Stufe. In Regionen, wo heute gemäss Standortsregionenkarte keine Buche vorkommt, wurde das Areal der Winterlinde an die Modellierung der hochmontanen Stufe angehängt. An nordexponierten Hängen nähert sich das Areal bis auf ca. 850 m der oberen Grenze der hochmontanen Stufe. An südexponierten Hängen bleibt das Areal ca. 700 m unter der oberen Grenze der hochmontanen Stufe zurück.

Sommerlinde:
Die Sommerlinde kommt in der ganzen Schweiz nie auf Gneis oder Granit (Lithologieklassen 4 und 5) vor. Für die restlichen Lithologieklassen wird das Areal wie folgt definiert. Im Jura besteht das Areal aus den Stufen collin, «ohne Buche», submontan und untermontan und geht zusätzlich auf Kalk bis auf 100 m andie obere Grenze der obermontanen Stufe heran. In der restlichen Nordschweiz besteht das Areal aus den Stufen collin, ohne Buchen, submontan, untermontan und reicht auf Kalk zusätzlich bis auf 100 m an die obere Grenze der obermontanen Stufe. In Regionen, wo heute gemäss Standortsregionenkarte keine Buche vorkommt, besteht das Areal aus der collinen Stufe und zusätzlich auf Kalk aus dem gleichen Areal wie das der Winterlinde. Im Süden besteht das Areal aus der hyperinsubrischen und der collinen Stufe und übertrifft die obere Grenze der collinen Stufe um 200 m.

2.3 Methode «ForClim»

ForClim ist ein Modell der Walddynamik, das Verjüngung, Wachstum und Mortalität von Einzelbäumen in jährlichen Schritten simuliert (Bugmann 1996). Der Simulation liegen bioklimatische Indizes zugrunde, welche anhand standortspezifischer Temperatur- und Niederschlagswerte berechnet werden. Klimawandel wird durch eine graduelle Erhöhung dieser Mittelwerte simuliert (vgl. Schmid et al. 2015). Das Modell ist dabei in der Lage, ohne weitere standortspezifische Kalibrierung Waldbestände in einem weiten Bereich von klimatischen Bedingungen zu simulieren.
Für das vorliegende Projekt wurde die fundamentale Nische von 17 Baumarten Mitteleuropas mit dem bioklimatischen Teil des Modells ForClim (Rasche et al. 2012) simuliert, d.h. ohne jede Konkurrenz-Effekte. Für jeden Rasterpunkt der Schweiz (Beispielkarte s. Abb. 2) wurde die Eignung für einzelne Baumarten berechnet anhand der für die Baumarten wichtigen Parameterwerte, welche die fundamentale Nische bestimmen:

- Jahresgradsumme (uDD),
- Trockenstress-Index (uDr),
- Wintertemperaturlimite (uWiT).

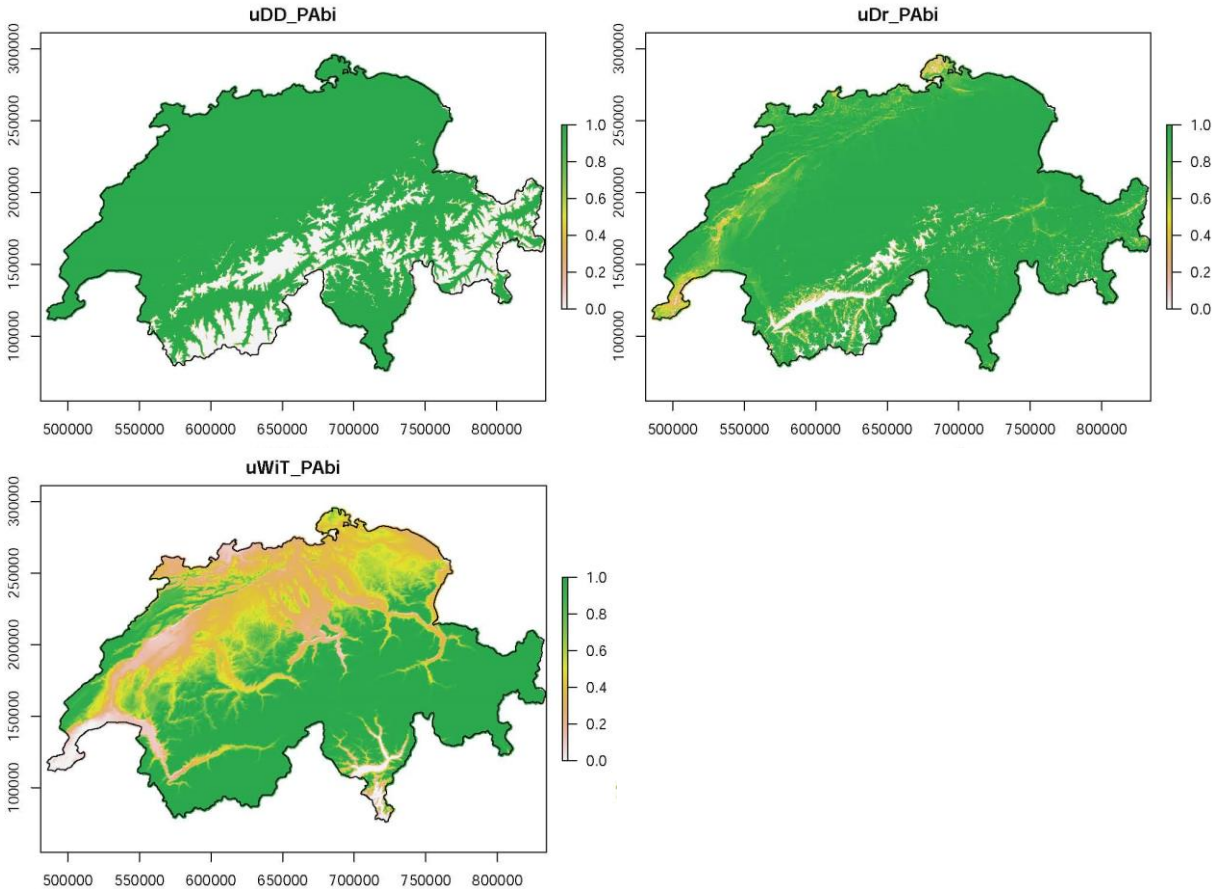

Abb. 2: Karten mit den Parameterwerten Jahresgradsumme (uDD), Trockenstress-Index (uDr) und Wintertemperaturlimite (uWiT) für die Fichte (PAbi).

Die Berechnung dieser drei Karten, sowie deren Überlagerung erlauben eine ökologische Interpretation der Arealgrenzen (Abb. 3). Dunkle Flächen zeigen Flächen, bei denen keine Limitierungen bestehen und die somit geeignete Areale darstellen.

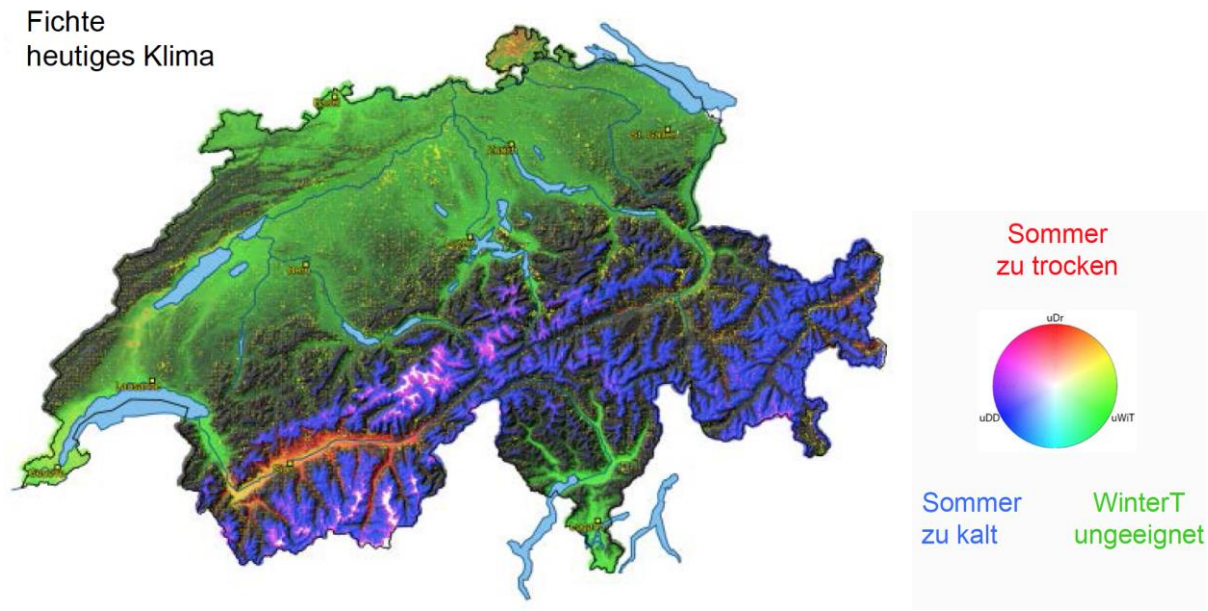

Abb. 3: Simulierte fundamentale Nische der Fichte in der Schweiz und ihre Limitierungen durch die drei Klima-Faktoren Tagesgrade (uDD), Trockenheit (uDr) und Phänologie (uWiT).

Der Projekt-Bearbeiter, Dr. Dario Martin-Benito, verfasste einen kurzen technischen Bericht, in welchem das Vorgehen beschrieben wird (Anhang 2). Die Interpretation der Ergebnisse ist aber nicht trivial, und deshalb erklärt Bugmann zusätzlich die Grundlagen, Aussagen und Grenzen dieser Simulationen (ebenfalls Anhang 2). Er erläutert dabei die getroffenen Annahmen für ForClim und ihre Umsetzung im Projekt. Ähnlich wie in vielen anderen dynamischen Waldmodellen wird in ForClim davon ausgegangen, dass sowohl der Zuwachs als auch die Verjüngung durch klimatische Faktoren limitiert werden. Das Kartenmaterial basiert auf einem räumlichen Raster von 200 m.
Ebenfalls wird in Anhang 2 die Interpretation der Ergebnisse erläutert und die Originalkarten werden aufgezeigt. Dabei ist die Bedeutung der folgenden Farben:

- Schwarz: Baumart kommt potentiell vor,
- Rot: Baumart limitiert wegen Trockenheit,
- Blau: Baumart limitiert wegen Wärmesumme,
- Grün: Baumart limitiert wegen Wintertemperatur,
- Weiss: Baumart limitiert wegen aller 3 Faktoren.

Wichtig: Das bioklimatische Untermodell von ForClim ist weder im Hinblick auf detaillierte lokale bis kleinregionale Aussagen strukturiert worden, noch wurde versucht, die Parameterwerte so zu kalibrieren, dass z.B. im Tal Y die «richtige» Menge der Baumart X simuliert wird. Die Potenzial-Karten von ForClim sind «out-of-the-box»-Anwendungen eines vergleichsweise sehr groben Modells.

2.4 Vorgehen bei der Synthese

Die ForClim-Karten wurden durch Zimmermann in binäre Karten umgewandelt. Gebiete, welche > 0 sind (pro Faktor), werden als Teil der fundamentalen Nische betrachtet.
Zimmermann erstellte und kombinierte folgendes Kartenmaterial für den Vergleich:

- Einzelkarten pro Modell (Abenis-, ForClim- und PorTree^{+}-Modelle) für heute und die zwei Klimazukünfte (RegCM3 und CLM für die Periode 2070-2099).
- Synthesekarten aus Abenis- und PorTree^{+}-Modell für heute und die zwei Klimazukünfte (RegCM3 und CLM für die Periode 2070-2099).

3 Resultate: Vergleich von Modellierungen von PorTree+, Abenis und ForClim

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der Habitateignungs-Modellierungen (heutige Arealverbreitungskarten und Karten für die Periode 2070-2099) von PorTree^{+} und Abenis mit Hilfe von Synthesekarten miteinander verglichen. Die Karten von ForClim werden ebenfalls berücksichtigt, aber da sie die fundamentale Nische (ohne Konkurrenzeinfluss) abbilden, wird kein Vergleich mit den anderen beiden Modellen gezogen.
Sämtliche Abbildungen, die in den folgenden Kapiteln nur erwähnt, aber nicht dargestellt werden, befinden sich im Anhang 4 (pro Baumart Einzelkarten von Abenis und PorTree^{+} von heute und den Klimazukünften CLM und RegCM3 für die Periode 2070-2099). Bei ForClim sind zusätzlich im Anhang 3 die einzelnen Karten mit den Parameterwerten Jahresgradsumme (uDD), Trockenstress-Index (uDr) und Wintertemperaturlimite (uWiT) vorhanden. Zu den Ergebnissen und der Interpretation der ForClim-Karten siehe Erläuterungen von Bugmann im Anhang 2.
In den folgenden Kapiteln wird jeweils die Synthese aus den Modellen PorTree^{+} (es wurden nur die Flächen berücksichtigt, bei denen mindestens 60 % der Modell-/Resampling Karten die Art als «Vorkommen» klassieren) und Abenis (realisiertes Baumartenareal heute und zukünftige Habitateignungskarten; die Lärche wurde nicht modelliert) abgebildet sowie die fundamentale Nische von ForClim (ausser bei Kirsche, diese wurde nicht modelliert). Pro Baumart werden jeweils in einer Tabelle die Ergebnisse der Modellierungen von PorTree^{+} und Abenis erläutert und miteinander verglichen. Für die Interpretation der Realitätsnähe der heutigen Modellierungen wurden LFI-Daten beigezogen und Lokalkenntnisse des Projektteams flossen ein (dies kann zu einer stärkeren Gewichtung von gewissen Regionen/Kantonen führen, z.B. Kanton St. Gallen, Uri und Graubünden). Auf eine Interpretation der Zukunftsmodellierungen von ForClim wird aus mangelnden Vergleichsmöglichkeiten verzichtet.

3.1 Buche (Fagus sylvatica)

Modellierung des Buchenareals heute

Die Modellierung von Abenis weist ein grösseres Buchenareal aus als die Modellierung von PorTree⁺ (Abb. 4). Das Modell Abenis wird als etwas realitätsnäher eingeschätzt (detaillierter Vergleich in Tab. 2).

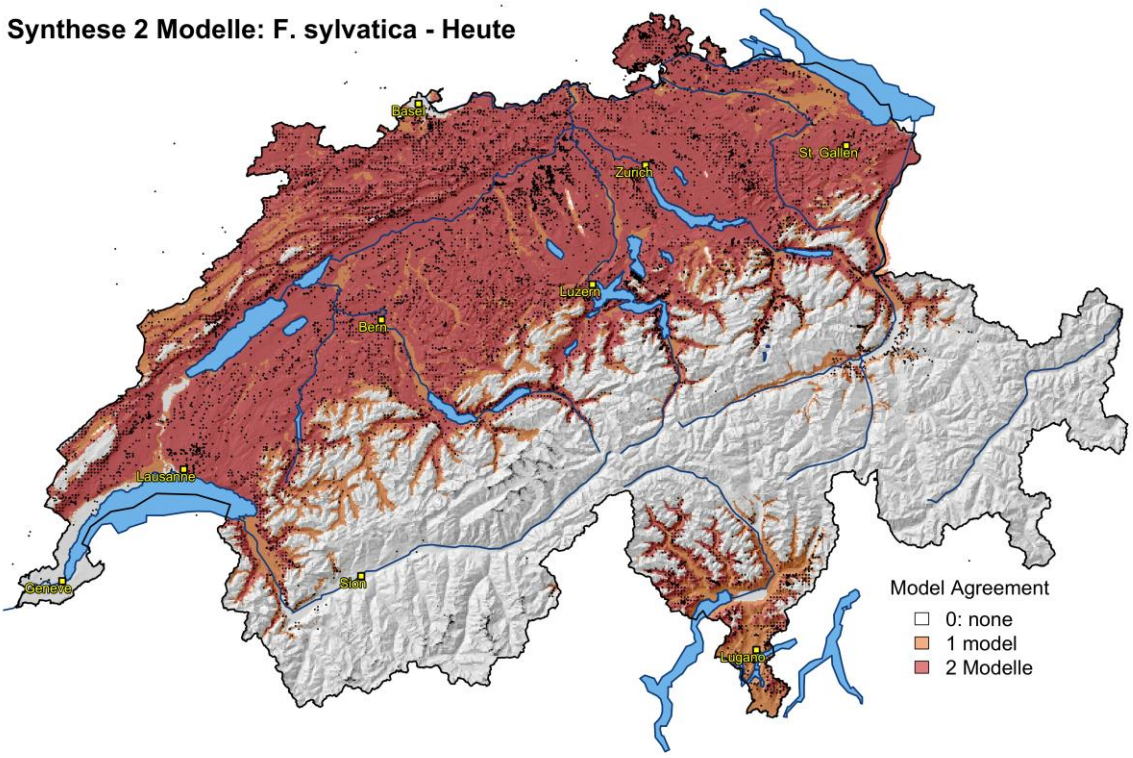

Abb. 4: Synthese von PorTree⁺ und Abenis. Modellierte Habitateignung der Buche, heute. Legende: 2 = Buche kommt in beiden Modellen vor, 1 = Buche kommt nur in einem Modell vor, 0 = Buche kommt in keinem Modell vor.

Nach der Modellierung mit ForClim (fundamentale Nische; Abb. 5) steigt die Buche viel höher hinauf als bei den Modellierungen von Abenis und PorTree⁺. Bei ForClim fehlt die kontinentale Begrenzung (z.B. Unterengadin), die Begrenzung durch Föhneinfluss (Misox, Leventina, Bergell, Puschlav) und durch Kaltluftseen (fehlende Buchen in Einsiedeln, Altmatt, Gstaad und Ilanz). In Basel sind Buchen modelliert, die wegen Schotterflächen (und damit geringer Wasserspeicherkapazität) fehlen. ForClim berücksichtigt auch strauchförmige Buchen in hohen Lagen.

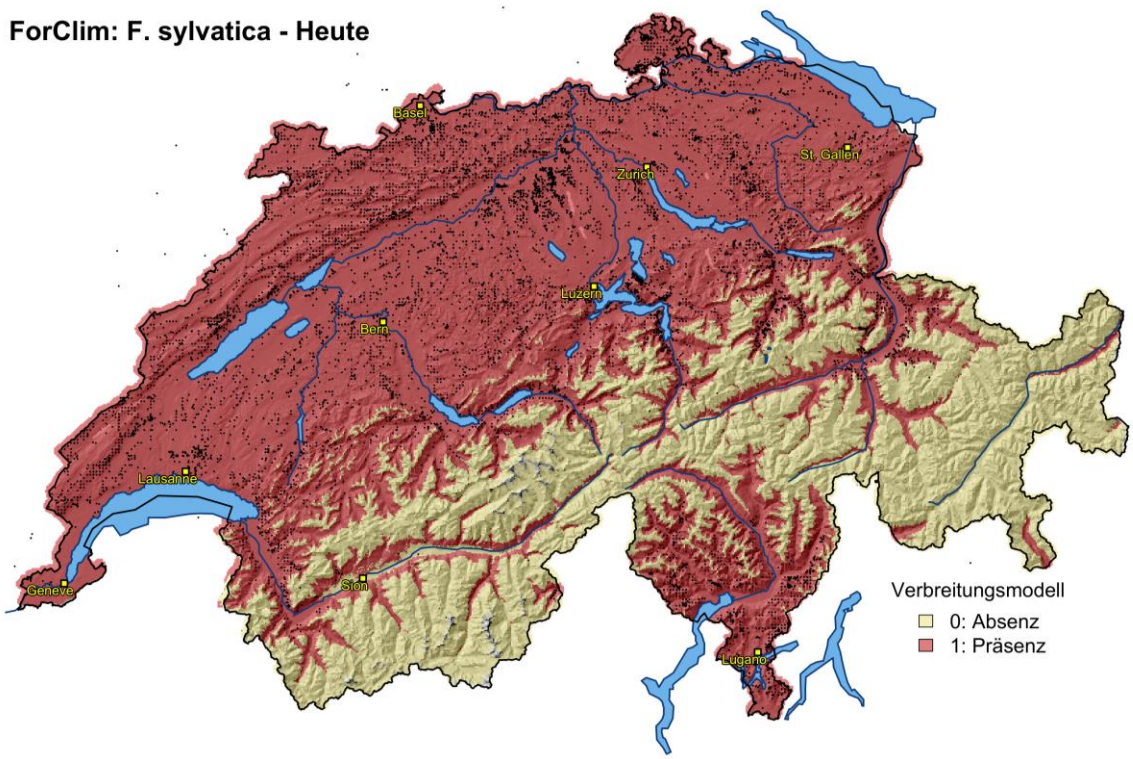

Abb. 5: Modellierte fundamentale Nische der Buche, heute (gemäss ForClim).

Modellierung des Buchenareals mit der Klimazukunft RegCM3 (Periode 2070-2099)

In der Nordschweiz (Basel, Schaffhausen) und im westlichen Mittelland inkl. Genferseegebiet nimmt die Eignung für die Buche in beiden Modellen (Abb. 6) stark ab (detaillierter Vergleich in Tab. 2).

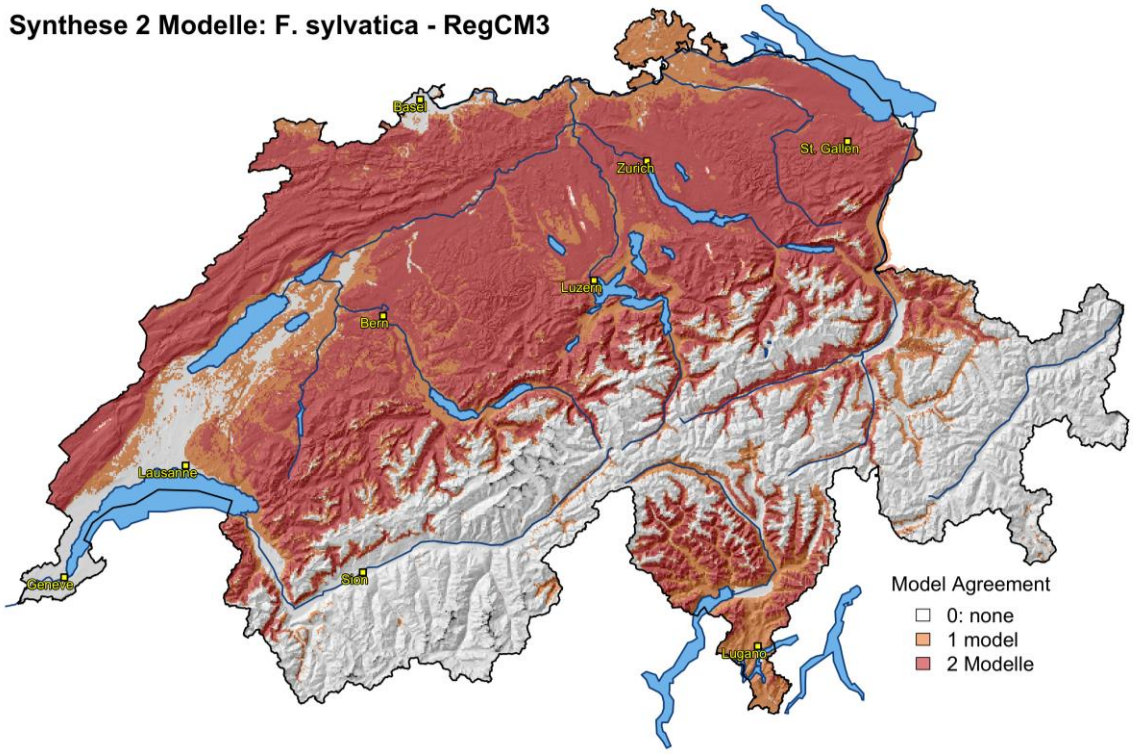

Abb. 6: Synthese von PorTree⁺ und Abenis. Modellierte Habitateignung der Buche, Klimazukunft RegCM3 für die Periode 2070 - 2099. Legende: 2 = Buche kommt in beiden Modellen vor, 1 = Buche kommt nur in einem Modell vor, 0 = Buche kommt in keinem Modell vor.

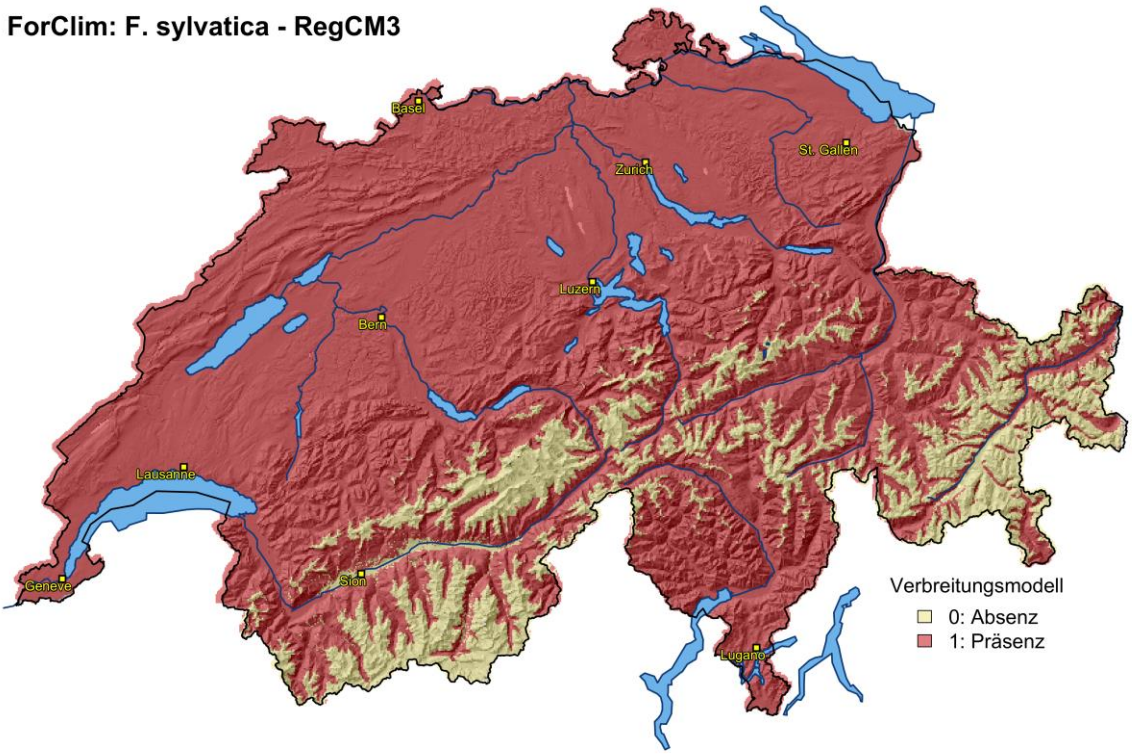

Abb. 7: Modellierte fundamentale Nische der Buche gemäss ForClim, mit der Klimazukunft RegCM3 für die Periode 2070-2099.

Modellierung des Buchenareals mit der Klimazukunft CLM (Periode 2070-2099)

Im Vergleich zu den Modellierungen beim RegCM3 zieht sich die Buche zusätzlich aus den unteren Lagen der Südschweiz zurück und ihr Gedeihen ist in grossen Teilen des Mittellandes unsicher (detaillierter Vergleich in Tab. 2). Vor allem im Jura, den nördlichen Randalpen und im östlichen Mittelland wird sich nach den Modellen die Buche halten können, ebenfalls in den höheren Lagen im Tessin und in Teilen von Nordbünden. Bei den Flächen, wo die Habitateignung für Buche hoch bleibt, handelt es sich um Gebiete, wo das Klima ozeanisch mit ausgeglichenen Temperaturen, eher hoher Luftfeuchtigkeit und reichlichen Niederschlägen ausgestattet ist und wo es nicht zu heiss sein wird.

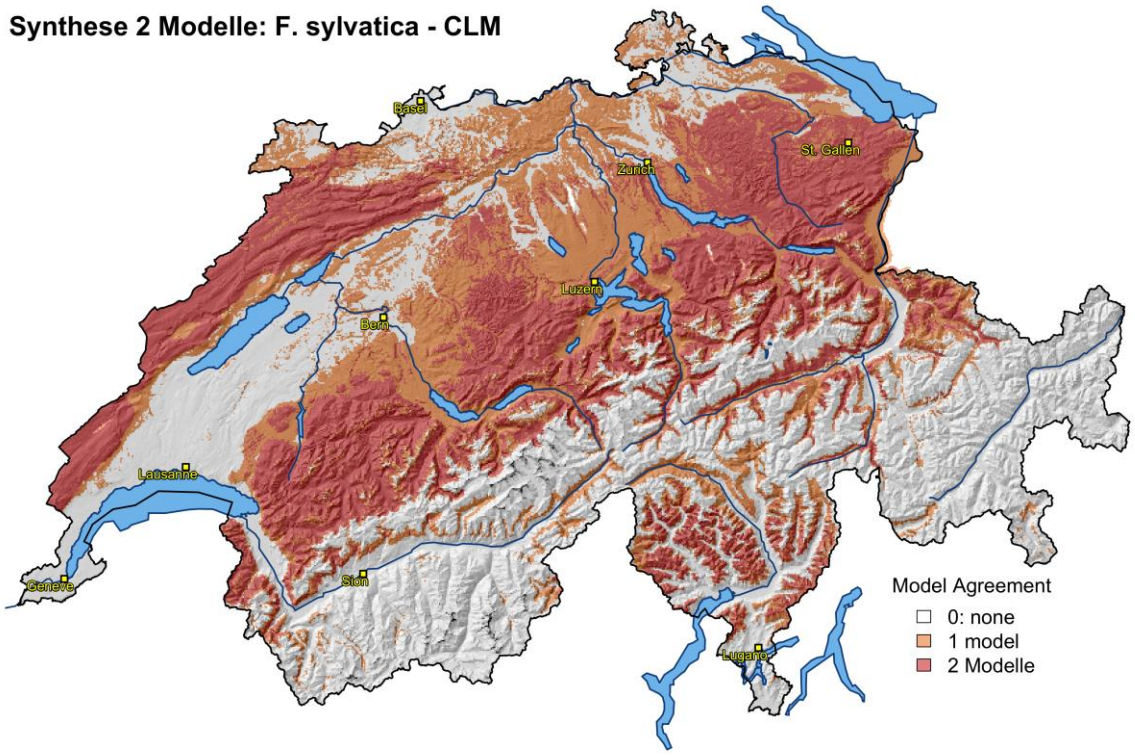

Abb. 8: Synthese von PorTree⁺ und Abenis. Modellierte Habitateignung der Buche, Klimazukunft CLM für die Periode 2070 - 2099. Legende: 2 = Buche kommt in beiden Modellen vor, 1 = Buche kommt nur in einem Modell vor, 0 = Buche kommt in keinem Modell vor.

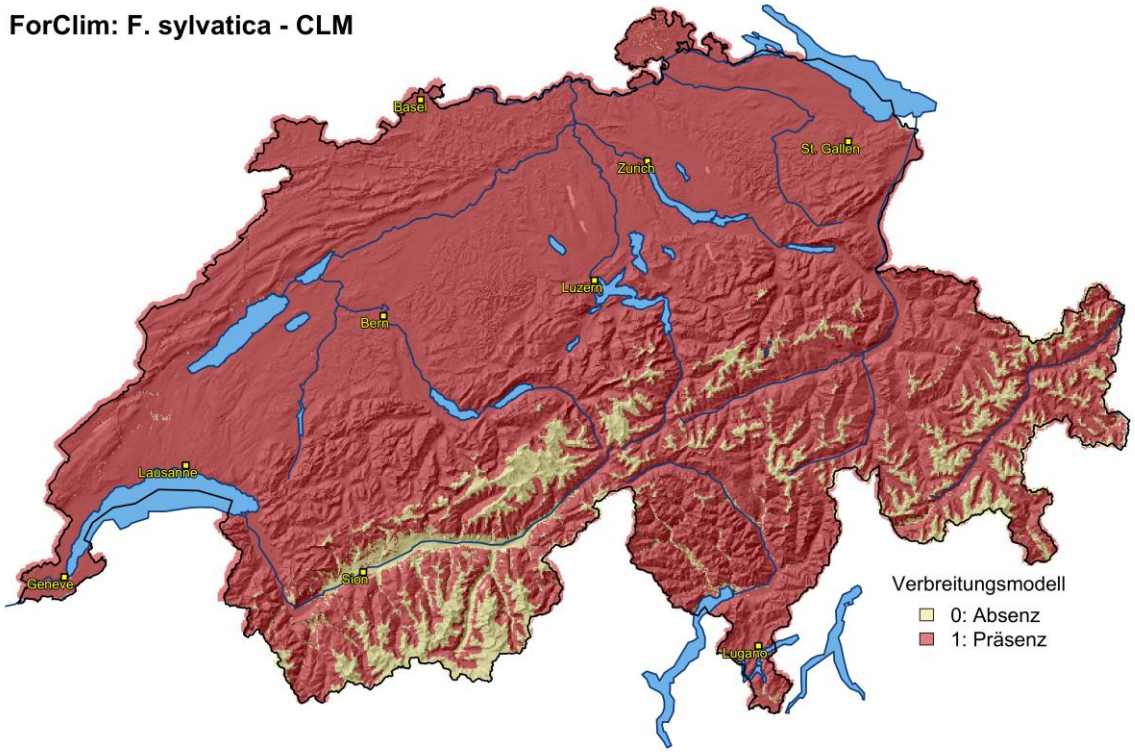

Abb. 9: Modellierte fundamentale Nische der Buche gemäss ForClim, mit der Klimazukunft CLM für die Periode 2070-2099.

Modellvergleich PorTree+ und Abenis bei der Buche: heute und bei den Klimazukünften RegCM3 und CLM (Periode 2070-2099)

In Tab. 2 werden die grössten Unterschiede der Modellierungen erläutert.

Tab. 2: Vergleich von Modellierungen von PorTree+ und Abenis mit LFI-Daten und Lokalkenntnissen.

	Wie stark ist die Buche im Vergleich zum heutigen Buchenvorkommen (LFI-Flächen [LFI] und Lokalkenntnissen [LK]) in den verschiedenen Modellierungen vertreten?		Wie stark weicht die Modellierung für die Periode 2070-2099 von Abenis (MAB) von der Modellierung von PorTree+ (MPT) ab?	
Gebiet	**PorTree+ (MPT)**	**Abenis (MAB)**	**RegCM3**	**CLM**
Schaffhausen	i.O.	i.O.	MAB: keine Buche wegen Trockengrenze (SM ohne Buche). MPT viel Buche.	Im Gegensatz zu MPT bei MAB keine Buchen mehr.
Bodenseegebiet	Im Vergleich zu LFI: zu wenig.	i.O.	Keine Abweichung.	Im Gegensatz zu MPT bei MAB fast keine Buchen mehr.
Mittelland	i.O.	i.O.	Grosse Flächenunterschiede infolge sehr flacher Temperaturgradienten, subtile Temperaturgrenze.	MAB weist mehr Flächen aus, grosse Unterschiede da sehr flache Temperaturgradienten.
Basel	Im Vergleich zu LFI: zu wenig.	i.O.	Wenig Abweichung.	Keine Abweichung.
Jurabogen	Bildet Einfluss von Kaltluftseen gut ab, evtl. eher zu wenig ausgewiesene Flächen.	i.O.	Keine Abweichung.	MAB: im Nordosten weniger Buche.
Aargau	i.O.	i.O.	Wenig Abweichung.	MAB weist kein Buchenhabitat auf, MPT schon – unterschiedliche Gewichtung von Faktoren.
Nördliche Randalpen	Im Vergleich zu LFI: eher zu wenig.	i.O.	Wenig Abweichung.	MAB in den unteren Lagen auch Buche. MPT: keine Buchen in unteren Lagen.
Genfersee-Neuenburgersee	i.O.	i.O.	Bei Neuenburgersee und Ajoie überall bei MAB weniger Buchen, dank Trockengrenze (submontan ohne Buche).	Keine Abweichung.
Rhonetal (VS)	Eher zu wenig. LK: bei Martigny noch vorkommend.	Eher zu wenig.	Wenig Abweichung.	MPT: Inneralpin grösseres Eindringen von Buchen in die Täler.
Rheintal (GR)	Zu wenig.	Zu starke Ausdehnung in Surselva und ins Domleschg hinein. LK: Buchen-Inseln bis Trun, aber z.T. gepflanzt.	In Inneralpen weiteres Eindringen von MAB in Täler.	MPT im hinteren Bereich der Täler mehr Buche.

Gebiet	Wie stark ist die Buche im Vergleich zum heutigen Buchenvorkommen (LFI-Flächen [LFI] und Lokalkenntnissen [LK]) in den verschiedenen Modellierungen vertreten?		Wie stark weicht die Modellierung für die Periode 2070-2099 von Abenis (MAB) von der Modellierung von PorTree+ (MPT) ab?	
	PorTree+ (MPT)	Abenis (MAB)	RegCM3	CLM
Engadin (GR)	i.O.	i.O.	Keine Buchen.	Keine Buchen.
Tessin	Zu wenig, in Tieflagen und Talböden unterschätzt. Wenn auch Flächen mit 30-60% Präsenz hinzugenommen würden, realistischere Verbreitung. LK: Bei Südhängen bis ca. 700 m ü. M. vorkommend, an Nordlagen bis in Tallagen. Buche ist weniger konkurrenzstark im TI, evtl. wegen sauren Böden, Nährstoffarmut und Lufttrockenheit.	i.O., Täler gut erfasst, in tieferen Lagen weiss man es nicht.	MAB: deutlich mehr Buchen in Tallagen. MPT: mehr Buchen im hinteren Teil der Täler.	Tallagen identisch wegen Trockenheitsgrenze, bei MPT weiteres Vordringen in Täler (v.a. Bedrettotal).
Misox (GR)	Zu wenig.	i.O.	MAB: deutlich mehr Buchen in Tallagen. MPT: mehr Buchen im hinteren Teil der Täler.	Tallagen identisch wegen Trockenheitsgrenze, bei MPT weiteres Vordringen in Täler.
Puschlav, Münstertal, Bergell (GR)	i.O.	i.O.	Keine Abweichung.	Bei MAB im Gegensatz zu MPT kein Buchenvorkommen.

Fazit

Falls es in Zukunft nicht wesentlich trockener wird, sondern nur wärmer, wird die Buche weniger Probleme bekommen, als wenn es trockener und wärmer wird. Wichtig ist, wie oft Trockenperioden in Zukunft auftreten werden und wie ausgeprägt sie sind. Dabei wird sich auf tiefgründigen Böden an Nordlagen die Buche auch im Mittelland wahrscheinlich halten können. Für die Zukunft wurde vom Projektteam eigentlich eine Ausbreitung in den Alpentälern erwartet, da die Frostwechseltage abnehmen. Nach den Modellen breitet sich die Buche aber in Zukunft nur wenig in die Alpentäler aus, ausser in Graubünden, dort sollte sie sich grossflächiger in den mittleren Lagen ausbreiten können. Die Föhnhäufigkeit ist in beiden Klimazukünften gleich gewählt wie heute, da die zukünftige Entwicklung zu wenig untersucht ist. Nach Z'graggen (mündliche Mitteilung) nimmt die Frosthäufigkeit in hohen Lagen in Zukunft (2070-2099) ab. In näherer Zukunft könnten bei der Buche bei früherem Blattaustrieb allenfalls noch Frostprobleme auftreten (Remund et al. 2016). Entscheidend ist nicht nur, ob die Frosthäufigkeit abnimmt, sondern auch, ob die Frosthäufigkeit nach Blattaustrieb nicht zunimmt.

Gebiete mit häufigen und intensiven Kaltluftseen sind thermisch sehr kontinental. Regionen mit erhöhter thermischer Kontinentalität weisen mehr Frostwechseltage auf, was z.V. das

Vordringen spätfrostempfindlicher Baumarten wie der Buche und in vermindertem Mass auch der Weisstanne in die inneralpinen Gebiete verhindert, bzw. stark erschwert (Huber et al. 2015).
Aufgrund des wahrscheinlich gleichbleibenden Föhneinflusses kann die Buche ziemlich sicher auch in Zukunft nicht weiter in die Südtäler (Bergell, Misox, Puschlav) vorstossen; die Buche reagiert empfindlich auf Luft- und Bodentrockenheit (Lendzion & Leuscher 2008). In Huber et al. 2015 konnte gezeigt werden, dass in diesen Gebieten die Buche bei einer Föhnhäufigkeit von ca. 17 % im Jahr ausfällt, trotz genügend Niederschlag und relativ geringer Kontinentalität.
Nach Zingg & Bürgi (2008) muss bei der Buche mit teils starken Verlusten im Wachstum in den unteren Lagen aufgrund erhöhter Trockenheit gerechnet werden. Nach Kint et al. (2012) weist die Buche bereits heute ein rückläufiges Wachstum auf, insbesondere entlang ihrer südlichen Verbreitungsgrenze, verbunden mit einer Verschiebung in höhere Lagen (Penuelas & Boada 2003, Jump et al. 2006).

3.2 Weisstanne (Abies alba)

Modellierung des Weisstannenareals heute

Abweichungen bestehen bei der Synthese von Abenis und PorTree$^+$ (Abb. 10) v.a. im Tessin, im Kanton Graubünden, im Wallis, im Raum Zürich-Schaffhausen-Bodensee und bei Basel. Ebenfalls bestehen Abweichungen zwischen Lausanne und dem Bielersee. Relativ gut stimmen die Modelle in den nördlichen Randalpen und im Jura überein. Die Weisstanne ist in den Modellen Abenis und PorTree$^+$ in den Talböden unterschiedlich vertreten. Die Weisstanne geht beim Modell Abenis meist weiter in die Täler hinein und ist realistischer als die Modellierung von PorTree$^+$. Die Modelle von PorTree$^+$ und Abenis unterscheiden sich in der Höhenausbreitung (detaillierter Vergleich in Tab. 3).

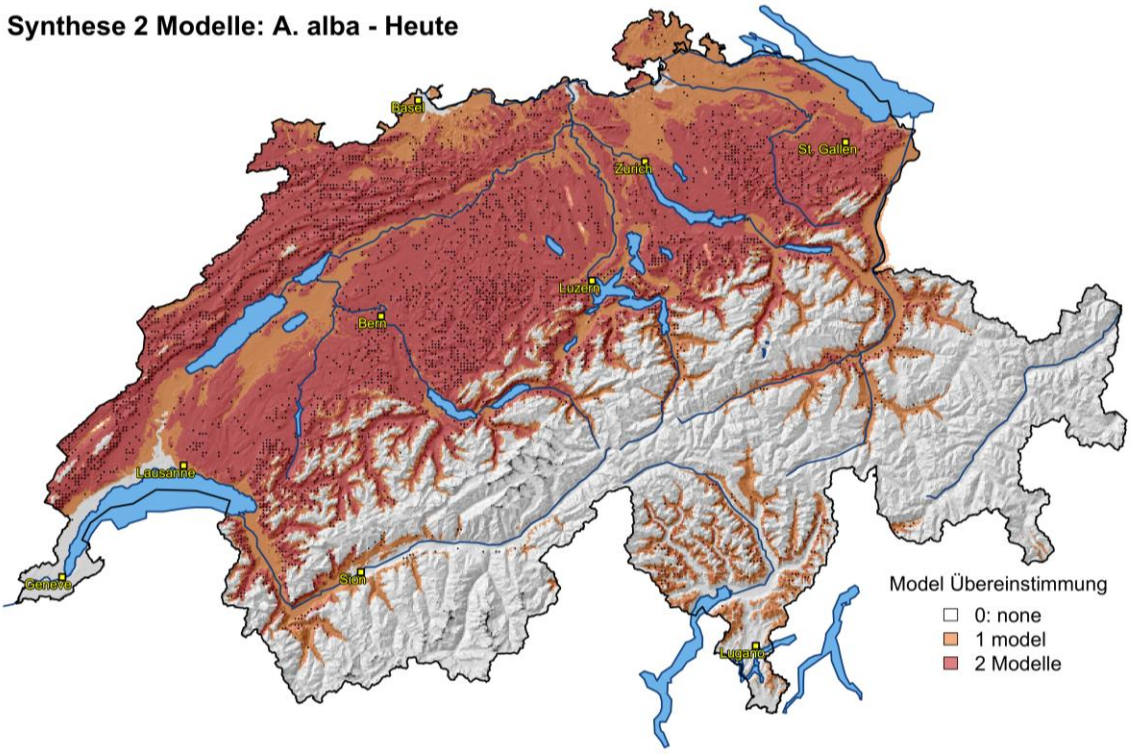

Abb. 10: Synthese von PorTree$^+$ und Abenis. Modellierte Habitateignung der Weisstanne, heute. Legende: 2 = Weisstanne kommt in beiden Modellen vor, 1 = Weisstanne kommt nur in einem Modell vor, 0 = Weisstanne kommt in keinem Modell vor.

Plausibilität der heutigen fundamentalen Nische bei ForClim (Abb. 11): Im Reliktareal wurden teilweise Weisstannenvorkommen modelliert (z.B. Engadin, Münstertal). Im Mittelland, in den Alpentälern (z.B. GL, SG, UR) und in den nördlichen Randalpen (z.B. Napfgebiet = klassisches Weisstannengebiet) wurden deutlich zu wenig Flächen modelliert. Im Wallis ist die Modellierung relativ gut, ausser in den Vispertälern, dort fehlt die Weisstanne. Im Jura wurden bei La Brevine Weisstannen modelliert, wo sie wegen einem Kaltluftsee fehlen. Das Weisstannenvorkommen wird auf der Alpennordseite von den Alpentälern bis ins Mittelland stark unterschätzt, sonst ist es relativ gut modelliert. Die Frage ist, ob die grossen Flächen, wo die Weisstanne unterschätzt wird, mit einer Anpassung eines oder mehrerer der 3 limitierenden Faktoren angepasst werden könnten.

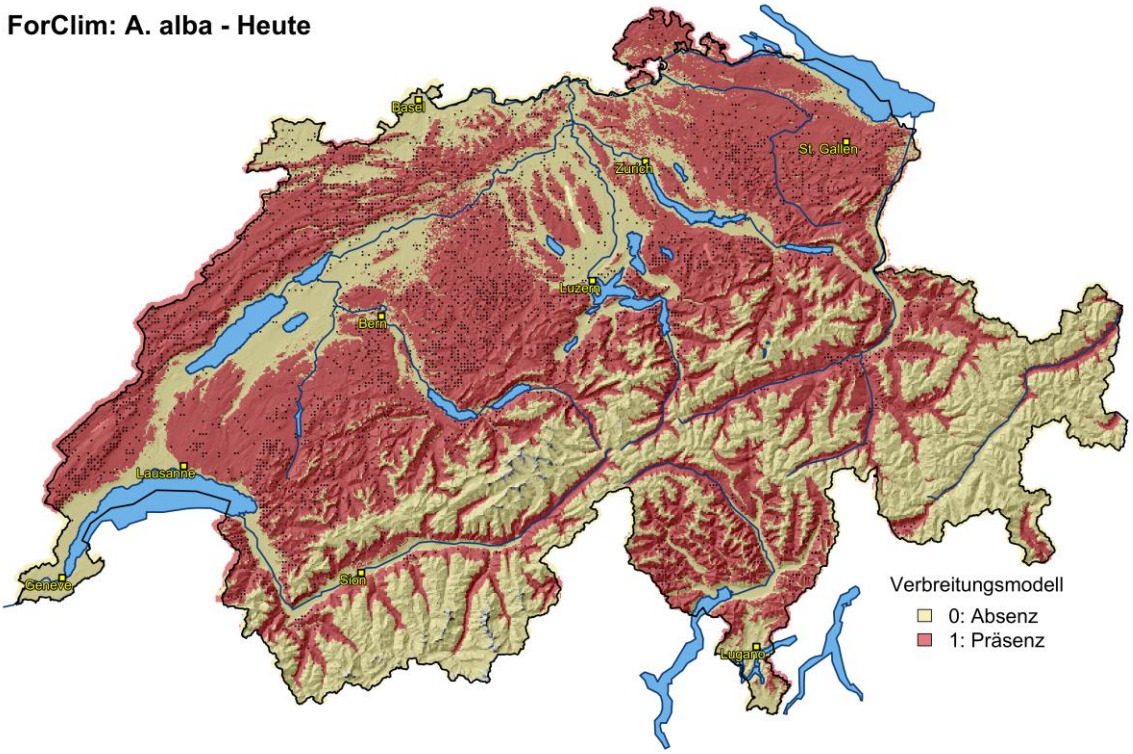

Abb. 11: Modellierte fundamentale Nische der Weisstanne, heute (gemäss ForClim).

Modellierung des Weisstannenareals mit der Klimazukunft RegCM3 (Periode 2070-2099)

Die nördlichen Randalpen und der Jura weisen v.a. Übereinstimmungen bei den Modellierungen auf (Abb. 12; detaillierter Vergleich in Tab. 3).

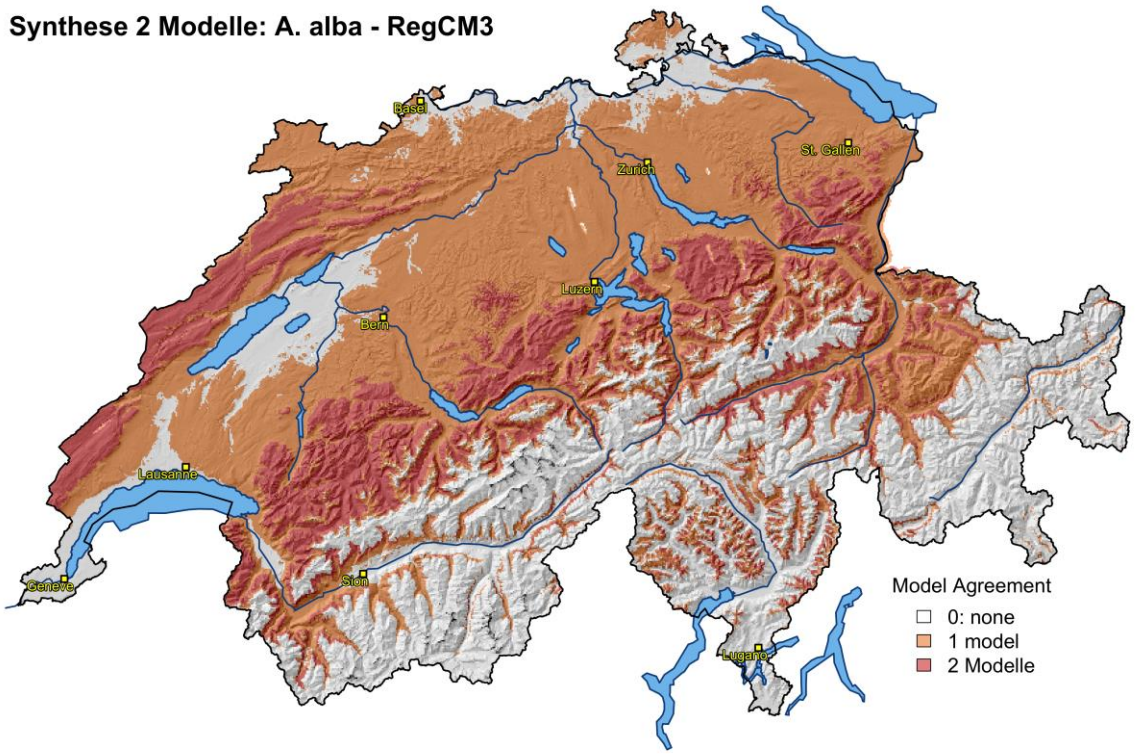

Abb. 12: Synthese von PorTree⁺ und Abenis. Modellierte Habitateignung der Weisstanne, Klimazukunft RegCM3 für die Periode 2070 - 2099. Legende: 2 = Weisstanne kommt in beiden Modellen vor, 1 = Weisstanne kommt nur in einem Modell vor, 0 = Weisstanne kommt in keinem Modell vor.

