

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

## Übersicht über die Teilberichte

Monika Frehner & Barbara Huber

Mit Beiträgen von Päivi Gubelmann (Teil 1 und 3), Nora Zürcher-Gasser (Teil 4 und 5), Ni-  
klaus E. Zimmermann (Teil 3), Sabine Braun (Teil 2), Martin Scherler (Teil 2), Andreas Zischg  
(Teil 1), Jacques Burnand (Teil 1), Gabriele Carraro (Teil 1), Harald Bugmann (Teil 3) und  
Achilleas Psomas (Teil 3)

Fachliche Unterstützung durch Ludwig Z'graggen



**ABENIS AG**  
INGENIEURE + PLANER



Monika Frehner  
Sargans



April 2019

## Autoren

Monika Frehner<sup>1</sup> & Barbara Huber<sup>2</sup>. Mit Beiträgen von Päivi Gubelmann<sup>2</sup> (Teil 1 und 3), Nora Zürcher-Gasser<sup>3</sup> (Teil 4 und 5), Niklaus E. Zimmermann<sup>4</sup> (Teil 3), Sabine Braun<sup>5</sup> (Teil 2), Martin Scherler<sup>4</sup> (Teil 2), Andreas Zischg<sup>6</sup> (Teil 1), Jacques Burnand<sup>7</sup> (Teil 1), Gabriele Carraro<sup>8</sup> (Teil 1), Harald Bugmann<sup>9</sup> (Teil 3) und Achilleas Psomas<sup>4</sup> (Teil 3).

<sup>1</sup> Forstingenieurbüro, Sixerstrasse 9, 7320 Sargans

<sup>2</sup> Abenis AG, Quaderstrasse 7, 7000 Chur

<sup>3</sup> Gadola AG, Via Caho 10, 7172 Rabius

<sup>4</sup> Eidg. Forschungsanstalt WSL, Zürcherstr. 111, 8903 Birmensdorf

<sup>5</sup> Institut für Angewandte Pflanzenbiologie, Sandgrubenstrasse 25, 4124 Schönenbuch

<sup>6</sup> Geographisches Institut der Universität Bern, Hallerstrasse 12, 3012 Bern

<sup>7</sup> Vegetation-Landschaft-Umwelt, Zähringerstrasse 9, 8001 Zürich

<sup>8</sup> Dionea SA, Lungolago Motta 8, 6600 Locarno

<sup>9</sup> Institut für Terrestrische Ökosysteme, ETH Zürich, Universitätsstrasse 16, 8092 Zürich

Ein Projekt-Schlussbericht aus dem Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel» von BAFU und WSL ([www.wsl.ch/wald\\_klima](http://www.wsl.ch/wald_klima)).

Ein Teil des Teilprojektes 1 wurde ausserhalb des Forschungsprogramms vom BAFU finanziert, der Vollständigkeit halber wird er aber in diesen Schlussbericht integriert.

Projektlaufzeit: 1.1.2015 bis 31.12.2018.

## Zitierung

Frehner, M. & Huber, B. Mit Beiträgen von Päivi Gubelmann (Teil 1 und 3), Nora Zürcher-Gasser (Teil 4 und 5), Niklaus E. Zimmermann (Teil 3), Sabine Braun (Teil 2), Martin Scherler (Teil 2), Andreas Zischg (Teil 1), Jacques Burnand (Teil 1), Gabriele Carraro (Teil 1), Harald Bugmann (Teil 3), Achilleas Psomas (Teil 3), 2019. Schlussbericht des Projektes «Adaptierte Ökogramme» im Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel»: Übersicht über die Teilberichte. Sargans, Forstingenieurbüro Frehner & Chur, Abenis AG.

Im pdf-Format zu beziehen über [www.wsl.ch/wald\\_klima](http://www.wsl.ch/wald_klima)



## Dank

Ohne die wertvolle Unterstützung durch Ludwig Z'graggen wäre die Durchführung dieser Teilprojekte in dieser Form nicht möglich gewesen. Durch seine grosse Mithilfe bei der Entwicklung und Erarbeitung der klimatologischen Grundlagen 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 der Teilprojekte bei. Wir sind ihm zu grossem Dank verpflichtet. Desweiteren möchten wir uns bei den folgenden Experten bedanken: Hans-Ueli Frey und Brächt Wasser.

Wir möchten uns beim Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel» und beim BAFU bedanken für die Finanzierung der Projekte und die wertvolle Hilfe bei der Detailplanung der Projekte. Ausserdem bedanken wir uns bei den Kantonen für das zur Verfügung stellen der kantonalen Grundlagen und beim LFI-Team für den Erhalt der LFI-Daten.

©Abenis AG, Chur, 2018

## Einleitung

Das Hauptziel des Projektes «Adaptierte Ökogramme» bestand darin, Grundlagen für den Einbezug des Klimawandels in die waldbauliche Entscheidungsfindung in einem konkreten Bestand zu erarbeiten, d.h. auf kleinen Waldflächen von teils unter einer Hektare (ha). Der Klimawandel wirkt sich je nach Bodeneigenschaften unterschiedlich aus. Bodenkarten, die eine korrekte Ansprache von Flächen weniger als einer Hektare erlauben, sind aber in der Schweiz nur auf kleinen Flächen vorhanden. Deshalb waren keine genügend genauen Grundlagen vorhanden, um Habitateignungsmodelle von Baumarten zu rechnen, die direkt in einem Bestand angewendet werden können.

In der Schweiz werden waldbauliche Entscheide häufig auf der Grundlage von Waldstandortstypen getroffen. Deshalb wurden auch im Schutzwald (50% der Schweizer Waldfläche) im Rahmen von NaiS («Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald», Frehner et al. 2005/2009) Anforderungsprofile in Bezug auf den Standort beschrieben. Dazu wurden die in den kantonalen Schlüsseln der Schweiz beschriebenen Standortstypen als NaiS-Standortstypen zusammengefasst. Im Projekt «NaiS-LFI: Zuordnung der LFI-Stichprobenpunkte zu Waldgesellschaften» (2013–2019) werden die NaiS-Standortstypen soweit ergänzt, dass alle LFI-Stichprobenpunkte einem NaiS-Standortstyp zugeordnet werden können. Die NaiS-Standortstypen decken alle heute in der Schweiz vorkommenden Waldstandorte ab. Etwa ein Drittel der Waldfläche der Schweiz weist heute eine NaiS-nahe Waldstandortskartierung auf. Auch auf der übrigen Waldfläche gehört es zur guten fachlichen Praxis der Förster, im Rahmen von Schutzwaldpflege und naturnahem Waldbau den Waldstandort zu berücksichtigen.

Die Definition des Standorts lautet: Der Standort eines Baumbestandes umfasst die Gesamtheit aller Einflüsse, die auf die Bäume eines Waldbestandes wirken, zum Beispiel Klima, Bodeneigenschaften, Topografie, Lawinen, Steinschlag etc. (Ott et al. 1997). Da im Standort das «Klima» und der «Boden» enthalten sind und da die Einteilung in Waldstandorte schon heute von der Praxis im Gelände angewandt wird, werden die Standortstypen verwendet, um Grundlagen für den Einbezug des Klimawandels in die waldbauliche Entscheidungsfindung auf Bestandesebene zu erarbeiten.

Im Projekt «Adaptierte Ökogramme» werden zwei Klimazukünfte angewendet. Grundlage für beide ist das vom Bund verwendete Emissionsszenario A1B. Aus der Vielfalt der zur Verfügung stehenden Klimamodelle wurden zwei extreme ausgewählt, ein weniger trockenes (RegCM3) und ein trockeneres (CLM). So versucht man, den Bereich der möglichen Klimaentwicklung innerhalb des Emissionsszenarios A1B abzubilden. Die mögliche Klimaentwicklung wurde für die Jahre 2070–2099 modelliert, da Bestände, die heute verjüngt werden, diese Zeitperiode mindestens noch erleben sollten.

## Teil 1: Quantifizierung und Verschiebung der Höhenstufengrenzen sowie des Tannen- und Buchenareals in der Schweiz mit zwei Klimazukünften

Ziel dieses Projektteiles ist es, die Vegetationshöhenstufengrenzen und die Grenzen des Tannen- und Buchenareals zu quantifizieren, damit deren Lage mit den beiden Klimazukünften neu berechnet werden kann. Die Höhenstufengrenzen können im Feld normalerweise auf  $\pm 20$  m genau festgelegt werden. Die schon vorhandenen Klimakarten wiesen eine Auflösung von 250 m x 250 m auf und waren damit zu ungenau, um die Höhenstufengrenzen zu beschreiben. Deshalb wurden zunächst Klimakarten mit einer Auflösung von 25 m x 25 m erarbeitet (Vorprojekt Huber et al. 2015). Im selben Projekt wurde als Nächstes analysiert, welche

Klimafaktoren die Grenzen der Vegetationshöhenstufen und Areale beeinflussen, um deren Änderungen mit einem künftigen Klima berechnen zu können.

Zur Berechnung des Regressionsmodelles, mit dem die Vegetationshöhenstufen beschrieben werden, wurden aus bestehenden Waldstandortskarten typische Höhenstufengrenzen herausgelesen und als Referenz verwendet. Zur Validierung wurden die Höhenstufen, die für das heutige Klima modelliert wurden, verglichen mit den Höhenstufen, die auf LFI-Probeflächen im Rahmen vom Projekt «NaiS-LFI: Zuordnung der LFI-Stichprobenpunkte zu Waldgesellschaften» (2013 – 2019) angesprochen wurden.

Beim Tannen- und Buchenareal wurden die Grenzen aus der Karte der Standortsregionen nach NaiS als Referenz verwendet. Zum Teil wurden diese Grenzen noch mit Daten aus Bestandeskarten und mit Lokalkenntnissen verfeinert. Die Grenzen wurden mit einem Expertensystemansatz (Fuzzy-logic) modelliert.

Das Resultat sind Karten der Schweiz mit modellierten Vegetationshöhenstufen inkl. Tannen- und Buchenareal für das heutige Klima und für die beiden Klimazukünfte. Das heisst, an jedem Ort der Schweizer Waldfläche kann eine Vegetationshöhenstufe nach dem heutigen Klima sowie nach der weniger trockenen und der trockeneren Klimazukunft abgelesen werden.

Eine Auswertung bezüglich der Verschiebung der Höhenstufen bei den Klimazukünften RegCM3 und CLM gegenüber heute zeigte, dass nicht immer die ganze Höhenstufe, die wir heute vorfinden, bei den Modellen mit den zwei Klimazukünften jeweils wieder einer einzigen Höhenstufe zugeordnet wird. Zwar wird z. B. die Fläche der heutigen obermontanen Stufe 2070 – 2099 im Jura und im Mittelland fast vollständig als submontan modelliert. Hingegen ist die Fläche der heutigen hochmontanen Stufe nach den Modellen 2070 – 2099 in den Höhenstufen collin, submontan, untermontan und obermontan zu finden.

## **Teil 2: Quantifizierung der Lage von Standortstypen im Ökogramm**

Die NaiS-Standortstypen werden pro Vegetationshöhenstufe und Standortsregion in einem Ökogramm mit den Achsen sauer-basisch und nass-trocken dargestellt. Bei einer Verschiebung der Höhenstufe gemäss Teil 1 wechselt mit der Höhenstufe daher auch das zu verwendende Ökogramm. Ziel von Projektteil 2 war es abzuklären, ob die verwendeten Klimazukünfte auch eine Verschiebung innerhalb des Ökogrammes entlang der Achse nass-trocken verursachen.

Dazu wurden zuerst verschiedene Trockenheitsindices miteinander verglichen. Dann wurde statistisch analysiert, welche Faktoren die Position eines Standortstyps auf der Achse nass-trocken bestimmen, und es wurde deskriptiv-grafisch die Position untersucht. Beide Vorgehensweisen ergaben, dass auch Standortsregion und Vegetationshöhenstufe die Feuchteachse beeinflussen. Die Auswirkungen der Klimaänderung auf die Positionen von Standortstypen auf der mit fünf Einheiten skalierten Feuchteachse betragen im Mittel 0.34 Einheiten bei Anwendung des CLM-Modells und 0.10 Einheiten, wenn das RegCM3-Modell angewandt wurde. Diese Änderungen sind so gering, dass es nicht nötig ist, sie durch eine generelle Verschiebung der Position eines Standorts im Ökogramm in Richtung trockenerer Verhältnisse zu berücksichtigen. Daher soll im «Ziel-Ökogramm» der NaiS-Standortstyp am gleichen Ort des Ökogrammes gewählt werden wie im heutigen Ökogramm. Befinden sich im Ziel-Ökogramm an der Stelle des ursprünglichen Standortstyps im Ausgangs-Ökogramm mehrere Standortstypen, soll der trockenere Standortstyp gewählt werden.



### **Teil 3: Vergleich verschiedener Modelle der Baumartenverbreitung**

Im Teil 3 (Frehner et al. 2017) wurden mit Hilfe von Gubelmann et al. (2019) und Expertenwissen Baumartenverbreitungskarten nach der Methode «Abenis» (Regressionsanalyse zur Quantifizierung der Vegetationshöhenstufen als Grundlage für deren Verschiebung mit dem künftigen Klima) berechnet. Die Plausibilität der Ergebnisse wurde durch den Vergleich mit Baumartenverbreitungskarten von Zimmermann et al. (2016) aus dem Projekt PorTree<sup>+</sup>/PorTree (Methode: species distribution models – SDM; statistische Verbreitungswahrscheinlichkeiten) und mit Ergebnissen des ForClim-Modells (Gap-Modell, Bircher et al. 2016) überprüft. Die Karten von PorTree<sup>+</sup>/PorTree und Abenis beschreiben beide die realisierte Nische einer Baumart und stimmten meist sehr gut überein, v.a. bei den häufigen Baumarten. Die Karten von ForClim beschreiben die fundamentale Nische und weisen deshalb meistens grössere Areale auf.

### **Teil 4: Vergleich der Ergebnisse des Projektes «Adaptierte Ökogramme» mit anderen Projekten des Forschungsprogramms «Wald und Klimawandel»**

Im Teil 4 (Zürcher-Gasser & Frehner 2017) wurden die Resultate verschiedener Projekte des Forschungsprogramms «Wald und Klimawandel» mit den Ergebnissen des Projektes «Adaptierte Ökogramme» verglichen. Dabei zeigte sich, dass ein direkter Vergleich auf Grund der unterschiedlichen Zielsetzungen der Projekte zumeist schwierig und teilweise unmöglich ist. Mit dem Projekt «RetroPro» (Bircher et al. 2016), in dem mit dem Simulationsmodell ForClim gearbeitet wurde, konnte ein detaillierter Vergleich durchgeführt werden, wobei die Ergebnisse aus dem Projekt «RetroPro» die Ergebnisse des Projektes «Adaptierte Ökogramme» prinzipiell bestätigten. Bei den übrigen verglichenen Projekten wurden keine grundsätzlichen Widersprüche zu den Ergebnissen des Projektes «Adaptierte Ökogramme» gefunden.

### **Teil 5: Herleitung von regional optimierten Baumartenempfehlungen**

Ziel dieses Projektteils war es, eine Methode zu entwickeln, um aus Vorarbeiten zum Einfluss des Klimawandels auf die Vegetationshöhenstufen und Baumartenareale Baumartenempfehlungen pro Standortstyp herzuleiten. Die Empfehlungen zielen darauf ab, dass die Baumarten in einem Standortstyp in der Periode 2070 – 2099 gut an zwei Klimazukünfte («mässige Klimaänderung» = weniger trocken, «starke Klimaänderung» = trockener, Frehner et al. 2018) angepasst sind. Dazu wurden zuerst pro NaiS-Standortstyp die möglichen Baumarten, d.h. jene, die gedeihen und sich natürlich verjüngen können, aus bestehenden standortkundlichen Grundlagen auf Bundes- und Kantonebene zusammengestellt und an einem Workshop auf Widersprüche und Fehler überprüft und angepasst. Zudem wurde die Herleitung der Baumartenempfehlungen, die in den NaiS-Anforderungsprofilen Standort (Frehner et al. 2005, Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald) dargestellt sind, dokumentiert. In der Periode 2070 - 2099 werden nicht überall in der Schweiz Standortbedingungen erwartet, die schon heute anderswo in der Schweiz vorkommen. Für diese „nicht analogen Standorte“ wurden neue Einheiten definiert und es wurden für letztere gutachtlich Baumartenempfehlungen hergeleitet, ohne weitere Beschreibung der übrigen Vegetation.

Bei der praktischen Anwendung der Baumartenempfehlungen unter Berücksichtigung des Klimawandels werden diese hergeleitet, indem man die Baumarten des heutigen Standortstyps und die Baumarten der Standortstypen, die in Zukunft bei Annahme der beiden Klimazukünfte

erwartet werden, miteinander vergleicht. Daraus kann abgeleitet werden, welche Baumarten heute und in Zukunft geeignet sind, welche ihre Eignung verlieren und welche neu hinzukommen könnten. Dazu wird an einem konkreten Ort zuerst die Vegetationshöhenstufe bestimmt, welche dann das zu verwendende Ökogramm vorgibt, und innerhalb des Ökogramms wird der heutige NaiS-Standortstyp bestimmt. Danach wird für die Koordinate dieses Ortes die modellierte Höhenstufe für die Periode 2070 – 2099 für die weniger trockene und die trockenere Klimazukunft bestimmt. Im «Ziel-Ökogramm» in der zukünftig geltenden Höhenstufe wird der zukünftige Standortstyp grundsätzlich dort im Ökogramm gewählt, wo der heute geltende Standortstyp im heutigen Ökogramm liegt. Befinden sich im Ziel-Ökogramm an der Stelle des ursprünglichen Standortstyps mehrere Standortstypen, soll der trockenere Standortstyp gewählt werden.

Zudem wurden für die anlässlich der «Waldtests» 2016 und 2017 (Frehner et al. 2018) besuchten Wälder Baumartenempfehlungen für die zwei Klimazukünfte hergeleitet. Dies geschah im Weiteren auch für einen Vergleich mit Ergebnissen des Waldsukzessionsmodells ForClim (Zürcher-Gasser et al. 2016).

## Literatur

### Teilprojekte:

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.

Frehner, M., Scherler, M. & Braun, S., 2017. Schlussbericht des Projektes «Adaptierte Ökogramme» im Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel», Teil 2: Quantifizierung der Lage von Standortstypen im Ökogramm. Sargans, Forstingenieurbüro Frehner. 39 S.

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». Sargans, Forstingenieurbüro Frehner & Chur, Abenis AG. 105 S.

Zürcher-Gasser, N. & Frehner, M., 2017. Schlussbericht des Projektes «Adaptierte Ökogramme» im Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel», Teil 4: Vergleich der Projektergebnisse mit anderen Projekten aus dem Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel». Rabius, Gadola AG. 12 S.

Frehner, M. & Zürcher-Gasser, N., 2019. Schlussbericht des Projektes «Adaptierte Ökogramme» im Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel», Teil 5: Herleitung von regional optimierten Baumartenempfehlungen. Sargans, Forstingenieurbüro Frehner. 24 S.

### Begleit- oder Vorprojekte:

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. Chur, Abenis AG. 149 S.

Huber, B., Gubelmann, P. & Frehner, M., 2016. Untersuchung der potenziellen Arealgrenze der Lärche sowie der klimatischen Grenzen der Buchen- und Fichtenverjüngung an ausgewählten Standorten. Ein Bericht aus dem Projekt «Adaptierte Ökogramme» im Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel». Chur, Abenis AG. 28 S.

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

Zürcher-Gasser, N. & Frehner, M., 2016. Prä-Waldtest. Ein Bericht aus dem Projekt «Adaptierte Ökogramme» im Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel». Rabius, Gadola AG. 8 S.

### **Weitere Literatur:**

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. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern; Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf; Haupt Bern, Stuttgart, Wien. S. 157 – 174

Frehner, M., Wasser, B. & Schwitter, R., 2005. Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion, Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 564 S.

Frehner, M., Burnand, J., Carraro, G., Frey, H. U. & Lüscher, P., 2009. Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Anhang 2A. BUWAL, Bern.

Frehner, M., Brang, P., Kaufmann, G. & Kuchli, C., 2018. Standortkundliche Grundlagen für die Waldbewirtschaftung im Klimawandel. WSL Ber. 66: 43 S.

Ott, E., Frehner, M., Frey, H. U. & Lüscher, P., 1997. Gebirgsnadelwälder. Ein praxisorientierter Leitfaden für eine standortgerechte Waldbehandlung. Bern, Stuttgart, Wien: Haupt-Verlag, 287 S.

Zimmermann, N. E., Schmatz, D. R., Gallien, L., Körner, C., Huber, B., Frehner, M., Kuchler, M., Psomas, A., 2016. Baumartenverbreitung und Standorteignung. In: Pluess, A.R., Augustin S., Brang, P. (Red), Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptionsstrategien. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern; Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf; Haupt Bern, Stuttgart, Wien. S. 199 – 221.



## Introduction

The main objective of the project 'Adapted Ecograms' was to develop basic principles for taking into account climate change in silvicultural decision making at the stand level, i.e. on small forest areas of partly less than one hectare. The impact of climate change varies depending on soil characteristics. In Switzerland, soil maps that allow for a correct evaluation of areas smaller than one hectare are only available in limited areas. Therefore, the information basis to calculate habitat suitability models for tree species applicable at the stand level was insufficient.

Silvicultural decisions are often taken based on site types in Switzerland. Consequently, target profiles for protection forests (50% of the Swiss forest area) in NaiS ('Sustainability and success monitoring in protection forests', Frehner et al. 2005/2009) were described according to site types. These are based on different cantonal site type keys, which were compiled to NaiS site types. In the project 'NaiS-NFI: Attribution of National Forest Inventory sampling points to site types' (2013 – 2019), NaiS site types are being complemented to allow an assignment of all LFI sample plots to a NaiS site type. NaiS site types cover all currently existing site types in Switzerland. Today, site type maps based on NaiS-related site types exist for about one third of the Swiss forest area. Also on the rest of the forest area, good practice requires that foresters take the site type for protection forest management and close-to-nature silviculture into account.

A site type is defined as follows: The site type of a stand comprises the entirety of all environmental factors acting upon the trees of the stand, for example climate, soil characteristics, topography, avalanches, rock fall etc. (Ott et al. 1997). A site type includes climate and soil characteristics and the site type classification is already part of the current practical work in the field. Therefore, site types are used to develop basic principles for the consideration of climate change in silvicultural decision making in a certain stand.

Two future climates were applied in the project 'Adapted Ecograms'. The basis for both was the emission scenario A1B used by the Confederation. The high diversity of possible climate change projections was captured by selecting two extreme climate models, a less dry (RegCM3) and a drier one (CLM), within the emission scenario A1B. Climate projections were modelled for the period of 2070 – 2099, as stands that are regenerated today should at least survive until this period.

## **Part 1: Quantification and shift of the limits of altitudinal vegetation belts and of the distribution limits of silver fir and European beech in Switzerland under two future climate projections**

This part of the project aimed at quantifying the limits of the altitudinal vegetation belts and the distribution limits of silver fir and European beech and should enable to predictions of their future distribution with two future climate projections. Altitudinal vegetation belt limits can usually be determined in the field with an accuracy of  $\pm 20$  m. However, existing climate maps had a resolution of 250 m x 250 m only and were thus not precise enough to describe these limits. Therefore, climate maps with a resolution of 25 m x 25 m were developed (pre-project Huber et al. 2015). In the same project, the relation between climate factors on the one hand and altitudinal vegetation belts and distribution limits on the other hand was analysed, enabling projections of their changes in future climates.

To calculate the regression models for the altitudinal vegetation belts, characteristic belt limits were derived on site type maps and used as a reference. To validate the altitudinal vegetation belts modelled with the current climate, they were compared with empirical vegetation belts mapped in the field within the project 'NaiS-NFI: Attribution of National Forest Inventory sampling points to site types' (2013 – 2019).

The distribution limits of silver fir and European beech were derived from ecoregions of NaiS and partly improved with forest stand maps and local knowledge. All limits were modelled by using an expert system approach (Fuzzy logic).

The results consist of maps of Switzerland with modelled limits of altitudinal vegetation belts, which also show the distribution limits of silver fir and European beech, for the current climate and two future climate projections. These maps allow, for any given location in the Swiss forest, deriving the altitudinal vegetation belt for the current climate and for the drier and the less dry climate projection.

An evaluation of the shifts of altitudinal vegetation limits applying the climate projections RegCM3 and CLM with the current limits shows that some of the current altitudinal vegetation belts may split of and be located in several vegetation belts in the future. Although the current upper montane belt in the Jura Mountains and the Swiss Plateau is modelled almost completely as submontane belt in the future, the current high montane belt, for example, will split into the colline, submontane, under montane and upper montane belts in 2070 – 2099.

## **Part 2: Quantifying the position of site types in ecograms**

Site types are depicted in ecograms according to their altitudinal vegetation belt and ecoregion along two axes, one axis representing nutrient supply (expressed as soil reaction from acidic to alkaline), the other representing the site humidity (from wet to very dry). A shift of the altitudinal vegetation belt according to part 1 results in a change of the applicable ecogram. The objective of part 2 of the project was to check if the applied climate projections will also cause a shift of a site type within the ecogram along the axis wet-dry.

First of all, different drought indices were compared. Subsequently, the humidity axis was analyzed statistically as well as using a graphical approach. Both approaches indicated that ecoregion and altitudinal vegetation belt influenced the humidity axis as well. Climate change resulted in an average shift of 0.34 units of the position of site types within the humidity axis scaled into five units, using the A1B scenario / CLM climate model, and in a shift of only 0.10 units if the A1B scenario / RegCM3 climate model was used. These shifts are too small for a general adjustment of the site type position in the ecogram towards drier conditions. In the 'target ecogram' a site type should therefore be chosen at the same position in the ecogram. If several site types exist at the position in the target ecogram, then the drier one should be chosen.

## **Part 3: Comparing different tree species distribution models**

In part 3 (Frehner et al. 2017), tree species distribution maps were modelled using a combination of results from Gubelmann et al. (2019) and expert knowledge (method 'Abenis'; regression analysis to quantify altitudinal vegetation belts to project their shifts caused by climate change). The plausibility of the results was evaluated by comparing the resulting distribution maps with tree species distribution maps of Zimmermann et al. (2016) of the project PorTree<sup>+</sup>/PorTree (method: species distribution models – SDM; statistical distribution

likelihood) and results of the ForClim-model (Gap model, Bircher et al. 2016). Maps of PorTree<sup>+</sup>/PorTree and Abenis describe the realized niche of a tree species and usually matched very well, especially for the most frequent tree species. Maps of ForClim describe the fundamental niche and therefore show a usually larger distribution area.

#### **Part 4: Comparing results of the project ‘Adapted Ecograms’ with other projects of the research programme ‘Forests and Climate Change’**

In part 4 (Zürcher-Gasser & Frehner 2017), results of different projects of the research programme ‘Forests and Climate Change’ were compared with results of the project ‘Adapted Ecograms’. A direct comparison between the projects was usually difficult or impossible due to their different objectives. A detailed comparison was possible with the project ‘RetroPro’ (Bircher et al. 2016) in which the simulation model ForClim was used. The ForClim results in general confirmed results of the project ‘Adapted Ecograms’. The results of the other evaluated projects were not found to be in fundamental contradiction to results of the project ‘Adapted Ecograms’.

#### **Part 5: Derivation of regionally optimised tree species recommendations**

This part of the project aimed at developing a method to derive tree species recommendations per site type, based on earlier studies about the impact of climate change on altitudinal vegetation belts and tree species distributions. These recommendations should meet the requirement that tree species are climatically well adapted to the conditions on a site type in 2070 – 2099, assuming two projections of the future climate («moderate» climate change = less dry, «strong» climate change = drier, Frehner et al. 2018). First, potential tree species, i.e. those able to grow and to regenerate naturally, were compiled for each site type according to the NaiS classification from existing federal and cantonal guidelines for site-specific tree species selection. Then, a workshop was held to check the tree species lists for contradictions and to eliminate errors. Furthermore, it was documented how the recommended tree species listed in the NaiS target profiles for each site type (Frehner et al. 2005, Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald) had been derived. For certain site types in Switzerland, the climate predicted for the period 2070 – 2099 can currently not be found elsewhere in Switzerland. For these ‘non analogue sites’, new site types were described and the recommended tree species derived from expert knowledge, without describing the rest of the vegetation.

Tree species recommendations considering climate change are derived by comparing the tree species recommended for the current site type with those of the future site types under the two climate projections. This allows drawing conclusions about which tree species recommended today will still be well adapted in the future, which ones will become unsuitable and which ones could become suitable. For a given location, this requires first determining the correct ecogram, which depends on the altitudinal vegetation belt, and, within this ecogram, the current NaiS site type. Then, at the same coordinate, the modelled altitudinal vegetation belt in 2070 – 2099 is determined for the two projections of future climate. In the ‘target ecogram’ of the future altitudinal vegetation belt, the site type is usually chosen at the same position in the ecogram. If several site types exist at this position in the target ecogram, then the drier one should be chosen.

In addition, tree species recommendations were derived for both climate projections for the excursion sites visited during ‘Forest workshops’ conducted in 2016 and 2017 (Frehner et al.



2018). This served also for a comparison with results of the forest succession model ForClim (Zürcher-Gasser et al. 2016).

## References

### Subprojects:

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.

Frehner, M., Scherler, M. & Braun, S., 2017. Schlussbericht des Projektes «Adaptierte Ökogramme» im Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel», Teil 2: Quantifizierung der Lage von Standortstypen im Ökogramm. Sargans, Forstingenieurbüro Frehner. 39 S.

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». Sargans, Forstingenieurbüro Frehner & Chur, Abenis AG. 105 S.

Zürcher-Gasser, N. & Frehner, M., 2017. Schlussbericht des Projektes «Adaptierte Ökogramme» im Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel», Teil 4: Vergleich der Projektergebnisse mit anderen Projekten aus dem Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel». Rabius, Gadola AG. 12 S.

Frehner, M. & Zürcher-Gasser, N., 2019. Schlussbericht des Projektes «Adaptierte Ökogramme» im Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel», Teil 5: Herleitung von regional optimierten Baumartenempfehlungen. Sargans, Forstingenieurbüro Frehner. 24 S.

### Accompanying projects or pre-projects:

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. Chur, Abenis AG. 149 S.

Huber, B., Gubelmann, P. & Frehner, M., 2016. Untersuchung der potenziellen Arealgrenze der Lärche sowie der klimatischen Grenzen der Buchen- und Fichtenverjüngung an ausgewählten Standorten. Ein Bericht aus dem Projekt «Adaptierte Ökogramme» im Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel». Chur, Abenis AG. 28 S.

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

Zürcher-Gasser, N. & Frehner, M., 2016. Prä-Waldtest. Ein Bericht aus dem Projekt «Adaptierte Ökogramme» im Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel». Rabius, Gadola AG. 8 S.

**Further references:**

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 Adaptionstrategien. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern; Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf; Haupt Bern, Stuttgart, Wien. S. 157 – 174

Frehner, M., Wasser, B. & Schwitter, R., 2005. Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion, Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 564 S.

Frehner, M., Burnand, J., Carraro, G., Frey, H. U. & Lüscher, P., 2009. Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Anhang 2A. BUWAL, Bern.

Frehner, M., Brang, P., Kaufmann, G. & KÜchli, C., 2018. Standortkundliche Grundlagen für die Waldbewirtschaftung im Klimawandel. WSL Ber. 66: 43 S.

Ott, E., Frehner, M., Frey, H. U. & Lüscher, P., 1997. Gebirgsnadelwälder. Ein praxisorientierter Leitfaden für eine standortgerechte Waldbehandlung. Bern, Stuttgart, Wien: Haupt-Verlag, 287 S.

Zimmermann, N. E., Schmatz, D. R., Gallien, L., Körner, C., Huber, B., Frehner, M., KÜchler, M., Psomas, A., 2016. Baumartenverbreitung und Standorteignung. In: Pluess, A.R., Augustin S., Brang, P. (Red), Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptionstrategien. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern; Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf; Haupt Bern, Stuttgart, Wien. S. 199 – 221.

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

# **Teil 1: «Quantifizierung und Verschiebung der Höhenstufengrenzen sowie des Tan- nen- und Buchenareals in der Schweiz mit zwei Klimazukünften»**

Päivi Gubelmann, Barbara Huber, Monika Frehner, Andreas Zischg, Jacques Burnand,  
Gabriele Carraro

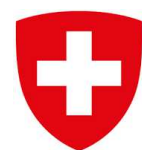
Fachliche Unterstützung durch Ludwig Z'graggen



**ABENIS** AG  
INGENIEURE + PLANER



Monika Frehner  
Sargans



April 2019



## Autoren

Päivi Gubelmann<sup>1</sup>, Barbara Huber<sup>1</sup>, Monika Frehner<sup>2</sup>, Andreas Zischg<sup>3</sup>, Jacques Burnand<sup>4</sup>, Gabriele Carraro<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Abenis AG, Quaderstrasse 7, 7000 Chur

<sup>2</sup> Forstingenieurbüro, Sixerstrasse 9, 7320 Sargans

<sup>3</sup> Geographisches Institut der Universität Bern, Hallerstrasse 12, 3012 Bern

<sup>4</sup> Vegetation-Landschaft-Umwelt, Zähringerstrasse 9, 8001 Zürich

<sup>5</sup> Dionea SA, Lungolago Motta 8, 6600 Locarno

Ein Projekt-Schlussbericht aus dem Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel» von BAFU und WSL ([www.wsl.ch/wald\\_klima](http://www.wsl.ch/wald_klima)).

Ein Teil des Teilprojektes 1 des Projektes «Adaptierte Ökogramme» wurde ausserhalb des Forschungsprogramms vom BAFU finanziert, der Vollständigkeit halber wird es aber ebenfalls in den Schlussbericht integriert.

Projektlaufzeit: 1.10.2015 bis 31.12.2018.

## Zitierung

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

Im pdf-Format zu beziehen über [www.wsl.ch/wald\\_klima](http://www.wsl.ch/wald_klima)

## Dank

Ohne die wertvolle Unterstützung durch Dr. 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 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 ihm zu grossem Dank verpflichtet. Desweiteren möchten wir uns bei den folgenden Experten bedanken: Hans-Ueli Frey und Brächt Wasser.

Wir möchten uns beim Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel» und beim BAFU bedanken für die Finanzierung der Projekte und die wertvolle Hilfe bei der Detailplanung der Projekte. Ausserdem bedanken wir uns bei den Kantonen für das Zurverfügungstellen der kantonalen Grundlagen. Das BAFU, Abt. Gefahrenprävention, stellte zudem die Daten aus dem Projekt «NaiS-LFI Zuordnung der LFI-Stichprobenpunkte zu Waldgesellschaften» zur Verfügung, welche das Büro IWA für einen Vegetationshöhenstufenvergleich aufbereitete.

## Inhalt

Abkürzungen .....	1
Klimaparameter.....	2
Zusammenfassung.....	6
Summary .....	9
1 Einleitung .....	11
2 Material und Methoden.....	12
2.1 Aufbereitung der Klimaparameter.....	12
2.1.1 Räumliche und zeitliche Auflösung der Kartengrundlagen.....	12
2.1.2 Lufttemperatur.....	13
2.1.2.1 Kaltluftseen .....	20
2.1.2.2 Korrektur der Strahlung .....	28
2.1.3 Thermische Kontinentalität.....	36
2.1.4 Mittlerer erster und letzter Frosttag im Jahr .....	40
2.1.5 Dauer der frostfreien Vegetationsperiode.....	40
2.1.6 Niederschlag.....	40
2.1.7 Relative Luftfeuchtigkeit .....	42
2.1.8 Globalstrahlung.....	45
2.1.9 Wind.....	46
2.1.10 Potenzielle Evapotranspiration .....	47
2.1.11 Föhn.....	50
2.2 Verwendung weiterer Standortfaktoren.....	60
2.2.1 Karte der Substratgruppen.....	60
2.2.2 Trockenheitsindices ETa/ETp und Standortwasserbilanz.....	60
2.3 Neuberechnung der Klimakarten für die Periode 2070-2099 .....	66
2.3.1 Klimaparameter, die nicht in die Zukunft modelliert werden .....	67
2.3.2 Neuberechnung der Temperaturkarten.....	67
2.3.3 Neuberechnung des mittleren ersten und letzten Frosttages im Jahr .....	68
2.3.4 Neuberechnung der frostfreien Vegetationsdauer .....	68
2.3.5 Neuberechnung der Niederschlagskarten .....	68
2.3.6 Neuberechnung der Karten zur potenziellen Evapotranspiration.....	68
2.4 Methoden der Modellierungen .....	69
2.4.1 Modellaufbau Höhenstufengrenzen.....	69
2.4.1.1 Stichproben für die Modellierung der Höhenstufengrenzen .....	69
2.4.1.2 Regionalisierung der Höhenstufen .....	76
2.4.1.3 Auswahl der Modelle zur Regionalisierung der Höhenstufe .....	78
2.4.1.4 Räumliche Auflösung der Grundlagendaten und angestrebte Genauigkeit in der Lokalisierung der Höhengrenzen.....	78
2.4.1.5 Vorgehen bei der Modellerstellung der Vegetationshöhenstufengrenzen	78
2.4.1.6 Obere Waldgrenze .....	82
2.4.2 Modellaufbau Arealgrenzen von Buchen- und Tannenareal.....	83

2.4.2.1	Vorgehen Arealgrenzen: Beispiel Tannen-Haupt-/Nebenareal und Klimaparameter Kontinentalität .....	85
2.4.2.2	Für die Arealmodellierungen verwendete Klimaparameter .....	89
2.4.2.3	Buchenareal .....	92
2.4.2.4	Grenze Tannen-Hauptareal zu Tannen-Nebenareal .....	94
2.4.2.5	Grenze zwischen dem Tannen-Nebenareal und dem Tannen-Reliktareal .....	96
2.4.2.6	Colline Stufe .....	99
2.4.3	Vorgehen beim Erstellen der Höhenstufenkarte der Schweiz .....	101
2.4.4	Vorgehen zur Kontrolle der modellierten Höhenstufen mit NaiS-LFI Probeflächen .....	102
2.4.5	Vorgehen bei der Höhenstufenverschiebung .....	103
2.4.6	Vorgehen Lithologievergleich .....	103
3	Resultate .....	105
3.1	Niederschlagskarten der beiden Klimazukünfte CLM und RegCM3 .....	105
3.2	Temperaturkarten der beiden Klimazukünfte CLM und RegCM3 .....	107
3.3	Vegetationshöhenstufenkarten .....	108
3.3.1	Modellierung der Höhenstufen für heutiges Klima .....	109
3.3.2	Überprüfung der modellierten Höhenstufen für heutiges Klima .....	110
3.3.2.1	Nordschweiz .....	110
3.3.2.2	Tessin .....	110
3.3.3	Kontrolle der modellierten Höhenstufen heute mit NaiS-LFI-Probeflächen ...	113
3.3.4	Modellierung der Höhenstufen mit der Klimazukunft RegCM3 .....	117
3.3.5	Modellierung der Höhenstufen mit der Klimazukunft CLM .....	118
3.3.1	Verschiebung der Höhenstufen bei den Klimazukünften RegCM3 und CLM in der Periode 2070 - 2099 gegenüber heute .....	119
3.3.2	Lithologievergleich .....	124
3.4	Buchenareal .....	128
3.4.1	Heutige Modellierung des Buchenareals .....	128
3.4.2	Modellierungen des Buchenareals mit der Klimazukunft RegCM3 .....	135
3.4.3	Modellierungen des Buchenareals mit der Klimazukunft CLM .....	138
3.5	Grenze Tannen-Hauptareal / Tannen-Nebenareal .....	141
3.5.1	Heutige Modellierung der Grenze Tannen-Hauptareal / Tannen-Nebenareal .....	141
3.5.2	Modellierungen der Grenze Tannen-Hauptareal / Tannen-Nebenareal mit der Klimazukunft RegCM3 .....	146
3.5.3	Modellierungen der Grenze Tannen-Hauptareal / Tannen-Nebenareal mit der Klimazukunft CLM .....	149
3.6	Grenze Tannen-Nebenareal - Tannen-Reliktareal .....	152
3.6.1	Heutige Modellierung der Grenze Tannen-Nebenareal / Tannen-Reliktareal .....	152
3.6.2	Modellierungen der Grenze Tannen-Nebenareal / Tannen-Reliktareal für die Klimazukunft RegCM3 .....	159
3.6.3	Modellierungen der Grenze Tannen-Nebenareal / Tannen-Reliktareal mit der Klimazukunft CLM .....	163
3.7	Colline Stufe .....	167
3.7.1	Heutige Modellierung der collinen Stufe .....	167

3.7.2	Modellierungen der collinen Stufe mit der Klimazukunft RegCM3 .....	175
3.7.3	Modellierungen der collinen Stufe mit der Klimazukunft CLM .....	181
4	Diskussion.....	187
4.1	Verwendete Klimamodelle und Szenarien.....	187
4.2	Verwendete Kartengrundlagen.....	187
4.3	Verwendete geologische Grundlagen.....	188
4.4	Methodenwahl.....	188
4.5	Kenntnislücken und Einschätzung der Unsicherheiten der Methode .....	189
5	Schlussfolgerungen .....	190
6	Ausblick .....	192
7	Literatur.....	193
8	Anhang .....	195
8.1	Einteilung der Lithologien in die berücksichtigten Lithologieklassen (Grundlage: Lithologie-Karte der Schweiz, <a href="http://www.atlasderschweiz.ch">www.atlasderschweiz.ch</a> ) .....	195
8.2	Höhenstufen nach NaiS (Definitionen aus Frehner et al. 2005/2009 neu überarbeitet, noch unpubliziert) .....	197
8.3	Fehlerliste Höhenstufenkarte heute .....	198
8.4	Abbildungen des Buchenareals der Klimazukunft RegCM3.....	200
8.5	Abbildungen des Buchenareals der Klimazukunft CLM .....	203
8.6	Abbildungen des Tannen-Hauptareals der Klimazukunft RegCM3 .....	206
8.7	Abbildungen des Tannen-Hauptareals der Klimazukunft CLM.....	209
8.8	Abbildungen des Tannen-Nebenareals der Klimazukunft RegCM3.....	212
8.9	Abbildungen des Tannen-Nebenareals der Klimazukunft CLM .....	216
8.10	Abbildungen der collinen Stufe der Klimazukunft RegCM3 .....	220
8.11	Abbildungen der collinen Stufe der Klimazukunft CLM .....	225
8.12	Höhenstufenkarten der Schweiz für heute und für die Periode 2070-2099 unter Annahme der Klimazukünfte RegCM3 und CLM.....	230
8.13	Höhenstufenkarten der Schweiz mit Unterteilung von Tannen-Haupt-, Tannen-Neben- und Tannen-Reliktareal für heute und für 2070-2099 unter Annahme der Klimazukünfte RegCM3 und CLM.....	233
8.14	Erstellung von Trockenheitsindex-Karten auf Basis von verfeinerten Klimadaten, J. Remund 2016 .....	236

## Abkürzungen

Namenskürzel:	BH (B. Huber), LZ (L. Z'graggen), MF (M. Frehner), PG (P. Gubelmann), JB (J. Burnand), GC (G. Carraro), HUF (H.-U. Frey).
Vegetationshöhenstufen:	Im Text abgekürzt als «Höhenstufen». CO (collin), SM (submontan), UM (untermontan), OM (obermontan), HM (hochmontan), SA (subalpin), OSA (obersubalpin).
Baumarten:	Bu (Buche), Ta (Weisstanne), Fi (Fichte), Ei (Eichen, v.a. Traubeneiche), FEi (Flaumeiche), HBU (Hagebuche), Av (Arve), WFö (Waldföhre), Lä (Lärche).
Standortsregionen:	J (Jura), M (Mittelland), 1 (nördliche Randalpen), 2a (nördliche Zwischenalpen mit Buchen), 2b (nördliche Zwischenalpen ohne Buchen), 3 (Kontinentale Hochalpen), 4 (Südliche Zwischenalpen [ohne Buchen]), 5aF (Südliche Randalpen mit Fichte [mit Buchen]), 5aFV (Südliche Randalpen mit Fichtenvorposten [mit Buchen]), 5b (Südliche Randalpen ohne Fichte [mit Buchen]).
Tannenareale:	HA (Hauptareal), NA (Nebenareal), RA (Reliktareal).
Kantone:	AG (Aargau), AI (Appenzell Innerrhoden), AR (Appenzell Ausserrhoden), BE (Bern), BS (Basel-Stadt), BL (Basel-Landschaft), FR (Freiburg), GE (Genf), GL (Glarus), GR (Graubünden), JU (Jura), LU (Luzern), NE (Neuenburg), NW (Nidwalden), OW (Obwalden), SG (St. Gallen), SH (Schaffhausen), SO (Solothurn), SZ (Schwyz), TG (Thurgau), TI (Tessin), UR (Uri), VD (Waadt), VS (Wallis), ZG (Zug), ZH (Zürich).
Klimaszenarien:	CLM (ECHAM5/CLM [MPI]), RegCM3 (ECHAM5/RegCM3 [ICTP])

## Klimaparameter

Klimaparameter	Beschreibung und Quelle (falls nicht vom Projektteam erstellt)	Einheit	1961-1990	1981-2010	2070-2099	Raster
DHM25	Höhe über Meer (swisstopo)	m				25m
ETOJAN	Potenzielle Evapotranspiration Januar	mm	-	x	x	25m
ETOAPR	Potenzielle Evapotranspiration April	mm	-	x	x	25m
ETOJUL	Potenzielle Evapotranspiration Juli	mm	-	x	x	25m
ETOOKT	Potenzielle Evapotranspiration Oktober	mm	-	x	x	25m
ETOJAHR	Potenzielle Evapotranspiration Jahr	mm	-	x	x	25m
FETOJAN	Potenzielle Evapotranspiration bei Föhn Januar	mm	-	x	x	25m
FETOAPR	Potenzielle Evapotranspiration bei Föhn April	mm	-	x	x	25m
FETOJUL	Potenzielle Evapotranspiration bei Föhn Juli	mm	-	x	x	25m
FETOOKT	Potenzielle Evapotranspiration bei Föhn Oktober	mm	-	x	x	25m
FETOJAHR	Potenzielle Evapotranspiration bei Föhn Jahr	mm	-	x	x	25m
FOEHNJAN	Relative Luftfeuchte bei Föhn Januar	%	-	x	-	25m
FOEHNAPR	Relative Luftfeuchte bei Föhn April	%	-	x	-	25m
FOEHNJUL	Relative Luftfeuchte bei Föhn Juli	%	-	x	-	25m
FOEHNOKT	Relative Luftfeuchte bei Föhn Oktober	%	-	x	-	25m
FOEHNJAHR	Relative Luftfeuchte bei Föhn Jahr	%	-	x	-	25m
FOEHNHJAN	Föhnhäufigkeit Januar		x	-	-	25m
FOEHNHAPR	Föhnhäufigkeit April		x**	-	-	25m
FOEHNHJUL	Föhnhäufigkeit Juli		x**	-	-	25m
FOEHNHOKT	Föhnhäufigkeit Oktober		x**	-	-	25m
FOEHNHJAHR	Föhnhäufigkeit Jahr		x**	-	-	25m
FOEHN TJAN	Lufttemperatur bei Föhn Januar	°C	x**	x	x	25m
FOEHN TAPR	Lufttemperatur bei Föhn April	°C	x**	x	x	25m
FOEHN TJUL	Lufttemperatur bei Föhn Juli	°C	x**	x	x	25m

Klimaparameter	Beschreibung und Quelle (falls nicht vom Projektteam erstellt)	Einheit	1961-1990	1981-2010	2070-2099	Raster
FOEHNTOKT	Lufttemperatur bei Föhn Oktober	°C	x**	x	x	25m
FOEHNTJAHR	Lufttemperatur bei Föhn Jahr	°C	x**	x	x	25m
LFJAN	Relative Luftfeuchte Januar	%	-	x	-	25m
LFAPR	Relative Luftfeuchte April	%	-	x	-	25m
LFJUL	Relative Luftfeuchte Juli	%	-	x	-	25m
LFOKT	Relative Luftfeuchte Oktober	%	-	x	-	25m
LFJAHR	Relative Luftfeuchte Jahr	%	-	x	-	25m
TJANMEAN	Mittlere Lufttemperatur Januar	°C	x	x	x	25m
TJANMAX	Mittlere Höchstwerte Lufttemperatur Januar	°C	x	x	x	25m
TJANMIN	Mittlere Tiefstwerte Lufttemperatur Januar	°C	x	x	x	25m
TAPRMEAN	Mittlere Lufttemperatur April	°C	x	x	x	25m
TAPRMAX	Mittlere Höchstwerte Lufttemperatur April	°C	x	x	x	25m
TAPRMIN	Mittlere Tiefstwerte Lufttemperatur April	°C	x	x	x	25m
TJULMEAN	Mittlere Lufttemperatur Juli	°C	x	x	x	25m
TJULMAX	Mittlere Höchstwerte Lufttemperatur Juli	°C	x	x	x	25m
TJULMIN	Mittlere Tiefstwerte Lufttemperatur Juli	°C	x	x	x	25m
TOKTMEAN	Mittlere Lufttemperatur Oktober	°C	x	x	x	25m
TOKTMAX	Mittlere Höchstwerte Lufttemperatur Oktober	°C	x	x	x	25m
TOKTMIN	Mittlere Tiefstwerte Lufttemperatur Oktober	°C	x	x	x	25m
TJAHRMEAN	Mittlere Lufttemperatur Jahr	°C	x	x	x	25m
TJAHRMAX	Mittlere Höchstwerte Lufttemperatur Jahr	°C	x	x	x	25m
TJAHRMIN	Mittlere Tiefstwerte Lufttemperatur Jahr	°C	x	x	x	25m
TABSMAX	Absolute Höchstwerte Temperatur	°C	x	x	x	25m
TABSMIN	Absolute Tiefstwerte Temperatur	°C	x	x	x	25m
TMAIMEAN25K	Mittlere Lufttemperatur Mai	°C	x	x	x	25m
TJUNMEAN25K	Mittlere Lufttemperatur Juni	°C	x	x	x	25m
TAUGMEAN25K	Mittlere Lufttemperatur August	°C	x	x	x	25m

Klimaparameter	Beschreibung und Quelle (falls nicht vom Projektteam erstellt)	Einheit	1961-1990	1981-2010	2070-2099	Raster
TSEPMEAN25K	Mittlere Lufttemperatur September	°C	x	x	x	25m
TAMJJASMEANK	Mittlere Lufttemperatur April-September	°C	x	x	x	25m
NS_JJA	Niederschlag Juni-August (HADES 2001, verfeinert durch Projektteam)	mm	1971-1990	-	x	25m
NS_AMJJAS	Niederschlag April-September (HADES 2001, verfeinert durch Projektteam)	mm	1971-1990	-	x	25m
NSJAHR27	Niederschlag im Jahr (HADES 2001)	mm	1971-1990	-	x	25m
SWB	Site Water Balance (Remund 2016)	mm		x	x	250m
ETa/ETp	Verhältnis aktueller zu potenzieller Evapotranspiration	dimensi- onslos		x	x	250m
KONTJAN	Thermische Kontinentalität Januar	°C	x	-	-	25m
KONTAPR	Thermische Kontinentalität April	°C	x	-	-	25m
KONTJUL	Thermische Kontinentalität Juli	°C	x	-	-	25m
KONTOKT	Thermische Kontinentalität Oktober	°C	x	-	-	25m
KONTJAHR	Thermische Kontinentalität Jahr	°C	x	-	-	25m
KONTABS	Absolute thermische Kontinentalität	°C	x	-	-	25m
KONTJAN1000	Thermische Kontinentalität auf 1000m Januar	°C	x	-	x*	25m
KONTAPR1000	Thermische Kontinentalität auf 1000m April	°C	x	-	x*	25m
KONTJUL1000	Thermische Kontinentalität auf 1000m Juli	°C	x	-	x*	25m
KONTOKT1000	Thermische Kontinentalität auf 1000m Oktober	°C	x	-	x*	25m
KONTJAHR1000	Thermische Kontinentalität auf 1000m Jahr	°C	x	-	x*	25m
KONTABS1000	Absolute thermische Kontinentalität auf 1000m	°C	x	-	x*	25m
JANGLOBRADW	Globalstrahlung Januar	W/m <sup>2</sup>	1984-1993	-	-	25m
APRGLOBRADW	Globalstrahlung April	W/m <sup>2</sup>	1984-1993	-	-	25m
JULGLOBRADW	Globalstrahlung Juli	W/m <sup>2</sup>	1984-1993	-	-	25m
OKTGLOBRADW	Globalstrahlung Oktober	W/m <sup>2</sup>	1984-1993	-	-	25m
GLOBRADJAHRW	Globalstrahlung Jahr	W/m <sup>2</sup>	1984-1993	-	-	25m



Klimaparameter	Beschreibung und Quelle (falls nicht vom Projektteam erstellt)	Einheit	1961-1990	1981-2010	2070-2099	Raster
LFD	Mittlerer letzter Frosttag	Tag im Jahr	x	x	x	25m
FFD	Mittlerer erster Frosttag	Tag im Jahr	x	x	x	25m
VEGPER	Frostfreie Vegetationsperiode	Anzahl Tage	x	x	x	25m
WJANMEAN25	Mittlere Windgeschwindigkeit Januar	m/s		x	-	25m
WAPRMEAN25	Mittlere Windgeschwindigkeit April	m/s		x	-	25m
WJULMEAN25	Mittlere Windgeschwindigkeit Juli	m/s		x	-	25m
WOKTMEAN25	Mittlere Windgeschwindigkeit Oktober	m/s		x	-	25m
WYMEAN25	Mittlere Windgeschwindigkeit Jahr	m/s		x	-	25m

\*= vereinfachtes Verfahren, Verschiebung um 400m in der Höhe

\*\*= unterschiedliche Zeiträume, siehe Tab. 7

## Zusammenfassung

Im Projekt «Mit welchen Klimaparametern kann man Grenzen plausibel erklären, die in NaiS (Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald) verwendet werden, um Ökogramme auszuwählen?» (Huber et al. 2015) aus dem Programm «Wald und Klimawandel» wurden in einem ersten Schritt neue detaillierte Klimakarten erstellt. In einem zweiten Schritt wurde untersucht, welche Klimaparameter für die Arealgrenzen von Tanne, Buche und Flaumeiche sowie für die Vegetationshöhenstufengrenzen in den Kantonen SG, GR, SH, BL/BS und GE relevant sind und es wurde versucht, allfällige Schwellenwerte zu eruieren (deskriptive Statistik, ohne Modellierungen). Aufbauend auf diesen Grundlagen war das Ziel des **Teils A des Vorprojektes «Ausweiten der Quantifizierung der Höhenstufengrenzen und anderer klimatisch bedingter Grenzen gemäss Projekt Huber et al. 2015 auf zusätzliche Kantone ohne Nais-nahe Standortkartierung»** (kein Bericht, Ergebnisse wurden aktualisiert und fliessen im vorliegenden Bericht mit ein), in den Kantonen BE und UR so weit als möglich Vegetationshöhenstufengrenzen mit Klimaparametern (unter Berücksichtigung weiterer Standortfaktoren) zu quantifizieren und zu modellieren. Im Kanton Bern wurden wegen unterschiedlicher Klimaregionen die Naturräume Jura, Seeland, Mittelland, Voralpen und Zwischenalpen separat betrachtet. Desweiteren wurden bei den bereits in Huber et al. (2015) untersuchten Kantonen SG, AR, GR, SH, BS/BL und GE die Vegetationshöhenstufengrenzen auf erweiterter Datengrundlage modelliert.

Aufgrund der plausiblen Ergebnisse aus dem Projekt Huber et al. 2015 und den Arbeiten im Vorprojekt (Teil A) wurde das **Gesamtprojekt «Adaptierte Ökogramme»** initiiert. **Das vorliegende Teilprojekt 1 des Gesamtprojektes** baut auf den Erfahrungen und Resultaten der Vorprojekte auf. Der vorliegende Bericht beinhaltet sowohl die Arbeiten des Vorprojektes als auch die des Gesamtprojektes.

In einem ersten Schritt wurde pro Region jede Vegetationshöhenstufengrenze mit Hilfe der Klimaparameter aus dem Schlussbericht des Projektes Huber et al. (2015) modelliert. Es wurde jeweils ein lineares Regressionsmodell auf Basis einer Stichprobe der Obergrenzen erstellt, das für jede geologische Einheit die Temperatur an der Obergrenze aus den betrachteten Klimaparametern berechnet. Diese berechnete Temperatur wurde dann mit der Temperaturkarte verglichen und damit die Vegetationshöhenstufengrenze direkt aus der Temperaturkarte abgeleitet. Die Temperatur an jeder Vegetationshöhenstufengrenze variiert regional und ist im Wesentlichen je nach Vegetationshöhenstufe vor allem von ETa/ETp, Niederschlag, thermischer Kontinentalität und Globalstrahlung abhängig. Die Regressionsformeln wurden jeweils für verschiedene Lithologieklassen geeicht. Für jede Vegetationshöhenstufe wurden andere Klimaparameter verwendet. Bei der collinen Stufe musste ein anderes Vorgehen aufgrund der geringen Anzahl Stichprobenpunkte gewählt werden. Die collinen Flächen wurden mit dem Flaumeichenareal vom Wallis zusammengefasst, da beide ähnliche begrenzende Klimaparameter aufweisen. Beim Gesamtprojekt wurden diese Vorgehensweisen auf die ganze Schweiz ausgeweitet (unterteilt nach Jura, Nordschweiz und Alpensüdseite) und vorgängig zusätzliche Stichprobenpunkte in verschiedenen Kantonen erhoben, um genauere Resultate zu erhalten.

Beim **Teil B des Vorprojektes «Verschieben der im Teil A und im Projekt Huber et al. 2015 gefundenen Grenzen mit 2 Klimaszenarien»** (die Ergebnisse fliessen ebenfalls in den vorliegenden Bericht mit ein) wurden für die Berechnung der zukünftigen Vegetationshöhenstufengrenzen dieselben Regressionsgleichungen auf die Temperatur- und Niederschlagskarten der jeweiligen Klimazukunft angewendet. Ergebnisse der Modellierung der

Vegetationshöhenstufengrenzen waren Linien-Shapefiles für jede ausgewählte Region, die die obere Höhengrenze der jeweiligen Vegetationshöhe angeben. Das Problem war, dass die Grenzlinien nicht durchgehend waren und je nach Geologie grössere Sprünge enthielten. Daraufhin wurden im vorliegenden Gesamtprojekt die Linien in Flächen umgewandelt, was einfacher zu lesende Ergebnisse hervorbrachte.

Zusätzlich wurden das Buchen-, das Tannen-Haupt- und Nebenareal und die colline Stufe (unterteilt in die Regionen «Kantone VS und GR» und «übrige Nordschweiz») quantifiziert und modelliert. Die Arealgrenzen wurden ausgehend von den Stichprobendaten mit Hilfe eines Verbreitungsmodells bestimmt und geeicht. Für die Modellierung des Buchen- und Tannen-Hauptareals wurde jeweils ein Höhenbereich als Grundlage für die Eichung verwendet. Bei der Buche wurde anfänglich die Eichung gebietspezifisch für die folgenden Regionen durchgeführt: UR, GR, TI, VS und gesamte CH, wobei die Formel für verschiedene lithologische Klassen separat geeicht wurde. Im Gesamtprojekt wurden nur noch sieben Lithologieklassen unterschieden.

Die Verbreitung der Buche hing stark von der Föhnhäufigkeit im Jahr, der relativen Luftfeuchtigkeit und dem Sommerniederschlag ab. In geringerem Masse waren die thermische Kontinentalität und das ETa/ETp-Verhältnis ausschlaggebend.

Das Tannen-Hauptareal wurde im Vor- und im Gesamtprojekt für die gesamte Schweiz berechnet und für 55 lithologische Einheiten separat geeicht. Es zeigte sich, dass die Verbreitung der Tanne stark von der thermischen Kontinentalität abhängt, gefolgt vom Niederschlag im Sommer und in geringerem Masse von der relativen Luftfeuchtigkeit im Jahr und der Föhnhäufigkeit im Jahr. Die Grenze zwischen Neben- und Reliktareal konnte im Vorprojekt nicht zufriedenstellend modelliert werden. Um diese Grenze besser abbilden zu können, wurden deshalb im Gesamtprojekt drei Modelle für drei Regionen mit jeweils sieben lithologischen Klassen unterschieden.

Bei der collinen Stufe wurden bei beiden Regionen («Kantone VS und GR» und «übrige Nordschweiz») nur zwei Lithologieklassen berücksichtigt («Schotter und Sande», sowie restliche Lithologieklassen zusammengefasst). Es zeigte sich, dass in beiden Regionen das Verhältnis  $E_{Ta}/E_{Tp}$ , der mittlere Höchstwert der Lufttemperatur im Juli und der mittlere Tiefstwert der Lufttemperatur im April wesentlich für die Abgrenzung zur submontanen Stufe sind. Beim Modell für die Nordschweiz wurden zusätzlich noch die Klimaparameter «Niederschlagssumme Juni – August», «mittlere potenzielle Evapotranspiration im Juli», «Globalstrahlung im Jahr», «thermische Kontinentalität im Juli» und «mittlerer letzter Frosttag im Jahr» berücksichtigt. Für die Modellierung der Arealverschiebungen aufgrund der Zukunftsszenarien wurde die an der Stichprobe geeichte Formel auf Basis der neu erstellten Temperatur- und Niederschlagskarten (Periode 2070-99) angewandt.

Die modellierte Vegetationshöhenstufenkarte wurde aus den Modellierungen der Höhenstufen und den Arealen der Buche und der Tanne erstellt. Ein Vergleich der modellierten Vegetationshöhenstufen mit Höhenstufenangaben aus dem NaiS-LFI-Projekt zeigte eine gute Übereinstimmung von 91%.

Zur Verschiebung der Areal- und Vegetationshöhenstufengrenzen wurden vorerst die in Huber et al. (2015) neu erstellten Klimakarten für die Zukunft (2070-2099) berechnet. Da die Klimaszenarien auf der Referenzperiode 1981 – 2010 aufbauen, unsere Temperaturkarten aber die Periode 1961 – 1990 abbilden, wurden diese auf die Periode 1981-2010 umgerechnet. Aus dem Klimaszenario A1B wurden die Klimazukünfte ECHAM5/CLM [MPI] und ECHAM5/RegCM3 [ICTP] genommen. Für die Anpassung der Temperaturkarten an die Klimazukünfte wurde der Unterschied zwischen dem Modelllauf 2070-2099 und den gemessenen Werten der Periode 1981-2010 verwendet. So konnten neue Kartengrundlagen für die

Temperatur (inkl. Kaltluftseen), die Temperatur bei Föhnlage, den Niederschlag, die potenzielle Evapotranspiration und die potenzielle Evapotranspiration bei Föhnlagen geschaffen werden. Die in den Klimaszenarien nicht beschriebenen Klimaparameter (Wind, relative Luftfeuchtigkeit, Strahlung, Föhnhäufigkeit und thermische Kontinentalität) wurden bei den Modellierungen aufgrund von fehlendem Wissen als konstant über die Zeit angenommen, d.h. eine mögliche Veränderung dieser Parameter wurde nicht berücksichtigt.

## Summary

As a first step in the project 'Which climate parameters enable plausible explanations of limits used in NaiS (Sustainability and success monitoring in protection forests) to select ecograms?' (Huber et al. 2015) of the research programme 'Forests and Climate Change', new detailed climate maps were developed. Second, the predictive power of diverse climate parameters for the distribution areas of silver fir, beech and downy oak, as well as for the altitudinal vegetation belt limits in the cantons of SG, GR, SH, BL/BS and GE was investigated. Furthermore, it was attempted to determine threshold values (descriptive statistics, without modelling). These basics were then used in part A of the pre-project 'Extension of calculated altitudinal belt limits and of other climatically caused limits, on the basis of the project Huber et al. 2015, to additional cantons which lack site maps according to NaiS' (no report, results were updated and are implemented in this report). This part A aimed at quantifying and modelling altitudinal vegetation belt limits using climate parameters (in consideration of other site factors) in the cantons of Berne and Uri. In the canton of Berne, the landscapes Jura Mountains, Seeland, Swiss Plateau, Prealps and 'Intermediate Alps' were investigated separately because they differ in climate. Furthermore, for the cantons of SG, AR, GR, SH, BS/BL, and GE, already investigated in Huber et al. (2015), the altitudinal vegetation belt limits were modelled on an extended data basis.

Based on plausible results of the project Huber et al. 2015 and results of the pre-project (part A), the overall project 'Adapted Ecograms' was initiated. Part 1 of the overall project presented here relies on experiences and results of the pre-projects. This report describes the work done in the pre-project and in the overall project.

At first, the altitudinal vegetation belt limits were modelled for each region using climate parameters that resulted in the final report of the project Huber et al. (2015). Based on a sample of the upper limits, a linear regression model was fitted to calculate for each geological unit the temperature at the upper limit out of the considered climate parameters. Subsequently, the calculated temperature was compared with the temperature map and therefore the altitudinal vegetation belt limit directly derived from that map. The temperature at every altitudinal vegetation belt limit varies regionally and depends mainly on  $ET_a/ET_p$ , precipitation, thermal continentality and global radiation. The regression model formulas were calibrated for different lithological units. For each altitudinal vegetation belt, different climate parameters were applied. To model the colline belt, a different method was used as the number of sample points was insufficient. The colline area was merged with the distribution area of downy oak in the canton of Wallis as both are defined by similar climate parameters. For the overall project, this method was extended to entire Switzerland (classified in the Jura Mountains, Northern Switzerland and Southern Valleys) after collecting more samples in different cantons to receive more accurate results.

In part B of the pre-project 'Shifting of the limits found in part A and in the project Huber et al. 2015 with 2 climate scenarios', the results of which are implemented in the presented report, the same regression equations were used to calculate temperature and precipitation maps for the particular climate projection and to model future altitudinal vegetation belts. The results of modelling the altitudinal vegetation belt limits for the selected regions were line shapefiles, indicating the upper limit of each belt. However, this method was difficult to implement, as boundaries were discontinuous and contained large jumps caused by geology. Consequently, lines were converted to areas in the main project, which yielded results that are more easy to visualize.

In addition, the distribution area of beech, the distribution 'main area' and 'secondary area' of silver fir as well as the colline belt, subdivided in the regions 'cantons of VS and GR' and 'rest of Northern Switzerland', were quantified and modelled. Based on sample data, distribution area limits were determined and calibrated with a distribution model. To model the 'main area' of beech and silver fir, a specific altitudinal belt was used for calibration. For beech, an area-specific calibration was conducted in the beginning for the following regions: UR, GR, TI, VS and whole Switzerland, with separate calibration for different lithologic units. In the main project, only seven lithology classes were distinguished.

The distribution of beech depended strongly on the annual frequency of Föhn winds, the relative air humidity and precipitation during summer. Thermal continentality and  $ETa/ETp$ -ratio had only some explanatory power.

The silver fir 'main area' was modelled in the pre-project and the main project throughout Switzerland and calibrated for 55 different lithologic units. The distribution of silver fir depends largely on thermal continentality, followed by precipitation during summer, and, to a lesser extent, relative air humidity and annual frequency of Föhn. In the pre-project, the modelled boundary between 'secondary area' and 'relict area' had not proved satisfactory. In the main project, three regions with seven lithologic units each were therefore distinguished for the silver fir 'secondary area'.

For the colline belt, only two lithologic units were considered ('crushed stone and sands' and the remaining lithologic units merged) in two different regions ('cantons of VS and GR' and 'rest of Northern Switzerland'). In both regions, the  $ETa/ETp$ -ratio, the average maximum temperature in July and the average minimum temperature in April were important for the boundary to the submontane belt. For the model of Northern Switzerland, the following climate parameters were considered additionally: 'precipitation sum June-August', 'average potential evapotranspiration July', 'annual global radiation', 'thermal continentality July' and 'average last frost day of the year'. To model shifts of distribution areas on the basis of future climate projections, the formula that was calibrated with the sample was applied based on the modelled temperature and precipitation maps of the future period.

The modelled altitudinal vegetation belts were created from the altitudinal vegetation belt limits and the area of beech and silver fir. A comparison of the modelled altitudinal vegetation belts with data from the NaiS-LFI project showed a good agreement of 91%.

Before shifting distribution areas and altitudinal vegetation belt limits, the climate maps of Huber et al. (2015) were calculated for the future (2070 – 2099). As the climate scenarios are based on the reference period of 1981 – 2010, but our temperature maps represent the period of 1961 – 1990, the latter had to be converted to the period of 1981 – 2010. The two climate models ECHAM5/CLM [MPI] and ECHAM5/RegCM3 [ICTP] were selected from the climate scenario A1B. To adapt the temperature maps according to the future climate projections, the difference between values modelled for 2070 – 2099 and those measured during 1981 – 2010 were used. Thus, new maps for temperature (taking pools of cold air into account), temperature during Föhn events, precipitation, potential evapotranspiration and potential evapotranspiration during Föhn could be developed. Due to lack of knowledge concerning climate parameters that are not described in climate scenarios (wind, relative air humidity, radiation, frequency of Föhn and thermal continentality), they were considered to be constant over time, which means that a potential change of these parameters was not taken into account.

## 1 Einleitung

Im Projekt «Mit welchen Klimaparametern kann man Grenzen plausibel erklären, die in NaiS (Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald) verwendet werden um Ökogramme auszuwählen?» (Huber et al. 2015) aus dem Programm «Wald und Klimawandel» wurden in einem ersten Schritt neue detaillierte Klimakarten für die Schweiz erstellt. In einem zweiten Schritt wurde untersucht, welche Klimaparameter für die Arealgrenzen von Tanne, Buche und Flaumeiche sowie für die Vegetationshöhenstufengrenzen (im Bericht jeweils abgekürzt als «Höhenstufen») für die Kantone SG, GR, SH, BL/BS und GE relevant sind und es wurde versucht, allfällige Schwellenwerte zu eruieren (deskriptive Statistik, keine Modellierungen). Aufbauend auf diesen Grundlagen wurden im Vorprojekt Teil A «Ausweiten der Quantifizierung der Höhenstufengrenzen und anderer klimatisch bedingter Grenzen gemäss Projekt Huber et al. 2015 auf zusätzliche Kantone ohne Nais-nahe Standortkartierung» (kein Bericht, Ergebnisse wurden aktualisiert und fliessen im vorliegenden Bericht mit ein), für die Kantone BE und UR so weit als möglich Höhenstufengrenzen mit Klimaparametern (unter Berücksichtigung weiterer Standortfaktoren) quantifiziert und modelliert. Im Kanton BE wurden wegen unterschiedlicher Klimaregionen die Naturräume Jura, Seeland, Mittelland, Voralpen und Zwischenalpen separat betrachtet. Des Weiteren wurden bei den bereits in Huber et al. (2015) untersuchten Kantonen SG, AR, GR, SH, BS/BL und GE die Höhenstufengrenzen auf erweiterter Datengrundlage modelliert.

Der vorliegende Bericht enthält die Resultate der Vorprojekte und des Gesamtprojektes «Adaptierte Ökogramme», welche im Rahmen des Forschungsprogrammes «Wald und Klimawandel» erarbeitet wurden. Im Teilprojekt 1 wurde die Quantifizierung der Höhenstufengrenzen und anderer klimatisch bedingter Grenzen (Buchenareal, Tannen-Haupt- und Nebenareal und Flaumeichenareal (dito colline Stufe im VS) auf die übrige Schweiz ausgeweitet und aufgrund von besseren Datengrundlagen verfeinert. Danach wurden die gefundenen Grenzen mit 2 Klimazukünften in die Zukunft verschoben. Die im Teilprojekt 1 erarbeiteten Kartengrundlagen wurden nach dem Delta-Change-Ansatz (Anandhi et al. 2011) für die beiden Klimazukünfte für die Periode 2070 – 2099 neu gerechnet. Aus dem Klimaszenario A1B wurde als «trockenere» Modellierung ECHAM5/CLM (MPI), als «weniger trockenere» ECHAM5/RegCM3 (ICTP) verwendet. Die Verschiebung der Höhenstufen wurde so weit als möglich quantifiziert. Allfällige weitere Einflüsse von in den Klimaszenarien nicht beschriebenen Klimaparameter wurden in Absprache mit der Programmleitung berücksichtigt.

### Projektziele und Fragestellung

Die Hauptziele des Teilprojektes 1 waren:

- Höhenstufengrenzen für die gesamte Schweiz mit Hilfe von klimatischen Variablen (unter Berücksichtigung der Geologie) modellieren; Verschiebung der Höhenstufengrenzen in Zukunft (unter Szenario A1B),
- Arealgrenzen der Buche, der Tanne und der Flaumeiche für die gesamte Schweiz beschreiben; zukünftige Änderungen der Arealgrenzen aufzeigen.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Aufbereitung der Klimaparameter

Unter «Klimaparameter» am Anfang des Berichtes sind sämtliche verwendeten Klimakarten aufgelistet. In den folgenden Kapiteln werden die in Huber et al. (2015) von Ludwig Z'graggen und Andreas Zischg neu entwickelten Klimakarten vorgestellt. Die Karten ETa/ETp und SWB sind aus Remund (2015) und die Niederschlagskarten basieren auf den Karten des „Hydrologischen Atlas der Schweiz“ (HADES, <http://hydrologischeratlas.ch>); letztere wurden durch das Projektteam verfeinert. Die Karten «mittlerer letzter Frosttag», «mittlerer erster Frosttag» und «frostfreie Vegetationsperiode» wurden erst für dieses Projekt neu erstellt. Innerhalb des Projektes Huber et al. (2015) wurden erst Klimakarten für die Periode 1961-1990 erstellt (ausser bei der Luftfeuchte, der potenziellen Evapotranspiration und dem Wind; hier wurden die Werte der Periode 1981-2010 verwendet). Neu wurden sämtliche Karten auch für die Periode 1981-2010 berechnet und mit Szenarien in die Periode 2070-2099 transferiert (s. Kap. 2.3).

#### 2.1.1 Räumliche und zeitliche Auflösung der Kartengrundlagen

Die Klimaparameter Lufttemperatur, thermische Kontinentalität, Frosttage, Niederschlag, relative Luftfeuchtigkeit, Globalstrahlung und potenzielle Evapotranspiration wurden auf die Masstabebene der Waldstandorte gebracht. Die Flächen der Waldstandorte liegen in einer Grössenordnung ab 100 bis 500 m<sup>2</sup>. Vor allem um die genaue Lage der Höhenstufengrenzen detailliert abbilden zu können, war eine sehr hohe räumliche Auflösung erforderlich. Aus diesem Grund wurden alle räumlich sehr variablen Klimaparameter auf die Auflösung des digitalen Geländemodells von swisstopo (Maschenweite 25 m) gebracht. Der Algorithmus für die räumliche Interpolation von den Messstandorten auf die Fläche ist für jeden Klimaparameter unterschiedlich und wird im jeweiligen Kapitel beschrieben. Neu erstellte Daten wurden auf dieser Masstabebene erstellt, vorhandene Daten wurden wo möglich auf diese Auflösung gebracht.

Bezüglich zeitlicher Auflösung war zu entscheiden, ob für die Modellierungen der Höhenstufen und Areale für den Zustand «heute» die Klimaparameter der Periode 1961-1990 oder die der Periode 1981 – 2010 verwendet werden sollten. Die Periode 1981-2010 weist bereits eine kleine Erwärmung gegenüber 1961-1990 auf. Die meisten Kartierungen von Waldstandorten wurden im Zeitraum 1980-2010 durchgeführt, die Wälder wurden aber bei anderen Temperaturen begründet (eher wie Periode 1961-1990). Da die Baumartenzusammensetzung nur träge auf die Temperaturänderungen reagiert, wurden im Projekt v.a. die Temperaturkarten auf die Periode 1961-1990 bezogen. Für die Erarbeitung der Karten für Luftfeuchte, potenzielle Evapotranspiration und Wind wurden die Werte der Periode 1981-2010 verwendet, da vorher diese Parameter nicht in geeigneter Stationsdichte gemessen worden waren. Im Projekt wurde angenommen, dass sich diese Parameter zwischen den beiden Zeitperioden nicht grundsätzlich veränderten und der Einfluss der Verwendung von z.T. unterschiedlichen Zeitperioden marginal ist.

Nachfolgend wird das Vorgehen bei der Entwicklung des Kartenmaterials vorgestellt.



### 2.1.2 Lufttemperatur

Die Lufttemperatur ist einer der wichtigsten klimatischen Standortsfaktoren. Im Rahmen des Projektes wurden die Temperaturdaten für die Periode 1961-1990 aufbereitet und in die Fläche extrapoliert. Die Auflösung der Temperaturkarten entspricht der Auflösung des digitalen Geländemodells von swisstopo (Maschenweite 25 m). Es wurden Karten der mittleren Tiefstwerte und mittleren Höchstwerte für die Monate Januar, April, Juli und Oktober sowie für das Jahr erstellt. Zusätzlich wurden Karten für die absoluten Minima und Maxima erstellt.

Als Stützpunkte für die Interpolation der Temperaturen wurden ausschliesslich die Messstationen von MeteoSchweiz verwendet. Wichtig für die Pflanzenwelt sind vor allem Tagesgänge der Temperatur. In kontinentalen, inneralpinen Gebieten sind auf gleicher Höhe die mittleren täglichen Schwankungen weit grösser als am Alpennordrand oder gar an einem isolierten Gipfel im Jura oder in den äussersten Voralpen. Der mittlere Tagesgang der Temperatur entspricht im Übrigen nicht der Differenz zwischen dem Mittelwert aller täglicher Temperaturmaxima und dem Mittelwert aller täglicher Temperaturminima eines betrachteten Zeitraumes (vgl. Tab. 1). Der Grund liegt darin, dass sowohl das Temperaturmaximum als auch das Temperaturminimum zu jeder Tageszeit auftreten können. Der mittlere Tagesgang der Lufttemperatur ist die Differenz zwischen dem mittleren täglichen Höchststand der Temperatur, welcher an einer Station in der Regel um 14 Uhr nachmittags eintritt, und dem mittleren täglichen Tiefststand der Temperatur, welcher sich meist bei Sonnenaufgang einstellt. Um nun den mittleren Höchst- und Tiefststand ermitteln zu können, ist es nötig, dass man die Temperatur zeitlich hochaufgelöst (alle 10 Minuten) misst. Wenn zum Beispiel der mittlere jährliche Tagesgang zwischen 1961 und 1990 bestimmt werden soll, so wird für jeden Zeitpunkt, das heisst alle 10 Minuten, von 0 Uhr bis 23.50 Uhr der Mittelwert der Lufttemperatur über die Jahre 1961 bis 1990 errechnet. Dies sind also für jeden Zeitpunkt 10'957 Werte, für jeden Tag zwischen 1961 und 1990 ein Wert. Damit kann anschliessend die Temperaturkurve in Abhängigkeit von der Tageszeit ermittelt werden. Diese Temperaturkurve ähnelt in der Regel einer Sinuskurve. Der höchste Wert dieser Temperaturkurve wird nun als mittlerer täglicher Höchststand der Temperatur bezeichnet, der tiefste Wert dieser Kurve entsprechend als mittlerer täglicher Tiefststand der Temperatur.

**Tab. 1: Schematische Darstellung der Berechnung des mittleren täglichen Höchst- und Tiefstandes sowie des mittleren Tagesmaximums und Tagesminimums.**

	0.00h	7.00h	7.10h	14.30h	14.40h	23.40h	23.50h	Tages- max.	Tages- min.
01.01.1961	-3.2	-3.4	-3.0	0.0	0.3	-7.8	-8.0	0.5	-7.8
02.01.1961	-8.0	-7.7	-8.1	-5.0	-4.6	-6.1	-6.2	-4.4	-8.1
.....									
31.07.1983	10.0	8.9	8.8	30.0	30.6	12.1	11.8	30.6	8.8
.....									
.....									
30.12.1990	8.1	4.6	5.2	-1.0	-1.3	-3.0	-3.2	8.1	-3.2
31.12.1990	-3.3	-3.4	-3.8	-4.6	-4.8	-8.2	-8.5	-3.3	-8.5
Mittelwert 1961-1990	6.1	5.2	5.1 mittl. Tages- tiefst- stand	12.4	12.5 mittl. Tages- höchst- stand	6.2	6.1	13.6 mittl. Tages- maxi- mum	4.1 mittl. Tages- mini- mum

Es ist klar, dass das **mittlere Tagesmaximum der Temperatur immer höher oder mindestens gleich hoch sein muss wie der mittlere tägliche Höchststand der Temperatur**, ebenso ist das **mittlere Tagesminimum der Temperatur immer tiefer oder gleich tief wie der mittlere tägliche Tiefstand der Temperatur** (vgl. Tab. 1). In Tab. 1 beträgt also der mittlere Tagesgang  $7.4^{\circ}\text{C}$ , wobei der mittlere Tagestiefstand  $5.1^{\circ}\text{C}$  beträgt und um 7.10 Uhr eintritt und der mittlere Tageshöchststand  $12.5^{\circ}\text{C}$  beträgt und um 14.30 Uhr erfolgt. **Die Differenz zwischen dem mittleren Tageshöchststand und dem mittleren Tagestiefstand, also der mittlere Tagesgang der Lufttemperatur an einem bestimmten Ort ist ein gutes Mass für die thermische Kontinentalität eines Ortes**, weil er die **mittlere strahlungsbedingte Temperaturänderung eines Ortes** darstellt. Die Differenz zwischen mittlerem Tagesmaximum, welches in Tabelle 1 einen Wert von  $13.6$  aufweist und dem mittleren Temperaturminimum, welches in Tabelle 1 den Wert  $4.1^{\circ}\text{C}$  aufweist, wird **mittlerer Tagesbereich** der Temperatur genannt. Er beträgt in Tabelle 1  $13.6^{\circ}\text{C} - 4.1^{\circ}\text{C}$ , also  $9.5^{\circ}\text{C}$ . Der mittlere Tagesbereich ist **immer** grösser als der mittlere (strahlungsbedingte) Tagesgang. Die Differenz zwischen dem mittleren Tagesbereich und dem mittleren Tagesgang wird **aperiodische Komponente** genannt. Diese beträgt im obgenannten Fall  $9.5^{\circ}\text{C} - 7.4^{\circ}\text{C}$ , also  $1.9^{\circ}\text{C}$ . Die aperiodische Komponente ist ein Mass für die Häufigkeit der Auswechslung von unterschiedlich temperierten Luftmassen.

In der Schweiz gibt es nun Orte, die einen hohen Tagesgang der Temperatur aufweisen. Dies sind inneralpine Gebiete im Wallis, in Graubünden oder im Nordtessin, wo in den Niederungen mittlere jährliche Tagesgänge von  $10^{\circ}\text{C}$  und mehr möglich sind. Umgekehrt sind diese Gebiete von Luftmassenwechseln relativ wenig betroffen, die aperiodische Komponente ist dort mit  $1.5$  bis  $2^{\circ}\text{C}$  deshalb relativ klein. Demgegenüber weisen exponierte Gipfellagen in den Voralpen nur einen sehr geringen Tagesgang der Temperatur auf, welcher  $2^{\circ}\text{C}$  kaum überschreitet. Die aperiodische Komponente kann aber in diesen Lagen bis  $3^{\circ}\text{C}$  erreichen, weil Luftmassenwechsel in solchen Lagen sehr häufig stattfinden. Allgemein kann aber gesagt werden, dass der mittlere Tagesgang schweizweit mit einem Bereich von  $2$  bis über  $10^{\circ}\text{C}$  deutlich grössere regionale Unterschiede aufweist als die aperiodische Komponente, welche nur zwischen etwa  $2$  und  $4^{\circ}\text{C}$  schwankt.

Der Grund, weshalb in der vorliegenden Arbeit der mittlere Tagesgang berücksichtigt wurde, liegt darin, dass sich der Tiefstwert ganz anders auswirkt, wenn er in der Nacht auftritt als wenn er tagsüber auftritt. Tritt Frost in der Nacht auf, so wirkt er viel schädlicher auf die Pflanze, da in vielen Fällen noch die Ausstrahlung dazukommt, welche an der Pflanzenoberfläche noch tiefere Minima verursacht. Tagsüber hingegen wirkt sich eine Lufttemperatur, welche wegen einer kurzzeitigen Kaltluftadvektion unter 0°C sinkt, auf der Pflanzenoberfläche kaum negativ aus, da die Strahlung der Pflanzenoberfläche deutlich höhere Temperaturen beschert. Umgekehrt wirkt sich ein kurzzeitiger nächtlicher Föhnneinbruch, welcher die Temperatur auf hohe Werte treibt, bei einem Waldbaum kaum aus, da der Baum nachts photosynthetisch inaktiv ist. Wenn ein Temperaturhöchstwert hingegen mit hoher Einstrahlung gekoppelt ist, hat dies für die Pflanzenwelt einen grossen Einfluss.

Da in der Schweiz die Temperaturen erst seit den 1980er Jahren alle 10 Minuten gemessen werden, konnten erst ab diesem Zeitpunkt die Tagesgänge und die aperiodischen Komponenten ermittelt werden. Um Tagesgänge für die gewünschte Zeitperiode 1961-1990 zu erhalten, wurden für diese Zeitperiode das mittlere Minimum und das mittlere Maximum an sämtlichen Stationen von MeteoSchweiz berechnet und diese dann um die erhaltenen aperiodischen Komponenten der Jahre 1981-2010 korrigiert. Mit diesem Verfahren konnte an sämtlichen Stationen von MeteoSchweiz der mittlere Tagestiefststand und der mittlere Tageshöchststand ermittelt werden. Dieses Verfahren wurde auf das gesamte Jahr sowie auf die für die vier Jahreszeiten repräsentativen Monate Januar, April, Juli und Oktober angewendet. Grundlage für die nun berechneten Karten waren also die mittleren Tagestiefststände und die mittleren Tageshöchststände der Zeitperiode 1961-1990 im gesamten Jahr, sowie in den Monaten Januar, April, Juli und Oktober.

Anschliessend wurden die Temperaturwerte der Stationen auf repräsentative Lagen einer Region umgerechnet. Als repräsentative Lage wurde eine Hanglage mit durchschnittlichen Strahlungsverhältnissen, also eine Hanglage westlicher oder östlicher Exposition betrachtet, welche zusätzlich nicht im Einflussbereich von lokalen Kaltluftseen steht. So wurde bei Nordhängen die Temperatur tagsüber erniedrigt, an einem Südhang dagegen erhöht. Diese Korrekturen erreichten kleine Beträge von meist weniger als 0.5°C, da sich die Stationen in den meisten Fällen in nur schwach geneigten Lagen befinden. Im April und Juli sind infolge der kräftigen Talwinde und der labilen Luftschichtung die Expositionsunterschiede vernachlässigbar klein (Volken, 2008 sowie langjährige Temperaturmessungen von L. Z'graggen in der oberen Leventina). Bedeutender waren die Korrekturen bei Stationen mit Kaltluftseelagen. Hier konnten die Beträge an einzelnen Stationen bei den Tiefstständen bis 10°C erreichen, so im Monat Januar an der Station Samedan im Oberengadin, welche in einem extremen Kaltluftsee liegt, vgl. Kapitel Kaltluftseen.

Mit Hilfe von jahreszeitabhängigen Gradienten wurden die Werte der Stationen in Höhenlagen von 500, 1000 und 2000 Metern berechnet. Diese projizierten Werte wurden auf den genannten Höhen flächig interpoliert. Dabei wurden gutachterlich auf einer Landeskarte im Massstab 1:300'000 Isolinien gezeichnet. Die gutachterliche Erstellung der Isolinien für die flächige Interpolation der Temperaturen auf 500, 1000 und 2000 m war notwendig, da die verschiedenen Kriging-Verfahren die Gradienten entlang des Alpenhauptkammes und spezielle Temperaturverhältnisse in anderen Gebieten nicht zufriedenstellend abbilden konnten. So liegt zum Beispiel der Höchststand der Temperatur im Juli in Göschenen fast 3°C tiefer als im gleichhoch gelegenen Airolo, während zwischen Göschenen und einem Ort in der Nordschweiz kaum Unterschiede bestehen (langjährige Temperaturmessungen zwischen 2000 und 2013 im oberen Reusstal und in der oberen Leventina durch L. Z'graggen). Zusätzlich zu diesen drei Höhenlagen wurden Isolinienkarten in der Höhenlage von 3500 m erstellt, um die Gradienten zwischen

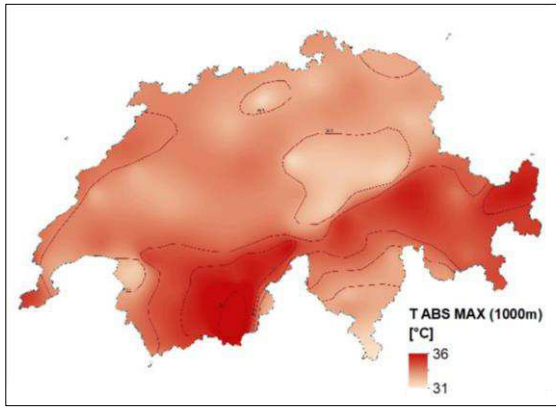
2000 m und 3500 m flächig modellieren zu können. Diese basierten jeweils auf dem Messwert der Station Jungfrauoch und einem leichten von Nord nach Süd gerichteten horizontalen Gradienten (+1°C im Süden bei Chiasso und – 1°C im Norden bei Schaffhausen), denn gemäss den Radiosondierungen in Payerne, München und Milano kann zwischen Schaffhausen und Chiasso in grosser Höhe ein Temperaturunterschied von etwa 2°C erwartet werden (Auswertung durch L. Z'graggen am Geographischen Institut der ETH Zürich, nicht publ.). Mit dem GIS-Programm «Topo to Raster» (<https://pro.arcgis.com/de/pro-app/tool-reference/3d-analyst/topo-to-raster.htm>) wurden anhand der digitalisierten Isolinien auf den genannten Höhenlagen 500, 1000, 2000 und 3500 m die jeweiligen Temperaturwerte auf jeden Gitterpunkt mit einer Maschenweite von 25 m interpoliert. Damit war für die Höhenlagen 500 m, 1000 m, 2000 m und 3500 m an jeden Gitterpunkt die Temperatur errechnet. Abb. 1 zeigt die Verteilung einiger Temperaturwerte in einer Höhenlage von 1000 m, worauf weiter unten noch näher eingegangen wird.

**Da die absoluten Höchst- und Tiefsttemperaturen für die Pflanzenwelt bedeutend sein können**, wurde zusätzlich noch eine Karte der absoluten Temperaturminima (1864 bis 1990) und der absoluten Temperaturmaxima (1864 bis 1990) erstellt. Die Ausdehnung auf mehr als ein Jahrhundert war notwendig, weil insbesondere extreme Kältewellen selten auftreten und Temperaturminima von -28 bis -36°C, wie sie im Februar 1929 in der Ostschweiz auftraten, vorher nie gemessen wurden und sich auch seither nicht annähernd wiederholten. Auch bei den absoluten Maxima gilt das Gesagte. So trat beispielsweise im Tessin am 17. Juli 1881 in Bellinzona um 13.30 Uhr ein Temperaturwert von 37.9°C auf. Bis zum Höchststand von 14.30 Uhr wird die Temperatur noch um 1 bis 1.5°C gestiegen sein. Dies ergäbe dann über 39°C. Es dauerte dann bis zum 11.8.2003, als eine ähnliche Wetterlage diesen Wert mit ca. 40.0°C überbot. In den Jahren 1961-1990 wurden dort 38°C kaum überschritten. Bei der Erarbeitung der Karte für die absoluten Minima wurde zusätzlich neben Temperaturkarten auf 500, 1000, 2000 und 3500 m noch eine Temperaturkarte für eine Höhenlage von 1500 m erstellt, da in dieser Höhenlage die Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen Regionen wie in 1000 m Höhe noch beträchtlich sind.

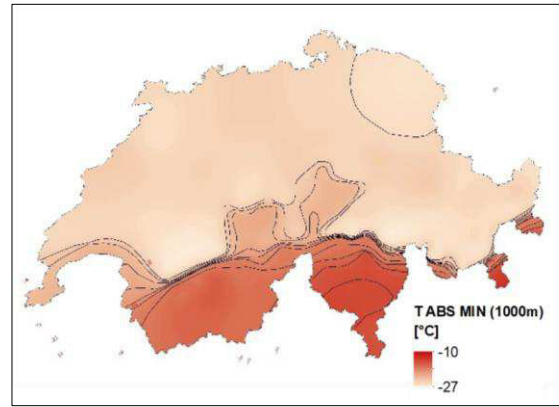
Die in Abb. 1 dargestellten Karten zeigen die unterschiedlichen Temperaturverhältnisse auf 1000 Metern deutlich. Die ersten Karten stellen die absoluten Höchst- und Tiefstwerte in 1000 Meter dar. Bei den Maxima zeigt der inneralpine Wärmedom deutlich an. So werden in den Vispertälern und im Unterengadin bei Schuls auf 1000 Metern um 35°C erreicht. Ausgehend von diesen zwei Wärmepolen verläuft ein Band von hohen Temperaturmaxima von mehr als 33°C über das gesamte Oberwallis und das nördlichste Tessin über Mittelbünden bis ins Engadin. Über dem Mittelland, im Jura und trotz gelegentlicher heisser Föhnstage auch am zentralen und östlichen Alpennordhang treten nur noch Werte um 31 bis 32°C auf. Ganz anders das Bild bei den absoluten Tiefstwerten. Hier sticht die Ostschweiz mit sehr tiefen Werten von -25°C und darunter deutlich hervor. Dies ist dadurch zu erklären, dass bei extremen Tiefsttemperaturen die Luftmasse immer von Nordosten herkommt und sich nach Südwesten hin allmählich erwärmt. Die Alpensüdseite bleibt vom Zustrom sehr kalter Arktisluft durch die Alpen weitgehend geschützt, weil in diesem Fall Nordföhn auftritt, welcher wegen adiabatischer Erwärmung in tieferen Lagen keine allzu tiefen Werte mehr bringen kann. Nimmt die aus Nordosten eintreffende Kaltluft den Weg via Adria und Poebene und strömt auf diese Weise ins Tessin ein, so ist die Luft wegen dem Überqueren der warmen Adria deutlich milder geworden. Insbesondere das Südtessin erreicht auf 1000 m nur absolute Tiefstwerte von -17°C. Überraschend sind die nicht sehr tiefen Minima in der Zentralschweiz, insbesondere im Urnerland sowie im Berner Oberland. In diesen Gebieten wirken die tiefen Alpenrandseen stark erwärmend. Wenn sehr kalte Luft beispielsweise ins Urnerland eindringt, so muss sie den

Urnersee überqueren. Eine Kaltluft, welche in Luzern und Zug noch  $-20^{\circ}\text{C}$  aufweist, kommt besonders in tieferen Lagen im Urnerland deutlich milder an. Erfahrungsgemäss beträgt die Erwärmung meist bedeutsame  $3^{\circ}\text{C}$ . Das sonst als sehr kontinentales Gebiet bekannte Wallis zeigt ebenfalls überraschend kleine extremen Tiefstwerte auf. Dies hat zwei Gründe. Zum einen muss die arktische Kaltluft, wenn sie ins Wallis eindringt, den weiten Umweg über den Genfersee und das Rhoneknie machen. Dabei ist die Kaltluft in der Westschweiz bereits wärmer als in der Nordostschweiz und wird ausserdem beim Überqueren eines Teils des Genfersees erwärmt. Andererseits haben die bei solchen Kältewellen stets vorherrschenden Nordostwinde im Oberwallis in den höheren Luftschichten föhnartige Erwärmung zur Folge, was extreme Tiefstwerte ebenfalls verhindert. Das Engadin, welches nach Nordosten offen ist, und auch Nord- und Mittelbünden, welche via das Rheintal nach Norden geöffnet sind, sind hingegen dem Zustrom arktischer Kaltluft fast in gleicher Masse ausgesetzt wie die Ostschweiz. Bei den Höchstständen der Temperatur im Jahr und auch in den Monaten Januar, April, Juli und Oktober zeichnen sich die strahlungsreichen Gebiete der Schweiz durch hohe Temperaturen aus. Im Januar ist dies besonders die Alpensüdseite, in deutlich geringerer Masse das Engadin und das Wallis. Der häufig infolge Staulagen bewölkte Alpennordhang und besonders das oft von Hochnebel betroffene Mittelland sind dagegen recht kalt. Auch im April ist das Bild noch ähnlich, allerdings ist der Unterschied zwischen der Alpensüdseite und den inneralpinen Gebieten des Wallis und des Engadins bereits weniger ausgeprägt. Im Juli verschiebt sich das Wärmemaximum in die inneralpinen Gebiete, nämlich ins Gebiet der Vispertäler und des Unterengadins. Auch Mittelbünden und das Nordtessin sind noch sehr warm, während das Südtessin nicht mehr zu den wärmsten Gebieten zählt. Der wiederum häufig bewölkte Alpennordhang sowie das Mittelland und der Jura sind wie schon im Januar und April als kalte Gebiete zu betrachten. Die Erklärung der hohen Temperaturen im Wallis und im Engadin, insbesondere im Unterengadin und in den Vispertälern, lässt sich durch den sogenannten Massenerhebungseffekt erklären. Die hochgelegenen Talsohlen und Berghänge der genannten Gebiete können sich stärker aufheizen als die in gleicher Höhe über den nördlichen Voralpen gelegenen isolierten Gipfel, welche von einem grossen Luftmeer umgeben sind. Ausserdem herrscht im Engadin und im Wallis oft recht sonniges Wetter vor, während am Alpennordhang durch die häufigen Nordwestwinde Staubewölkung herrscht, was eine Aufheizung reduziert. Auch im Oktober sind die Innenalpen noch wärmer als die anderen Gebiete. Wie in den übrigen Jahreszeiten ist das Südtessin, obwohl es auch keine grosse Massenerhebung aufweist, wärmer als der Jura und das Mittelland. Der Grund liegt darin, dass südlich der Alpen meist wärmere Luftmassen herrschen und dass es im Südtessin deutlich sonniger ist als nördlich der Alpen, was die Luftmasse, wenn auch in geringerer Masse als in den Innenalpen, tagsüber doch stärker erwärmt als auf der Alpennordseite.

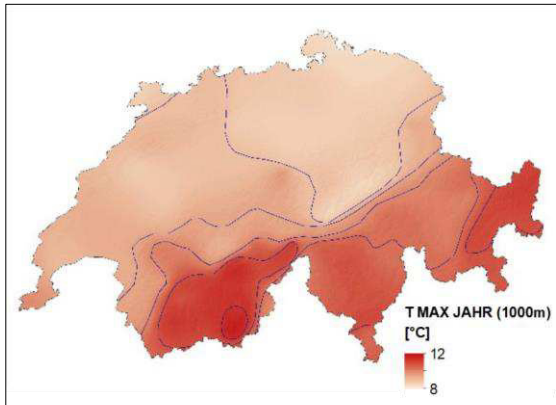
Die mittleren Tiefststände im Jahr und in den einzelnen Monaten zeigen ein recht einheitliches Bild. Zum einen gibt es eine auffallende Nord-Südtrennung. Das heisst, die Alpensüdseite ist aufgrund anderer Luftmassen stets deutlich wärmer als die übrigen Gebiete. Zum anderen sind im Juli und Oktober die inneralpinen Landschaften nur unwesentlich kälter als die Voralpen oder das Mittelland und der Jura. Die hochgelegenen Berghänge kühlen zwar nachts stärker ab als isolierte Gipfel der Voralpen. Dieser Effekt tritt jedoch nur zwischen Mittelbünden und dem östlichen Alpennordhang etwas hervor. Demgegenüber ist das Berner Oberland etwas kühler als das kontinentale Wallis. Die im Juli häufig vorhandenen Nordwestwinde bewirken im Wallis einen gewissen Föhneffekt. Dieser wirkt erwärmend und kann den Effekt der von der Massenerhebung hervorgerufenen stärkeren Auskühlung überkompensieren.



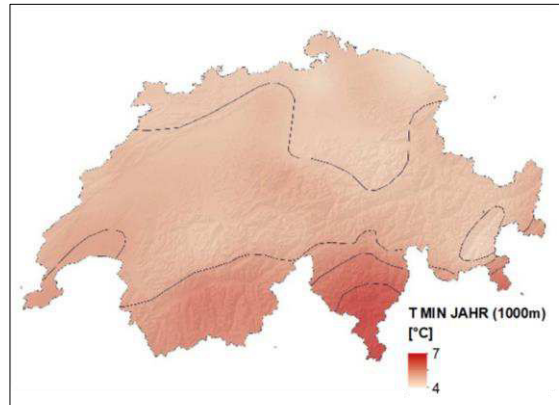
Absolute Maxima in der Periode



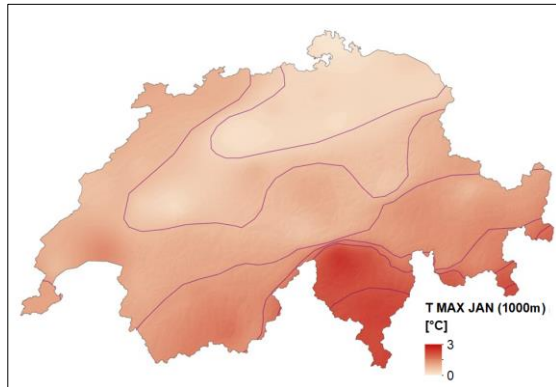
Absolute Minima in der Periode



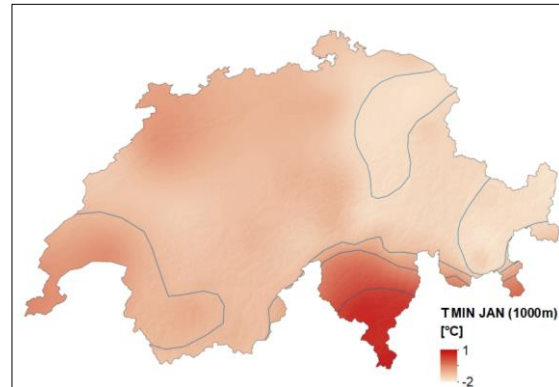
Jahreshöchstwerte



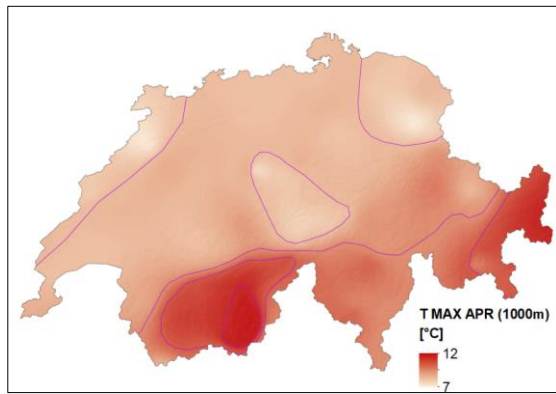
Jahrestiefstwerte



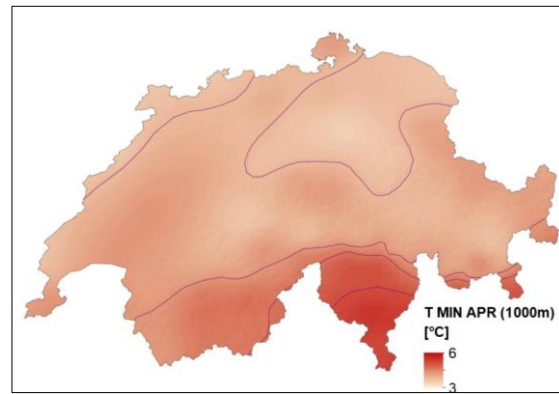
Mittlere Höchstwerte Januar



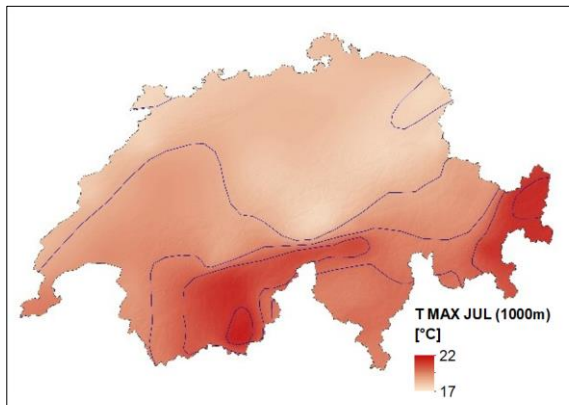
Mittlere Tiefstwerte Januar



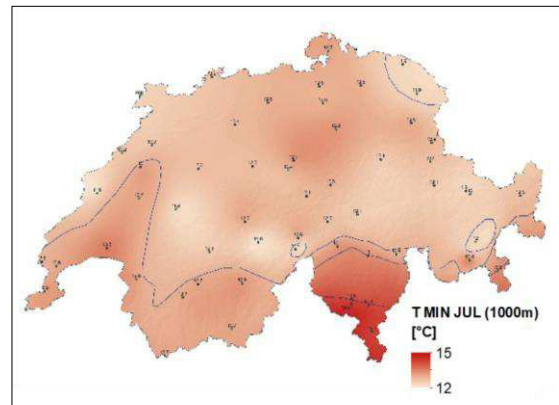
Mittlere Höchstwerte April



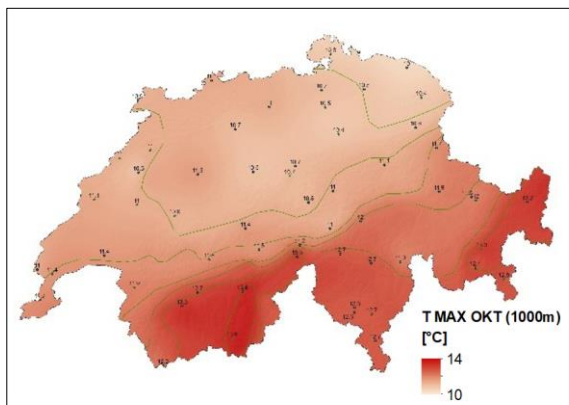
Mittlere Tiefstwerte April



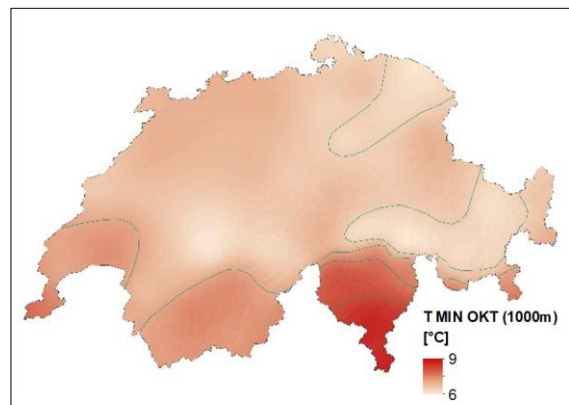
Mittlere Höchstwerte Juli



Mittlere Tiefstwerte Juli



Mittlere Höchstwerte Oktober



Mittlere Tiefstwerte Oktober

**Abb. 1:** Verteilung der Lufttemperatur in 1000 m Höhe in der Periode 1961-1990. Für die Interpolation wurden die korrigierten Stationswerte und gutachterlich abgegrenzte Isolinien verwendet. Legende: rot = hohe Temperaturen, weiss = tiefe Temperaturen. Einzig bei den Karten der absoluten Maxima und Minima wurde auf die Periode 1864 bis 1990 zurückgegriffen, weil sehr extreme Temperaturen, besonders Tiefsttemperaturen, nur sehr selten auftreten und so die extremen Tiefstwerte vom Februar 1929 unberücksichtigt geblieben wären.

Für die Berechnung der einzelnen Temperaturwerte auf reelle Höhen des digitalen Geländemodells mit einer Gittermaschenweite von 25 m wurden zwischen den verschiedenen Höhenstufen die Gradienten aus den Temperaturkarten auf 500 m, 1000 m, 1500 m, 2000 m und 3500 m auf jedem Gitterpunkt berechnet und anschliessend die Temperatur auf die reelle Höhe desselben Gitterpunktes berechnet. Unterhalb der Höhenlage von 500 m wurde der Gradient zwischen 500 und 1000 Meter als repräsentativ betrachtet, oberhalb der Höhenlage von 3500 m wurden in Abhängigkeit von der Jahreszeit pauschal Gradienten zwischen 0.5 und 0.7°C/100 m verwendet.

Diese Basiskarten der Temperatur wurden anschliessend um die Strahlung, die Gletscherflächen und um die Kaltluftseen bereinigt. Die Temperatur auf Gletscherflächen wurde pauschal um -2°C korrigiert.

### 2.1.2.1 Kaltluftseen

In einem reich gekammerten Land wie der Schweiz treten innerhalb kleiner Distanz oft erhebliche Temperaturunterschiede auf. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn sich in einem Gebiet bei klaren Nächten durch Abstrahlung eine kräftige bodennahe Inversion auszubilden vermag. Besonders in abgeschlossenen Talbecken der Alpen und des Juras bilden sich oft solche Inversionen, welche auch **Kaltluftseen** genannt werden. Für die Pflanzenwelt sind Kaltluftseen von grosser Wichtigkeit, tritt doch in Kaltluftseen zu einem viel späteren Zeitpunkt im Frühjahr noch Frost auf als an einem Hang in gleicher Höhenlage. So kann es vorkommen, dass Baumarten, zum Beispiel Buche oder in vermindertem Masse auch die Tanne, welche auf Spätfrost oder auch auf extrem tiefe Wintertemperaturen empfindlich sind, in Gebieten mit starken Kaltluftseen nicht mehr gedeihen. Deshalb ist es wichtig, die Kaltluftseen, zumindest jene, welche ganze Talschaften beeinflussen, möglichst genau zu kartieren. Für einige Gebiete, wie im Goms, im Oberengadin oder um La Brévine im Neuenburger Jura, konnte die Stärke der Kaltluftseen gut abgeschätzt werden, da sich dort in der Talsohle Messstationen befinden. An anderen Orten musste die Stärke der Kaltluftseen aufgrund von grossflächigen Thermalaufnahmen und aus Angaben von alten Klimastationen abgeschätzt werden. Mit diesen Verfahren konnte somit die Temperaturabweichung gegenüber der freien Atmosphäre im tiefsten Bereich der Talsohle bestimmt werden. In einem zweiten Schritt musste die Mächtigkeit eines Kaltluftsees ermittelt werden. Dabei wurde im Allgemeinen angenommen, dass oberhalb eines stauenden Hindernisses, zum Beispiel einem Talriegel oder einer Talverengung, kein Kaltluftsee mehr existiert (vgl. Abb. 2). Meistens sind diese Hindernisse nicht mehr als 150 Meter mächtig. Es gibt aber Gebiete, wo das stauende Hindernis bis 600 Meter mächtig ist. So verengt sich unterhalb Martina im Unterengadin das bisher breite Tal sehr abrupt zur Schlucht. Selbst 600 Meter über der Talsohle ist diese Talverengung noch spürbar. Damit ist anzunehmen, dass der dortige Kaltluftsee von Martina an talaufwärts eine Mächtigkeit von 600 Meter hat und das Klima des Engadins noch bis 1600 m ü. M. beeinflusst. Allerdings nimmt die Intensität mit der Höhe stetig ab (Abb. 2).



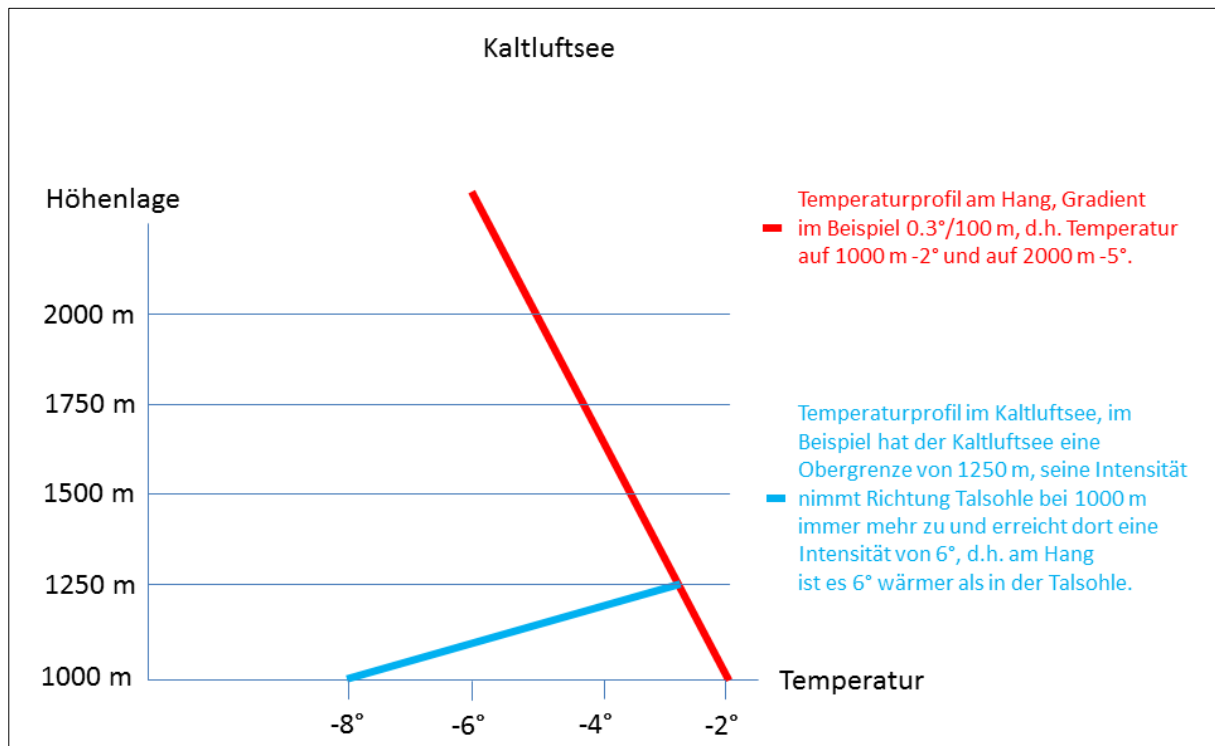


Abb. 2: Schematische Darstellung eines Kaltluftsees.

In abflusslosen Mulden, wie sie etwa im Jura vorkommen, wurde im Prinzip gleich verfahren wie in einem Tal. Auch hier wurde die grösste Kaltluftintensität am tiefsten Punkt des Beckens angenommen. Auch wurde angenommen, dass oberhalb des tiefsten umgebenden Randes des Beckens kein Kaltluftsee mehr existiert. Abb. 3 zeigt die berücksichtigten Kaltluftseen. Es erstaunt, dass das Mittelland und der Juranordfuss einen grossflächigen Kaltluftsee darstellen. Dies kann jedoch bei extremen Kältewellen der Fall sein. Im Jahresmittel und bei den Monatsmitteln fallen hingegen diese Gebiete kaum auf. Kaltluftseen, welche sich auch bei den Jahresmitteln und Monatsmitteln bemerkbar machen, sind besonders in den Alpentälern, so zum Beispiel im Oberengadin oder im Goms, zu finden. So reduziert der häufig auftretende, extreme Kaltluftsee bei Samedan den Tagestiefststand der Temperatur im Januar um bis zu  $10^{\circ}\text{C}$ . An heiteren Tagen kann der Unterschied noch weit grösser sein. So kann es im Oberengadin, im Urserental und im Obergoms in einzelnen Winternächten 15 bis  $20^{\circ}\text{C}$  kälter sein als an einem Hang in gleicher Höhe, welcher nicht von Kaltluft beeinflusst wird. In abgeschlossenen Becken, wie in La Brévine, können sogar  $20^{\circ}\text{C}$  Temperaturunterschied überschritten werden. Auch auf der Alpensüdseite gibt es starke Kaltluftseen. Erwähnt sei der Kaltluftsee von Ambri in der Leventina, wo es in einer klaren Winternacht mehr als  $15^{\circ}\text{C}$  kälter sein kann als an einem Hang auf gleicher Höhe weiter talabwärts. Allerdings treten Kaltluftseen nicht überall gleich häufig auf. So kann bei Samedan im Oberengadin fast in jeder klaren Nacht mit einem Kaltluftsee gerechnet werden, während im Urserental der Föhn oder in der oberen Leventina der Nordföhn die Kaltluftseebildung oft unterbindet.



Abb. 3: Berücksichtigte Kaltluftseen.

Wie man in Abb. 4 gut erkennen kann, werden die absoluten Minima beim Vorhandensein von Kaltluftseen stark gesenkt. Dies ist vor allem in den Gebieten mit den intensivsten Kälteseen zu erwarten, so in La Brévine, im Vallée de Joux, im Gebiet um Rothenturm sowie im Obergoms, im Urserental, im Oberengadin, speziell im Becken um Samedan und Buffalora am Ofenpass sowie auf der Glattalp. Hier können die absoluten Minima um 10, in abgeschlossenen Becken sogar bis 15°C tiefer liegen als an einem gleichhoch gelegenen Standort an einem Berggipfel oder an einem Steilhang. So werden an einem Berggipfel in 1000 Metern im Jura als extremster Tiefstwert -26°C kaum unterschritten, währendem in La Brévine bis -42°C gemessen werden können. In Ulrichen im Obergoms kann die Temperatur auf fast -35°C absinken, während sie an einem Steilhang im Wallis auf 1300 Metern kaum unter -22°C fällt. Auf den ersten Blick etwas überraschend sind die grösseren Abweichungen im östlichen Mittelland, wo lokale Kälteseen 6°C tiefere Temperaturen bringen können als eine normale Lage, während es in der Westschweiz nur etwa 4°C sind. Dies rührt daher, dass bei extremen Kälteperioden fast immer eine nordöstliche Bodenströmung herrscht. Beim nächtlichen Aufklaren des Himmels kann die im östlichen Mittelland herrschende, schwache Nordostströmung (Bise) einschlafen, womit sich in Kälteseen sehr tiefe Minima von -30°C, lokal sogar noch tiefer, einstellen können. In der Westschweiz dagegen bläst bei diesen Wetterlagen meist eine starke Bise, welche die nächtliche Auskühlung stärker behindert. So sind dort auch in Kälteseen kaum Temperaturen von weniger als -25°C zu erwarten, zumindest im Genferseegebiet nicht.

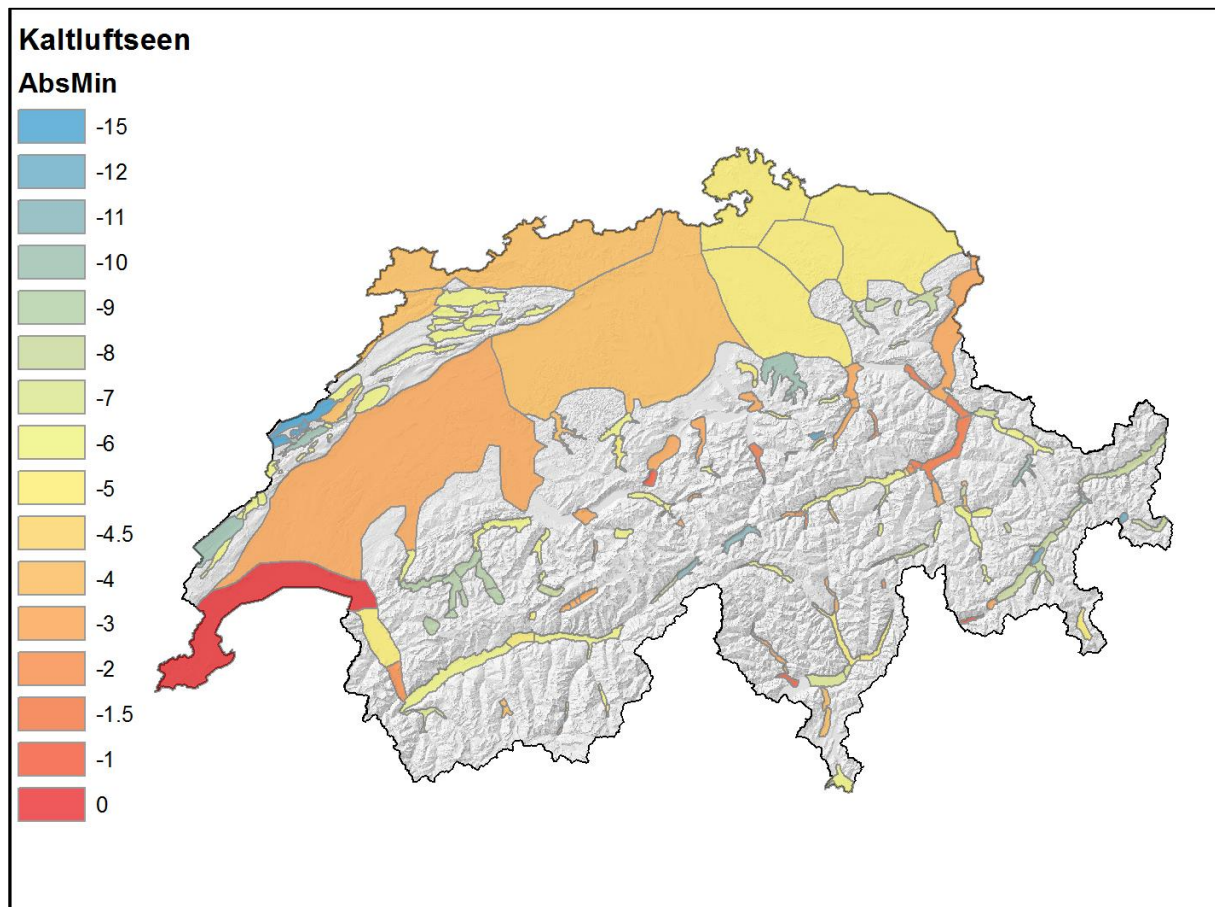


Abb. 4: Intensität der berücksichtigten Kaltluftseen bei den absoluten Minima.

Die in Abb. 5 dargestellten Intensitäten beim Tiefststand der Temperaturen im Januar zeigen gegenüber den absoluten Minima ein anderes Bild. Erstens sind die Intensitäten geringer. Dies ist nicht erstaunlich, weil im langjährigen Monatsmittel nicht nur Tage mit Bildung von Inversionen berücksichtigt sind, sondern das ganze Spektrum der Wetterlagen einfließt. Damit ist auch klar, weshalb im Mittelland die Kaltluftseen bei Tiefststand des Monats Januar kaum zur Geltung kommen. Im Mittelland liegt nämlich bei Hochdruckwetterlagen meist eine kompakte Nebeldecke, welche das Ausbilden von Kaltluftseen unterbindet. Demgegenüber sind die Hochtäler des Juras, wo es häufig klare Nächte gibt, und ganz besonders der Alpen, in denen es im Januar fast jede zweite Nacht heiter ist, oft von der Bildung von Kaltluftseen betroffen. Wo zusätzlich die Intensität des Kaltluftsees in einer heiteren Nacht sehr gross ist, wie beispielsweise im Oberengadin, wird der Tiefststand der Temperatur im Januar sehr stark erniedrigt. Abweichungen von 10°C gegenüber einer Hanglage sind durchaus möglich, wie zum Beispiel in Samedan. Die in Abb. 6 bis Abb. 9 dargestellten Intensitäten bei den Tiefstständen der Temperatur der Monate April, Juli, Oktober und im ganzen Jahr zeigen ein ähnliches Bild wie der Monat Januar, allerdings werden die Intensitäten allgemein schwächer. Der Grund liegt hauptsächlich darin, dass in den genannten Monaten die Schneedecke, welche als Isolator wirkt, fehlt. Damit kühlen die bodennahen Luftschichten nicht mehr so stark aus wie im Monat Januar. Einzig im Mittelland nimmt die Intensität der Kaltluftseen etwas zu. Grund sind dort die öfters auftretenden, klaren Nächte, welche im Monat Januar wegen des herrschenden Nebels selten sind.



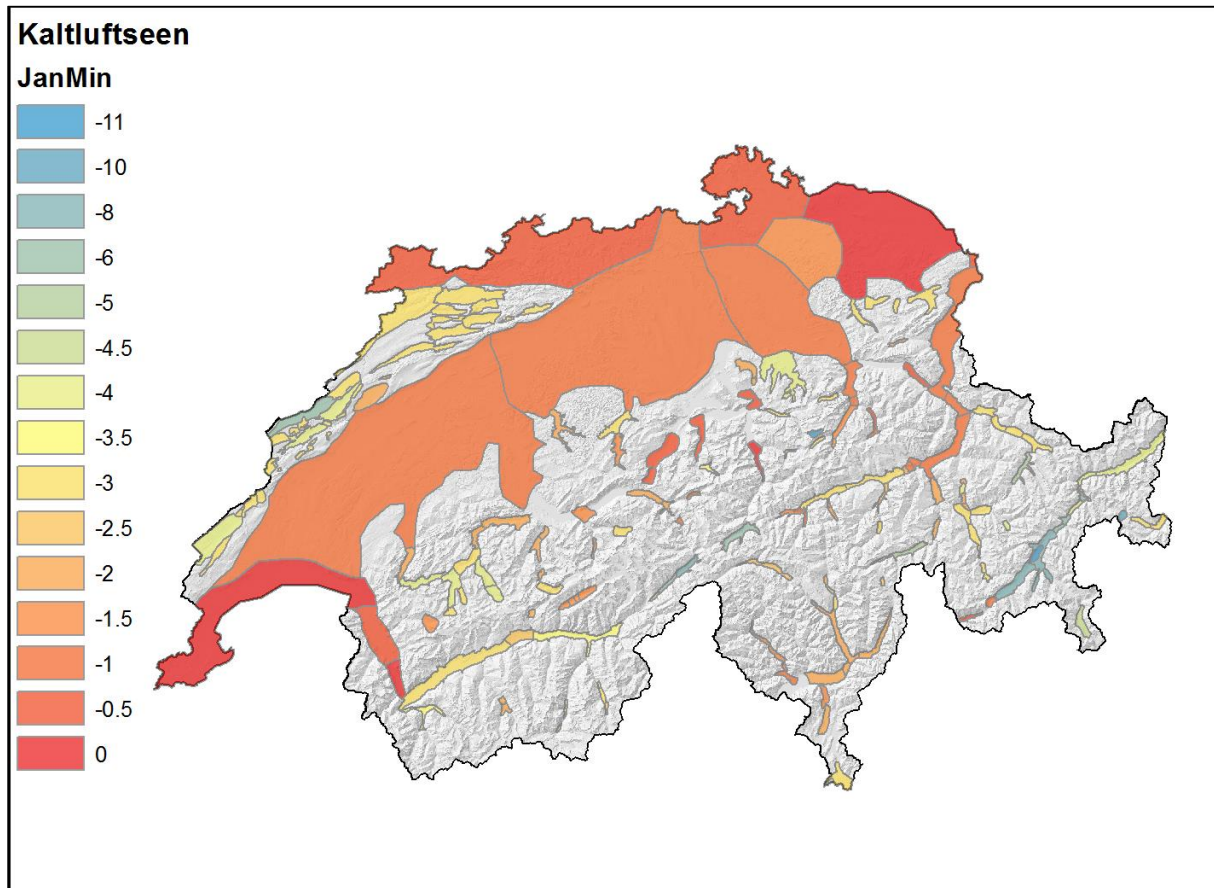


Abb. 5: Intensität der berücksichtigten Kaltluftseen beim mittleren Tiefststand der Temperatur im Januar.

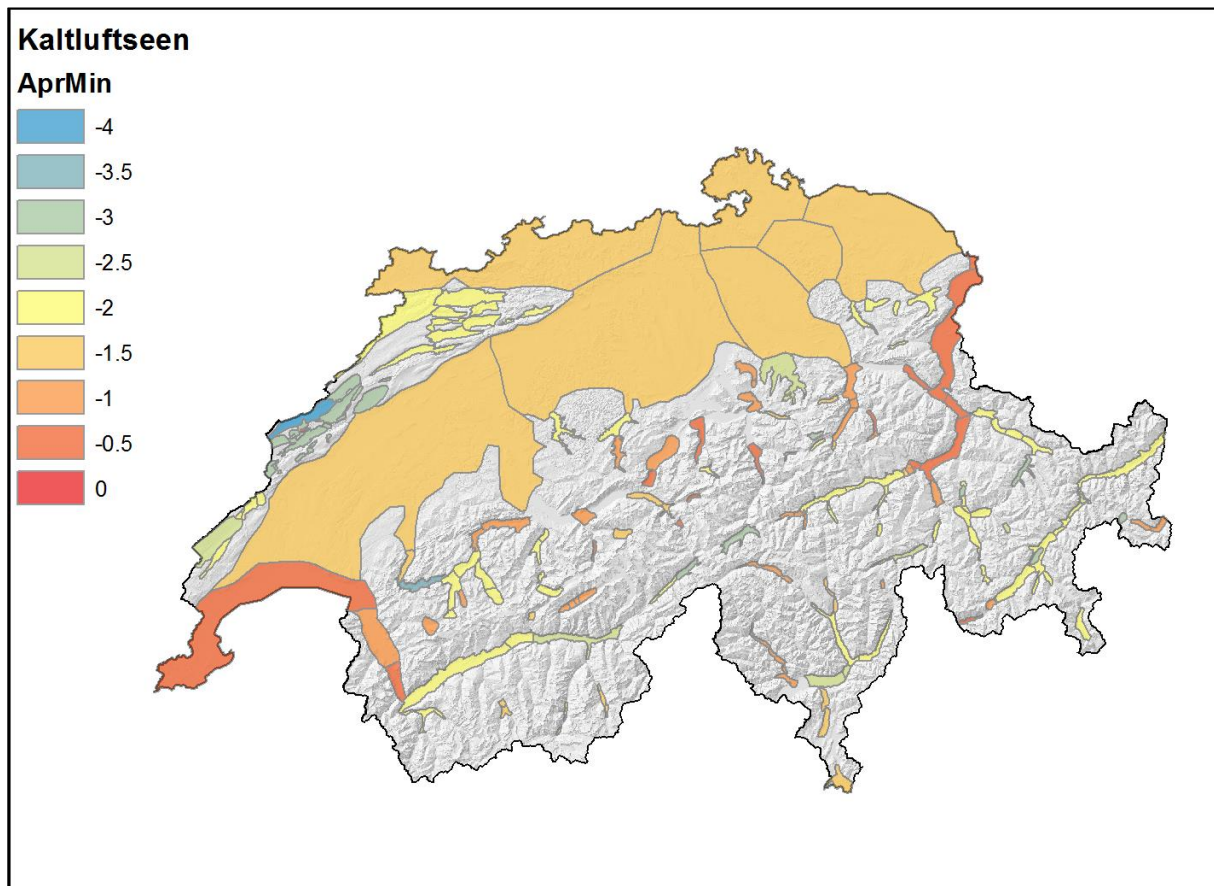


Abb. 6: Intensität der berücksichtigten Kaltluftseen beim mittleren Tiefststand der Temperatur im April.

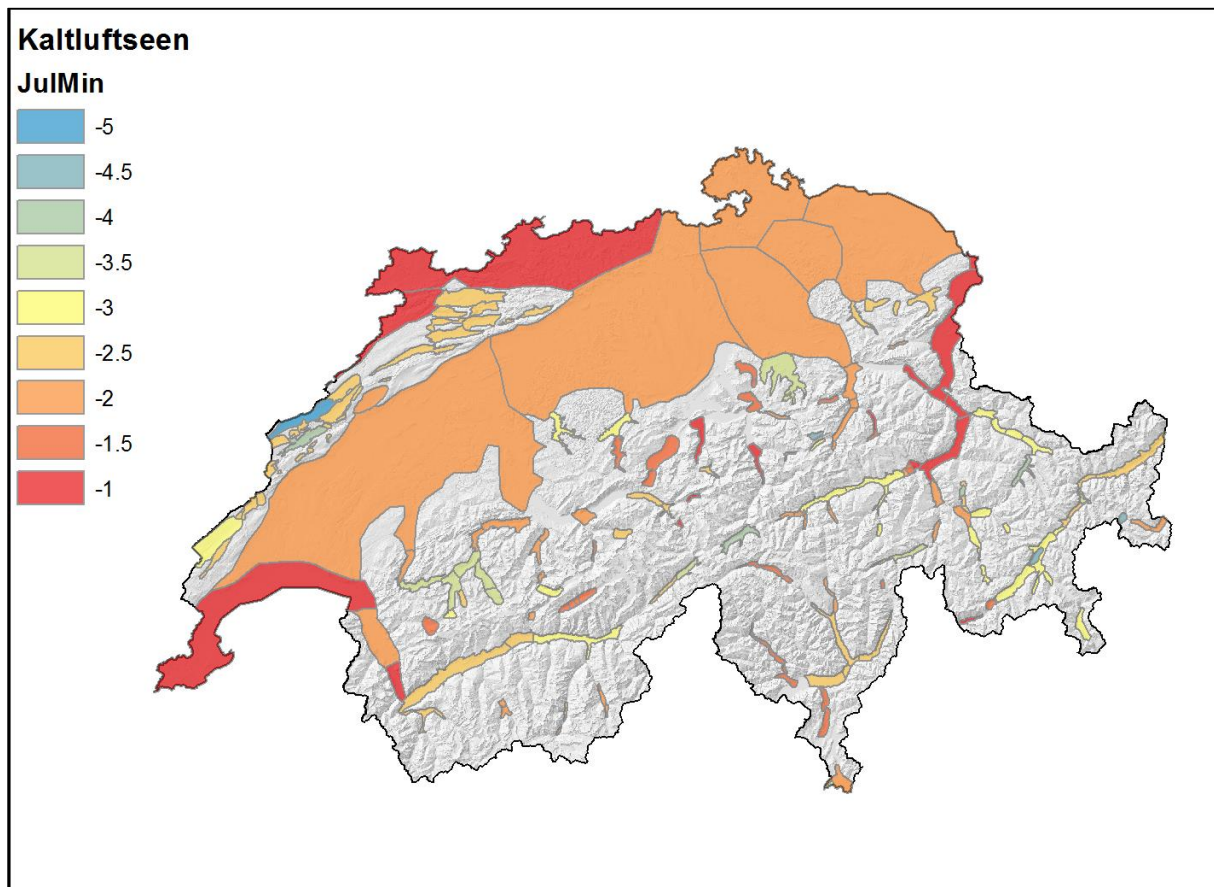


Abb. 7: Intensität der berücksichtigten Kaltluftseen beim mittleren Tiefststand der Temperatur im Juli.

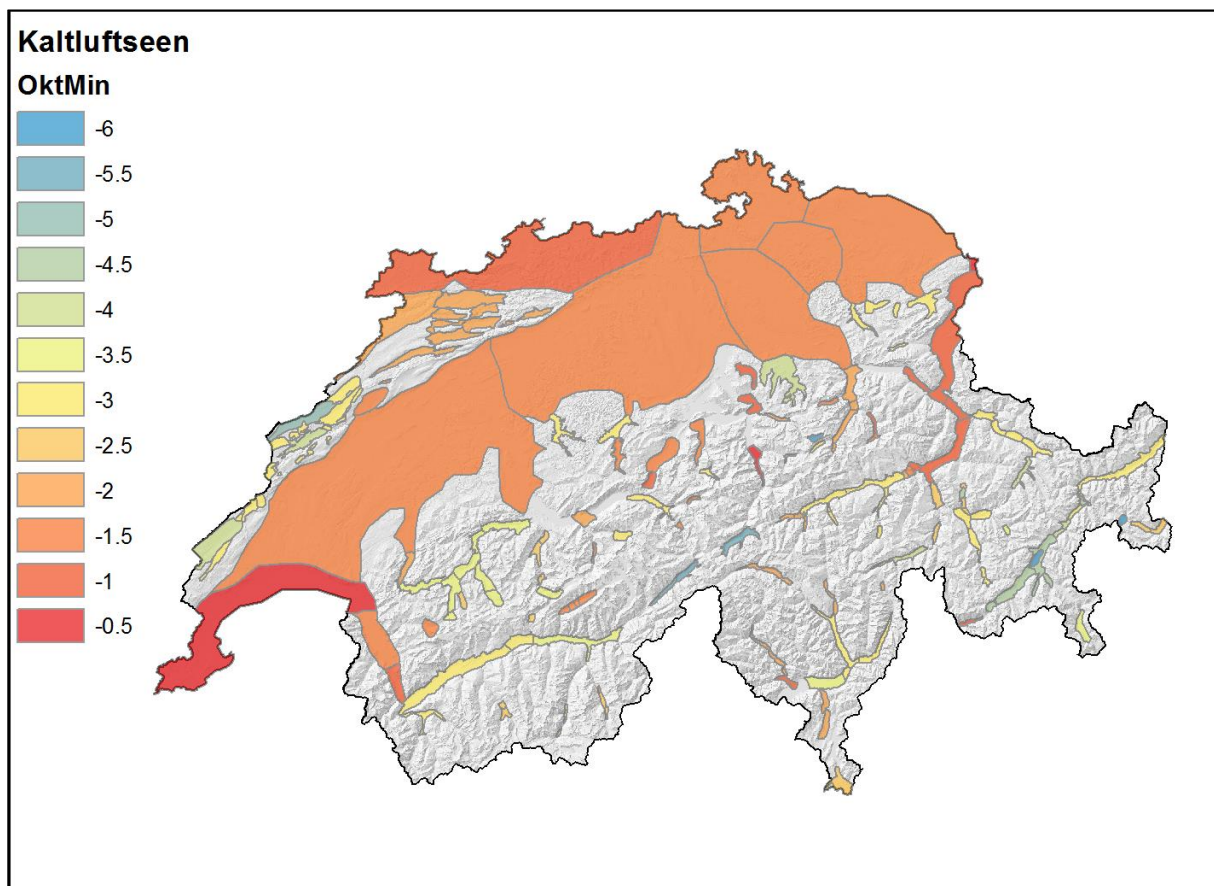


Abb. 8: Intensität der berücksichtigten Kaltluftseen beim mittleren Tiefststand der Temperatur im Oktober.

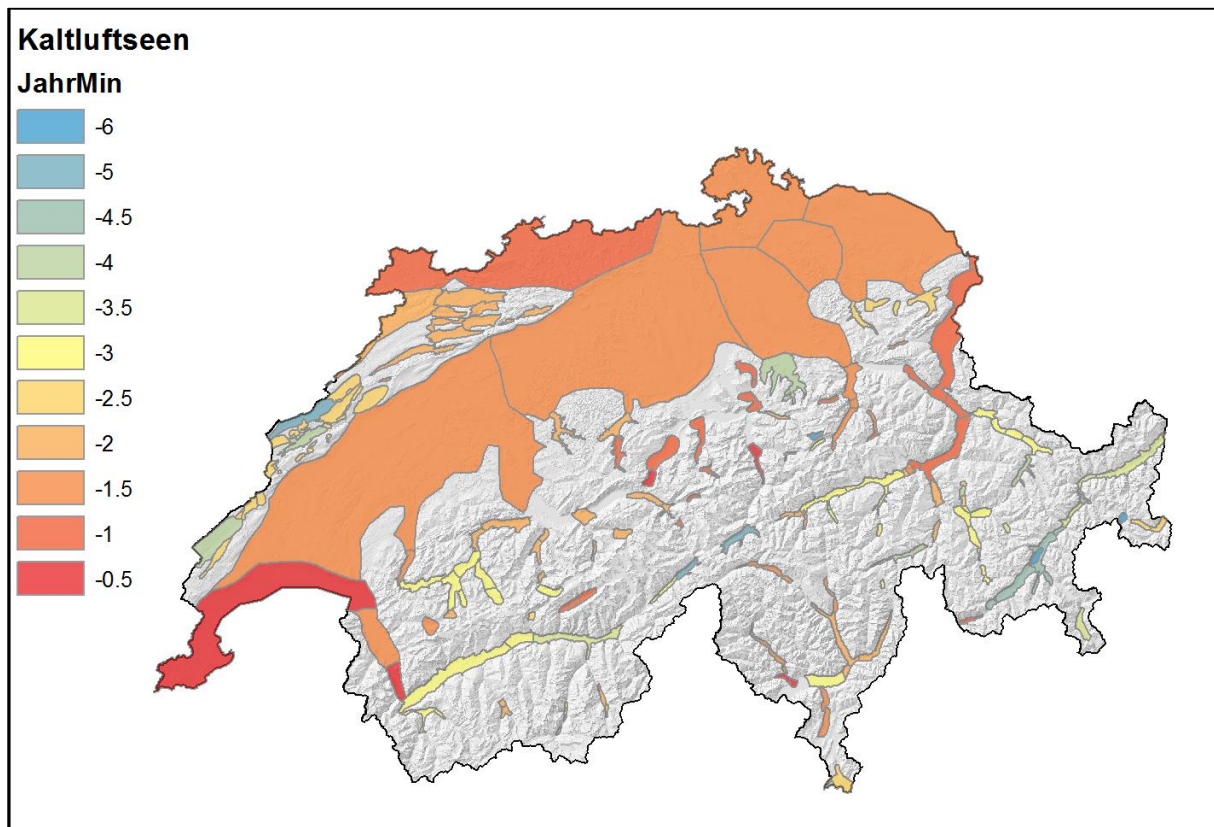


Abb. 9: Intensität der berücksichtigten Kaltluftseen beim mittleren Tiefststand der Temperatur im Jahr.

Im Weiteren kann es vorkommen, dass sich Kaltluftseen tagsüber nicht mehr auflösen. Dies ist aber nur im November, Dezember und Januar der Fall, wenn die schwache Sonneneinstrahlung nicht ausreicht, um die kalten Talsohlen ausreichend zu erwärmen oder wenn die Talgründe wegen starker Horizontüberhöhung kein direktes Sonnenlicht mehr erhalten. Deshalb musste die Intensität der Kaltluftseen auch beim Tageshöchststand der Temperatur im Monat Januar kartiert werden. Die Intensitäten sind allerdings klein, überschreiten  $2^{\circ}\text{C}$  nur selten und beschränken sich auf einige Kälteseen im Jura und in den Alpen, wie Abb. 10 zu entnehmen ist. Die meisten Kaltluftseen lösen sich indessen auch im Januar tagsüber vollständig auf.



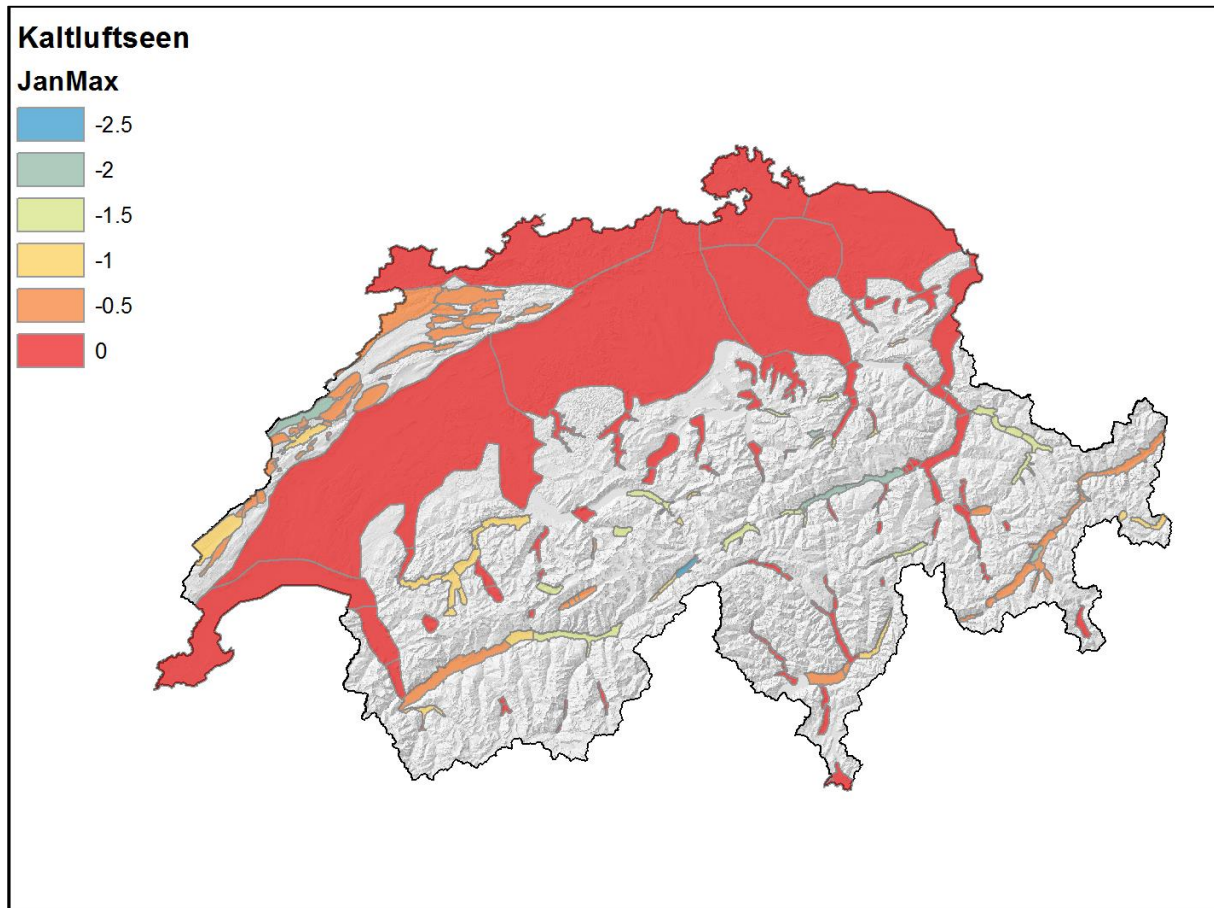


Abb. 10: Intensität der berücksichtigten Kaltluftseen beim mittleren Höchststand der Temperatur im Januar.

Die in den Monaten November, Dezember und Januar auch am Nachmittag bestehenbleibenden Kaltluftseen beeinflussen in geringem Masse auch die Temperatur während des Tageshöchststandes im Gesamtjahr (Abb. 11). Allerdings sind die Intensitäten mit bis 1°C nicht mehr bedeutend.



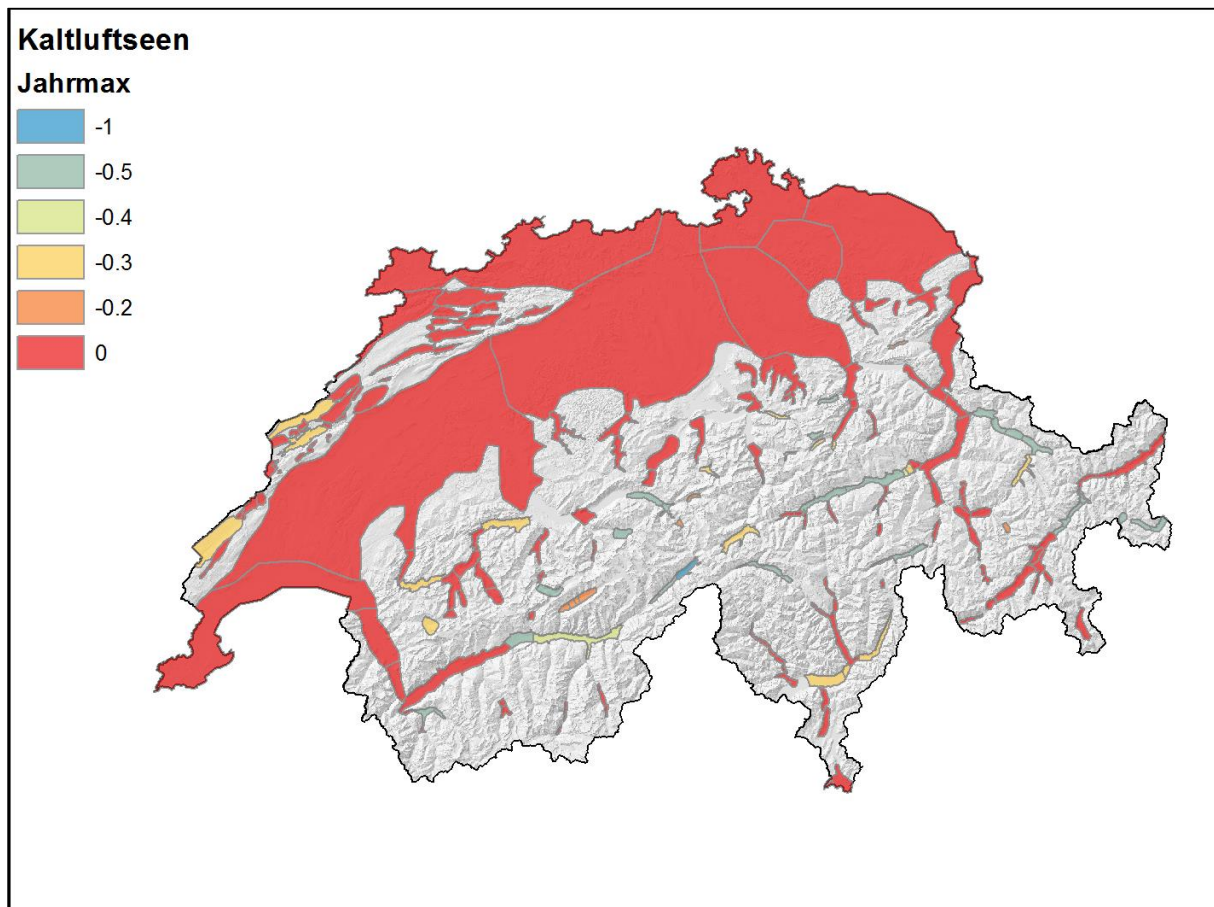


Abb. 11: Intensität der berücksichtigten Kaltluftseen beim mittleren Höchststand der Temperatur im Jahr.

