

# Neu entwickelte Klimakarten für den Wald im Klimawandel

**Barbara Huber** Abenis AG (CH)\*  
**Andreas Zischg** Abenis AG, jetzt Geografisches Institut der Universität Bern (CH)  
**Monika Frehner** Forstingenieurbüro Frehner (CH)  
**Gabriele Carraro** Dionea SA (CH)  
**Jacques Burnand** Vegetation-Landschaft-Umwelt (CH)

Im Rahmen eines im Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel» durchgeführten Projekts wurden landesweit hochaufgelöste Kartengrundlagen zu Lufttemperatur, thermischer Kontinentalität, relativer Luftfeuchtigkeit sowie Verdunstung erarbeitet. Weiter wurden Karten zu Nord- und Südföhn von Grund auf neu entwickelt. Diese Karten sollen genutzt werden, um die Verschiebung der Vegetationshöhenstufen sowie der Verbreitungsareale von Buche, Tanne und Flaumeiche unter Annahme von Klimaszenarien zu modellieren.

doi: 10.3188/szf.2015.0432

\* Quaderstrasse 7, CH-7000 Chur, E-Mail b.huber@abenis.ch

Für eine standortkundlich fundierte Schutzwaldpflege wurde die in der Schweiz anzutreffende Standortvielfalt in Regionen und Höhenstufen gegliedert (Frehner et al 2005; Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald NaiS). Die Grenzen zwischen diesen Regionen und Höhenstufen werden massgeblich durch klimatische Faktoren bestimmt. Die Bedeutung und der Einfluss der einzelnen Faktoren konnten bislang aber nicht analysiert werden, da die dafür notwendigen hochauflösenden Grundlagenkarten fehlten. Im Rahmen des Forschungsprogramms «Wald und Klimawandel» wurde ein Projekt initiiert, das diese Lücke schliessen soll.

Konkret wurden die Grenzen zwischen Tannen-Hauptareal, Tannen-Nebenareal und Tannen-Reliktareal sowie die Buchenarealgrenzen gemäss der Karte der NaiS-Standortregionen (Frehner et al 2005, Anhang 2A) und die Grenze des Flaumeichenareals gemäss der Karte «Waldstandorte Walliser Haupttal» (Frehner et al 2005, Anhang 2B) analysiert. Für die Höhenstufengrenzen wurden bestehende Waldstandortkarten der Kantone Aargau, Appenzell Ausserrhoden, beider Basel, Freiburg, Jura, Uri, St. Gallen, Schaffhausen, Schwyz und Zug sowie die Höhenstufenkartierung des Kanton Graubündens nach Nais harmonisiert und ausgewertet.

Als Grundlage für diese Analysen wurden die Daten zu den Klimaparametern Lufttemperatur, thermische Kontinentalität, Globalstrahlung, relative Luftfeuchtigkeit sowie Verdunstung flächendeckend aufbereitet und in Karten dargestellt. Zudem wurden Karten zum Föhn (Häufigkeit sowie Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Verdunstung bei Föhnlagen) erstellt. Die Klimaparameter wurden auf den Betrachtungsmaassstab der Waldstandortkarten gebracht. Um vor allem die Höhenstufengrenzen detailliert abbilden zu können, war eine sehr hohe räumliche Auflösung erforderlich. Aus diesem Grund wurden alle räumlich variablen Klimaparameter auf die Auflösung des digitalen Geländemodells DHM25 von Swisstopo (Maschenweite 25 m) interpoliert. Bereits bestehende Karten zu Lithologie, Niederschlag, Schnee sowie zum Verhältnis zwischen aktueller und potenzieller Evapotranspiration wurden wo möglich ebenfalls auf diese Auflösung gebracht.