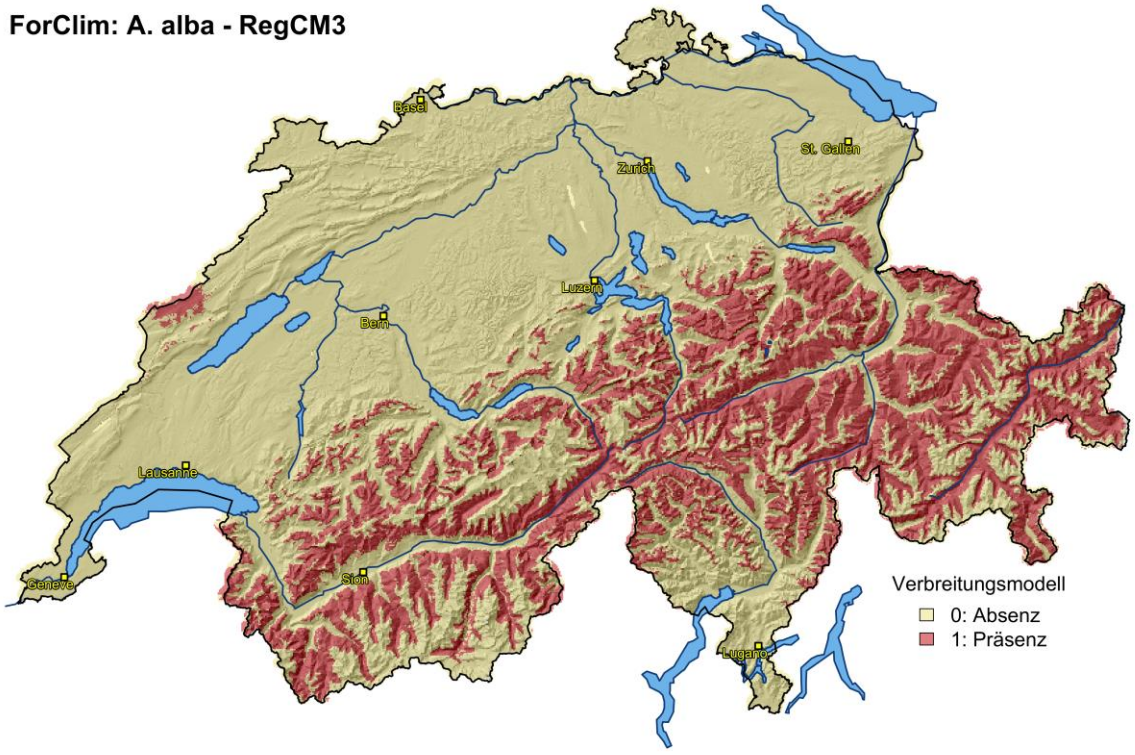

Abb. 13: Modellierte fundamentale Nische der Weisstanne gemäss ForClim, mit der Klimazukunft RegCM3 für die Periode 2070-2099.

Modellierung des Weisstannenareals mit der Klimazukunft CLM (Periode 2070-2099)

Die einzigen Übereinstimmungen bei den beiden Modellen (Abb. 14) bestehen noch in den nördlichen Randalpen. Aufgrund dieser grossen Abweichungen bestehen grosse Unsicherheiten in der Vorhersage (detaillierter Vergleich in Tab. 3). Nach den Modellen kann angenommen werden, dass die Weisstanne in den nördlichen Randalpen und in den höheren Lagen in Graubünden, im Unterwallis, im Tessin und im Jura bestehen bleibt.

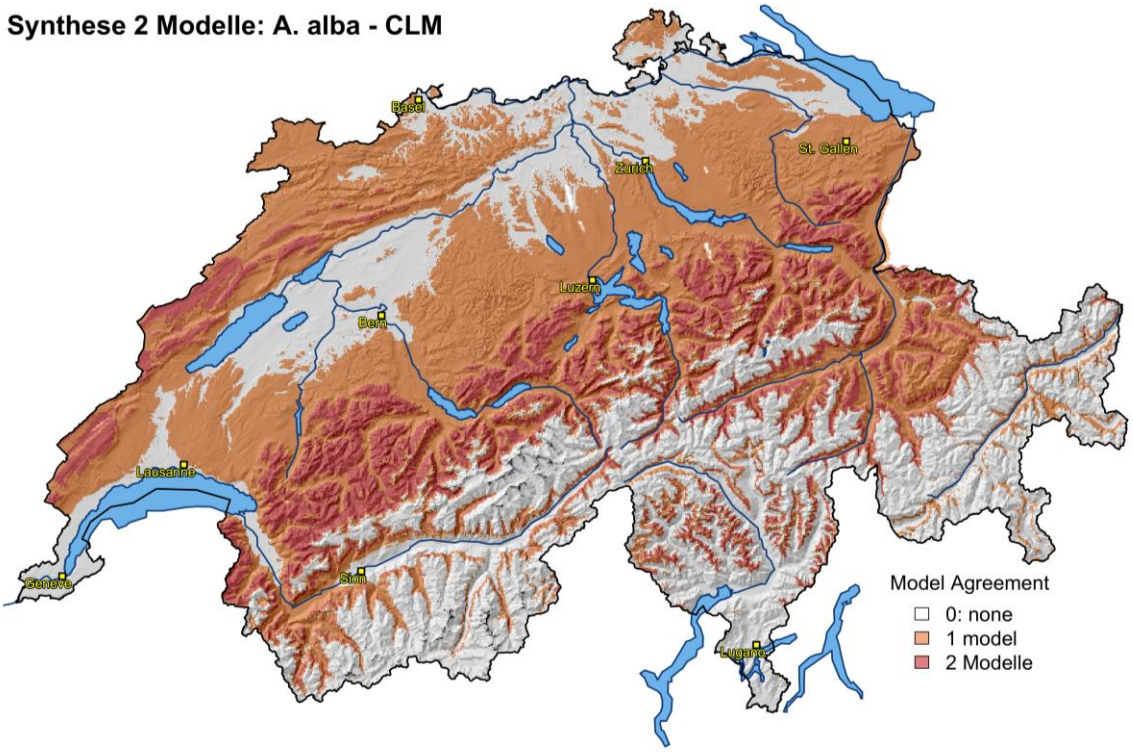

Abb. 14: Synthese von PorTree⁺ und Abenis. Modellierte Habitateignung der Weisstanne, Klimazukunft CLM für die Periode 2070 - 2099. Legende: 2 = Weisstanne kommt in beiden Modellen vor, 1 = Weisstanne kommt nur in einem Modell vor, 0 = Weisstanne kommt in keinem Modell vor.

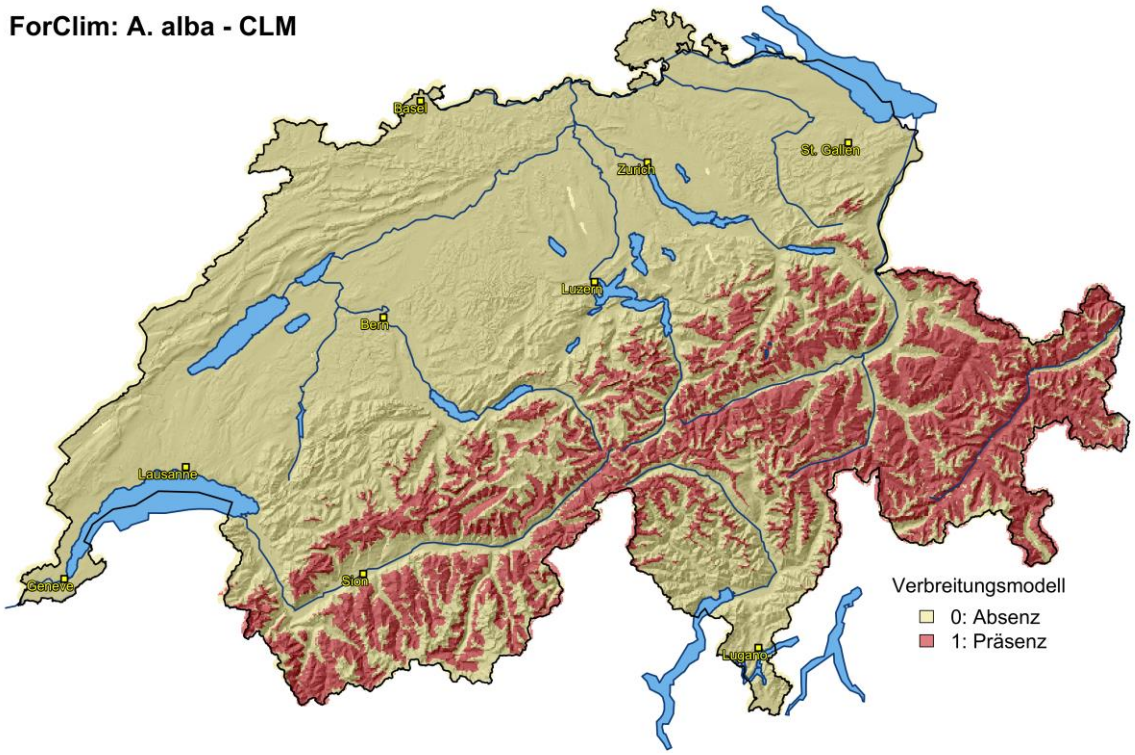

Abb. 15: Modellierte fundamentale Nische der Weisstanne gemäss ForClim, mit der Klimazukunft CLM für die Periode 2070-2099.

Modellvergleich PorTree+ und Abenis bei der Weisstanne: heute und bei den Klimazukünften RegCM3 und CLM (Periode 2070-2099)

In Tab. 3 werden die grössten Unterschiede der Modellierungen erläutert.

Tab. 3: Vergleich von Modellierungen von PorTree+ und Abenis mit LFI-Daten und Lokalkenntnissen.

	Wie stark ist die Weisstanne im Vergleich zum heutigen Weisstannenvorkommen (LFI-Flächen [LFI] und Lokalkenntnissen [LK]) in den verschiedenen Modellierungen vertreten?		Wie stark weicht die Modellierung für die Periode 2070-2099 von Abenis (MAB) von der Modellierung von PorTree+ (MPT) ab?	
Gebiet	**PorTree+ (MPT)**	**Abenis (MAB)**	**RegCM3**	**CLM**
allgemein / in allen Regionen	Geht weniger stark in warme Gebiete als LFI. Weisstanne wird unterschätzt.		MPT geht viel weniger stark in warme Gebiete als MAB. Weisstanne wird bei MPT evtl. unterschätzt.	MPT geht viel weniger stark in warme Gebiete als MAB. Weisstanne wird bei MPT evtl. unterschätzt.
Nordschweiz	Zu schwache Verbreitung modelliert.	i.O.	Bei MAB Tanne noch viel grossflächiger vorhanden, MPT sehr restriktiv.	
Mittelland	In tiefen Lagen teilweise zu schwache Verbreitung modelliert.	i.O.	Bei MAB im Mittelland noch vorkommend, bei MPT nicht. MAB evtl. eher zu optimistisch. Im Mittelland auf tiefgründigen Böden sollte die Weisstanne noch vorkommen.	Bei MAB im Mittelland z.T. noch vorkommend, bei MPT gar nicht. MAB evtl. eher zu optimistisch, MPT zu pessimistisch.
Tessin	Deutlich zu schwach modelliert.	i.O.	Bei MAB deutlich stärker vorkommend als bei MPT.	Ähnliche Verteilung.
Graubünden	Zu schwach modelliert.	i.O.	Ähnliche Ausdehnung, bei MPT weniger flächig, Ausfall in tieferen Lagen.	Ähnliche Ausdehnung, bei MPT Ausfall der Weisstanne in tieferen Lagen.
Engadin	i.O.	i.O.	Bei MPT im Gegensatz zu MAB Weisstanne neu vorkommend.	Bei MPT im Engadin verbreitet vorkommend, nicht realistisch.

Fazit

Ein Beispiel, dass es auch der Tanne zu trocken werden kann, zeigen die Schäden aufgrund der Sommerdürren im Zeitraum 1945 bis 1952 (Pfister et al. 1988): «In der südlichen Randzone des Berner Juras fiel die Weisstanne der Trockenheit grösstenteils zum Opfer. Am Chaumont war der Anfall an dürren Weisstannen…geradezu beängstigend».

Huber et al. (2015) kamen zum Schluss, dass bei einer jährlichen Föhnhäufigkeit von über 15 bis 17 % (z.B. obere Talabschnitte der Alpensüdseite), aber auch bei einer mittleren jährlichen thermischen Kontinentalität, welche auf 1000 m ü. M. 5°C überschreitet, die Tanne nur noch in Reliktbeständen vorkommt, unabhängig von anderen Faktoren. Wir gehen davon aus, dass sich der Föhneinfluss in Zukunft nicht wesentlich ändert, die Kontinentalität aber eher rückläufig ist. Ebenfalls verschwindet nach unseren Erkenntnissen die Tanne bei Sommerniederschlägen (Mai-Juli) unter 200 mm und/oder Jahresniederschlägen unter 800 mm, insbesondere wenn hohe Sommertemperaturen und geringe Luftfeuchtigkeit die Verdunstung fördern (z.B. Zentralwallis).

Die Wärmegrenze bei der Weisstanne wurde bei Huber et al. (2015) nicht untersucht. Tinner et al. (2013) zeigen anhand von Paläodaten und Modellen, dass die Weisstanne möglicherweise viel toleranter gegenüber Wärme ist als allgemein angenommen.

3.3 Fichte (Picea abies)

Modellierung des Fichtenareals heute

Synthese von Abenis und PorTree⁺ heute (Abb. 16, detaillierter Vergleich in Tab. 4): PorTree⁺ weist eine aktuelle Verbreitung auf, die etwas weniger stark ist als beim LFI, bei Abenis ist das Vorkommen eher etwas stärker modelliert als beim LFI. Grundsätzlich ist es bei der Fichte besonders schwierig, das Verbreitungsgebiet zu definieren, da sie eigentlich eine sehr grosse ökologische Amplitude hat, aber besonders auf wüchsigen Standorten in warmen Lagen sehr stark durch den Buchdrucker beeinflusst wird.
Das Fehlen der Fichte im westlichen Tessin bei MPT ist ein Fehler. Die Fichtenobergrenze korreliert in mässig kontinentalen Gebieten gut mit der maximalen Junitemperatur, inneralpin korreliert sie vermutlich mit der Frosttrocknis (Huber et al. 2015). Das Absinken der Grenzen in den hinteren Tallagen konnte bei beiden Modellen zu wenig gut modelliert werden. Das Absinken kann verschiedene Ursachen haben: z.B. Gletscherwinde, hohe Windhäufigkeit wegen Passlagen oder Samendruck. Nach Zimmermann wäre ein Algorithmus, der den Höhenlinien folgt, notwendig, um dies zu modellieren, zudem wird die Information benötigt, wie nahe am Talende eine Probefläche liegt.

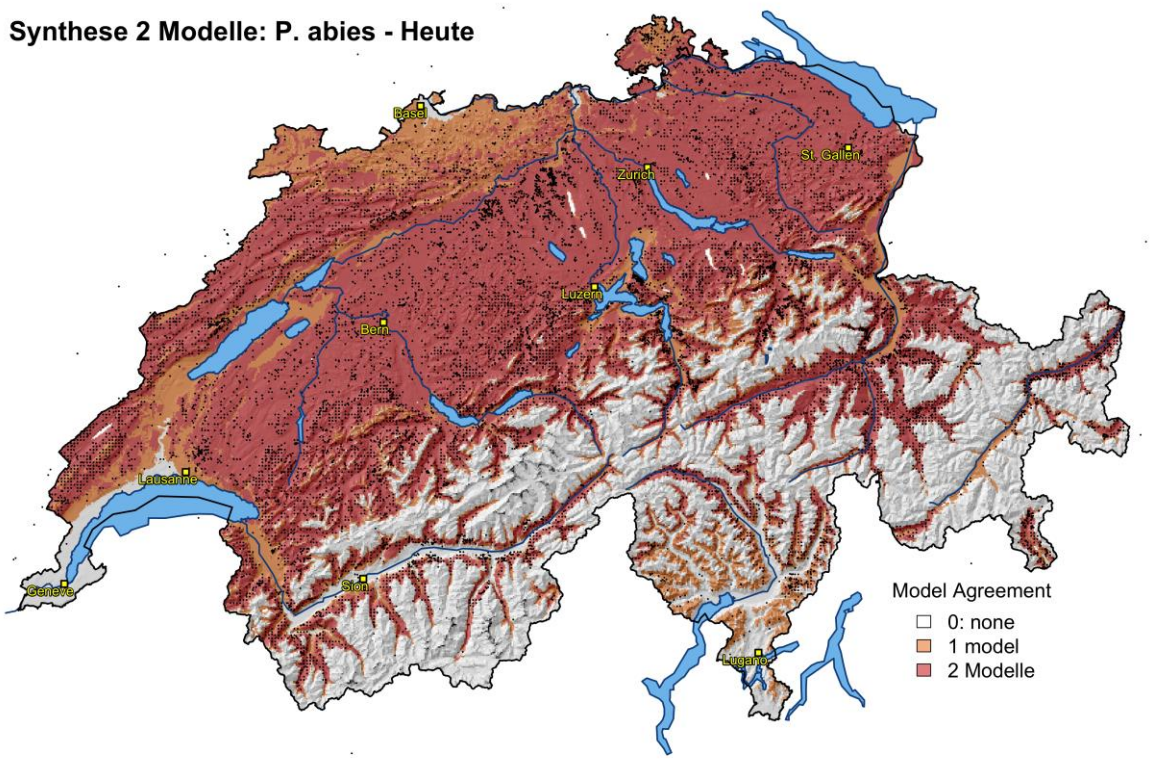

Abb. 16: Synthese von PorTree⁺ und Abenis. Modellierte Habitateignung der Fichte, heute. Legende: 2 = Fichte kommt in beiden Modellen vor, 1 = Fichte kommt nur in einem Modell vor, 0 = Fichte kommt in keinem Modell vor.

Die Modellierung der heutigen fundamentalen Nische bei ForClim ist plausibel (Abb. 17), einzig in der collinen Stufe im Mittelland wird die potenzielle Nische der Fichte eher überschätzt.

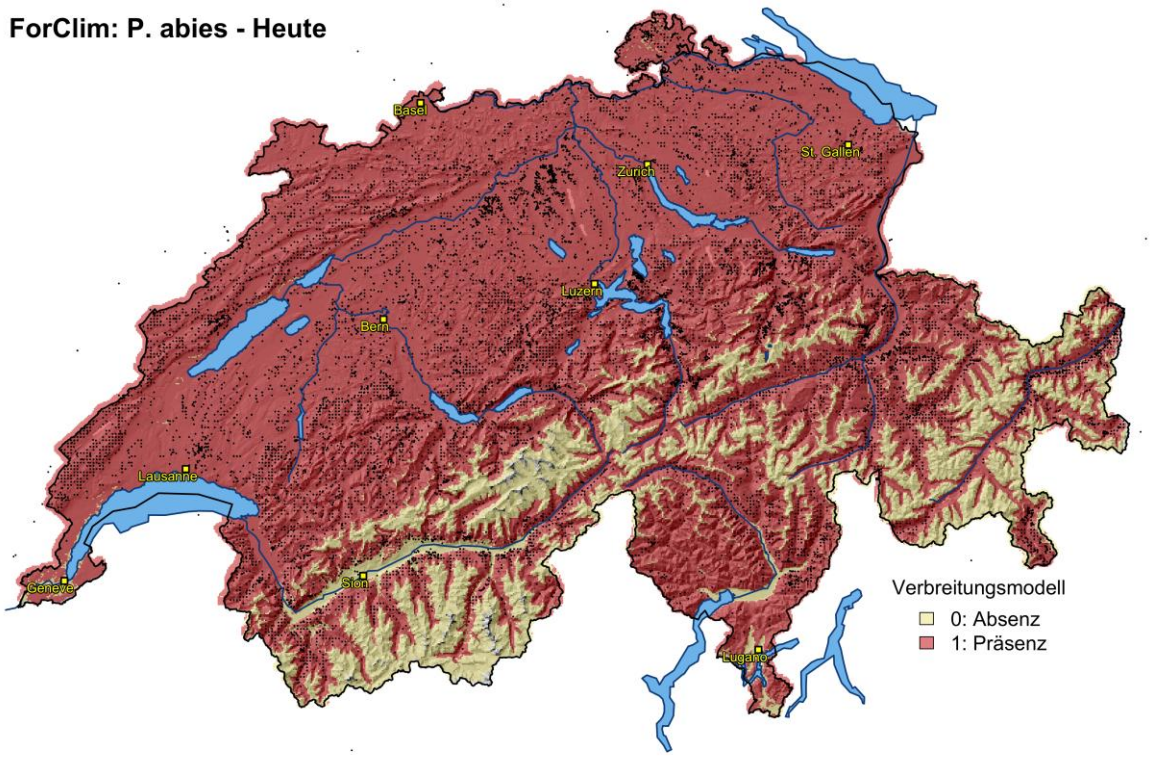

Abb. 17: Modellierte fundamentale Nische der Fichte, heute (gemäss ForClim).

Modellierung des Fichtenareals mit der Klimazukunft RegCM3 (Periode 2070-2099)

Während bei MPT die Fichte im Mittelland und im Jura bereits aussteigt, weist sie beim Abenis-Modell immer noch geeignete Habitate auf (eher so interpretieren, dass sie sich in diesen Gebieten noch halten kann). Ansonsten decken sich die Modellierungen gut (nördliche Randalpen, Zentralalpen und Tessin; Abb. 18; detaillierter Vergleich in Tab. 4).

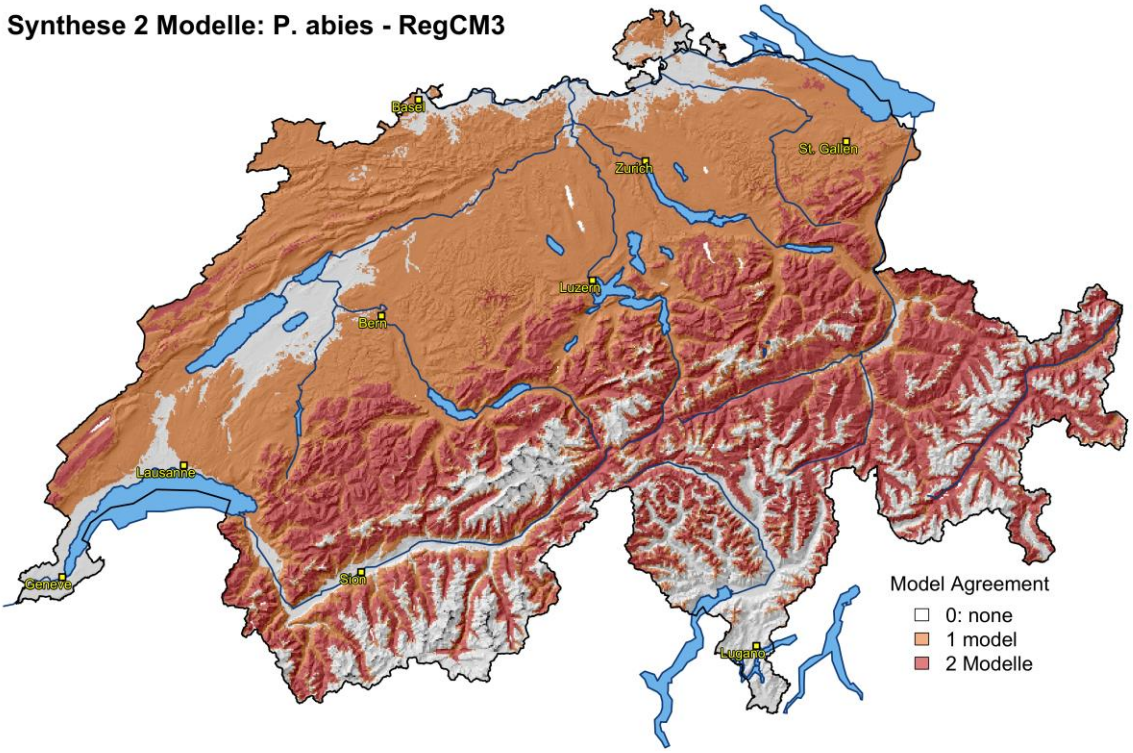

Abb. 18: Synthese von PorTree⁺ und Abenis. Modellierte Habitateignung der Fichte, Klimazukunft RegCM3 für die Periode 2070 - 2099. Legende: 2 = Fichte kommt in beiden Modellen vor, 1 = Fichte kommt nur in einem Modell vor, 0 = Fichte kommt in keinem Modell vor.

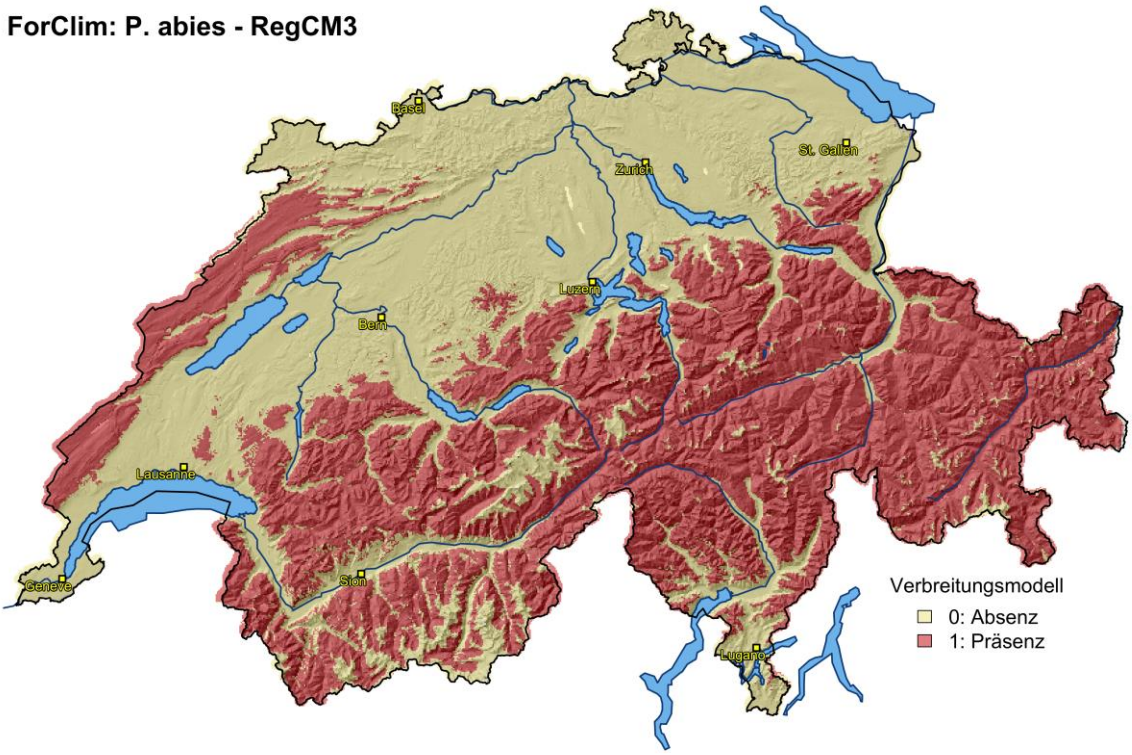

Abb. 19: Modellierte fundamentale Nische der Fichte gemäss ForClim, mit der Klimazukunft RegCM3 für für die Periode 2070-2099.

Modellierung des Fichtenareals mit der Klimazukunft CLM (Periode 2070-2099)

Die Modellierungen von PorTree^{+} und Abenis sind fast identisch wie bei RegCM3, neu weist auch MAB im Mittelland grössere Gebiete auf, wo die Fichte aussteigt (Abb. 20, detaillierter Vergleich in Tab. 3).

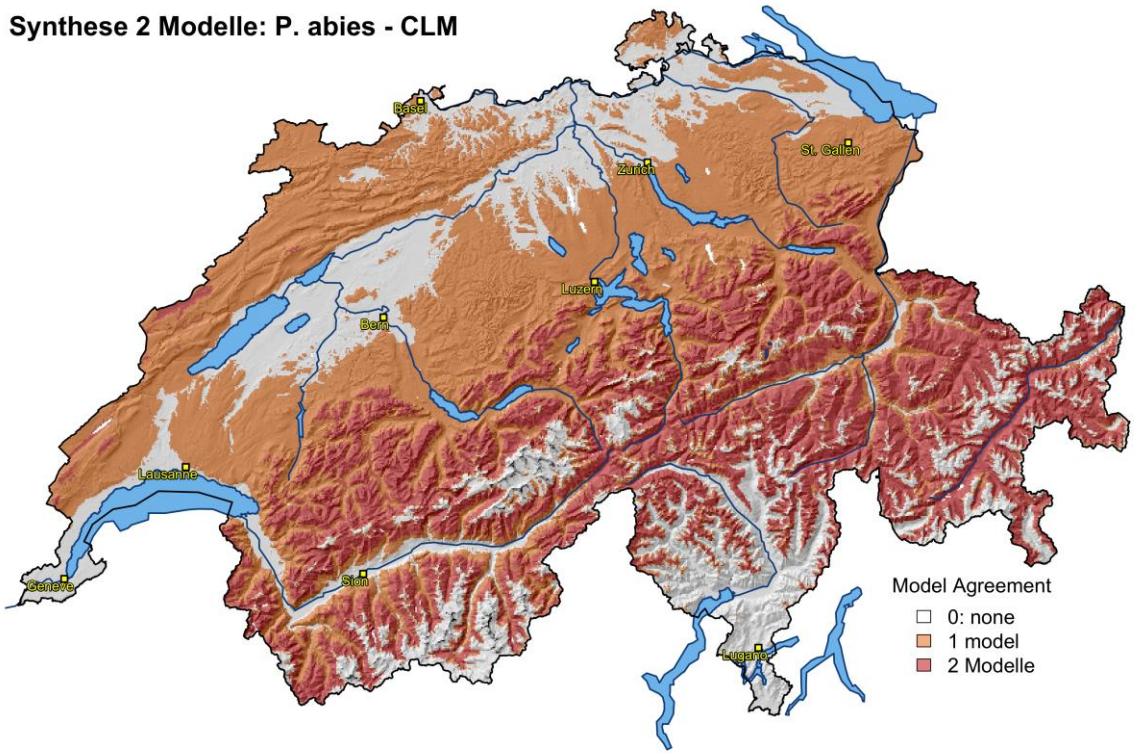

Abb. 20: Synthese von PorTree⁺ und Abenis. Modellierte Habitateignung der Fichte, Klimazukunft CLM für die Periode 2070 - 2099. Legende: 2 = Fichte kommt in beiden Modellen vor, 1 = Fichte kommt nur in einem Modell vor, 0 = Fichte kommt in keinem Modell vor.

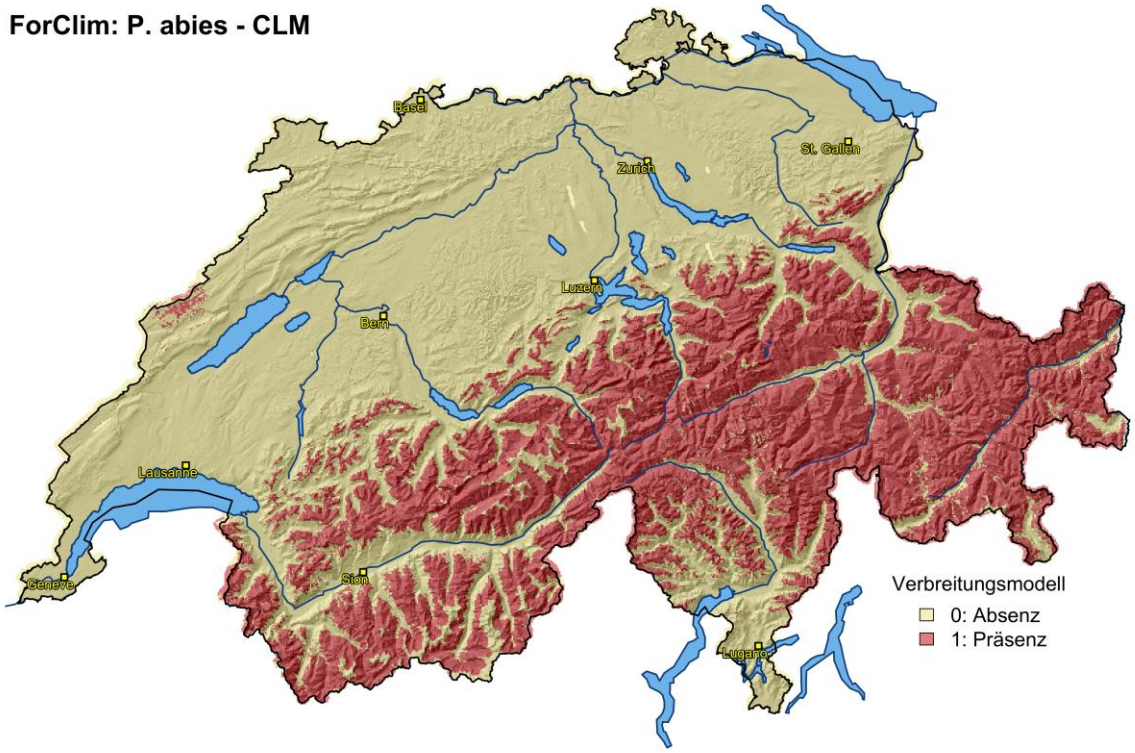

Abb. 21: Modellierte fundamentale Nische der Fichte gemäss ForClim, mit der Klimazukunft CLM für die Periode 2070-2099.

Modellvergleich PorTree+ und Abenis bei der Fichte: heute und bei den Klimazukünften RegCM3 und CLM (Periode 2070-2099)

In Tab. 4 werden die grössten Unterschiede der Modellierungen erläutert.

Tab. 4: Vergleich von Modellierungen von PorTree+ und Abenis mit LFI-Daten und Lokalkenntnissen.

	Wie stark ist die Fichte im Vergleich zum heutigen Fichtenvorkommen (LFI-Flächen [LFI] und Lokalkenntnissen [LK]) in den verschiedenen Modellierungen vertreten?		Wie stark weicht die Modellierung für die Periode 2070-2099 von Abenis (MAB) von der Modellierung von PorTree+ (MPT) ab?	
Gebiet	**PorTree+ (MPT)**	**Abenis (MAB)**	**RegCM3**	**CLM**
Nordschweiz, Mittelland, Basel, Aargau	Im Vergleich zum LFI eher wenig modellierte Flächen.	i.O.	Bei MPT Fichtenvorkommen sehr restriktiv, bei MAB kommt Fichte meist noch vor aufgrund anderer Gewichtung von Variablen.	Bei MPT keine Fichten-Habitateignung mehr, bei MAB noch grossflächiger vorhanden.
Nordalpen	In tiefen Lagen weniger Fichte modelliert als bei MAB.	i.O.	Bei MPT reicht Fichte weniger weit zu Talsohle als bei MAB.	Bei MPT reicht Fichte weniger weit zu Talsohle als bei MAB.
Jura	i.O.	i.O.	Bei MAB Fichte noch viel stärker vorkommend als bei MPT.	Bei MAB Fichte noch sehr viel stärker vorkommend als bei MPT.
Wallis	Modelle ähnlich. In den Vispertälern fehlt die Fichte hinter Randa vermutlich wegen Frosttrocknis.	Bei MAB kommt die Fichte in tieferen Lagen vor als bei MPT.	Bei MPT reicht Fichte weniger weit zu Talsohle als bei MAB.	Bei MPT reicht Fichte weniger weit zu Talsohle als bei MAB.
Tessin	Grosses Manko im westlichen Tessin.	Eher zu stark modelliert.	Fast identische Modellierungen, MAB geht etwas weiter in Talböden.	Ähnliche Modellierungen.
Graubünden	Gute Übereinstimmung, auch mit LFI-Punkten.		Fast identische Modellierungen, MAB geht etwas weiter in Talböden.	Ähnliche Modellierungen.
Engadin	Engadin leicht zu restriktiv modelliert.	Zu stark modelliert.	Bei beiden ist die Fichte auf grosser Fläche modelliert.	Ähnliche Modellierungen.

Bei beiden Klimazukünften besteht im Jura ein grosser Unterschied zwischen MPT und MAB. Dies erstaunt, da ein grosser Temperaturgradient (über 600 Höhenmeter) vorhanden ist. Bei den grossen Höhenunterschieden im Jura zwischen höchsten Gipfellagen und milderen Lagen ergibt sich immerhin ein Temperaturunterschied von 3 Grad, deshalb wäre zu erwarten, dass die Modelle einheitlichere Resultate ergeben.

Fazit

Nach Etzold et al. 2016 hat das Klima bei der Fichte in Hoch- sowie Tieflagen keinen direkten signifikanten Einfluss auf die Mortalitätsraten, bei der Fichte spielen vermehrt die sekundären Faktoren eine Rolle – wie z.B. die Borkenkäfer (Wermelinger et al. 2014).
Nach Jakoby et al. 2016 sind die Fichten unter der Klimazukunft CLM bis Ende des Jahrhunderts für die meisten Teile der Schweiz, mit Ausnahme der hohen alpinen Lagen, von erhöh-

tem (Voralpen und höhe Lagen des Juras) bis stark erhöhtem Trockenstress (Mittelland, untere Juralagen, alpine Tallagen, Tessin) betroffen.
Ein Beispiel, dass ein Ausfall der Fichte in Teilen des Mittellandes realistisch ist, zeigen die beschriebenen Schäden aufgrund der Sommerdürren im Zeitraum 1945 bis 1952 aus Pfister et al. 1988 auf: «...im Jahr 1948 fiel 173'000 m^3 käferfreies Dürrholz an. Am meisten gefährdet waren die Fichten auf durchlässigen Schotterböden. Wie gross z.B. in den Hardwaldungen von Bülach, bei Eglisau, Weiach, Laufenburg und Sisseln der Einfluss der trockenen Witterung war, geht daraus hervor, dass 1947 und 1948 von den dort anfallenden Zwangsnutzungen bis zu 90 % auf Dürrständer entfielen, die gar keinen Borkenkäferbefall aufwiesen. 1949 fielen nochmals 160'000 m^3 käferfreies Dürrholz (Baumarten nicht benannt) an». Nach Pfister et al. 1988 sind die Borkenkäferkalamitäten heute grossräumiger und länger anhaltend als in früheren Jahrzehnten / Jahrhunderten, trotz z.T. ähnlichen Klimabedingungen / Dürreperioden. Ebenfalls kommen sie zum Schluss, dass sich heute die Sensitivität gegenüber klimatischen Einflüssen erhöht hat (früher hätten die Schäden mehr Kurzzeit- oder wellenförmigen Charakter gehabt und wurden meist durch extreme Witterungsereignisse ausgelöst und der Wald erholte sich nach kurzer Zeit wieder).
Auch weist die Fichte bei Kalium- und Magnesium-Mangel eine erhöhte Mortalität auf (Göttlein et al. 2011, zitiert in Etzold et al. 2016), ein K- und Mg-Mangel kann durch Stickstoffeinträge und ein daraus resultierendes Nährstoffungleichgewicht erfolgen.
Nach Lévesque et al. 2014 ist die Fichte trockenheitsempfindlich, auch muss bei der Fichte nach Zingg & Bürgi 2008 mit starken Verlusten in den unteren Lagen aufgrund der erhöhten Trockenheit gerechnet werden. Rössler et al. 2012 rechnen mit einer deutlichen Zunahme der Trockenheit in den inneralpinen Regionen bis in höhere Lagen, was dem von Seidl et al. 2011, Hanewinkel et al. 2013 und Nothdurft 2013 (alle Autoren zitiert in Bircher et al. 2016) prognostizierten zukünftigen erhöhten Risiko der Fichte weitere Plausibilität verleiht.

3.4 Lärche (Larix decidua)

Die folgenden Abbildungen (Abb. 22 bis Abb. 27) zeigen die Ergebnisse der Modelle PorTree$^+$ und die fundamentale Nische des Modells ForClim. Abenis hat die Lärche nicht modelliert. Die Modellierung PorTree$^+$ weist weniger Lärchenverbreitung auf als eher das ursprüngliche «Kerngebiet» der Lärche, da die Lärche auch im Mittelland mit waldbaulicher Hilfe aufkommen kann. Wenn Lärchen dort gepflanzt werden, überleben sie auch in den Gebieten mit hoher Luftfeuchtigkeit Die Vorkommen der Lärche im Mittelland spiegeln daher die Pflanztätigkeit. Die Fichte hingegen kann sich im Mittelland an vielen Orten natürlich verjüngen.

Modellierung des Lärchenareals heute

In den Alpen besteht eine gute Übereinstimmung mit der Verbreitungskarte der Lärche vom LFI (Abb. 22; Vergleich in Tab. 5). Im Mittelland und im Jura sieht die Verbreitung im LFI lückig und evtl. zufällig aus, sie stimmt nicht gut mit MPT zusammen.

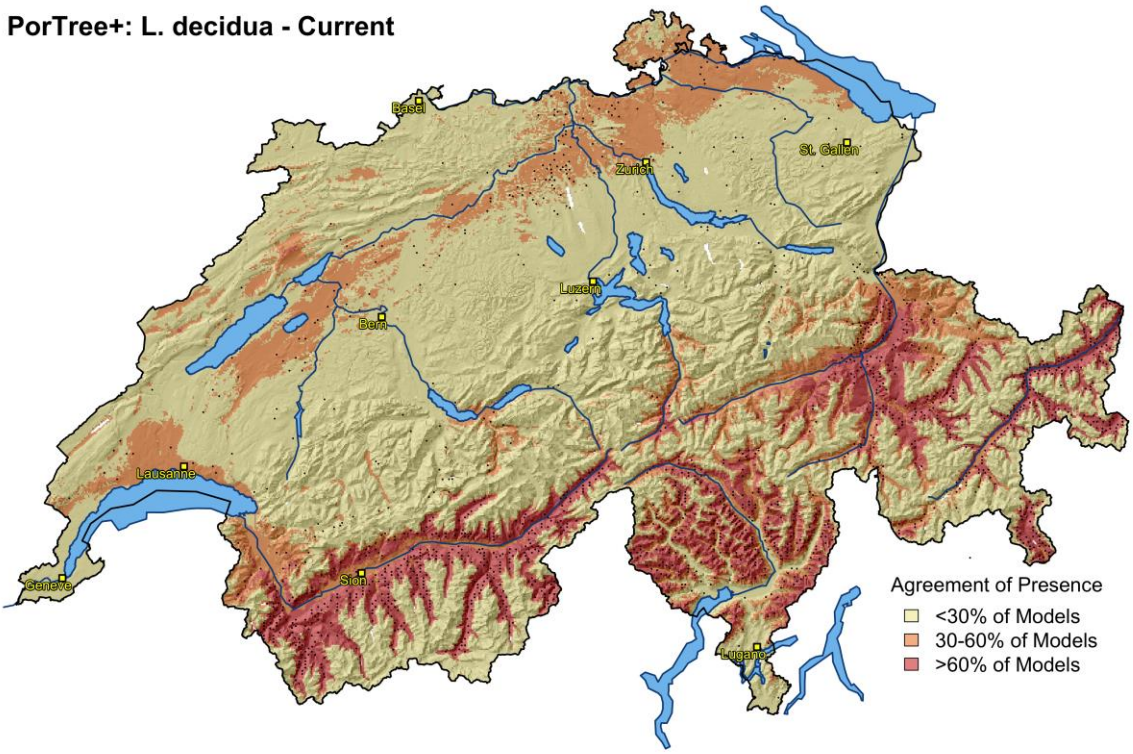

Abb. 22: Modellierte Habitateignung der Lärche, heute (gemäss PorTree⁺). Legende: > 60 % = wenn mindestens 60 % der Modell-/Resampling Karten die Art als «Vorkommen» klassieren, wird das Habitat als geeignet eingestuft.

Bei ForClim wird das Lärchenvorkommen relativ gut modelliert (Abb. 23), in Graubünden und im Tessin ist die Modellierung am besten. Das Lärchenvorkommen in luftfeuchten Regionen wird eher überschätzt, ideal wäre, wenn die Luftfeuchtigkeit in das Modell eingebaut werden könnte. In den nördlichen Randalpen, vor allem im Säntisgebiet, Kanton Glarus, Schwyz, Napfgebiet, nördlich vom Brienzersee und in den Freiburger und Waadtländer Randalpen wurde Lärche modelliert wo sie aufgrund der zu hohen Luftfeuchtigkeit Probleme hat. Im Jura ist sie flächig modelliert, wegen der hohen Luftfeuchtigkeit wird die Lärche vermutlich aber nur an südexponierten Hängen auftreten.

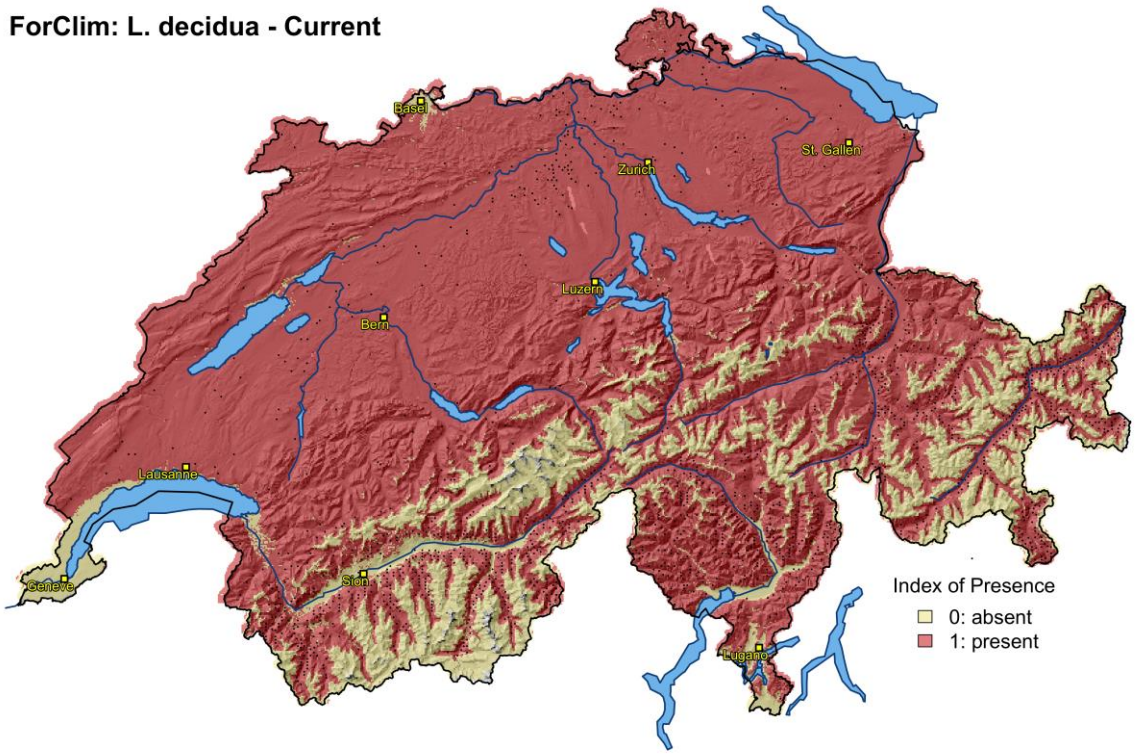

Abb. 23: Modellierte fundamentale Nische der Lärche, heute (gemäss ForClim).

Modellierung des Lärchenareals mit der Klimazukunft RegCM3 (Periode 2070-2099)

Im Tessin und an den Südhängen im Wallis wird bei RegCM3 (Abb. 24) eine Abnahme der Habitateignung modelliert im Vergleich zu heutiger Modellierung. Eine Zunahme gegenüber heute erfolgt im Kanton Uri, in der Surselva, im Prättigau und im Wallis und allgemein eine Ausbreitung in höhere Lagen.

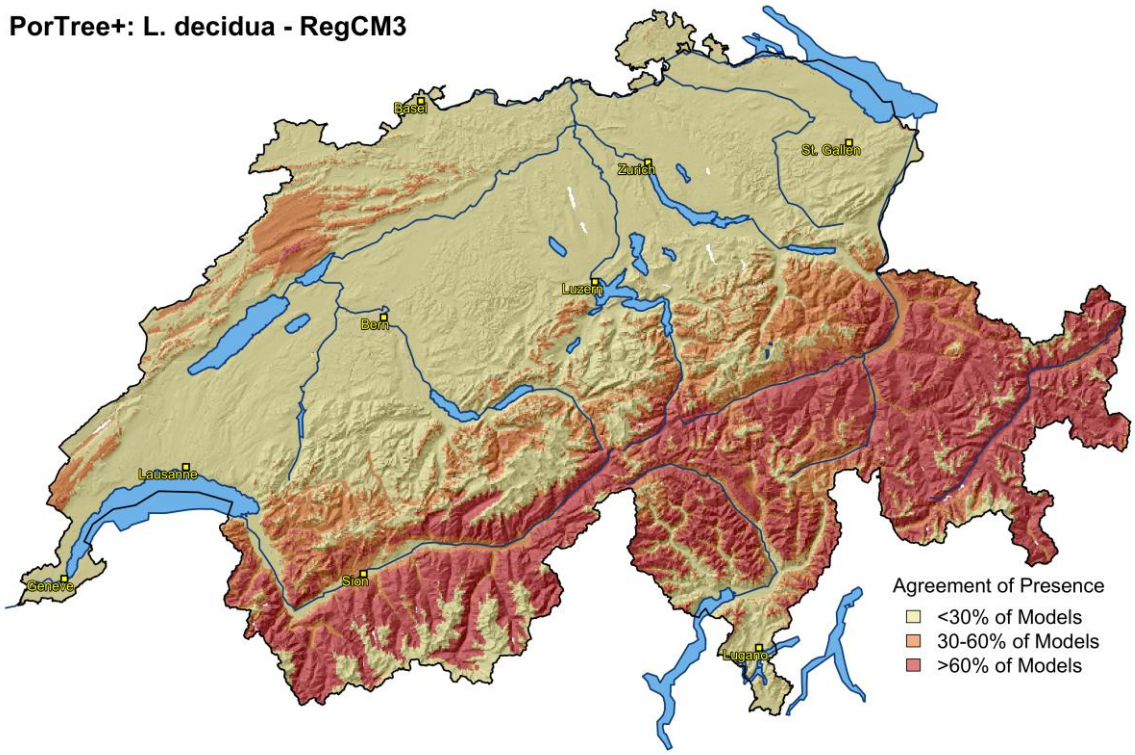

Abb. 24: Modellierte Habitateignung der Lärche (gemäss PorTree+), Klimazukunft RegCM3 für die Periode 2070 – 2099. Legende: > 60 % = wenn mindestens 60 % der Modell-/Resampling Karten die Art als «Vorkommen» klassieren, wird das Habitat als geeignet eingestuft.