### 2.1.2.2 Korrektur der Strahlung

Die Korrektur der Strahlung erfolgte wie in Z'graggen (2001) beschrieben nur für die mittleren Höchststände der Monate Januar und Oktober und im Jahr. In diesen Monaten spielt die Strahlung eine grosse Rolle bei der Unterscheidung der Temperatur an Schattenhängen und sonnenexponierten Hängen. In den Monaten April und Juli sind die Expositionsunterschiede, wie bereits erwähnt, gering (Volken, 2008 sowie langjährige Temperaturmessungen von L. Z'graggen in der oberen Leventina). Dabei wurde für den Januar und den Oktober die direkte Einstrahlung berechnet. Für den über die ganze Schweiz berechneten Mittelwert der direkten Strahlung wurde eine Temperaturkorrektur von  $0^{\circ}\text{C}$ , für den Mindestwert eine Temperaturkorrektur von  $-1^{\circ}\text{C}$ , für den Maximalwert eine Temperaturkorrektur von  $+1^{\circ}\text{C}$  vorgenommen. Zwischen diesen Werten wurde der Korrekturfaktor in Abhängigkeit von der direkten Strahlung linear interpoliert.

Die in Abb. 12 enthaltenen, auf die wirkliche Höhe berechneten Extremtemperaturen zeigen, dass bei den absoluten Maxima nur geringe Unterschiede zwischen Alpennord- und Alpensüdseite erkennbar sind. Beidseits der Alpen sind in den Niederungen Höchstwerte von  $36$  bis  $38^{\circ}\text{C}$  zu erwarten. Inneralpin, also im Wallis, in Graubünden und in vermindertem Masse auch im Nordtessin sind noch etwas höhere Werte möglich. Mit Zunahme der Höhe nehmen die Temperaturen stark ab. So sind in  $2200$  Metern Höhe  $25^{\circ}\text{C}$  noch knapp möglich, in  $3500$  Metern steigt das Thermometer auch über gletscherfreien Felsflächen kaum über  $15^{\circ}\text{C}$ . Ein anderes Bild zeigen die absoluten Tiefstwerte. Mit absoluten Tiefstwerten von nur  $-10$  bis  $-12^{\circ}\text{C}$  ist es in den Seeregionen des Mittel- und Südtessins eindeutig am wenigsten kalt. Demgegenüber ist die Ostschweiz, welche den Kälteeinbrüchen aus Nordost voll ausgesetzt

ist, mit Tiefstwerten von  $-25$ , in Kälteseen von  $-30^{\circ}\text{C}$  sehr kalt. Selbst Gipfellagen auf 2500 Metern bzw. 3500 Metern sind mit Tiefstwerten von etwa  $-32$  bzw. etwa  $-37^{\circ}\text{C}$  nur unwesentlich kälter als die Niederungen der Ostschweiz. Abb. 13 bis Abb. 17 zeigen die Tiefst- und Höchststände der Temperatur im Jahr und in den Monaten Januar, April, Juli und Oktober. Hier gilt im Wesentlichen das in Abb. 12 Gesagte, einzig spielt die Höhe eine entscheidende Rolle, indem es bekanntlich mit zunehmender Höhe kälter wird. Allerdings ist die Temperaturabnahme in den Monaten Juli und April viel grösser als im Oktober und besonders im Januar. In den Monaten Oktober und Januar ist die Atmosphäre oft stabil geschichtet, insbesondere bei Hochdrucklagen. Dann kann es vorkommen, dass es auch ausserhalb von Kälteseen in tieferen Lagen kälter ist als in der Höhe. Im April hingegen kann die kräftige Sonneneinstrahlung die Niederungen bereits stark aufheizen, während es in der Höhe immer noch sehr kalt ist. Auch im Juli sorgt die lange und kräftige Sonneneinstrahlung besonders in den Niederungen für hohe Temperaturen, während höhere Luftschichten von dieser Erwärmung weniger profitieren. Als Folge dieser oft labilen Temperaturschichtungen kommt es denn in den Monaten April und Juli oft zu vertikalen Umlagerungen, was sich oft in Form von Schauern und Gewittern äussert.

Die **Monatsmitteltemperaturen** wurden von den mittleren Tiefst- und Höchstwerten des jeweiligen Monats abgeleitet. Die Temperaturen der Monate Mai, Juni, August, September wurden nur für die Berechnung der Mitteltemperatur in den Monaten April bis September gebraucht. Sie wurden deshalb nur von den im Detail ausgearbeiteten Temperaturkarten durch lineare Korrelationen aus den Stationswerten abgeleitet. Für jeden Stationswert wurde eine Korrelationsfunktion abgeleitet und der Korrekturwert anschliessend flächig interpoliert. Die Temperaturkarte des Monats Mai wurde mithilfe dieser Korrelation vom April abgeleitet, die Temperaturkarte des Junis und des Augusts vom Juli, die Temperaturkarte des Septembers vom Oktober.

In vielen Publikationen wird mit dem Mittel der **Temperatur während der Vegetationsperiode** (Wachstumsperiode, Zeitraum mit Tagesmittel von mindestens  $5^{\circ}\text{C}$ , Hörsch 2001) gearbeitet. Die Länge der Vegetationsperiode ist aber räumlich sehr unterschiedlich. Um diese Information zu erstellen, müsste man für jeden Gitterpunkt in Abhängigkeit von der Höhenlage und der Region eine Statistik rechnen. Dies war im Rahmen des Projektes nicht möglich, deshalb wurde hier eine Karte der **Mitteltemperatur in den Monaten April bis September** für die Periode 1961-1990 erstellt. Der April wurde einbezogen, um den früheren Beginn der Wachstumsperiode in den tiefen Lagen mit zu berücksichtigen.

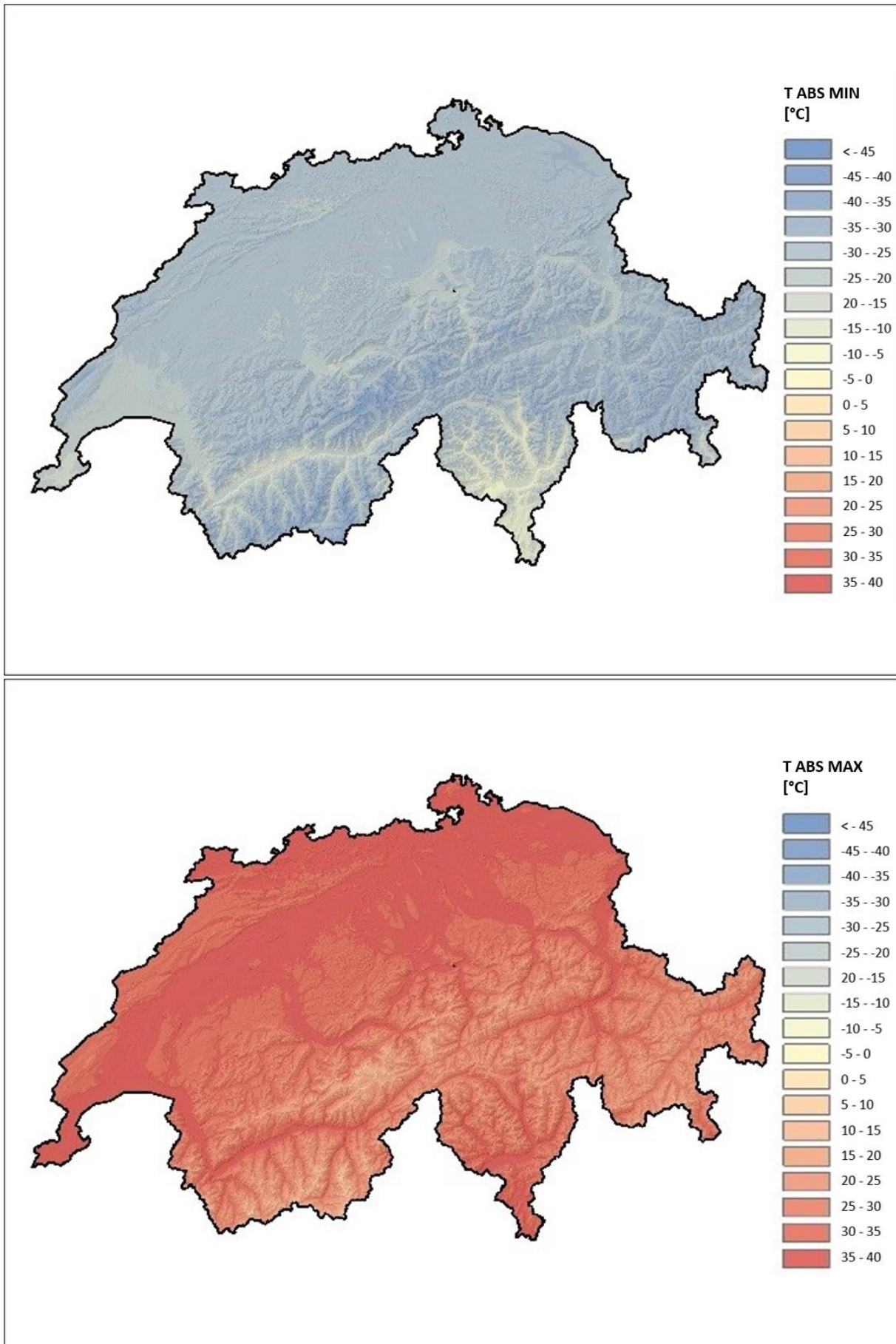


Abb. 12: Interpolierte absolute Minima (oben) und Maxima (unten) der Temperaturen für das Jahr (Periode 1864-1990).



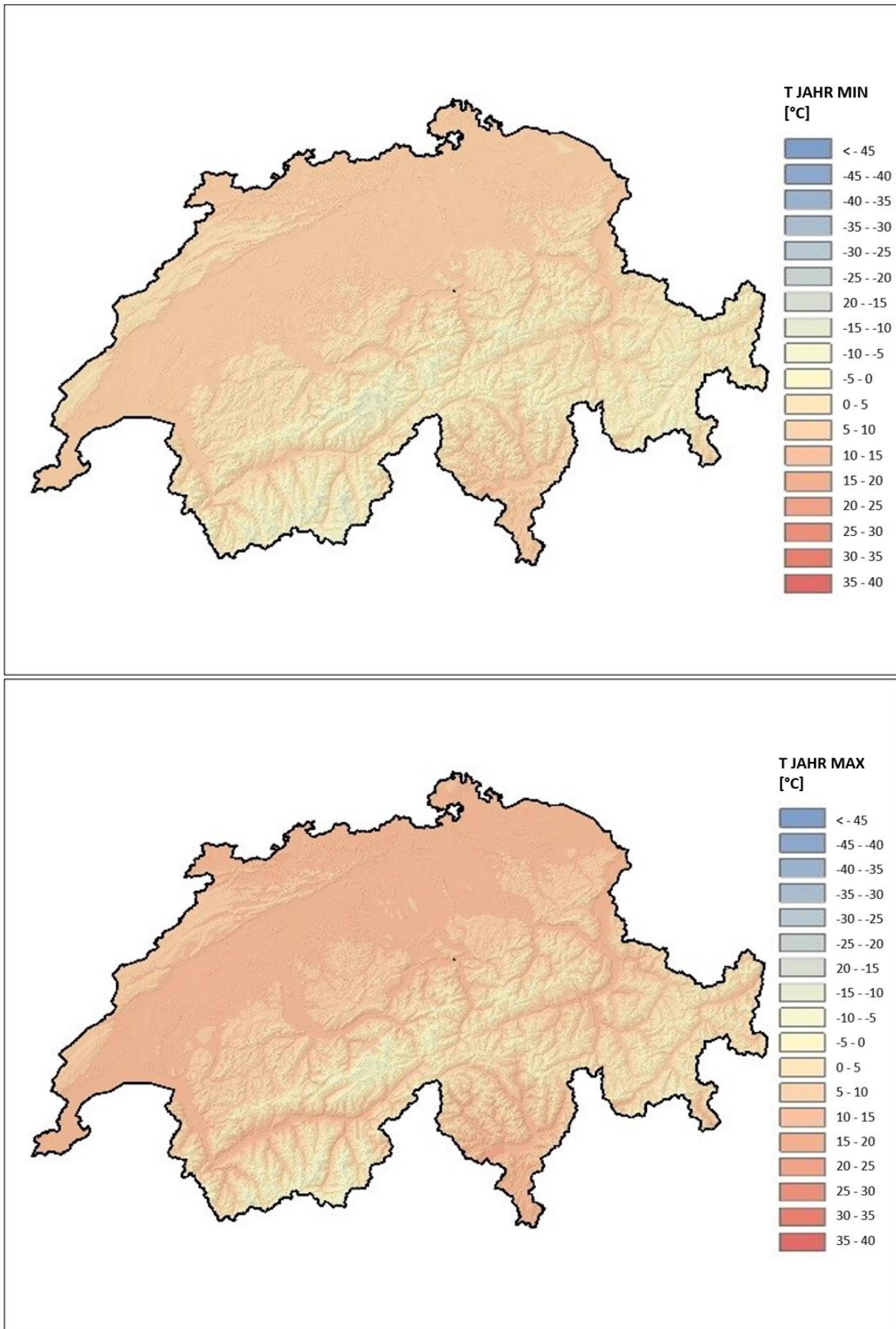


Abb. 13: Interpolierte mittlere Tiefstwerte (oben) und Höchstwerte (unten) der Temperaturen für das Jahr (Periode 1961-1990).

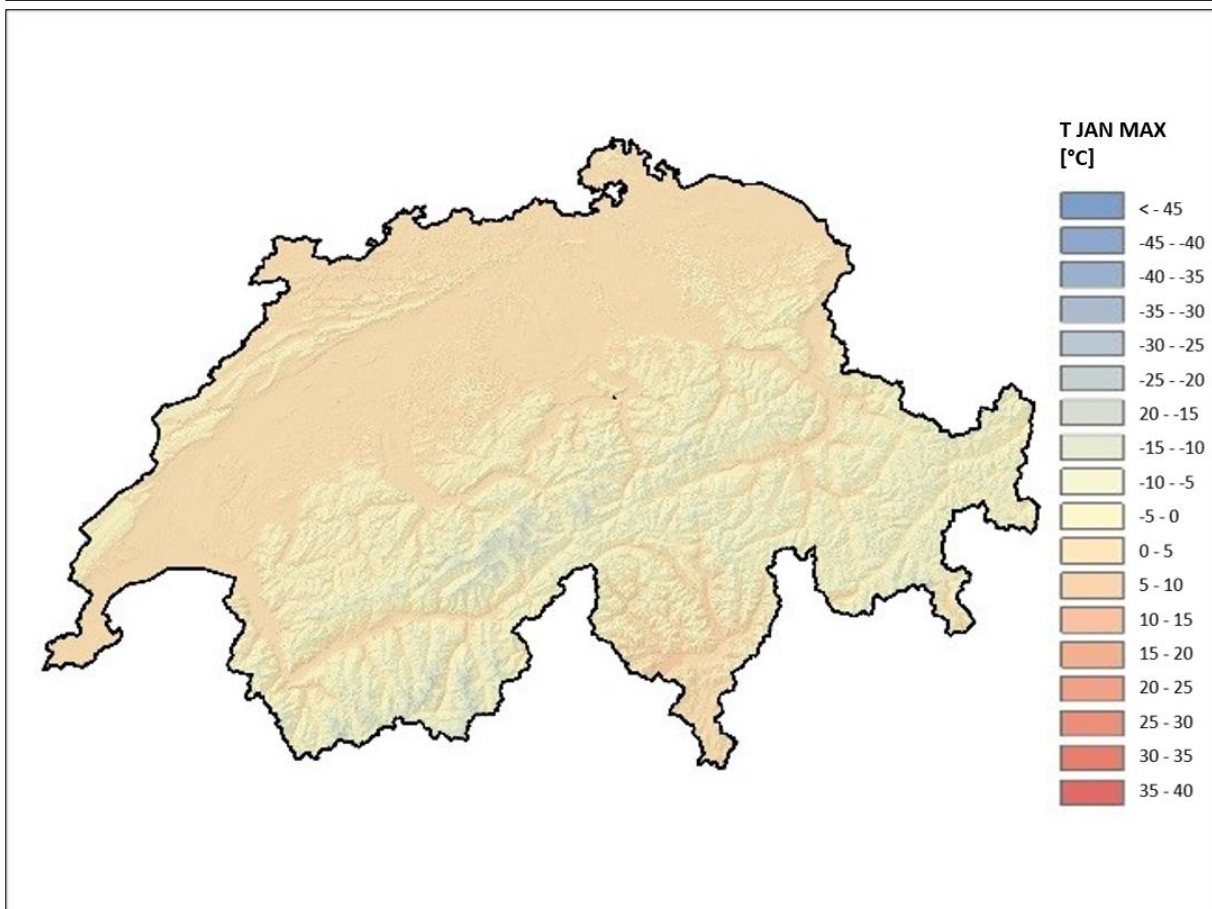
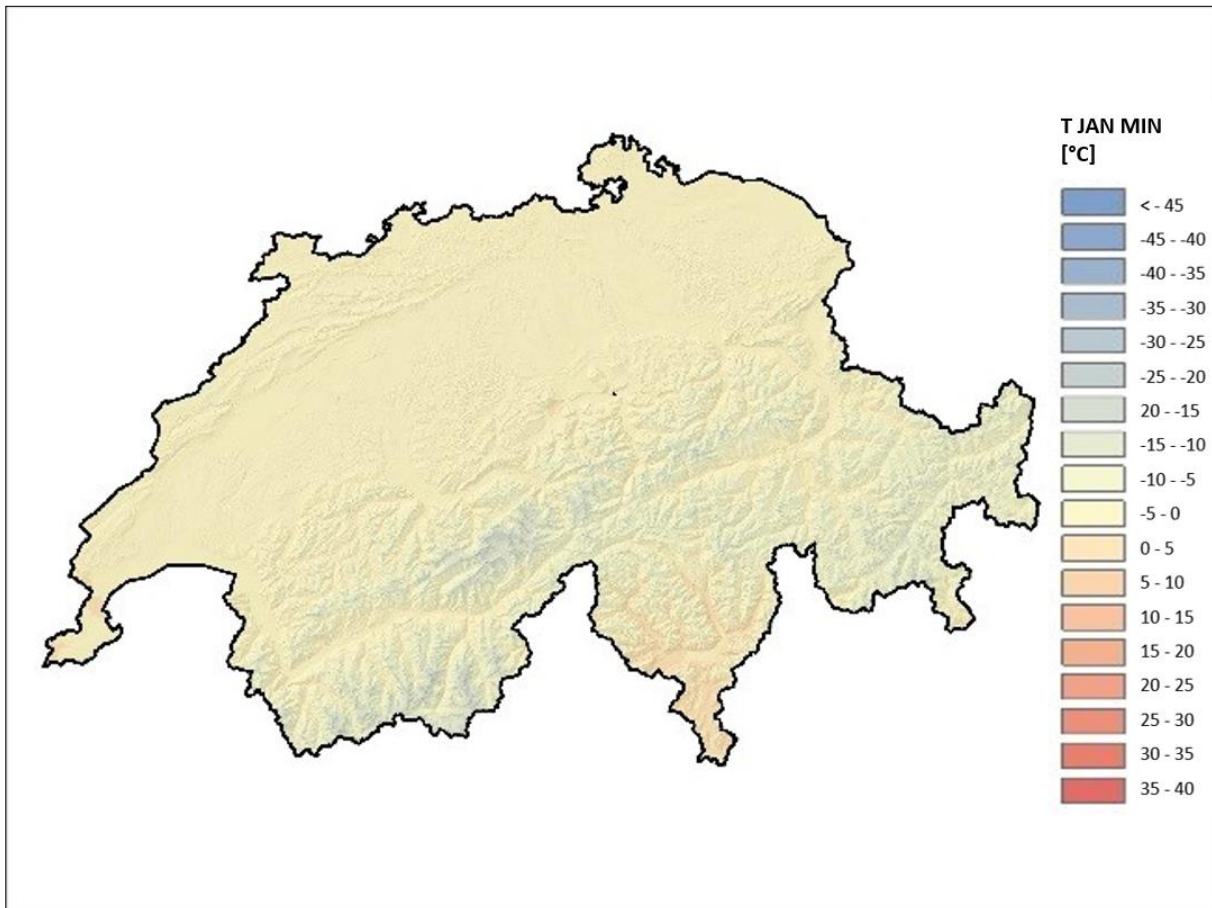


Abb. 14: Interpolierte mittlere Tiefstwerte (oben) und Höchstwerte (unten) der Temperaturen für den Januar (Periode 1961-1990).



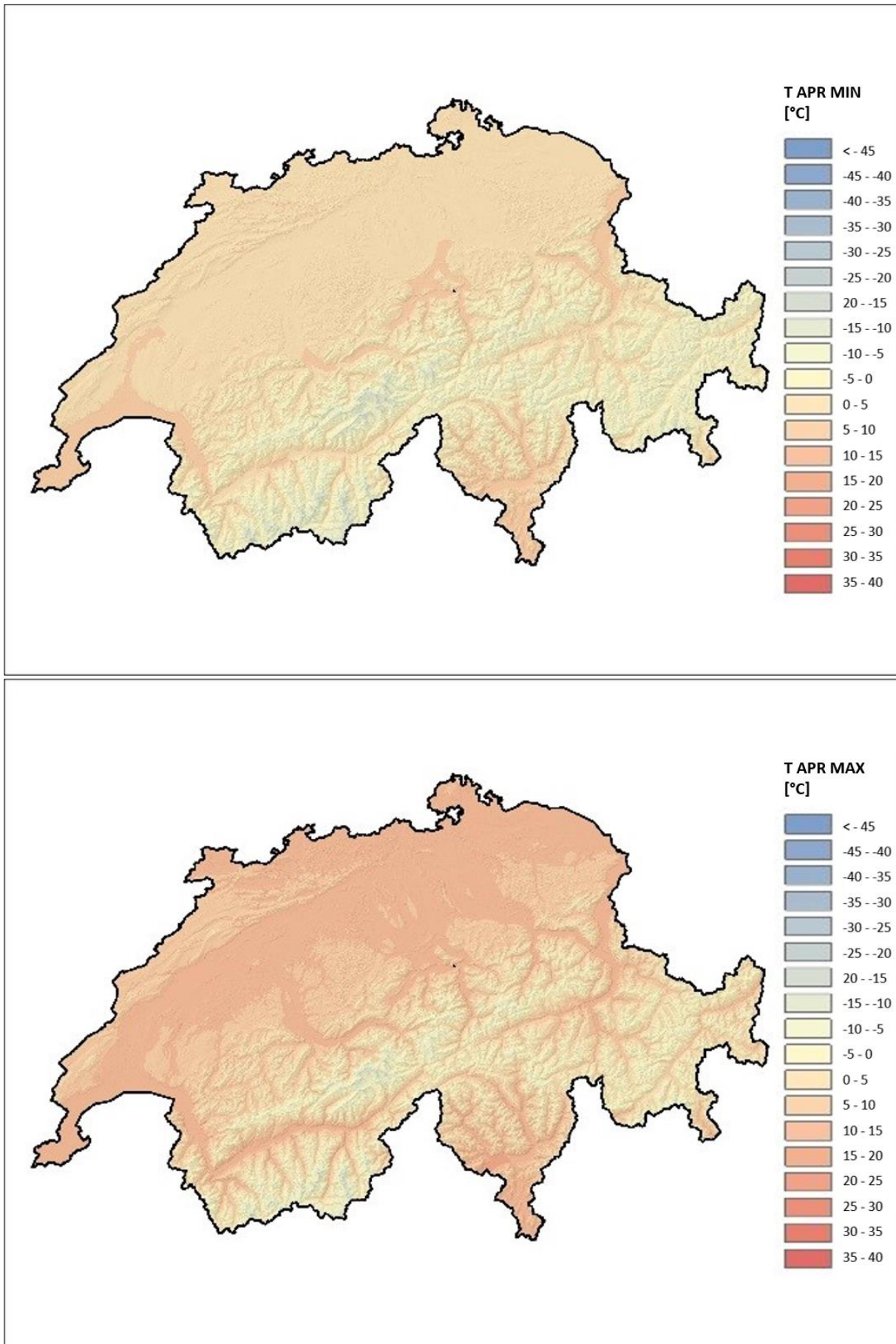


Abb. 15: Interpolierte mittlere Tiefstwerte (oben) und Höchstwerte (unten) der Temperaturen für den April (Periode 1961-1990).

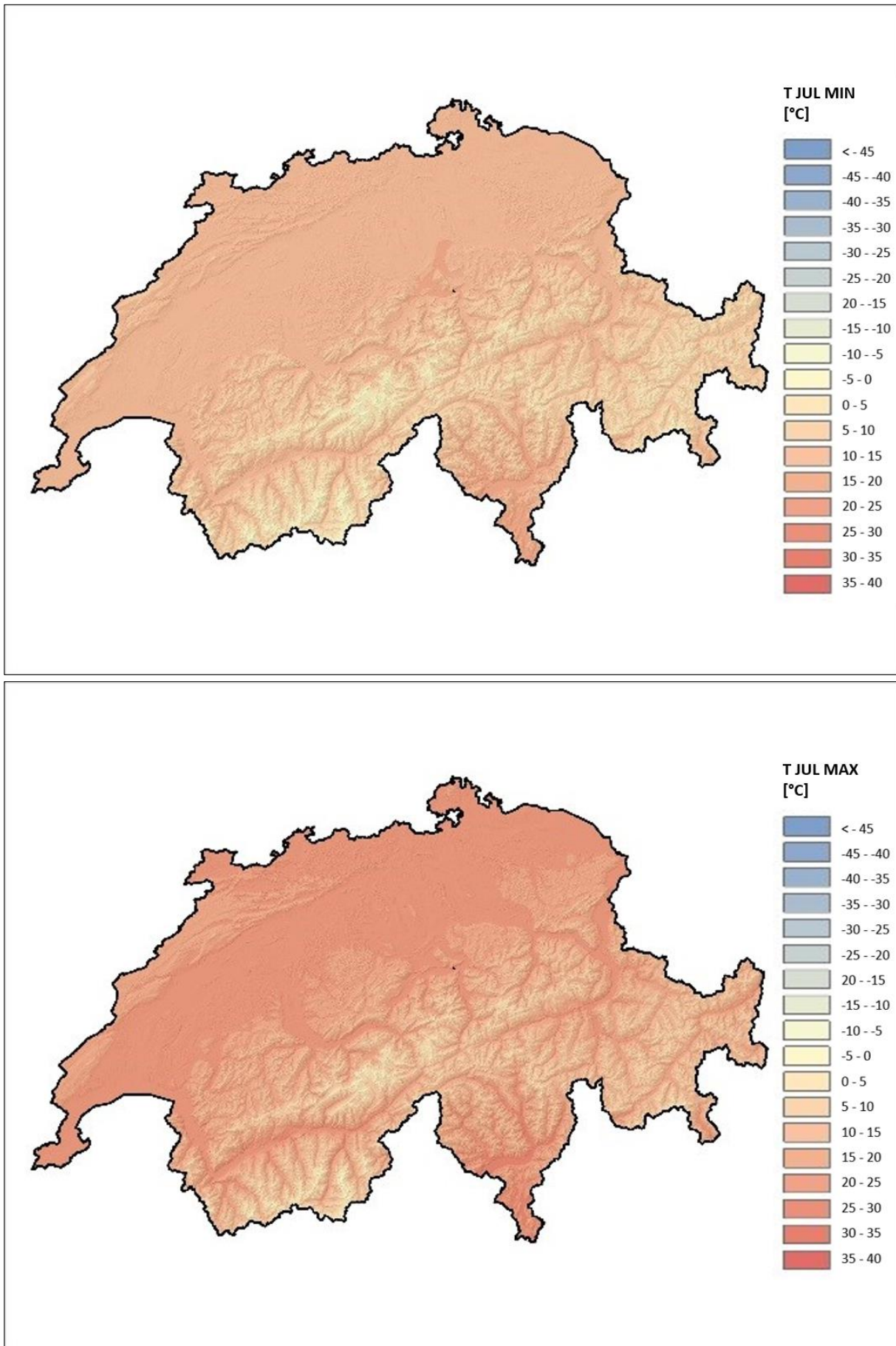


Abb. 16: Interpolierte mittlere Tiefstwerte (oben) und Höchstwerte (unten) der Temperaturen für den Juli (Periode 1961-1990).



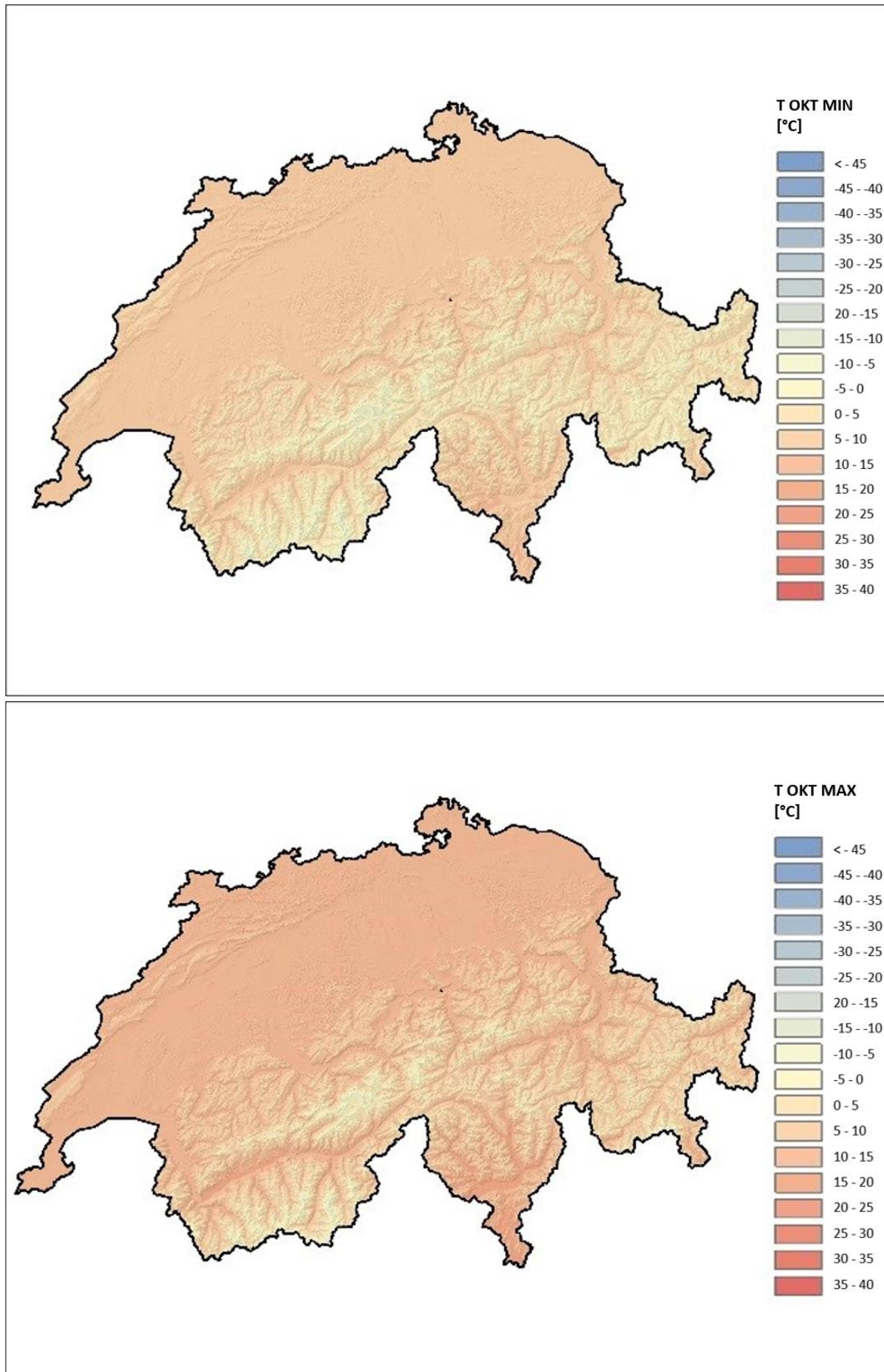


Abb. 17: Interpolierte mittlere Tiefstwerte (oben) und Höchstwerte (unten) der Temperaturen für den Oktober (Periode 1961-1990).



### 2.1.3 Thermische Kontinentalität

Die thermische Kontinentalität wurde durch den Unterschied zwischen den Tiefstständen und Höchstständen der Temperatur im Monat berechnet. Die in Kapitel 2.1.2.2 genannten Karten der Tiefststände und Höchststände der Temperaturen in den ausgewählten Zeiträumen wurden subtrahiert, sodass sich für jeden Zeitraum eine thermische Kontinentalität ergab.

Bei der thermischen Kontinentalität kann unterschieden werden zwischen der absoluten thermischen Kontinentalität, welche die Differenz zwischen absolutem Minimum und absolutem Maximum darstellt, und den mittleren täglichen Kontinentalitäten, welche die Differenz zwischen dem Tageshöchst- und Tiefststand des Jahres und der Monate Januar, April, Juli und Oktober darstellt. Die absolute thermische Kontinentalität ist grossflächig in der Ostschweiz am grössten, dies aufgrund der sehr tiefen absoluten Minima. Allerdings können kleinflächige Kaltluftseelagen, wie zum Beispiel La Brévine, diese Werte noch übertreffen. Die höchste bisher gemessene Differenz wurde in La Brévine registriert, dort betrug das absolute Minimum  $-41.8^{\circ}\text{C}$  und das absolute Maximum  $33^{\circ}\text{C}$ . Dies ergibt eine Differenz von  $74.8^{\circ}\text{C}$  (Abb. 18). Die kleinste Differenz wird an Seeufern am Lago Maggiore verzeichnet. Hier stieg die Temperatur bisher zwar auf maximal  $38^{\circ}\text{C}$ , der Tiefstwert auf den Brissagoinseln fiel jedoch nie unter  $-8^{\circ}\text{C}$ . Dies ergibt eine absolute Differenz von  $46^{\circ}\text{C}$ . Auch auf dem 905 Meter hoch gelegenen Gipfel des Monte Bre ob Lugano waren die bisherigen Extremschwankungen mit einer Spanne von knapp  $50^{\circ}\text{C}$  recht bescheiden. **Allerdings scheinen die absoluten Extreme kaum einen Einfluss auf die Verteilung der Waldbäume zu haben. So sind gerade in der Ostschweiz, welche sich durch sehr tiefe absolute Minima auszeichnet, die scheinbar auf Winterkälte empfindsamen Baumarten Buche und Tanne die bedeutendsten Baumarten. Umgekehrt fehlt die Buche im Wallis, welches sich durch eine geringe absolute thermische Kontinentalität hervorhebt, praktisch vollständig und auch die Tanne besiedelt dort viele Hochtäler nur noch in geringem Ausmass.**

Die täglichen Kontinentalitäten, das heisst die Differenz zwischen dem mittleren Tageshöchststand und dem mittleren Tagestiefstand der Temperaturen zeigen ein ganz anderes Bild (Abb. 19-Abb. 23). Sowohl im Jahr als auch in den Monaten Januar, April, Juli und Oktober zeichnen sich vor allem die inneralpinen Gebiete, also das Wallis und das Engadin durch grosse Schwankungen aus. Dies insbesondere dann, wenn sich häufig Kälteseen einstellen, wie es in den Talagen der inneren Alpen oft vorkommt. Auch die Alpensüdseite, welche bei den absoluten Kontinentalitäten geringe Werte aufweist, zeigt bei den täglichen Kontinentalitäten eher höhere Werte als die Alpennordseite. Dies rührt von den vielen heiteren Tagen her, welche eine kräftige nächtliche Abkühlung und eine starke Aufheizung tagsüber nach sich ziehen. **Die täglichen Kontinentalitäten sind für die Vegetation weit bedeutender, denn in Gebieten mit hohen täglichen Kontinentalitäten kommt es im Frühjahr häufig zu Frostwechseltagen. Ebenfalls können Fröste noch lange auftreten, z.B. auch dann, wenn die Baumarten aufgrund der hohen Wärme tagsüber bereits aus ihrer Winterruhe erwacht sind. Gerade auf Spätfröste sind Baumarten wie Buche und Tanne sehr empfindlich. Sie fehlen daher in den inneralpinen Hochtälern fast gänzlich (ausser bei Binn und Tschlin).**

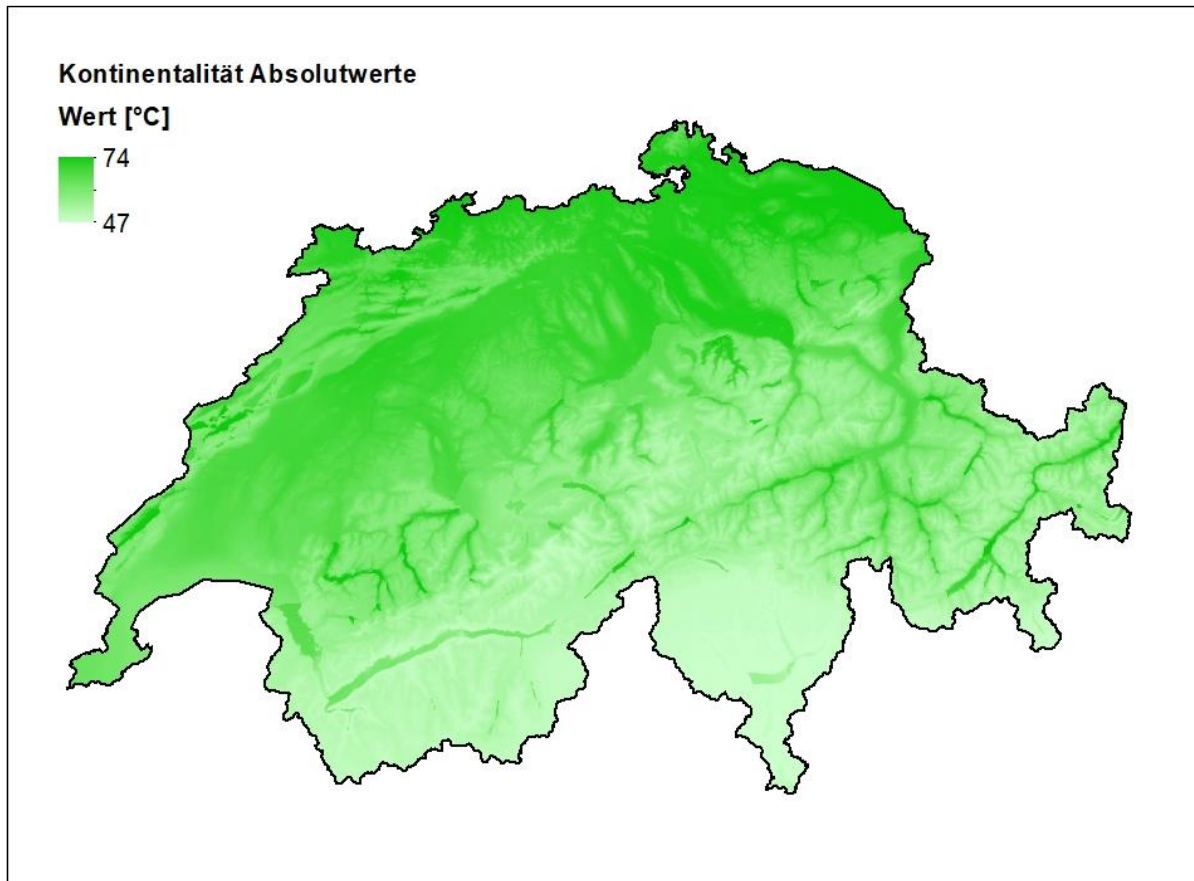


Abb. 18: Thermische Kontinentalität für die absoluten Minima und Maxima im Jahr (Periode 1864-1990).

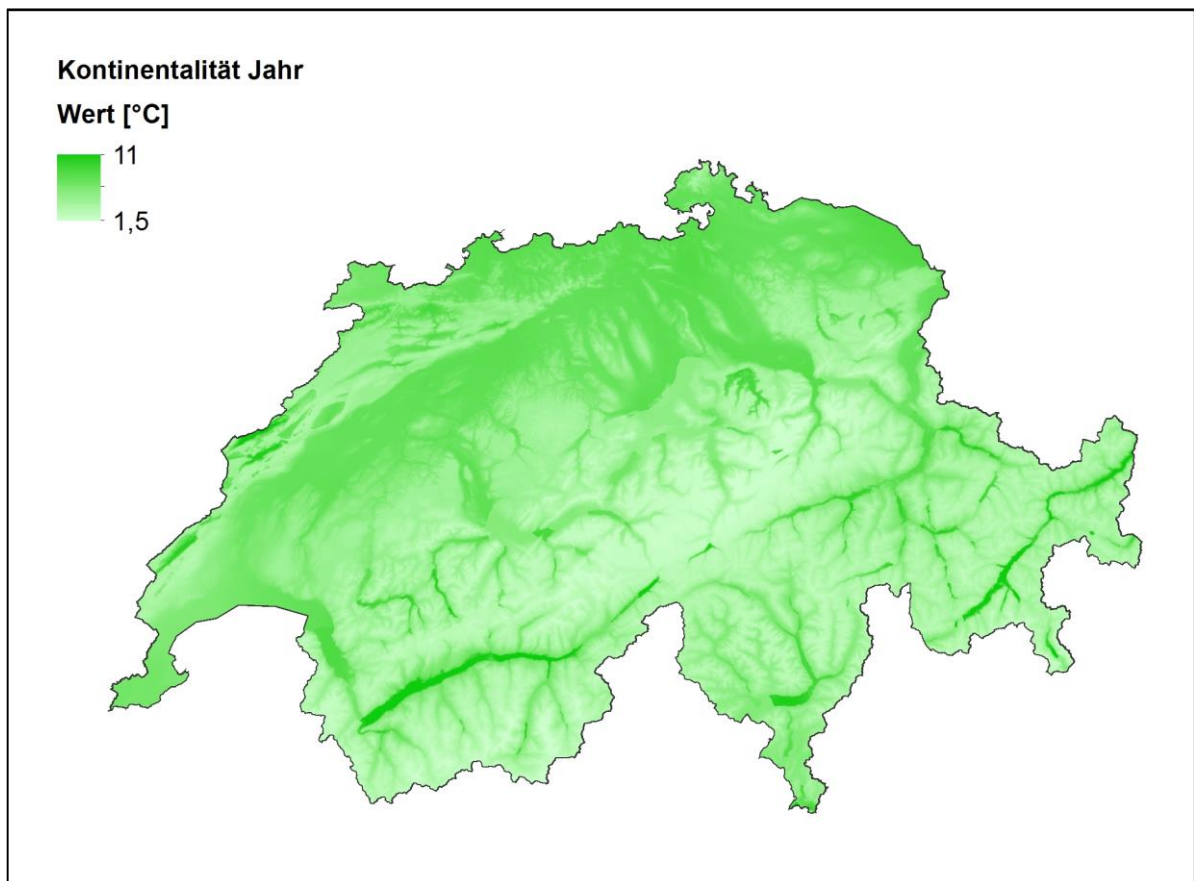


Abb. 19: Thermische Kontinentalität für die mittleren Tiefst- und Höchstwerte im Jahr (Periode 1961-1990).

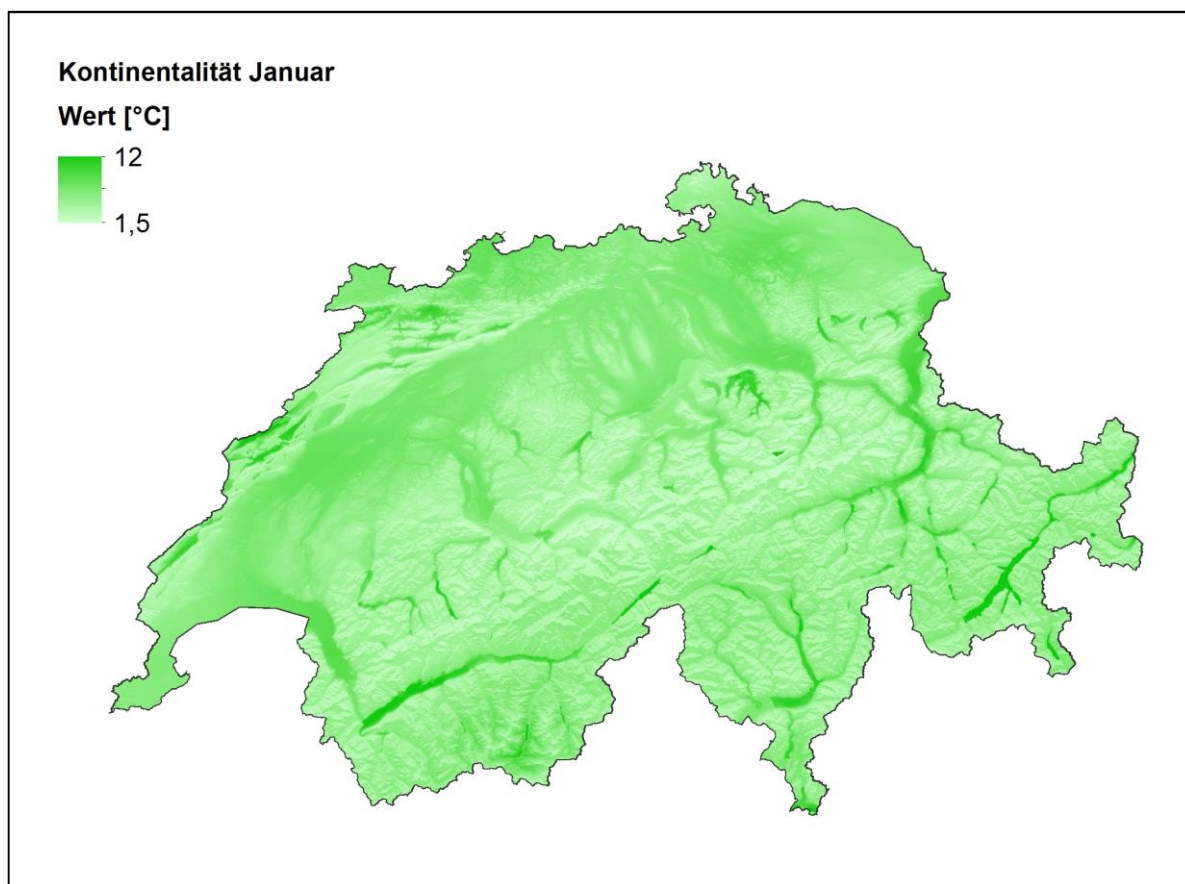


Abb. 20: Thermische Kontinentalität für den Januar (Periode 1961-1990).

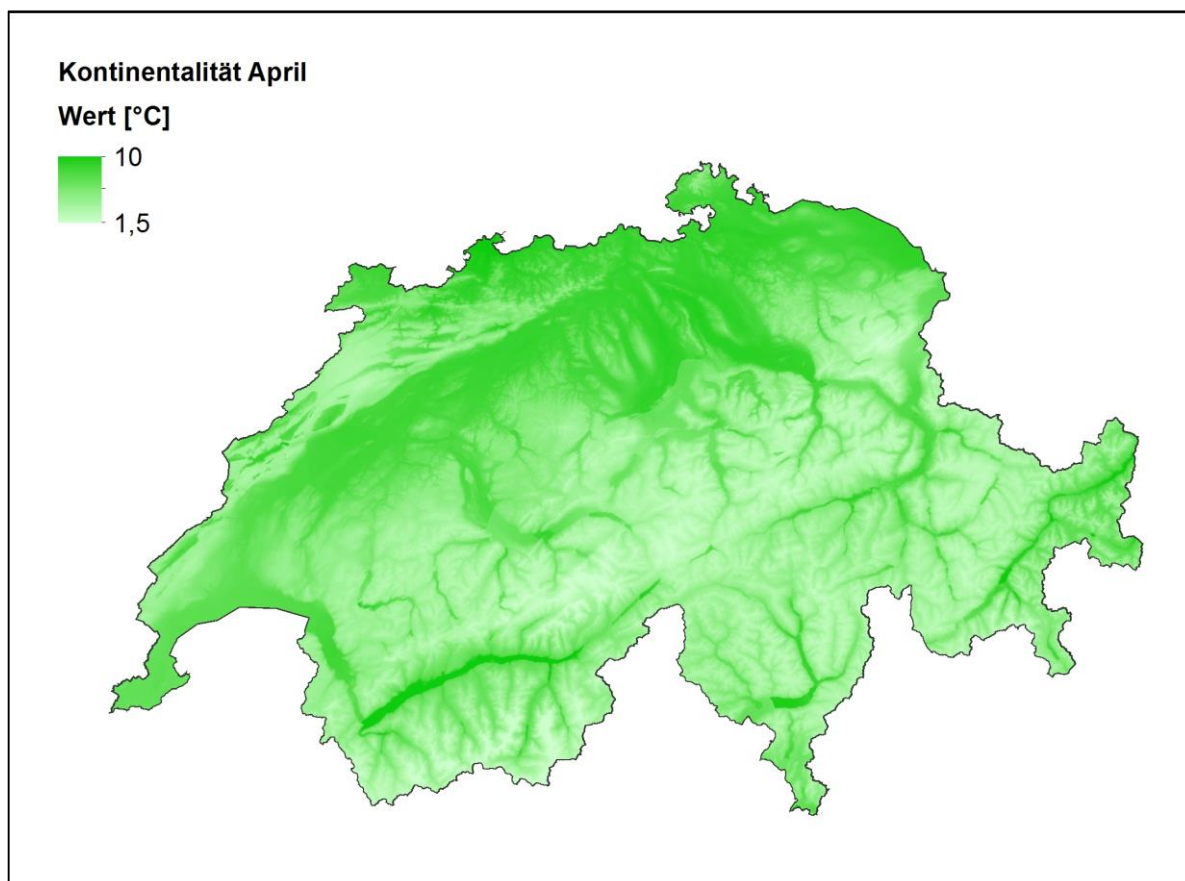


Abb. 21: Thermische Kontinentalität für den April (Periode 1961-1990).

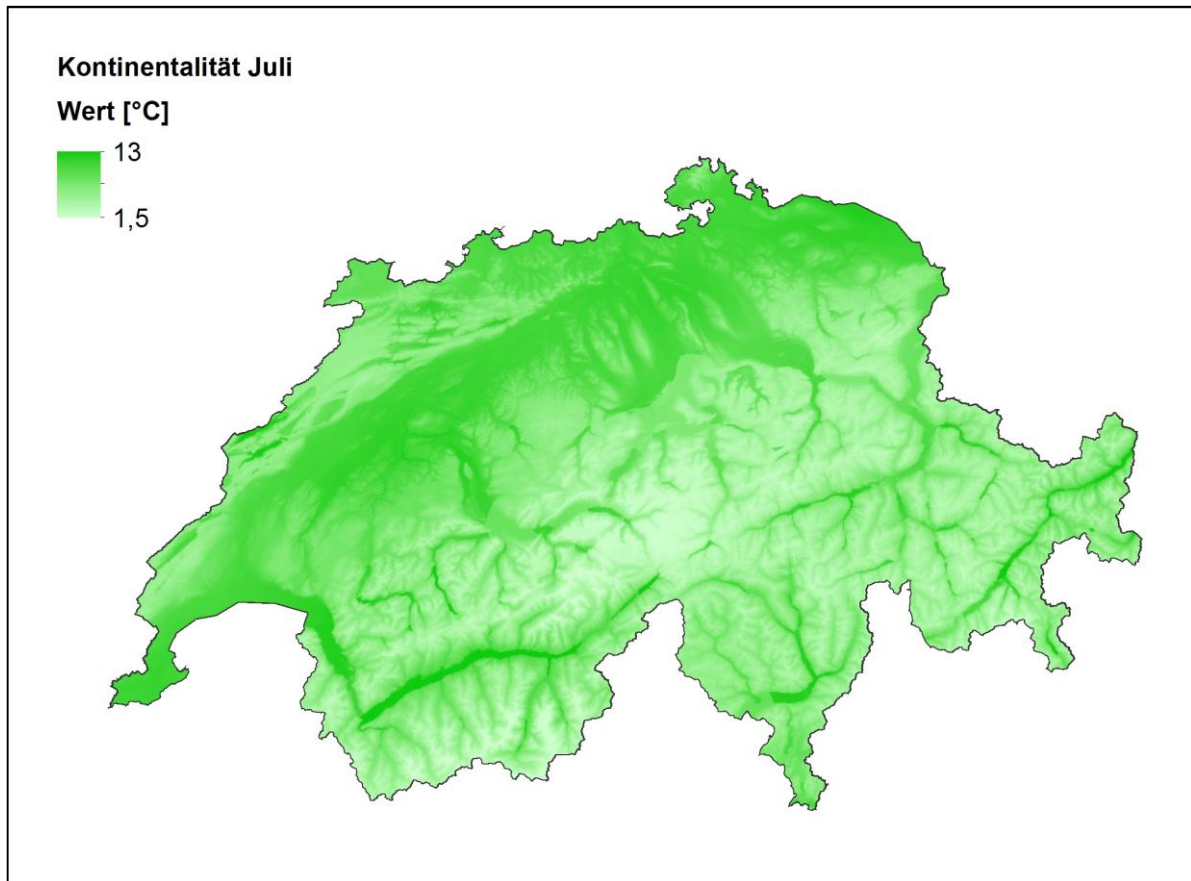


Abb. 22: Thermische Kontinentalität für den Juli (Periode 1961-1990).

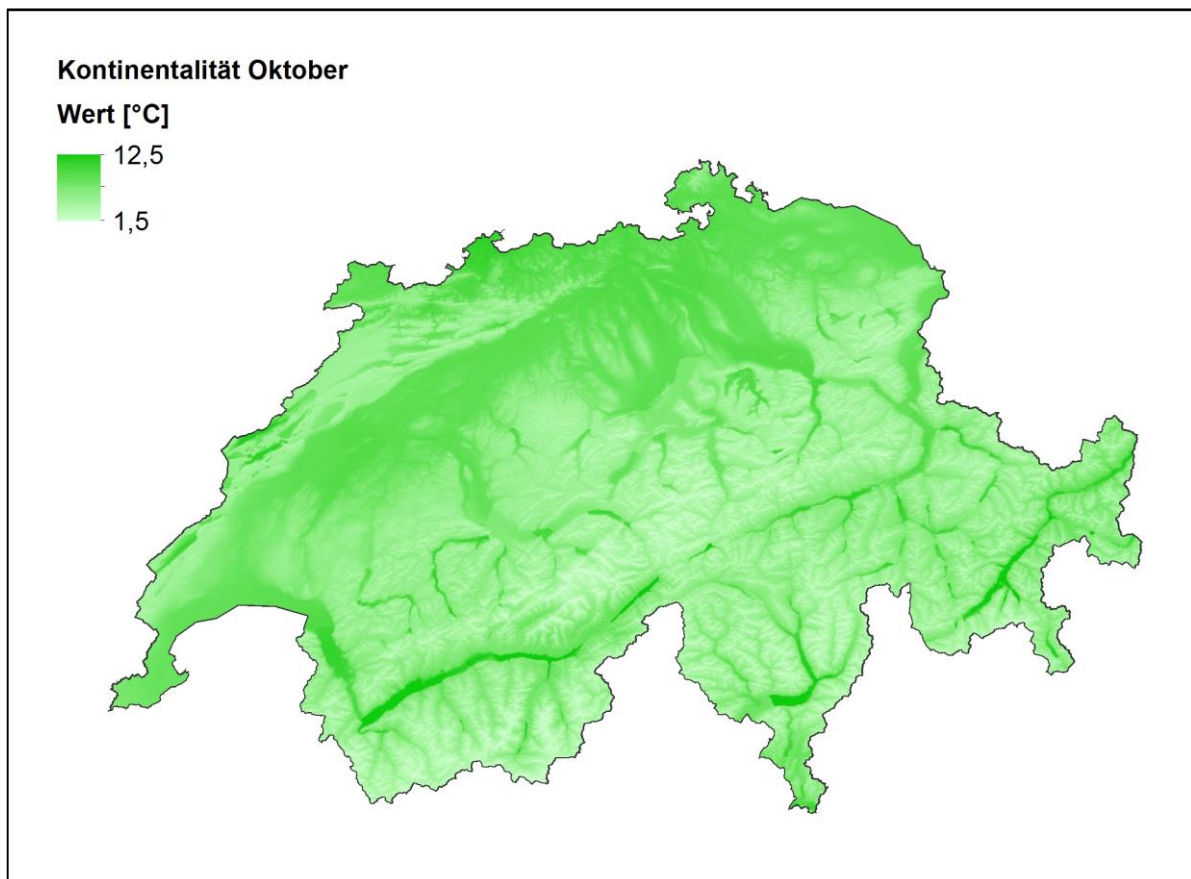


Abb. 23: Thermische Kontinentalität für den Oktober (Periode 1961-1990).



#### **2.1.4 Mittlerer erster und letzter Frosttag im Jahr**

Der letzte Frosttag im Frühling ist entscheidend für das Vorkommen vieler Baumarten (Frosttoleranz und phänologische Kontrolle für Austrieb/Blüte). Einen weniger grossen Einfluss hat der erste Frost im Herbst, dieser begrenzt v.a. die Wachstumsperiode der Bäume. Die Karten für den letzten und den ersten mittleren Frosttag im Jahr wurden beide mit gleicher Vorgehensweise berechnet. Die Karten basieren auf Messdaten für die Periode 1961-1990. Als Stützpunkte für die Interpolation wurden ausschliesslich Messstationen von MeteoSchweiz verwendet. Ein Tag wurde als «Frosttag» definiert, wenn die Tiefsttemperatur dieses Tages unter 0° C liegt.

Im Weiteren wird das exakte Vorgehen am Beispiel der Berechnung des letzten mittleren Frosttages beschrieben.

Zunächst wurde für jede Station der mittlere letzte Frosttag im Jahr für die Periode 1961-1990 berechnet. Jede Station erhält so einen Wert zwischen 1 und 365 (1 = 1. Januar). Aufgrund dieser Auswertung wurden gutachterlich Isolinien mit gleichem letztem Frosttag für die Höhen 500 m, 1000 m, 1500 m und 2000 m gezeichnet. Die gutachterliche Erstellung der Isolinien war notwendig, um die Gradienten entlang des Alpenhauptkammes zufriedenstellend abbilden zu können. Die Isolinien wurden anschliessend digitalisiert. Mit dem GIS-Programm «Topo to Raster» wurde anhand der digitalisierten Isolinien auf den genannten Höhenlagen 500, 1000, 1500 und 2000 m der jeweilige letzte Frosttag auf jeden Gitterpunkt mit einer Maschenweite von 25 m interpoliert.

Für die Berechnung des mittleren letzten Frosttages auf den reellen Höhen des digitalen Geländemodells mit einer Maschenweite von 25 m wurden zwischen den verschiedenen Höhenstufen die Gradienten aus den Frostkarten auf 500, 1000, 1500 und 2000 m auf jedem Gitterpunkt berechnet. Damit wurde schliesslich der mittlere letzte Frosttag auf die reelle Höhe desselben Gitterpunktes berechnet. Unterhalb von 500 m wurde der Gradient zwischen 500 und 1000 m verwendet, oberhalb von 2000 m der Gradient zwischen 1500 und 2000 m eingesetzt. Die Karte für den mittleren ersten Frosttag wurde nach analogem Vorgehen berechnet. Beide Karten wurden anschliessend für Kaltluftseen korrigiert. Für jeden Kaltluftsee wurde gutachterlich die Korrektur (in Tagen) für den tiefsten Punkt des Sees festgelegt. Der Korrekturwert nimmt innerhalb des Kaltluftsees gegen oben hin linear ab und ist am oberen Rand des Sees gleich Null.

Zum Schluss wurden fixe Grenzen für das Auftreten des mittleren letzten und mittleren ersten Frosttages gesetzt. Für den mittleren letzten Frosttag ist dies der Tag 196 (15. Juli), für den mittleren ersten Frosttag der Tag 225 (13. August).

#### **2.1.5 Dauer der frostfreien Vegetationsperiode**

Die Dauer der frostfreien Vegetationsperiode ist vor allem für frostempfindliche Baumarten wie Buche und Tanne entscheidend. Sie wurde berechnet als Differenz zwischen dem mittleren ersten Frosttag im Jahr und dem mittleren letzten Frosttag im Jahr. Dies wurde für die historische Periode 1961-1990 und für die zukünftige Periode 2070 – 2099 bei einer Erwärmung von 3° C und einer Erwärmung von 4° C gerechnet, was am oberen Rand der beiden Klimazukünfte liegt.

#### **2.1.6 Niederschlag**

Für die Analyse der Niederschlagsverhältnisse wurde hauptsächlich der Datensatz der Tafel 2.7 «Mittlere saisonale Niederschlagshöhen im europäischen Alpenraum 1971–1990» des

Hydrologischen Atlas der Schweiz HADES verwendet (Schwarb et al. 2001). Dabei wurden die Niederschlagskarten für alle Monate des Jahres auf dieselbe Auflösung wie die Temperaturkarten gebracht (25 x 25 m). In Abb. 24 sind die Monatsmittel des Niederschlages für die Monate Januar, April, Juli und Oktober abgebildet. Da sich die Niederschlagsverhältnisse zwischen den Zeitperioden 1971-1990 und 1961-1990 eher geringfügig unterscheiden, wurde auf eine Korrektur der Werte 1971-1990 auf die Periode 1961-1990 verzichtet. Dies kann auch darum vertreten werden, weil eine Standortsveränderung eines Niederschlagssammlers oft grössere Änderung mit sich bringt (zum Teil mehr als 30% aufgrund unterschiedlichen Windeinflusses oder durch die an sich schon hohe Variabilität des Niederschlags besonders in den Alpen) als die insgesamt geringe Änderung auch über eine lange Zeitperiode 1901 bis 1990.

Als erster Datensatz für die Überlagerungen mit den Standortkarten wurde die Tafel 2.2 «Mittlere jährliche korrigierte Niederschlagshöhen 1951-1980» des Hydrologischen Atlas der Schweiz HADES verwendet (Höhengradient 0.8 mm/m, HADES 2001).

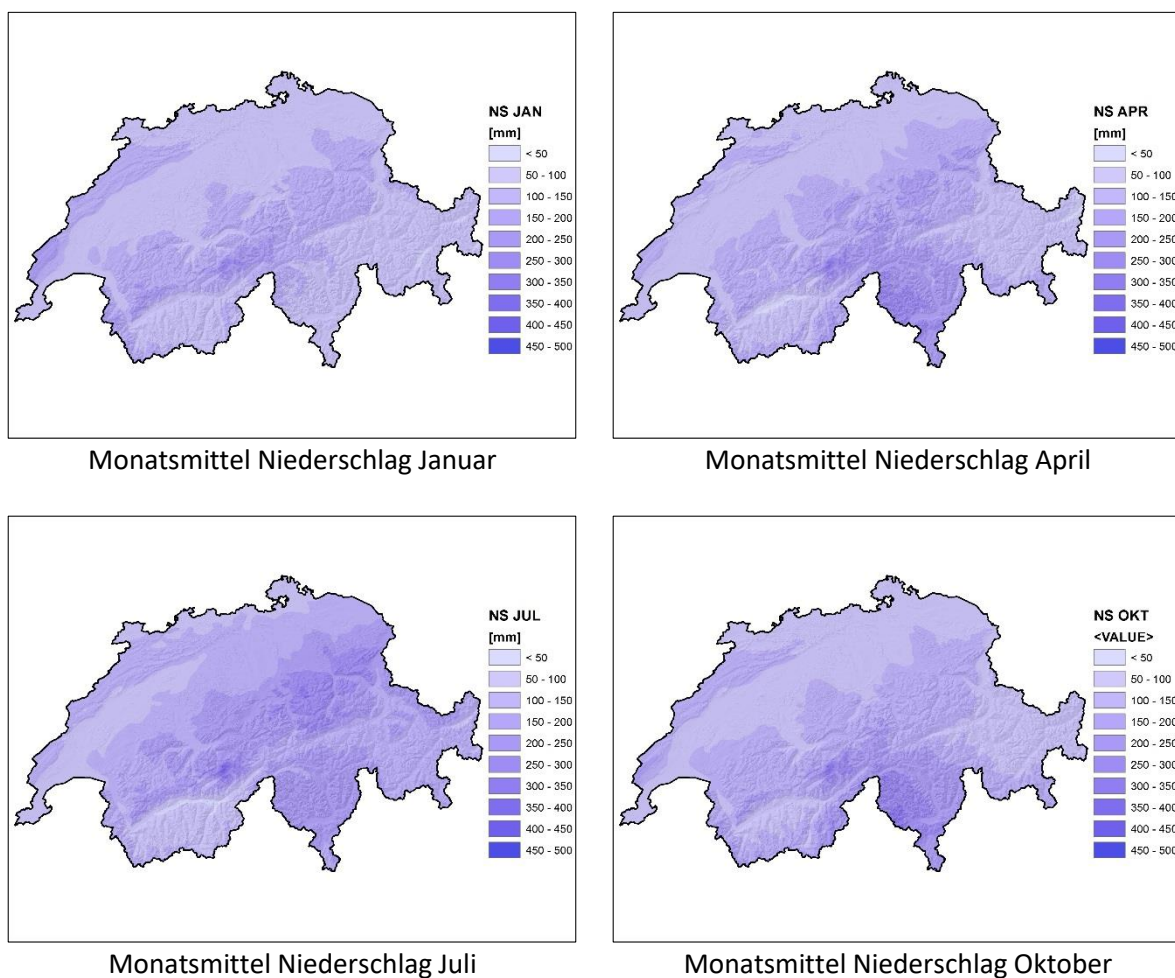


Abb. 24: Mittlere monatliche Niederschlagshöhen (HADES Tafel 2.7). Legende: dunkelviolet = 450-500 mm, helllila = < 50 mm.

### 2.1.7 Relative Luftfeuchtigkeit

Analog dem Verfahren zur Erstellung der Temperaturkarten mit Höhengradienten und flächige Interpolation nach dem «Topo to Raster» Ansatz wurden Karten der monatlichen Mittel der relativen Luftfeuchtigkeit um 13:30 Uhr für die Monate Januar, April, Juli und Oktober sowie für das Jahresmittel in der Periode 1981-2010 berechnet. In einem zweiten Schritt wurden Karten der monatlichen Mittel der relativen Luftfeuchtigkeit um 6 Uhr für die Monate Januar, April, Juli und Oktober sowie für das Jahresmittel in der Periode 1981-2010 erstellt.

Abb. 25 bis Abb. 28 zeigen die relative Luftfeuchtigkeit um 13.30 Uhr in der Schweiz während den Monaten Januar, April, Juli und Oktober; Abb. 29 die relative Luftfeuchtigkeit im Jahr. Die Luftfeuchtigkeit ist für die Pflanzenwelt besonders tagsüber wichtig, weil dann die Pflanze photosynthetisch aktiv ist und bei geringer Luftfeuchtigkeit entweder viel verdunstet oder aber ihre Stomata schliessen muss, wodurch sie aber keinen Kohlenstoff assimilieren kann. Die Luftfeuchtigkeit während der Nacht ist von deutlich geringerer Bedeutung, da die Pflanze in der Nacht infolge weitgehendem Stomataschluss kaum verdunstet. Im Monat Januar zeichnet sich infolge der häufigen Nebel- und Hochnebelsituationen das Mittelland durch hohe relative Luftfeuchtigkeiten von ca. 75% aus. Demgegenüber sind das Wallis, das Engadin und die Alpensüdseite mit Werten von ca. 50% sehr lufttrocken. Die Regionen Wallis, Nordtessin und Engadin sowie in vermindertem Mass auch Nord- und Mittelbünden zeigen im Übrigen in allen Monaten geringe relative Luftfeuchtigkeiten, während sie speziell in den Monaten April und Juli sowie auch im Jahr am Alpennordhang trotz gelegentlicher Föhnlagen hoch sind. Die geringen Luftfeuchtigkeiten auf der Alpensüdseite, speziell in den Tälern Leventina, Blenio, Misox, Bergell und Puschlav sind vor allem auf den dort sehr häufigen Nordföhn zurückzuführen. So herrscht beispielsweise in der oberen Leventina an jedem dritten Tag um die Mittagszeit Nordföhn. Die geringe relative Luftfeuchtigkeit im Wallis und im Engadin geht einerseits darauf zurück, dass diese Gebiete bei Nordanströmung einen gewissen Föhneffekt mit Abtrocknung der Luft erfahren und sich andererseits, zumindest im Wallis und im Unterengadin, auch bei Südanströmung Föhneffekte bemerkbar machen. Im Weiteren heizen sich diese Gebiete zumindest im Sommerhalbjahr tagsüber wegen des Massenerhebungseffektes stark auf, was die relative Luftfeuchtigkeit ebenfalls absenkt. Der Alpennordhang hingegen bleibt, wie oben erwähnt, relativ feucht. Der Grund dafür liegt im deutlichen Überwiegen von Winden aus dem West- und Nordsektor gegenüber solchen aus dem Südsektor. Der bei Südwinden am Alpennordhang auftretende Föhn erniedrigt zwar die relative Luftfeuchtigkeit vorübergehend stark, tritt aber um die Mittagszeit nur etwa zur Hälfte der Zeit auf wie der Nordföhn in entsprechenden Lagen auf der Alpensüdseite. Die häufigen Winde aus dem Nord- und Westsektor bringen dem Alpennordhang häufig Stau der Luftmassen, Bewölkung und zeitweise auch Niederschlag.

Um die potenzielle Evapotranspiration bei Föhn zu berechnen, wurden in einem weiteren Schritt die Luftfeuchte am frühen Morgen oder die mittlere Luftfeuchte berechnet.

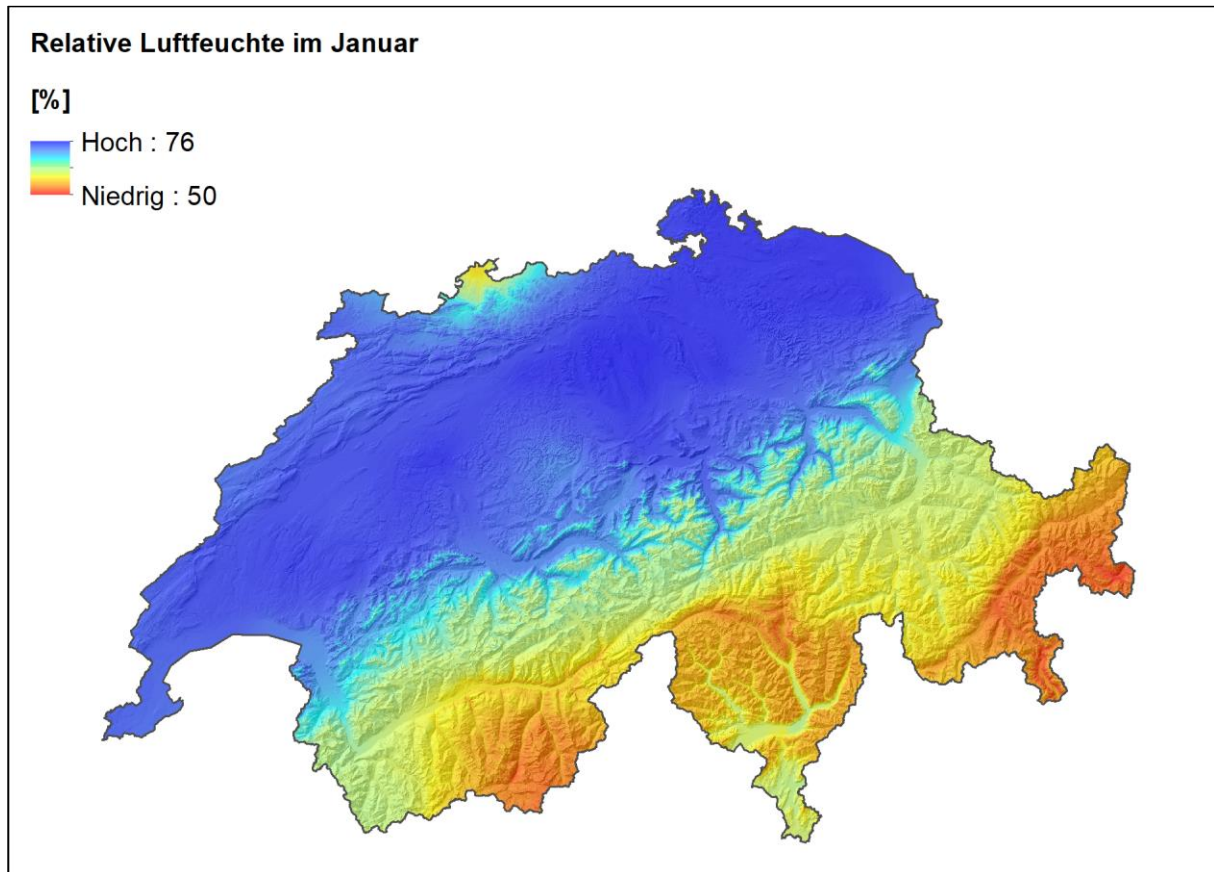


Abb. 25: Relative Luftfeuchte um 13:30 Uhr im Januar, (Periode 1981-2010).

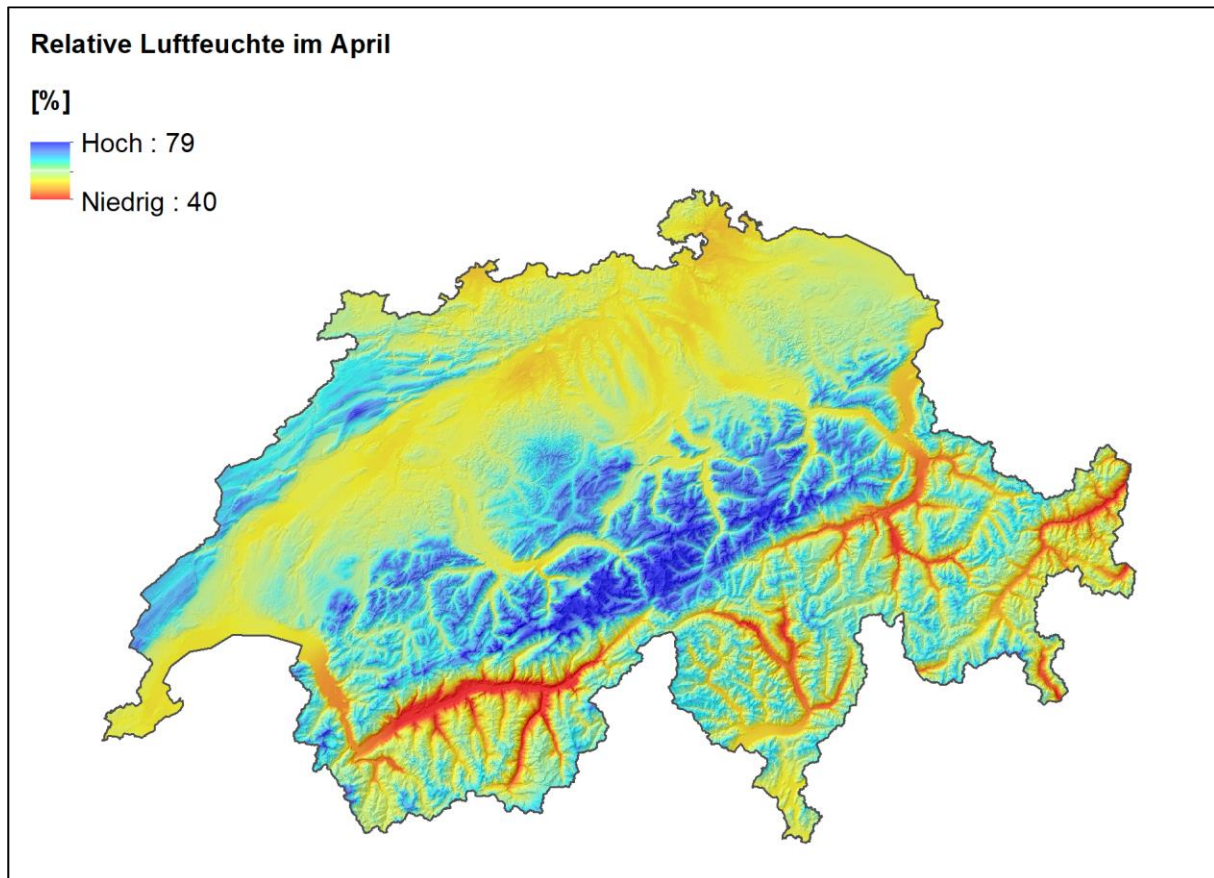


Abb. 26: Relative Luftfeuchte um 13:30 Uhr im April, (Periode 1981-2010).



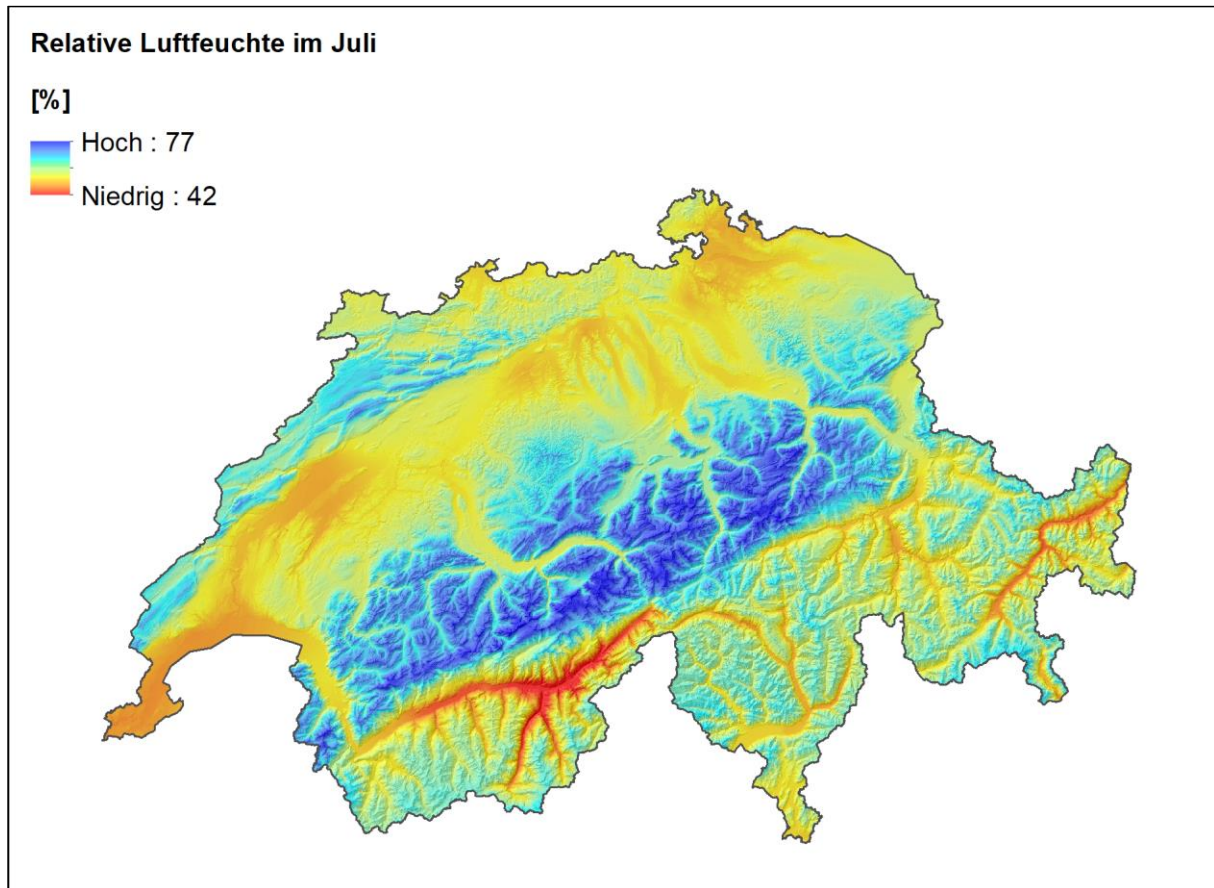


Abb. 27: Relative Luftfeuchte um 13:30 Uhr im Juli, (Periode 1981-2010).

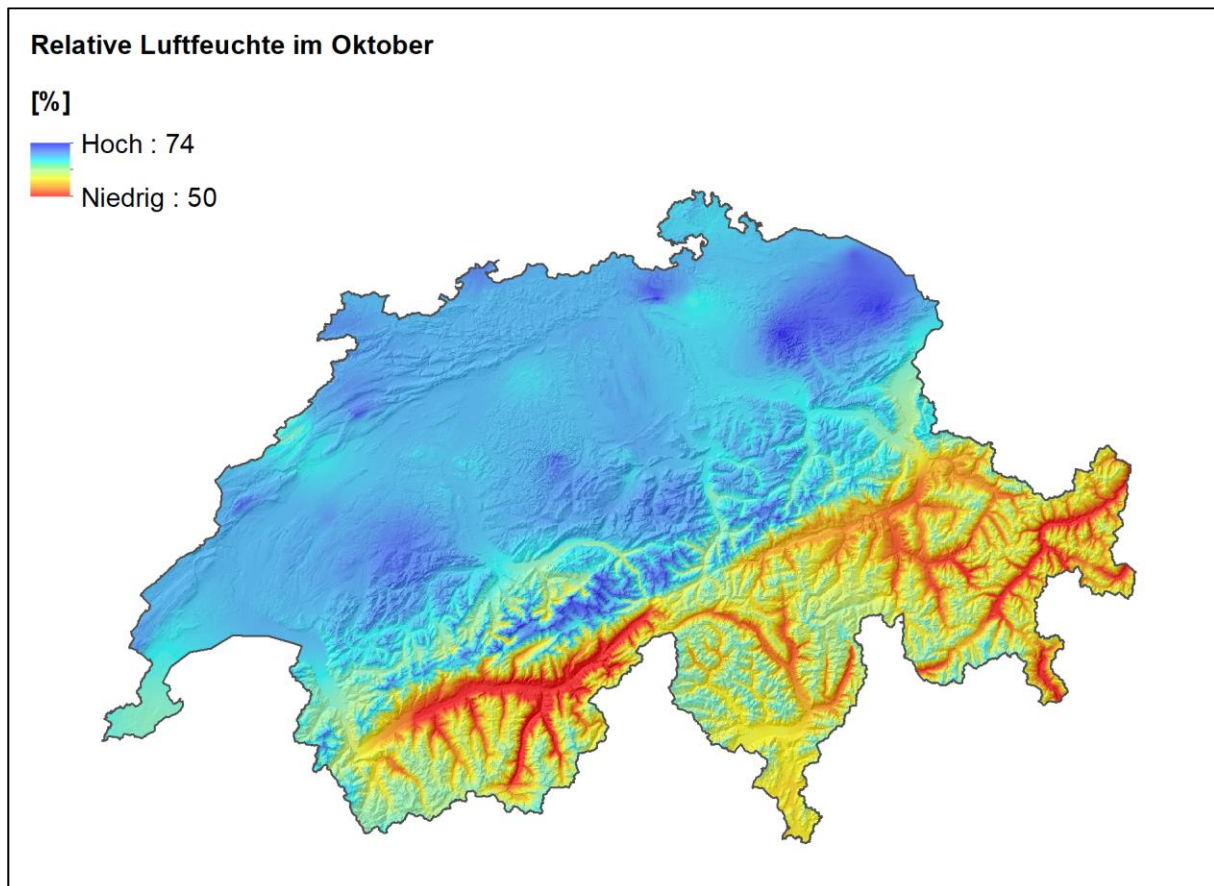


Abb. 28: Relative Luftfeuchte um 13:30 Uhr im Oktober, (Periode 1981-2010).

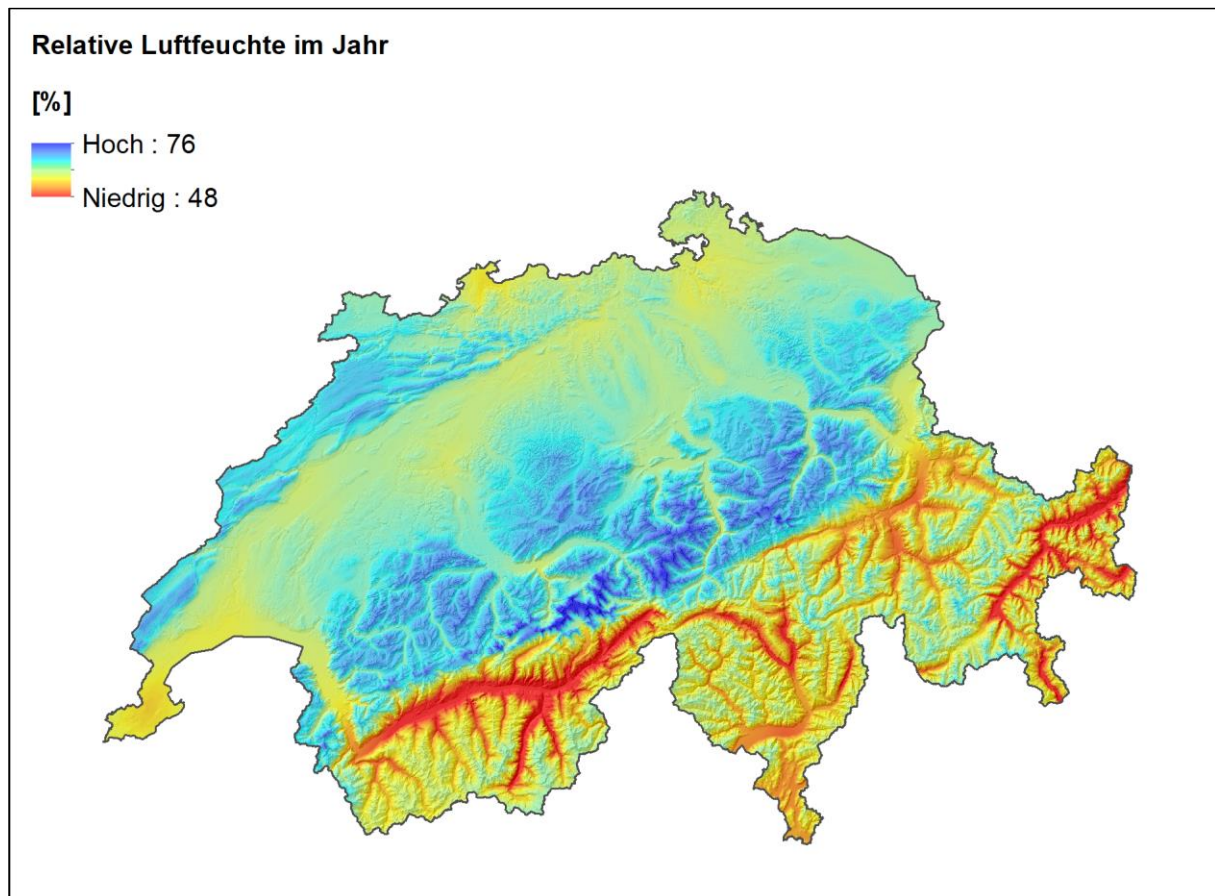


Abb. 29: Relative Luftfeuchte um 13:30 Uhr im Jahr (Periode 1981-2010).

### 2.1.8 Globalstrahlung

Für die Globalstrahlung wurden die Daten der Dissertation von Ludwig Z'graggen (Z'graggen 2001) aufbereitet. Die Daten wurden neu berechnet mit der Auflösung des digitalen Geländemodells mit Maschenweite 25 m. Es wurden die Monatsmittel der Globalstrahlung der Monate Januar, April, Juli und Oktober (Abb. 30) sowie das Jahresmittel der Globalstrahlung verwendet. Die Zeitperiode war 1984-1993. Diese 10-Jahresperiode kann als repräsentativ für Klimaperioden von 30 Jahren betrachtet werden, da die Bewölkungs- und Strahlungsverhältnisse zwischen einzelnen 10-Jahresperioden nicht wesentlich voneinander abweichen. Das Verhältnis zwischen direkter Strahlung und Globalstrahlung wurde nach Z'graggen (2001) angenommen (Tabellen 2-5).

Tab. 2: Verhältnis zwischen direkter Strahlung und Globalstrahlung im Januar (Z'graggen 2001).

V <sub>D/G</sub> Januar								
Höhe	200	400	600	800	1000	1200	1400	>1500
Alpennordseite	0.28	0.32	0.36	0.38	0.40	0.44	0.48	0.50
Alpensüdseite	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

Tab. 3: Verhältnis zwischen direkter Strahlung und Globalstrahlung im April (Z'graggen 2001).

V <sub>D/G</sub> April								
Höhe	200	400	600	800	1000	1200	1400	>1500
Alpennordseite	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42
Alpensüdseite	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46

Tab. 4: Verhältnis zwischen direkter Strahlung und Globalstrahlung im Juli (Z'graggen 2001).

V <sub>D/G</sub> Juli								
Höhe	200	400	600	800	1000	1200	1400	>1500
Alpennordseite	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59
Alpensüdseite	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61

Tab. 5: Verhältnis zwischen direkter Strahlung und Globalstrahlung im Oktober (Z'graggen 2001).

V <sub>D/G</sub> Oktober								
Höhe	200	400	600	800	1000	1200	1400	>1500
Alpennordseite	0.42	0.43	0.45	0.47	0.49	0.51	0.53	0.56
Alpensüdseite	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56

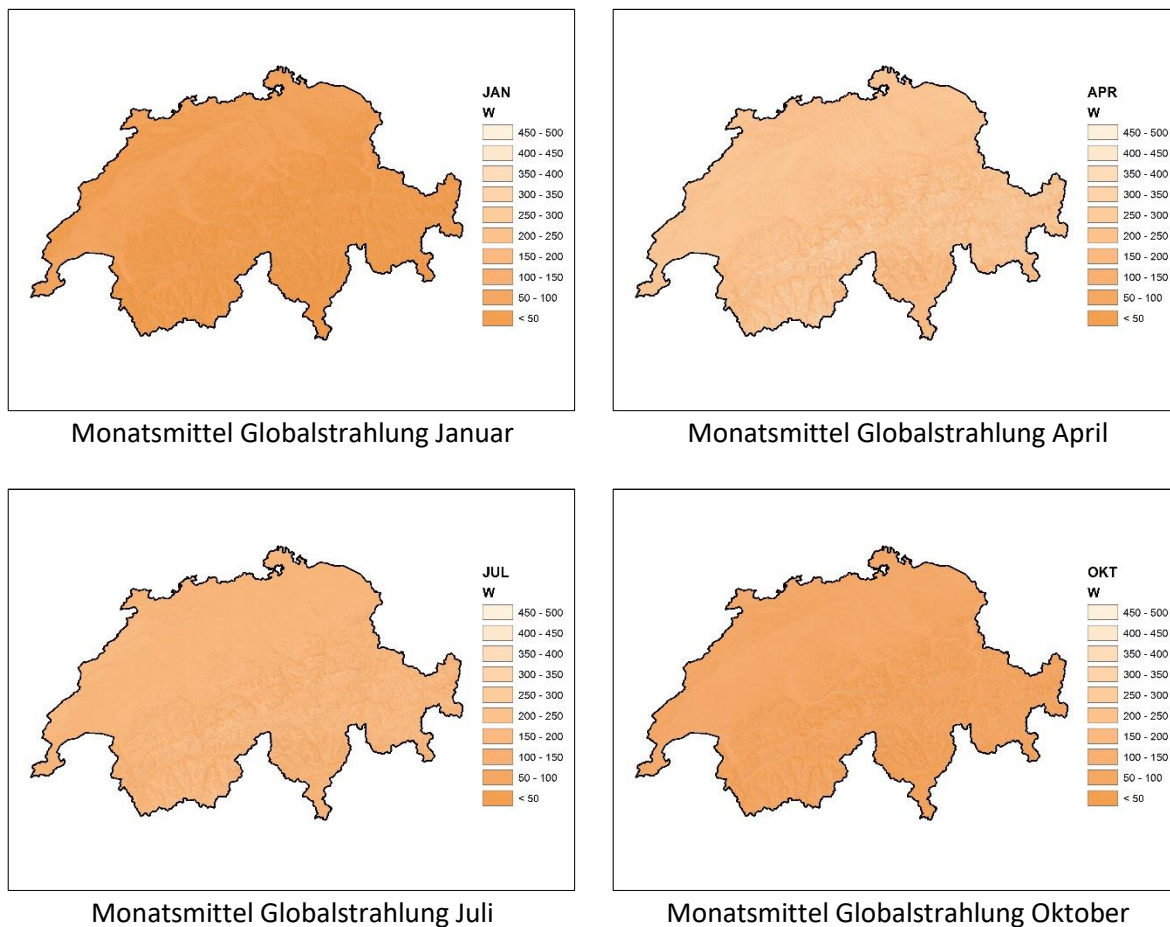


Abb. 30: Mittlere monatliche Globalstrahlung Januar, April, Juli und Oktober in W/m<sup>2</sup>. Legende: dunkelorange = < 50 W/m<sup>2</sup>, hellorange = 450-500 W/m<sup>2</sup>.

### 2.1.9 Wind

Als weitere Parameterkarten wurden Karten für die mittlere Windgeschwindigkeit über das Jahr sowie für die vier Monate Januar, April, Juli und Oktober erarbeitet (1981-2010). Es wurde angenommen, dass sich die Periode von 1961-1990 im Mittel nicht wesentlich von 1981-2010 unterscheidet. Grund für diese Annahme war einerseits, dass die Windmessungen bei Meteoschweiz erst im Jahre 1981 mit der Einführung des automatischen Messnetzes vereinheitlicht wurden. In den vorhergehenden Jahrzehnten wurden die Windgeschwindigkeiten an vielen Stationen anhand einer sogenannten Wildschen Windfahne geschätzt. Ein direkter Vergleich



ist daher kaum möglich. Andererseits müsste sich aber die Witterungsklimatologie mit ihren charakteristischen Windsituationen zwischen den zwei Perioden 1961-1990 und 1981-2010 fundamental verändert haben, damit sich die mittleren Windgeschwindigkeiten in diesen beiden Zeitperioden in erheblichem Masse unterscheiden würden. Auf eine Umrechnung der Periode von 1981-2010 auf die Periode 1961-1990 wurde deshalb verzichtet. Anschliessend wurden die mittleren Windgeschwindigkeiten der Stationen von Meteoschweiz mit Hilfe der von Meteotest (2011) ermittelten Höhengradienten auf 1000 m reduziert. Anschliessend wurde auf 1000 m ü. M. eine flächige Interpolation nach dem «Topo to Raster» auf jeden Gitterpunkt mit der Maschenweite von 25 m durchführt. Zum Schluss wurde mit den Höhengradienten von Meteotest (2011) die Windgeschwindigkeit analog dem Verfahren bei der Temperatur und Luftfeuchtigkeit auf der wirklichen Höhe jedes Gitterpunktes berechnet (Abb. 31).

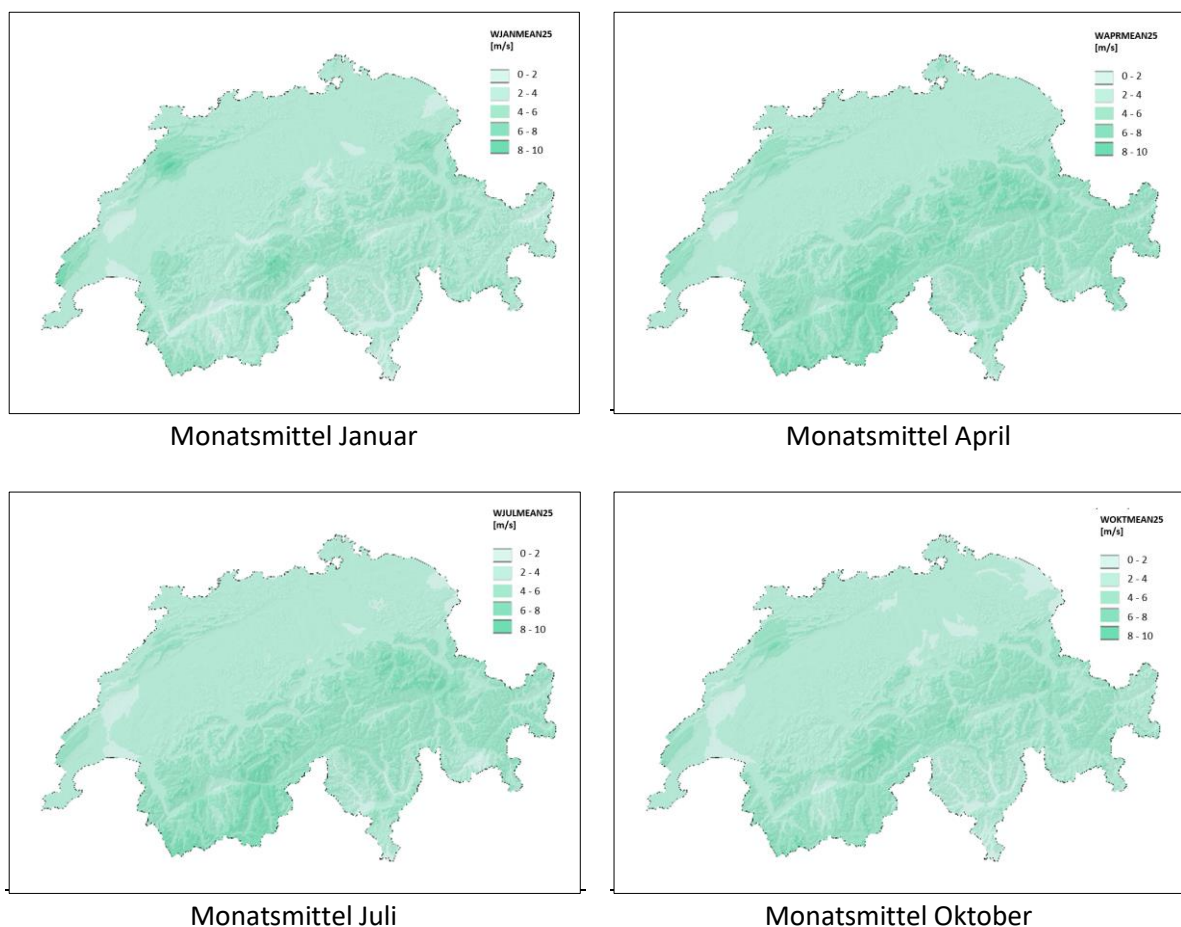


Abb. 31: Karten der mittleren monatlichen Windgeschwindigkeiten für die Monate Januar, April, Juli und Oktober. Legende: dunkelgrün = 8-10 m/s, hellgrün = <2 m/s.

### 2.1.10 Potenzielle Evapotranspiration

Mit Hilfe der Monatsmittelwerte der Globalstrahlung, der Windgeschwindigkeit, der Luftfeuchtigkeit sowie der Lufttemperatur wurde die potenzielle Evapotranspiration flächendeckend für die ganze Schweiz für Periode 1961-90 mit einer Auflösung von 25 x 25 m berechnet, dies für die Monate Januar, April, Juli und Oktober sowie für das Jahr (Abb. 32 bis Abb. 36). Die Farbskalen der Karten sind nicht aufeinander abgestimmt. Die absoluten Werte der potenziellen Evapotranspiration unterscheiden sich je nach Monat deutlich.

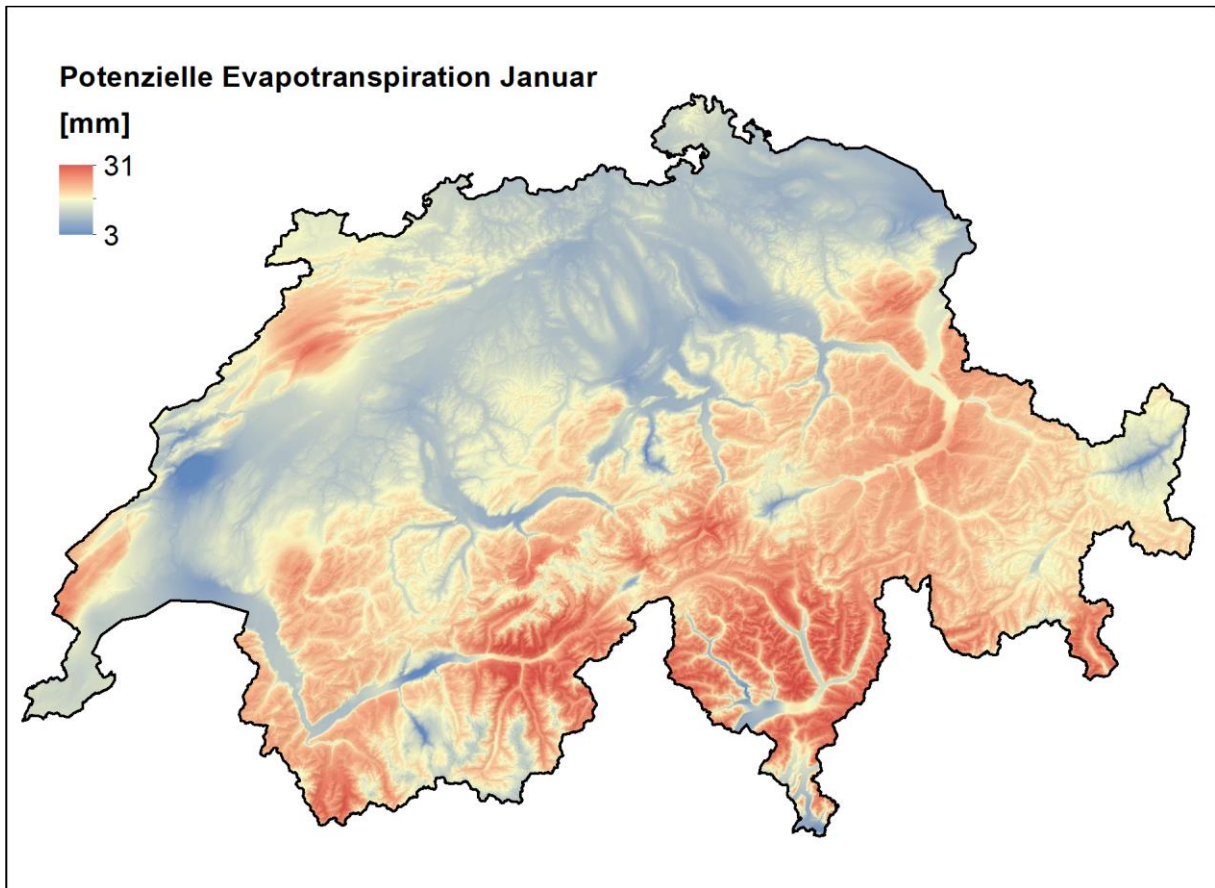


Abb. 32: Karte der potenziellen Evapotranspiration im Januar.

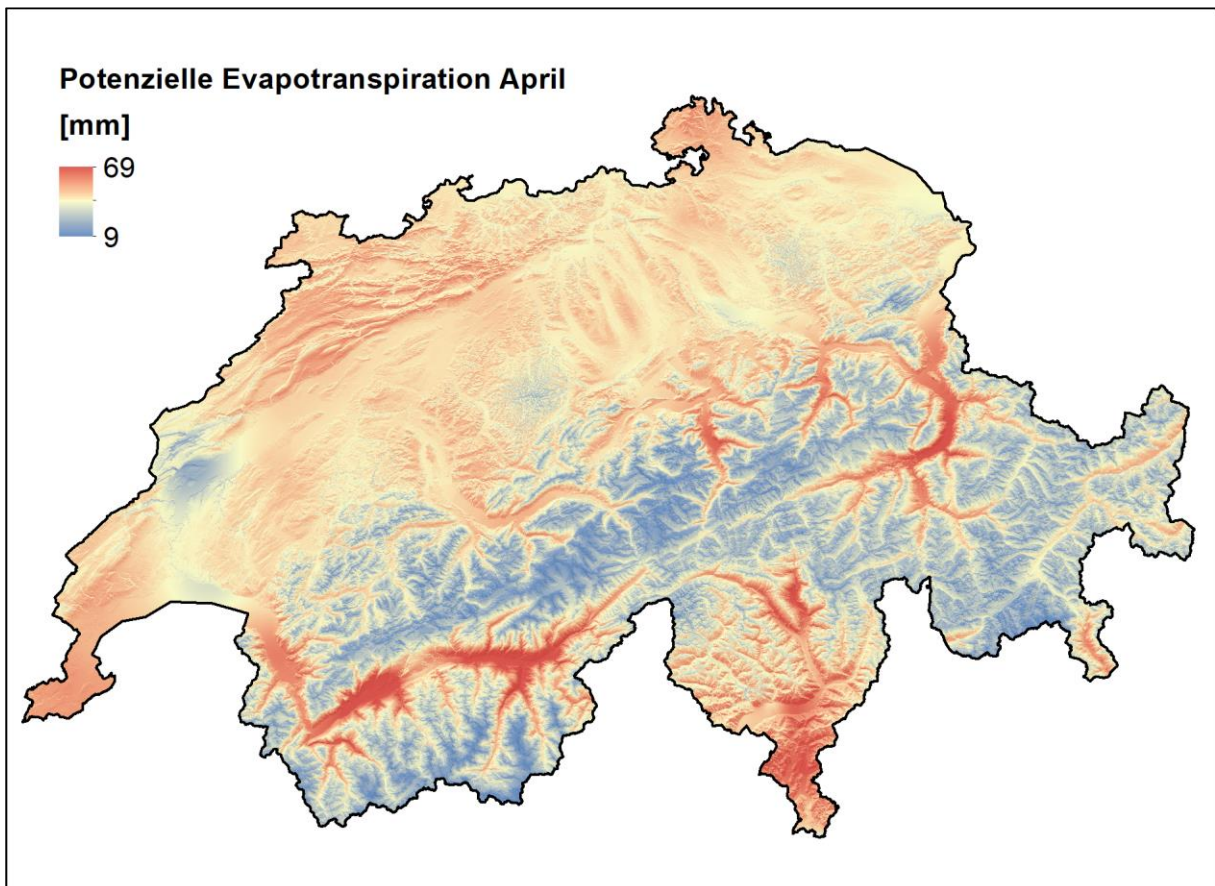


Abb. 33: Karte der potenziellen Evapotranspiration im April.



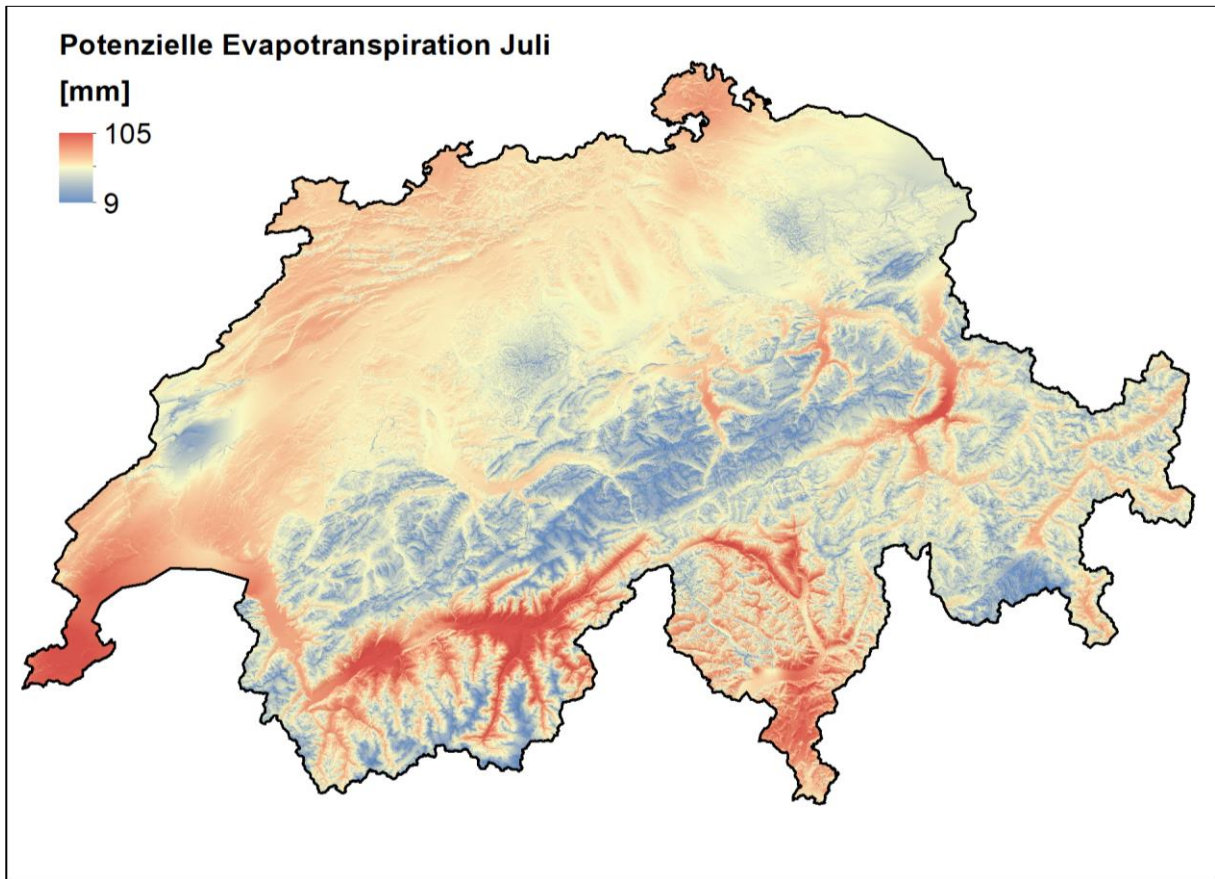


Abb. 34: Karte der potenziellen Evapotranspiration im Juli.

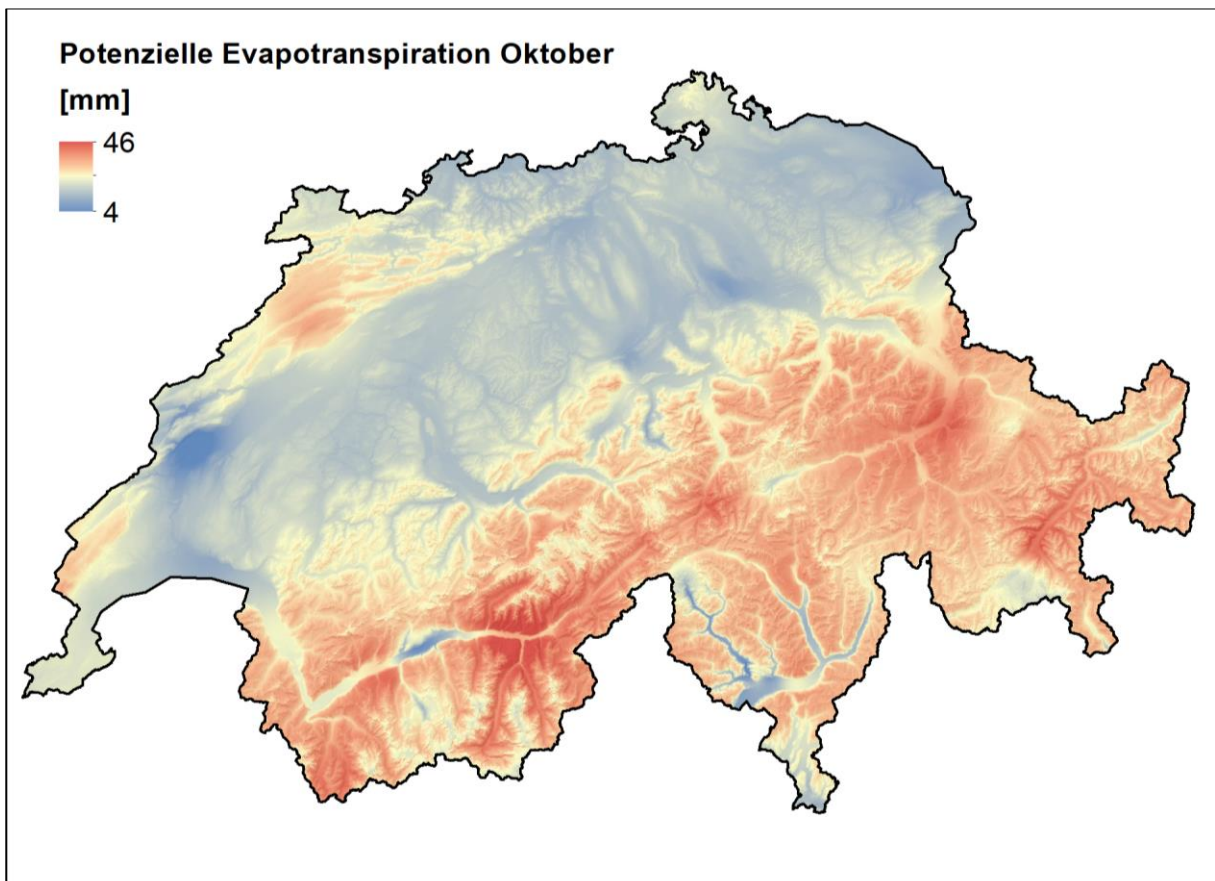


Abb. 35: Karte der potenziellen Evapotranspiration im Oktober.

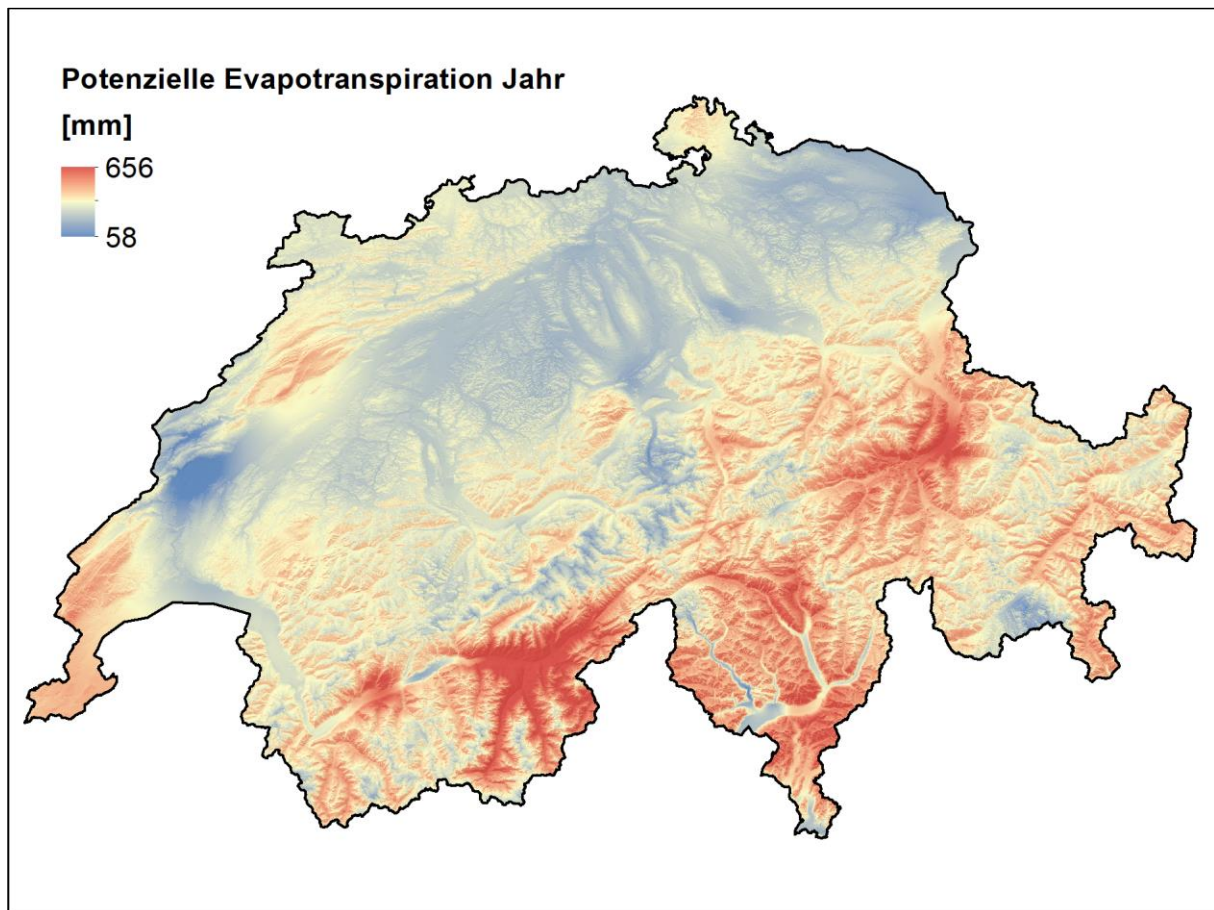


Abb. 36: Karte der potenziellen Evapotranspiration im Jahr.

### 2.1.11 Föhn

Der Föhn ist für die Pflanzenwelt von grosser Bedeutung, da er durch seine grosse Windgeschwindigkeit, niedrige Luftfeuchtigkeit und hohe Temperatur das Pflanzenleben entscheidend beeinflusst. So verlängert der Föhn in den nördlichen Alpentälern die Vegetationsperiode, wirkt aber auch sehr austrocknend, so dass einige hygrophile Pflanzen trotz hoher Niederschlagsmengen in stark dem Föhnwind ausgesetzten Regionen in ihrer Konkurrenzkraft stark geschwächt sind.

In der Schweiz gibt es im Wesentlichen zwei typische Föhnerscheinungen. Dies ist zum einen der bekannte Südföhn, der im Allgemeinen einfach Föhn genannt wird. Dieser entsteht meist bei südlicher bis südwestlicher Höhenströmung und betrifft die Gebiete nördlich des Alpenhauptkammes, welche sich vom Gr. St. Bernhard über die Monte Rosa bis zum Gotthardpass und von da an über Lukmanier- und Malojapass bis zum Ofenpass erstrecken. Das Engadin, welches unmittelbar nördlich dieser Linie verläuft, hat keine typischen Südföhnerscheinungen, weshalb Föhnerscheinungen in dieser Region nicht untersucht wurden. Auch im Mittelland und im Jura kennt man den Föhn als Wind kaum, weshalb er auch hier nicht weiter untersucht wurde.

Die typischsten Föhnregionen sind im Einzugsgebiet der Rhone das Rhonequertal von Martigny an abwärts bis zum Genfersee, das Val d'Entremont und das Val Ferret sowie das Oberwallis von Brig bis etwa Sierre, ferner noch das Saas- und das Mättertal. In den anderen Tälern, welche vom Rhonetal südwärts bis zu den Walliser Alpen verlaufen, also im Turtmantal, im Val d'Anniviers, im Val d'Hérens und im Val d'Héremence ist der Föhn als Wind praktisch unbekannt. Am Alpennordhang macht sich der Föhn ganz besonders im Oberhasli vom Grimsel

abwärts bis zum Brienersee stark bemerkbar, andere markante Föhnschneisen sind das Urner Reusstal und das St. Galler und Churer Rheintal. Auch in der Gegend von Elm und Vättis macht sich der Föhn häufig bemerkbar, während er im Linthtal sowie in der Gegend von Engelberg schon deutlich seltener auftritt. Im Gebiet von Nord- und Mittelbünden sind das Hinterrheintal, die südlichen Seitentäler des Vorderrheins und die Gegend von Davos markante Föhntäler. Die zweite, ausgeprägte Föhnerscheinung ist der Nordföhn, welcher in den Tälern südlich des Alpenkammes auftritt. Der Nordföhn kann dabei fast in jedem Tal auftreten. Eindeutig am häufigsten ist er aber auf der Simplonsüdseite, in der Leventina und im Bergell. Über die Föhnhäufigkeit existieren bisher einzig von einigen wenigen Stationen zuverlässige Angaben. Es war also nötig, die in den Föhnregionen vorhandenen Klimastationen bezüglich Föhnhäufigkeit auszuwerten. Dabei werden an allen Stationen dieselben Kriterien angewendet, um Föhnfälle von Nichtföhnfällen zu unterscheiden.

Als Kriterien für Föhnfälle galten dabei:

- Relative Luftfeuchtigkeit: tagsüber  $\leq 50\%$ , in der Nacht  $\leq 55\%$
- Windgeschwindigkeit:  $\geq 5$  km/h
- Windrichtungsbereich: typische Windrichtung in  $^\circ$  bei Föhn  $\pm 60^\circ$  (Anmerkung: bei Südföhn weht bspw. der Wind im Walliser Haupttal bei Visp aus Osten, in Chur aus Südwesten, etc.)

Nur wenn alle obgenannten drei Bedingungen an einer Station erfüllt waren, wurde von Föhn gesprochen.

Das Messnetz von MeteoSchweiz besitzt zwei für Föhnuntersuchungen in Frage kommende Stationstypen. Dies sind erstens die automatischen Messstationen, an welchen alle 10 Minuten bestimmte Klimaparameter gemessen werden. Die Föhnstunden können bei solchen Stationen direkt ausgezählt werden. Da es aber gerade in den Föhngebieten nur wenige solche Stationen gibt, mussten auch diejenigen Klimastationen in Betracht gezogen werden, bei denen nur dreimal am Tag beobachtet wird, nämlich morgens um 7.30 Uhr, nachmittags um 13.30 Uhr und abends um 19.30 Uhr. Um die Föhnstunden eines Tages abschätzen zu können, wurde mit einem einfachen Verfahren gearbeitet: Hat eine bestimmte Station an einem Termin Föhn, so wird die Föhndauer dieses Tages auf 8 Stunden gesetzt. Falls eine Station an 2 Terminen an einem bestimmten Tag Föhn zeigt, ergibt dies eine Föhndauer von 16 Stunden und wenn schliesslich alle 3 Termine Föhn anzeigen, so wird die Föhndauer dieses Tages auf 24 Stunden gesetzt. Nun wiesen viele wertvolle Stationen (Stationen in den charakteristischen Föhntälern) über nur wenige Jahre Beobachtungen in digitaler Form auf. Sie mussten jedoch trotzdem in Betracht gezogen werden, weil der Föhn räumlich ein sehr variables Phänomen ist (Verwendung der digital verwendbaren Zeitperioden).

Nach dem oben beschriebenen Verfahren wurden für das Jahr sowie für die Monate Januar, April, Juli und Oktober die Anzahl Stunden mit Föhn, die Temperatur bei Föhn sowie die relative Luftfeuchtigkeit bei Föhn ausgewertet. Die für das ganze Jahr erhaltenen Föhnparameter sind in Tabelle 6 für den Südföhn und in Tabelle 7 für den Nordföhn enthalten.



Tab. 6: Anzahl Stunden mit Föhn (Südföhn), Temperatur bei Föhn und Luftfeuchtigkeit bei Föhn an den ausgewerteten Klimastationen.

Station	Stationshöhe [m ü. M.]	Zeitperiode	Anzahl Föhn- stunden Jahr in [h]	Temperatur bei Föhn im Jahr in [°C]	Luftfeuchtigkeit bei Föhn im Jahr in [%]
Visp	640	2009-2013	738	16.2	43
Zermatt	1638	2009-2013	223	11.5	38
Turtmann	630	1971-1980	506	15.7	36
Montana	1505	2009-2013	583	10.6	45
Sion	482	1973-1982	155	17.6	35
Vernayaz	480	1971-1980	340	15.3	40
Monthey	470	1971-1980	220	15.7	41
Aigle	381	1984-2008	60	16.7	37
Adelboden	1345	1973-1982	105	14.5	35
Guttannen	1058	1971-1980	890	12.5	45
Meiringen	600	1971-1980	327	16.9	37
Interlaken	575	1973-1982	25	17.2	37
Engelberg	1017	1971-1980	252	15.1	40
Gütsch	2282	1971-1980	595	3.6	48
Göschenen	1110	1971-1980	1216	9.6	54
Gurtellen	739	1969-1973	770	14.6	43
Altdorf	449	1969-1973	514	17.6	34
Altdorf	449	1983-2012	445	18.8	34
Altdorf	449	2009-2013	501	18.8	36
Elm	959	1971-1980	443	13.1	41
Tierfehd Linthal	815	1969-1973	418	15.5	36
Tierfehd Linthal	815	1971-1980	403	15.7	37
Glarus	515	1983-2012	158	19.3	31
Vättis	957	1971-1980	582	13.6	42
Platta Medels	1378	1969-1973	434	11.4	41
Disentis	1190	2009-2013	390	13.8	43
Andeer	987	2009-2013	654	14.4	43
Weissfluhjoch	2670	1971-1980	339	2.6	41
Davos	1580	1984-2008	755	8.1	42
Chur	555	1983-2012	728	16.1	44
Bad Ragaz	496	1973-1982	565	17.7	37
Vaduz	460	1973-1982	405	19.3	31
Heiden	810	1973-1982	265	16.0	35
St.Gallen	779	1973-1982	110	16.7	35
Altstätten	430	1973-1982	135	20.0	29
Säntis	2500	1971-1980	327	3.1	41

**Tab. 7: Anzahl Stunden mit Nordföhn, Temperatur bei Nordföhn und Luftfeuchtigkeit bei Nordföhn an den ausgewerteten Klimastationen.**

Station	Höhe [m ü. M.]	Zeitperiode	Anzahl Föhn- stunden Jahr	Temperatur bei Föhn im Jahr	Luftfeuchtigkeit bei Föhn im Jahr
Simplon	1475	1971-1980	1489	6.6	43
Airolo	1139	1971-1980	1797	7.6	46
Piotta	1007	1997-2013	1501	9.5	42
Matro	2180	1997-2013	1255	3.3	37
Comprovasco	544	1969-1973	1018	12.2	36
Bellinzona	229	1969-1973	806	13.9	32
Monte Bre	905	1971-1980	798	9.3	37
Lugano	276	1971-1980	640	15.0	30
Monte Gene- roso	1610	1997-2013	1093	5.7	38
Vicosoprano	1065	1969-1973	1771	7.8	42
Robbia	1078	1971-1980	1161	8.9	35

Die an den Stationen erhaltenen Angaben dienen schliesslich dazu, in den Südföhngebieten für das Jahr und die Monate Januar, April, Juli und Oktober auf den Höhen 500 m, 1000 m und 2000 m gutachterlich Isolinien für die Anzahl Föhnstunden, für die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit zu zeichnen. Mit Hilfe dieser Isolinien konnte nun analog dem Verfahren bei den Temperaturwerten auf den erwähnten Höhen flächendeckend auf jedem Gitterpunkt die Anzahl Föhnstunden, die Temperatur bei Föhn und die relative Luftfeuchtigkeit bei Föhn berechnet werden. Zwischen den Höhen 1000 und 2000 m sowie zwischen den Höhen 500 und 1000 m wurden nun die Höhengradienten der Anzahl Föhnstunden, der Temperatur bei Föhn und der relativen Luftfeuchtigkeit bei Föhn berechnet. Mit Hilfe der errechneten Werte auf 1000 m und dem Gradienten zwischen 1000 und 2000 m bzw. dem Gradienten zwischen 500 und 1000 m konnten anschliessend auf den Höhenlagen zwischen 500 und 2000 m auf jedem Gitterpunkt des digitalen Geländemodells die Anzahl Föhnstunden, die Temperatur bei Föhn und die relative Luftfeuchtigkeit bei Föhn auf der wahren Höhe ermittelt werden. Für Gitterpunkte, welche eine Höhe von mehr als 2000 m aufweisen, wurde angenommen, dass sich die Häufigkeit des Föhns und die Luftfeuchtigkeit bei Föhn nicht ändert, bei der Temperatur bei Föhn wurde ein einheitlicher Höhengradient von  $-0.7^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  Anstieg angesetzt. Mit diesen Annahmen war es möglich, auch die Föhnparameter oberhalb von 2000 m auf jedem Gitterpunkt zu erhalten. Unterhalb von 500 m wurde vorausgesetzt, dass der Gradient, welcher zwischen den Höhenlagen von 500 m und 1000 m berechnet wurde, auch in Höhenlagen unterhalb von 500 m gilt. Mit den flächendeckenden Angaben der Anzahl Föhnstunden, der Temperatur bei Föhn und der relativen Luftfeuchtigkeit bei Föhn auf 500 m und dem Gradienten zwischen 500 m und 1000 m wurden abschliessend die Föhnparameter für die Gitterpunkte, welche eine Höhe von weniger als 500 m aufweisen, ermittelt. Für die Gebiete mit Nordföhn wurde das gleiche Verfahren angewendet wie in den Gebieten mit Südföhn.

Die Abb. 37 stellt die Häufigkeit des Süd- und Nordföhns dar. Beim Südföhn stechen das obere Reusstal, das Haslital, das Oberwallis und das Vorder- und Hinterrheintal durch Föhnhäufigkeiten von 8 bis 14% deutlich hervor. Allerdings macht sich der Föhn im Goms, im Vorder- und Hinterrheintal sowie im Prättigau nur durch höhere Temperatur und geringe Luftfeuchtigkeit bemerkbar, während die Windgeschwindigkeit im Allgemeinen klein bleibt. Demgegenüber ist der Föhn im Urner Reusstal, im Oberhasli sowie in der Gegend von Brig bis nach Leuk und im Churer und oberen St. Galler Rheintal auch durch hohe Windgeschwindigkeit präsent. Der

Nordföhn hat eine deutlich grössere Häufigkeit als der Südföhn. In der oberen Leventina in Airolo bläst der Nordföhn während 19% des Jahres, während der Südföhn in Göschenen mit etwa 14% merkbar seltener ist. Wenn die für die Pflanzen wichtige Zeit mit Tageslicht berücksichtigt wird, weht der Nordföhn knapp südlich des Gotthards sogar mehr als doppelt so häufig wie der Südföhn nördlich davon. Dabei muss gesagt werden, dass der Südföhn in Göschenen häufiger auftritt als an allen übrigen Stationen nördlich des Alpenkammes. Das Gleiche gilt in Airolo bei Nordföhn. Auch in tieferen Lagen weht der Nordföhn weit häufiger als der Südföhn. So weht der Nordföhn in Comprovasco an über 1000 Std. im Jahr, während in Gurtellen im Reusstal, welches zudem näher am Alpenhauptkamm liegt, der Südföhn nur an 780 Std. auftritt. Selbst in Bellinzona bläst der Nordföhn mit etwa 800 Std. im Jahr noch etwa gleich häufig wie der Föhn in Gurtellen. Altdorf als klassische Südföhnstation hat mit seinen etwa 500 Std. im Jahr nur drei Fünftel mal so viel Föhn wie Bellinzona Nordföhn aufweist.

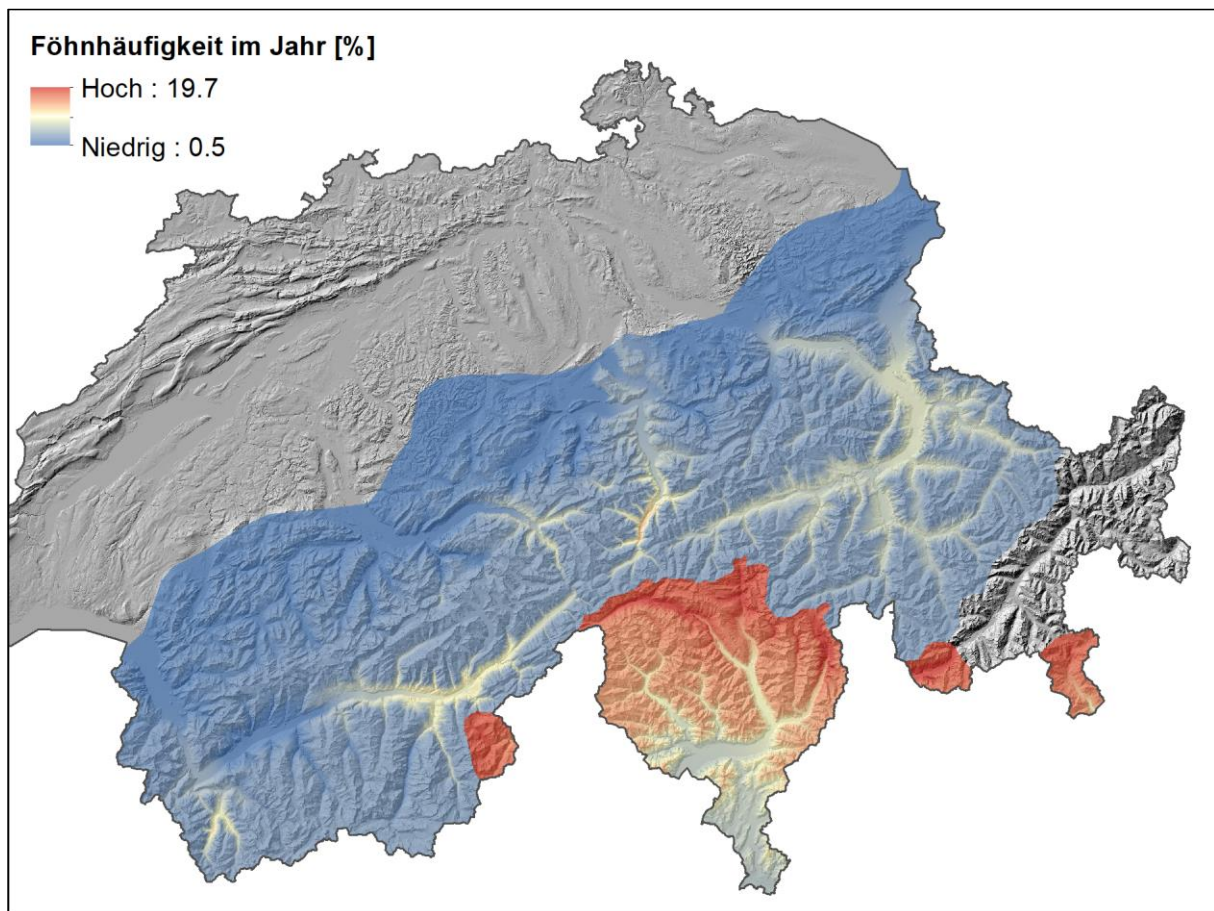


Abb. 37: Föhnhäufigkeit im Jahr (Lesehilfe: 12% von Jahr = 44 Tage im Jahr Föhnereignis).

Abb. 38 zeigt die relative Luftfeuchtigkeit bei Föhn. Dabei sind sowohl der Süd- als auch der Nordföhn in Alpenkammnähe deutlich feuchter als in den tiefen Talsohlen der Alpentäler oder am Alpenrand. Der Südföhn weist unmittelbar nördlich des Alpenkamms etwa 50% relative Luftfeuchtigkeit auf, bei Nordföhn sind es unmittelbar südlich des Alpenkamms etwa 45%. In tiefen Lagen der nördlichen Alpentäler weist der Südföhn nur noch ca. 30% relative Luftfeuchtigkeit auf, ähnlich trocken ist der Nordföhn in den Niederungen der Alpensüdseite. Die höhere relative Luftfeuchtigkeit am Alpenkamm überrascht nicht, denn in vielen Fällen mit Föhn auf der einen Seite der Alpen herrscht auf der anderen Seite trübes Wetter mit Niederschlägen. Somit wirkt sich der Föhneffekt wenige km vom Alpenkamm entfernt noch nicht so stark

aus wie weiter stromabwärts. Gebiete, wo der Südföhn mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50% noch nicht sehr trocken ist, sind das Oberwallis vom Saastal bis ins Obergoms, das Urserental und das oberste Reusstal sowie das Tavetsch und das Rheinwald. Im Falle des Nordföhns sind mit relativen Luftfechtigkeiten von 40 bis 45% unter anderem die Simplonsüdseite, das Bedrettotol, die oberste Leventina und das Bergell nicht so lufttrocken wie die Gebiete weiter südlich.

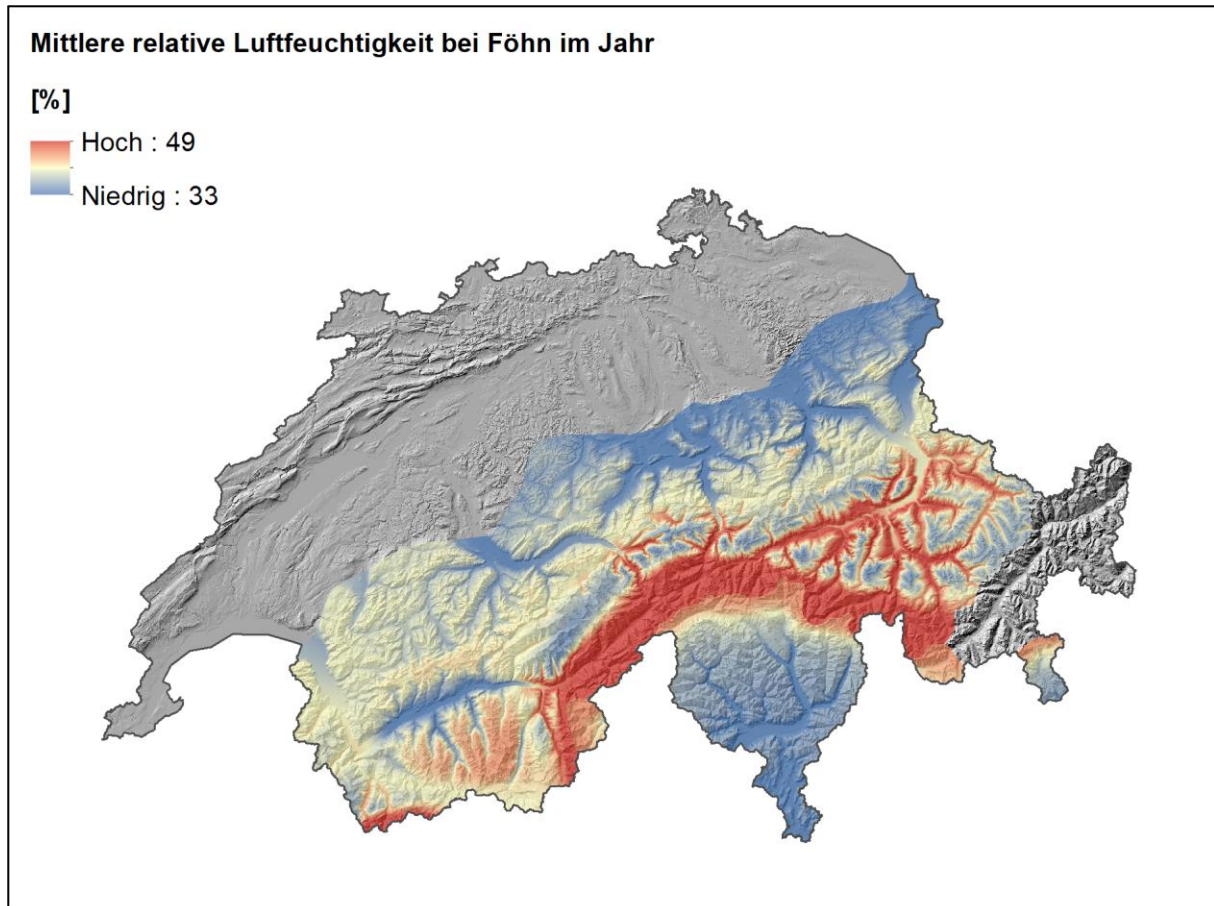


Abb. 38: Mittlere relative Luftfeuchtigkeit bei Föhn im Jahr in %.

Abb. 39 zeigt die Lufttemperatur bei Süd- und Nordföhn. Der Südföhn ist auf vergleichbarer Höhe etwa 3 bis 5°C wärmer als der Nordföhn, dies, weil der Südföhn warme Luft vom Mittelmeerraum heranzführt, währendem es sich bei Nordföhn meist um Polarluft handelt. Im Übrigen nimmt die Temperatur bei Föhn mit zunehmender Höhe stark ab. Der Südföhn bringt in den tieferen Lagen der nördlichen Alpentäler im Durchschnitt eine Erwärmung von 9°C, in Glarus sogar von 10°C mit sich. Der Südföhn erhöht also die Temperatur am Alpennordrand sehr stark. Deutlich kleiner ist die Erwärmung bei Nordföhn auf der Alpensüdseite. In den Niederungen der Alpensüdseite beträgt die mittlere Erwärmung gegenüber dem Jahresmittel nur 4°C. Grund ist einerseits, wie bereits erwähnt, die unterschiedliche Herkunft der Luftmasse. Andererseits ist es auf der Alpensüdseite im Jahresmittel in tieferen Lagen um 500 m ohnehin 2-3°C wärmer als auf gleicher Höhenlage nördlich der Alpen. In Lagen um 1100 m bringt der Südföhn gegenüber dem Jahresmittel eine 3-5°C höhere Temperatur. Auf der Alpensüdseite ist in diesen Höhenlagen, zumindest in Alpenkammnähe, bei Nordföhn von einer Erwärmung kaum etwas zu spüren. Im Winter kann es sogar bei Nordföhn extrem kalt sein. So kann, wenn arktische Kaltluft im Spiel ist, die Temperatur bei Nordföhn in Airolo in der Nacht auf -20°C



sinken, dies ist 15°C kälter als der übliche Tiefstwert im Winter. Selbst in Lugano kann es bei Nordföhn bei solchen Wetterlagen zu Temperaturen unter dem Gefrierpunkt kommen. Im Gegensatz dazu ist der Südföhn nördlich der Alpen fast immer mit relativ hohen Temperaturen verbunden.

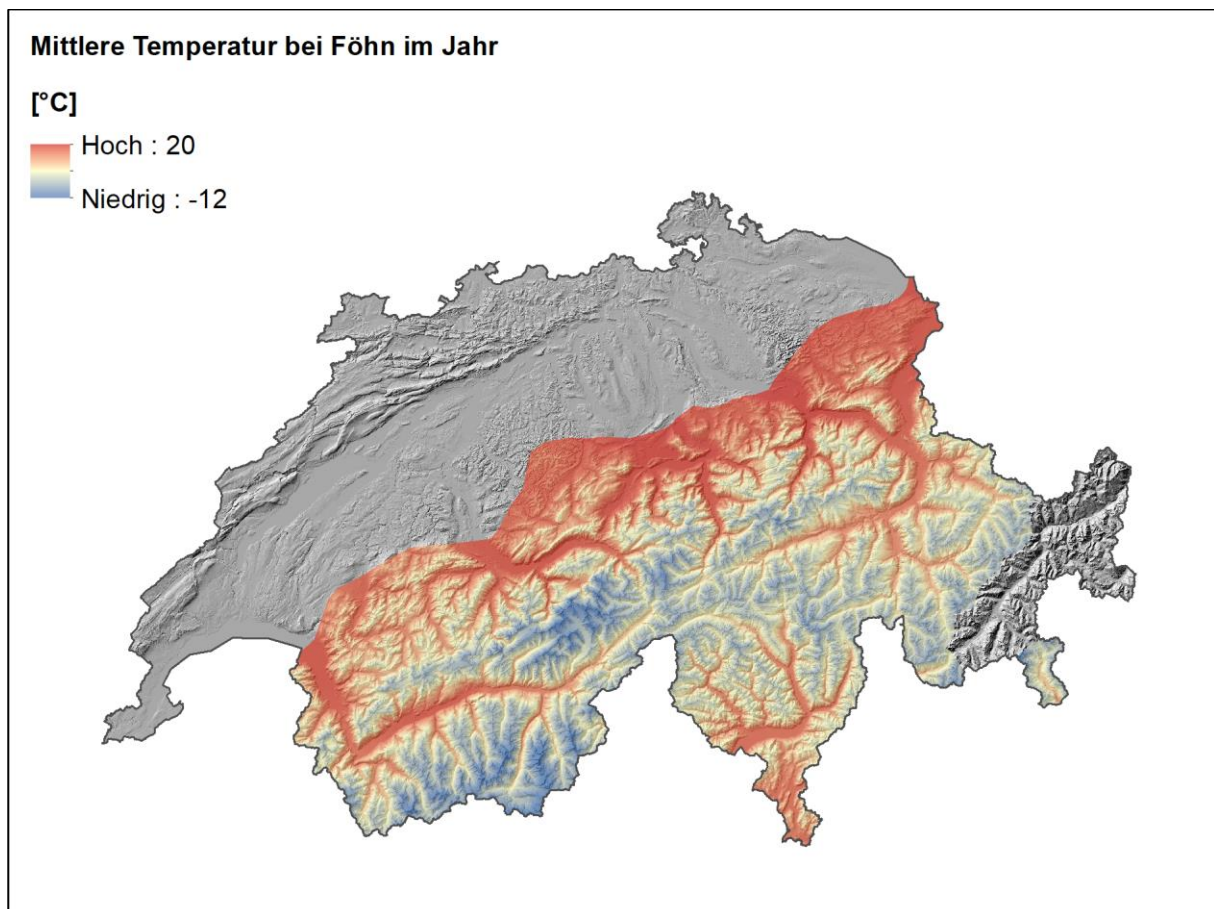


Abb. 39: Mittlere Temperatur bei Föhn im Jahr in °C.

Die Stärke des Föhnwindes ist naturgemäss diejenige Grösse, welche am meisten variiert. Es war deshalb sehr schwierig, diese Grösse flächendeckend darzustellen. Zuerst einmal kann davon ausgegangen werden, dass der Föhn im Januar und Oktober stärker bläst als im April und im Juli, was die Windgeschwindigkeiten für einige automatische Messstationen von MeteoSchweiz bestätigen. Aufgrund dieser Angaben wurden im Juli und im April die Föhnwindgeschwindigkeit gegenüber dem Oktober und Januar um 25% reduziert. In einem nächsten Schritt wurde das Gebiet des Südföhns bzw. des Nordföhns **gutachterlich** in Windgeschwindigkeitsklassen gemäss Abb. 40 unterteilt. Dabei stellt die Klasse 1 die höchste Windgeschwindigkeit bei Föhn dar, die Klasse 3 die kleinste. Tabelle 8 enthält die den in den Monaten Januar, April, Juli und Oktober sowie im Jahr den Klassen zugeordneten Windgeschwindigkeiten.

Tab. 8: Den Klassen 1 bis 3 zugeordnete Windgeschwindigkeiten [km/h] bei Süd- und Nordföhn in den Monaten Januar, April, Juli und Oktober sowie im Jahr.