Die meisten Kartierungen von Waldstandorten wurden im Zeitraum 1980–2010 durchgeführt. Da die Baumartenzusammensetzung nicht rasch auf Temperaturänderungen reagiert, wurde für die Klimadaten wo möglich die Periode 1961–1990 verwendet. Einzig für die Erarbeitung der Karten für Luftfeuchtigkeit, Verdunstung

und Wind mussten die Werte der Periode 1981–2010 eingesetzt werden, da diese Parameter vorher nicht in geeigneter Stationsdichte gemessen worden waren.

In diesem Beitrag stellen wir die wichtigsten neu entwickelten Kartengrundlagen vor. Die ökologisch relevanten Folgerungen aus dem Projekt sollen später publiziert werden.

## Lufttemperatur

Es wurden Karten der mittleren Lufttemperatur sowie der mittleren täglichen Tiefststände und mittleren täglichen Höchststände für die Monate Januar, April, Juli und Oktober sowie für das ganze Jahr erstellt. Für die Bestimmung der Temperaturkurve für den Tagesgang wurden die Temperaturwerte für jeden Messzeitpunkt (alle zehn Minuten) zwischen 0 Uhr und 24 Uhr über die entsprechende Zeitperiode gemittelt. Der höchste Wert dieser Kurve entspricht dem mittleren täglichen Höchststand und der tiefste Wert dem mittleren täglichen Tiefststand. Da in der Schweiz die Temperaturen erst seit den 1980er-Jahren alle zehn Minuten gemessen werden, wurden für die Zeitperiode davor die (berechneten) mittleren Minima und Maxima mit der aperiodischen Komponente (Unterschied zwischen Höchst-/Tiefststand und Maxima/Minima) der Jahre 1981–2010 korrigiert. Als Stützpunkte für die Interpolation der Temperaturen wurden ausschliesslich die Messstationen von MeteoSchweiz verwendet.

Zusätzlich wurden Karten für die absoluten Tiefst- und Höchststände (1864 bis 1990) erarbeitet. Die Ausdehnung auf mehr als ein Jahrhundert war notwendig, weil extreme Kälte- und Hitzewellen selten auftreten. Ebenfalls wurde eine Karte der mittleren Lufttemperatur von April bis September erstellt, zur Grobcharakterisierung der Temperatur während der Vegetationsperiode.

Der Grund, weshalb in der vorliegenden Arbeit der mittlere Tageshöchst- und der mittlere Tagestiefststand berücksichtigt wurden (und nicht die Mittelwerte der täglichen Temperaturmaxima und -minima), liegt darin, dass ein Tiefstwert, der in der Nacht auftritt, andere Konsequenzen hat als ein solcher bei Tag: Nachtfrost kann sich sehr schädlich auf die Pflanze auswirken, da oft die Ausstrahlung dazukommt, welche an der Pflanzenoberfläche noch tiefere Minima erzeugt.

Tagsüber hingegen hat eine Lufttemperatur, welche wegen einer kurzzeitigen Kaltluftadvektion unter 0 Grad sinkt, kaum negative Folgen, 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 dieser nachts viel weniger transpiriert (Lyr 1992). Ein Temperaturhöchstwert, der mit hoher Einstrahlung gekoppelt ist, hat hingegen einen grossen Einfluss auf Pflanzen.

Die Temperaturwerte der Stationen wurden auf die tatsächliche Höhe des Gipfelpunktes des digitalen Höhenmodells umgerechnet. Berücksichtigt wurden dabei die Ausrichtung der Hänge (Süd/Nord) sowie der Einfluss von Kaltluftseen und von Gletscherflächen. Kaltluftseen mussten dazu zunächst möglichst genau kartiert werden. In Regionen ohne Messstationen in der Talsohle wurden die Intensität und die Mächtigkeit der Kaltluftseen aufgrund von grossflächigen Thermalaufnahmen und aus Angaben von früher betriebenen Klimastationen abgeschätzt. Die Mächtigkeit des Kaltluftsees wurde der Höhe des stauenden Hindernisses gleichgesetzt. Für die Pflanzenwelt sind Kaltluftseen sehr wichtig, tritt doch Frost in diesen noch viel später im Frühjahr auf als an Hängen gleicher Höhenlage. So kann es vorkommen, dass Baumarten, welche auf Spätfrost oder auch auf extrem tiefe Wintertemperaturen empfindlich sind, in Gebieten mit starken Kaltluftseen nicht mehr gedeihen. Beispiele dafür sind die Buche und, in geringerem Masse, die Tanne. Mithilfe jahreszeitlicher