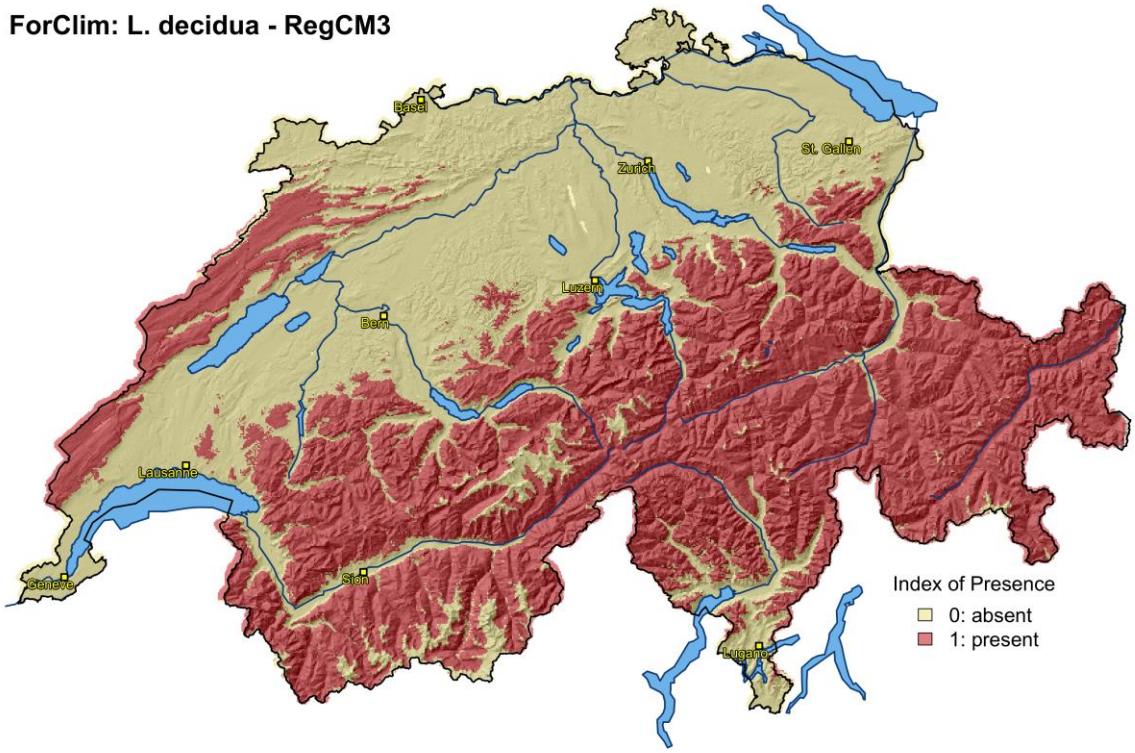

Abb. 25: Modellierte fundamentale Nische der Lärche gemäss ForClim, mit der Klimazukunft RegCM3 für die Periode 2070-2099.

Modellierung des Lärchenareals mit der Klimazukunft CLM (Periode 2070-2099)

Eine Abnahme der Habitateignung für die Lärche bei CLM im Vergleich zu heute wird nur im Wallis an den Südhängen und in den tiefen Lagen modelliert (Abb. 26), ansonsten wird eine Zunahme in den nördlichen und südlichen Zwischenalpen, den südlichen Randalpen und in den kontinentalen Hochalpen modelliert. Die Lärche als obersubalpine Art profitiert wohl v.a. von den projizierten trockeneren Bedingungen unter Klimawandel (Zimmermann et al. 2016). Die Modellergebnisse bei PorTree^{+} deuten darauf hin, dass sie sich teils nördlich der Alpen ausdehnen könnte (Zimmermann et al. 2016). Bei Bircher et al. (2016) weisen die Lärchen in der obersubalpinen Stufe unter Klimawandel höhere Grundflächen auf.

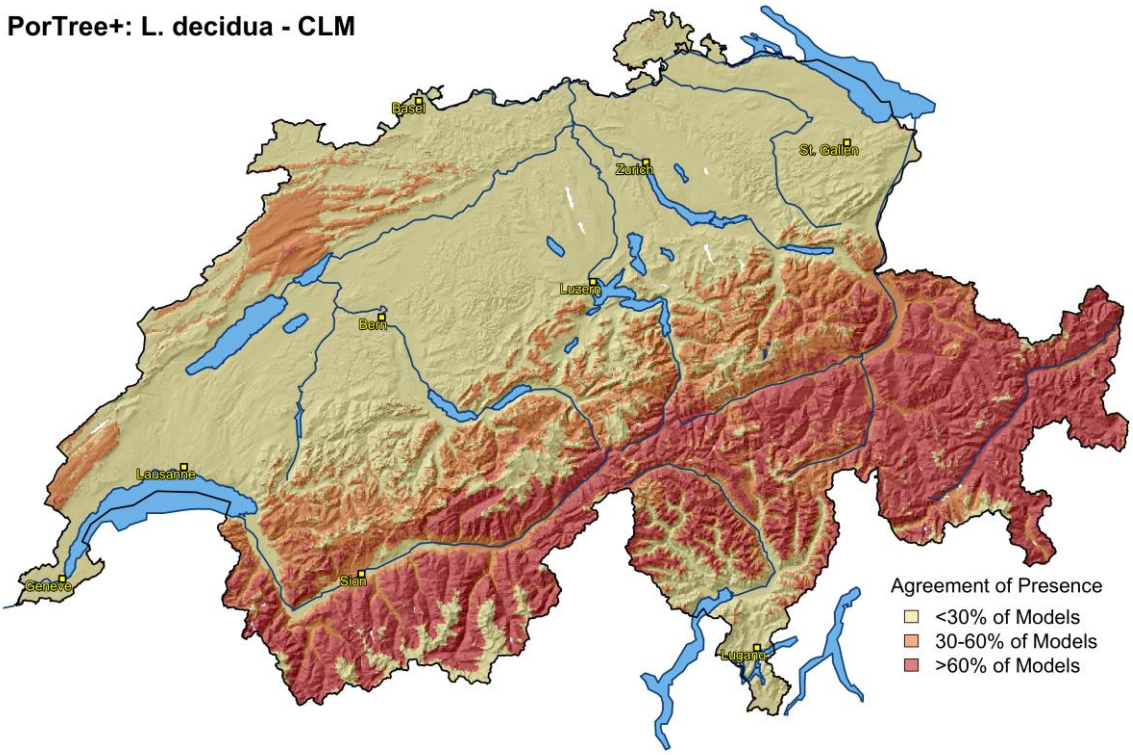

Abb. 26: Modellierte Habitateignung der Lärche (gemäss PorTree+), Klimazukunft CLM für die Periode 2070 – 2099. Legende: > 60 % = wenn mindestens 60 % der Modell-/Resampling Karten die Art als «Vorkommen» klassieren, wird das Habitat als geeignet eingestuft.

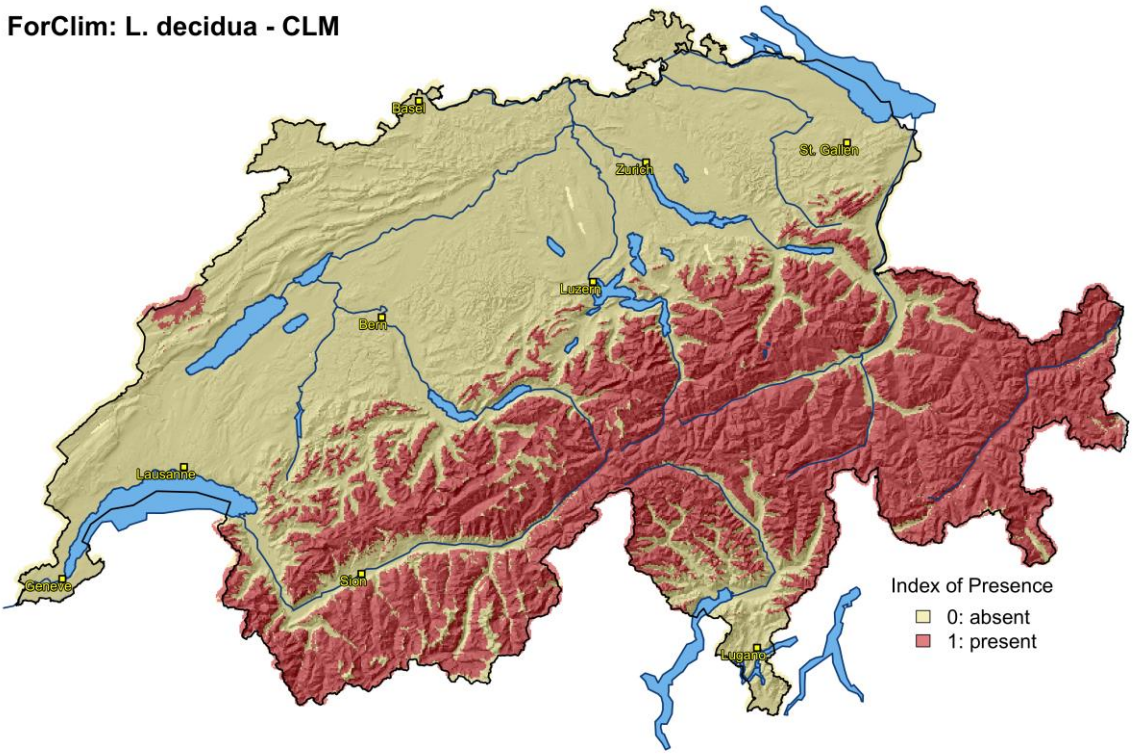

Abb. 27: Modellierte fundamentale Nische der Lärche gemäss ForClim, mit der Klimazukunft CLM für die Periode 2070-2099.

Einschätzung der Habitateignung gemäss PorTree⁺: heute und bei den Klimazukünften RegCM3 und CLM (Periode 2070-2099)

In Tab. 5 werden die grössten Unterschiede der Modellierungen erläutert.

Tab. 5: Vergleich von Modellierung von PorTree⁺ mit LFI-Daten und Lokalkenntnissen.

Gebiet	Wie stark ist die Lärche im Vergleich zum heutigen Lärchenvorkommen (LFI-Flächen [LFI] und Lokalkenntnissen [LK]) in der Modellierung von PorTree⁺ vertreten? PorTree⁺ (MPT)
Nördliche Randalpen	Lärchen-Populationen kommen v.a. an Nordhängen vor, wo die Fichten schneebedingt fehlen (dies sind aber Spezialstandorte, die kaum modelliert werden können).
Vispertäler (VS)	Gute Modellierung. LK: Lärchenreinbestände in der hochmontanen Stufe der Vispertäler hinter Randa: Die Fichte fällt wegen Kontinentalität (Frosttrocknis) aus, die Arve wächst vor allem obersubalpin und subalpin, hochmontan ist es eher zu warm für die Arve, evtl. fehlende Verbreitung der Arve durch den Tannenhäher.
Tessin	Gute Modellierung, etwas zu weit in tiefe Lagen und Richtung Südtessin modelliert. LK: Im Tessin gibt es Lärchenreinbestände in den obersten Lagen: Schneereiche Lagen, Arve fällt aus wegen Schneeschimmel, viele Alpenrosen, Fichte leidet unter Fichtennadelrost *(Chrysomixa rhododendri).*

Fazit

Der wichtigste Parameter für das Ausbleiben von Lärchen ist vermutlich die hohe Luftfeuchtigkeit. In diesen Lagen verjüngt sich die Lärche schlecht. Sie kann zwar gepflanzt werden, bekommt aber oft Lärchenkrebs. Die Lärche muss verdunsten können, sie benötigt deshalb feuchte Böden, auf trockenen Kalkböden wird sie durch Föhren ersetzt. Im Meiental (UR), Weisstannental und Calfeisental (SG) ist die Lärche stellenweise an Nordhängen zu finden, wo die Fichte z.B. durch Schneebewegungen gestört ist. Die Surselva (GR) ist ein Gebiet mit wenigen Störungen, die Luftfeuchtigkeit wäre i.O. für die Lärche, aber die Böden sind meist

stabil und die Fichte ist sehr konkurrenzkräftig. Die Konkurrenzsituation mit der Fichte sollte eigentlich auch als erklärender Faktor berücksichtigt werden.

3.5 Kirsche (Prunus avium)

Die folgenden Abbildungen (Abb. 28 bis 34) zeigen die Synthese aus den Modellen PorTree^{+} und Abenis (realisiertes Kirschenareal heute). Von ForClim gibt es keine Modellierung für die Kirsche.
Das Kirschenareal ist bei Abenis in zwei Klassen unterteilt (Karte im Anhang 4):

1 = kann in die Oberschicht wachsen, mit Förderung für die Holzproduktion geeignet.

2 = kommt vor, aber wenig konkurrenzstark und nicht geeignet für Holzproduktion.

Die Kirsche ist für die Zukunft eine interessante Baumart. Es kann angenommen werden, dass sie an warmen Orten lange überlebt. Sie besitzt eine grosse physiologische Amplitude (grosse Trockenheitstoleranz, auch auf sauren Standorten vorhanden).

Modellierung des Kirschenareals heute

Die beiden Modellierungen (Abb. 28; detaillierter Vergleich in Tab. 6) unterscheiden sich v.a. im Jura (Abenis eher zu hoch) und in den höheren Lagen (nach Barengo et al. 2001: Höhenverbreitung in den Zentralalpen bis 1700 m ü. M., da nur noch strauchförmig), dies auch aufgrund der unterschiedlichen Modellierung (Abenis in 2 Klassen unterteilt). Die Synthese der beiden Modellierungen (rote Flächen) deckt sich sehr gut mit den LFI-Erhebungen, einige Punkte werden nur durch Abenis abgedeckt.

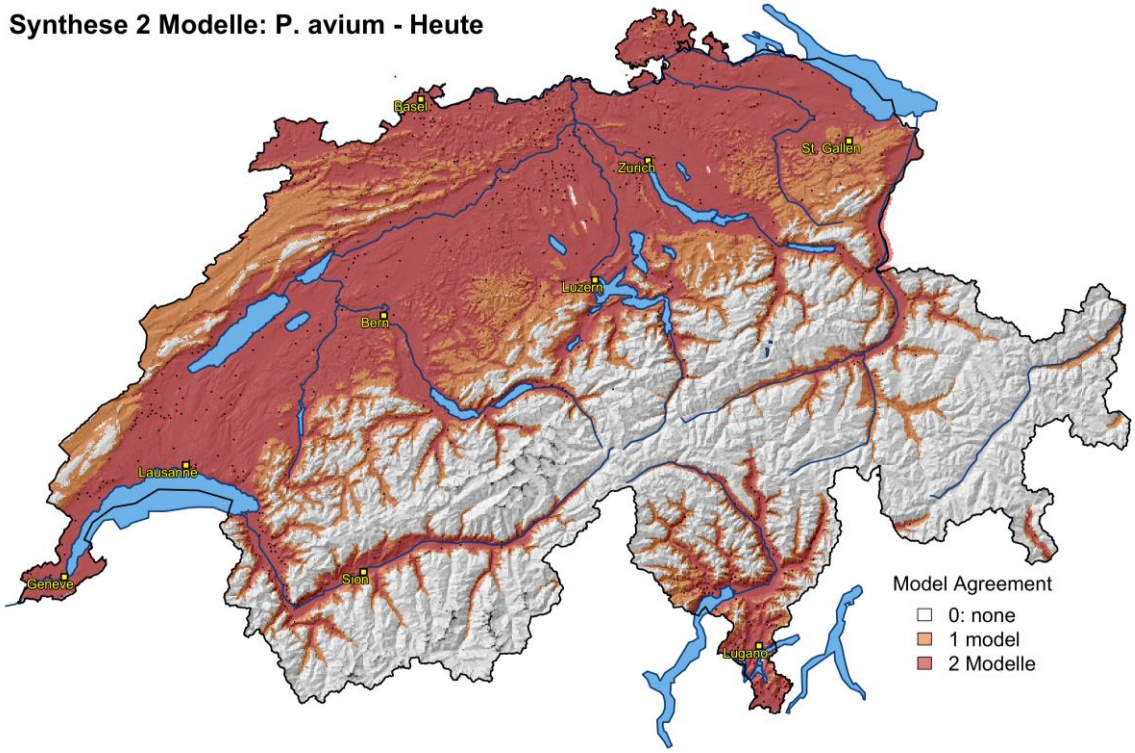

Abb. 28: Synthese von PorTree+ und Abenis. Modellierte Habitateignung der Kirsche, heute. Legende: 2 = Kirsche kommt in beiden Modellen vor, 1 = Kirsche kommt nur in einem Modell vor, 0 = Kirsche kommt in keinem Modell vor.

Modellierung des Kirschenareals mit der Klimazukunft RegCM3 (Periode 2070-2099)

Die beiden Modellierungen decken sich nur in den tieferen Lagen, PorTree+ ist in einigen Gebieten eher zu restriktiv modelliert (v.a. Tessin, Jura und Graubünden). Es kann angenommen werden, dass sich die Kirsche in allen Landesteilen ausbreiten kann.

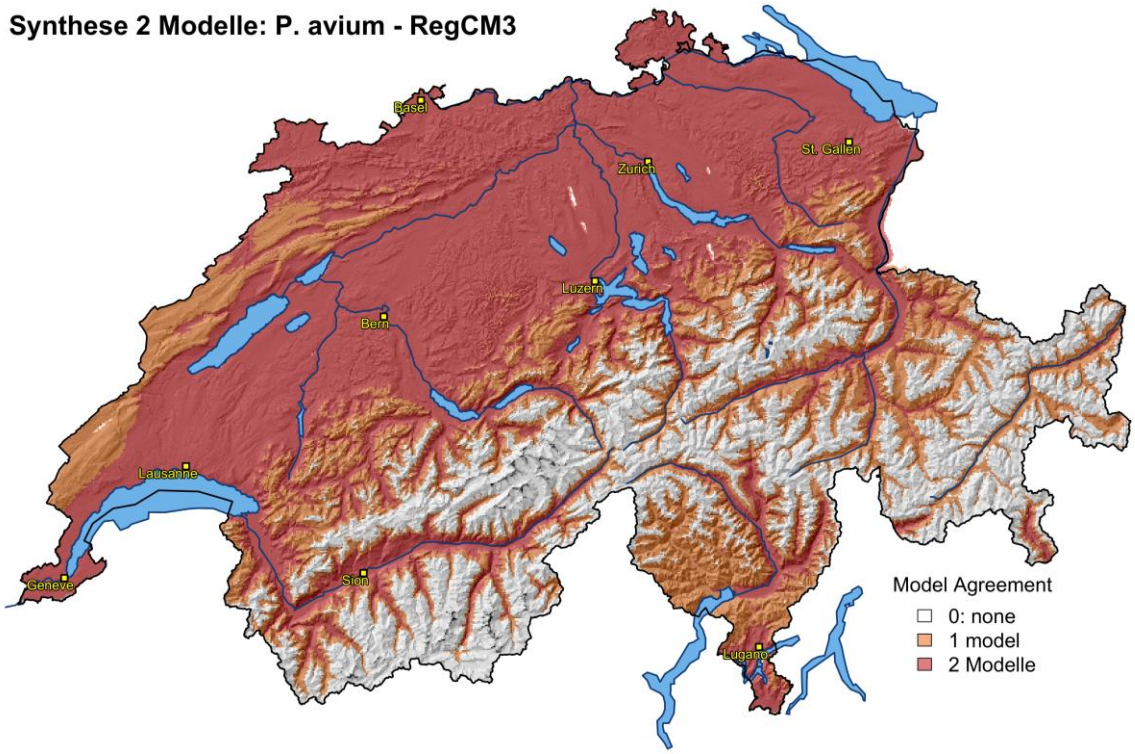

Abb. 29: Synthese von PorTree+ und Abenis. Modellierte Habitateignung der Kirsche, Klimazukunft RegCM3 für die Periode 2070 - 2099. Legende: 2 = Kirsche kommt in beiden Modellen vor, 1 = Kirsche kommt nur in einem Modell vor, 0 = Kirsche kommt in keinem Modell vor.

Modellierung des Kirschenareals mit der Klimazukunft CLM (Periode 2070-2099)

Auch hier weisen die beiden Modellierungen grössere Unterschiede v.a. in den höheren Lagen und im westlichen Tessin auf. Es kann angenommen werden, dass sich die Kirsche in allen Landesteilen ausbreiten kann.

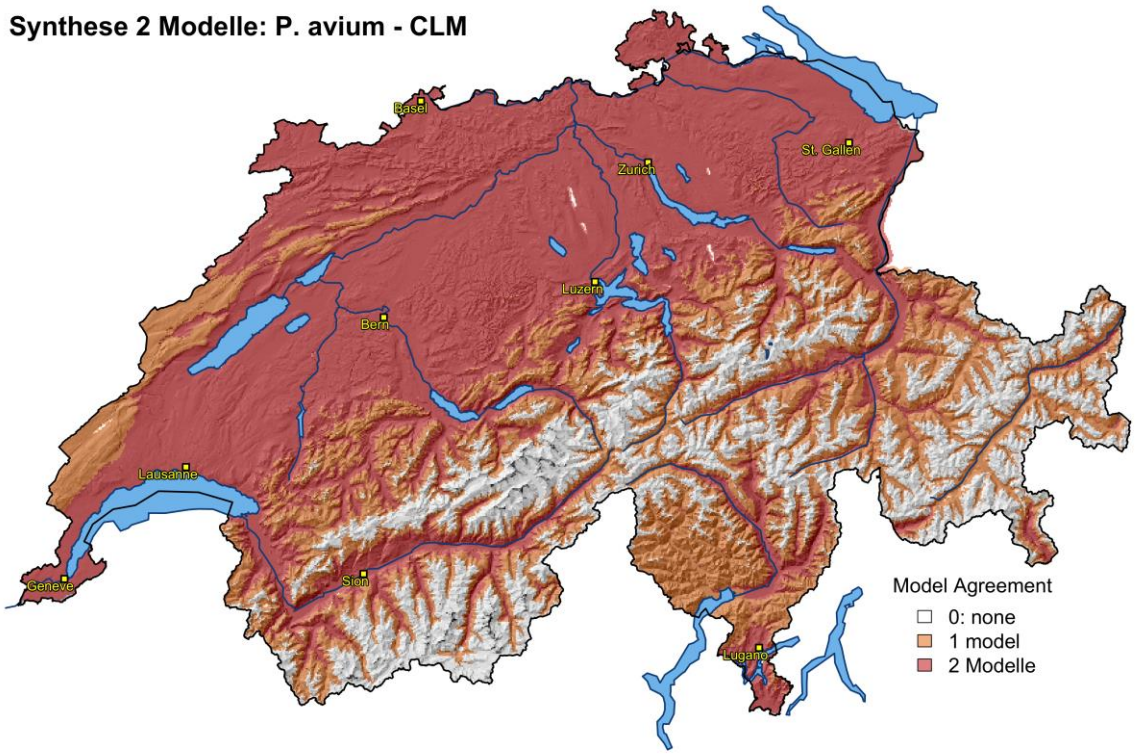

Abb. 30: Synthese von PorTree⁺ und Abenis. Modellierte Habitateignung der Kirsche, Klimazukunft CLM für die Periode 2070 - 2099. Legende: 2 = Kirsche kommt in beiden Modellen vor, 1 = Kirsche kommt nur in einem Modell vor, 0 = Kirsche kommt in keinem Modell vor.

Modellvergleich PorTree⁺ und Abenis bei der Kirsche: heute und bei den Klimazukünften RegCM3 und CLM (Periode 2070-2099)

In Tab. 6 werden die grössten Unterschiede der Modellierungen erläutert.

Tab. 6: Vergleich von Modellierungen von PorTree⁺ und Abenis mit LFI-Daten und Lokalkenntnissen.

	Wie stark ist die Kirsche im Vergleich zum heutigen Kirschenvorkommen (LFI-Flächen [LFI] und Lokalkenntnissen [LK]) in den verschiedenen Modellierungen vertreten?		**Wie stark weicht die Modellierung für die Periode 2070-2099 von Abenis (MAB) von der Modellierung von PorTree⁺ (MPT) ab?**	
Gebiet	**PorTree⁺ (MPT)**	**Abenis (MAB)**	**RegCM3**	**CLM**
allg.	Arealgrenzen zwischen Regionen 1 und 2 von MAB liegend. MPT hat LFI-Punkte relativ gut erfasst.	Weist eine höhere vertikale Verbreitung auf.	Bei MAB geht Kirsche bis fast 2000 m ü. M., Modellierung i.O. Grössere Unterschiede zwischen MPT und MAB.	
Jura		Stärkere Verbreitung als MPT, etwa 300 m zu hoch.	Bei MPT viel geringere Verbreitung.	Bei MPT fehlt Kirsche in Zukunft.
Graubünden	eher zu restriktiv.	i.O.	Bei MPT viel restriktivere Modellierung als bei MAB.	Bei MPT viel restriktivere Modellierung als bei MAB.
St. Gallen		Ausdehnung etwa 300 m zu hoch.		
Engadin	Kirsche fehlend, zu restriktiv.	i.O.	Abbildung von Kaltluftsee i.O., MPT modelliert viel weniger als MAB.	Abbildung von Kaltluftsee i.O., MPT modelliert viel weniger als MAB.

Gebiet	Wie stark ist die Kirsche im Vergleich zum heutigen Kirschenvorkommen (LFI-Flächen [LFI] und Lokalkenntnissen [LK]) in den verschiedenen Modellierungen vertreten?		Wie stark weicht die Modellierung für die Periode 2070-2099 von Abenis (MAB) von der Modellierung von PorTree+ (MPT) ab?	
	PorTree+ (MPT)	Abenis (MAB)	RegCM3	CLM
Tessin	i.O.	i.O.	Bei MPT im westlichen Tessin zu wenig Areale modelliert.	Bei MPT im westlichen Tessin zu wenig Areale modelliert.
Uri	Bei MPT Modellierung zu tief (zwischen 700 - 800 m ü. M.).			
Wallis	Sehr ähnliche Verbreitung zwischen MAB, Klasse 1 und MPT.			Gute Modellierung bei MPT und MAB.

3.6 Traubeneiche (Quercus petraea)

Modellierung des Traubeneichenareals heute

Abweichungen bestehen vor allem im Jura, Mittelland und den nördlichen Randalpen, bei MPT wird weniger weit in höhere Lagen modelliert (Abb. 31; detaillierter Vergleich in Tab. 7). Gute Übereinstimmung weisen die beiden Modellierungen im Wallis, in den Südtälern und im Churer Rheintal auf. Die Traubeneiche kommt an weniger strahlungsintensiven Standorten vor als die Flaumeiche und sie ist gegenüber dem geologischen Substrat indifferent, im Gegensatz zur Flaumeiche, welche kalkreichen Untergrund bevorzugt (Burnand 1976). Die Traubeneiche ist sehr trockenheitstolerant, aber auch sehr frostempfindlich. Dies bedeutet, dass Traubeneichen in nicht allzu frostreichen Lagen bei zunehmender Kontinentalität zwar die Buchen ablösen, bei allzu grosser Frosthäufigkeit (und evtl. Winterkälte) steigt die Traubeneiche aber ebenfalls aus und macht der Waldföhre oder manchmal auch der Zitterpappel Platz. So z.B. im Unterengadin oder im mittleren Goms oder auch schon in der oberen Leventina. Auch im Schams kommen Traubeneichen kaum mehr vor.

Entscheidend für den Standortsvorteil der Eichen ist ihr Vermögen, ihre Transpiration auch bei Trockenheit lange aufrechtzuerhalten (Scherrer et al. 2011). Dies v.a. aufgrund ihrer Fähigkeit, ein Wasserdefizit durch eine tief reichende Durchwurzelung des Bodens zu vermeiden (Breda et al. 2006).

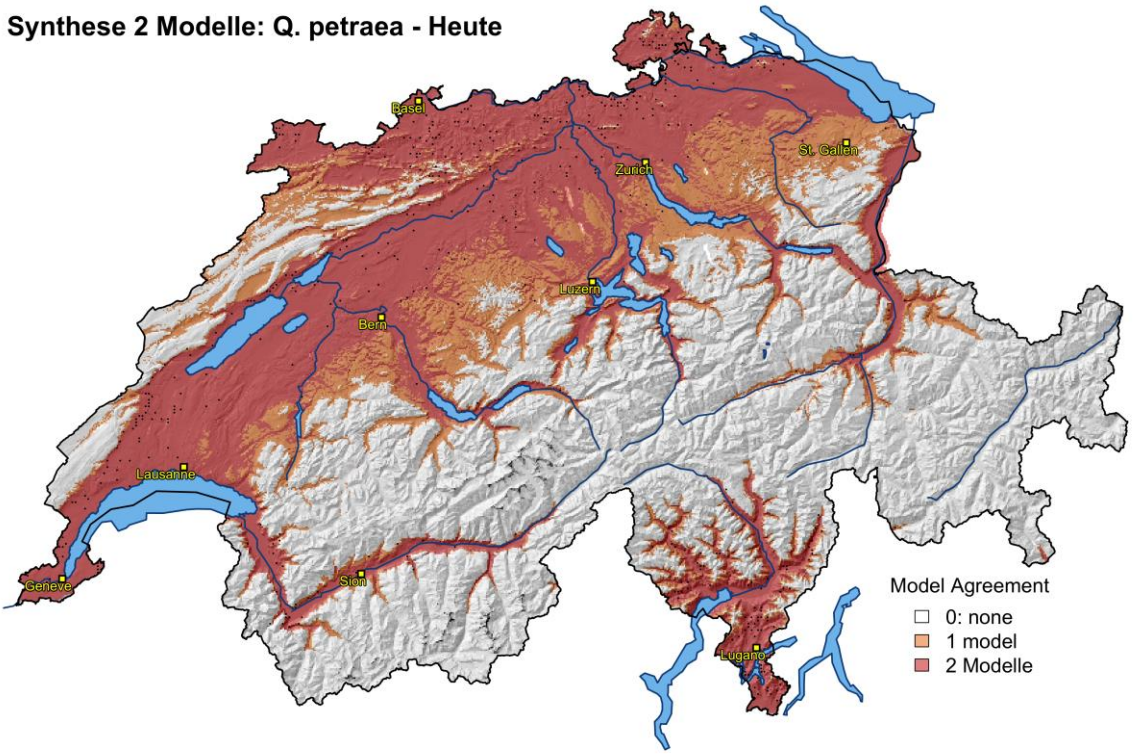

Abb. 31: Synthese von PorTree⁺ und Abenis. Modellierte Habitateignung der Traubeneiche, heute. Legende: 2 = Traubeneiche kommt in beiden Modellen vor, 1 = Traubeneiche kommt nur in einem Modell vor, 0 = Traubeneiche kommt in keinem Modell vor.

Die fundamentale Nische der Traubeneiche ist zu grosszügig modelliert (Abb. 32; ForClim berücksichtigt auch strauchförmige Traubeneichen in hohen Lagen), überschätzt wird sie in den nördlichen Randalpen, dem Unterengadin und im Goms (Traubeneiche fehlend wegen Frost). Ebenfalls geht die fundamentale Nische zu weit in die kontinentalen Täler hinein (wahrscheinlich deshalb, weil beim Modell der Einfluss des Spätfrostes und des Winterfrostes nicht berücksichtigt werden kann) und weist allgemein zu hohe Obergrenzen auf. Im Tessin wird die fundamentale Nische v.a. in der oberen Leventina überschätzt, allgemein wird auch hier zu weit in die Täler hinein und in zu hohe Lagen modelliert. Im Wallis ist die Trockengrenze wahrscheinlich gut modelliert.

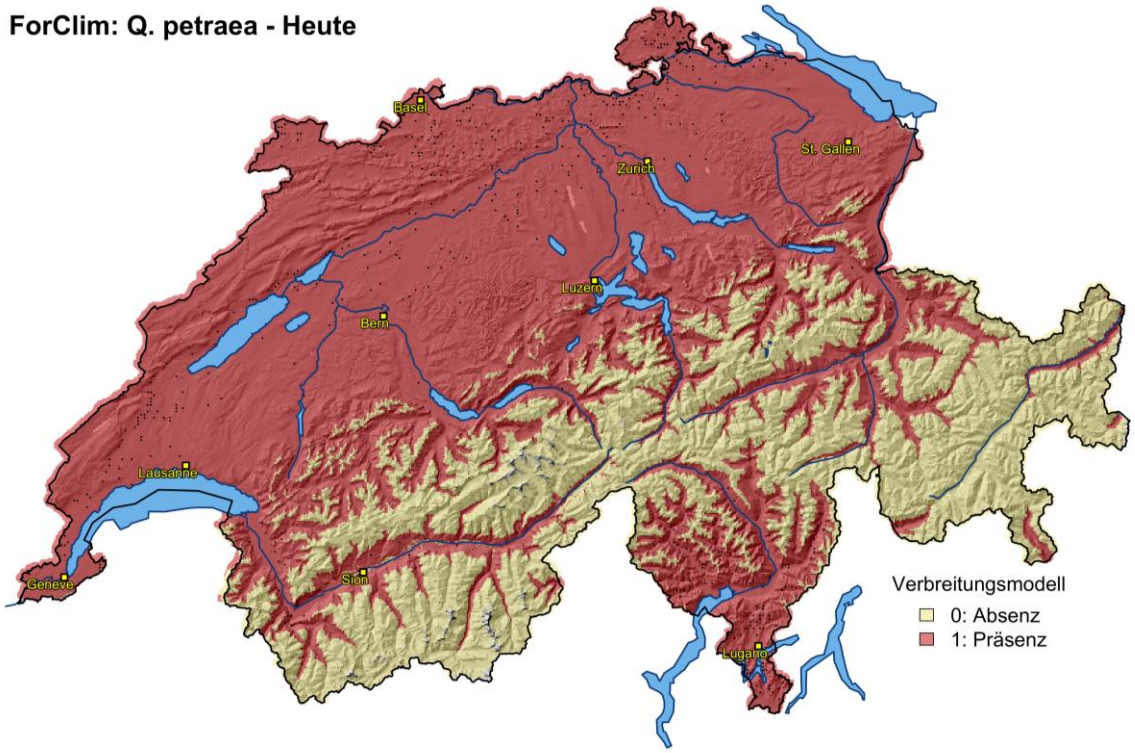

Abb. 32: Modellierte fundamentale Nische der Traubeneiche, heute (gemäss ForClim).

Modellierung des Traubeneichenareals mit der Klimazukunft RegCM3 (Periode 2070-2099)

Sehr gute Übereinstimmungen bestehen bei RegCM3 (Abb. 33). Leichte Abweichungen existieren einzig im Jura und in den nördlichen Randalpen.

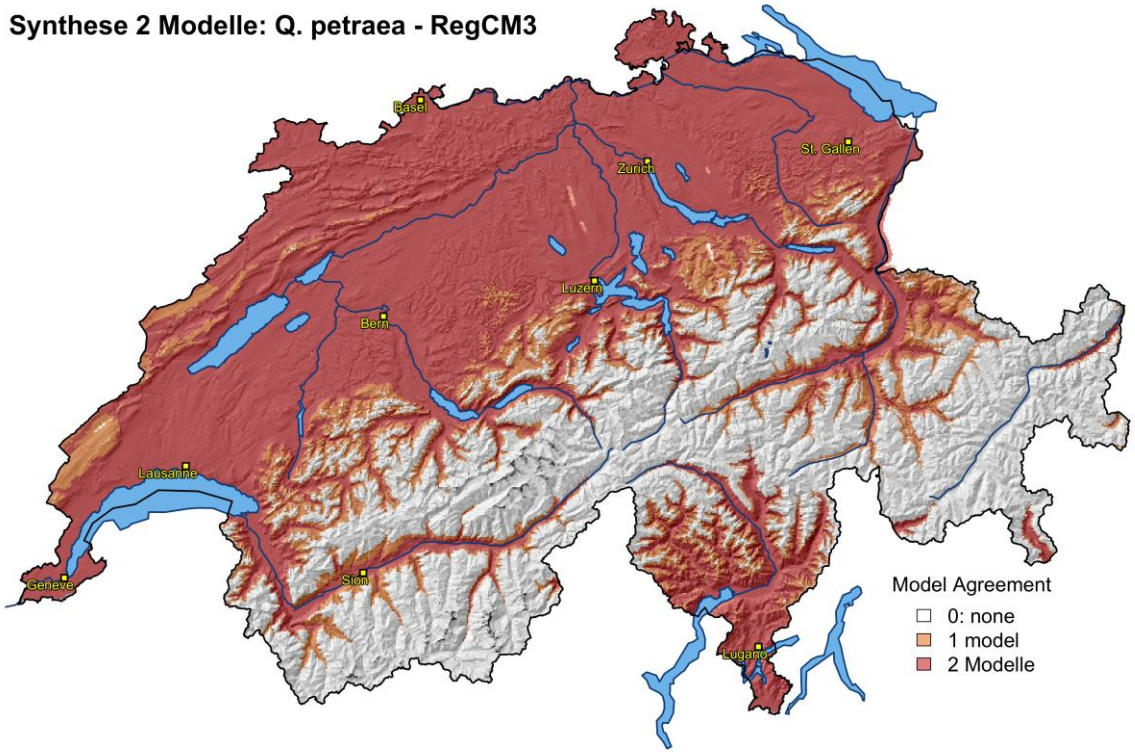

Abb. 33: Synthese von PorTree⁺ und Abenis. Modellierte Habitateignung der Traubeneiche, Klimazukunft RegCM3 für die Periode 2070 - 2099. Legende: 2 = Traubeneiche kommt in beiden Modellen vor, 1 = Traubeneiche kommt nur in einem Modell vor, 0 = Traubeneiche kommt in keinem Modell vor.

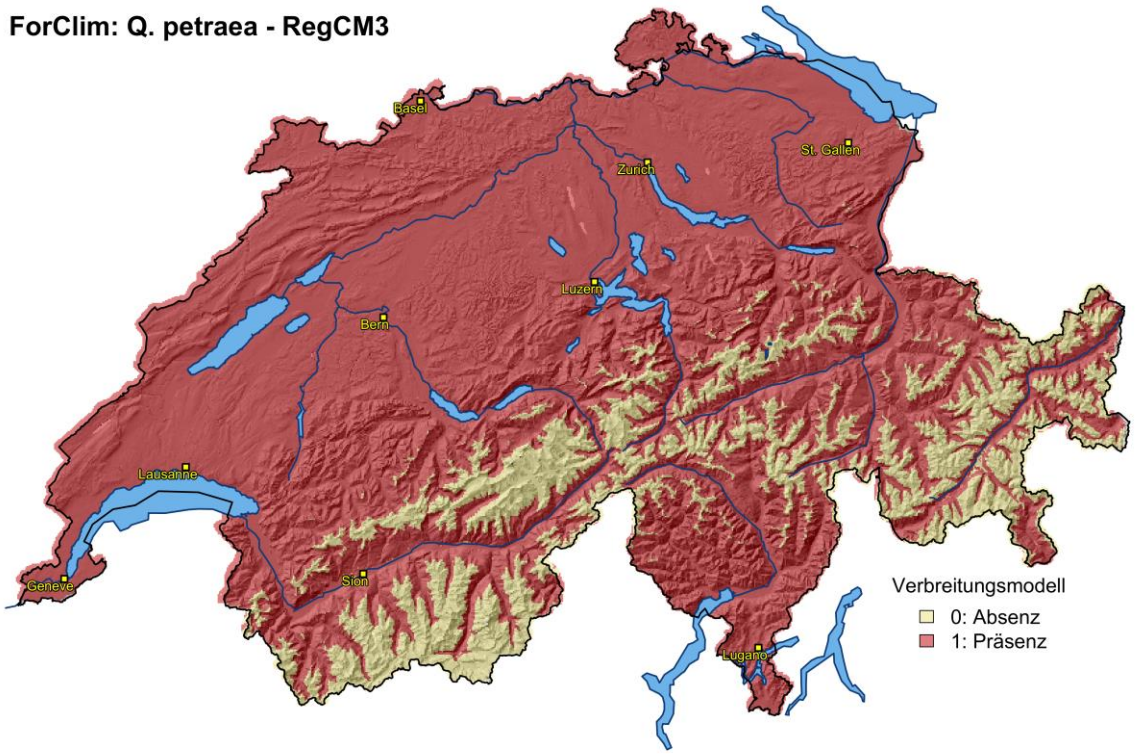

Abb. 34: Modellierte fundamentale Nische der Traubeneiche gemäss ForClim, mit der Klimazukunft RegCM3 für für die Periode 2070-2099.

Modellierung des Traubeneichenareals mit der Klimazukunft CLM (Periode 2070-2099)

Beim CLM besteht eine sehr gute Übereinstimmung, leichte Abweichungen treten einzig im Jura und in den nördlichen Randalpen auf (Abb. 35).

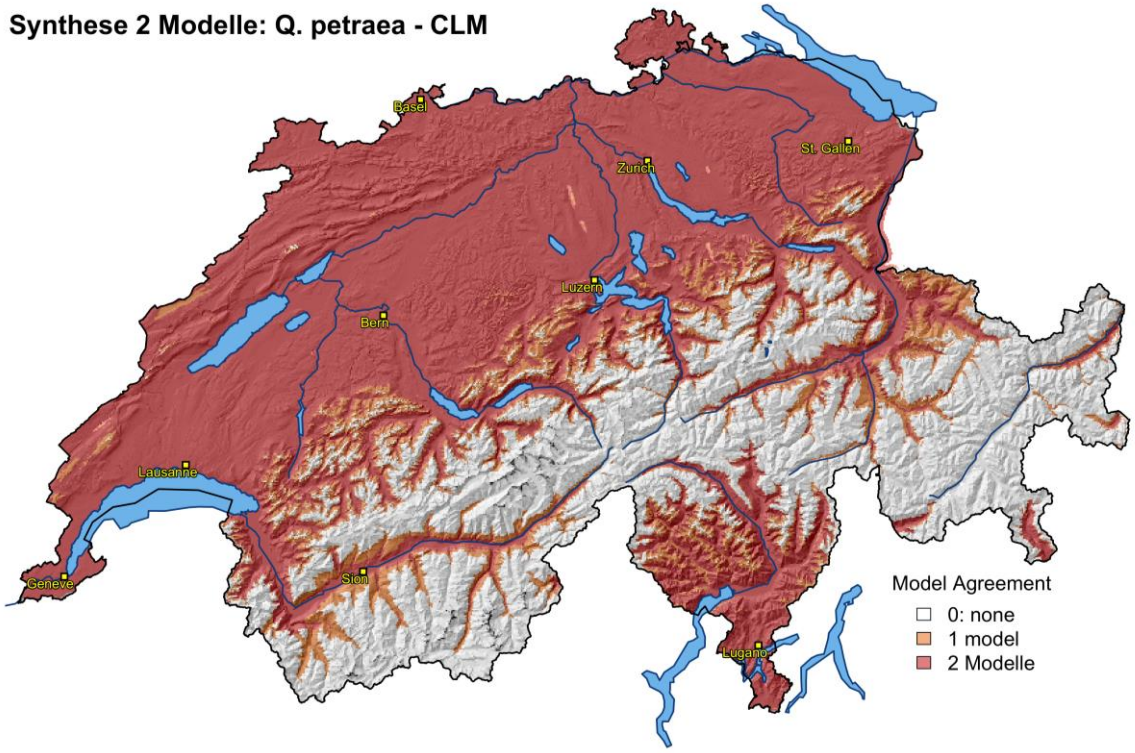

Abb. 35: Synthese von PorTree⁺ und Abenis. Modellierte Habitateignung der Traubeneiche, Klimazukunft CLM für die Periode 2070 - 2099. Legende: 2 = Traubeneiche kommt in beiden Modellen vor, 1 = Traubeneiche kommt nur in einem Modell vor, 0 = Traubeneiche kommt in keinem Modell vor.

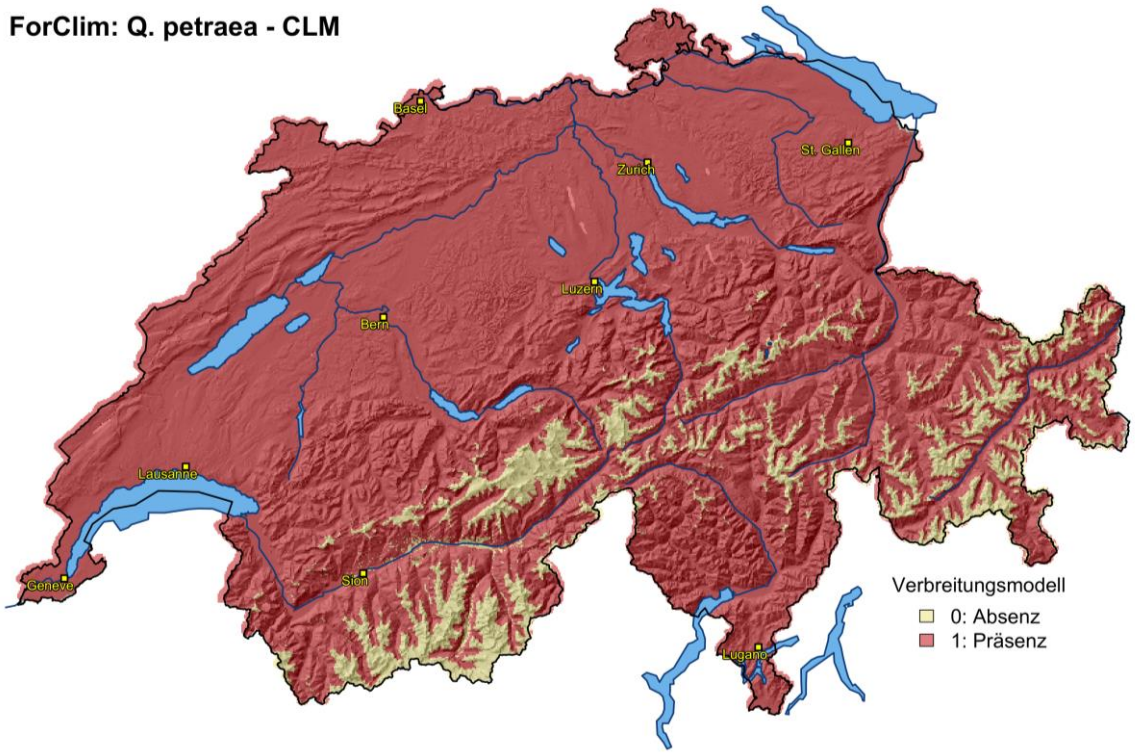

Abb. 36: Modellierte fundamentale Nische der Traubeneiche gemäss ForClim, mit der Klimazukunft CLM für die Periode 2070-2099.

Modellvergleich PorTree⁺ und Abenis bei der Traubeneiche: heute und bei den Klimazukünften RegCM3 und CLM (Periode 2070-2099)

In Tab. 7 werden die grössten Unterschiede der Modellierungen erläutert.

Tab. 7: Vergleich von Modellierungen von PorTree⁺ und Abenis mit LFI-Daten und Lokalkenntnissen.

	Wie stark ist die Traubeneiche im Vergleich zum heutigen Traubeneichenvorkommen (LFI-Flächen [LFI] und Lokalkenntnissen [LK]) in den verschiedenen Modellierungen vertreten?		**Wie stark weicht die Modellierung für die Periode 2070-2099 von Abenis (MAB) von der Modellierung von PorTree⁺ (MPT) ab?**	
Gebiet	**PorTree⁺ (MPT)**	**Abenis (MAB)**	**RegCM3**	**CLM**
allgemein	Bei MPT weniger in höheren Lagen modelliert (z.B. Jura, Mittelland, nördliche Randalpen), ansonsten sehr ähnliche Modellierungen. LK: In den Nordalpen an Südhängen bis 1200 m ü. M.; in den Südalpen bis ca. 1500 m ü. M. Vorkommen gut möglich.		Bei MAB etwas grosszügiger, leicht höher und weiter in Täler hineinreichend. Ansonsten wenig Unterschiede.	MAB leicht höher hinauf modelliert.
zentrales Mittelland	Sehr wenig Flächen in höheren Lagen.	i.O.	Bei beiden flächig modelliert.	Bei beiden flächig modelliert.
Jura	Keine Modellierung von Eichen.	Nur in tieferen Lagen Modellierung von Eichen, der Realität mehr entsprechend.	Bei MAB in höheren Lagen modelliert als bei MPT.	Bei beiden fast flächig modelliert.
Prättigau	Fast keine Eichen vorhanden.	Eichen vorhanden (der Realität eher entsprechend).	Bei MAB in höheren Lagen modelliert als bei MPT.	Bei MAB in höheren Lagen modelliert als bei MPT.
Nordbünden		Modellierung reicht höher hinauf und weiter in Täler hinein als bei MPT.	Bei MAB in höheren Lagen modelliert als bei MPT.	MAB geht weiter in Täler hinein.
Wallis	Ähnliche Modellierungen. LK: Die Traubeneiche kommt heute schon bis 1700 m ü. M. als Krüppeleiche vor.		Ähnliche Modellierungen.	Ähnliche Modellierungen.
Walenseegebiet		LK: bis 1200 m ü. M. vorkommend.	Ähnliche Modellierungen.	Ähnliche Modellierungen.
Unterengadin	Fehlend, bei Modellierungen und in Realität.		Bei beiden Modellen neu vorkommend.	Ähnliche Modellierungen.
Puschlav und Bergell			Bei beiden Modellen neu in höheren Lagen vorkommend.	Ähnliche Modellierungen.
Tessin	Ähnliche, realistische Modellierungen.		Bei MAB in höheren Lagen modelliert als bei MPT.	MAB leicht höher hinauf modelliert, ansonsten gleiche Ausbreitung in Täler hinein.

3.7 Stieleiche (Quercus robur)

Modellierung des Stieleichenareals heute

Die beiden Modelle weisen eine sehr ähnliche Verbreitung auf und bilden die Vorkommen der Stieleiche realistisch nach (Abb. 37; detaillierter Vergleich in Tab. 8). Beide Modelle gehen eher zu weit in Alpentäler hinein und weisen eher zu hohe Obergrenzen auf. Die Stieleiche ist empfindlicher als die Traubeneiche bezüglich Trockenheit, dies weisen auch die Modelle aus (kleinflächigere Modellierungen bei der Stieleiche).