	Januar	April	Juli	Oktober	Jahr
Klasse 1	40	30	30	40	40
Klasse 1.5	34	25	25	34	34
Klasse 2	25	19	19	25	25
Klasse 2.5	18	14	14	18	18
Klasse 3	10	8	8	10	10

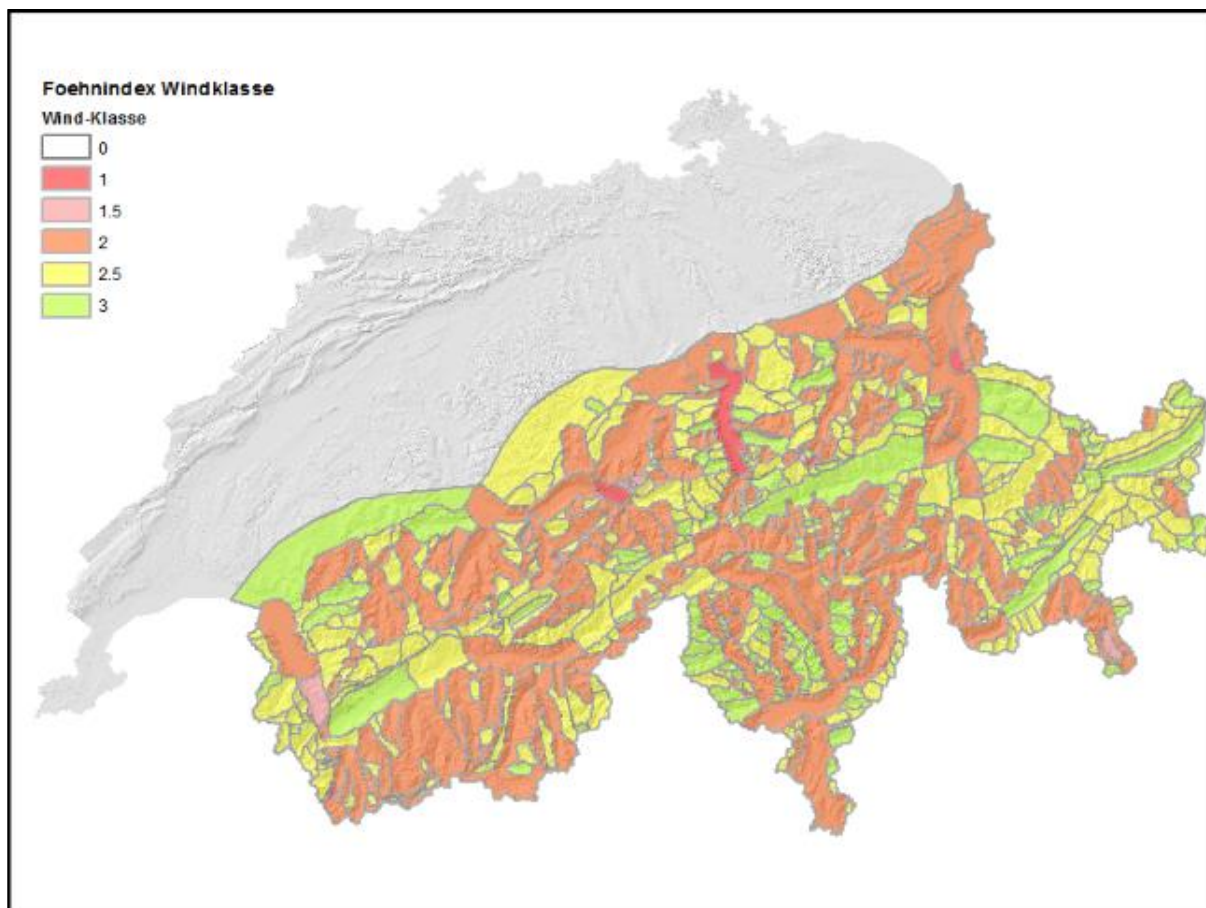


Abb. 40: Windklassen für den Südföhn und Nordföhn.

Zu den in Abb. 40 dargestellten Stärkeklassen ist zu bemerken, dass die stärkste Windklasse, nämlich die Klasse 1, nur für das untere Urner Reusstal, die Gebiete um Balzers im St. Galler Rheintal und um Meiringen im Haslital sowie beim Lauberhorn im Berner Oberland gegeben wurde. Die Klasse 1.5 wurde dem Rhonequertal zwischen Martigny und St. Maurice zugeordnet. Bei all diesen Gebieten handelt es sich um Orte, wo der Südföhn praktisch immer heftig bläst und durchschnittlich im Winter mit 40 km/h nordwärts braust. Im Falle eines Föhnsturmes sind Stundenmittel von 70-85 km/h möglich. Die übrigen Nord-Südtäler erhielten in der Regel die Stärkeklasse 2. Den Ost-West gerichteten Tälern, wie dem Vorderrheintal, dem Prätigau oder dem Rhonetal von Martigny aufwärts bis etwa Sion, wo man den Föhn als kräftigen Wind praktisch nicht kennt, wurde die Stärkeklasse 3 zugeordnet.

Ähnlich wie beim Südföhn wurde beim Nordföhn verfahren. Den Nord-Südtälern wurde in der Regel die Stärkeklasse 2 zugordnet, den geschützten West-Ost gerichteten Tälern jeweils die Stufe 3. Den übrigen Talkammern wurde die Stärkeklasse 2.5 zugewiesen. Die Stärkeklassen 1 wurden für die Gebiete mit Nordföhn nirgendwo vergeben, da die Geschwindigkeit bei Nordföhn deutlich schwächer ist als bei Südföhn und im Stundenmittel 60 km/h auch in

Extremfällen nicht überschreitet. Einzig im Puschlav kann bei stärkstem Nordföhn ein Stundenmittel von 70 km/h knapp erreicht werden. Der Talabschnitt oberhalb des Lago Poschiavo bekam denn auch den Wert 1.5 zugeordnet. In extremen Kamm- und Gipfellagen kann ein Südföhnsturm Stundenmittel von über 140 km/h erreichen, bei Nordföhn sind mehr als 100 km/h möglich. Diese Werte werden allerdings nur auf äusserst kleinen Flächen oberhalb der Waldgrenze erreicht.

Abschliessend wurden aus den bereits aufbereiteten Karten der Temperatur bei Föhn, der relativen Luftfeuchtigkeit bei Föhn und der Windstärke bei Föhn eine Karte der potenziellen Evapotranspiration bei Föhn für die Monate Januar, April, Juli und Oktober sowie fürs Jahr berechnet. Die Berechnung der potenziellen Evapotranspiration bei Föhn erfolgte nach Penman-Monteith. Da die Berechnung nach Penman-Monteith auch die Globalstrahlung beinhaltet, musste diese berücksichtigt werden. Die Bewölkung entspricht bei Südföhn in etwa dem Mittel aller Wetterlagen, so dass die aufbereitete Globalstrahlung (Kap. 2.1.8) in die Berechnung der potenziellen Evapotranspiration bei Föhn einfluss. Bei Nordföhn ist es in der Regel deutlich wolkenärmer als im Durchschnitt. In diesem Fall wäre eine Berechnung der Globalstrahlung für wolkenarme Verhältnisse angezeigt gewesen. Allerdings unterscheidet sich die Globalstrahlung bei heiteren Verhältnissen vom Mittel insofern, dass steile Nordhänge weniger Globalstrahlung erhalten, weil der diffuse Strahlungsanteil wegfällt und der direkte Strahlungsanteil klein ist, und dass steile Südhänge mehr Strahlung erhalten, weil dort der direkte Strahlungsanteil bei heiteren Verhältnissen sehr gross ist. Bei allen übrigen Expositionen und bei weniger steilen Hängen dürften diese Differenzen aber nicht gross ins Gewicht fallen.

Wie aus Abb. 41 deutlich hervorgeht, ist die Jahressumme der potenziellen Evapotranspiration bei Föhn mit bis 250 mm in der Leventina, im Bleniotal, im Misox sowie im Bergell und im Puschlav sowie auf der Simplonsüdseite am grössten. Dies sind die Gebiete, wo häufig der Nordföhn aufritt und gleichzeitig die Luftfeuchtigkeit durch die tiefen Tallagen bei Nordföhn gegenüber den umliegenden Berglagen schon tief ist, und die Temperatur gegenüber den höher gelegenen Berglagen markant erhöht ist. Geringere Luftfeuchtigkeit und höhere Temperatur erhöhen die potentielle Evapotranspiration. So haben die umliegenden Berglagen der obgenannten Täler zwar etwas häufiger Nordföhn als diese Täler selbst, jedoch eine höhere Luftfeuchtigkeit und deutlich tiefere Temperaturen bei Nordföhn, so dass die potenzielle Evapotranspiration bei Nordföhn geringer ausfällt. Die Niederungen der Alpensüdseite haben hingegen deutlich kleinere Verdunstungswerte, obschon der Nordföhn dort trockener ist als in den alpenkammnahen Südtälern. Der Grund liegt eindeutig in der deutlich geringeren Häufigkeit des Nordföhns im Mittel- und Südtessin gegenüber den oberen Alpentälern. Auch verdunstet bei Südföhn über das Jahr betrachtet deutlich weniger als bei Nordföhn, dies obwohl der Südföhn wärmer ist als der Nordföhn und beispielsweise im unteren Reusstal auch stärker bläst als der Nordföhn irgendwo. Der Grund ist infolgedessen in der deutlich grösseren Häufigkeit des Nordföhns gegenüber dem Südföhn zu suchen. Immerhin wirkt sich der Südföhn bezüglich potenzieller Evapotranspiration und dementsprechend bezüglich Trockenheit zwischen Martigny und dem Gr. St. Bernhard im Oberwallis in der Region Visp, im Oberhasli, im Urner Reusstal, sowie im Churer und St. Galler Rheintal inklusive Seeztal und Walenseeregion doch bedeutend aus. Allerdings scheint dieser Effekt nicht auszureichen, um eine Baumart vollständig zum Verschwinden zu bringen. Immerhin tritt beispielsweise die Buche im Urner Reusstal deutlich seltener auf als in föhnarmen Gebieten der Nordalpen, bei Gurnellen verschwindet sie sogar fast vollständig. Hier dürfte aber der nährstoffarme, trockene und saure Böden hervorbringende Aaregranit die Hauptrolle spielen. Hingegen ist es sehr wahrscheinlich, dass das Fehlen der Buche im Bergell, im mittleren und oberen Misox und im Calancatal auf den Nordföhn zurückzuführen ist.

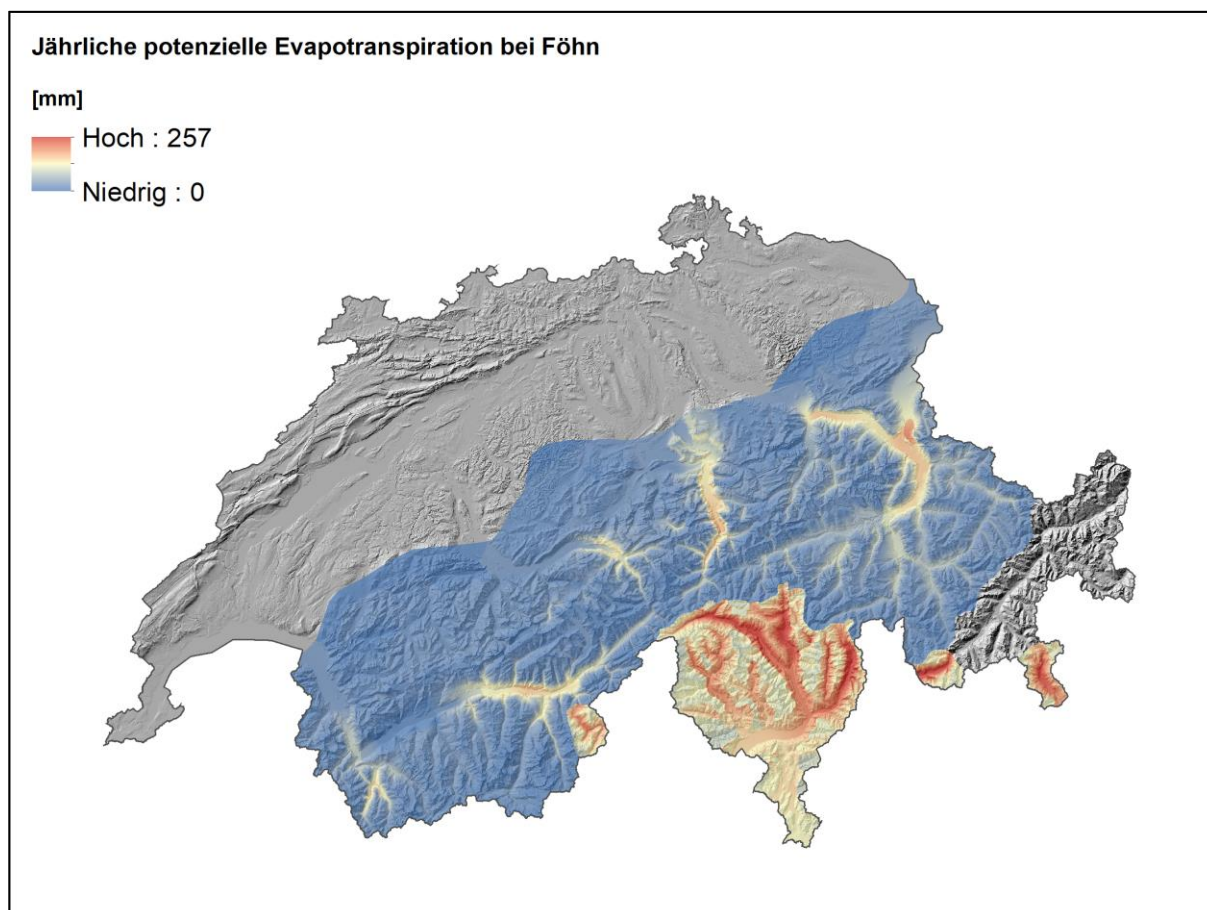


Abb. 41: Jährliche potenzielle Evapotranspiration in mm, verursacht durch den Südföhn und den Nordföhn.



## 2.2 Verwendung weiterer Standortfaktoren

### 2.2.1 Karte der Substratgruppen

Als Grundlage für die Modellierungen wurde die Karte der Lithologie im Massstab 1:500'000 verwendet, die im Atlas der Schweiz publiziert wurde ([www.atlasderschweiz.ch](http://www.atlasderschweiz.ch)). Die 55 Einheiten der Lithologie-Karte der Schweiz wurden durch Remund & Augustin (2015) für andere Zwecke in 9 Klassen eingeteilt, die in die folgenden 7 Klassen zusammengefasst wurden (Details s. Anhang 8.1):

- 1 – Sonstiges
- 2 – Kalke und Dolomite
- 3 – Flysch
- 4 – Gneise
- 5 – Granite
- 6 – Bündnerschiefer
- 7 – Peridotite und Serpentinite
- 0 – übrige Flächen

Je nach Modellierung wurden diese Klassen noch weiter zusammengefasst (siehe jeweiligen Methodenbeschrieb), um genügend Stichproben pro Klasse zu erhalten.

### 2.2.2 Trockenheitsindices ETa/ETp und Standortwasserbilanz

Für die Überlagerung der Waldstandorte mit Parametern, die eine Disposition für Trockenheit widerspiegeln, wurden die Karten aus dem Projekt «Schätzung standortspezifischer Trockenstressrisiken in Schweizer Wäldern» des BAFU/WSL Programms «Wald und Klimawandel» verwendet (ergänzte Grundlagen, Remund & Rihm 2013). Zwei Trockenheitsindizes wurden für die Schweiz von Remund & Rihm (2013) berechnet, die «Site Water Balance» (SWB) und das Verhältnis zwischen der aktuellen und potenziellen Evapotranspiration (ETa/ETp).

Im Vorprojekt zeigte sich, dass der Parameter ETa/ETp gut geeignet ist, um einige Areale der Baumartenverbreitung und der collinen Stufe zu beschreiben. Die bisherigen Karten des ETa/ETp-Verhältnisses während der Vegetationszeit, welche die regionale Verteilung der Trockenheit in der Schweiz auf einem 250 x 250 m-Raster aufzeigten, waren aber zu grobmaschig um sie in unserem Projekt mit den anderen Karten verwenden zu können. Deshalb wurden im Projekt «Erstellung von Trockenheitsindex-Karten auf Basis von verfeinerten Klimadaten – Neuberechnung der Karten des Trockenheitsindex ETa/ETp» (Remund 2016) die ETa/ETp-Verhältnisse auf der Grundlage der 25 x 25-m Klima-Informationen von Ludwig Z'graggen neu berechnet, um sie für die Berechnung der Höhenstufen und der Baumartenverbreitung verwenden zu können (s. Anhang 8.14).

**Folgende Abschnitte sind Ausschnitte aus Remund 2016.** Die verfeinerten Meteodaten von Ludwig Z'graggen wurden nur in Form von Klimakarten der Monate Januar, April, Juli, Oktober und des Jahreswerts berechnet – also nur für mittlere Zustände und nicht für Zeitreihen. Um die mittleren ETa/ETp-Verhältnisse zu berechnen, werden allerdings Zeitreihen benötigt. Deshalb wurden in einem ersten Schritt die Klimawerte der beiden Datengrundlagen der Periode 1981–2010 und der Monate Januar, April, Juli und Oktober von Z'graggen und Meteotest verglichen und die Differenzen bestimmt. Dabei werden nur die lokalen Differenzen auf dem 250 m-Raster berücksichtigt, d.h. die Raster von Z'graggen werden vorgängig von 25 m auf 250 m

Zellengrösse aggregiert. Die monatlichen Differenzen der Temperatur und Feuchte werden kartographisch dargestellt, um die regionalen Unterschiede sichtbar zu machen.

Bei den Differenzen zwischen den mittleren Karten (1981-2010) der Temperatur- und Taupunkttemperaturen (Abb. 42, Abb. 43; Anhang 8.14) zwischen den Klimatologien von Remund und Z'graggen fallen bei der Lufttemperatur vor allem die Gebiete in den Alpen und im Tessin auf. Im hochalpinen Bereich (grüne Gebiete, z.B. Berner oder Walliser Alpen) sind die Temperaturwerte von Remund höher, in vielen Tälern Graubündens, des Wallis und des Tessins diejenigen von Z'graggen. Im engeren Bereich der stärksten Kaltluftseen (Obergoms und Oberengadin) sind die Unterschiede der Januar-Temperatur relativ gering. Die grössten Unterschiede sind in den angrenzenden Gebieten zu sehen. Der wahrscheinliche Grund dafür ist, dass die Ausdehnung der Kaltluftseen bei Remund durch das 250m-Raster nicht berücksichtigt werden konnte.

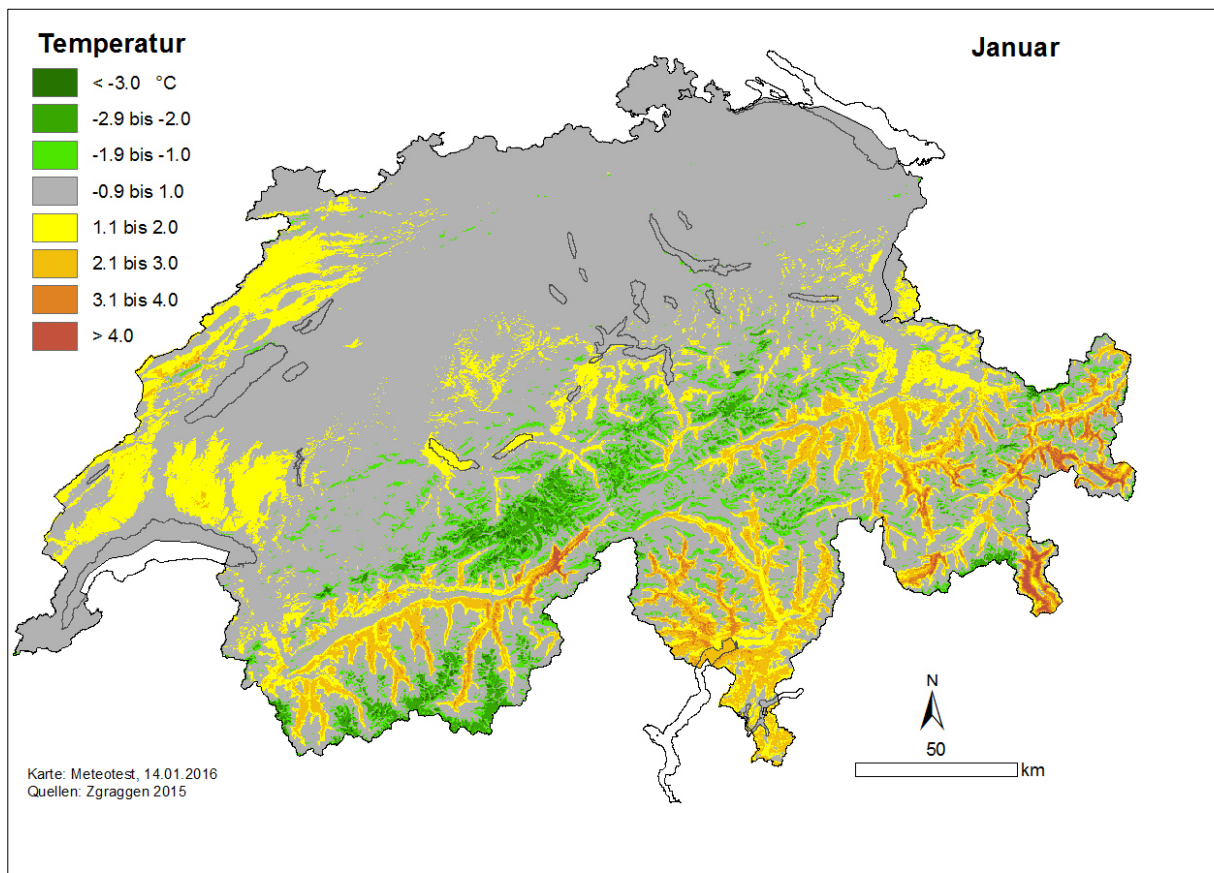


Abb. 42: Differenzkarte der Januar-Temperatur (Z'graggen-Remund). Quelle: Remund (2016).

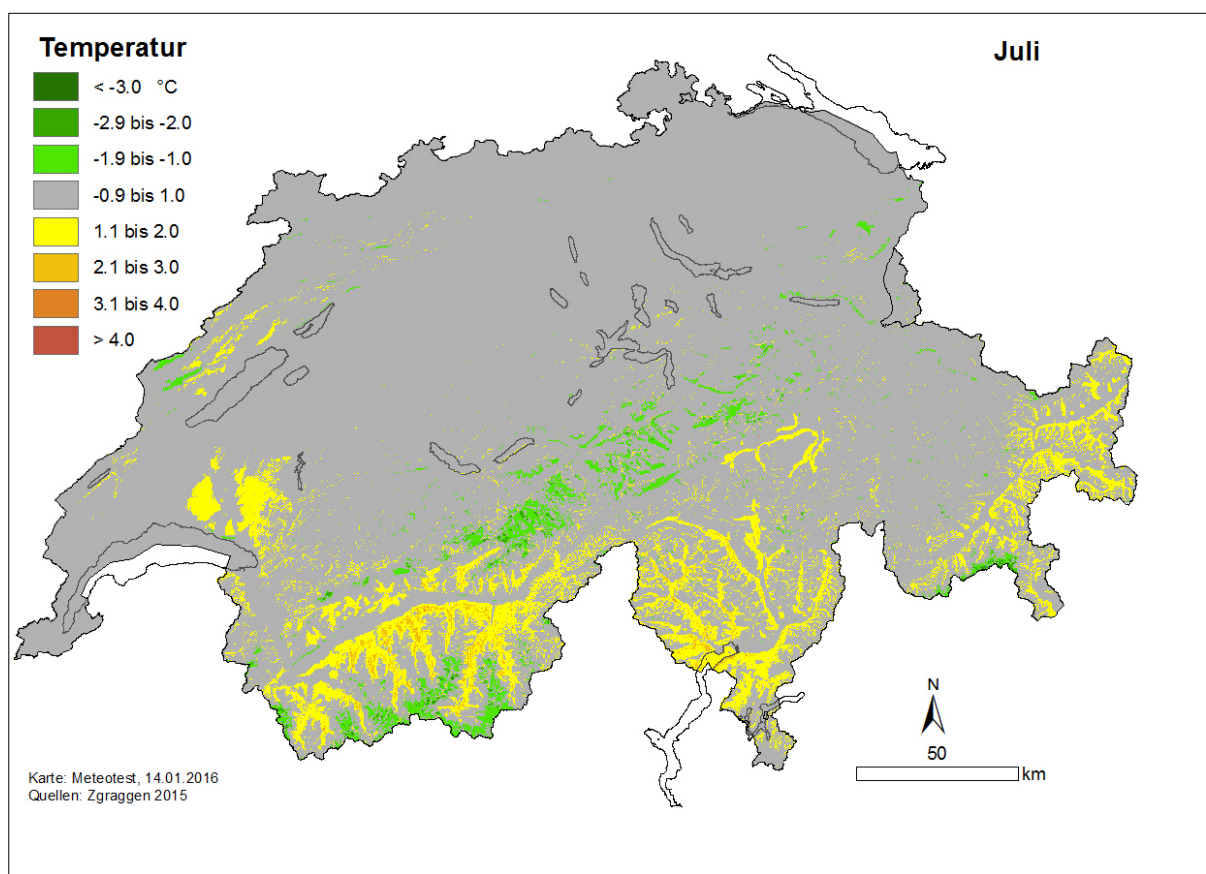


Abb. 43: Differenzkarte der Juli-Temperatur (Z'graggen-Remund). Quelle: Remund (2016).

Tab. 9 enthält die Flächenanteile unterteilt nach Grösse der Abweichungen. Im Januar sind die Abweichungen grösser als im Sommer.

Tab. 9: Flächenanteile der Abweichungen der Januar- und Juli-Temperatur bezogen auf gesamte Schweizer Fläche unterhalb 2500 m ü. M. Quelle: Remund (2016).

Klasse	Abs. Differenz	Anteil an Gesamtfläche [%] Januar	Anteil an Gesamtfläche [%] Juli
1	<math>< 1\text{ °C}</math>	64	82
2	<math>\geq 1\text{ bis }3\text{ °C}</math>	33	18
3	<math>\geq 3\text{ °C}</math>	3	0
Total	-	100	100

Die Taupunkttemperatur (Tab. 10) basierend auf Remund ist in den Berner Alpen höher, diejenige basierend auf Z'graggen ist in den westlichen Alpen und im Winter auch im Tessin höher als bei Remund. Die Unterschiede in den Alpen konnten auf Grund der verschiedenen Lage-Analysen der Interpolationsmethoden erwartet werden. Die Unterschiede im Tessin kommen wahrscheinlich durch die Berücksichtigung von unterschiedlichen Wetterstationen zustande. Tab. 10 enthält die Flächenanteile unterteilt nach Grösse der Abweichungen. Im Gegensatz zur Lufttemperatur sind die Anteile im Sommer und Winter gleich gross und entsprechen den Anteilen der Differenzen der Juli-Temperatur.

Tab. 10: Flächenanteile der Abweichungen der Januar- und Juli-Taupunkttemperatur bezogen auf gesamte Schweizer Fläche unterhalb 2500 m ü. M. Quelle: Remund (2016).

Klasse	Abs. Differenz	Anteil an Gesamtfläche [%] Januar	Anteil an Gesamtfläche [%] Juli
1	< 1°C	82	82
2	≥ 1 bis 3°C	18	18
3	≥ 3°C	0	0
Total	-	100	100

Zum Vergleich wurden beide Klimatologien zudem mit Messwerten von MeteoSchweiz (Swissmetnet) verglichen (Ergebnisse siehe Anhang 8.14). Die mittleren Abweichungen der Temperatur-Interpolationen sind relativ klein, was nicht erstaunt, da die meisten Meteo-Stationen auch für die Herstellung der Klimatologien verwendet wurden, und Temperatur-Interpolationen unabhängig von der Interpolationsmethode stets ähnliche Ergebnisse liefern (auf eine eigentliche Kreuzkorrelation wurde aus Zeitgründen verzichtet). Die Standardabweichung der Taupunkttemperatur ist bei Z'graggen etwas erhöht.

Abb. 44 zeigt die **Differenz zwischen den Mittelwerten der ETa/ETp-Verhältnisse** der Periode 1981-2010 (Sommermonate), basierend auf der Klimatologie Remund und der Klimatologie Z'graggen.

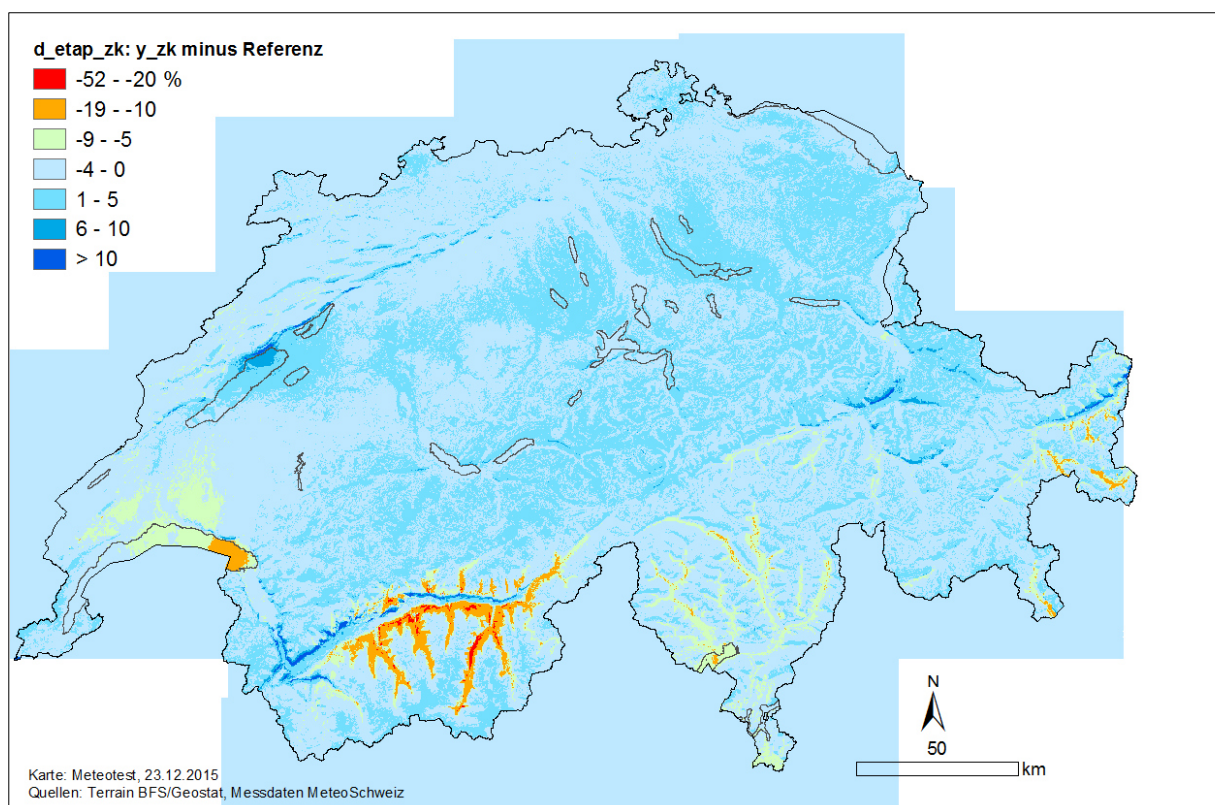


Abb. 44: Differenzkarte des ETa/ETp-Verhältnis zwischen Z'graggen und Remund. Quelle: Remund (2016).

Die Differenzen zwischen den beiden Klimatologien sind relativ gering. Einzig im Wallis treten deutliche Unterschiede auf. Während der Südhang des Haupttals mit der Klimatologie von Remund etwas trockener ist (blaue Flächen), sind die Südtäler bei Z'graggen deutlich trockener. Diese Unterschiede sind wahrscheinlich durch die unterschiedlichen Interpolationsmethoden bedingt (Erklärungen dazu in Remund 2016).



Flächenmässig sind die Gebiete mit grossen Unterschieden gering (Tab. 11). 97% der Waldflächen weisen nur kleine Unterschiede von -10 bis +10% auf. Der Anteil der Gebiete, bei denen Z'graggen trockener ist, ist grösser als derjenige, bei dem Remund trockener ist.

Tab. 11: Flächenanteile (aller Waldflächen) von drei Differenzklassen ETa/ETp. Quelle: Remund (2016).

Klasse	Differenz	Fläche [ha]	Anteil an Gesamtfläche [%]
1	< -10%	35'230	3%
2	-10 – 10%	1'123'296	97%
3	> 10%	4'113	0%
Total	-	1'162'639	100%

Zum Vergleich stellte Remund die **Differenzen zwischen Remund und Z'graggen bei den SWB-Karten** dar (Abb. 45). Die grössten Unterschiede werden ebenfalls in den Südtälern des Wallis verzeichnet. In der Westschweiz ist der Unterschied etwas akzentuierter als beim ETa/ETp-Verhältnis. In allen anderen Regionen sind die Unterschiede gering (im Bereich von -50 bis +50 mm). Die Flächen mit über 50 mm Differenzen machen weniger als 0.5% der Waldfläche aus (Tab. 12).

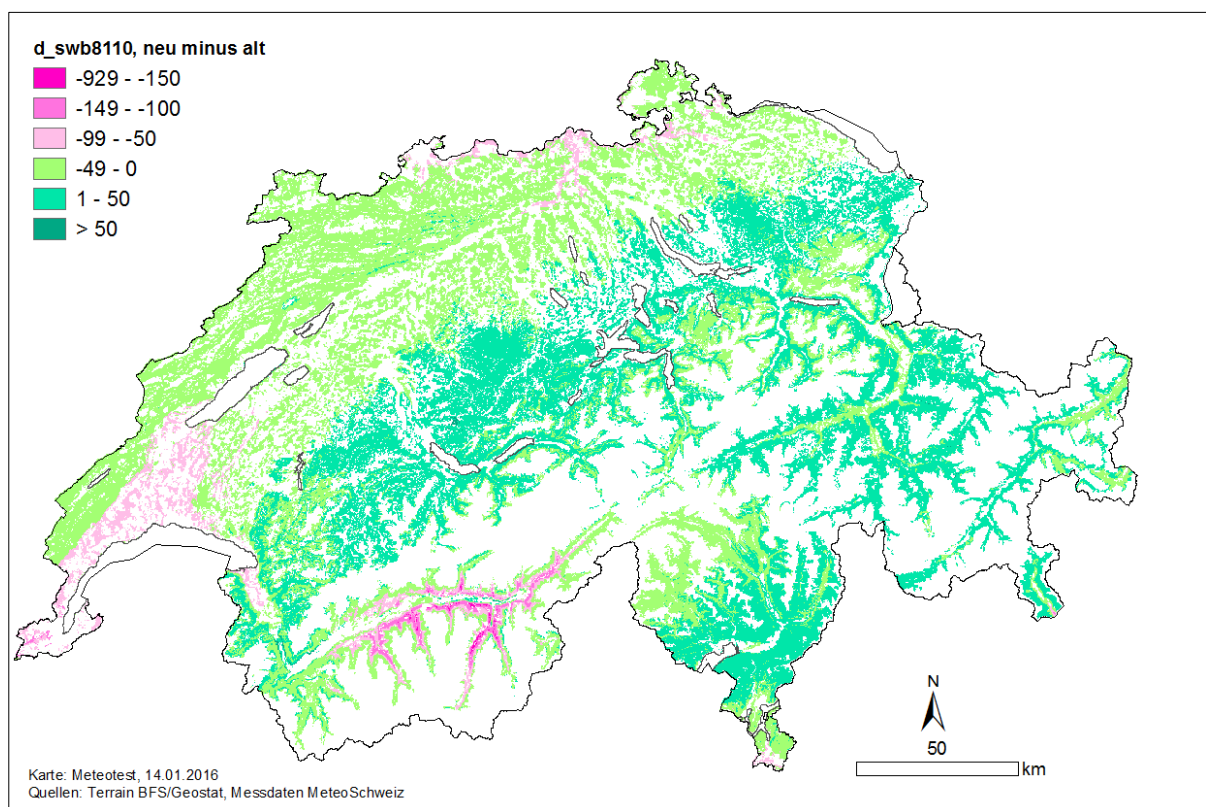


Abb. 45: Differenzkarte der SWB zwischen Z'graggen und Remund. Quelle: Remund (2016).

Tab. 12: Flächenanteile (aller Waldflächen) von drei Differenzklassen SWB. Quelle: Remund (2016).

Klasse	Differenz [mm]	Fläche [ha]	Anteil an Gesamtfläche [%]
1	< -50	62'776	6%
2	-50 – 50	1'054'701	94%
3	> 50	1'026	0%
Total	-	1'118'503	100%

Nach diesem Vergleich wurden durch Remund diese Differenzen zwischen den vier Kernmonaten der Jahreszeiten für alle Monatswerte linear interpoliert und die Zeitreihen der Meteorologischen Daten von Meteotest damit korrigiert. Auf eine Änderung der Differenzen in Abhängigkeit des Schönwetteranteils wurde vorerst verzichtet.

Von Meteotest wurden folgende Parameter neu berechnet und zur Verfügung gestellt (Kartendaten, Schweiz in 250 m Auflösung):

- Jahreswerte  $ET_a/ET_p$ , 2 Klimazukünfte: 2 Karten (Version Januar 2016)
- Jahreswerte SWB, 2 Klimazukünfte: 2 Karten (Version Januar 2016)

## 2.3 Neuberechnung der Klimakarten für die Periode 2070-2099

Die folgenden Klimaparameter wurden nach dem Delta-Change-Ansatz für zwei Klimazukünfte und die Periode 2070-2099 berechnet und in Karten dargestellt (25x25m-Raster):

- Mittlere Lufttemperatur,
- Mittlere Höchstwerte Lufttemperatur,
- Mittlere Tiefstwerte Lufttemperatur,
- Temperatur bei Föhn (analog allen übrigen Temperaturen),
- potenzielle Evapotranspiration,
- potenzielle Evapotranspiration bei Föhn.

Als Klimazukünfte sollten das Szenario A1B und die folgenden Modellläufe verwendet werden: als «trockenere» Modellierung ECHAM5/CLM (MPI), als «weniger trockene» ECHAM5/RegCM3 (ICTP) (Tab. 13).

**Tab. 13:** Die prognostizierten Klimaänderungen bei den beiden gewählten Klimamodellierungen. Anomalien der Periode 2070-2099 gegenüber 1981-2010. Die Werte der Auswahlkriterien wurden für die Alpennordseite und die Alpensüdseite für die folgenden repräsentativen Standorte berechnet: Region «Nord»: Aarau (47.38°N/8.08°E/394 m); Region «Süd»: Locarno (46.17°N/8.80°E/223 m). Bedeutung «Trockentage»: Absolute Änderung der aufeinander folgenden Tage ohne Niederschlag (Kriterium: Tagessumme Niederschlag < 0.1 mm).

	ECHAM5/CLM (MPI)		ECHAM5/RegCM3 (ICTP)	
	Nord	Süd	Nord	Süd
Temperatur [°C]	4.2	4.3	2.9	3.2
Niederschlag [%]	- 13.7%	- 26.0%	+ 4.6%	- 8.0%
Trockentage [d]	5.58	1.45	1.08	0.25

Da die Klimazukünfte auf dem Zeitraum 1981-2010 als Referenzperiode aufbauen, wurden in einem ersten Schritt die vorhandenen Temperaturkarten der Periode 1961-1990 an die Periode 1981-2010 angepasst. Dabei wurde die Differenz zwischen den jeweiligen Temperaturwerten der Normwerttabellen von MeteoSchweiz (Periode 1961-1990 und Periode 1981-2010) räumlich interpoliert. Mit Hilfe dieser räumlichen Änderung der Temperatur zwischen diesen beiden Perioden (jeweils für das Jahr und die entsprechenden Monate) wurden die ursprünglichen Karten für die Periode 1961-1990 auf die Periode 1981-2010 aufdatiert. Die Karten für die Klimaparameter ETa/ETp und SWB wurden sowohl für die aktuelle Periode als auch für die Klimazukünfte direkt von Meteotest (Aufbereitung für das Forschungsprogramm) übernommen. Die Änderungen im Niederschlag wurden ebenso von Meteotest aufbereitet. Die Modelle für die Arealgrenzen (Buche und Tanne) beziehen sich auf die thermische Kontinentalität in einer bestimmten Höhe (z.B. die Karte zur thermischen Kontinentalität auf 1000 m ü. M.). Da sich aber die Höhenlage der Arealgrenzen auch verschieben wird, wird in die Modelle für die zukünftigen Arealgrenzen die Karte der thermischen Kontinentalität auf der entsprechenden Höhenstufe benötigt. Für die Garantierung der Validität der Modelle für die zukünftigen Arealgrenzen müssen diese Kartengrundlagen für die entsprechende Höhenlage erstellt werden. Grund dafür ist, dass sich die Kontinentalität an einem bestimmten Ort bei einem Temperaturanstieg an sich nicht ändert, da ja die Tiefst- und Höchststände gleichermaßen von der Temperaturänderung erfasst werden, sich aber die Lage der Arealgrenze ändert. Bei der Anpassung der thermischen Kontinentalität wurde eine stark vereinfachte Methode angewandt, die Karten zur thermischen Kontinentalität auf einer bestimmten Höhe



wurden mit Karten der thermischen Kontinentalität auf einer um 400 m nach oben verschobenen Höhe ausgetauscht. Da sich die Höhengrenzen dieser beiden Baumarten (Buche und Tanne) bei der weniger trockenen Klimazukunft um etwa 400 m verschieben werden, wird für die Zukunft die thermische Kontinentalität in 1400 m herangezogen.

### **2.3.1 Klimaparameter, die nicht in die Zukunft modelliert werden**

Die Klimaparameter relative Luftfeuchte, Globalstrahlung, Föhnhäufigkeit und mittlere Windgeschwindigkeit wurden als konstant über die Zeit angenommen, d.h. eine mögliche Veränderung dieser Parameter wurde nicht berücksichtigt. Dies vor allem deshalb, weil nicht bekannt ist, in welcher Intensität sich diese Parameter ändern werden. Bei einigen klimatischen Grössen, wie zum Beispiel beim Wind, bei der Föhnhäufigkeit und bei der Strahlung, besteht sogar grosse Unsicherheit darüber, in welche Richtung der Wechsel allenfalls stattfinden wird. Generell kann angenommen werden, dass der Klimawandel die obgenannten Parameter eher gering beeinflusst. Wohl kann man davon ausgehen, dass sich die Temperatur um 3 bis 4°C erhöhen wird. Wenn man aber kaum eine Veränderung der einzelnen Wetterlagen erwartet, bleibt die thermische Kontinentalität, welche neben der Wetterlage von den lokalen Kaltluftseen und der geographischen Lage innerhalb der Schweiz (zum Beispiel randalpin oder inneralpin) abhängig ist, im Wesentlichen konstant. Auch die Luftfeuchtigkeit, welche zum grossen Teil von der Wetterlage und von der geografischen Lage abhängig ist, darf als ziemlich robust angesehen werden. Sie dürfte allerdings, falls die sommerliche Trockenheit zunehmen wird, besonders tagsüber etwas absinken. Solche Effekte sind aber kaum berechenbar und dürften insgesamt relativ klein sein. Ähnliches gilt für die Strahlungsverhältnisse, den Wind sowie die Föhnhäufigkeit. Diese Parameter sind von der Wetterlage bestimmt, deshalb ist in Zukunft kaum mit einer Änderung diesbezüglich zu rechnen. Immerhin kann gesagt werden, dass beispielsweise die Föhnhäufigkeit in Altdorf im Urner Reusstal seit 1864 keinen Trend erkennen lässt, obwohl sich das Klima seit den 1980er Jahren des 20. Jahrhunderts merkbar erwärmt hat (Gutermann et al. 2012).

### **2.3.2 Neuberechnung der Temperaturkarten**

Erster Schritt war die Überlagerung der Normwerttabellen von MeteoSchweiz (<http://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/vergangenheit/klimanormwerte/normwerte-pro-messgroesse.html>) der Perioden 1961-1990 und 1981-2010 und die Berechnung der Unterschiede zwischen den Perioden für die Monatsmittel Januar, April, Juli, Oktober und für das Jahresmittel der Temperatur. Die Unterschiede wurden in die Fläche im Raster 25x25 m interpoliert (Interpolationsansatz «Topo to Raster»). Der flächenhaft interpolierte Temperaturunterschied zwischen den beiden Perioden wurde zu den Temperaturkarten der Periode 1961-1990 addiert. Dies ergibt dasselbe Kartenset umgerechnet für die Periode 1981-2010. Diese letzten Karten werden als Basis für die Erstellung der Temperaturkarten für die Periode 2070-2099 verwendet. Die in den Temperaturkarten der Periode 1961-1990 berücksichtigten Kaltluftseen werden somit weiterhin berücksichtigt. Die Karten für die Temperatur bei Föhnlagen wurden nach demselben Verfahren auf die Klimazukünfte angepasst. Für die Änderung der Temperaturkarten auf die Klimazukünfte wurde der Unterschied zwischen dem Modelllauf 2070-2099 und den gemessenen Werten der Periode 1981-2010 verwendet.

### **2.3.3 Neuberechnung des mittleren ersten und letzten Frosttages im Jahr**

Die Isolinien wurden wiederum gutachterlich auf einer Karte gezeichnet und anschliessend digitalisiert. Die Karten für die Zukunft wurden mit diesen Isolinien nach analogem Vorgehen wie die Karten für die historische Periode berechnet und ebenfalls für Kaltluftseen korrigiert. Die Korrekturwerte für die Kaltluftseen bleiben für die Zukunft gleich wie für die historische Periode. Die absolut gesetzten Grenzen für das Auftreten des mittleren letzten und mittleren ersten Frosttages bleiben ebenfalls gleich in Zukunft wie für die historische Periode.

### **2.3.4 Neuberechnung der frostfreien Vegetationsdauer**

Die Dauer der frostfreien Vegetationsperiode für die Periode 2070-2099 wurde berechnet als Differenz zwischen dem mittleren ersten Frosttag im Jahr und dem mittleren letzten Frosttag im Jahr. Dazu wurden jeweils die Frostkarten für die zukünftige Periode verwendet.

### **2.3.5 Neuberechnung der Niederschlagskarten**

Die Niederschlagskarten (HADES 2001) wurden mit den von Meteotest gelieferten Niederschlagsanomalien auf die Periode 2070-2099 geändert. Die Niederschlagsanomalien wurden aus der Differenz zwischen Modelllauf der Referenzperiode und Modelllauf der jeweiligen Klimazukünfte abgeleitet.

### **2.3.6 Neuberechnung der Karten zur potenziellen Evapotranspiration**

Die erarbeiteten Karten der Evapotranspiration wurden mit den neuen Temperaturkarten auf die Periode 2070-2099 (für beide Klimazukünfte) angepasst. Dabei wurden Wind, Strahlung, Luftfeuchte und Albedo als konstant über die Zeit angenommen. Die Karten zur potenziellen Evapotranspiration bei Föhnsituationen wurden auf der Basis der neuen Temperaturkarten bei Föhnlagen angepasst.

## 2.4 Methoden der Modellierungen

Im Allgemeinen wurde wie folgt vorgegangen: Die Höhenstufen und die Arealgrenzen wurden getrennt und mit verschiedenen Ansätzen modelliert.

**Es bedurfte zahlreicher Versuche bei den Modellierungen der Höhenstufen und Areale. Nachfolgend werden nur die Endversionen vorgestellt, über die übrigen Versionen und den Verlauf wurde Protokoll geführt, und bei Interesse können diese bei den Autoren bezogen werden.**

### 2.4.1 Modellaufbau Höhenstufengrenzen

#### 2.4.1.1 Stichproben für die Modellierung der Höhenstufengrenzen

##### 2.4.1.1.1 Aufbereitung der Waldstandortskartierungen der Kantone

Sämtliche kantonalen Waldstandortskartierungen, die digitalisiert verfügbar sind, wurden im Projekt verwendet und soweit als möglich bei den Analysen mit einbezogen. Zudem wurden Höhenstufengrenzen auf der Grundlage von Begehungen und Felderfahrung eingezeichnet.

##### 2.4.1.1.2 Definition der Höhenstufen nach NaiS

Bei den NaiS-nahen Kartierungen werden die Grenzen der Höhenstufen folgendermassen charakterisiert (Definitionen aus Frehner et al. 2005/2009, neu überarbeitet, noch nicht publiziert, siehe Anhang 8.2). Die Bezeichnungen der Standortsregionen beziehen sich auf die Abb. 50:

#### **Allgemeine Bemerkungen zu den Höhenstufen**

Da die NaiS-Standortstypen auf die Anwendung im Waldbau optimiert sind, werden primär Merkmale der Baumschicht (Baumart und Struktur) verwendet, um die Höhenstufen abzugrenzen. Daneben können aber auch Arten der Kraut-, Strauch- und Mooschicht wichtige Hinweise zur Abgrenzung der Höhenstufen geben. Eine Auswahl dieser Arten ist in Frehner et al. (2009) im Kapitel 8 angegeben.

#### **Collin – submontan**

Die Buche ist submontan vital, collin nimmt ihre Vitalität stark ab, das heisst, sie kann im Mittelland, im Jura und in den Regionen 1 und 2a auf feuchten und frischen, nicht extrem sauren Standorten noch etwas beigemischt sein, in den Regionen 2b und 4 fehlt sie. Wärmeliebende Baumarten (z.B. Eiche, Kastanie) sind in der collinen Stufe vitaler und häufiger als in der submontanen Stufe.

#### **Submontan – untermontan**

Submontan dominiert die Buche nicht so stark wie untermontan, submontan sind wärmeliebende Baumarten wie Kirsche und Eiche im Bestand vorhanden.

#### **Untermontan – obermontan**

Untermontan erreicht die Buche ähnliche Oberhöhen wie Tanne und Fichte, obermontan werden Fichte und Tanne 5 – 10 m höher als Buche.

#### **Obermontan – hochmontan**

Die Buche ist obermontan in der Baumschicht vorhanden, hochmontan erscheint die Buche nicht mehr in der Baumschicht.

### **Hochmontan – subalpin**

Hochmontan entstehen auf wüchsigen Standorten geschlossene Bestände mit relativ vollholzigen Bäumen und starker Konkurrenz zwischen den Bäumen. Subalpin entstehen auch auf wüchsigen Standorten nur lückige Bestände mit abholzigen Bäumen, welche schmale, lange Kronen aufweisen, bei Fichte entstehen Rotten. Nur in ozeanischen Gebieten ist hochmontan neben der Fichte auch die Tanne im Bestand stark vertreten, subalpin ist die Tanne meistens nicht mehr konkurrenzkräftig im Vergleich zur Fichte, in den Waadtländer Alpen und in Derborence kann die Tanne auch stark vertreten sein. In den Südalpen (Region 4 und 5) ist die Tanne stellenweise auch subalpin stark vertreten (47\*, Alpenrosen-Lärchen-Tannenwald).

### **Subalpin – obersubalpin**

Subalpin dominiert die Fichte, einzelne Tannen können vor allem in den ozeanischen Gebieten beigemischt sein, in den Waadtländer Alpen und in Derborence kann die Tanne auch stark vertreten sein, ebenso in den Südalpen. Obersubalpin dominieren Arve und Lärche. Die Fichte kommt nur noch in den Südalpen vor.

### **Besonderheiten:**

#### **Übergang ozeanisch – kontinental in der Region 2a**

Die Buche weist schon in tiefen Lagen ein reduziertes Wachstum im Vergleich zur Fichte auf, deshalb reicht die obermontane Stufe weiter hinunter und die untermontane/submontane Stufe fehlt zum Teil gegen die Grenze zu Region 2b.

#### **Direkter Übergang von collin zu hochmontan in den Regionen 2b und 4**

Im unteren Bereich der hochmontanen Stufe (in GR unterhalb von ca. 1000 m ü. M.) gibt es Nadelholzbestände, die in der Pionierphase edellaubholzreich sind. Dabei handelt es sich um einen Übergangsbereich zwischen der hochmontanen und der collinen Stufe. In GR werden in diesem Bereich die Standortstypen 51C und 52T ausgeschieden.

#### **Grenze collin – hochmontan in den Regionen 2b und 4**

Collin erreichen Eichen, Linden, Kirsche, Esche Spitzahorn etc. die Oberschicht.

#### **Untermontan/obermontan in den Regionen 5a und 5b**

Da diese Höhenstufen im Gelände wegen dem starken Einfluss der Bewirtschaftung (Buchen-niederwälder) nicht unterschieden werden können, werden sie zusammengefasst.

#### **Hyperinsubrisch – collin mit Buche – untermontan/obermontan in den Regionen 5a und 5b**

Hyperinsubrisch sind die Laurophyllen stark vertreten mit autochthonen Laurophyllen (Ilex, Taxus, Hedera etc.) und exotischen Laurophyllen (Laurus, Cinnamomum, Ligustrum lucidum, Prunus laurocerasus, Trachycarpus etc.). Collin sind die autochthonen Laurophyllen (Ilex, Taxus, Hedera etc.) baumförmig vertreten. Eichen und Kastanien erreichen die Oberschicht. Die Buche kann auf feinerdereichen Böden beigemischt sein, da es nicht so trocken ist wie in der Region 4. Untermontan sind Ilex und Hedera nur noch in der Strauchschicht anzutreffen, die Buche dominiert.

#### **Bemerkungen zur submontanen Stufe**

In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts ging man davon aus, dass es in den unteren Lagen des Mittellandes eine colline Stufe gibt, in dem der Eichen-Hagebuchenwald auf den meisten Standorten dominiert. Um 1955 erkannte man, dass die Eichen und Hagebuchen durch den Mittelwaldbetrieb sehr stark gefördert worden waren und dass eigentlich die Buche auf den meisten Standorten dominiert. Deshalb wurde damals in den Regionen nördlich der Alpen die submontane Stufe eingeführt.

### 2.4.1.1.3 Variabilität der Höhenstufengrenzen

Die Variabilität der Höhenstufenobergrenze der Stichproben ist in den Tabellen 14-15 für die Nordschweiz und die Alpensüdseite aufgeführt (mittlere Höhenlage und Standardabweichung).

Tab. 14: Mittlere Höhen und Standardabweichungen der Höhenstufen in der Nordschweiz.

Höhenstufe (Obergrenze)	Anzahl Stichprobenpunkte	Mittlere Höhe ü. M.	Standardabweichung
submontan	17'792	601	123
untermontan	14'818	964	105
obermontan	17'162	1339	106
hochmontan	17'069	1618	74
subalpin	11'145	1901	91

Tab. 15: Mittlere Höhen und Standardabweichungen der Höhenstufen in den Alpensüdseite.

Höhenstufe (Obergrenze)	Anzahl Stichprobenpunkte	Mittlere Höhe ü. M.	Standardabweichung
hyperinsubrisch	3106	493	132
collin	8315	848	195
unter-/obermontan	3615	1425	123
hochmontan	5387	1632	77
subalpin	4757	1841	109

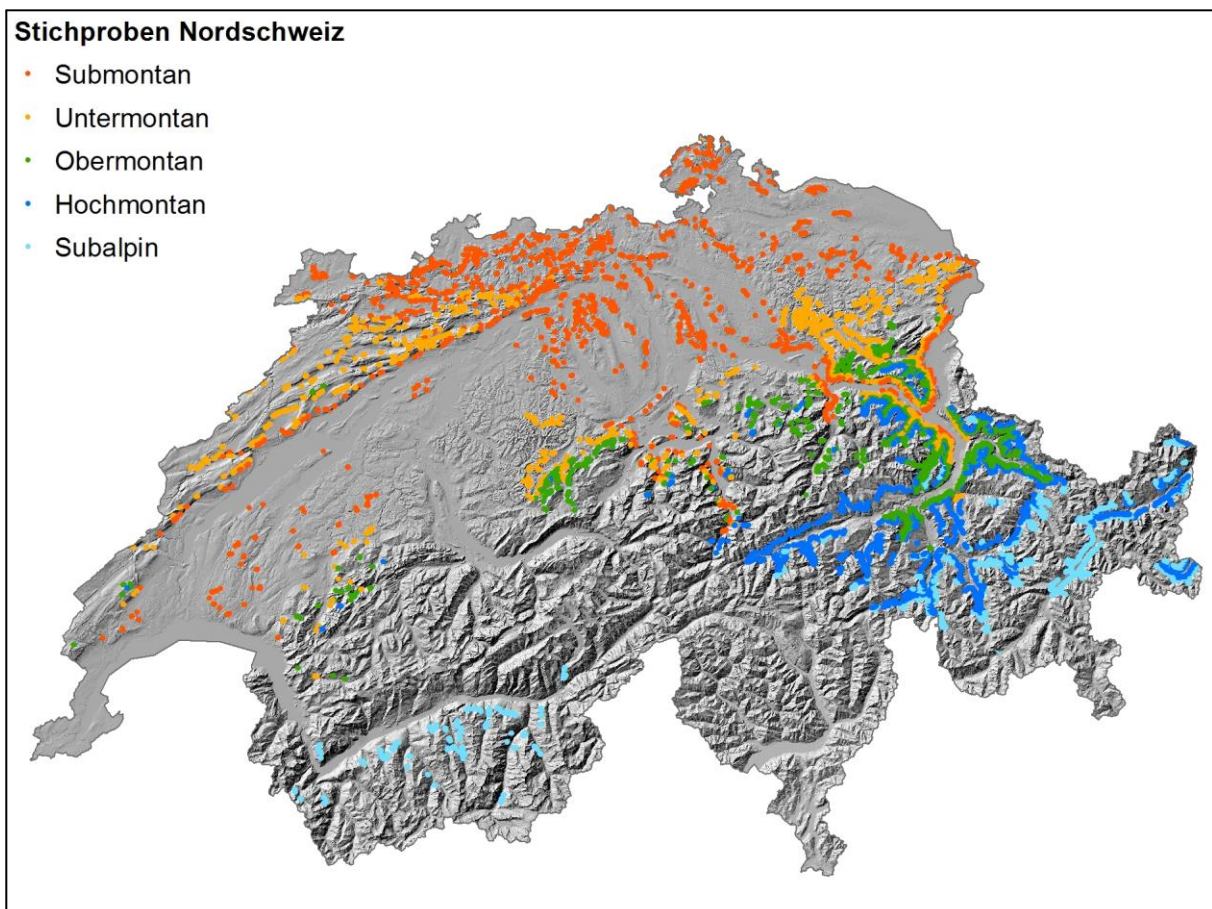


Abb. 46: Räumliche Verteilung der vorhandenen Stichproben für die Höhenstufengrenzen in der Nordschweiz.



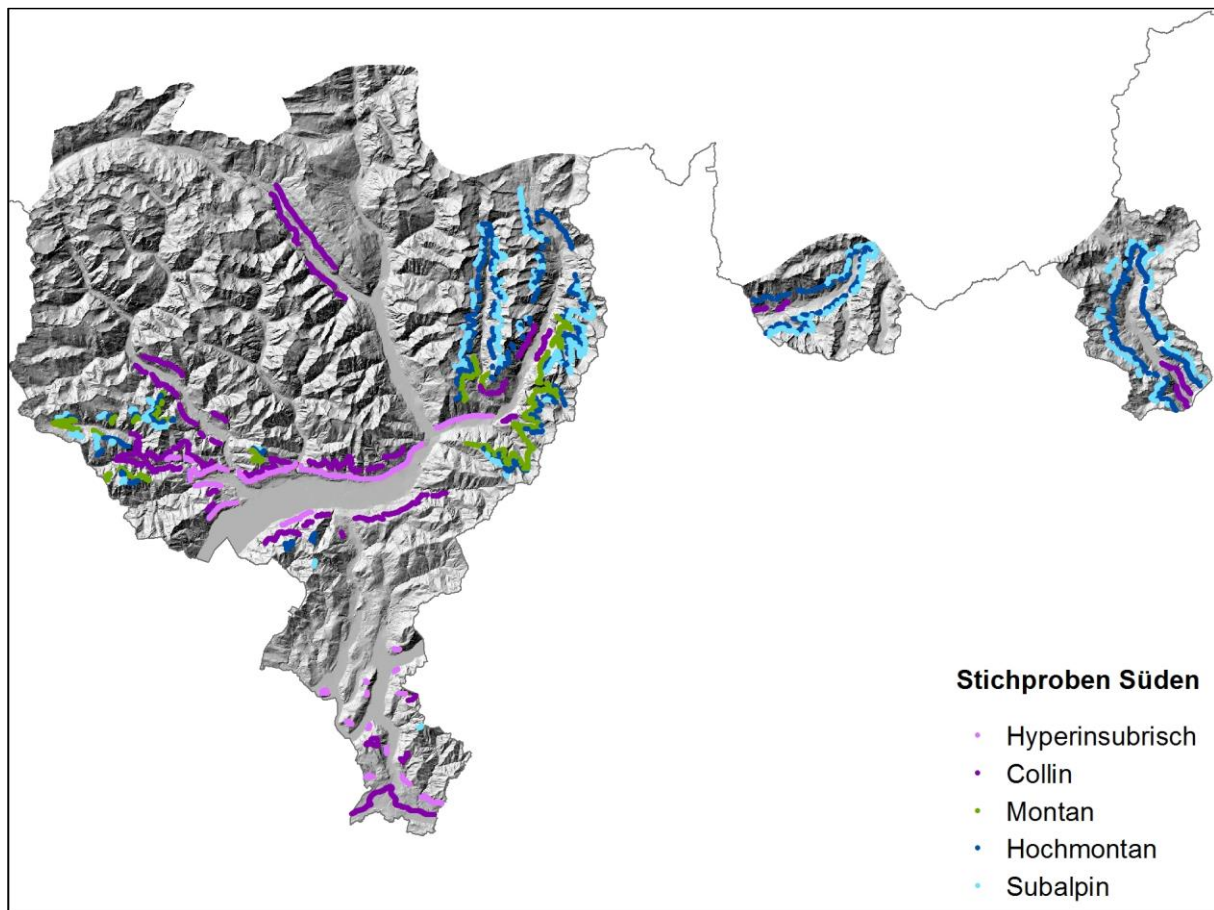


Abb. 47: Räumliche Verteilung der vorhandenen Stichproben für die Höhenstufengrenzen in den Alpensüdseite.

#### 2.4.1.1.4 Kantone/Regionen mit abweichenden Höhenstufen

**Höhenstufen Graubünden:** Die Wald-Höhenstufenkarte bildet nicht die «potenzielle Waldvegetation» ab, sondern die Baumartenzusammensetzung, die zurzeit vorhanden ist. Die Stufe «buchenfreie Laubwälder» entspricht nicht der collinen Stufe, sondern bildet eine Zusammenfassung sämtlicher Laubwaldtypen (ausser Buchen), unabhängig von der Höhenstufe (inkl. subalpiner Grünerlenbestände). In den Gebieten um Chur, im Prättigau und im Misox sind im Buchenareal keine eigentlichen Höhenstufen unterscheidbar (kein submontan, untermontan und obermontan), besser wäre es von einer «Buchenwald-Höhenstufe» zu sprechen. Im Prättigau wurde zudem die Buche stark anthropogen gefördert, dies erschwert die Kontrolle des Buchenareals und der Höhenstufen mit Buchen. Die Modellierungen für die Periode 2070-2099 beinhalten im Kanton Graubünden verschiedene Höhenstufen mit Buche (SM, UM, OM), die nicht zusammengefasst werden.

Einige Bemerkungen zu den Höhenstufen im Tessin sind in Tabelle 16 zusammengefasst (s. auch Abb. 50). In der Region 5 wurde die colline Stufe mit Hilfe des Buchenareals aufgeteilt. Innerhalb des Buchenareals entspricht die colline Stufe der Höhenstufe «collin mit Buche», diese umfasst einen grossen Anteil der collinen Stufe beim heutigen Klima. Ausserhalb des Buchenareals entspricht die colline Stufe der Höhenstufe «collin» oder in Zukunft auch der mediterranen Höhenstufe. Es wurden keine Referenzflächen gefunden, um das colline Klima vom mediterranen Klima abzugrenzen. Für die Baumartenempfehlungen (Frehner & Zürcher-Gasser 2019) wurde die colline Stufe ohne Buche der Region 5 wie folgt zugeteilt: da heute die mediterrane Stufe noch nicht vorhanden ist, wurde die colline Fläche ausserhalb des Buchenareals beim heutigen Klima der Höhenstufe «collin» zugeteilt. Beim Klima 2070 – 2099

wird erwartet, dass ein grosser Anteil der collinen Fläche ausserhalb des Buchenareals der Höhenstufe «mediterran» entspricht, deshalb wurde die ganze Fläche dieser Höhenstufe zugeteilt.

Tab. 16: Standortsregionen nach NaiS im Tessin und vorkommende Höhenstufen. 4 = Südliche Zwischenalpen, 5aFV = Südliche Randalpen mit Fichtenvorposten, 5aF = Südliche Randalpen mit Fichten.

Standortregion	Abfolge der Höhenstufen	Bemerkungen
4	collin – hochmontan – subalpin	ausserhalb Buchenareal
5aF	collin – untermontan/obermontan – hochmontan – subalpin	dort, wo Buche nicht an subalpine Stufe grenzt
5aFV	collin – untermontan/obermontan (1600 m ü. M.) – subalpin	dort, wo Buche an subalpine Stufe grenzt

#### 2.4.1.1.5 Vorgehen bei der Stichprobenerhebung

In Huber et al. (2015) wurden Höhenstufengrenzen von Stichproben aus harmonisierten Standortkarten nach NaiS berechnet. Es zeigte sich, dass eine Automatisierung des Verfahrens zwar viele Stichprobenpunkte ergäbe, diese aber z.T. wenig verlässlich sind. Deshalb wurde beschlossen, bei den kantonalen Waldstandortkartierungen repräsentative und gut belegte Höhenstufenlinien zu digitalisieren. Dies ergab zwar eine geringere Stichprobenmenge, dafür eine Verbesserung der Ergebnisse.

Die Höhenstufengrenzen wurden mit Hilfe von digitalisierten Standortkarten eingezeichnet: Gesucht wurden Höhenstufengrenzen in Hanglagen. Höhenstufengrenzen, die nur auf der Topografie beruhen, wurden nicht berücksichtigt. In Hanglagen wurden Höhenstufengrenzen eingezeichnet, falls klare Grenzlinien sichtbar waren (Abb. 48, Abb. 49). In Abb. 48 ist keine klare Grenze zwischen den obermontanen Einheiten 18a, 18b, 20 sowie den untermontanen Einheiten 8, 12, 13, 17 zu erkennen, deshalb wurde keine Höhenstufengrenze eingezeichnet.



Abb. 48: Ausschnitt aus Kartierung Niederurnen von 1992, Autorin Monika Frehner.

In Abb. 49 ist eine klare Grenze zwischen den untermontanen Einheiten 12, 12pic sowie der submontanen Einheit 9 zu erkennen, deshalb wurde eine Höhenstufengrenze eingezeichnet.



Abb. 49: Ausschnitt aus Kartierung Niederurnen von 1992, Autorin Monika Frehner.

Bei älteren Standortskarten wurden die Höhenstufengrenzen vor allem an Hand der Krautpflanzen bestimmt, weshalb es oft Teilbereiche ohne klare Grenzlinien gibt. Etwa ab 1995 wurden die Höhenstufengrenzen vermehrt auf Grund der Wüchsigkeit der Baumarten festgelegt, so wie es heute bei den NaiS-Standortstypen gemacht wird. Das führt dazu, dass bei diesen Kartierungen deutlich mehr Höhenstufengrenzen eingezeichnet wurden. Zusätzlich wurden Höhenstufengrenzen auf Grund von Begehungen oder Felderfahrung eingezeichnet. Eine Zusammenstellung, wo an Hand welcher Grundlagen Grenzen eingezeichnet wurden, findet sich in Tabelle 17. Die Höhenstufengrenzen sind im Gelände normalerweise fließende Grenzen. Zum Festlegen der Grenzen werden die obersten Stellen gesucht, die den typischen Charakter der unteren Höhenstufe aufweisen und die untersten Stellen, die den typischen Charakter der oberen Höhenstufen aufweisen, in der Mitte zwischen diesen Stellen wird die Höhenstufengrenze eingezeichnet. Normalerweise können die Höhenstufengrenzen im Gelände mit einer Genauigkeit von  $\pm 20$  Höhenmeter festgelegt werden. Die obere Waldgrenze wurde nicht eingezeichnet und auch nicht modelliert. Deshalb gibt es z.B. keine Obergrenze der ober-subalpinen Stufe.

Tab. 17: Übersicht zur Herkunft der eingezeichneten Höhenstufengrenzen. Die %-Angaben beziehen sich auf die Waldfläche des entsprechenden Kantons.

Kanton	Flächenanteil Nais-naher Kartierungen	Kartierungen mit Abweichung bei der Ansprache der Höhenstufen	Kartierung nicht direkt in Nais übersetzbar	Kartierung deutlich genereller als Nais (OW 1: 50000, NE viele Nais-Standortstypen zusammenfasst)	Höhenstufenkarte vorhanden	Höhenstufenkarte vorhanden, Verbreitung Tanne und Buche etwas geringer beurteilt als in Nais	Höhenstufen an Hand digitaler Karte eingezeichnet	Höhenstufen an Hand von Feldkenntnissen und Begehungen eingezeichnet
AG	100%						Ja, JB	
AI			100%					
AR	100%						Ja, MF	
BE		10%				100%	Jura JB	Jura JB
BL/BS	100%						Ja, JB	
FR		100%					Teils, JB	
GE	100%						keine Grenze vorhanden	
GL		100%					Teils, MF	
GR					100%		Ja, HUF	
JU	mind. 40%						Ja, JB	JB
LU		100%					Teils, MF	
NE				100%			Teils, JB	
NW		60%					Teils, MF	
OW				100%				
SG	100%						Ja, MF	
SH	100%						Ja, JB	
SO	100%						Ja, JB	
SZ	15%						Ja, MF	
TG	100%						Ja, JB	
TI	1%							GC
UR	20%						Ja, MF	LZ
VD	5%							JB
VS	2%		98%				Teils, JB	
ZG	5%						Teils, JB	
ZH		100%					Teils, JB	

Die eingezeichneten Höhenstufengrenzen wurden in eine Stichprobe für die Eichung der Modelle umgewandelt. Die Stichproben der Höhenstufengrenzen wurden für die Herleitung der Regressionsgleichung verwendet, die anschliessend für die Modellierung der Höhenstufengrenzen eingesetzt wurde. Es wurde kein Sampling der Stichprobe durchgeführt, d.h. die unterschiedliche Dichte an verfügbaren Stichproben in den Regionen wurde nicht korrigiert. Dies

kann ein gewisses Clustering und eine spezielle Gewichtung einiger Regionen zur Folge haben. Die räumliche Verteilung der Stichproben wird in den Abb. 46 und Abb. 47 dargestellt. Nach Vorliegen der ersten Modellierungsergebnisse wurden diese mit Experten (M. Frehner, J. Burnand, G. Carraro, H.-U. Frey, L. Z'graggen) diskutiert und gegebenenfalls angepasst. Beim Kanton BE wurden die Resultate mit den Angaben zu den Höhenstufen des Kantons und Expertenwissen (z.B. Brächt Wasser, Christian von Grünigen) verglichen und angepasst. Beim Kanton Graubünden wurden die Flächen mit der Höhenstufenkarte und mit Hilfe von H.-U. Frey überprüft. Im Kanton TI wurden die modellierten Höhenstufen teils im Feld durch G. Carraro überprüft und weitere Stichprobenpunkte erhoben, um eine grössere Stichprobenmenge vor allem in der hyperinsubrischen und der collinen Stufe zu erhalten.

#### **2.4.1.2 Regionalisierung der Höhenstufen**

Für die Regionalisierung der Ergebnisse (Tab. 18, Tab. 19, Tab. 20 und Tab. 24) wurden die angepassten Standortsregionen (erfolgte Änderungen siehe Huber et al. 2015 sowie Kap. 2.4.2.3.2, Kap. 2.4.2.4.2, Kap. 2.4.2.5.2) aus NaiS verwendet. Da diese Grenzen z.T. nicht entlang von natürlichen Grenzen wie Gebirgszügen oder Flussläufen verlaufen, können daraus Ungenauigkeiten bei den modellierten Höhenstufen entstehen. Bei einer allfälligen Überarbeitung der Höhenstufen aufgrund aktuellerer Klimaszenarien wäre es wichtig, dass diese Abgrenzungen der Standortsregionen überprüft und dem Gelände angepasst werden. Die folgenden Standortsregionengrenzen werden sich in der Zukunft nicht verschieben, da sie nicht klimatisch begründet sind:

- die Grenze «Jura» - «Mittelland» wurde aufgrund der Geologie festgelegt,
- die Grenze «Mittelland» - «Nördliche Randalpen» wurde so gezogen, dass im Mittelland keine subalpine Stufe vorkommt.

Es wurden jene Grenzen der Standortsregionen modelliert, bei denen ein starker Zusammenhang mit dem Klima zu erwarten ist, während die übrigen Grenzen dort belassen wurden, wo sie heute liegen. Die Grenze «Nördliche Randalpen» (1) - «Nördliche Zwischenalpen» (2) entspricht etwa der Grenze «Tannen-Hauptareal - Tannen-Nebenareal», die modelliert wurde. Ebenso wurden die Grenze «Tannen-Nebenareal - Tannen-Reliktareal» und die Grenze «Nördliche Zwischenalpen mit Buche» (2a) und «Nördliche Zwischenalpen ohne Buche» (2b) modelliert. Die Grenze «Nördliche Zwischenalpen» (2b) - «Kontinentale Hochalpen» (3) wurde so gewählt, dass in den kontinentalen Hochalpen keine colline Stufe erscheint. Die Grenze «Kontinentale Hochalpen» (3) – «Südliche Zwischenalpen» (4) ist sehr stark vom Relief abhängig und wird nicht modelliert. Die Grenze «Südliche Zwischenalpen» (4) – «Südliche Randalpen» (5) entspricht der Buchengrenze, die wir modellierten.



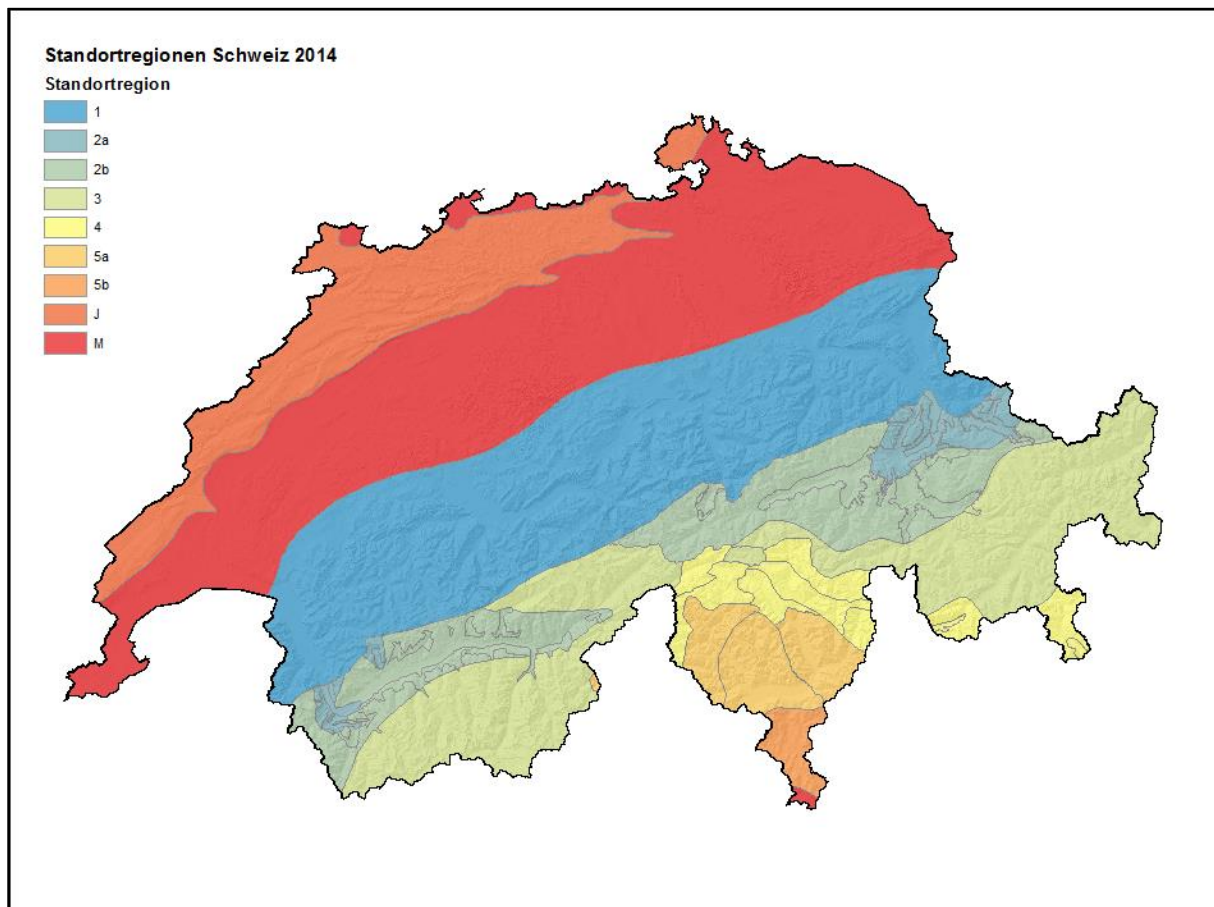


Abb. 50: Karte der angepassten NaiS-Standortsregionen. Legende: 1 = Nördliche Randalpen, 2a = Nördliche Zwischenalpen mit Buchen, 2b = Nördliche Zwischenalpen ohne Buchen, 3 = Kontinentale Hochalpen, 4 = Südliche Zwischenalpen, 5a = Südliche Randalpen mit Fichte/mit Fichtenvorposten (mittlere Fläche), 5b = Südliche Randalpen ohne Fichte, J = Jura, M = Mittelland. Anmerkung: In den Regionen 3 und 4 gibt es keine Buchenvorkommen.

Für die Regionalisierung der Modellierungen wurden im Vergleich mit der ursprünglichen NaiS-Standortskarte folgende Änderungen vorgenommen:

- zur Modell-Region Jura (J) wurden zusätzlich die kleinen Gebiete der Standortsregion Mittelland (M) an der Schweizer Grenze hinzugenommen,
- die nördlichen Randalpen (1) und die nördlichen Zwischenalpen mit Buchen (2a) wurden zusammengefasst (ansonsten 2a zu kleinräumig),
- die nördlichen Zwischenalpen ohne Buchen (2b) und die kontinentalen Hochalpen (3) wurden zusammengefasst (aufgrund fehlender Stichproben im VS),
- die südlichen Zwischenalpen (4) und Randalpen (5a/5b) wurden ebenfalls zusammengefasst (aufgrund von fehlenden Stichproben im Tessin).

Es wurden verschiedene Regionalisierungen getestet. Die Regionalisierung ist hier eine Optimierung zwischen der Stichprobenanzahl pro Höhenstufe und der Verwendung unterschiedlicher Regressionsgleichungen. Die Unterteilung in zusätzliche Regionen brachte keine Verbesserungen. In den Hochalpen kommen zum Beispiel nur die Höhenstufen hochmontan und subalpin vor. Die meisten Stichproben für diese Höhenstufen sind sowieso in den Hochalpen eingezeichnet. Wenn die Hochalpen also mit den Stichproben der gesamten Nordschweiz modelliert werden, kommt der Grossteil der verwendeten Stichproben aus dieser Region. Ein separates Modell nur für die Hochalpen würde an diesem Resultat kaum etwas ändern. Schlussendlich wurden drei regionale Modelle gerechnet: «Norden», «Jura» und «Süden». Für das

Modell «Norden» wurden die Standortsregionen M, 1, 2a, 2b und 3 verwendet. Für das Modell «Jura» wurden zusätzlich zu den Stichproben des Juras auch jene des Modells «Norden» verwendet (da im Jura zu wenig Stichproben vorhanden waren und dies zu keinen befriedigenden Ergebnissen führte), aber andere Regressionsgleichungen erstellt (z.B. ohne Verwendung des Faktors «Föhn», da dieser im Jura nicht vorkommt, in der Modellregion «Norden» hingegen schon). Und ein drittes Modell wurde für die Standortregion «Süden» erstellt. Dazu zählen die Regionen 4, 5a und 5b. Einerseits wurde dafür ein neues, separates Stichprobenset durch GC erstellt; andererseits wurden andere Höhenstufen modelliert als für die Nordschweiz. Für das Modell «Süden» wurden nur Stichproben innerhalb dieser Regionen verwendet. Es wurde ausserdem nur eine Buchenstufe (untermontan/obermontan) modelliert und nicht wie in der Nordschweiz unterschieden zwischen submontan, untermontan und obermontan. Zwischen den regionalen Modellierungen bestehen an den Grenzen z.T. «holprige» Übergänge aufgrund der unterschiedlichen Regressionsgleichungen, diese wurden nicht harmonisiert.

#### **2.4.1.3 Auswahl der Modelle zur Regionalisierung der Höhenstufe**

Eine wichtige Anforderung bei der Auswahl der Modelle zur Beschreibung der Lage der Höhenstufengrenzen war, dass das gewählte Modell eine robuste Vorhersage der Lage in einem zukünftigen Klima erlaubt. Die Temperatur und der Niederschlag aus den Klimamodellen sollten deshalb in den Formeln berücksichtigt werden können. Das bedeutet aber, dass lokalklimatische und kleinräumige geologische Besonderheiten nur bedingt berücksichtigt werden können. Das Modell zur Lageberechnung der Obergrenzen der Höhenstufen ist deshalb bewusst einfach gehalten. Im Wesentlichen berücksichtigen die Modelle zur Berechnung der Höhenstufengrenzen die folgenden Parameter: Jahresmittel der Temperatur, mittlere Höchststände der Temperatur im Jahr, mittlere Höchststände der Temperatur im Juli, Niederschlag April-August oder Niederschlag Juni-August, thermische Kontinentalität im Jahr oder im April auf verschiedenen Höhenlagen, Föhnhäufigkeit im Jahr, ETa/ETp und Globalstrahlung (im April oder im Jahr). Für jede Höhenstufe wurden andere Parameter verwendet. Die Auswahl wurde aufgrund der Erkenntnisse aus Huber et al. (2015) getroffen.

#### **2.4.1.4 Räumliche Auflösung der Grundlagendaten und angestrebte Genauigkeit in der Lokalisierung der Höhengrenzen**

Die räumliche Auflösung des Höhenmodells beträgt 25 m, die Genauigkeit der Temperaturkarten entspricht 0.1 - 0.3°C. Das entspricht bei einem mittleren Höhengradienten der Lufttemperatur von 0.7°C/100 m etwa 30 - 40 m. Die räumliche Auflösung der lithologischen Karte und der ETa/ETp-Karte liegt bei 250 m.

Die angestrebte Genauigkeit in der Lokalisierung der Höhengrenzen liegt bei +/- 50 - 100 m im Mittel über eine grössere Fläche (Region). Die Modelle sind auf die Abbildung von Standorten mit mittleren Standortseigenschaften ausgerichtet. Für extreme Standorte und lokale Besonderheiten geben sie die Lage der Höhenstufengrenze wahrscheinlich nur mit grösseren Unsicherheiten an.

#### **2.4.1.5 Vorgehen bei der Modellerstellung der Vegetationshöhenstufengrenzen**

Grundlage für die Modellierung der Höhenstufengrenzen bildeten die digitalisierten Höhenstufengrenzen, welche als Stichprobe dienen. Für jeden Punkt der Stichprobe wurden die Werte aller verwendeten Klimaparameter extrahiert (Abb. 51). Dabei ist wichtig, dass

möglichst unabhängige Klimaparameter genommen werden, um Scheinkorrelationen zu vermeiden.

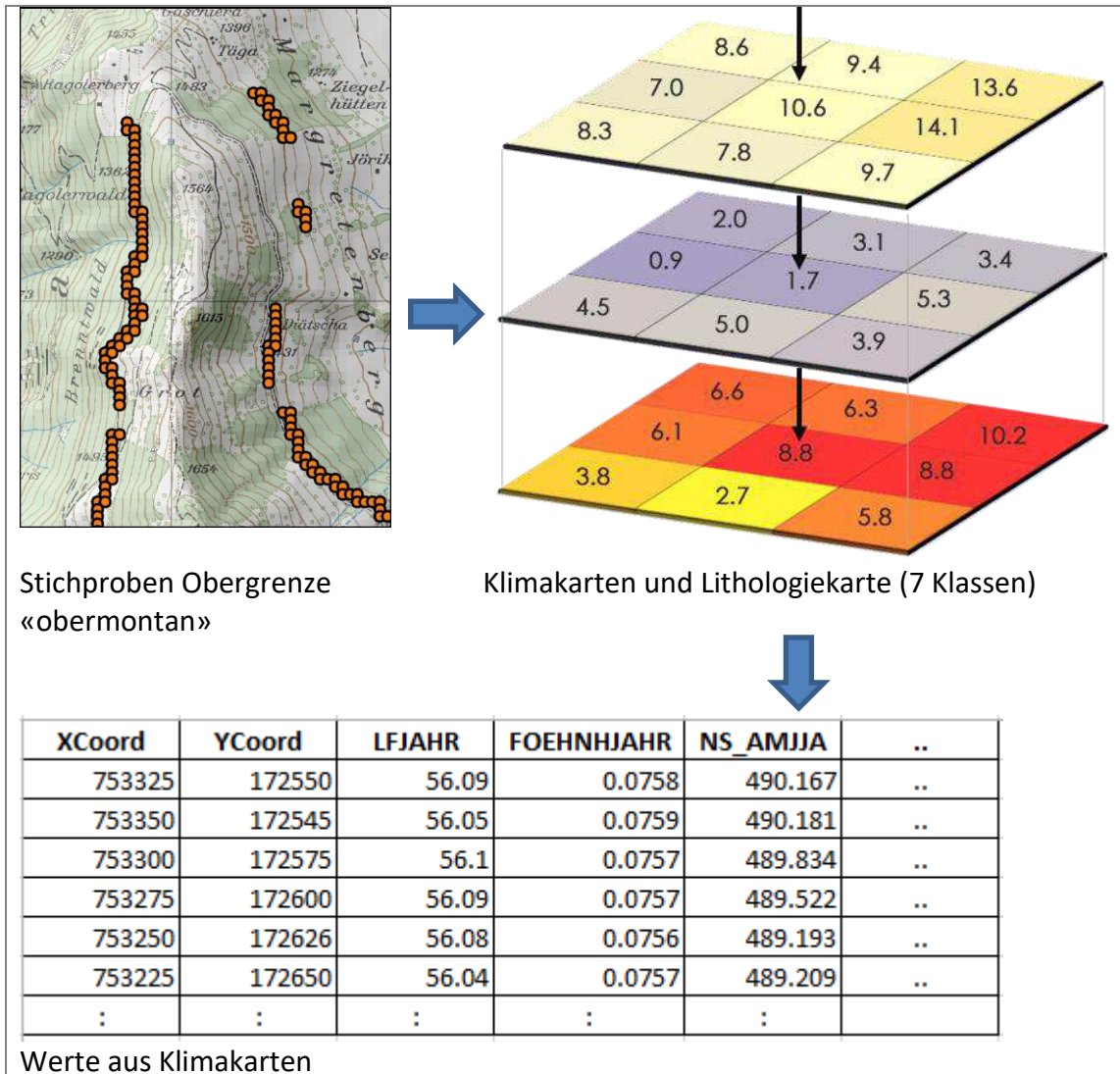


Abb. 51: Schematische Abbildung zum Vorgehen bei der Höhenstufenmodellierung.

Danach wurde ein lineares Regressionsmodell auf Basis dieser Stichprobe erstellt, welches für jede Lithologiekategorie die Temperatur an der Obergrenze einer Höhenstufe aus den verwendeten Klimaparameter berechnen kann. Pro Pixel liefert die Regressionsgleichung eine berechnete Temperatur, welche danach mit dem realen Temperaturwert aus der Temperaturkarte verglichen wird. Solange die reale Temperatur eines bestimmten Pixels grösser ist als dessen berechnete Temperatur, gehört das entsprechende Pixel zur Höhenstufe unterhalb der jeweiligen Obergrenze. Wenn die reale Temperatur eines bestimmten Pixels kleiner ist als dessen berechneter Temperatur, befindet sich das Pixel oberhalb der entsprechenden Höhenstufengrenze.

Auf diese Weise können die Höhenstufen flächig modelliert werden. Die untere Grenze einer Höhenstufe wird definiert durch die Modellierung der darunterliegenden Höhenstufe. Die hochmontane Stufe zum Beispiel wird nach unten begrenzt durch die Modellierung der obermontanen Stufe (wo eine solche vorkommt).

Für die Berechnung der Höhenlagen für die beiden Klimazukünfte (RegCM3 und CLM) wurden dieselben Regressionsgleichungen mit den zukünftigen Klimaparameter angewendet.

Die Einheiten der Lithologie-Karte der Schweiz ([www.atlasderschweiz.ch](http://www.atlasderschweiz.ch)) wurden in 7 Klassen eingeteilt (für Details siehe Anhang 8.1). Für die Modelle der Höhenstufengrenzen wurden diese 7 Klassen übernommen oder unterschiedlich zusammengefasst. Seen und Gletscher wurden in eine separate Gruppe (übrige Flächen) eingeteilt und grundsätzlich bei der Modellierung ausgeschlossen.

Die obere Grenze der collinen Stufe konnte in der Nordschweiz (inkl. Jura) mit diesem Ansatz nicht zufriedenstellend modelliert werden. Für diese Höhenstufe wurde deshalb das Verbreitungsareal mit einer anderen Methode modelliert (s. Kap. 2.4.2.6). Für den Süden wurden sowohl die colline wie auch eine hyperinsubrische Stufe mit Regressionsgleichungen modelliert. Die verwendeten Regressionsgleichungen werden in den Tabellen 18-20 aufgeführt. Da die Koeffizienten der Regressionsgleichungen für jede Lithologiekategorie unterschiedlich sind, werden sie hier nicht dargestellt. Für einige Klassen gibt es nur eine sehr geringe Anzahl von Stichproben. Deshalb wurde bei einigen Höhenstufen für die betroffenen Klassen das Modell einer anderen Klasse angewendet. Die Spalte «Regressionsgleichungen» in den Tabellen 18-20 zeigt die verwendeten Regressionsgleichungen pro Modell und Höhenstufe auf. Der erste Parameter ist jeweils die modellierte Temperatur (z.B. TJAHRMAX), nach dem Zeichen «~» werden alle Parameter aufgeführt, die zum Modellieren der entsprechenden Temperatur verwendet wurden. In der Spalte «Angaben zu Lithologieklassen» wird aufgeführt, welche Lithologieklassen jeweils zusammengefasst wurden.

Tab. 18: Modelle Nordschweiz: Verwendete Klimaparameter und Lithologieklassen für die Höhenstufenmodellierung.

Höhenstufe	Regressionsgleichungen	Angaben zu Lithologieklassen
submontan	$TJHRMAX \sim NS\_JJA + KONTJAHR1000 + I(ETAP8110Y^2) + I(GLOBRADJAHR^3)$	1, 4, 5, 6, 7 → Klasse 1 2 und 3 einzeln
untermontan	$TJAHRMEAN \sim NS\_AMJJA + KONTAPR1400 + ETAP8110Y + FOEHNHJAHR + I(APRGLOBRAD^3)$	1, 4, 5, 6, 7 → Klasse 1 2 und 3 einzeln
obermontan	$TJAHRMEAN \sim NS\_AMJJA + KONTAPR1400 + ETAP8110Y + FOEHNHJAHR + I(APRGLOBRAD^3)$	1, 4, 5, 6, 7 → Klasse 1 2 und 3 einzeln
hochmontan	$TJAHRMEAN \sim NS\_AMJJA + KONTAPR1400 + FOEHNHJAHR + I(APRGLOBRAD^3)$	4, 5, 7 → Klasse 4 restliche Klassen einzeln
subalpin	$TJULMAX \sim NS\_AMJJA + KONTJAHR2000 + FOEHNHJAHR + I(APRGLOBRAD^2)$	4, 5, 7 → Klasse 4 restliche Klassen einzeln

Tab. 19: Modelle Jura: Verwendete Klimaparameter und Lithologieklassen für die Höhenstufenmodellierung.

Höhenstufe	Regressionsgleichungen	Angaben zu Lithologieklassen
submontan	$TJHRMAX \sim NS\_JJA + KONTJ1000 + I(ETAP8110Y^2) + I(GLOBRADJAHR^2)$	1, 4, 5, 6, 7 → Klasse 1 2 und 3 einzeln
untermontan	$TJHRMAX \sim NS\_JJA + KONTJ1000 + I(ETAP8110Y^2) + I(GLOBRADJAHR^2)$	1, 4, 5, 6, 7 → Klasse 1 2 und 3 einzeln
obermontan	$TJHRMAX \sim NS\_AMJJA + KONTJ1000 + I(ETAP8110Y^2) + I(GLOBRADJAHR^2)$	1, 4, 5, 6, 7 → Klasse 1 2 und 3 einzeln

Tab. 20: Modelle Alpensüdseite: Verwendete Klimaparameter und Lithologieklassen für die Höhenstufenmodellierung.

Höhenstufe	Regressionsgleichungen	Angaben zu Lithologieklassen
hyperinsubrisch	$TABSMIN \sim ETAP8110Y + JANGLOBRADW$	nur 1 Klasse
insubrisch/collin	$TJANMAX \sim ETAP8110Y + JANGLOBRADW$	2, 3, 4, 5, 6, 7 → Klasse 4 1 einzeln
montan	$TJAHRMEAN \sim KONTAPR1000 + I(APRGLOBRAD^3)$	nur 1 Klasse
hochmontan	$TJAHRMEAN \sim KONTAPR1000 + I(APRGLOBRAD^3)$	4, 5, 7 → Klasse 1 1, 2, 3, 6 → Klasse 2
subalpin	$TJULMAX \sim KONTJAHR2000 + I(APRGLOBRAD^3)$	4, 5, 7 → Klasse 1 1, 2, 3, 6 → Klasse 2



Tab. 21: Übersicht über die verwendeten Klimaparameter für die Höhenstufenmodellierung Nordschweiz. Die grossen, dicken Kreuze kennzeichnen jene Parameter, die sich gemäss Berechnungen und Expertenprüfung (Huber et al. 2015) als besonders entscheidend erwiesen für die Begrenzung der Höhenstufengrenzen.

Nordschweiz	Subalpin	Hochmontan	Obermontan	Untermontan	Submontan
Niederschlag Juni-August					x
Niederschlag April-August	x	x	x	x	
Kontinentalität Jahr auf 1000 m					x
Kontinentalität April auf 1400 m		<b>X</b>	x	x	
Kontinentalität Jahr auf 2000 m	<b>X</b>				
Föhnhäufigkeit im Jahr	x	x	<b>X</b>	<b>X</b>	
Globalstrahlung Jahr					<b>X</b>
Globalstrahlung April	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	
ETa/ETp			x	<b>X</b>	<b>X</b>

Tab. 22: Übersicht über die verwendeten Klimaparameter für die Höhenstufenmodellierung Jura. Die grossen, dicken Kreuze kennzeichnen jene Parameter, die sich gemäss Berechnungen und Expertenprüfung (Huber et al. 2015) als besonders entscheidend erwiesen für die Begrenzung der Höhenstufengrenzen.

Jura	Subalpin	Hochmontan	Obermontan	Untermontan	Submontan
Niederschlag April-August			x		
Niederschlag Juni-August				x	x
Kontinentalität Jahr auf 1000 m			x	x	x
Globalstrahlung Jahr			<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
ETa/ETp			<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>

Tab. 23: Übersicht über die verwendeten Klimaparameter für die Höhenstufenmodellierung Südschweiz. Die grossen, dicken Kreuze kennzeichnen jene Parameter, die sich gemäss Berechnungen und Expertenprüfung (Huber et al. 2015) als besonders entscheidend erwiesen für die Begrenzung der Höhenstufengrenzen.

Südschweiz	Subalpin	Hochmontan	Montan	Collin	Hyperinsubrisch
Kontinentalität Jahr auf 2000 m	<b>X</b>				
Kontinentalität April auf 1000 m		<b>X</b>	<b>X</b>		
Globalstrahlung April	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>		
Globalstrahlung Januar				<b>X</b>	<b>X</b>
ETa/ETp				<b>X</b>	<b>X</b>

Die absolute Minimum-Temperatur im Jahr bildet die hyperinsubrische Stufe gut ab (nach G. Carraro liegt die Grenze bei ca.  $-14^{\circ}\text{C}$ ). Für die hyperinsubrische Stufe (v.a. im Sotto Ceneri und bei Bellinzona) sind sowohl wintermilde Tage als auch Tage mit Frost typisch, sowie nicht zu ausgeprägte Trockenheit im Sommerhalbjahr (Niederschlag  $> 1000$  mm). Eine hohe Einstrahlung im Winter fördert zudem die Laurophyllen, die auch im Winter assimilieren (Walther 2001).

#### 2.4.1.6 Obere Waldgrenze

Die Obergrenze der obersubalpinen Stufe, respektive die obere Waldgrenze wurde sowohl bei Huber et al. (2015) als auch im aktuellen Projekt nicht untersucht. Um die Modellierungen nach oben einzugrenzen wurde sie sehr grob modelliert.

Die obere Waldgrenze stellt eine Grenze des Wärmemangels dar (Lang 1994, Körner 1999, zit. in Klötzli et al. 2010). Vor allem die nachmittägliche Einstrahlung und Wärme ist entscheidend für das Baumwachstum. Deshalb wurde die heutige Waldgrenze mit dem GIS-Layer «Mittlere Maximale Temperatur im Juli» (tjulmax) mit dem Grenzwert von 12°C «modelliert». Der Grenzwert entspricht in etwa dem Wert an der oberen Waldgrenze im Vispertal (VS) und passt auch in der übrigen Schweiz relativ gut, ausser bei einzelnstehenden Berggipfeln wegen dem Gipfelphänomen. Bei einzelnstehenden Gipfeln werden höhere Windgeschwindigkeiten gemessen und sie weisen eine nicht so starke Erwärmung an den Hängen auf, was die obere Waldgrenze senkt. Einzig bei Grindelwald, bei Guttannen, im Albulatal, bei Davos und im Puschlav ist die aktuelle obere Waldgrenze höher als die 12° Linie. Für die Modellierung der zukünftigen Höhenstufen wurde der Grenzwert um 1°C gegen oben verschoben. Dies, um sicherzustellen, dass in den Modellen der Zukunft bei jedem Punkt, an dem es heute Wald hat, eine Höhenstufe angegeben ist.

#### **2.4.2 Modellaufbau Arealgrenzen von Buchen- und Tannenareal**

Die heutigen Arealgrenzen wie z.B. die Tannenareale (Haupt-, Neben- und Reliktareal) und das Buchenareal sind bekannt (NaiS-Karte) bzw. wurden bei Huber et al. (2015) in höherer räumlicher Auflösung neu festgelegt (Details dazu inkl. Definitionen zu Arealen und vorgenommenen Regionalisierungen siehe Kap. 3.4 bis 3.6. Im Resultateteil werden die Modellierungen jeweils mit den durch das Projektteam korrigierten Arealgrenzen verglichen). Ziel dieses Arbeitsschrittes war es, die Arealgrenzen mithilfe der erarbeiteten Klimakarten quantitativ zu erklären und diese Erklärungen als Grundlagen für eine Abschätzung der möglichen Verschiebungen dieser Arealgrenzen durch den Klimawandel zu verwenden. In Huber et al. (2015) wurde aufgezeigt, dass die Buchenarealgrenze, die Tannen-Hauptarealgrenze und die Grenzen des Flaumeichenareals und der collinen Höhenstufe von vielen Faktoren abhängig sind, deren Bedeutung regional sehr unterschiedlich ist. Dies bedeutet, dass bei einem überregionalen Modell die Faktorenkombination ein grösseres Gewicht als die einzelnen Faktoren selbst haben muss. Zudem sind die Arealgrenzen in der Karte zwar als Linie gezeichnet, in der Natur sind aber die Übergänge zwischen den Arealgrenzen eher fließend. Ein weiteres Problem der Erklärung der Arealgrenzen von Standortsregionen ist die Unterscheidung zwischen Faktoren, die sich aus Höhengradienten ergeben und Faktoren, die eine regionale Differenzierung darstellen (horizontale Gradienten). Die Modellierung der Arealgrenzen beinhaltet im engeren Sinne nur Letzteres, nämlich die horizontalen Gradienten. Diese werden mittels Karten dargestellt, die die regionale Änderung des jeweiligen Klimaparameters auf einer bestimmten Höhe darstellen, ohne Berücksichtigung der Höhengradienten.

Für die Modellierung von unscharfen Übergängen an den Arealgrenzen und die Berücksichtigung der Bedeutung von Faktorenkombinationen eignet sich die Theorie der unscharfen Mengen (Fuzzy logic, Zadeh 1978). Diese stellt eine Erweiterung der binären Logik dar, indem die möglichen Wahrheitswerte «wahr» und «falsch» (bzw. 0 oder 1) um Zwischenzustände ergänzt werden. Das bedeutet, dass ein Punkt im Raum (gegeben durch x,y,z-Koordinate) bspw. zu einem gewissen Grad dem Tannen-Hauptareal und zu einem gewissen Grad dem Tannen-Nebenareal zugeordnet werden kann und nicht nur zu einem der beiden Areale. Diese Zuordnung zur Menge der Punkte mit bzw. ohne einer bestimmten Baumart kann mit Zugehörigkeitsfunktionen abgebildet werden. Die Form der Zugehörigkeitsfunktion wird durch die Analyse von Stichproben abgeleitet. Da Computer immer in «scharfen» (binären) Zahlen rechnen, muss bei Verwendung der Fuzzy logic eine Transformation der Daten erfolgen. Diese Transformation nennt man «Fuzzifikation der Eingangsgrössen». Mit den transformierten Werten können anschliessend Berechnungen mit unscharfen Mengen und Zahlen erfolgen. Der Vorteil

dieser Methode besteht darin, dass auch (unscharf formuliertes) Expertenwissen in Form von Zugehörigkeitsfunktionen und Regeln zur Datenverarbeitung in die Modelle eingebaut und quantitativ verarbeitet werden kann. Die Überlagerung der einzelnen fuzzifizierten Eingangsgrößen erfolgt durch ein Regelwerk. Für diese sogenannten «Fuzzy Overlay» Funktionen gibt es mehrere Wege, die entweder einzelnen Parametern oder der Kombination von Parametern mehr Gewicht verleihen. Für die Tanne und die Buche wurde jeweils die Overlay-Methode «Gamma» (Wert 0.9) verwendet (<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-fuzzy-overlay-works.htm>). Bei dieser Methode wird der Wert für jeden Pixel mit folgender Gleichung berechnet:

$$\text{fuzzyvalue} = (\text{fuzzySUM})^{0.9} * (\text{fuzzyPRODUCT})^{0.1}$$

mit:

$$\text{FuzzySUM} = 1 - (1 - \text{arg1}, \dots, 1 - \text{argN})$$

$$\text{FuzzyPRODUCT} = \text{arg1} * \dots * \text{argN}$$

Für die colline Stufe wurde die Methode «AND» verwendet. Der Überlagerungstyp «Fuzzy-Und» gibt den kleinsten Wert der Mengen zurück, zu denen die Zellenposition gehört. Dies bedeutet, jedes Pixel erhält den Wert des am wenigsten geeigneten Klimaparameters.

Für «Fuzzy-Und» wird die folgende Funktion zur Auswertung verwendet:

$$\text{fuzzyAndValue} = \min(\text{arg1}, \dots, \text{argn})$$

Ergebnis dieser Überlagerungsfunktionen ist ein Ausgabewert, der die Zugehörigkeit jedes Pixels zur Menge der abzubildenden Arealfläche beschreibt. Dieser berücksichtigt Graustufen oder fließende Übergänge zwischen einem Areal und dessen Ausschluss-Areal.

Die unscharfen Ausgangswerte (Werte zwischen 0 und 1) müssen für bestimmte Fragestellungen anschliessend wieder in binäre Werte (scharfe Werte) zurücktransformiert werden. Diesen Prozess nennt man «Defuzzifikation». Auch wenn für bestimmte Fragestellungen schlussendlich nur scharfe Werte zählen, bietet die Berücksichtigung der Unschärfen während der Modellierung doch einen Vorteil, weil der Informationsverlust erst am Ende des Prozesses und nicht am Beginn desselben erfolgt.

In diesem Projekt wurden die Arealgrenzen ausgehend von den Stichprobendaten mit Hilfe eines Verbreitungsmodells bestimmt. Die Eichung der Parameter erfolgte durch einen vereinfachten machine-learning Ansatz auf Basis der Fuzzy logic. Für jedes Areal wurde die Stichprobe nach dem folgenden Schema analysiert:

- Ermittlung des Mittelwertes und der Minima bzw. Maxima des jeweiligen Klimaparameters (Abb. 57).
- Ableitung einer Fuzzy Membership-Funktion aus der Stichprobe zur Zugehörigkeit jeden Werts einer Klimakarte zur Menge der Standorte des jeweiligen Areals.
- Anwendung der Membership-Funktionen auf die gesamte Karte des jeweiligen Klimaparameters.
- Verschnitt der einzelnen Zugehörigkeitsfunktionen und Berechnung der Zugehörigkeitsfunktion jedes Pixels zur Menge des jeweiligen Areals.
- Konvertierung der Zugehörigkeitsfunktionen in ein binäres Format (Verbreitungsareal ja/nein).

Es wurde immer nur das untersuchte Areal berücksichtigt und nicht die Klimaparameter ausserhalb der Arealgrenze.

Im Folgenden ist die Methode des Fuzzy logic Ansatzes an einem einfachen Beispiel (Tanne Haupt-/Nebenareal und Klimaparameter Kontinentalität) ohne Berücksichtigung der Geologie beschrieben, im Detail wird das Vorgehen in den folgenden Kapiteln beschrieben.

#### 2.4.2.1 Vorgehen Arealgrenzen: Beispiel Tannen-Haupt-/Nebenareal und Klimaparameter Kontinentalität

Abb. 52 zeigt das Tannen-Haupt- und Tannen-Nebenareal. Als Stichprobenflächen wird das Höhenband zwischen 1000 und 1500 m ü. M. des Hauptareals verwendet.

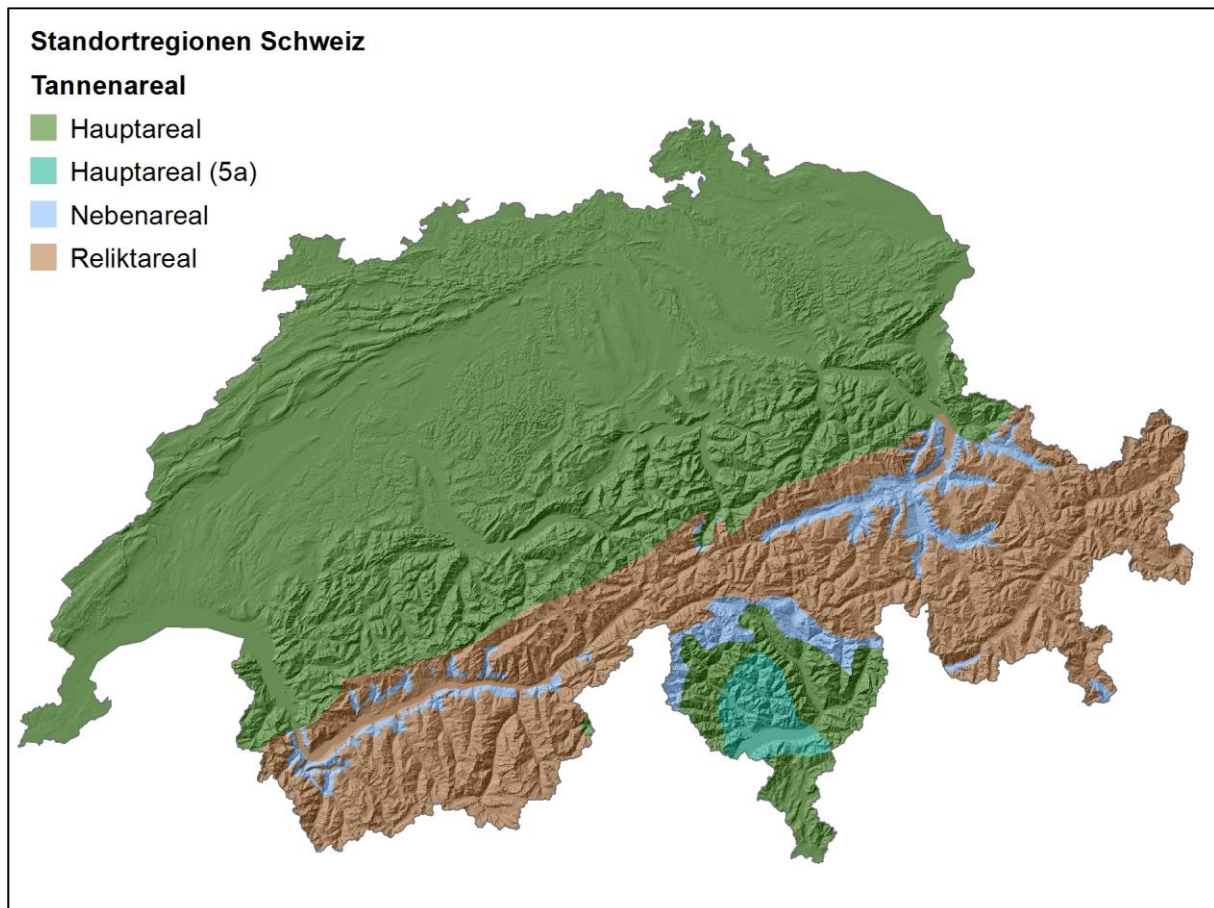


Abb. 52: Tannenareale nach der Standortsregionenkarte.

Es wird angenommen, dass der Mittelwert der Kontinentalität aus den Stichprobenflächen für die Tanne geeignet ist. Dieser Mittelwert wird aus den Stichprobenflächen berechnet und erhält den Wert 1 (Abb. 53). Der Einfluss der Kontinentalität auf die Tanne kann ausserdem wie folgt definiert werden: «Je kleiner die Kontinentalität, desto besser für die Tanne». Aus dieser Aussage folgt, dass der maximale Wert der Kontinentalität aus den Stichprobenflächen als oberer Grenzwert angenommen wird und den Wert 0 erhält. Zwischen dem Mittelwert und dem maximalen Wert wird der lineare Gradient berechnet.

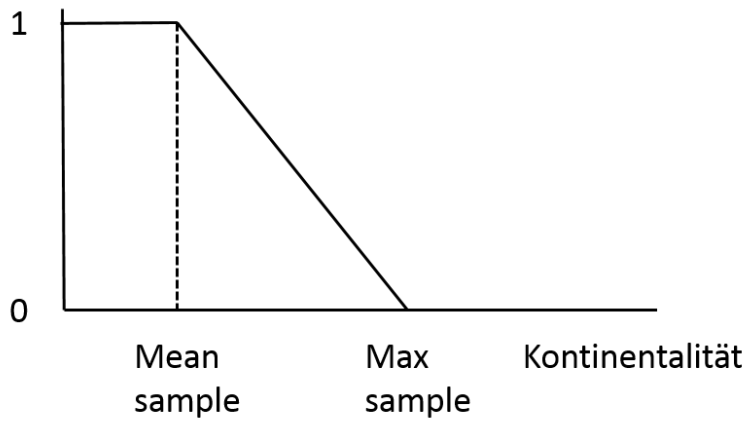


Abb. 53: Schematischer Mittelwert und Maximalwert der Kontinentalität aus den Stichprobenflächen.

Nun wird für jeden Pixel in der Karte der Kontinentalität der Wert analysiert. Dabei gibt es folgende Möglichkeiten (Abb. 54):

1. Wert Kontinentalität real > Wert Max sample  $\rightarrow 0$
2. Wert Mean sample < Wert Kontinentalität real < Wert Max sample  $\rightarrow 0 - 1$
3. Wert Kontinentalität real < Wert Mean sample  $\rightarrow 1$

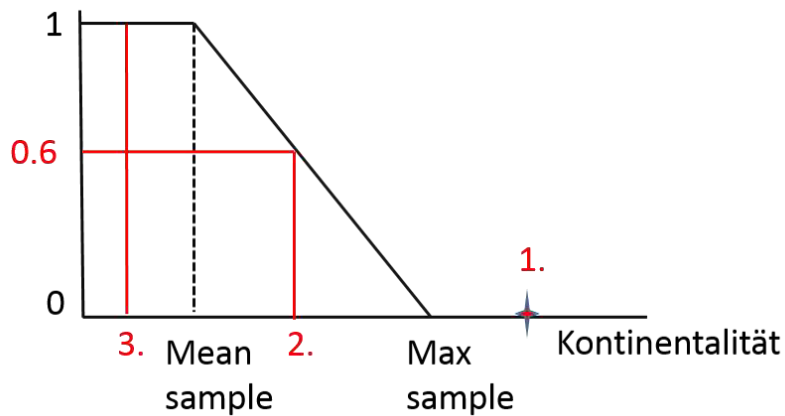


Abb. 54: Zuordnung von Werten zwischen 0 – 1 für jeden Pixel der Karte Kontinentalität.

Auf diese Weise wird jedem Pixel in der Karte ein Wert zwischen 0 und 1 zugeteilt. Dies wird in der folgenden Standorteignungskarte dargestellt (Abb. 55). Je näher der Wert bei 1 liegt, desto besser ist der Standort für die Tanne geeignet.



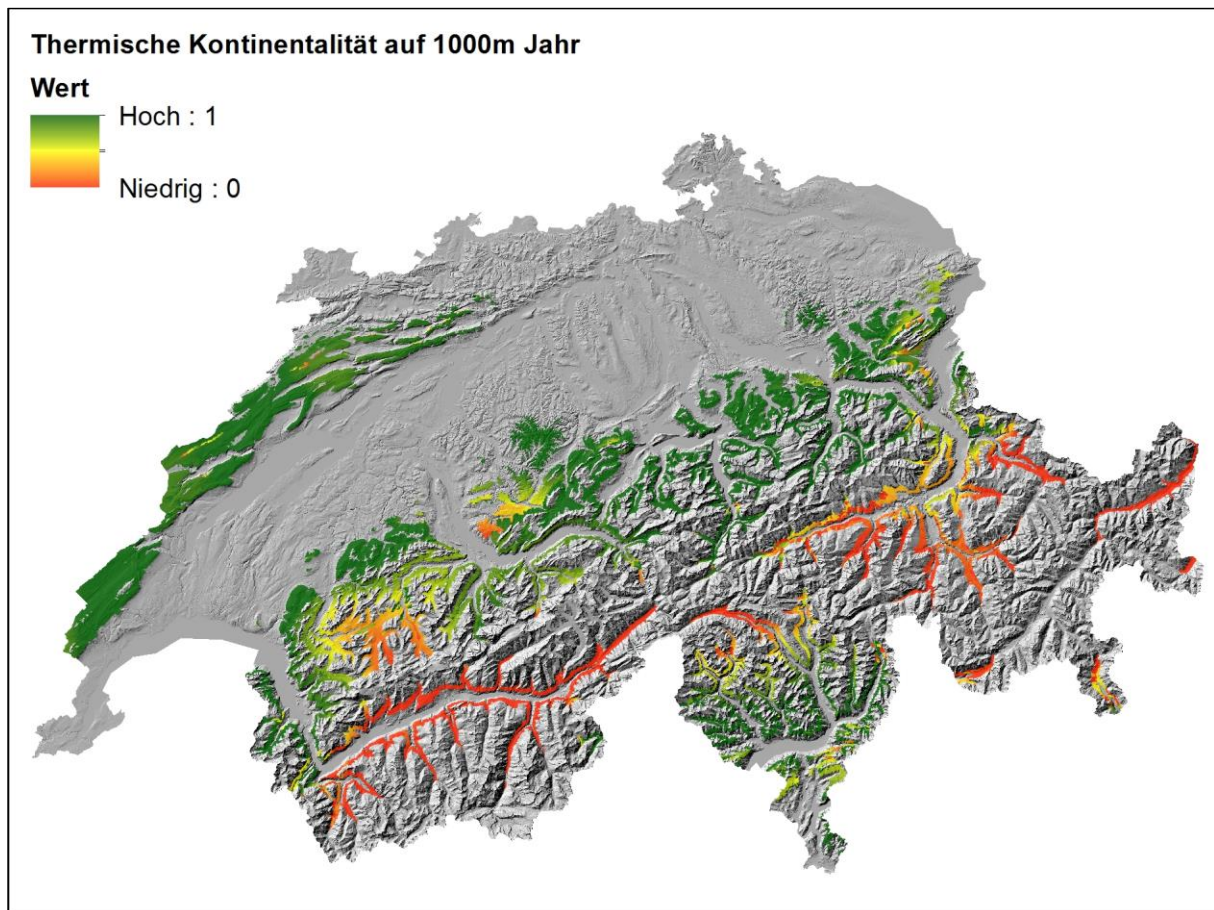


Abb. 55: Standorteignungskarte für die Tanne; Klimaparameter Kontinentalität.

Ein analoges Vorgehen für verschiedene Klimaparameter führt zu Standorteignungskarten für die entsprechenden Faktoren mit Werten zwischen 0 und 1. Die einzelnen Karten für alle jeweils verwendeten Klimaparameter werden in den Resultaten präsentiert. Nun können diese Karten überlagert werden.

Nach dieser Überlagerung mehrerer Klimaparameter liegt eine Standorteignungskarte für die Tanne vor mit Werten zwischen 0 und 1 (Abb. 56). Je näher die Werte bei 1 liegen, desto besser ist der Standort für die Tanne geeignet. Falls scharfe Grenzen benötigt werden, kann nun ein Grenzwert festgelegt werden, bei dem der Standort von «geeignet» zu «nicht geeignet» wechselt.

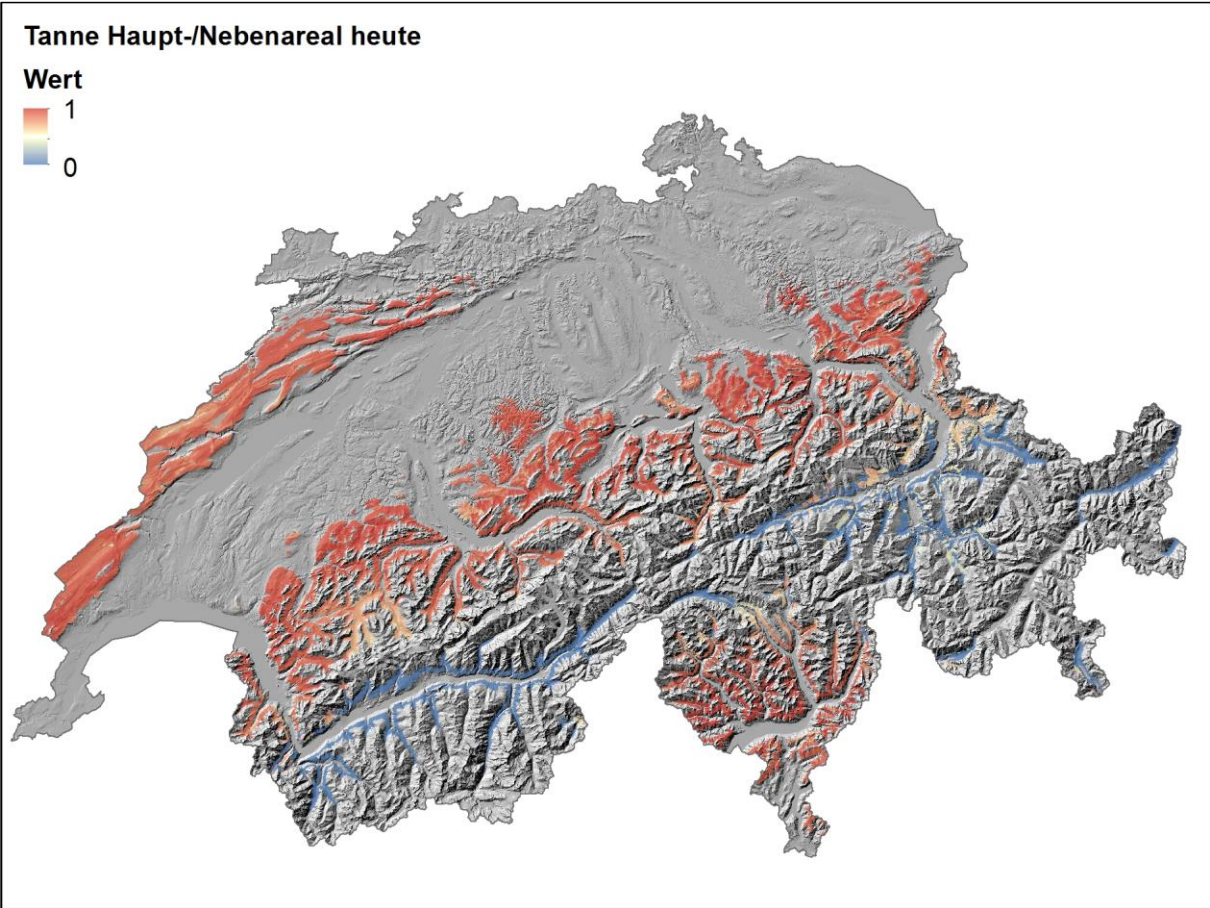


Abb. 56: Modellierung Tannenareal (Haupt-/Nebenareal).

### 2.4.2.2 Für die Arealmodellierungen verwendete Klimaparameter

Tab. 24: Verwendete Klimaparameter und Lithologieklassen für die Modellierung der Areale. Die grossen, dicken Kreuze kennzeichnen jene Parameter, die sich gemäss Berechnungen und Expertenprüfung (Huber et al. 2015) als besonders entscheidend erwiesen für die Begrenzung der Arealgrenzen.

Klimaparameter	Buchen-areal	Tannen-Haupt-areal	Tannen-Neben-areal	colline Stufe Nord-CH	colline Stufe VS/GR
Föhnhäufigkeit im Jahr	<b>X</b>	x	x		
Relative Luftfeuchte im Jahr	<b>X</b>	x	x		
Niederschlagssumme Juni-August	<b>X</b>	x	x	x	
Thermische Kontinentalität auf 1000 m im Jahr	x	<b>X</b>	<b>X</b>		
Thermische Kontinentalität auf 1000 m im Juli				x	
ETa/ETp	x			<b>X</b>	<b>X</b>
Mittlerer letzter Frosttag	x	x	x	x	
Frostfreie Vegetationsperiode		x	x		
Mittlere Höchstwerte Lufttemperatur Juli				<b>X</b>	<b>X</b>
Mittlere Tiefstwerte Lufttemperatur April				x	x
Globalstrahlung Jahr			x	x	
Globalstrahlung Juli					<b>X</b>
Mittlere potenzielle Evapotranspiration Juli				x	
Lithologieklassen	7	7	7	2	2
gewählte Overlay-Methode	GAMMA (Wert 0.9)	GAMMA (Wert 0.9)	GAMMA (Wert 0.9)	AND	AND
Grenzwerte für binäre Areale	N: 0.65 S: 0.75	0.7	VS: 0.7 Süd: 0.65 GR/UR/SG: 0.82	0.07	0.21

Die Umwandlung in ein binäres Format (Werte 0 oder 1), welches das Verbreitungsareal darstellt, erfolgt durch die Ermittlung eines Schwellenwertes. Der Wert wurde regionalspezifisch so festgelegt, dass das modellierte Areal am besten mit dem beobachteten Areal übereinstimmt. Für das Buchenareal sind die verwendeten Stichprobenflächen in Abb. 58 dargestellt. In Tab. 24 werden die verwendeten Klimaparameter für die Modellierungen der Areale für die Buche, Tanne Haupt-/Nebenareal (Ta HaNe), Tanne Neben-/Reliktareal (Ta NeRe) und die colline Stufe aufgeführt. Das Schema in Abb. 57 zeigt, wie die Klimaparameter jeweils verwendet wurden. Bei einigen Parametern wurde anstelle des Mittelwertes der Minimum- oder Maximumwert aus der Stichprobe als Optimum (Wert = 1) angewendet.

Für die Arealmodellierung wurde beim Buchenareal und bei den Tannenarealen mit den gleichen 7 Lithologieklassen wie bei den Höhenstufenmodellen (siehe Anhang 8.1) gearbeitet und bei der collinen Stufe inkl. Flaumeichenareal mit einer Klassifizierung der Lithologie in 2 Einheiten (Schotter und Sande sowie restliche Lithologien).

Das Ziel im Arealmodell war, die horizontale und nicht die vertikale Ausdehnung (Wärme-grenze) von Buche und Tanne zu erfassen. Deshalb wurde für die Eichung des Modells für das Buchen- und Tannenareal jeweils ein Höhenbereich (800 – 1300 m ü. M. für die Buche, 1000 bis 1500 m ü. M. für die Tanne) festgelegt, in dem die Bedingungen von der Höhenlage her für die Buche oder Tanne sicher geeignet sind, falls es sich nicht um Extremstandorte handelt. In der Realität kommen Buchen und Tannen an vielen Orten auch unterhalb oder oberhalb dieses Höhenbereichs vor, zum Teil wirken dort aber schon Klimaparameter limitierend auf das Wachstum, die man im Arealmodell nicht erfassen wollte. Für die Modellierung des Buchen- und Tannenareals heute und in Zukunft wurde gegen unten keine Grenze gesetzt, entsprechend den verwendeten Klimaparametern wird gegen unten eine Grenze modelliert, die hauptsächlich durch Trockenheit begründet ist. Gegen oben wurde die Grenze heute auf 1300 m ü. M. bei Buche und 1500 m ü. M. bei Tanne gesetzt, in Zukunft wurde diese Grenze jeweils um 400 m gegen oben verschoben. Damit liegt in den Optimumgebieten der Baumarten die modellierte obere Grenze des Areals meistens unter der durch die Klimaparameter begründeten oberen Grenzen der Baumarten.

In der Höhenstufenkarte, die das Höhenstufenmodell und das Arealmodell enthält (in Abb. 65 ist die Höhenstufenkarte für das heutige Klima dargestellt), wurde in den Optimumgebieten der Baumarten jeweils die ganze Höhenstufe verwendet ohne Begrenzung gegen oben wie beim Arealmodell. Bei der Buche wurden jeweils die Höhenstufen in den Regionen JU, M, 1, 2a submontan, untermontan und obermontan in die Höhenstufenkarte übernommen, gegen unten begrenzt durch die untere Grenze vom Buchenareal. In der Region 5 wurde die ganze unter- und obermontane Höhenstufe übernommen, die colline Stufe wurde mit der unteren Grenze vom Buchenareal unterteilt in collin (ausserhalb vom Buchenareal) und collin mit Buche (innerhalb vom Buchenareal). Deshalb reicht die obermontane Stufe oft über 1300 m ü. M. (in der Zukunft 1700 m ü. M.) hinauf. Falls in den Standortsregionen 2b, 3 oder 4 in Zukunft Buchen modelliert werden, wird die untere und obere Grenze vom Buchenareal übernommen, deshalb liegt die obere Grenze der Buchen in diesen Gebieten für die Höhenstufenkarte Zukunft nie höher als 1700 m ü. M. Im Hauptareal der Tanne wurde die ganze hochmontane Stufe dem Hauptareal zugeordnet, auch oberhalb von 1500 m ü. M. (in der Zukunft jeweils 1900 m ü. M.). Im Nebenareal der Tanne wurde die Begrenzung vom Arealmodell übernommen, oft liegt diese unter 1500 m ü. M., teilweise bei 1500 m ü. M., der Rest der hochmontanen Stufe wurde dem Reliktareal der Tanne zugeordnet. Das Nebenareal der Tanne wird so an einzelnen Stellen unterschätzt, falls bei allen Stellen, an denen das Nebenareal 1500 m ü. M. erreicht die Fläche der hochmontanen Stufe oberhalb davon auch zum Nebenareal zugeordnet würden, würde das Nebenareal der Tanne in diesen Flächen teilweise stark überschätzt. Das gleiche gilt entsprechend für die Buche in der Zukunft in den Standortsregionen 2b, 3 und 4. Im Kapitel 2.4.3 ist das Vorgehen der Erstellung der Höhenstufenkarte heute und in Zukunft im Detail beschrieben.

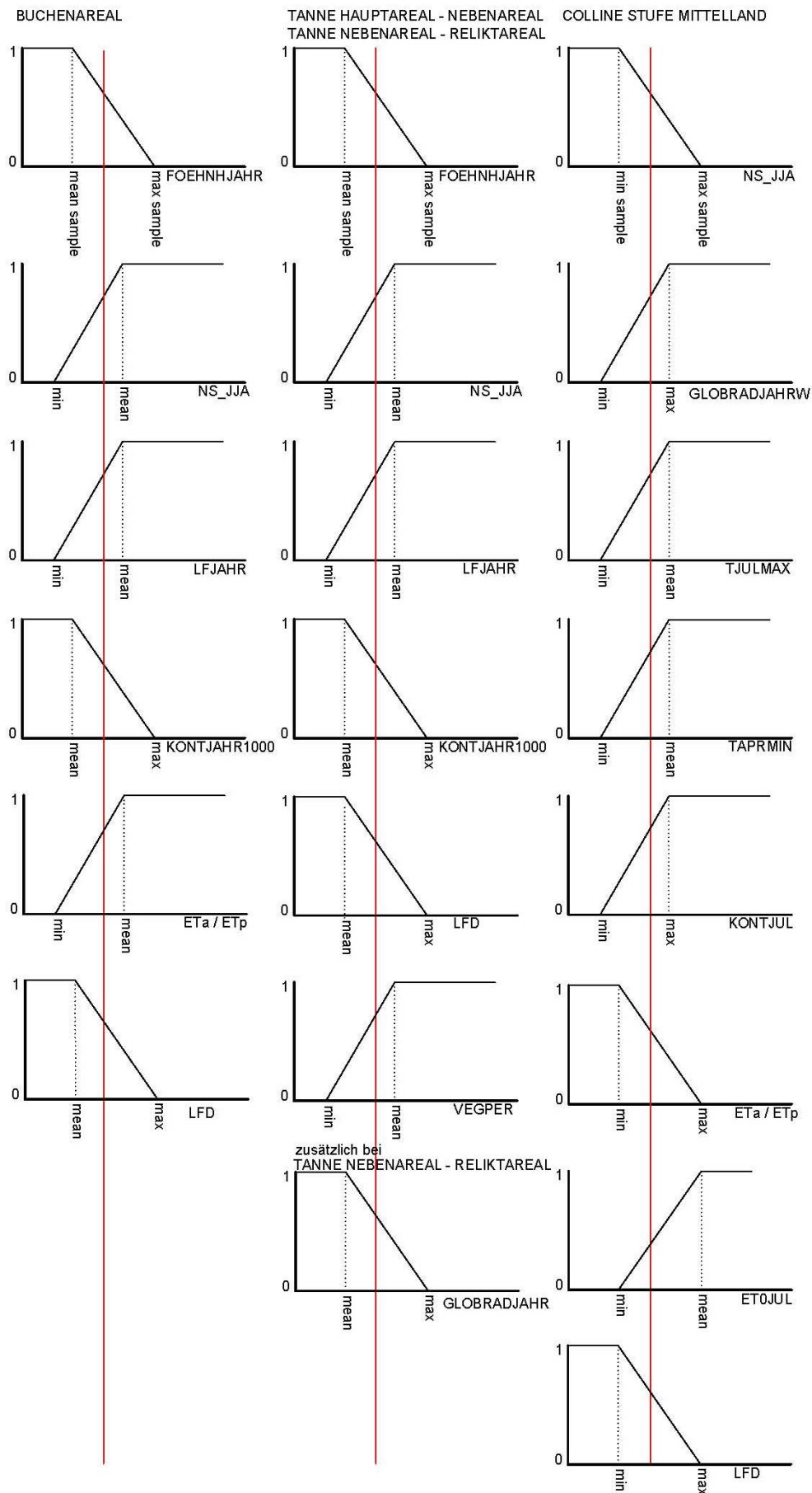


Abb. 57: Schema der verwendeten Klimaparameter bei der Modellierung der Arealgrenzen von Buche und Tanne und des Verbreitungsareals der collinen Stufe.



### 2.4.2.3 Buchenareal

#### 2.4.2.3.1 Definition Buchenareal und berücksichtigte Höhenstufen

Gemäss NaiS umfasst das Buchenareal die Regionen Jura, Mittelland, Nördliche Randalpen, Nördliche Zwischenalpen mit Buchen (2a) und Südliche Randalpen. In der Region 2a sind dies v.a. tief eingeschnittene Täler, gegen Norden geöffnet. Im Vergleich zu den nördlichen Randalpen ist die Wüchsigkeit der Buche reduziert. Sie dominiert nur noch im Bereich der Taleingänge. Im Bereich häufiger Nebelbänke und auf laubholzfördernder Unterlage (Substrat, das im Grenzbereich der obermontanen und hochmontanen Stufe Laubbäume gegenüber Nadelbäumen begünstigt: Kalke, Dolomite, Molasse [ausser feinkörnigen, basenarmen Schichten], skelettreichen Ablagerungen [Hangschutt von Kalkmolasse, nicht zu tonige Moränen, etc.]; Frehner et al 2009) reichen die Buchen am weitesten in die Täler hinein.

Das Gebiet der «Nördlichen Zwischenalpen ohne Buchen» umfasst v.a. jene Täler, die durch die Randalpen abgeschirmt sind. Die Buche tritt nur noch vereinzelt auf, das Areal der Buche löst sich hier in Inseln auf. In den Kontinentalen Hochalpen und den Südlichen Zwischenalpen kommen keine Buchen vor.

Als Höhenstufen mit Buche wurden berücksichtigt: submontane Stufe, untermontane Stufe, obermontane Stufe. Region 5, Südliche Randalpen: colline Stufe und hyperinsubrische Stufe (nach GC kommt die Buche auf feinerdereichen Standorten z.T. dominierend vor in Gebieten, welche von Waldbränden unbeeinflusst blieben. So z.B. hektarweise am Südhang zwischen Barbengo und Figino).

#### 2.4.2.3.2 Änderungen des Buchenareals auf der NaiS-Standortsregionenkarte

Folgende Änderungen wurden beim Buchenareal (Abb. 50) vollzogen:

- Änderung Bu-Areal UR, 2a/2b (Anpassungen durch LZ).
- Änderung Bu-Areal TI, 4/5a: Korrektur Buchengrenze in West und Nordost (durch GC).
- Änderung Bu-Areal VS, 2a/2b: Anpassung an vorhandene Bestände (durch JB), für Analysen wurden reale Buchenbestände aus der Karte «Waldstandorte im Walliser Haupttal» (Frehner et al. 2005/2009) genommen.
- Änderung Bu-Areal GR: Grenze 2a/2b wurde z.T. angepasst aufgrund neu erstelltem Buchenlayer GR, so dass die zusammenhängenden Flächen des Buchenlayers GR erhalten sind. Dies hatte meistens eine Ausdehnung des Buchenareals zur Folge. Der Buchenlayer GR besteht aus den Höhenstufen submontan, untermontan und obermontan innerhalb 2a, inkl. collin (nur jene Flächen, die real Buchenbestände enthalten). Kleine Anpassung von 2a im Domleschg.

#### 2.4.2.3.3 Vorgenommene Regionalisierungen und gewähltes Höhenband

Das Buchenareal wurde für die ganze Schweiz mit dem gleichen Modell gerechnet. Für die Modellierung wurde der Höhenbereich zwischen 800 und 1300 m als Stichprobenflächen für die Eichung verwendet (Abb. 58). Die Modellierung des heutigen Areals erfolgte ohne untere Begrenzung bis 1300 m ü. M. Auch für die Arealmodellierung mit Klimazukünften wurde keine untere Höhenbegrenzung gesetzt (siehe 2.4.2.2). Die obere Grenze wurde bei 1700 m ü. M. festgelegt.

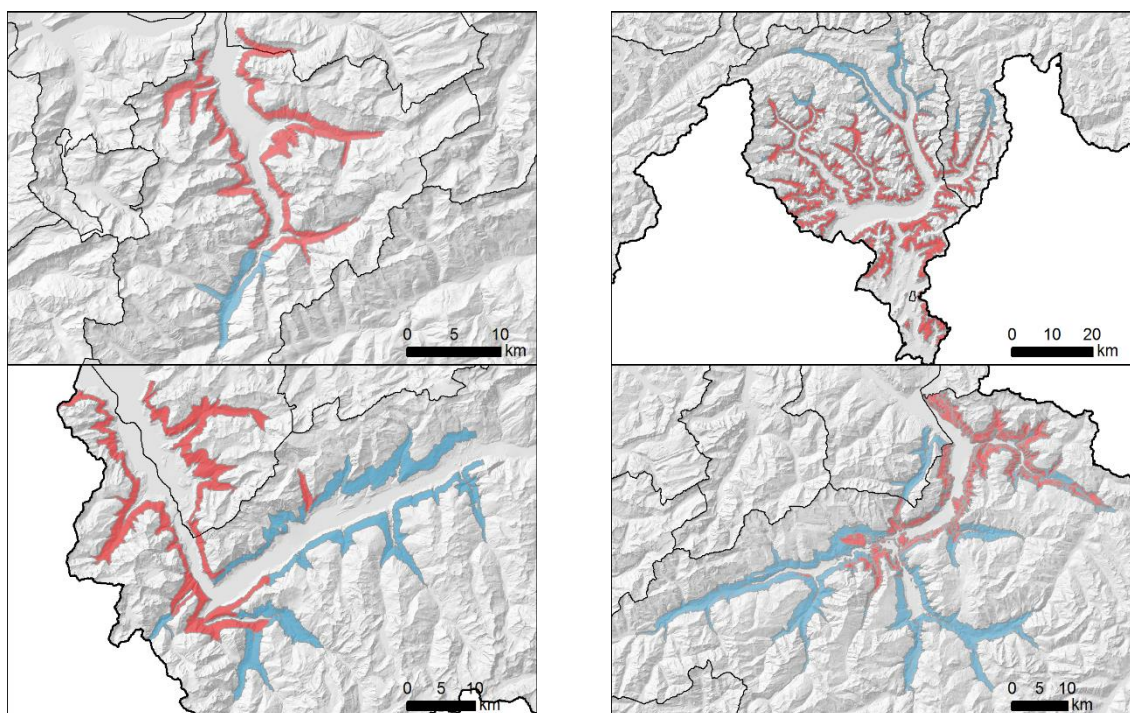


Abb. 58: Verwendete Stichproben für die Modellierung der Arealgrenze des Buchenareals. Rot: Buchenareal im Höhenbereich 800-1300 m, Blau: im Höhenbereich 800-1300 m ohne Buchen.

#### 2.4.2.3.4 Gewählte Klimaparameter

Aufgrund der Ergebnisse aus Huber et al. (2015) fiel die Wahl der Klimaparameter bei der Buche auf die in Tabelle 25 angegebenen Parameter (siehe auch Abb. 57; Literaturangaben zu den berücksichtigten Klimaparametern und deren Wirkung auf die Buche siehe Huber et al. 2015).

Tab. 25: Begründung für die Auswahl der Klimaparameter für die Modellierung des Buchenareals. Die Parameter sind in absteigender Wichtigkeit aufgeführt (die wichtigsten sind fett gedruckt):

Umso bessere Standorteignung für Buche, je:	Begründung:
<b>geringer die Föhnhäufigkeit im Jahr.</b>	Aufgrund der Austrocknung der Verjüngung.
<b>höher die relative Luftfeuchte im Jahr.</b>	Aufgrund der Austrocknung der Verjüngung.
<b>höher der Niederschlag in der Periode Juni-August.</b>	Sommertrockenheit erträgt die Buche schlecht, bei erhöhter Wärme ist sie weniger empfindlich.
tiefere thermische Kontinentalität auf 1000 m.	Je tiefer die thermische Kontinentalität, je weniger grosse Temperaturunterschiede, je weniger Frostereignisse. Die Buche ist empfindlich gegenüber Spätfrost.
höher das ETa/ETp-Verhältnis während der Vegetationszeit (das heisst, je feuchter).	Bei einem hohen ETa/ETp-Verhältnis während der Vegetationszeit ist das Wasserangebot besser.
früher der mittlere letzte Frosttag im Jahr auftritt.	Die Buche ist spätfrostempfindlich.

## 2.4.2.4 Grenze Tannen-Hauptareal zu Tannen-Nebenareal

### 2.4.2.4.1 Definition Tannen-Hauptareal und berücksichtigte Höhenstufen

Die Tannen-Areale wurden in Frey 2003 definiert und begründet. Frey 2003 bildet die Basis für die Tannen-Areale in Frehner et al. 2005/2009.

**Tannen-Hauptareal:** Mit Ausnahme von einigen Extremstandorten darf im Mittelland, in den nördlichen Randalpen und im Jura davon ausgegangen werden, dass die Weisstanne in der obermontanen und hochmontanen Stufe natürlicherweise in einer erheblichen Masse am Bestandaufbau beteiligt ist. Alle zonal weit verbreiteten Standortstypen dieser Höhenstufen weisen in einer späten Optimalphase einen gewissen Tannenanteil auf. Fehlt die Tanne, so handelt es sich meist um Pionierphasen nach flächigen Störungsereignissen oder um menschlich bedingtes Fehlen der Tanne. «Für die Schweiz sind diese Gebiete sowie die Täler der südlichen Randalpen als das eigentliche Areal, also das Hauptareal der Tanne zu betrachten» (aus Frehner et al. 2005/2009).

Das Tannen-Hauptareal umfasst v.a. die Standortsregionen Jura, Mittelland, Nördliche Randalpen, Teile des Kt. UR in den Nördlichen Zwischenalpen sowie Teile der Südlichen Zwischenalpen und die Südlichen Randalpen.

**Höhenstufen mit Tanne:** Die Tanne ist gut vertreten in der hochmontanen Stufe des Haupt- und Nebenareals sowie in der obermontanen Stufe. Beigemischt ist sie in der untermontanen Stufe und etwas weniger stark in der submontanen Stufe sowie in der collinen Stufe der Alpennordseite. Vereinzelt Vorkommen sind im Hauptareal zudem in der collinen Stufe der Alpennordseite sowie in der subalpinen Stufe möglich. In der obersubalpinen Stufe werden keine Tannen erwartet.

### 2.4.2.4.2 Änderungen des Tannen-Hauptareals auf der NaiS-Standortsregionenkarte

Folgende Änderungen wurden beim Tannen-Hauptareal (Abb. 52) vollzogen:

- UR: Sehr geringe thermische Kontinentalität, weshalb das Hauptareal bis Göschenen vergrössert wurde (Änderungen durch LZ).
- TI (Änderungen durch GC und LZ; siehe Huber et al. 2015).
- VS, Hauptareal – Nebenareal (Änderungen durch JB): Verschiebung der Grenze zugunsten des Tannenhauptareals, da die Tanne im angrenzenden Kt. VD sehr wüchsig ist.

### 2.4.2.4.3 Vorgenommene Regionalisierungen und gewähltes Höhenband

Das Tannen-Hauptareal wurde für die ganze Schweiz mit dem gleichen Modell gerechnet. Die Arealgrenze zwischen Tannen-Hauptareal und Tannen-Nebenareal wurde aufgrund des Höhenbereichs zwischen 1000 und 1500 m ü. M. geeicht (Abb. 59). Für die Modellierung der heutigen Areale wurde keine untere Begrenzung festgelegt, die Obergrenze wurde bei 1500 m ü. M. angesetzt. Auch für die Arealmodellierung mit Klimazukünften wurde keine untere Höhenbegrenzung festgelegt (siehe 2.4.2.2). Die obere Grenze wurde bei 1900 m ü. M. gesetzt (siehe 2.4.2.2).

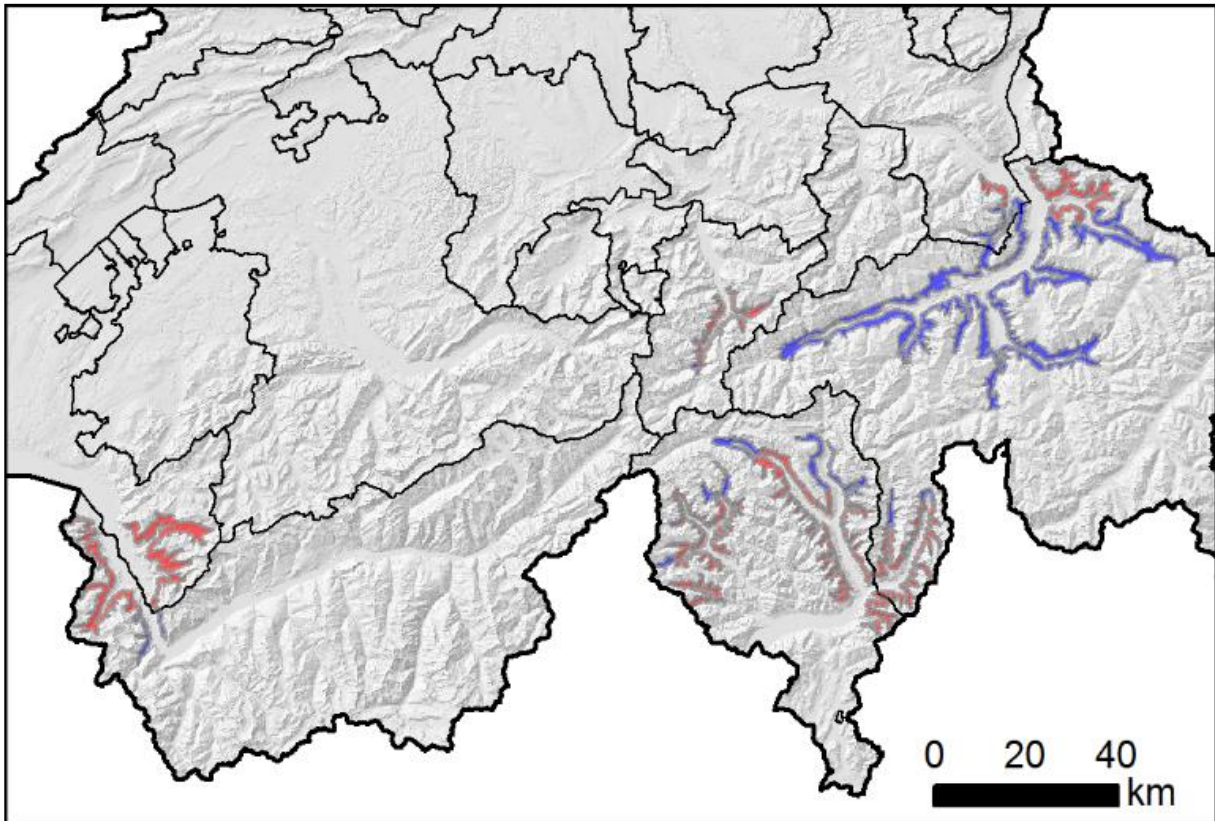


Abb. 59: Verwendete Stichproben für die Modellierung der Arealgrenze des Tannen-Hauptareals. Rot: Tannen-Hauptareal im Höhenbereich 1000-1500 m, Blau: Tannen-Neben- und Reliktareal im Höhenbereich 1000-1500 m.

#### 2.4.2.4.4 Gewählte Klimaparameter

Aufgrund der Ergebnisse aus Huber et al. (2015) fiel die Wahl der Klimaparameter bei der Modellierung des Tannen-Hauptareals auf die in Tab. 26 angegebenen Parameter (siehe auch Abb. 57; Literaturangaben zu den berücksichtigten Klimaparametern und deren Wirkung auf die Tanne siehe Huber et al. 2015).

Tab. 26: Begründung für die Auswahl der Klimaparameter für die Modellierung des Tannen-Hauptareals. Wichtigkeit der einzelnen Parameter wird in etwa in absteigender Reihenfolge aufgeführt (kann regional verschieden sein, gewisse Parameter können sich gegenseitig beeinflussen, die entscheidenden Werte sind fett gedruckt).