Gradienten wurden alle Temperaturwerte für die Höhenlagen von 500, 1000 und 2000 m berechnet. Die projizierten Werte wurden anschliessend flächig auf die Höhenbereiche dazwischen interpoliert.

### Thermische Kontinentalität

Wichtig für die Pflanzenwelt sind vor allem die 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. Die Kontinentalität ist für die Vegetation bedeutend, weil es in Gebieten mit hoher thermischer Kontinentalität im Frühjahr häufig zu Frostwechseltagen kommt. Ebenfalls können Fröste noch lange auftreten, insbesondere auch dann, wenn die Baumarten aufgrund der hohen Wärme tagsüber bereits aus ihrer Winterruhe erwacht sind. Gerade auf Spätfroste sind Baumarten wie Buche und Tanne sehr empfindlich; unter anderem deshalb fehlen sie in den alpinen Hochtälern (Frey 2003, Willner 2002).

Die thermische Kontinentalität wird durch den Unterschied zwischen den Tiefstständen und den Höchstständen der Temperatur im Monat berechnet. Die Tiefst- und Höchststände der Temperaturen in den ausgewählten Zeiträumen wurden voneinander subtrahiert, womit für jeden Zeitraum ein Wert für die thermische Kontinentalität ermittelt werden konnte. Karten für die absolute thermische Kontinentalität wurden aus der Differenz zwischen dem absoluten Minimum und dem absoluten Maximum der Tem-

peratur berechnet. Karten für die mittlere thermische Kontinentalität im Monat wurden aus der Differenz zwischen dem mittleren Tageshöchststand und dem mittleren Tagestiefstand berechnet.

### Relative Luftfeuchtigkeit

Die Luftfeuchtigkeit ist für Pflanzen besonders tagsüber wichtig, weil sie dann entweder fotosynthetisch aktiv sind und bei geringer Luftfeuchtigkeit mit offenen Stomata viel Wasser verlieren oder aber ihre Stomata schliessen und deshalb nicht assimilieren können.

Analog dem Verfahren zur Erstellung der Temperaturkarten mit Höhengradienten und flächiger räumlicher Interpolation wurden Karten der relativen Luftfeuchtigkeit für die Periode 1981–2010 berechnet. Erstellt wurden Karten für die monatlichen Mittel der relativen Luftfeuchtigkeit um 13.30 Uhr (Abbildung 1) und im Tagesmittel für die Monate Januar, April, Juli und Oktober sowie für das Jahresmittel. 13.30 Uhr wurde gewählt, weil um diese Zeit herum die Temperatur in der Regel am höchsten und die Luftfeuchtigkeit am geringsten ist und weil dies früher der einzige Beobachtungszeitpunkt tagsüber war.

### Nord- und Südföhn

Der Föhn ist für Pflanzen von eminenter Bedeutung, da er sie durch grosse Windgeschwindigkeit, niedrige Luftfeuchtigkeit und hohe Temperatur entscheidend beeinflusst. So verlängert der Föhn in den nördlichen Alpentälern die Vegetationsperiode, er wirkt aber auch austrocknend, was die Konkurrenzkraft hygrophiler Pflanzen trotz hohen Niederschlagsmengen reduziert. Es