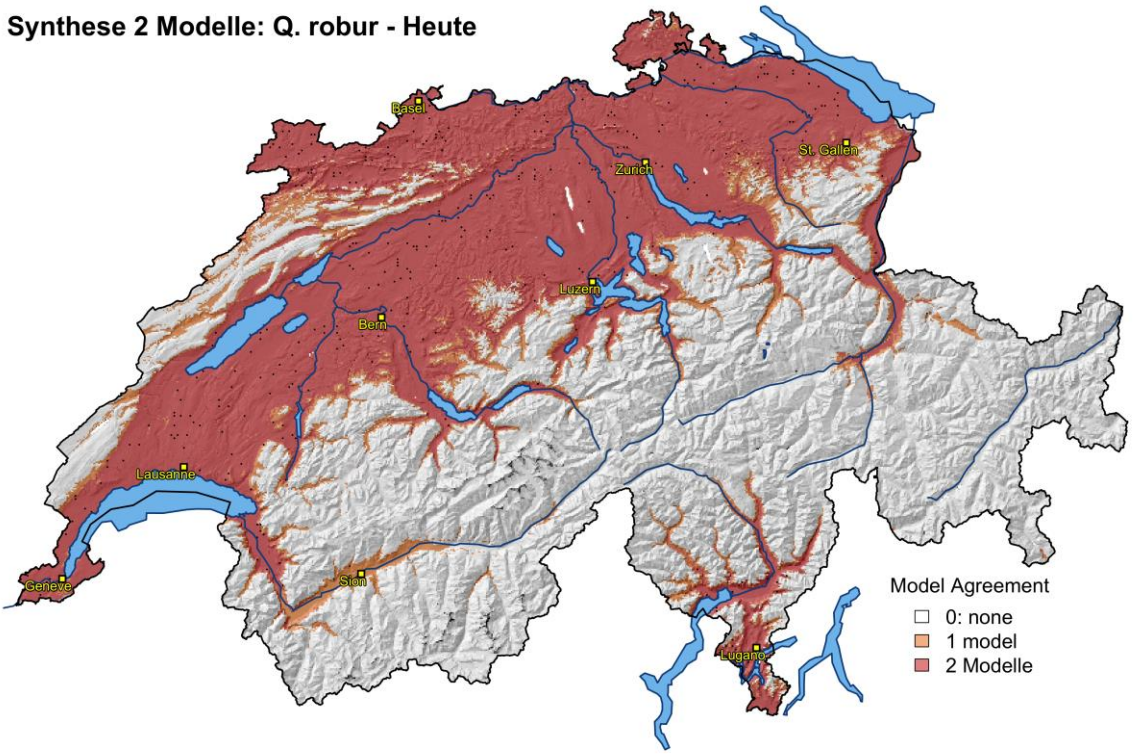

Abb. 37: Synthese von PorTree⁺ und Abenis. Modellierte Habitateignung der Stieleiche, heute. Legende: 2 = Stieleiche kommt in beiden Modellen vor, 1 = Stieleiche kommt nur in einem Modell vor, 0 = Stieleiche kommt in keinem Modell vor.

Die fundamentale Nische (Abb. 38) der Stieleiche ist zu grosszügig modelliert, vor allem in hohen Lagen (Engadin, Bedrettotal) und die Modellierung dringt zu weit in Alpentäler vor (z.B. im Vorder- und Hinterrheintal und im westlichen Tessin). Die Stieleiche kommt in Lagen bis ca. 1000 m ü. M. vor (SEBA, https://www1.ethz.ch/wm/sebapub).

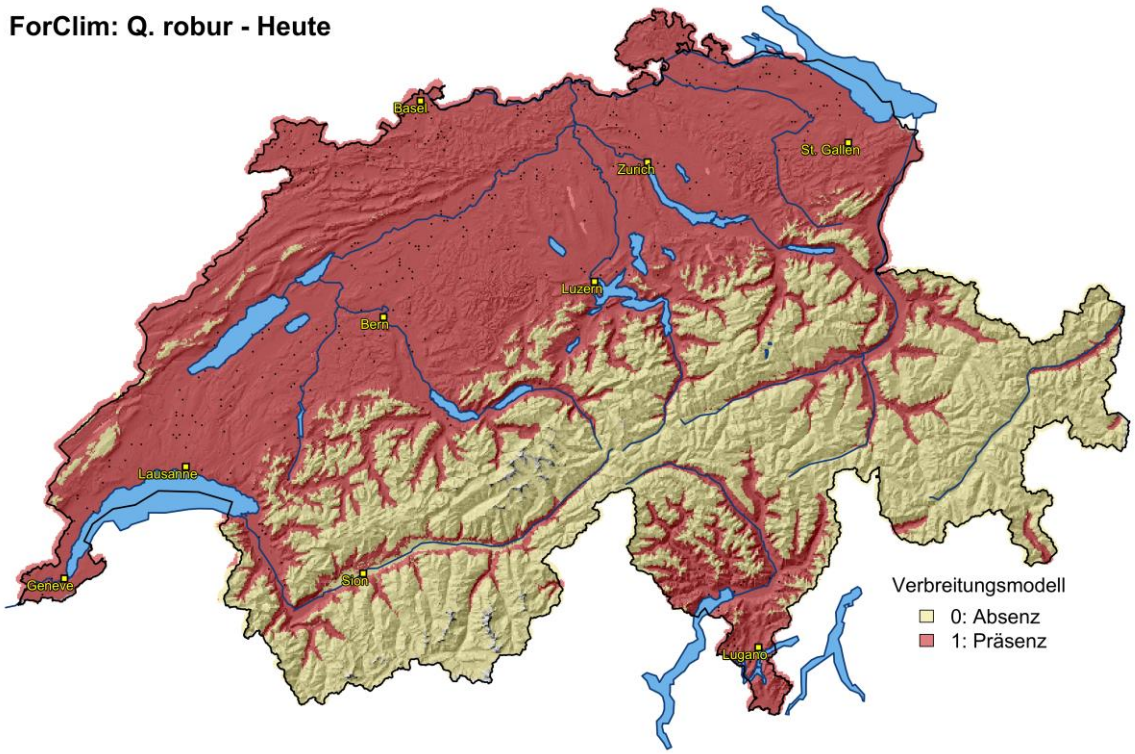

Abb. 38: Modellierte fundamentale Nische der Stieleiche, heute (gemäss ForClim).

Modellierung des Stieleichenareals mit der Klimazukunft RegCM3 (Periode 2070-2099)

Die Habitateignung für die Stieleiche nimmt grossflächig v.a. im Jura, in den nördlichen Randalpen und im Tessin zu (Abb. 39).

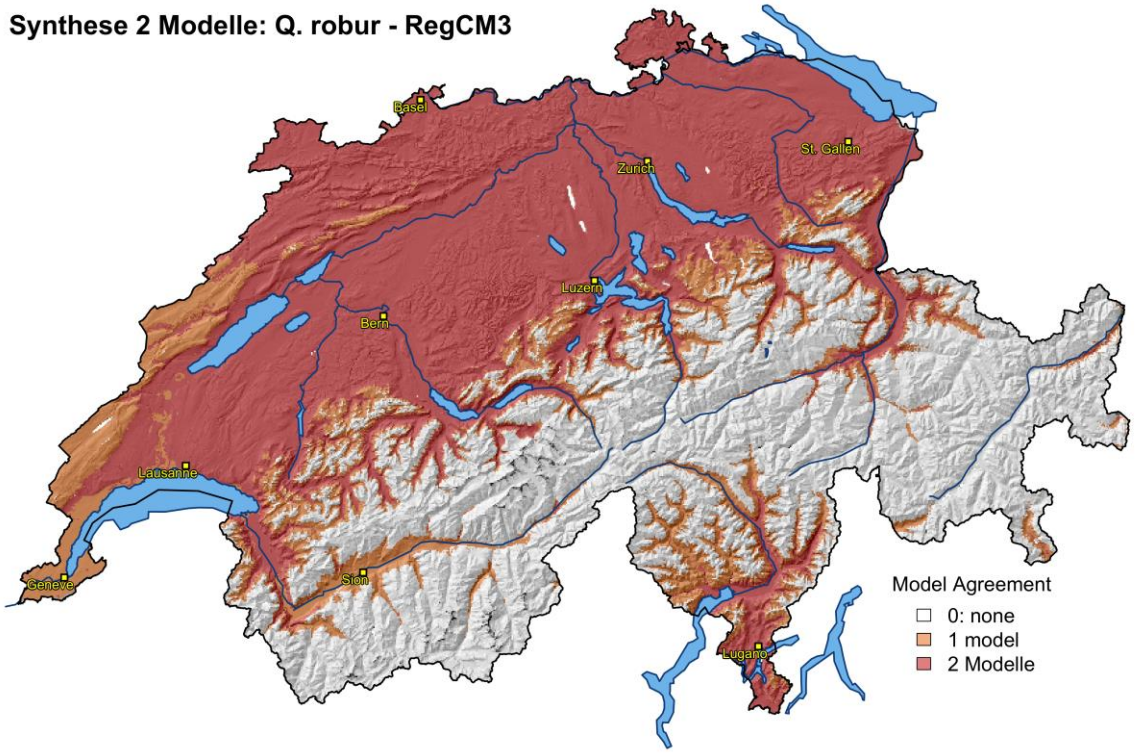

Abb. 39: Synthese von PorTree⁺ und Abenis. Modellierte Habitateignung der Stieleiche, Klimazukunft RegCM3 für die Periode 2070 - 2099. Legende: 2 = Stieleiche kommt in beiden Modellen vor, 1 = Stieleiche kommt nur in einem Modell vor, 0 = Stieleiche kommt in keinem Modell vor.

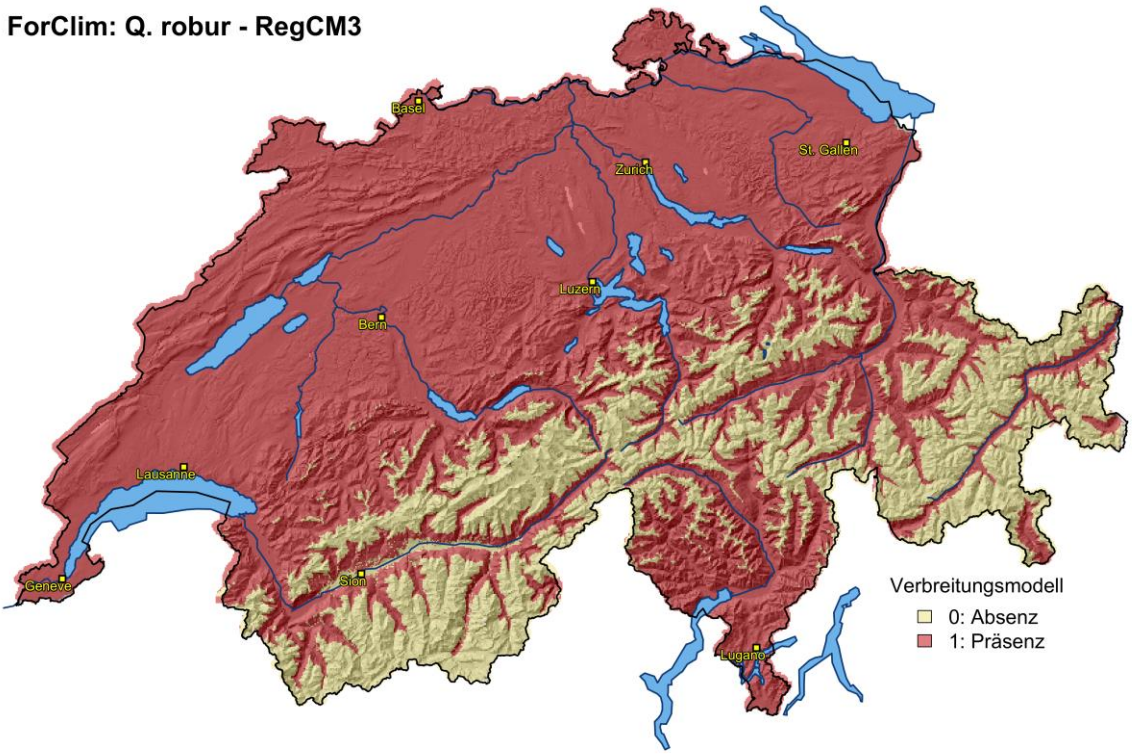

Abb. 40: Modellierte fundamentale Nische der Stieleiche gemäss ForClim, mit der Klimazukunft RegCM3 für für die Periode 2070-2099.

Modellierung des Stieleichenareals mit der Klimazukunft CLM (Periode 2070-2099)

Die beiden Modelle unterscheiden sich im Jura, im Mittelland, im Wallis und im Tessin erheblich (Abb. 41). Dort wo rote Flächen vorhanden sind, kann man am ehesten davon ausgehen, dass die Stieleiche überlebt. Keine Probleme sollte die Stieleiche in Teilen des Mittellandes Richtung nördliche Randalpen bekommen, besonders auf nährstoffreichen, frischen und tiefgründigen Böden (Lehm-, Braunerde- und Tonböden). Bei Abenis fällt die Stieleiche aufgrund der Trockenheit schneller aus als bei PorTree^{+}. Die Modellierung von PorTree^{+} ist z.T. weniger realistisch, da sie auf nur wenigen LFI-Punkten aufbauen musste und somit vor allem in Randlagen Fehler auftreten können.

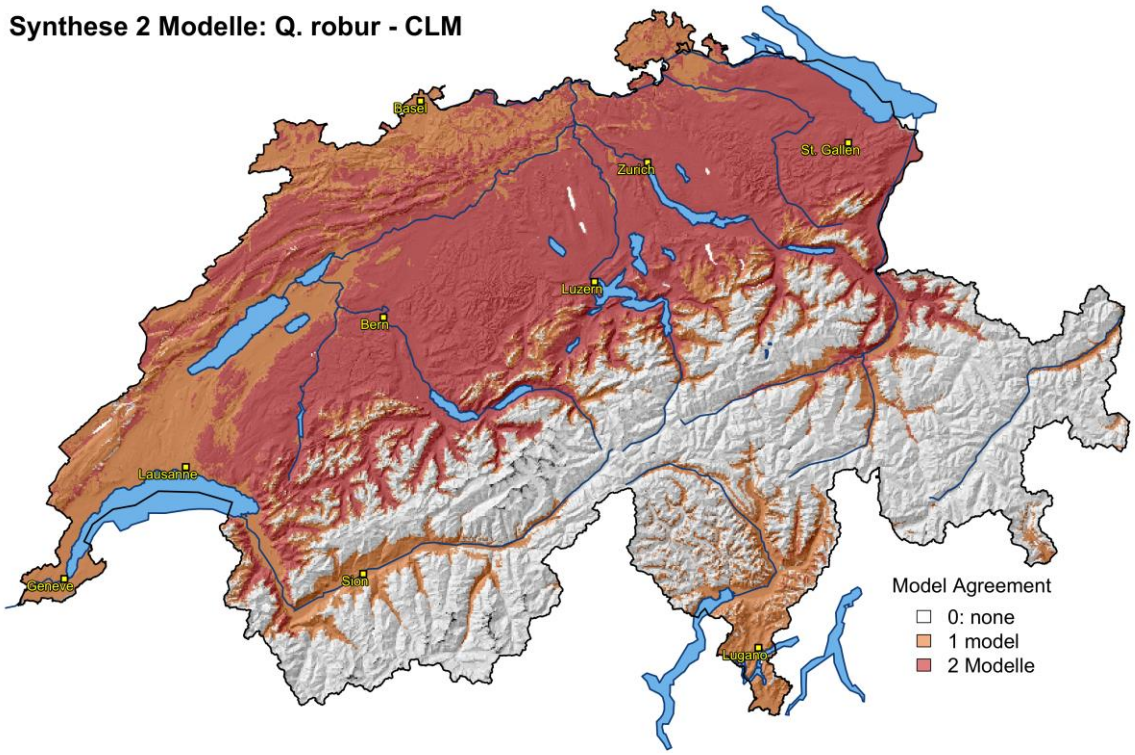

Abb. 41: Synthese von PorTree⁺ und Abenis. Modellierte Habitateignung der Stieleiche, Klimazukunft CLM für die Periode 2070 - 2099. Legende: 2 = Stieleiche kommt in beiden Modellen vor, 1 = Stieleiche kommt nur in einem Modell vor, 0 = Stieleiche kommt in keinem Modell vor.

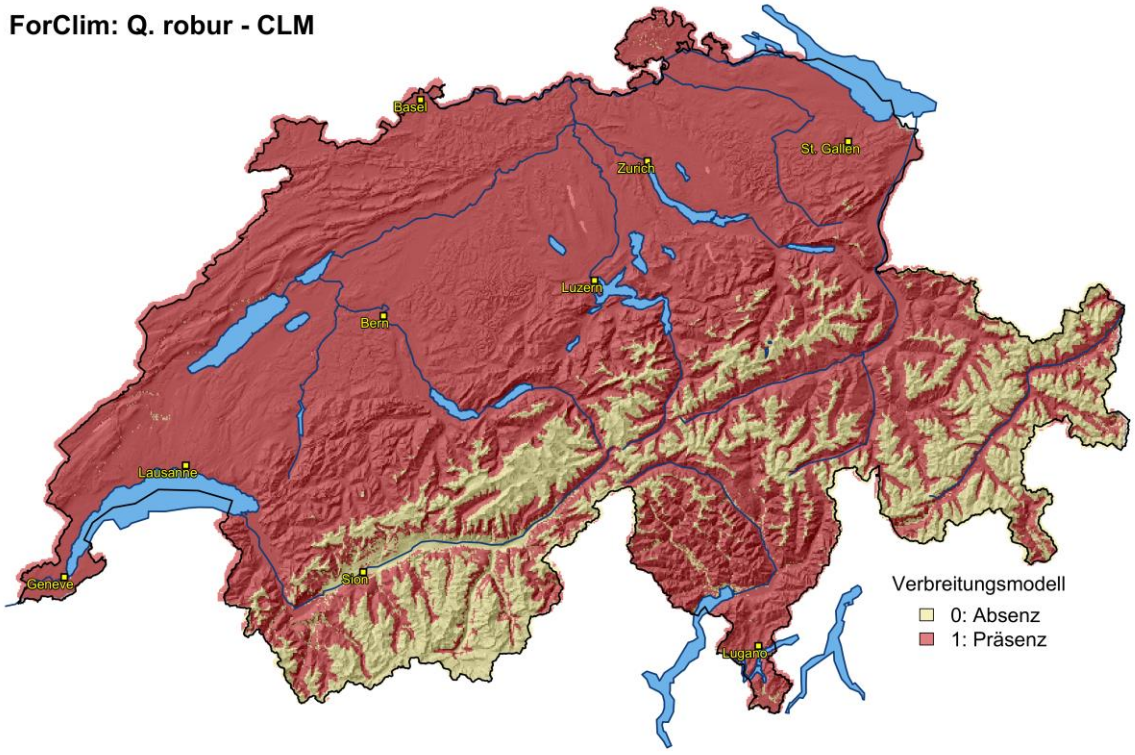

Abb. 42: Modellierte fundamentale Nische der Stieleiche gemäss ForClim, mit der Klimazukunft CLM für die Periode 2070-2099.

Modellvergleich PorTree+ und Abenis bei der Stieleiche: heute und bei den Klimazukünften RegCM3 und CLM (Periode 2070-2099)

In Tab. 8 werden die grössten Unterschiede der Modellierungen erläutert.

Tab. 8: Vergleich von Modellierungen von PorTree+ und Abenis mit LFI-Daten und Lokalkenntnissen.

	Wie stark ist die Stieleiche im Vergleich zum heutigen Stieleichenvorkommen (LFI-Flächen [LFI] und Lokalkenntnissen [LK]) in den verschiedenen Modellierungen vertreten?		**Wie stark weicht die Modellierung für die Periode 2070-2099 von Abenis (MAB) von der Modellierung von PorTree+ (MPT) ab?**	
Gebiet	**PorTree+ (MPT)**	**Abenis (MAB)**	**RegCM3**	**CLM**
allgemein	MPT geht weniger weit in Täler hinein und weniger hoch als MAB.		Relativ ähnliche Verbreitungsmuster, Abweichungen v.a. im Jura, Genf, Wallis und Tessin.	Bei MPT Stieleiche unten stärker vertreten als bei MAB, in höheren Lagen bei MAB stärker verbreitet als bei MPT. Grössere Differenzen.
Wallis	Flächen modelliert, obwohl keine LFI-Punkte vorhanden. Nach D. Horisberger einzelne Stieleichen bis Leuk.	Keine Vorkommen modelliert, Modell etwas zu restriktiv.	Bei MAB fehlt Stieleiche, da zu trocken.	Bei MAB fehlt Stieleiche, da zu trocken.
Tessin	Westliches Tessin fehlt, Fehler.	i.O.	MAB grossflächiger als MPT.	Bei MAB fast gänzlich fehlend, bei MPT noch in Tälern vorkommend.
Misox (GR)	i.O.	i.O.	MAB grossflächiger als MPT.	Bei MAB fast gänzlich fehlend, bei MPT noch in Tälern vorkommend.
Mittelland	Sehr ähnliche Modellierungen, der Realität entsprechend.		Sehr ähnliche Modellierungen.	Grössere Unterschiede an der CH-Nordgrenze und zwischen Genf und Bielersee, bei MAB Ausfall von Stieleiche, bei MPT weiter vorkommend.
Nordalpen	MAB reicht weiter in die Täler als MPT.		MAB weist etwas mehr Flächen in höheren Lagen auf.	MAB weist etwas mehr Flächen in höheren Lagen auf.
Nord- und Mittelbünden, Prättigau (GR)	Zu geringe Modellierung im Prättigau.	i.O.	MAB im Prättigau grossflächiger modelliert.	Bei MPT viel grossflächiger in Mittelbünden.
Engadin				Neu bei MPT vorkommend, aufgrund der Trockenheit nicht realistisch.
Jura	Ähnliche Modellierungen, MAB leicht grössere Verbreitung und etwas höher hinauf Vorkommen modelliert.		MAB weist mehr Flächen in höheren Lagen auf.	MAB weist mehr Flächen in höheren Lagen auf.
Genf	i.O.	i.O.	In MPT vorhanden, in MAB nicht (da zu trocken).	In MPT vorhanden, in MAB nicht (da zu trocken).
Puschlav (GR)	Keine Modellierung, in Infoflora nur alte		Bei MAB grossflä-	Bei MPT im Gegen-

Gebiet	Wie stark ist die Stieleiche im Vergleich zum heutigen Stieleichenvorkommen (LFI-Flächen [LFI] und Lokalkenntnissen [LK]) in den verschiedenen Modellierungen vertreten?		Wie stark weicht die Modellierung für die Periode 2070-2099 von Abenis (MAB) von der Modellierung von PorTree+ (MPT) ab?	
	PorTree+ (MPT)	Abenis (MAB)	RegCM3	CLM
	Vorkommen und in Braun-Blanquet 1932 keine Vorkommen ausgewiesen.		chigere Habitateignung.	satz zu MAB auch in Talsohle.

3.8 Bergahorn (Acer pseudoplatanus)

Modellierung des Bergahornareals heute

Die beiden Modellierungen sind sehr ähnlich, einzig bei Genf, im Wallis, in den collinen Lagen vom Mittelland und im Engadin und Nordbünden bestehen grössere Abweichungen (Abb. 43; detaillierter Vergleich in Tab. 9). Der Bergahorn mag keine sauren Böden. Nach Köcher et al. (2009) ist der Bergahorn trockenheitssensitiver als die Winterlinde oder die Esche. In der collinen Höhenstufe hat der Bergahorn aufgrund dessen evtl. Mühe, danach ist er real gut vertreten bis in die subalpine Stufe (v.a. in den Nordalpen und in Kalkgebieten). Im Wallis kommt der Bergahorn in feuchten Hanglagen vor; bei Fiesch gibt es in Muldenlagen noch Bergahornwälder, im Obergoms gibt es weniger Bergahorn (aufgrund von Kaltluftsee und sauren Böden). Im Val Lizerne Richtung Derborence wird der Bergahorn durch Kalk gefördert.

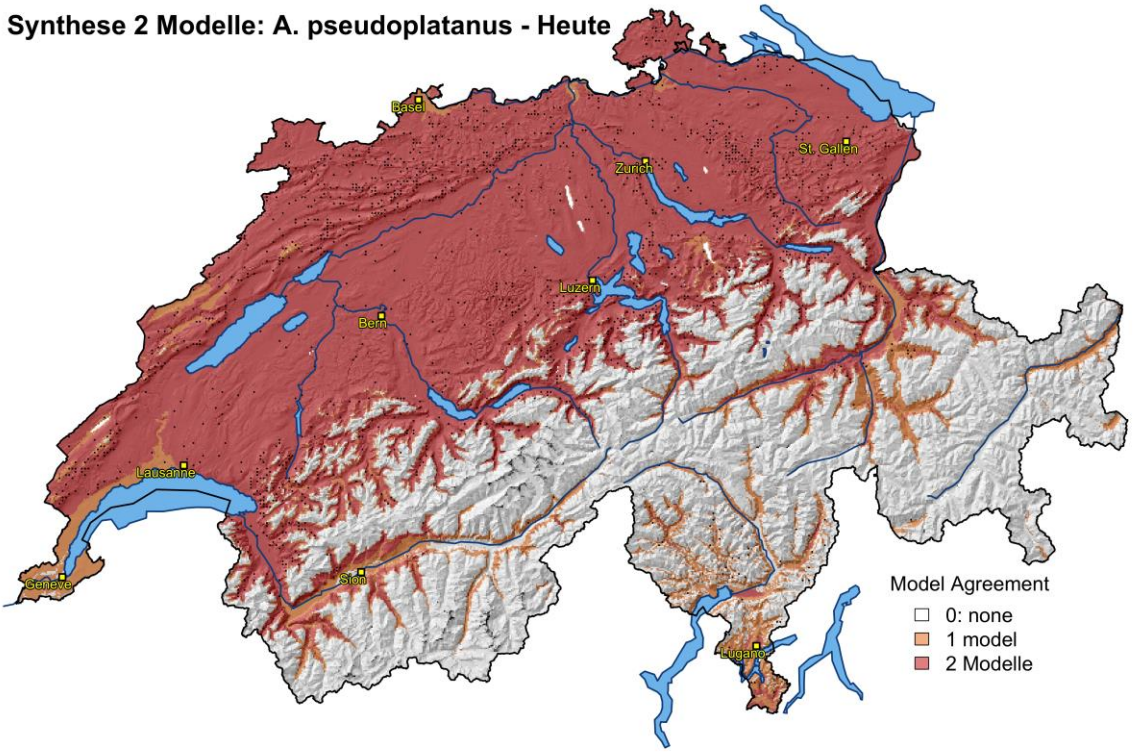

Abb. 43: Synthese von PorTree⁺ und Abenis. Modellierte Habitateignung des Bergahorns, heute. Legende: 2 = Bergahorn kommt in beiden Modellen vor, 1 = Bergahorn kommt nur in einem Modell vor, 0 = Bergahorn kommt in keinem Modell vor.

Die fundamentale Nische des Bergahorns wird gut abgebildet in den Südtälern und in Graubünden, Fehler bestehen im Unterengadin und im Münstertal (Abb. 44). Im Wallis geht die Modellierung eher zu weit in Täler hinein (Beschränkung aufgrund von Frost). Die fundamentale Nische wird überschätzt in Gebieten mit Kaltluftseen und sauren Böden, so im Obergoms und den hinteren Tälern des Wallis. Im ozeanischen Klima überall gut vorkommend.

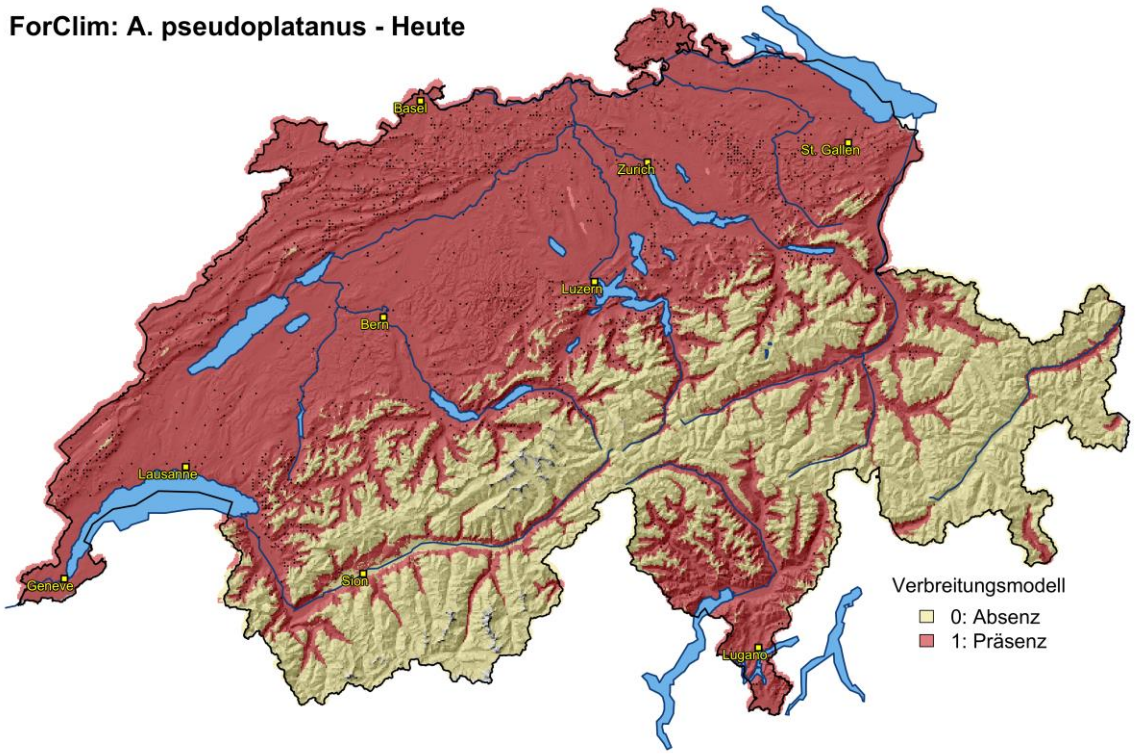

Abb. 44: Modellierte fundamentale Nische des Bergahorns, heute (gemäss ForClim).

Modellierung des Bergahornnareals mit der Klimazukunft RegCM3 (Periode 2070-2099)

Im nördlichen Bereich (Basel, Schaffhausen), im westlichen Mittelland und im Tessin wird es für den Bergahorn schwierig (Abb. 45).

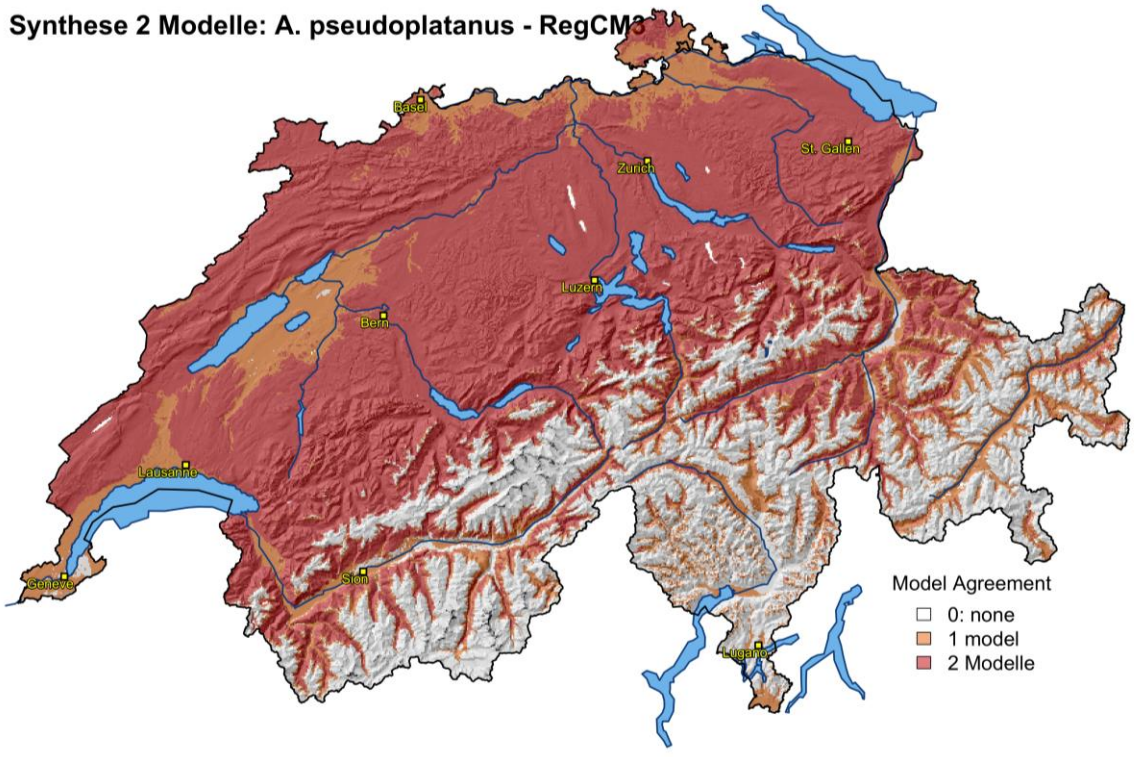

Abb. 45: Synthese von PorTree+ und Abenis. Modellierte Habitateignung des Bergahorns, Klimazukunft RegCM3 für die Periode 2070 - 2099. Legende: 2 = Bergahorn kommt in beiden Modellen vor, 1 = Bergahorn kommt nur in einem Modell vor, 0 = Bergahorn kommt in keinem Modell vor.

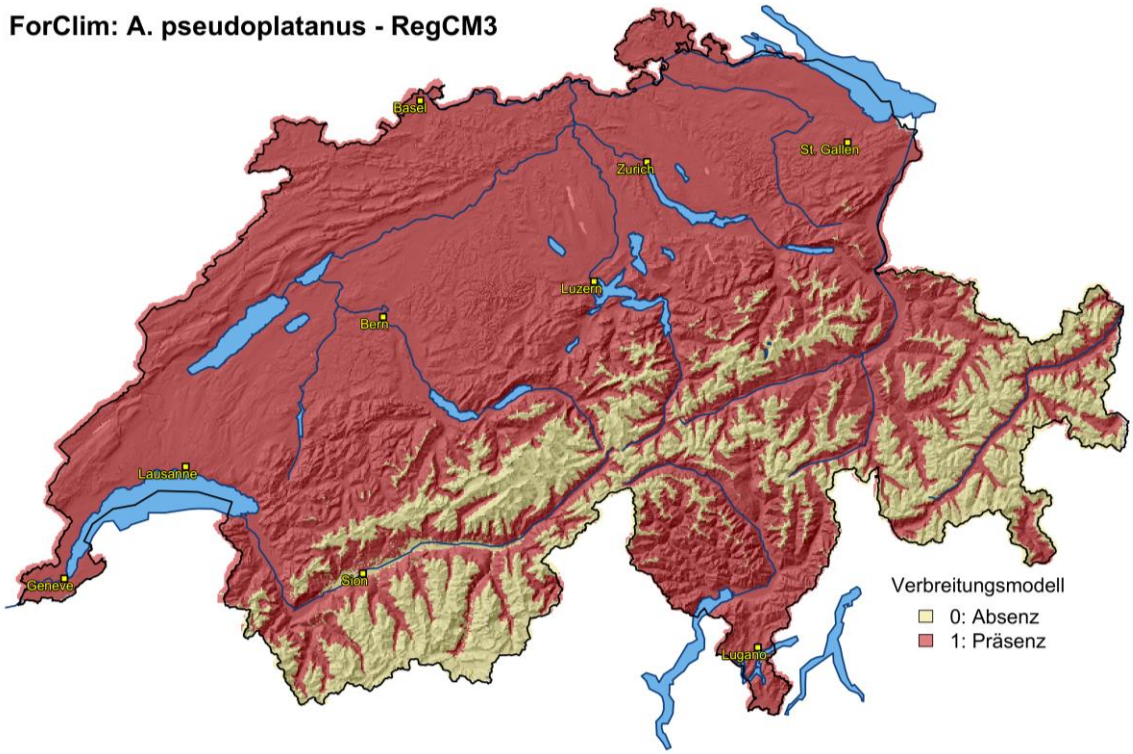

Abb. 46: Modellierte fundamentale Nische des Bergahorns gemäss ForClim, mit der Klimazukunft RegCM3 für für die Periode 2070-2099.

Modellierung des Bergahornnareals mit der Klimazukunft CLM (Periode 2070-2099)

Schwierig wird es für den Bergahorn in Zukunft vor allem in grossen Teilen des Mittellandes und im Tessin (Abb. 47). Auch beim CLM kann sich der Bergahorn vor allem im Jura, in den nördlichen Randalpen und in den luftfeuchteren höheren Lagen der Zentralalpen halten.

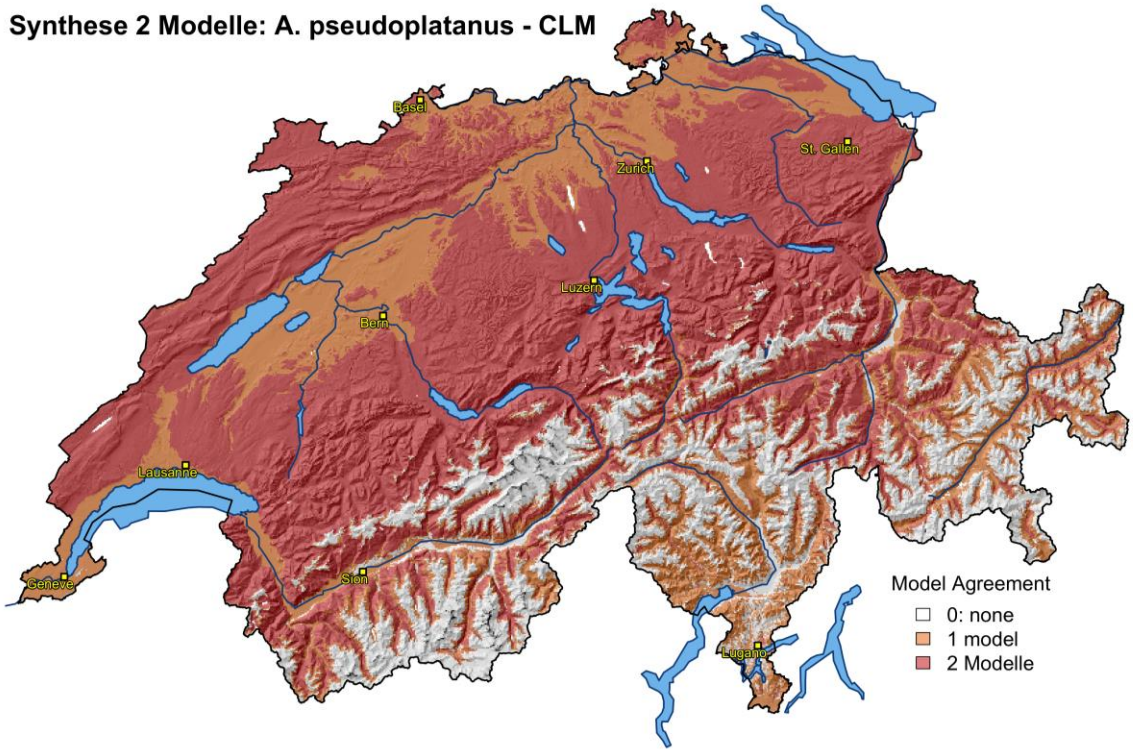

Abb. 47: Synthese von PorTree⁺ und Abenis. Modellierte Habitateignung des Bergahorns, Klimazukunft CLM für die Periode 2070 - 2099. Legende: 2 = Bergahorn kommt in beiden Modellen vor, 1 = Bergahorn kommt nur in einem Modell vor, 0 = Bergahorn kommt in keinem Modell vor.

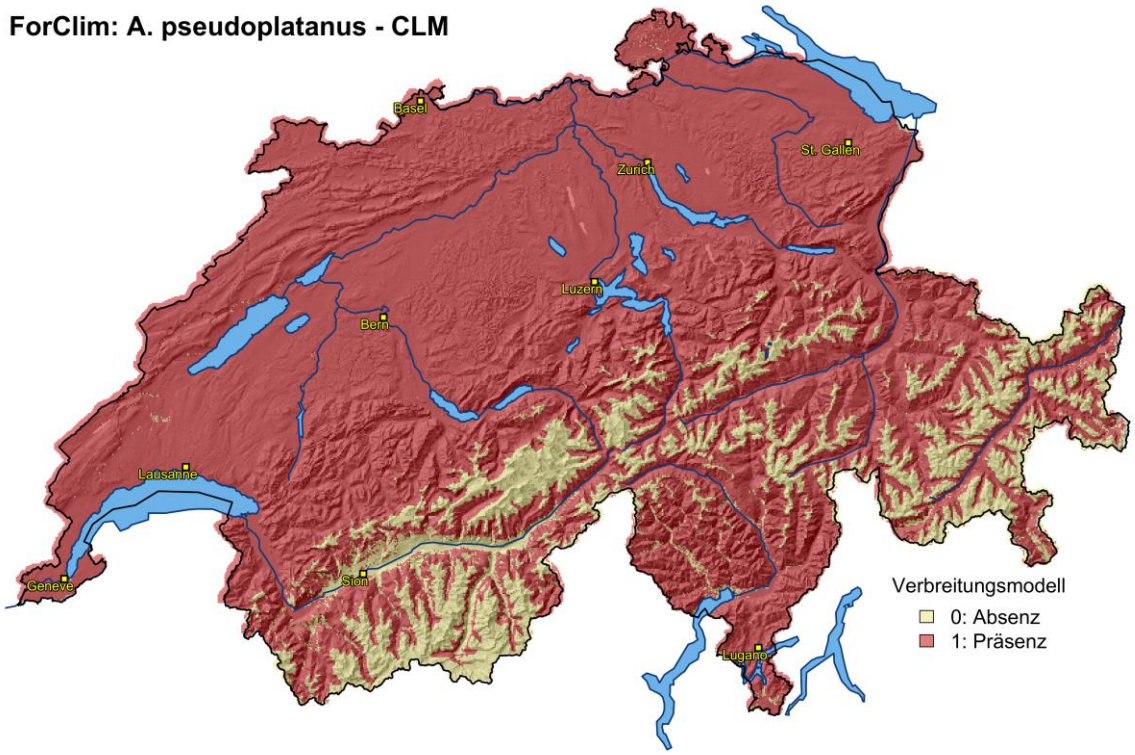

Abb. 48: Modellierte fundamentale Nische des Bergahorns gemäss ForClim, mit der Klimazukunft CLM für die Periode 2070-2099.

Modellvergleich PorTree+ und Abenis beim Bergahorn: heute und bei den Klimazukünften RegCM3 und CLM (Periode 2070-2099)

In Tab. 9 werden die grössten Unterschiede der Modellierungen erläutert.

Tab. 9: Vergleich von Modellierungen von PorTree+ und Abenis mit LFI-Daten und Lokalkenntnissen.

	Wie stark ist der Bergahorn im Vergleich zum heutigen Bergahornvorkommen (LFI-Flächen [LFI] und Lokalkenntnissen [LK]) in den verschiedenen Modellierungen vertreten?		**Wie stark weicht die Modellierung für die Periode 2070-2099 von Abenis (MAB) von der Modellierung von PorTree+ (MPT) ab?**	
Gebiet	**PorTree+ (MPT)**	**Abenis (MAB)**	**RegCM3**	**CLM**
allgemein	Modellierung in der Nordschweiz gut, in Graubünden, im Tessin, im Oberwallis zu restriktiv.	i.O.	Bei MPT auf warm-trockenen Standorten im Mittelland und Wallis zu grossflächig modelliert.	Obergrenze stimmt gut überein.
Tessin	Zu geringes Vorkommen modelliert. LK: Im Bavonatal auf 900 m ü. M., muss etwas frisch sein, im Leventina auch vorkommend. Nach G. Carraro geht der B'ahorn auf basenreichen Standorten auch in tiefere Lagen.	i.O.	Bei MPT praktisch nicht modelliert in Zukunft, bei MAB schon. Collin mit Buche – Annahme, dass Ahorn auch mit vorkommt.	Bei MAB relativ stark vertreten und bei MPT nicht.
Wallis	Fehlende Modellierung im Oberwallis. LK: Ahorn sehr empfindlich auf Trockenperioden, geht aber weiter in innere alpine Täler als Esche, da weniger frostempfindlich.	In tiefen, lufttrockenen Lagen fehlend, in Seitentälern und höheren Lagen vorkommend (Modellierung realistisch)	Bei MAB auf warm-trockenen Tallagen fehlend, in luftfeuchteren Seitentälern vorkommend. Bei MPT in der Talsohle kein Ausfall der Baumart.	Ähnliche Modellierungen, MPT auch in Tallagen. Aufgrund der künftigen Trockenheit eher zu grosszügig modelliert.
Genf	Bei MPT vorkommend (in Infoflora auch)	Bei MAB fehlend.	Bei MAB fehlend, bei MPT vorhanden – unrealistisch aufgrund geringer Niederschläge.	
Nordalpen	i.O.	i.O.	Ähnliche Modellierungen.	
Engadin, Puschlav (GR)	Fehlend (in Realität Bergahorn selten vorkommend, ausser im Oberengadin fehlend). LK: Im Engadin und Münstertal evtl. fehlend aufgrund der sauren Böden.	Unterengadin zu grosszügig modelliert (ebenfalls Münstertal, dort fehlt Bergahorn fast vollständig).	Bei MPT praktisch nicht modelliert in Zukunft, bei MAB schon.	Bei MAB relativ stark vertreten und bei MPT nicht, aufgrund der Lufttrockenheit MAB eher nicht realistisch.
Mittelland	Zu grossflächig auch in colliner Stufe modelliert.	In der collinen Stufe bei MAB nicht vorkommend, anhand von Verbreitung von LFI-Punkten stimmt dies.	In warm-trockenen Lagen Ausfall bei MAB, bei MPT flächig vorkommend – MAB realistischer.	

3.9 Esche (Fraxinus excelsior)

Modellierung des Eschenareals heute

Eine gute Übereinstimmung weisen die Modellierungen im Mittelland, in den nördlichen Randalpen und im Tessin/Misox auf (Abb. 49; detaillierter Vergleich in Tab. 10). Abweichungen bestehen v.a. im Wallis, in Nordbünden, im Unterengadin und im Jura. Beim Modell Abenis dringt die Esche weiter in die Täler vor und steigt in höhere Lagen als PorTree^{+} - die Realität ist am ehesten ein «Mittelding» zwischen den beiden Modellen. Die Esche ist trockenresistent (nach Köcher et al. 2009) trockenresistenter als Winterlinde und Bergahorn), vor allem auf kalkhaltigen Böden. Früher wurden «Kalkesche» (verträgt höhere Trockenheit) und «Wasseresche» unterschieden, inzwischen ist aber bekannt, dass kein genetischer Unterschied besteht. Die Esche verträgt keine sauren Böden und ist nährstoffbedürftig.

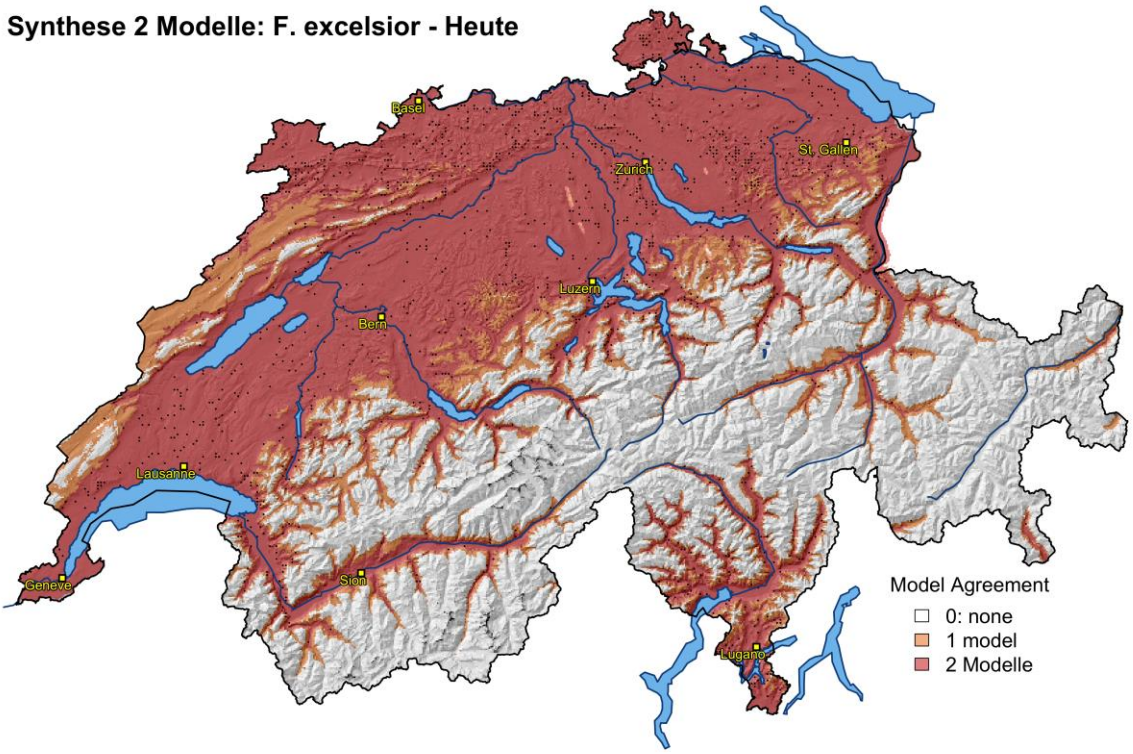

Abb. 49: Synthese von PorTree^{+} und Abenis. Modellierte Habitateignung der Esche, heute. Legende: 2 = Esche kommt in beiden Modellen vor, 1 = Esche kommt nur in einem Modell vor, 0 = Esche kommt in keinem Modell vor.

Die Modellierung von ForClim ist realitätsnah, ausser im Wallis wird die fundamentale Nische der Esche unterschätzt (evtl. zu strikte Trockengrenze) und in den Nordalpen steigt sie etwas zu hoch hinauf (Abb. 50). Die Esche kommt bis ca. 1100 m ü. M. vor, auf Kalk kann sie auch höher noch vorkommen.

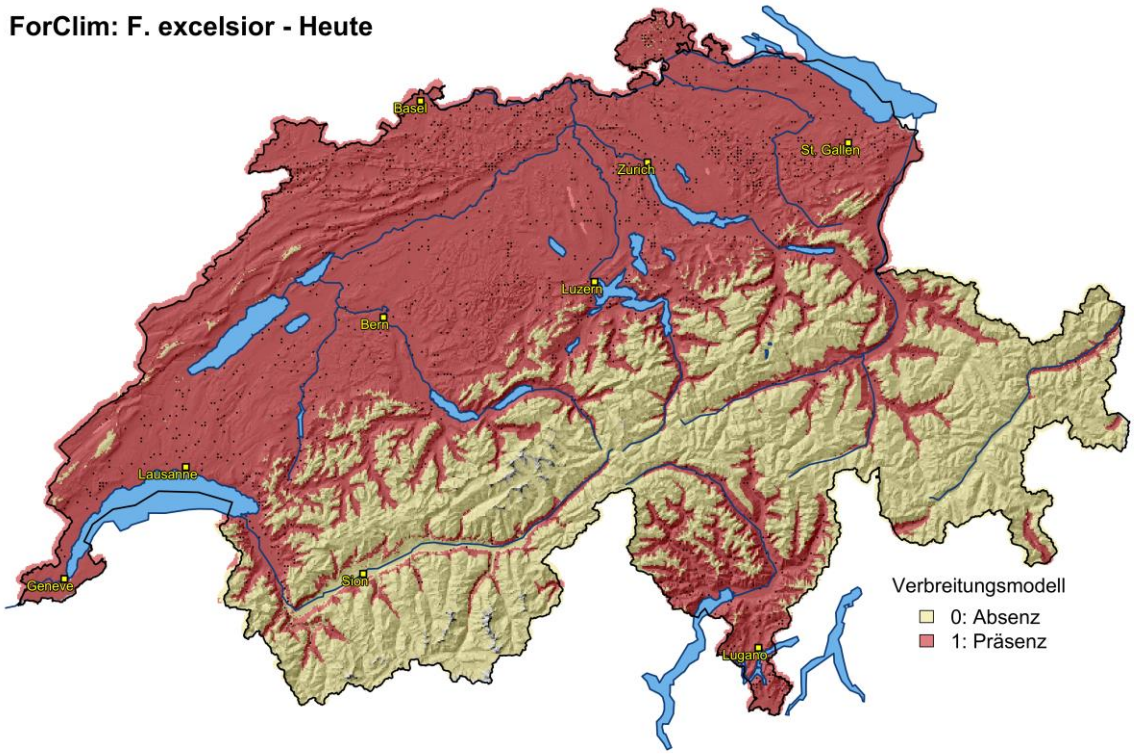

Abb. 50: Modellierte fundamentale Nische der Esche, heute (gemäss ForClim).