Umso bessere Standorteignung für Tannen-Hauptareal, je:	Begründungen (aus Huber et al. 2015):
<b>tiefer die thermische Kontinentalität auf 1000 m.</b>	Bei einer thermischen Kontinentalität, welche auf 1000 m 5°C überschreitet, weist die Tanne unabhängig von anderen Faktoren nur noch Reliktbestände auf. Für den Übergang vom Haupt- zum Nebenareal scheint eine jährliche Kontinentalität auf 1000 m von 3.5 - 4°C die plausibelste Grenze zu sein, auch wenn die übrigen Faktoren noch günstig sind. Bei lokalen Kaltluftseen oder strahlungsreichen Südhängen, welche beide die thermische Kontinentalität ansteigen lassen, kann die Tanne bereits in Gebieten ausfallen, wo das regionale Klima für sie an und für sich noch günstig ist.
geringer die Föhnhäufigkeit im Jahr.	Bei einer jährlichen Föhnhäufigkeit von über 15 - 17%, wie sie in den oberen Talabschnitten der Alpensüdseite vorkommt, weist die Tanne nur noch Reliktbestände auf. Dies gilt auch dann, wenn die anderen Faktoren an sich für die Tanne noch günstig sind. Eine jährliche Föhnhäufigkeit von 12 – 15% scheint auszureichen (kommt allerdings nur in den oberen Tälern der Alpensüdseite vor), um die Tanne soweit zu benachteiligen, dass sie sich auf günstige Nordhänge, tiefgründige Böden u. ä. zurückzieht.
höher die relative Luftfeuchte im Jahr.	Die Tanne kommt z.B. im Puschlav nur an den luftfeuchtesten Lagen vor, v.a. in steiler Nordostlage (Campell et al. 1955).
höher der Niederschlag im Juni-August.	Sommerniederschläge unter 200 mm und/oder Jahresniederschläge unter 650 - 800 mm sind für die Tanne kritisch (nur an Nordhängen im VS kommen Tannen bei tieferen Niederschlagswerten vor), insbesondere, wenn hohe Sommertemperaturen und geringe Luftfeuchtigkeit die Verdunstung (potenzielle Evapotranspiration) fördern, wie zum Beispiel im Zentralwallis.
früher der mittlere letzte Frosttag erfolgt im Jahr.	Die Tanne ist spätfrostempfindlich.
länger die frostfreie Vegetationsperiode dauert.	Die Tanne ist spätfrostempfindlich.

Dabei scheint das geologische Substrat in keiner Region einen entscheidenden Einfluss auf die Tannenareale zu haben. Auch gemäss Frey (2003) wirkt sich das geologische Substrat kaum merklich auf die Verbreitung der Tannen aus, so konnten bisher keine „tannenfeindlichen“ Gesteine festgestellt werden.

#### 2.4.2.5 Grenze zwischen dem Tannen-Nebenareal und dem Tannen-Reliktareal

##### 2.4.2.5.1 Definition Tannen-Nebenareal, Tannen-Reliktareal und berücksichtigte Höhenstufen

**Tannen-Nebenareal** (aus Frehner et al. 2005/2009): «In den nördlichen Zwischenalpen sind ohne Zutun des Menschen mehr oder weniger ausgedehnte zonale Tannenvorkommen in der hochmontanen Stufe auf die nord- und ostexponierten Hänge jener Gebiete beschränkt, wo die Talsohle des Haupttales unterhalb von 1000 m ü. M. liegt. Die Obergrenze der Tannenverbreitung liegt im östlichen Gebiet (GR) an den Talflanken bei ca. 1300 m ü. M. (Frey 2003, zitiert in Frehner et al. 2005/2009). In den südlichen Zwischenalpen war die Tanne bei der



Einwanderung vermutlich einem wesentlich geringeren Einwanderungsdruck durch die Fichte unterworfen. Hier nähern sich die Gesetzmässigkeiten der Tannenverjüngung jenen der Fichte. Dies äussert sich vor allem in einer geringeren Schattentoleranz, einem schnelleren Jugendwachstum und in der vermehrten Fähigkeit zur Besiedelung von Kahlfleichen (mündl. Mitteilung H.-U. Frey und U. Bühler). Die Obergrenze der Tannenverbreitung liegt hier und auch im VS bei ca. 1600 - 1700 m ü. M. Das Tannen-Nebenareal umfasst Gebiete in den Nördlichen und Südlichen Zwischenalpen.

**Tannen-Reliktareal** (aus Frehner et al. 2005/2009): «In den höher gelegenen Tälern (Talsole deutlich über 1000 m ü. M.) der Zwischenalpen sowie in den kontinentalen Hochalpen sind immer wieder kleinere und isolierte Tannenbestände anzutreffen. Sie sind als Relikte eines ehemals viel grösseren Tannenareals zu werten. Unter klimatisch wesentlich günstigeren Bedingungen war der Grossteil der Alpen im Bereich der Tannenverbreitung. Diese Relikte sollen nicht dazu verleiten, ein aktuelles zonales Vorkommen der Tanne zu postulieren. Inwieweit sich die klimatischen Bedingungen im Reliktareal durch die neuerdings feststellbare Klimaerwärmung wieder jenem tannenfreundlichen Klima der postglazialen Wärmezeit anzunähern vermag, wird erst die Zukunft zeigen. Im südlichen und westlichen Teil der Zwischenalpen sind Reliktbestände an Hängen mit viel direkter Sonneneinstrahlung wesentlich häufiger als im östlichen Teil». Das Tannen-Reliktareal umfasst Gebiete in den Nördlichen und Südlichen Zwischenalpen und den Kontinentalen Hochalpen.

Im Nebenareal ist die Tanne in der hochmontanen Stufe mässig vertreten, in der collinen Stufe der Alpensüdseite kann sie beigemischt sein.

#### 2.4.2.5.2 Änderungen des Tannen-Nebenareals auf der NaiS-Standortsregionenkarte

Folgende Änderungen wurden beim Tannen-Nebenareal (Abb. 52) vollzogen:

- Änderung Ta-Areal UR, Nebenareal – Reliktareal (Änderungen durch LZ im obersten Reusstal bei Wassen - Göschenen, Hauptareal geht neu im Reusstal bis Göschenen und nicht nur bis Amsteg, Nebenareal erfasst neu die untersten Talabschnitte des Meien- und Göschenertales, welche zuvor noch als Reliktareal galten).
- Änderung Ta-Areal TI, Nebenareal – Reliktareal (Änderungen durch GC und LZ in der Leventina, Hauptareal der Tanne neu bis zum Monte Piottino oberhalb Faido und nicht wie bisher bis etwa zur Biaschina; das Nebenareal der Tanne reicht neu bis zum Stavedro knapp unterhalb Airolo und nicht wie bisher nur zum Monte Piottino).
- Änderung Ta-Areal GR (Änderungen durch BH, MF, HUF, im Misox/Calanca durch LZ, GC, BH): Als Obergrenze wurde die Grenze hochmontan/subalpin genommen. Als Untergrenze wurde die «Buchenuntergrenze» (siehe unten) übernommen und aufgrund von Betriebsplandaten angepasst.
- Änderung Ta-Hauptareal VS, Verfeinerung des Nebenareals (Änderungen durch JB, MF, HUF): Eingrenzung des Tannenareals nach der Karte von Lingg (1986) und Höhenangaben auf S. 354 bei Lingg (Untergrenze Nordhang 800 m ü. M., Südhang 1200 m ü. M., Obergrenze Nordhang 1500 m ü. M., Südhang 1700 m ü. M.). Eingezeichnete grössere Tannenbestände oberhalb der bei Lingg (1986) auf S. 354 erwähnten Obergrenze wurden ebenfalls integriert. Das Flaumeichenareal aus der Waldstandortskarte VS (Frehner et al. 2005/2009) diente als untere Grenze. In den Seitentälern wurde das Nebenareal der Tanne so korrigiert, dass die Untergrenze nicht unter 1000 m ü. M. liegt.

#### 2.4.2.5.3 Vorgenommene Regionalisierungen und gewähltes Höhenband

Es wurden drei regionale Modelle verwendet, die sich einzig in der Wahl der Stichprobenflächen unterscheiden. Der Modellaufbau und die verwendeten Klimaparameter sind für alle drei Modelle identisch.

Es wurden folgende drei Regionen separat modelliert: Kanton VS, Süden (Standortsregion 4 und 5), und die restlichen Kantone (GR ohne Südtäler, UR, SG). Als Stichprobenflächen dienten dabei jeweils die Flächen des Tannen-Nebenareals. Für die Modelle Wallis und Süden wurden jeweils die Nebenarealfächen der entsprechenden Region verwendet. Für das dritte Modell GR/UR/SG wurden alle Nebenarealfächen der Tanne (ganze CH) verwendet. Dieses Modell passte besser, als wenn nur die Nebenarealfächen der Region GR/UR/SG als Stichprobenflächen verwendet wurden. Es wurde wiederum nur ein Höhengürtel aus den entsprechenden Flächen zur Eichung verwendet. Wie beim Tannen-Hauptareal ist dies der Gürtel zwischen 1000-1500 m ü. M. Zur Modellierung des heutigen Areals wurde keine untere Grenze festgelegt, die Modellierung erfolgte bis zur Höhe 1500 m ü. M. Auch für die Arealmodellierung mit Klimazukünften wurde keine untere Höhenbegrenzung gesetzt. Die obere Grenze wurde bei 1900 m ü. M. festgelegt (siehe 2.4.2.2).

#### 2.4.2.5.4 Gewählte Klimaparameter

Im Vergleich zum Modell für das Tannen-Haupt- und Nebenareal wurde für das Tannen-Neben- und Reliktareal einzig zusätzlich der Klimaparameter Globalstrahlung im Jahr berücksichtigt. Die Globalstrahlung ist v.a. im VS entscheidend. An strahlungsreichen Südhängen steigt die thermische Kontinentalität an, so dass die Tanne bereits in Gebieten ausfällt, wo das regionale Klima für sie sonst noch günstig wäre.

### 2.4.2.6 Colline Stufe

Die colline Stufe (getrennt modelliert nach colline Stufe Nord-CH und colline Stufe VS/GR) wird wie das Buchen- und das Tannenareal mit dem Experten-Ansatz modelliert. Die colline Stufe aus den kantonalen Standortskarten (für Modell Nord-CH) sowie das Flaumeichenareal im VS und die Stichprobenflächen in GR wurden je zu einem Eichungsdatensatz zusammengefasst.

#### 2.4.2.6.1 Definition colline Stufe (inkl. Flaumeichenareal im VS)

Collin bedeutet, dass die Buche auch in der Mitte des Ökogrammes (Feuchteachse) Probleme bekommt, nicht nur am oberen trockenen Rand, sie ist nur noch vereinzelt auf feuchten und frischen, nicht extrem sauren Standorten beigemischt. Alle Eichenwälder, die nur wegen dem felsigen Untergrund Eichenwälder (40\* etc.) sind, gehören nicht zur collinen Stufe. Die Eichen-Hagebuchenwälder (35, 35A, 35M) auf Schotter sind ein Grenzfall, auch sie sind im oberen Teil vom Ökogramm, aber nicht so weit oben wie die Eichenwälder auf Fels. Die Flaumeichenflächen wurden aus der Karte «Waldstandorte im Walliser Haupttal» (Frehner et al. 2005/2009) übernommen. Kleinere Änderungen nahm JB aufgrund detaillierterer Kartengrundlagen und Lokalkenntnissen vor. Zur collinen Stufe gehören auf der Alpennordseite (Modelle Nord-CH und VS/GR) demnach folgende Gebiete (verwendete Stichproben siehe Abb. 142, diese basieren teils auf Standortskarten und teils auf dem Lokalwissen von Experten):

- Im VS der Talboden und das Flaumeichenareal.
- In den Kantonen GE und VD die Eichen-Hagebuchenwälder.
- In den Kantonen BS/BL und SH die Eichen-Hagebuchenwälder.
- Im Churer Rheintal und im Domleschg v.a. die Rebbauggebiete.

Diese Flächen wurden als Stichprobenflächen für die Eichung der Modelle genommen. Die Eichenwälder am Walensee gehören nicht zur collinen Stufe, sie sind dort aufgrund des felsigen Untergrundes vorhanden.

#### 2.4.2.6.2 Vorgenommene Regionalisierungen

Mit dem oben beschriebenen Datensatz wurden zwei regionale Modelle geeicht. Eines für die Kantone VS und GR (Verwendung der Flächen der Kantone VS und GR als Stichprobenflächen) und eines für die restliche Nordschweiz (Verwendung der Flächen der Kantone GE, VD, SH und BS/BL als Stichprobenflächen).

#### 2.4.2.6.3 Gewählte Klimaparameter und Lithologieklassen

Aufgrund der Ergebnisse aus Huber et al. (2015) fiel die Wahl der Klimaparameter bei der collinen Stufe der Nordschweiz auf folgende Parameter (Tab. 27; s. auch Abb. 57; Literaturangaben zu den berücksichtigten Klimaparametern und deren Wirkung auf die colline Stufe s. Huber et al. 2015). Bei der collinen Stufe in den Kantonen VS und GR wurden nur die Klimaparameter mittlere Höchstwerte Temperatur Juli, Verhältnis ETa/ETp und mittlere Tiefstwerte Temperatur April verwendet.

Tab. 27: Begründung für die Auswahl der Klimaparameter für die Modellierung der collinen Stufe. Die Bedeutung der einzelnen Parameter wird in absteigender Reihenfolge aufgeführt (die wichtigsten sind fett gedruckt).

Umso eher colline Stufe, je:	Begründung:
<b>tiefer das <math>ET_a/ET_p</math>-Verhältnis (das heisst, je trockener).</b>	Nach Leuzinger (2009) und Manthey et al. (2007) ist die in der collinen Stufe nur noch beschränkt vitale Buche gegenüber Trockenstress empfindlicher als die wärmeliebenden Baumarten der collinen Stufe wie die Eiche, Hainbuche oder Linde. Auch ist die Buche anfälliger für Kavitation als z.B. die Eiche (Magnani & Borghetti 1995; Bréda et al. 1993; zit. in Manthey et al. 2007). Nach Ellenberg (1963) führt ein Zusammenwirken von geringen Niederschlagsmengen und hohem sommerlichem Wärmegenuss zu vermehrtem Eichenanteil bzw. dem Zurücktreten der Buche.
<b>höher die mittleren Höchstwerte der Lufttemperatur im Juli.</b>	Siehe Erläuterungen bei $ET_a/ET_p$ -Verhältnis.
tiefer der Niederschlag im Juni-August.	
höher die thermische Kontinentalität im Juli.	Die Traubeneiche erträgt sonnige und sehr warme Tage gut, und bei solchen Tagen ist die Temperaturschwankung hoch, im Gegensatz zu bewölkten Tagen.
früher der mittlere letzte Frosttag im Jahr erfolgt.	Die Traubeneiche ist spätfrostempfindlich.
höher die mittleren Tiefstwerte der Lufttemperatur im April.	Die Traubeneiche ist spätfrostempfindlich.
höher die Globalstrahlung im Jahr, bzw. im Juli.	Nach Burnand (1976) ist eine Primärwirkung der Strahlung auf die Vegetationsentwicklung im Relief nachweisbar und entscheidend für die Verteilung von Waldföhre und Flaumeiche im VS.
höher die mittlere potenzielle Evapotranspiration im Juli.	Siehe Erläuterungen bei $ET_a/ET_p$ -Verhältnis.

Bei der collinen Stufe ist der geologische Untergrund (leicht durchlässige geologische Unterlagen) entscheidend. Es wurden 2 Lithologieklassen unterschieden: Klasse 1 (v.a. Schotter und Sande) separat und die übrigen Klassen zusammengefasst.

### **2.4.3 Vorgehen beim Erstellen der Höhenstufenkarte der Schweiz**

Als Grundlagen für die Höhenstufenkarten dienen die Höhenstufenmodellierungen mit Regressionsgleichungen, die Modellierungen der Areale mit dem Fuzzy logic Ansatz und die Standortsregionenkarte. Durch Kombination dieser Grundlagen wurden folgende Höhenstufen definiert:

#### **Region Süden**

##### **Obersubalpin**

Umfasst alle Pixel zwischen der modellierten Obergrenze der subalpinen Stufe und der 12°C Grenze der «Mittleren Maximalen Temperatur im Juli».

##### **Subalpin**

Umfasst die subalpine Höhenstufe. Falls die 12°C Isolinie der «Mittleren Maximalen Temperatur im Juli» tiefer liegt als die Obergrenze der subalpinen Stufe, wird die Obergrenze der subalpinen Stufe gegen oben durch die 12°C Linie abgegrenzt.

##### **Hochmontan**

Umfasst die hochmontane Höhenstufe und zusätzlich ausserhalb des Buchenareals die unter- und obermontane Stufe.

##### **Unter- und obermontan**

Umfasst die untermontane und obermontane Stufe innerhalb des Buchenareals.

##### **Collin mit Buche**

Umfasst die colline Höhenstufe im Areal mit Buche.

##### **Collin**

Umfasst die colline und hyperinsubrische Höhenstufe im Areal ohne Buche.

##### **Hyperinsubrisch**

Umfasst die hyperinsubrische Höhenstufe im Areal mit Buche.

#### **Region Norden und Jura**

##### **Obersubalpin**

Umfasst alle Pixel zwischen der modellierten Obergrenze der subalpinen Stufe und der 12°C Grenze der «Mittleren Maximalen Temperatur im Juli».

##### **Subalpin**

Umfasst die subalpine Höhenstufe. Falls die 12°C Isolinie der «Mittleren Maximalen Temperatur im Juli» tiefer liegt als die Obergrenze der subalpinen Stufe, wird die Obergrenze der subalpinen Stufe gegen oben durch die 12°C Linie abgegrenzt.

##### **Hochmontan**

Umfasst die hochmontane Höhenstufe, zudem die Höhenstufen untermontan und obermontan, die ausserhalb des Areals mit Buche und ausserhalb des collinen Areals liegen.

##### **Obermontan**

Umfasst die obermontane Höhenstufe in den Regionen Jura, Mittelland, 1 (Nördliche Randalpen) und 2a (Nördliche Zwischenalpen mit Buche) sowie die obermontane Stufe in den Regionen 2b (Nördliche Zwischenalpen ohne Buche) und 3 (Kontinentale Hochalpen) im Areal mit Buche, aber ausserhalb des collinen Areals.



### **Untermontan**

Umfasst die untermontane Höhenstufe in den Regionen Jura, Mittelland, 1 (Nördliche Randalpen) und 2a (Nördliche Zwischenalpen mit Buche) sowie die untermontane Stufe in den Regionen 2b (Nördliche Zwischenalpen ohne Buche) und 3 (Kontinentale Hochalpen) im Areal mit Buche, aber ausserhalb des collinen Areals.

### **Submontan**

Umfasst die submontane und colline Stufe im Areal mit Buche.

### **Collin**

Umfasst das colline Areal ausserhalb des Buchenareals und die submontane Stufe ausserhalb des Buchenareals.

Für die Berücksichtigung der Tannenareale wurde ein zweiter Kartenlayer erstellt. Dabei wurde die hochmontane Stufe in die drei Klassen des Tannenareals unterteilt. Es entstanden so die Klassen «Hochmontan im Tannen-Hauptareal», «Hochmontan im Tannen-Nebenareal» und «Hochmontan im Tannen-Reliktareal». Bei der Modellierung des Tannen-Hauptareals und Tannen-Nebenareals besteht im Modell für das heutige Klima gegen oben eine Begrenzung von 1500 m ü. M. und für die Modelle RegCM3 und CLM eine Begrenzung von 1900 m ü. M. Im Bereich des heutigen Tannen-Hauptareals gemäss Standortsregionenkarte wurde die ganze heutige und zukünftige hochmontane Höhenstufe dem Tannen-Hauptareal zugeteilt. Dies ist möglich, da in diesem Bereich auf jenen Flächen, bei denen in Zukunft eine hochmontane Höhenstufe modelliert wird, in Zukunft überall Tannen-Hauptareal modelliert wird. Im Bereich des heutigen Tannen-Neben- und Reliktareals gemäss Standortsregionenkarte wurden mit erster Priorität die Flächen im Tannen-Hauptareal übernommen und mit 2. Priorität die Flächen im Tannen-Nebenareal. Die Restfläche der modellierten hochmontanen Stufe in diesem Bereich wird als Tannen-Reliktareal bezeichnet. Da im Streifen zwischen der Obergrenze des Modells (1500/1900 m ü. M.) und der modellierten Obergrenze der hochmontanen Höhenstufe die Beteiligung der Tanne nicht abgeschätzt werden konnte, ist er dem Tannen-Reliktareal zugeteilt.

#### **2.4.4 Vorgehen zur Kontrolle der modellierten Höhenstufen mit NaiS-LFI Probeflächen**

Die Richtigkeit der Höhenstufen des heutigen Modells wurden mit Hilfe von Ergebnissen des BAFU-Projekts «NaiS-LFI: Zuordnung der NaiS-LFI-Stichprobenpunkte zu Waldgesellschaften» evaluiert. Innerhalb des Projekts NaiS-LFI wurden bisher bei gut 95% der LFI4-Punkte der NaiS-Standortstyp und die Höhenstufe bestimmt. Die dabei festgestellten Höhenstufen wurden mit den modellierten Höhenstufen verglichen. Im Modell wurde keine obersubalpine Stufe modelliert. Für den Vergleich wurden Flächen zwischen der subalpinen Stufe und der 12°C-Isolinie der «Mittleren Maximalen Temperatur im Juli» der obersubalpinen Stufe zugeordnet. Bei Übereinstimmung der Höhenstufe von Modell und Projekt NaiS-LFI wurden die Punkte als «gleich» bezeichnet. Bei Abweichungen wurde zuerst die Zuordnung im Projekt NaiS-LFI geprüft, diese war teilweise falsch und wurde angepasst. Bei den weiteren Punkten ohne Übereinstimmung wurde die Abweichung analysiert und gemäss Tab. 28 beurteilt. Bei den Punkten mit beschränkter oder ohne Übereinstimmung wird mehrheitlich davon ausgegangen, dass die Zuordnung im Projekt NaiS-LFI richtig ist. Übereinstimmung auf der Fläche bedeutet, dass sowohl bei NaiS-LFI als auch beim Modell Abenis die gleiche Höhenstufe angesprochen wurde. Übereinstimmung auf der Linie bedeutet, dass bei beiden die gleiche Höhenstufe angesprochen wurde und dass die Höhenstufengrenze auf plus minus 30 m an der gleichen Stelle gezogen wurde. Übergang bei NaiS-LFI heisst, dass ein Übergang von einer Höhenstufe zu einer

anderen Höhenstufe angegeben ist. Das heisst, man befindet sich nahe bei der Höhenstufengrenze.

Tab. 28: Zuordnung der Punkte beim Vergleich der Höhenstufe des Modells Abenis und der Zuordnung gemäss Projekt NaiS-LFI (nachfolgend als «LFI» bezeichnet).

Zuordnung	Interpretation
Abenis = LFI	Übereinstimmung in der Fläche
Abenis = LFI, aber LFI zusätzlich Übergang, Abenis im Bereich von plus minus 30 m der Höhenstufengrenze	Übereinstimmung auf der Linie
Abenis = LFI, aber LFI zusätzlich Übergang	Beinahe Übereinstimmung auf der Fläche
Abenis nicht gleich LFI, aber Abenis = Übergang LFI und im Bereich von plus minus 30 m der Höhenstufengrenze	Beinahe Übereinstimmung auf der Linie
Abenis nicht gleich LFI, aber Abenis = Übergang LFI	Abweichung auf der Fläche deutlich innerhalb des Fehlers des Modells Abenis
Abenis nicht gleich LFI, aber im Bereich von plus minus 30 m der Höhenstufengrenze	Abweichung auf der Fläche deutlich innerhalb des Fehlers des Modells Abenis
Abenis nicht gleich LFI	Keine Übereinstimmung innerhalb von plus minus 30 m der Höhenstufengrenze des Modells Abenis. Da beim Modell Abenis mit einem Fehler von plus minus 50 – 100 Höhenmeter gerechnet wird, kann innerhalb des Fehlers des Modells trotzdem eine Übereinstimmung bestehen.

#### 2.4.5 Vorgehen bei der Höhenstufenverschiebung

Für die Analyse wurde der Layer mit den heutigen Höhenstufen (Modell) mit demjenigen der Höhenstufen der Zukunft (einmal Klimazukunft RegCM3, einmal CLM) überlagert. So kann für jede heutige Höhenstufe in Prozent angegeben werden, welche Flächenanteile in Zukunft welche Höhenstufen haben werden.

#### 2.4.6 Vorgehen Lithologievergleich

Die geologischen Kartenblätter von Büren, Moutier und Solothurn wurden von swisstopo nach ihren neuesten Standards harmonisiert. Für den Perimeter der drei Kartenblätter wurden zudem zwei neue Höhenstufenmodelle erstellt. Beim ersten Modell wurde die Lithologie verwendet, welche wir auch für das restliche Projekt verwendeten (Kap. 2.2.1). Beim zweiten Modell verwendeten wir die harmonisierten Kartenblätter. Dazu wurden die Schichten analog zu Klosterhuber 2016 neu eingeteilt nach der Achse sauer – mittel – basisch und nach der Achse weich (tonreich) – mittel – hart (Tab. 29). Als Hilfe für die Einteilung wurden strati.ch sowie die Polygoninformationen der geologischen Karten verwendet. Auf den drei Kartenblättern wurden nur die Lithologie-Klassen 2, 3, 5, 6 und 9 gefunden.

Tab. 29: Systematische Einteilung von Lithologieklassen in den neuen Lithologie-Kartenblättern von Büren, Moutier und Solothurn. Die Klasse 0 umfasst zudem Seen etc. Kurzbezeichnungen Bodenarten: U = Schluff, IU = Schluff-Lehm, uL = schluffiger Lehm, L = Lehm, tL = toniger Lehm, T = Ton, S = Sand, uS = schluffiger Sand.

	<b>Verwitterungseigenschaften, Feinbodenbeschaffenheit nach Klosterhuber 2016</b>	<b>sauer</b>	<b>mittel</b>	<b>basisch</b>
<b>weich</b>	Leicht verwitternd: grobskelettarm (< 25%), tonreich (U, IU, uL, L, tL, T), wasserstauend.	1	2	3
<b>mittel</b>	Durchschnittliches Verwitterungsvermögen: durchschnittlicher Skelettgehalt und mittlere Bodenart oder schwere Bodenart bei höherem Skelettgehalt.	4	5	6
<b>hart</b>	Physikalisch leicht, chemisch schwer verwitternd: grobskelettreich (> 75%), tonarm (S, uS), durchlässig.	7	8	9

Für den Vergleich der Modelle wurden die Stichproben zu den Höhenstufenobergrenzen verwendet. Innerhalb des Perimeters gibt es Stichproben für die Höhenstufenobergrenzen untermontan und submontan; die im Gebiet auch vorkommende obermontane Stufe weist dort keine Obergrenze auf, weshalb diese Flächen als leere Flächen dargestellt wurden.

Für die Modelle wurden die Gleichungen der Region Jura (siehe Kap. 2.4.1.5) verwendet. Der Perimeter liegt auf der Grenze und beinhaltet Teile der Regionen Jura und Mittelland. Die meisten Stichproben liegen aber in der Region Jura. Ausserdem wird beim Höhenstufenmodell für die Nordschweiz die Föhnhäufigkeit mitberücksichtigt, welche für den Perimeter überall Null ist und somit keine Rolle spielt.

Es wurde nur für diejenigen Lithologieklassen mit N grösser oder gleich 50 ein Modell erstellt (Tab. 30). Dies hat zur Folge, dass für die übrigen Lithologieklassen innerhalb des Perimeters kein Modell erstellt wird und die Flächen somit leer bleiben. Die Flächen der Klasse 0 (übrige Flächen) bleiben ebenfalls leer.

Tab. 30: Anzahl Stichproben pro Lithologiekategorie im Vergleich der Lithologien.

<b>Im Gesamtprojekt verwendete Lithologiekarte</b>	
SM (total N = 316): Geo 1 → N = 179 Geo 2 → N = 102 Geo 3 → N = 35	UM (total N = 708): Geo 1 → N = 55 Geo 2 → N = 653
<b>Aufgrund neuer Kartengrundlagen abgeleitete Lithologieklassen</b>	
SM (total N = 315): Geo 2 → N = 50 Geo 5 → N = 186 Geo 9 → N = 79	UM (total N = 708): Geo 2 → N = 38 Geo 3 → N = 1 Geo 5 → N = 227 Geo 6 → N = 44 Geo 9 → N = 398

### 3 Resultate

#### 3.1 Niederschlagskarten der beiden Klimazukünfte CLM und RegCM3

Der Niederschlag ist ein wesentlicher Parameter für die Modellierung sowohl der Höhenstufengrenzen als auch der Arealgrenzen. Deshalb werden hier die zwei Klimazukünfte kurz dargestellt und verglichen (Abb. 60 bis Abb. 62, alles im Raster 25x25m).

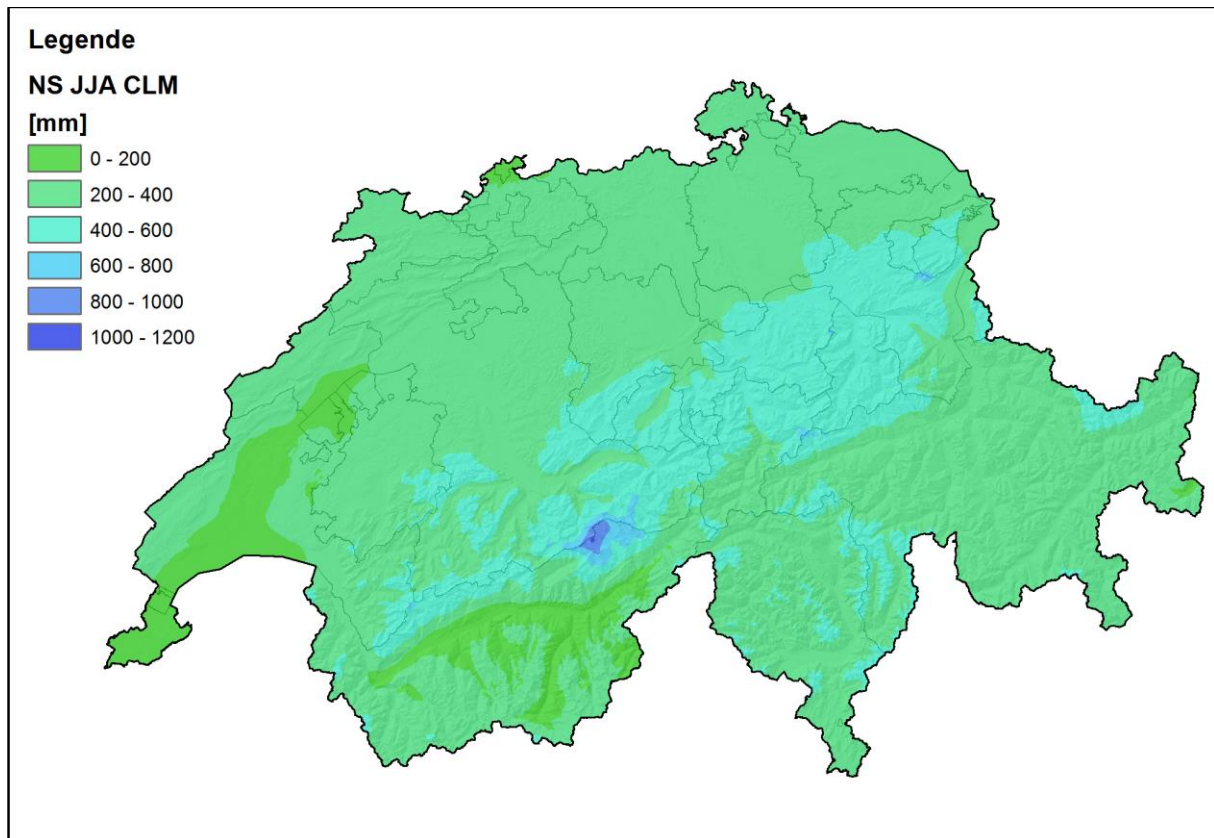


Abb. 60: Niederschlag im Juni, Juli und August bei der Klimazukunft CLM, Periode 2070-2099.

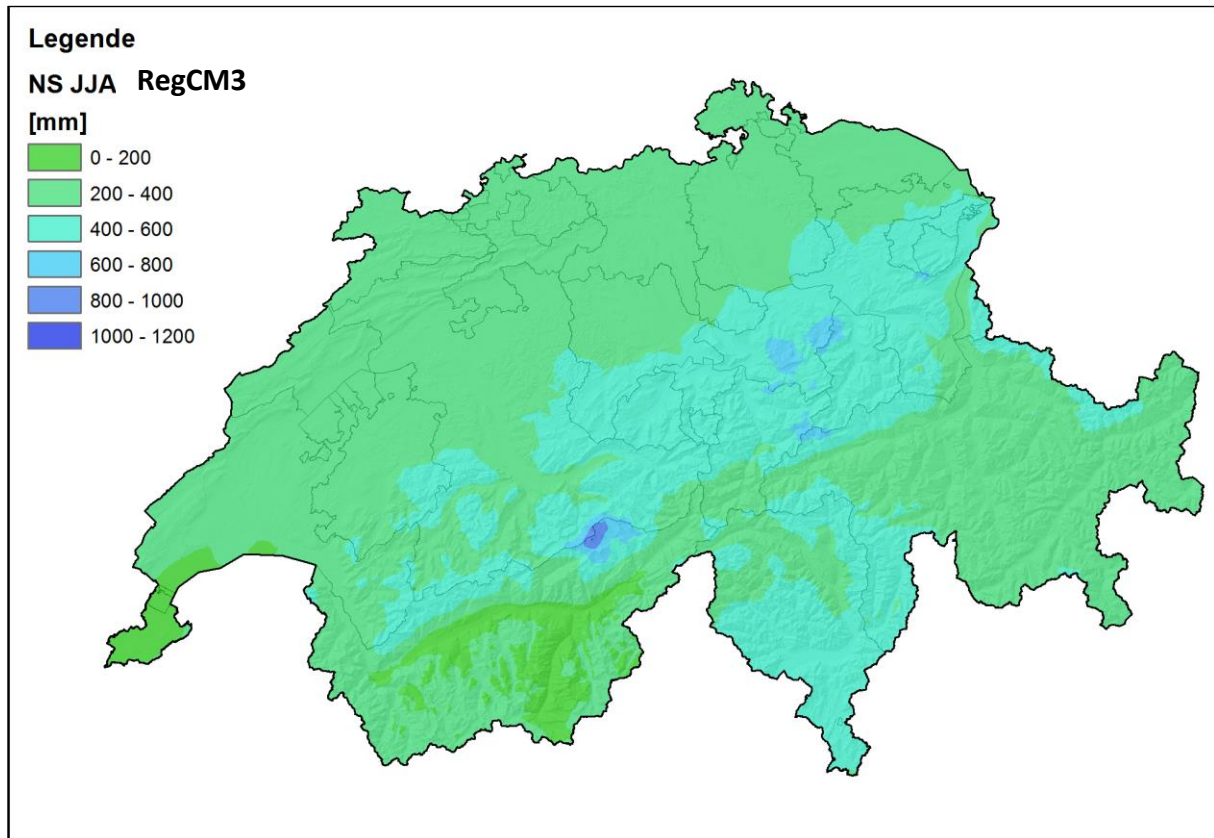


Abb. 61: Niederschlag im Juni, Juli und August bei der Klimazukunft RegCM3, Periode 2070-2099.

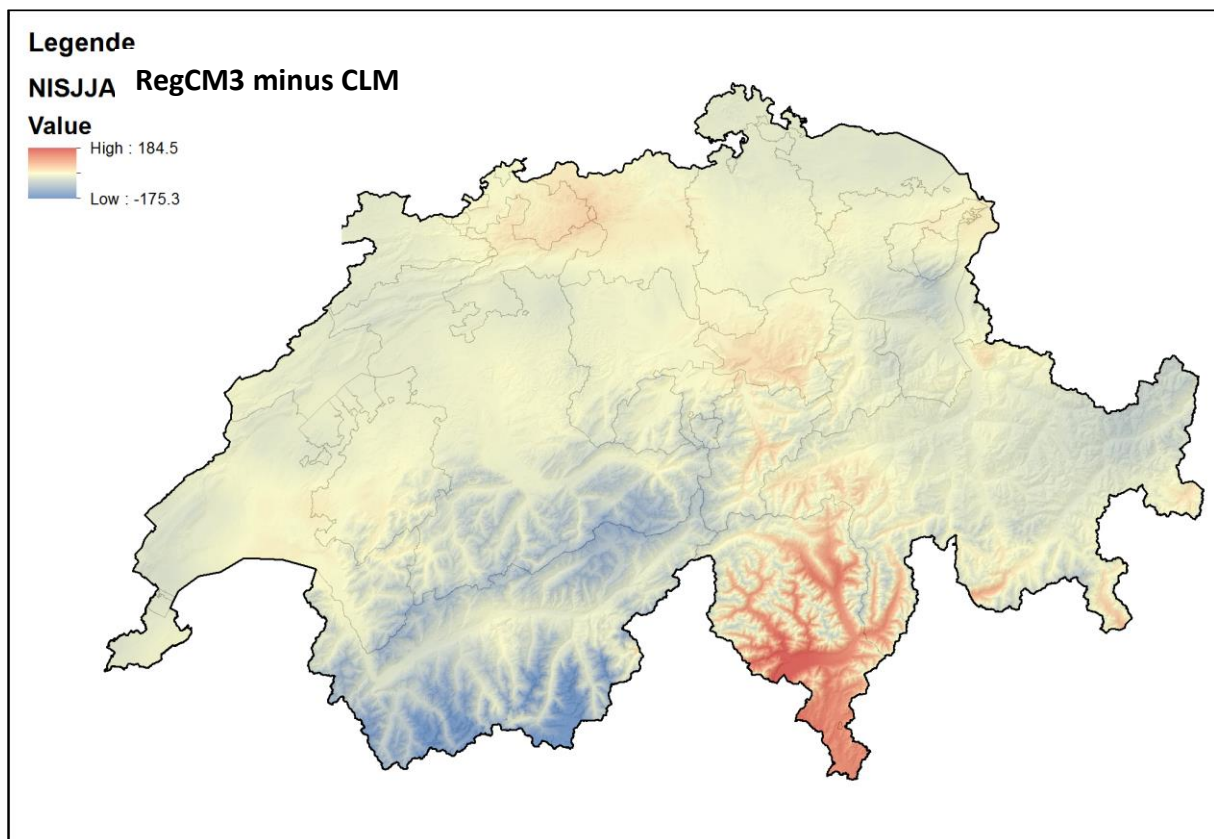


Abb. 62: Unterschied im Niederschlag im Juni, Juli und August zwischen RegCM3 und CLM in mm. Der Niederschlag der Klimazukunft CLM wurde von dem der Klimazukunft RegCM3 abgezogen (RegCM3 minus CLM). In rot eingefärbten Gebieten ist die Klimazukunft RegCM3 deutlich nasser als die Klimazukunft CLM, in blauen Gebieten ist es umgekehrt. In gelb eingefärbten Gebieten weisen beide Klimazukunftse ähnlich hohe Niederschläge auf.

Die Bezeichnung «weniger trocken» für die Klimazukunft RegCM3 stimmt nicht überall in der Schweiz. Im Kanton VS und weniger deutlich in Regionen vom Kanton GR fällt im Sommer weniger Niederschlag als bei der Klimazukunft CLM. Das CLM ist trockener im Sommer als das RegCM3 in der Nordschweiz und im Tessin, Bergell, Puschlav, Misox und im Raum Basel.

### 3.2 Temperaturkarten der beiden Klimazukünfte CLM und RegCM3

Die Temperatur ist ein weiterer wesentlicher Parameter für die Modellierung sowohl der Höhenstufengrenzen als auch der Arealgrenzen. Deshalb werden hier die zwei Klimazukünfte kurz verglichen (Abb. 63, Abb. 64). Beide Abbildungen zeigen, dass die Klimazukunft RegCM3 nie höhere Temperaturen aufweist als die Klimazukunft CLM.

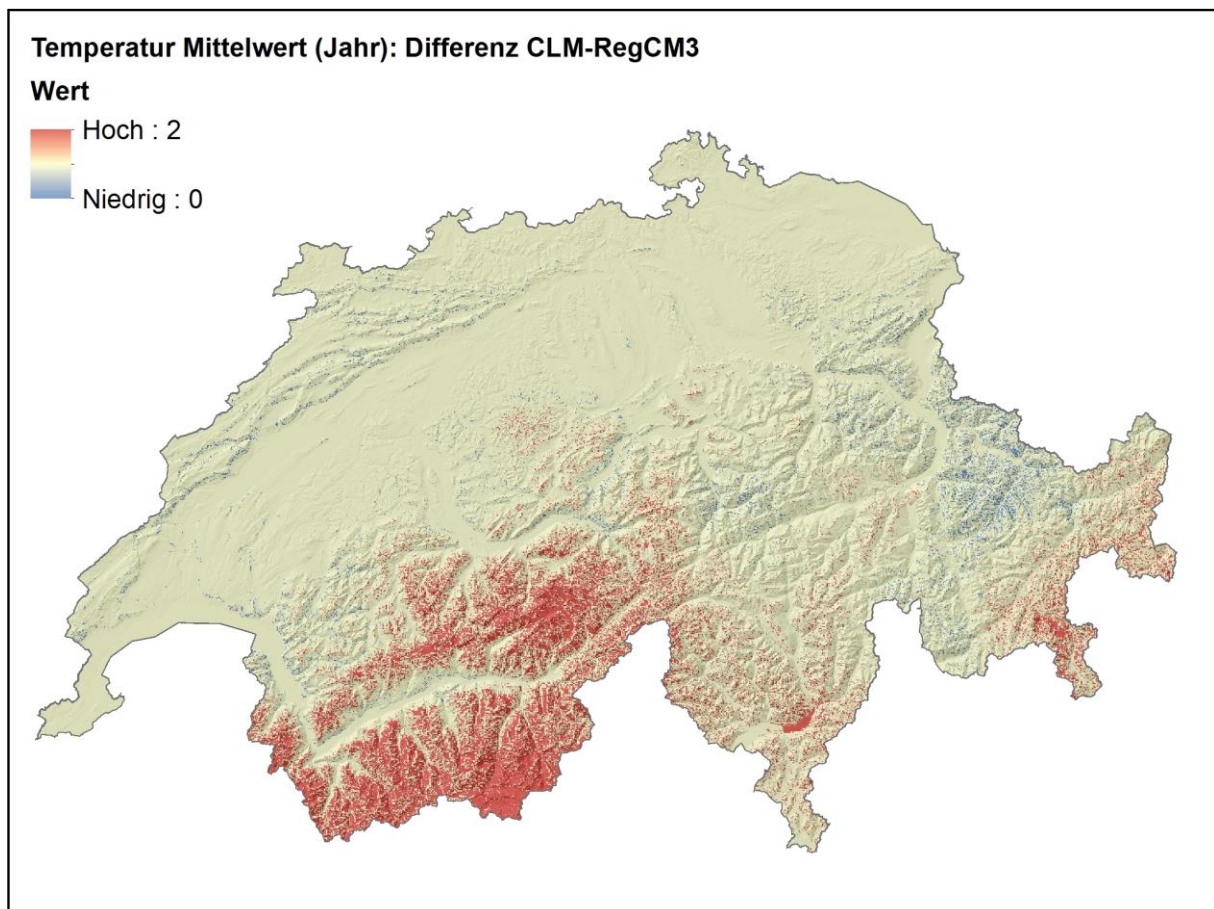


Abb. 63: Unterschied bei der mittleren Jahrestemperatur zwischen CLM und RegCM3 in °C. Die Jahresmitteltemperatur von der Klimazukunft RegCM3 wurde von der Klimazukunft CLM abgezogen (RegCM3 minus CLM). In rot eingefärbten Gebieten ist die Klimazukunft RegCM3 deutlich kühler als die Klimazukunft CLM, in gelben Gebieten ist der Unterschied weniger gross und in blau eingefärbten Gebieten weisen beide Klimazukünfte ähnliche Temperaturen auf.



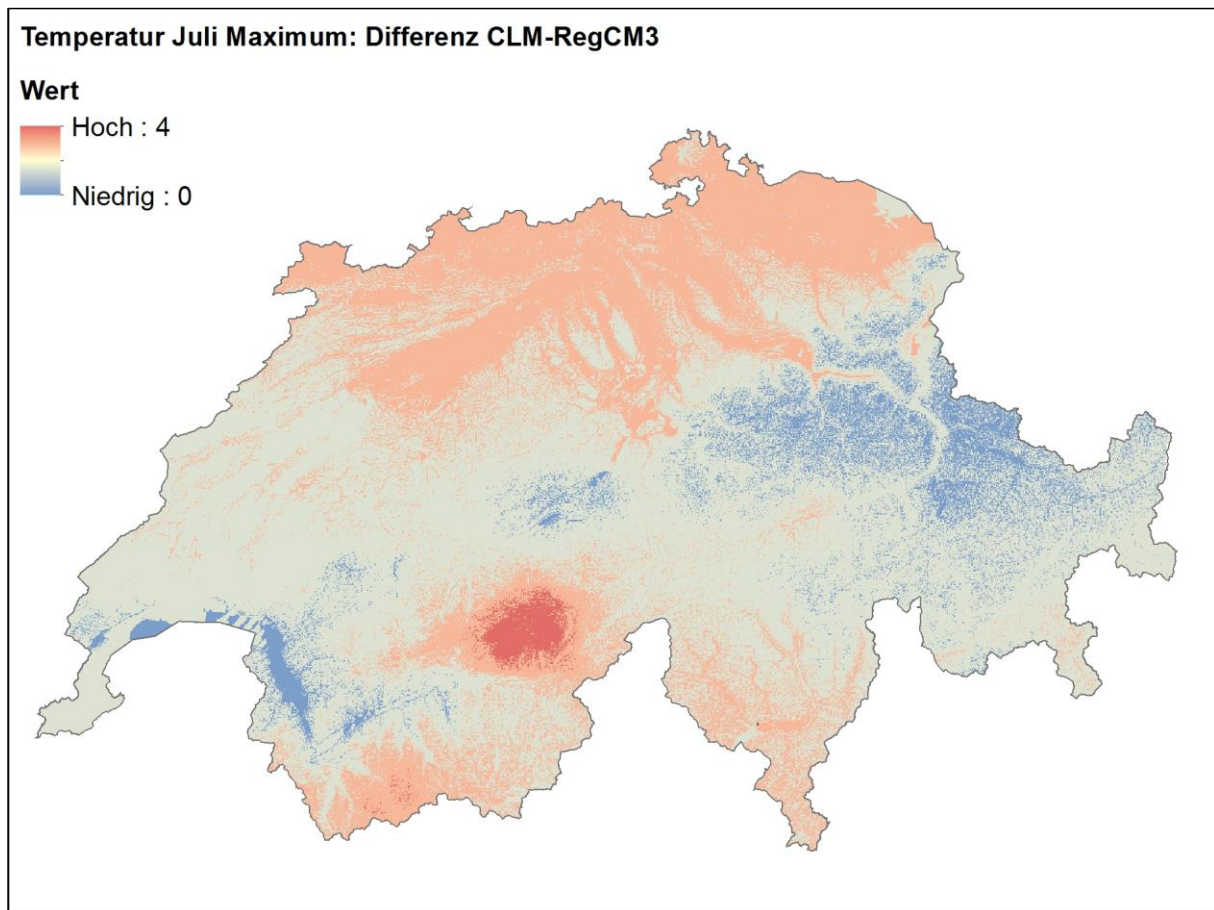


Abb. 64: Unterschied bei der maximalen Temperatur im Juli zwischen CLM und RegCM3 in °C. Die Jahresmitteltemperatur von der Klimazukunft RegCM3 wurde von der Klimazukunft CLM abgezogen (RegCM3 minus CLM). In rot eingefärbten Gebieten ist die Klimazukunft RegCM3 deutlich kühler als die Klimazukunft CLM, in gelben Gebieten ist der Unterschied weniger gross und in blau eingefärbten Gebieten weisen beide Klimazukünfte ähnliche Temperaturen auf.

Deutlich wärmer als das RegCM3 ist das CLM im Mittelland, in grossen Teilen des VS und in der Südschweiz.

### 3.3 Vegetationshöhenstufenkarten

Im Folgenden wird die Karte mit den Höhenstufen innerhalb des heutigen Waldareales dargestellt (Abb. 65). Im Anhang 8.12 befinden sich sämtliche Höhenstufenkarten für das heutige Klima und die Klimazukünfte RegCM3 und CLM in der Periode 2070-2099 und im Anhang 8.13 befinden sich die gleichen Karten, aber mit Unterteilung von Tannen-Haupt-, Tannen-Neben- und Tannen-Reliktareal.

Wegen der oberen Begrenzung der Arealmodelle kann es vorkommen, dass Tannen-Hauptareal und Tannen-Nebenareal oder Tannen-Nebenareal und Tannen-Reliktareal am selben Hang übereinander vorkommen, wenn die modellierte hochmontane Stufe höher als die Grenze der jeweiligen Arealmodellierung (heute bei 1500 m ü. M. / 2070-2099 bei 1900 m ü. M.) liegt. Dies ist in Realität nicht so, modelltechnisch aber nicht behebbar. Wenn die modellierte hochmontane Stufe hingegen tiefer liegt als die jeweilige Grenze der Arealmodellierung, ist dieses Vorkommen von zwei verschiedenen Tannen-Arealen übereinander am selben Hang klimatisch bedingt.

Bei den Karten handelt es sich um Rohfassungen, es wurden keine Arrondierungen bei den Höhenstufenflächen vorgenommen, einzig Artefakte (leere Pixel) behoben. Aus diesem Grund

bestehen z.T. sehr kleine Flächen oder Mosaik aus / unscharfe Übergänge bei zwei Höhenstufen. Das Grundproblem ist, dass einige den Modellen zugrundeliegenden Hintergrundkarten nur im 200 m Raster vorliegen (Lithologie und ETa/ETp). Diese Fehler behoben wir bewusst nicht, da ansonsten die Veränderungen von den heutigen zu den zukünftigen Höhenkarten nicht mehr nachvollziehbar sind. Für die Klasse «übrige Flächen» (eigentlich Seen und Gletscherflächen; leider auch Flächen innerhalb des Waldareals) der Lithologiekarte wurde keine Höhenstufe modelliert, die Höhenstufenkarten weisen an entsprechenden Stellen keinen Wert auf.

### 3.3.1 Modellierung der Höhenstufen für heutiges Klima

Folgende Höhenstufen kommen nur auf der Alpensüdseite vor: hyperinsubrisch, collin mit Buche, unter-/obermontan (Abb. 65). Die obersubalpine Stufe wurde nicht modelliert, sie wird in den Karten aber in der ganzen Schweiz als Stufe zwischen der modellierten oberen Grenze der subalpinen Stufe und der 12°C Grenze der «Mittleren Maximalen Temperatur im Juli» abgebildet.

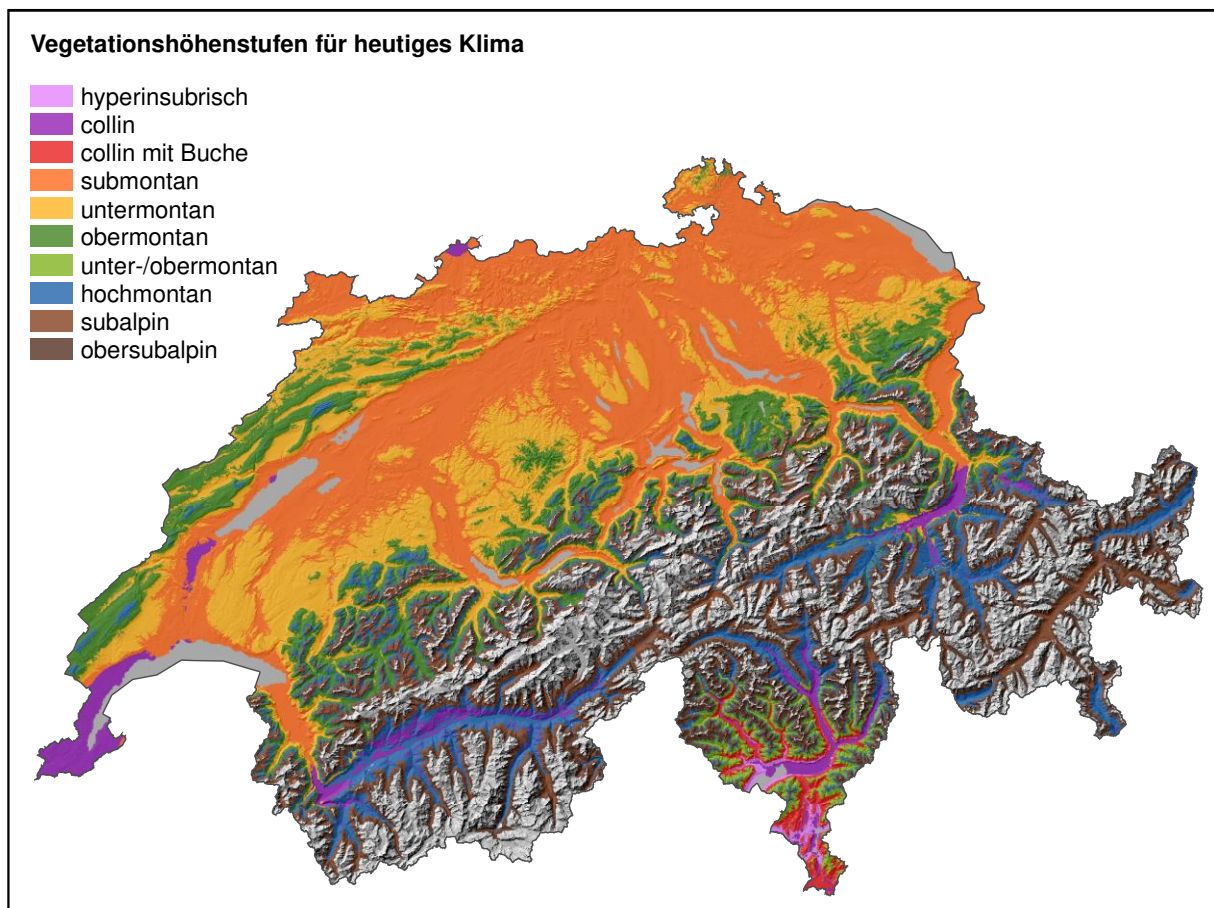


Abb. 65: Modellierte Höhenstufen für heutiges Klima.

### 3.3.2 Überprüfung der modellierten Höhenstufen für heutiges Klima

#### 3.3.2.1 Nordschweiz

Grössere Abweichungen als +/- 50 Höhenmeter oder Fehler bei der Zuteilung der Höhenstufen weist die Karte an ca. 9 Orten in der Nordschweiz und ca. 15 Orten in den Zentralalpen (VS/GR) auf (siehe Fehlerliste im Anhang 8.3). Allgemein ist Folgendes zu vermerken:

- Im östlichen Teil des Kantons SH, der zur Standortsregion Mittelland gehört, wurde deutlich zu viel obermontane Stufe modelliert. Der westliche Teil des Kantons SH gehört zur Standortsregion Jura, hier wurden die Obergrenzen der sub- und untermontanen Höhenstufe etwas zu tief modelliert. In Schaffhausen existiert nur eine Klimamessstation in Stadtnähe am Südhang. Am Jurasüdfuss existiert nur eine Klimamessstation und zudem keine repräsentative, dies kann zu Fehlern bei den Temperaturkarten geführt haben.
- Im Kanton SG wurde submontan und untermontan z.T. zu hoch modelliert.
- Im Kanton GR wurde die subalpine Stufe an mehreren Orten zu tief modelliert.
- Im VS und GR ist die colline Stufe z.T. zu grossflächig modelliert. Hingegen fehlt die colline Stufe im VS grossflächig am Südosthang beim Rhoneknien (Martigny) und am Nordwesthang zwischen Saxon und Sierre.

Kleinflächige Fehler treten vor allem auch bei azonalen Standorten (Blockschuttwälder, vernässte Standorte, etc. und auf Gley) auf, da das Modell nur zonale Standorte darstellen kann. Im Flachland bei geringer Höhenzunahme führen kleine Abweichungen in der Modellierung gleich zu sehr grossen Flächenverschiebungen der Höhenstufen (z.B. Berner Mittelland, St. Galler Mittelland).

Die Modellierung weist zwischen der collinen und obermontanen Stufe im Grenzgebiet der Buche z.T. eine hochmontane Stufe auf. Damit wird dargestellt, dass angrenzend an die colline Stufe die Verhältnisse für die Buche noch ungünstig sind, aber weiter oben, wo es kühler ist und mehr Niederschläge hat, für die Buche günstig werden. Die Grenze der Verbreitung von Buche und Tanne ist im Gelände ohnehin keine klare Linie, weshalb sie schwierig zu modellieren ist.

#### 3.3.2.2 Tessin

Im TI liegen die Höhenstufen in den tieferen Gebieten wegen den wärmeren Temperaturen meist höher als im Norden. Im TI ist wichtig zu berücksichtigen, dass die Höhenstufen in den 1990er Jahren modelliert wurden, als die hyperinsubrische Stufe (neu vordringende Palmen) noch nicht so gut sichtbar war wie heute.

Insbesondere in der Leventina stimmt die Karte nach LZ sehr gut. Die hochmontane und subalpine Stufe sind gut modelliert. Gut sind auch die Täler im Locarnese abgebildet. Der wichtigste Unterschied im Nordtessin, nämlich eine mächtige hochmontane Stufe und das direkte Angrenzen an die colline Stufe in der Leventina und im Bleniotal vs. einer sehr mächtigen montanen Stufe und einer nur wenig mächtigen hochmontanen Stufe im Locarnese ist gut gelungen. Es zeigt, dass die klimatische Eingrenzung des Buchenareals (Absinken und Auskeilen der Buche) gegen das Alpeninnere gut erfasst wurde, und dass dementsprechend die klimatischen Faktoren, die gewählt worden sind, richtig beurteilt wurden.

Problematischer ist das zu weite Vordringen der Buche im Calancatal (heutzutage kommen Buchenbestände nur bis Arvigo vor und nicht bis fast ans Ende des Tales wie modelliert) und das etwas zu wenig weite Vorstossen der Buche im Lavizzaratal. Diese Fehler könnten

entstanden sein, da wir von diesen Tälern keine Temperatur-, Luftfeuchtigkeits- und Windwerte (vielleicht wurde der Nordföhn im Calancatal unterschätzt) besitzen und evtl. könnte auch die Geologie noch eine gewisse Rolle spielen (Sedimenttaschen im Lavizzaratal, welche die Buche evtl. fördern). Wichtig zu beachten ist, es handelt sich um Modellierungen mit Hilfe von Klimavariablen, die von LZ ausgewertet wurden. Es stand etwa im Misox nur eine einzige Temperatur-, Wind- und Luftfeuchtigkeitsstation zur Verfügung, nämlich das hochgelegene San Bernardino. Die Kaltluftseen beispielweise mussten aufgrund von Satellitendaten gutachterlich bestimmt werden. Noch unsicherer ist die Lage bezüglich Nordföhn, man hat eigentlich keine grosse Ahnung, wie weit er vorstösst, bis Mesocco oder Pian San Giacomo, wenn zum Beispiel Comprovasco und Faido ebenfalls Nordföhn haben. Kleine Abweichungen bei den modellierten Höhenstufen im TI können auch auftreten aufgrund von kleinen Fehlern bei der Temperaturkarte: Die Temperatur liegt auch im Sommer an den Nordhängen tiefer als an den Südhängen (dies wurde bei der Erstellung der Klimakarte aber nicht so modelliert, nur im Winter wurde dies berücksichtigt), was nach heutigen Erkenntnissen besser berücksichtigt werden müsste. Nordhänge sind im TI ca. 0.5-1°C kühler, dies führt zu 100-150 m Höhenunterschieden. Bisher existieren keine Klimamessstationen an Nordhängen für lokalklimatische Messungen im TI.

Die im TI modellierten Höhenstufenlinien kontrollierte G. Carraro (siehe folgende Abschnitte und Fehlerliste im Anhang 8.3).

### **Hyperinsubrische Stufe**

Die Modellierung widerspiegelt die mittlere Lage der hyperinsubrischen Stufe in den 1960-1990er Jahren gut. Heute sind aber die Standorte mit dichten Laurophyllen zum Teil noch höher zu beobachten. Sehr gut ist die Abtrennung der Talböden Eingangs Seitentäler modelliert, die kaum zur hyperinsubrischen Stufe dazu gehören. Die Modellierung differenziert zwischen den Nord- und Südhängen aber zu wenig. Die Obergrenze der hyperinsubrischen Stufe ist an der Südseite eher zu tief modelliert, an den Nordhängen aber meistens 100-200 m zu hoch, d.h. in der Formel sollte der Faktor Globalstrahlung im Januar stärker ins Gewicht fallen.

### **Collin ohne Buche**

Die Obergrenze der collinen Stufe ohne Buche stimmt sehr gut in den oberen Bereichen und ist sehr gut zwischen Nord- und Südhängen differenziert, mit deutlichen, gut beobachtbaren Differenzen. Ungewiss sind die Talboden-Inseln «collin ohne Buche» in der Magadino-Ebene südlich Biasca. Unsicher ist, ob der Grund für ein Ausfallen der Buche dort das «Planare Klima» darstellt oder aufgrund von Kaltluftseen, Föhneinfluss oder durchlässigen Schotterböden auftritt. In Wirklichkeit gibt es dort fast keinen Wald mehr (v.a. keinen Klimaxwald), daher war die Modellierung nicht beurteilbar.

### **Collin mit Buche**

Die Modellierung trifft im Mittel- und Nordtessin sehr gut zu. Die Modellierung differenziert gut zwischen Nord- und Südhängen, ausser im Sottoceneri, wo nach Ansicht von GC die modellierten Höhenlinien in den Expositionen West, Nord bis Ost z.T. 150-250 m zu tief liegen.

### **Unter- und obermontane Stufe**

Die unter- und obermontane Stufe stimmt gut im Haupttal Misox, die Buchenbestände bleiben effektiv in der Höhe abgegrenzt und schieben sich in die Seitentäler hinein, dies bis etwa Mesocco. Aber der unterhalb modellierte hochmontane Streifen im Talboden des Misoxs (nord-exponierte Hangfusslagen, 300-400 m dick), welcher fast bis Roveredo reicht, wo sogar noch Buchen gedeihen, müsste als collin (ohne Buche) bezeichnet werden.

### **Hochmontane und subalpine Stufe**

Die Modellierung passt sehr gut für das mittlere und südliche TI, sie weist eine gute Differenzierung zwischen Nord- und Südhängen auf. Die Modellierung ist fehlerhaft bei der Biasca-Leventina-Blenio Abzweigung: Dort dringt die unter- und obermontane Stufe (d.h. mit Buche) 5 bis 8 km zu weit in die Täler.

Die modellierten Tannenareale wurden im TI durch GC und LZ kontrolliert und folgendermassen beurteilt: Möglicherweise geht das Nebenareal der Tanne in der oberen Leventina noch etwas weiter taleinwärts und könnte das Bedrettotal bis in die Gegend von Ossasco erfassen. Dies mit einem möglichen Unterbruch bei Airolo, weil dort der Nordwind stärker bodenaustrocknend wirkt, während er im Bedrettotal als Wind deutlich weniger zu spüren ist. Insbesondere die tiefgründigen Böden am Nordhang oberhalb Ossasco, welche zudem recht schattig sind, könnten der Tanne zusagen. Damit wären dort mehr als nur kleinste Bestände denkbar.

Im Bleniotal wurde wahrscheinlich das Tannen-Hauptareal zu wenig weit ins Tal hineingezogen. Denn in der Leventina, wo das Hauptareal der Tanne sehr plausibel bis in die mittlere Leventina hinaufreicht, ist das Klima nicht ozeanischer als im Bleniotal. Gemäss klimatologischen Analogien könnte man also annehmen, dass das Tannen-Hauptareal etwa bis in die Gegend Torre - Aquila reichen müsste. Möglicherweise ist im mittleren Bleniotal die Föhnhäufigkeit etwas zu hoch modelliert worden. Besonders in der Höhe um 1000 bis 1500 m, also im Bereich, wo die Tanne eine hohe Konkurrenzkraft hat, könnte die Föhnhäufigkeit etwas zu hoch ausgefallen sein. Die Häufigkeit des Föhns wurde in diesem Bereich bekanntlich aufgrund der Stationsangaben von Comprovasco auf 575 m ü. M. und mit Hilfe eines Höhengradienten ermittelt. Diese Interpolation kann gewisse Abweichungen gegenüber der tatsächlichen Föhnhäufigkeit mit sich bringen.



### 3.3.3 Kontrolle der modellierten Höhenstufen heute mit NaiS-LFI-Probeflächen

Zur Validierung der modellierten Höhenstufen wurden diese mit NaiS-LFI-Probeflächen (nachfolgend als «LFI» bezeichnet) verglichen. Die Abb. 66 zeigt die verwendeten NaiS-LFI-Probeflächen und die Übereinstimmung mit dem Höhenstufenmodell. In Abb. 67 wird die räumliche Verteilung der Stichproben aufgezeigt, die zur Kalibrierung der Höhenstufenmodellierung verwendet wurden.

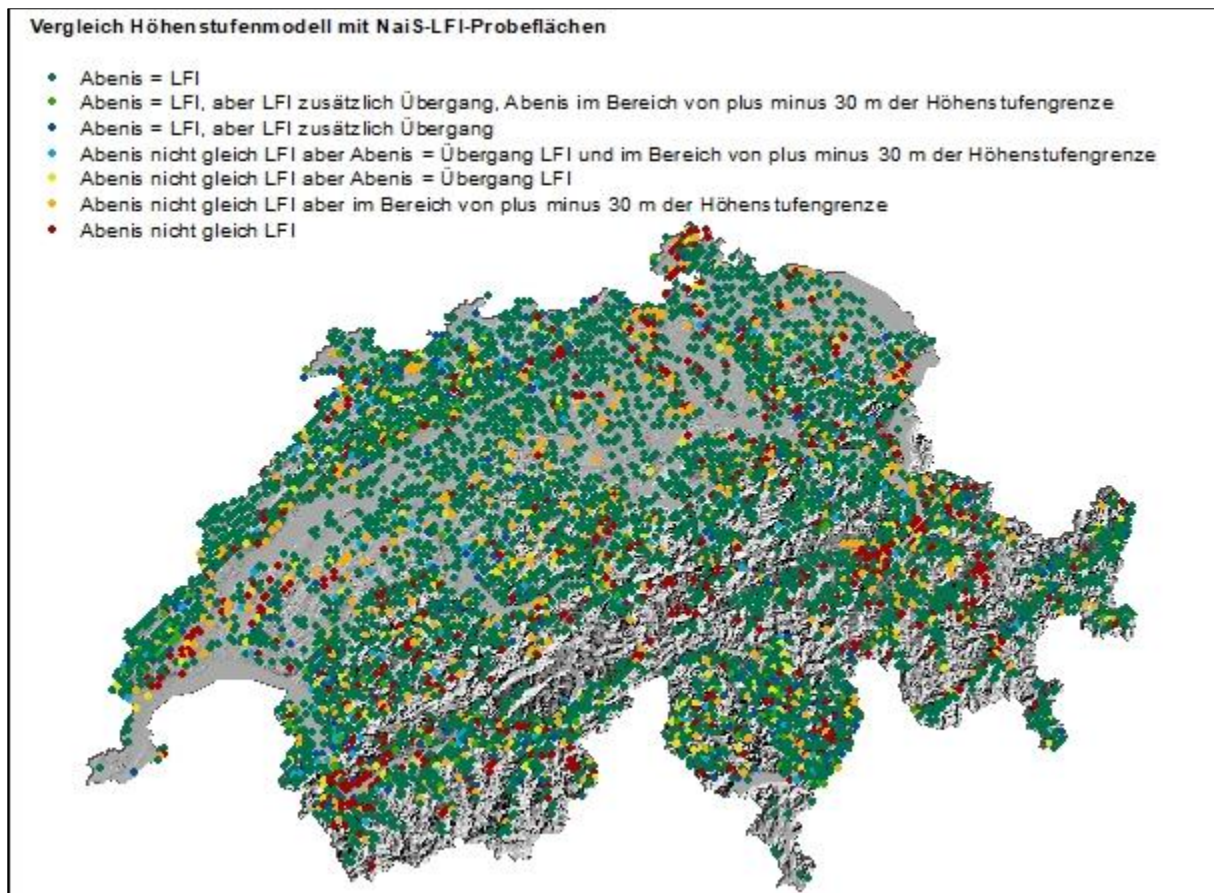


Abb. 66: Kontrolle der für das heutige Klima modellierten Höhenstufen mit NaiS-LFI-Probeflächen.

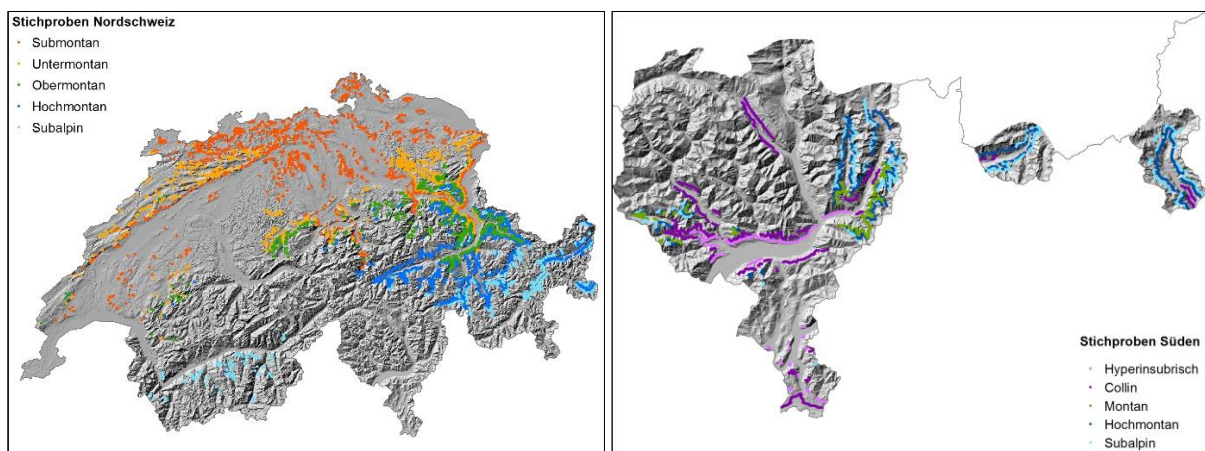


Abb. 67: Räumliche Verteilung der Stichproben für die Modellierung der Höhenstufengrenzen.



Insgesamt wurden 6067 NaiS-LFI-Probeflächen verglichen. Davon stimmen 4400 (72%) der NaiS-LFI-Flächen mit den modellierten Höhenstufen überein (Abenis = LFI), 574 (9%) stimmen nicht überein (Abenis nicht gleich LFI). Die restlichen 1093 NaiS-LFI-Flächen (18%) sind im Grenzbereich oder bei Übergängen und liegen klar innerhalb des Fehlers des Höhenstufenmodells Abenis. Eine Übereinstimmung von 91% zeigt, dass die Modellierung der Vegetationshöhenstufen gut gelungen ist. Tab. 31 zeigt das Resultat des Vergleichs nach den Höhenstufen im Modell. Tab. 32 zeigt das Resultat nach Kantonen, Tab. 33 das Resultat nach Standortsregionen.

Bei der collinen Stufe ergab der Vergleich am wenigsten Übereinstimmung mit 50% ungleichen Flächen. Dies überrascht nicht, denn einerseits ist die colline Stufe in der Schweiz nur kleinflächig vertreten, d.h. ein grosser Anteil der collinen Stufe liegt im Grenzbereich zur submontanen oder hochmontanen Höhenstufe, wo die Zuordnung schwierig ist. Andererseits ist es auch im Gelände schwierig, die Grenze der collinen Stufe zu bestimmen. Auch die hyperinsubrische Stufe ist in der Schweiz nur sehr kleinflächig vertreten. Bei dieser Stufe sind 19% der verglichenen NaiS-LFI-Probeflächen ungleich. Die untermontane Stufe weist 13% ungleiche NaiS-LFI-Flächen und ausserdem 26% Grenzen und Übergänge auf. Die Grenzen zwischen submontan und untermontan sowie zwischen untermontan und obermontan sind im Gelände oft sehr fliessend. Die obersubalpine Stufe weist 12% ungleiche NaiS-LFI-Flächen auf. Diese Stufe wurde im Rahmen dieses Projektes allerdings nicht modelliert, sondern nur vereinfacht abgeleitet. Bei allen übrigen Höhenstufen ist der Anteil ungleicher NaiS-LFI-Flächen unter 10%. Das Höhenstufenmodell wurde gegen oben entlang der 12°C Grenze der maximalen Lufttemperatur im Juli abgeschnitten. 24 NaiS-LFI-Flächen liegen oberhalb dieser Grenze.

Tab. 31: Vergleich der Höhenstufenmodellierung und der NaiS-LFI-Probeflächen nach Höhenstufen im Modell.

Höhenstufen	Anzahl								Total
	Abenis = LFI	Abenis = LFI, aber LFI zusätzlich Übergang, Abenis im Bereich von plus minus 30 m der Höhenstufengrenze	Abenis = LFI, aber LFI zusätzlich Übergang	Abenis nicht gleich LFI aber Abenis = Übergang LFI und im Bereich von plus minus 30 m der Höhenstufengrenze	Abenis nicht gleich LFI aber Abenis = Übergang LFI	Abenis nicht gleich LFI aber im Bereich von plus minus 30 m der Höhenstufengrenze	Abenis nicht gleich LFI	Abenis nicht gleich LFI [%]	
hyperinsubrisch	2		4			7	3	19	16
collin	47		5	1	4	8	65	50	130
collin mit Buche	34		2	1	1		0	0	38
submontan	932	12	33	12	18	42	48	4	1097
untermontan	830	35	58	34	40	188	170	13	1355
obermontan	839	22	24	22	22	78	80	7	1087
unter-/obermontan	93	4	4	7	2	5	10	8	125
hochmontan	801	25	37	18	33	63	72	7	1049
subalpin	558	29	36	10	20	44	58	8	755
obersubalpin	264	10	13	7	21	28	48	12	391
- *						4	20	83	24
Gesamtergebnis	4400	137	216	112	161	467	574	9	6067

\* oberhalb der 12°C Grenze der Mittleren Maximalen Lufttemperatur im Juli (Modell abgeschnitten)

Kantone, bei denen viele Höhenstufengrenzen für die Eichung des Modells verwendet wurden, weisen eher eine gute Übereinstimmung auf. Ausgenommen davon sind folgende Kantone: GR, hier gibt es sehr unterschiedliche klimatische und geologische Verhältnisse, was die Beurteilung im Feld und die Modellierung der Höhenstufen erschwert. SH: Hier stimmt das Modell wie in Kapitel 3.3.2 erwähnt nicht so gut.

Tab. 32: Vergleich der Höhenstufenmodellierung und der NaiS-LFI-Probeflächen nach Kantonen.

Kantone	Anzahl							Abenis nicht gleich LFI [%]	Total
	Abenis = LFI	Abenis = LFI, aber LFI zusätzlich Übergang, Abenis im Bereich von plus minus 30 m der Höhenstufengrenze	Abenis = LFI, aber LFI zusätzlich Übergang	Abenis nicht gleich LFI aber Abenis = Übergang LFI und im Bereich von plus minus 30 m der Höhenstufengrenze	Abenis nicht gleich LFI aber Abenis = Übergang LFI	Abenis nicht gleich LFI aber im Bereich von plus minus 30 m der Höhenstufengrenze	Abenis nicht gleich LFI		
AG	192	1	8	3	3	16	16	7	239
AI	20		1			5	2	7	28
AR	38			1		3	1	2	43
BE	679	13	29	18	19	77	53	6	888
BL	72	2	9	4	2	2	4	4	95
BS	1							0	1
FR	152	2	5	4	4	22	16	8	205
GE	7		1			1	1	10	10
GL	79	4	3	3	2	6	5	5	102
GR	751	11	32	8	26	77	140	13	1045
JU	124	6	8	4	2	18	12	7	174
LU	163	2	2	2	4	25	8	4	206
NE	122	1	3	1	3	11	6	4	147
NW	30				1	2	3	8	36
OW	82	1		1	2	12	9	8	107
SG	219	4	7	8	5	20	28	10	291
SH	29	1	3		2	7	15	26	57
SO	123	9	7	1	5	11	9	5	165
SZ	112	2	2	2	1	14	13	9	146
TG	96	1	1	1	5	9	4	3	117
TI	281	24	32	13	29	25	29	7	433
UR	82	1	2	1	1	4	17	16	108
VD	322	28	25	20	20	32	50	10	497
VS	419	23	31	13	19	45	96	15	646
ZG	29				1		2	6	32
ZH	176	1	4	4	5	23	36	14	249

Bei der Auswertung nach Standortsregionen ergibt sich die geringste Übereinstimmung in der Standortsregion «Nördliche Zwischenalpen mit Buche» mit 29% ungleichen NaiS-LFI-Flächen. Die folgenden Standortsregionen weisen einen Anteil von ungleichen NaiS-LFI-Flächen zwischen 12 und 15% auf: «Nördliche Zwischenalpen ohne Buche», «Kontinentale Hochalpen» und «Südliche Randalpen mit Fichte». In den übrigen Standortsregionen sind weniger als 10% der NaiS-LFI-Flächen ungleich.

Tab. 33: Vergleich der Höhenstufenmodellierung und der NaiS-LFI-Probenflächen nach Standortsregionen.

Standortsregionen	Anzahl								total
	Abenis = LFI	Abenis = LFI, aber LFI zusätzlich Übergang, Abenis im Bereich von plus minus 30 m der Höhenstufengrenze	Abenis = LFI, aber LFI zusätzlich Übergang	Abenis nicht gleich LFI aber Abenis = Übergang LFI und im Bereich von plus minus 30 m der Höhenstufengrenze	Abenis nicht gleich LFI aber Abenis = Übergang LFI	Abenis nicht gleich LFI aber im Bereich von plus minus 30 m der Höhenstufengrenze	Abenis nicht gleich LFI	Abenis nicht gleich LFI [%]	
Jura	722	41	49	22	26	70	63	6	993
Mittelland	1076	11	29	22	32	110	115	8	1395
Nördliche Randalpen	1198	29	47	37	30	152	131	8	1624
Nördliche Zwischenalpen mit Buche	107	3	8	5	9	15	60	29	207
Nördliche Zwischenalpen ohne Buche	469	13	17	9	17	46	77	12	648
Kontinentale Hochalpen	410	11	17	3	12	40	73	13	566
Südliche Zwischenalpen	216	11	26	2	20	11	20	7	306
Südliche Randalpen mit Fichte	161	12	17	11	13	19	31	12	264
Südliche Randalpen mit Fichtenvorposten	32	5	5	1	2	4	5	9	54
Südliche Randalpen ohne Fichte	8							0	8

### 3.3.4 Modellierung der Höhenstufen mit der Klimazukunft RegCM3

Ein Vergleich der Modellierung RegCM3 (Abb. 68) mit der Modellierung von PorTree+ wurde im Projektteil «Vergleich verschiedener Modelle der Baumartenverbreitung» (siehe Frehner et al. 2017) durchgeführt.

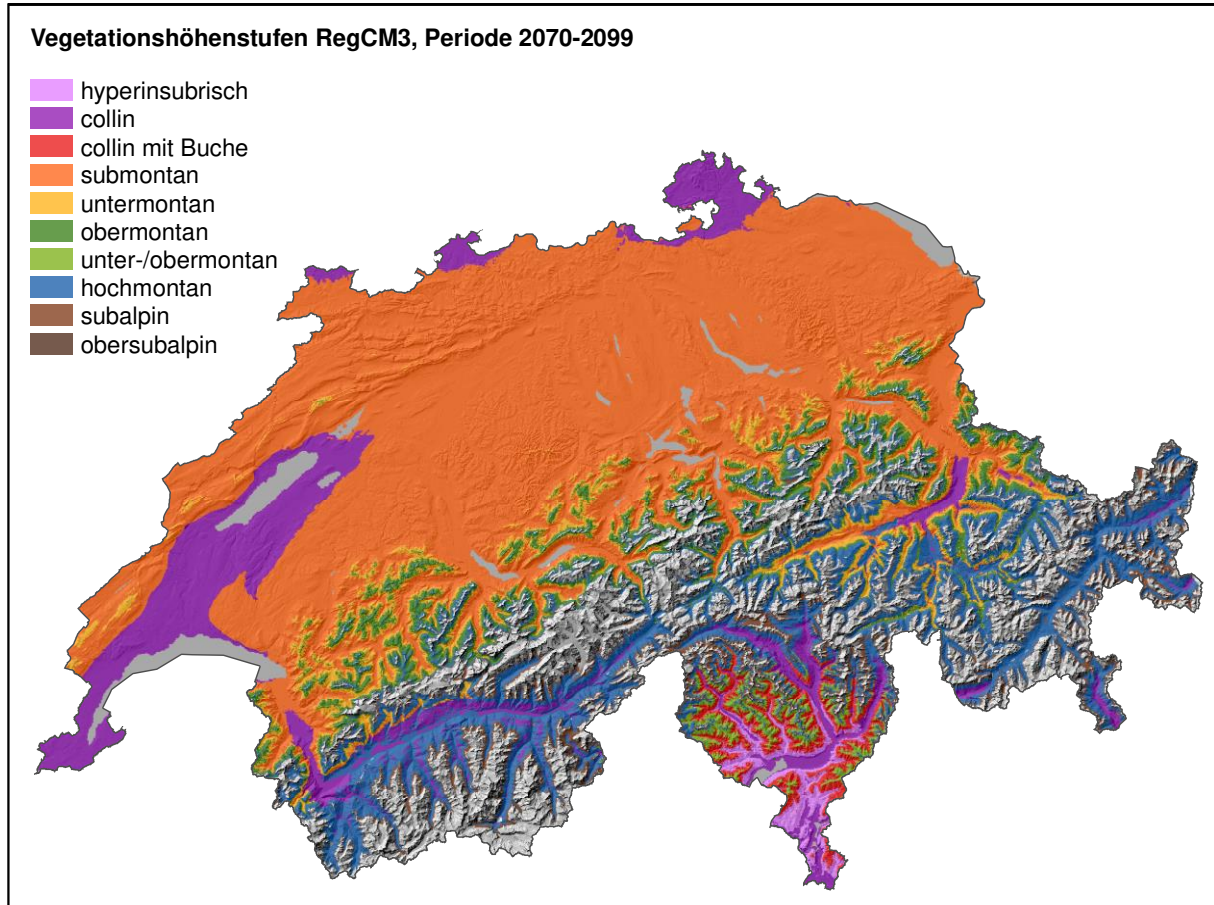


Abb. 68: Modellierte Höhenstufen RegCM3, Periode 2070-2099.

### 3.3.5 Modellierung der Höhenstufen mit der Klimazukunft CLM

Ein Vergleich der Modellierung CLM (Abb. 69) mit der Modellierung von PorTree+ wurde im Projektteil «Vergleich verschiedener Modelle der Baumartenverbreitung» (siehe Frehner et al. 2017) durchgeführt.

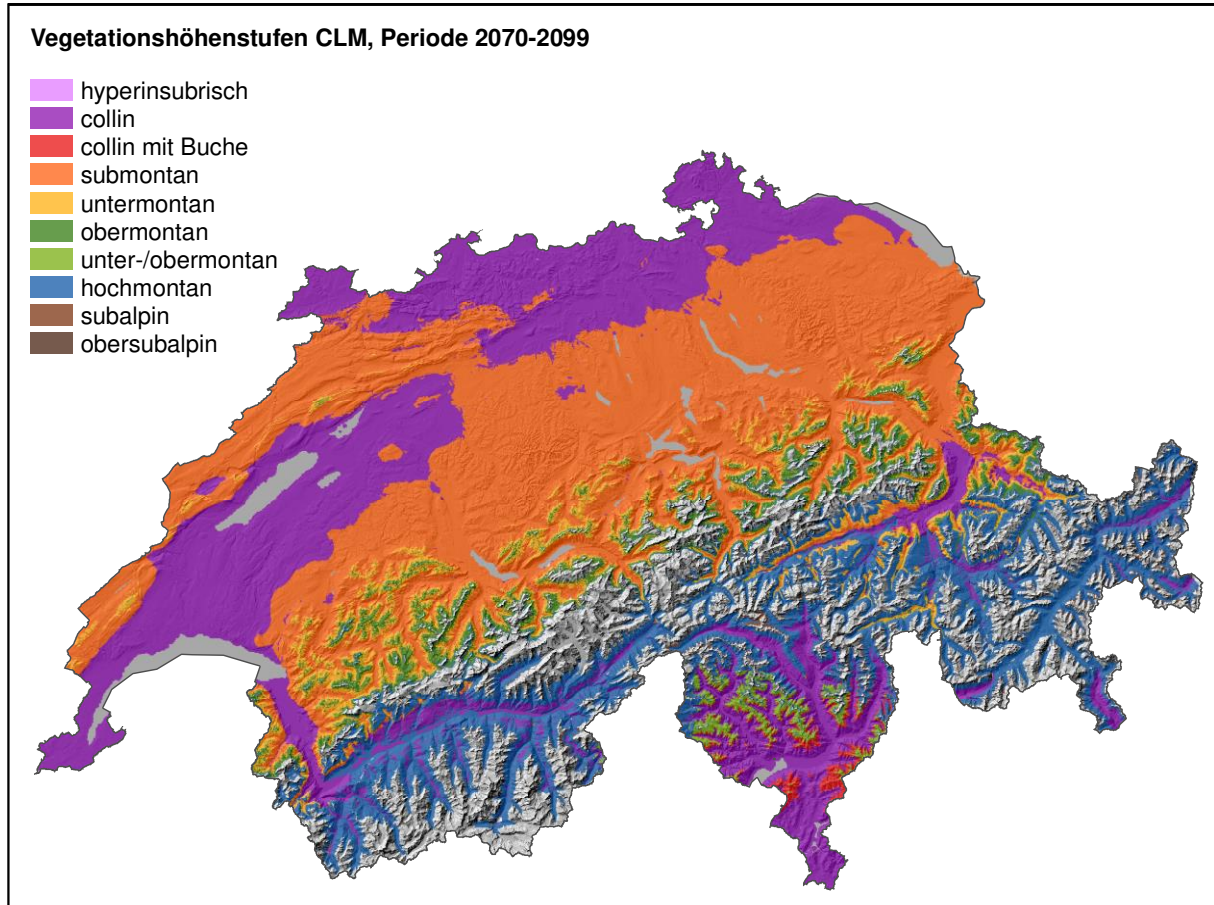


Abb. 69: Modellierte Höhenstufen CLM, Periode 2070-2099.

### 3.3.1 Verschiebung der Höhenstufen bei den Klimazukünften RegCM3 und CLM in der Periode 2070 - 2099 gegenüber heute

Siehe auch Abbildungen zu den Höhenstufen im Anhang 8.12.

In diesem Kapitel werden die Verschiebungen der Höhenstufen in der Periode 2070-2099 gegenüber heute dargestellt. Die obersubalpine Stufe wird nicht abgebildet, da diese nicht modelliert wurde (Kap. 2.4.1.6). Ausserdem werden pro Region die Anteile der Höhenstufen heute als Prozentanteil der Gesamtfläche der Region (nicht nur der Waldfläche) angegeben. Aufgrund der Topografie (grossflächiges flaches Mittelland mit geringen Temperaturänderungen) breitet sich die submontane Stufe horizontal weiter aus als höher gelegene Stufen an steileren Hanglagen. Nachfolgend werden v.a. die Höhenstufen, die in den Regionen heute häufig vertreten sind, kommentiert.

Im Jura dominieren heute die Höhenstufen submontan, untermontan und obermontan (Abb. 70). Zwischen den beiden Modellierungen für die Zukunft besteht der grösste Unterschied bei der submontanen Stufe. Bei der Klimazukunft CLM wird die heutige submontane Stufe fast gänzlich durch die colline Stufe ersetzt, bei der Klimazukunft RegCM3 nur zu einem kleinen Teil. Ein Drittel der heutigen untermontanen Stufe wird bei der Klimazukunft CLM zur colline Stufe, während dies bei der Klimazukunft RegCM3 nur zu einem sehr kleinen Teil geschieht. Die obermontane Stufe wird bei beiden Klimazukünften zum grossen Teil durch die submontane Stufe ersetzt (Abb. 71).

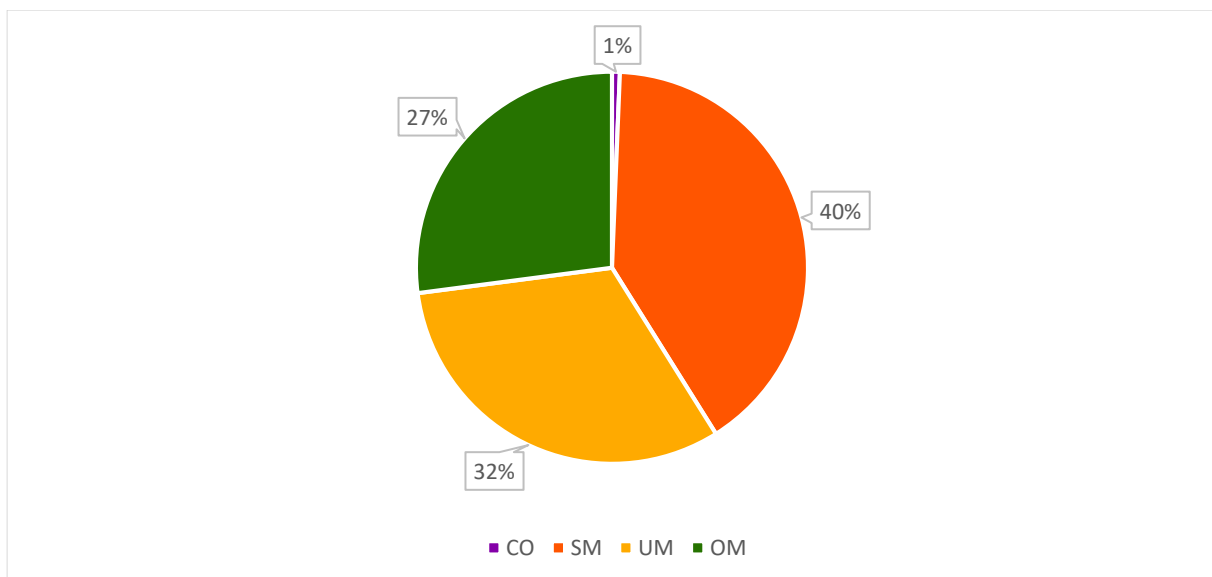


Abb. 70: Region Jura, Höhenstufenanteile heute. CO = collin, SM = submontan, UM = untermontan, OM = obermontan.



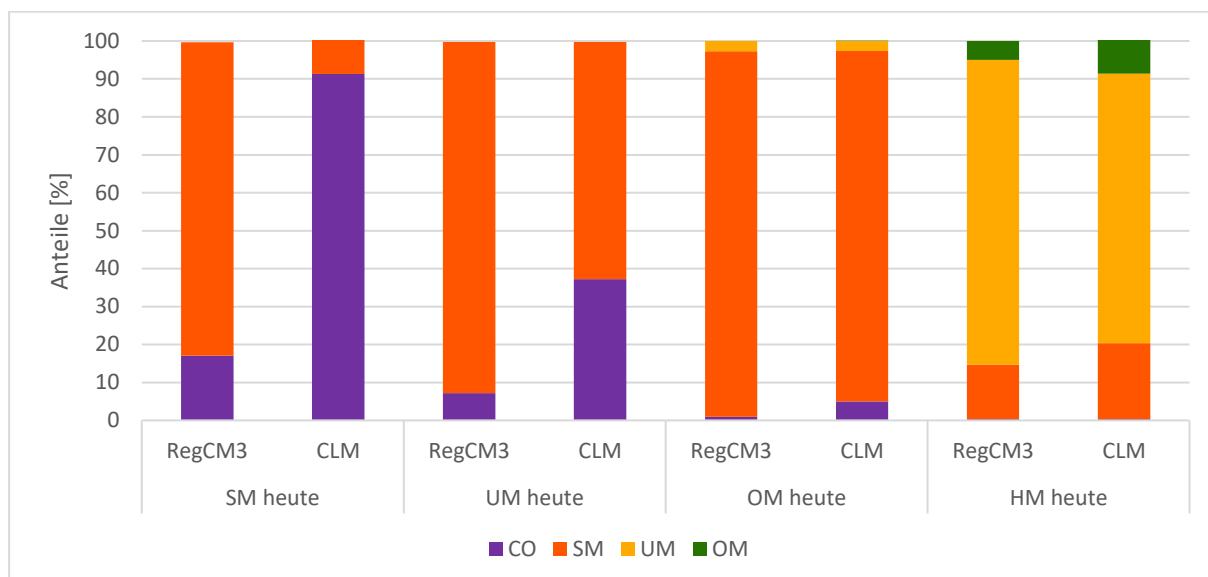


Abb. 71: Region Jura, Höhenstufenverschiebung von heute zur Periode 2070-2099 in den Klimazukünften RegCM3 und CLM. CO = collin, SM = submontan, UM = untermontan, OM = obermontan, HM = hochmontan.

Im Mittelland dominieren heute die Höhenstufen submontan und untermontan (Abb. 72). Der Anteil der hochmontanen Stufe ist deutlich kleiner als 1%, deshalb erscheint die hochmontane Stufe nicht in Abb. 72. Im Mittelland unterscheiden sich die beiden Klimazukünfte vor allem in der heutigen submontanen und untermontanen Stufe; bei CLM werden grössere Anteile in Zukunft der collinen Stufe zugeteilt als bei RegCM3, während die übrigen Flächen dieser Höhenstufen in Zukunft als submontan modelliert werden. Fast das gesamte Mittelland wird in Zukunft von der collinen und submontanen Höhenstufe eingenommen, während unter- und obermontane Flächen in Zukunft fast gänzlich fehlen, denn in Zukunft kommen diese Höhenstufen nur noch in den kleinen Flächen vor, die heute in der hochmontanen Stufe liegen (Abb. 72, Abb. 73).

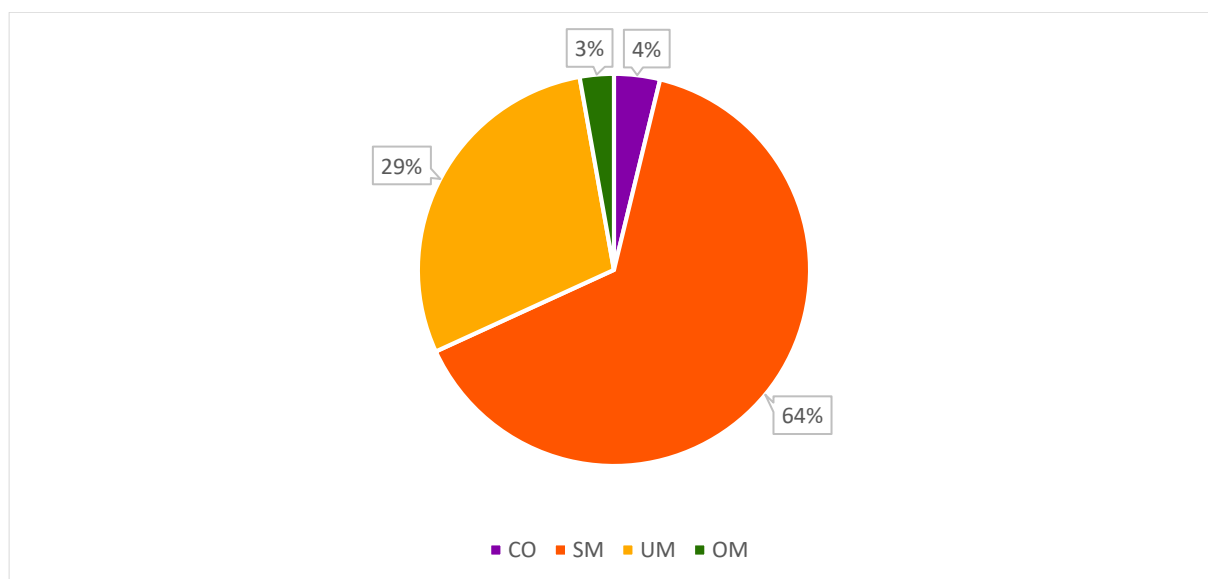


Abb. 72: Region Mittelland, Höhenstufenanteile heute. CO = collin, SM = submontan, UM = untermontan, OM = obermontan.

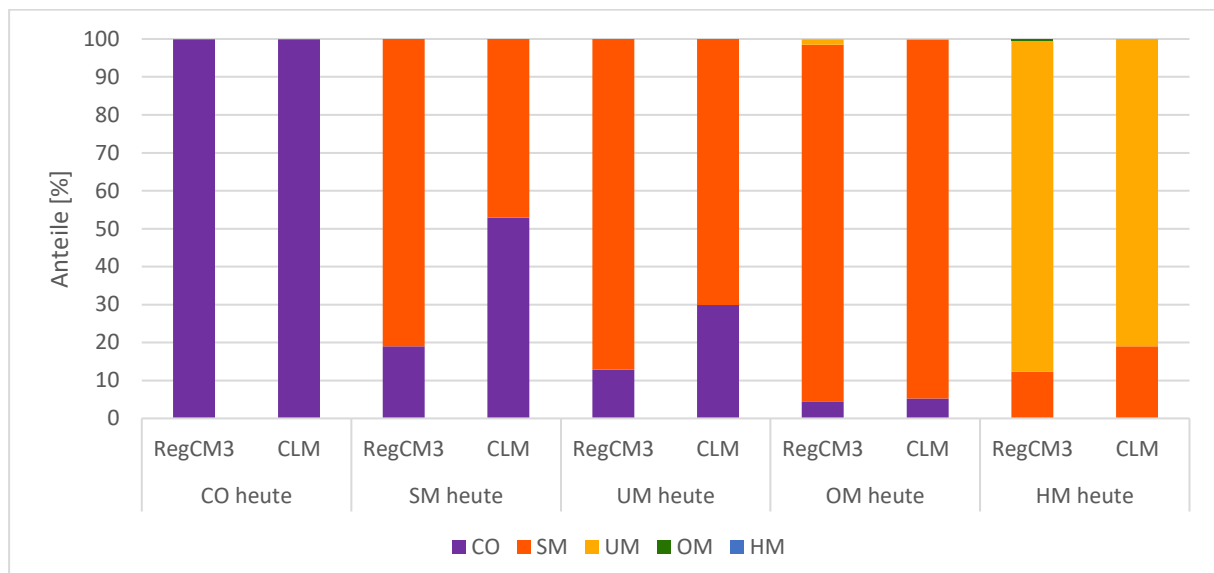


Abb. 73: Region Mittelland, Höhenstufenverschiebung von heute zur Periode 2070-2099 in den Klimazukünften RegCM3 und CLM. CO = collin, SM = submontan, UM = untermontan, OM = obermontan, HM = hochmontan.

In den Regionen nördliche Randalpen und nördliche Zwischenalpen mit Buche dominieren heute die Höhenstufen submontan, untermontan, obermontan, hochmontan und subalpin (Abb. 74). Am stärksten unterscheiden sich die beiden Klimazukünfte in den heutigen oberen Höhenstufen. In der heutigen subalpinen Stufe wechseln beim CLM mehr Flächen zur untermontanen Stufe als beim RegCM3. In der heutigen hochmontanen Stufe wechseln die Flächen beim RegCM3 mehrheitlich in die untermontane und obermontane Stufe, beim CLM rückt neben der untermontanen die submontane Stufe stärker nach. Die ober-, unter- und submontane Stufe weisen bei beiden Klimazukünften zum grossen Teil submontane Verhältnisse auf (Abb. 75).

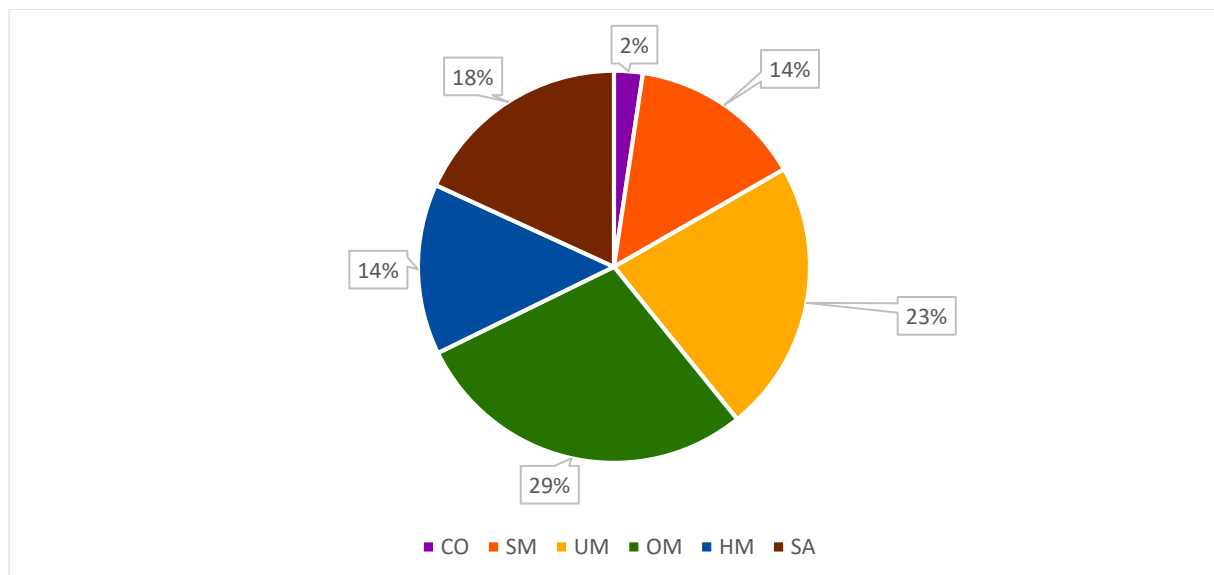


Abb. 74: Regionen nördliche Randalpen und nördliche Zwischenalpen mit Buche, Höhenstufenanteile heute. CO = collin, SM = submontan, UM = untermontan, OM = obermontan, HM = hochmontan, SA = subalpin.

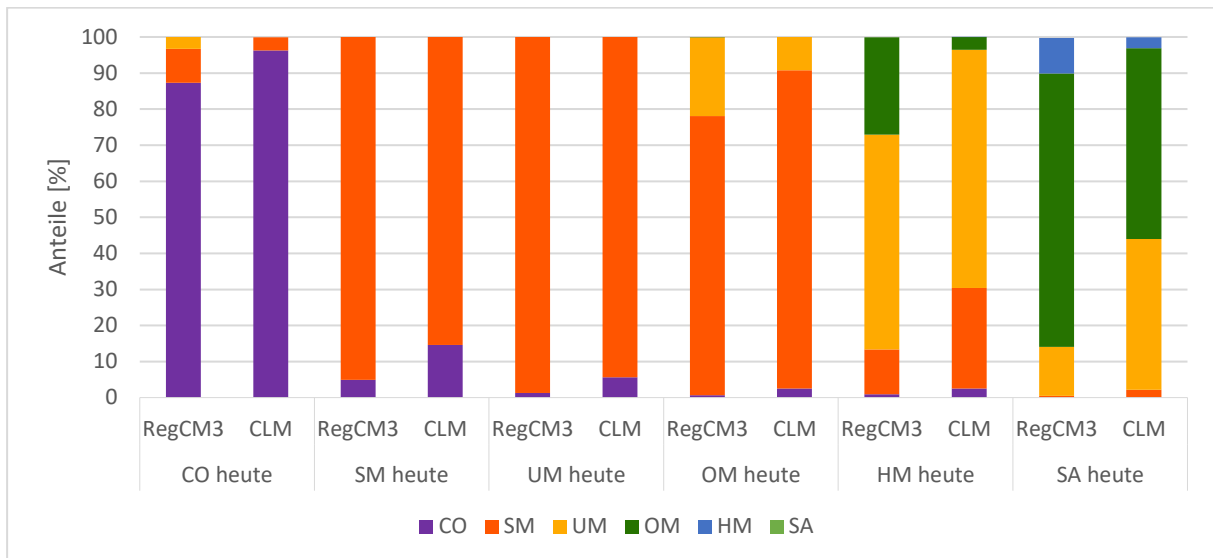


Abb. 75: Regionen nördliche Randalpen und nördliche Zwischenalpen mit Buche, Höhenstufenverschiebung von heute zur Periode 2070-2099 in den Klimazukünften RegCM3 und CLM. CO = collin, SM = submontan, UM = untermontan, OM = obermontan, HM = hochmontan, SA = subalpin.

In den Regionen nördliche Zwischenalpen ohne Buche und kontinentale Hochalpen dominieren heute die hochmontane und subalpine Höhenstufe, auch collin ist mit 6% vertreten. Eine ober- und untermontane Stufe (geringes Ausmass) erscheint aufgrund von Randeffecten (Abb. 76). Die subalpine Stufe wird bei beiden Klimazukünften zum grossen Teil durch die hochmontane Stufe ersetzt. Die hochmontane Stufe wechselt in unterschiedliche Stufen, die colline Stufe bleibt collin (Abb. 77).

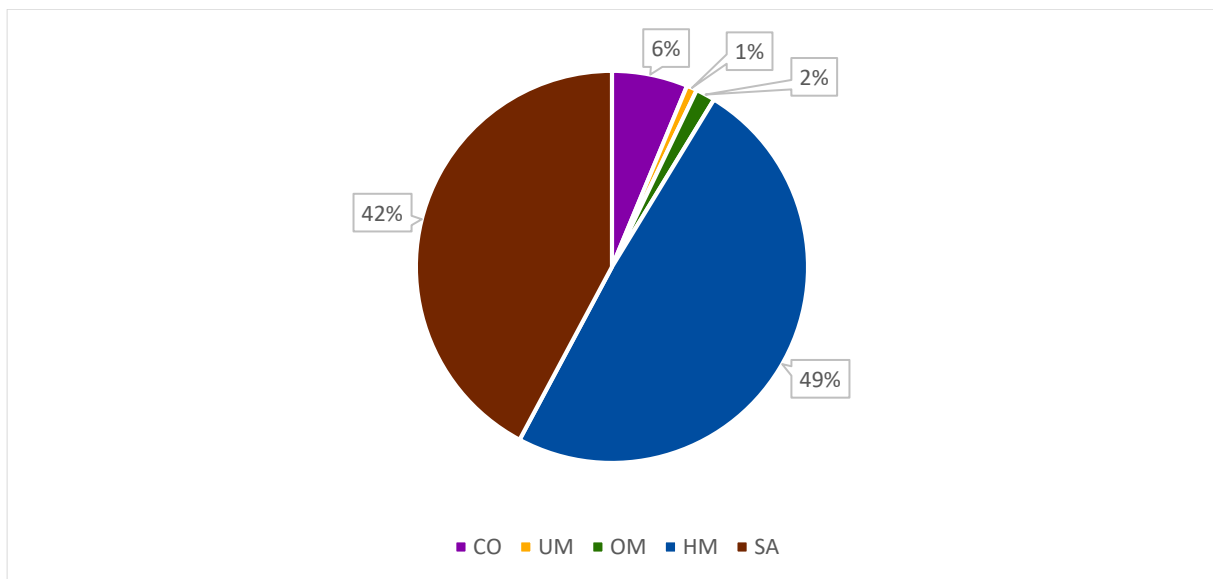


Abb. 76: Regionen nördliche Zwischenalpen ohne Buche und kontinentale Hochalpen, Höhenstufenanteile heute. CO = collin, UM = untermontan, OM = obermontan, HM = hochmontan, SA = subalpin.

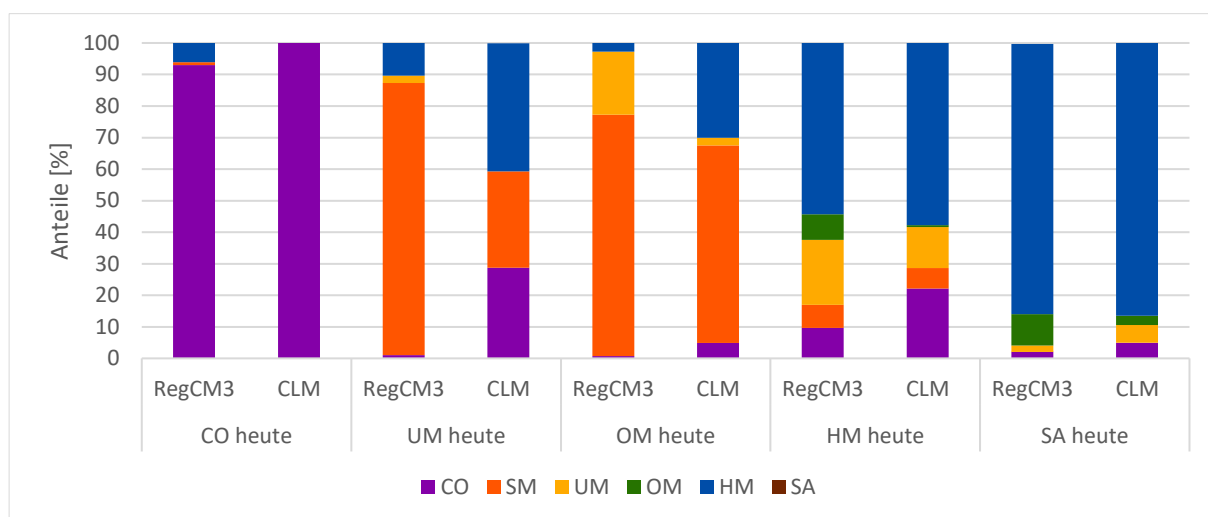


Abb. 77: Region nördliche Zwischenalpen ohne Buche und kontinentale Hochalpen, Höhenstufenverschiebung von heute zur Periode 2070-2099 in den Klimazukünften RegCM3 und CLM. CO = collin, SM = submontan, UM = untermontan, OM = obermontan, HM = hochmontan, SA = subalpin.

In der Südschweiz dominieren heute die Höhenstufen collin mit Buche, unter- und obermontan, hochmontan und subalpin. Auch die colline (ohne Buche) und die hyperinsubrische Stufe sind mit 5-8% vertreten (Abb. 78). Die hyperinsubrische Stufe bleibt in der Klimazukunft RegCM3 grossteils hyperinsubrisch, bei CLM wechselt sie in die colline Stufe (ohne Buche). Die colline Stufe (ohne Buche) bleibt collin. Die colline Stufe mit Buche wechselt bei RegCM3 mehrheitlich in die hyperinsubrische, bei CLM wechselt sie in die colline (ohne Buche) Stufe. Die hyperinsubrische Stufe und die colline Stufe mit Buche sind beide warm und feucht, weshalb sie sich bei RegCM3 ausdehnen können. Bei CLM hingegen wird es wärmer und trockener, die notwendige Feuchtigkeit für die hyperinsubrische Stufe oder für das Vorkommen der Buche fehlen, weshalb im Modell die colline Stufe (ohne Buche) erscheint. Die unter- und obermontane Stufe wechseln bei RegCM3 zum grossen Teil in die colline Stufe mit Buche, bei CLM mehrheitlich in die colline Stufe ohne Buche. Die hochmontane und die subalpine Stufe wechseln in unterschiedliche Stufen (Abb. 79).

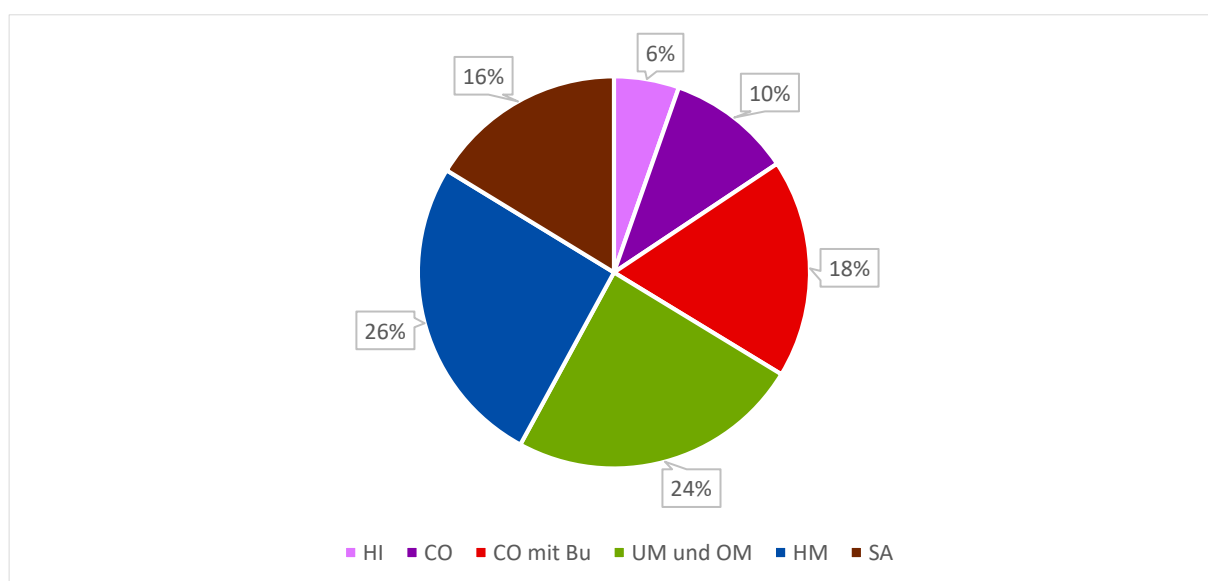


Abb. 78: Region Südschweiz, Höhenstufenanteile heute. HI = hyperinsubrisch, CO = collin, CO mit Bu = collin mit Buche, UM und OM = unter- und obermontan, HM = hochmontan, SA = subalpin.

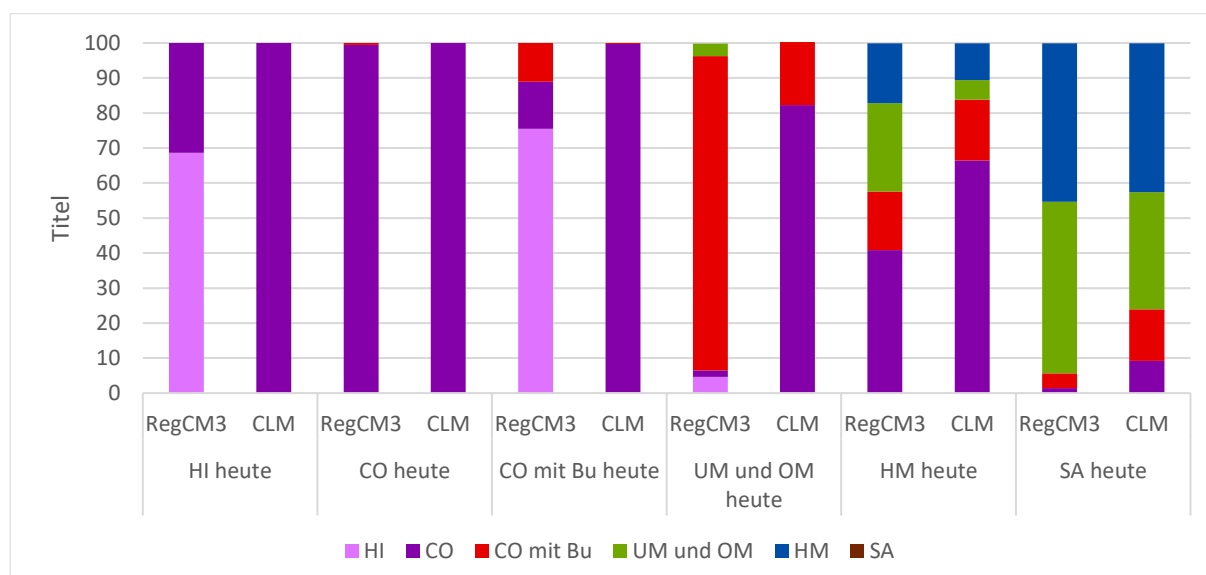


Abb. 79: Region Südschweiz, Höhenstufenverschiebung von heute zur Periode 2070-2099 in den Klimazukünften RegCM3 und CLM. HI = hyperinsubrisch, CO = collin, CO mit Bu = collin mit Buche, UM und OM = unter- und obermontan, HM = hochmontan, SA = subalpin.

Deutlich wird durch die Auswertungen in allen Regionen, dass sich die meisten Flächen um mehr als eine Höhenstufe verschieben (v.a. bei CLM). Keine Verschiebungen gab es jeweils in der Höhenstufe collin (ohne Buche), da wir noch keine Kenntnisse von möglichen zukünftigen Höhenstufen besitzen, welche sich in der Schweiz in den wärmsten und tiefsten Lagen in Zukunft etablieren könnten und heute in der Schweiz noch nicht vorkommen. Für die Baumartenempfehlungen (Frehner & Zürcher-Gasser 2019) wurde in der Region 5 die Stufe collin (ohne Buche) beim heutigen Klima der Stufe collin zugeteilt. Beim Klima 2070 – 2099 wird erwartet, dass in der Region 5 ein grosser Anteil der collinen Fläche ausserhalb des Buchenareals der Höhenstufe «mediterran» entspricht, deshalb wurde die ganze Fläche dieser Höhenstufe zugeteilt.

### 3.3.2 Lithologievergleich

Für einen Perimeter von 631 km<sup>2</sup> Ausdehnung wurden die von swisstopo harmonisierten geologischen Kartenblätter von Büren, Moutier und Solothurn (Abb. 80) neu eingeteilt (Tab. 29) und mit unseren Modellierungen (mit den 7 Lithologieklassen, Abb. 81, Kap. 2.2.1) verglichen (Abb. 83, Abb. 84). Damit soll abgeschätzt werden, ob das Höhenstufenmodell verbessert werden kann, wenn ca. im Jahre 2030 alle geologischen Kartenblätter der Schweiz 1: 25'000 fertig und harmonisiert sind.



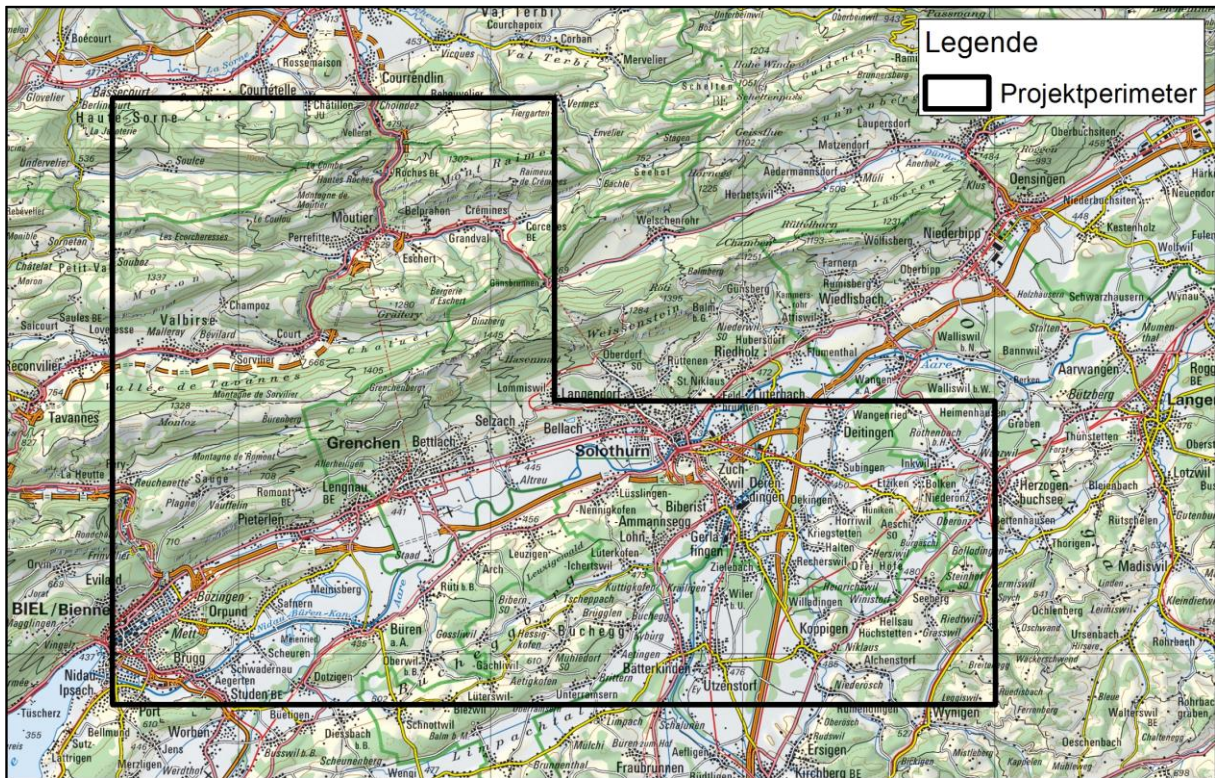


Abb. 80: Untersuchungssperimeter.

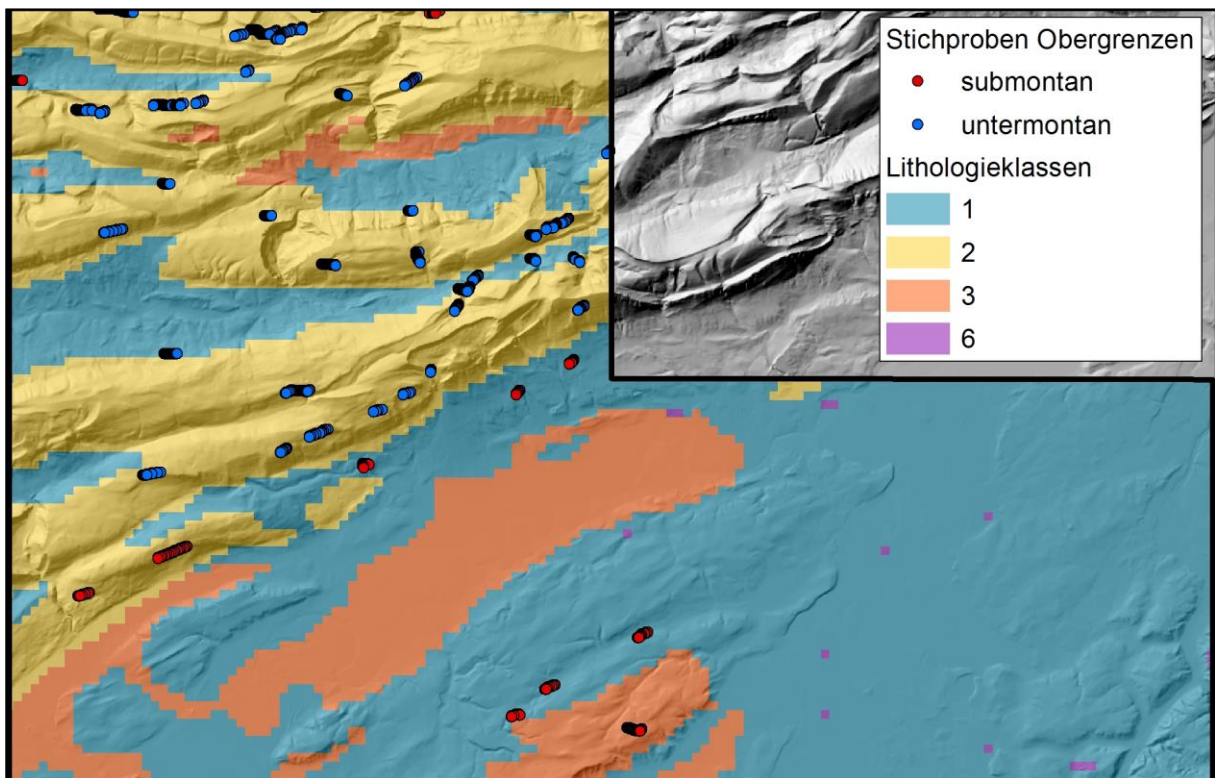


Abb. 81: Einteilung der Lithologie gemäss Kap. 2.2.1. Legende: 1 = Sonstiges, 2 = Kalke und Dolomite, 3 = Flysch, 6 = Bündnerschiefer.

Die mit den harmonisierten Geologiekarten neu gebildeten Lithologieklassen sind deutlich differenzierter als die 7 bisher verwendeten Lithoklassen (Kap. 2.2.1). Bei beiden gut erkennbar sind die Kalke des Jura, Lithoklasse 2 (Kap. 2.2.1) und Lithoklasse 9 bei den harmonisierten Geologiekarten. Bei den anderen Klassen ist nur wenig Übereinstimmung zu sehen.



Bei den harmonisierten geologischen Karten fällt auf, dass zwischen der Karte Moutier und Büren keine Grenze zu sehen ist, hingegen ist die Grenze zwischen den Karten Büren und Solothurn klar erkennbar (Abb. 82). Im Bereich der geraden Grenzlinie ist auf beiden geologischen Karten eine Grundmoräne eingezeichnet. Auf dem Blatt Solothurn ist sie als lehmig siltig beschrieben und wurde deshalb der Lithoklasse 2 zugeteilt, auf dem Blatt Büren hingegen ist sie als siltig, sandig, kiesig beschrieben und wurde deshalb der Lithoklasse 5 zugeteilt. Im Gelände wird die Eigenschaft der Grundmoräne kaum in einer geraden Linie wechseln. Es wird deshalb vermutet, dass der Übergang zwischen diesen beiden Karten noch nicht harmonisiert ist.

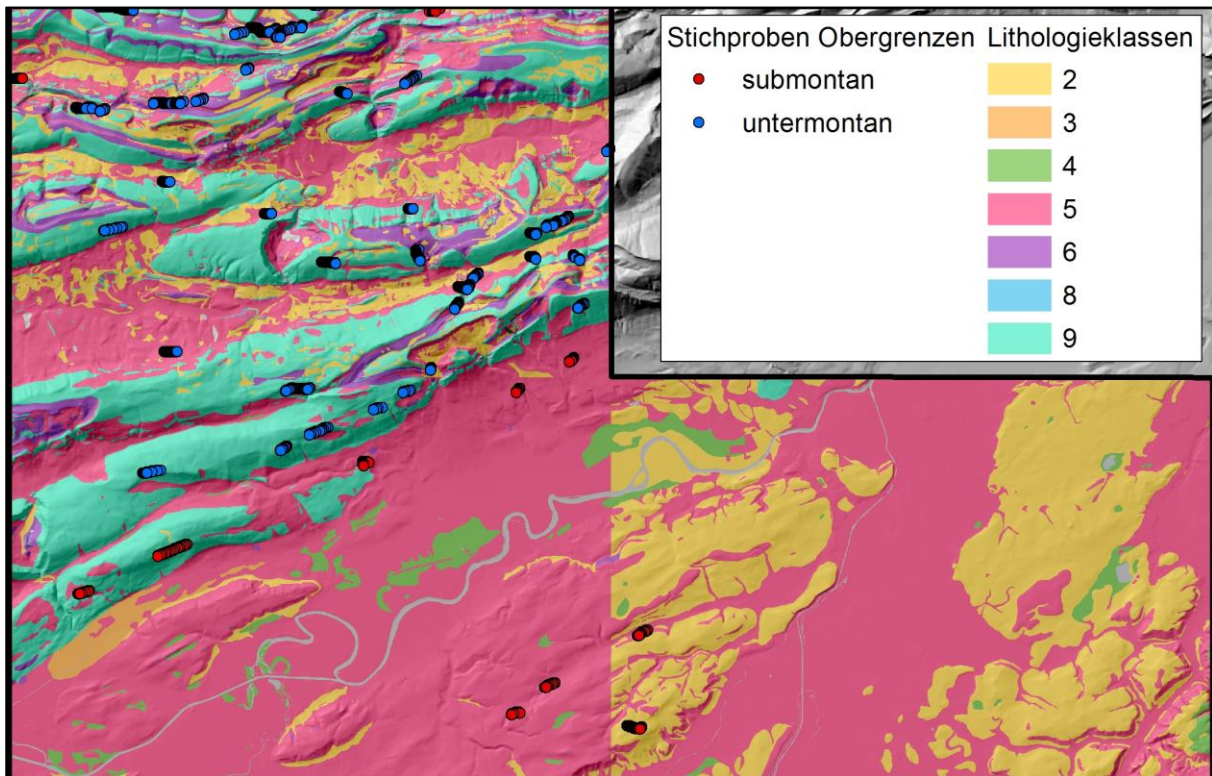


Abb. 82: Neu gebildete Lithologieklassen aus harmonisierten Geologiekarten. Lithologieklassen siehe Tab. 29.

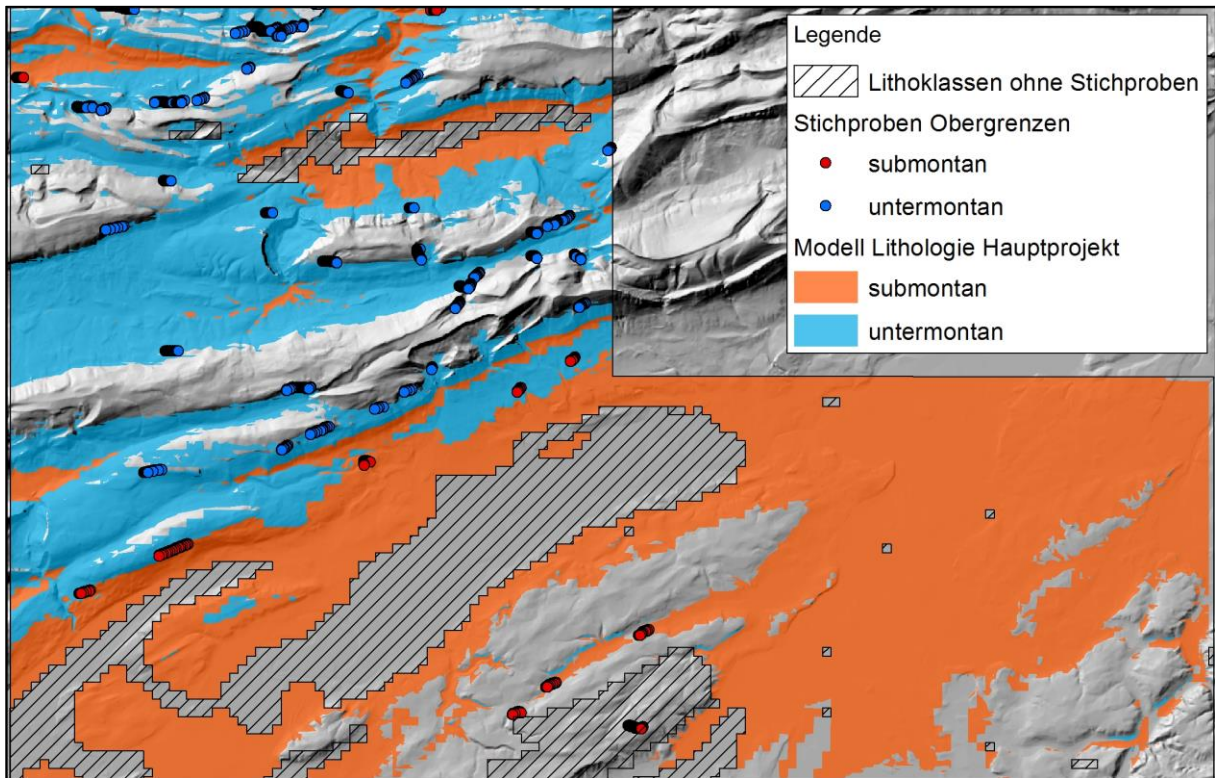


Abb. 83: Modellierte Höhenstufen mit Lithologieklassen gemäss Kap.2.2.1.

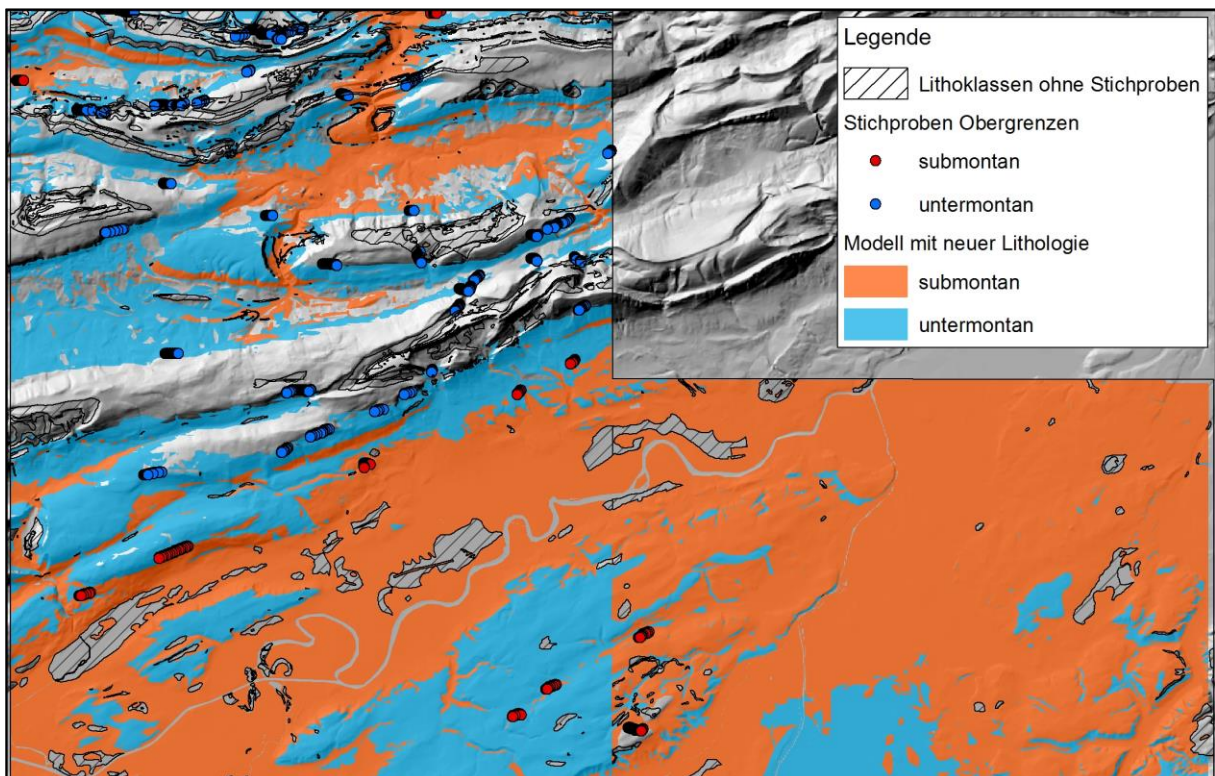


Abb. 84: Modellierte Höhenstufen mit neu gebildeten Lithologieklassen aus harmonisierten Geologiekarten.

Leere Flächen können bei der Modellierung auf zwei Arten entstehen (Abb. 83, Abb. 84):

- Da für die obere Grenze der obermontanen Stufe keine Stichproben vorhanden waren, wird diese Stufe nicht modelliert. Flächen, die zur obermontanen Stufe gehören würden, werden deshalb im Modell nicht wiedergegeben (leere Flächen).
- Alle Lithologieklassen, in denen weniger als 50 Stichprobenpunkte liegen, werden nicht modelliert (schraffierte Flächen).
- Von Gewässern eingenommene Flächen sind ebenfalls leer (schraffierte Flächen).

Vergleich der Höhenstufen bei den beiden Modellierungen (Abb. 83, Abb. 84):

- Im Bereich der Jurakalke stimmen die beiden Karten relativ gut überein. Die Höhenstufengrenzen, die mit den harmonisierten geologischen Karten modelliert wurden, sind etwas differenzierter als jene, die im Gesamtprojekt modelliert wurden.
- Im Mittelland sind die Unterschiede grösser. Bei der Modellierung des Gesamtprojekts (Teil 1) gibt es relativ viele leere Flächen, teilweise weil die Lithoklasse nicht berücksichtigt wurde. Beim Modell, das mit den harmonisierten geologischen Karten gerechnet wurde, ist die nicht harmonisierte Grenzlinie der Karten Büren/Solothurn gut sichtbar, und allgemein wurde mehr untermontane Stufe modelliert als im Gesamtprojekt. Bei der Standortkartierung Solothurn sind im Bereich dieser Grenzlinie häufig submontane Standorte eingetragen, aber auch viele Übergänge zwischen der submontanen und untermontanen Stufe. Das bedeutet, dass im Bereich der Grenzlinie im Gelände submontane und untermontane Standorte vorkommen.

Grundsätzlich standen wenig Stichproben zur Verfügung, um das Modell mit den harmonisierten geologischen Karten zu eichen. Deshalb erwies sich ein direkter Vergleich mit der Höhenstufenkarte Schweiz aus dem Gesamtprojekt als schwierig. Der Vergleich zeigt aber, dass mit den harmonisierten geologischen Karten die Geologie deutlich differenzierter berücksichtigt werden kann als mit den Lithoklassen aus dem Gesamtprojekt.

## **3.4 Buchenareal**

### **3.4.1 Heutige Modellierung des Buchenareals**

Die beiden folgenden Abbildungen zeigen das Resultat für das Buchenareal heute (kontinuierliche und binäre Darstellung). Die horizontale Arealgrenze des Buchenareals wurde ohne untere Begrenzung bis 1300 m ü. M. für die ganze Schweiz modelliert. Auf der Werteskala zwischen 0 und 1 wurde der Wert 0.75 für die Standortsregionen 4 und 5 (Süden) und der Wert 0.65 für die übrige Schweiz (Norden) als Schwellenwert für eine binäre Darstellung ausgewählt, da dieser Schwellenwert in der besten Übereinstimmung mit dem heutigen Areal resultierte (siehe Kap. 2.4.2.3).



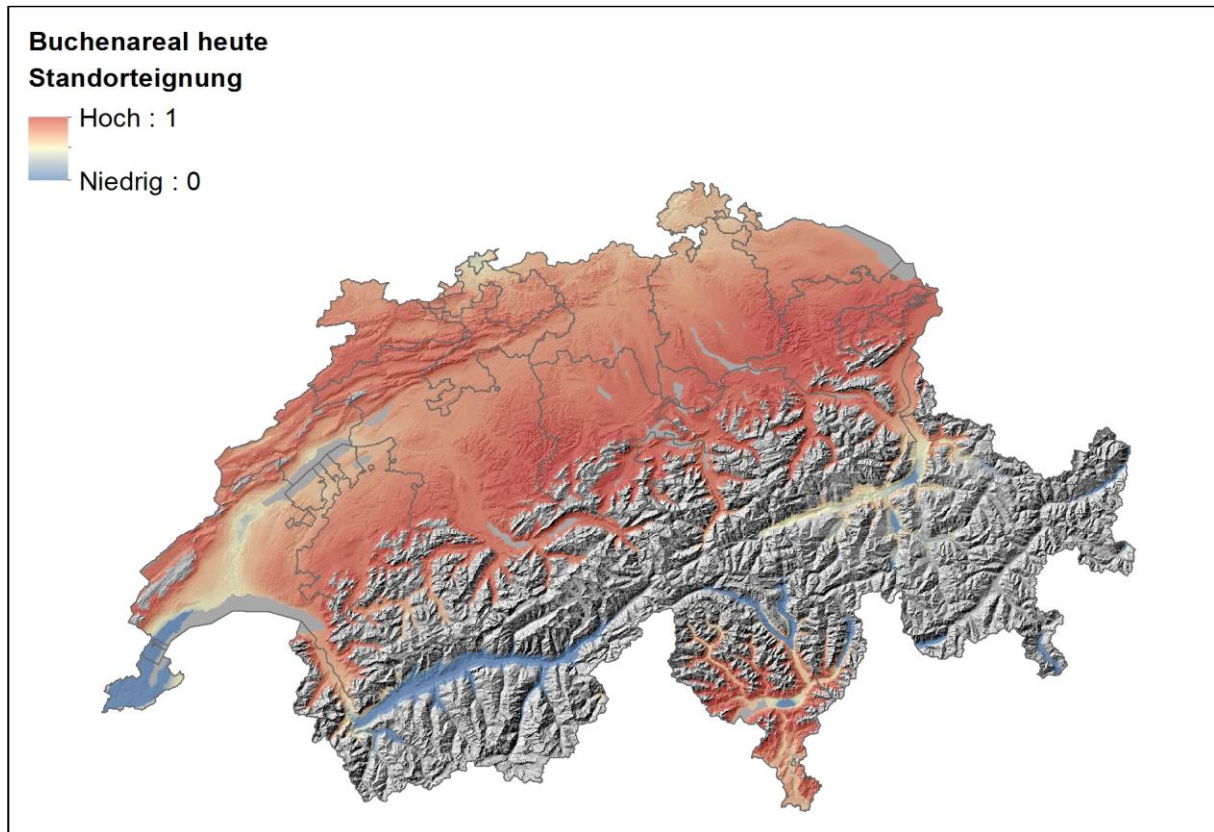


Abb. 85: Modelliertes Buchenarealgrenze heute, mit Obergrenze bei 1300 m ü. M., kontinuierliche Darstellung der Standorteignung.

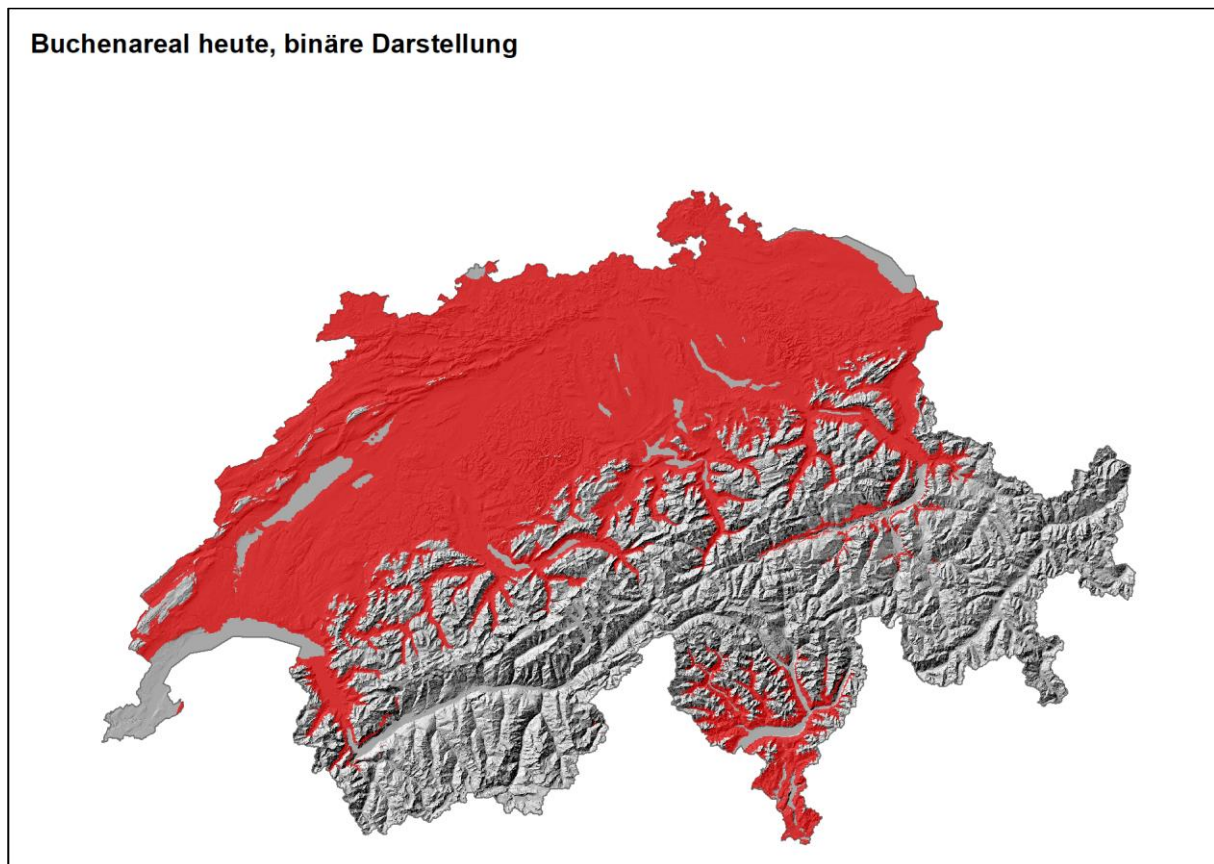


Abb. 86: Modelliertes Buchenareal heute, mit Obergrenze bei 1300 m ü. M., binäre Darstellung der Standorteignung (Schwellenwert Norden 0.65; Schwellenwert Süden 0.75).

### Überprüfung des modellierten heutigen Buchenareals

Das modellierte Buchenareal stimmt sehr gut mit den LFI-Probeflächen und dem geänderten Buchenareal nach NaiS (Frehner et al. 2005/2009) überein (Abb. 87). Im Kanton GR ist in der Surselva und Eingangs Val Lumnezia das Buchenareal ausgedehnter modelliert als in Realität, denn in der Surselva kommen in Natura nur noch Bucheninseln vor. Im Domleschg stimmen die modellierten Flächen gut mit der Realität überein, Eingangs der Viamala und des Nollatobels kommen noch Buchen vor. Im Prättigau ist die Buchenverbreitung im Modell geringer, die Buche wurde im Prättigau aber auch stark anthropogen gefördert.

Im Kanton UR weist die Modellierung südlich von Amsteg im Widerspruch zur Realität noch Buchenareal auf. Eingangs VS weist das Modell zwischen Martigny und Sion am Südhang noch Buchen auf, obwohl dort keine Buchen mehr vorkommen. Hingegen bildet das Modell die Buchenvorkommen bei Gondo sehr gut ab. Im TI und im Misox geht die Modellierung z.T. weiter als in Realität, v.a. in der Leventina, dem Bleniotal, nördlich von Peccia sowie im Calancatal. Ein Grund dafür könnte sein, dass Blockschutt im Modell nicht berücksichtigt wird. In den tiefsten Lagen weist das Modell eine «Trockengrenze» auf, die sich gut mit den collinen Lagen bei Genf, Martigny, Basel sowie im Churer Rheintal und dem Domleschg deckt.

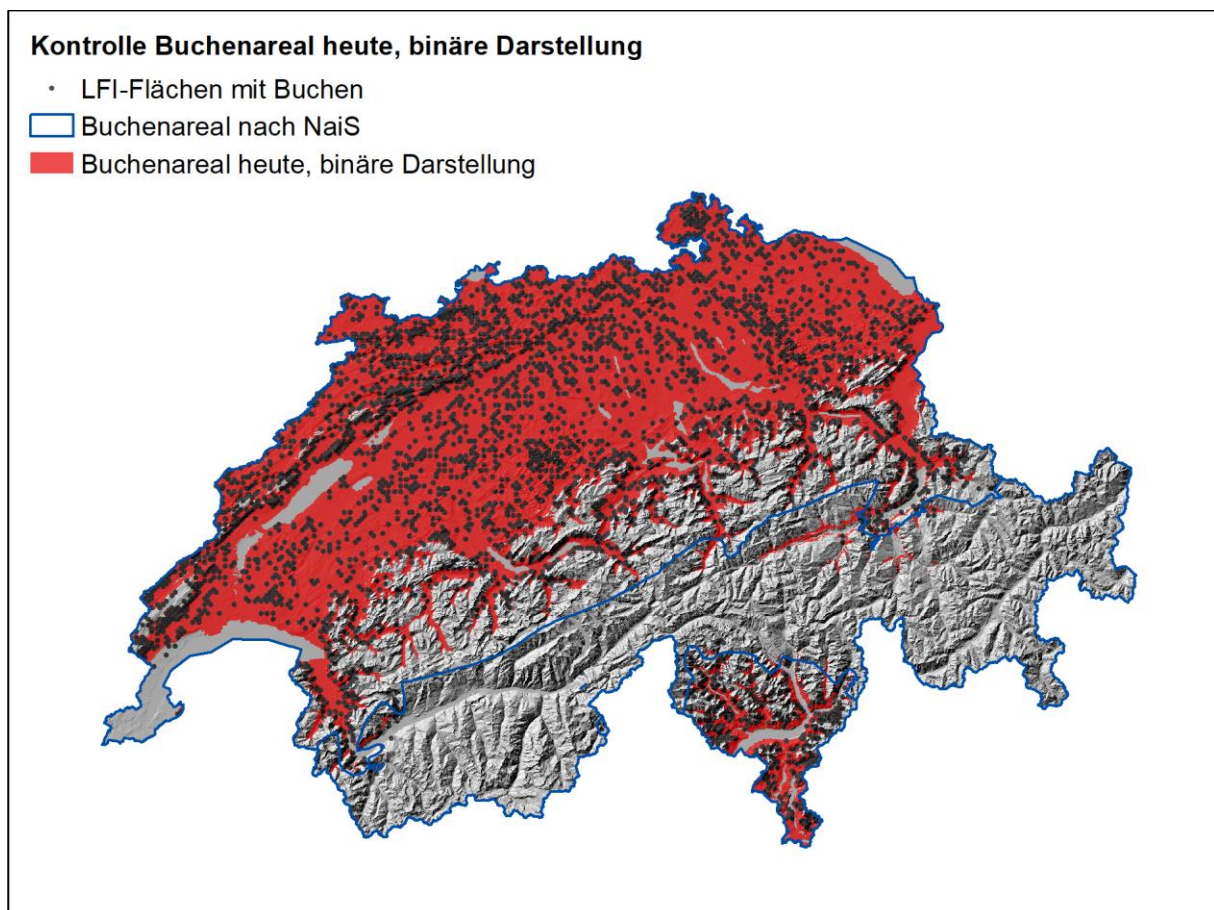


Abb. 87: Kontrolle modelliertes Buchenareal heute, binäre Darstellung der Standorteignung (Schwellenwert Norden 0.65; Schwellenwert Süden 0.75), mit LFI-Punkten und Buchenareal nach NaiS.