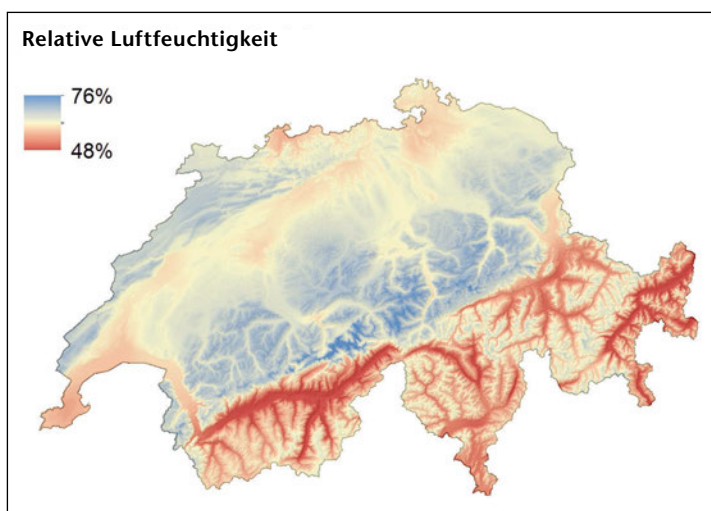


Abb 1 Relative Luftfeuchtigkeit um 13.30 Uhr im Jahresdurchschnitt (Periode 1981–2010).

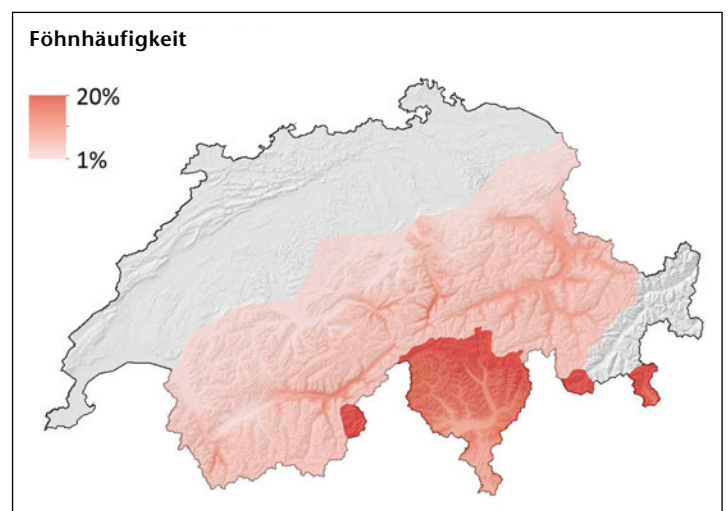


Abb 2 Föhnhäufigkeit im Jahresdurchschnitt (Periode 1981–2010).

ist zum Beispiel sehr wahrscheinlich, dass das Fehlen der Buche im Bergell, im mittleren und oberen Misox und im Calancatal einzig auf den Nordföhn zurückzuführen ist (Huber et al 2015).

Für die Erstellung der Föhnkarten wurden zunächst alle Klimastationen (automatische Messstationen mit Messungen alle zehn Minuten; Klimastationen mit drei Messungen pro Tag) in den Föhnregionen (Südföhn/Nordföhn) ausgewertet. Dabei wurden Föhnfälle von Nichtföhnfällen mit folgenden Kriterien voneinander unterschieden:

- Relative Luftfeuchtigkeit: tagsüber  $\leq 50\%$ , in der Nacht  $\leq 55\%$
- Windgeschwindigkeit:  $\geq 5$  km/h
- Windrichtungsbereich: typische Windrichtung in  $^\circ$  bei Föhn  $\pm 60^\circ$