Modellierung des Eschenareals mit der Klimazukunft RegCM3 (Periode 2070-2099)

Die Habitateignung der Esche breitet sich überall in höhere Lagen und weiter in die Täler aus (Abb. 51; in Realität aber aufgrund der Eschenwelke nicht sehr realistisch).

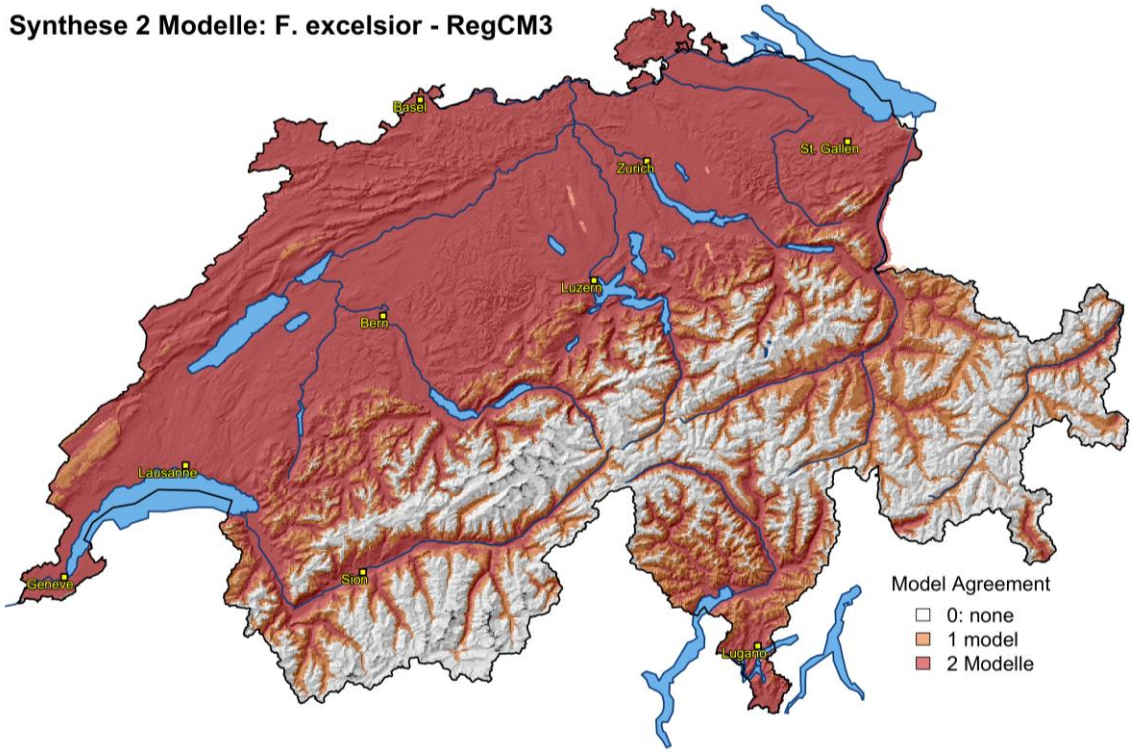

Abb. 51: Synthese von PorTree⁺ und Abenis. Modellierte Habitateignung der Esche, Klimazukunft RegCM3 für die Periode 2070 - 2099. Legende: 2 = Esche kommt in beiden Modellen vor, 1 = Esche kommt nur in einem Modell vor, 0 = Esche kommt in keinem Modell vor.

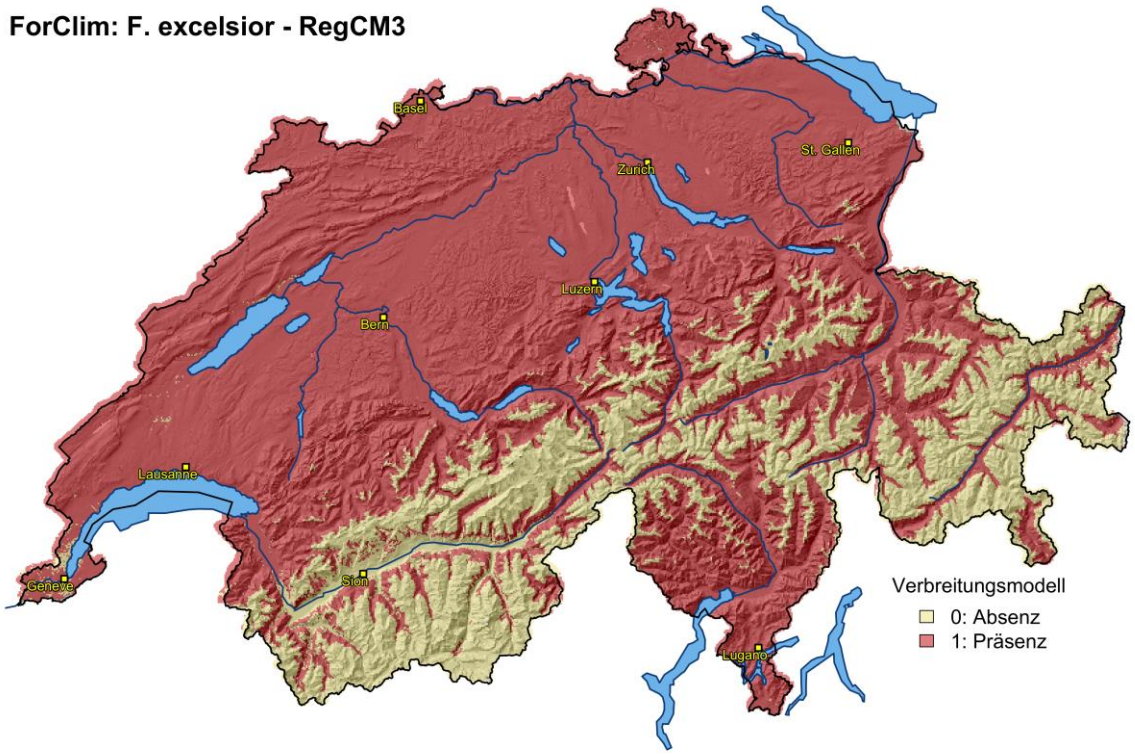

Abb. 52: Modellierte fundamentale Nische der Esche gemäss ForClim, mit der Klimazukunft RegCM3 für für die Periode 2070-2099.

Modellierung des Eschenareals mit der Klimazukunft CLM (Periode 2070-2099)

Während sich die Habitateignung der Esche bei Abenis noch stärker ausbreitet und in den Talböden bestehen bleibt, verändert sich die Modellierung von PorTree^{+} nur wenig gegenüber dem RegCM3-Modell – einzig dass die Esche in den Talböden im Oberwallis und im Churer Rheintal neu keine Habitateignung mehr aufweist (Abb. 53).

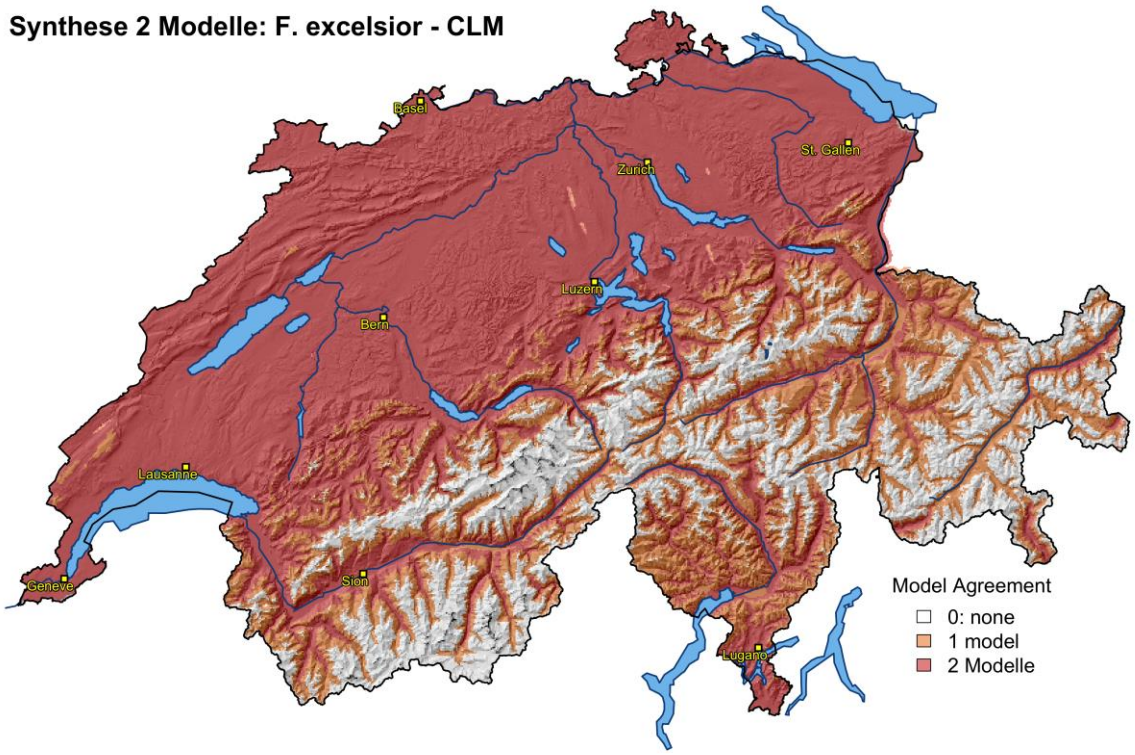

Abb. 53: Synthese von PorTree⁺ und Abenis. Modellierte Habitateignung der Esche, Klimazukunft CLM für die Periode 2070 - 2099. Legende: 2 = Esche kommt in beiden Modellen vor, 1 = Esche kommt nur in einem Modell vor, 0 = Esche kommt in keinem Modell vor.

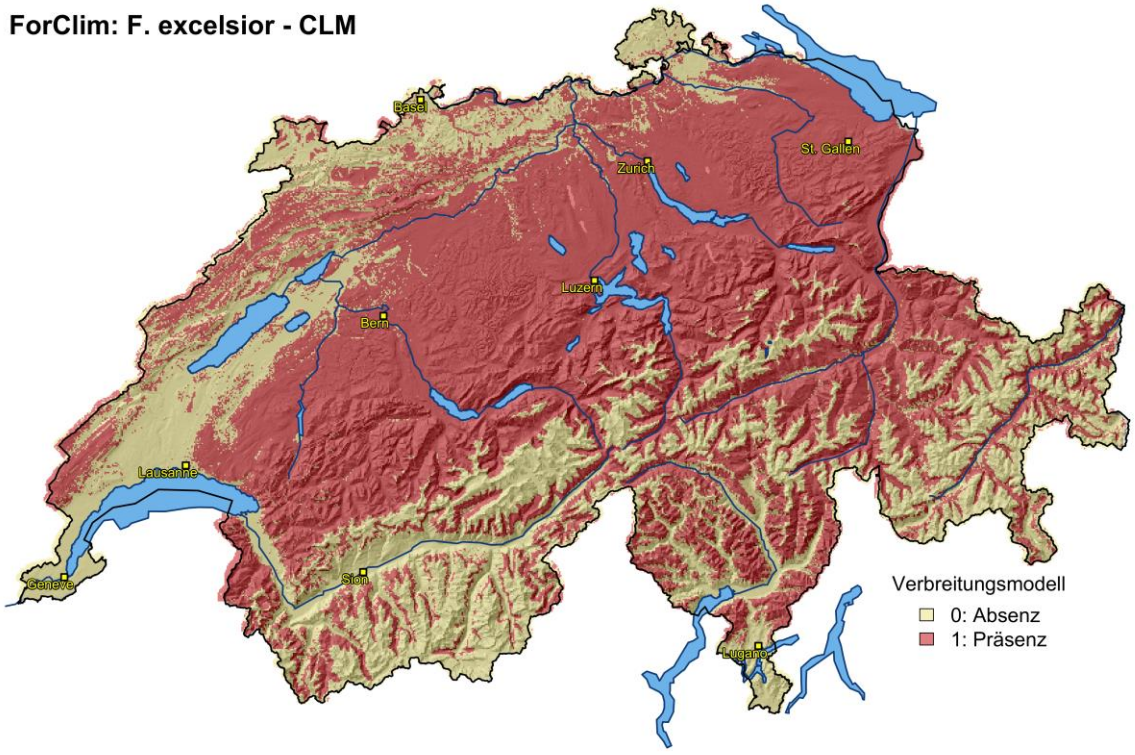

Abb. 54: Modellierte fundamentale Nische der Esche gemäss ForClim, mit der Klimazukunft CLM für die Periode 2070-2099.

Modellvergleich PorTree+ und Abenis bei der Esche: heute und bei den Klimazukünften RegCM3 und CLM (Periode 2070-2099)

In Tab. 10 werden die grössten Unterschiede der Modellierungen erläutert.

Tab. 10: Vergleich von Modellierungen von PorTree+ und Abenis mit LFI-Daten und Lokalkenntnissen.

	Wie stark ist die Esche im Vergleich zum heutigen Eschenvorkommen (LFI-Flächen [LFI] und Lokalkenntnissen [LK]) in den verschiedenen Modellierungen vertreten?		Wie stark weicht die Modellierung für die Periode 2070-2099 von Abenis (MAB) von der Modellierung von PorTree+ (MPT) ab?	
Gebiet	**PorTree+ (MPT)**	**Abenis (MAB)**	**RegCM3**	**CLM**
Mittelland	Gute Übereinstimmung, auch mit LFI.		identisch	identisch
Jura	Bei MAB steigt Esche höher hinauf als bei MPT.		Bei MPT dringt Esche weniger weit in höhere Lagen vor.	Fast identische Verbreitung.
Nördliche Randalpen	MPT geringfügig kleinflächiger als MAB und LFI.		Ähnliche Verbreitung.	Bei MAB dringt Esche weiter in höhere Lagen vor.
Wallis	MPT kleinflächiger als MAB und LFI-Verbreitung. LK: Esche dringt weniger weit in inneralpine Täler vor als der Bergahorn, da die Esche frostempfindlicher ist.		Bei MAB viel grossflächiger.	Bei MAB dringt Esche weiter in höhere Lagen vor.
Uri			Bei MAB dringt Esche weiter in Täler und höhere Lagen vor.	Bei MAB dringt Esche weiter in Täler und höhere Lagen vor.
Nordbünden	Zu geringe Fläche modelliert.	Gute Übereinstimmung mit LFI.	Bei MAB viel grossflächiger.	Bei MAB dringt Esche weiter in Täler und höhere Lagen vor.
Engadin	i.O.	Zu starke Modellierung im Unterengadin.	Bei MAB viel grossflächiger.	Bei MAB viel grossflächiger.
Tessin, Misox	Sehr ähnliche Modellierung, gute Übereinstimmung mit LFI.		Bei MAB viel grossflächiger.	Bei MAB dringt Esche weiter in höhere Lagen vor.

3.10 Winterlinde (Tilia cordata)

Wichtig: Die Unterscheidung von Winterlinde und Sommerlinde im Feld (z.B. bei LFI-Aufnahmen) ist schwierig und kann zu Fehlern bei MPT führen.

Modellierung des Winterlindenareals heute

Die Modellierung von PorTree⁺ geht weniger weit in die Höhe als jene von Abenis (Abb. 55; wobei die Winterlinde bei der Modellierung bei PorTree⁺ nur als Baum berücksichtigt wurde, nicht als Strauchform). Nach SEBA 2001 liegt der Schwerpunkt bei 500 - 600 m ü. M., sie steige weniger hoch als die Sommerlinde, im Jura bis 1100 m ü. M., in den Zentralalpen bis 1500 m ü. M. Ansonsten stimmen die beiden Modelle sehr gut überein und bilden die Realität gut ab. Die lindenreichen Föhntäler sind bei beiden Modellen gut abgebildet. Auch die frostertragende Winterlinde steigt in den Inneralpen aus. Hier ist wohl ihre zu geringe Trockenheitstoleranzentscheidend. Die Winterlinde ist wohl trockenheitstoleranter als die Buche, aber doch nicht so wie die Eichen und in höheren Lagen auch die Waldföhre. Nach Köcher et al. 2009 ist die Winterlinde weniger robust gegen Trockenheit als Esche, aber resistenter als der Bergahorn. Zudem scheint die Winterlinde bei mässig lufttrockenen Gebieten gegenüber der Buche im Vorteil zu sein, v.a. wenn die Hänge nicht zu strahlungsreich sind (Zwischenalpen). Dort wo allerdings sehr strahlungsreiche Hänge und geringe Luftfeuchtigkeit zusammenkommen, steigt sie ebenfalls aus. Nach LFI kann die Winterlinde nur auf trockenen bis frischen Schutt- und Schotterböden vorherrschen, da hier die Buche wegen mangelnder Feinerde und sommerlicher Austrocknung ausfällt.

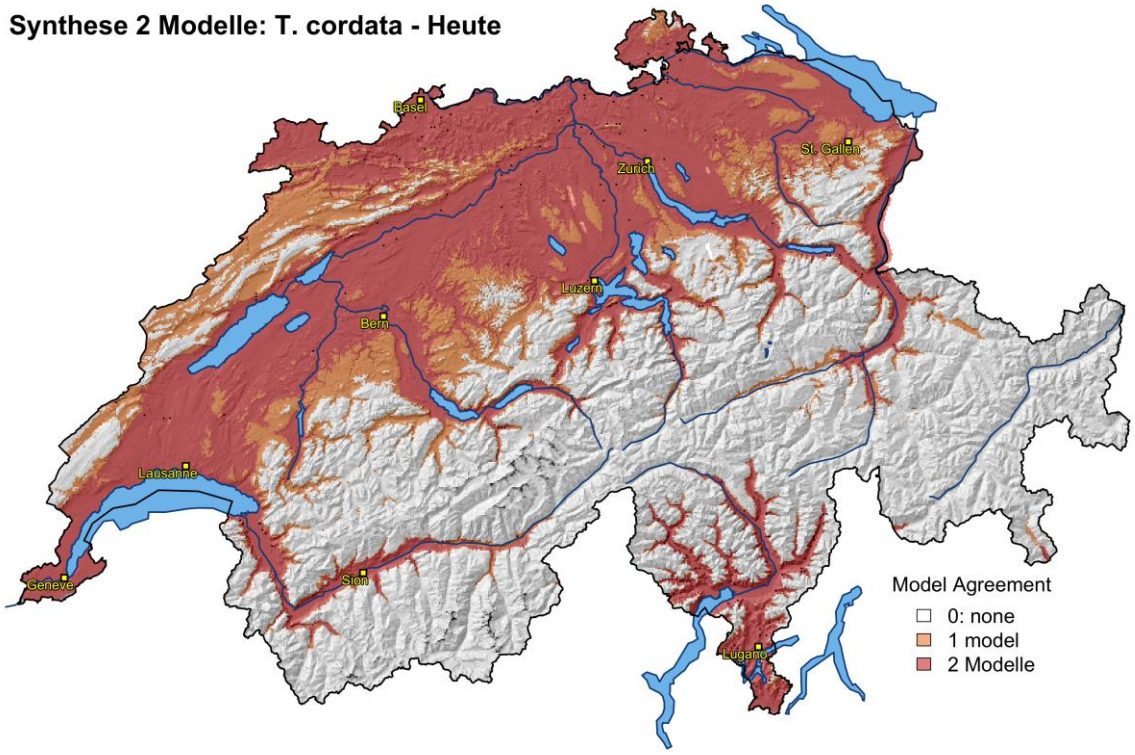

Abb. 55: Synthese von PorTree⁺ und Abenis. Modellierte Habitateignung der Winterlinde, heute. Legende: 2 = Winterlinde kommt in beiden Modellen vor, 1 = Winterlinde kommt nur in einem Modell vor, 0 = Winterlinde kommt in keinem Modell vor.

Die Modellierung der heutigen fundamentalen Nische gemäss ForClim ist realitätsnah (Abb. 56).

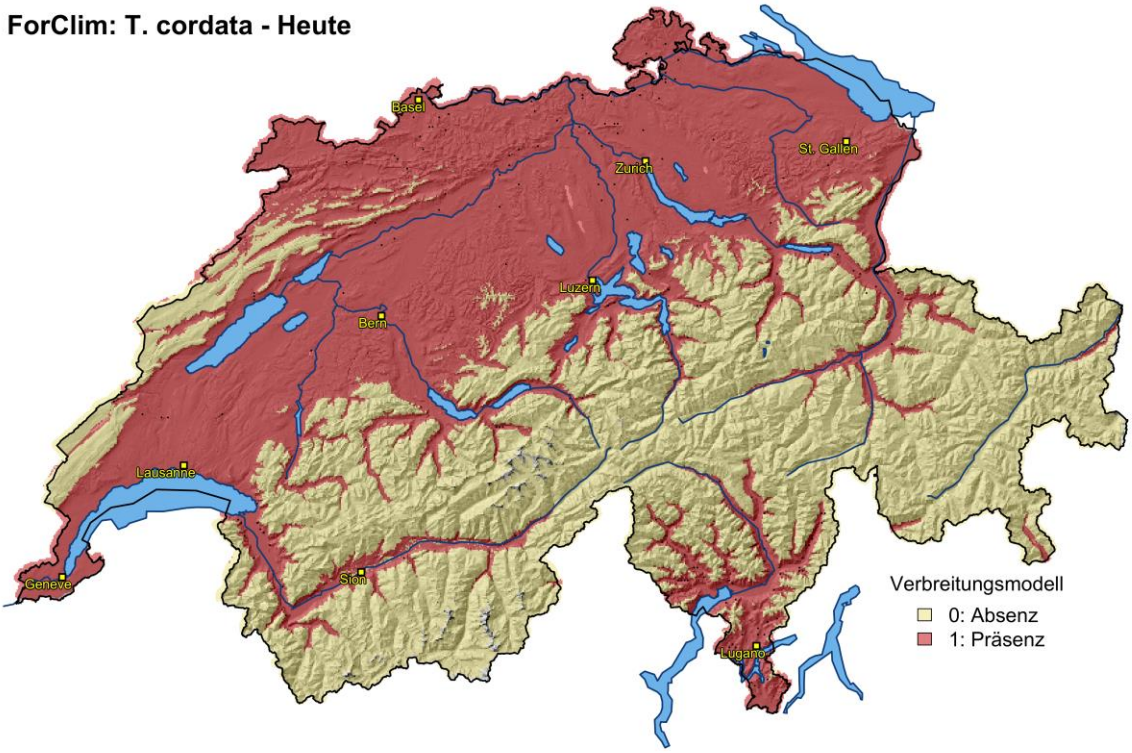

Abb. 56: Modellierte fundamentale Nische der Winterlinde, heute (gemäss ForClim).

Modellierung des Winterlindenareals mit der Klimazukunft RegCM3 (Periode 2070-2099)

Die Winterlinde kann sich in allen Gebieten halten und breitet sich im Jura, in den nördlichen Randalpen, den Zentralalpen und im Tessin in höhere Gebiete und weiter in die Täler hinein aus (Abb. 57).

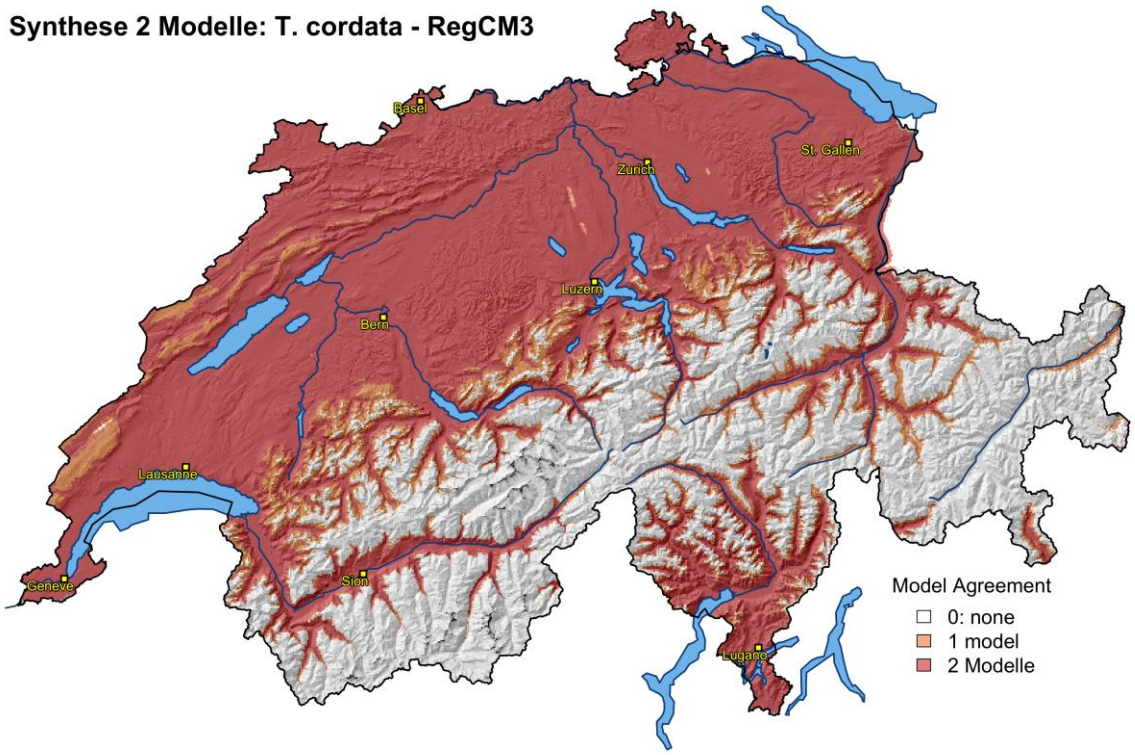

Abb. 57: Synthese von PorTree⁺ und Abenis. Modellierte Habitateignung der Winterlinde, Klimazukunft RegCM3 für die Periode 2070 - 2099. Legende: 2 = Winterlinde kommt in beiden Modellen vor, 1 = Winterlinde kommt nur in einem Modell vor, 0 = Winterlinde kommt in keinem Modell vor.

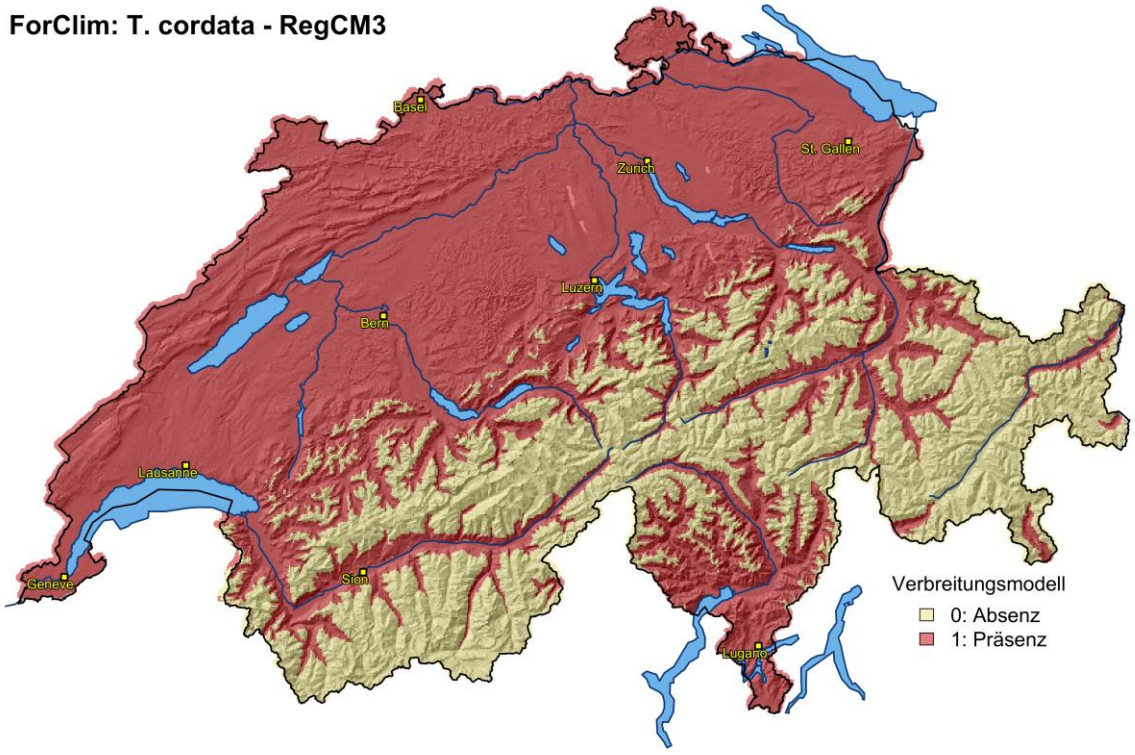

Abb. 58: Modellierte fundamentale Nische der Winterlinde gemäss ForClim, mit der Klimazukunft RegCM3 für für die Periode 2070-2099.

Modellierung des Winterlindenareals mit der Klimazukunft CLM (Periode 2070-2099)

Auch hier kann sich die Winterlinde in allen Gebieten halten und breitet sich im Jura, in den nördlichen Randalpen, den Zentralalpen und im Tessin in höhere Gebiete und weiter in die Täler hinein aus (Abb. 59).

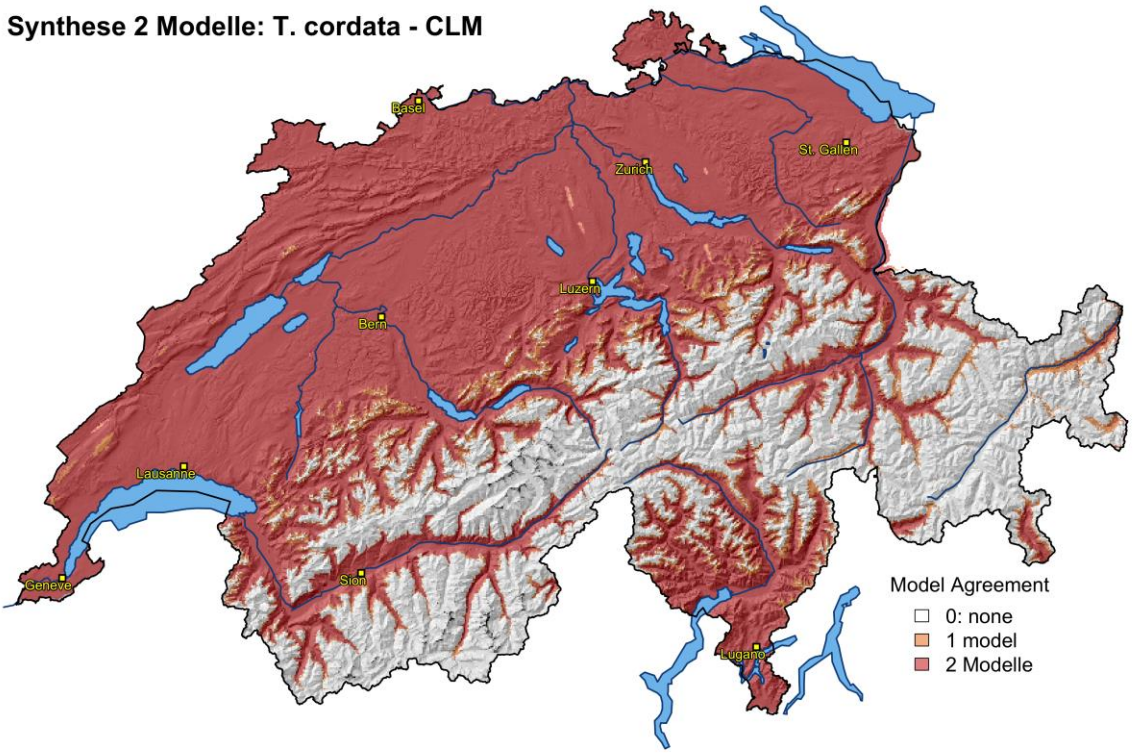

Abb. 59: Synthese von PorTree⁺ und Abenis. Modellierte Habitateignung der Winterlinde, Klimazukunft CLM für die Periode 2070 - 2099. Legende: 2 = Winterlinde kommt in beiden Modellen vor, 1 = Winterlinde kommt nur in einem Modell vor, 0 = Winterlinde kommt in keinem Modell vor.

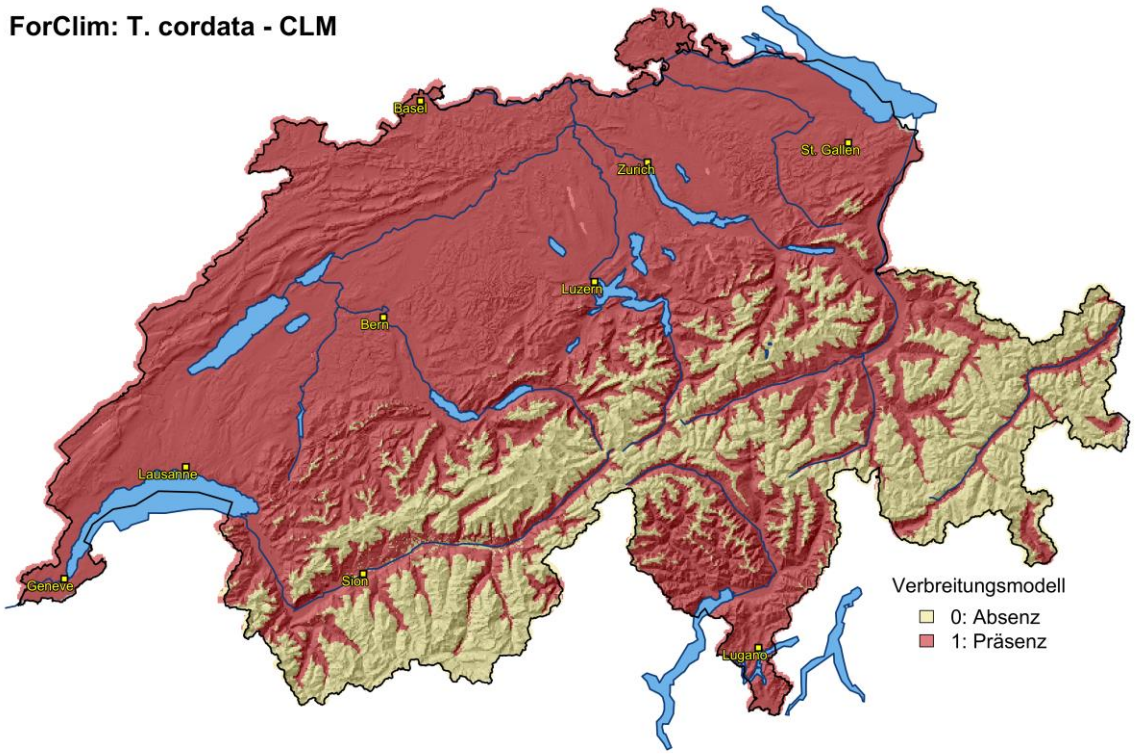

Abb. 60: Modellierte fundamentale Nische der Winterlinde gemäss ForClim, mit der Klimazukunft CLM für die Periode 2070-2099.

Modellvergleich PorTree⁺ und Abenis bei der Winterlinde: heute und bei den Klimazukünften RegCM3 und CLM (Periode 2070-2099)

In Tab. 11 werden die grössten Unterschiede der Modellierungen erläutert.

Tab. 11: Vergleich von Modellierungen von PorTree⁺ und Abenis mit LFI-Daten und Lokalkenntnissen.

	Wie stark ist die Winterlinde im Vergleich zum heutigen Winterlindenvorkommen (LFI-Flächen [LFI] und Lokalkenntnissen [LK]) in den verschiedenen Modellierungen vertreten?		**Wie stark weicht die Modellierung für die Periode 2070-2099 von Abenis (MAB) von der Modellierung von PorTree⁺ (MPT) ab?**	
Gebiet	**PorTree⁺ (MPT)**	**Abenis (MAB)**	**RegCM3**	**CLM**
allgemein	MPT geht auf der Alpennordseite weniger weit in die Höhe als MAB. Ansonsten sehr gute Übereinstimmung. Die lindenreichen Föhntäler sind bei beiden Modellen gut abgebildet. LFI: Die Winterlinde gedeiht vor allem an (Steil-) Hängen der collinen und submontanen Stufe; ein Viertel besiedelt die untere Montanstufe.		MAB erstreckt sich überall leicht höher hinauf als MPT, ansonsten sehr gute Übereinstimmung.	Sehr ähnliche Modellierungen.
Tessin	Sehr ähnliche Modellierungen.		Sehr ähnliche Modellierungen.	Sehr ähnliche Modellierungen.
Wallis	Sehr ähnliche Modellierungen.		Sehr ähnliche Modellierungen.	Sehr ähnliche Modellierungen.
Graubünden	MPT geht leicht weniger weit in die Täler hinein als MAB.		MAB grossflächiger.	Fast identisch, bei MAB auch bei Davos, im Rheinwald und auf der Lenzerheide neu vorkommend.
Mittelland	Bei MPT beschränkt sich die Winterlinde		Sehr ähnliche Mo-	Sehr ähnliche Model-

Gebiet	Wie stark ist die Winterlinde im Vergleich zum heutigen Winterlindenvorkommen (LFI-Flächen [LFI] und Lokalkenntnissen [LK]) in den verschiedenen Modellierungen vertreten?		Wie stark weicht die Modellierung für die Periode 2070-2099 von Abenis (MAB) von der Modellierung von PorTree⁺ (MPT) ab?	
	PorTree⁺ (MPT)	Abenis (MAB)	RegCM3	CLM
	auf die tiefsten Lagen im Gegensatz zu MAB, grossflächigere Verbreitung.		dellierungen.	lierungen.
Engadin, Münstertal (GR)	Fehlend, i.O.	Fehlend, i.O.	Bei MAB neu Winterlinden vorhanden, bei MPT nicht.	Bei MAB grossflächiger modelliert als bei MPT.
Nordalpen	Gute Modellierung, bei beiden werden dies lindenreichen Föhntäler gut wiedergegeben.		Bei MAB leicht grossflächiger modelliert.	MAB erstreckt sich leicht höher hinauf als MPT.

3.11 Sommerlinde (Tilia platyphyllos)

Modellierung des Sommerlindenareals heute

Abenis weist ein grösseres Areal auf als PorTree⁺ (Abb. 61). Abenis modelliert vor allem auf der Alpennordseite mehr Flächen, Portree⁺ im Tessin und im Wallis in der Ausdehnung in der Höhe (nach LFI liegt die Hauptverbreitung unterhalb 1100 m ü. M., sie steigt in den Alpen generell höher als die Winterlinde). Nach LFI bevorzugt die Sommerlinde sommerwarme colline und submontane Laubmischwälder. Sie benötigt eine höhere Luftfeuchtigkeit als die Winterlinde.

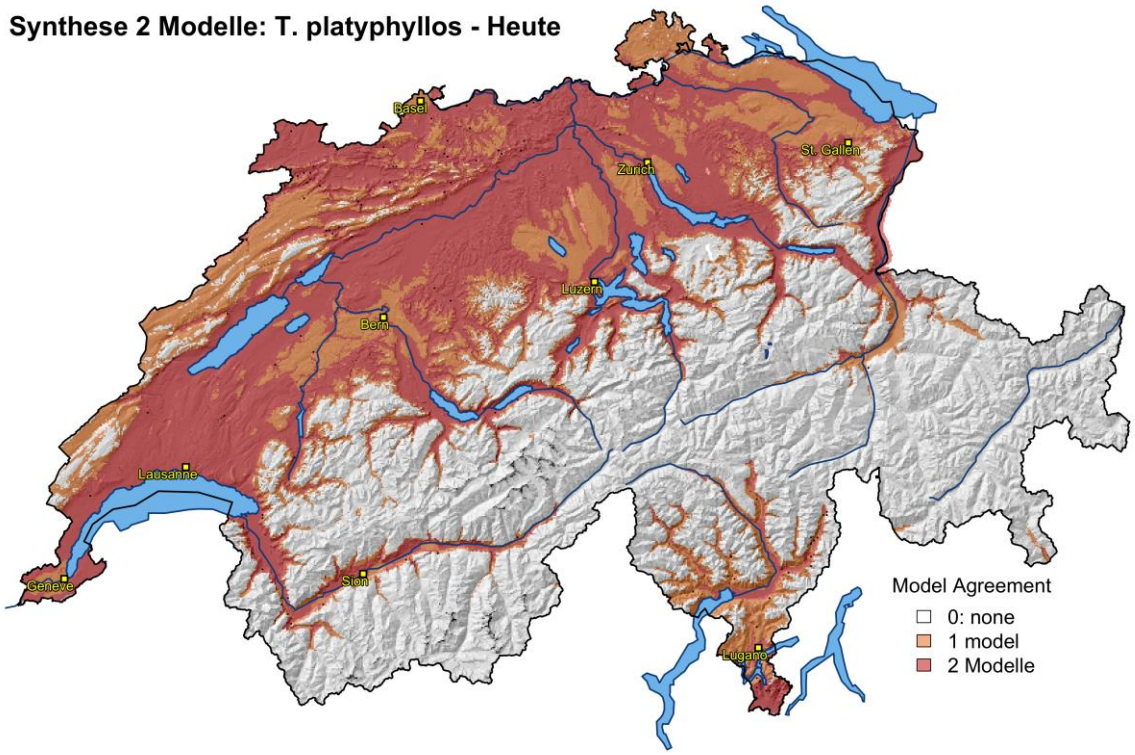

Abb. 61: Synthese von PorTree⁺ und Abenis. Modellierte Habitateignung der Sommerlinde, heute. Legende: 2 = Sommerlinde kommt in beiden Modellen vor, 1 = Sommerlinde kommt nur in einem Modell vor, 0 = Sommerlinde kommt in keinem Modell vor.

Die Modellierung von ForClim ist plausibel (Abb. 62), einzig in den Vispertälern wird die fundamentale Nische unterschätzt. Die Sommerlinde ist relativ trockenresistent auf kalkhaltigem Grund und wird leicht unterschätzt in der Trockenheitstoleranz. ForClim berücksichtigt auch strauchförmige Sommerlinden in hohen Lagen. Auf Granit / Gneiss wird die Sommerlinde von ForClim überschätzt.

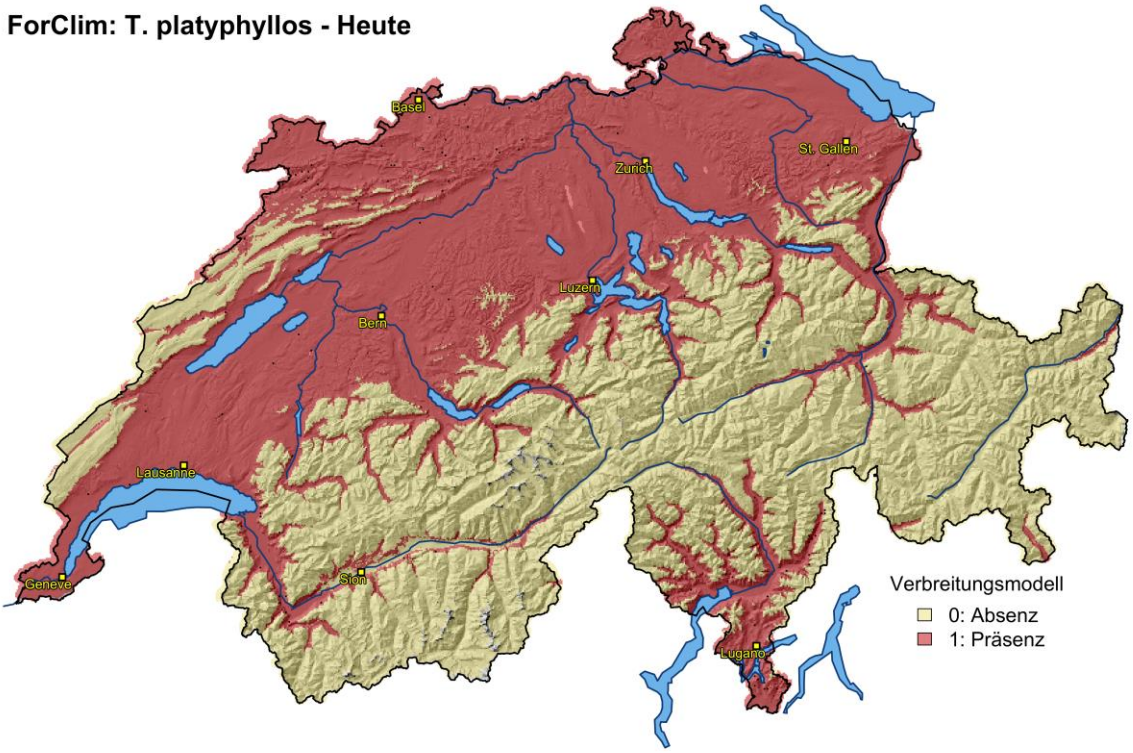

Abb. 62: Modellierte fundamentale Nische der Sommerlinde, heute (gemäss ForClim).

Modellierung des Sommerlindenareals mit der Klimazukunft RegCM3 (Periode 2070-2099)

Die Sommerlinde breitet sich aus und steigt in keinem Gebiet aus (Abb. 63). Grössere Unsicherheiten bestehen im Tessin, im Wallis und Graubünden und in der Höhenausdehnung.

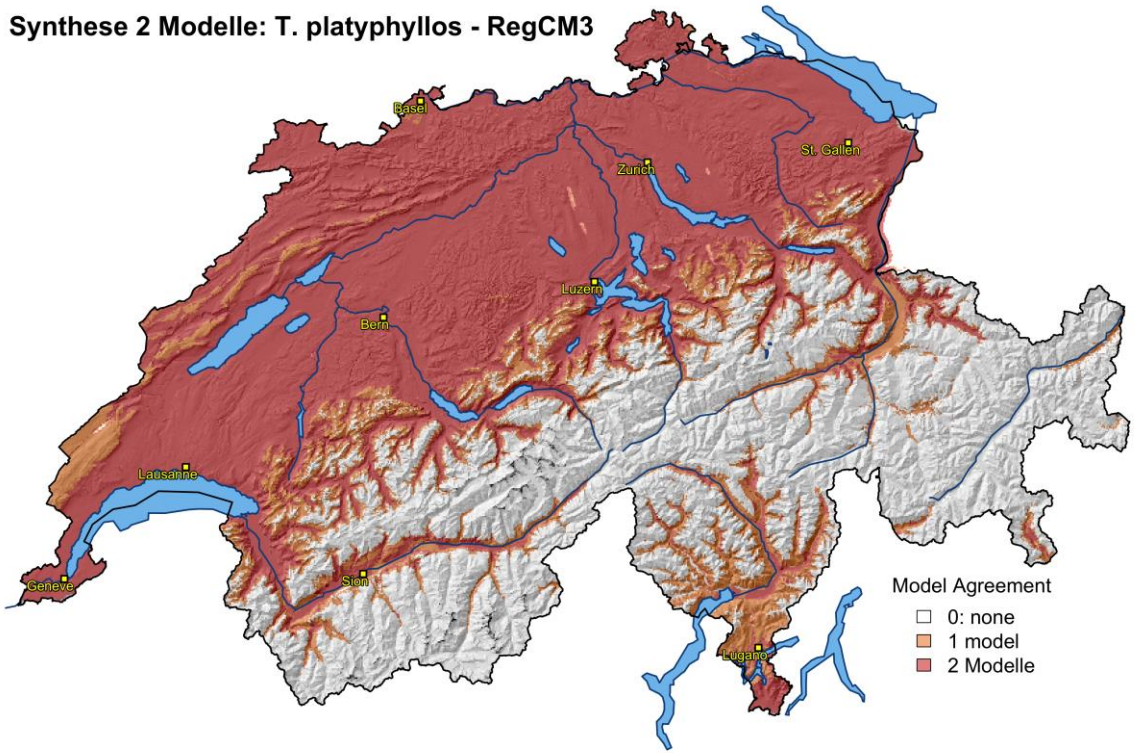

Abb. 63: Synthese von PorTree⁺ und Abenis. Modellierte Habitateignung der Sommerlinde, Klimazukunft RegCM3 für die Periode 2070 - 2099. Legende: 2 = Sommerlinde kommt in beiden Modellen vor, 1 = Sommerlinde kommt nur in einem Modell vor, 0 = Sommerlinde kommt in keinem Modell vor.

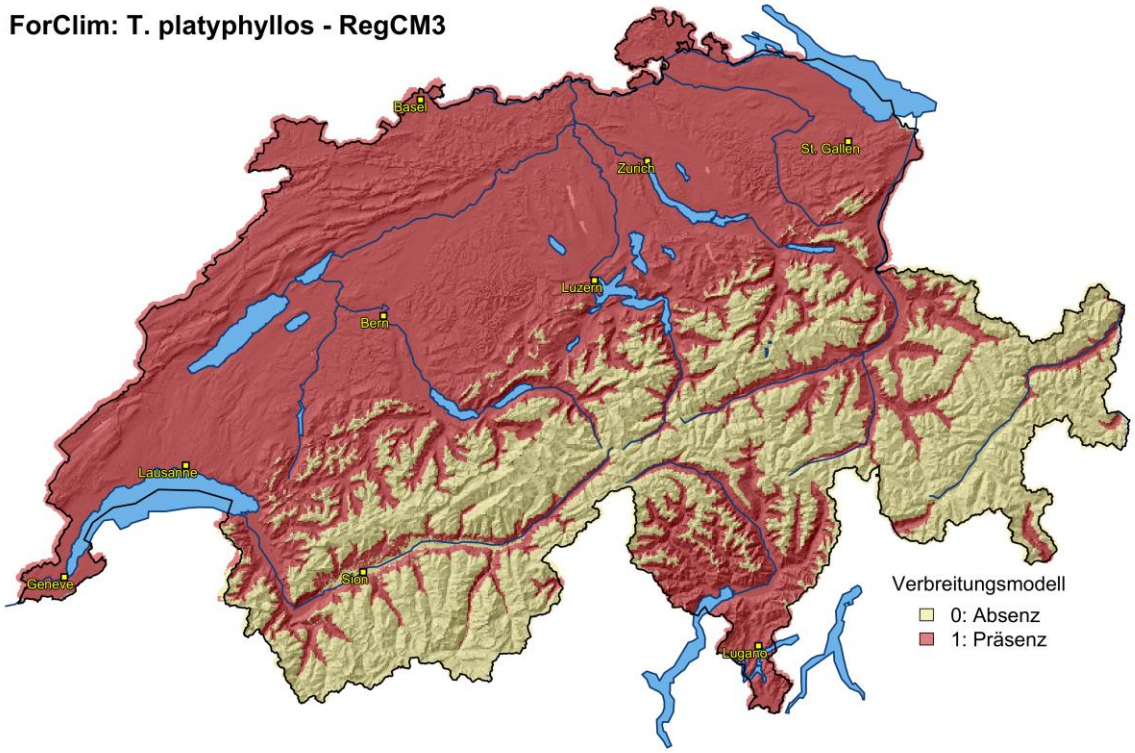

Abb. 64: Modellierte fundamentale Nische der Sommerlinde gemäss ForClim, mit der Klimazukunft RegCM3 für für die Periode 2070-2099.