### Welche Klimaparameter beeinflussen die Buchenverbreitung?

Abb. 88 bis Abb. 93 zeigen, wie die einzelnen Klimaparameterkarten in die Modellierung des Buchenareals (ohne untere Begrenzung, bis 1300 m ü. M.) einfließen. Achtung: Die Abbildungen bilden Übereinstimmungen und keine kausalen Zusammenhänge ab. In verschiedenen Regionen können unterschiedliche Klimaparameter begrenzend wirken. Wenn die Klimaparameter einzeln betrachtet werden, korreliert keiner in sämtlichen Regionen gut mit dem Buchenareal. Regional bestehen gute Übereinstimmungen mit gewissen Klimaparametern, z.B. scheint im Kanton GR die relative Luftfeuchte und die Föhnhäufigkeit und im Kanton VS der Sommerniederschlag, die relative Luftfeuchte und das Verhältnis aktueller zu potenzieller Evapotranspiration entscheidend für die Habitateignung der Buche zu sein. Auf der Alpensüdseite weist v.a. die relative Luftfeuchte und die Föhnhäufigkeit eine gute Übereinstimmung auf und könnte für den Ausfall der Buche entscheidend sein. Im Kanton UR könnten die Föhnhäufigkeit und der Spätfrost für das Vorkommen der Buche begrenzend wirken. Beim Vorgehen mit Fuzzy logic ist unklar, welche Schwellenwerte bei den verschiedenen Klimaparametern gelten. Es könnte sein, dass «rot» bei unterschiedlichen Parametern für die Buche unterschiedlich problematisch ist. Da die Grundlagen für die Modellierung begrenzt vorhanden waren (meist nur saisonale Klimakarten und Mittelwerte über Zeitperioden) ist es möglich, dass es uns nicht gelang, die entscheidenden Klimaparameter zu identifizieren (z.B. weil nicht genau die relevante Periode gewählt wurde, oder weil der Sommerniederschlag die Wasserversorgung nur unvollkommen abbildet). Diese Kritikpunkte gelten für sämtliche folgenden Fuzzy logic-Modellierungen.

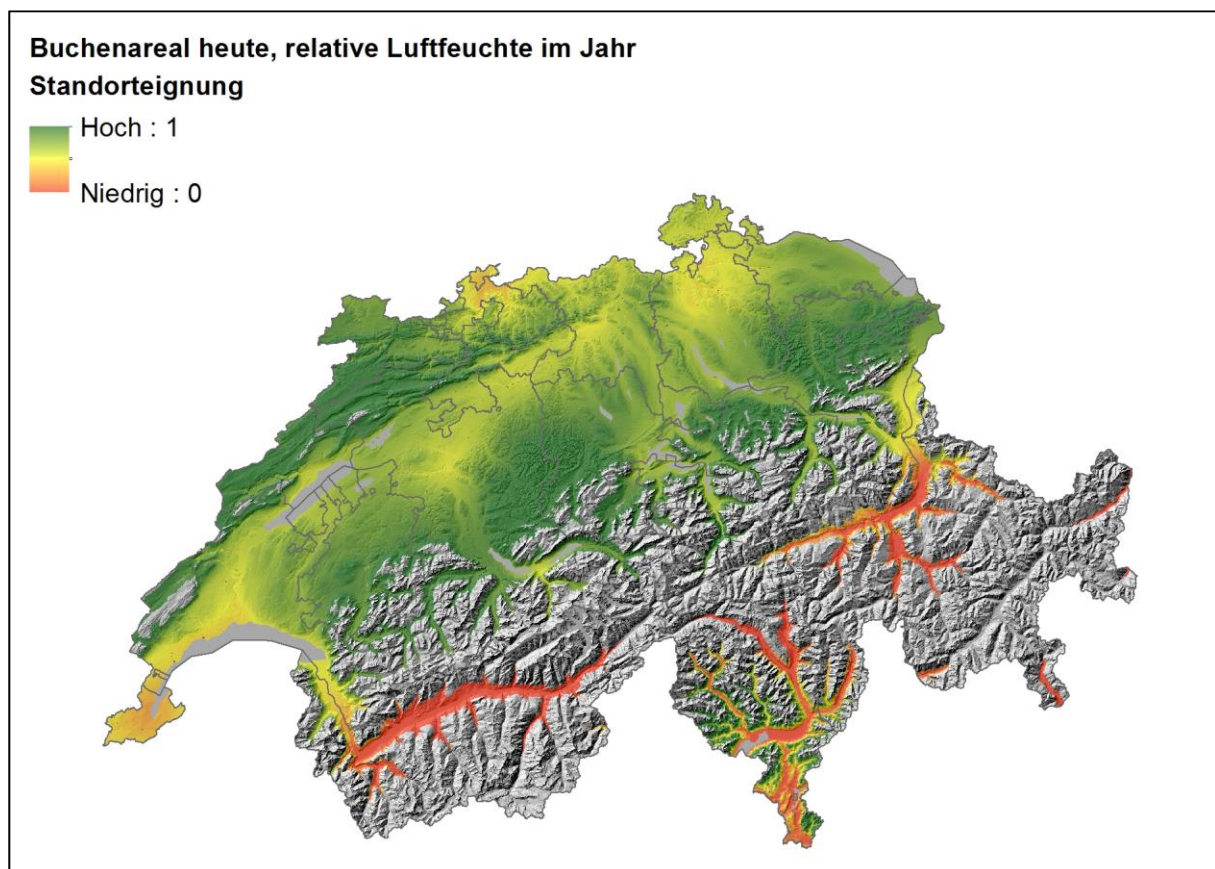


Abb. 88: Modellierte Standorteignung für das Buchenareal heute, Klimaparameter: Mittlere relative Luftfeuchtigkeit um 13:30 Uhr im Jahr. Werte um 1 bedeuten eine hohe Standorteignung für das modellierte Areal aus der Sicht des ausgewählten Klimaparameters. Werte um 0 bedeuten eine geringe Standorteignung aus der Sicht des ausgewählten Klimaparameters.



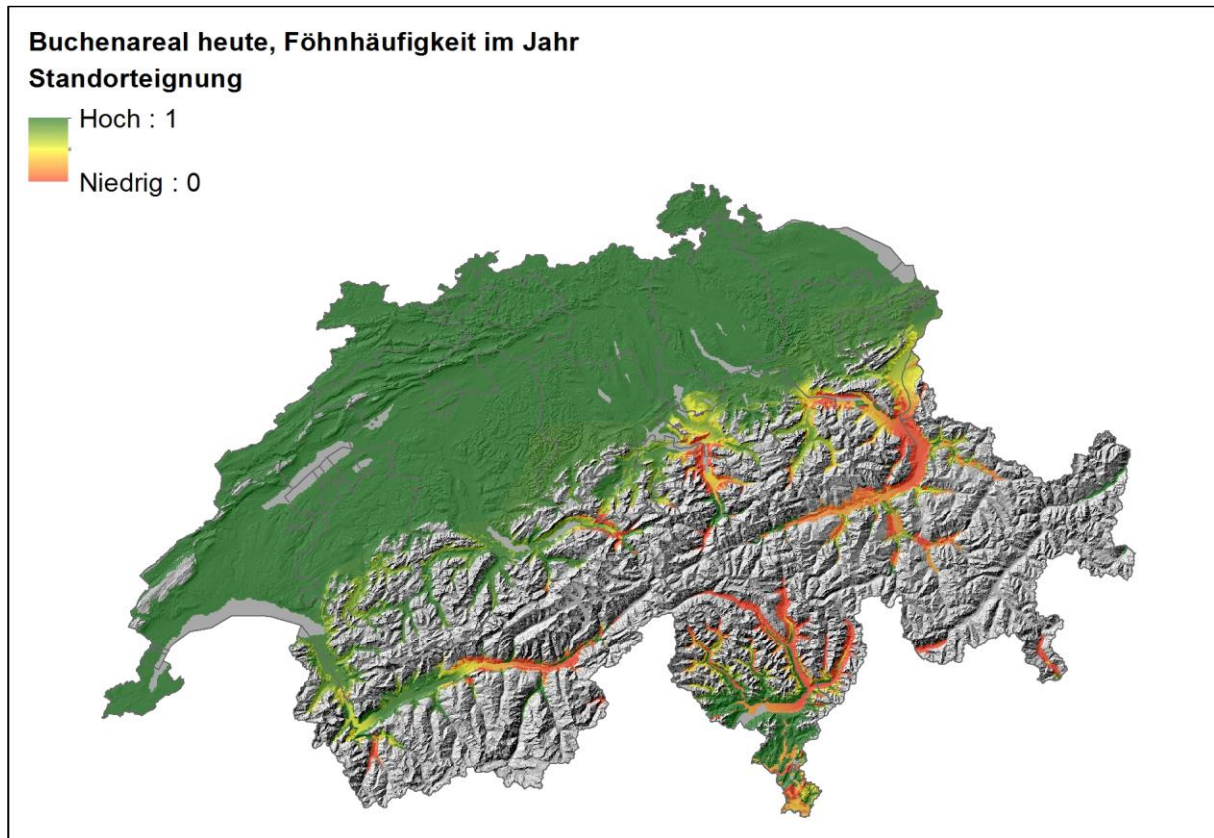


Abb. 89: Modellierte Standorteignung für das Buchenareal heute, Klimaparameter: Föhnhäufigkeit im Jahr. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.

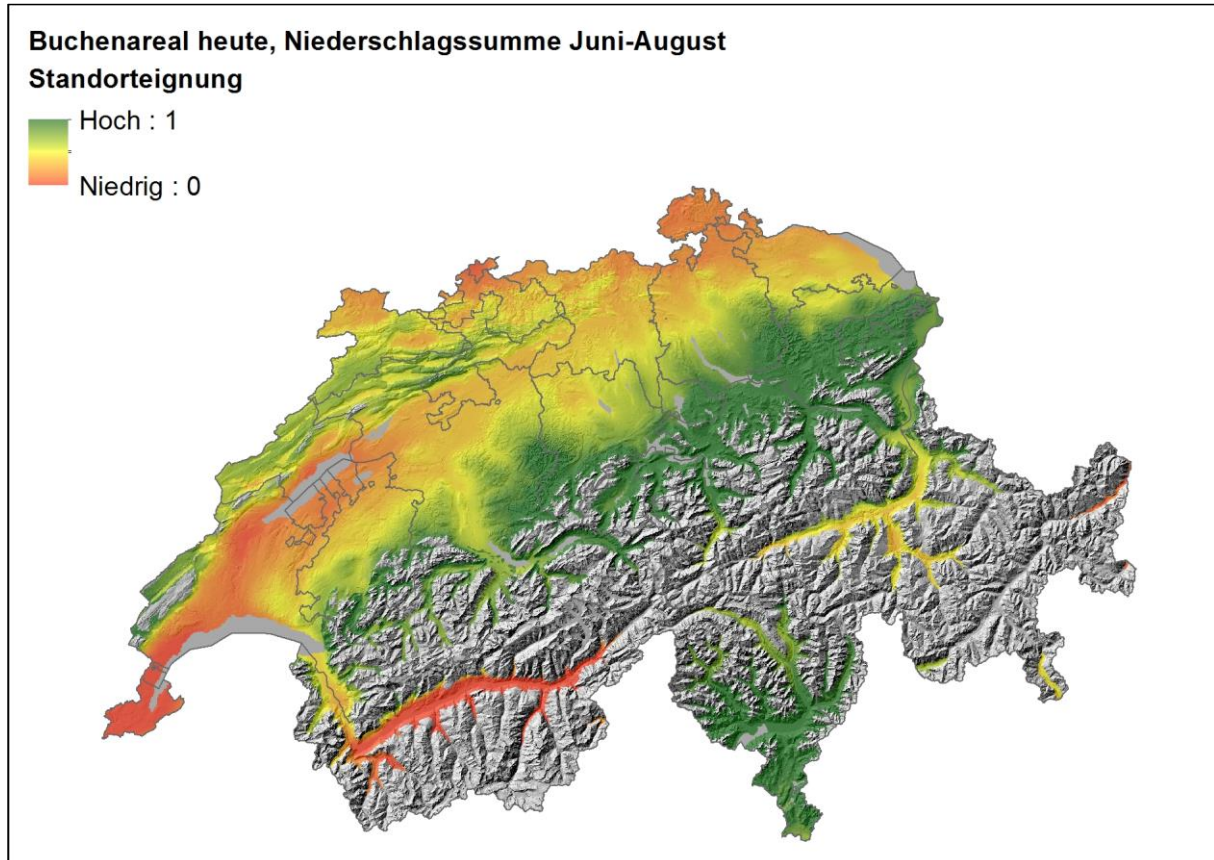


Abb. 90: Modellierte Standorteignung für das Buchenareal heute, Klimaparameter: Niederschlagssumme Juni - August. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.

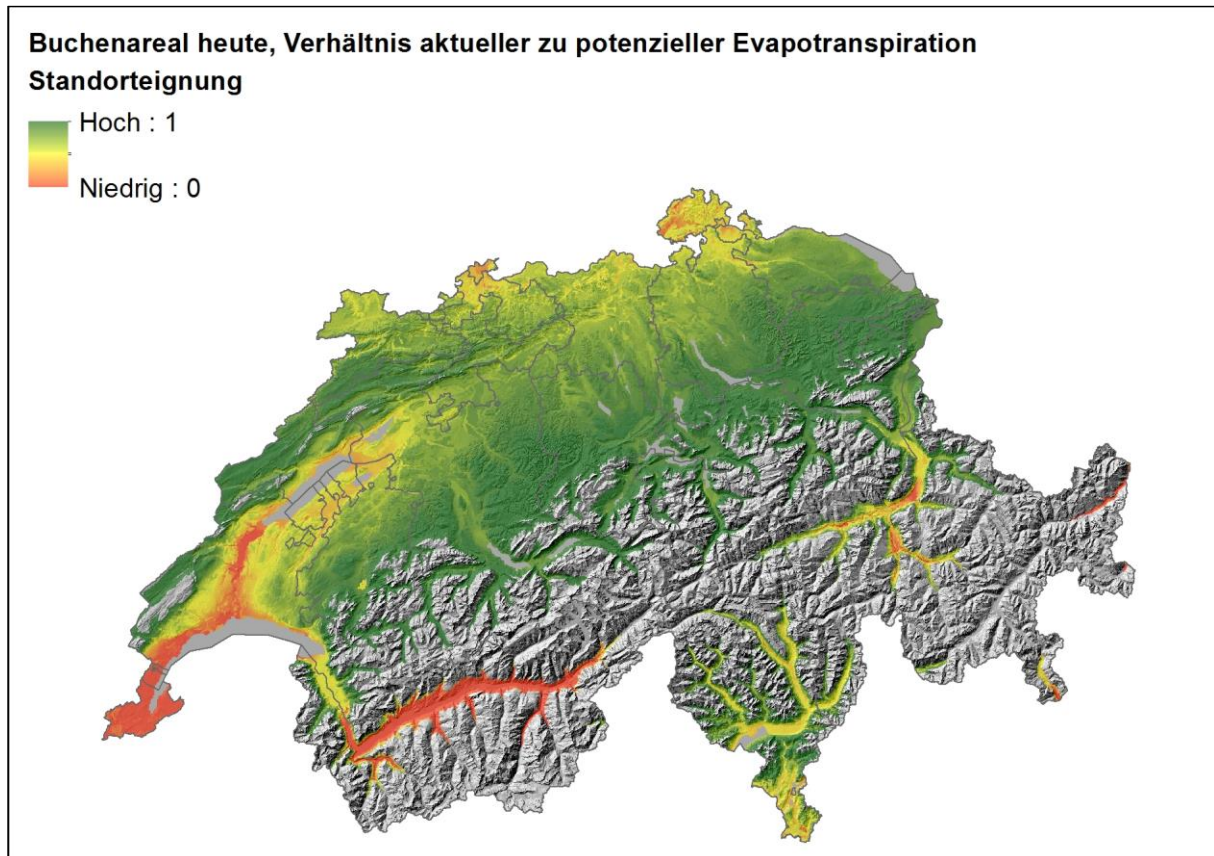


Abb. 91: Modellerte Standorteignung für das Buchenareal heute, Klimaparameter: Verhältnis aktueller zu potenzieller Evapotranspiration. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.

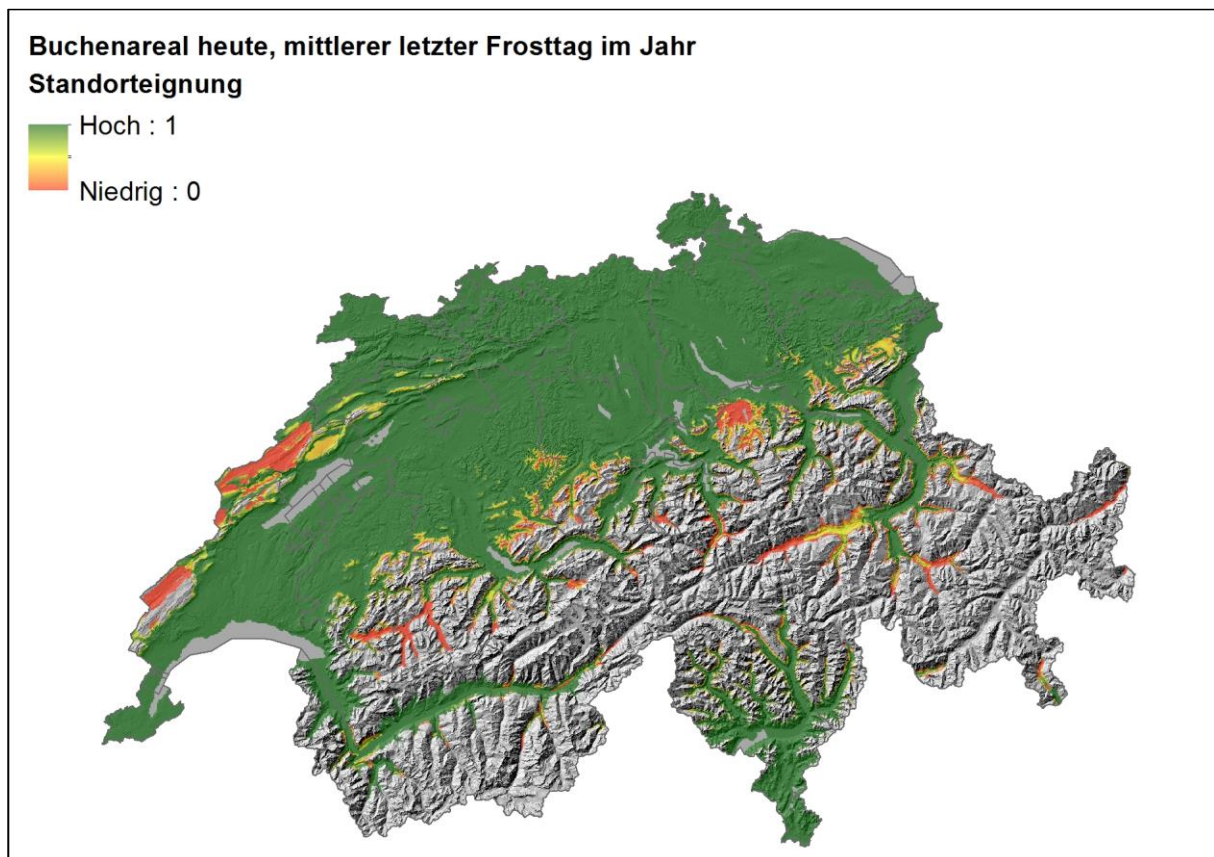


Abb. 92: Modellerte Standorteignung für das Buchenareal heute, Klimaparameter: Mittlerer letzter Frosttag im Jahr. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.



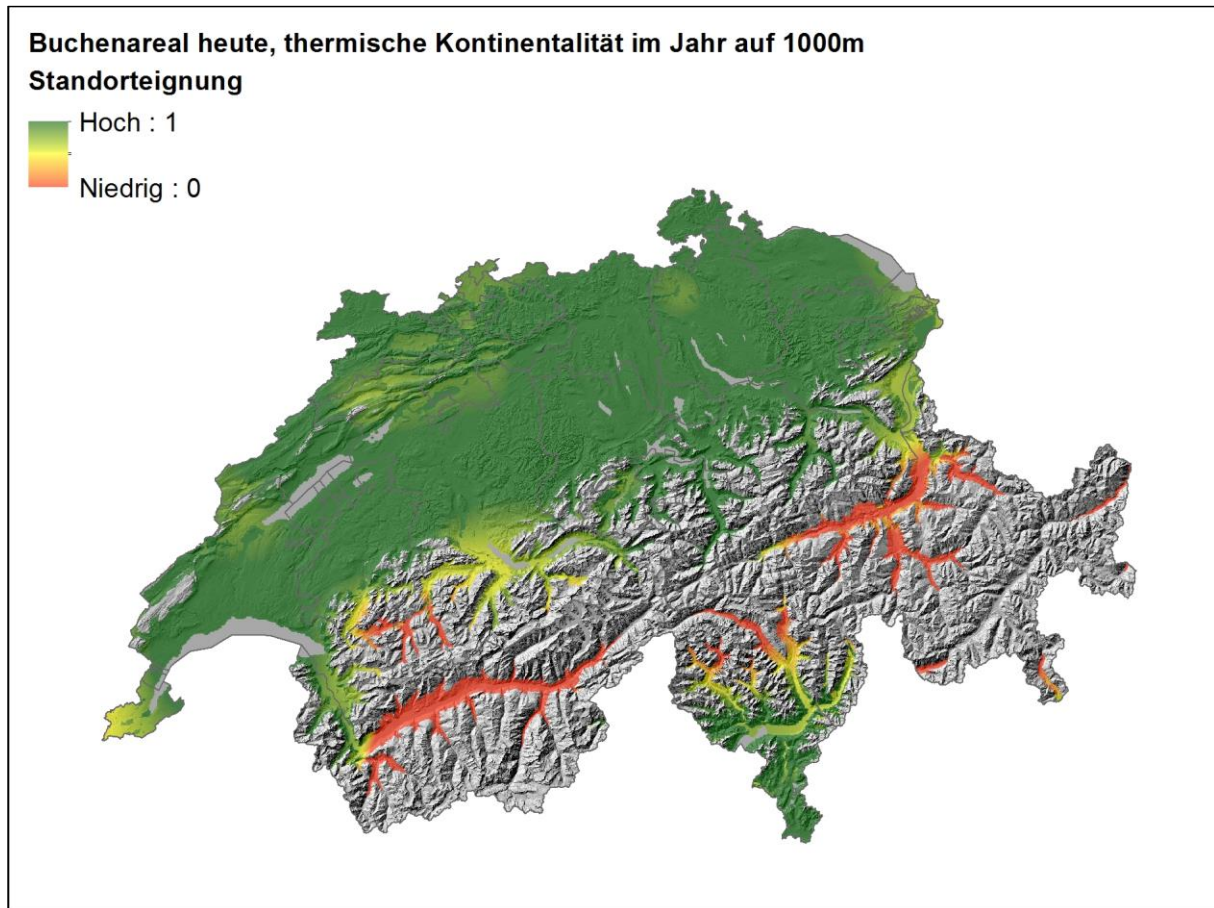


Abb. 93: Modellierte Standorteignung für das Buchenareal heute, Klimaparameter: Thermische Kontinentalität auf 1000 m ü. M. im Jahr. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.

### 3.4.2 Modellierungen des Buchenareals mit der Klimazukunft RegCM3

Die folgenden beiden Abbildungen (kontinuierliche und binäre Darstellung) zeigen die Ergebnisse der Modellierung für die Klimazukunft RegCM3 in der Periode 2070-2099 (ohne untere Begrenzung, mit Obergrenze bei 1700 m ü. M.). Aus der Werteskala zwischen 0 und 1 wurde wie bei der Modellierung beim heutigen Klima der Wert 0.75 für die Standortsregionen 4 und 5 (Süden) und der Wert 0.65 für die übrige Schweiz (Norden) als Schwellenwert für eine binäre Darstellung ausgewählt.

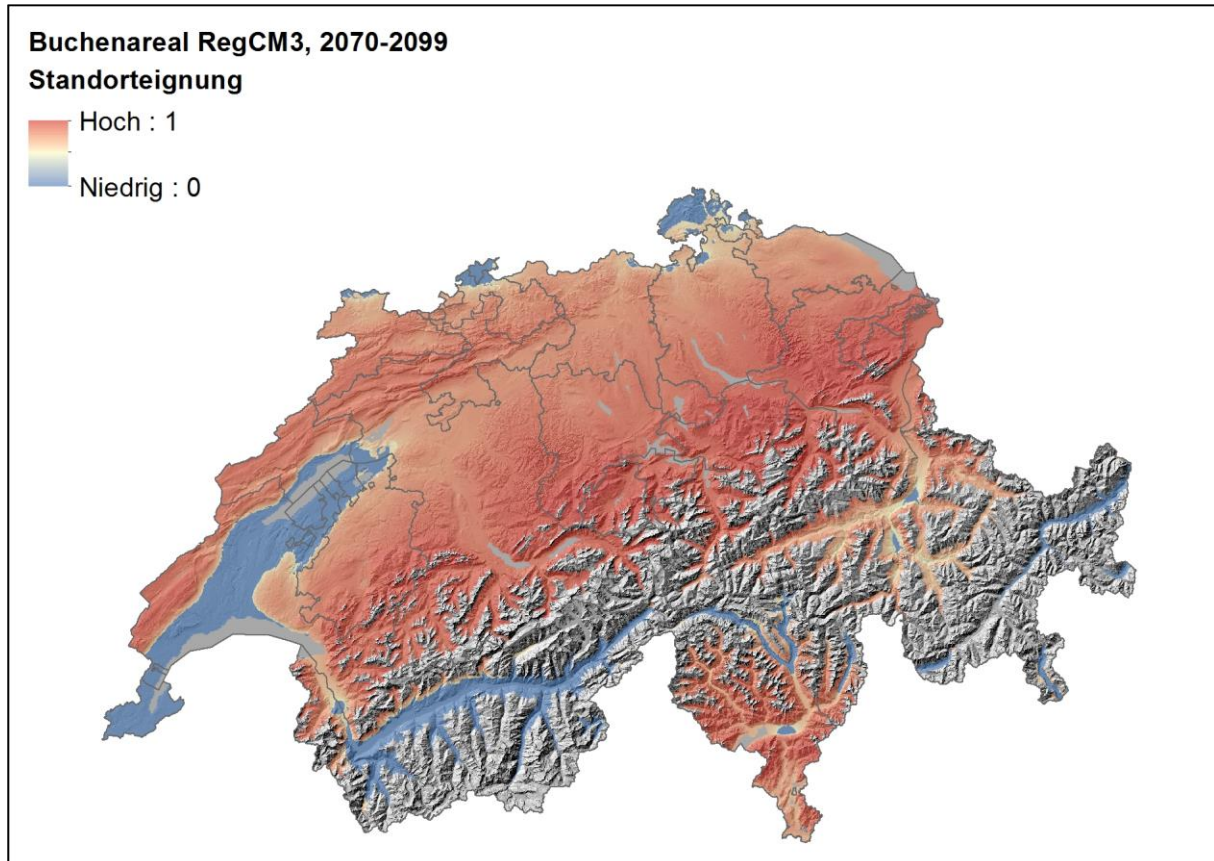


Abb. 94: Modellierte Buchenarealgrenze mit Obergrenze bei 1700 m ü. M., Klimazukunft RegCM3, kontinuierliche Darstellung der Standorteignung.

### Buchenareal RegCM3, 2070-2099, binäre Darstellung

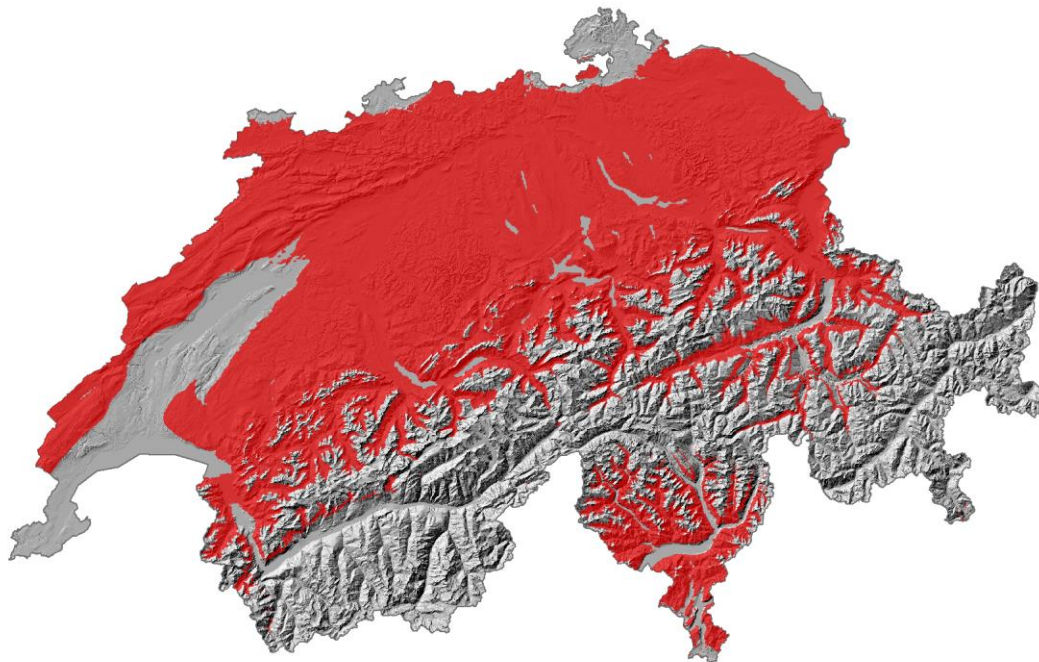


Abb. 95: Modelliertes Buchenareal, mit Obergrenze bei 1700 m ü. M., Klimazukunft RegCM3, binäre Darstellung der Standorteignung (Schwellenwert Norden 0.65; Schwellenwert Süden 0.75).

Ein Vergleich der Modellierung RegCM3 mit der Modellierung von PorTree+ wurde im Projektteil «Vergleich verschiedener Modelle der Baumartenverbreitung» (siehe Frehner et al. 2017) durchgeführt.

#### Veränderungen gegenüber heutiger Modellierung

Die Region zwischen Genfersee und Neuenburgersee wird nach den Modellen in der Klimazukunft RegCM3 grossflächig für die Buche zu ungeeignetem Habitat. Ebenfalls zeigt die Habitateignung im Kanton JU, bei BS/BL, SH und an der nördlichen Grenze des Kantons AG eine rückläufige Tendenz auf. Im Gegenzug dehnt sich nach den Modellen das für die Buche geeignete Habitat in die Höhen aus, was eine grossflächige Zunahme in den Voralpen und im Kanton GR und eine geringere im Kanton TI zur Folge haben könnte.

#### Welche Klimaparameter beeinflussen die Habitateignung für die Buche bei der Klimazukunft RegCM3?

Abb. 96 und Abb. 97 zeigen, wie die einzelnen Klimaparameterkarten in die Modellierung des Buchenareals (RegCM3; mit Obergrenze bei 1700 m ü. M.) einfließen. Sämtliche Karten werden im Anhang dargestellt, nachfolgend werden nur die entscheidenden, sich stark verändernden Klimaparameter aufgezeigt. In den Gebieten SH, BS/BL und zwischen dem Genfersee und Neuenburgersee könnten nach Aussage der Modelle in Zukunft der Sommerniederschlag und das Verhältnis  $ETa/ETp$  die Habitateignung der Buche eingrenzen.



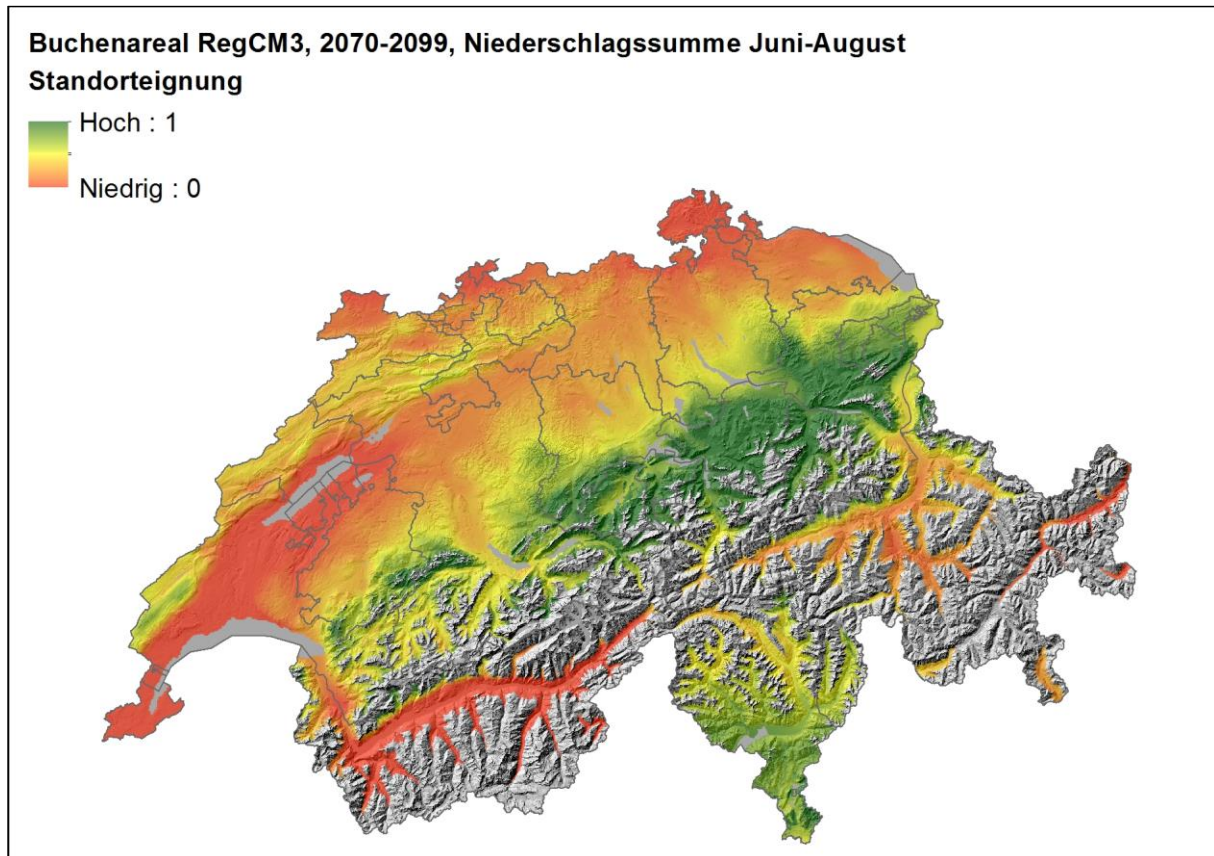


Abb. 96: Modellerte Standorteignung für das Buchenareal, Klimaparameter: Niederschlagssumme Juni - August. Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.

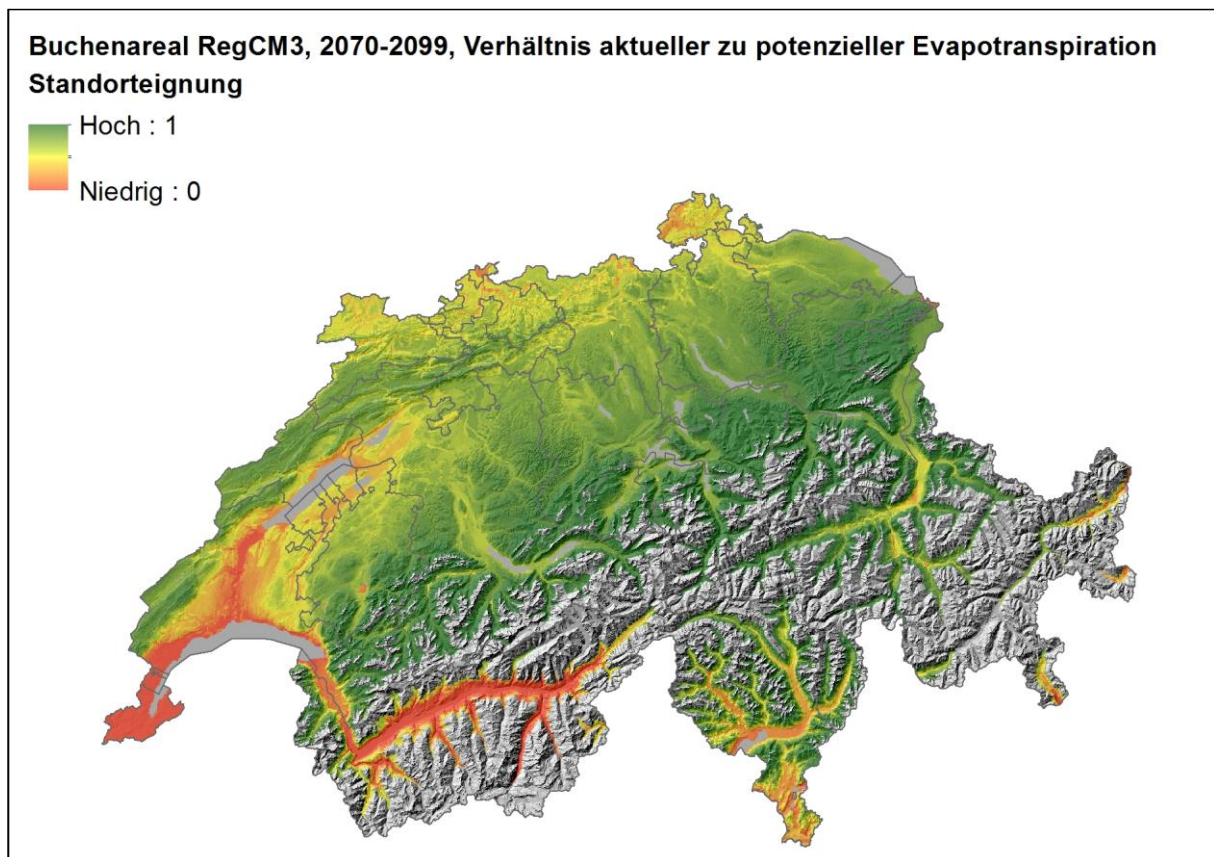


Abb. 97: Modellerte Standorteignung für das das Buchenareal, Klimaparameter: Verhältnis aktueller zu potenzieller Evapotranspiration. Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.

### 3.4.3 Modellierungen des Buchenareals mit der Klimazukunft CLM

Die folgenden beiden Abbildungen (kontinuierliche Darstellung und binäre Darstellung) zeigen die Ergebnisse der Modellierung für die Klimazukunft CLM (ohne untere Begrenzung, mit Obergrenze 1700 m ü. M.). Auf der Werteskala zwischen 0 und 1 wurde der Wert 0.75 für die Standortsregionen 4 und 5 (Süden) und der Wert 0.65 für die übrige Schweiz (Norden) als Schwellenwert für eine binäre Darstellung ausgewählt.

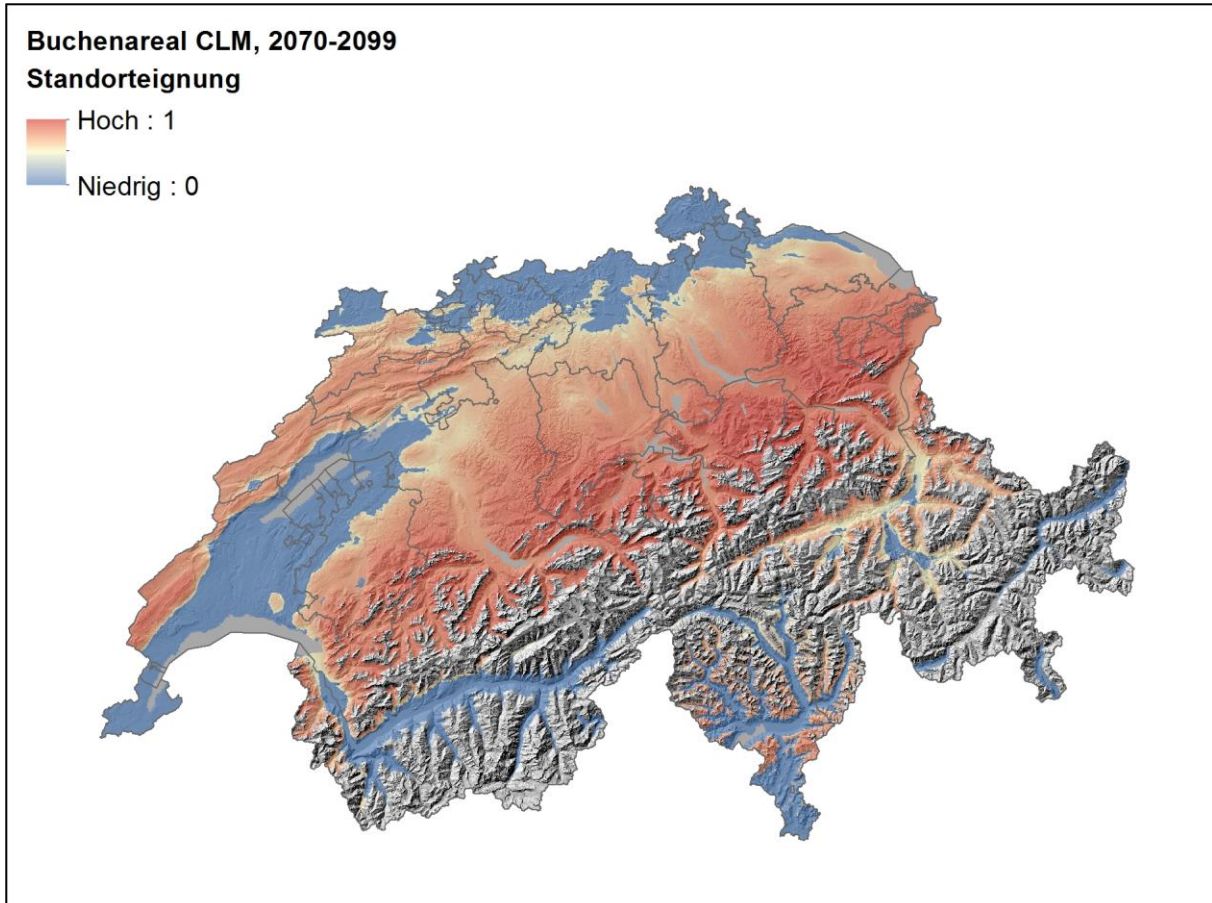


Abb. 98: Modellierte Buchenarealgrenze mit Obergrenze bei 1700 m ü. M., Klimazukunft CLM, kontinuierliche Darstellung der Standorteignung.



### Buchenareal CLM, 2070-2099, binäre Darstellung

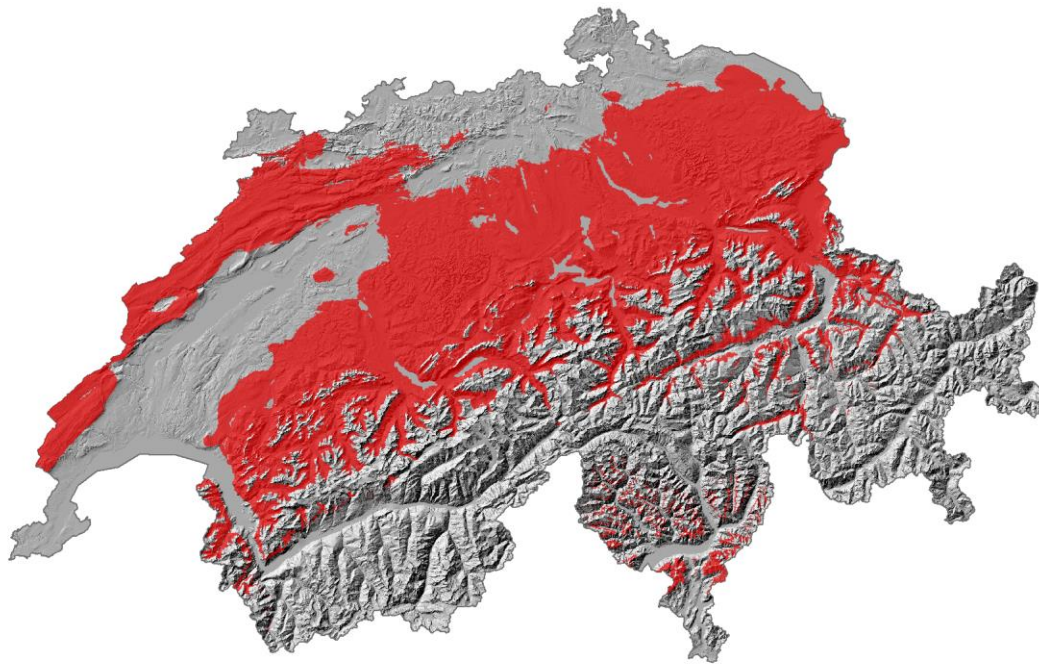


Abb. 99: Modelliertes Buchenareal mit Obergrenze bei 1700 m ü. M., Klimazukunft CLM, binäre Darstellung der Standort-eignung (Schwellenwert Norden 0.65; Schwellenwert Süden 0.75).

Ein Vergleich der Modellierung CLM mit der Modellierung von PorTree+ wurde im Projektteil «Vergleich verschiedener Modelle der Baumartenverbreitung» (siehe Frehner et al. 2017) durchgeführt.

### Veränderungen gegenüber heutiger Modellierung und Unterschied zur Klimazukunft RegCM3

Im westlichen und nördlichen Mittelland weist das Modell der Klimazukunft CLM in der Periode 2070-2099 grossflächig keine Habitateignung für die Buche mehr aus. Ebenfalls stark rückläufig ist die Habitateignung im TI und im Misoix in den tieferen Lagen. Nach Modell erfolgt eine starke Höhengausdehnung, was zu einer grossflächigen Zunahme in den Voralpen, im Jura und in geringerem Masse als bei der Klimazukunft RegCM3 im Kanton GR führen kann. Bei Annahme der Klimazukunft RegCM3 ist das modellierte Buchenareal viel grösser als bei der Klimazukunft CLM.

### Welche Klimaparameter beeinflussen die Habitateignung für die Buche bei der Klimazukunft CLM?

Abb. 100 und Abb. 101 zeigen, wie die Klimaparameterkarten des Niederschlags und der potenziellen Evapotranspiration in die Modellierung des Buchenareals (CLM; mit Obergrenze bei 1700 m ü. M.) einfließen. Sämtliche übrigen Karten werden im Anhang dargestellt, nachfolgend werden nur die entscheidenden, sich stark verändernden Klimaparameter aufgezeigt. Nach dem Modell ist der Sommerniederschlag zunehmend in mehreren Regionen begrenzend, denn er verändert sich bei der Klimazukunft CLM besonders stark.

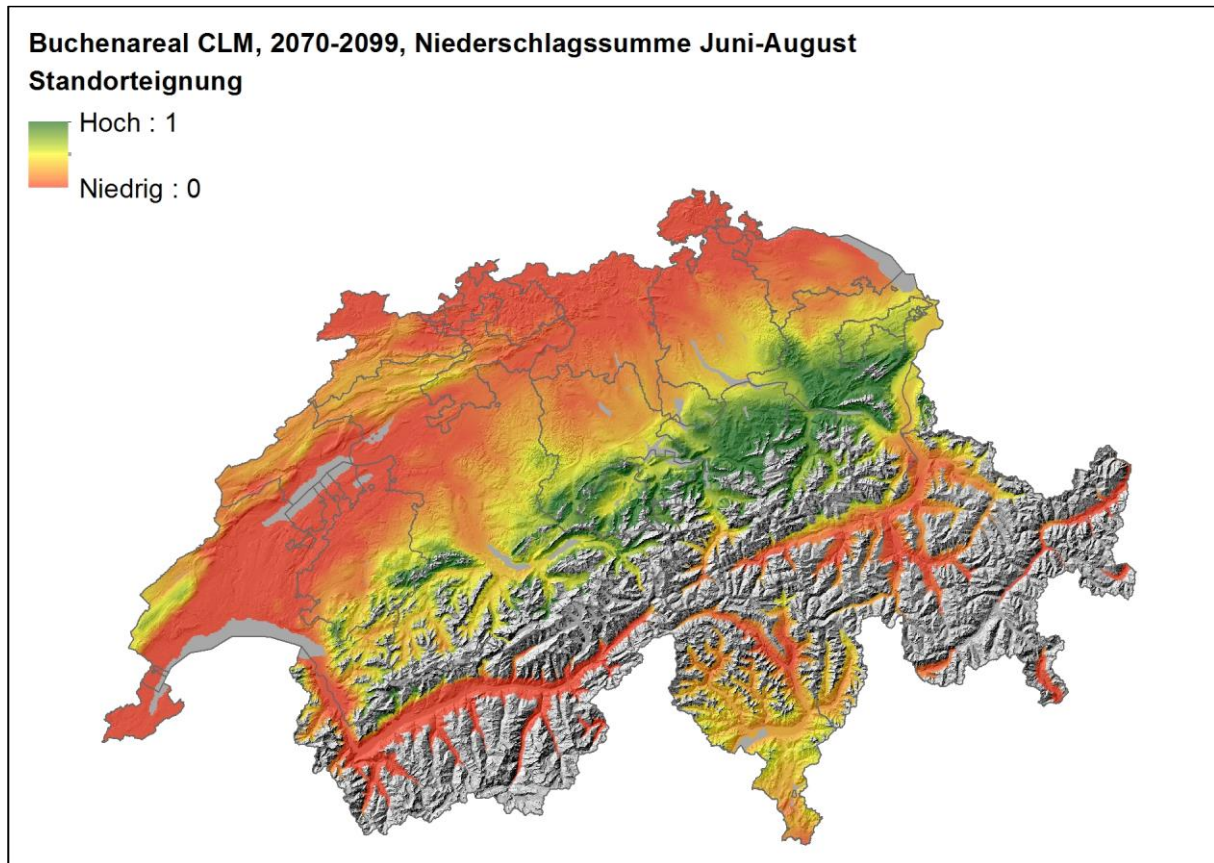


Abb. 100: Modellerte Standorteignung für das Buchenareal in der Periode 2070-2099, Klimaparameter: Niederschlags-  
summe Juni - August. Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.

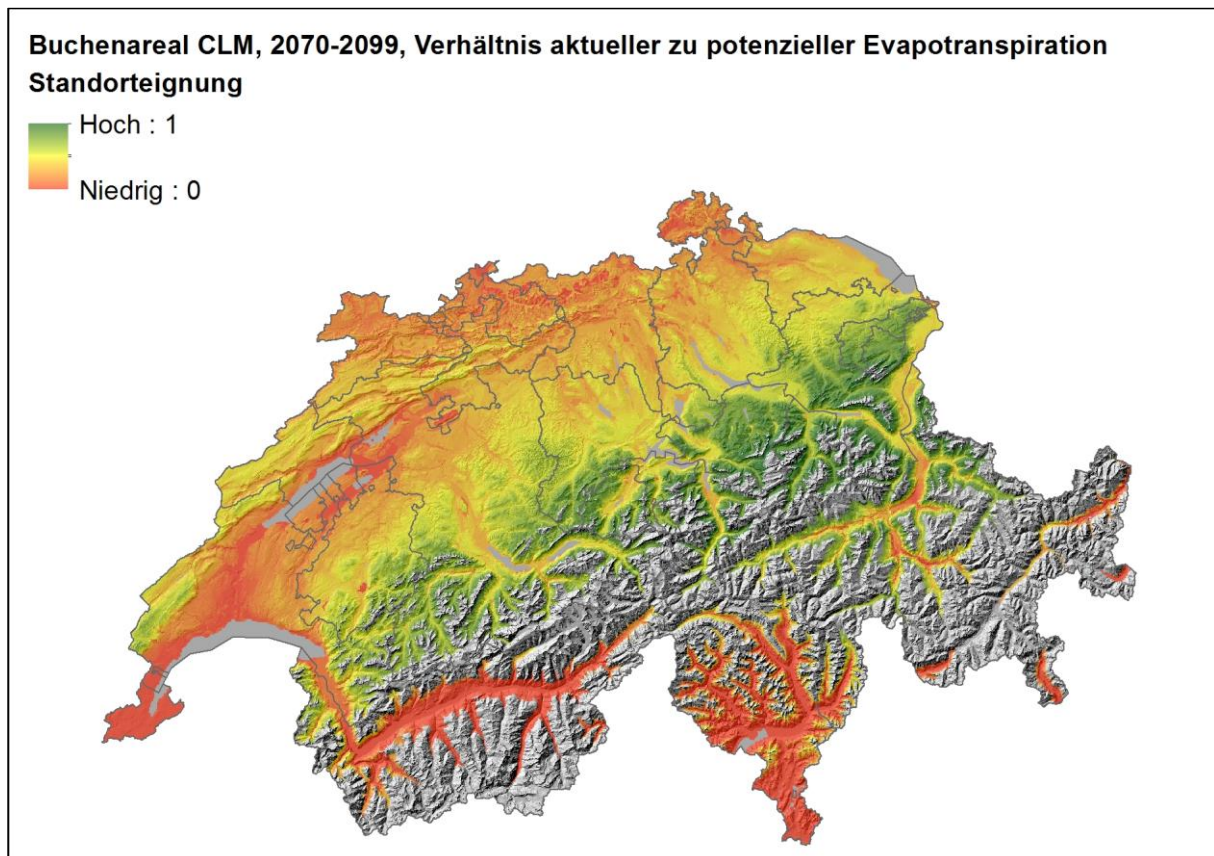


Abb. 101: Modellerte Standorteignung für das Buchenareal in der Periode 2070-2099, Klimaparameter: Verhältnis aktuel-  
ler zu potenzieller Evapotranspiration. Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.



### 3.5 Grenze Tannen-Hauptareal / Tannen-Nebenareal

#### 3.5.1 Heutige Modellierung der Grenze Tannen-Hauptareal / Tannen-Nebenareal

Die horizontale Arealgrenze zwischen dem Tannen-Hauptareal und dem Tannen-Nebenareal wurde ohne untere Begrenzung mit Obergrenze bei 1500 m ü. M. für die ganze Schweiz modelliert. Abb. 102 und Abb. 103 (kontinuierliche Darstellung und binäre Darstellung) zeigen die Ergebnisse der Modellierung für den heutigen Zustand. Für die binäre Darstellung wurde aus der Werteskala zwischen 0 und 1 der Wert 0.7 als Schwellenwert ausgewählt, da dieser zu den höchsten Übereinstimmungen zwischen dem modellierten und beobachteten Areal führt.

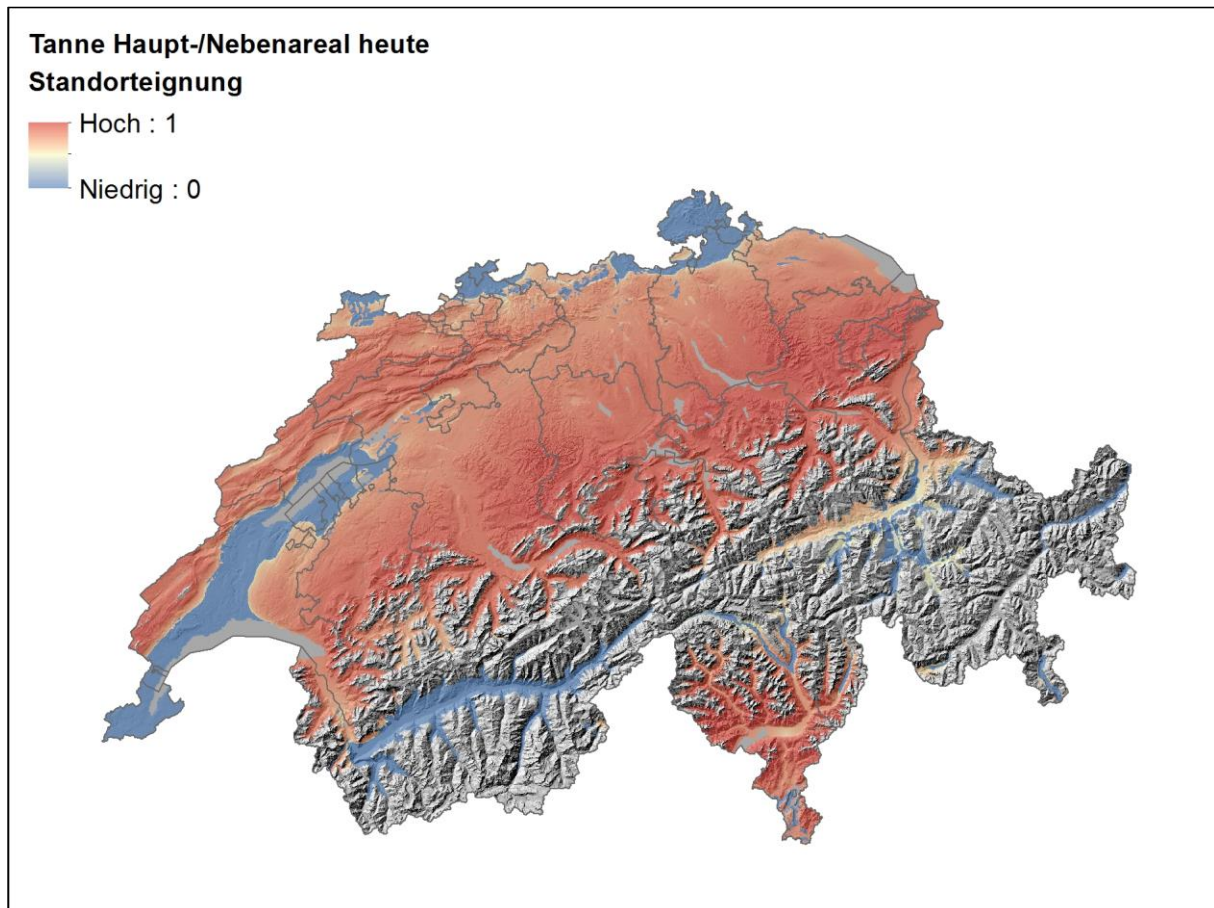


Abb. 102: Modellierte Arealgrenze zwischen Tannen-Hauptareal und Tannen-Nebenareal heute, mit Obergrenze bei 1500 m ü. M., kontinuierliche Darstellung der Standorteignung.



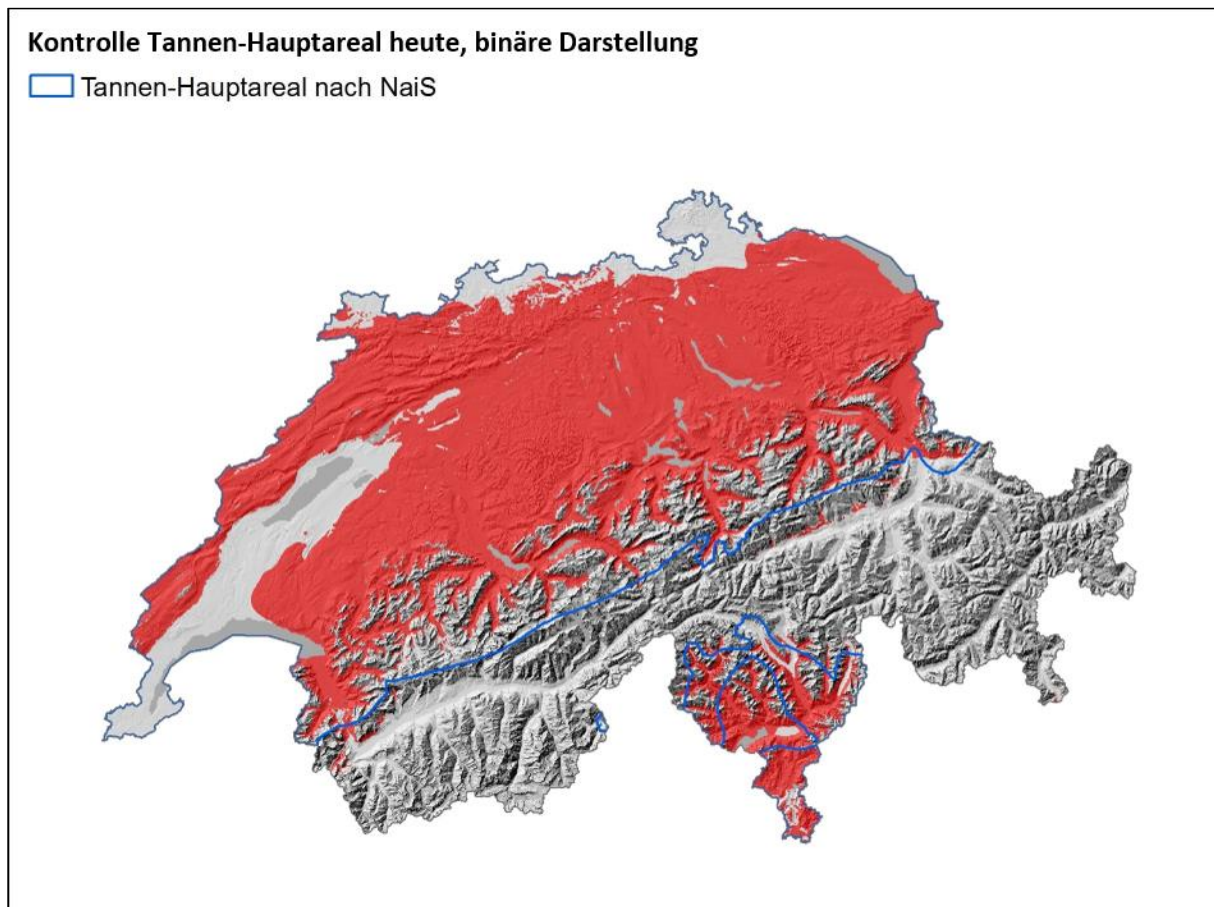


Abb. 103: Modelliertes Tannen-Hauptareal heute, mit Tannen-Hauptarealgrenze (blaue Linien) nach NaiS. Binäre Darstellung der Standorteignung (Schwellenwert 0.7).

### Überprüfung des modellierten heutigen Tannen-Hauptareals

Eingangs VS geht die Tannenmodellierung weiter als die Vorgaben aus NaiS (bis Martigny; Abb. 103). Im Kanton UR weist die Modellierung im Göschenertal und im Meiental noch Tannen-Hauptareal auf im Gegensatz zu NaiS. In diesen Seitentälern ist das Tannenareal schwierig zu erfassen, u.a. weil lokale Kaltluftseen in der Temperaturkarte nicht berücksichtigt wurden. Im Kanton GR und SG weist das Modell in den Nordtälern der Surselva, bei Flims und im hinteren Taminatal im Gegensatz zur heutigen Tannenverbreitung noch Tannen-Hauptareal auf. Auf der Alpensüdseite geht die Modellierung im Leventinatal zu wenig weit gegen Norden, hingegen weist die Modellierung im Bleniotal, nördlich von Peccia und im Calancatal über die Tannenverbreitung hinaus weiter ins Talinnere Tannen-Hauptareal aus.

### Welche Klimaparameter beeinflussen die Tannenverbreitung im Hauptareal?

Abb. 104 bis Abb. 109 zeigen, wie die einzelnen Klimaparameterkarten in die Modellierung des Tannen-Hauptareals (mit Obergrenze bei 1500 m ü. M.) einfließen.

Die klimatischen Einflussfaktoren scheinen regional unterschiedlich stark begrenzend. Eingangs VS könnte die thermische Kontinentalität, die Niederschlagssumme Juni-August und die relative Luftfeuchtigkeit entscheidend für die Modellgrenze sein. Im Kanton GR, im Taminatal und in der Leventina könnten die thermische Kontinentalität, die relative Luftfeuchtigkeit und evtl. die Föhnhäufigkeit im Jahr entscheidend für den Wechsel von Haupt- zu Nebenareal sein.

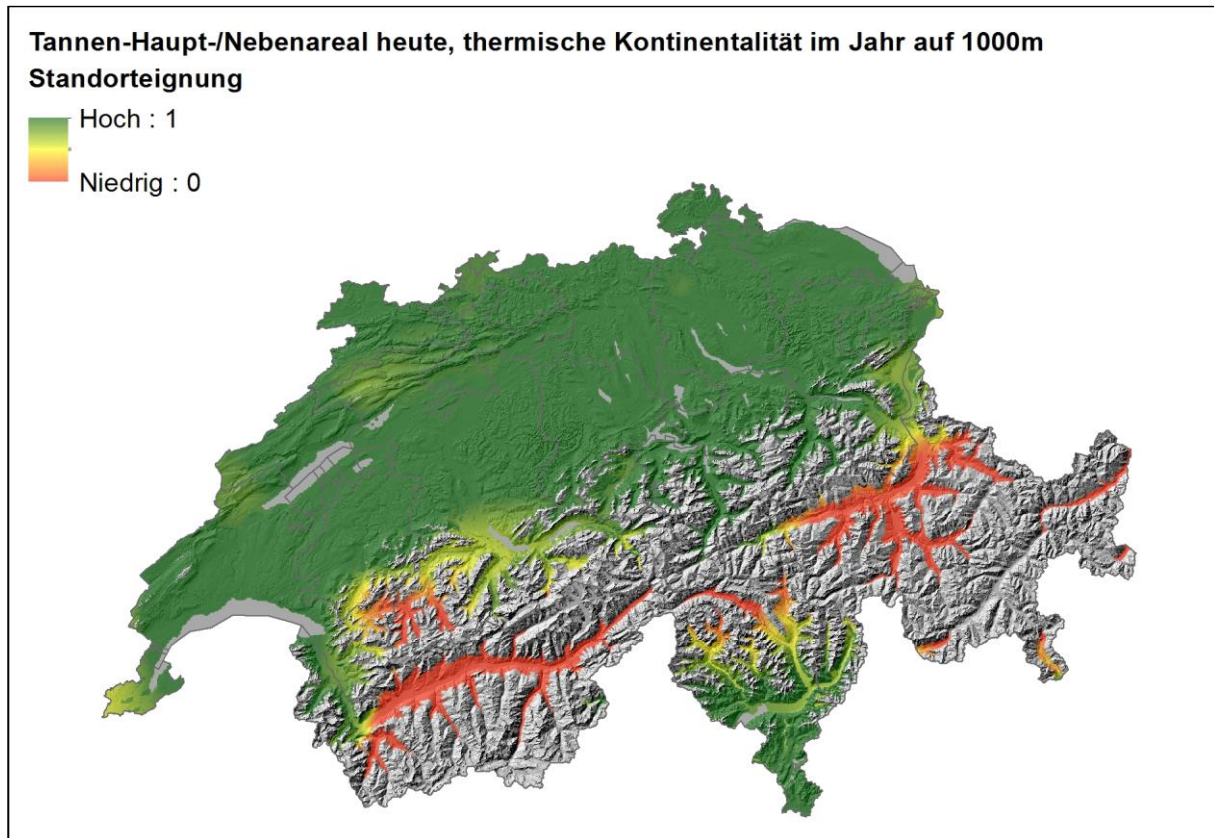


Abb. 104: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Hauptareal (Abgrenzung zum Tannen-Nebenareal) heute, Klimaparameter: Thermische Kontinentalität auf 1000 m ü. M. im Jahr. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.

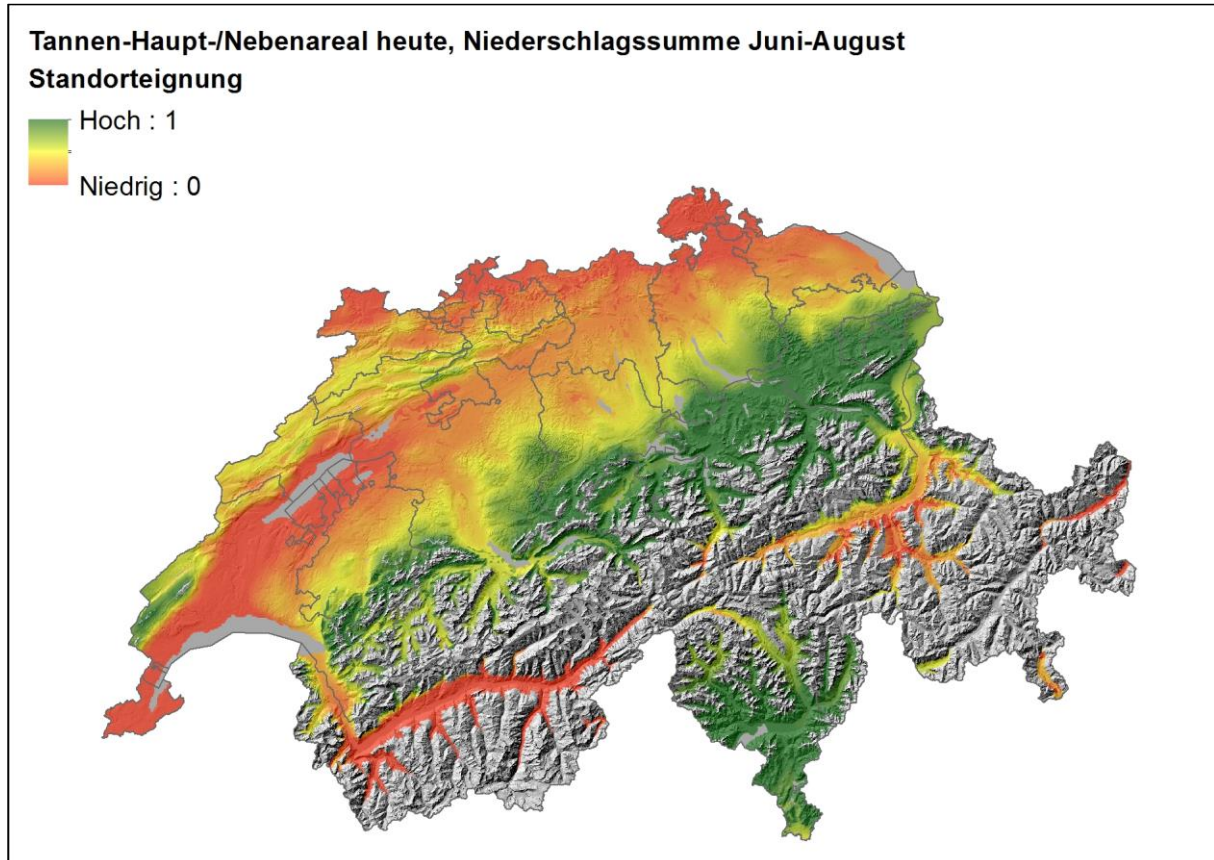


Abb. 105: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Hauptareal (Abgrenzung zum Tannen-Nebenareal) heute, Klimaparameter: Niederschlagssumme Juni-August. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.



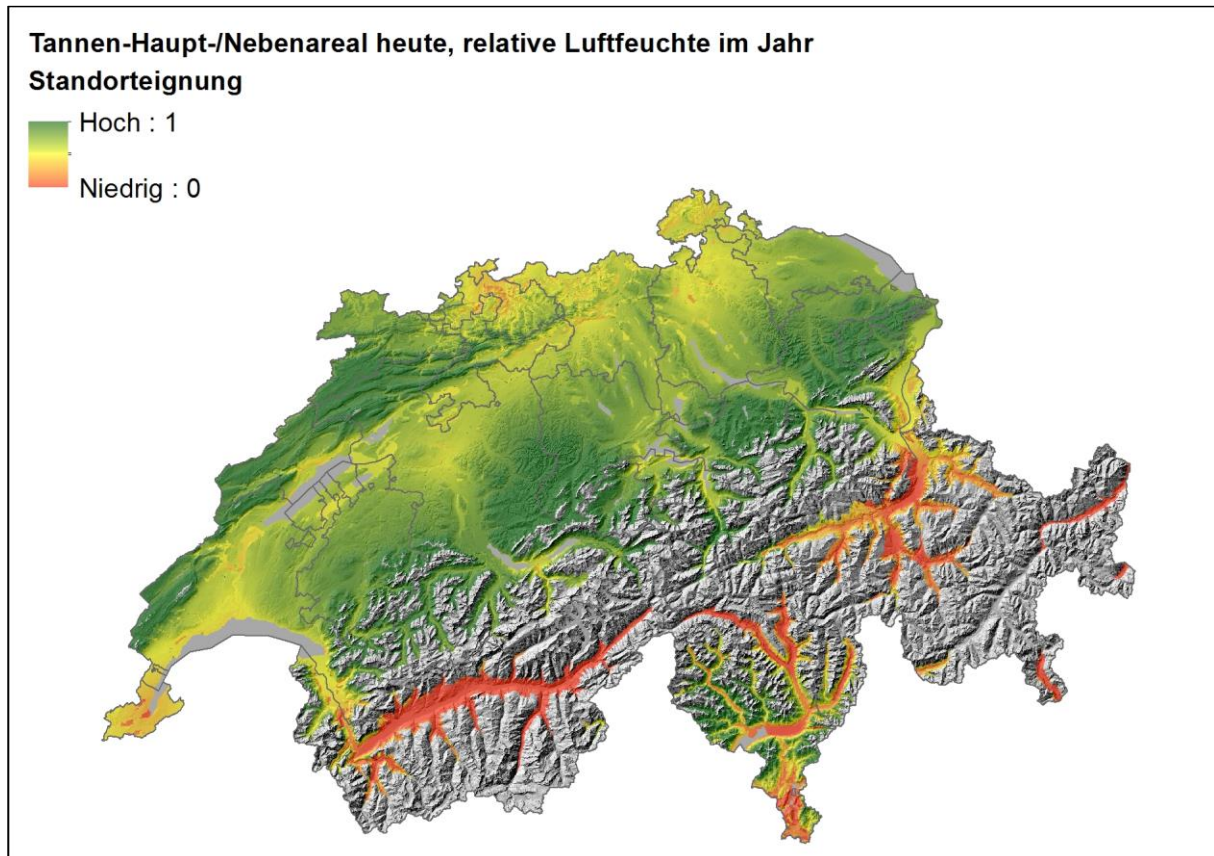


Abb. 106: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Hauptareal (Abgrenzung zum Tannen-Nebenareal) heute, Klimaparameter: Mittlere relative Luftfeuchtigkeit um 13:30 Uhr im Jahr. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.

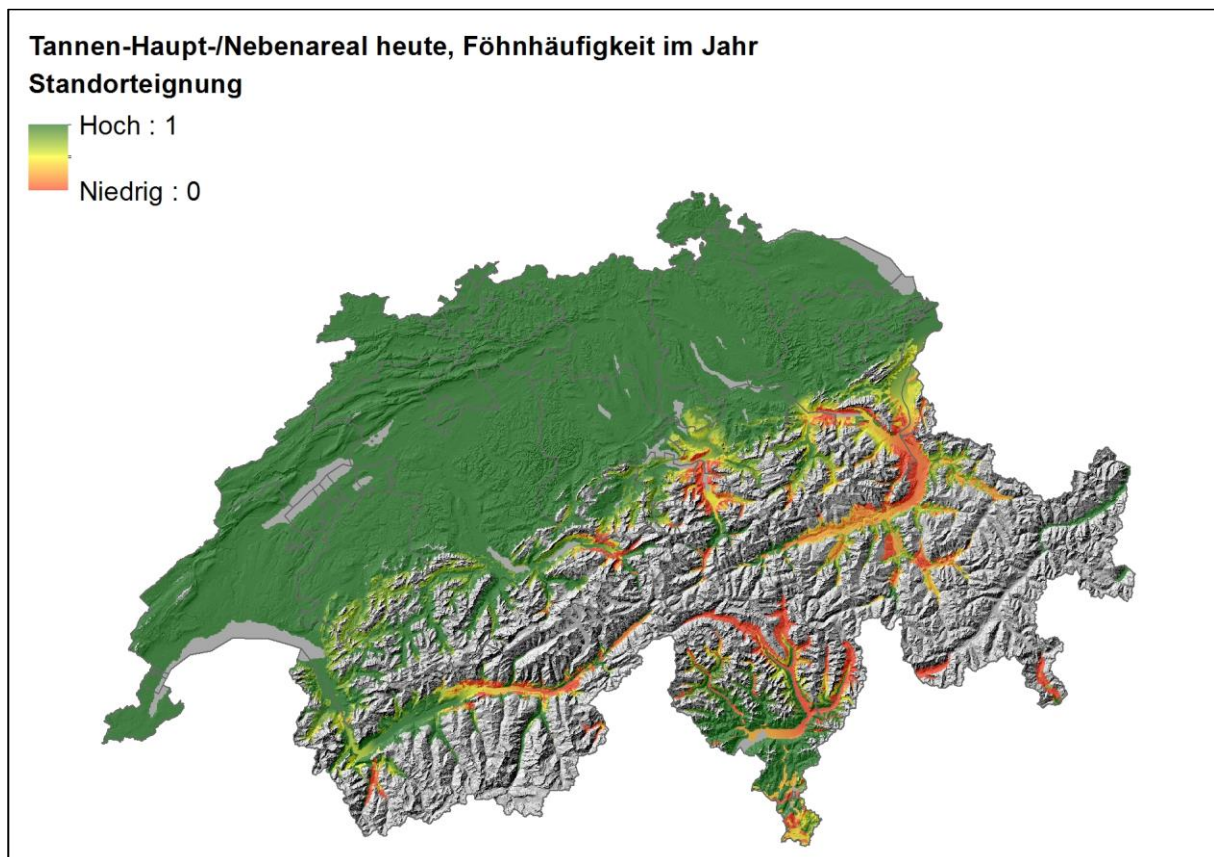


Abb. 107: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Hauptareal (Abgrenzung zum Tannen-Nebenareal) heute, Klimaparameter: Föhnhäufigkeit im Jahr. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.

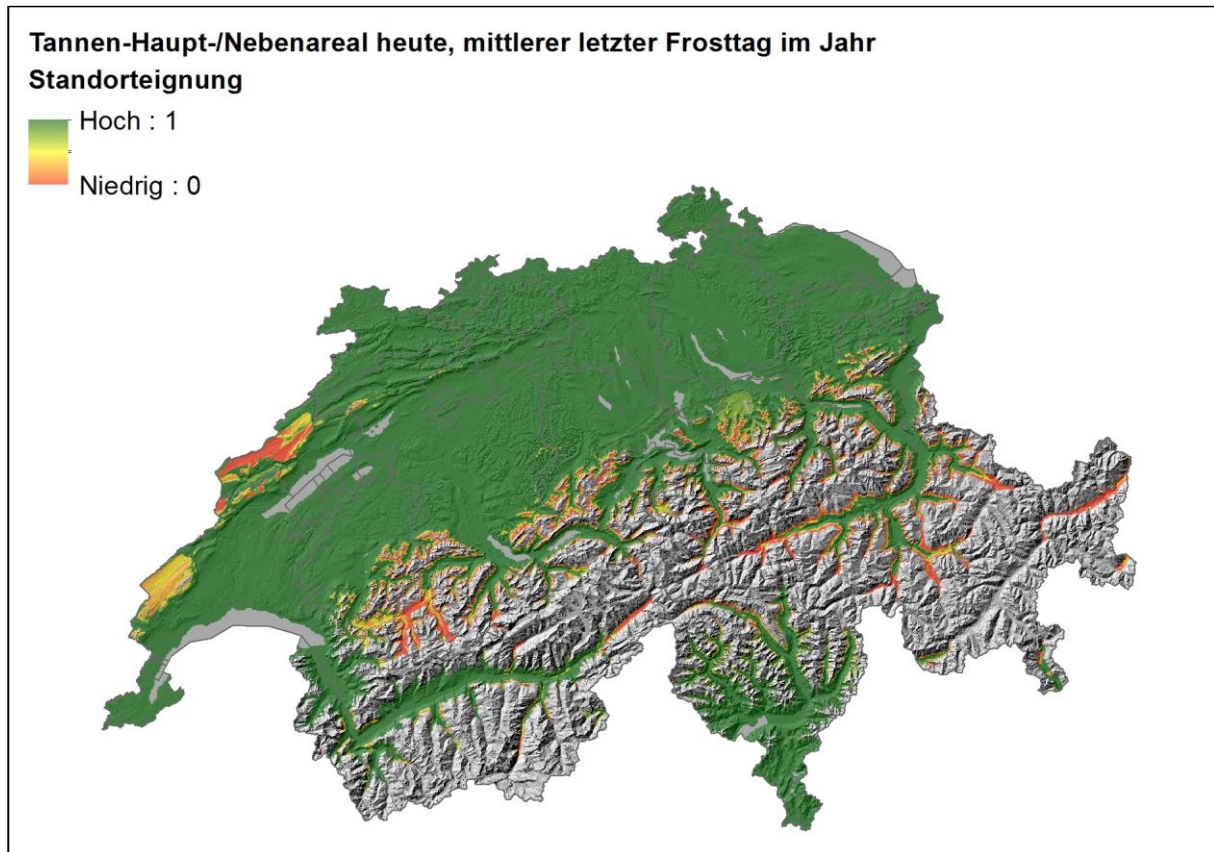


Abb. 108: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Hauptareal (Abgrenzung zum Tannen-Nebenareal) heute, Klimaparameter: Mittlerer letzter Frosttag im Jahr. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.

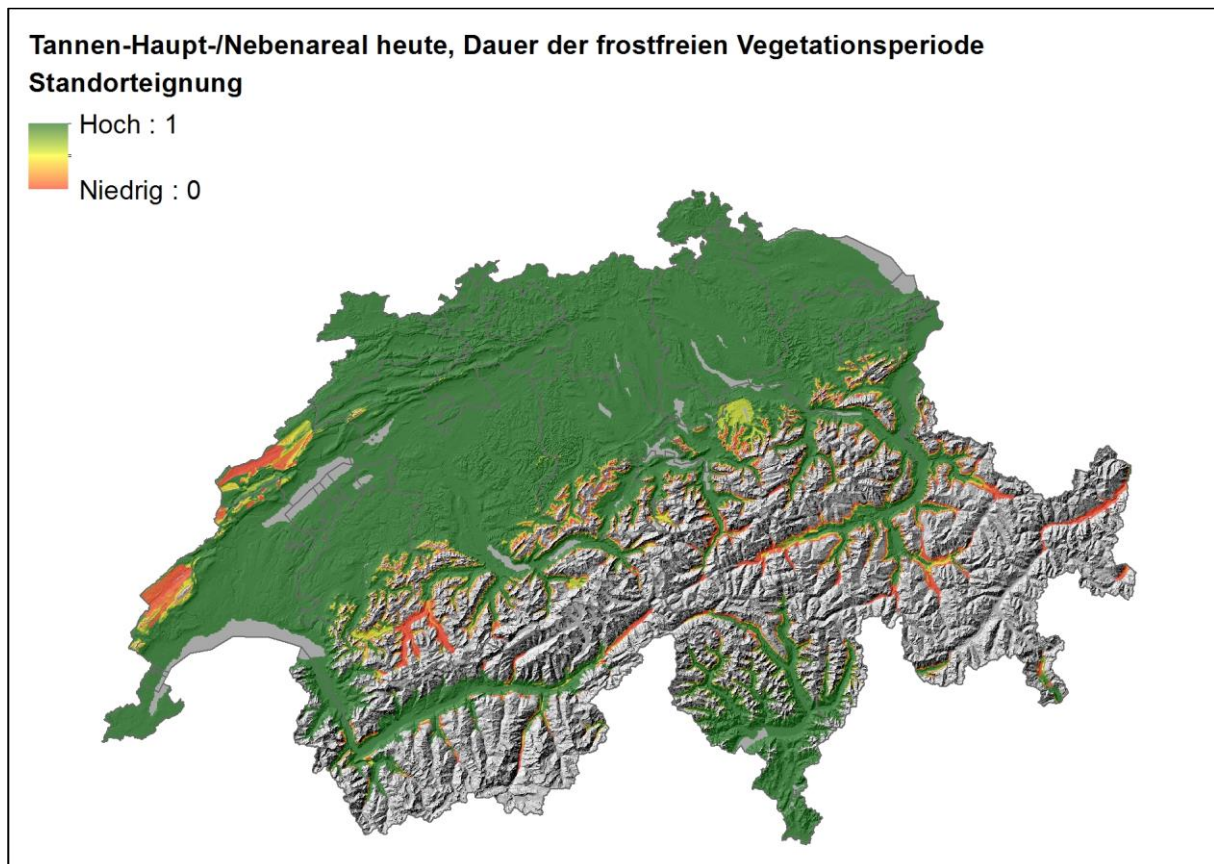


Abb. 109: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Hauptareal (Abgrenzung zum Tannen-Nebenareal) heute, Klimaparameter: Dauer der frostfreien Vegetationsperiode. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.



### 3.5.2 Modellierungen der Grenze Tannen-Hauptareal / Tannen-Nebenareal mit der Klimazukunft RegCM3

Die folgenden beiden Abbildungen (kontinuierliche Darstellung und binäre Darstellung) zeigen die Ergebnisse der Modellierung für das RegCM3-Szenario (ohne untere Begrenzung, mit Obergrenze bei 1900 m ü. M.). Aus der Werteskala zwischen 0 und 1 wurde, wie bei der heutigen Modellierung, der Wert 0.7 als Schwellenwert für eine binäre Darstellung verwendet.

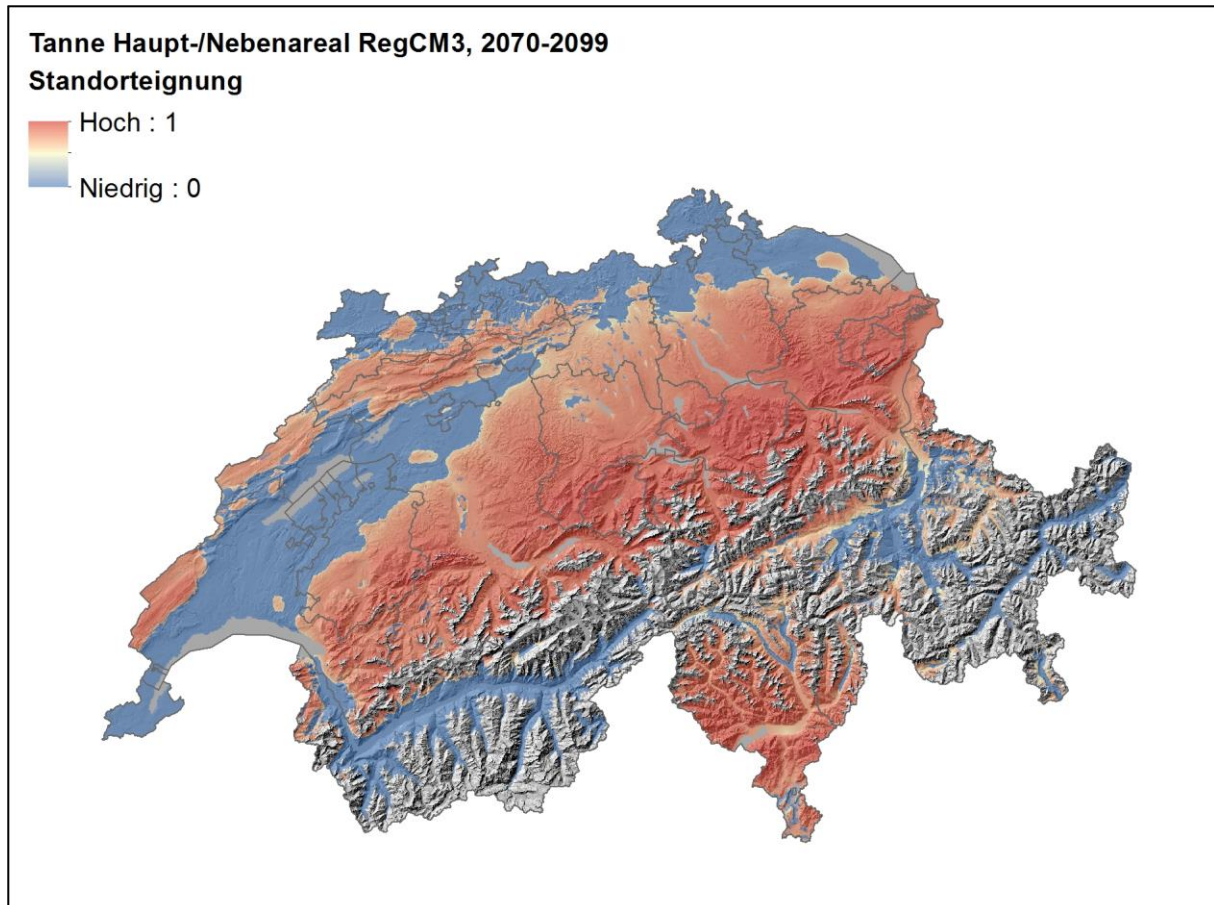


Abb. 110: Modellierte Arealgrenze zwischen Tannen-Hauptareal und Tannen-Nebenareal mit Obergrenze bei 1900 m ü. M., kontinuierliche Darstellung der Standorteignung, Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3.



### Tanne Hauptareal RegCM3, 2070-2099, binäre Darstellung

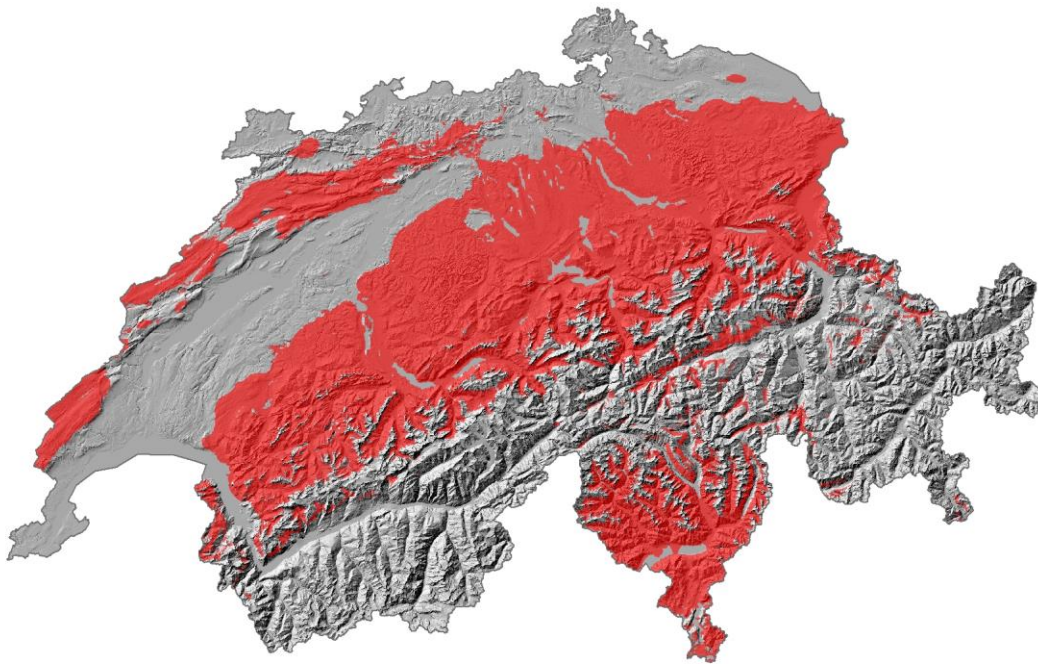


Abb. 111: Modelliertes Tannen-Hauptareal mit Obergrenze bei 1900 m ü. M., binäre Darstellung der Standorteignung (Schwellenwert 0.7), Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3.

#### Veränderungen gegenüber heutiger Modellierung

Im westlichen und nördlichen Mittelland weist das Modell der Klimazukunft RegCM3 grossflächig kein Tannen-Hauptareal mehr aus. Ein kleiner Rückzug des modellierten Areals befindet sich auch in der Bündner Herrschaft, im Prättigau und Eingang VS in tieferen Lagen. Im Gegenzug erfolgt eine Höhengausdehnung beim Modell v.a. in den Voralpen, im TI und im Misox. Wenig ausgedehnte, neu modellierte Areale in höheren Lagen weisen die Surselva, Mittelbünden, das Prättigau, das Bergell und Puschlav und die Nordtäler des VS auf.

#### Welche Klimaparameter beeinflussen die Habitateignung der Tanne im Hauptareal bei der Klimazukunft RegCM3?

Abb. 112 und Abb. 113 zeigen, wie die einzelnen Klimaparameterkarten in die Modellierung des Tannen-Hauptareals (ohne untere Begrenzung, mit Obergrenze bei 1900 m ü. M.) einfließen. Sämtliche Karten werden im Anhang dargestellt, nachfolgend werden nur die entscheidenden, sich stark verändernden Klimaparameter aufgezeigt.

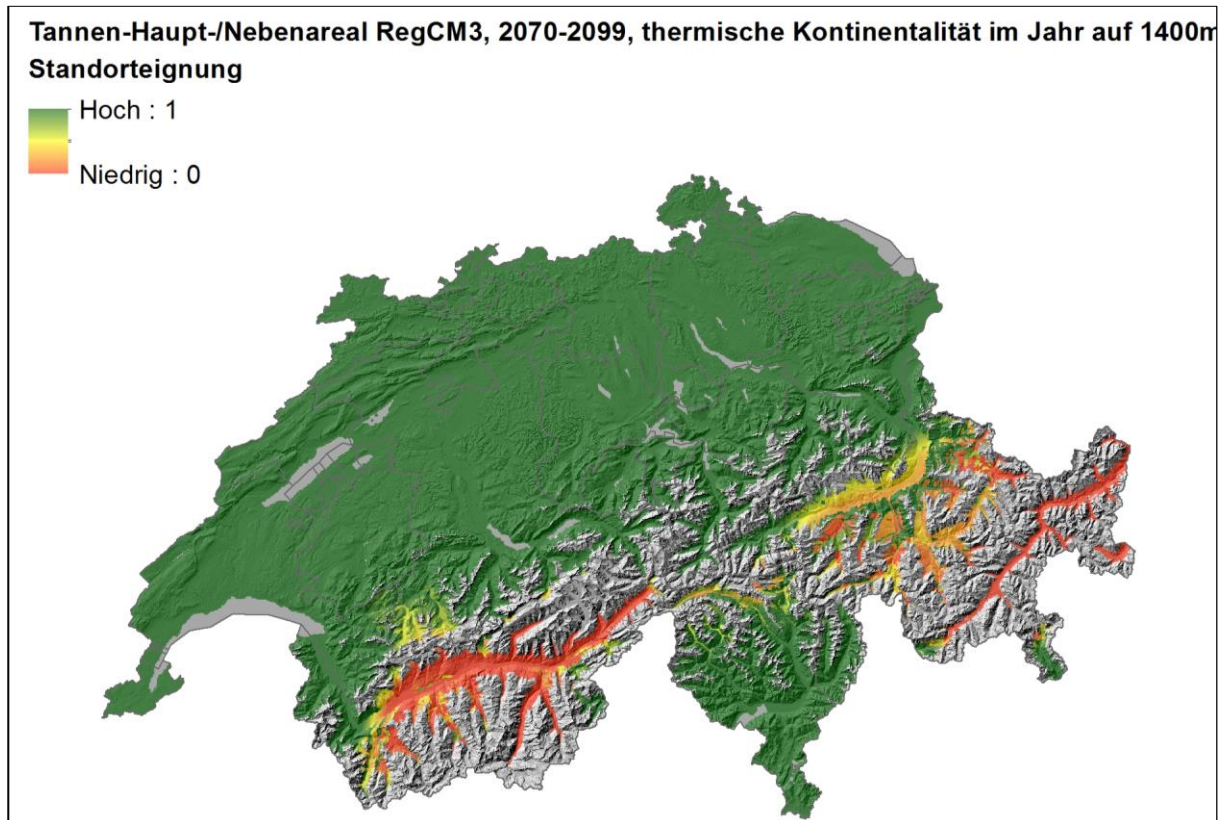


Abb. 112: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Hauptareal (Abgrenzung zum Tannen-Nebenareal), Periode 2070-2099, Klimaparameter: Thermische Kontinentalität auf 1400 m ü. M. im Jahr. Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.

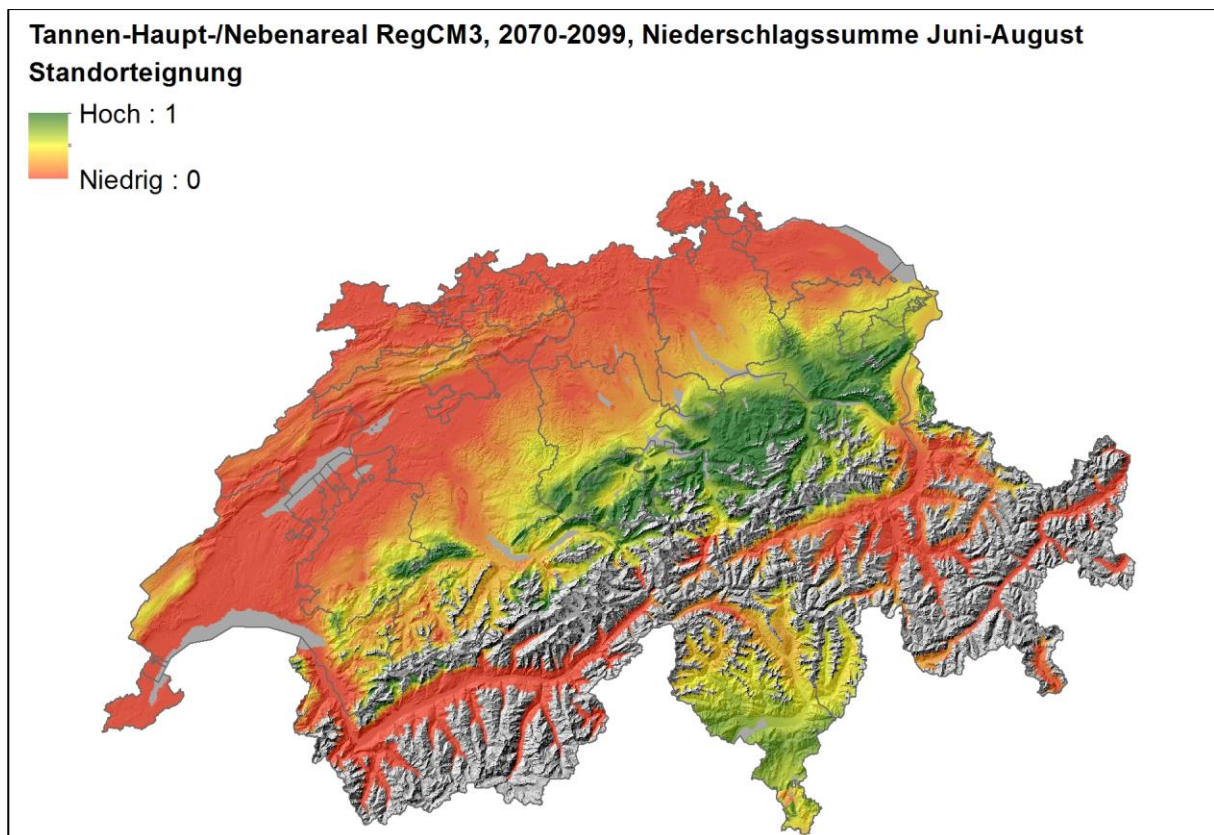


Abb. 113: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Hauptareal (Abgrenzung zum Tannen-Nebenareal), Periode 2070-2099, Klimaparameter: Niederschlagssumme Juni-August. Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.

### 3.5.3 Modellierungen der Grenze Tannen-Hauptareal / Tannen-Nebenareal mit der Klimazukunft CLM

Die folgenden beiden Abbildungen (kontinuierliche Darstellung und binäre Darstellung) zeigen die Ergebnisse der Modellierung für das CLM-Szenario (ohne untere Begrenzung, mit Obergrenze bei 1900 m ü. M.). Aus der Werteskala zwischen 0 und 1 wurde, wie bei der heutigen Modellierung, der Wert 0.7 als Schwellenwert für eine binäre Darstellung ausgewählt.

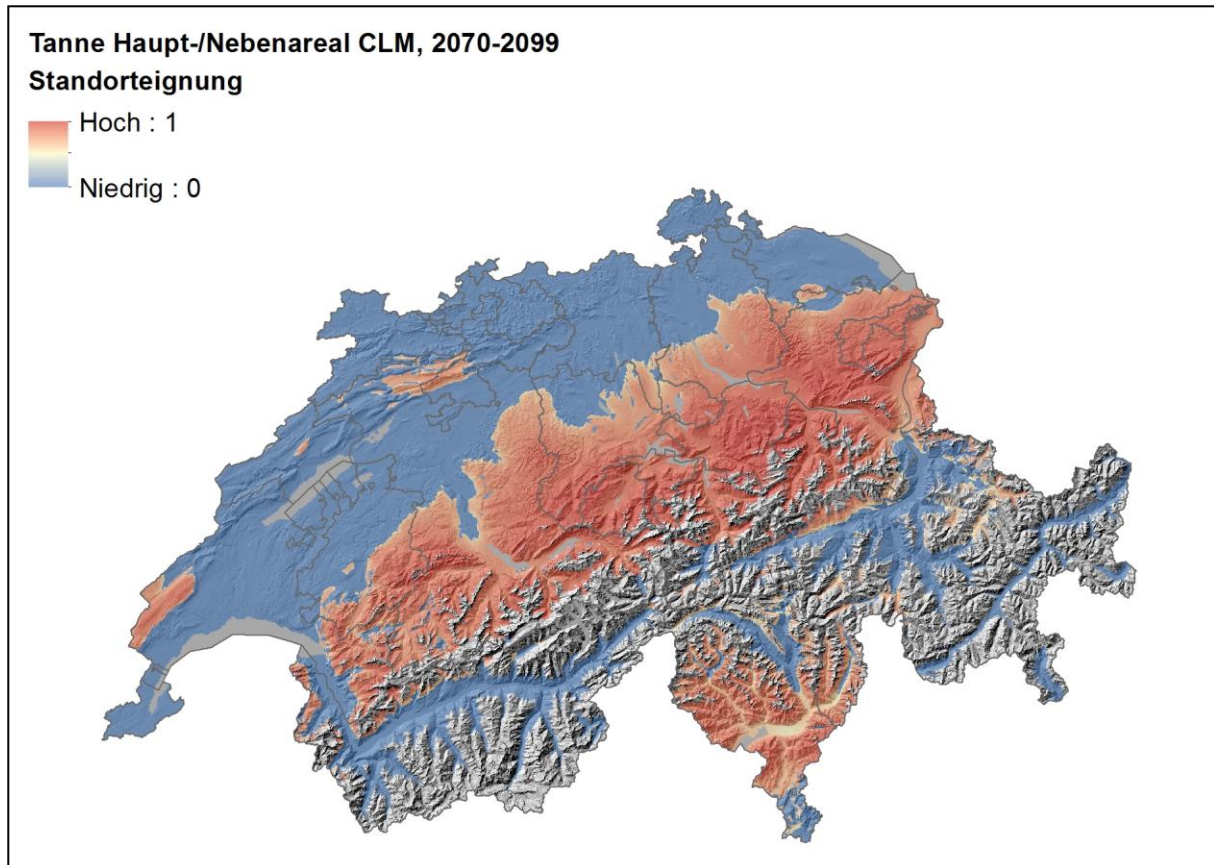


Abb. 114: Modellierte Arealgrenze zwischen Tannen-Hauptareal und Tannen-Nebenareal mit Obergrenze bei 1900 m ü. M., Periode 2070-2099, kontinuierliche Darstellung der Standorteignung, Klimazukunft CLM.



### Tanne Hauptareal CLM, 2070-2099, binäre Darstellung

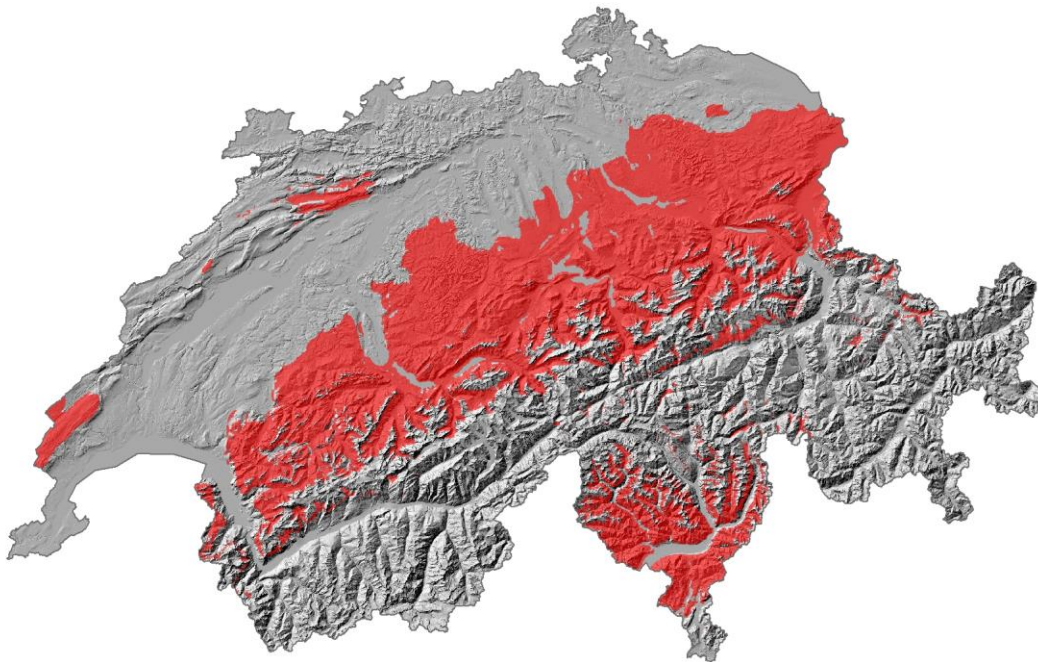


Abb. 115: Modelliertes Tannen-Hauptareal mit Obergrenze bei 1900 m ü. M., Periode 2070-2099, binäre Darstellung der Standorteignung (Schwellenwert 0.7), Klimazukunft CLM.

### Veränderungen gegenüber heutiger Modellierung und Unterschiede zur Klimazukunft RegCM3

Im Jura und im westlichen, nördlichen und östlichen Mittelland weist das Modell der Klimazukunft CLM grossflächig kein Tannen-Hauptareal mehr aus. Ein Rückzug des modellierten Areal findet sich auch in der Bündner Herrschaft, im Prättigau, im Kanton UR, zwischen Genfersee und Martigny und in den tiefen Lagen des TI statt. Es erfolgt eine starke Höhenausdehnung v.a. in den Voralpen und im TI und Misox. Neue modellierte Arealflächen in höheren Lagen weist das CLM-Modell viel weniger auf als das RegCM3. Das modellierte Areal ist deutlich kleiner als bei der Klimazukunft RegCM3.

### Welche Klimaparameter beeinflussen die Habitateignung der Tanne im Hauptareal bei der Klimazukunft CLM?

Abb. 116 und Abb. 117 zeigen, wie die einzelnen Klimaparameterkarten in die Modellierung des Tannen-Hauptareals (ohne untere Begrenzung, mit Obergrenze bei 1900 m ü. M.) einfließen. Sämtliche Karten werden im Anhang dargestellt, nachfolgend werden nur die entscheidenden, sich stark verändernden Klimaparameter aufgezeigt.

Bei der Abnahme der Habitateignung im Mittelland, Eingangs VS, bei der heutigen Arealgrenze im Kanton GR und UR, sowie in den tiefen Lagen des TI könnte v.a. die Abnahme des Sommer-niederschlags ausschlaggebend sein. Nach Modell erfolgt keine Ausweitung der Habitateignung der Tanne in neue Regionen, einzig in der Höhe (Wärmegrenze).

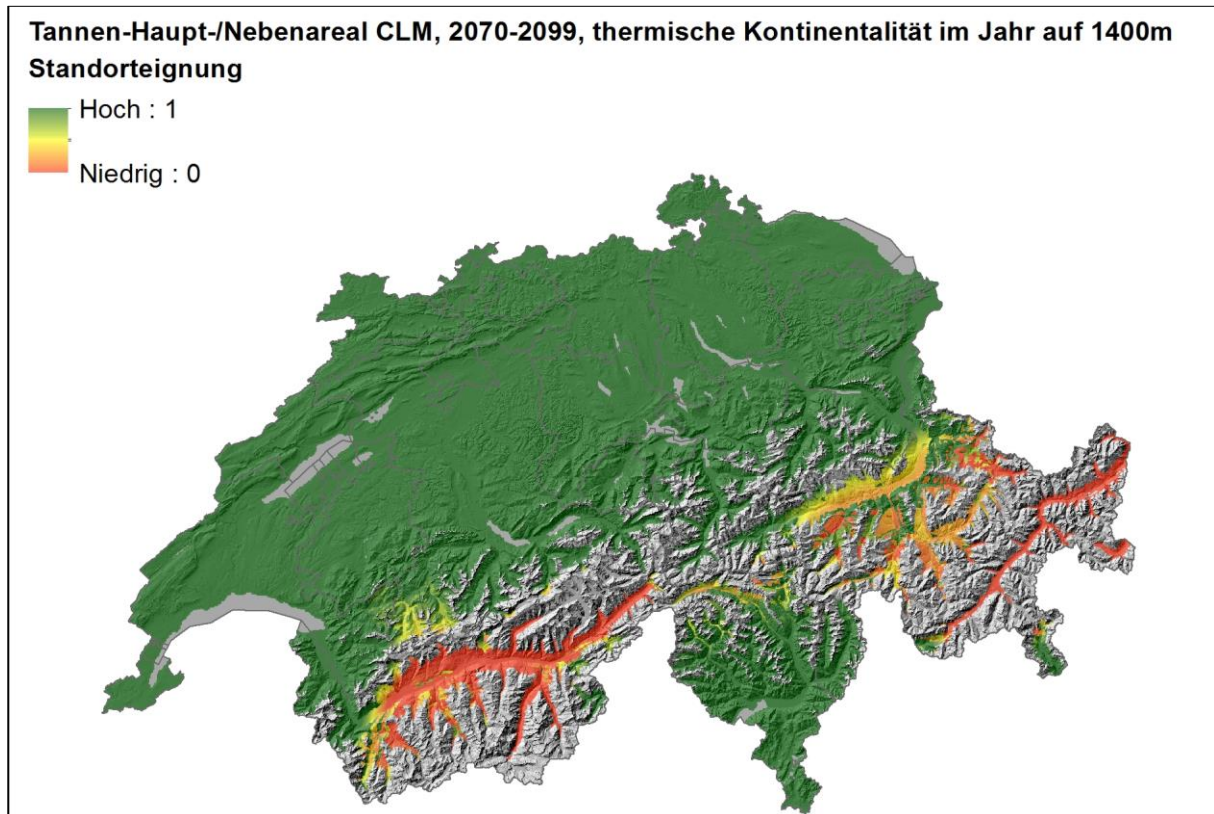


Abb. 116: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Hauptareal (Abgrenzung zum Tannen-Nebenareal), Klimaparameter: Thermische Kontinentalität auf 1400 m ü. M. im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.

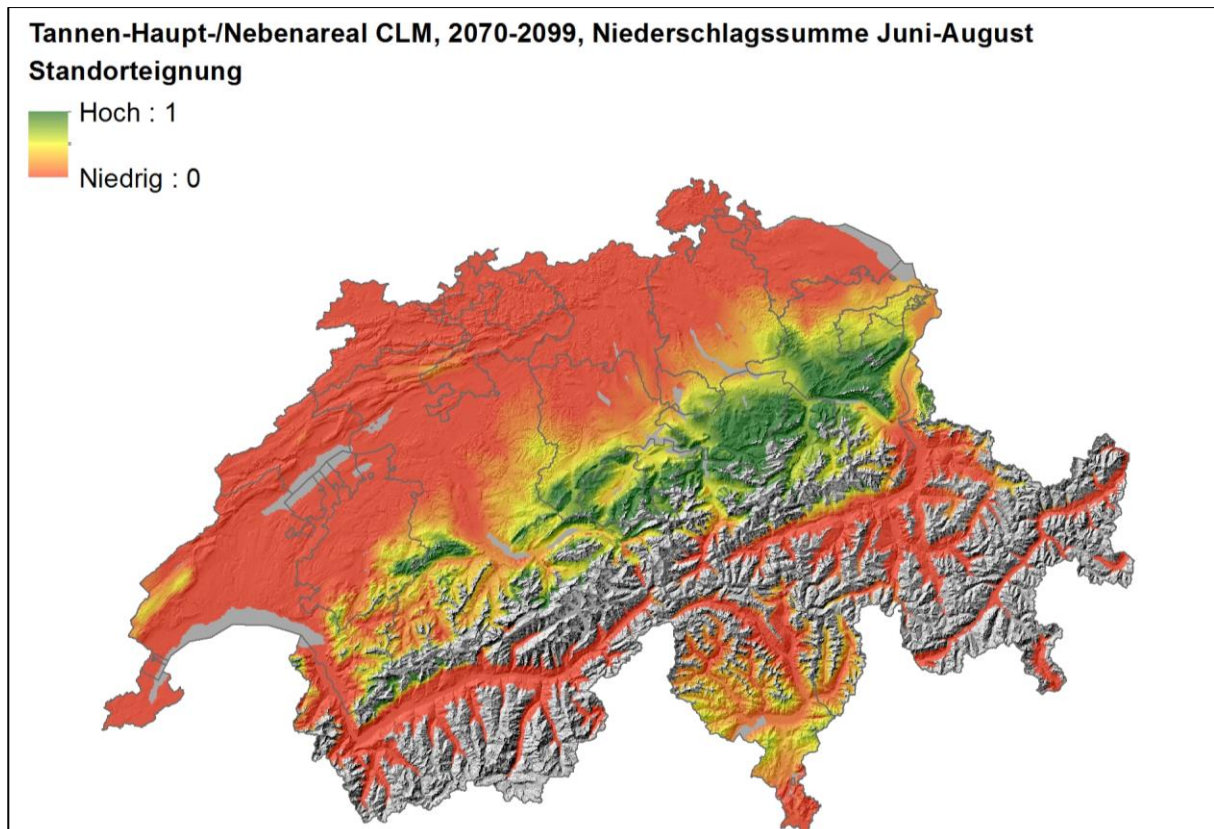


Abb. 117: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Hauptareal (Abgrenzung zum Tannen-Nebenareal), Klimaparameter: Niederschlagssumme Juni-August. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.



## 3.6 Grenze Tannen-Nebenareal - Tannen-Reliktareal

### 3.6.1 Heutige Modellierung der Grenze Tannen-Nebenareal / Tannen-Reliktareal

Die horizontale Arealgrenze zwischen dem Tannen-Nebenareal und dem Tannen-Reliktareal wurde ohne untere Begrenzung mit einer Obergrenze bei 1500 m ü. M. für die drei Gebiete VS, Alpensüdseite und GR getrennt modelliert. Die folgenden beiden Abbildungen (kontinuierliche Darstellung und binäre Darstellung) zeigen die Ergebnisse der Modellierung für das heutige Klima. Für die binäre Darstellung wurde aus der Werteskala zwischen 0 und 1 beim VS der Wert 0.7, bei der Alpensüdseite 0.65 und beim Kt. GR, UR und SG der Wert 0.82 als Schwellenwert ausgewählt. Diese Werte ergaben regionalspezifisch die beste Übereinstimmung zwischen modelliertem und kartiertem Areal. Die violetten Linien auf den folgenden Abbildungen in diesem Kapitel entsprechen den Grenzen der drei regionalen Modelle.

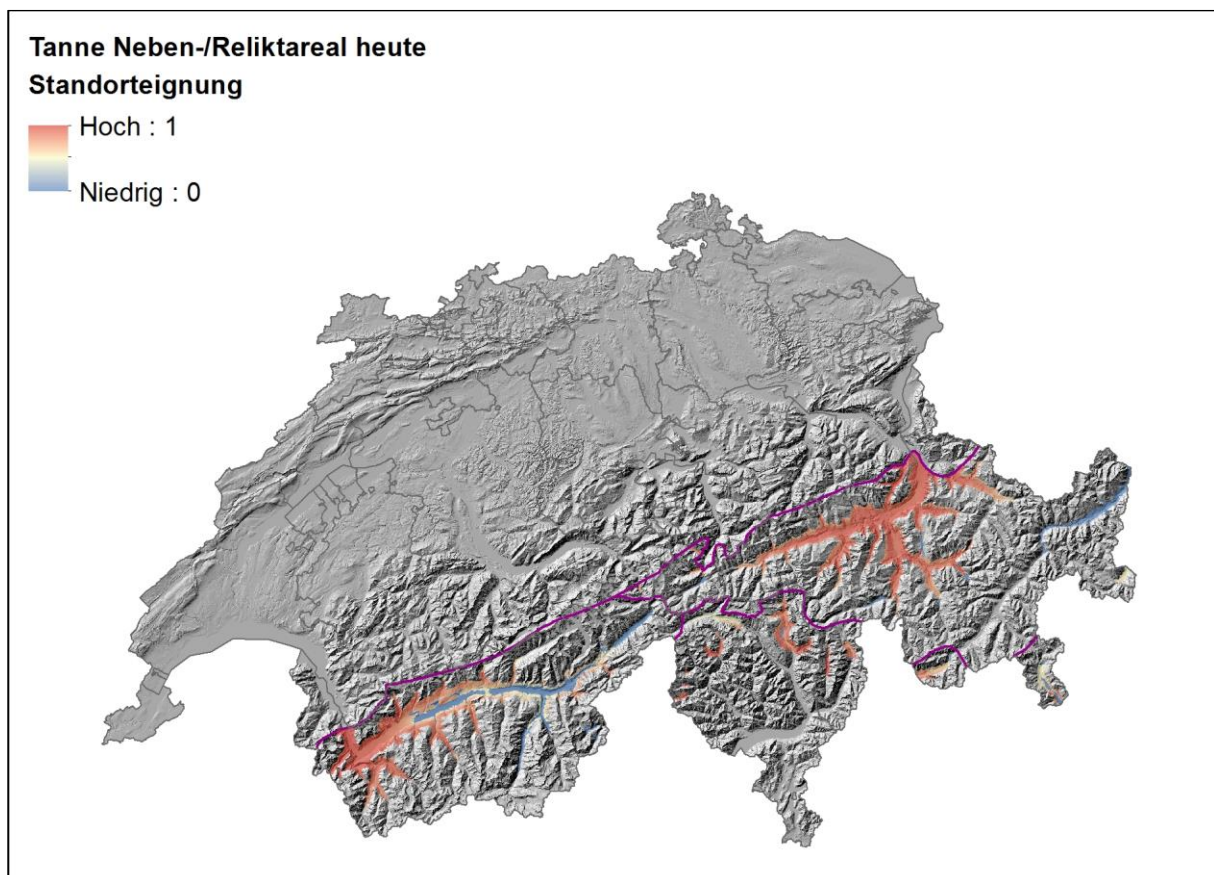


Abb. 118: Modellierte Arealgrenze zwischen Tannen-Nebenareal und Tannen-Reliktareal heute mit Obergrenze bei 1500 m ü. M., kontinuierliche Darstellung der Standorteignung. Violette Linien = Grenzen der unterschiedlichen Modelle.

### Tanne Nebenareal heute, binäre Darstellung

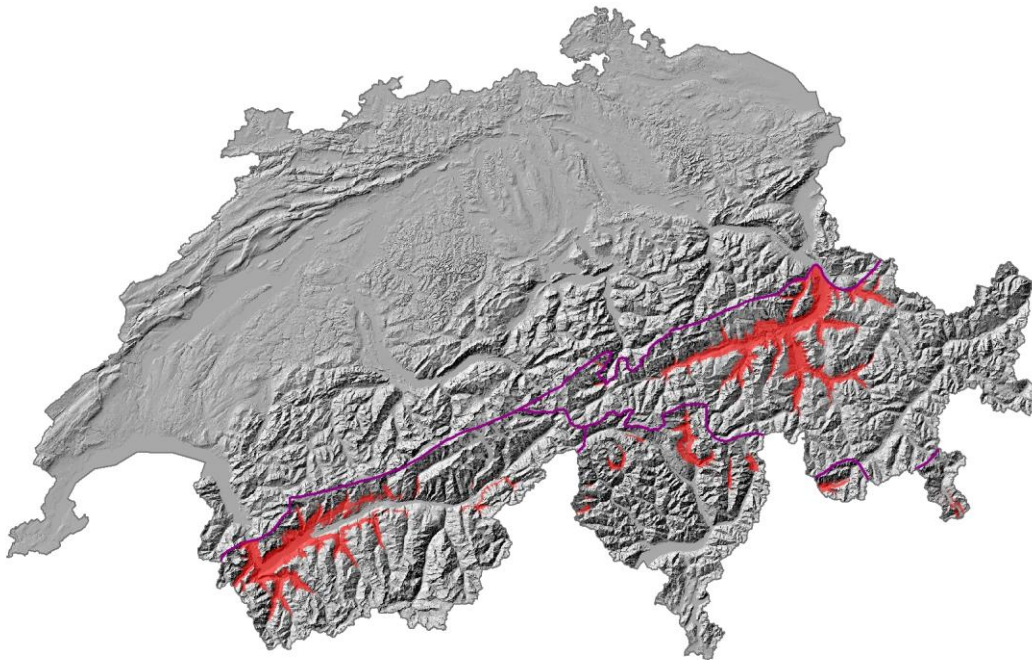


Abb. 119: Modellierter Arealgrenze des Tannen-Nebenareals heute, mit Obergrenze bei 1500 m ü. M., binäre Darstellung der Standorteignung (Schwellenwerte: VS = 0.7, Alpensüdseite = 0.65 und GR, UR und SG = 0.82). Violette Linien = Grenzen der unterschiedlichen Modelle.

Eine Aufteilung in drei Gebiete (GR/UR/SG, Alpensüdseite, VS) bei der Modellierung wurde gemacht, um das Nebenareal besser modellieren zu können als im Vorprojekt (für die ganze Schweiz).

Die Tanne macht gegen das inneralpine Gebiet immer mehr der Fichte Platz. Dies aufgrund der erhöhten Kontinentalität (grössere Frosthäufigkeit auf einer bestimmten Höhenlage) und der geringeren Luftfeuchtigkeit tagsüber (sei es durch grössere Aufheizung tagsüber, was die Verdunstung fördert [besonders im Sommer], oder häufigerem Föhn).

Die Tanne fällt als Tiefwurzler gegenüber der Fichte zuerst an flachgründigen Orten aus (so in Felslagen, falls sie nicht spaltengründig sind), auf Blockschutthalden und allgemein zuerst an Südhängen (weil sie grössere Temperaturschwankungen aufweisen und tagsüber lufttrockener sind als Nordhänge).

Geologische Formationen, welche tiefgründige Böden liefern, leiten in der Regel die Tanne am weitesten in die Alpentäler hinein. Es sind dies vor allem Bündnerschiefer und Flysche, da diese tonreich verwittern und tiefgründig sind. Die Tanne kann als Tiefwurzler diesen Böden bis in grosse Tiefen Wasser entziehen, was die Fichte weniger gut kann. Auch tiefgründige Moränenböden sind günstig (auch für Fichte). Es können auch Felsböden günstig sein, sofern sie klüftig sind und in den Klüften genügend Wasser auftritt, so z.B. auf einigen Granitböden im Reusstal. Hier fällt sogar die Fichte aus, weil sie als Flachwurzler in der Regel nicht so tief in die Spalten eindringt. Sind allerdings die Felsklüfte sehr durchlässig, wie viele Granitböden im Urnerland oder die meisten klüftigen Kalkfelsen, versickert das Wasser in die Tiefe, so dass diese Felsen nur trockenheitsresistente Berg- und Waldföhrenbestände tragen und die Tanne nicht mehr vorkommt. Dies gilt sogar in sehr ozeanischem, feuchtem Klima; so z.B. in den

Voralpen bei Schwyz. Es scheint, je tiefgründiger der Boden, desto mehr Trockenheit erträgt die Tanne; auf flachgründigen Böden fällt die Tanne schneller aus.

### Überprüfung des modellierten heutigen Tannen-Nebenareals

In Abb. 120 ist ersichtlich, dass die Modellierung des Tannen-Nebenareals im VS ausgedehnter ist als die geänderten Standortsregionen aus NaiS in den Südtälern des VS (v.a. Val de Bagnes, Val d'Entremont, Val Ferret, Val d'Hérens und Val d'Anniviers). Dies deshalb, weil nicht alle lokalen Kaltluftseen bei der Erstellung der Temperaturkarten ausgeschieden wurden. Ebenfalls kommt hier das Problem mit den hinteren Tallagen und dem geringeren Samendruck zu tragen. Beim Südhang im VS weist die Modellierung z.T. tiefer am Hang noch eine Habitataeignung auf (v.a. zwischen Martigny und Sion). Östlich von Visp stimmt die Modellierung gut mit den Stichproben überein (Kartierungen von Lingg 1986). Zwischen Visp und Turtmann weist das Modell im Widerspruch zu den Kartierungen von Lingg (1986) keine Habitataeignung auf. Im Kanton UR stimmt die Modellierung sehr gut, ebenfalls in den Kantonen GR und SG und auf der Alpensüdseite. Allgemein: Dort wo die Tanne im Modell weitergeht als im Gelände festgestellt wurde, hat es oft Talstufen, evtl. werden diese im Modell zu wenig berücksichtigt.

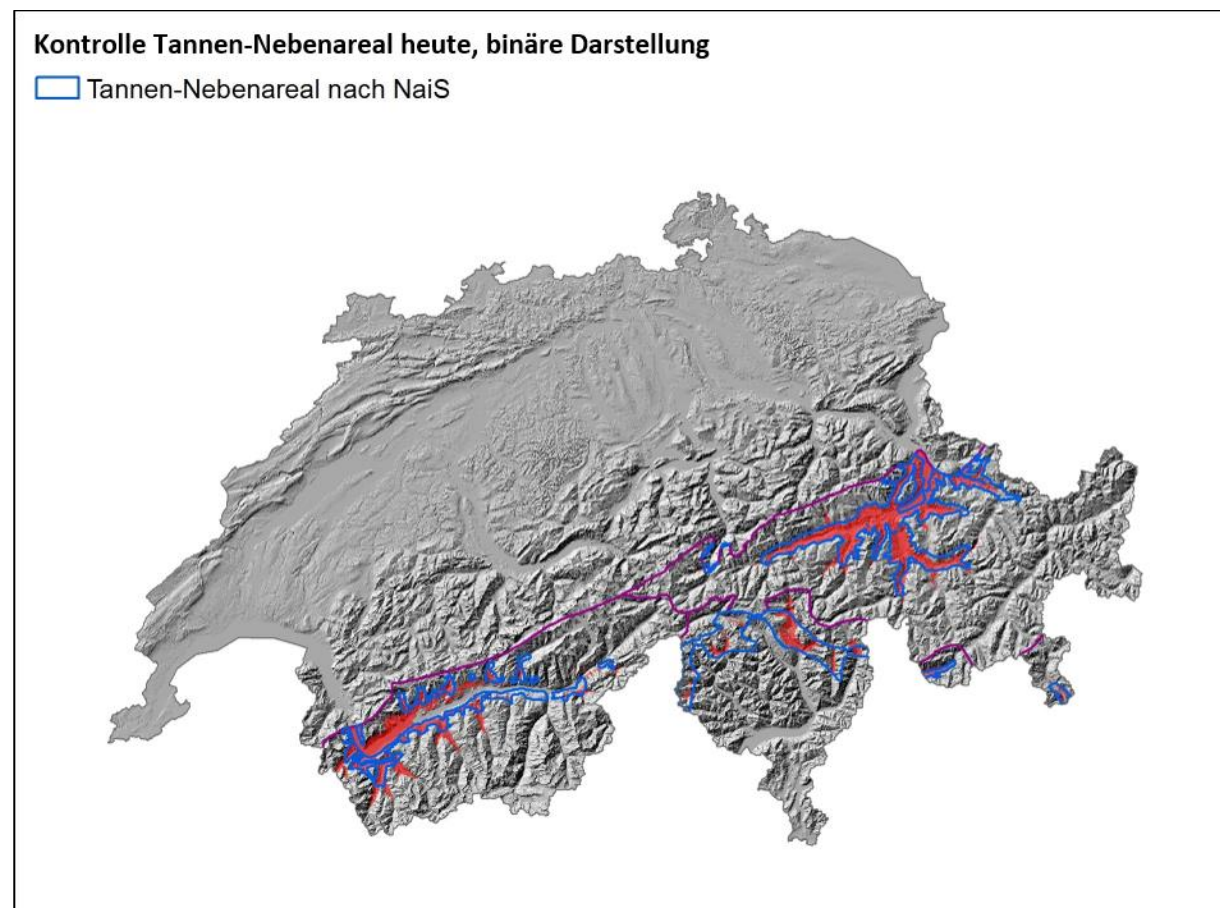


Abb. 120: Kontrolle modelliertes Tannen-Nebenareal heute, binäre Darstellung der Standorteignung (Schwellenwerte: VS = 0.7, Alpensüdseite = 0.65 und GR, UR und SG = 0.82), mit Tannen-Nebenarealgrenze nach NaiS. Violette Linien = Grenzen der unterschiedlichen Modelle.

### Welche Klimaparameter beeinflussen die Tannenverbreitung im Nebenareal?

Abb. 121 bis Abb. 127 zeigen, wie die einzelnen Klimaparameterkarten in die Modellierung des Tannen-Nebenareals einfließen.



Die klimatischen Einflussfaktoren scheinen regional unterschiedlich stark begrenzend. Die Kontinentalität könnte nach Modell im Oberwallis, im Bedrettal und im Engadin begrenzend wirken, ebenso der Sommerniederschlag und die Luftfeuchte im VS und im Puschlav und evtl. die Globalstrahlung an den Südhängen im VS.

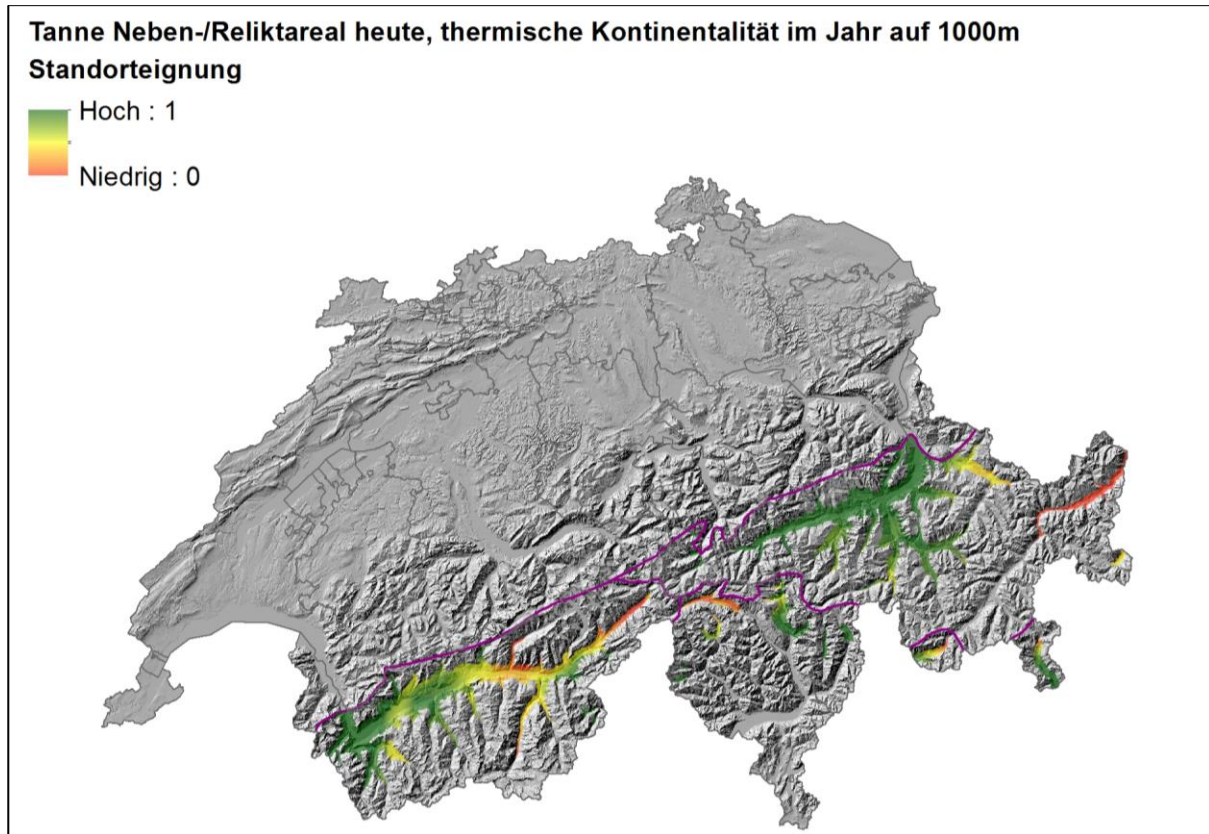


Abb. 121: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Nebenareal (Abgrenzung zum Tannen-Reliktareal) heute, Klimaparameter: Thermische Kontinentalität auf 1000 m ü. M. im Jahr. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88. Violette Linien = Grenzen der unterschiedlichen Modelle.

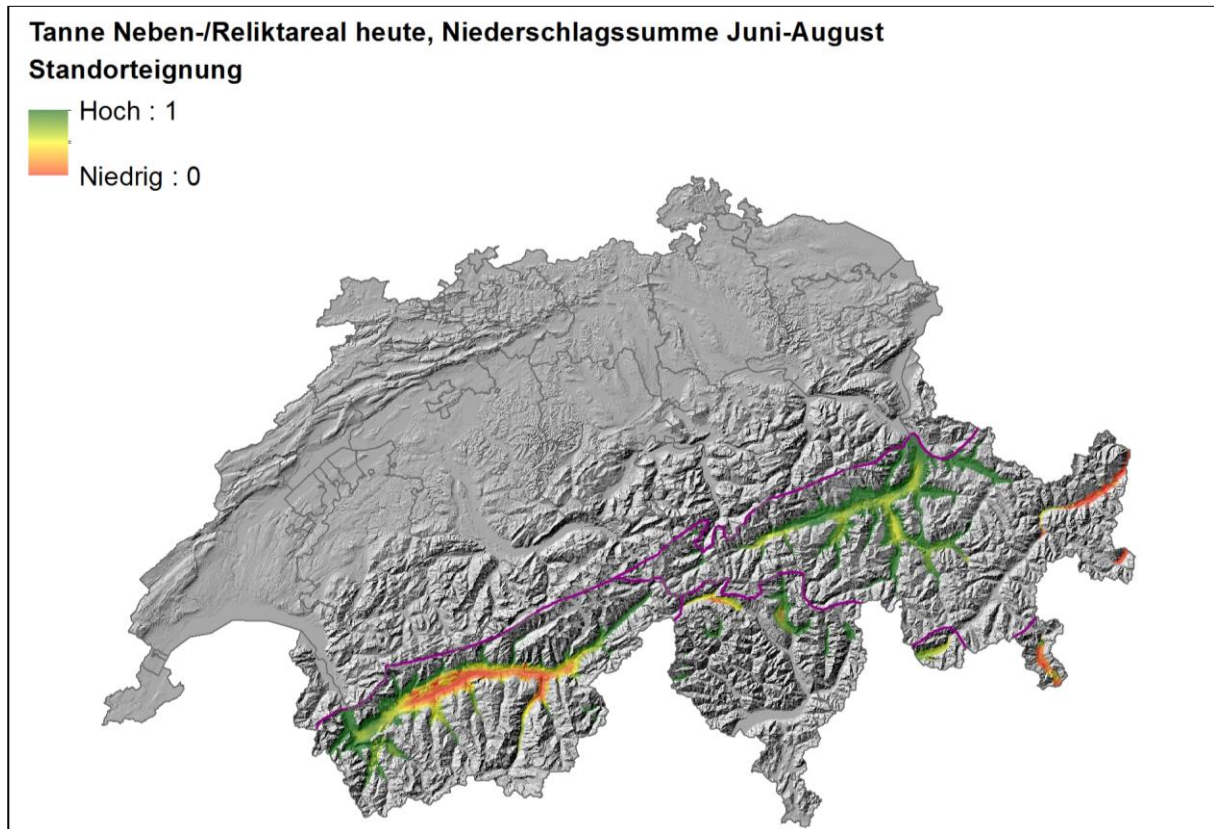


Abb. 122: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Nebenareal (Abgrenzung zum Tannen-Reliktareal) heute, Klimaparameter: Niederschlagssumme Juni-August. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88. Violette Linien = Grenzen der unterschiedlichen Modelle.

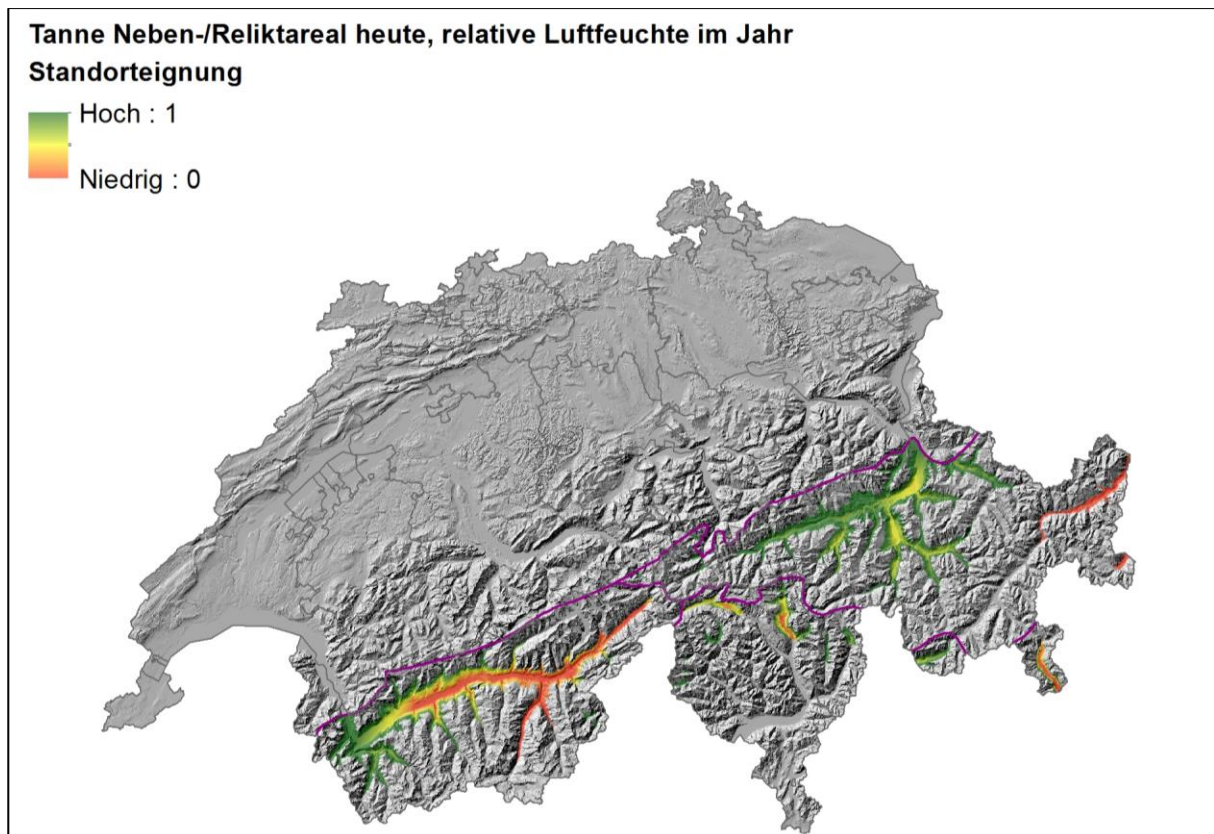


Abb. 123: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Nebenareal (Abgrenzung zum Tannen-Reliktareal) heute, Klimaparameter: Mittlere relative Luftfeuchtigkeit um 13:30 Uhr im Jahr. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88. Violette Linien = Grenzen der unterschiedlichen Modelle.



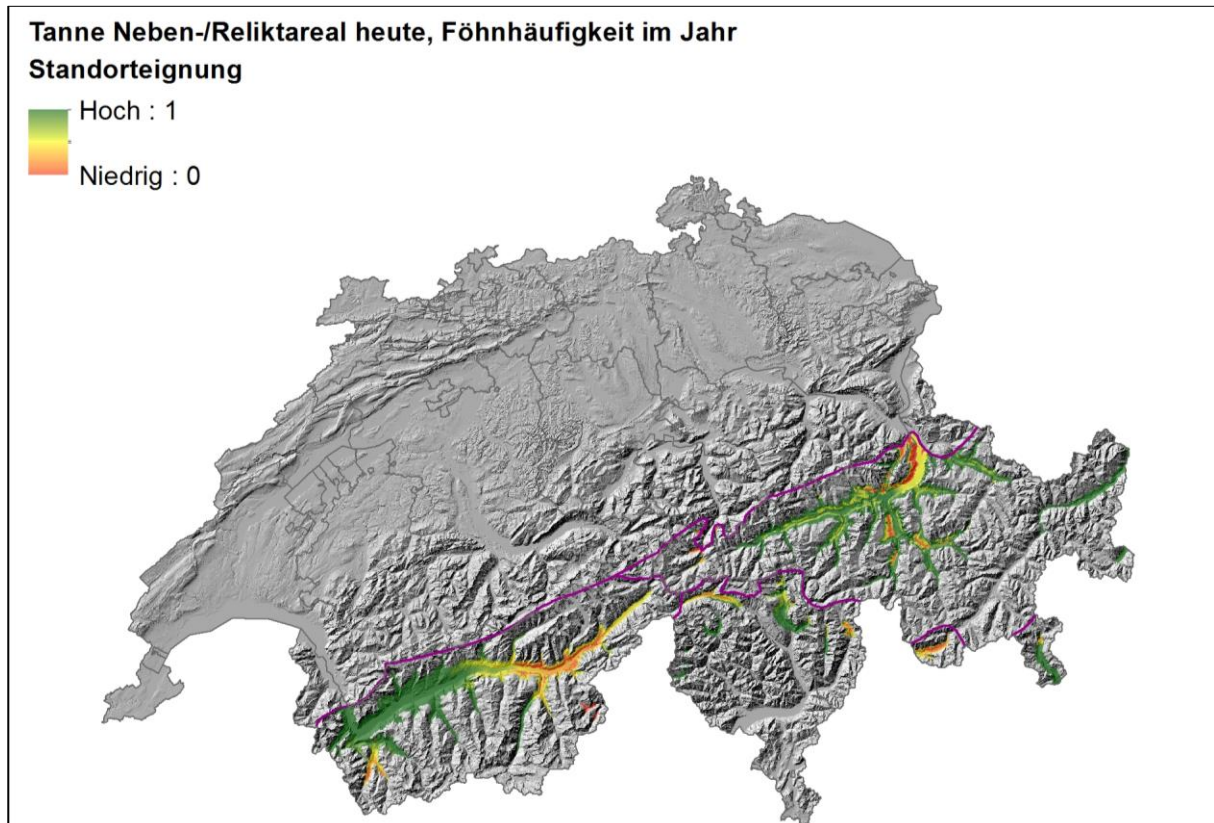


Abb. 124: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Nebenareal (Abgrenzung zum Tannen-Reliktareal) heute, Klimaparameter: Föhnhäufigkeit im Jahr. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88. Violette Linien = Grenzen der unterschiedlichen Modelle.

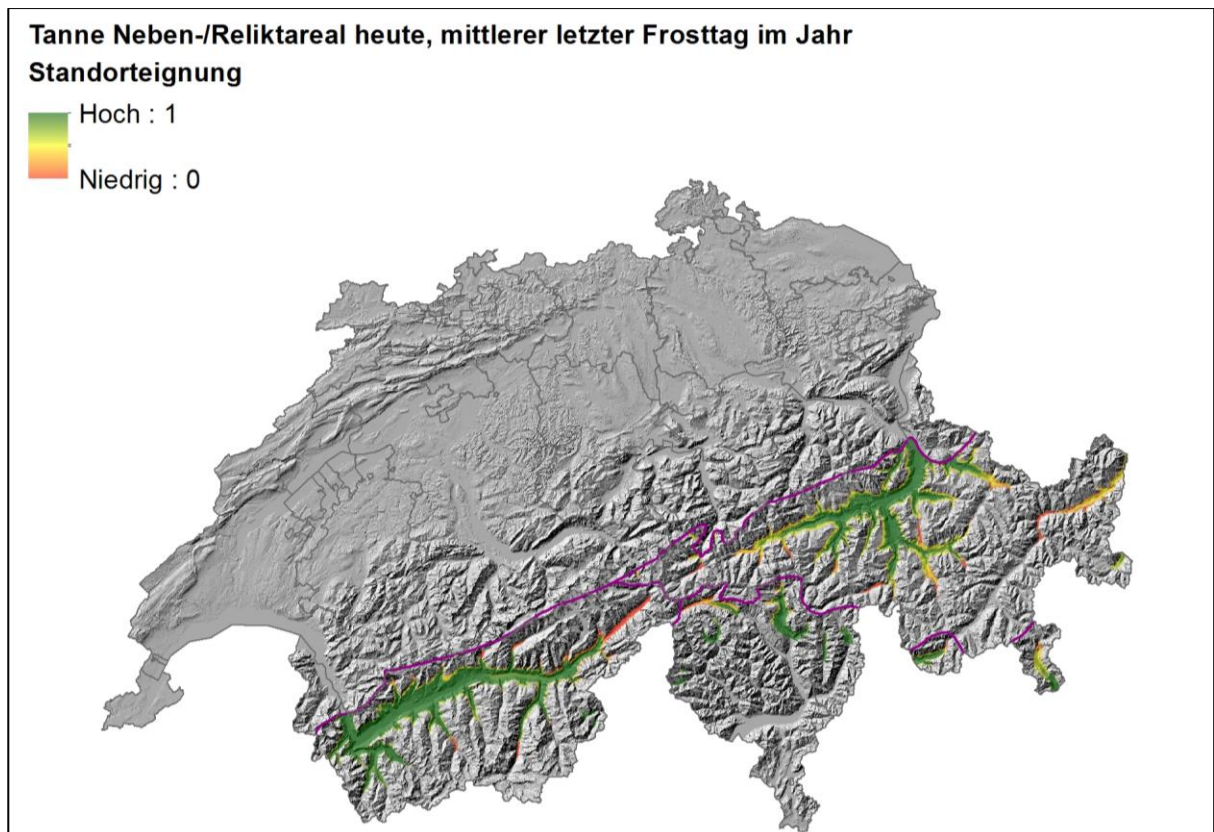


Abb. 125: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Nebenareal (Abgrenzung zum Tannen-Reliktareal) heute, Klimaparameter: Mittlerer letzter Frosttag im Jahr. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88. Violette Linien = Grenzen der unterschiedlichen Modelle.

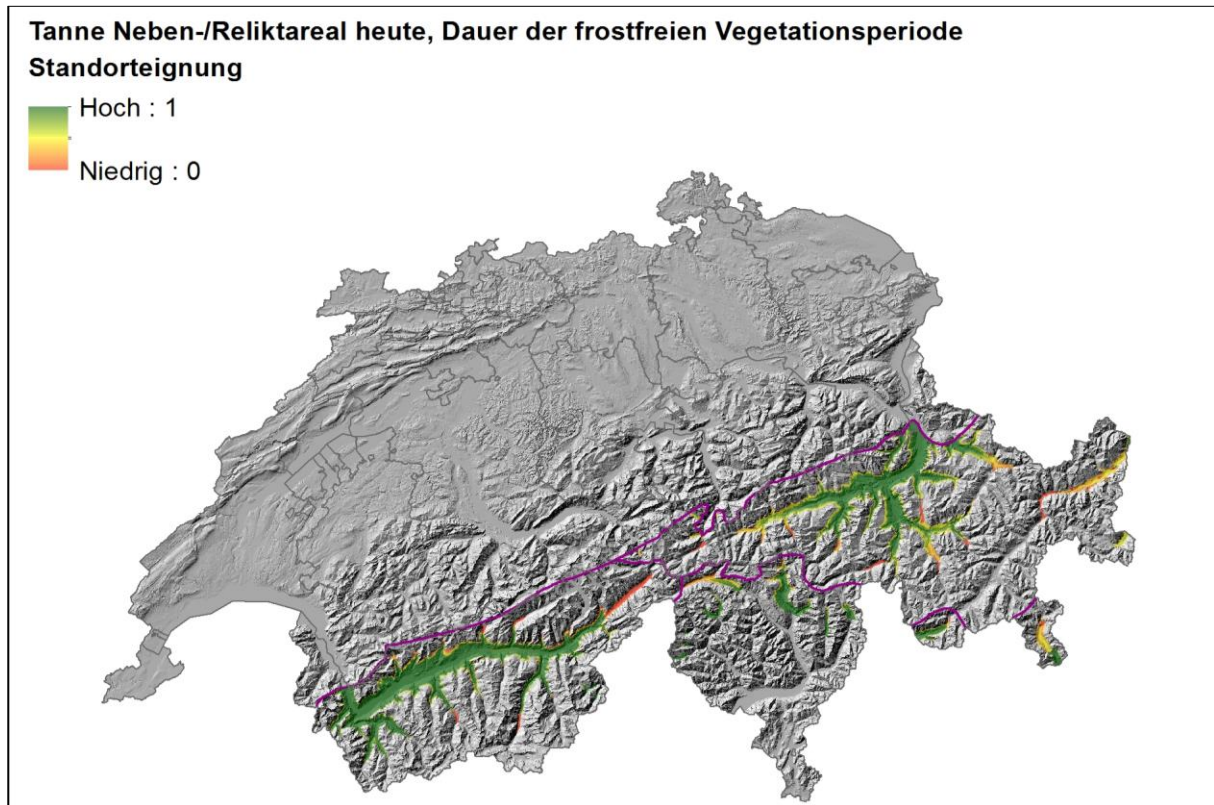


Abb. 126: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Nebenareal (Abgrenzung zum Tannen-Reliktareal) heute, Klimaparameter: Dauer der frostfreien Vegetationsperiode. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88. Violette Linien = Grenzen der unterschiedlichen Modelle.

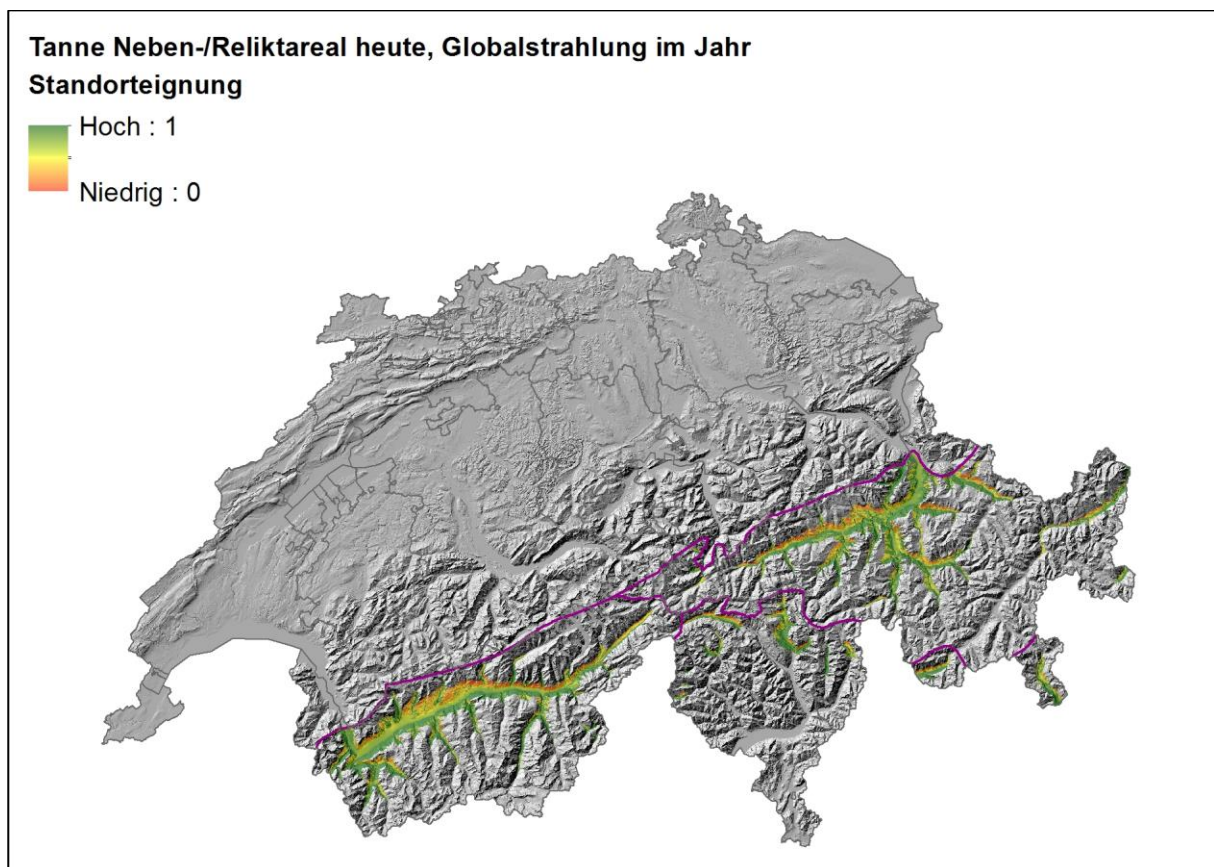


Abb. 127: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Nebenareal (Abgrenzung zum Tannen-Reliktareal) heute, Klimaparameter: Globalstrahlung im Jahr. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88. Violette Linien = Grenzen der unterschiedlichen Modelle.



### 3.6.2 Modellierungen der Grenze Tannen-Nebenareal / Tannen-Reliktareal für die Klimazukunft RegCM3

Die folgenden beiden Abbildungen (kontinuierliche Darstellung und binäre Darstellung) zeigen die Ergebnisse der Modellierung für das RegCM3-Szenario (ohne untere Begrenzung, mit Obergrenze bei 1900 m ü. M.). Für die binäre Darstellung wurde aus der Werteskala zwischen 0 und 1 beim VS der Wert 0.7, bei der Alpensüdseite 0.65 und bei den Kantonen GR, UR und SG der Wert 0.82 als Schwellenwert verwendet. Die Werte entsprechen den Schwellenwerten, die für die heutige Modellierung festgelegt wurden.

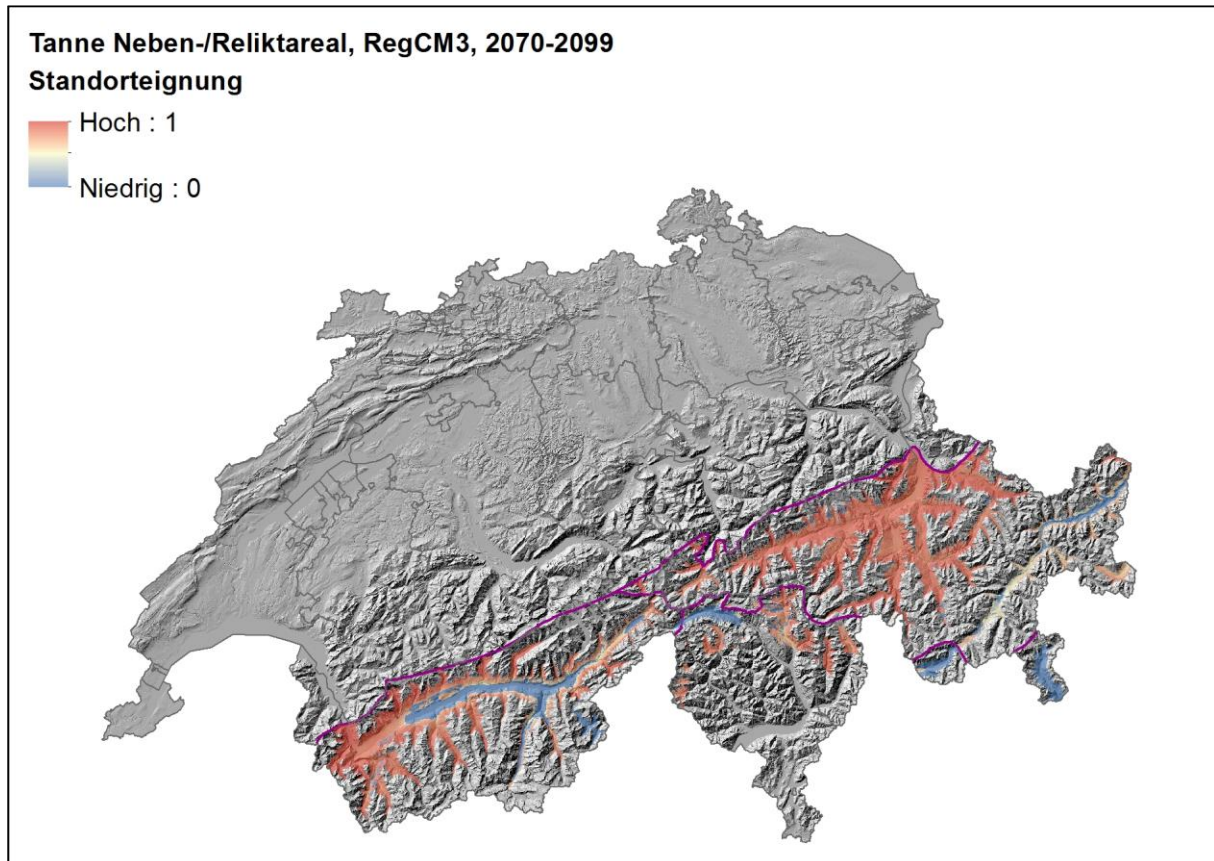


Abb. 128: Modellierte Arealgrenze zwischen Tannen- Nebenareal und Tannen-Reliktareal mit Obergrenze bei 1900 m ü. M., kontinuierliche Darstellung der Standorteignung, Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Violette Linien = Grenzen der unterschiedlichen Modelle.

### Tanne Nebenareal RegCM3, 2070-2099, binäre Darstellung

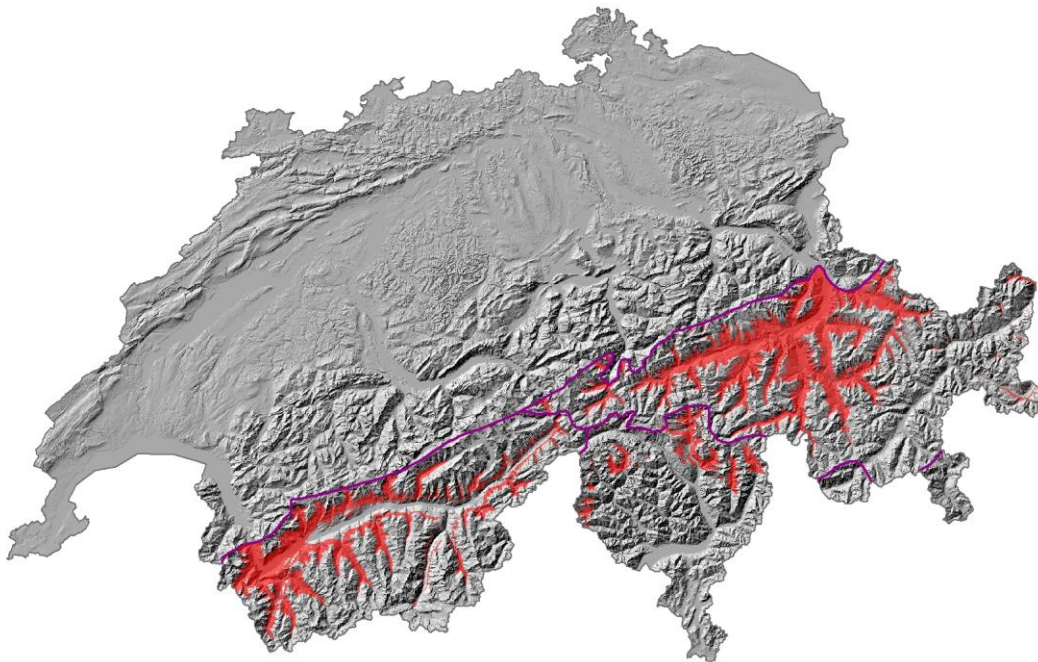


Abb. 129: Modellierte Arealgrenze zwischen Tannen- Nebenareal und Tannen-Reliktareal mit Obergrenze bei 1900 m ü. M., binäre Darstellung der Standorteignung (Schwellenwerte: VS = 0.7, Alpensüdseite = 0.65 und GR, UR und SG = 0.82), Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Violette Linien = Grenzen der unterschiedlichen Modelle.

#### Veränderungen gegenüber heutiger Modellierung

Beim RegCM3 erfolgt eine Höhengausdehnung des Nebenareals, was eine grossflächige Zunahme in allen Regionen zur Folge hat. Neue Gebiete ausserhalb des heutigen Reliktareals sind Samnaun, das Münstertal, Davos, Rheinwald, Avers, das Goms und das Saas- und Mattertal. Ausfallen nach Modell RegCM3 wird die Tanne in tieferen Lagen im Bergell, im Puschlav und im VS.

#### Welche Klimaparameter beeinflussen die Habitateignung der Tanne im Nebenareal bei der Klimazukunft RegCM3?

Abb. 130 bis Abb. 133 zeigen, wie die einzelnen Klimaparameterkarten in die Modellierung des Tannen-Nebenareals (RegCM3; mit Obergrenze bei 1900 m ü. M.) einfließen. Sämtliche Karten werden im Anhang dargestellt, nachfolgend werden nur die entscheidenden, sich stark verändernden Klimaparameter aufgezeigt.

Für den zukünftigen Ausfall der Tanne im Bergell, Puschlav, den tieferen Lagen der Leventina, des Bleniotals und des VS dürfte v.a. der abnehmende Sommerniederschlag entscheidend sein. Für das Steigen der Tanne in höhere Lagen ist die Temperaturerhöhung und evtl. die Abnahme der Spätfrostgefahr entscheidend.

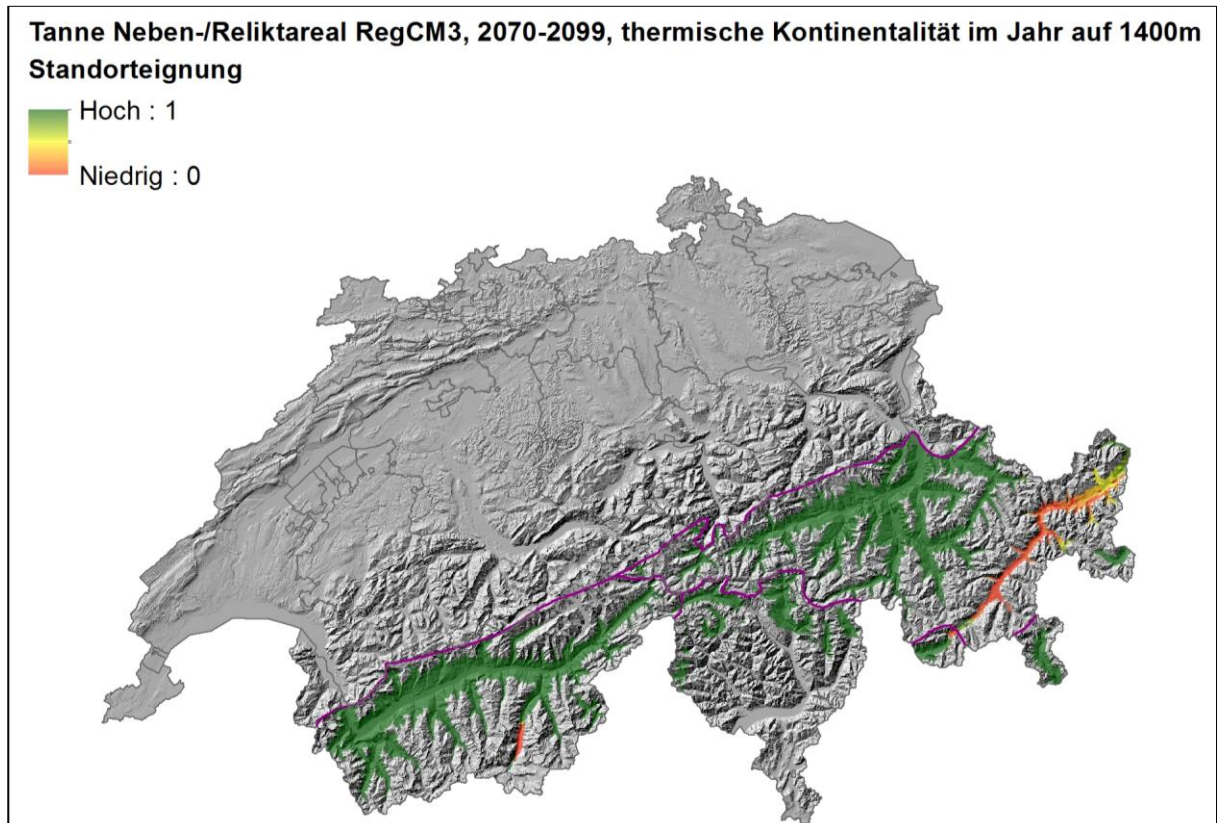


Abb. 130: Modellerte Standorteignung für das Tannen-Nebenareal (Abgrenzung zum Tannen-Reliktareal), Klimaparameter: Thermische Kontinentalität auf 1400 m ü. M. im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88. Violette Linien = Grenzen der unterschiedlichen Modelle.

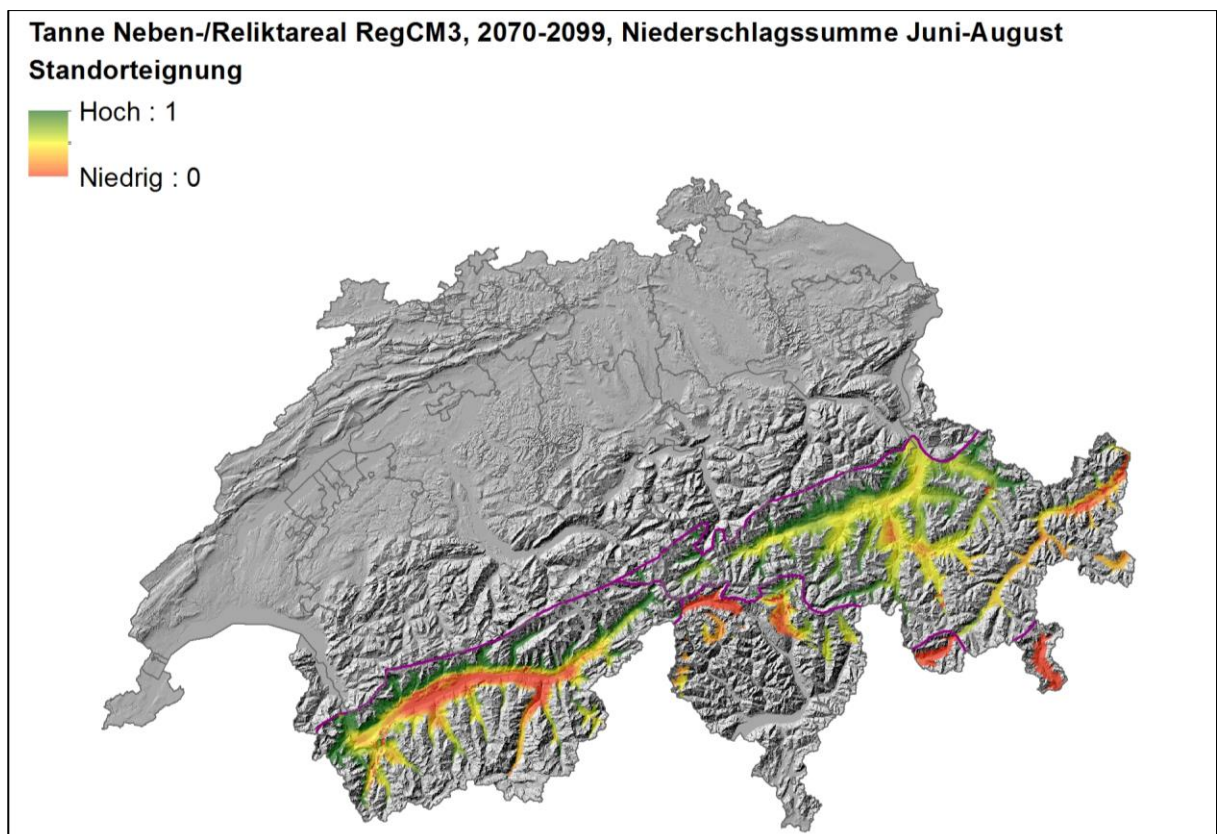


Abb. 131: Modellerte Standorteignung für das Tannen-Nebenareal (Abgrenzung zum Tannen-Reliktareal), Klimaparameter: Niederschlagssumme Juni-August. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88. Violette Linien = Grenzen der unterschiedlichen Modelle.



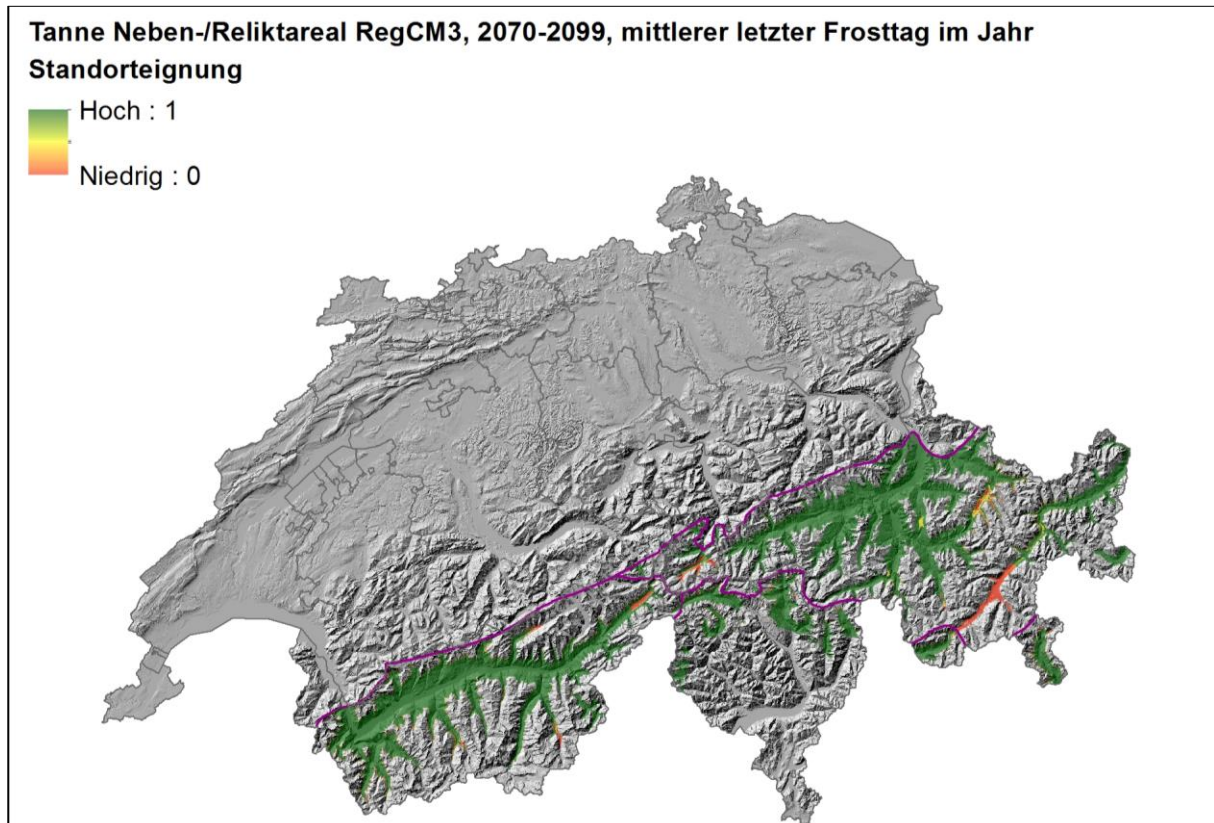


Abb. 132: Modellerte Standorteignung für das Tannen-Nebenareal (Abgrenzung zum Tannen-Reliktareal), Klimaparameter: Mittlerer letzter Frosttag im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88. Violette Linien = Grenzen der unterschiedlichen Modelle.

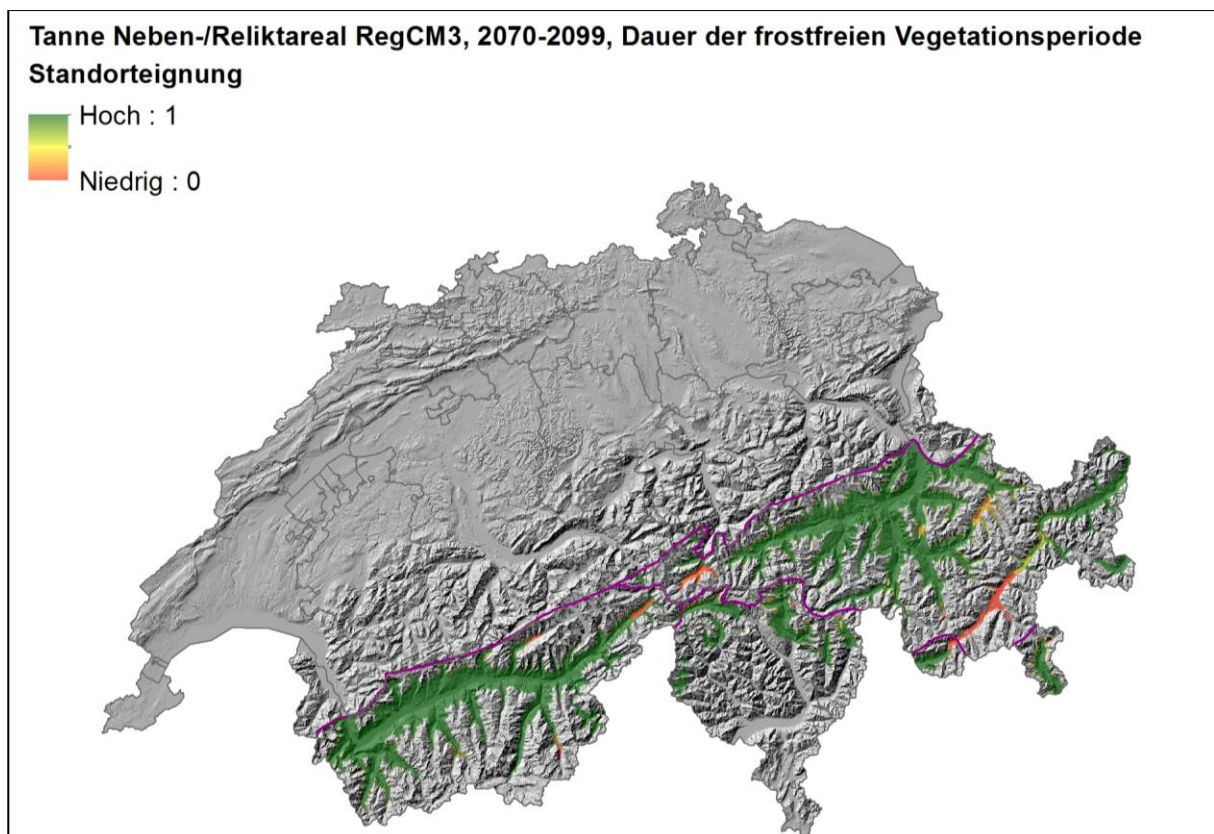


Abb. 133: Modellerte Standorteignung für das Tannen-Nebenareal (Abgrenzung zum Tannen-Reliktareal), Klimaparameter: Dauer der frostfreien Vegetationsperiode. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88. Violette Linien = Grenzen der unterschiedlichen Modelle.

### 3.6.3 Modellierungen der Grenze Tannen-Nebenareal / Tannen-Reliktareal mit der Klimazukunft CLM

Die folgenden beiden Abbildungen (kontinuierliche Darstellung und binäre Darstellung) zeigen die Ergebnisse der Modellierung für das CLM-Szenario (ohne untere Begrenzung, mit Obergrenze bei 1900 m ü. M.). Für die binäre Darstellung wurde aus der Werteskala zwischen 0 und 1 beim VS der Wert 0.7, bei der Alpensüdseite 0.65 und bei den Kantonen GR, UR und SG der Wert 0.82 als Schwellenwert verwendet. Die Werte entsprechen den Schwellenwerten, die für die heutige Modellierung festgelegt wurden.

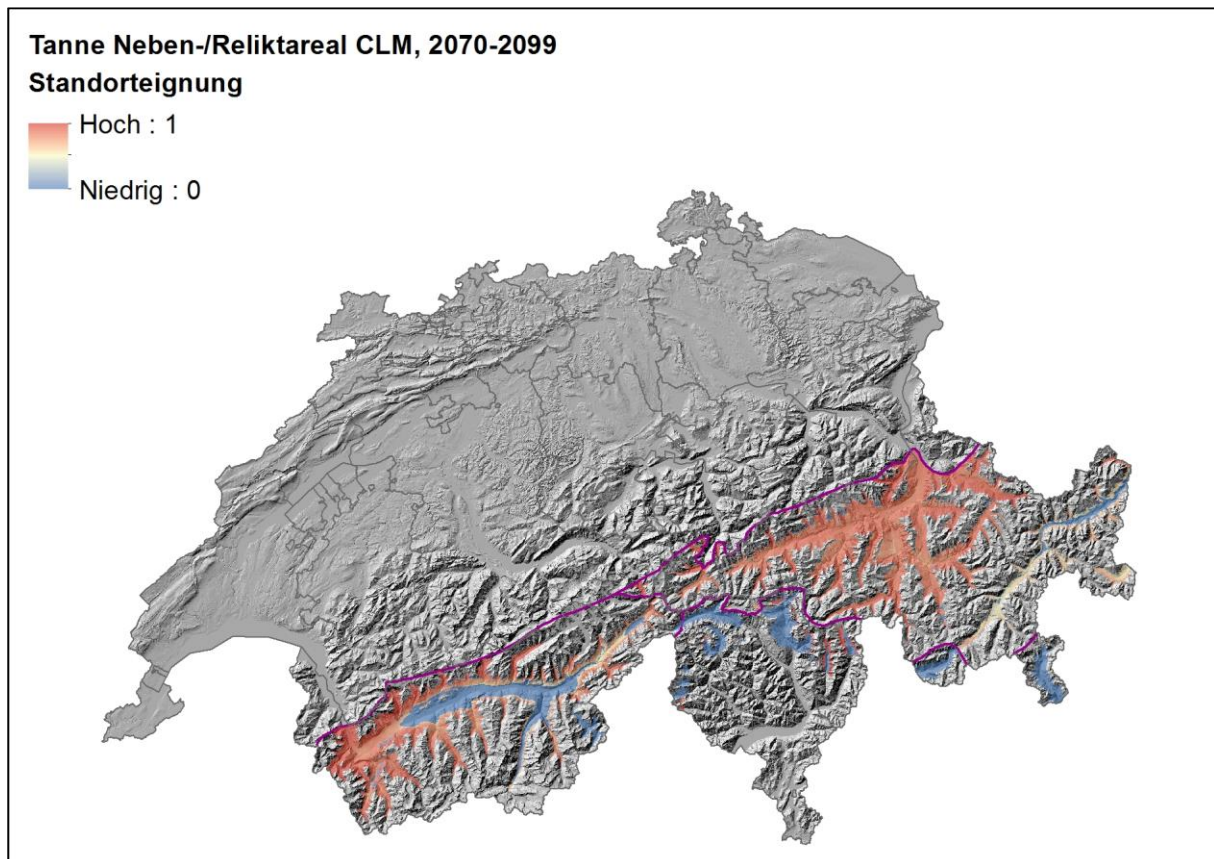


Abb. 134: Modellierte Arealgrenze zwischen Tannen- Nebenareal und Tannen-Reliktareal mit Obergrenze bei 1900 m ü. M., kontinuierliche Darstellung der Standorteignung, Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Violette Linien = Grenzen der unterschiedlichen Modelle.

### Tanne Nebenareal CLM, 2070-2099, binäre Darstellung

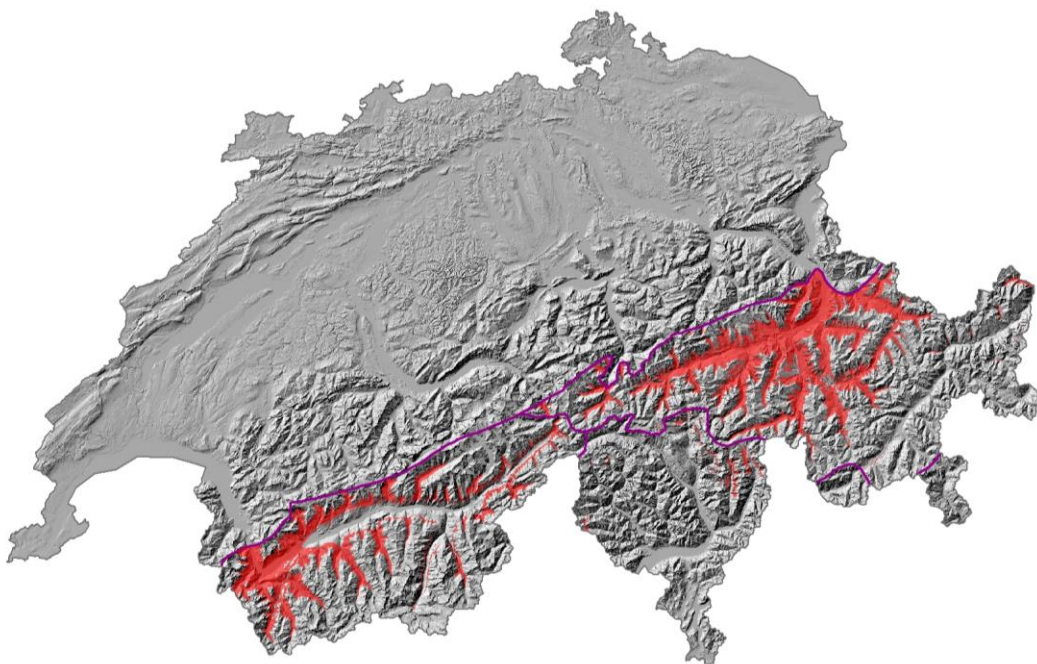


Abb. 135: Modelliertes Tannen- Nebenareal mit Obergrenze bei 1900 m ü. M., binäre Darstellung der Standorteignung (Schwellenwerte: VS = 0.7, Alpensüdseite = 0.65 und GR, UR und SG = 0.82), Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Violette Linien = Grenzen der unterschiedlichen Modelle.

### Veränderungen gegenüber heutiger Modellierung und Unterschiede zur Klimazukunft RegCM3

Es erfolgt eine starke Höhenausdehnung des Nebenareals, was eine grossflächige Zunahme in allen Regionen (ausser dem TI) zur Folge hat. Neue Gebiete ausserhalb des heutigen Reliktareals sind Samnaun, Davos, Rheinwald, Avers, das Goms und das Saas- und Mattertal. Ausfallen nach Modell CLM (Wechsel in Reliktareal) wird die Tanne fast gänzlich im TI, im Bergell, im Puschlav und in tieferen Lagen im VS, Domleschg und Albulatal.

Bei der Klimazukunft RegCM3 wechseln viel weniger Flächen vom Nebenareal zum Reliktareal, die Habitataignung für die Tanne ist viel grösser als beim CLM. V.a. im TI kann sich die Tanne beim RegCM3 noch halten, im Gegensatz zur Klimazukunft CLM.

### Welche Klimaparameter beeinflussen die Habitataignung der Tanne im Nebenareal bei der Klimazukunft CLM?

Abb. 136 bis Abb. 139 zeigen, wie die einzelnen Klimaparameterkarten in die Modellierung des Tannen- Nebenareals einfließen. Sämtliche Karten werden im Anhang dargestellt, nachfolgend werden nur die entscheidenden, sich stark verändernden Klimaparameter aufgezeigt. Bei den folgenden Abbildungen bedeuten Werte um 1 eine hohe Standorteignung für das Tannen-Nebenareal hinsichtlich des ausgewählten Klimaparameters, Werte um 0 bedeuten eine geringe Standorteignung.

Für den zukünftigen Ausfall der Tanne im TI, Bergell, Puschlav sowie in den tieferen Lagen im VS, Domleschg und Albulatal dürfte der abnehmende Sommerniederschlag entscheidend sein. Zum Steigen der Tanne in höhere Lagen und zur neuen Habitataignung in Samnaun könnten



die Temperaturerhöhung, die Abnahme der thermischen Kontinentalität und der Spätfrostgefahr und die Ausdehnung der frostfreien Vegetationsperiode beitragen.

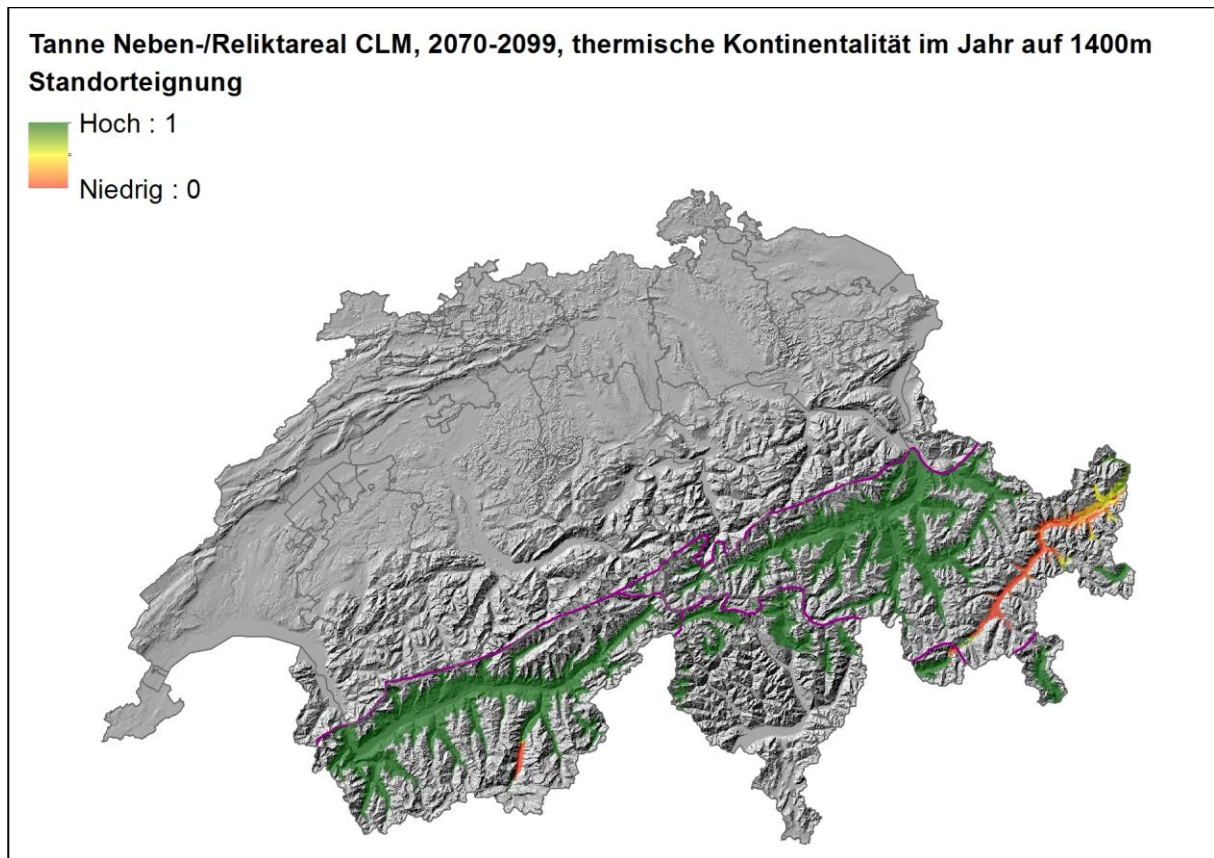


Abb. 136: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Nebenareal (Abgrenzung zum Tannen-Reliktareal), Klimaparameter: Thermische Kontinentalität auf 1400 m ü. M. im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88. Violette Linien = Grenzen der unterschiedlichen Modelle.



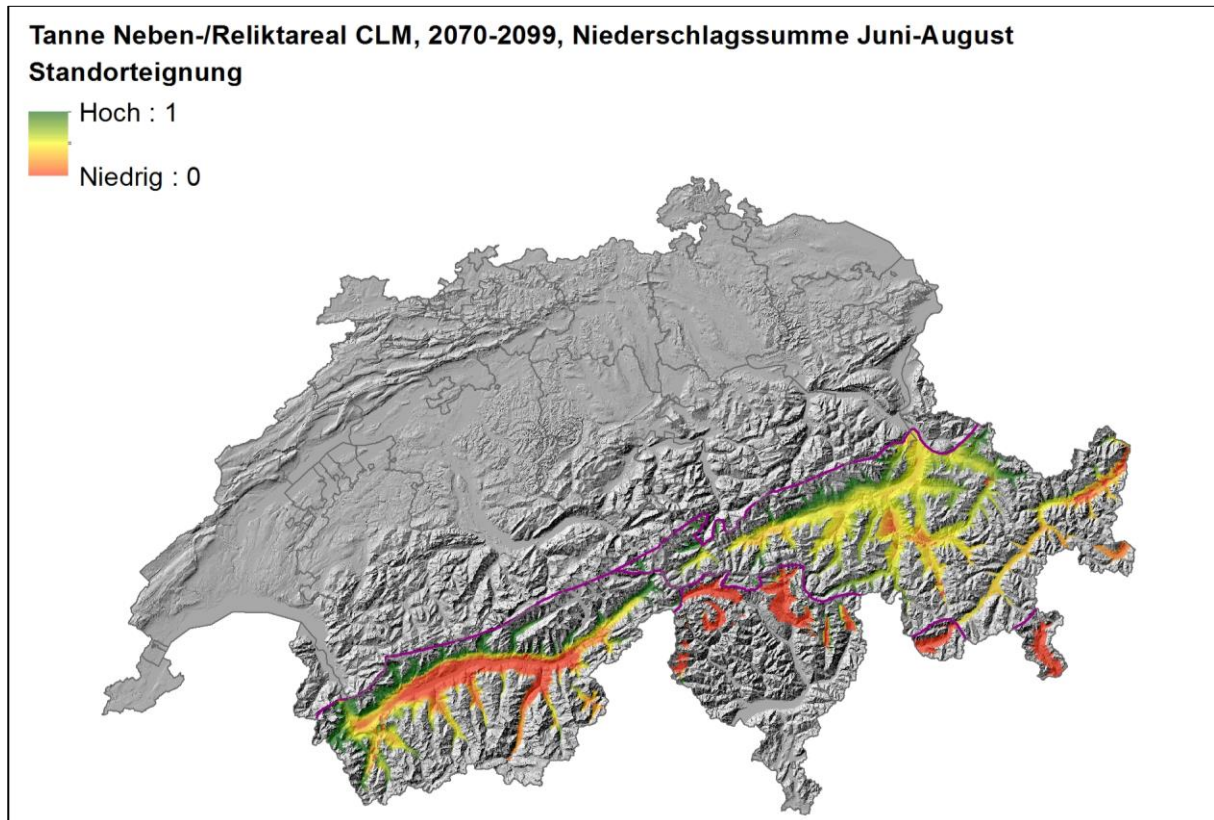


Abb. 137: Modellerte Standorteignung für das Tannen-Nebenareal (Abgrenzung zum Tannen-Reliktareal), Klimaparameter: Niederschlagssumme Juni-August. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88. Violette Linien = Grenzen der unterschiedlichen Modelle.

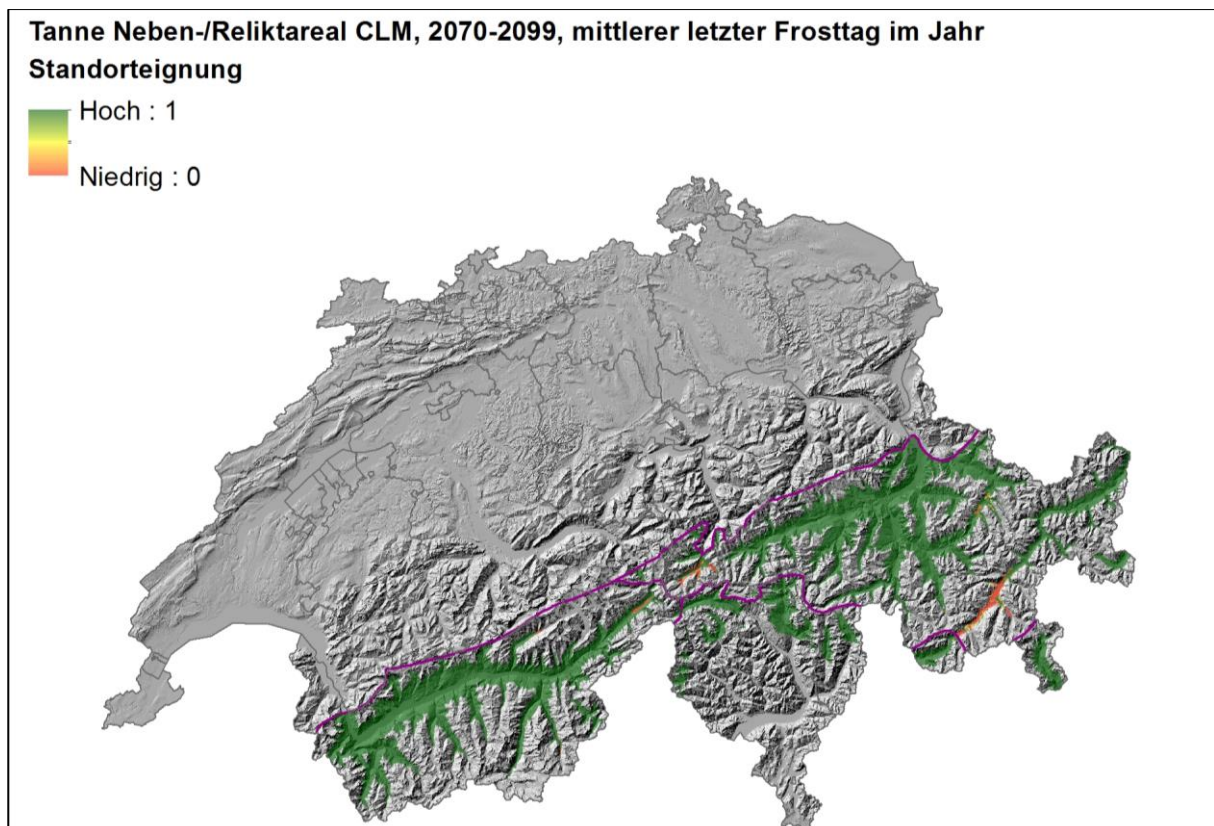


Abb. 138: Modellerte Standorteignung für das Tannen-Nebenareal (Abgrenzung zum Tannen-Reliktareal), Klimaparameter: Mittlerer letzter Frosttag im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88. Violette Linien = Grenzen der unterschiedlichen Modelle.

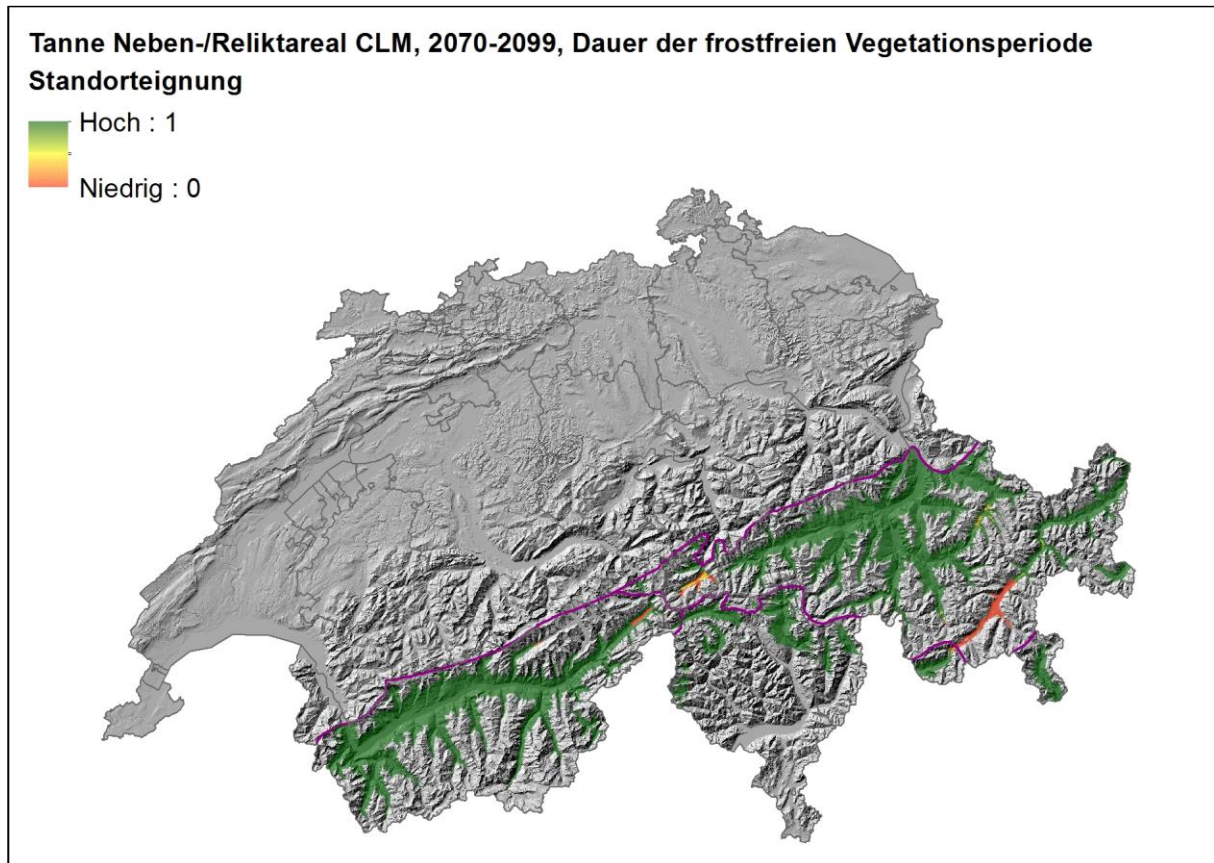


Abb. 139: Modellerte Standorteignung für das Tannen-Nebenareal (Abgrenzung zum Tannen-Reliktareal), Klimaparameter: Dauer der frostfreien Vegetationsperiode. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88. Violette Linien = Grenzen der unterschiedlichen Modelle.

### 3.7 Colline Stufe

#### 3.7.1 Heutige Modellierung der collinen Stufe

Die Verbreitung der collinen Stufe wird in den folgenden beiden Abbildungen dargestellt (kontinuierliche Darstellung und binäre Darstellung). Die Karten zeigen Ergebnisse der Modellierung für den heutigen Zustand. Aus der Werteskala zwischen 0 und 1 wurde im Mittelland der Wert 0.07 und im VS und GR der Wert 0.21 als Schwellenwert für eine binäre Darstellung ausgewählt. Diese Diskrepanz in den Schwellenwerten lässt sich mit den regionalspezifischen Besonderheiten, den in der Modellierung nicht berücksichtigten Faktoren und den regional unterschiedlichen Grundlagendaten erklären. Trotzdem zeigt sich die verwendete Methode, die Modellierung von nicht binären (unscharfen) Arealgrenzen mit einer binären Arealklassifikation erst am Schluss der Datenbearbeitung, als robust.



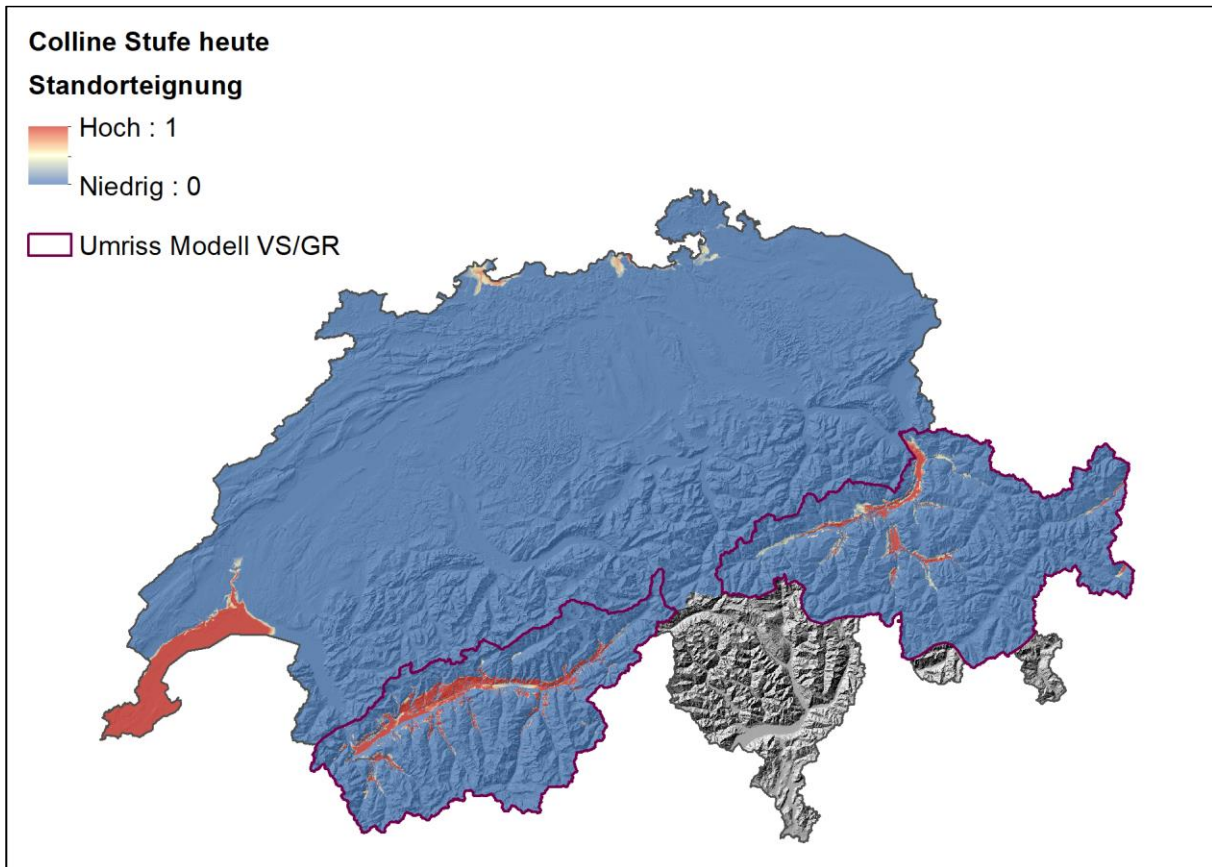


Abb. 140: Modellierte Verbreitung der collinen Stufe heute, kontinuierliche Darstellung der Standorteignung.

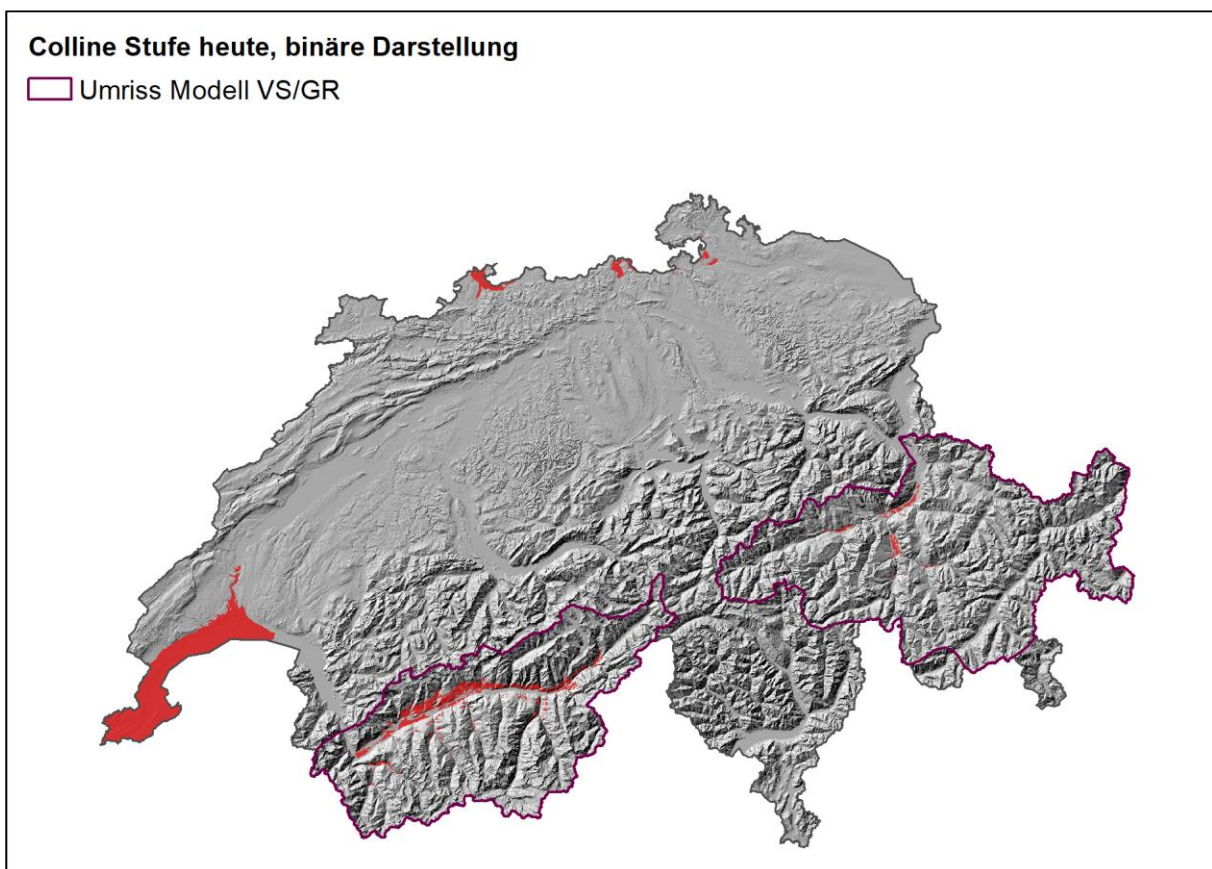


Abb. 141: Modellierte Verbreitung der collinen Stufe heute, binäre Darstellung der Standorteignung (Schwellenwert: Mittelland = 0.07, VS und GR = 0.21).

## Überprüfung der modellierten heutigen collinen Stufe

Beim Genfersee ist die Modellierung grossflächiger als der durch JB neu erstellte Eichungsdatensatz, auch im Kanton BS/BL und im Kanton AG zeigt das Modell weitere Flächen in der collinen Stufe an. Im VS zeigt das Modell in den Südtälern und im Goms eine leicht grössere Ausdehnung. Im Kanton GR weist das Modell im Gegensatz zum Eichungsdatensatz kleine Gebiete in der Ruinaulta, im Albulatal und im Schams auf. Ansonsten stimmt das Modell im VS und in GR sehr gut mit dem Eichungsdatensatz überein (Abb. 142).

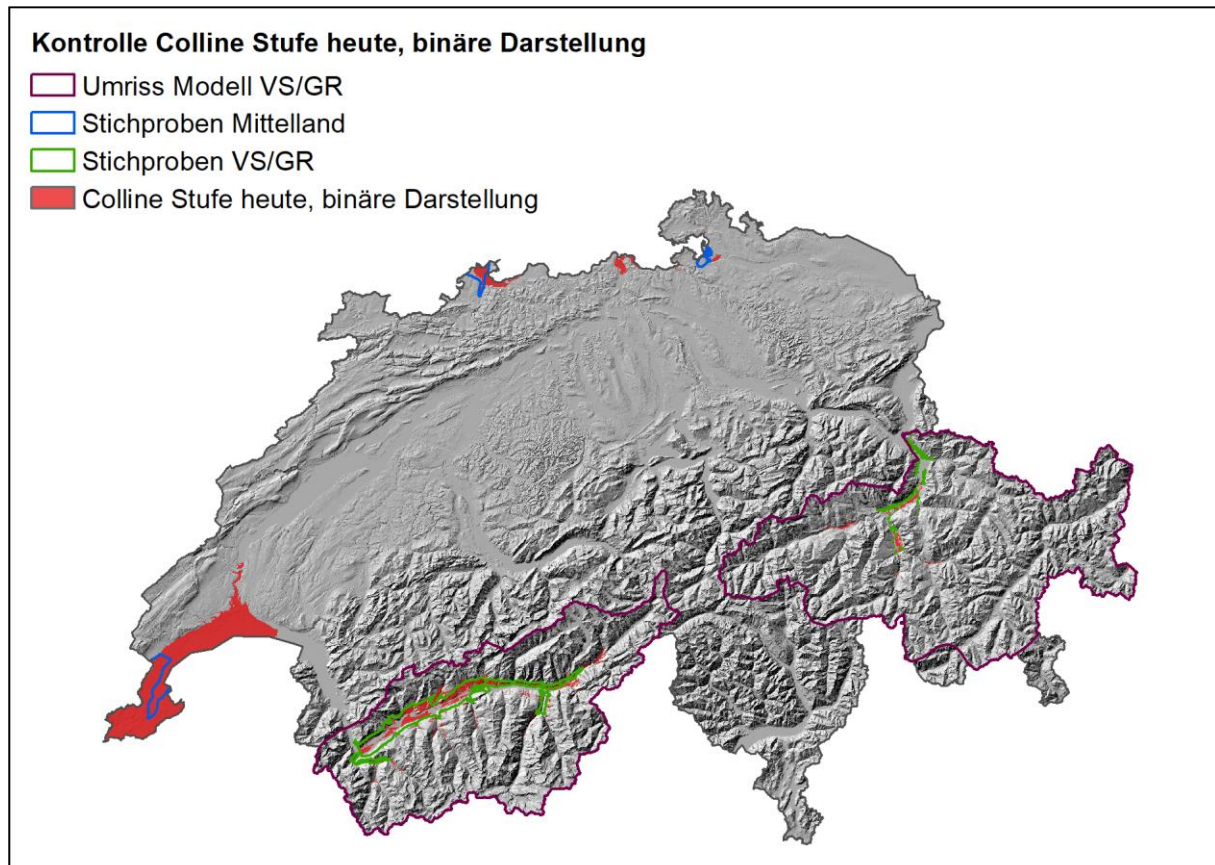


Abb. 142: Kontrolle der modellierten collinen Stufe heute, binäre Darstellung der Standorteignung (Schwellenwert: Mittelland = 0.07, VS und GR = 0.21), mit Stichproben der collinen Stufe.

Es ist relativ schwierig, die colline Stufe realitätsnah zu modellieren. So hat zum Beispiel das Unterengadin sehr hohe mittlere Höchstwerte der Lufttemperatur im Juli und eine hohe Globalstrahlung, was die Eiche und die colline Stufe hochsteigen lassen würde. Auch ist das Verhältnis  $ET_a/ET_p$  klein, was die Eiche gegenüber der Buche fördert. All diese Faktoren würden die colline Stufe fördern. Zwar ist die Eiche wohl sehr trockenheitstolerant (v.a. Flaumeiche, aber auch Traubeneiche), aber eben auch sehr frostempfindlich. Dies bedeutet, dass die Eiche in nicht allzu frostreichen Lagen bei zunehmender Kontinentalität zwar die Buche ablöst, bei allzu grosser Frosthäufigkeit aber (und evtl. Winterkälte) steigt die Eiche dann auch aus und macht der Waldföhre oder manchmal auch der Zitterpappel Platz. So zum Beispiel im Unterengadin oder im mittleren Goms oder auch in der oberen Leventina. Auch im Schams kommen Eichen kaum mehr vor. Auch die frosttolerante Winterlinde steigt in den Inneralpen aus. Die Winterlinde ist wohl trockenheitstoleranter als die Buche, aber doch nicht so wie die Eichen und in höheren Lagen die Waldföhre. Auch scheint die Winterlinde in 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 aus. Eine Plausibilitätsprüfung der modellierten collinen Stufe in den Klimazukünften RegCM3 und CLM wurde aufgrund fehlender Vergleichsmöglichkeiten nicht durchgeführt.

### Welche Klimaparameter beeinflussen die colline Stufe?

Die folgenden Abbildungen zeigen, wie die einzelnen Klimaparameterkarten in die Modellierung der collinen Stufe einfließen. Für die separat ausgeführte Modellierung der collinen Stufe im VS und in GR wurden nur die ersten drei Klimaparameter sowie zusätzlich die Globalstrahlung im Juli verwendet (siehe Kap. 2.4.2.2). Werte für diese Gebiete sind deshalb nur in Abb. 143 bis Abb. 145 und Abb. 151 abgebildet.

Entscheidend für die Grenzen der collinen Stufe in allen Gebieten dürfte die Mittlere Maximaltemperatur im Juli und in geringerem Masse das Verhältnis  $ET_a/ET_p$  sein. Bei GE, BS/BL und SH scheint zusätzlich der Sommerniederschlag und die mittlere potenzielle Evapotranspiration im Juli entscheidend zu sein.

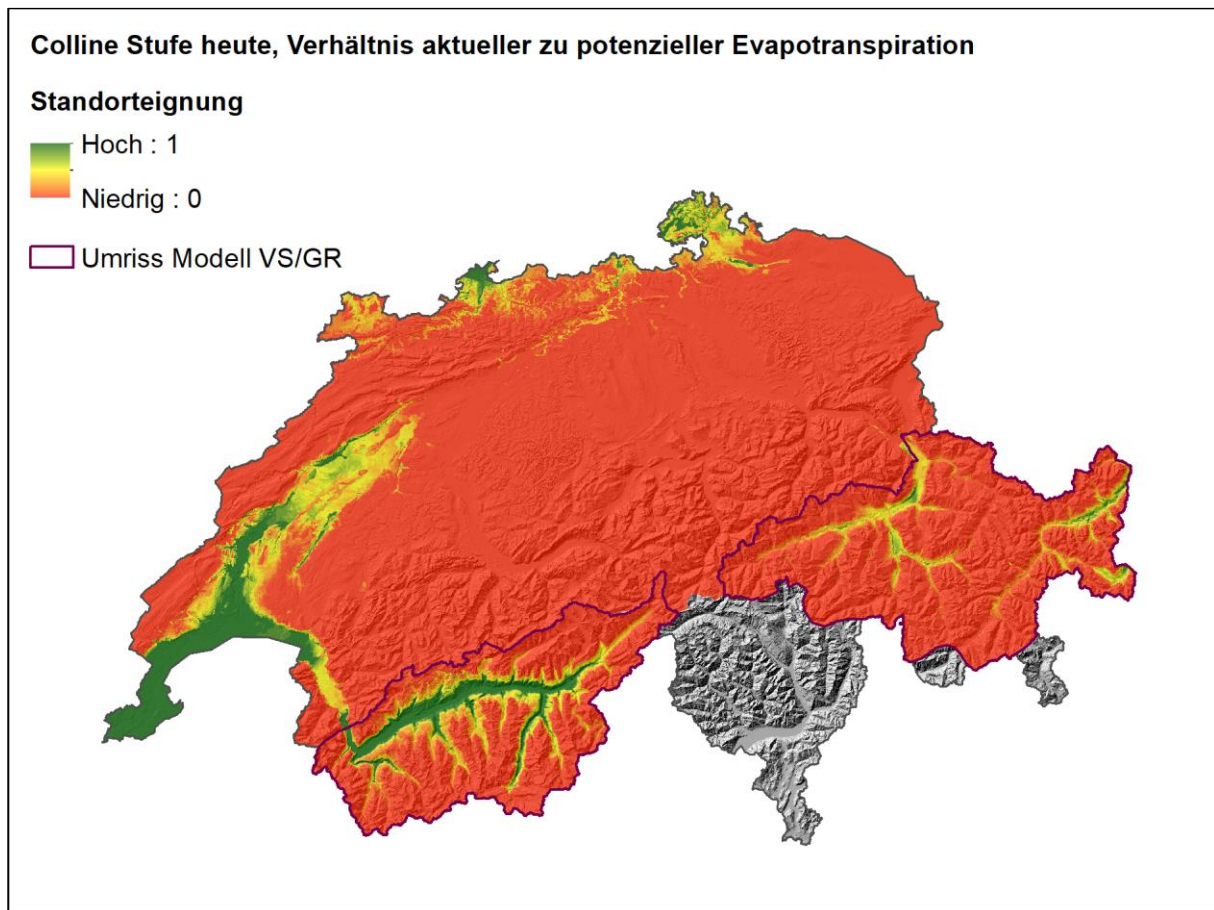


Abb. 143: Modellierte Standorteignung für die colline Stufe heute, Klimaparameter: Verhältnis aktueller zu potenzieller Evapotranspiration. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.

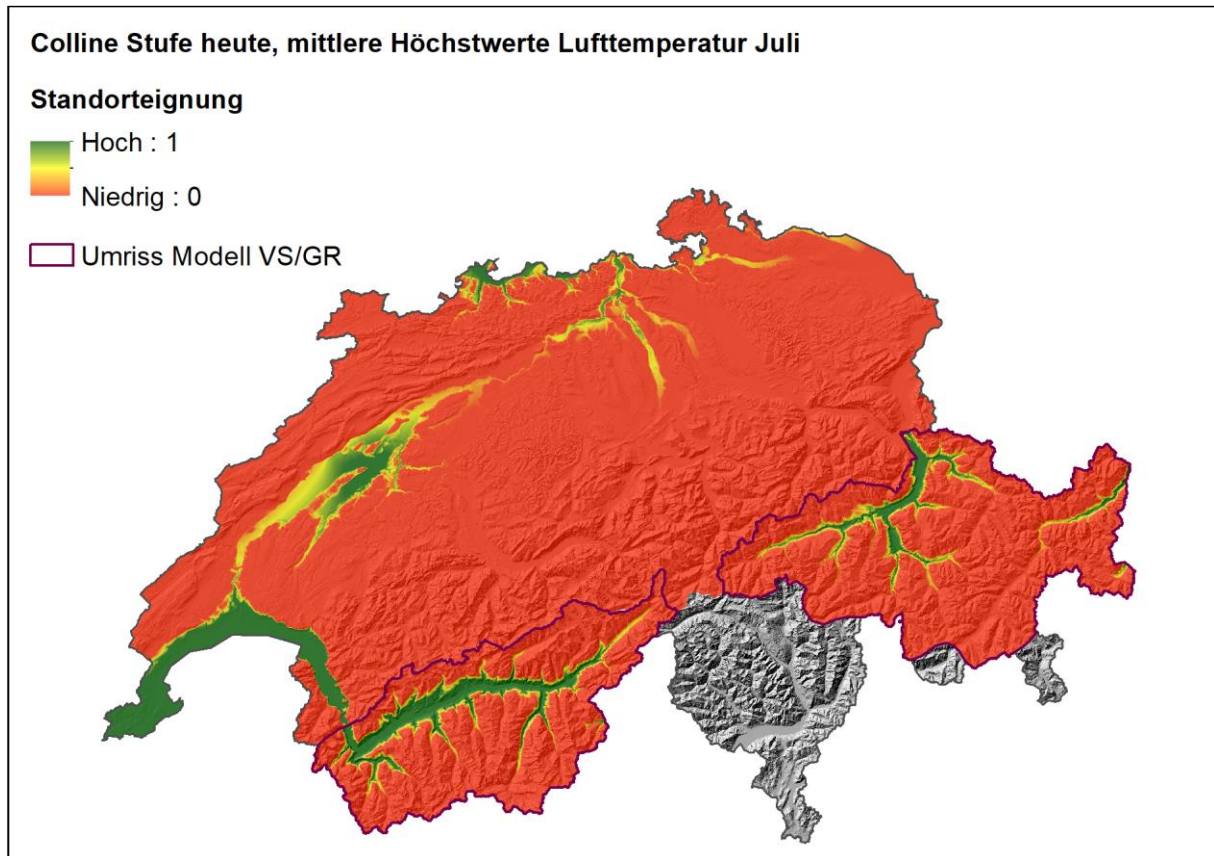


Abb. 144: Modellierte Standorteignung für die colline Stufe heute, Klimaparameter: Mittlere Höchstwerte Lufttemperatur im Juli. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.

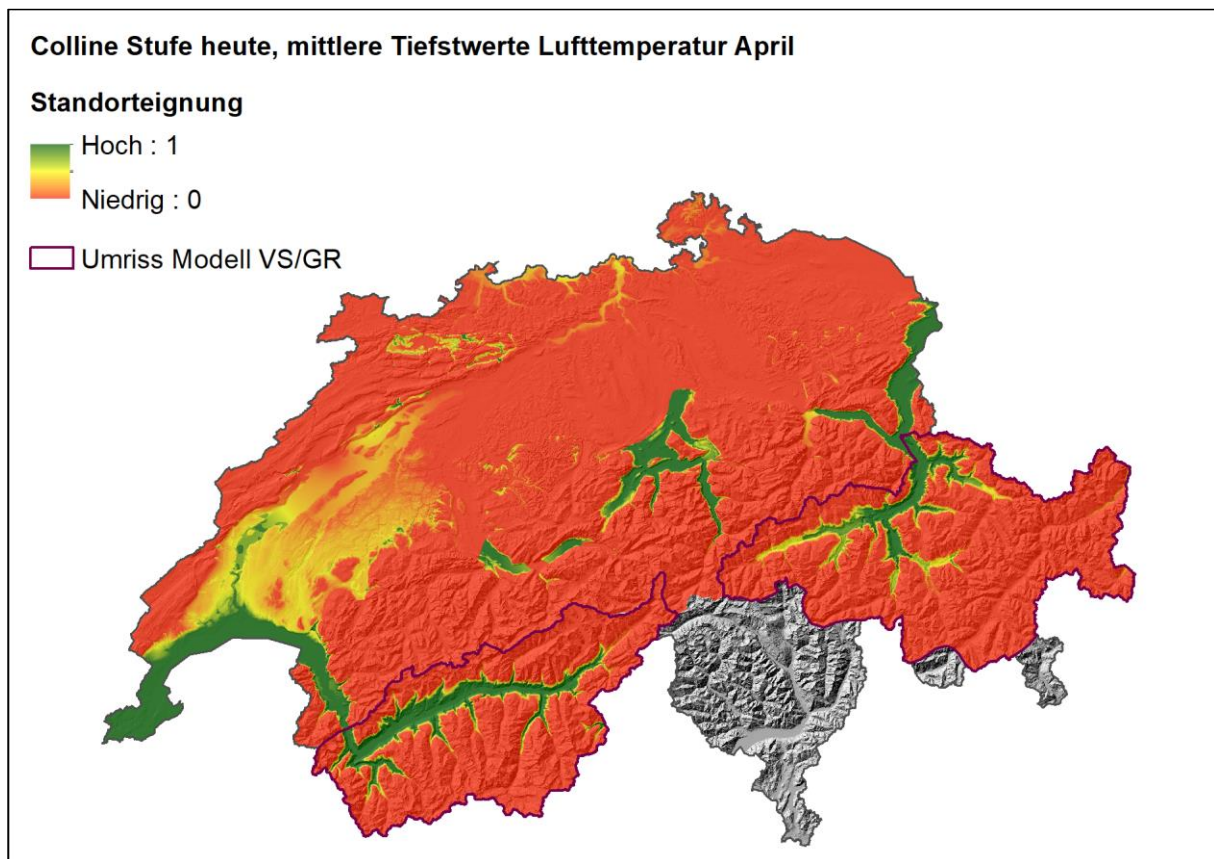


Abb. 145: Modellierte Standorteignung für die colline Stufe heute, Klimaparameter: Mittlere Tiefstwerte Lufttemperatur im April. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.



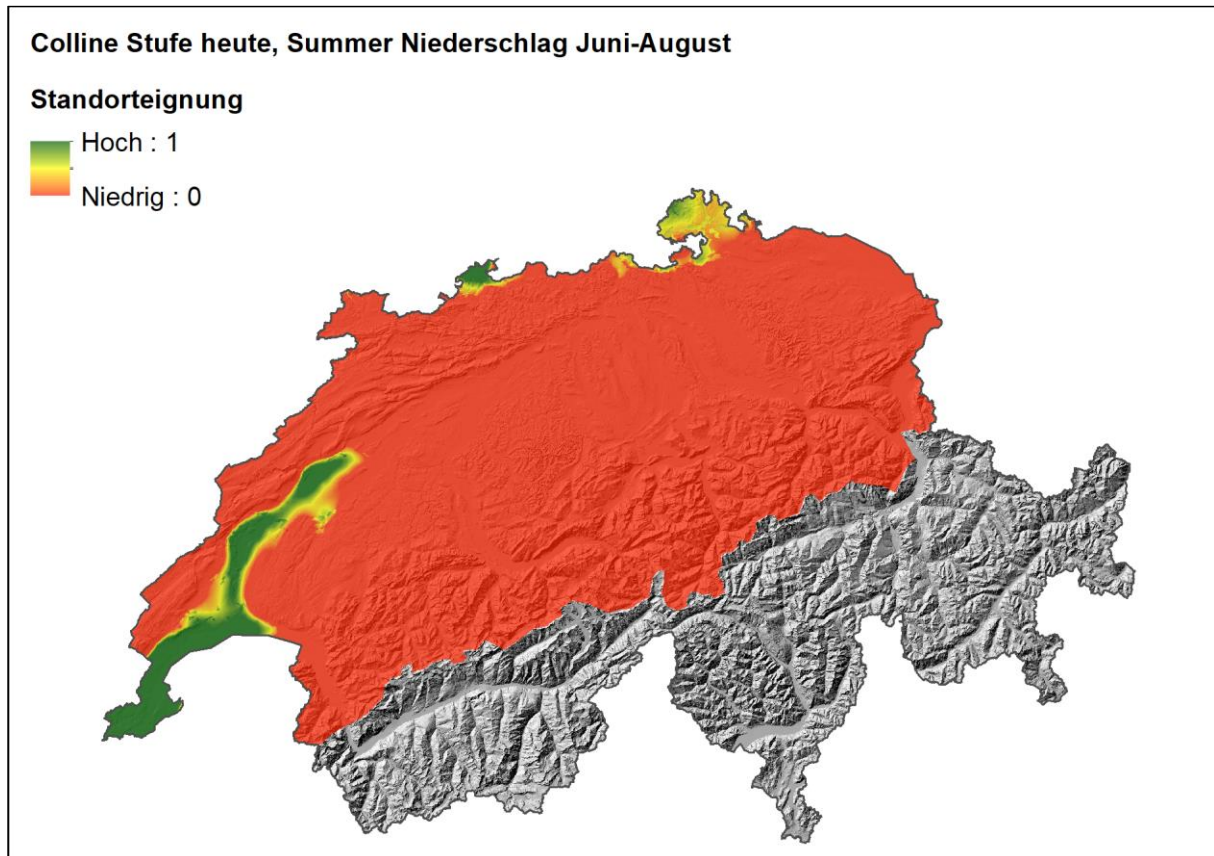


Abb. 146: Modellierte Standorteignung für die colline Stufe heute, Klimaparameter: Niederschlagssumme Juni- August. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.

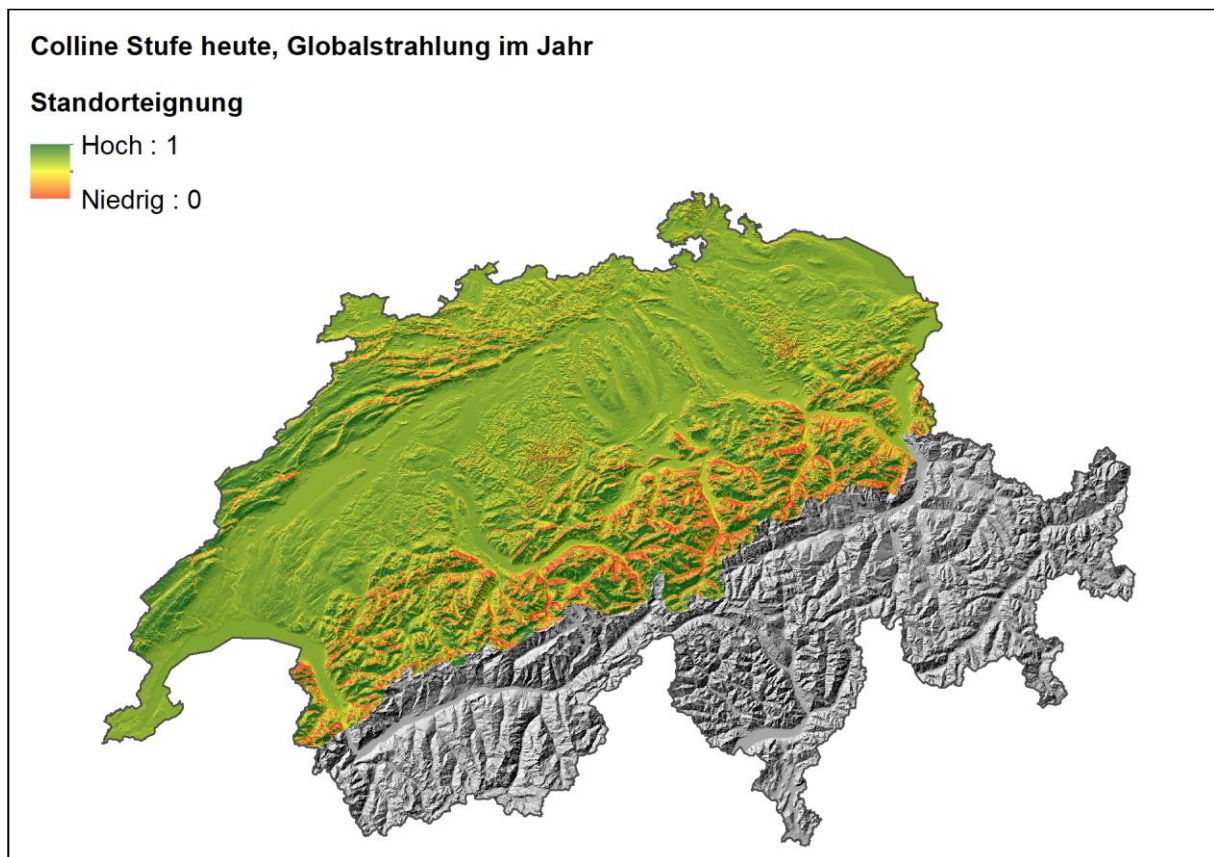


Abb. 147: Modellierte Standorteignung für die colline Stufe heute, Klimaparameter: Globalstrahlung im Jahr. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.

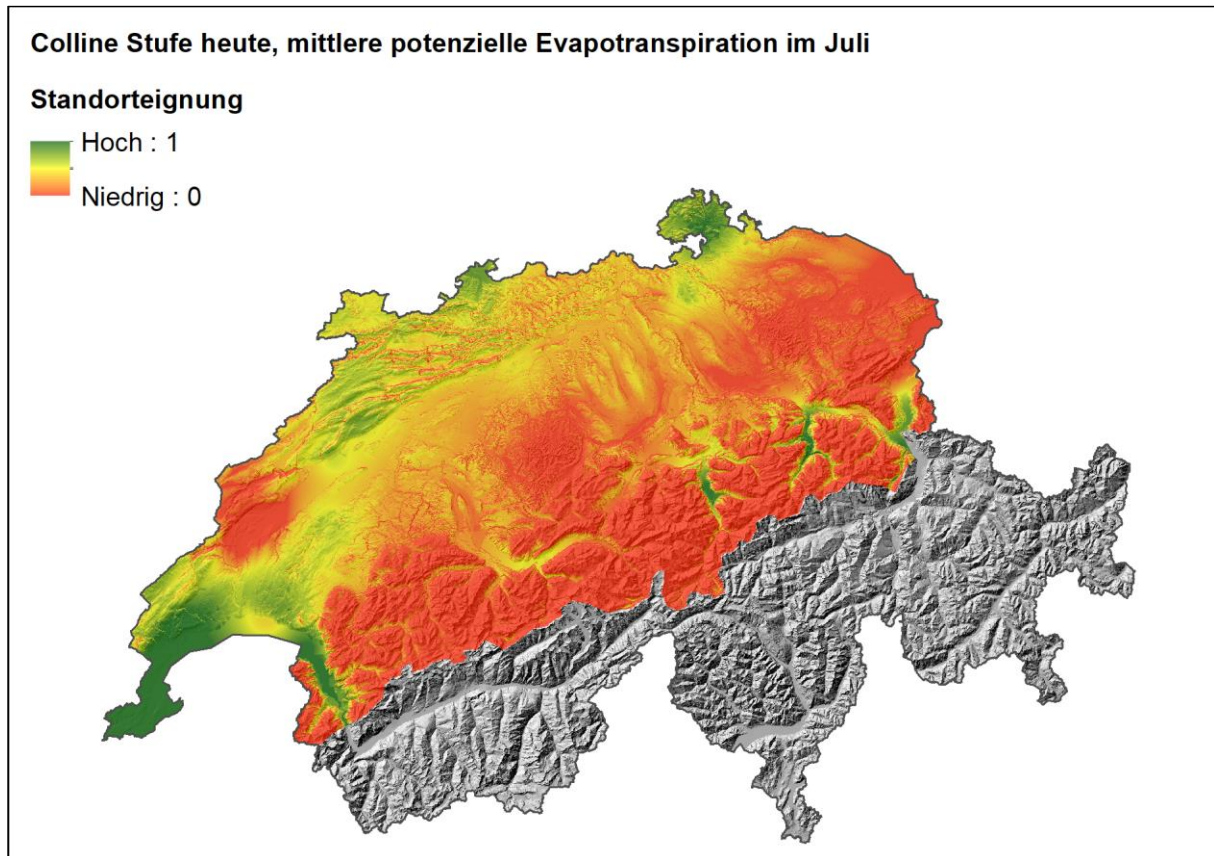


Abb. 148: Modellierte Standorteignung für die colline Stufe heute, Klimaparameter: Mittlere potenzielle Evapotranspiration im Juli. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.

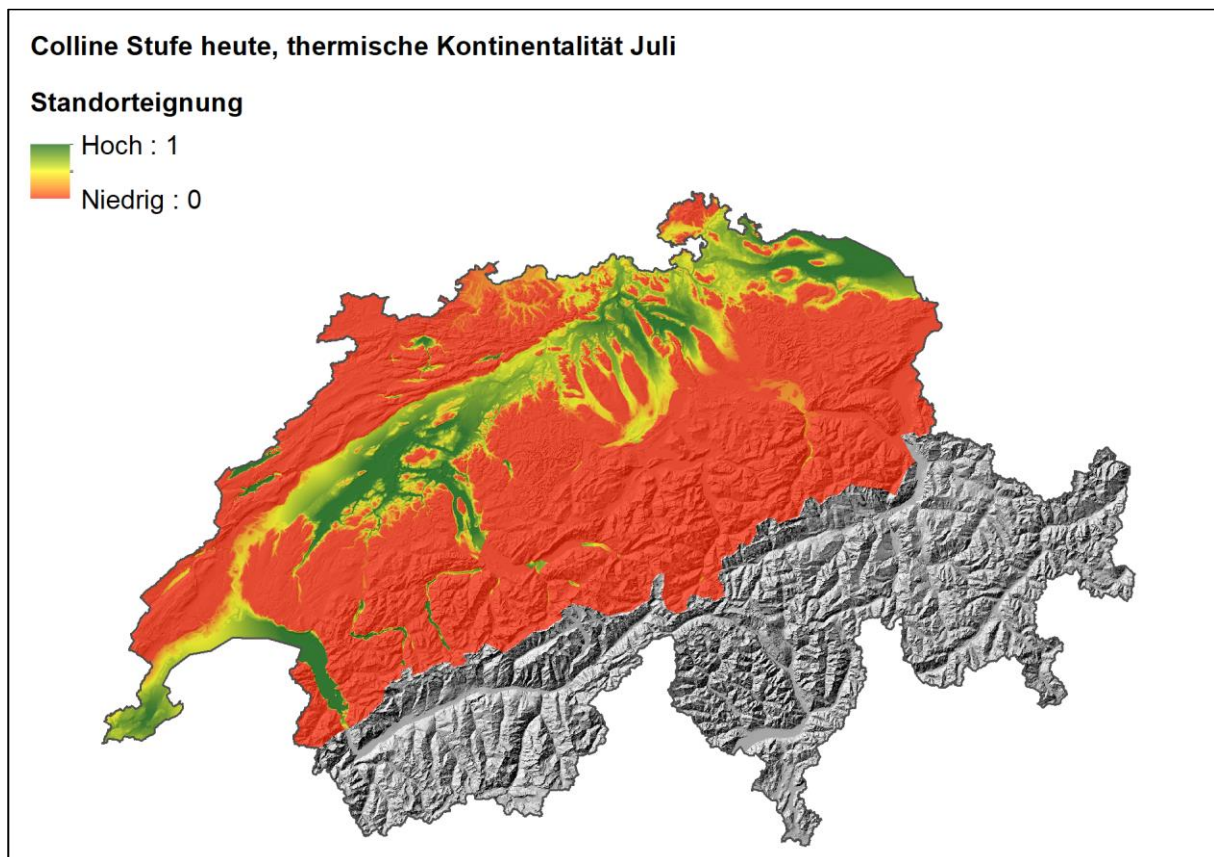


Abb. 149: Modellierte Standorteignung für die colline Stufe heute, Klimaparameter: Thermische Kontinentalität im Juli. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.



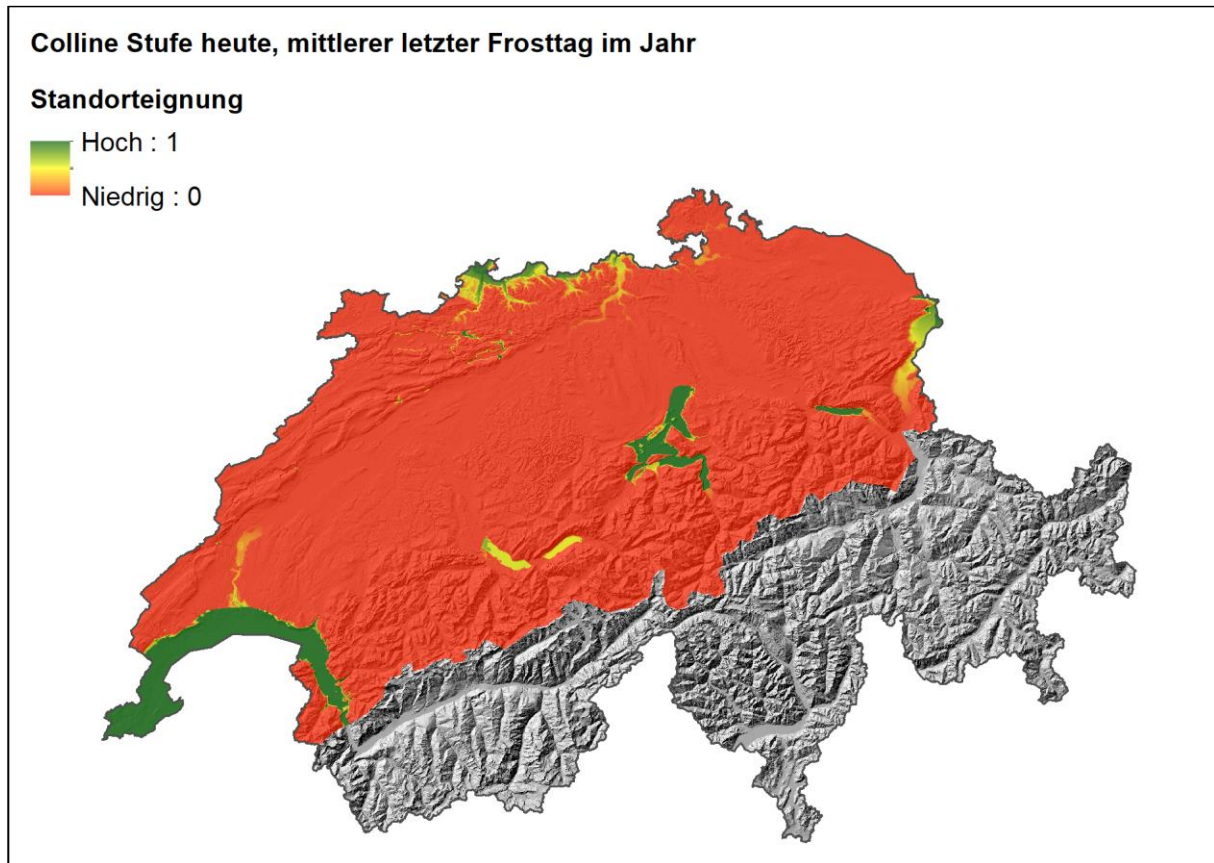


Abb. 150: Modellierte Standorteignung für die colline Stufe heute, Klimaparameter: Mittlerer letzter Frosttag im Jahr. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.

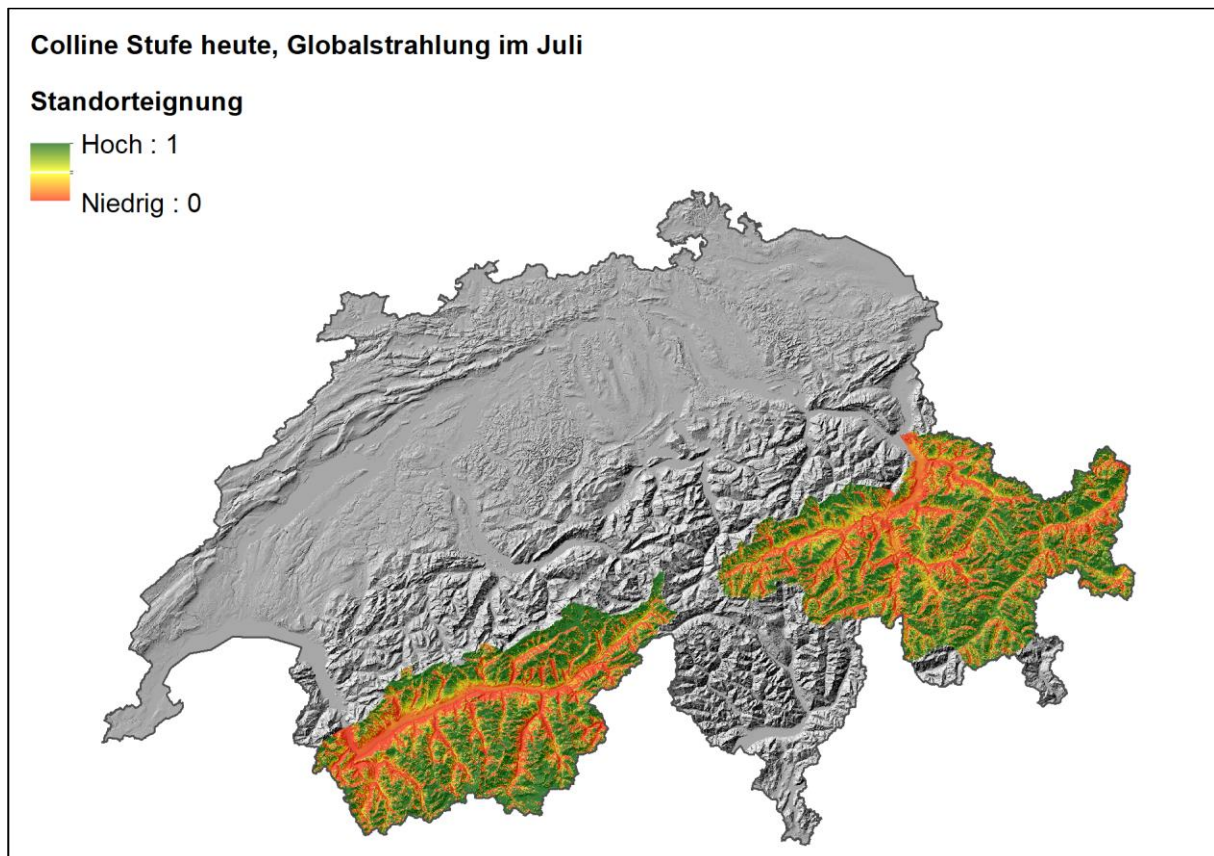


Abb. 151: Modellierte Standorteignung für die colline Stufe heute, Klimaparameter: Globalstrahlung im Juli. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.

### 3.7.2 Modellierungen der collinen Stufe mit der Klimazukunft RegCM3

Die folgenden beiden Abbildungen (kontinuierliche Darstellung und binäre Darstellung) zeigen die Ergebnisse der Modellierung für das RegCM3-Szenario. Aus der Werteskala zwischen 0 und 1 wurde im Mittelland der Wert 0.07 und im VS und GR der Wert 0.21 als Schwellenwert für eine binäre Darstellung verwendet. Diese Werte entsprechen denjenigen, die für die heutige Modellierung ausgewählt wurden.

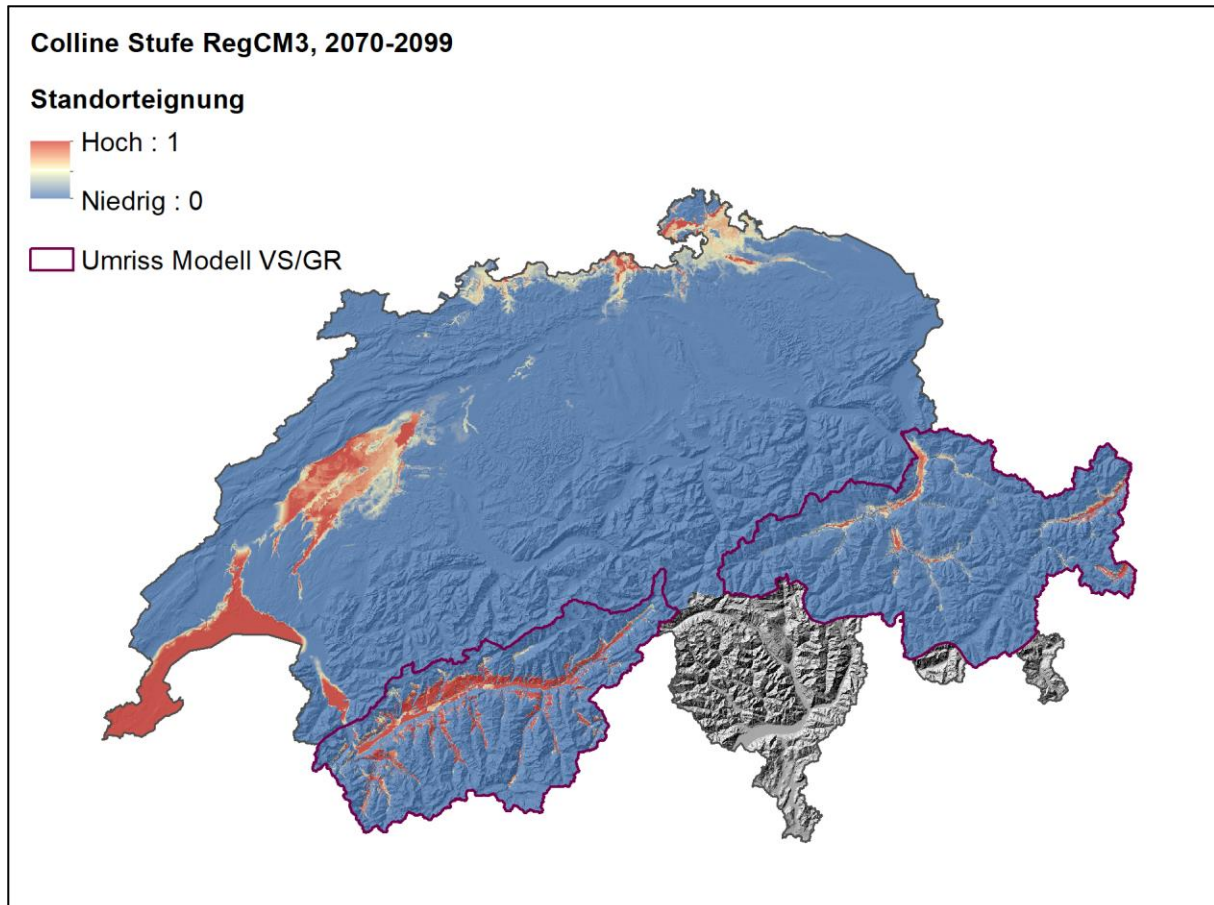


Abb. 152: Modellierte Verbreitung der collinen Stufe, kontinuierliche Darstellung der Standorteignung, Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3.

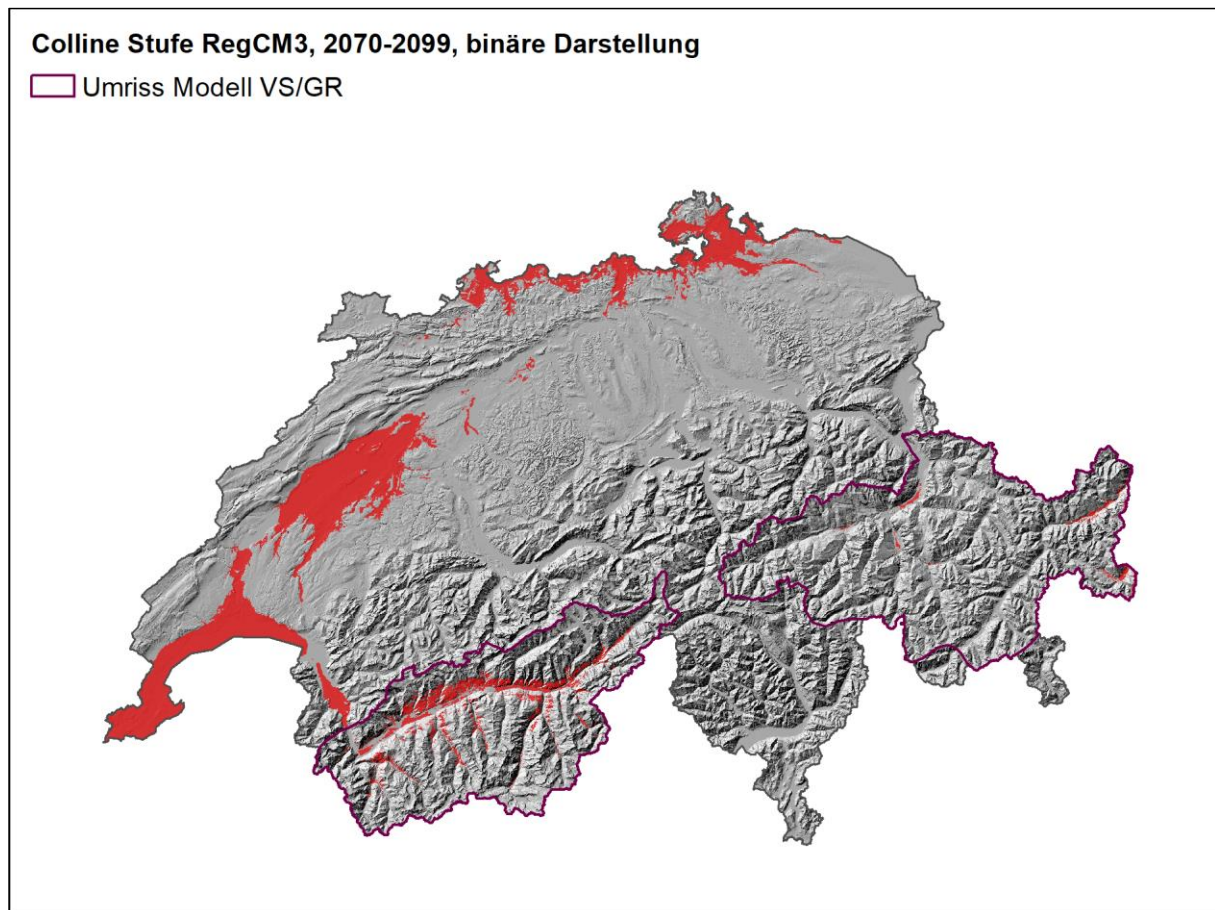


Abb. 153: Modellerte Verbreitung der collinen Stufe, binäre Darstellung der Standorteignung (Schwellenwert: Mittelland = 0.07, VS und GR = 0.21), Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3.

### Veränderungen gegenüber heutiger Modellierung

Bei der Klimazukunft RegCM3 steigt die colline Stufe im VS an den Südhängen an und dringt ebenfalls weiter in die Täler vor. Ebenfalls dehnt sich die colline Stufe Richtung Genfersee aus. In Nordbünden bleibt die zukünftige colline Stufe in etwa gleich oder ist sogar kleinflächiger, dies evtl. aufgrund einer geringeren modellierten Standorteignung beim Verhältnis  $ET_a/ET_p$ . Neue Habitatsignung für die colline Stufe weisen das Münstertal und das Engadin auf, ebenfalls das Berner Seeland sowie das Gebiet östlich des Neuenburgersees und die grenznahen Gebiete im Norden der Schweiz.

Für die colline Stufe auf der Alpennordseite sowie in den Kantonen VS und GR gemäss der Klimazukunft RegCM3 bedeutet, dass Buche, Fichte und Tanne nur noch auf besonders gut wasserversorgten Standorten gut gedeihen, sonst aber grossflächig ausfallen.

### Welche Klimaparameter beeinflussen die colline Stufe bei der Klimazukunft RegCM3?

Abb. 154 bis Abb. 159 zeigen, wie die einzelnen Klimaparameter in die Modellierung der collinen Stufe (RegCM3) einfließen. Sämtliche Karten werden im Anhang dargestellt, nachfolgend werden nur die entscheidenden, sich gross verändernden Klimaparameter aufgezeigt. Bei den folgenden Abbildungen bedeuten Werte um 1 eine hohe Standorteignung für das colline Areal aus der Sicht des ausgewählten Klimaparameters. Werte um 0 bedeuten eine geringe Standorteignung aus der Sicht des ausgewählten Klimaparameters. Für die Modellierung der collinen Stufe im VS und in GR wurden nur die Klimaparameter verwendet, die in den folgenden Abbildungen Werte für dieses Gebiet aufweisen (Abb. 154 bis Abb. 156 und Abb. 159).



Auch hier dürfte die Zunahme der mittleren Maximaltemperatur im Juli und die Veränderung beim Verhältnis  $ET_a/ET_p$  die Ausbreitung der collinen Stufe zusätzlich verstärken. Zwischen GE und Berner Seeland und an der Nordgrenze der Schweiz könnte zusätzlich v.a. der Sommerniederschlag entscheidend werden.

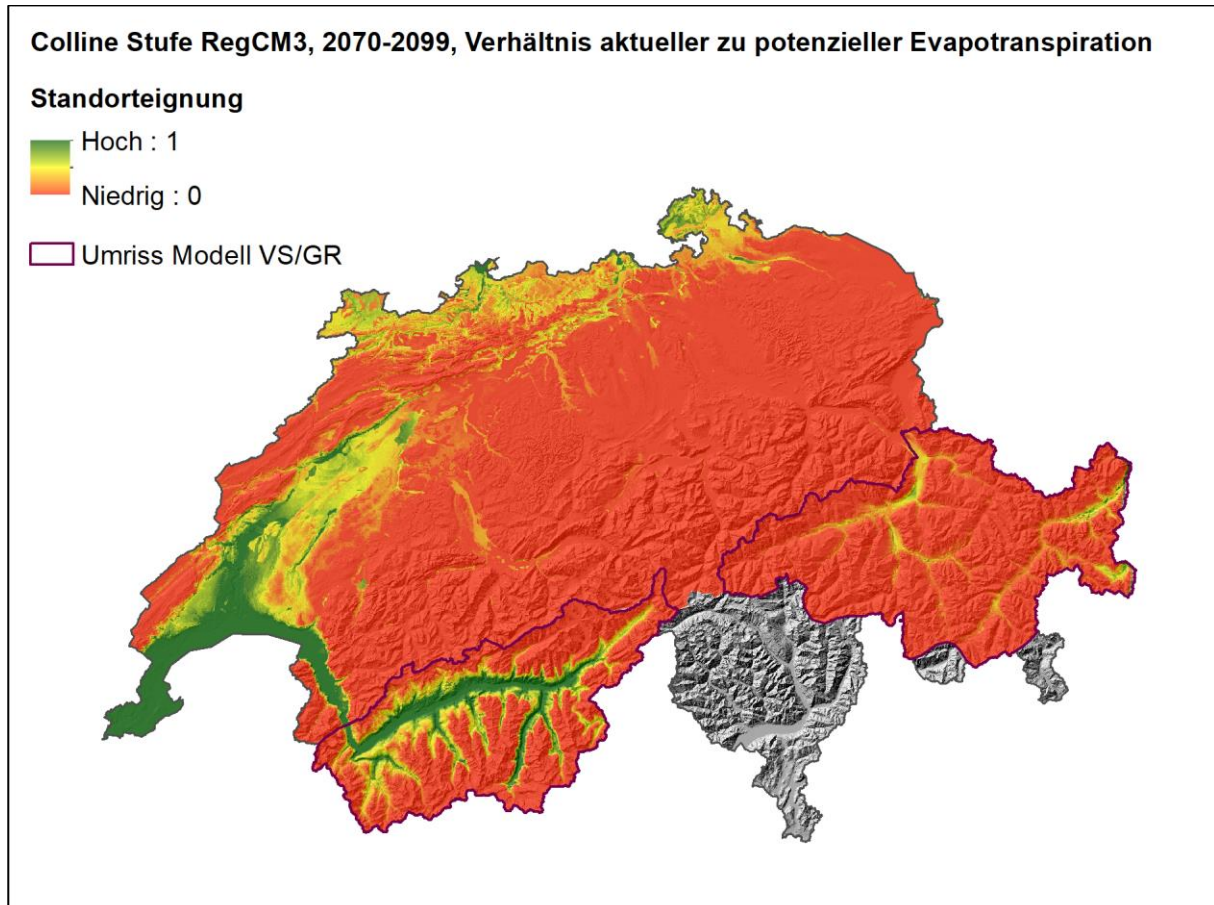


Abb. 154: Modellerte Standorteignung für die colline Stufe, Klimaparameter: Verhältnis aktueller zu potenzieller Evapotranspiration. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.



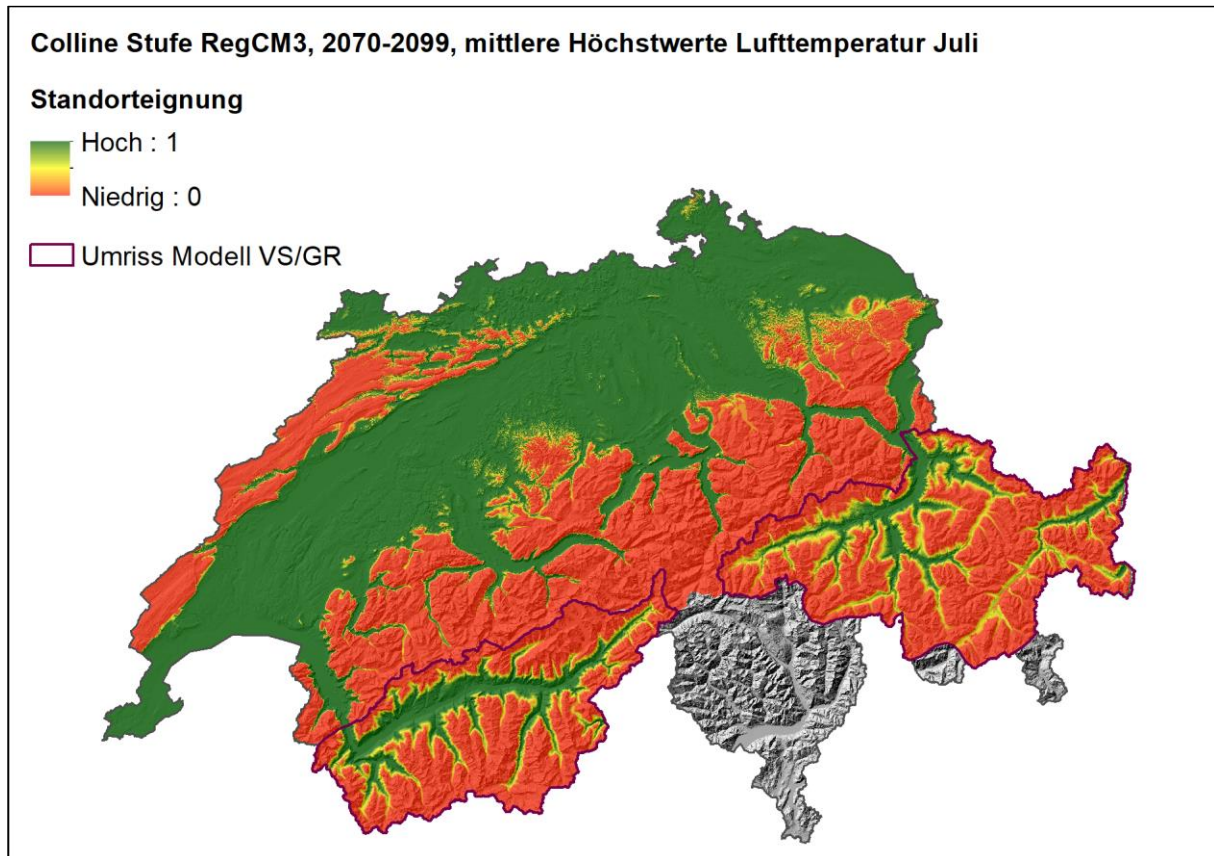


Abb. 155: Modellierte Standorteignung für die colline Stufe, Klimaparameter: Mittlere Höchstwerte Lufttemperatur im Juli. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.

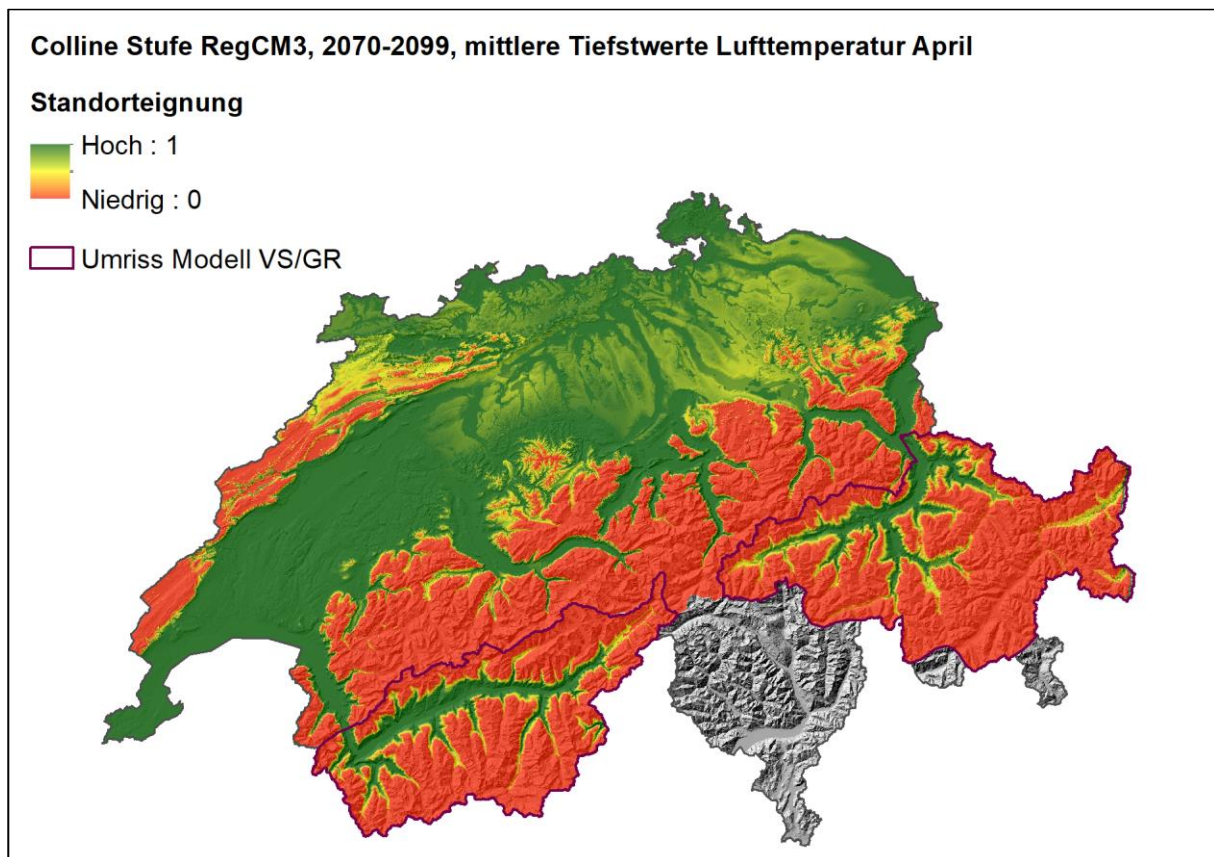


Abb. 156: Modellierte Standorteignung für die colline Stufe, Klimaparameter: Mittlere Tiefstwerte Lufttemperatur im April. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.

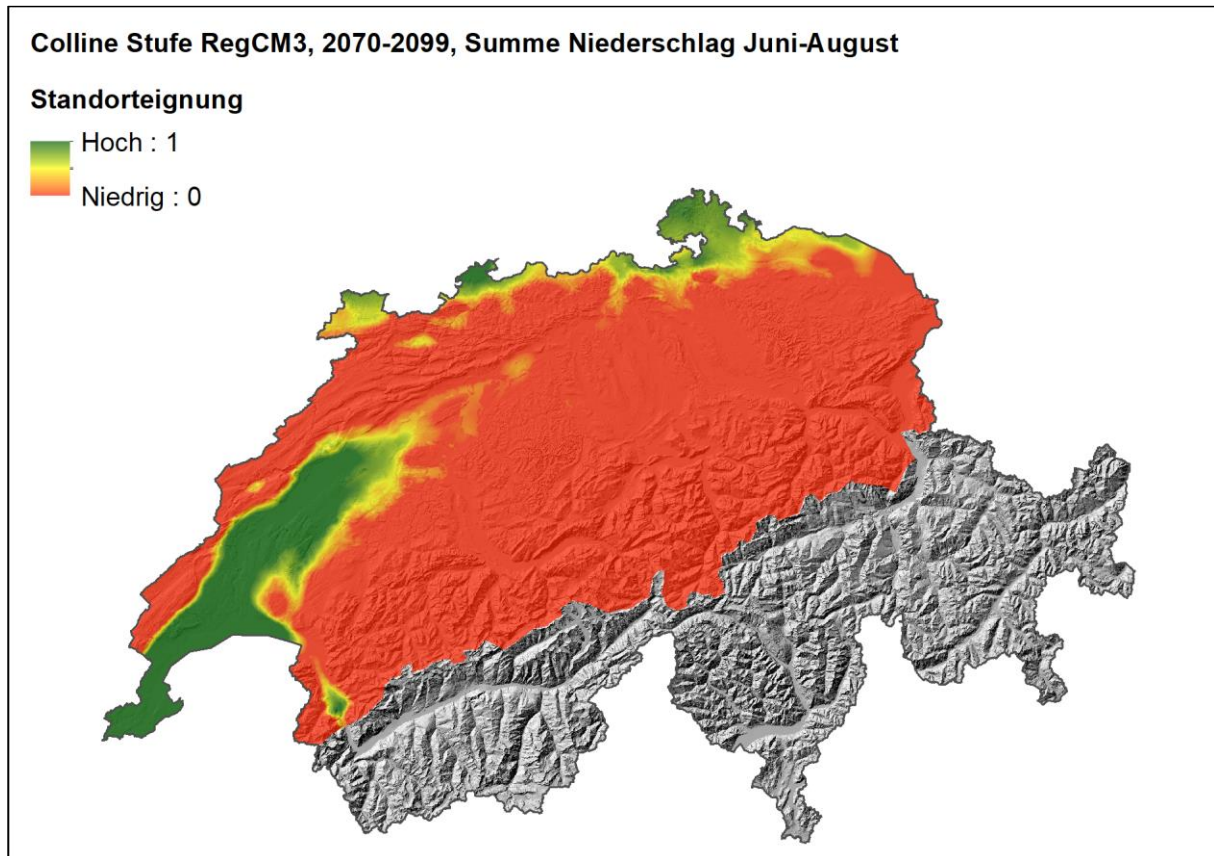


Abb. 157: Modellierte Standorteignung für die colline Stufe, Klimaparameter: Niederschlagssumme Juni- August. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.

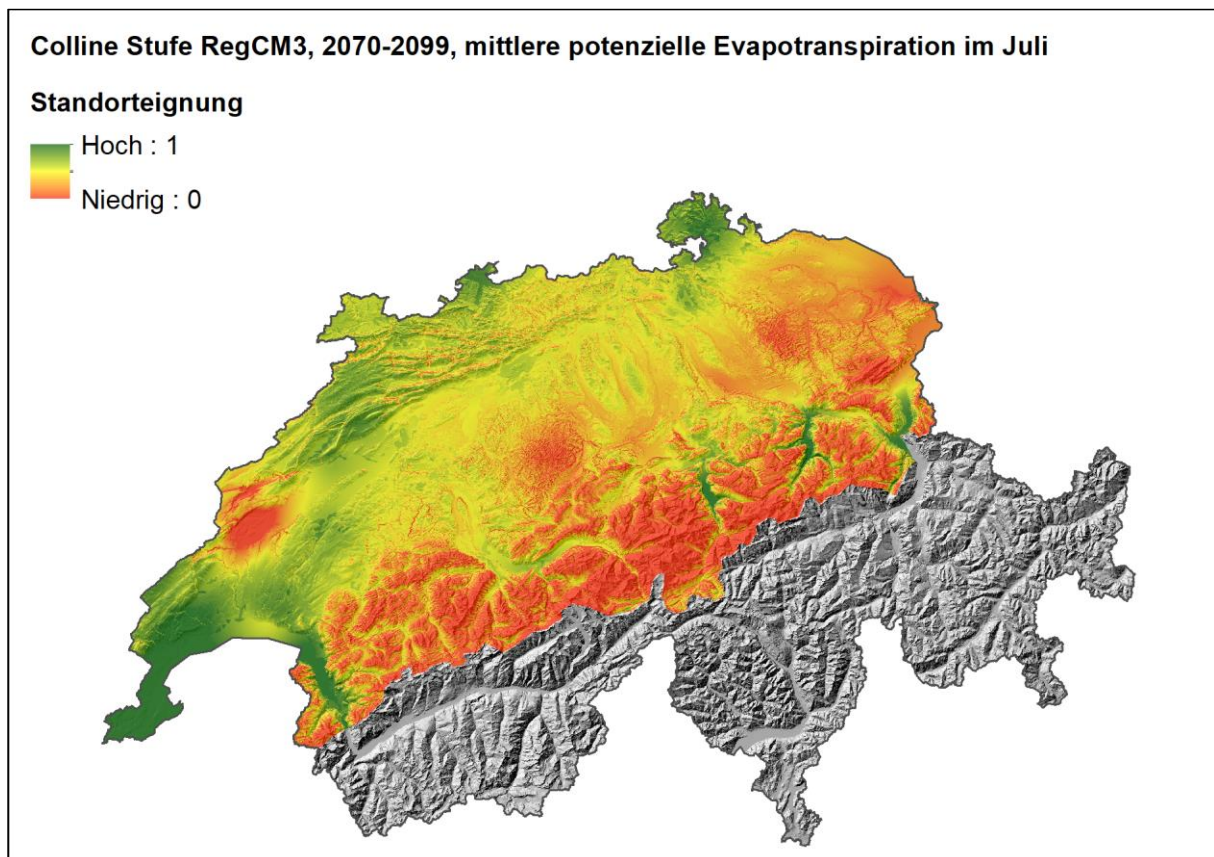


Abb. 158: Modellierte Standorteignung für die colline Stufe, Klimaparameter: Mittlere potenzielle Evapotranspiration im Juli. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.



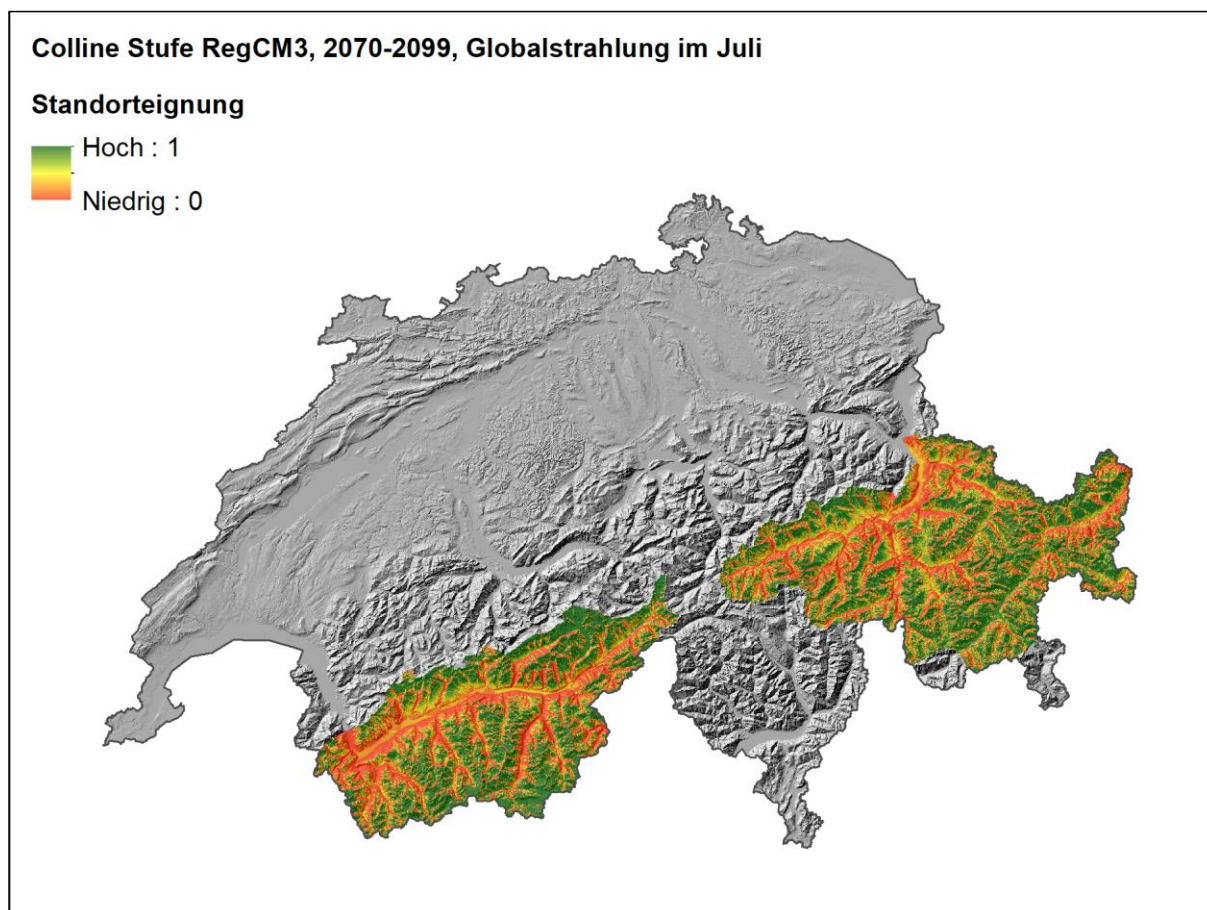


Abb. 159: Modellerte Standorteignung für die colline Stufe, Klimaparameter: Globalstrahlung im Juli. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.

### 3.7.3 Modellierungen der collinen Stufe mit der Klimazukunft CLM

Die folgenden beiden Abbildungen (kontinuierliche Darstellung und binäre Darstellung) zeigen die Ergebnisse der Modellierung für das CLM-Szenario. Aus der Werteskala zwischen 0 und 1 wurde im Mittelland der Wert 0.07 und im VS und GR der Wert 0.21 als Schwellenwert für eine binäre Darstellung verwendet. Diese Werte entsprechen denjenigen, die für die heutige Modellierung ausgewählt wurden.

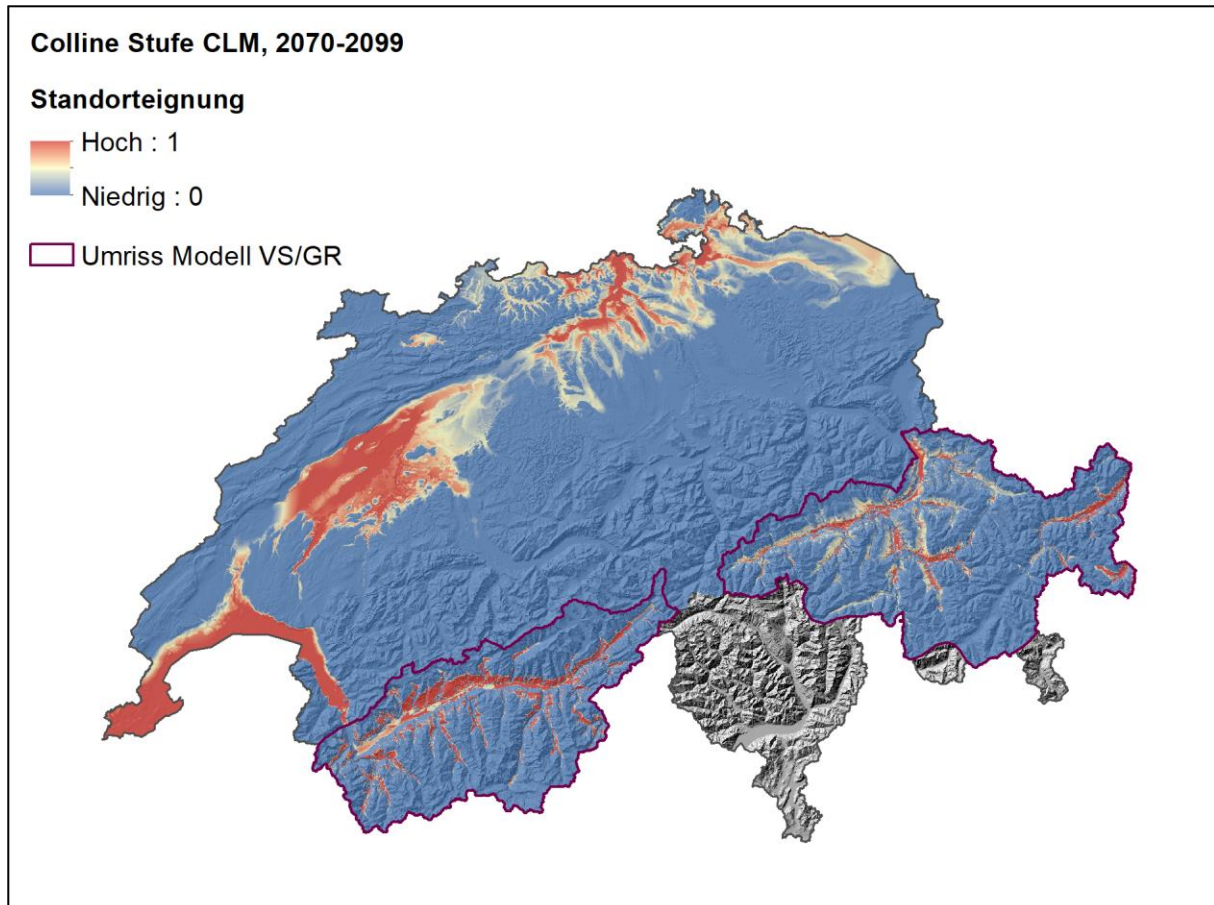


Abb. 160: Modellierte Verbreitung der collinen Stufe, kontinuierliche Darstellung der Standorteignung, Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM.



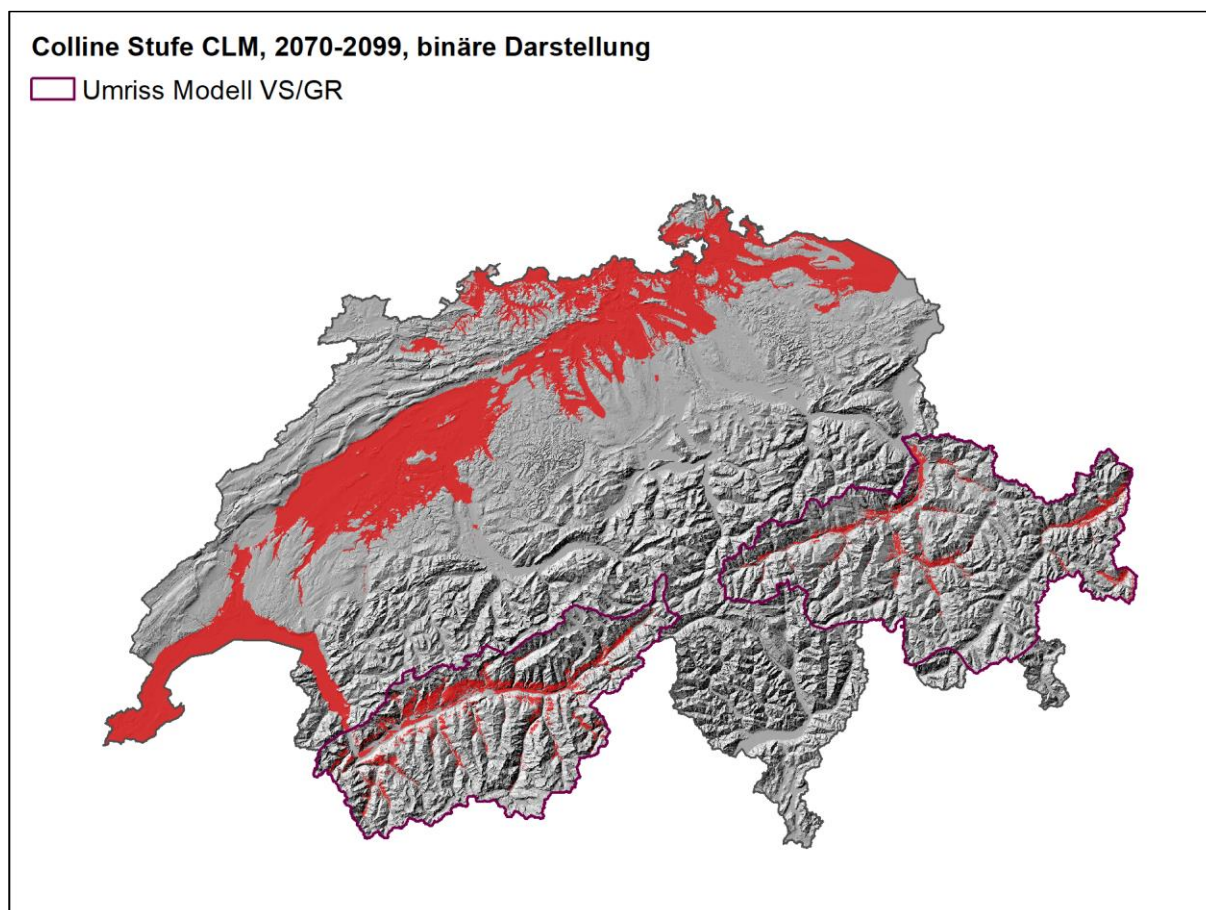


Abb. 161: Modellierte Verbreitung der collinen Stufe, binäre Darstellung der Standorteignung (Schwellenwert: Mittelland = 0.07, VS und GR = 0.21), Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM.

### Veränderungen gegenüber heutiger Modellierung und Unterschiede zur Klimazukunft RegCM3

Das CLM- und das RegCM3-Modell sind im VS fast deckungsgleich, bei beiden steigt die colline Stufe im VS v.a. an den Südhängen des Haupttals z.T. stark an und dringt weiter in die Täler vor. Dies könnte evtl. aufgrund der stärkeren Sommertrockenheit im Wallis beim RegCM3 sein. Ebenfalls dehnt sich die colline Stufe Richtung Genfersee aus. Im Kanton GR ist die colline Stufe beim CLM viel grösser als beim RegCM3; beim CLM weist die zukünftige colline Stufe eine sehr grosse Ausdehnung in die Surselva, ins Val Lumnezia, ausserdem in Mittelbünden und im Prättigau auf. Neue Habitatsignung für die colline Stufe weisen ebenfalls das Münstertal und das Engadin auf. Sehr grossflächig weist das CLM die künftige colline Stufe im westlichen und östlichen Mittelland aus (fast doppelt so gross wie das RegCM3).

Die colline Stufe CLM auf der Alpennordseite sowie in den Kantonen VS und GR bedeutet bei der Umsetzung, dass wir Buche, Fichten und Tanne nur noch auf besonders gut wasserversorgten Standorten sehen, auf dem grossen Teil der Fläche erwarten wir, dass diese Baumarten ausfallen.

### Welche Klimaparameter beeinflussen die colline Stufe bei der Klimazukunft CLM?

Abb. 162 bis Abb. 167 zeigen, wie die einzelnen Klimaparameterkarten in die Modellierung der collinen Stufe (CLM) einfließen. Sämtliche Karten werden im Anhang dargestellt, nachfolgend werden nur die entscheidenden, sich gross verändernden Klimaparameter aufgezeigt. Bei den folgenden Abbildungen bedeuten Werte um 1 eine hohe Standorteignung für das colline Areal aus der Sicht des ausgewählten Klimaparameters. Werte um 0 bedeuten eine

geringe Standorteignung aus der Sicht des ausgewählten Klimaparameters. Für die Modellierung der collinen Stufe im VS und in GR wurden nur die Klimaparameter verwendet, die in den folgenden Abbildungen Werte für dieses Gebiet aufweisen (Abb. 162 bis Abb. 164 und Abb. 167).

Auch hier, wie bei der Klimazukunft RegCM3, dürfte die Zunahme der mittleren Maximaltemperatur im Juli und die Abnahme des Verhältnisses  $ET_a/ET_p$  die Ausbreitung der collinen Stufe verstärken; im VS und GR evtl. ebenfalls noch die mittleren Minimaltemperaturen im April. Für die starke Ausbreitung der collinen Stufe im westlichen und nördlichen Mittelland könnte zusätzlich v.a. der Sommerniederschlag und die mittlere potenzielle Evapotranspiration im Juli sich entscheidend auswirken.

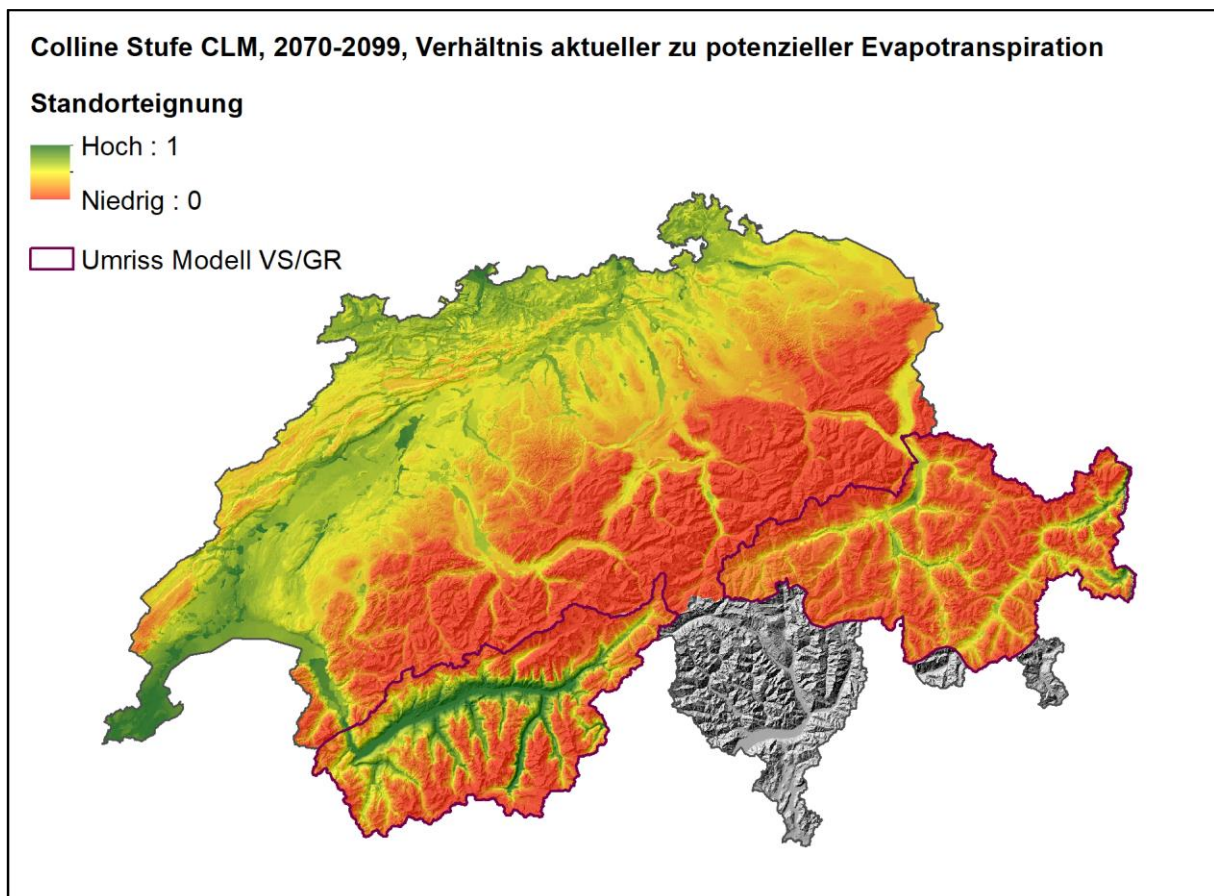


Abb. 162: Modellierte Standorteignung für die colline Stufe, Klimaparameter: Verhältnis aktueller zu potenzieller Evapotranspiration. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.



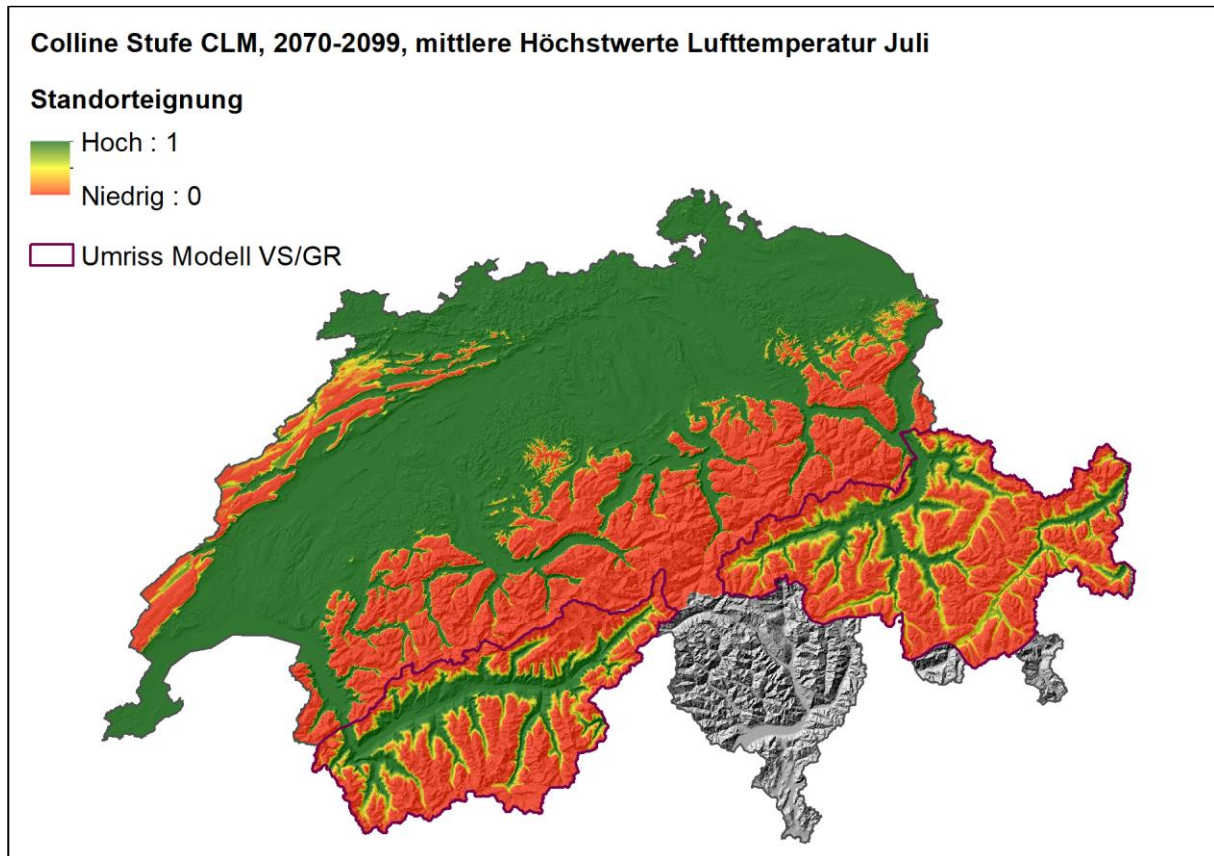


Abb. 163: Modellierte Standorteignung für die colline Stufe, Klimaparameter: Mittlere Höchstwerte Lufttemperatur im Juli. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.

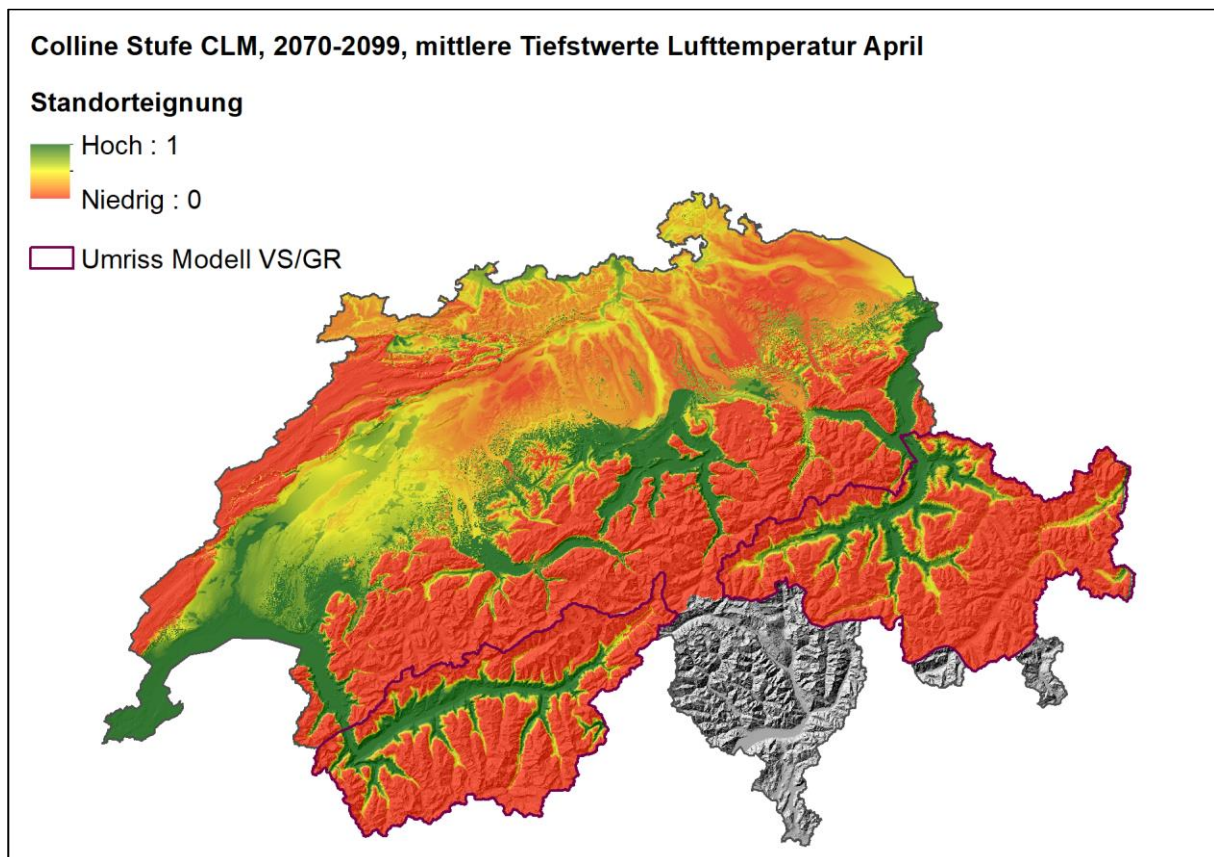


Abb. 164: Modellierte Standorteignung für die colline Stufe, Klimaparameter: Mittlere Tiefstwerte Lufttemperatur im April. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.