Modellierung des Sommerlindenareals mit der Klimazukunft CLM (Periode 2070-2099)

Auch hier breitet sich die Sommerlinde aus und steigt in keinem Gebiet aus (Abb. 65). Grössere Unsicherheiten bestehen im Tessin (bei MPT konnte der Einfluss der Geologie zu wenig berücksichtigt werden), im Wallis und Graubünden und in der Höhenausdehnung.

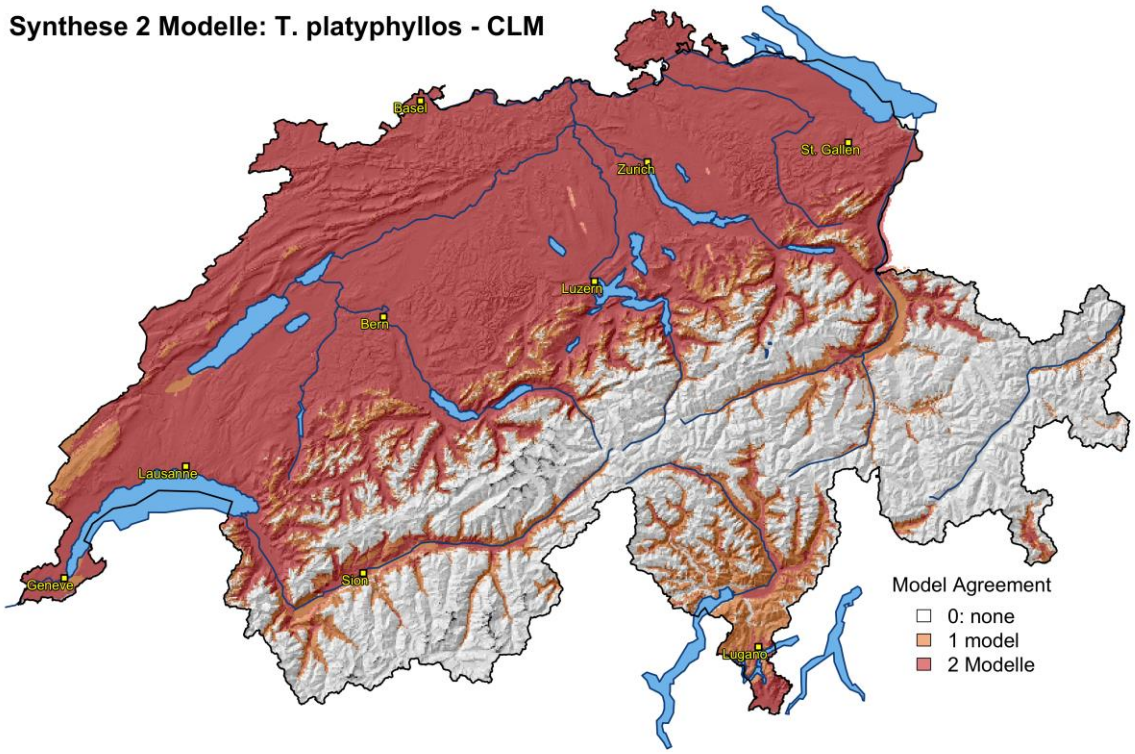

Abb. 65: Synthese von PorTree⁺ und Abenis. Modellierte Habitateignung der Sommerlinde, Klimazukunft CLM für die Periode 2070 - 2099. Legende: 2 = Sommerlinde kommt in beiden Modellen vor, 1 = Sommerlinde kommt nur in einem Modell vor, 0 = Sommerlinde kommt in keinem Modell vor.

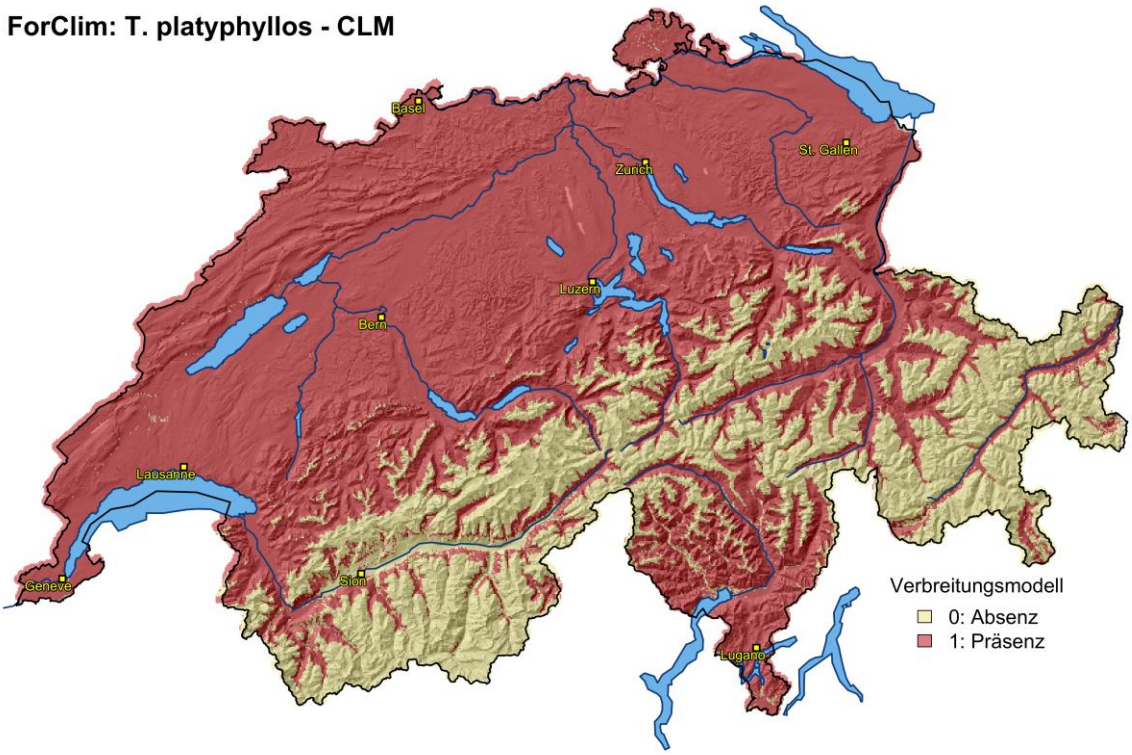

Abb. 66: Modellierte fundamentale Nische der Sommerlinde gemäss ForClim, mit der Klimazukunft CLM für die Periode 2070-2099.

Modellvergleich PorTree⁺ und Abenis bei der Sommerlinde: heute und bei den Klimazukünften RegCM3 und CLM (Periode 2070-2099)

In Tab. 12 werden die grössten Unterschiede der Modellierungen erläutert.

Tab. 12: Vergleich von Modellierungen von PorTree⁺ und Abenis mit LFI-Daten und Lokalkenntnissen.

	Wie stark ist die Sommerlinde im Vergleich zum heutigen Sommerlindenvorkommen (LFI-Flächen [LFI] und Lokalkenntnissen [LK]) in den verschiedenen Modellierungen vertreten?		**Wie stark weicht die Modellierung für die Periode 2070-2099 von Abenis (MAB) von der Modellierung von PorTree⁺ (MPT) ab?**	
Gebiet	**PorTree⁺ (MPT)**	**Abenis (MAB)**	**RegCM3**	**CLM**
allgemein	Mehr in wärmeren Lagen – fast keine LFI-Punkte, schwierig zu modellieren.	MAB realistischer wegen Einbezug von Einfluss von Gneis und Granit.	Bei MAB in Jura und Nordbünden stärker, bei MPT im TI, VS, Vorderrheintal und Engadin stärker.	
Nördliche Randalpen	MPT geht weniger weit in Täler hinein als im Süden.	i.O.	Bei beiden Modellen Ausbreitung, MAB steigt höher hinauf als MPT.	
Mittelland / Jura	Nach LFI grossflächigeres Vorkommen als bei MPT. LFI: Vorwiegend im Jura und im Chablais vorkommend, im Jura ist sie häufiger, als die Winterlinde; an den übrigen Standorten der Schweiz dominiert	i.O.	MAB steigt höher hinauf als MPT.	

Gebiet	Wie stark ist die Sommerlinde im Vergleich zum heutigen Sommerlindenvorkommen (LFI-Flächen [LFI] und Lokalkenntnissen [LK]) in den verschiedenen Modellierungen vertreten?		Wie stark weicht die Modellierung für die Periode 2070-2099 von Abenis (MAB) von der Modellierung von PorTree^{+} (MPT) ab?	
	PorTree^{+} (MPT)	Abenis (MAB)	RegCM3	CLM
	die Winterlinde.			
Tessin, Bergell	MPT geht mehr in Täler im Süden. LK: im Süden sollte die Sommerlinde auf Granit nicht und nur vereinzelt auf Gneis vorkommen. Ansonsten vorkommend in luftfeuchteren Lagen.	i.O.	MPT weiterverbreitet als MAB (da Granit und Gneis nicht berücksichtigt) und weiter in Täler und höher hinauf.	
Wallis	MPT leicht grossflächiger als MAB, Modellierung i.O. LK: Im Wallis an Schattenhängen und in Schluchten bis ca. 1200 m ü. M. vorkommend.	i.O.	MPT weiterverbreitet als MAB (da Granit und Gneis nicht berücksichtigt) und weiter in Täler und höher hinauf.	
Nordbünden	Zu kleinflächig modelliert.	LK: Im Churer- und Vorderrheintal und im Domleschg ziemlich verbreitet. MAB zu kleinflächig.	Bei MPT geringere Habitateignung als bei MAB.	
Engadin	Kein modelliertes Vorkommen. LK: Im Unterengadin gibt es Lindenbestände; es ist jedoch nicht sicher ob Tilia cordata oder Tilia platyphyllos. Nach Braun-Blanquet 1932 sehr selten vorkommend.	Kein modelliertes Vorkommen.	Bei MAB im Engadin leichtes Vorkommen.	

4 Resultate: Weitere Potenzialkarten nach ForClim und Habitateignungskarten nach PorTree oder PorTree^{+}

Die folgenden Abbildungen zeigen die fundamentale Nische von ForClim und falls vorhanden, die Arealverbreitungsmodelle von PorTree oder PorTree^{+}. Abenis hat diese Baumarten nicht modelliert. Folgende Karten sind vorhanden:

Tab. 13: Vorhandenes Kartenmaterial pro Baumart der Modellierungen ForClim, PorTree und PorTree^{+}.

Baumart	ForClim	PorTree	PorTree^{+}
Waldföhre	x		x
Bergulme	x	x	
Spitzahorn	x		
Grünerle	x		
Hängebirke		x	
Hagebuche	x	x	
Edelkastanie	x	x	
Arve	x	x	
Flaumeiche		x	

Bei ForClim sind im Anhang 3 die einzelnen Karten mit den Parameterwerten Jahresgradsumme (uDD), Trockenstress-Index (uDr) und Wintertemperaturlimite (uWiT) vorhanden. Bei PorTree sind Karten, welche mit einem A1B Ensembles gerechnet wurden für die Periode 2051-2080 vorhanden (Details dazu siehe http://www.wsl.ch/lud/portree/report.ehtml).
Nachfolgend werden nur die heutigen fundamentalen Nischen (ForClim) und die aktuellen Habitateignungskarten (PorTree, PorTree^{+}) auf deren Plausibilität hin angeschaut, die zukünftigen Modellierungen werden nur abgebildet aber nicht interpretiert.

4.1 Waldföhre (Pinus sylvestris)

Angaben zur aktuellen Verbreitung der Baumart

Im Engadin kommt die Waldföhre in der hochmontanen Stufe vor, in den Bündner Südtälern bis 2000 m ü. M. In der Südschweiz fehlt die Waldföhre als Bestand im Maggiatal und im westlichen Tessin, eventuell wegen zu hohen Schneemengen und auch wegen der Konkurrenz von Traubeneichen. Ökologisches Wachstum sollte eigentlich kein Problem darstellen – das Potential wäre vorhanden, aber wahrscheinlich verdrängen die konkurrenzstärkeren Eichen und in höheren Lagen die Lärchen die Waldföhre. Im Wallis kommt die Waldföhre bis Täsch vor. Bei Oberwald wird die Waldföhre besonders auf tiefgründigen Böden von der Fichte und der Lärche verdrängt. Nach Etzold et al. (2016) war die Waldföhre durch menschlichen Einfluss über ihre ökologische Nische hinaus verbreitet und wird nun zunehmend zurückgedrängt.

Modellierung des Waldföhrenareals heute

In ForClim wird die fundamentale Nische der Waldföhre in den Nordalpen höher (ca. 300 Höhenmeter) modelliert als die aktuelle Verbreitung (Abb. 67; methodenbedingte Abweichungen). Die fundamentale Nische geht auch im Oberengadin, im Puschlav und im Prättigau über die realisierte Nische hinaus. Inneralpin weist die Modellierung eine bessere Übereinstimmung auf. Im Wallis ist die Modellierung eher zu hoch vorkommend (bis 2000 m ü. M.); real sind bis mindestens 1800 m ü. M. Vorkommen von Waldföhre möglich. Hinter Kalpetran (VS) kommen real keine Waldföhren mehr vor. Im Jura ist die fundamentale Nische der Waldföhre sehr gross modelliert – real kommt die Waldföhre nur in tieferen Lagen vor aufgrund der Konkurrenz durch die Bergföhre (evtl. Potential aber noch vorhanden). Es entsteht der Eindruck, dass das Verbreitungsgebiet der Waldföhre auch jenes von der Bergföhre beinhaltet. Die fundamentale Nische der Waldföhre wird im Tessin in hohen Lagen überschätzt.

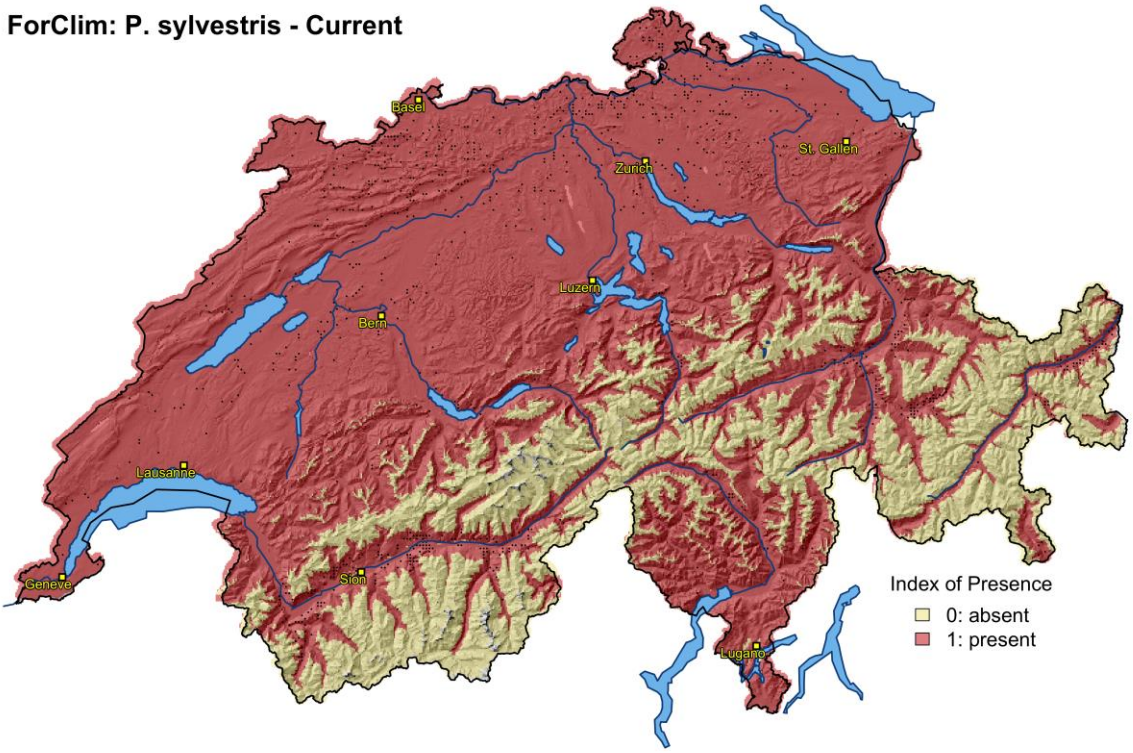

Abb. 67: Modellierte fundamentale Nische der Waldföhre, heute (gemäss ForClim).

Die Modellierung von PorTree+ weist im Kanton Uri, St. Gallen und Tessin zu wenig modellierte Flächen aus (Abb. 68). Insbesondere das Silikatgebiet (Granit- und Gneisgebiet) in Uri wird deutlich zu wenig modelliert, kommt doch die Waldföhre fast bis Göschenen vor, wobei eine Höhe von 1300 bis 1600 m ü. M. eine oberste Grenze darstellen, während weiter oben die aufrechte Bergföhre auftritt.
Ganz allgemein kann gesagt werden, dass heute die Waldföhre überall auftreten könnte, wenn sie nicht der Konkurrenz unterliegen würde, ausser den meisten subalpinen Lagen und den obersubalpinen Lagen.
Fraglich ist, ob das im Sommer erhöhte Bestandesinnenklima in Föhrenwäldern (erhöhtes Tagesmaxima um +5°C, von Arx et al. 2012) den Waldföhren nicht zusätzlich noch zu schaffen macht, v.a. der Verjüngung, und die Waldföhre als Mischbaumart in anderen Waldtypen (Laubwälder), bei welchen das Bestandesinnenklima im Sommer um bis zu 5,1°C abgeschwächt wird gegenüber dem Offenland, noch länger eine Chance haben würde. Auch die Luftfeuchtigkeit war bei den Laub- und Nadelwäldern bis zu 12,4 % höher als im Freiland, im Gegensatz zu den Föhrenwäldern, bei denen die Luftfeuchtigkeit bis zu 4,3 % tiefer lag.

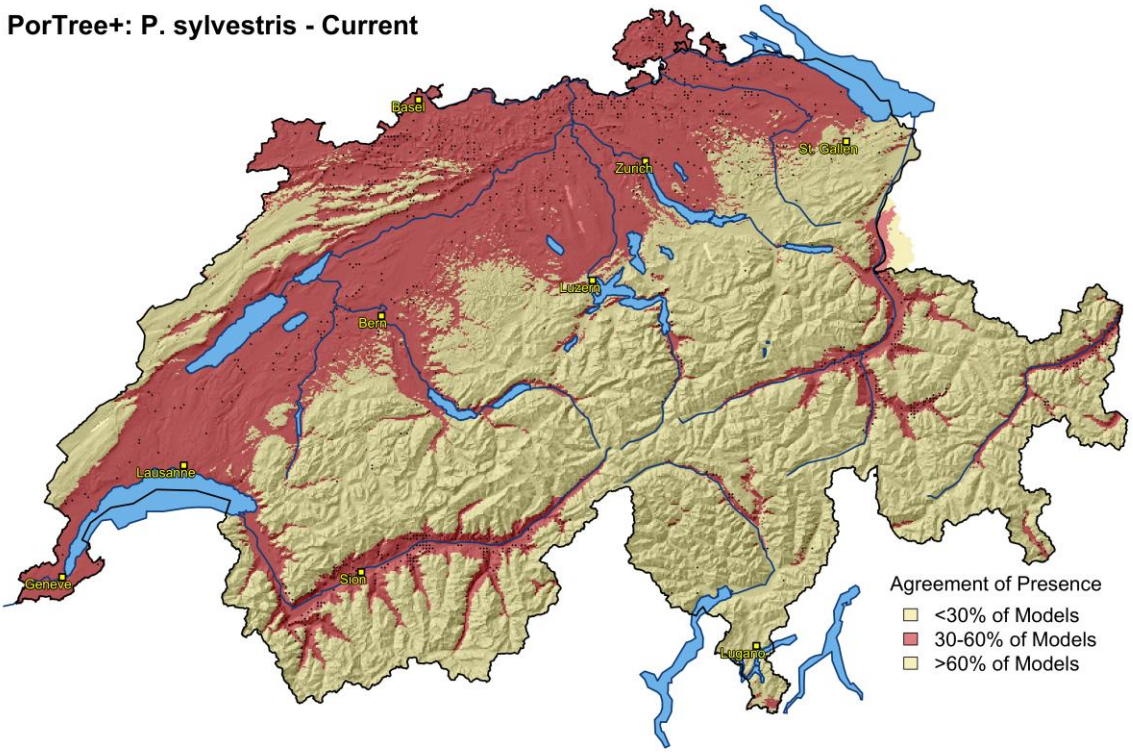

Abb. 68: Modellierte Habitateignung der Waldföhre, heute (gemäss PorTree+). Legende: > 60 % = wenn mindestens 60 % der Modell-/Resampling Karten die Art als «Vorkommen» klassieren, wird das Habitat als geeignet eingestuft.

Modellierung des Waldföhrenareals mit der Klimazukunft RegCM3 (Periode 2070-2099)

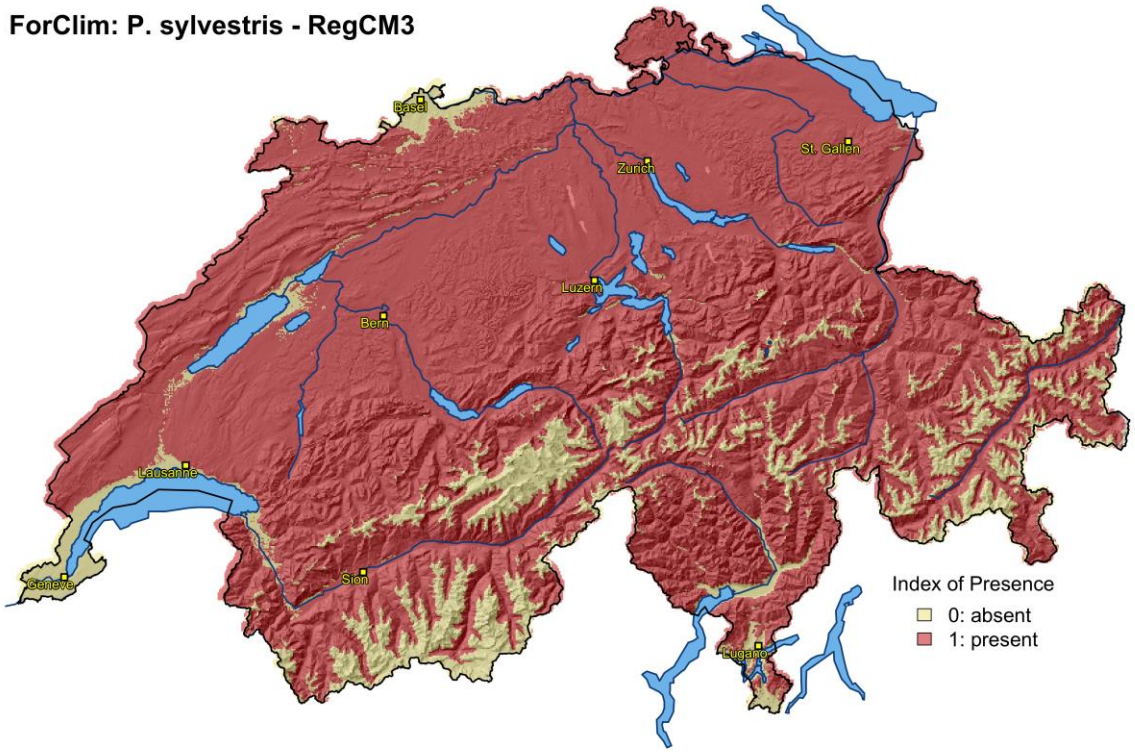

Abb. 69: Modellierte fundamentale Nische der Waldföhre gemäss ForClim, mit der Klimazukunft RegCM3 für für die Periode 2070-2099.

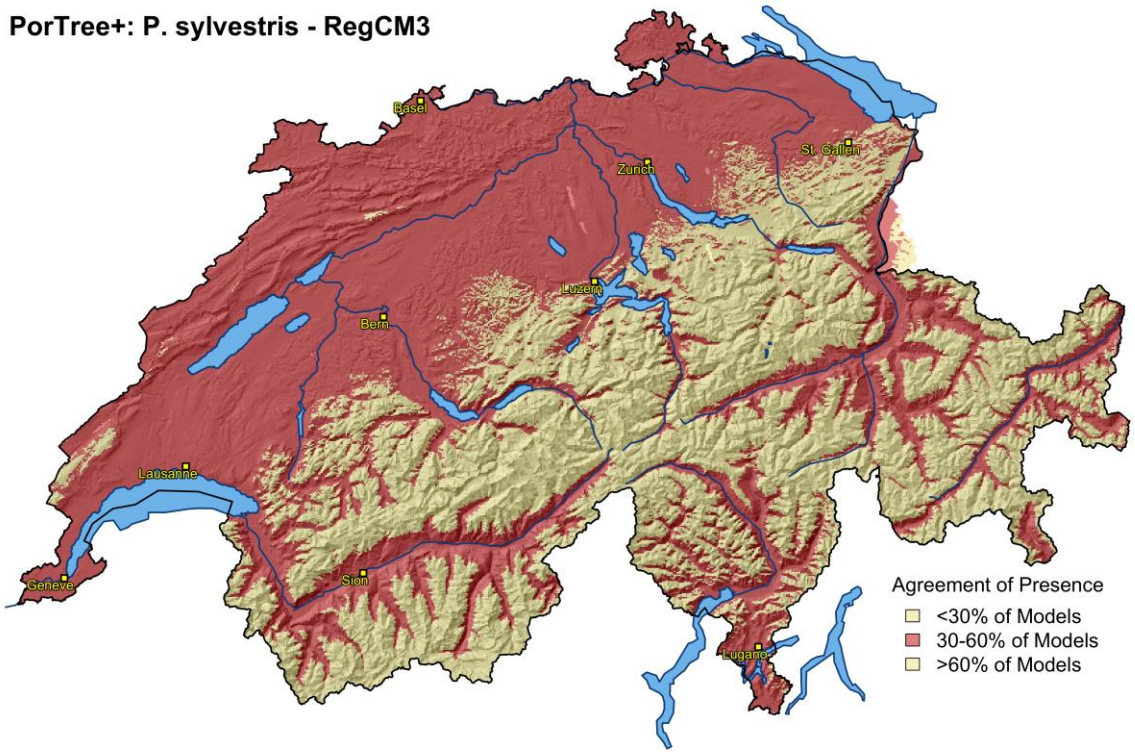

Abb. 70: Modellierte Habitateignung der Waldföhre (gemäss PorTree^{+}), Klimazukunft RegCM3 für die Periode 2070 – 2099. Legende: > 60 % = wenn mindestens 60 % der Modell-/Resampling Karten die Art als «Vorkommen» klassieren, wird das Habitat als geeignet eingestuft.

Modellierung des Waldföhrenareals mit der Klimazukunft CLM (Periode 2070-2099)

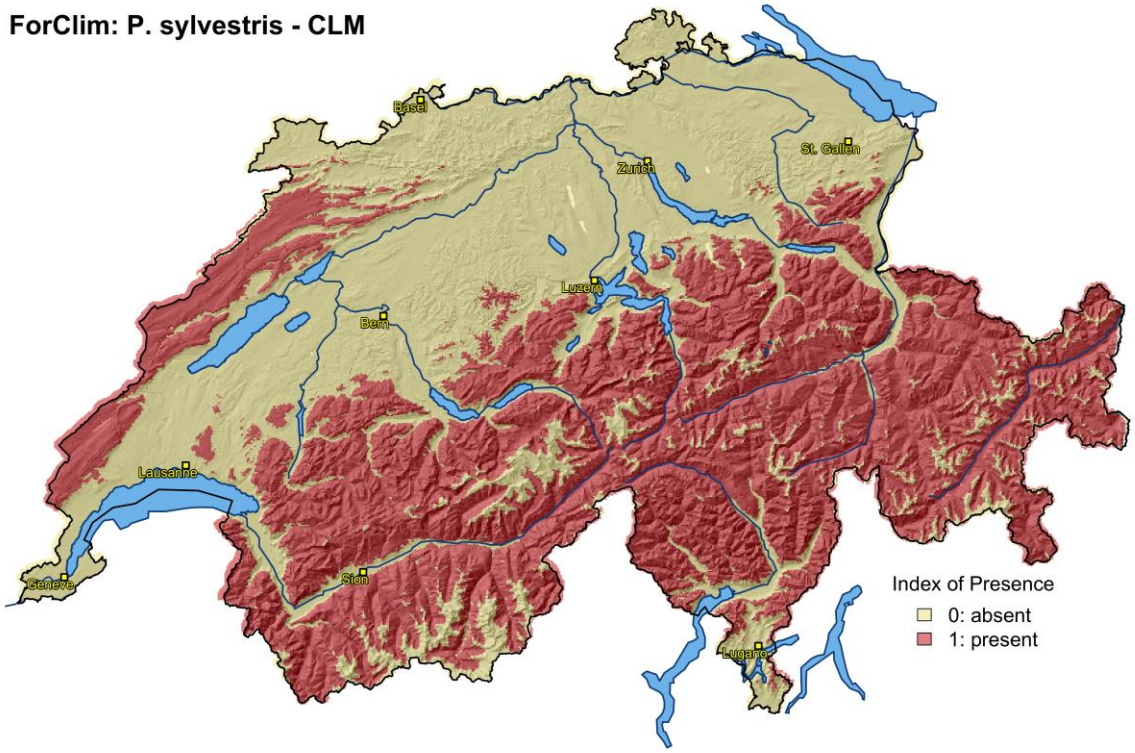

Abb. 71: Modellierte fundamentale Nische der Waldföhre gemäss ForClim, mit der Klimazukunft CLM für die Periode 2070-2099.

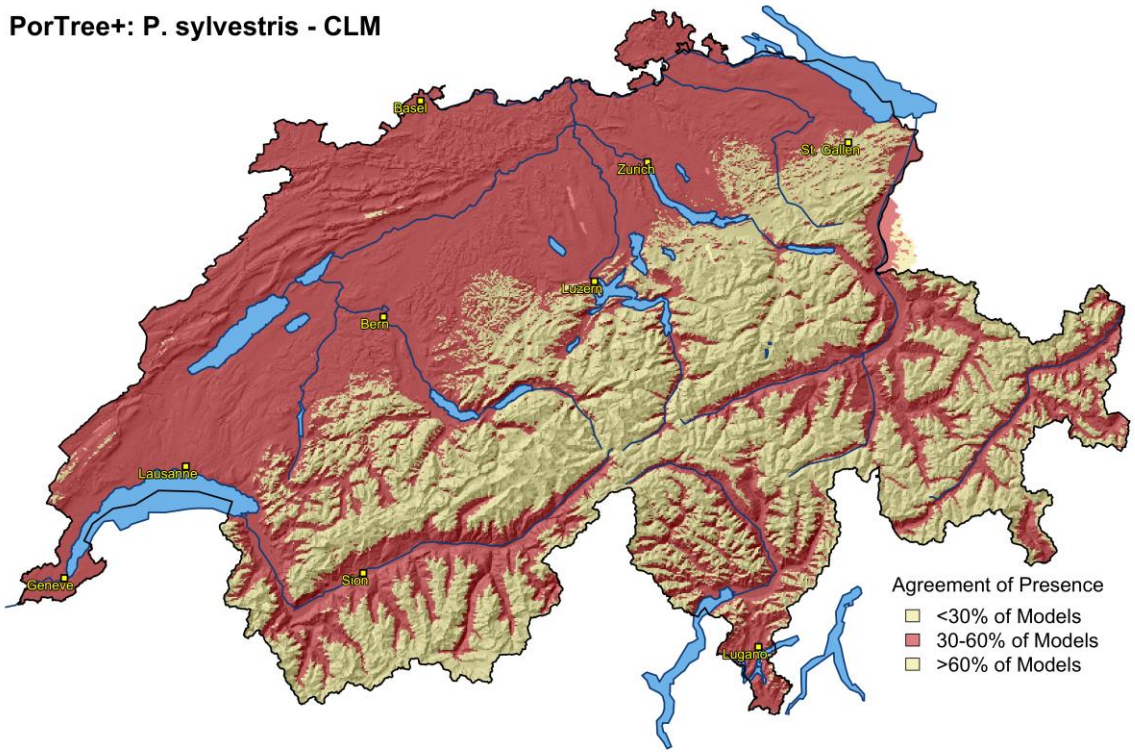

Abb. 72: Modellierte Habitateignung der Waldföhre (gemäss PorTree+), Klimazukunft CLM für die Periode 2070 – 2099. Legende: > 60 % = wenn mindestens 60 % der Modell-/Resampling Karten die Art als «Vorkommen» klassieren, wird das Habitat als geeignet eingestuft.

4.2 Bergulme (Ulmus glabra)

Angaben zur aktuellen Verbreitung der Baumart

Die Bergulme weist einen höheren Nährstoffbedarf als der Bergahorn auf, sonst sind die ökologischen Ansprüche ähnlich.

Modellierung des Bergulmenareals heute

Die fundamentale Nische wird bei der Modellierung von ForClim (Abb. 73) eher überschätzt (die Modellierung reicht zu weit in die Täler hinein), z.B. bei Andermatt (reeles Vorkommen bis Göschenen). Im Wallis trifft das Fehlen von Bergulme im Talboden zu; die obere Verbreitungsgrenze bei ca. 1250 m ü. M. ist zutreffend. Im Unterengadin wird die fundamentale Nische leicht überschätzt, ebenfalls in Richtung kontinentaler Täler (z.B. Mittelbünden).

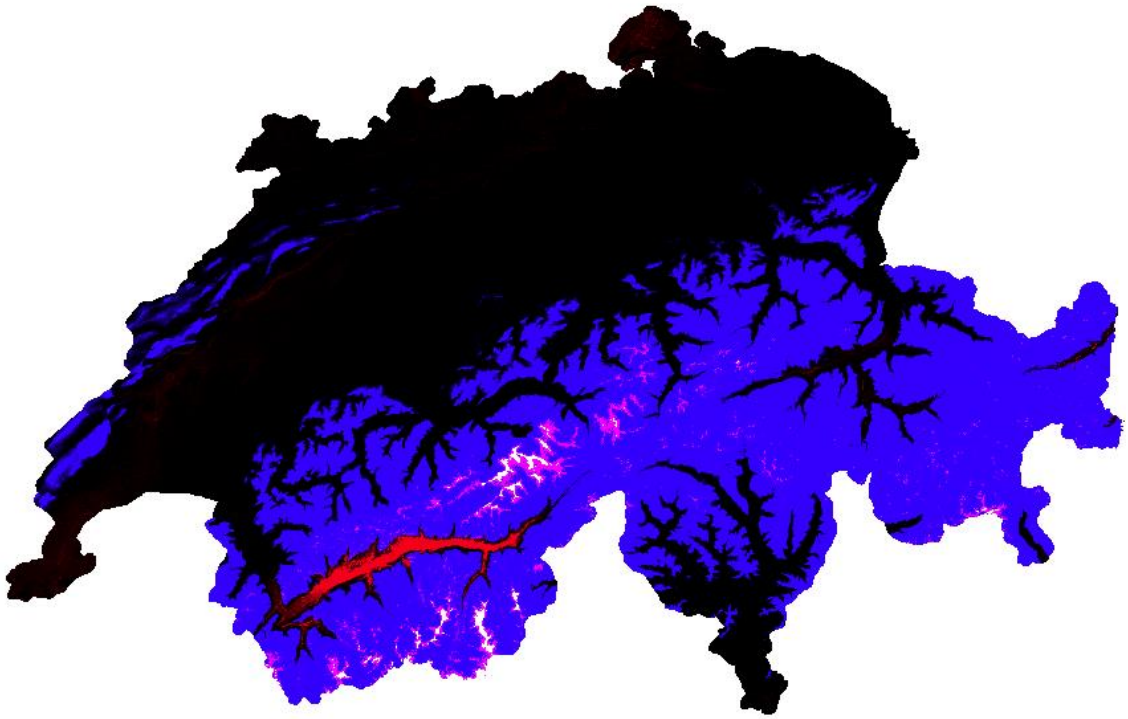

Abb. 73: Modellierte fundamentale Nische der Bergulme, heute (gemäss ForClim).

Die geringen Flächen bei der Modellierung von PorTree (Abb. 74) zeigen weniger die Habitateignung der Bergulme auf, als die tatsächliche Verbreitung der von der Ulmenwelke stark reduzierten Baumartenverbreitung.

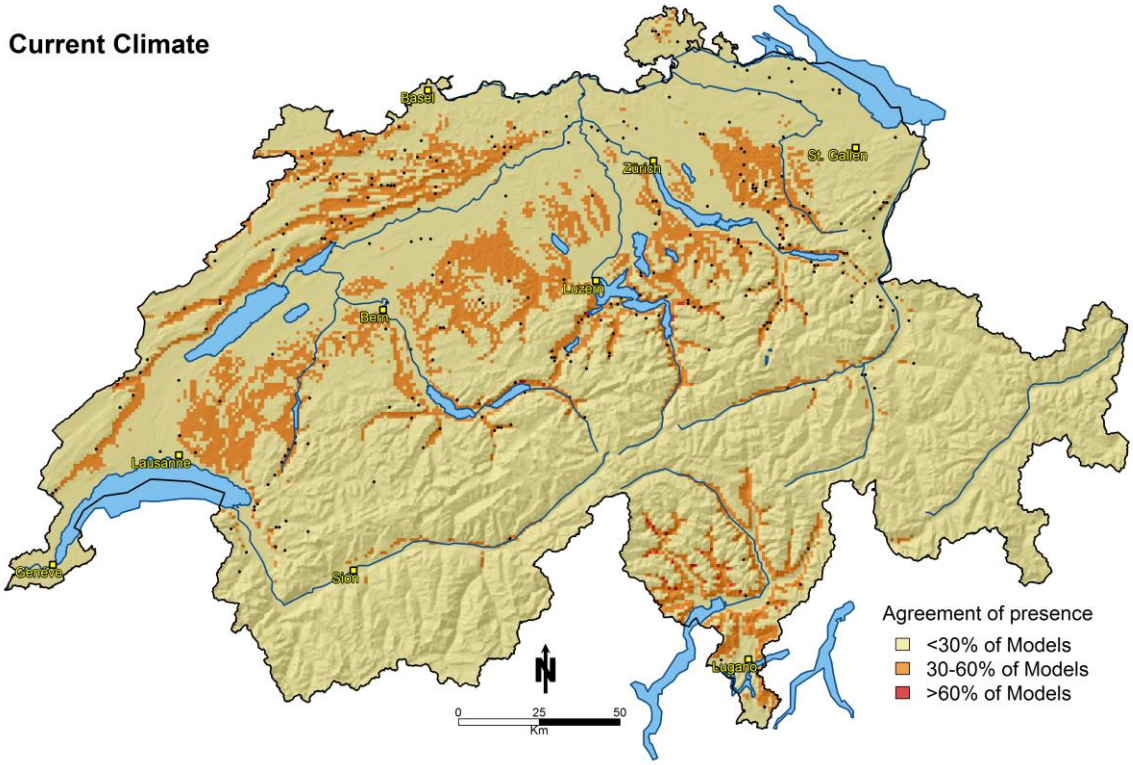

Abb. 74: Modellierte Habitateignung der Bergulme, heute (gemäss PorTree). Legende: > 60 % = wenn mindestens 60 % der Modell-/Resampling Karten die Art als «Vorkommen» klassieren, wird das Habitat als geeignet eingestuft.

Modellierung der fundamentalen Nische der Bergulme mit der Klimazukunft RegCM3 (Periode 2070-2099)

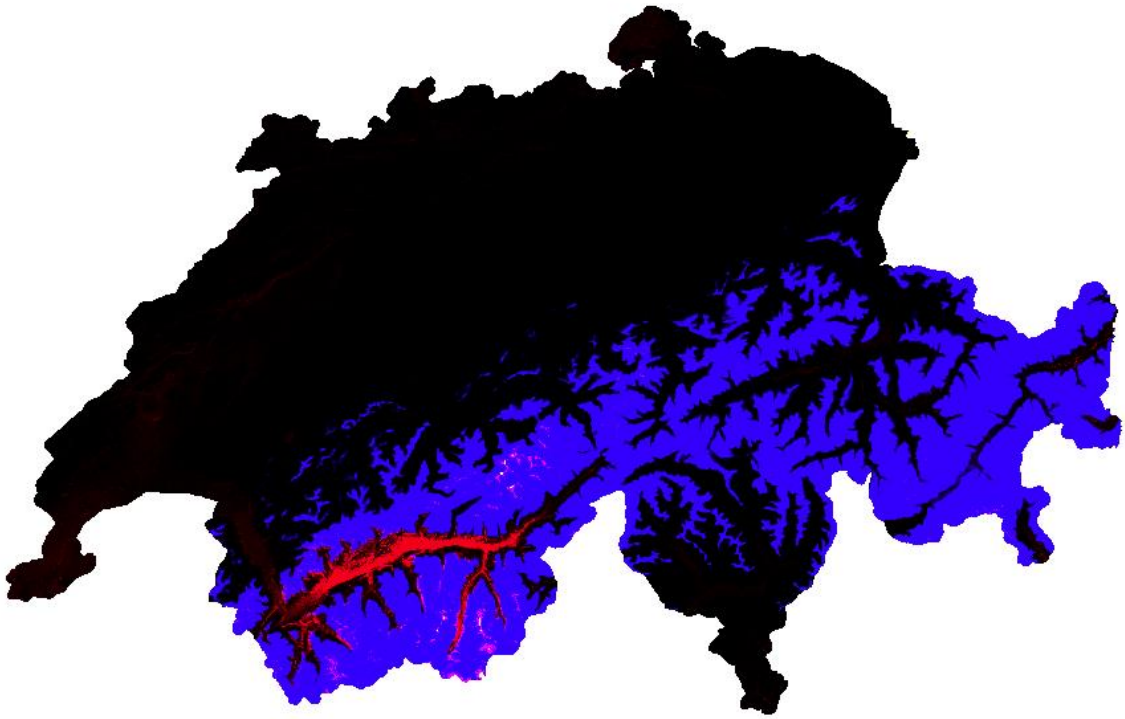

Abb. 75: Modellierte fundamentale Nische der Bergulme gemäss ForClim, mit der Klimazukunft RegCM3 für für die Periode 2070-2099.

Modellierung der fundamentalen Nische der Bergulme mit der Klimazukunft CLM (Periode 2070-2099)

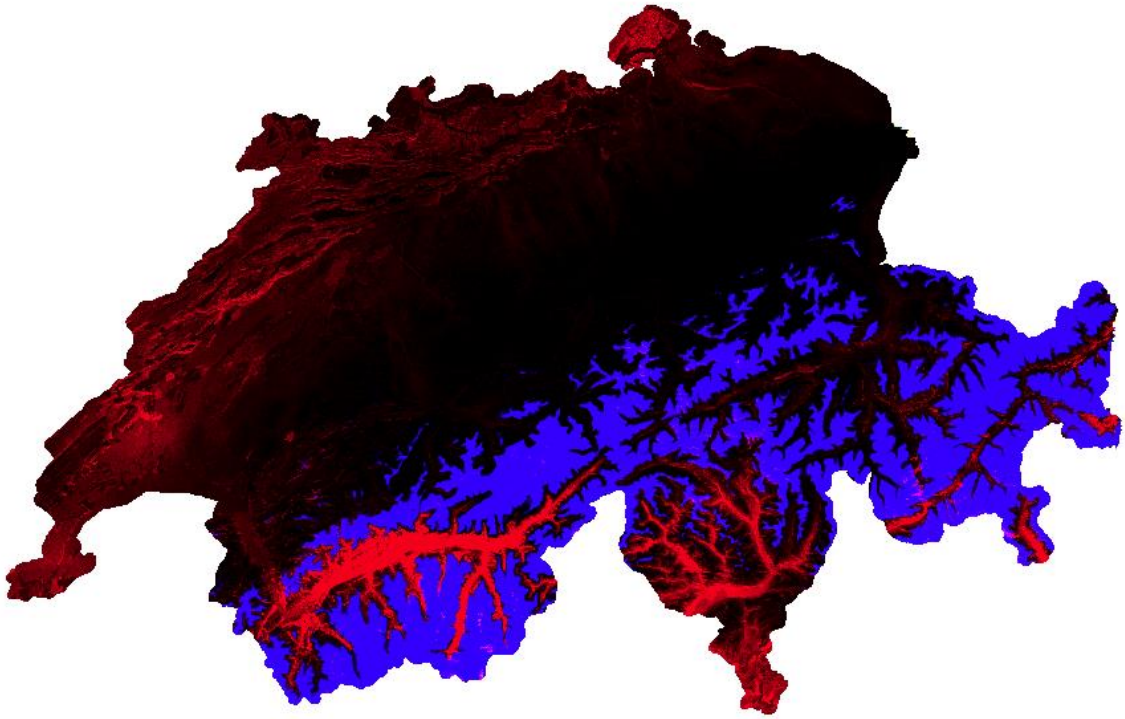

Abb. 76: Modellierte fundamentale Nische der Bergulme gemäss ForClim, mit der Klimazukunft CLM für die Periode 2070-2099.

Modellierung des Bergulmenareals mit A1B mit Ensembles (Periode 2051-2080)

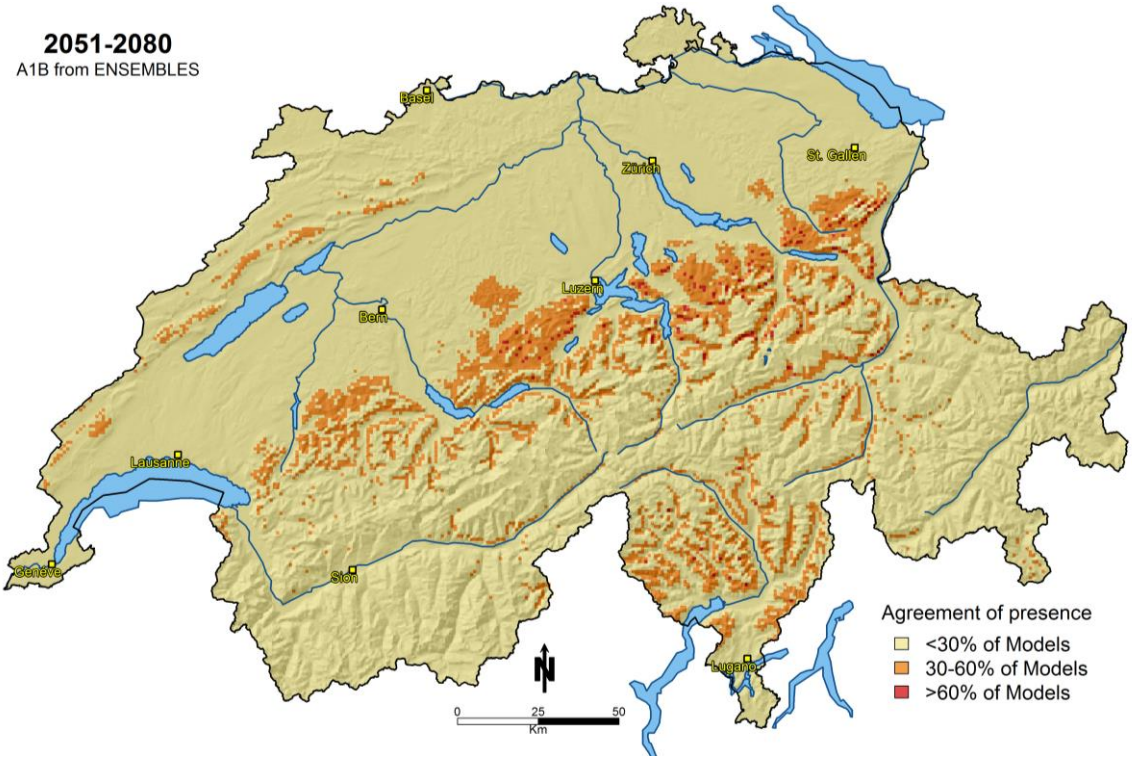

Abb. 77: Modellierte Habitateignung der Bergulme (gemäss PorTree), Modellierung mit A1B mit Ensembles für die Periode 2051 – 2080. Legende: > 60 % = wenn mindestens 60 % der Modell-/Resampling Karten die Art als «Vorkommen» klassieren, wird das Habitat als geeignet eingestuft.

4.3 Spitzahorn (Acer platanoides)

Angaben zur aktuellen Verbreitung der Baumart

Der Spitzahorn kommt in der Nordschweiz und im Tessin v.a. in der collinen und submontanen Stufe vor (nach SEBA 2001 steigt der Spitzahorn bis ca. 1300 m ü. M., Schwerpunkt bei 600 bis700 m ü. M.). Eine geringe Verbreitung weist er im Wallis und in Graubünden auf. Der Spitzahorn weist eine grössere Trockenheitsresistenz als der Bergahorn auf. Nach SEBA 2001 ist er winter- und weitgehend spätfrosthart.

Modellierung des Spitzahornareals heute

Die modellierte fundamentale Nische nach ForClim (Abb. 78) stimmt ziemlich gut. Die Modellierung reicht ein wenig zu weit in die Täler hinein.

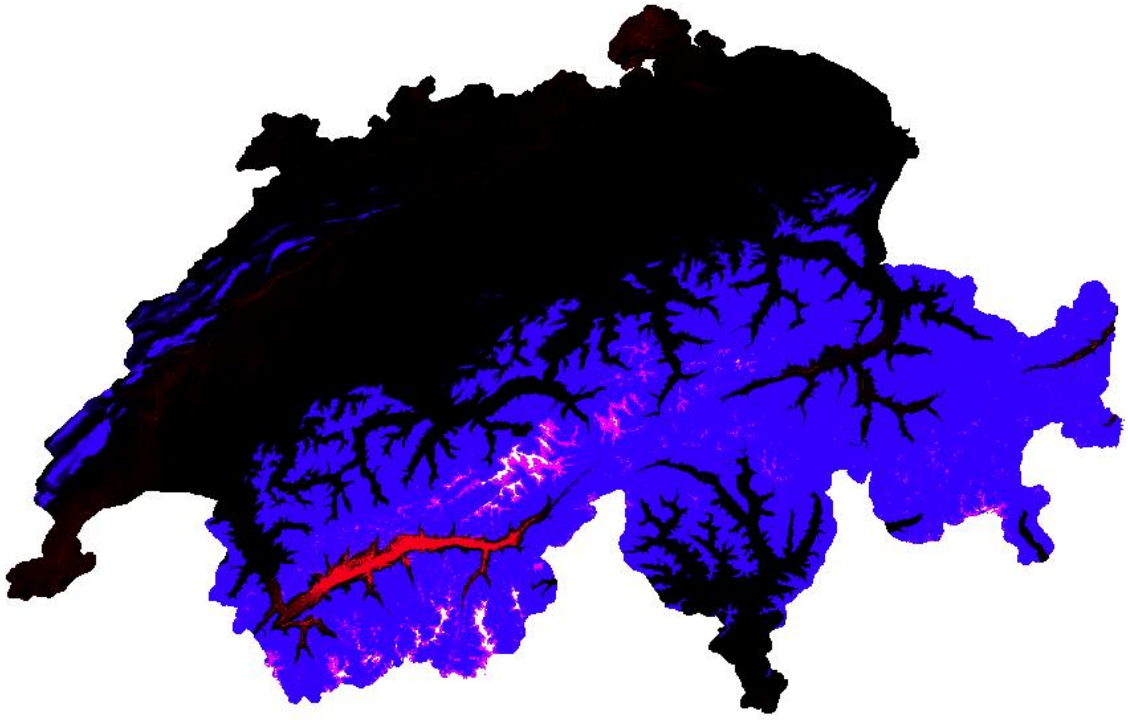

Abb. 78: Modellierte fundamentale Nische des Spitzahorns, heute (gemäss ForClim, Multiband). Legende: Schwarz = Baumart kommt potentiell vor, rot = Baumart limitiert wegen Trockenheit, blau = Baumart limitiert wegen Wärmesumme, grün = Baumart limitiert wegen Wintertemperatur, weiss = Baumart limitiert wegen allen 3 Faktoren.