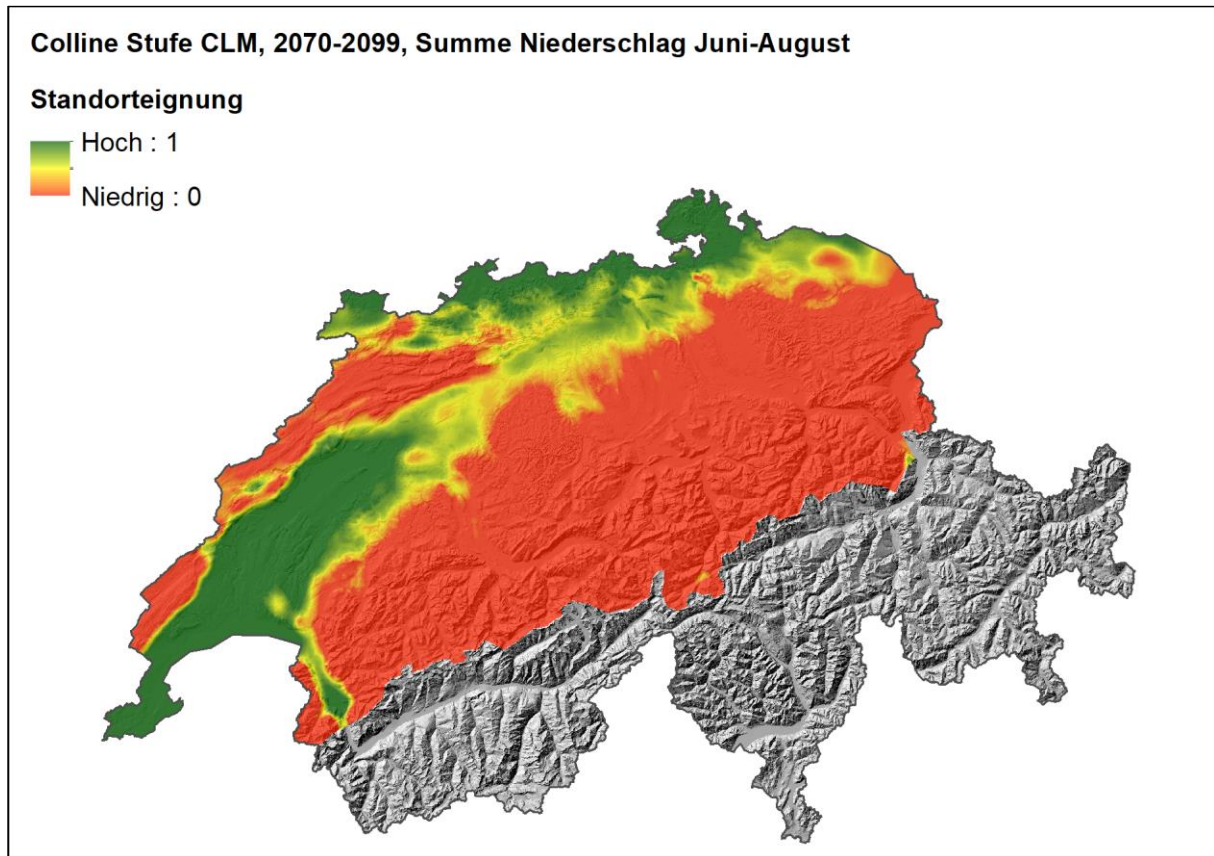


Abb. 165: Modellerte Standorteignung für die colline Stufe, Klimaparameter: Niederschlagssumme Juni- August. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.

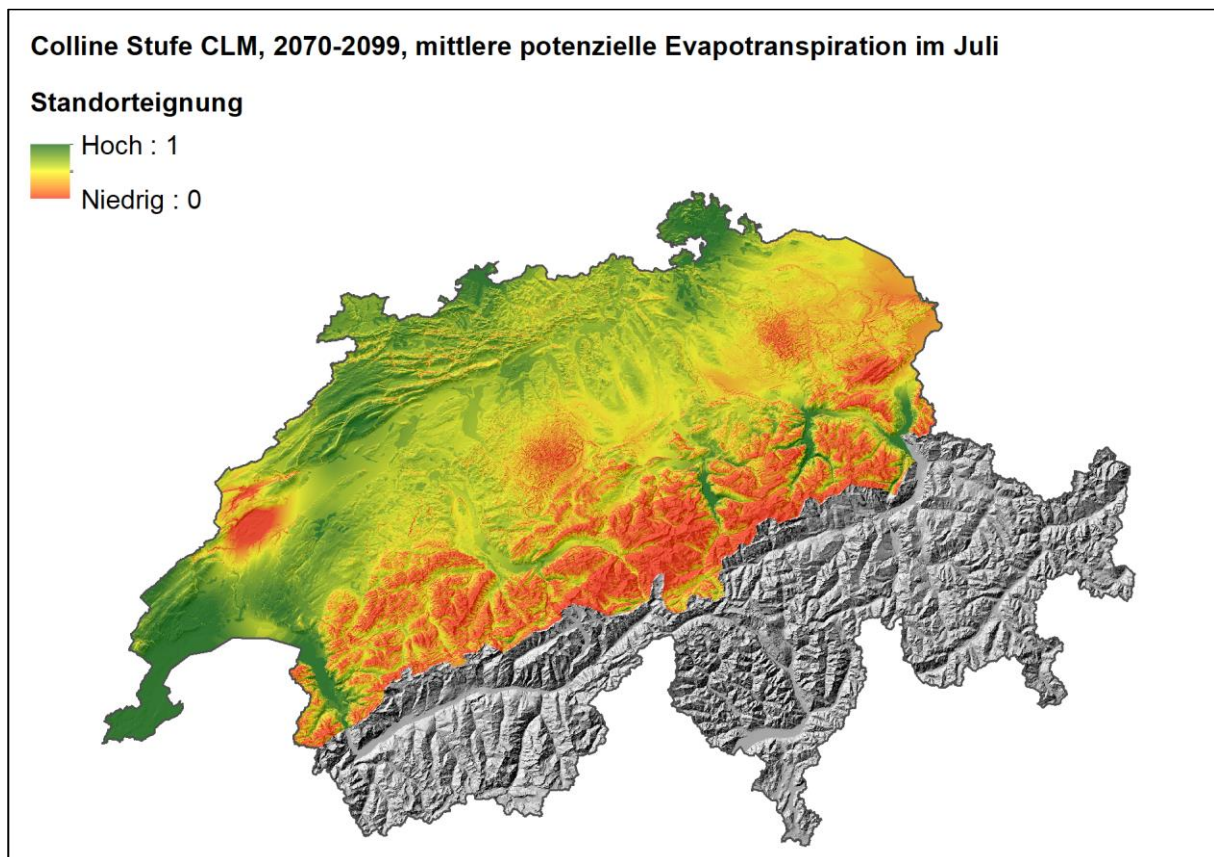


Abb. 166: Modellerte Standorteignung für die colline Stufe, Klimaparameter: Mittlere potenzielle Evapotranspiration im Juli. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.



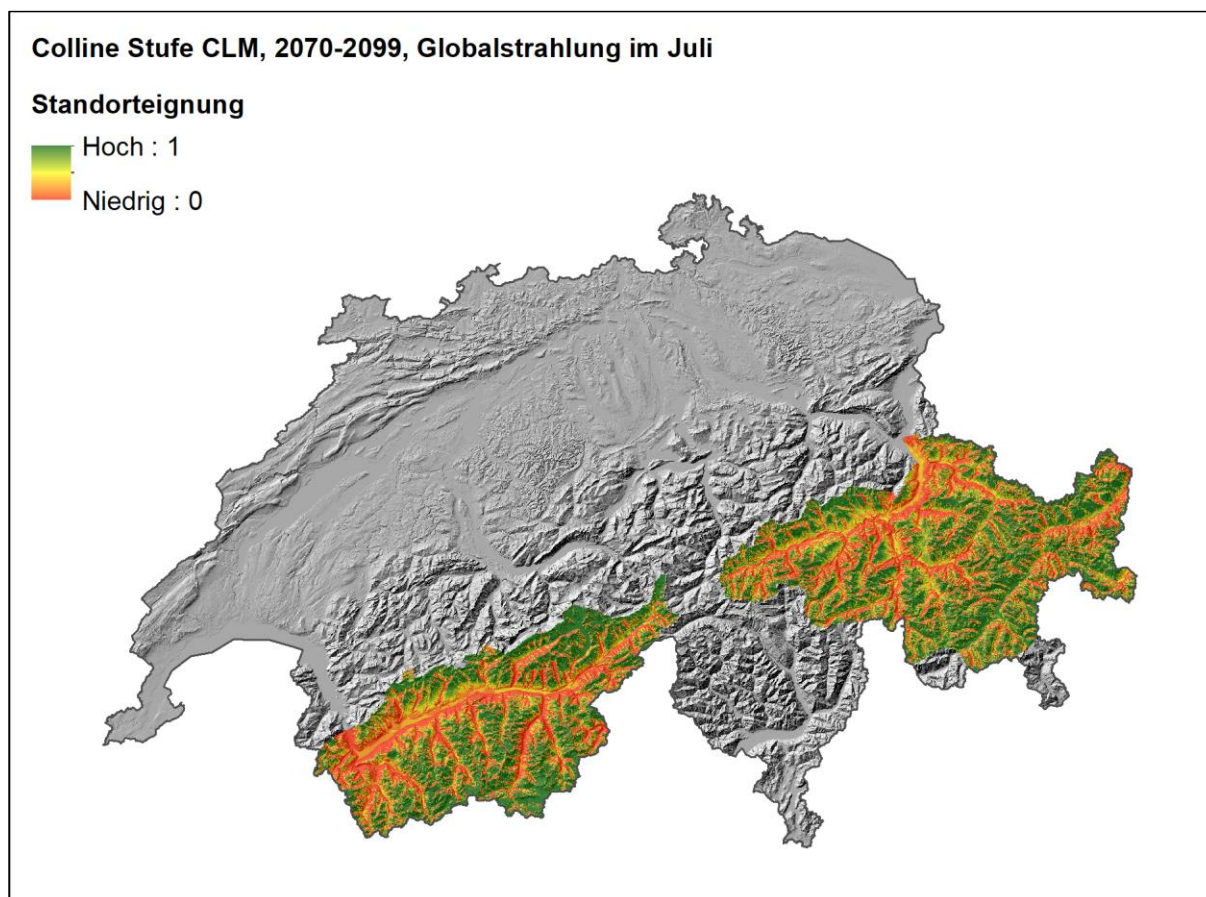


Abb. 167: Modellierte Standorteignung für die colline Stufe, Klimaparameter: Globalstrahlung im Juli. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 88.

## 4 Diskussion

«Die Frage, wie sich die Waldstandorte, konkret beschrieben als Standortstypen (Waldgesellschaften), infolge des Klimawandels verändern und welche Baumarten demnach für die Zukunft empfohlen werden können» (Frehner et al. 2018), wurde mit dem Projekt «Adaptierte Ökogramme» auf einfache, umsetzbare, auf bestehenden und akzeptierten Grundlagen aufbauend umgesetzt. «So gelang es, die heutige Gliederung der Standortstypen in der Schweiz mit dem Ökogrammansatz um die Dimension Klimawandel zu erweitern, so dass die bestehenden standortkundlichen Grundlagen auch in Zukunft nutzbar bleiben» (Frehner et al. 2018).

Verschiedene Faktoren erschweren die Modellierung von Vegetationshöhenstufen. So können Baumartenmischungen anders reagieren als Reinbestände und klimatische Einflüsse können in den verschiedenen Entwicklungsphasen der Bäume vermutlich unterschiedlich starke Wirkungen haben. Neben den Klimaeinflüssen gibt es noch andere Faktoren wie beispielsweise die Beschränkung der natürlichen Ausbreitung der Baumarten, die Konkurrenzsituation (nicht nur zwischen Baumarten, auch zwischen Baumartenverjüngung und Strauchschicht, Konkurrenzvegetation und Problempflanzen), die Bestandesdichte, die Bodenqualität, etc., die einen wichtigen Einfluss auf das Vorhandensein von Baumarten haben (Michiels 2008, Falk et al. 2011). Auch die saisonale Verteilung der Klimaereignisse ist wesentlich (z.B. Starkregen und Trockenperioden), welche im Rahmen dieses Projektes (noch) nicht modelliert werden konnte.

Für die Modellierungen wurden Klimaparameter verwendet, die einen Bezug zu Vitalität und Wachstum der Baumarten haben. Sind Vitalität und Wachstum eingeschränkt, so mindert das die Konkurrenzstärke der Baumarten und die Mischungsverhältnisse können sich verschieben. Dies wiederum ändert die Vegetationshöhenstufen. Eine Inspiration zur vorliegenden Arbeit war u.a. das Projekt «WINALP» (u.a. Reger & Ewald, 2011) und die Arbeiten aus dem Südtirol (u.a. Vacik et al. 2010).

### 4.1 Verwendete Klimamodelle und Szenarien

Für die Modellierungen wurden zwei Klimazukünfte aus dem Klimaszenario A1B (IPCC 2014) aus dem Jahre 2014 verwendet. Es wurde bewusst darauf verzichtet, die aktuellsten Szenarien zu verwenden, da diese beiden Klimazukünfte eine Vorgabe der Programmleitung waren und bisher in der Anpassungsstrategie des Bundesrates von allen Sektoren verwendet wurden, um eine Vergleichsbasis zu erhalten. «Um die Unsicherheit der Klimaentwicklung zu berücksichtigen, wurden zwei Klimazukünfte verwendet: eine mit mässigem Klimawandel (Klimamodell RegCM3, Klimaszenario A1B) sowie eine mit stärkerem Klimawandel (Klimamodell CLM, Klimaszenario A1B)», (Frehner et al. 2018). Die von uns gewählte Methode bietet eine gute Grundlage, welche in einigen Jahren mit aktuelleren Klimadaten aktualisiert werden kann.

### 4.2 Verwendete Kartengrundlagen

Bei den Temperaturkarten gibt es noch kleine Fehler im TI und im Jura aufgrund einer geringen Anzahl an Klimamessstationen. Im VS besteht zudem eine stärkere Abweichung gegenüber dem Kartenmaterial von Meteotest (Raster 250 m vs. 25 m).

Die Nährstoffeinträge (Stickstoff) wurden nicht einbezogen bei den Modellierungen. Bodenchemische Eigenschaften (Basensättigung, pH-Werte) ebenfalls nicht. Diese werden qualitativ

und indirekt über die Standortkartierungen berücksichtigt, sowie indirekt über die Angaben zur Geologie.

### 4.3 Verwendete geologische Grundlagen

Bis ca. 2030 werden die Legenden der geologischen Karten der Schweiz harmonisiert und die geologischen Karten werden vollständig im Massstab 1:25'000 vorliegen. Ein Modell mit diesen Grundlagen wird sicher zu besseren Resultaten führen und zu weniger holprigen Übergängen bei den Kartenblättern. Auch bei den harmonisierten Karten werden für die Modellierungen nur eine beschränkte Anzahl Klassen gebildet werden können, da sehr wichtig ist, dass genügend Stichproben pro Klasse, Region und Höhenstufe vorhanden sind.

In Zukunft ist es wichtig, dass wir genügend Stichproben in allen Lithologieklassen zur Verfügung haben. Z.B. ist die Stichprobenmenge der Klasse 7 (Peridotite und Serpentinite) viel zu klein, um berücksichtigt werden zu können. Zudem sind bei der Klasse 6 (Bündnerschiefer) z.T. unpassende Geologien enthalten (z.B. Lias, z.T. saure und basische Gesteine), was wiederum zu Problemen bei der Modellierung führt. In der obermontanen Stufe und den tiefer liegenden Stufen waren zudem zu wenig Stichproben vorhanden. Aus diesem Grunde wurde die Klasse 6 in diesen Höhenstufen der Klasse 1 (Sonstiges, siehe Anhang 8.1) zugeteilt. Bei der hochmontanen Stufe hingegen wurde die Klasse 6 separat berechnet. Die Klassen 5 (Granit) und 4 (Gneis) wurden ebenfalls zusammengefasst, da z.T. von einer Geologiekategorie zu wenig Stichproben pro Region oder Höhenstufe vorhanden waren. Die Klasse 1 ist zudem als Sammelkategorie weiterer geologischer Unterlagen sehr heterogen. Ein weiteres Problem der verwendeten Lithologiekarte ist, dass sie eine Klasse «übrige Flächen» mit Wert 0 aufweist, zu der unter anderem auch die Seen gehören. Die Seen sind im Vergleich mit der Landeskarte zum Teil ein wenig verschoben, was dort dazu führt, dass in Ufernähe keine Höhenstufe modelliert wurde. In der Klasse «übrige Flächen» der Lithologiekarte gibt es auch Flächen, die im Waldareal liegen, was auch dort dazu führt, dass keine Höhenstufe modelliert wurde (z.B. im Wallis auf der Südseite des Tals bei Riddes).

### 4.4 Methodenwahl

Fuzzy logic fand grosse Verbreitung im Zusammenhang mit Kontrollsystemen in Steuerungen und Geräten. Das Konzept leistet aber auch gute Dienste beim Aufbau von Expertensystemen, so beispielsweise bei der Beurteilung der Gefährdung durch Nassschneelawinen (Zischg et al. 2005). Die Fuzzy-Methode wurde inzwischen auch erfolgreich von Mani & Caduff (2012) angewandt, um die SilvaProtect-CH-Daten für die Bewertung der Sensitivität der Gefahrenprozesse im Hinblick auf die Klimaänderung auszuwerten. Das Verfahren hat den Vorteil, dass anstelle von scharfen numerischen Grenzen mit Übergangsbereichen gearbeitet werden kann (Mani & Caduff, 2012). Bei der Fuzzy-Klassifikation kann ein Wert im Bereich der Klassengrenzen zwei Klassen zugeordnet werden. Damit wirkt sich die Problematik, dass in Expertensystemen Grenzen häufig gutachterlich festgelegt werden müssen, weniger stark aus, da im Übergangsbereich die Eigenschaften beider Klassen für die weitere Analyse mitverwendet werden (Mani & Caduff, 2012). Nach Stéphane Losey ist die Methode sehr transparent und wenn die Methode etabliert und gut dokumentiert ist, kann man spätere Änderungen leichter umsetzen. Zum Beispiel sollte man in Zukunft mit einem Szenario arbeiten, welches die Niederschlagsintensität miteinbezieht.

Die erreichte Aussageschärfe der modellierten Höhenstufen für heute liegt bei über 90% im Bereich +/-30 m Höhendifferenz (Vergleich mit kantonalen Standortkartierungen und NaiS-

LFI-Flächen). Auch bei Feldkartierungen kann die Höhenstufe meist nicht punktgenau bestimmt werden, es bestehen meist längere Übergänge und Unschärfen. Die erreichte Aussageschärfe bei den Arealmodellierungen ist unterschiedlich, bei der collinen Stufe in GR ist geplant, nach neuen Felderhebungen die colline Stufe neu zu berechnen, um eine genauere Modellierung zu erhalten. Beim Buchenareal und bei den Tannen-Arealen ist eine Aussage zur Genauigkeit schwierig, da bereits die NaiS-Standortsregionen sehr grob gezeichnet wurden und eine genaue Ausscheidung der Areale im Feld aufgrund der Buchen- und Tanneninseln schwierig abzugrenzen ist.

#### 4.5 Kenntnislücken und Einschätzung der Unsicherheiten der Methode

Kenntnislücken bestehen noch in den tiefst gelegenen Standorten der Schweiz. Was folgt auf collin in der Nordschweiz? Was folgt in der Südschweiz auf collin, falls es zu trocken wird für hyperinsubrisch? Die obere Waldgrenze ist noch nicht modelliert. Ausserdem wäre die Erueirung von Arealgrenzen weiterer Baumarten sinnvoll, v.a. sogenannter Zukunftsbaumarten. Aber auch die Untersuchung von Ausbreitungsgrenzen konkurrenzierender (Hasel) und stark in Ausbreitung befindender Straucharten (Grünerle) oder Neophyten wären sinnvoll.

Wie bei den meisten waldbaulichen Entscheidungen wird immer eine gewisse Unsicherheit bestehen, ob die Ziele richtig gewählt sind.

Folgende Faktoren beeinflussen die Unsicherheit:

Faktor	Verbesserungspotential
Emissionsentwicklung der Treibhausgase	Keines - Da diese stark von der wirtschaftlichen Entwicklung abhängt, werden für längere Zeiträume immer Unsicherheiten vorhanden sein.
Klimamodelle	Es ist zu erwarten, dass diese in den nächsten Jahrzehnten besser werden und sich damit die Entwicklung des Niederschlags und der Luftfeuchte genauer vorhersagen lassen.
Modell Abris: Grenzen der Höhenstufen heute	Eine grössere Anzahl aktueller Höhenstufengrenzen pro Lithologiekategorie und Region und genauere, dem Gelände angepasste Arealgrenzen würden die Modelle verbessern.
Modell Abris: geologischer Input	Bis ca. 2030 ist zu erwarten, dass die geologischen Grundlagen der Schweiz im Massstab 1:25'000 komplett und die Legenden der einzelnen Kartenblätter harmonisiert und somit für die ganze Schweiz einheitlich verwendbar sind.

In den nächsten 10 – 20 Jahren kann zwar damit gerechnet werden, dass sich die Modelle etwas verbessern und die Unsicherheiten leicht abnehmen. Ein wesentlicher Grund für die Unsicherheiten ist die Entwicklung der Treibhausgasmissionen. Deshalb und wegen der langen Lebensdauer der Waldbäume werden die heutigen waldbaulichen Entscheide für die Zukunft immer eine gewisse Unsicherheit aufweisen.



## 5 Schlussfolgerungen

«Um die Vorgehensweise des Projektes «Adaptierte Ökogramme» weiter zu entwickeln und zu konsolidieren, wurde ein breit angelegter partizipativer Prozess mit sechs Waldtests durchgeführt. An den Waldtests und den verbundenen Anlässen nahmen insgesamt 242 Fachleute aus den nationalen und kantonalen Wald-, Jagd- und Naturschutzdiensten, den Waldeigentümer- und Holzwirtschaftsverbänden, Umweltverbänden sowie Leiter von Forstbetrieben teil. Die Waldtests boten ausgiebig Gelegenheit für Stellungnahmen und Rückmeldungen zu dem Vorgehen der Höhenstufen- und Arealverschiebungen. Ein wichtiges Fazit aus den Waldtests war: die entwickelte Methodik wurde von allen teilnehmenden Fachleuten begrüsst und konnte als konsolidiert eingestuft werden» (Frehner et al. 2018). Inzwischen wurden die erstellten Grundlagen (modellerte Höhenstufen und Areale) von vielen Kantonen und Institutionen bereits angefordert zwecks Weiterverwendung bei der kantonalen Planung oder als Grundlage für weitere Projekte.

Unsere Resultate stellen keine definitiven Ergebnisse dar. Mit einer Verbesserung der Klimaszenarien, der Harmonisierung der geologischen Grundlagen, der Verbesserung gewisser Klimakarten und einer grösseren Stichprobenmenge von heutigen Höhenstufen- und Arealgrenzen dürfte sich die Modellierung der Höhenstufen und Areale künftig noch verbessern lassen. Die Modellresultate der Höhenstufen und Areale zeigen, dass die Grenzen klimatisch definiert sind, somit sind diese Grenzen mit Hilfe der Klimazukünfte verschiebbar und sollten die Höhenstufen in der Periode 2070-2099 realitätsnah und plausibel wiedergeben und die Habitat-eignung für die typischen Baumarten der Höhenstufen / Areale abbilden. Die modellierten Höhenstufen zeigen hingegen nicht auf, wie schnell die Baumarten und die übrige Vegetation sich verschieben, ausbreiten oder verschwinden, die real vorhandene Vegetation wird somit sehr wahrscheinlich der Modellierung hinterherhinken.

Allgemein gilt, dass die Modelle eher auf mittlere Standorte ausgerichtet sind als auf Extremstandorte. In Kombination mit den Ökogrammen sollte aber bei diesem Genauigkeitsgrad eine «Vorhersage» an vielen Orten funktionieren.

Das gewählte Vorgehen war zielführend. Für das Gesamtprojekt «Adaptierte Ökogramme» haben wir das Vorgehen aus dem Vorprojekt angepasst. Als Stichproben für die Eichung der Modelle wurde anstelle der z.T. ungenauen, automatisch hergeleiteten Grenzen aus den Standortskarten der Kantone neu nur gutachtlich ausgewählte Grenzen berücksichtigt. Zwar gründen die Höhenstufenmodelle somit auf geringeren Datenmengen, aber diese weisen eine bessere Qualität auf und somit ist die Modellierung als zuverlässiger einzustufen.

Folgende Verbesserungen wären bei einer allfälligen Überarbeitung sinnvoll:

- Hintere Tallagen evtl. korrigieren bei Tälern mit eigenem Lokalklima (grössere Seitentäler, keine Wildbäche). Erste Versuche wurden bereits unternommen und das Vorgehen scheint zielführend. Das Absinken der Höhenstufengrenzen in den hinteren Tallagen kann verschiedene Ursachen haben (z.B. Gletscherwinde, hohe Windhäufigkeit wegen Passlagen, Samendruck) und kann nicht gut modelliert werden.
- Für die Ergänzung von Standortstypen, die in der Schweiz heute noch nicht vorkommen, müssten die Regionen mit künftig fehlender Höhenstufe (z.B. unter-colline Teilstufe wie im Südtirol [Vacik et al. 2010] oder planar Stufe [Ellenberg 1996]) noch eruiert werden.
- Es sollte vermehrt mit Anomalien gearbeitet werden (Abweichung vom Durchschnittswert), sobald digitale Grundlagen dazu entwickelt werden.

Es zeigt sich, dass es umso einfacher ist, Grenzen zu erklären und Parameter zu finden, je genauer der Massstab bei den Klimakarten ist und je detaillierter die Arealgrenzen oder Höhenstufengrenzen dargestellt werden. Die aus den kantonalen NaiS-nahen Kartierungen gewonnenen Höhenstufengrenzen erwiesen sich als gute Vergleichsbasis. Die Arealgrenzen nach NaiS erwiesen sich (wie vermutet) als sehr grob. Sie wären bei einer Überarbeitung besser an das Gelände anzupassen.

Die vorliegenden Resultate sind ein erster Schritt hin zur Quantifizierung von Arealgrenzen und Höhenstufengrenzen. Dabei wurden die wichtigsten klimatischen Parameter erkannt, aber es bestehen noch viele unbeantwortete Fragen bezüglich Lokalklima, Landnutzungsgeschichte, Geologie, Bodenverhältnissen und allenfalls unterschiedlichen Genotypen.

Weitere Unsicherheiten bleiben ebenfalls bestehen aufgrund der vielen Ungewissheiten. Zum Beispiel kann nicht sicher davon ausgegangen werden, dass über die Zeit überall eine allmähliche Verschiebung der typischen Vegetationszusammensetzung von Waldgesellschaften nach oben stattfinden wird. Eventuell treten auch längere Verbuschungsphasen auf oder andere, nicht vorgesehene Kombinationen von Baumarten installieren sich (evtl. auch mit Neophyten wie Götterbaum, Robinie, Essigbaum). Ebenfalls sind die Konkurrenzverhältnisse nicht bekannt, evtl. weichen Baumarten von unten nach oben aus, aber die vorherrschende Baumart von oberhalb befindet sich noch im Optimalbereich oder verharrt, so dass kein Nachrutschen möglich ist oder ein Ausfall / eine Verdrängung der Baumart zwischen zwei konkurrenzstarken Baumarten von unten und oben könnte eintreten.

Ebenfalls ist der Einfluss der Böden ungewiss, denn nicht nur das Klima ändert sich. Eine Verschiebung der Baumarten in höhere Lagen würde bedeuten, dass die Baumarten sich mit anderen Bodentypen abfinden müssen: Je höher der Standort, je höher ist der Anteil an Schuttflächen und je roher und z.T. extremer sind die Böden. So kann es sein, dass die Buche aufgrund des Klimawandels in höheren Lagen vorkommen könnte, aufgrund der vorhandenen Bodenverhältnisse aber nicht (z.B. auf sauren trockenen Böden). Auch die Böden selber verändern sich, dies aber sehr langsam und wahrscheinlich v.a. die Humusformen und die Mächtigkeit der Auflage.

## 6 Ausblick

Die modellierten Höhenstufen und Areale (heute, RegCM3, CLM für die Periode 2070-2099) wurden bereits mit den Ergebnissen von Potenzialmodellen von N. Zimmermann und H. Bugmann (Projekt «Adaptierte Ökogramme», Teil 3, Frehner et al. 2017) verglichen. Die Kartengrundlagen (RegCM3 und CLM für die Periode 2070-2099) sollen der Praxis Hinweise geben, mit welchen Veränderungen bei verschiedenen Klimazukünften zu rechnen ist. Dazu wurden im Sommer 2016 und im Sommer 2017 sogenannte Waldtests durchgeführt. Dabei wurden mit Hilfe der Höhenstufenverschiebungen Baumartenempfehlungen für konkrete Waldbestände erstellt und diskutiert.

Eine Eruierung von Regionen mit in Zukunft fehlender Höhenstufe (die modellierte colline und die hyperinsubrische Stufe weisen noch keine untere Begrenzung auf, es ist nicht sicher, ob die tiefsten, trockensten und wärmsten Lagen in Zukunft alle noch mit der collinen oder hyperinsubrischen Stufe erklärt werden können) wäre sinnvoll.

## 7 Literatur

Anandhi, A., Frei, A., Pierson, D.C., Schneiderman, E.M., Zion, M.S., Lounsbury, D., Matonse, A.H., 2011. Examination of change factor methodologies for climate change impact assessment. *Water Resources Research* 47 (3), 148 S.

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

Campell, E., Kuoch, R., Richard, F. & Trepp, W., 1955. Ertragreiche Nadelwaldgesellschaften im Gebiet der schweizerischen Alpen unter besonderer Berücksichtigung Graubündens. Beiheft 5 zum «Bündnerwald», Zeitschrift des Bündnerischen Forstvereins und der SELVA.

Ceschi, I., 2006. Carte Principali tipologie forestali del Canton Ticino. Repubblica e Cantone Ticino; Piano direttore.

Choat, B., Jansen, S., Brodribb, T.J., Cochard, H., Delzon, S., Bhaskar, R., Bucci, S.J., Feild, T.F., Gleason, S.M., Hacke, U.G., Jacobsen, A.L., Lens, F., Maherali, H., Martínez-Vilalta, J., Mayr, S., Mencuccini, M., Mitchell, P.J., Nardini, A., Pittermann, J., Pratt, R.B., Sperry, J.S., Westoby, M., Wright, I.J. & Zanne, A. E., 2012. Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature* 491: 752–755.

Ellenberg, H., 1996. Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht. 5. Aufl., Ulmer, Stuttgart, 1095 S.

Falk, W. & Mellert, K.H., 2011. Species distribution models as a tool for forest management planning under climate change: risk evaluation of *Abies alba* in Bavaria. *Journal of Vegetation Science* 22(4): 621-634.

Frehner, M., Wasser, B. & Schwitter, R., 2005/2009. Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion, Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 564 S.

Frehner, M., Brang, P., Kaufmann, G. & Küchli, C., 2018. Standortkundliche Grundlagen für die Waldbewirtschaftung im Klimawandel. WSL Ber. 66: 43 S.

Frehner, M. & Zürcher-Gasser, N. 2019. Schlussbericht des Projektes «Adaptierte Ökogramme» im Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel», Teil 5: Herleitung von regional optimierten Baumartenempfehlungen. Sargans, Forstingenieurbüro Frehner und Rabijs, Galdola AG, 24 Seiten.

Frey, H.-U., 2003. Die Verbreitung und die waldbauliche Bedeutung der Weisstanne in den Zwischenalpen. Ein Beitrag für die waldbauliche Praxis. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen: 154, 3-4: 90-98.

Gutermann, Th., Dürr, B., Richner, H., & Bader, S., 2012. Föhnklimatologie Altdorf: die lange Reihe (1864-2008) und ihre Weiterführung, Vergleich mit anderen Stationen. Arbeitsbericht MeteoSchweiz, 241: 53 S.

HADES, <http://hydrologischeratlas.ch>

Hörsch, B., 2001. Zusammenhang zwischen Vegetation und Relief in alpinen Einzugsgebieten des Wallis (Schweiz). Ein multiskaliger GIS- und Fernerkundungsansatz. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn.



- Huber, B., Zischg, A., Frehner, M., Carraro, G. & Burnand, J., 2015. Mit welchen Klimaparameter kann man Grenzen plausibel erklären, die in NaiS (Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald) verwendet werden, um Ökogramme auszuwählen? Schlussbericht. Chur, Abenis AG. 149 S.
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 S.
- Klötzli, F., Dietl, W., Marti, K., Schubiger-Bossard, C. & Walther, G.-R., 2010. Vegetation Europas: Das Offenland im vegetationskundlich-ökologischen Überblick. 1. Aufl., Ott Vlg., 1190 S.
- Klosterhuber, R. 2016. Substratklassifikationsschema WLM (Stand 2016).
- Lingg, W., 1986. Dendroökologische Studien an Nadelbäumen im alpinen Trockental Wallis (Schweiz). Bericht 287, Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Birmensdorf.
- Leuzinger, S., 2009. Synthesebericht Wald und globaler Wandel: Stand der Kenntnisse zu den Auswirkungen des globalen Wandels auf Schweizer Wälder. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.
- Mani, P. & Caduff, U., 2015. Klimasensitivität Naturgefahren, Teil 1: Methodenbericht. Geo7, Bern. Auftraggeber BAFU, Bern. 105 S.
- Manthey, M., Leuschner, C. & Härdtle, W., 2007. Buchenwälder und Klimawandel. Natur und Landschaft 82: 441-445.
- Michiels, H.G., 2008. Wald und Klima. Dynamisierte Einstufung der Baumarteneignung als Grundlage für die waldbauliche Planung. 48-51 S.
- Reger, B. & Ewald, K., 2011. Eine neue Planungshilfe für die Forstpraxis: Waldtypenkarte Bayerische Alpen. AFZ-Der Wald, Nr. 24: 14-16.
- Remund, J. & Augustin, S., 2015. Zustand und Entwicklung der Trockenheit in Schweizer Wäldern. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 166, 6: 352-360.
- Schwarb et al. 2001. Hydrologischer Atlas der Schweiz.
- Vacik, H., de Jel, S., Ruprecht, H. & Gruber, G., 2010. Waldtypisierung Südtirol. Band 1 und 2. Waldtypen, Wuchsgebiete, Bestimmungsschlüssel. Autonome Provinz Bozen-Südtirol. 300 S.
- Volken, D., 2008. Mesoklimatische Temperaturverteilung im Rhone- und Vispental. Diss., Naturwissenschaften, Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Nr. 17705.
- Walther, G.R., 2001. Laurophyllisation – a sign of a changing climate? Volume 35. Kluwer Academic, Dordrecht, tasks for vegetation science edition.
- Zadeh, L. A., 1978. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. Fuzzy Sets Syst., 1: 3-28.
- Z'graggen, L., 2001. Strahlungsbilanz der Schweiz. Diss. Naturwissenschaften ETH Zürich, Nr. 14158, 196 S.
- Zischg, A., Fuchs, S., Keiler, M. & Meissl, G., 2005. Modelling the system behaviour of wet snow avalanches using an expert system approach for risk management on high alpine traffic roads. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 5: 821-832.

## 8 Anhang

### 8.1 Einteilung der Lithologien in die berücksichtigten Lithologieklassen (Grundlage: Lithologie-Karte der Schweiz, [www.atlasderschweiz.ch](http://www.atlasderschweiz.ch))

Die 55 Lithologieklassen (Spalten «Klasse Nr.» und «Lithologiekategorie») und die Substratgruppen («Substrat Nr.» und «Substratgruppe») wurden aus der Lithologie-Karte der Schweiz, [www.atlasderschweiz.ch](http://www.atlasderschweiz.ch), übernommen. Bei den Spalten «litho15g» und «litho7g» wurden die 55 Lithologie-Klassen in 15, beziehungsweise 7 Klassen ähnlicher Verwitterungscharakteristik zusammengefasst. Anmerkung: verw. = verwittert.

Klasse Nr.	Substrat Nr.	Substratgruppe	Lithologiekategorie	litho15gt	litho15 Nr.	litho7g	litho7 Nr.
1	3	Glaziale Lehmsande	Molasse, sandsteinreich	Molasse	1	Sonstiges	1
2	3	Glaziale Lehmsande	Moränenmaterial	Moränenmaterial	2	Sonstiges	1
3	1	Sandsubstrate	Sande/Kiese	Sandsubstrate	3	Sonstiges	1
4	7	Grobklastische Materialien	Schotter	Grobklastische Materialien	4	Sonstiges	1
5	5	Festgestein, tonig verw.	Subalpine Molasse, mergelreich	Molasse	1	Sonstiges	1
6	5	Festgestein, tonig verw.	Tone	Festgestein, tonig verw.	5	Sonstiges	1
7	5	Festgestein, tonig verw.	Boluston	Festgestein, tonig verw.	5	Sonstiges	1
8	5	Festgestein, tonig verw.	Molasse, mergelreich	Molasse	1	Sonstiges	1
9	1	Sandsubstrate	Muschelsandstein	Festgestein, tonig verw.	5	Sonstiges	1
10	7	Grobklastische Materialien	Muschelbrekzie	Grobklastische Materialien	4	Sonstiges	1
11	5	Festgestein, tonig verw.	Opalinuston, Anhydritgruppe	Festgestein, tonig verw.	5	Sonstiges	1
12	2	Löss	Silte, Löss	Löss	6	Sonstiges	1
13	5	Festgestein, tonig verw.	Gips	Festgestein, tonig verw.	5	Sonstiges	1
14	5	Festgestein, tonig verw.	Subalpine Molasse, Ostschweiz	Molasse	1	Sonstiges	1
15	5	Festgestein, tonig verw.	Kalkstein allgemein	Kalke und Dolomite	7	Kalke und Dolomite	2
16	5	Festgestein, tonig verw.	Kalkstein mit bedeutenden Mergellagen	Kalke und Dolomite	7	Kalke und Dolomite	2
17	5	Festgestein, tonig verw.	Dolomit	Kalke und Dolomite	7	Kalke und Dolomite	2
18	7	Grobklastische Materialien	Kieselkalk	Grobklastische Materialien	4	Sonstiges	1
19	1	Sandsubstrate	Grünsandstein	Sandsubstrate	3	Flysch	3
20	5	Festgestein, tonig verw.	Kalkstein mit Dolomiteinlagen	Kalke und Dolomite	7	Kalke und Dolomite	2
21	1	Sandsubstrate	Perm/Karbon, grobkörnig	Sandsubstrate	3	Sonstiges	1
22	7	Grobklastische Materialien	Polygene Kalkbrekzie	Grobklastische Materialien	4	Sonstiges	1
23	4	Brackisch/marine Ablagerungen	Flysch, sandsteinreich	Flysch	8	Flysch	3
24	4	Brackisch/marine Ablagerungen	Flysch, allgemein	Flysch	8	Flysch	3
25	4	Brackisch/marine Ablagerungen	Flysch mit vulkanischen Tuffsandsteinen	Flysch	8	Flysch	3
26	7	Grobklastische Materialien	Molasse, Konglomeratreich	Molasse	1	Sonstiges	1
27	7	Grobklastische Materialien	Molasse, konglomerat bis sandsteinreich	Molasse	1	Sonstiges	1
28	5	Festgestein, tonig verw.	Paläoz. Tonschiefer	Molasse	1	Sonstiges	1
29	7	Grobklastische	Rauwacke	Grobklastische	4	Sonstiges	1

Klasse Nr.	Substrat Nr.	Substratgruppe	Lithologiekategorie	litho15gt	litho15 Nr.	litho7g	litho7 Nr.
		Materialien		Materialien			
30	7	Grobklastische Materialien	Tonschiefer, Rauwacke	Grobklastische Materialien	4	Sonstiges	1
31	7	Grobklastische Materialien	Blöcke/Gerölle (Bergsturmateriale)	Blockschutt	9	Sonstiges	1
32	7	Grobklastische Materialien	Murgang/Bachablagerungen	Grobklastische Materialien	4	Sonstiges	1
33	6	Festgestein, sandig verw.	Kalkmarmor, Kalksilikate	Festgestein, sandig verw.	10	Sonstiges	1
33	6	Festgestein, sandig verw.	Gneis, feldspatreich	harte Gneise	11	Gneise	4
34	6	Festgestein, sandig verw.	Gneis, feldspatreich, stark gegliedert	harte Gneise	11	Gneise	4
36	6	Festgestein, sandig verw.	Serizit-Chlorit-Schiefer, Gneis	weiche Gneise	12	Gneise	4
37	6	Festgestein, sandig verw.	Zweiglimmergneis, Biotitgneis	weiche Gneise	12	Gneise	4
38	6	Festgestein, sandig verw.	Glimmerschiefer mit Amphibolit	weiche Gneise	12	Gneise	4
39	6	Festgestein, sandig verw.	Granit	Granit	13	Granite	5
40	6	Festgestein, sandig verw.	Granit, schwach geschiefert	Granit	13	Granite	5
41	6	Festgestein, sandig verw.	Zweiglimmergneis	weiche Gneise	12	Gneise	4
42	6	Festgestein, sandig verw.	Glimmerschiefer, allgemein	weiche Gneise	12	Gneise	4
43	6	Festgestein, sandig verw.	Biotitgneis, Hornfels	weiche Gneise	12	Gneise	4
44	6	Festgestein, sandig verw.	Zweiglimmergneis mit Phenit	harte Gneise	11	Gneise	4
45	5	Festgestein, tonig verw.	Basische Gesteine (Gabbro)	Diorite und Amphibolite	14	Gneise	4
46	5	Festgestein, tonig verw.	Metabasische Gesteine	Diorite und Amphibolite	14	Gneise	4
47	5	Festgestein, tonig verw.	Peridotit	Festgestein, tonig verw.	5	Gift	7
48	5	Festgestein, tonig verw.	Bündnerschiefer, metamorph	Bündnerschiefer	15	Bündnerschiefer	6
49	5	Festgestein, tonig verw.	Bündnerschiefer, kalkig	Bündnerschiefer	15	Bündnerschiefer	6
50	5	Festgestein, tonig verw.	Bündnerschiefer, Kalksandsteine	Bündnerschiefer	15	Bündnerschiefer	6
51	6	Festgestein, sandig verw.	Quarzphillite	Festgestein, sandig verw.	10	Sonstiges	1
52	6	Festgestein, sandig verw.	Quarzit	Festgestein, sandig verw.	10	Granite	5
53	6	Festgestein, sandig verw.	Amphibolit (in Diorit, ..)	Diorite und Amphibolite	14	Gneise	4
54	6	Festgestein, sandig verw.	Porphyrit	Festgestein, sandig verw.	10	Granite	5
55	5	Festgestein, tonig verw.	Serpentinit	Festgestein, sandig verw.	10	Gift	7

## 8.2 Höhenstufen nach NaiS (Definitionen aus Frehner et al. 2005/2009 neu überarbeitet, noch unpubliziert)

**Legende:** In Klammern = selten; Zahlenwerte = Höhe ü. M.; Abkürzungen der Standortsregionen: J = Jura, M = Mittelland, 1 = Nördliche Randalpen, 2a = Nördliche Zwischenalpen mit Buchen, 2b = Nördliche Zwischenalpen ohne Buchen, 3 = Kontinentale Hochalpen, 4 = Südliche Zwischenalpen, 5 = Südliche Randalpen; N = Nord, S = Süd.

	collin	submontan		untermontan		obermontan		hochmontan		subalpin		obersubalpin		
			Mittlere Stufengrenze		Mittlere Stufengrenze		Mittlere Stufengrenze		Mittlere Stufengrenze		Mittlere Stufengrenze			
J	Unterhalb 300	300 bis 700 (800)	650	AG, BL, SO, JU: (400) 650 bis 1000 (1200) VD: (500) 700 bis 1100 (1200)	900	AG, BL, SO, JU: (800) 900 bis 1400 (1500) VD: (900) 1100 bis 1400 (1500)	Mind. 1350, gegen oben so weit, wie die Buche in der Oberschicht ist	1300 bis 1600	1550	Über 1500 bis 1600				
M	Unterhalb 350	350 bis 700 (800)		(500) 600 bis 1000 (1200)		Laubholzfördernd: (1000) 1100 bis 1400 (1500) Nadelholzfördernd: (800) 850 bis 1300 (1400)		Über (1200) 1300						
1		350 bis 700 (800)		(400) 700 bis 1000 (1200)				(1200) 1300 bis 1600 (1700)	1600	(1500) 1600 bis 1800 (1900)				
2a	Collin: unterhalb 500 bis 1000		750	(500) 700 bis 900 (1000)		Laubholzfördernd: 1000 bis 1600; Nadelholzfördernd: 800 bis 1400		(800) 1200 bis 1600 (1700)	1650	(1500) 1600 bis 1900 (2000)	1850	Über (1800) 1900		
2b	Collin: unterhalb 700 bis 1000 (1200) Grosse Unterschiede zwischen Nord- und Südexposition						N: 750 S: 1000	(600) 1000 bis 1600 (1700)	1650	(1500) 1600 bis 1900 (2000)	1850	Über (1800) 1900		
3								600 bis 1600 (1700)	1650	(1500) 1600 bis 1900 (2000)	1900	Über (1800) 2000		
4	Collin: (300) 400 bis 900 (1000) Grosse Unterschiede zwischen Nord- und Südexposition								(900) 1000 bis 1600 (1700)	1650	(1500) 1600 bis 1900 (2000)		(1800) 1900 bis 2100	
5	Collin: (300) 400 bis 1000 (1100), kleine Unterschiede zwischen Nord- + Südexp.		Untermontan und obermontan (1000) 1100 bis 1600 (1700)										(1500) 1600 bis 1900 (2000)	



### 8.3 Fehlerliste Höhenstufenkarte heute

Ergebnisse der Kontrolle der Höhenstufenmodellierungen durch M. Frehner, G. Carraro, J. Burnand und H.-U. Frey (Erläuterungen siehe Kap. 3.3.2).

X-Koord.	Y-Koord.	Lokalname	Kanton	Bemerkungen
571500	208800	Jolimont/Erlach	BE	Grenzbereich zwischen submontan und untermontan. Obermontan ist nicht plausibel. Geologie einheitlich.
738500	155900	Rheinwald	GR	Subalpin im Talboden zu tief. Lithoklasse Sonstiges und Bündnerschiefer. Kältesee.
761600	178650	Lenzerheide	GR	Subalpin im Talboden zu tief. Lithoklasse Sonstiges und Flysch. Kältesee.
782000	185500	Davos	GR	Subalpin im Talboden zu tief. Lithoklasse Sonstiges, Kalk und Gneise. Kältesee.
823500	167000	Val Mustair	GR	Subalpin im Talboden östlich und am südexponierten Hang zu tief. Geologie einheitlich. Kältesee.
756490	244100	Eichberg	SG	Obergrenze von submontan und untermontan auf Lithoklasse Kalk 100 - 150 m zu hoch, auf Lithoklasse Sonstiges 50 - 100 m zu hoch. Auf map.geo.admin.ch GeoCover-Vektordaten Rutschung, daneben Senonmergel (Leistmergel).
756400	247280	Widentobel	SG	Obergrenze von untermontan und submontan auf Lithoklasse Sonstiges 50 - 100 m zu hoch. Auf Geocover Rutschung und Oberes Stampien (Chattien, USM I).
763520	257740	Walzenhausen	SG	Obergrenze obermontan ca. 100 m zu hoch modelliert.
720100	238880	Tweralpispitz	SG	Am steilen südexponierten Hang Obergrenze von untermontan etwa 100 m zu tief. Lithoklasse Sonstiges, nach Geocover OSM II: Konglomerat, Sand- und Siltstein, Mergel (Hörnli-Schüttung).
694000	180500	Silenen	UR	Obergrenze von submontan, untermontan und obermontan zu tief modelliert. Lithoklasse Gneise. Nach Geocover Sericit- und Sericit-Chloritschiefer bzw. -gneise und Erstfelder Gneiskomplex.
666500	150550	Goms	VS	Subalpin im Talboden zu tief. Kältesee.
637038	125508	Eyholzerwald	VS	Hochmontan zu hoch auf Lithoklasse Sonstiges. Nach Geocover Hangschuttkegel und Mikroaugiger, feldspatischer Zweiglimmergneis.
585574	124318	Lodze	VS	Obermontan zu hoch auf Lithoklasse Flysch sowie Sonstiges (kleinflächig). Nach Geocover Calcaire à Nummulites, Hauterivien, Flysch (kleinflächig), Schistes morderés: Bajocien, Hangschutt, Valanginien calcaire.
691213	290688	nördl. Teil SH	SH	Im Modell deutlich mehr obermontan als im Feld.
705163	284563	nördl. Teil SH	SH	Im Modell deutlich mehr obermontan als im Feld.
700963	284813	Buch	SH	Im Modell deutlich mehr obermontan als im Feld.
729798	137415	Calancatal	GR	Buche etwas zu weit ins Tal modelliert; kommen im Feld nur bis Arvigo vor.
693198	141407	Lavizzaratal	TI	Buche etwas zu wenig weit ins Tal modelliert.

X-Koord.	Y-Koord.	Lokalname	Kanton	Bemerkungen
687507	135535	Bavona-Tal	TI	Hochmontan zu tief modelliert (Buche zu wenig grossflächig modelliert).
680247	125532	Val di Bosco	TI	Unter-/Obermontan (Bu) zu weit ins Tal modelliert.
718314	97648	Lugano	TI	Hyperinsubrisch zu wenig grossflächig modelliert.
706436	114734	Locarno	TI	Hyperinsubrisch zu wenig grossflächig modelliert.
574090	110574	Südosthang Rhoneknie	VS	Fehlende colline Stufe am Südosthang zwischen Martigny und Ardon.
652796	138651	Fiesch	VS	Colline Stufe reicht zu weit Richtung Fiesch.
587920	115586	Riddes	VS	Fehlende colline Stufe am Nordwesthang zwischen Saxon und Sierre.
753325	166869	Schams	GR	Colline Stufe zu weit ins Domleschg/Schams modelliert.
766065	170322	Albulatal	GR	Colline Stufe zu weit ins Albulatal modelliert.
746618	179291	Safien/Surselva	GR	Colline Stufe zu grossflächig/zu weit in die Täler modelliert.
759953	208303	Bündner Herrschaft	GR	Fehlende colline Stufe bei Modell.
786424	193856	Prättigau	GR	Colline Stufe zu grossflächig modelliert.
829662	195562	Strada-Martina	GR	Es sollte keine colline Stufe vorkommen - sehr kalte Winter.
831012	168287	Müstair	GR	Es sollte keine colline Stufe vorkommen.

## 8.4 Abbildungen des Buchenareals der Klimazukunft RegCM3

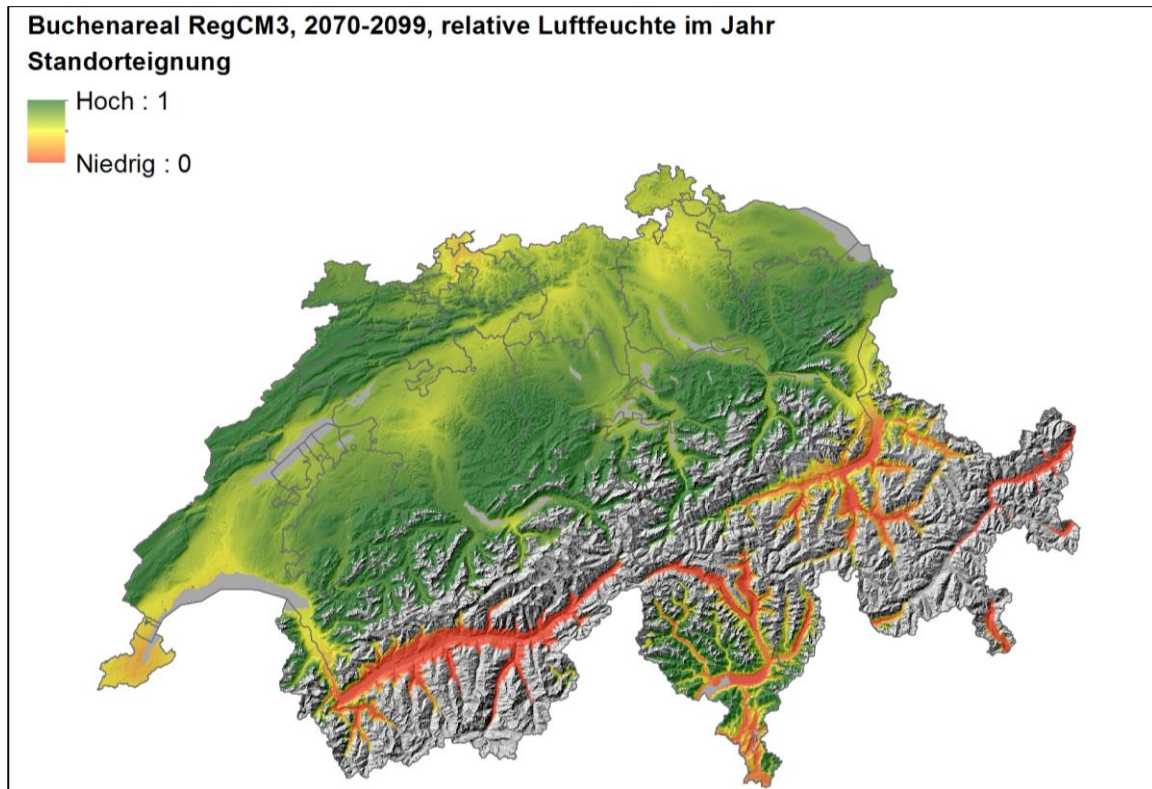


Abb. 168: Modellerte Standorteignung für das Buchenareal, Klimaparameter: Mittlere relative Luftfeuchtigkeit um 13:30 Uhr im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Werte um 1 bedeuten eine hohe Standorteignung für das modellierte Areal aus der Sicht des ausgewählten Klimaparameters. Werte um 0 bedeuten eine geringe Standorteignung aus der Sicht des ausgewählten Klimaparameters.

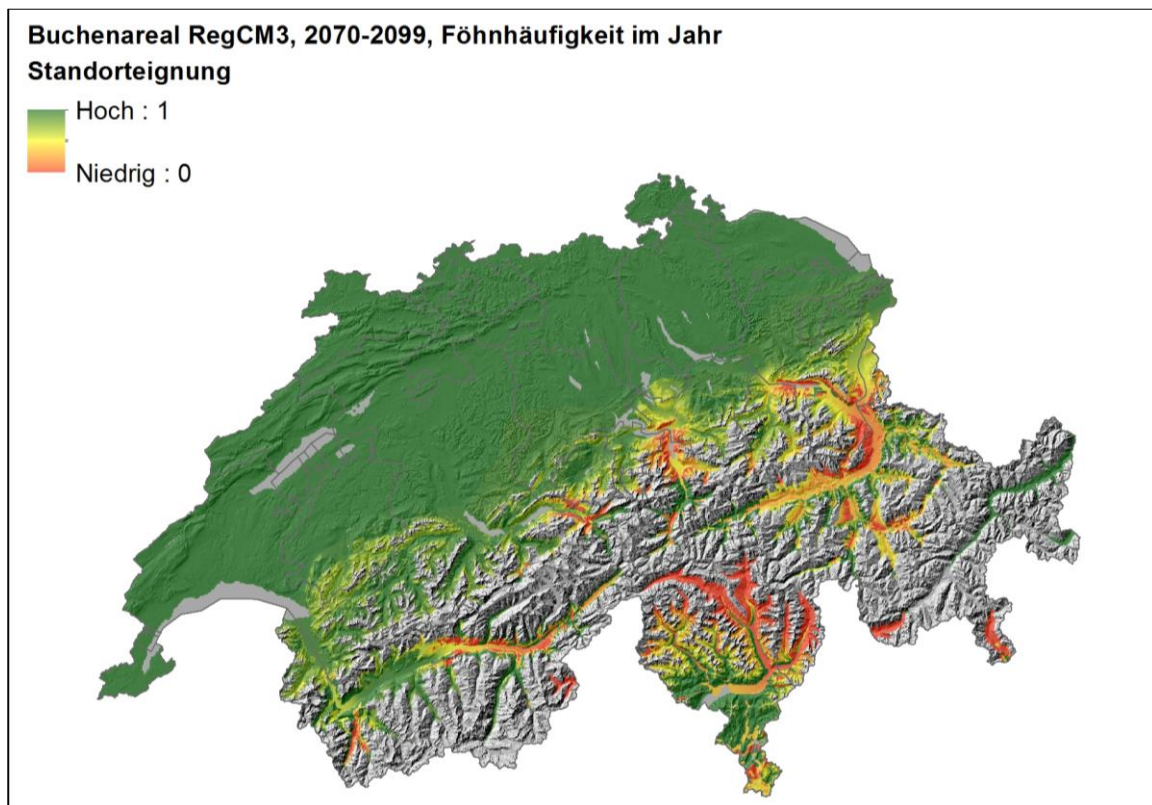


Abb. 169: Modellerte Standorteignung für das Buchenareal, Klimaparameter: Föhnhäufigkeit im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

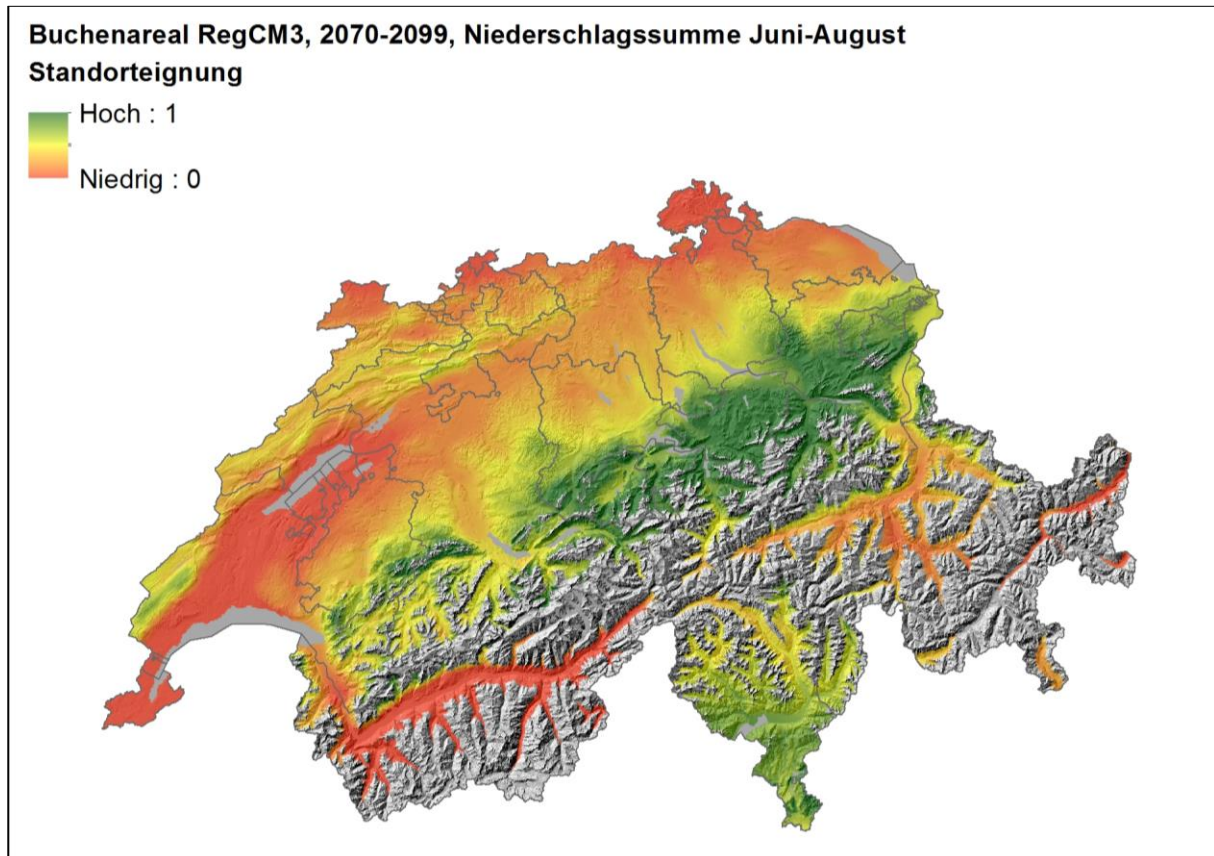


Abb. 170: Modellerte Standorteignung für das Buchenareal, Klimaparameter: Niederschlagssumme Juni - August. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

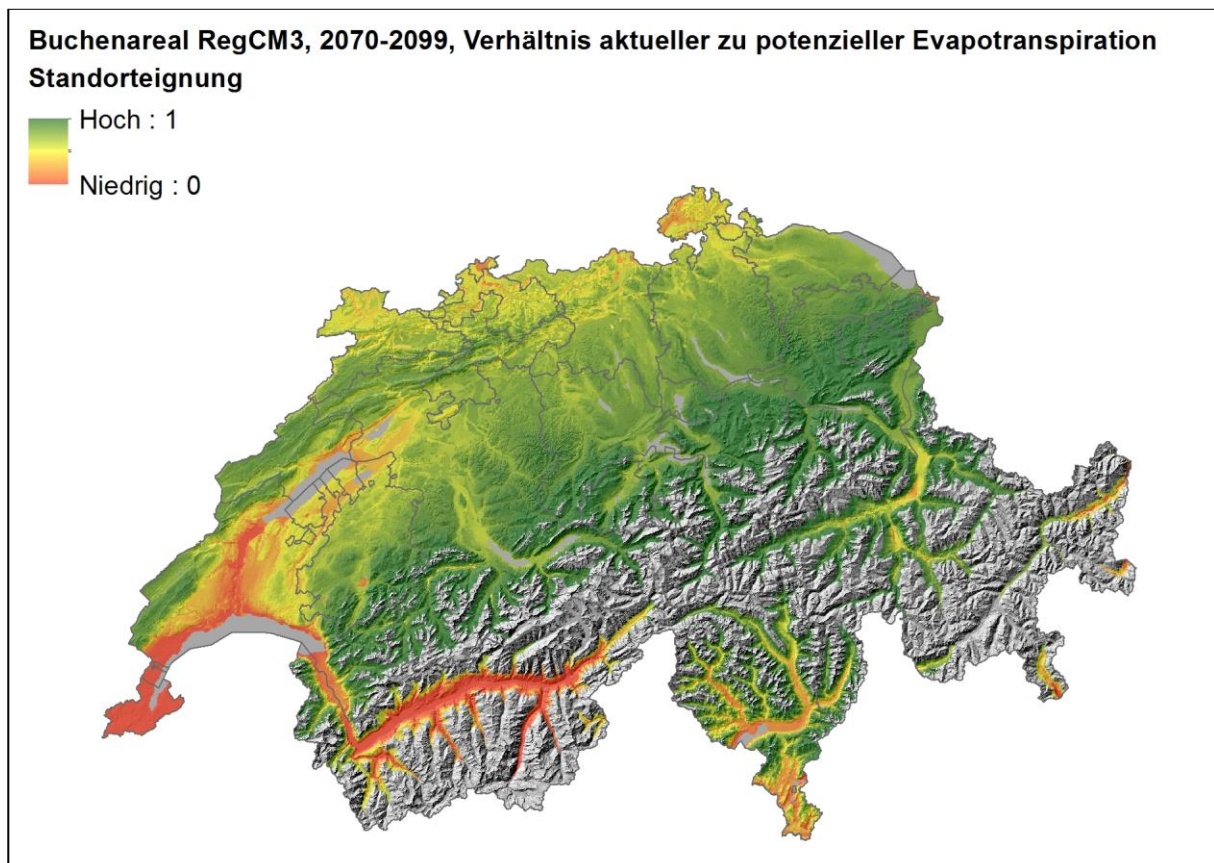


Abb. 171: Modellerte Standorteignung für das das Buchenareal, Klimaparameter: Verhältnis aktueller zu potenzieller Evapotranspiration. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.



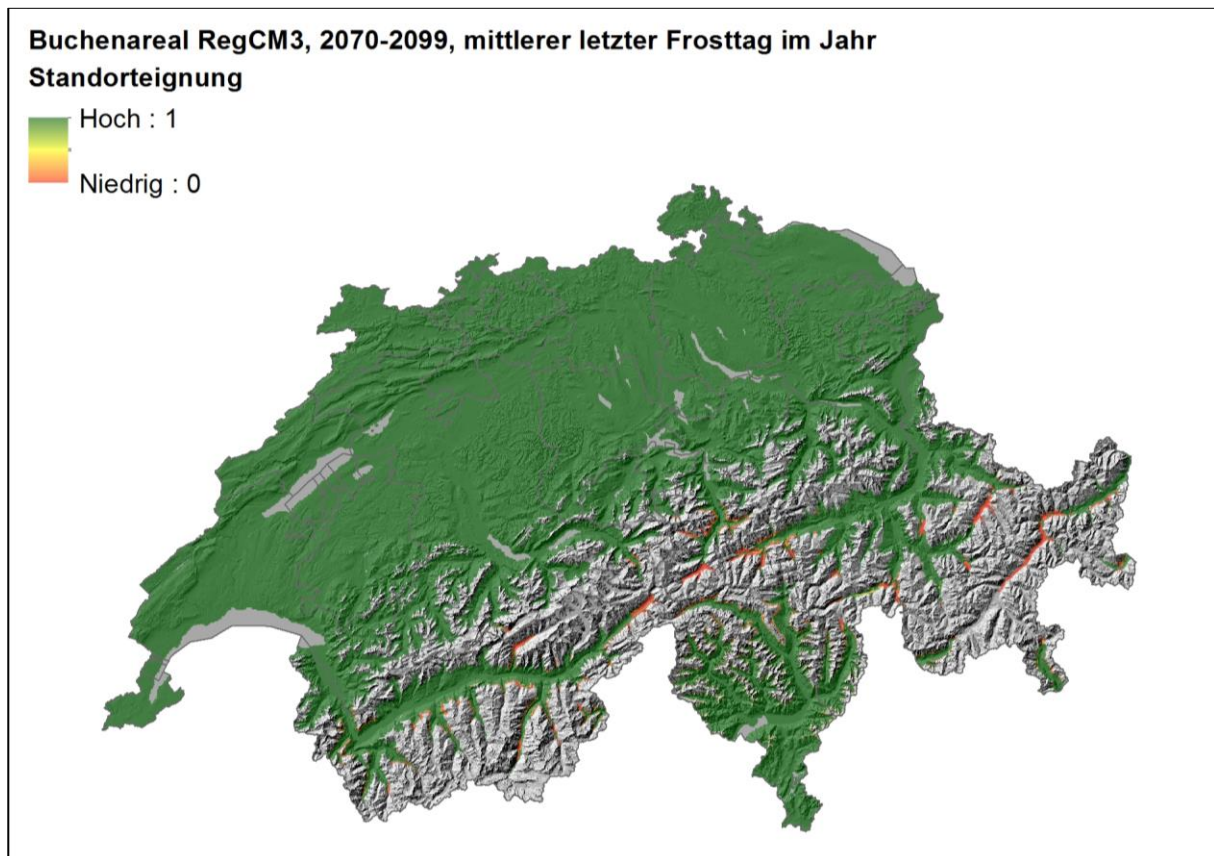


Abb. 172: Modellierte Standorteignung für das das Buchenareal, Klimaparameter: Mittlerer letzter Frosttag im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

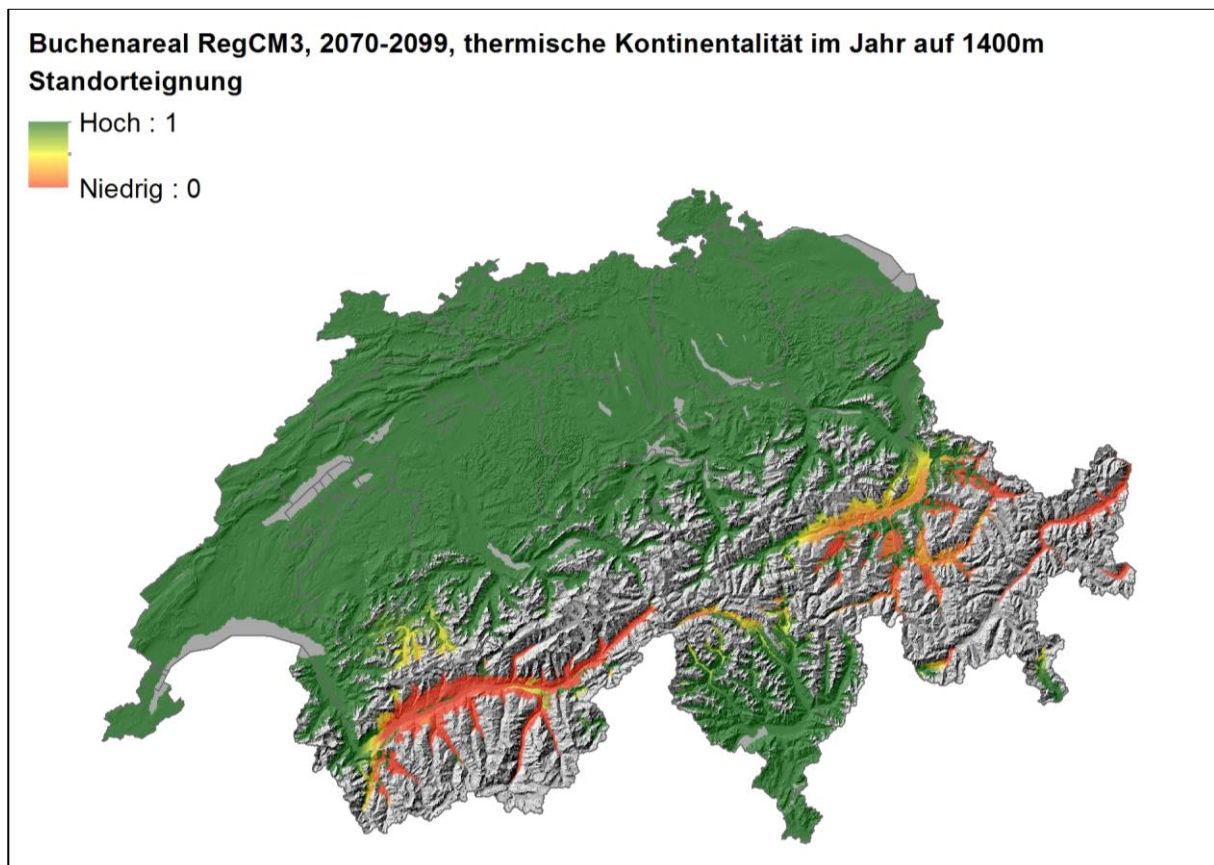


Abb. 173: Modellierte Standorteignung für das das Buchenareal, Klimaparameter: Thermische Kontinentalität auf 1400 m ü. M. im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

## 8.5 Abbildungen des Buchenareals der Klimazukunft CLM

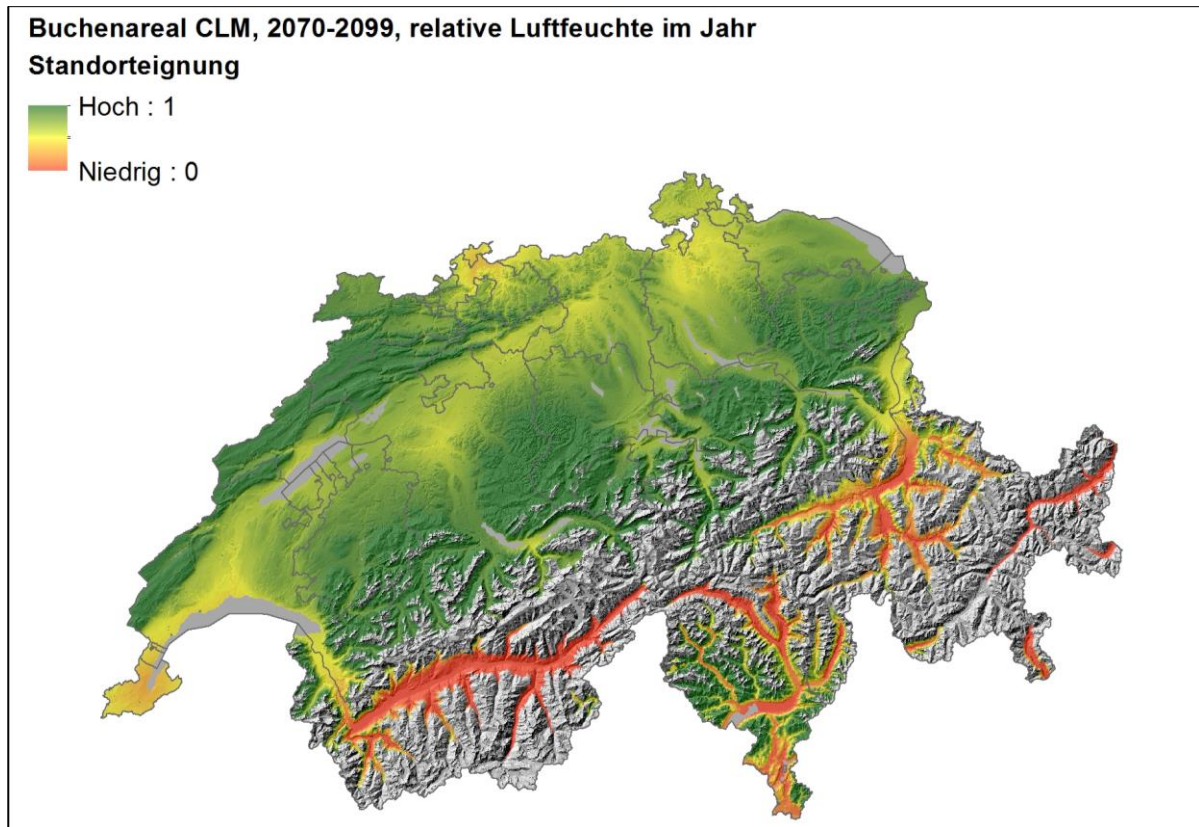


Abb. 174: Modellierter Standorteignung für das Buchenareal, Klimaparameter: Mittlere relative Luftfeuchtigkeit um 13:30 Uhr im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen Abb. 168.

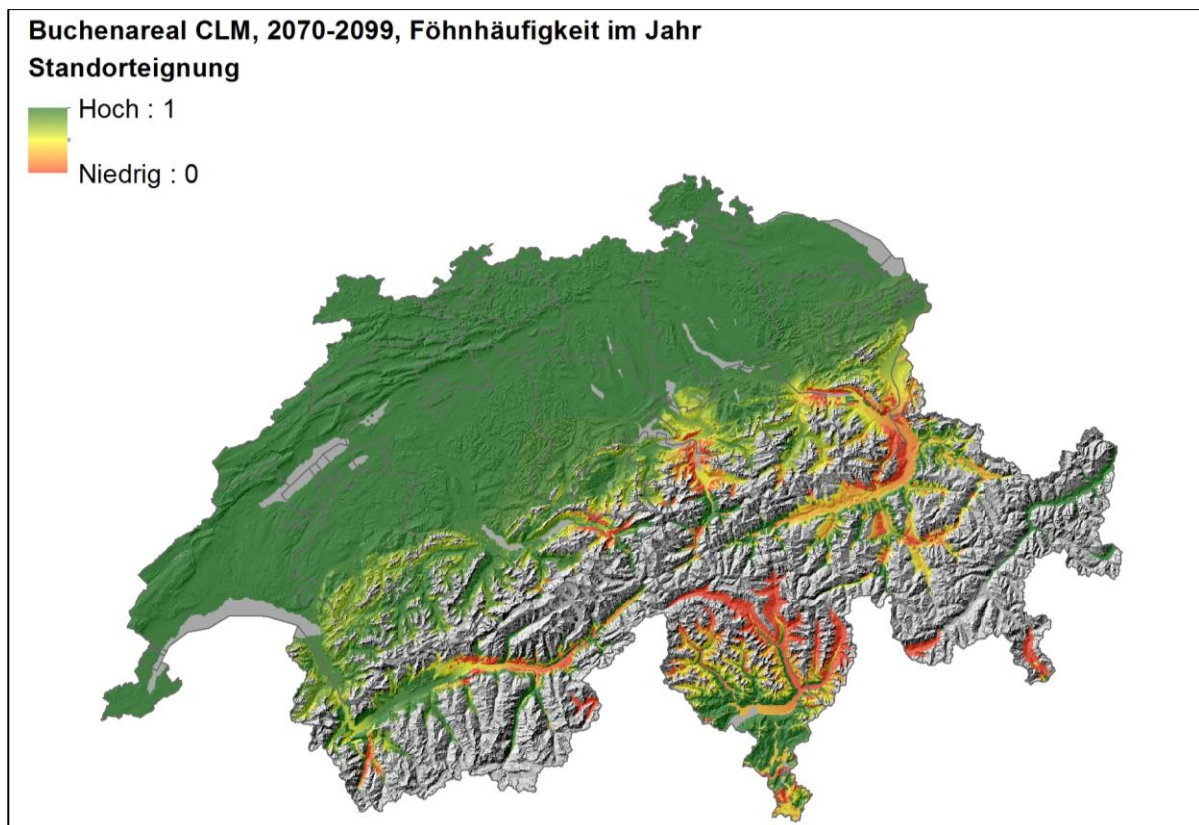


Abb. 175: Modellierter Standorteignung für das Buchenareal, Klimaparameter: Föhnhäufigkeit im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.



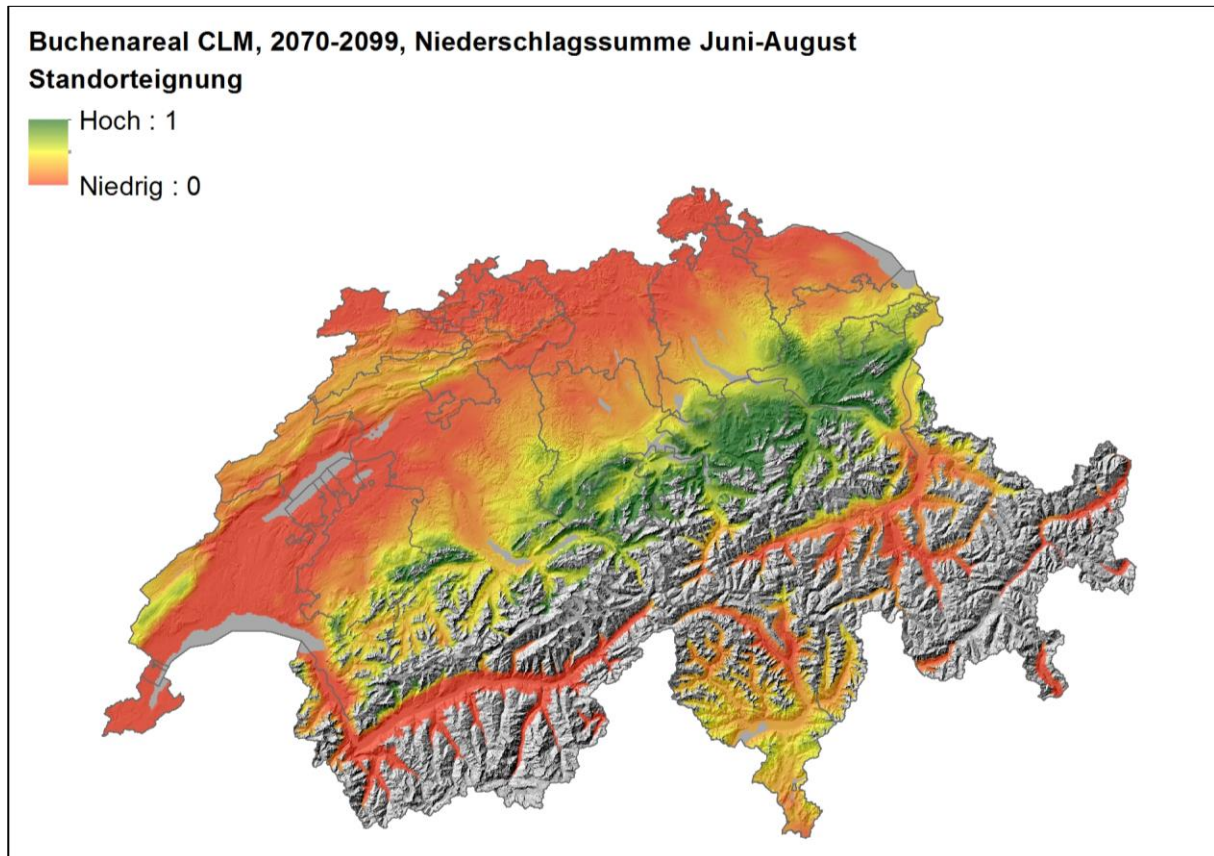


Abb. 176: Modellerte Standorteignung für das Buchenareal, Klimaparameter: Niederschlagssumme Juni - August. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

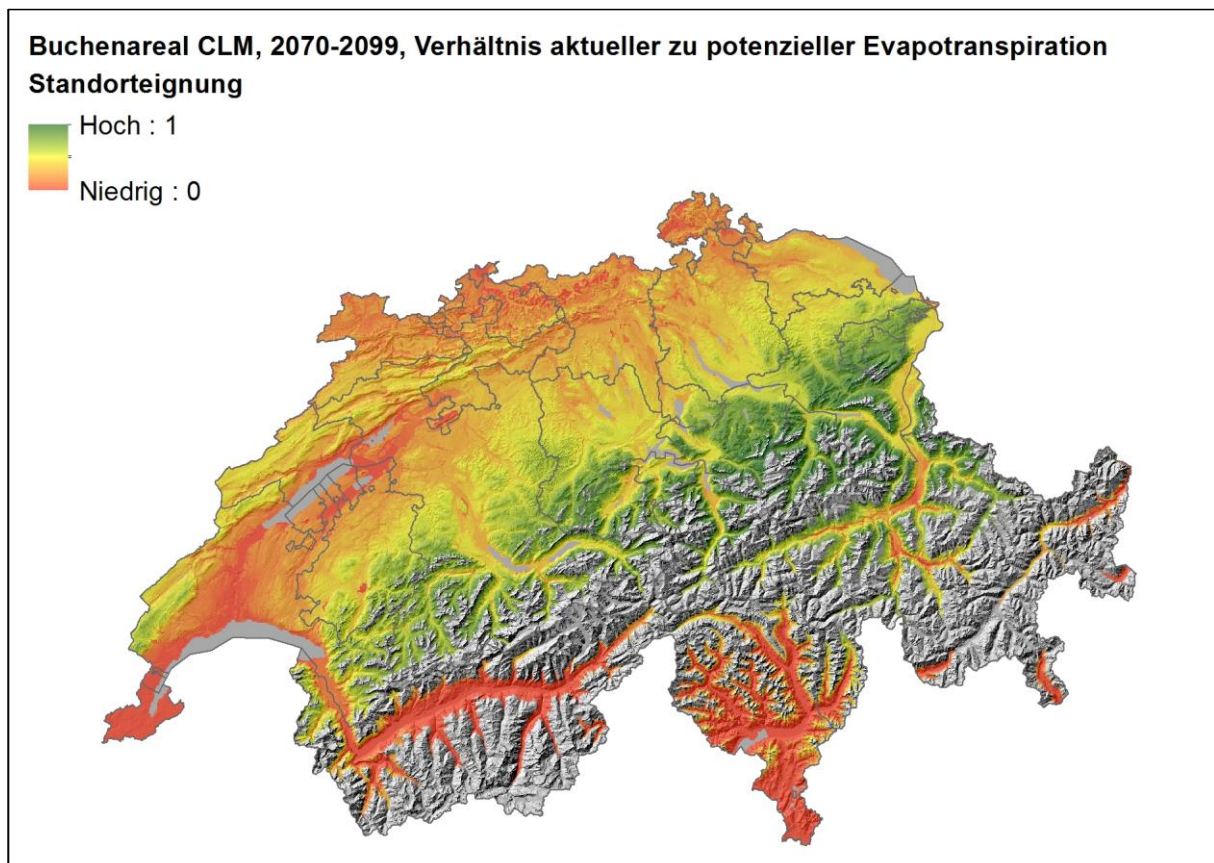


Abb. 177: Modellerte Standorteignung für das das Buchenareal, Klimaparameter: Verhältnis aktueller zu potenzieller Evapotranspiration. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

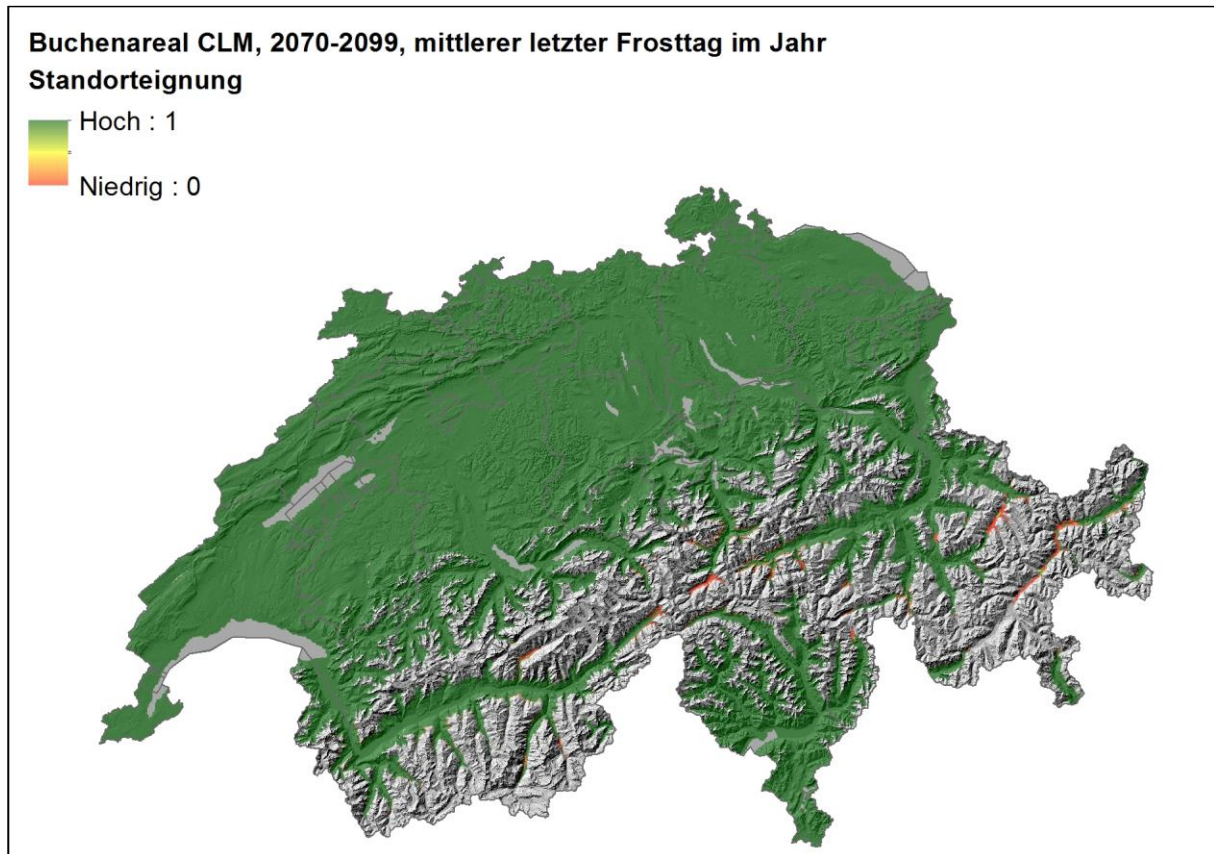


Abb. 178: Modellierter Standorteignung für das Buchenareal, Klimaparameter: Mittlerer letzter Frosttag im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

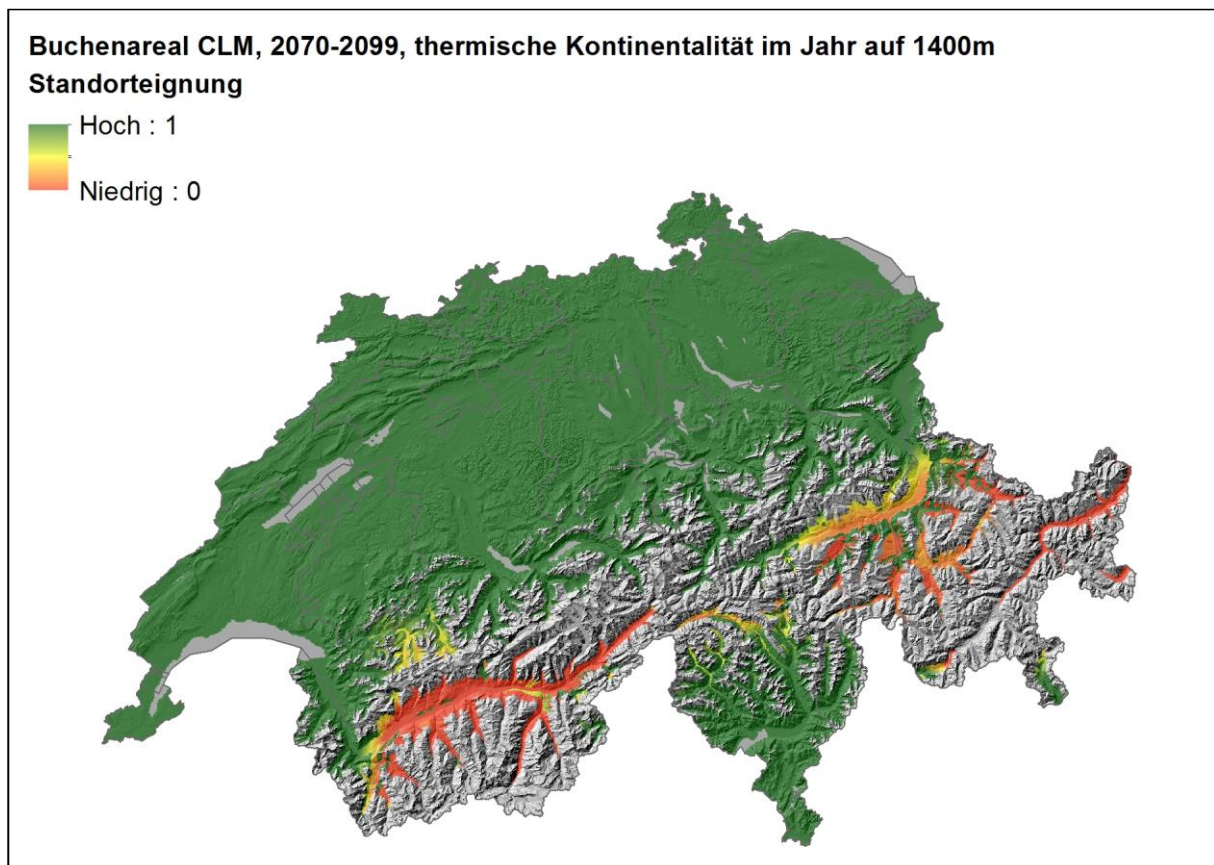


Abb. 179: Modellierter Standorteignung für das Buchenareal, Klimaparameter: Thermische Kontinentalität auf 1400 m ü. M. im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.



## 8.6 Abbildungen des Tannen-Hauptareals der Klimazukunft RegCM3

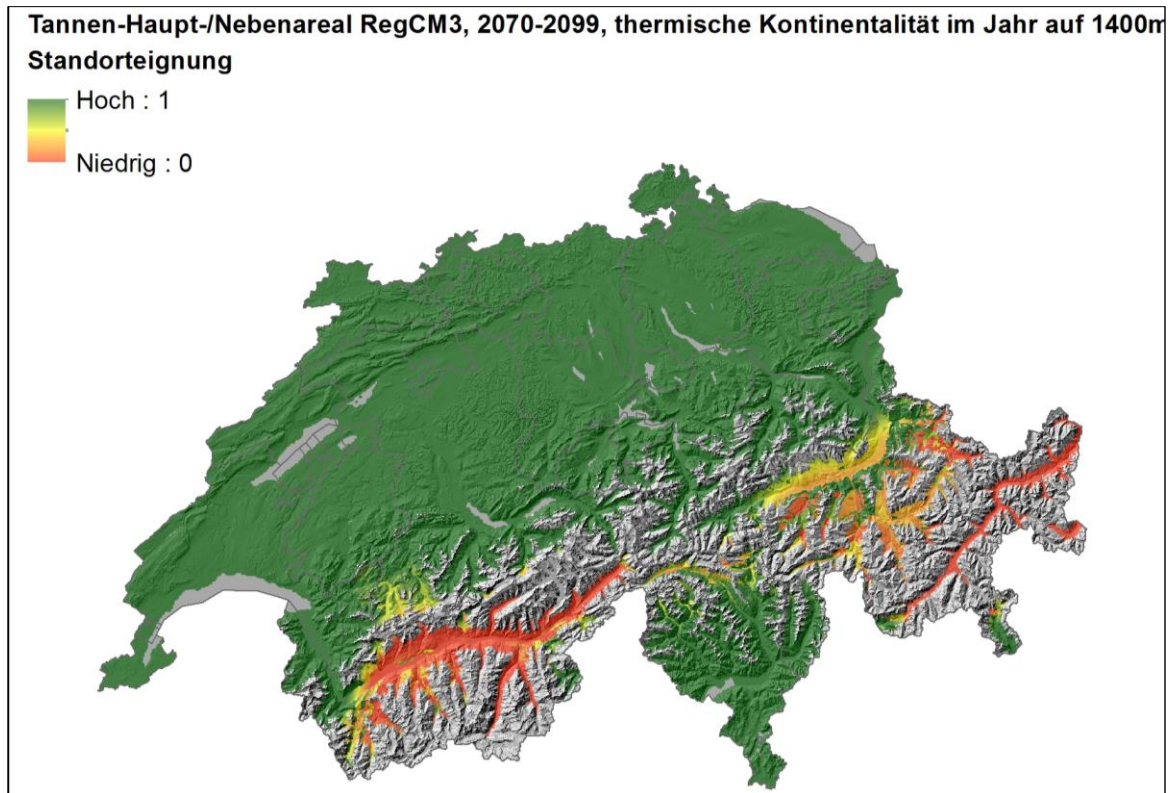


Abb. 180: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Hauptareal (Abgrenzung zum Tannen-Nebenareal), Klimaparameter: Thermische Kontinentalität auf 1400 m ü. M. im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

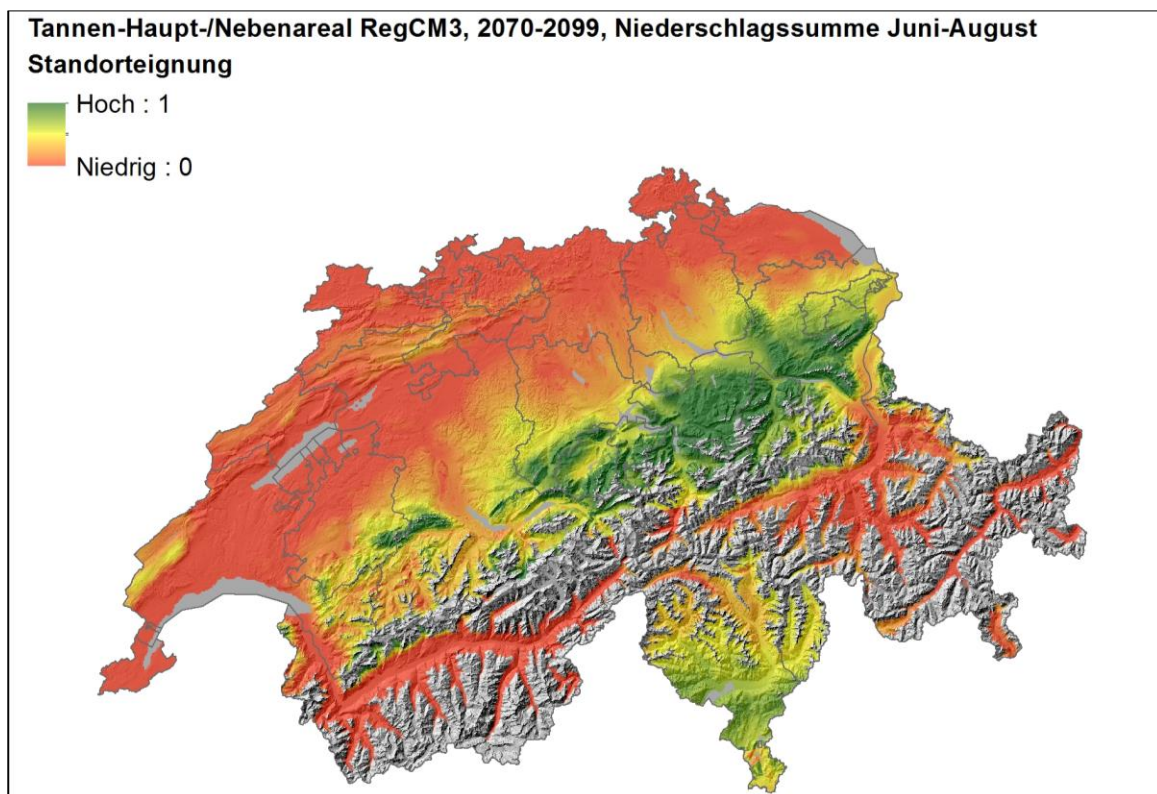


Abb. 181: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Hauptareal (Abgrenzung zum Tannen-Nebenareal), Klimaparameter: Niederschlagssumme Juni-August. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

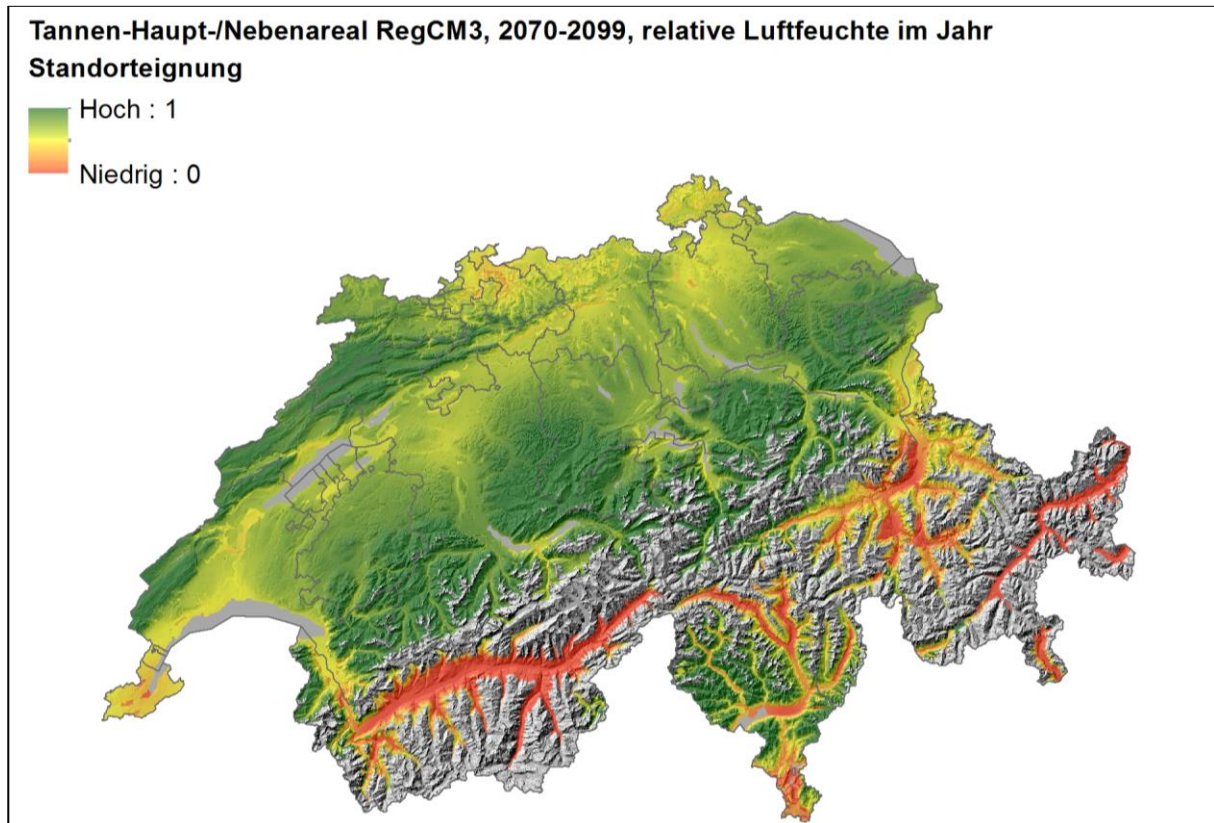


Abb. 182: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Hauptareal (Abgrenzung zum Tannen-Nebenareal), Klimaparameter: Mittlere relative Luftfeuchtigkeit um 13:30 Uhr im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

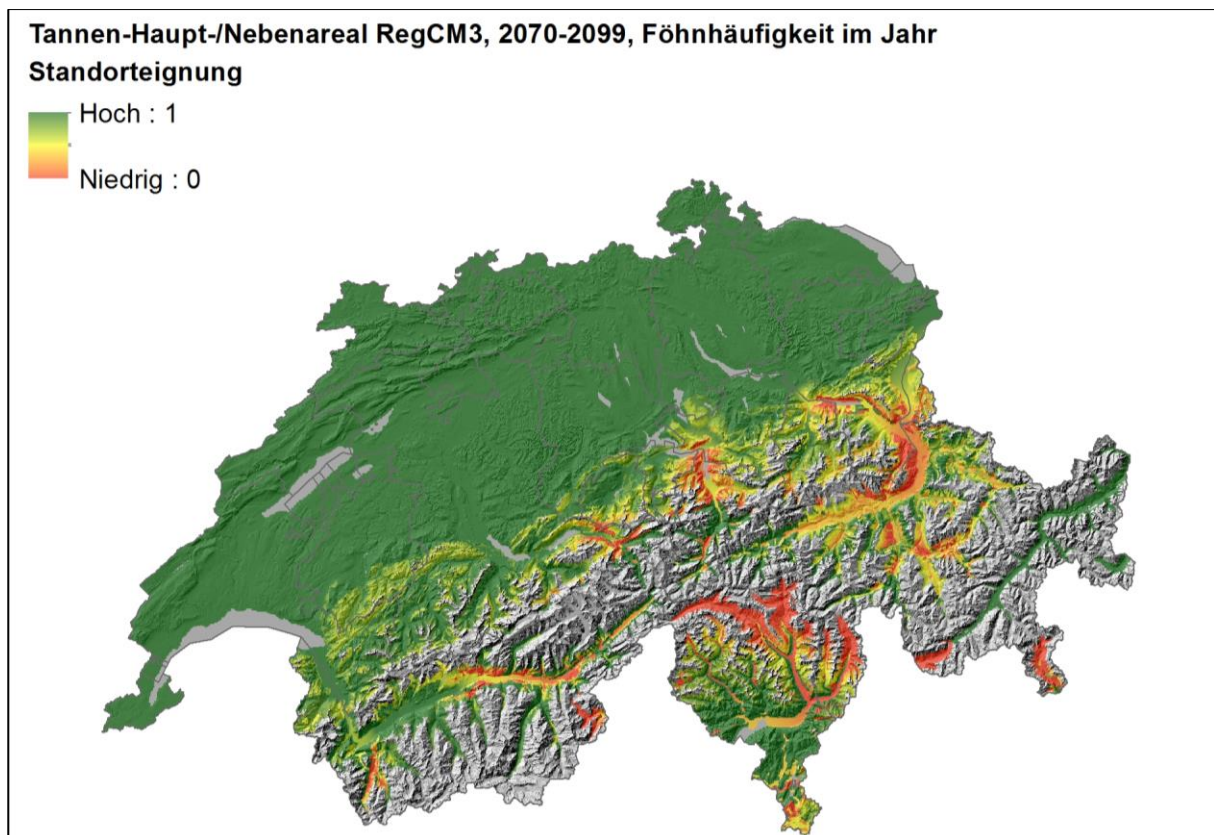


Abb. 183: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Hauptareal (Abgrenzung zum Tannen-Nebenareal), Klimaparameter: Föhnhäufigkeit im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.



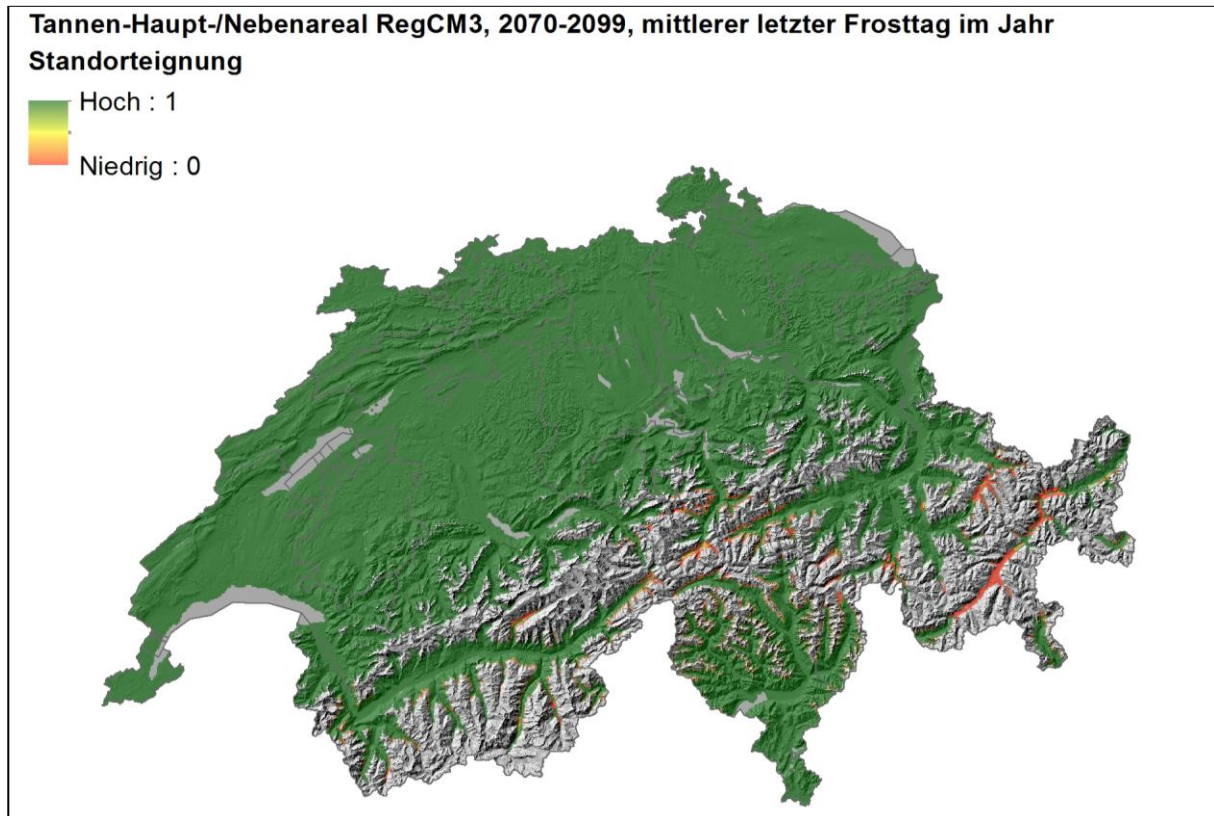


Abb. 184: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Hauptareal (Abgrenzung zum Tannen-Nebenareal), Klimaparameter: Mittlerer letzter Frosttag im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

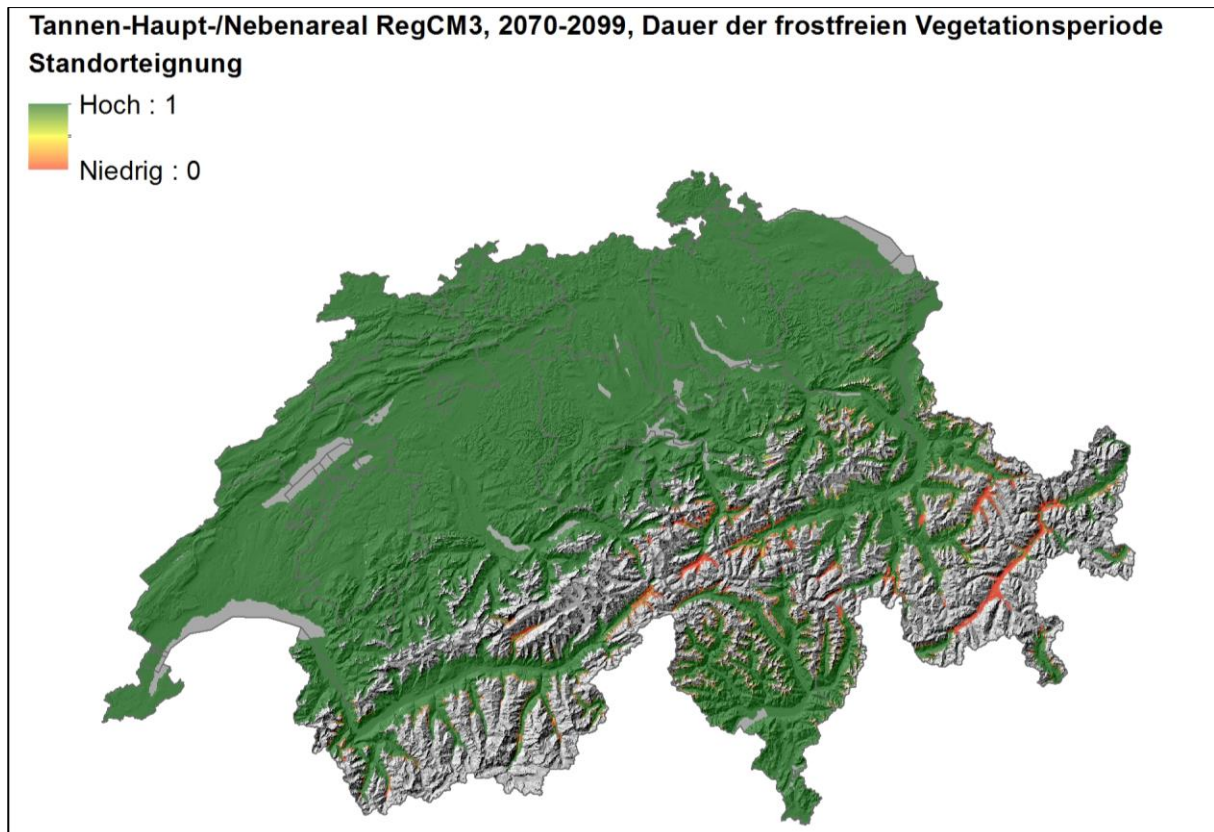


Abb. 185: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Hauptareal (Abgrenzung zum Tannen-Nebenareal), Klimaparameter: Dauer der frostfreien Vegetationsperiode. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

## 8.7 Abbildungen des Tannen-Hauptareals der Klimazukunft CLM

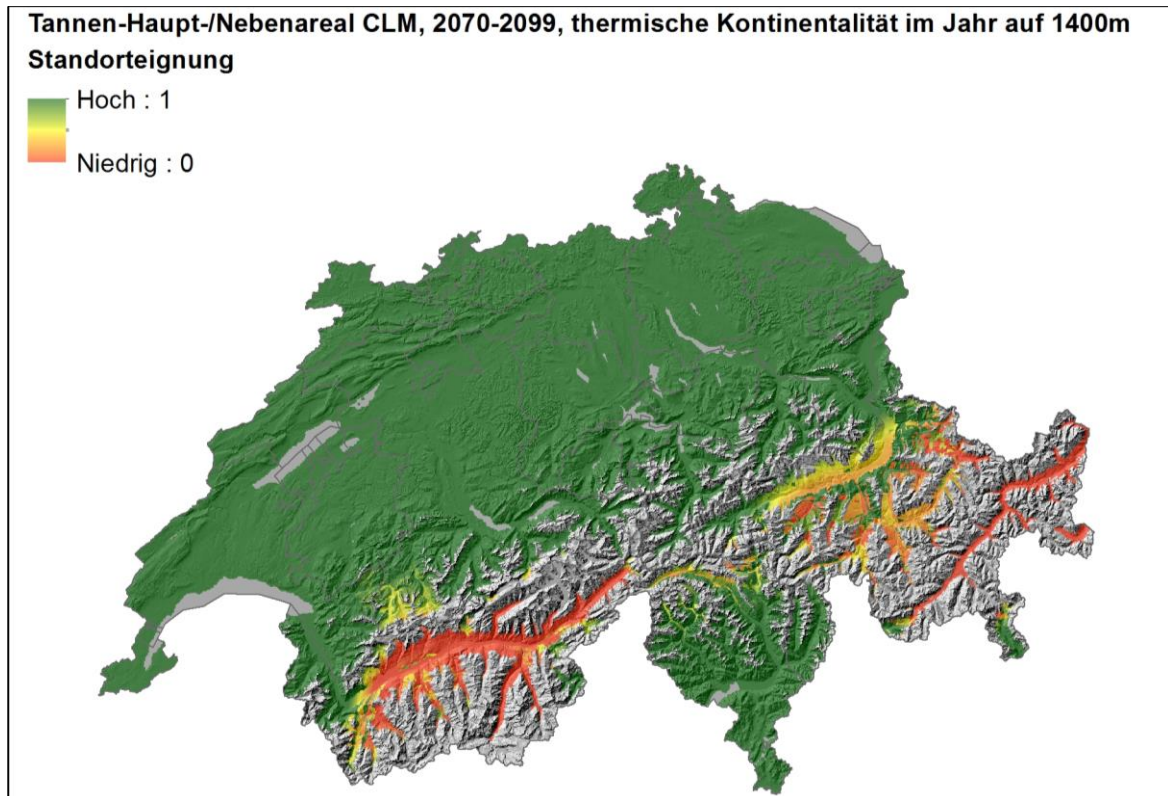


Abb. 186: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Hauptareal (Abgrenzung zum Tannen-Nebenareal), Klimaparameter: Thermische Kontinentalität auf 1400 m ü. M. im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

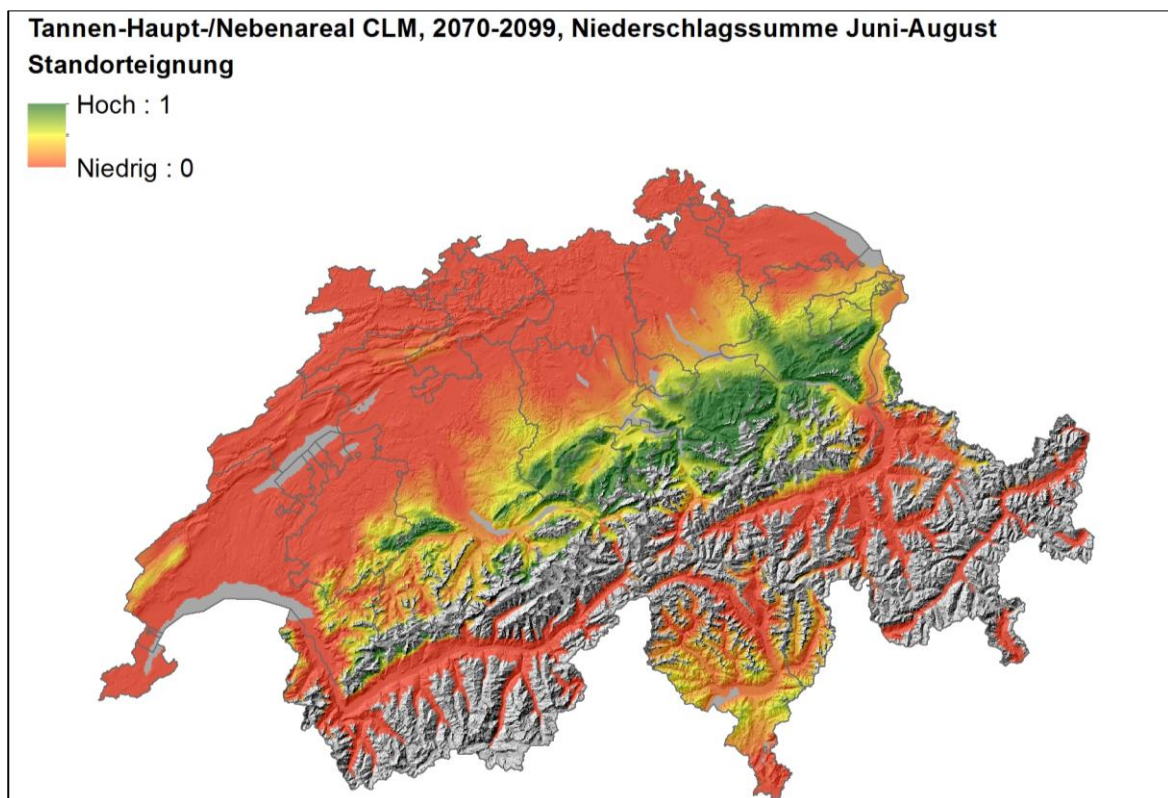


Abb. 187: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Hauptareal (Abgrenzung zum Tannen-Nebenareal), Klimaparameter: Niederschlagssumme Juni-August. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.



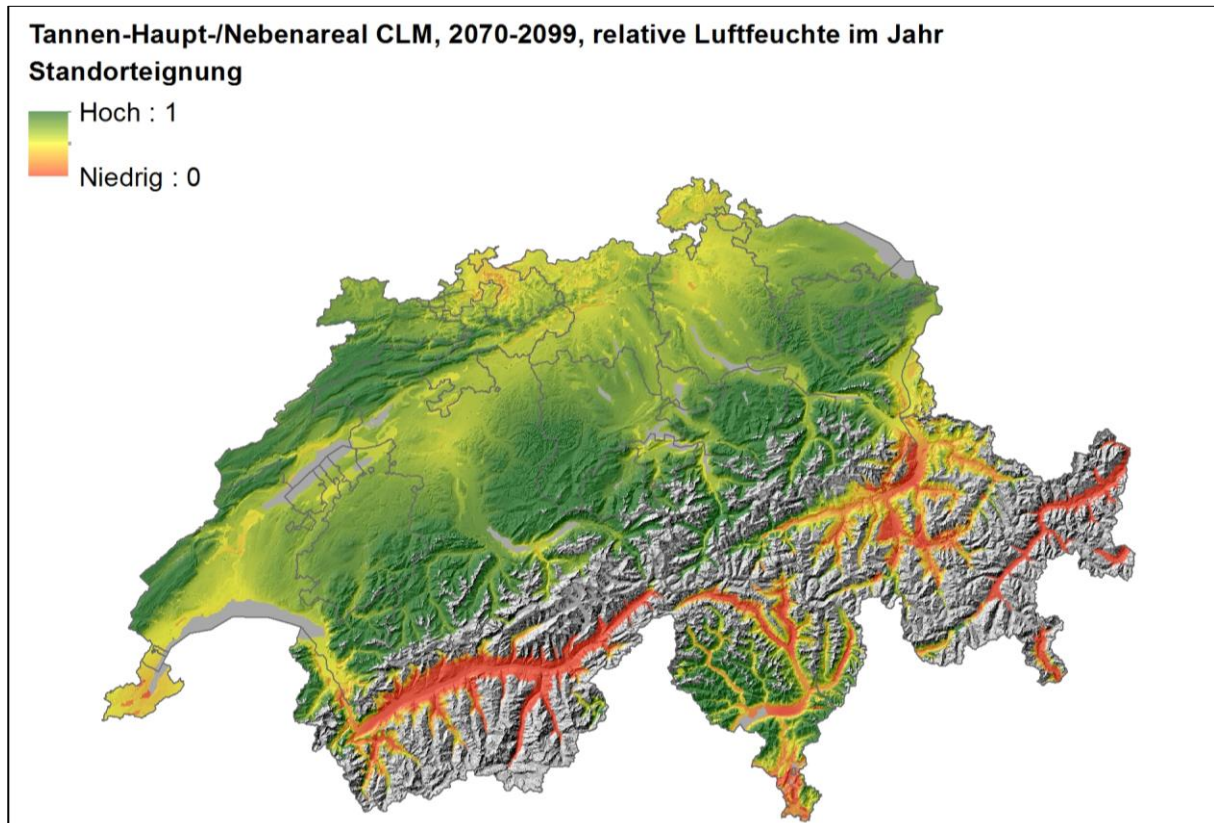


Abb. 188: Modellierter Standorteignung für das Tannen-Hauptareal (Abgrenzung zum Tannen-Nebenareal), Klimaparameter: Mittlere relative Luftfeuchtigkeit um 13:30 Uhr im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

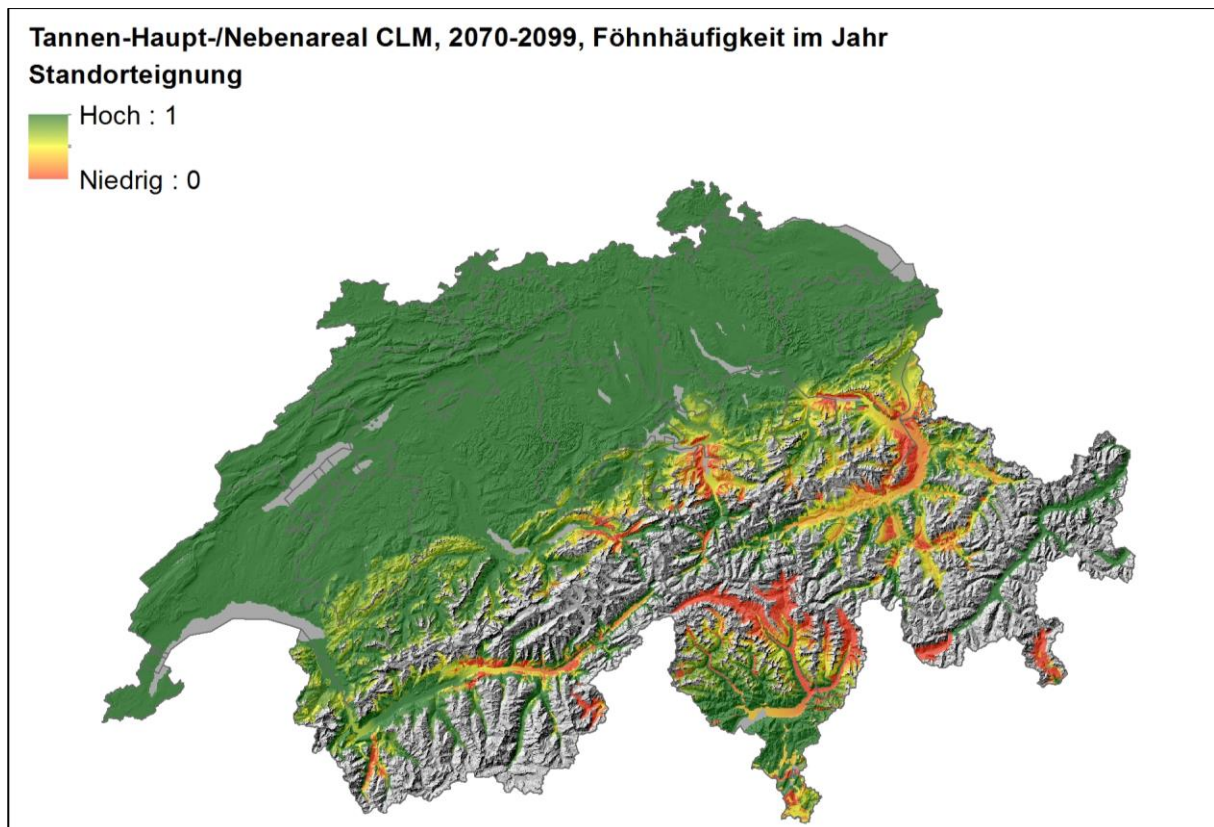


Abb. 189: Modellierter Standorteignung für das Tannen-Hauptareal (Abgrenzung zum Tannen-Nebenareal), Klimaparameter: Föhnhäufigkeit im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

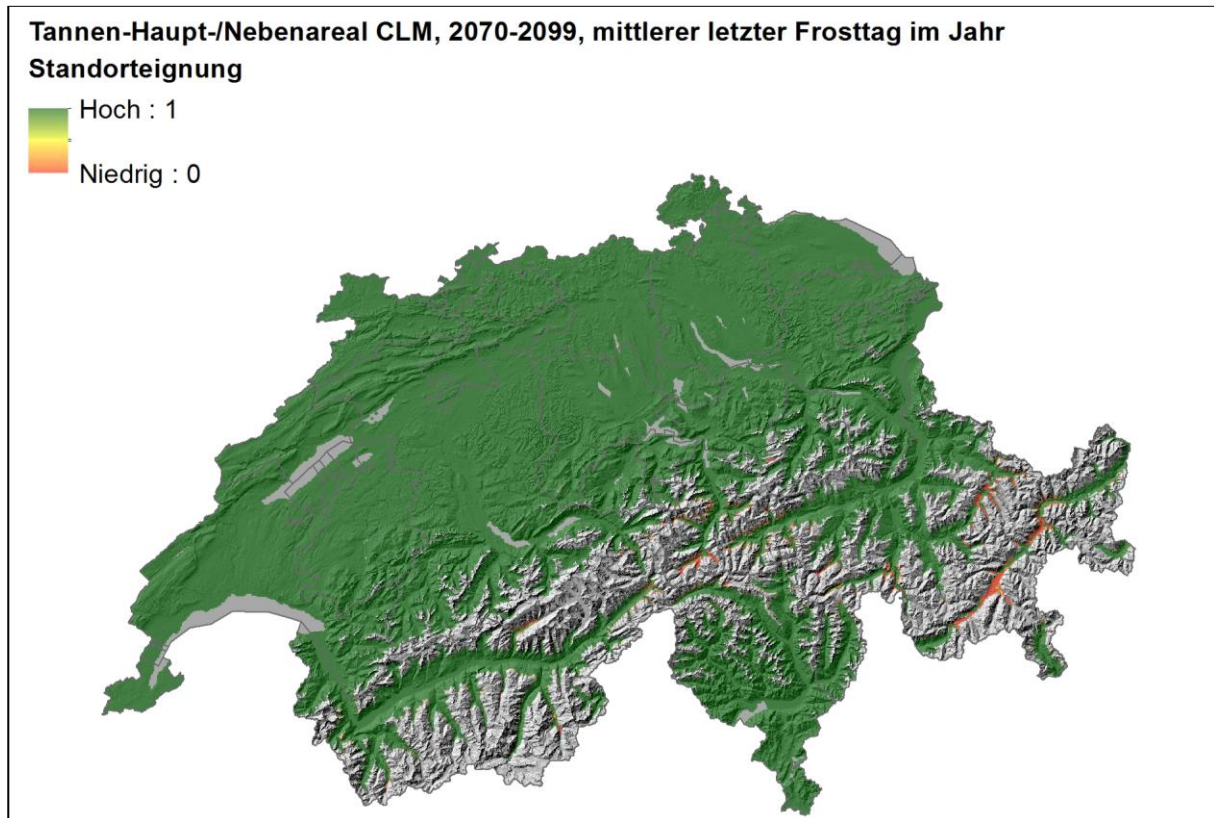


Abb. 190: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Hauptareal (Abgrenzung zum Tannen-Nebenareal), Klimaparameter: Mittlerer letzter Frosttag im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

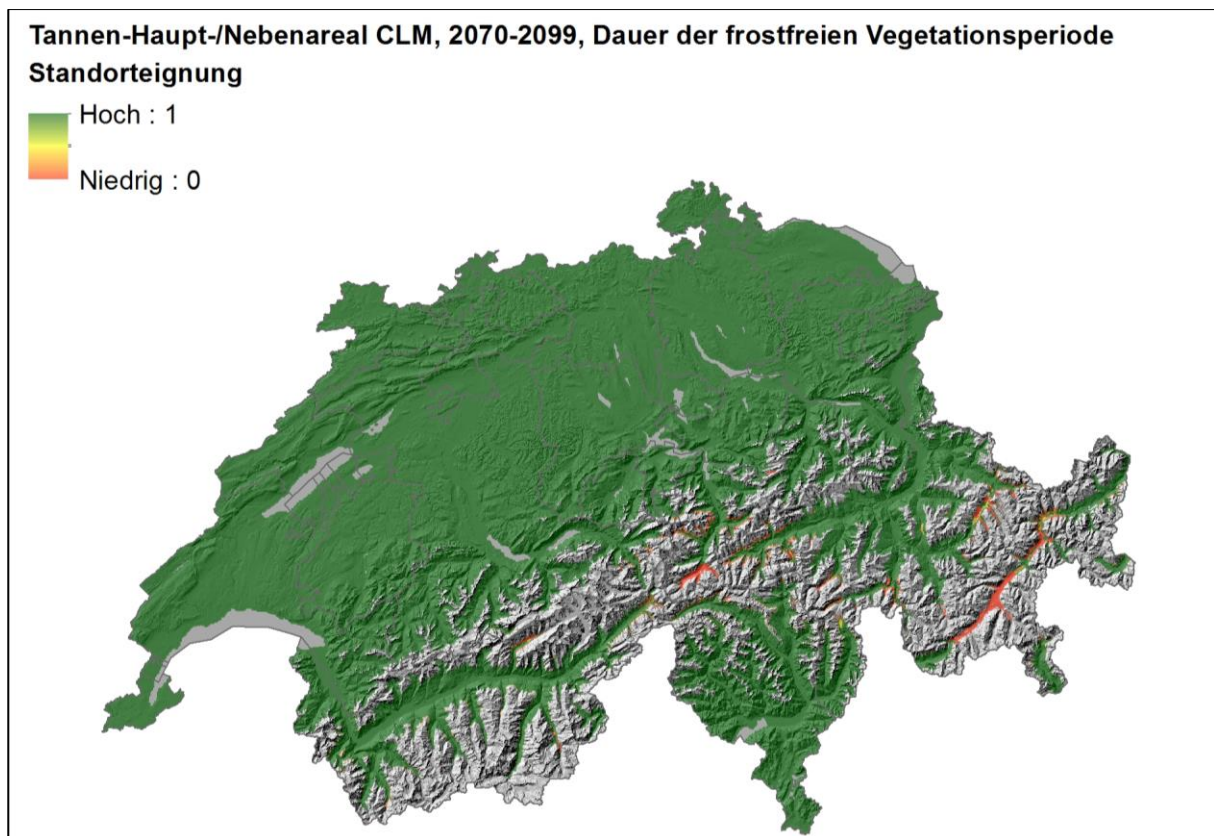


Abb. 191: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Hauptareal (Abgrenzung zum Tannen-Nebenareal), Klimaparameter: Dauer der frostfreien Vegetationsperiode. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.



## 8.8 Abbildungen des Tannen-Nebenareals der Klimazukunft RegCM3

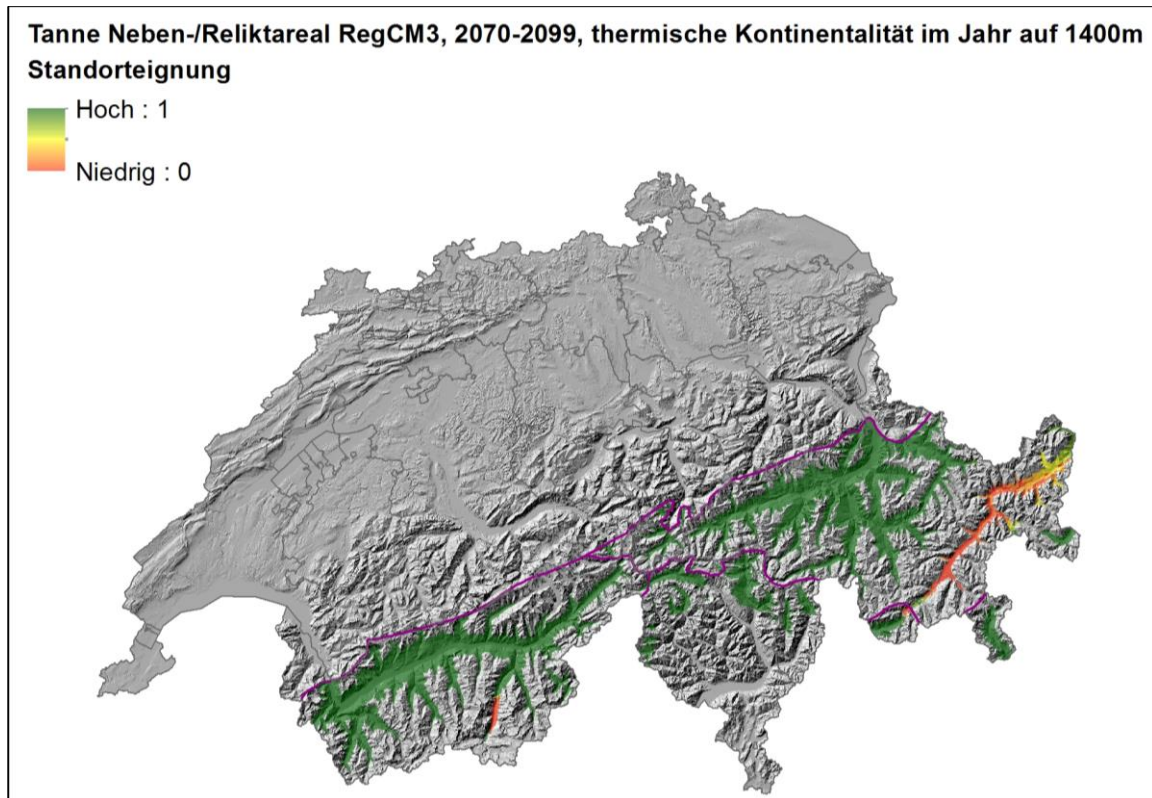


Abb. 192: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Nebenareal (Abgrenzung zum Tannen-Reliktareal), Klimaparameter: Thermische Kontinentalität auf 1400 m ü. M. im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

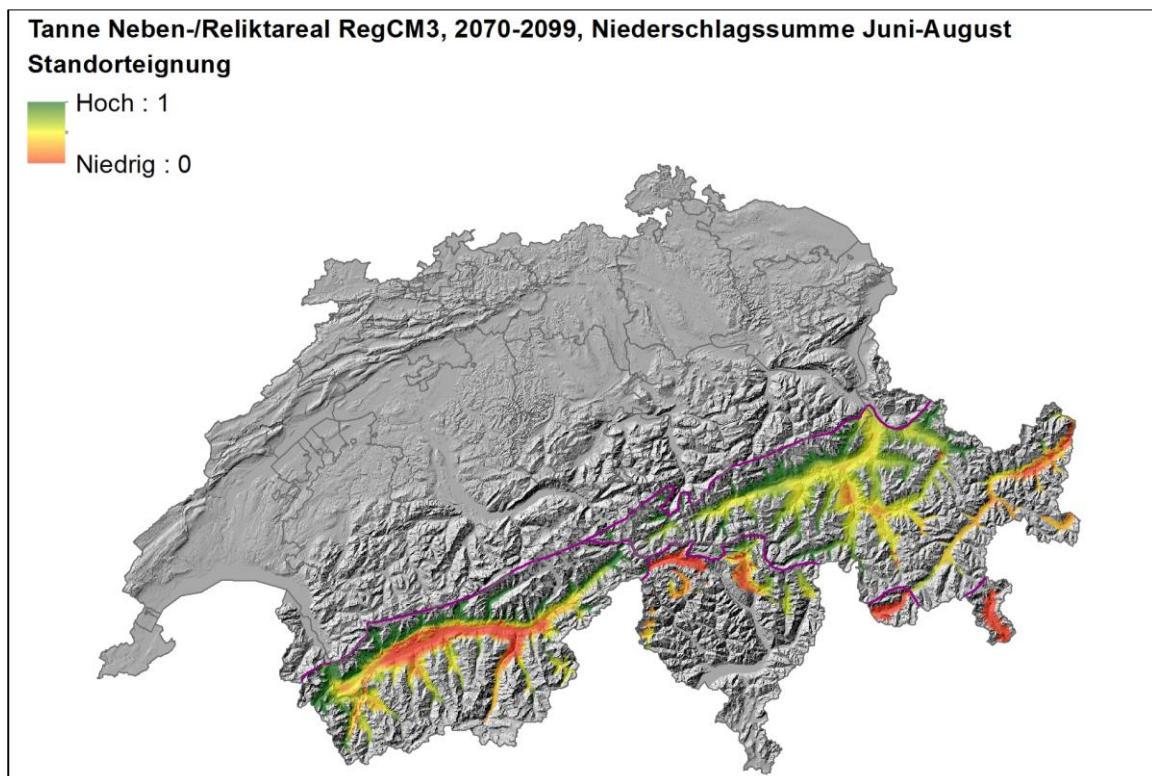


Abb. 193: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Nebenareal (Abgrenzung zum Tannen-Reliktareal), Klimaparameter: Niederschlagssumme Juni-August. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

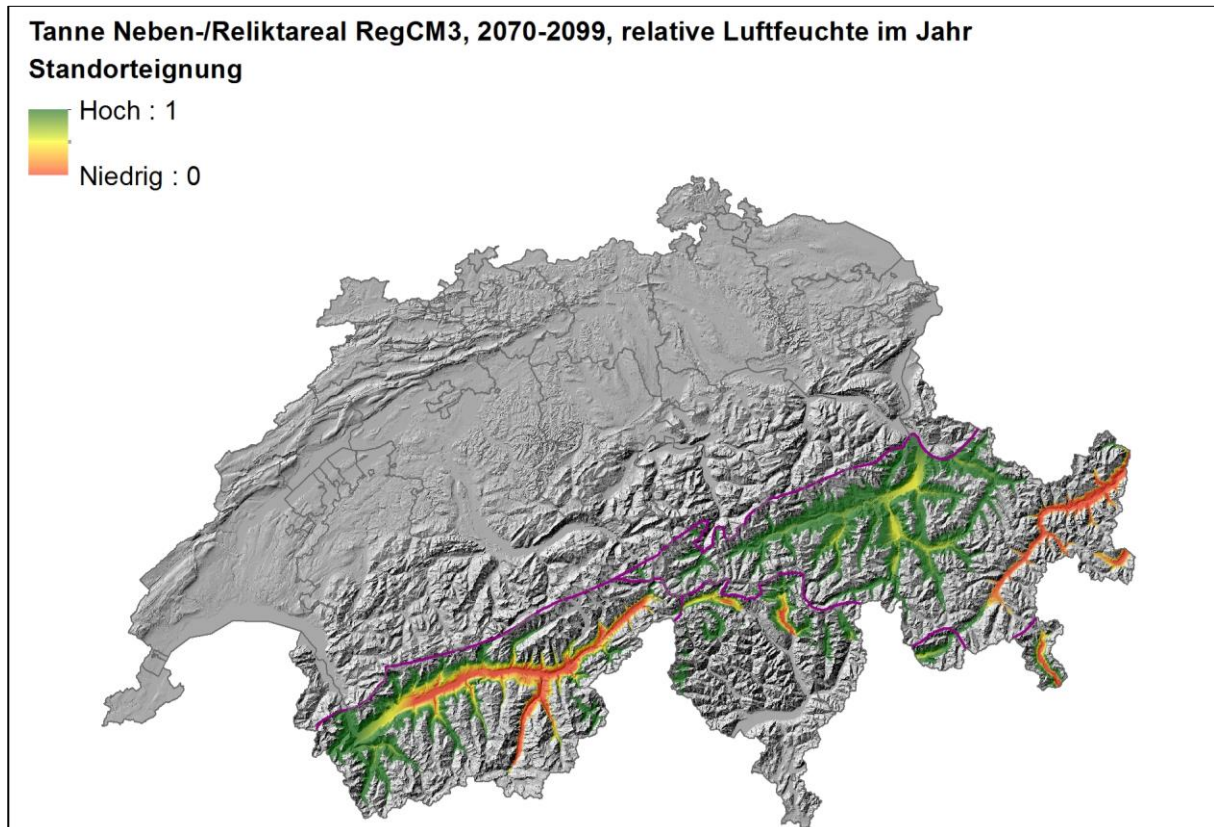


Abb. 194: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Nebenareal (Abgrenzung zum Tannen-Reliktareal), Klimaparameter: Mittlere relative Luftfeuchtigkeit um 13:30 Uhr im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

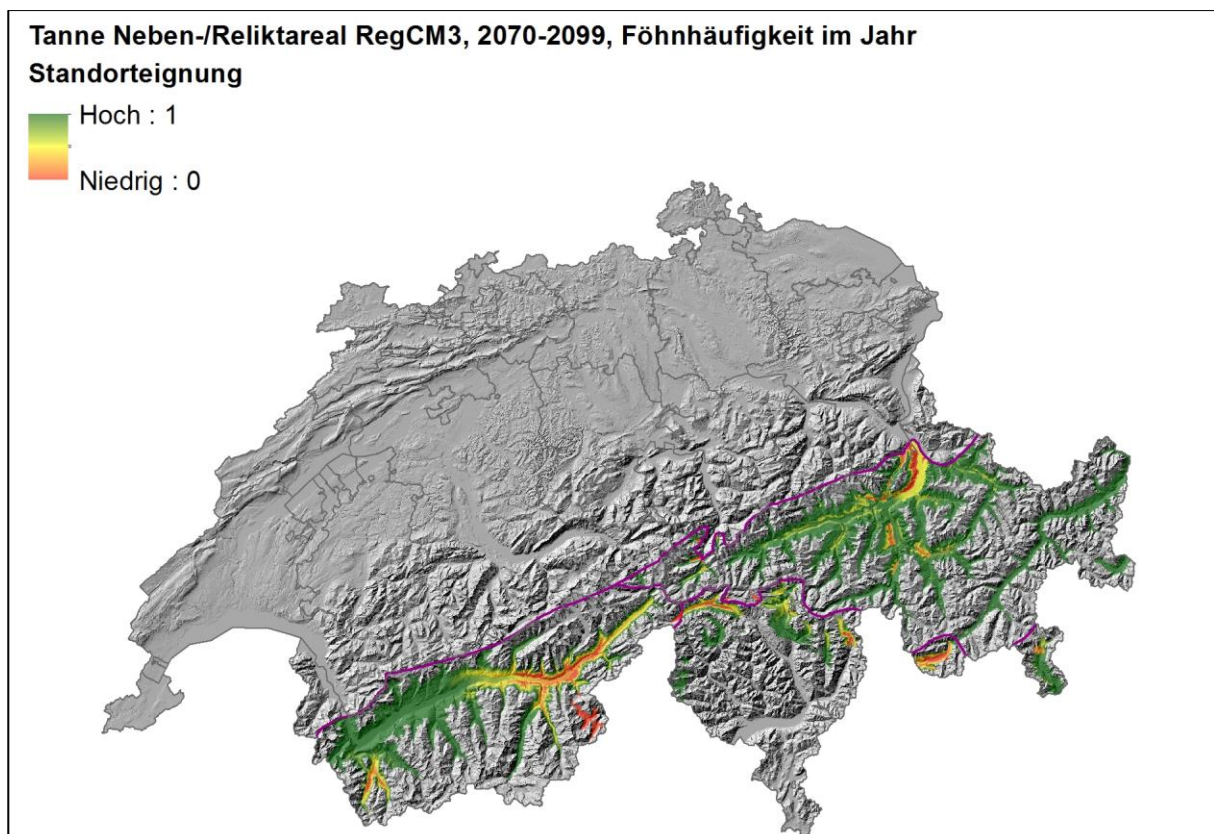


Abb. 195: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Nebenareal (Abgrenzung zum Tannen-Reliktareal), Klimaparameter: Föhnhäufigkeit im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.



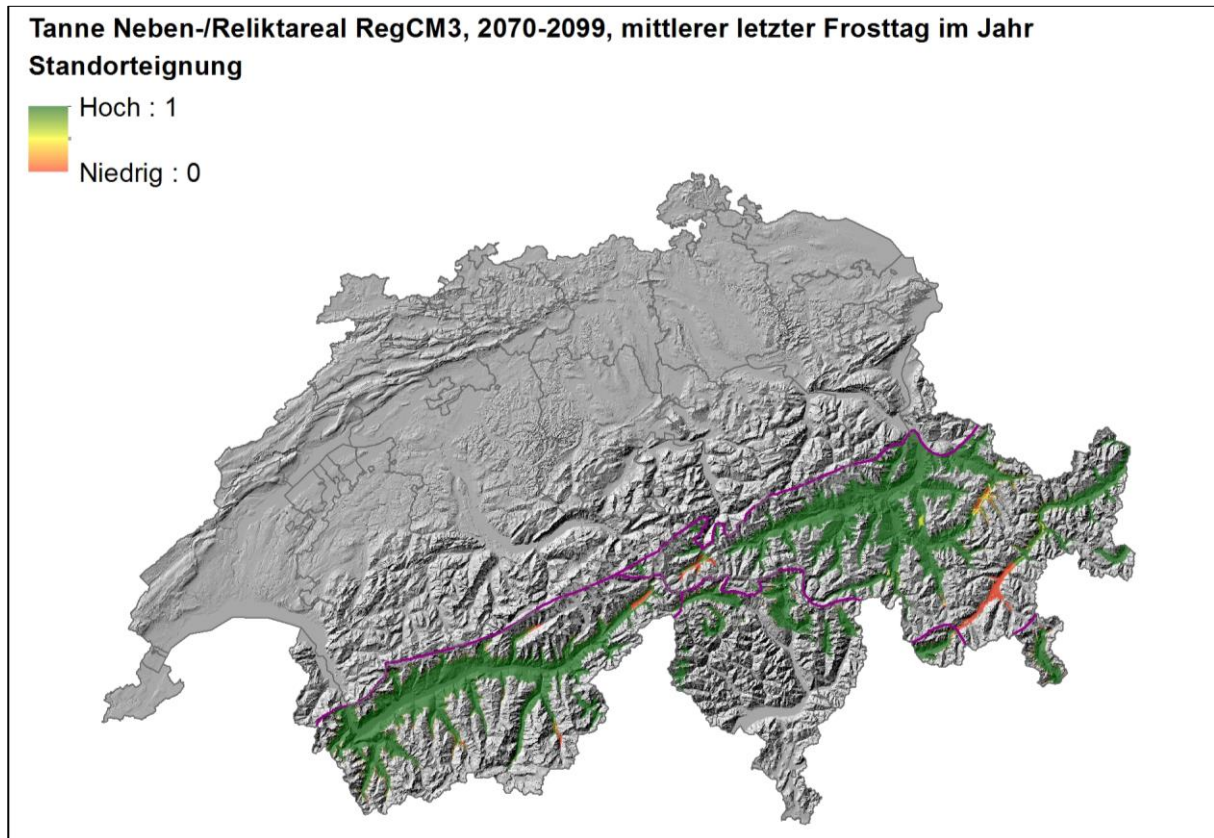


Abb. 196: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Nebenareal (Abgrenzung zum Tannen-Reliktareal), Klimaparameter: Mittlerer letzter Frosttag im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

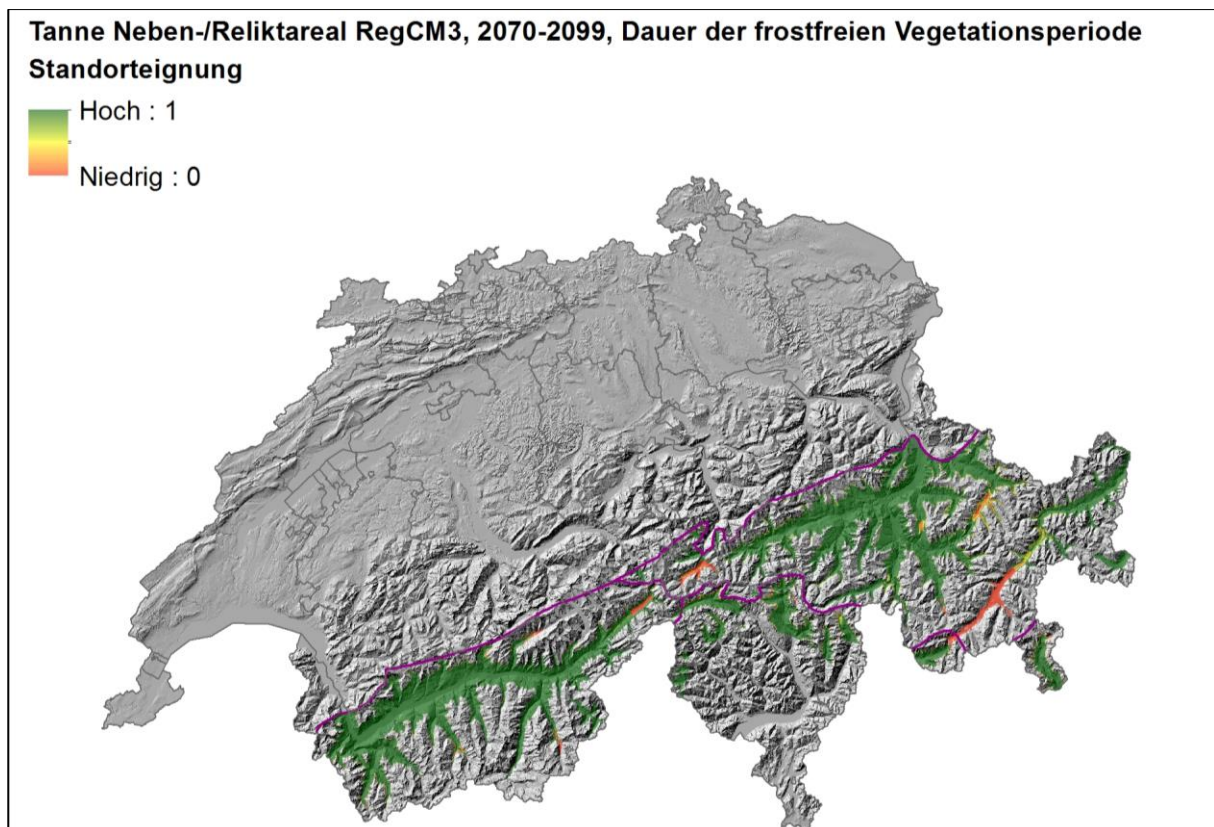


Abb. 197: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Nebenareal (Abgrenzung zum Tannen-Reliktareal), Klimaparameter: Dauer der frostfreien Vegetationsperiode. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

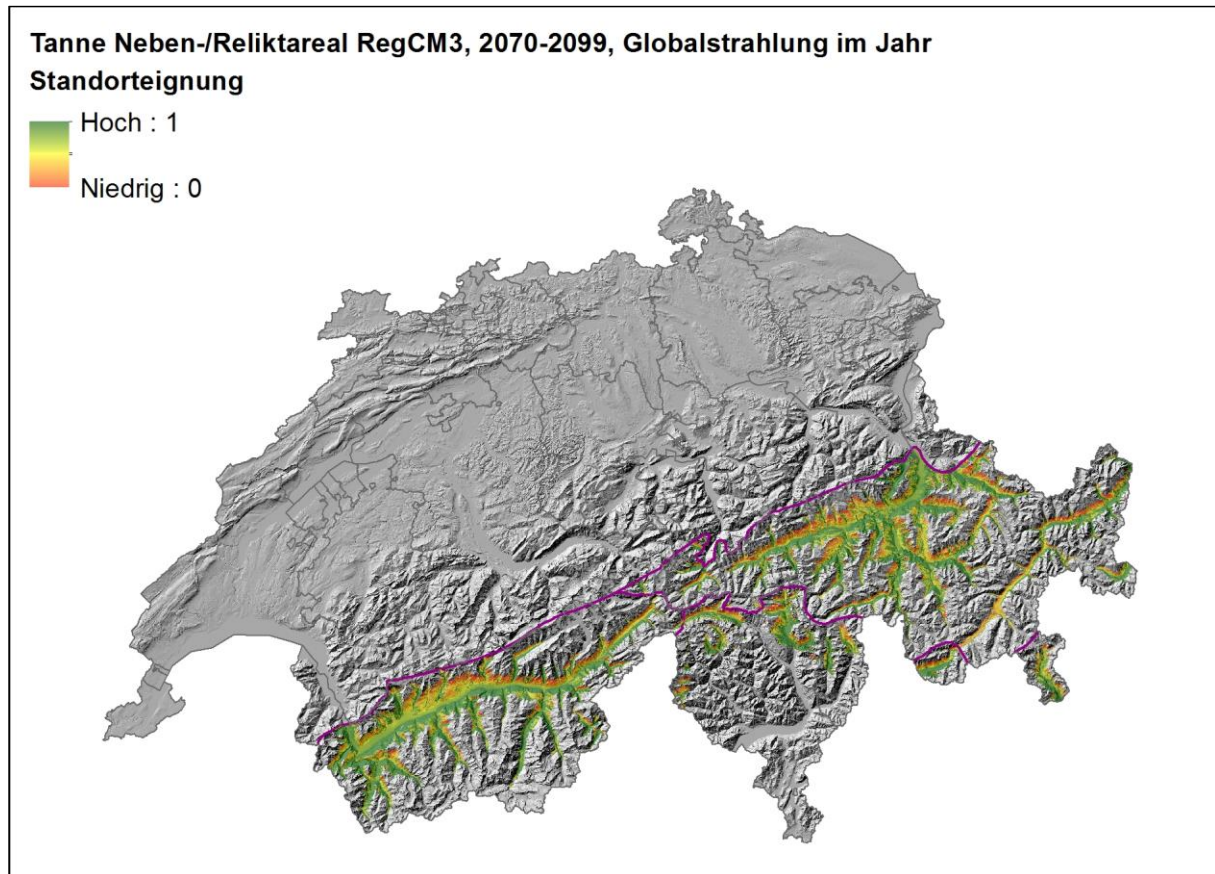


Abb. 198: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Nebenareal (Abgrenzung zum Tannen-Reliktareal), Klimaparameter: Globalstrahlung im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.



## 8.9 Abbildungen des Tannen-Nebenareals der Klimazukunft CLM

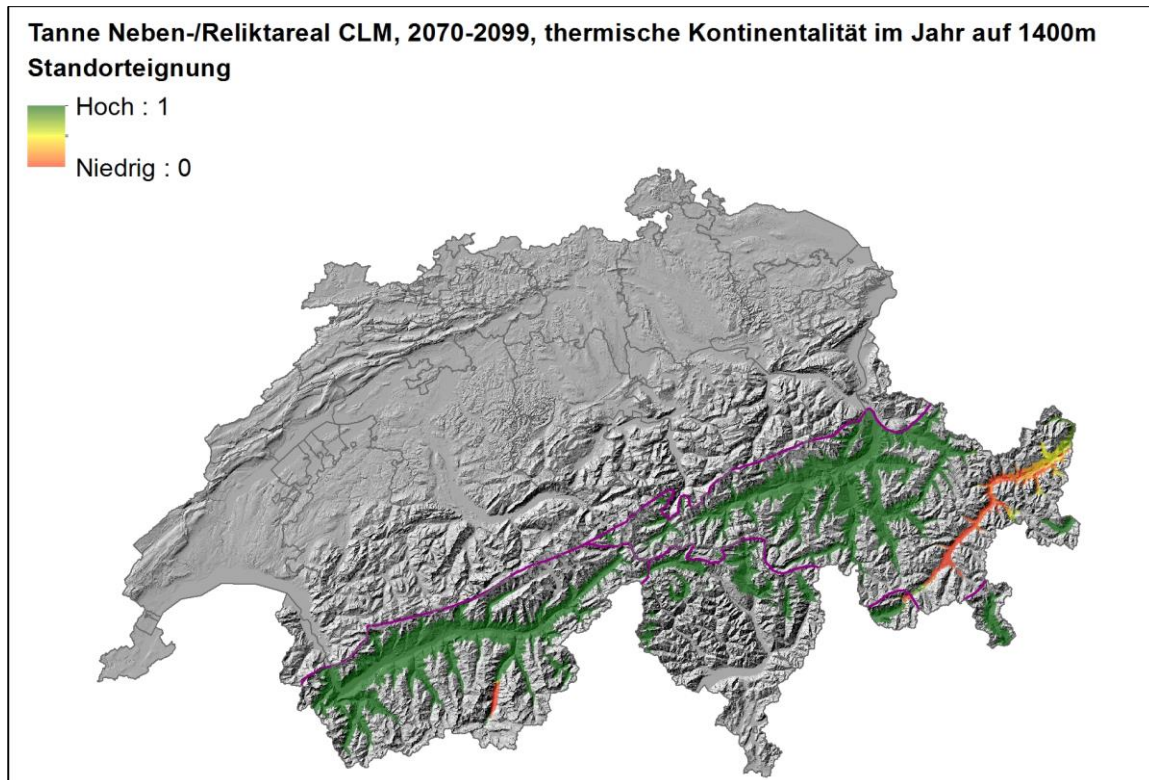


Abb. 199: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Nebenareal (Abgrenzung zum Tannen-Reliktareal), Klimaparameter: Thermische Kontinentalität auf 1400 m ü. M. im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

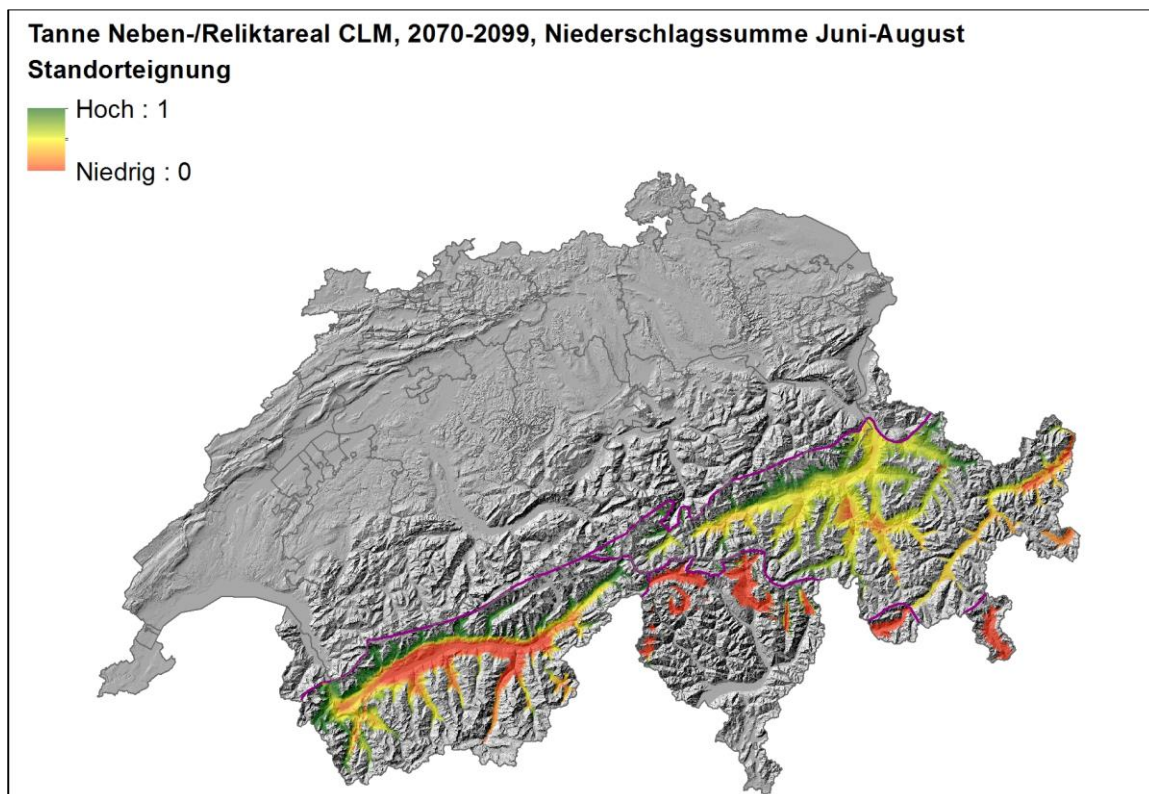


Abb. 200: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Nebenareal (Abgrenzung zum Tannen-Reliktareal), Klimaparameter: Niederschlagssumme Juni-August. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

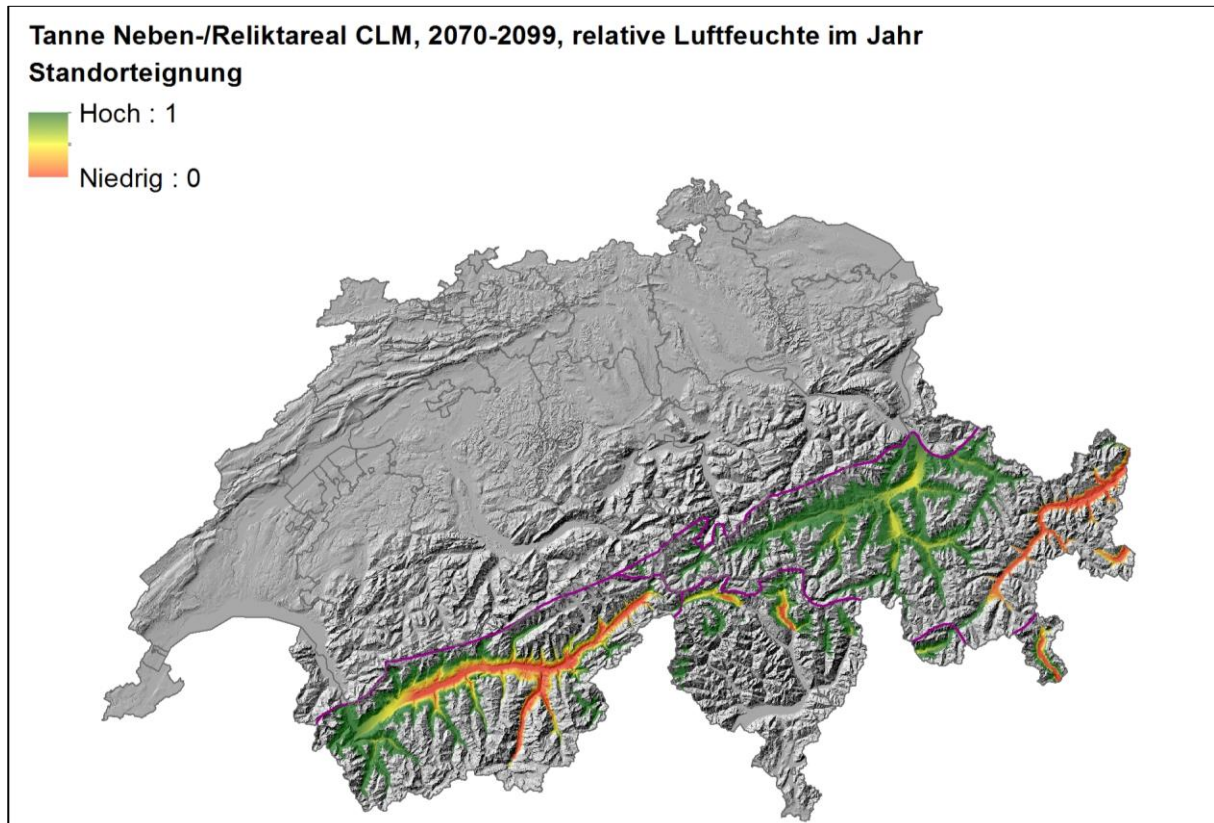


Abb. 201: Modellerte Standorteignung für das Tannen-Nebenareal (Abgrenzung zum Tannen-Reliktareal), Klimaparameter: Mittlere relative Luftfeuchtigkeit um 13:30 Uhr im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

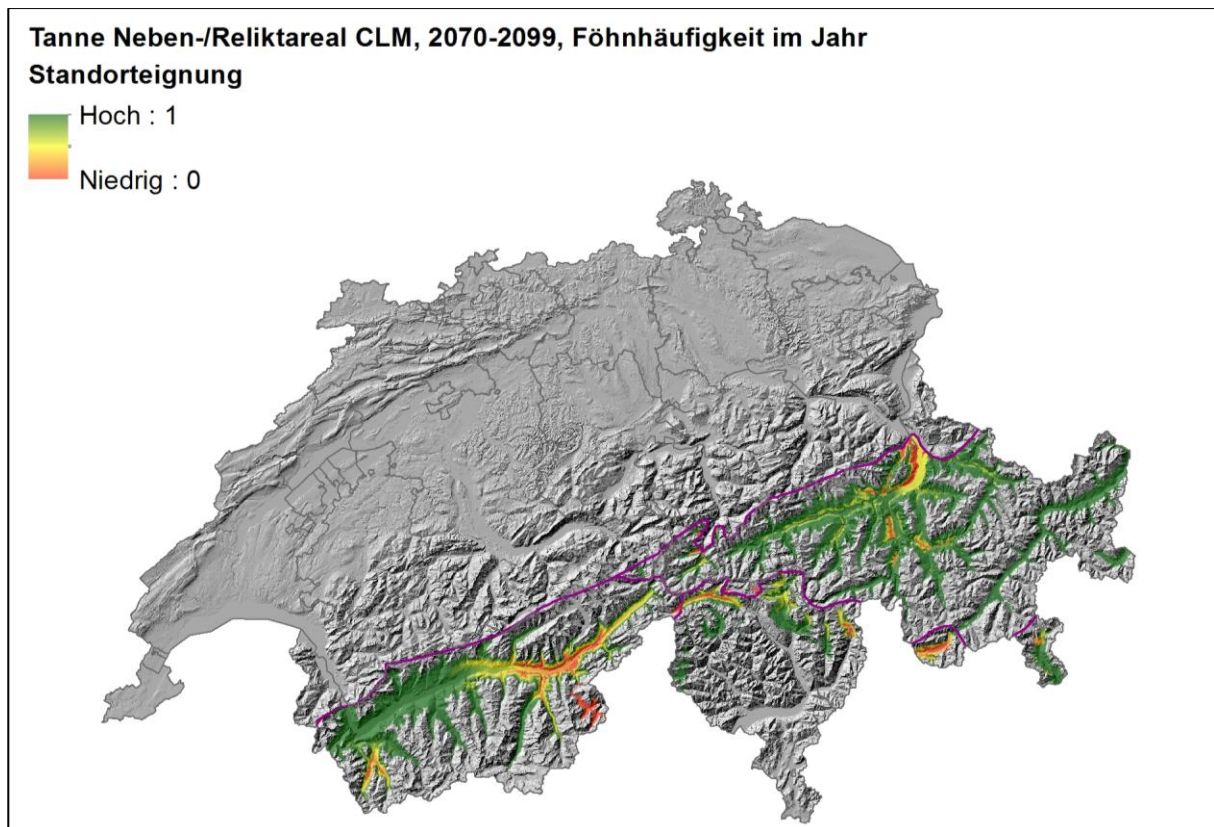


Abb. 202: Modellerte Standorteignung für das Tannen-Nebenareal (Abgrenzung zum Tannen-Reliktareal), Klimaparameter: Föhnhäufigkeit im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.



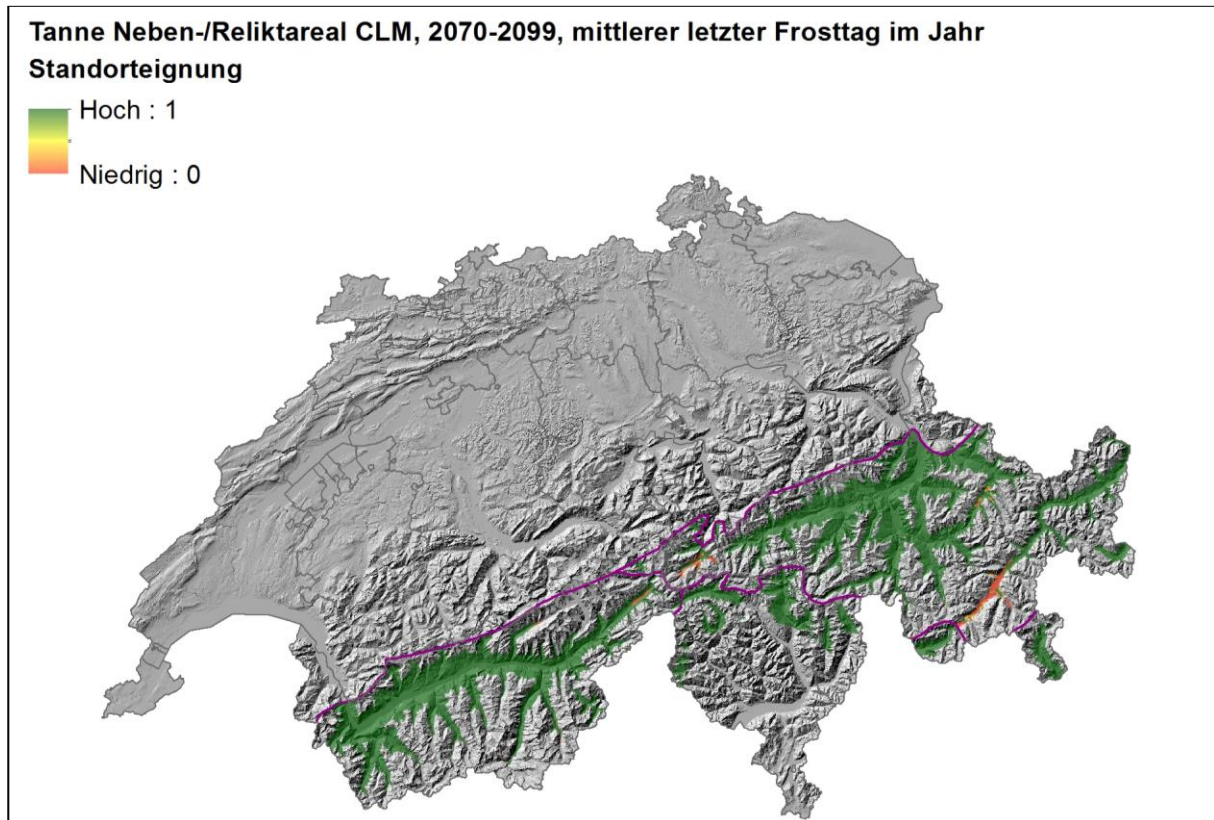


Abb. 203: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Nebenareal (Abgrenzung zum Tannen-Reliktareal), Klimaparameter: Mittlerer letzter Frosttag im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

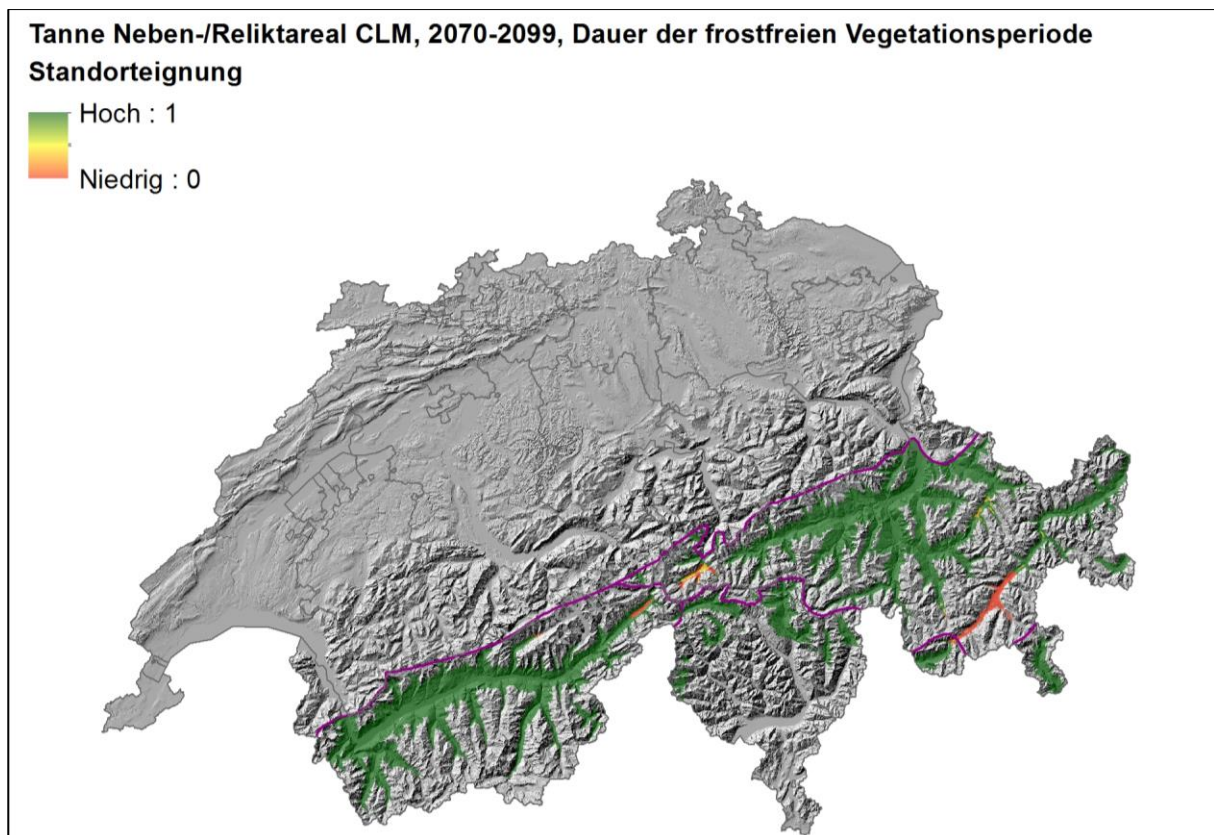


Abb. 204: Modellierte Standorteignung für das Tannen-Nebenareal (Abgrenzung zum Tannen-Reliktareal), Klimaparameter: Dauer der frostfreien Vegetationsperiode. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

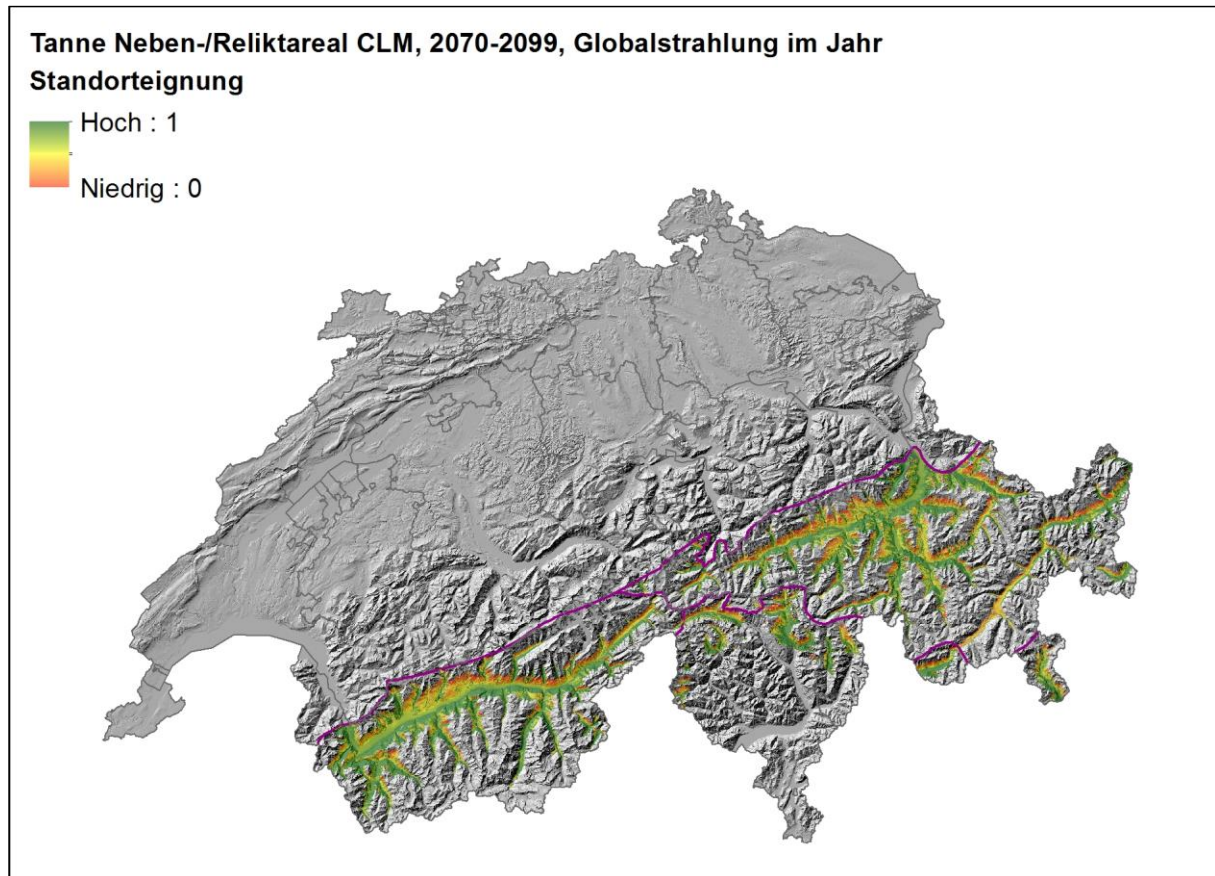


Abb. 205: Modellerte Standorteignung für das Tannen-Nebenareal (Abgrenzung zum Tannen-Reliktareal), Klimaparameter: Globalstrahlung im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.



## 8.10 Abbildungen der collinen Stufe der Klimazukunft RegCM3

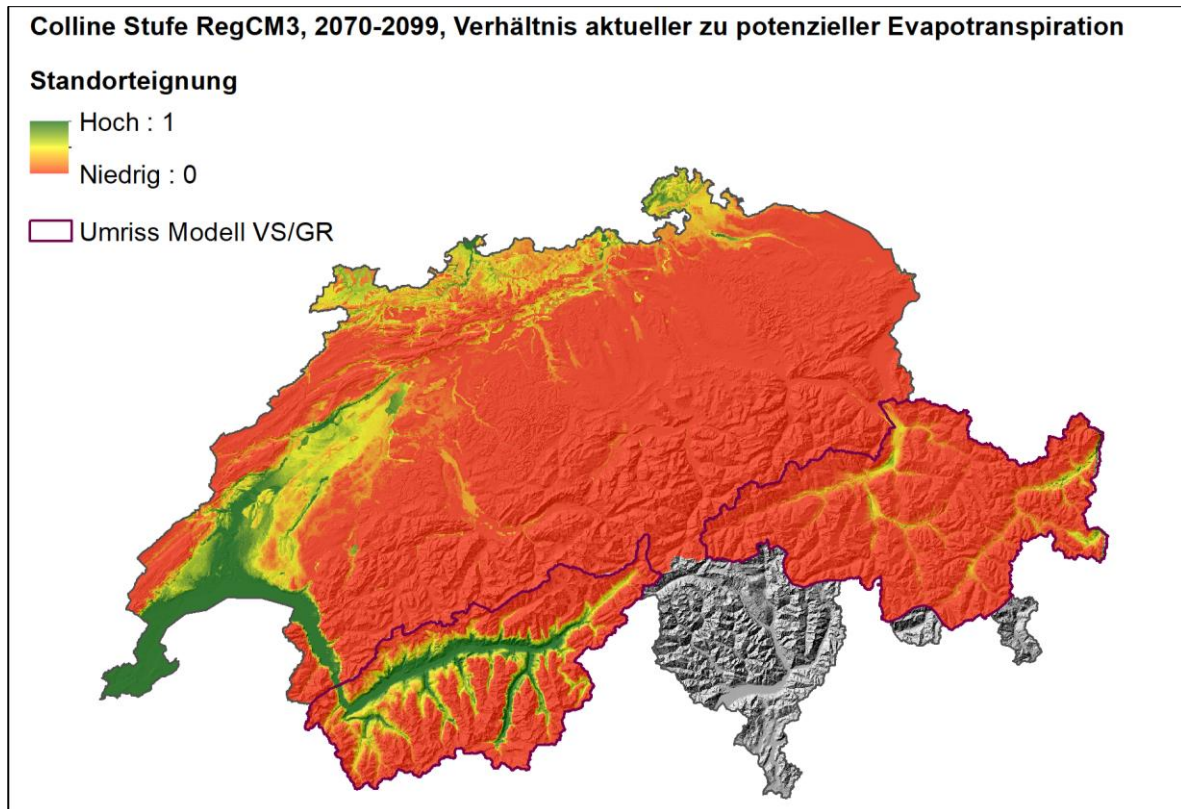


Abb. 206: Modellierte Standorteignung für die colline Stufe, Klimaparameter: Verhältnis aktueller zu potenzieller Evapotranspiration. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

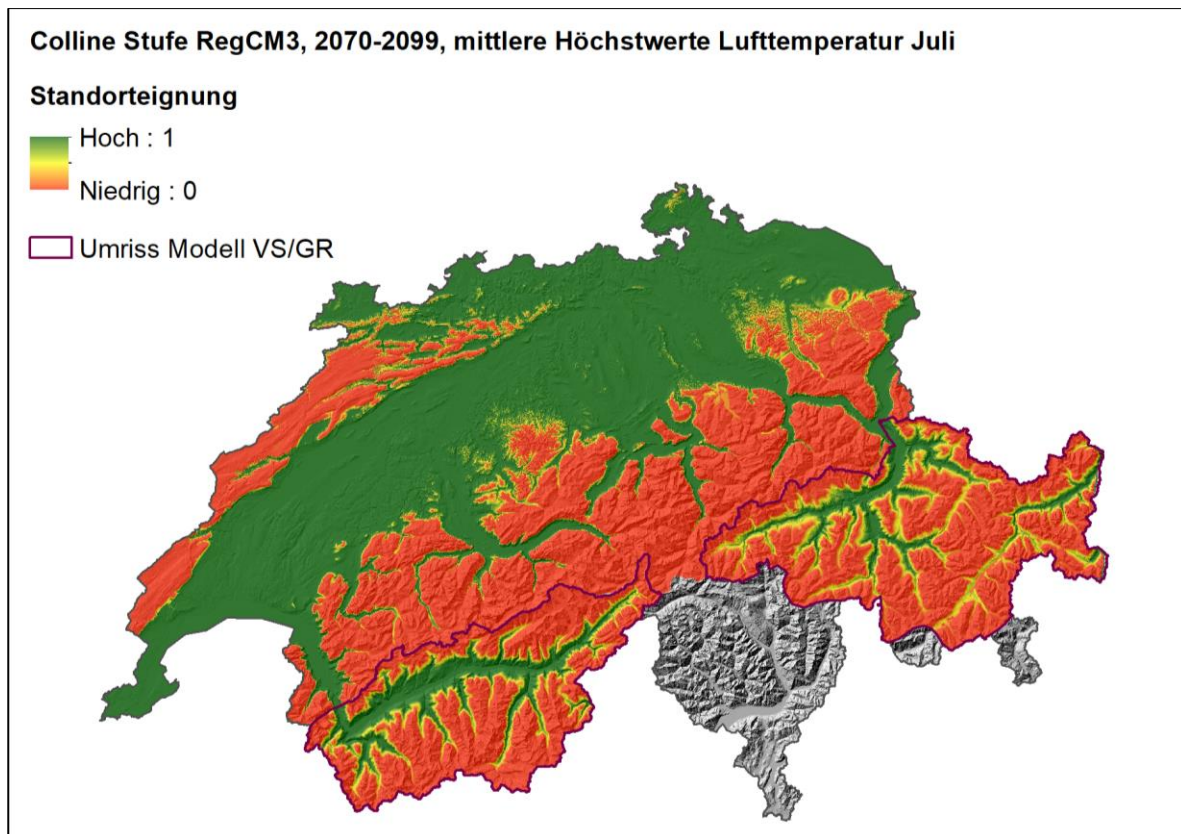


Abb. 207: Modellierte Standorteignung für die colline Stufe, Klimaparameter: Mittlere Höchstwerte Lufttemperatur im Juli. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

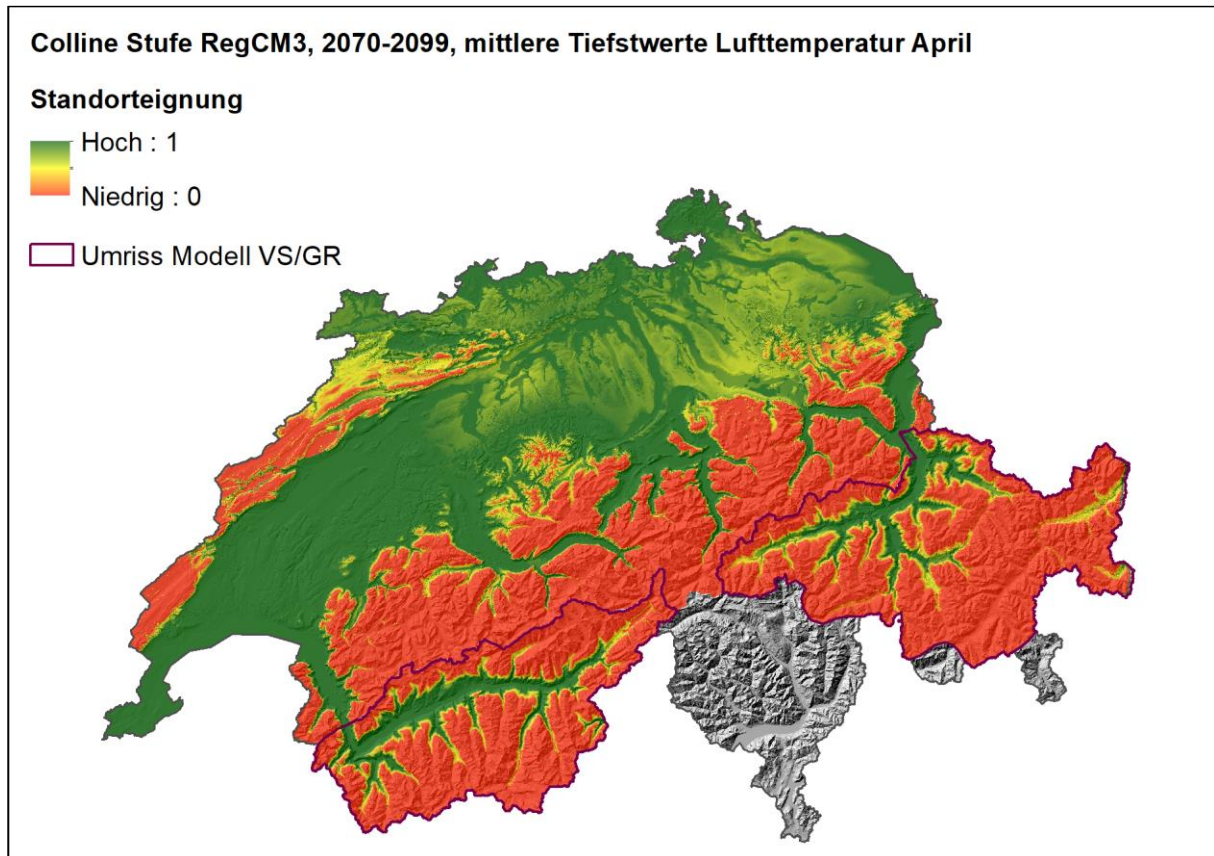


Abb. 208: Modellierte Standorteignung für die colline Stufe, Klimaparameter: Mittlere Tiefstwerte Lufttemperatur im April. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

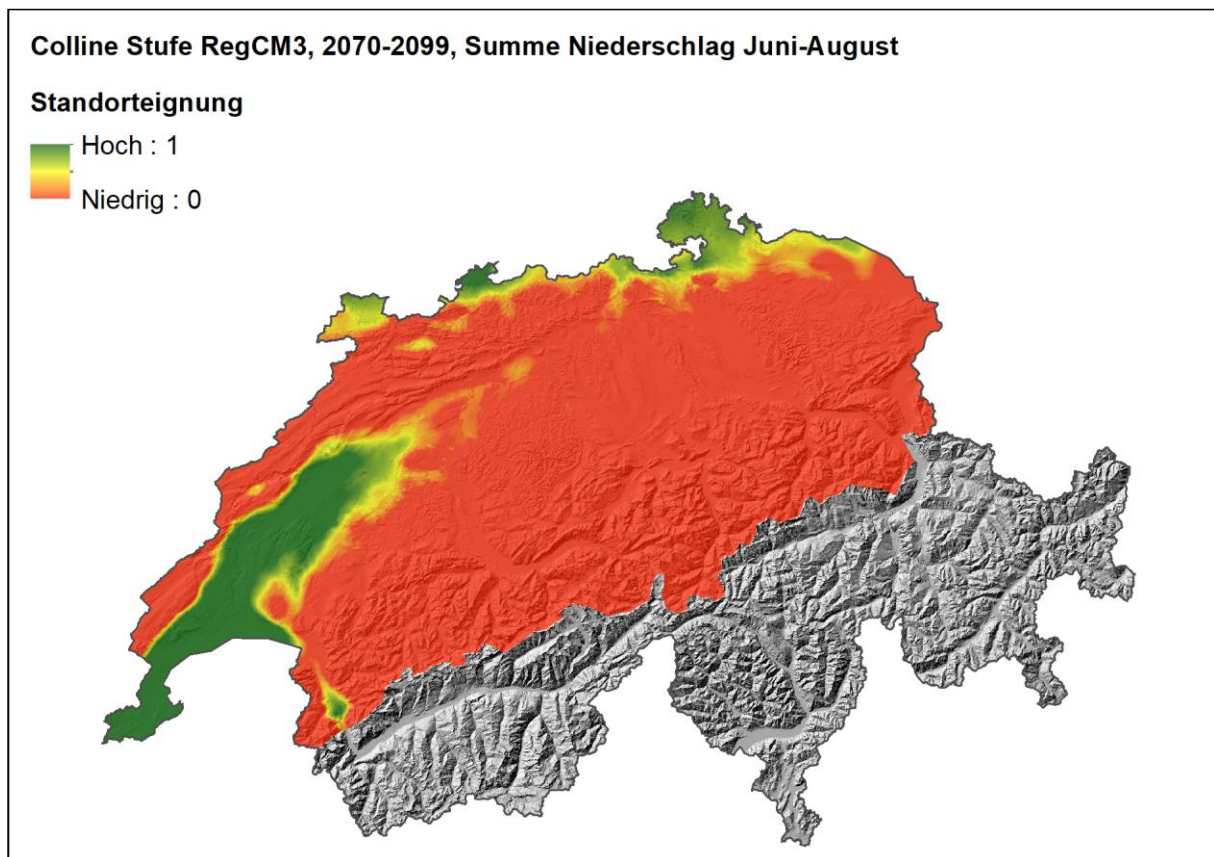


Abb. 209: Modellierte Standorteignung für die colline Stufe, Klimaparameter: Niederschlagssumme Juni- August. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.



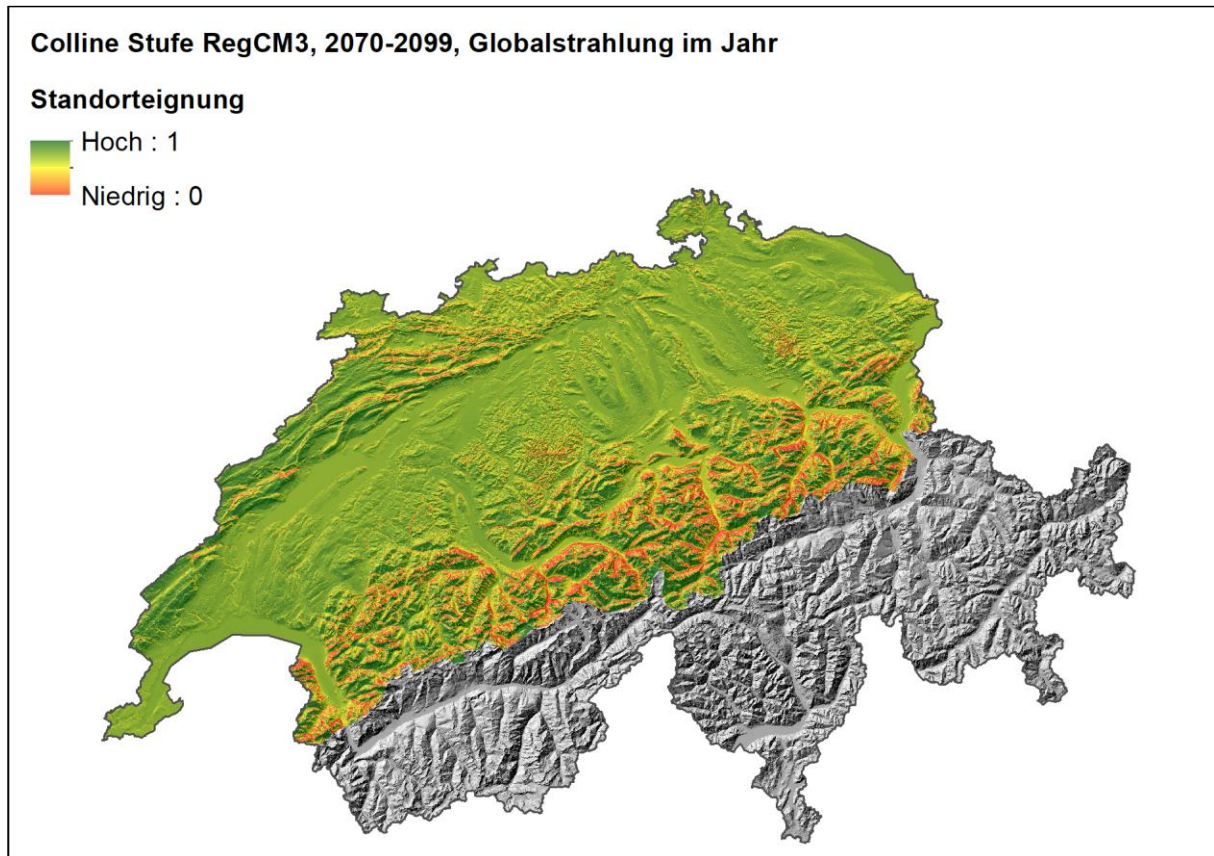


Abb. 210: Modellierte Standorteignung für die colline Stufe, Klimaparameter: Globalstrahlung im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

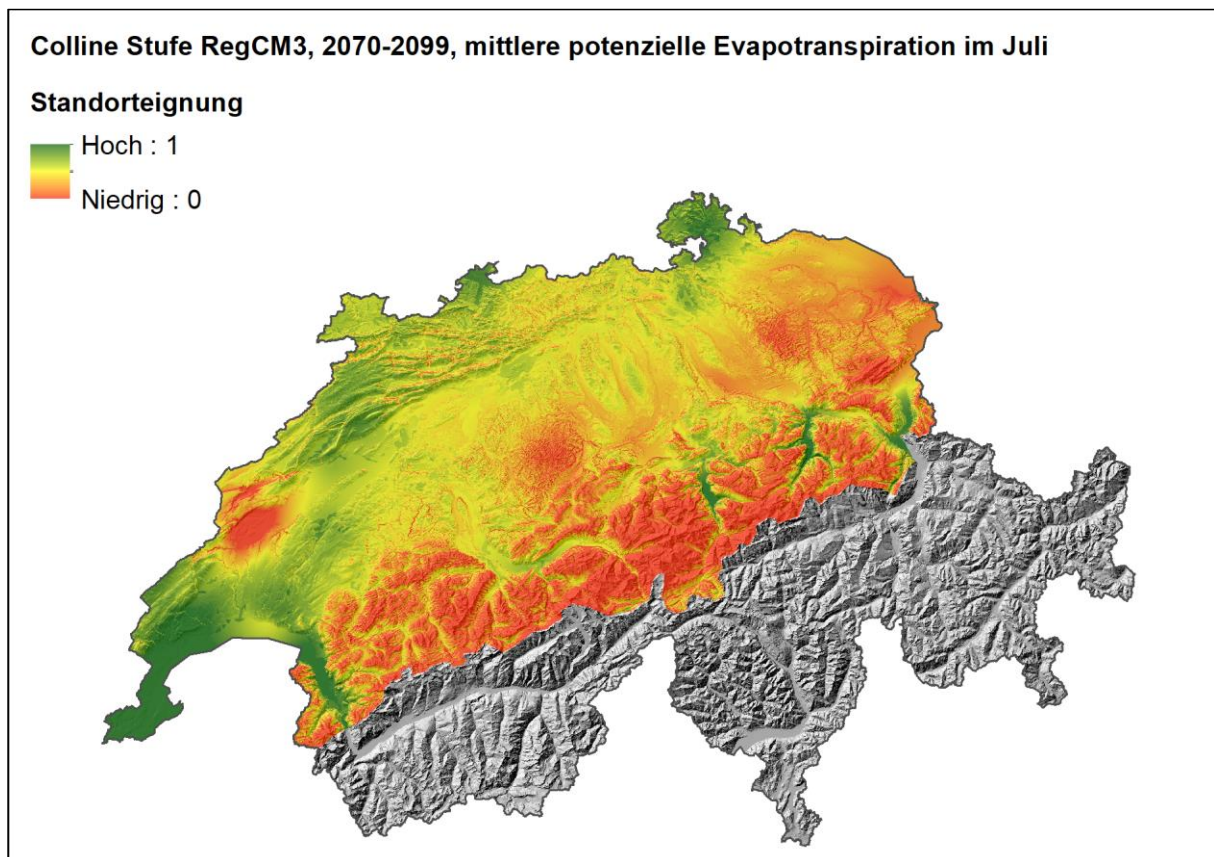


Abb. 211: Modellierte Standorteignung für die colline Stufe, Klimaparameter: Mittlere potenzielle Evapotranspiration im Juli. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

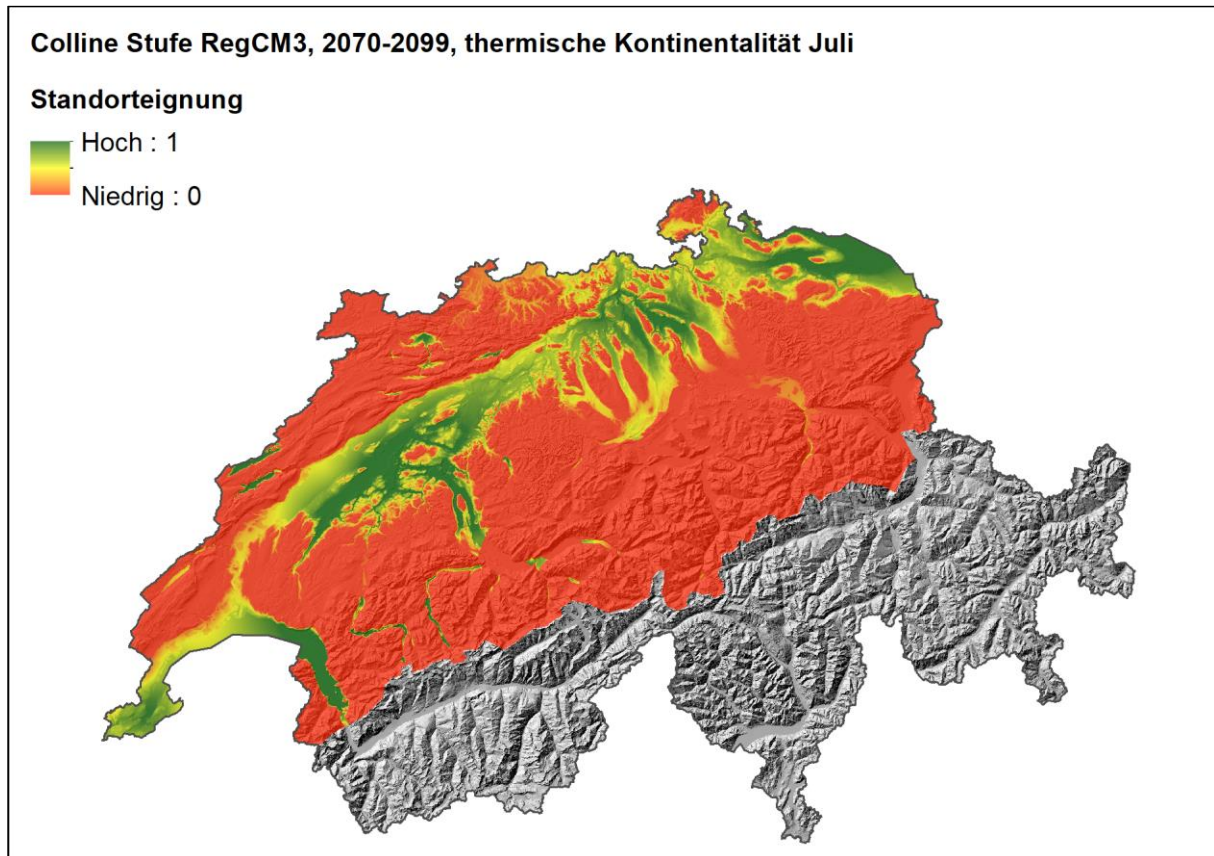


Abb. 212: Modellierter Standorteignung für die colline Stufe, Klimaparameter: Thermische Kontinentalität im Juli. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

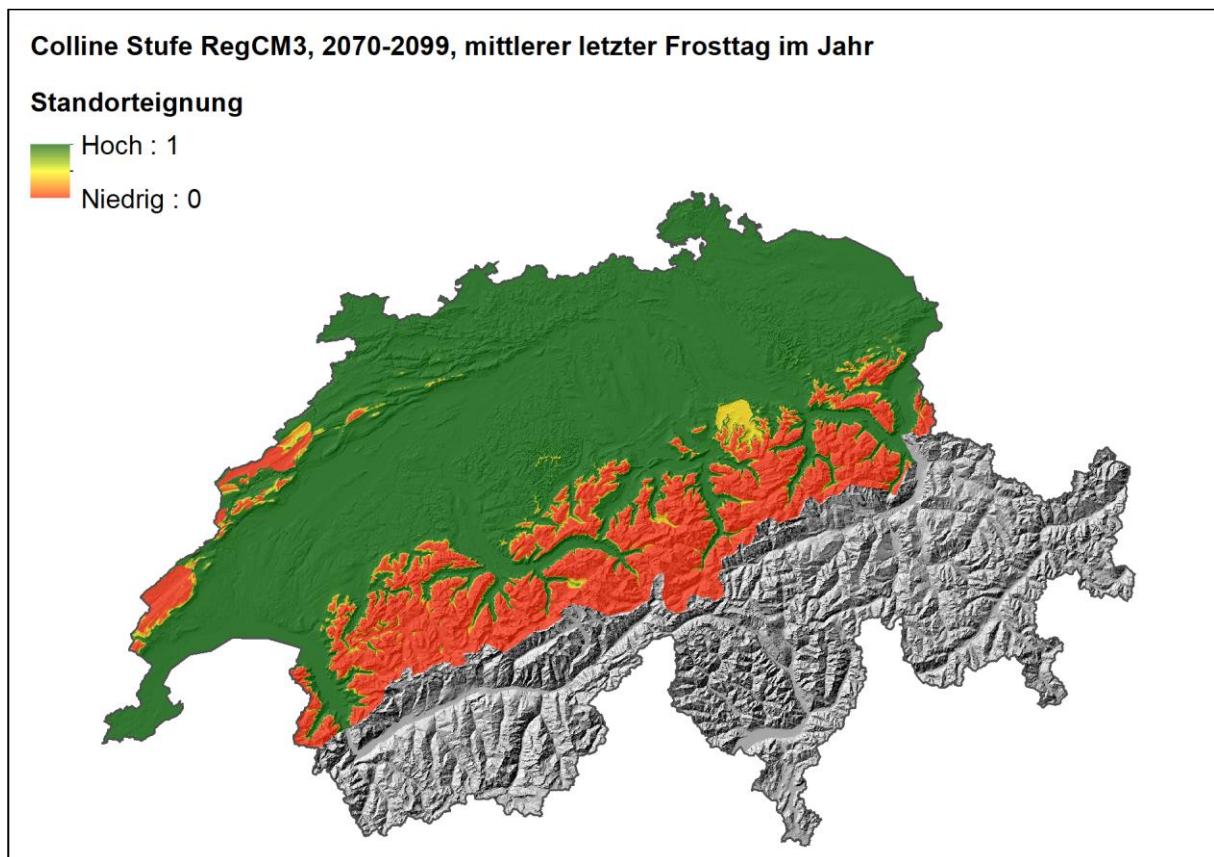


Abb. 213: Modellierter Standorteignung für die colline Stufe, Klimaparameter: Mittlerer letzter Frosttag im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.



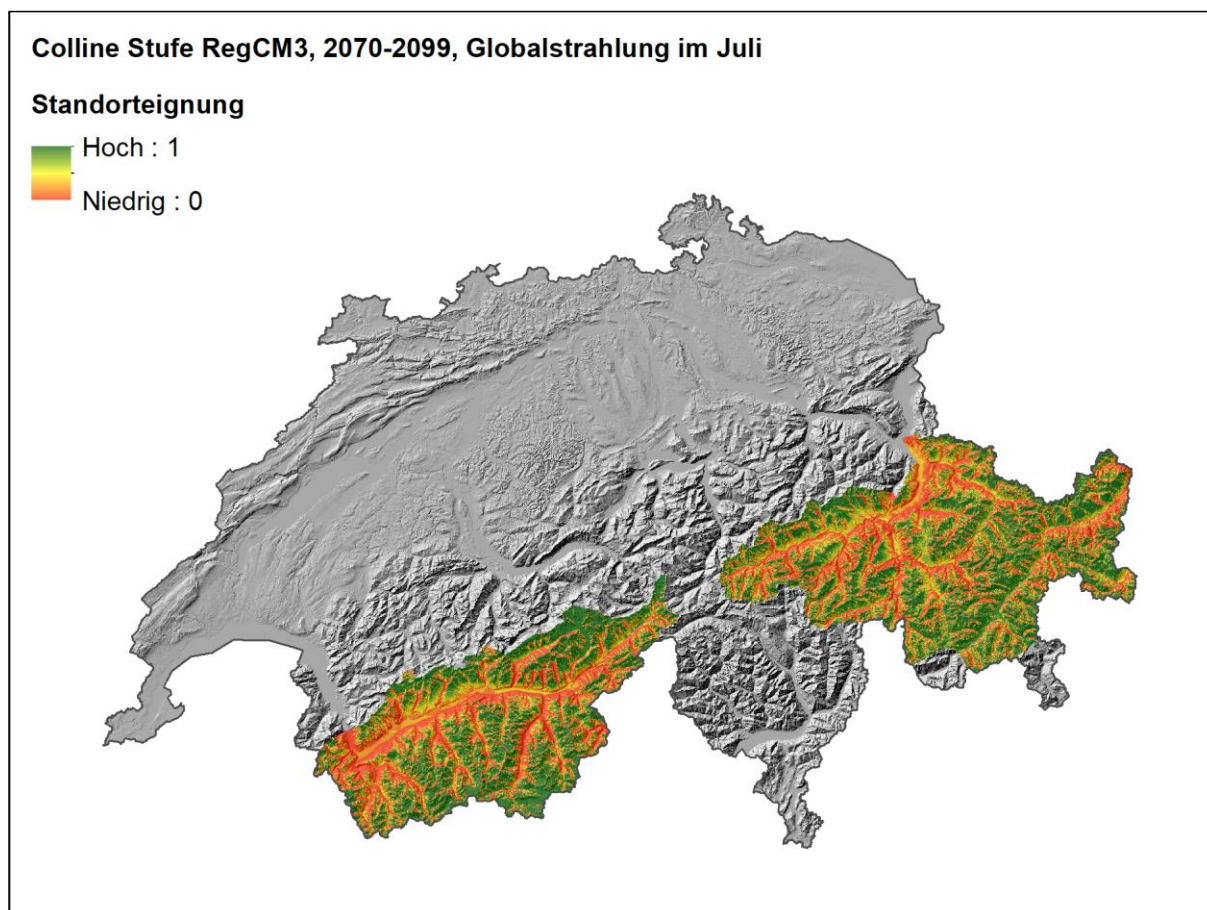


Abb. 214: Modellierte Standorteignung für die colline Stufe, Klimaparameter: Globalstrahlung im Juli. Periode 2070-2099, Klimazukunft RegCM3. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

## 8.11 Abbildungen der collinen Stufe der Klimazukunft CLM

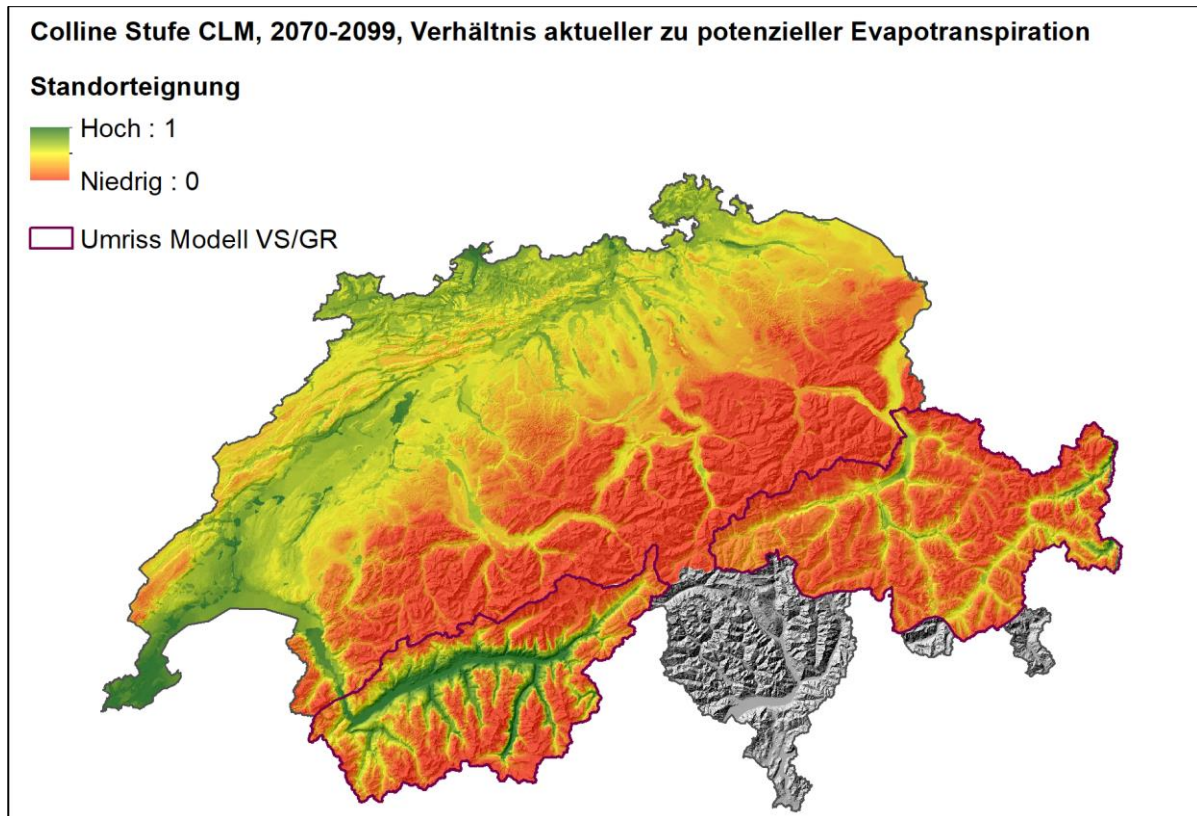


Abb. 215: Modellierte Standorteignung für die colline Stufe, Klimaparameter: Verhältnis aktueller zu potenzieller Evapotranspiration. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

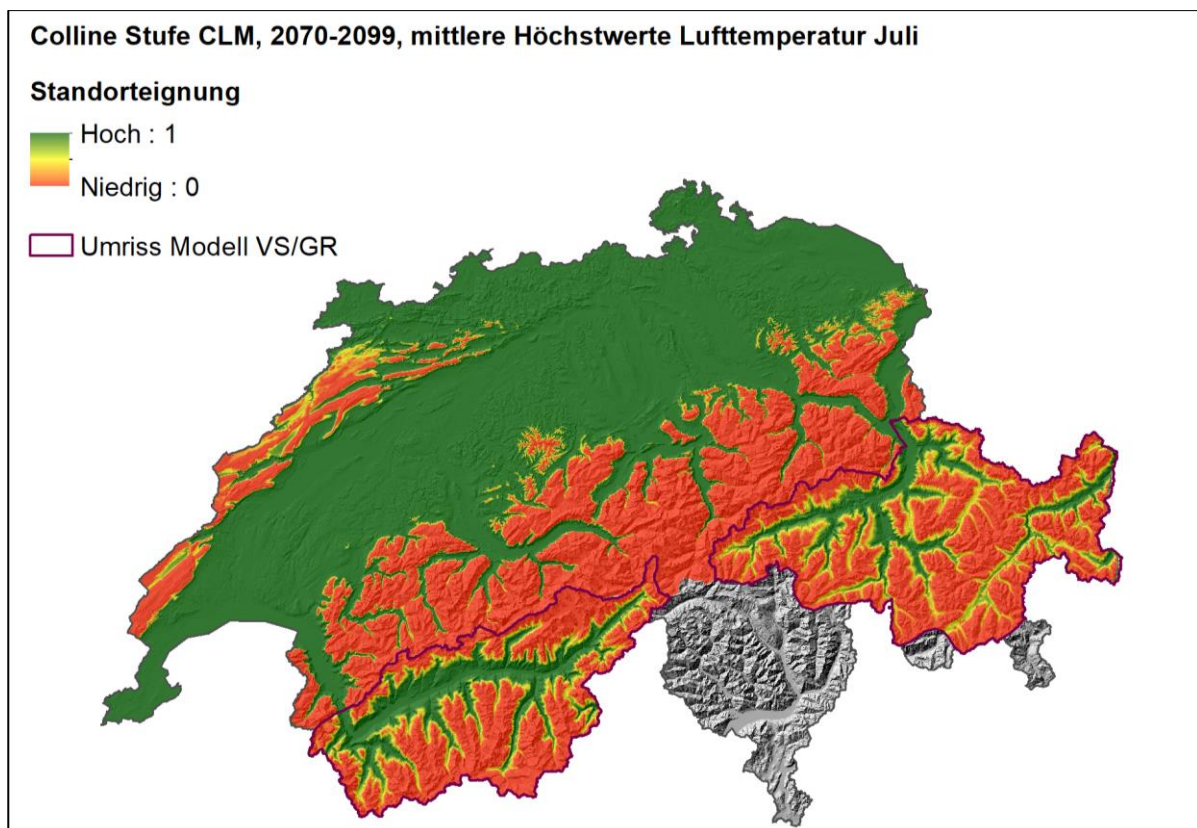


Abb. 216: Modellierte Standorteignung für die colline Stufe, Klimaparameter: Mittlere Höchstwerte Lufttemperatur im Juli. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.



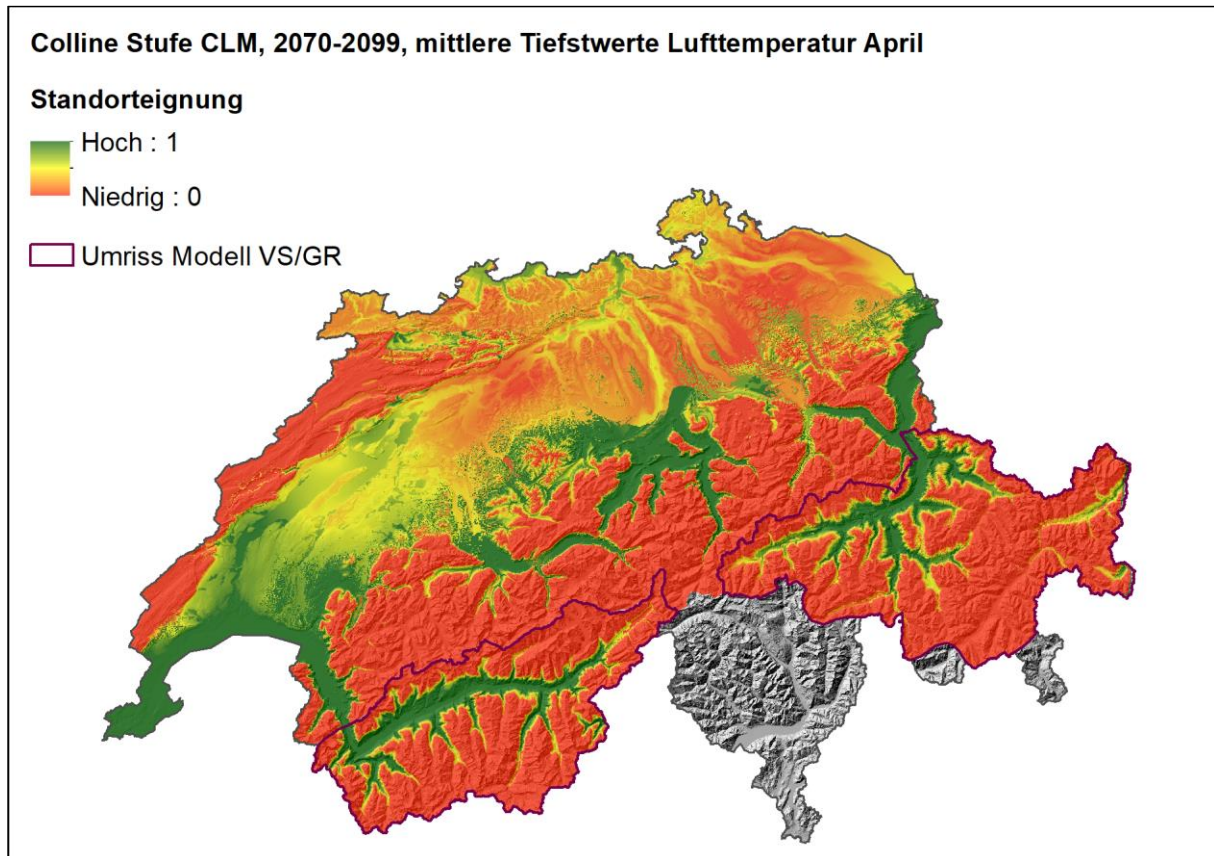


Abb. 217: Modellierte Standorteignung für die colline Stufe, Klimaparameter: Mittlere Tiefstwerte Lufttemperatur im April. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

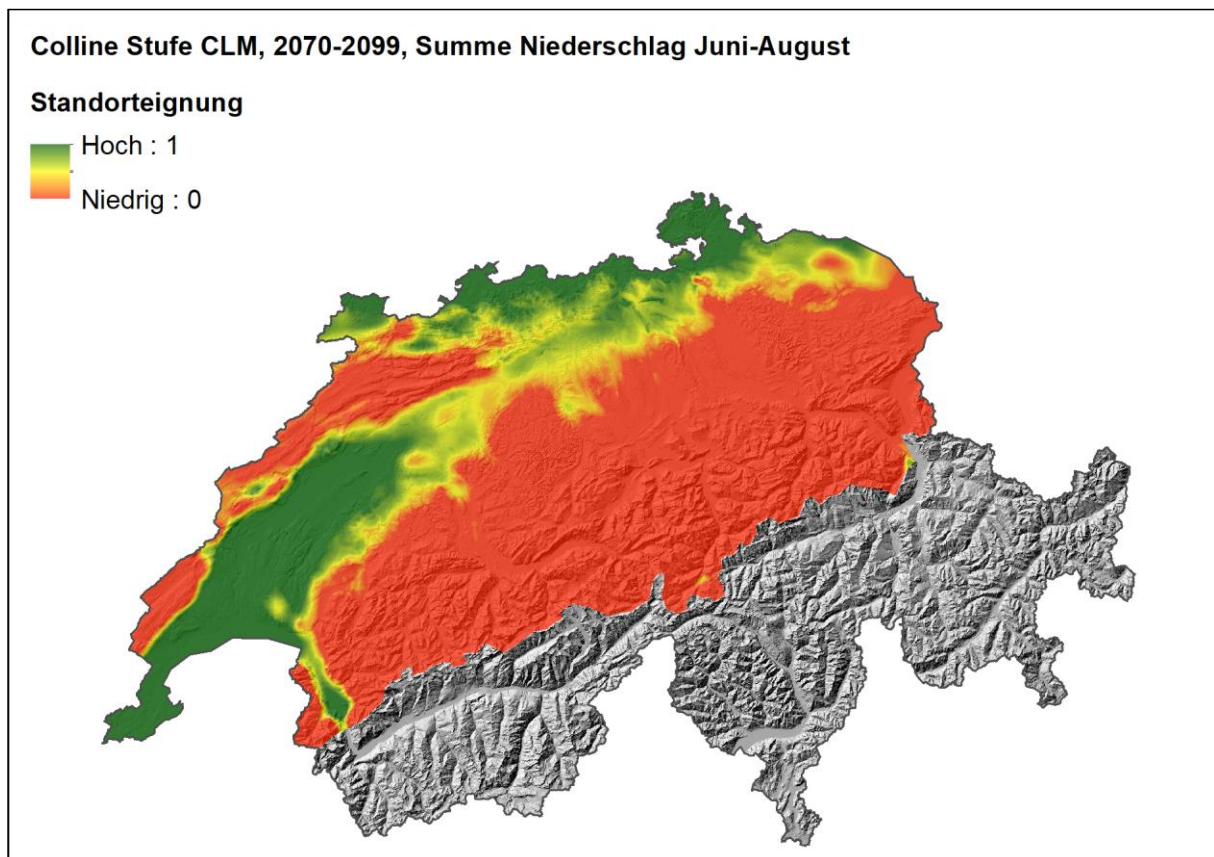


Abb. 218: Modellierte Standorteignung für die colline Stufe, Klimaparameter: Niederschlagssumme Juni- August. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

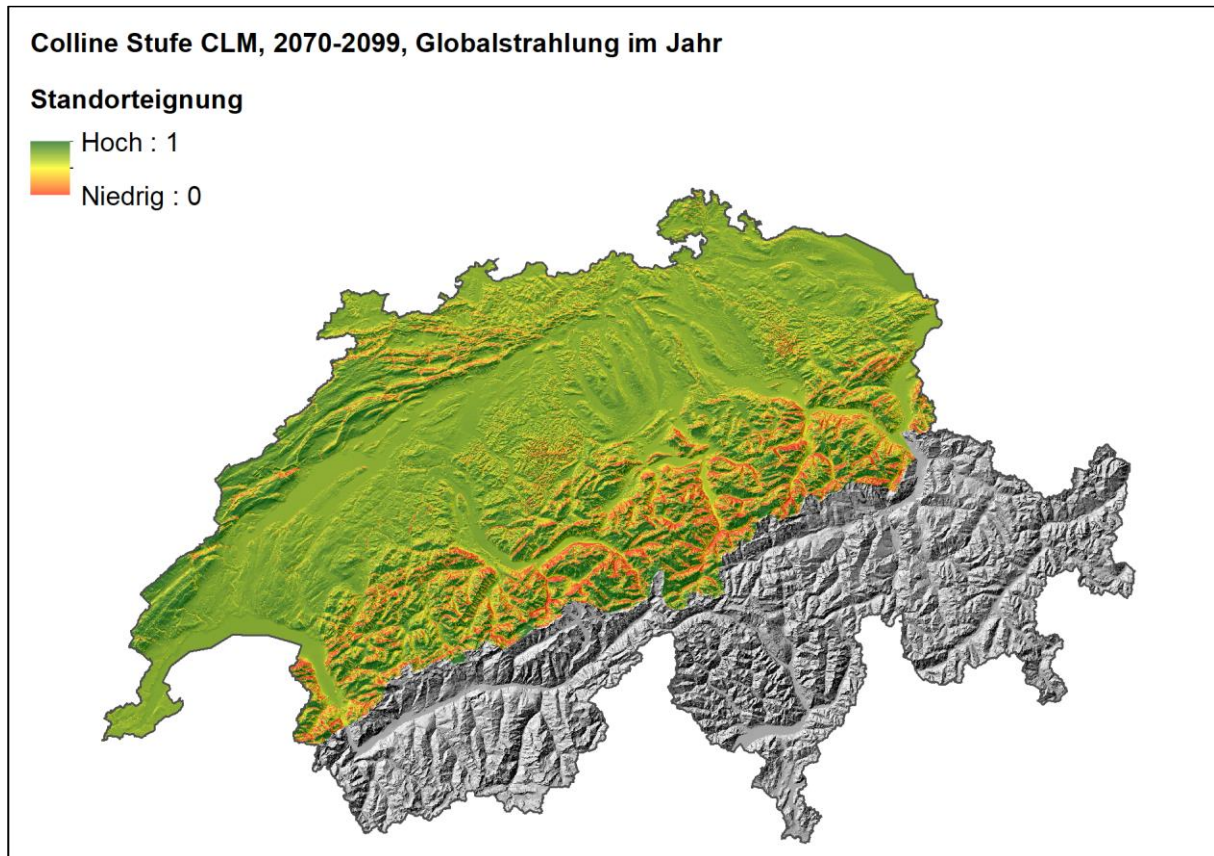


Abb. 219: Modellierte Standorteignung für die colline Stufe, Klimaparameter: Globalstrahlung im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

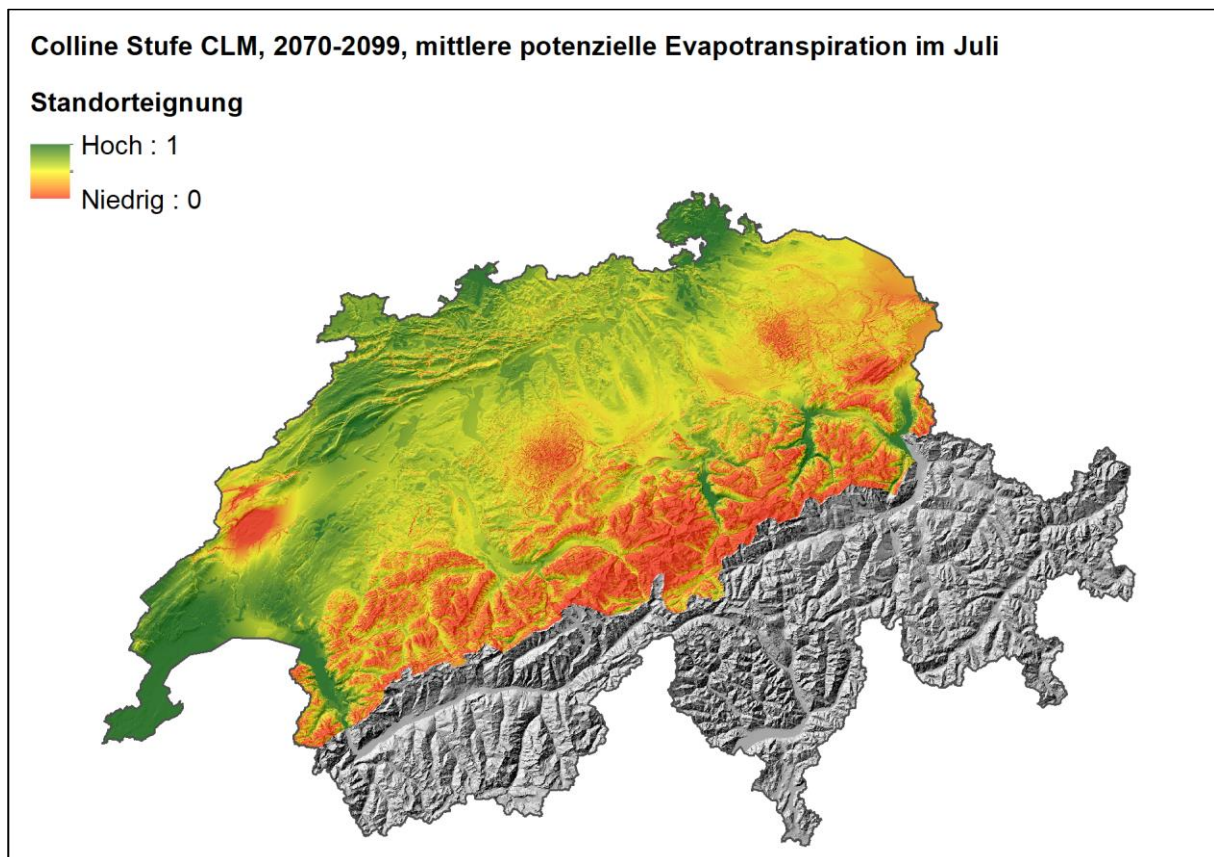


Abb. 220: Modellierte Standorteignung für die colline Stufe, Klimaparameter: Mittlere potenzielle Evapotranspiration im Juli. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.



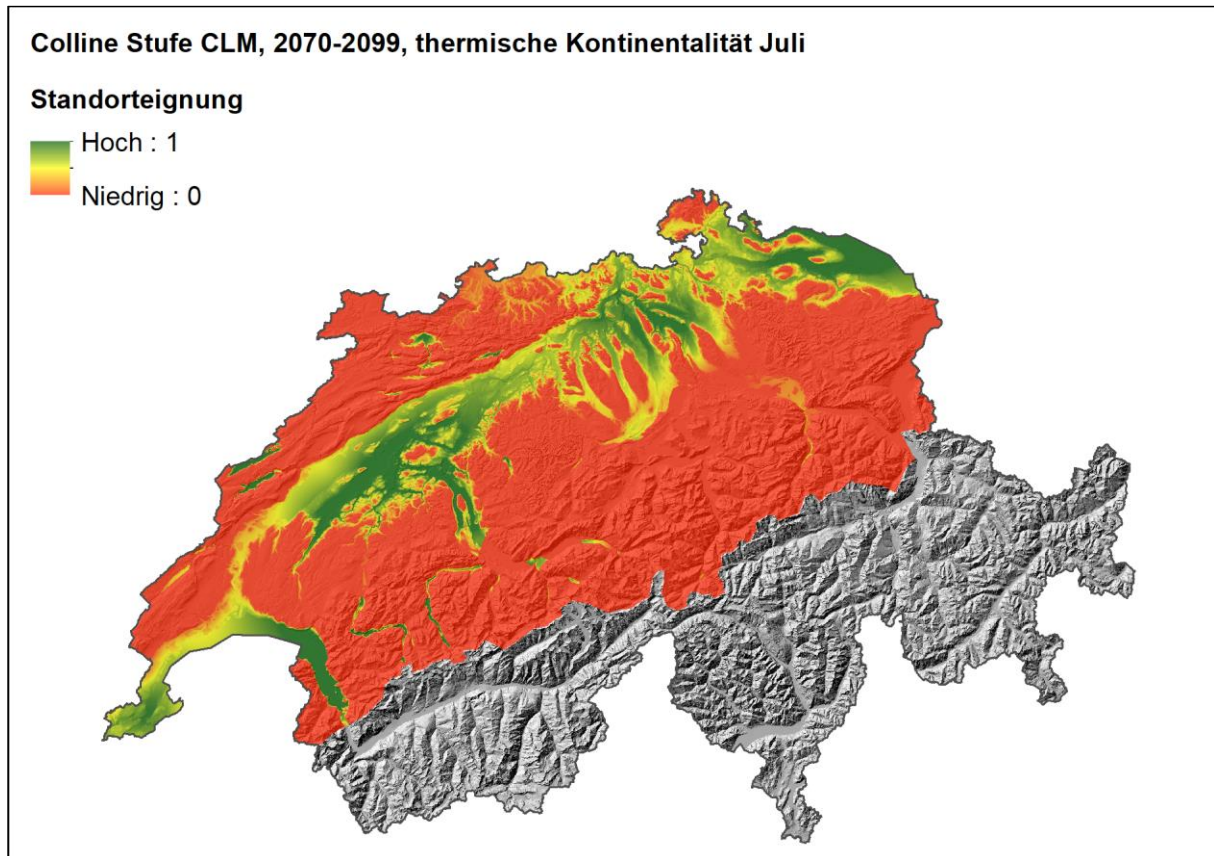


Abb. 221: Modellierte Standorteignung für die colline Stufe, Klimaparameter: Thermische Kontinentalität im Juli. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

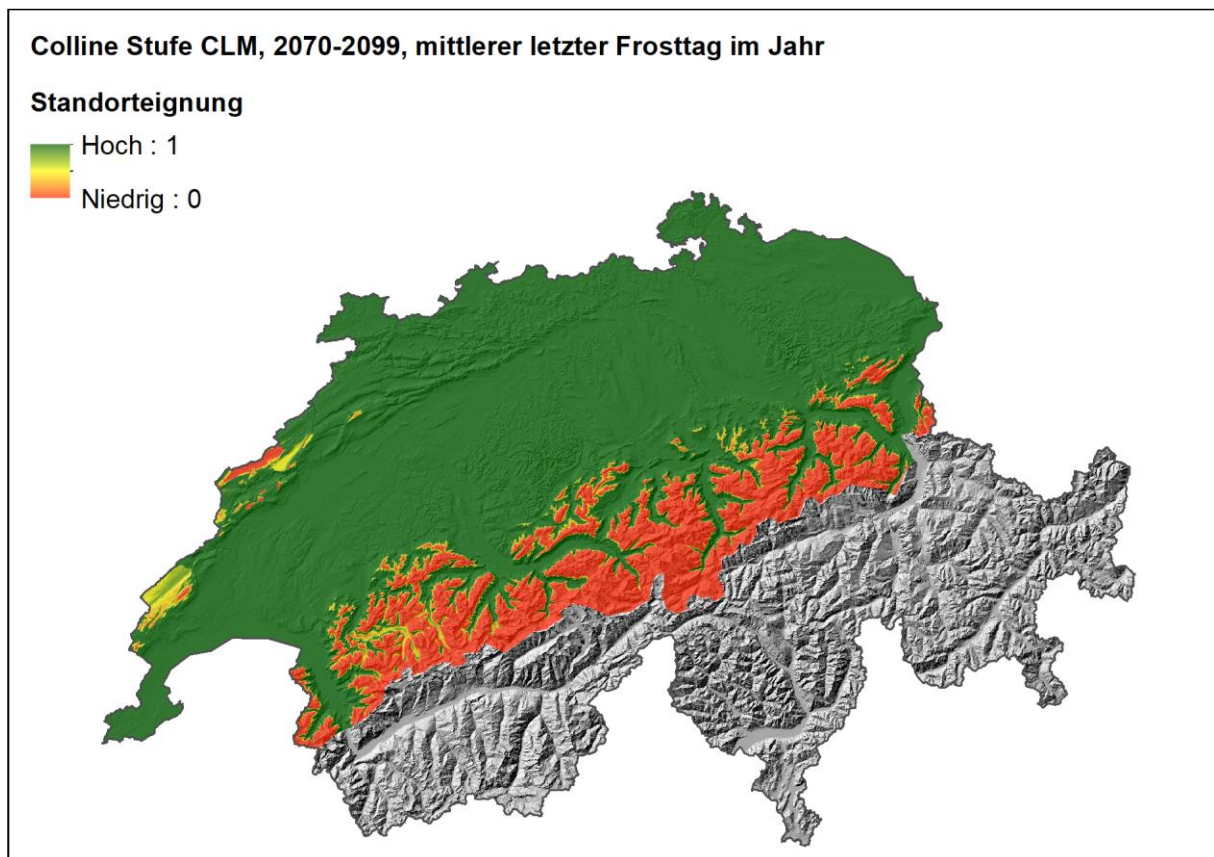


Abb. 222: Modellierte Standorteignung für die colline Stufe, Klimaparameter: Mittlerer letzter Frosttag im Jahr. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.

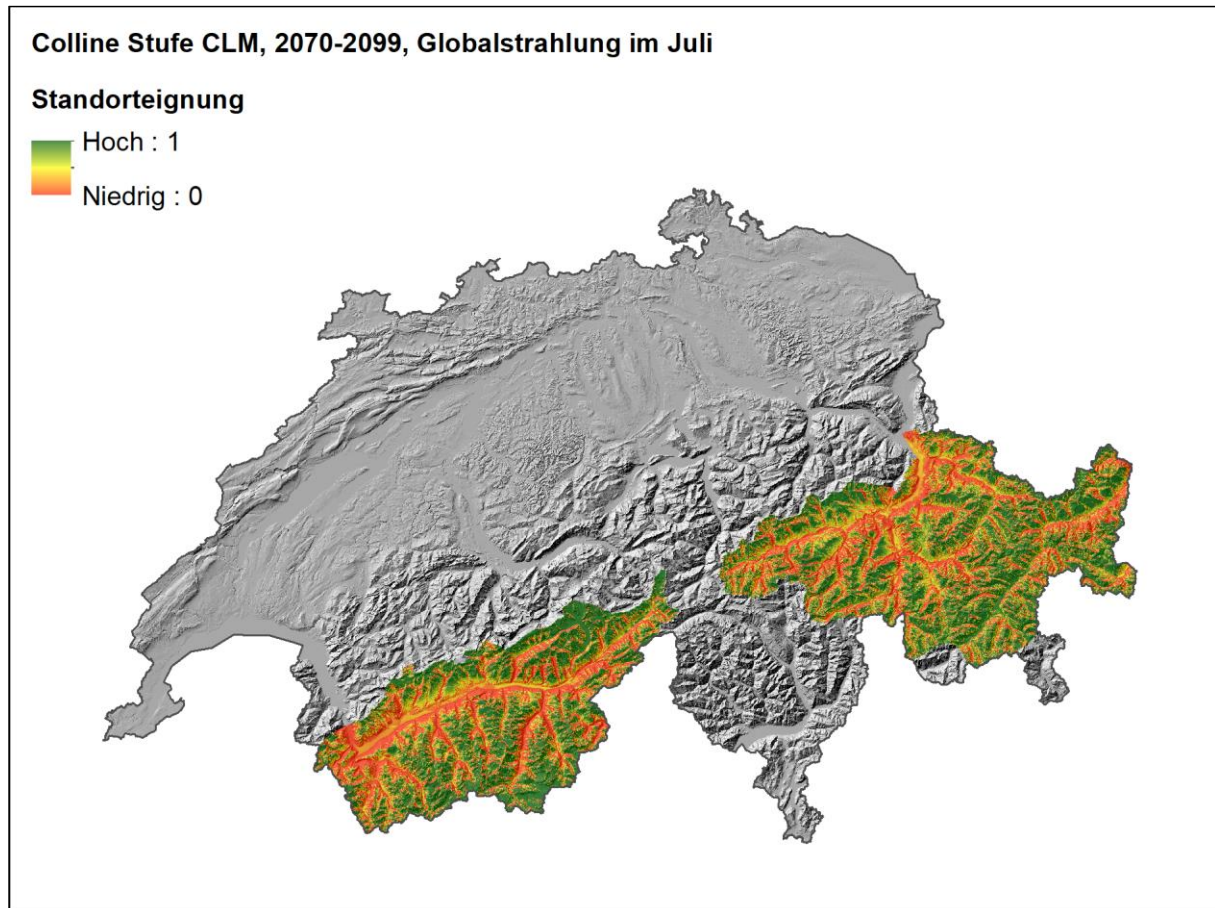
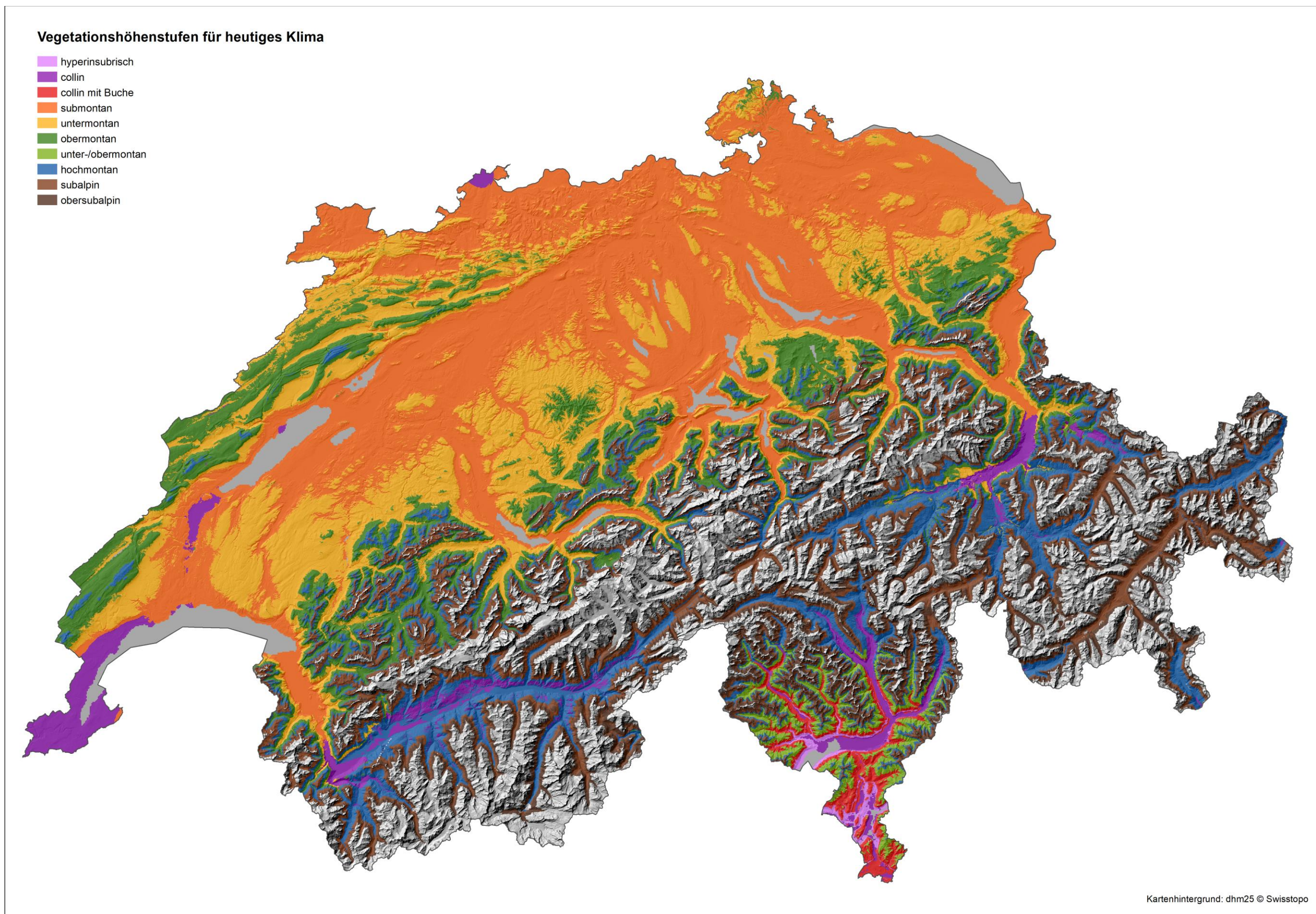


Abb. 223: Modellierte Standorteignung für die colline Stufe, Klimaparameter: Globalstrahlung im Juli. Periode 2070-2099, Klimazukunft CLM. Bezüglich der Werte 0-1 siehe Anmerkungen in Abb. 168.



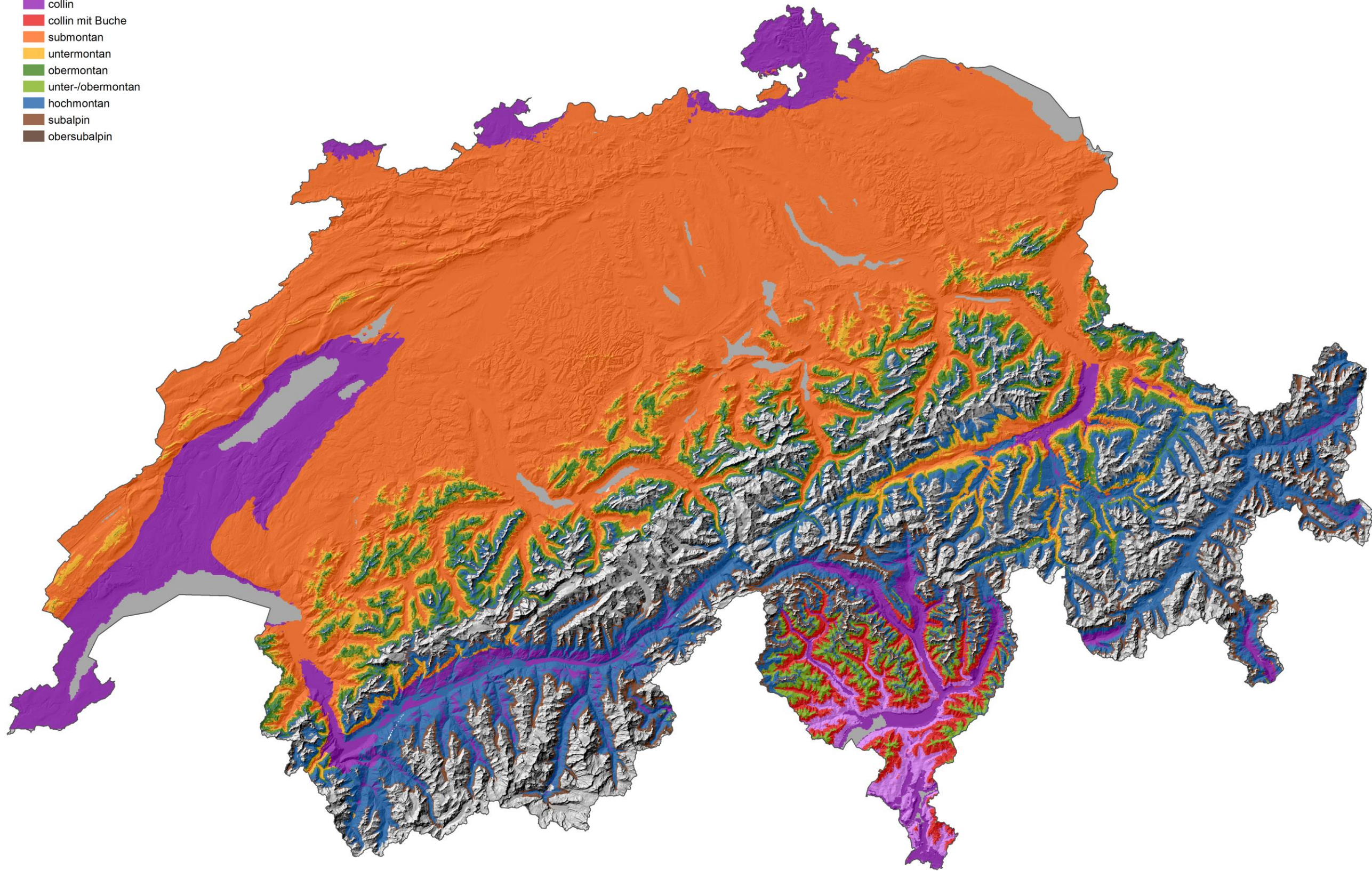
### 8.12 Höhenstufenkarten der Schweiz für heute und für die Periode 2070-2099 unter Annahme der Klimazukünfte RegCM3 und CLM





**Vegetationshöhenstufen RegCM3, Periode 2070-2099**

- hyperinsubrisch
- collin
- collin mit Buche
- submontan
- untermontan
- obermontan
- unter-/obermontan
- hochmontan
- subalpin
- obersubalpin

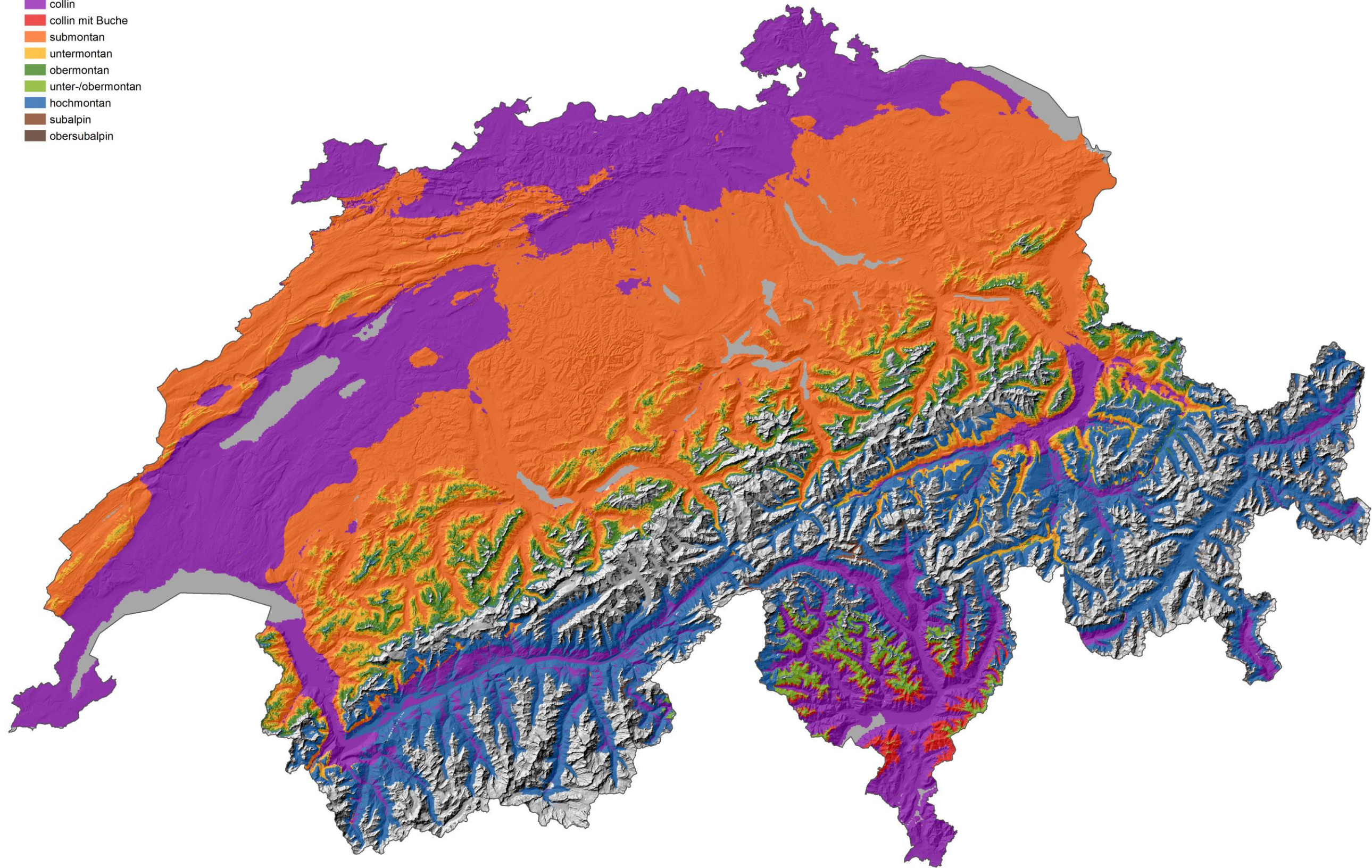


Kartenhintergrund: dhm25 © Swisstopo



### Vegetationshöhenstufen CLM, Periode 2070-2099

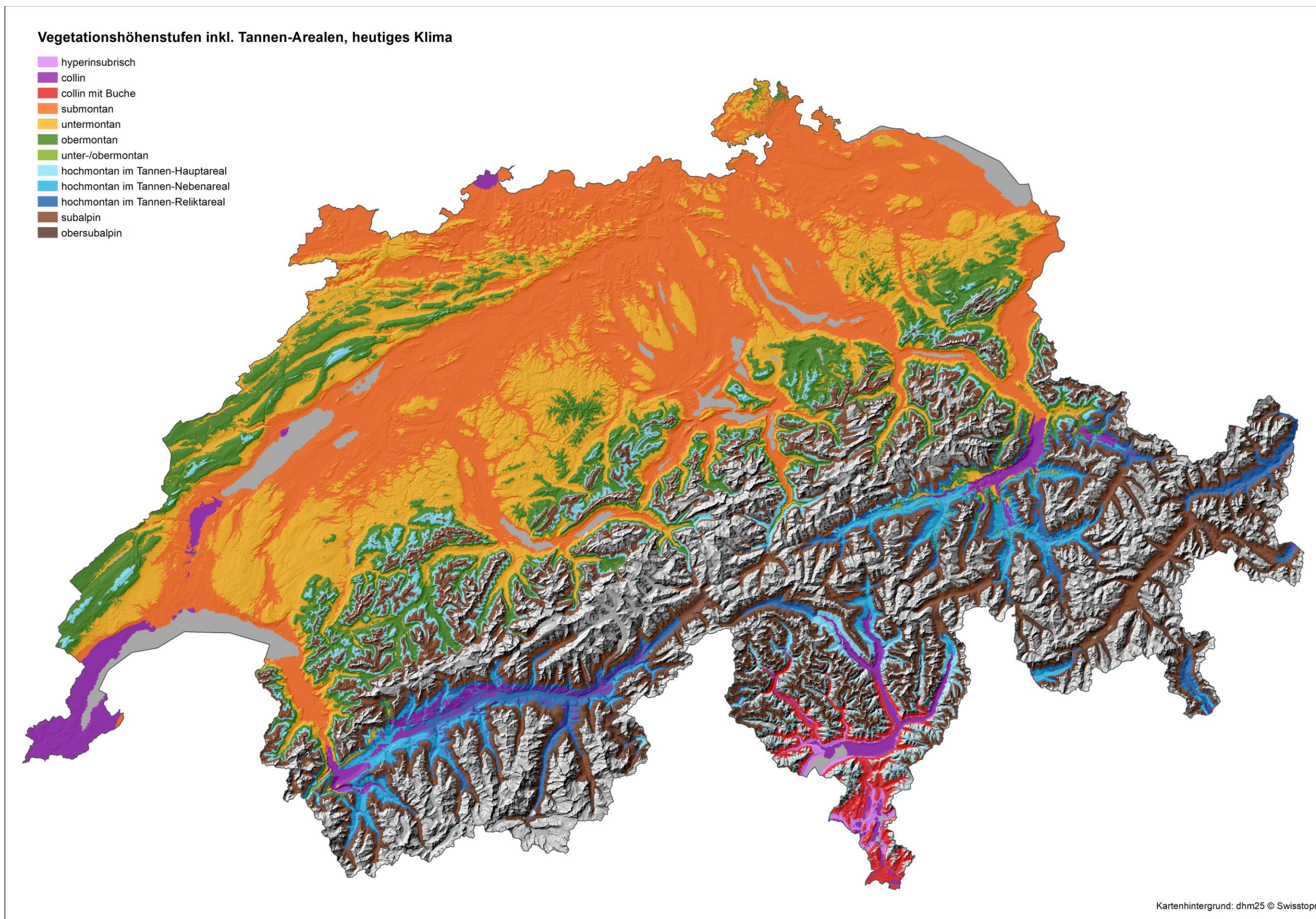
- hyperinsubrisch
- collin
- collin mit Buche
- submontan
- untermontan
- obermontan
- unter-/obermontan
- hochmontan
- subalpin
- obersubalpin



Kartenhintergrund: dhm25 © Swisstopo



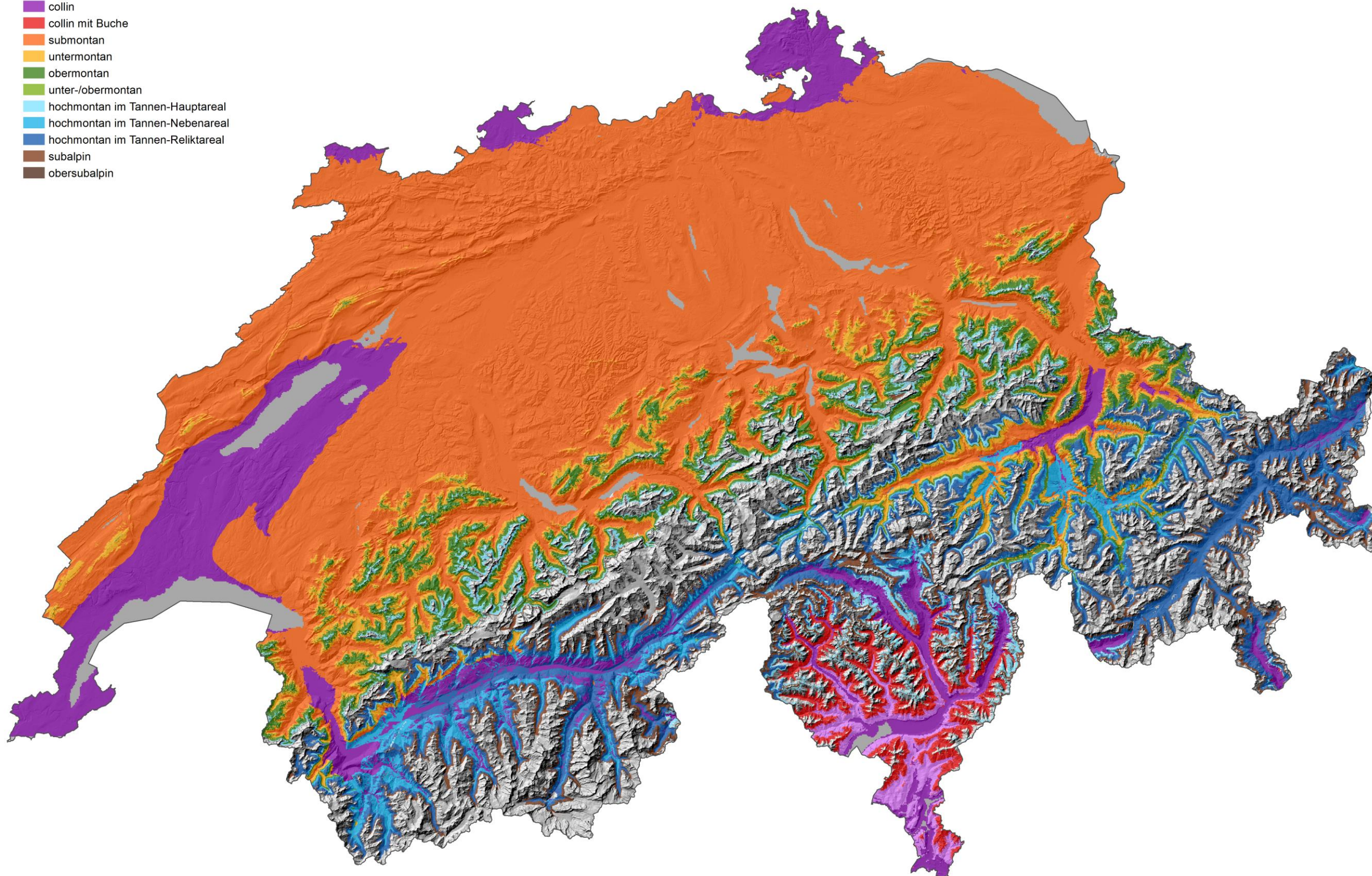
### 8.13 Höhenstufenkarten der Schweiz mit Unterteilung von Tannen-Haupt-, Tannen-Neben- und Tannen-Reliktareal für heute und für 2070-2099 unter Annahme der Klimazukünfte RegCM3 und CLM





Vegetationshöhenstufen inkl. Tannen-Arealen RegCM3, Periode 2070-2099

- hyperinsubrisch
- collin
- collin mit Buche
- submontan
- untermontan
- obermontan
- unter-/obermontan
- hochmontan im Tannen-Hauptareal
- hochmontan im Tannen-Nebenareal
- hochmontan im Tannen-Reliktareal
- subalpin
- obersubalpin

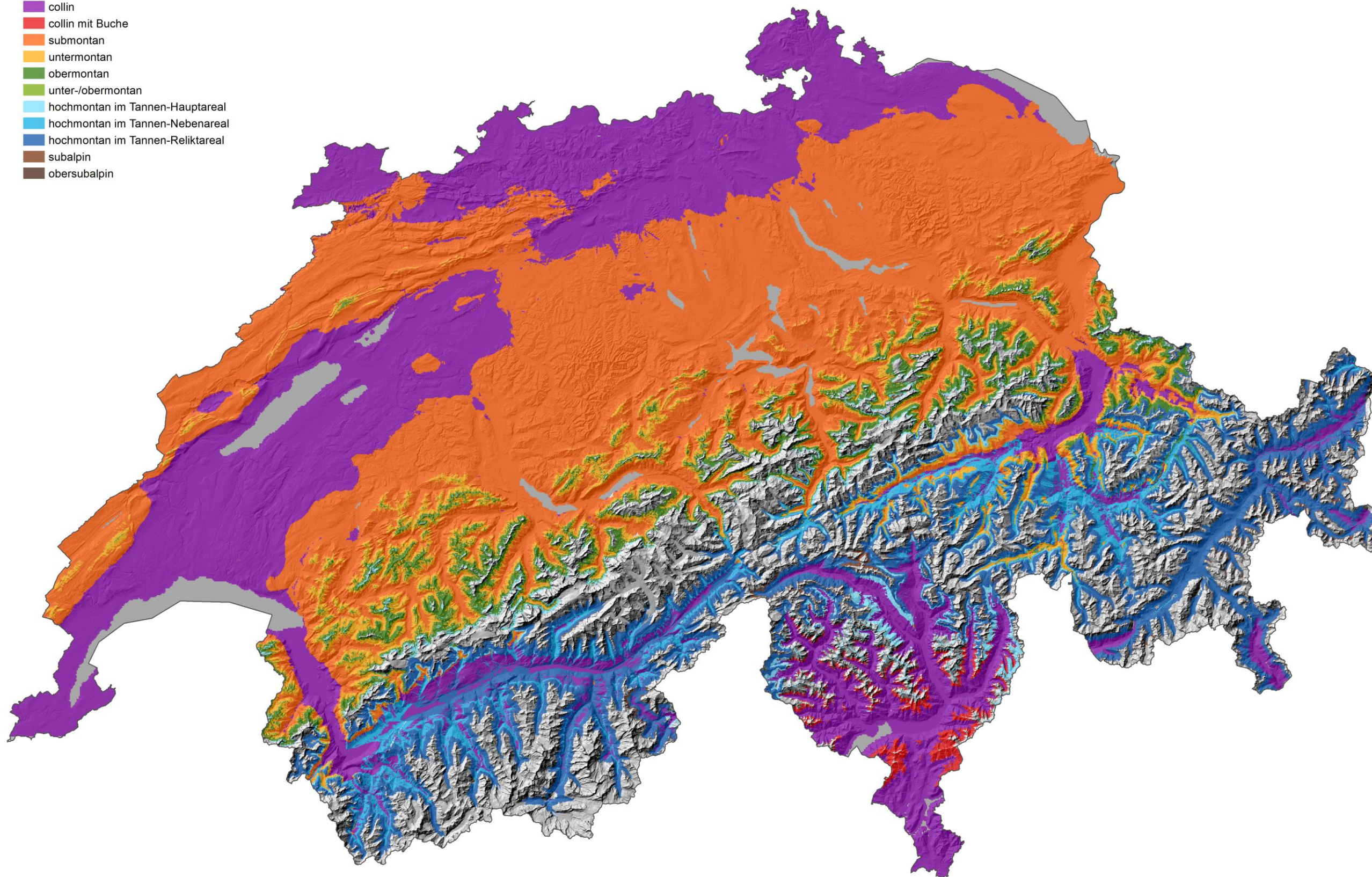


Kartenhintergrund: dhm25 © Swisstopo



**Vegetationshöhenstufen inkl. Tannen-Arealen CLM, Periode 2070-2099**

- hyperinsubrisch
- collin
- collin mit Buche
- submontan
- untermontan
- obermontan
- unter-/obermontan
- hochmontan im Tannen-Hauptareal
- hochmontan im Tannen-Nebenareal
- hochmontan im Tannen-Reliktareal
- subalpin
- obersubalpin



Kartenhintergrund: dhm25 © Swisstopo



## **8.14 Erstellung von Trockenheitsindex-Karten auf Basis von verfeinerten Klimadaten, J. Remund 2016**



Bern, 28. Januar 2016

## **Erstellung von Trockenheitsindex-Karten auf Basis von verfeinerten Klimadaten**

### **Neuberechnung der Karten des Trockenheitsindex ETa/ETp**

---

Auftraggeber:

Bundesamt für Umwelt BAFU  
Dr. Sabine Augustin

Abteilung Wald  
3003 Bern



Version	Datum	Dokument	Projektnummer
1	28.1.2016	Schlussbericht	15_088

Bearbeitung	Name	Datum
Erstellt von	Jan Remund	11.01.2016
Kontrolliert von	Beat Rihm, Sabine Augustin	28.01.2016
Genehmigt von	René Cattin	18.01.2016

Meteotest gewährleistet ihren Kunden eine sorgfältige und fachgerechte Auftragsabwicklung. Jegliche Haftung, insbesondere auch für Folgeschäden, wird im Rahmen des gesetzlich Zulässigen wegbedungen.

## Inhalt

<b>1 Auftrag</b> .....	<b>4</b>
<b>2 Methode</b> .....	<b>5</b>
2.1 Neuberechnung der ETa/ETp-Werte.....	5
<b>3 Resultate</b> .....	<b>6</b>
3.1 Differenz der Temperatur- und Taupunkttemperaturkarten .....	6
3.1.1 Vergleich mit Swisismetnet-Daten .....	9
3.2 Differenz ETa/ETp-Karten .....	10
3.3 Differenz Site Water Balance (SWB)-Karten.....	13

## 1 Auftrag

Im Rahmen des Forschungsprogramms "Wald und Klimawandel" des BAFU und der WSL hat Meteotest seit 2010 verschiedene Datensätze und Analysen für Trockenheitsanalysen von Wäldern berechnet. Insbesondere wurden Karten des ETa/ETp-Verhältnisses während der Vegetationszeit berechnet. Die Karten zeigen die regionale Verteilung der Trockenheit in der Schweiz auf einem 250 x 250 m-Raster.

Im Rahmen eines Projektes im Forschungsprogramm "Wald und Klimawandel" rechnete Ludwig Zraggen (Meteoschweiz) ab 2014 Klimaparameter wie Lufttemperatur und Feuchte auf einem 25 x 25m-Raster. Diese sind in einigen Gebieten neu interpoliert und zielen speziell auf die Berücksichtigung von Föhneinflüssen und Kaltluftseegebieten, die für den Waldbau ökologisch relevant sind.

Es hat sich erwiesen, dass der Parameter ETa/ETp gut geeignet ist um Arealgrenzen der Baumartenverbreitung zu beschreiben. In dem vorliegenden Projekt wird deshalb dieser Parameter auf der Grundlage der 25 x 25-m Klima-Informationen neu berechnet, um in Baumartenverbreitungskarten verwendet zu werden.



## 2 Methode

Die räumlich feiner aufgelösten Meteodaten von Ludwig Zraggen (MeteoSchweiz) wurden nur in Form von Klimakarten der Monate Januar, April, Juli, Oktober und des Jahreswerts (Durchschnitt der Jahre 1981 – 2010) berechnet – also nur für mittlere Zustände und nicht für Zeitreihen. Um die mittleren  $ET_a/ET_p$ -Verhältnisse in der Vegetationszeit zu berechnen, werden zeitlich besser aufgelöste Daten und Zeitreihen benötigt.

Deshalb werden in einem ersten Schritt die Klimawerte der beiden Datengrundlagen der Periode 1981–2010 und der Monate Januar, April, Juli und Oktober von Zraggen und Meteotest verglichen und die Differenzen bestimmt. Dabei werden nur die lokalen Differenzen auf dem 250-m-Raster berücksichtigt, d.h. die Raster von Zraggen werden vorgängig von 25 m auf 250 m Zellengrösse aggregiert. Die monatlichen Differenzen der Temperatur und Taupunkttemperatur werden kartographisch dargestellt, um die regionalen Unterschiede sichtbar zu machen.

Diese Differenzen werden zwischen den vier Kernmonaten der Jahreszeiten für alle Monatswerte linear interpoliert und die Zeitreihen der Meteodaten von Meteotest damit korrigiert. Auf eine Anpassung der Differenzen in Abhängigkeit des Schönwetteranteils wird vorerst verzichtet.

Die Temperatur- und Taupunkttemperatur-Klimatologien von Zraggen wurde zu Testzwecken mittels linearer Regression an die Klimatologien von Remund angepasst. Die Resultate (Trockenheitsindex, SWB) änderten sich mit dieser Anpassung aber nur unwesentlich und auf eine Darstellung wurde deshalb hier verzichtet.

### 2.1 Neuberechnung der $ET_a/ET_p$ -Werte

Die korrigierten monatlichen Zeitreihen (250 m Raster, 1981–2010) der Temperatur und der Taupunkttemperatur werden zusammen mit den bereits vorhandenen Niederschlags und Winddaten verwendet, um die monatlichen  $ET_a/ET_p$ -Verhältnisse flächenhaft neu zu berechnen und daraus schlussendlich neue  $ET_a/ET_p$ -Werte (der Vegetationszeit) zu rechnen. Diese werden dargestellt und mit den bislang vorhandenen Karten verglichen.

Zum Vergleich wird auch die Differenz zwischen der auf den Berechnungen von L. Zraggen basierenden SWB-Karte und der auf der (bisherigen) Remund (Meteotest) basierenden SWB-Karte dargestellt.

### 3 Resultate

#### 3.1 Differenz der Temperatur- und Taupunkttemperaturkarten

Die Differenzen zwischen den Karten der jährlichen Mittelwerte (1981-2010) der Temperatur- und Taupunkttemperaturen zwischen den Klimatologien von Remund und Zgraggen sind in den Abbildungen 1-4 dargestellt.

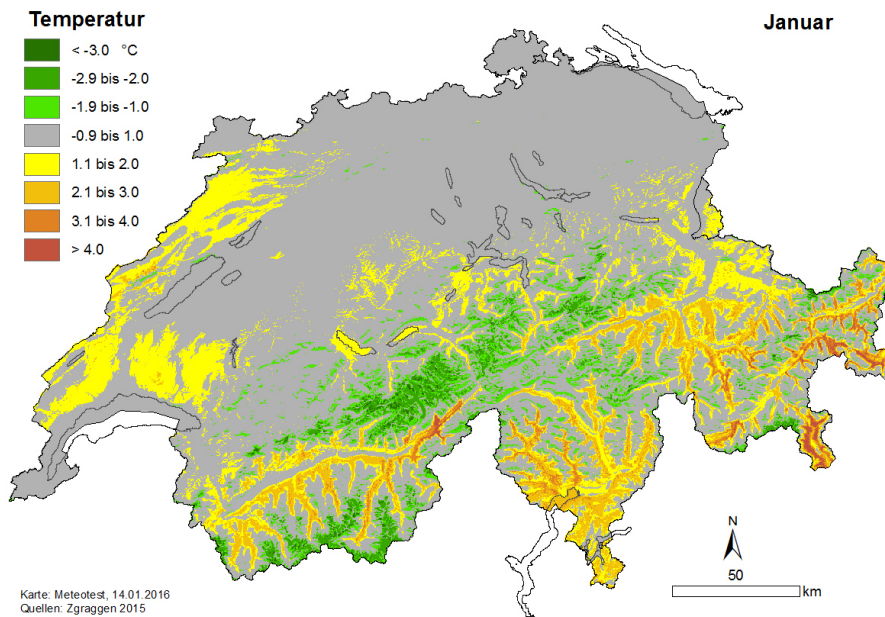


Abbildung 1: Differenzkarte der **Januar-Temperatur** (Zgraggen-Remund)

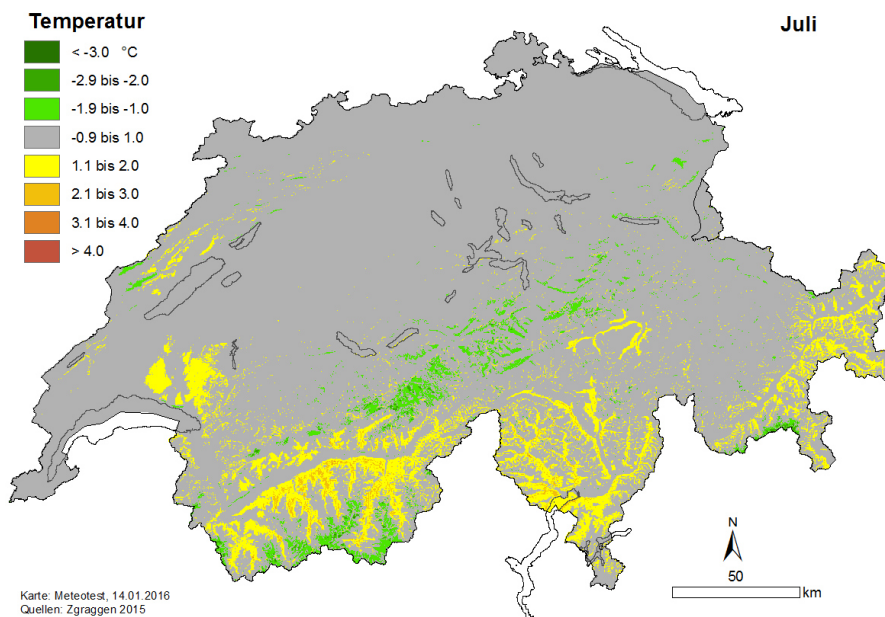


Abbildung 2: Differenzkarte der **Juli-Temperatur** (Zgraggen-Remund)

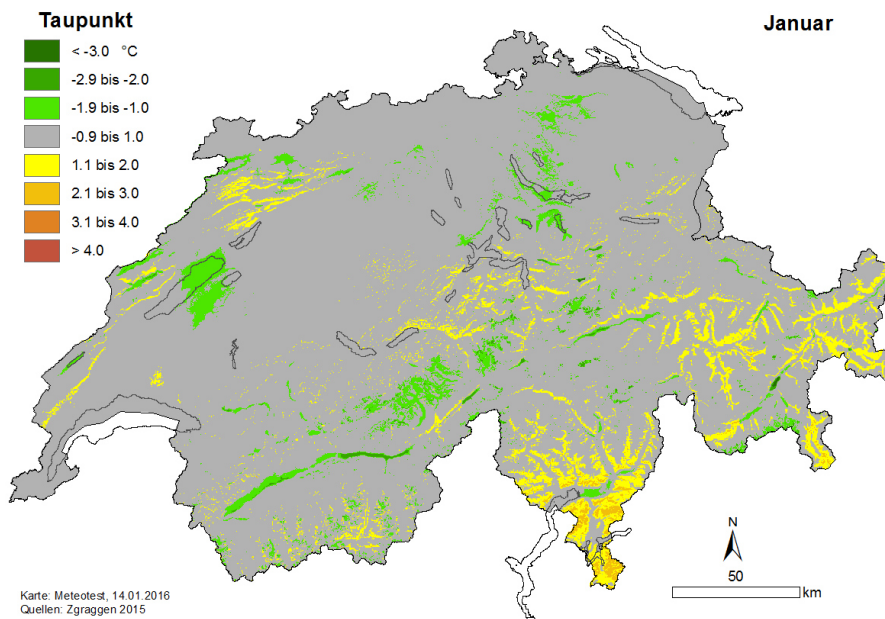


Abbildung 3: Differenzkarte der **Januar-Taupunkttemperatur** (Zgraggen-Remund)

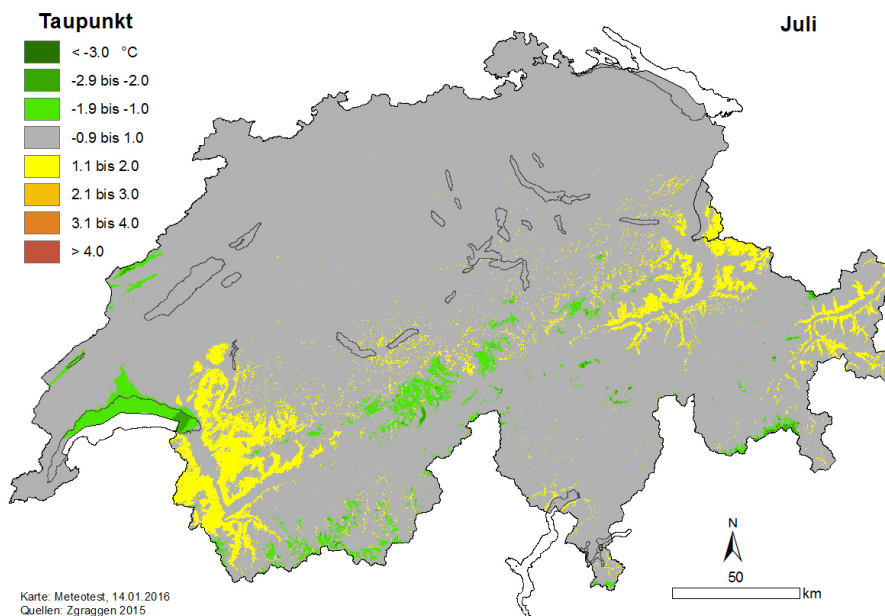


Abbildung 4: Differenzkarte der **Juli-Taupunkttemperatur** (Zgraggen-Remund)

Bei der Lufttemperatur fallen vor allem die Gebiete in den Alpen und im Tessin auf. Im hochalpinen Bereich (grüne Gebiete, z.B. Berner oder Walliser Alpen) sind die Temperaturwerte von Remund höher, in vielen Tälern Graubündens, des Wallis und des Tessins diejenige von Zgraggen. Im engeren Bereich der stärksten Kaltluftseen (Obergoms und Oberengadin) sind die Unterschiede der Januar-Temperatur relativ gering. Die grössten Unterschiede sind in den angrenzenden

Gebieten zu sehen. Der wahrscheinliche Grund dafür ist, dass die Ausdehnung der Kaltluftseen bei Remund nicht regional eingegrenzt wird; dies wurde im Ansatz von Zraggen gutachterlich durchgeführt. Tabelle 1 enthält die Flächenanteile unterteilt nach Grösse der Abweichungen. Im Januar sind die Abweichungen grösser als im Sommer.

Tabelle 1: Flächenanteile der Abweichungen der Januar- und Juli-**Temperatur** bezogen auf gesamte Schweizer Fläche unterhalb 2500 m.ü.M.

Klasse	Abs. Differenz	Anteil an Gesamtfläche [%] Januar	Anteil an Gesamtfläche [%] Juli
1	< 1°C	64	82
2	≥ 1 bis 3°C	33	18
3	≥ 3°C	3	0
Total	-	100	100

Die Taupunkttemperatur basierend auf den Berechnungen von Remund ist in den Berner Alpen höher, die Klimatologie basierend auf den Berechnungen von Zraggen in den westlichen Alpen und im Winter im Tessin. Die Unterschiede in den Alpen konnten auf Grund der verschiedenen Lage-Analysen der Interpolationsmethoden erwartet werden. Die Unterschiede im Tessin kommen wahrscheinlich durch die Berücksichtigung von unterschiedlichen Wetterstationen zu Stande. Tabelle 2 enthält die Flächenanteile unterteilt nach Grösse der Abweichungen. Im Gegensatz zur Lufttemperatur sind die Anteile im Sommer und Winter gleich gross – und entsprechen den Anteilen der Differenzen der Juli-Temperatur.

Tabelle 2: Flächenanteile der Abweichungen der Januar- und Juli-**Taupunkttemperatur** bezogen auf gesamte Schweizer Fläche unterhalb 2'500 m.ü.M.

Klasse	Abs. Differenz	Anteil an Gesamtfläche [%] Januar	Anteil an Gesamtfläche [%] Juli
1	< 1°C	82	82
2	≥ 1 bis 3°C	18	18
3	≥ 3°C	0	0
Total	-	100	100



### 3.1.1 Vergleich mit Swisismetnet-Daten

Zum Vergleich wurden beide Klimatologien zudem mit Messwerten der Meteo-schweiz (Swisismetnet) verglichen. Tabellen 3–5 zeigen die mittleren und extremsten Abweichungen.

Tabelle 3: Mittlere Abweichungen zwischen Bodenmessungen (in 2 m Höhe) – Karten (Jahreswerte), TT = Lufttemperatur; TD = Taupunkttemperatur

Klimatologie	TT [°C] Mittel	TT [°C] Standardabw.	TD [°C] Mittel	TD [°C] Standardabw.
Remund	-0.2	0.4	0.0	0.1
Zgraggen	0.3	0.4	0.1	0.6

Tabelle 4: Stationen mit grössten Abweichungen bez. Temperatur (tiefste und höchste Abweichung der Jahresmittel)

Klimatologie	Min [°C] $\Delta$ TT	Min [°C] Ort	Max [°C] $\Delta$ TT	Max [°C] Ort
Remund	-2.2	Gösgen (AG)	0.5	Grimsel-Hospiz (BE)
Zgraggen	-0.8	Neuchâtel (NE)	1.5	Vicosoprano (TI)

Tabelle 5: Stationen mit grössten Abweichungen bez. Taupunkttemperatur (tiefste und höchste Abweichung der Jahresmittel)

Klimatologie	Min [°C] $\Delta$ TD	Min [°C] Ort	Max [°C] $\Delta$ TD	Max [°C] Ort
Remund	-0.3	Robbia (GR)	0.4	Grimsel-Hospiz (BE)
Zgraggen	-1.6	Buffalora (GR)	1.3	Cimetta (TI)

Die Abweichungen der Temperatur-Interpolationen sind statistisch relativ klein, was nicht erstaunt, da die meisten Meteo-Stationen auch für die Herstellung der Klimatologien verwendet wurden. Die Standardabweichung der Taupunkttemperatur ist bei Zgraggen etwas erhöht.

### 3.2 Differenz ETa/ETp-Karten

Die folgenden Karten zeigen die Mittelwerte des ETa/ETp-Verhältnisses der Periode 1981-2010 (Sommermonate). Abbildung 5 zeigt den Mittelwert basierend auf der Klimatologie "Remund", Abbildung 6 den Mittelwert basierend auf der Klimatologie "Zgraggen" und Abbildung 7 die Differenz zwischen Remund und Zgraggen.

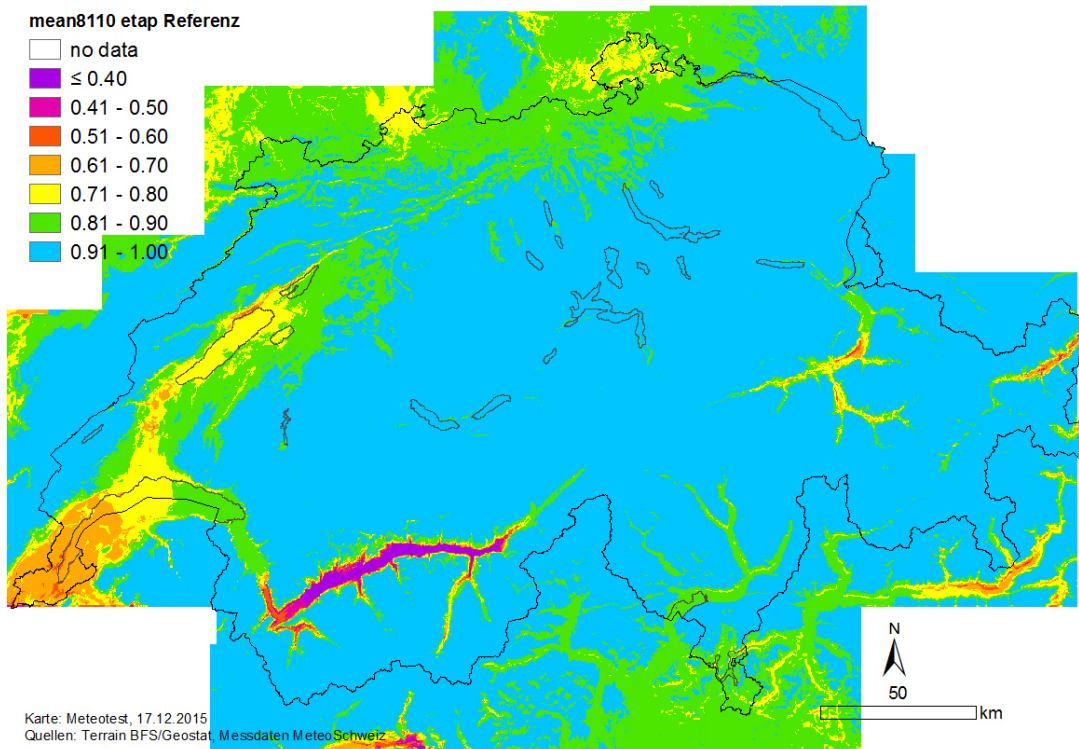


Abbildung 5: Karte des ETa/ETp-Verhältnisses basierend auf Remund.

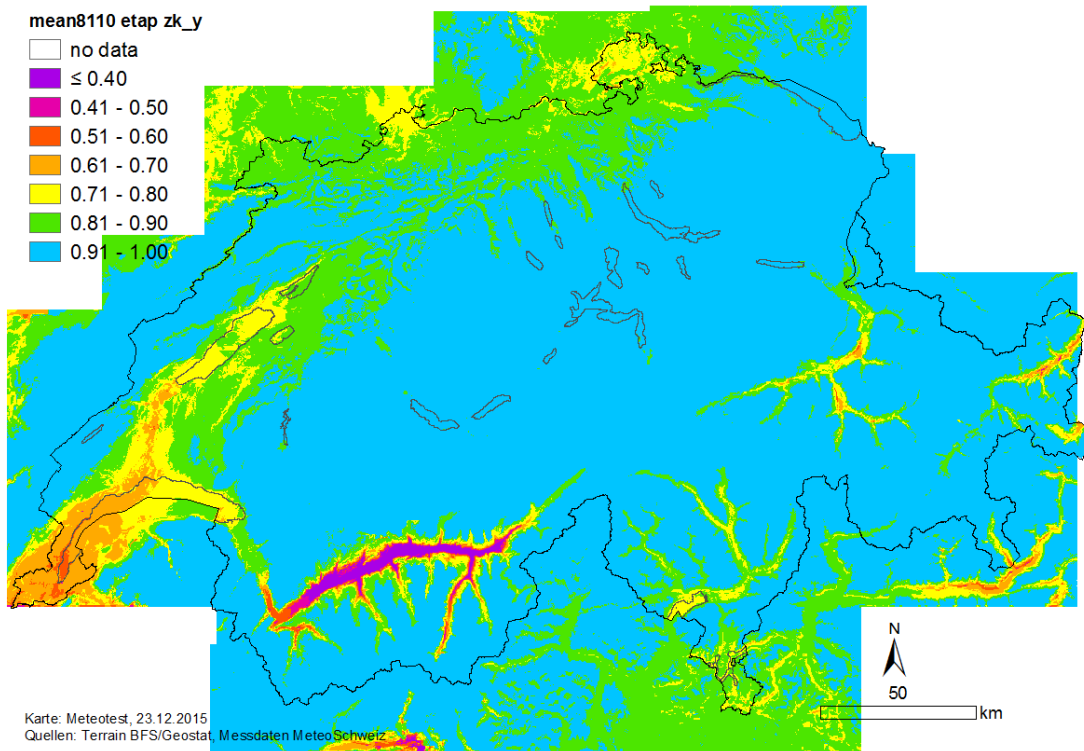


Abbildung 6: Karte des ETa/ETp-Verhältnisses basierend auf Zgraggen.

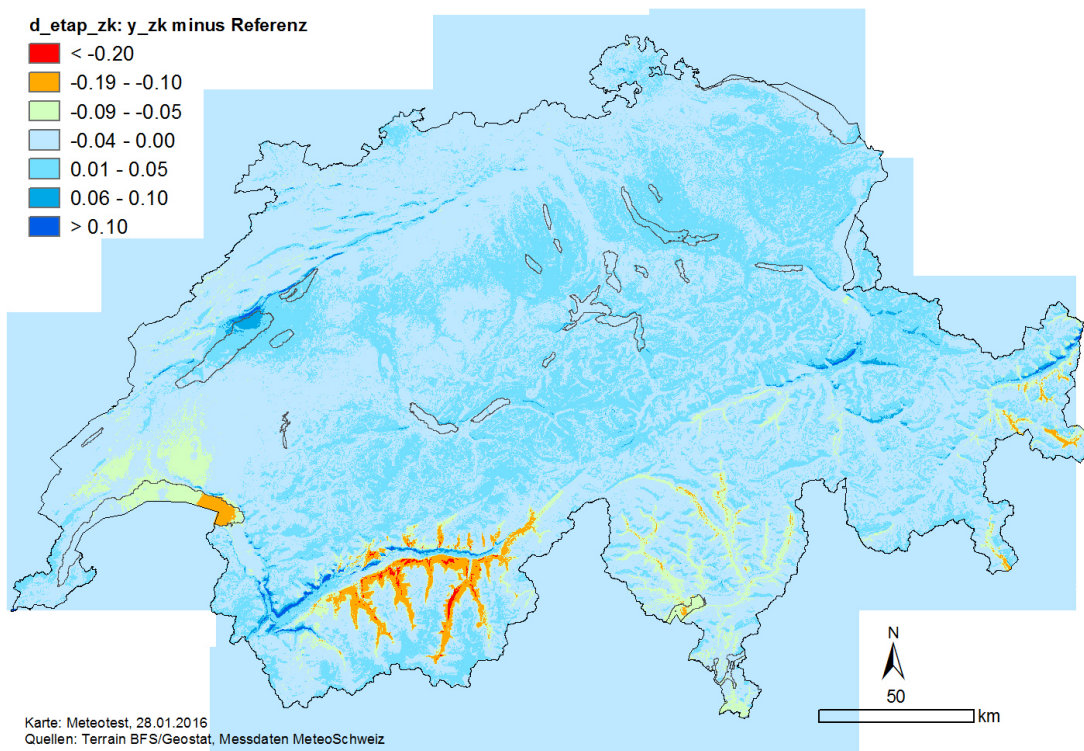


Abbildung 7: Differenzkarte des ETa/ETp-Verhältnisses zwischen Zgraggen und Remund.

Die Differenzen zwischen den beiden Klimatologien sind relativ gering. Einzig im Wallis treten deutliche Unterschiede auf. Während der Südhang des Haupttals mit der Klimatologie von Remund etwas trockener ist (blaue Flächen), sind die Südtäler bei Zraggen deutlich trockener. Diese Unterschiede sind wahrscheinlich durch die unterschiedlichen Interpolationsmethoden bedingt.

Bei der Methode von Remund wurden die Nord- und Südhänge automatisch klassiert und die Temperatur- und Feuchtwerte korrigiert. Dies ist wahrscheinlich der Grund für die Unterschiede an den Südhängen (Jura, Wallis, Churer Rheintal, Unterengadin). Die Unterschiede im Südwallis sind durch die kühleren Sommertemperaturen von Remund bedingt (Abbildung 2). Auch diese sind teilweise eine Folge der Lageklassifizierung: die Werte von den an Süd- oder Südwesthängen gelegenen Walliser Stationen Montana und Evolène/Villa wurden automatisch angepasst, d.h. für die Nordhanggebiete nach unten korrigiert. Da die Klimatologie von Remund allerdings an den Messstandorten (z.B. Montana, Zermatt) nur kleine Unterschiede aufweisen, ist davon auszugehen, dass ein erheblicher Teil der Differenzen durch die Interpolationsmethode von Zraggen bedingt ist.

Die Regionen mit den grössten Unterschieden bei der Januar-Temperatur sind nicht deckungsgleich mit den Regionen der grössten Unterschiede des Trockenheitsindex. Dies weist darauf hin, dass die Januar-Temperatur (oder allgemein die Wintertemperaturen) keinen grossen Einfluss auf den Trockenheitsindex ETa/ETp hat.

Trotz der Unterschiede der Taupunkttemperaturen im Tessin sind die Trockenheitsindizes dort kaum unterscheidbar. Ausserhalb der Alpen fällt nur die Region um Neuchâtel auf, wo die Klimatologie von Remund etwas trockenere Verhältnisse anzeigt.

Die Unterschiede sind interessanterweise nicht in den stärksten Föhn- oder Kaltluftseegebieten zu finden, wie auf Grund der unterschiedlichen Methoden zu erwarten war. Auch die Unterschiede im Tessin sind kaum durch Föhn bedingt, da diese im Maggia- als auch im Tal des Tessins ähnlich gross sind.

Flächenmässig sind die Gebiete mit grösseren Unterschieden gering (Tabelle 6). 97% der Waldflächen weisen nur kleine Unterschiede von -10 bis +10% auf. Der Anteil der Gebiete, bei denen Zraggen trockenere Verhältnisse berechnet, ist grösser als der entsprechende Anteil bei Remund.

Tabelle 6: Flächenanteile (aller Waldflächen) von drei Differenzklassen ETa/ETp

Klasse	Differenz	Fläche [ha]	Anteil an Gesamtfläche [%]
1	< -0.10	35'230	3.03%
2	-0.10 – 0.10	1'123'296	96.62%
3	> 0.10	4'113	0.35%
Total	-	1'162'639	100%



### 3.3 Differenz Site Water Balance (SWB)-Karten

Zum Vergleich haben wir auch die Differenz zwischen Remund und Zgraggen) der SWB-Karten (mittlere Differenz August - April) dargestellt (Abbildung 8). Die grössten Unterschiede werden ebenfalls in den Südtälern des Wallis verzeichnet. In der Westschweiz ist die Abnahme etwas akzentuierter als beim ETa/ETp-Verhältnis. In allen anderen Regionen sind die Unterschiede gering (im Bereich von -50 bis +50). Die Flächen mit über 50 mm Differenzen machen weniger als 0.5% der Waldfläche aus (Tabelle 7).

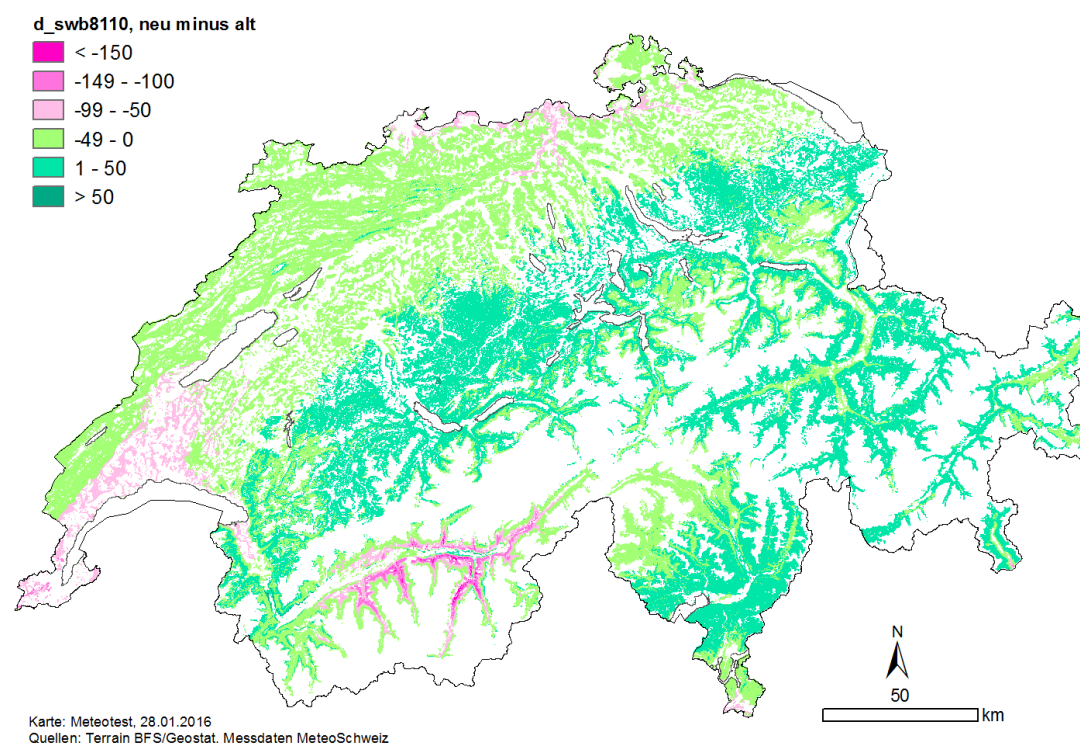


Abbildung 8: Differenzkarte der SWB zwischen Zgraggen und Remund [mm].

Tabelle 7: Flächenanteile (aller Waldflächen) von drei Differenzklassen SWB

Klasse	Differenz [mm]	Fläche [ha]	Anteil an Gesamtfläche [%]
1	< -50	62'776	5.61%
2	-50 – 50	1'054'701	94.3%
3	> 50	1'026	0.09%
Total	-	1'118'503	100%