Modellierung der fundamentalen Nische des Spitzahorns mit der Klimazukunft RegCM3 (Periode 2070-2099)

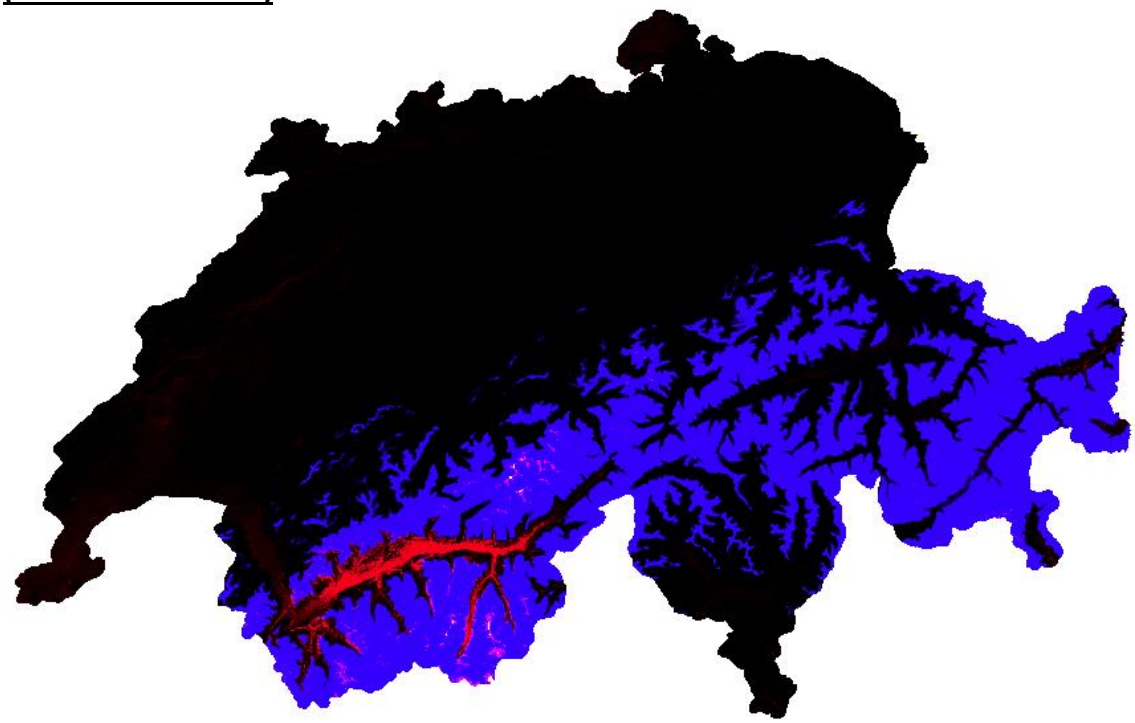

Abb. 79: Modellierte fundamentale Nische des Spitzahorns gemäss ForClim (Multiband), mit der Klimazukunft RegCM3 für für die Periode 2070-2099. Legende: Schwarz = Baumart kommt potentiell vor, rot = Baumart limitiert wegen Trockenheit, blau = Baumart limitiert wegen Wärmesumme, grün = Baumart limitiert wegen Wintertemperatur, weiss = Baumart limitiert wegen allen 3 Faktoren.

Modellierung der fundamentalen Nische des Spitzahorns mit der Klimazukunft CLM (Periode 2070-2099)

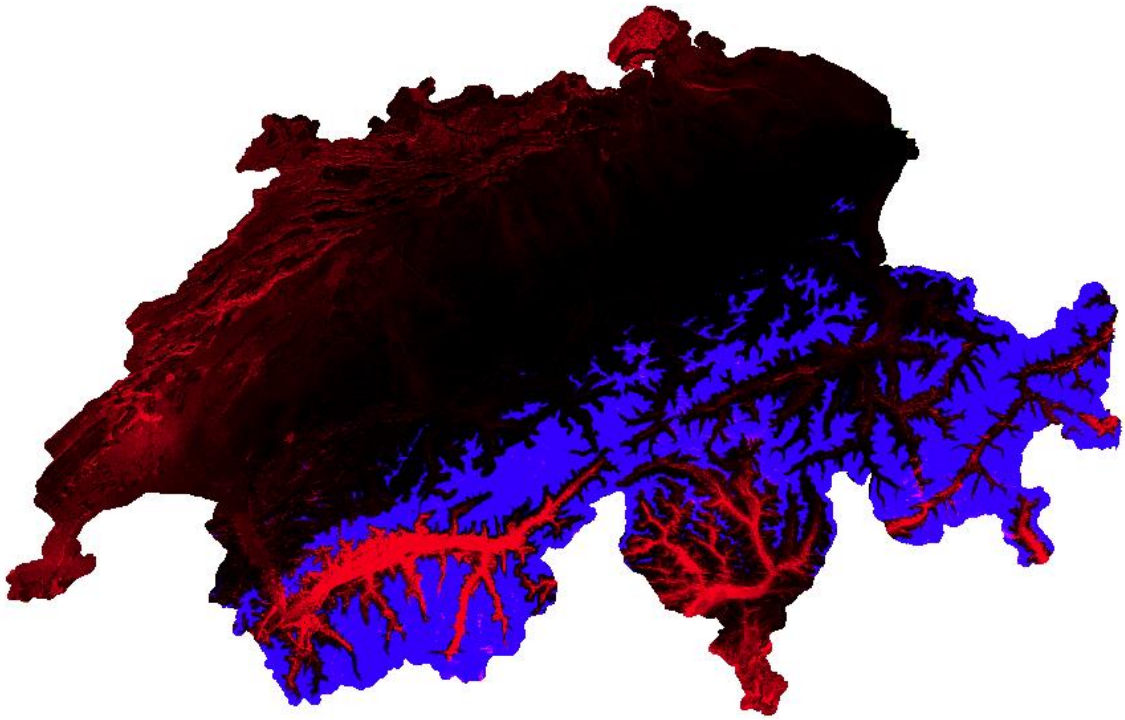

Abb. 80: Modellierte fundamentale Nische des Spitzahorns gemäss ForClim (Multiband), mit der Klimazukunft CLM für die Periode 2070-2099. Legende: Schwarz = Baumart kommt potentiell vor, rot = Baumart limitiert wegen Trockenheit, blau = Baumart limitiert wegen Wärmesumme, grün = Baumart limitiert wegen Wintertemperatur, weiss = Baumart limitiert wegen allen 3 Faktoren.

4.4 Grünerle (Alnus viridis)

Angaben zur aktuellen Verbreitung der Grünerle

Die Grünerle kommt vor allem in den nördlichen Randalpen, im Tessin und in feuchteren Gebieten der Zentralalpen vor.

Modellierung des Grünerlenareals heute

Bei der Modellierung nach ForClim (Abb. 81) werden in feuchten Lagen (z.B. Kanton Glarus, Schächental, Surselva) zu wenig und in trockenen Lagen (z.B. Engadin) zu viel Flächen angezeigt. Viel zu wenig Flächen werden im Gebiet (v.a. subozeanisch) zwischen Glarus – Prättigau – Tessin – Goms angezeigt; aber auch in Fribourg sollten Grünerlen eigentlich modelliert sein. Im Engadin werden Grünerlenbestände eher überschätzt.

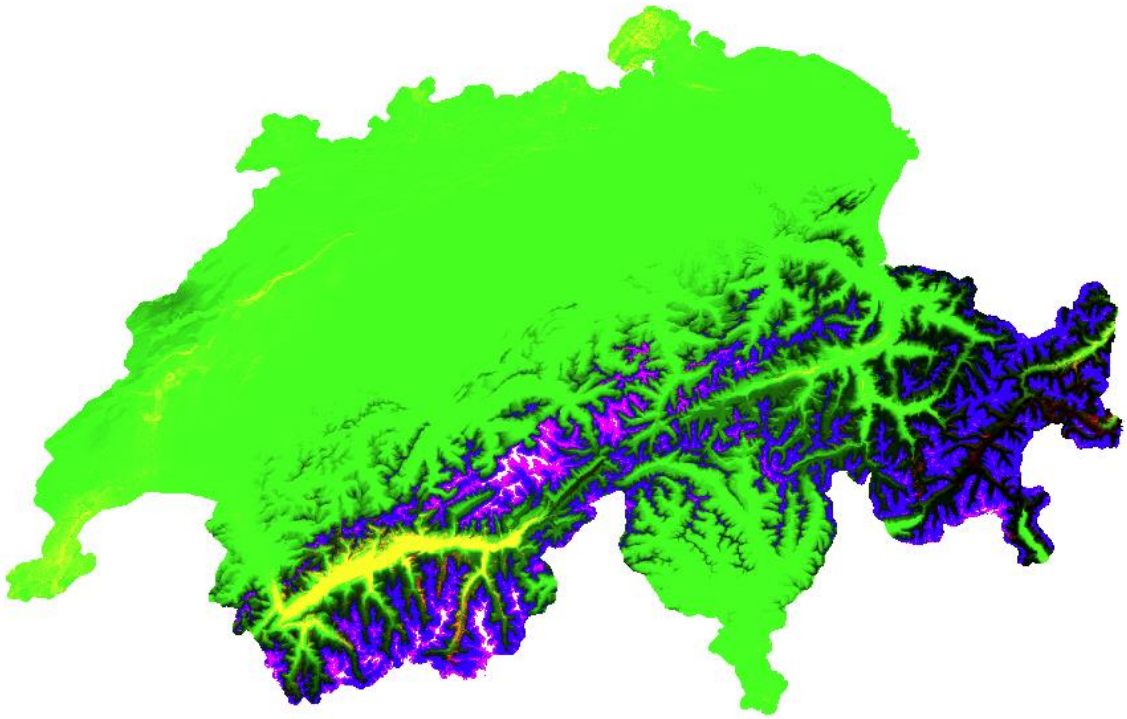

Abb. 81: Modellierte fundamentale Nische der Grünerle, heute (gemäss ForClim, Multiband). Legende: Schwarz = Baumart kommt potentiell vor, rot = Baumart limitiert wegen Trockenheit, blau = Baumart limitiert wegen Wärmesumme, grün = Baumart limitiert wegen Wintertemperatur, weiss = Baumart limitiert wegen allen 3 Faktoren.

Modellierung der fundamentalen Nische der Grünerle mit der Klimazukunft RegCM3 (Periode 2070-2099)

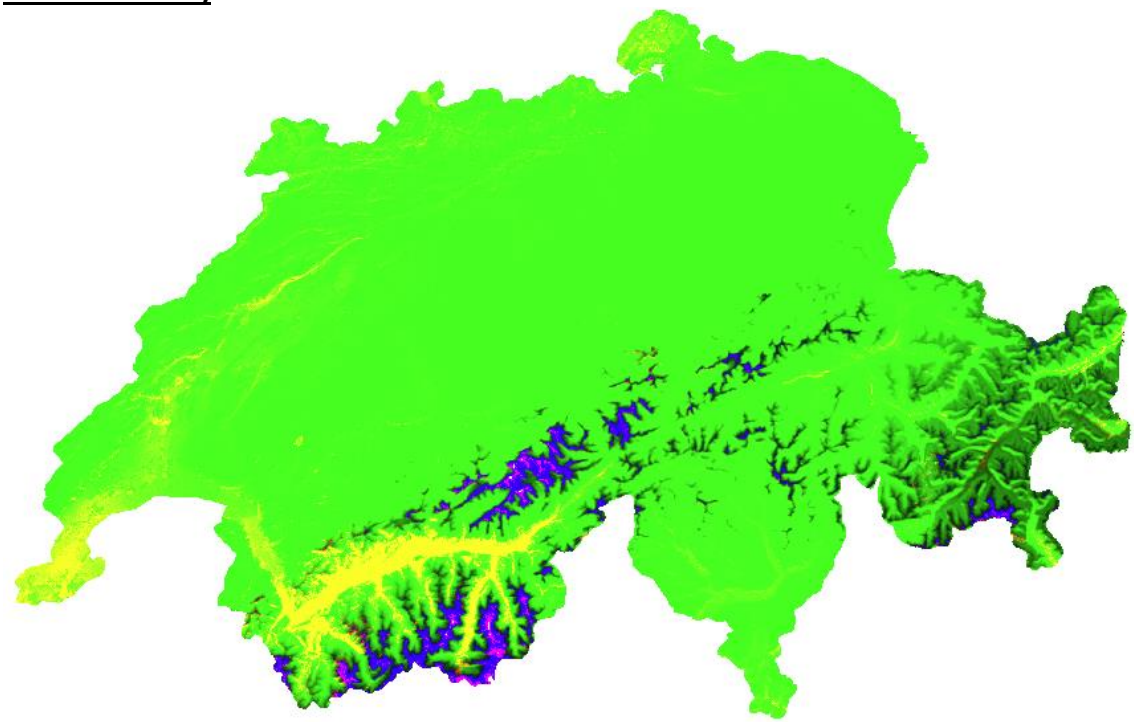

Abb. 82: Modellierte fundamentale Nische der Grünerle gemäss ForClim (Multiband), mit der Klimazukunft RegCM3 für für die Periode 2070-2099. Legende: Schwarz = Baumart kommt potentiell vor, rot = Baumart limitiert wegen Trockenheit, blau = Baumart limitiert wegen Wärmesumme, grün = Baumart limitiert wegen Wintertemperatur, weiss = Baumart limitiert wegen allen 3 Faktoren.

Modellierung der fundamentalen Nische der Grünerle mit der Klimazukunft CLM (Periode 2070-2099)

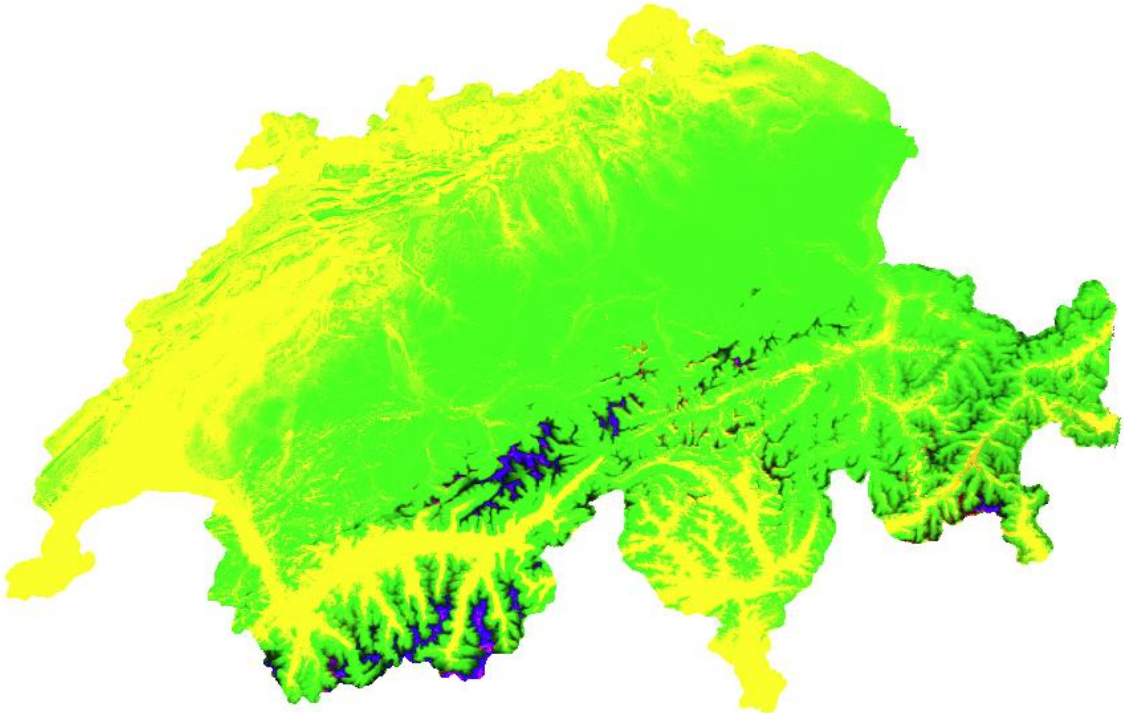

Abb. 83: Modellierte fundamentale Nische der Grünerle gemäss ForClim (Multiband), mit der Klimazukunft CLM für die Periode 2070-2099. Legende: Schwarz = Baumart kommt potentiell vor, rot = Baumart limitiert wegen Trockenheit, blau = Baumart limitiert wegen Wärmesumme, grün = Baumart limitiert wegen Wintertemperatur, weiss = Baumart limitiert wegen allen 3 Faktoren.

4.5 Hängebirke (Betula pendula)

Angaben zur aktuellen Verbreitung der Baumart

Die Hängebirke ist in der ganzen Schweiz (ausser im Oberengadin) in allen Höhenstufen verbreitet (bis ca. 2000 m ü. M. steigend).

Modellierung des Hängebirkenareals heute

Im Wallis, bei Genf und im Kanton Schaffhausen wird die Birke bei der Modellierung von ForClim (Abb. 84) unterschätzt. Eventuell ist die Trockengrenze zu strikt gefasst.

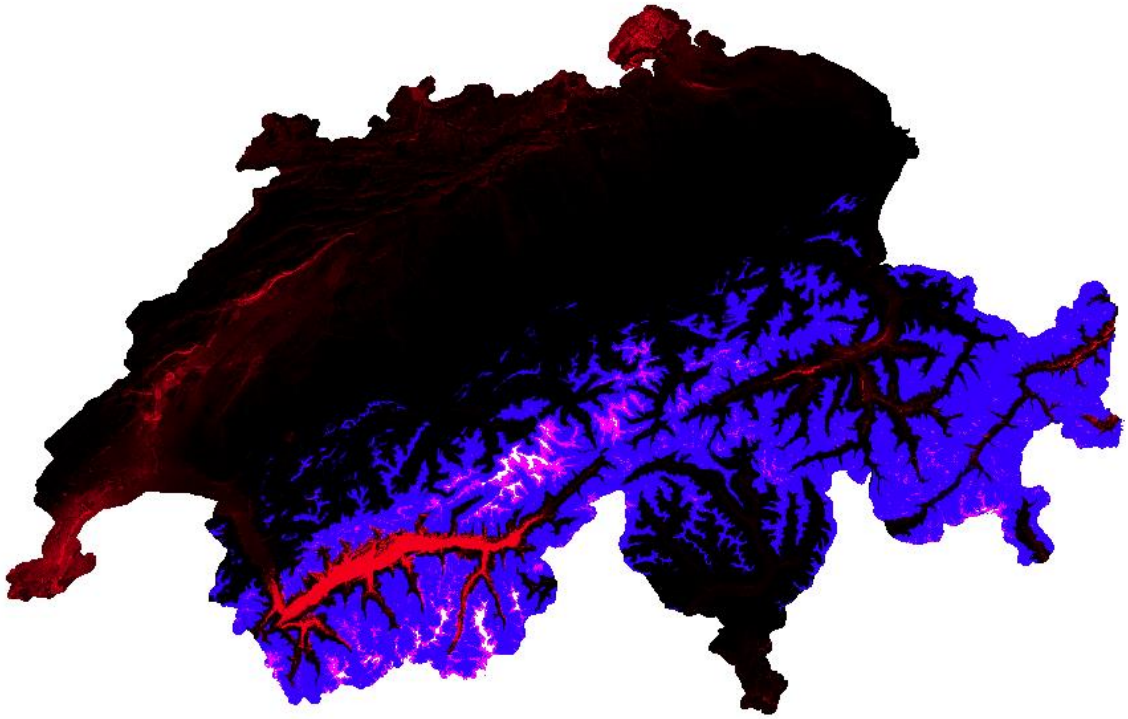

Abb. 84: Modellierte fundamentale Nische der Hängebirke, heute (gemäss ForClim, Multiband). Legende: Schwarz = Baumart kommt potentiell vor, rot = Baumart limitiert wegen Trockenheit, blau = Baumart limitiert wegen Wärmesumme, grün = Baumart limitiert wegen Wintertemperatur, weiss = Baumart limitiert wegen allen 3 Faktoren.

Bei der Modellierung von PorTree (Abb. 85) wird die Habitateignung der Birke im Mittelland, in den nördlichen Randalpen und im Kanton Graubünden (inkl. Südtälern) stark unterschätzt.

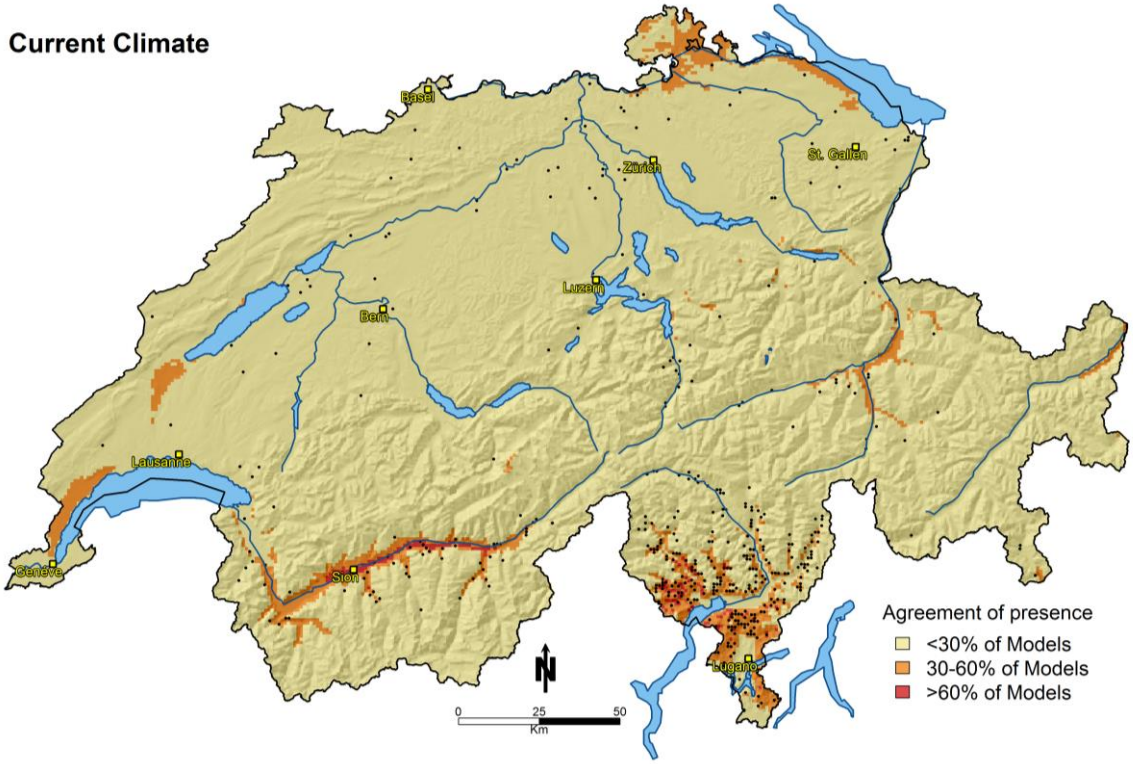

Abb. 85: Modellierte Habitateignung der Hängebirke, heute (gemäss PorTree). Legende: > 60 % = wenn mindestens 60 % der Modell-/Resampling Karten die Art als «Vorkommen» klassieren, wird das Habitat als geeignet eingestuft.

Modellierung des Hängebirkenareals mit A1B mit Ensembles (Periode 2051-2080)

Karten von den Modellierungen der fundamentalen Nische der Hängebirke mit den Klimazukünften RegCM3 und CLM (Periode 2070-2099) fehlen.

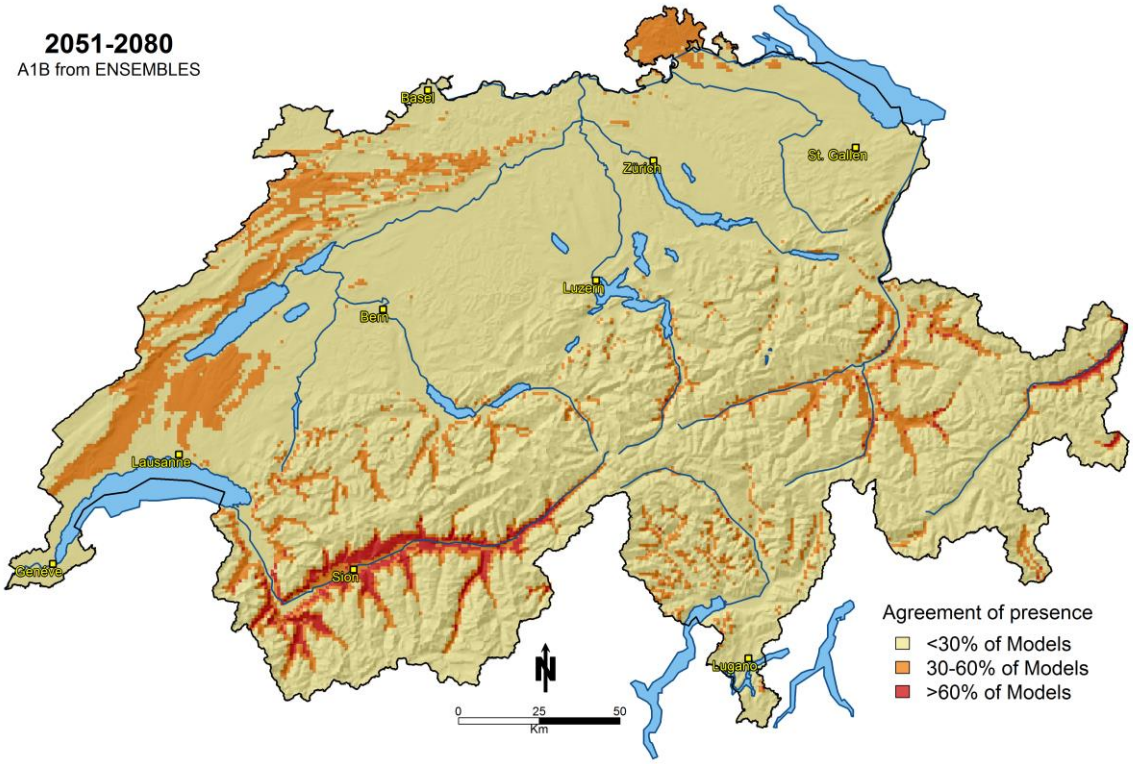

Abb. 86: Modellierte Habitateignung der Hängebirke (gemäss PorTree), Modellierung mit A1B mit Ensembles für die Periode 2051 – 2080. Legende: > 60 % = wenn mindestens 60 % der Modell-/Resampling Karten die Art als «Vorkommen» klassieren, wird das Habitat als geeignet eingestuft.

4.6 Hagebuche (Carpinus betulus)

Angaben zur aktuellen Verbreitung der Baumart

Die Hagebuche kommt vor allem in der collinen und der submontanen Stufe im Mittelland und im Südtessin vor. Die Hagebuche ist wie die Buche empfindlich gegen Winterfröste, wegen ihres frühen und schnellen Austreibens im Frühjahr aber weniger durch Spätfröste gefährdet (Altenkirch et al. 2002).

Modellierung des Hagebuchenareals heute

Die fundamentale Nische wird bei der Modellierung von ForClim (Abb. 87) massiv überschätzt, vor allem in Richtung der Alpentäler (z.B. bei Andermatt und besonders im kontinentalen Raum: im Unterengadin, in Mittelbünden und im Wallis), aber auch im Tessin. Ebenfalls wird die Höhenausdehnung überschätzt, die Modellierung reicht mindestens 400 m zu hoch.

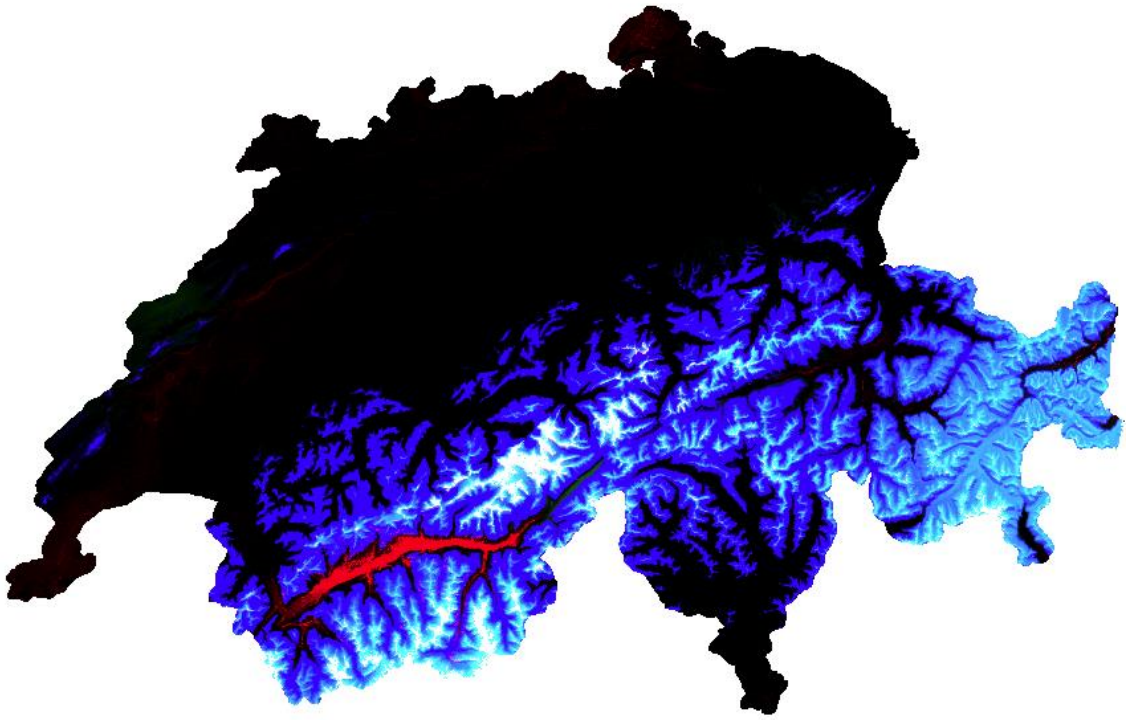

Abb. 87: Modellierte fundamentale Nische der Hagebuche, heute (gemäss ForClim, Multiband). Legende: Schwarz = Baumart kommt potentiell vor, rot = Baumart limitiert wegen Trockenheit, blau = Baumart limitiert wegen Wärmesumme, grün = Baumart limitiert wegen Wintertemperatur, weiss = Baumart limitiert wegen allen 3 Faktoren.

Die Modellierung von PorTree (Abb. 88) trifft ziemlich gut die heutige Verbreitung der Hagebuche, ausser im Wallis und in Graubünden, hier kommt sie real nur selten bis überhaupt nicht vor. Bei der Modellierung fehlen die Vorkommen im Südtessin und jene zwischen dem Jura, Bielersee und Aarau.

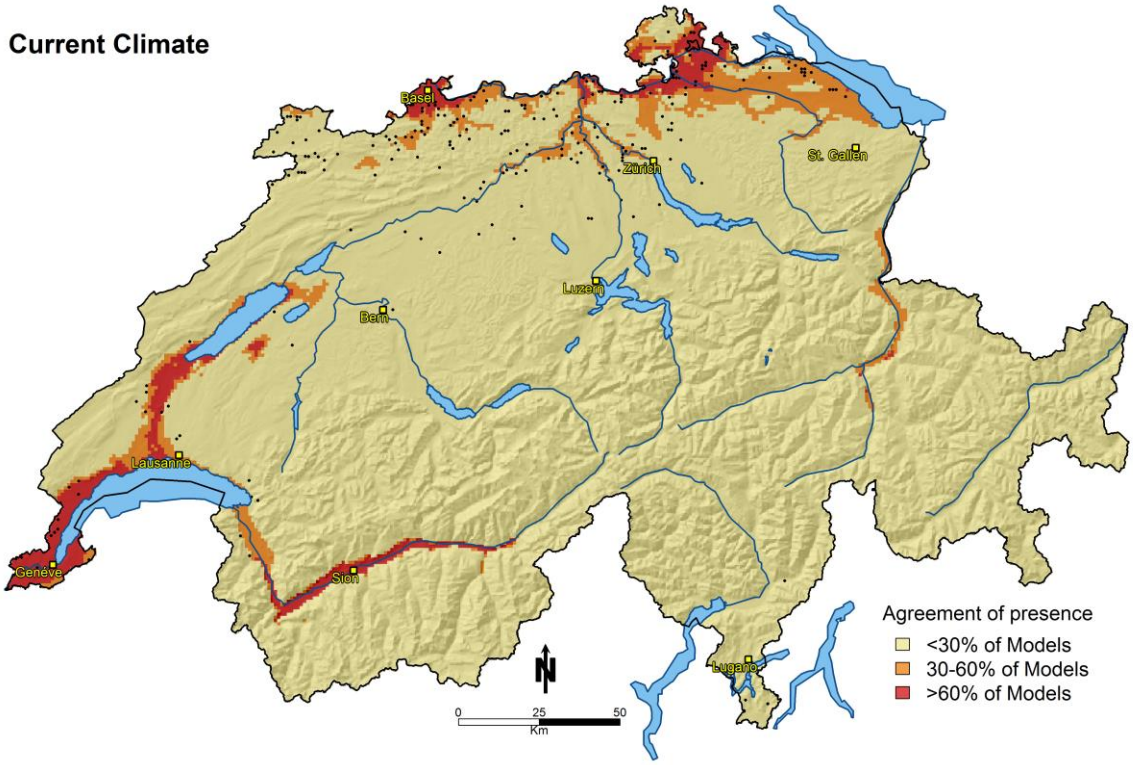

Abb. 88: Modellierte Habitateignung der Hagebuche, heute (gemäss PorTree). Legende: > 60 % = wenn mindestens 60 % der Modell-/Resampling Karten die Art als «Vorkommen» klassieren, wird das Habitat als geeignet eingestuft.

Modellierung der fundamentalen Nische der Hagebuche mit der Klimazukunft RegCM3 (Periode 2070-2099)

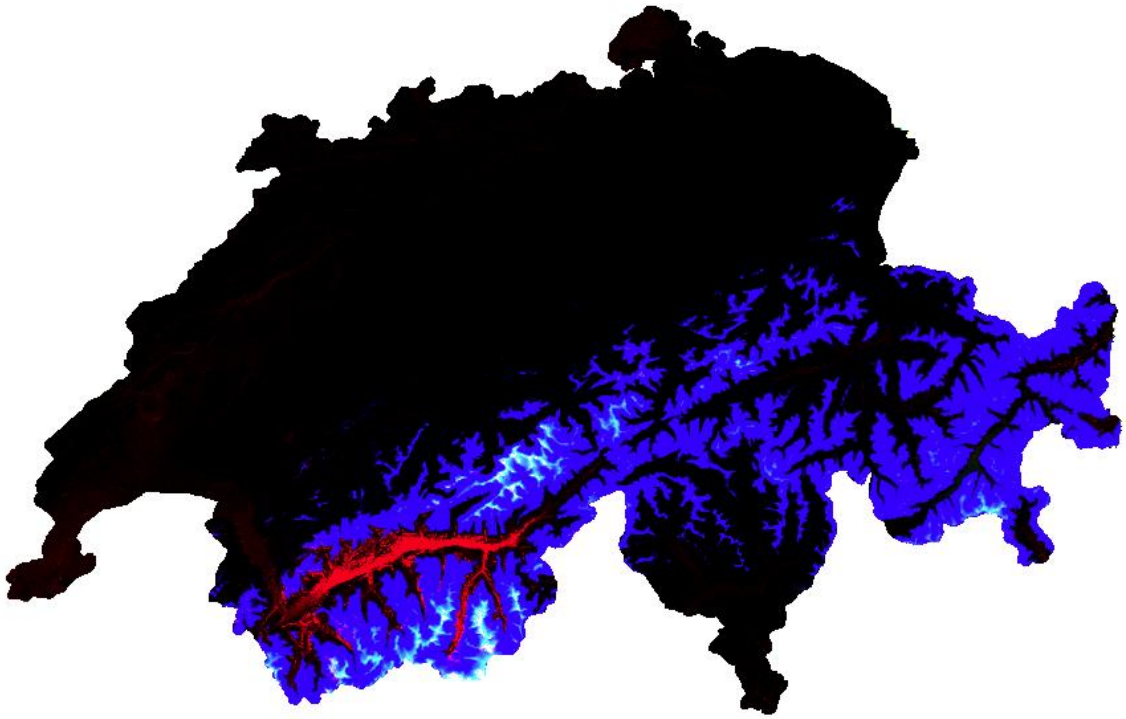

Abb. 89: Modellierte fundamentale Nische der Hagebuche gemäss ForClim (Multiband), mit der Klimazukunft RegCM3 für für die Periode 2070-2099. Legende: Schwarz = Baumart kommt potentiell vor, rot = Baumart limitiert wegen Trockenheit, blau = Baumart limitiert wegen Wärmesumme, grün = Baumart limitiert wegen Wintertemperatur, weiss = Baumart limitiert wegen allen 3 Faktoren.

Modellierung der fundamentalen Nische der Hagebuche mit der Klimazukunft CLM (Periode 2070-2099)

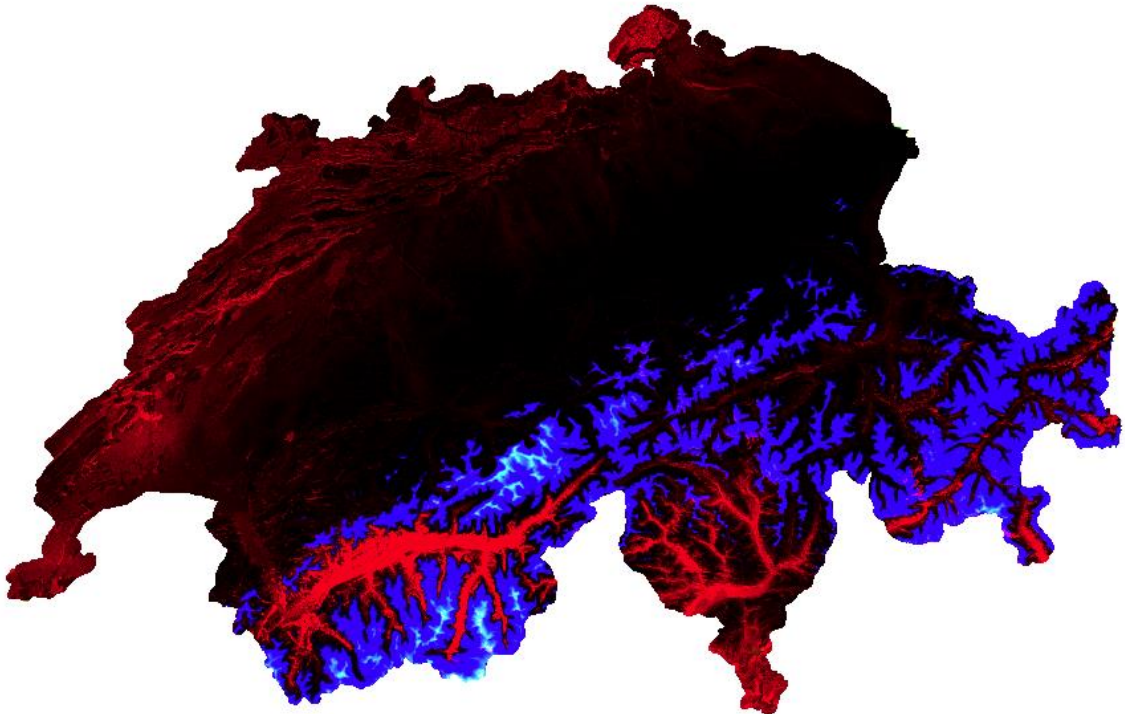

Abb. 90: Modellierte fundamentale Nische der Hagebuche gemäss ForClim (Multiband), mit der Klimazukunft CLM für die Periode 2070-2099. Legende: Schwarz = Baumart kommt potentiell vor, rot = Baumart limitiert wegen Trockenheit, blau = Baumart limitiert wegen Wärmesumme, grün = Baumart limitiert wegen Wintertemperatur, weiss = Baumart limitiert wegen allen 3 Faktoren.

Modellierung des Hagebuchenareals mit A1B mit Ensembles (Periode 2051-2080)

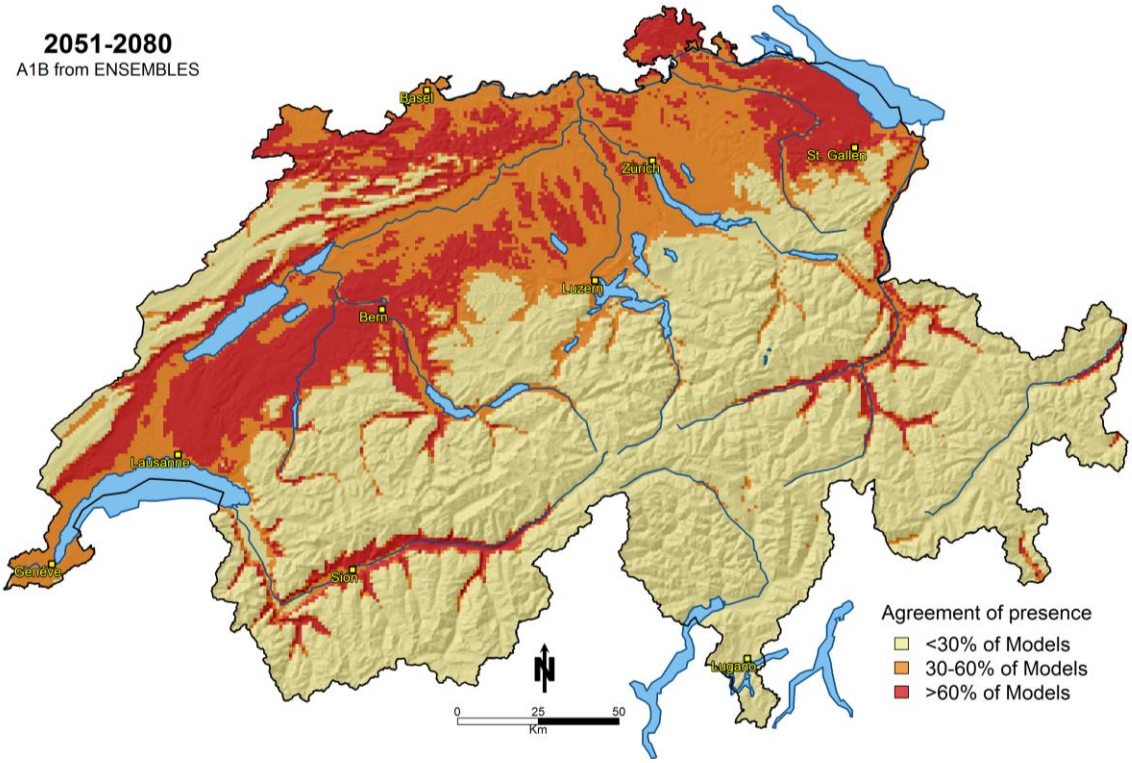

Abb. 91: Modellierte Habitateignung der Hagebuche (gemäss PorTree), Modellierung mit A1B mit Ensembles für die Periode 2051 – 2080. Legende: > 60 % = wenn mindestens 60 % der Modell-/Resampling Karten die Art als «Vorkommen» klassieren, wird das Habitat als geeignet eingestuft.

4.7 Edelkastanie (Castanea sativa)

Angaben zur aktuellen Verbreitung der Baumart

Im Tessin und in den Bündner Südtälern (ausser dem Münstertal) kommt die Kastanie sehr häufig vor. Im Kanton Uri kommt die Kastanie bis ca. 700 m ü. M. vor. Beim Vierwaldstättersee, im Raum Sargans, bei Genf und Eingangs Wallis kommt die Kastanie z.T. häufig vor, im übrigen Mittelland und in den Nordalpen nur vereinzelt. Im Rheintal (Kanton Graubünden) könnte die Kastanie, wenn sie kultiviert worden wäre, in Südlagen bis ca. 900 - 1000 m ü. M. und an Nordhängen bis 700 m ü. M. vorkommen, wenn die Standorte nicht zu frostgefährdet sind. Nach SEBA (https://www1.ethz.ch/wm/sebapub) meidet die Edelkastanie basischen Untergrund. Gründige, mittlere bis saure, frische bis leicht trockene Standorte in milden Lagen sagen ihr zu. Die Edelkastanie erträgt das Klima der Alpennordseite grundsätzlich gut. Wegen ihrer leichten Spätfrostempfindlichkeit werden raue Lagen (Bise, Kältesseen, Kaltluftabflüsse) aber gemieden. Nach Etzold et al. 2016 war die Kastanie durch menschlichen Einfluss über ihre ökologische Nische hinaus verbreitet und wird nun zunehmend zurückgedrängt.

Modellierung des Kastanienareals heute

Die Modellierung von ForClim (Abb. 92) passt in der Südschweiz gut zur Realität, ausser in der oberen Leventina, dort fehlt die Kastanie real wegen dem Kaltluftsee. In den Nordalpen ist die obere Verbreitungsgrenze zu hoch und zu weit in die Täler hinein modelliert (Einfluss von Kaltluftseen fehlt bei der Modellierung). Die Kastanie kommt bei Fiesch im Wallis auch real vor.

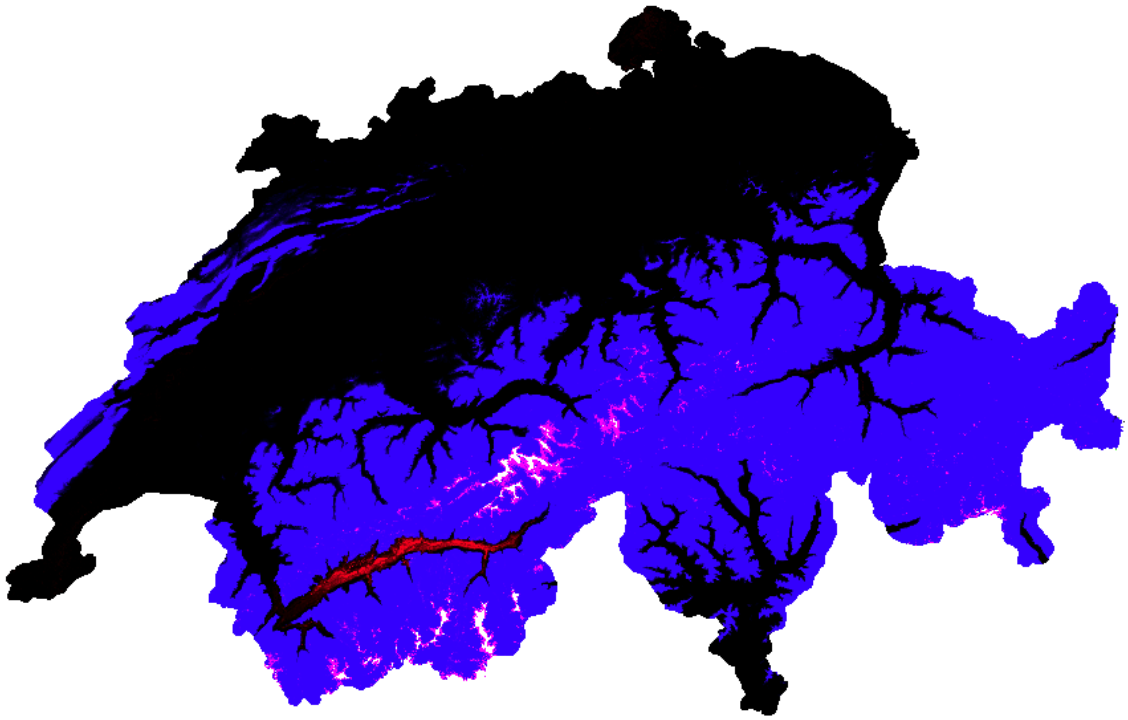

Abb. 92: Modellierte fundamentale Nische der Kastanie, heute (gemäss ForClim, Multiband). Legende: Schwarz = Baumart kommt potentiell vor, rot = Baumart limitiert wegen Trockenheit, blau = Baumart limitiert wegen Wärmesumme, grün = Baumart limitiert wegen Wintertemperatur, weiss = Baumart limitiert wegen allen 3 Faktoren.

Die Modellierung von PorTree (Abb. 93) stimmt sehr gut mit der Realität überein, einzig im Bergell und im Puschlav ist das Areal zu gering modelliert.

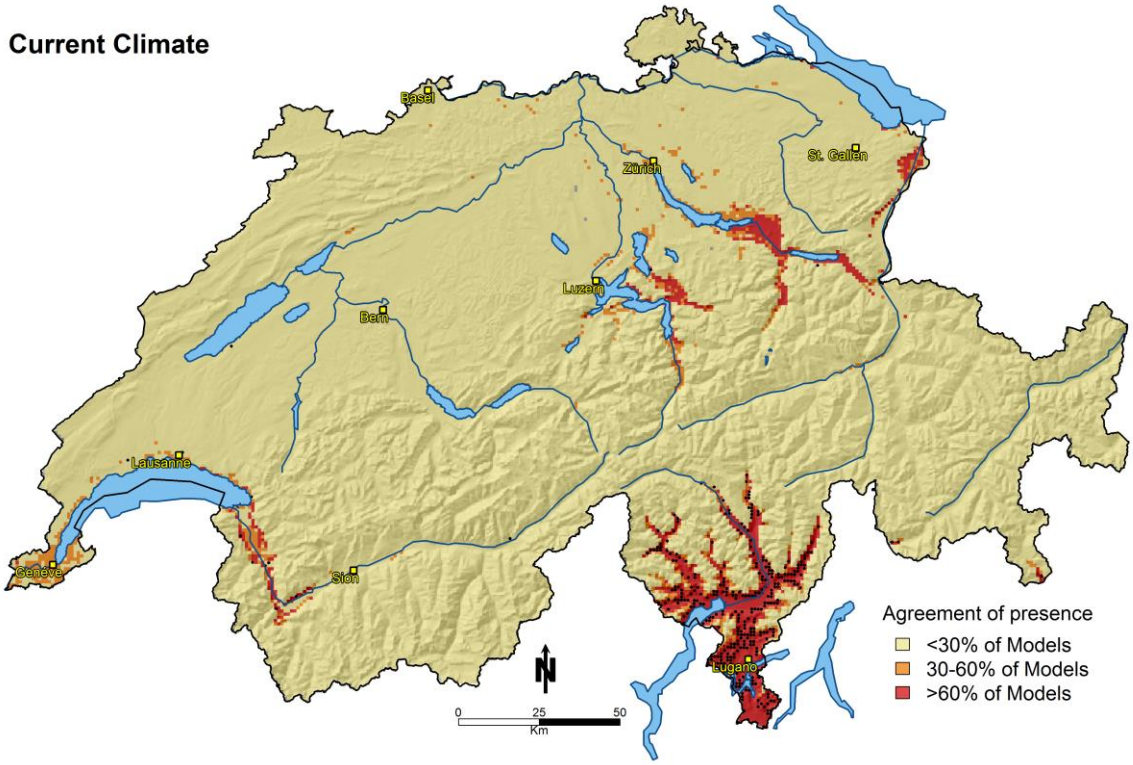

Abb. 93: Modellierte Habitateignung der Kastanie, heute (gemäss PorTree). Legende: > 60 % = wenn mindestens 60 % der Modell-/Resampling Karten die Art als «Vorkommen» klassieren, wird das Habitat als geeignet eingestuft.

Modellierung der fundamentalen Nische der Kastanie mit der Klimazukunft RegCM3 (Periode 2070-2099)

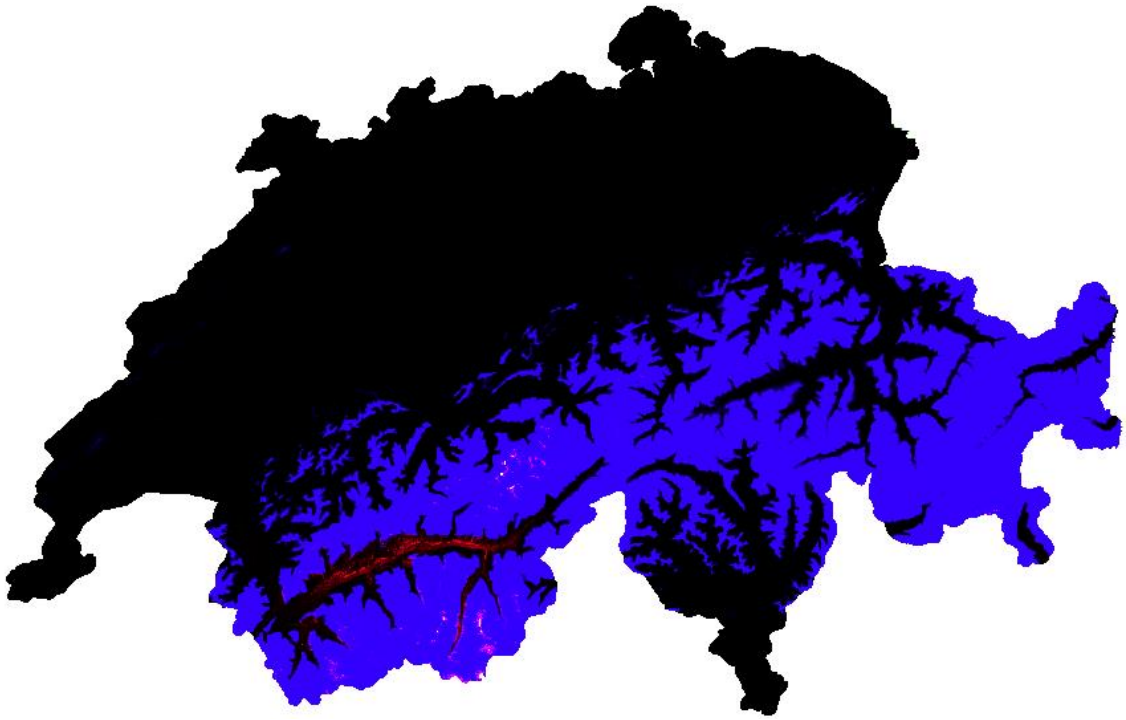

Abb. 94: Modellierte fundamentale Nische der Kastanie gemäss ForClim (Multiband), mit der Klimazukunft RegCM3 für für die Periode 2070-2099. Legende: Schwarz = Baumart kommt potentiell vor, rot = Baumart limitiert wegen Trockenheit, blau = Baumart limitiert wegen Wärmesumme, grün = Baumart limitiert wegen Wintertemperatur, weiss = Baumart limitiert wegen allen 3 Faktoren.

Modellierung der fundamentalen Nische der Kastanie mit der Klimazukunft CLM (Periode 2070-2099)

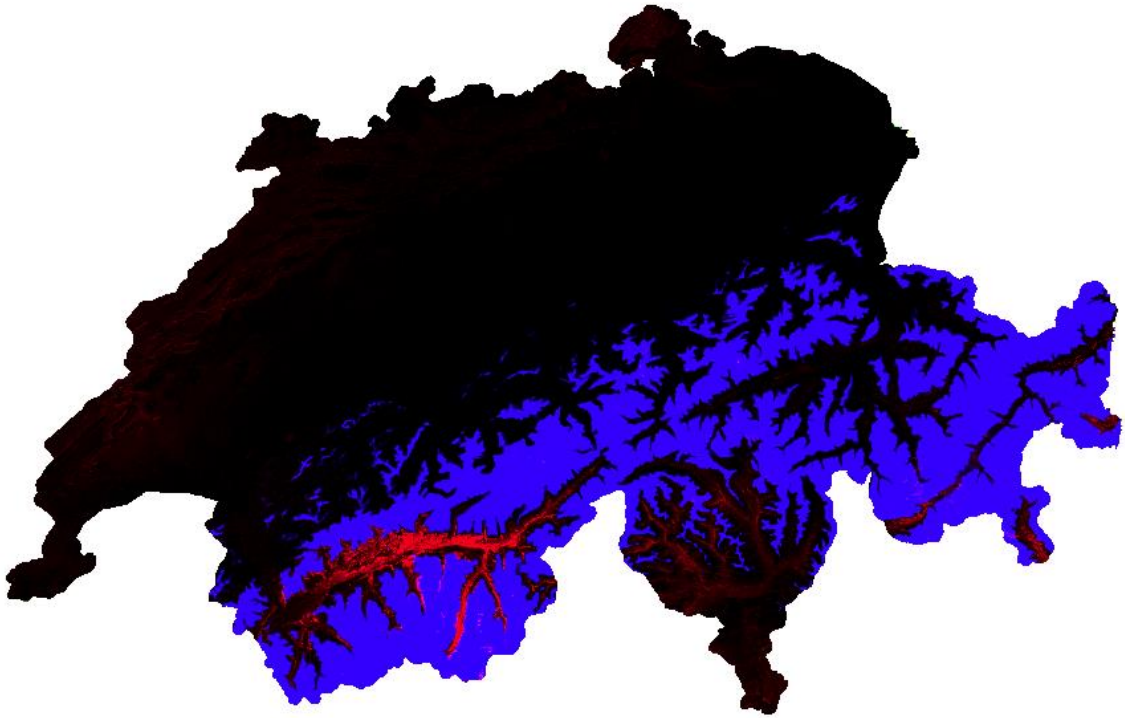

Abb. 95: Modellierte fundamentale Nische der Kastanie gemäss ForClim (Multiband), mit der Klimazukunft CLM für die Periode 2070-2099. Legende: Schwarz = Baumart kommt potentiell vor, rot = Baumart limitiert wegen Trockenheit, blau = Baumart limitiert wegen Wärmesumme, grün = Baumart limitiert wegen Wintertemperatur, weiss = Baumart limitiert wegen allen 3 Faktoren.

Modellierung des Kastanienareals mit A1B mit Ensembles (Periode 2051-2080)

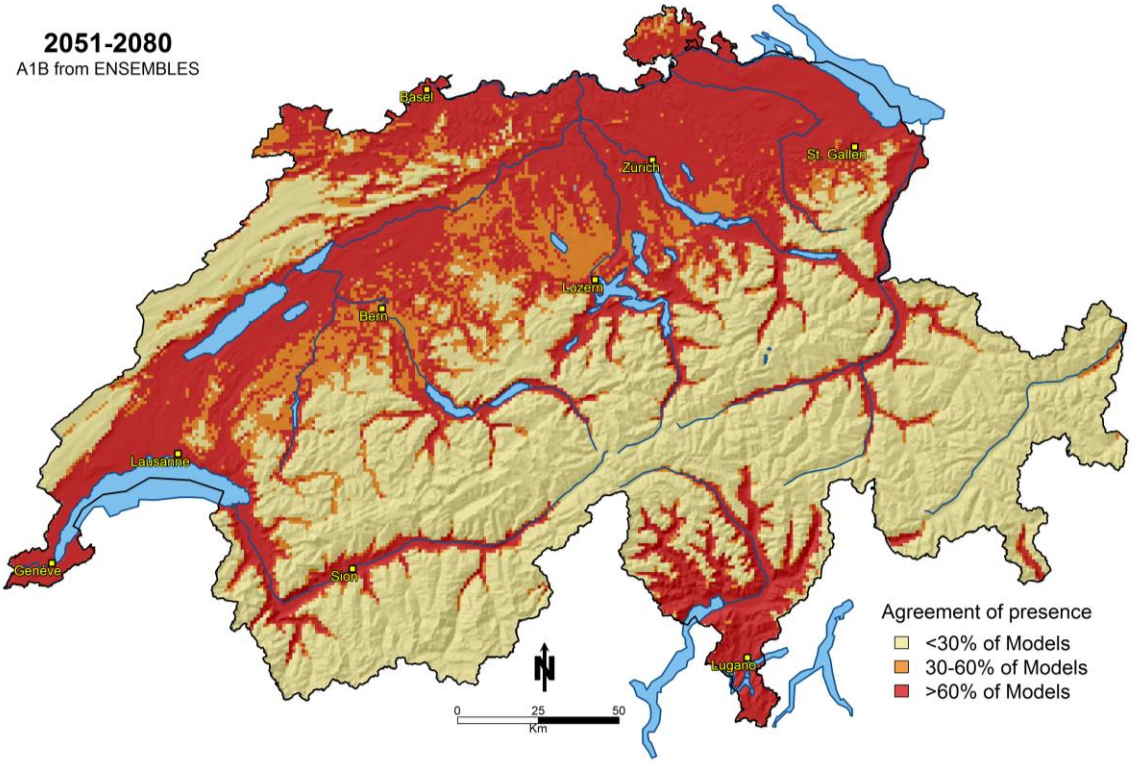

Abb. 96: Modellierte Habitateignung der Kastanie (gemäss PorTree), Modellierung mit A1B mit Ensembles für die Periode 2051 – 2080. Legende: > 60 % = wenn mindestens 60 % der Modell-/Resampling Karten die Art als «Vorkommen» klassieren, wird das Habitat als geeignet eingestuft.

4.8 Arve (Pinus cembra)

Angaben zur aktuellen Verbreitung der Baumart

Die Arve hat ihren Verbreitungsschwerpunkt in den kontinentalen Zentralalpen (v.a. Wallis und Engadin, Mittelbünden, Puschlav und Münstertal). Auf der Alpennordseite kommen nur noch isolierte Vorkommen vor.

Modellierung des Arvenareals heute

Die fundamentale Nische von ForClim ist in den Inneralpen recht gut modelliert (Abb. 97). Beim Lukmanier kommt die Arve heute noch vor. Am Säntis und im Puschlav wird die fundamentale Nische überschätzt, ebenfalls weist die Modellierung in den östlichen Nordalpen ein zu ausgedehntes Areal auf. In den Nordalpen kommt sie heute nur auf Spezialstandorten (Karren, Feldblöcke) vor, auch hier wird die fundamentale Nische überschätzt.

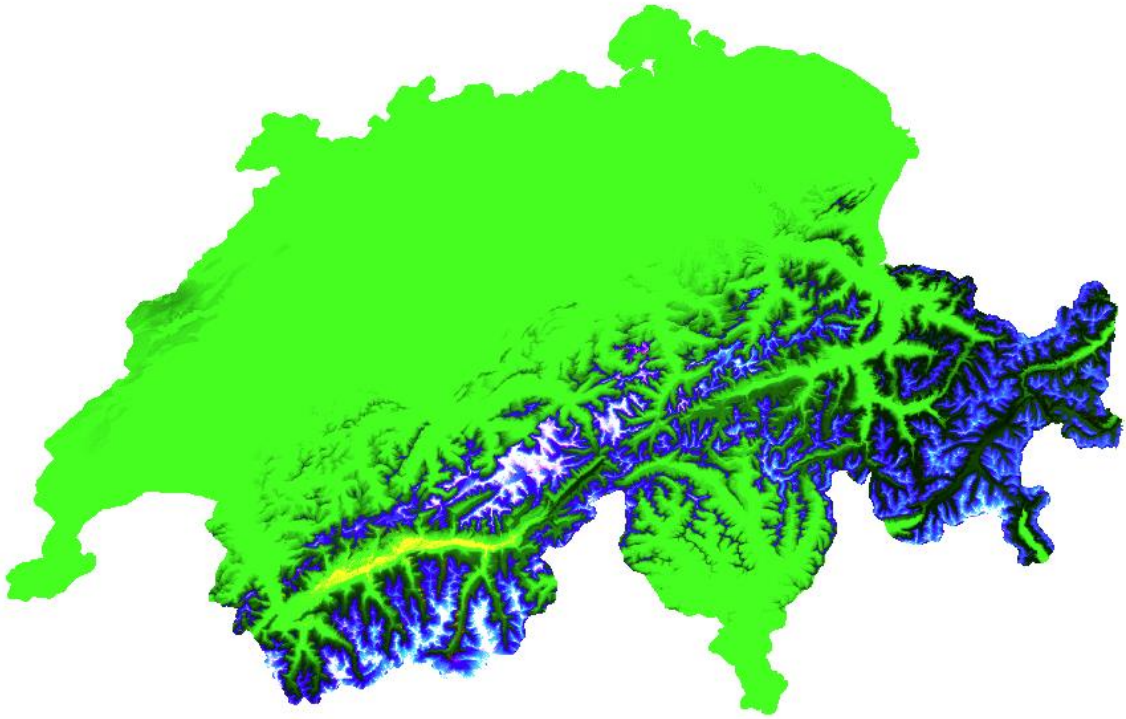

Abb. 97: Modellierte fundamentale Nische der Arve, heute (gemäss ForClim, Multiband). Legende: Schwarz = Baumart kommt potentiell vor, rot = Baumart limitiert wegen Trockenheit, blau = Baumart limitiert wegen Wärmesumme, grün = Baumart limitiert wegen Wintertemperatur, weiss = Baumart limitiert wegen allen 3 Faktoren.

Die Modellierung von PorTree (Abb. 98) bildet die Realität sehr gut ab, in den nördlichen Randalpen und in Nordbünden werden die Vorkommen eher überschätzt (aber die Ausdehnung der Arve war in früheren Jahrhunderten in diesen Gebieten ausgedehnter als heute).

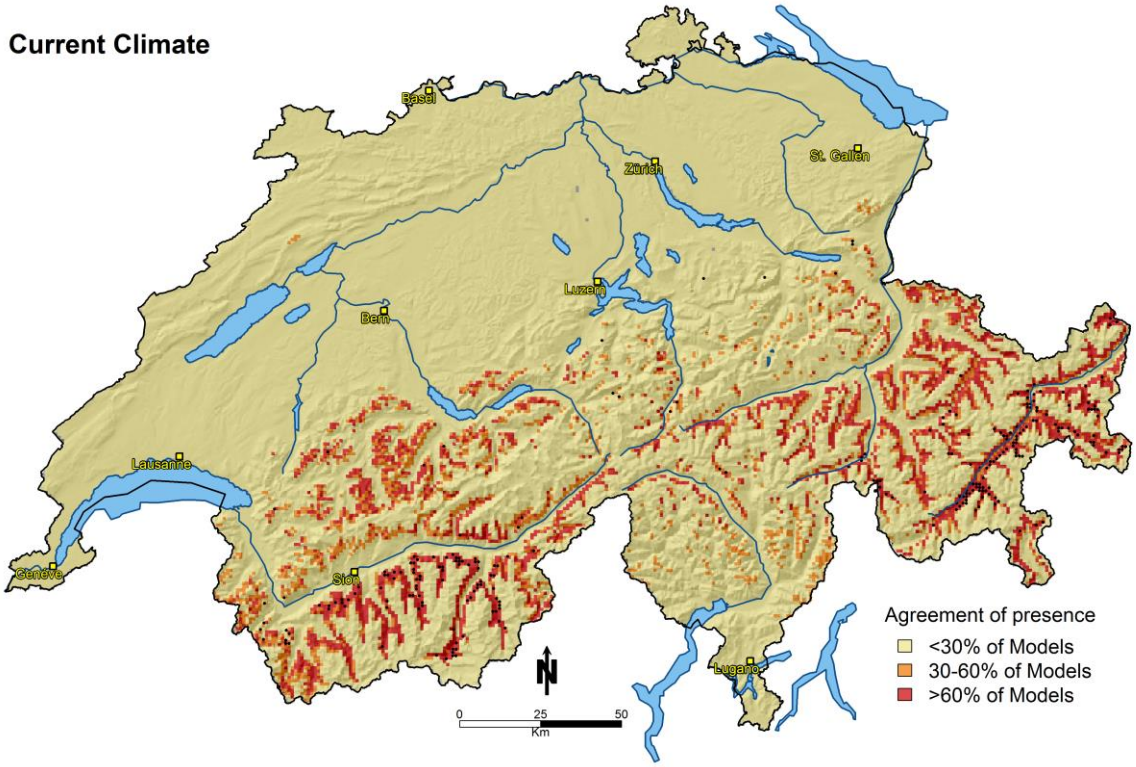

Abb. 98: Modellierte Habitateignung der Arve, heute (gemäss PorTree). Legende: > 60 % = wenn mindestens 60 % der Modell-/Resampling Karten die Art als «Vorkommen» klassieren, wird das Habitat als geeignet eingestuft.

Modellierung der fundamentalen Nische der Arve mit der Klimazukunft RegCM3 (Periode 2070-2099)

Bei Bircher et al. (2016) weisen die Arven in der obersubalpinen Stufe unter Klimawandel ebenfalls höhere Grundflächen auf.

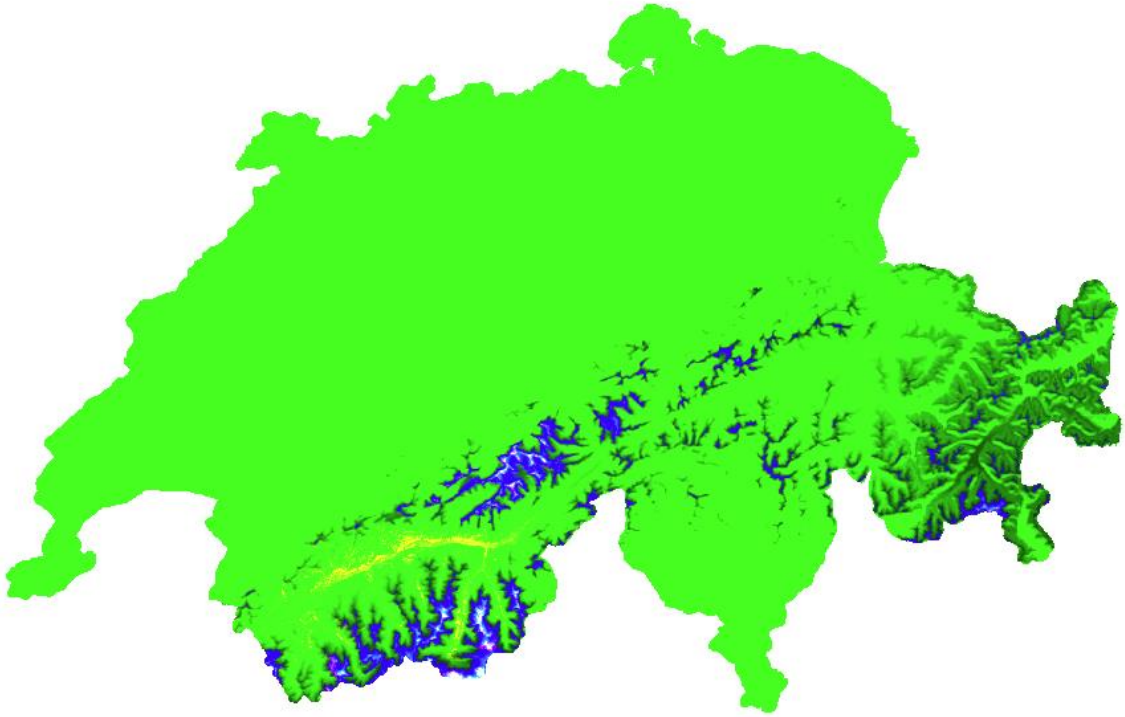

Abb. 99: Modellierte fundamentale Nische der Arve gemäss ForClim (Multiband), mit der Klimazukunft RegCM3 für für die Periode 2070-2099. Legende: Schwarz = Baumart kommt potentiell vor, rot = Baumart limitiert wegen Trockenheit, blau = Baumart limitiert wegen Wärmesumme, grün = Baumart limitiert wegen Wintertemperatur, weiss = Baumart limitiert wegen allen 3 Faktoren.

Modellierung der fundamentalen Nische der Arve mit der Klimazukunft CLM (Periode 2070-2099)

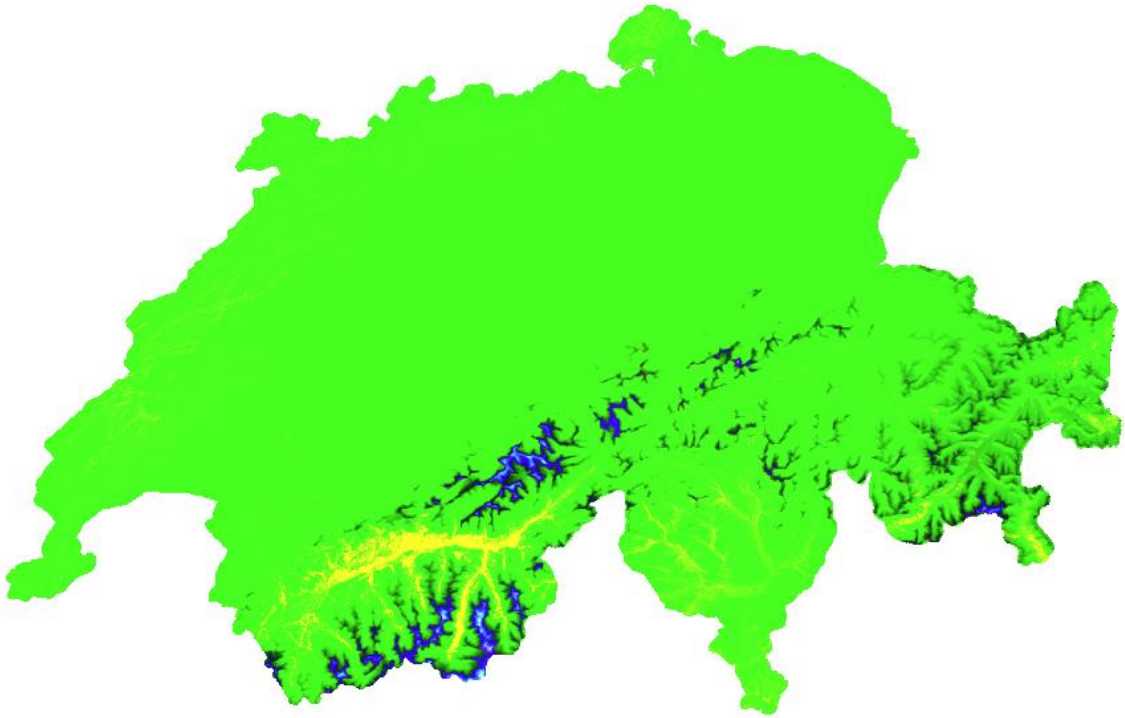

Abb. 100: Modellierte fundamentale Nische der Arve gemäss ForClim (Multiband), mit der Klimazukunft CLM für die Periode 2070-2099. Legende: Schwarz = Baumart kommt potentiell vor, rot = Baumart limitiert wegen Trockenheit, blau = Baumart limitiert wegen Wärmesumme, grün = Baumart limitiert wegen Wintertemperatur, weiss = Baumart limitiert wegen allen 3 Faktoren.

Modellierung des Arvenareals mit A1B mit Ensembles (Periode 2051-2080)

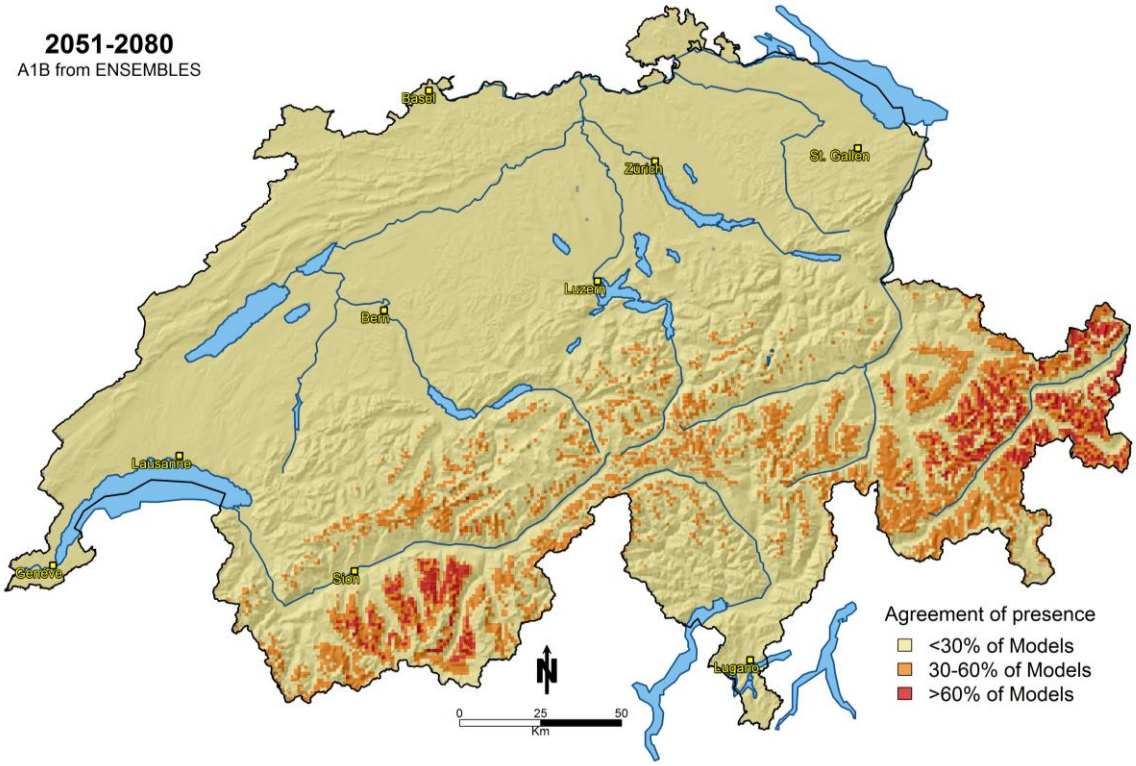

Abb. 101: Modellierte Habitateignung der Arve (gemäss PorTree), Modellierung mit A1B mit Ensembles für die Periode 2051 – 2080. Legende: > 60 % = wenn mindestens 60 % der Modell-/Resampling Karten die Art als «Vorkommen» klassieren, wird das Habitat als geeignet eingestuft.

5 Diskussion

5.1 Vergleich von PorTree⁺- und Abenis-Modellierungen

Wie bereits erwähnt, liegen die Hauptunterschiede der beiden Modelle dort, wo wenige LFI-Punkte vorhanden sind. PorTree⁺ funktioniert probabilistisch, Extrempunkte werden nicht berücksichtigt. Die Modelle von Abenis umreissen eher alle Randpunkte. Evtl. würde das Dazunehmen der «Walddatenbank» (WSL-Datenbank mit Wald-Vegetationsaufnahmen) die PorTree⁺-Ergebnisse verbessern. Dies könnte aber z.T. auch neue Probleme schaffen, da die Walddatenbank geklumpte, unausgeglichene Flächen enthält. Allgemein gilt bei statistischen Modellen, dass sie eher konservativ am Rand modellieren, bei wenigen Punkten am Rand werden diese nicht berücksichtigt.
Ebenfalls können Unterschiede auftreten, wenn Baumarten in unterschiedlichen Wuchsformen berücksichtigt werden (z.B. wird die Winterlinde bei PorTree⁺ nur als Baum berücksichtigt, nicht als Strauchform und bei Abenis wird die Traubeneiche auch als Krüppelform berücksichtigt).
Die Zukunftsmodellierungen von Abenis sind nur innerhalb des heutigen Waldareals realistisch, eine Begrenzung gegen oben fehlt bei den Modellierungen (die obere Waldgrenze wurde im Teilprojekt 1 nicht untersucht und nur behelfsmässig modelliert für die Eingrenzung der Modellierungen im Teilprojekt 1 auf das heutige Waldareal). Oberhalb der heutigen Waldgrenze ist eine Modellierung schwierig aufgrund von bremsenden Einflüssen und aufgrund der langsamer steigenden Waldgrenze (im Gegensatz zu den Waldhöhenstufen).

5.2 Anmerkungen zu ForClim

In Anbetracht der grossen Unsicherheiten, die mit einem Schluss von der jährlichen bioklimatischen Limitierung des Zuwachses resp. der Verjüngung auf die Grenzen der fundamentalen Nische der Baumarten verbunden sind, ist der «erste Wurf», den Dario Martin-Benito vorgelegt hat, nach Erachten von H. Bugmann sehr gut gelungen. Dies bedeutet jedoch nicht, dass Verbesserungen unnötig oder gar unmöglich wären.
Mittelfristig wird für ForClim angestrebt, die überaus simple Phänologie in ForClim (uWiT) durch ein stärker mechanistisch abgestütztes Modell zu ersetzen, wobei mehr Komplexität nicht notwendigerweise bessere Aussagen bedeutet (vgl. Basler 2016). Die Unsicherheit bezüglich der Frage, welcher Zusammenhang zwischen phänologischen Effekten, die sich auf die Verjüngung auswirken, und der fundamentalen Nische besteht, bleibt damit aber vollumfänglich erhalten.
Eine verbesserte «Kalibrierung» des Ansatzes sollte nicht auf Bauchgefühl basieren müssen, sondern auf echten Daten. Diese sind aber nicht wirklich verfügbar, da die tatsächliche Verbreitung der Arten im Raum nicht notwendigerweise die fundamentale Nische repräsentiert; es gibt sogar immer stärkere Zweifel an dieser Annahme (Tinner et al. 2016).

Bei ForClim wurden Potenzialkarten simuliert OHNE KONKURRENZ. Wenn die simulierten Verbreitungen also grösser sind als die reale Verbreitung, so muss das nicht notwendigerweise ein Problem der Modellierung sein (im Gegensatz zu den SDMs), sondern es ist sogar zu erwarten: die Konkurrenz reduziert die Verbreitung auf ein Gebiet, das kleiner als das Potenzialgebiet ist.
Aussagen wie die Folgende, dass Art X am Ort Y fehlt wegen Z (und deshalb vom Modell falsch simuliert werde), sind mit Vorsicht zu geniessen. Erstens ist nicht immer ganz sicher, warum die Art dort tatsächlich fehlt (es gibt manchmal konkurrierende Hypothesen, und nur weil man in der Praxis generell der Ansicht ist, dass es Faktor Z sei, muss das noch nicht wahr sein). Zudem ist denkbar, dass Faktor Z der Art X in der Konkurrenz mit den anderen zu schaffen macht, dass er sie aber nicht zum Absterben bringt. Dann ist es letztlich die Konkurrenz, welche Art X im Gebiet Y eliminiert - ohne Konkurrenz wäre sie vielleicht vorhanden, wenn auch nicht gerade mit guten Wuchsformen.
Da die Karten von PorTree$^+$ und Abenis das Vorkommen der Baumarten mit heutiger Konkurrenz abbilden, sind diese nur begrenzt vergleichbar mit den ForClim-Karten. Bei ForClim ist die Konkurrenz ausgeblendet. Wenn hingegen keine Verbreitung simuliert wird an Orten, wo eine Art heute auftritt, dann dürfte das meist ein Problem des Modells sein.

5.3 Umgang mit den Resultaten

Es wurde diskutiert, wie die Karten von ForClim und PorTree$^+$ verwendet werden dürfen, ob für mittlere Verhältnisse (nicht für Extremstandorte) z.B. ein sogenannter «Durchstich» (Überlagerung aller Baumartenkarten und Eruierung an einem beliebigen Punkt, welche Baumarten nach Modell X vorkommen/nicht vorkommen könnte) gemacht werden darf – als Idee was vorhanden sein könnte und was nicht. Für ForClim ist nur eine regionale Betrachtung möglich, nicht pro Koordinaten. Bei PorTree$^+$ kann grundsätzlich gezeigt werden, welche Arten vorkommen könnten:

- vom Klima her Habitat geeignet für Baumart → Klimahabitat stimmt.
- von Geologie her ist dies bei PorTree$^+$ nicht möglich.

→ Bei PorTree$^+$ kann somit gezeigt werden, was lokal / regional vorkommt - was bei vorhandenen Böden vorkommt.

Wichtig ist bei den Zukunftskarten, dass es sich dabei um die Habitateignung von Baumarten handelt und nicht um die zukünftigen Vorkommensgebiete der Baumarten (siehe Erläuterungen in der Einleitung).

5.4 Inputs vom Workshop «Non-analogue forest sites / Nicht-analoge Waldstandorte» vom 22.9.2016

Folgende Einwände / Verbesserungsvorschläge wurden am Workshop vom 22.9.2016 vorgebracht:

- H.-G. Michiels: Die Verwendung der aktuellen Verbreitung der Buche für eine Voraussage der zukünftigen Verbreitung der Baumart könnte in die Irre führen, da die Buche in den Tieflagen auch aufgrund von früherer Landnutzung fehlen könnte.
- G. Carraro: In den Südalpen können Reliktbestände von Weisstannen auf warmen und trockenen Standorten gefunden werden. Diese weite genetische Amplitude der Weisstanne könnte in Zukunft nützlich werden. Brang: Aus Sicht des Waldmanagers sind Reliktstandorte problematisch. Wenn man dort Bäume pflanzt, will man sicher sein, dass die verwendete Provenienz adaptiert ist an das lokale Klima. Man will sich nicht auf einzelne Punktinformationen verlassen müssen.

6 Schlussfolgerungen

Die Verbreitungskarten stellen eine wichtige Ergänzung zu den Höhenstufen- und Arealmodellierungen des Projekts «Adaptierte Ökogramme» dar. Die Modelle von Abenis werden durch diesen Vergleich plausibilisiert. Die Modellierungen von Abenis und PorTree^{+} stimmen meist sehr gut überein. Die grössten Unterschiede traten bei den Linden, bei der Esche und z.T. bei den Eichen auf. Allgemein liegen die Hauptunterschiede dort, wo wenige LFI-Punkte vorhanden sind.
Aufgrund der vorliegenden Resultate gehören v.a. die Baumarten Traubeneiche, Stieleiche, Esche, Kirsche sowie die Waldföhre und die Lärche in höheren Lagen zu den Gewinnern. Die Baumarten Buche, Fichte und Weisstanne werden mit den künftigen Klimaänderungen in tiefen Lagen eher Mühe haben und ihr Habitateignungsareal wird sich in höhere Lagen verschieben und gegenüber heute auch verkleinern. Nach Zimmermann et al. 2016 haben die meisten Arten mit Arealgewinnen warm-temperate bis submediterrane Verbreitung und gelten als an Trockenheit angepasst.
Insbesondere die Laubbaumarten werden sich längerfristig in höhere Lagen ausbreiten können, da die Temperaturen während dem Blattaustrieb zunehmen (weniger Spätfrostgefahr in der Periode 2070-2099) und in hohen Lagen die kambiale Holzbildung (diese stoppt bei ca. 5°C, Rossi et al. 2007) abgeschlossen werden kann.
Nicht berücksichtigte, aber ebenfalls wichtige Parameter wie die unterschiedlichen Auswirkungen des Nährstoffeintrags und der Nährstoffversorgung, des Einflusses des Waldinnenklimas, etc. würden diese Habitateignungsareale sicher ebenfalls noch beeinflussen – aber auch die in Zukunft häufiger auftretenden Waldbrände, nicht nur in den Südtälern, dem Wallis und Graubünden (nach Pfister 1999 entzündeten sich bei der Trockenheit von 1540 auch in der Nordschweiz viele Wälder, er zitiert u.a. «es giengen auch die Wälder von allzugrosser Hitz an, und verbrannten von Thann bis in Lothringen vil hundert Juchert Wäldt»). Auch die Schadorganismen werden die Verbreitung der Baumarten mitbestimmen, sowie die evtl. zukünftig weiter ansteigenden Sturmschäden (Usbeck et al. 2010, wobei Seidl et al. 2014 für den Alpenraum nach 2020 eine Abnahme des Windwurfschadens prognostizieren und Schiesser et al. 1997 belegen zwar, dass seit 1864 die Tage mit hohen Windgeschwindigkeiten generell zurückgegangen seien) und die v.a. bis 2050 zunehmende Nassschneegefahr

(Castebrunet et al. 2014, entscheidend v.a. bei Eichen- und Lärchenverjüngung). Einige dieser Faktoren (Sturmwurf, Käferbefall, Trockenheit) haben bereits in den letzten 10 Jahren dazu geführt, dass der Fichtenanteil im Mittelland in den letzten Jahren um 31 % zurückging (Camin et al. 2015).
Nach Etzold et al. 2016 vermindern die «schwächenden Faktoren» die Baumvitalität über lange Zeit (dazu gehören z.B. die genetische Veranlagung, das Alter, das Klima und Bodenfaktoren), während die «auslösenden Faktoren» eher kurzfristige Ereignisse wie Frost, Stürme, Trockenheit oder Entlaubung durch Insekten darstellen und die «beitragenden Faktoren» (z.B. Pilzbefall oder Viruserkrankungen) wiederum eher über längere Zeit wirken (in Etzold et al. 2016 werden zudem Mortalitätsraten für verschiedene Baumarten in verschiedenen Höhenlagen in der Vergangenheit und für die Zukunft prognostiziert). Nach Etzold et al. 2016 besteht bei der Buche, der Waldföhre, der Fichte und der Weisstanne ein signifikanter direkter oder indirekter Zusammenhang zwischen Mortalität und Trockenheitsereignissen und/oder Temperatur.
Pfister 1999 zitiert in seinem Buch «Wetternachhersage» H. Wanner: «Sicherheit wird es mit Sicherheit nie geben!» und weist darauf hin, dass die innerhalb des Wissenschaftssystems üblichen statistischen Verfahren in erster Linie die Gefahr des sogenannten Fehlers erster Art möglichst geringhalten, nämlich die Gefahr der fälschlichen Unterstellung eines Effekts (im Unterschied zum fälschlichen Übersehen eines Effekts). So liege die Beweislast stets bei dem, der einen bisher unbekannten Effekt behauptet, und nicht bei dem, der eine solche Behauptung bestreitet. Wenn kein signifikanter Effekt nachgewiesen werden kann, rechtfertigt dies nach Pfister aber keinesfalls den Übergang zu der Behauptung, wie dies in der Klimapolitik üblich sei, dass die fragliche Entwicklung harmlos ist (Lübbe 1997).
Die Resultate wurden an sogenannten Waldtests, an der Gebirgswaldgruppen-Tagung und am Workshop «Non-analogue forest sites» mit internationalen Experten diskutiert (22.9.2016). Die Verbreitungskarten wurden als eine gute Hilfe für konkrete Entscheide im Bestand gewertet.

7 Projektablauf

Das Projekt lief planmässig ab. Die Abgabefrist musste verlängert werden.

8 Ausblick

Die Resultate sollen der Praxis Hinweise geben, mit was für Veränderungen bei den verschiedenen Baumarten und Szenarien zu rechnen ist. Die Ergebnisse werden einfliessen in die von der Programmleitung erarbeiteten Merkblätter und in die Baumartenempfehlungen für die Zukunft (Methodenbeschrieb in Teilprojekt 1).
Mithilfe der Baumartenverbreitungskarten und weiteren Projektergebnissen aus dem Projekt «Adaptierte Ökogramme» sind Rückschlüsse auf die künftige Baumartenzusammensetzung und die Waldstandorte in konkreten Waldbeständen möglich. Die Karten der zukünftigen Kerngebiete unterstützen das Erarbeiten von Baumartenempfehlungen. Eine Verbesserung der Arealkarten wird möglich sein durch die sich in Entwicklung befindenden besseren und höher aufgelösten regionalen Klimamodelle (Projekt CORDEX3; einige Modelle werden für die Schweiz eine Auflösung von 3 km haben) und die darauf basierenden, von MeteoSchweiz neu erarbeiteten Klimaszenarien für die Schweiz. Ebenfalls würde z.T. neues, noch

zu erstellendes Kartenmaterial zu Verbesserungen bei den Verbreitungsarealen führen, z.B. bei der Fichte und der Arve die Herleitung einer Frosttrockniskarte oder bei den Eichen und der Lärche die Herstellung einer Nassschneekarte. Zudem wäre für die gegenüber Schadorganismen sehr anfälligen Baumarten der Einbezug derselben wichtig. Dazu wäre die Transferierung der Klimakarten in die Periode 2045-2070 sinnvoll, da die Schadorganismen schneller zu Änderungen in der Baumartenverbreitung führen werden als das meist eher langsame Absterben der Baumarten aufgrund von Klimaparametern (ausser bei Extremereignissen).
Ein «sauberer» Vergleich der Modellierungen würde eigentlich erfordern, an konkreten Standorten (z.B. bei Marteloskopflächen) die Modelle laufen zu lassen und dann einen Vergleich zu ziehen. Nach H. Lischke wird neu im Modell TreeMig sichtbar, wie Arten wandern (Prognose von Samenverbreitung). Bei ForClim müssten bei Anwendung auf einzelnen Flächen (Marteloskopflächen) zusätzliche Baumarten, die heute selten sind (z.B. Feldahorn) oder die heute noch nicht vorkommen (z.B. Korkeiche) mit einbezogen werden, um die Veränderungen durch das Einwandern von Baumarten zeigen zu können. Dies wäre vor allem bei tiefer gelegenen Flächen wichtig.

9 Literatur

Altenkirch, W., Majunke, C. & Ohnesorge, B. (Hrsg.), 2002. Waldschutz auf ökologischer Grundlage. Ulmer Vlg., Stuttgart. 434 S.

Araújo, M.B. & Guisan, A., 2006. Five (or so) challenges for species distribution modelling. J. Biogeogr. 33: 1677-1688.

Barengo, N., Rudow, A. & Schwab, P., 2001. Förderung seltener Baumarten auf der Schweizer Alpennordseite. Merkblätter ETHZ/BUWAL.

Basler, D., 2016. Evaluating phenological models for the prediction of leaf-out dates in six temperate tree species across central Europe. Agricultural and Forest Meteorology 217: 10-21.

Bircher, N., Cailleret, M. & Bugmann, H., 2015. The agony of choice: different empirical mortality models lead to sharply different future forest dynamics. Ecol. Appl. 25: 1303-1318.

Bircher, N., Cailleret, M., Zingg, A. & Bugmann, H., 2016. Potenzielle Grundflächenveränderungen auf Bestandesebene im Klimawandel. In: Pluess, A.R., Augustin, S., Brang, P. (Red.), Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptionsstrategien. BAFU, Ber, WSL, Birmensdorf. Haupt Vlg., Bern, Stuttgart, Wien. pp. 157-175.

Booth, T.H., Nix, H.A., Busby, J.R., Hutchinson, M.F. & Franklin, J., 2014. bioclim: the first species distribution modelling package, its early applications and relevance to most current MaxEnt studies. Divers. Distrib. 20: 1-9.

Brändli, U.-B., 1996. Die häufigsten Waldbäume der Schweiz. Ergebnisse aus dem Landesforstinventar 1983 – 85: Verbreitung, Standort und Häufigkeit von 30 Baumarten. Ber. Eidgenöss. Forsch.anst. Wald Schnee Landsch. 342: 278 S.

Bréda, N., Huc, R., Granier, A. & Dreyer, E., 2006. Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. Ann. For. Sci. 63, pp. 625-644.

Bugmann, H., 1996. A simplified forest model to study species composition along climate gradients. Ecology 77: 2055–2074.

Burnand, J., 1976. *Quercus pubescens*-Wälder und ihre ökologischen Grenzen im Wallis (Zentralalpen). Diss. ETH, Zürich.

Camin, P., Cioldi, F. & Röösli, B., 2015. Holzvorrat. In: Rigling, A., Schaffer, H.P. (Eds.) Waldbericht 2015. Zustand und Nutzung des Schweizer Waldes. Bern, Bundesamt für Umwelt. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, pp. 32-33.

Castebrunet, H., Eckert, N., Giraud, G., Durant, Y. & Morin, S., 2014. Projected changes of snow conditions and avalanche activity in a warming climate: the French Alps over the 2020–2050 and 2070–2100 periods. Cryosphere 8, pp. 1673-1697.

Etzold, S., Wunder, J., Braun, S., Rohner, B., Bigler, C., Abegg, M. & Rigling, A., 2016. Mortalität von Waldbäumen: Ursachen und Trends. In: Pluess, A.R., Augustin, S., Brang, P. (Red.), Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptionsstrategien. BAFU, Ber, WSL, Birmensdorf. Haupt Vlg., Bern, Stuttgart, Wien. Pp. 177-197.

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 & Sargans, Forstingenieurbüro Frehner. 194 S.

Guisan, A. & Zimmermann, N.E., 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. Ecol. Model. 135: 147-186.

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. Chur, Abenis AG. 149 S.

Jakoby, O., Stadelmann, G., Lischke, H. & Wermelinger, B., 2016. Borkenkäfer und Befallsdisposition der Fichte im Klimawandel. In: Pluess, A.R., Augustin, S., Brang, P. (Red.), Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptionsstrategien. BAFU, Bern, WSL, Birmensdorf. Haupt Vlg., Bern, Stuttgart, Wien. pp. 247-265.

Kint, V., Aertsen, W., Campioli, M., Vansteenkiste, D., Delcloo, A. & Muys, B., 2012. Radial growth change of temperate tree species in response to altered regional climate and air quality in the period 1901–2008. Climatic Change 115:343–363.

Köcher, P., Gebauer, T., Horna, V. & Leuschner, C., 2009. Leaf water status and stem xylem flux in relation to soil drought in five temperate broad-leaved tree species with contrasting water use strategies. Annals of Forest Science 66: 101.

Köhler, P., Chave, J., Riéra, B. & Huth, A., 2003. Simulating the long-term response of tropical wet forests to fragmentation. Ecosystems 6: 114-128.

Lendzion, J. & Leuschner, C., 2008. Growth of European beech (Fagus sylvatica L.) seedlings is limited by elevated atmospheric vapor pressure deficits. For. Ecol. Manage.256: 648-655.

Lévesque, M., Rigling, A., Bugmann, H., Weber, P. & Brang, P., 2014. Growth response of five co-occuring conifers to drought across a wide climatic gradient in Central Europe. *Agriculture and Forest Meteorology*, 197: pp. 1-12.

Lübbe, W., 1997. Der Gutachterstreit – ein wissenschaftliches Problem? In Gaia, 6/3: pp. 177-181.

Maiorano, L., Cheddadi, R., Zimmermann, N.E., Pellissier, L., Petitpierre, B., Pottier, J., Laborde, H., Hurdu, B.I., Pearman, P.B., Psomas, A., Singarayer, J.S., Broennimann, O., Vittoz, P., Dubuis, A., Edwards, M.E., Binney, H.A. & Guisan, A., 2013. Building the niche through time: using 13,000 years of data to predict the effects of climate change on three tree species in Europe. Global Ecol. Biogeogr. 22: 302-317.

Pfister, C., Bütikofer, N., Schuler, A. & Volz, R., 1988. Witterungsextreme und Waldschäden in der Schweiz. Bundesamt für Forstwesen und Landschaftsschutz, Bern. 70 S.

Pfister, C., 1999: Wetternachhersage. 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen. Haupt Vlg, Bern. 304 S.

Rasche, L., Fahse, L., Zingg, A. & Bugmann, H., 2012. Enhancing gap model accuracy by modeling dynamic height growth and dynamic maximum tree height. Ecol. Model. 232: 133-143.

Remund, J., von Arx, G., Gallien, L., Rebetez, M., Huber, B. & Zimmermann, N.E., 2016. Klimawandel in der Schweiz – Entwicklung waldrelevanter Klimagrössen. In: Pluess, A.R., Au-

gustin, S., Brang, P. (Red.), Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptionsstrategien. BAFU, Ber, WSL, Birmensdorf. Haupt Vlg., Bern, Stuttgart, Wien. pp. 23-37.

Rossi, S., Deslauriers, A., Anfodillo, T. & Carraro, V., 2007. Evidence of threshold temperatures for xylogenesis in conifers at high altitudes. Oecologia, 152(1): pp. 1-12.

Scherrer, D., Bader, M.K.F. & Körner, C., 2011. Drought-sensitivity ranking of deciduous tree species based on thermal imaging of forest canopies. Agric. For. Meteorol. 151, pp. 1632-1640.

Schiesser, H.-H., Pfister, C. & Bader, J., 1997. Winter Storms in Switzerland North oft he Alps 1864/65-1993/94. In: Theoretical and Applied Climatology, 58: pp. 1-19.

Schmid, U., Bircher, N. & Bugmann, H., 2015. Naturnaher und multifunktionaler Waldbau in Zeiten des Klimawandels – eine Fallstudie. Schweiz Z Forstwes 166: 314–324.

Seidl, R. & Lexer, M.J., 2013. Forest management under climatic and social uncertainty: trade-offs between reducing climate change impacts and fostering adaptive capacity. J. Environ. Manage. 114: 461-469.

Seidl, R., Schelhaas, M.J., Rammer, W. & Verkerk, P.J., 2014. Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. Nature Climate Change, Volume 4, pp. 806–810.

Siccama, T.G., Botkin, D.B., Bormann, F.H. & Likens, G.E., 1969. Computer simulation of a northern hardwood forest. Bull. Ecol. Soc. Amer. 50: 93.

Tinner, W., Conedera, M., Bugmann, H., Colombaroli, D., Gobet, E., Vescovi, E., Heiri, O., Joos, F., Luterbacher, J., La Mantia, T., Pasta, S. & Henne, P., 2016. Europäische Wälder unter wärmeren Klimabedingungen: neue Erkenntnisse aus Paläoökologie und dynamischer Vegetationsmodellierung. AFZ/Der Wald, 18: 45-49.

Tinner, W., Colombaroli, D., Heiri, O., Henne, P.D., Steinacher, M., Untenecker, J., Vescovi, E., Allen, J.R.M., Carraro, G., Conedera, M., Joos, F., Lotter, A.F., Luterbacher, J., Samartin, S. & Valsecchi, V. et al., 2013. The past ecology of Abies alba provides new perspectives on future responses of silver fir forests to global warming. Ecological Monographs, 83(4), pp. 419–439.

Usbeck, T., Wohlgemuth, T., Dobbertin, M., Pfister, C., Bürgi, A. & Rebetez, M., 2010. Increasing storm damage to forests in Switzerland from 1858 to 2007. Agric. For. Meteorol. 150: 47-55.

von Arx, G., Dobbertin, M. & Rebetez, M., 2012. Spatio-temporal effects of forest canopy on understory microclimate in a long-term experiment in Switzerland, Agric. For. Meteorol, 166-167: 144-155.

Wermelinger, B., Jakoby, O., Stadelmann, G., Bigler, C., Lischke, H., Meier, F., Bugmann, H. & Rigling, A., 2015. Borkenkäfer als Schlüsselfaktoren der zukünftigen Waldnutzung? Schlussbericht. Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel» des Bundesamtes für Umwelt BAFU, Bern und der Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf. 43 S.

Zimmermann, N. E. & Bugmann, H., 2008. Die Kastanie im Engadin – oder was halten Baumarten von modellierten Potenzialgebieten? Schweiz Z Forstwes 159: 326–335.

Zingg, A. & Bürgi, A., 2008. Trockenperioden seit 1900 und Waldwachstum: eine Analyse langfristiger Datenreihen. Schweiz. Z. Forstwes. 159, pp. 352-361.

Internetseiten: https://www1.ethz.ch/wm/sebapub/index