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

Für Klimastationen mit drei Messungen am Tag wurde die Föhndauer wie folgt definiert: Föhn zu einem Messzeitpunkt = 8 Stunden, Föhn an zwei Messzeitpunkten = 16 Stunden, Föhn an drei Messzeitpunkten = 24 Stunden. Für die Monate Januar, April, Juli und Oktober sowie für das ganze Jahr wurden dann folgende drei Parameter ausgewertet: Föhnhäufigkeit (in Prozent), Temperatur bei Föhn und relative Luftfeuchtigkeit bei Föhn. Die Angaben der Stationen dienten anschliessend dazu, in den Föhngebieten gutachterlich Isolinien auf den Höhen 500, 1000 und 2000 m für die drei genannten Parameter zu zeichnen. Mithilfe der Isolinien wurden die Parameter flächendeckend für die genannten Höhen berechnet. Daraus wurden die Höhengradienten für jeden Parameter bestimmt. Diese wurden schliesslich verwendet, um die drei Parameter auf der wahren Höhe zu bestimmen. Zusätzlich wurden die Föhngebiete gutachterlich in Zonen unterschiedlicher Windgeschwindigkeitsklassen unterteilt. Aus den Föhnkarten (Abbildung 2) wurden Karten für die potenzielle Verdunstung bei Föhnlagen (nach Penman-Monteith; Allen et al 1998) erstellt.

### Zwischenbilanz und Ausblick

Dank dem sehr detaillierten Kartenmaterial konnten plausible Klimaparameter gefunden werden, um unter Berücksichtigung weiterer pflanzenphysiologisch relevanter Standortfaktoren die Höhenstufengrenzen

sowie die Arealgrenzen von Buche, Tanne und Flaumeiche zu bestimmen. Im Rahmen des Projektes «Adaptierte Ökogramme», das ebenfalls im Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel» durchgeführt wird, werden die Kartengrundlagen auf die Periode 1981–2010 umgerechnet. Anschliessend werden die relevantesten Klimakarten mit der prognostizierten Temperaturänderung (Klimaszenario A1B in einer trockeneren und einer feuchteren Modellvariante) auf die Jahre 2070–2099 aufgerechnet. Erwartet wird, dass aus den derart entstehenden Grundlagen Ableitungen für adaptierte Ökogramme möglich sind, d.h. Aussagen darüber, wie sich Waldstandorte ökologisch entwickeln oder wie sich die Areale von Buche, Tanne und Flaumeiche unter bestimmten Klimaszenarien verschieben dürften.

Das erstellte Kartenmaterial eröffnet eine Fülle von Verwendungsmöglichkeiten. Neben Arealverschiebungen von weiteren Baumarten könnte auch die potenzielle Ausbreitung von konkurrierenden Straucharten (Hasel, Grünerle) oder Neophyten bestimmt werden, vorausgesetzt, Daten über ihre Verbreitung sind vorhanden. Die Klimaparameter könnten ausserdem für Forstschutzfragen (z.B. Föhneinfluss bei Borkenkäferentwicklung) verwendet werden. Auch beim Artenmanagement könnten die erarbeiteten Grundlagen Verwendung finden, beispielsweise für Informationen zur Veränderung von Lebensräumen und den entsprechenden Konsequenzen für Flora und Fauna. ■

### Dank

Das 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) konnte im Rahmen des BAFU/WSL-Forschungsprogramms «Wald und Klimawandel» durchgeführt werden. Bedanken möchten wir uns auch bei MeteoSchweiz und den Kantonen für das Zurverfügungstellen von Daten. Zu grossem Dank sind wir Dr. Ludwig Z'graggen (MeteoSchweiz) verpflichtet. Durch seine Beratung bei der Entwicklung und Erarbeitung der klimatologischen Grundlagen, aber auch durch seine fundierten Kenntnisse in Standortkunde und von klimatologischen Zusammenhängen hat er wesentlich zum Gelingen des Projektes beigetragen.

### Literatur

- ALLEN RG, PEREIRA LS, RAES D, SMITH M (1998) Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. Rome: Food and Agricultural Organization, FAO Irrigation and drainage paper 56. 333 p.
- FREHNER M, WASSER B, SCHWITTER R (2005) Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Bern: Bundesamt Umwelt, Vollzug Umwelt.
- FREY HU (2003) Die Verbreitung und die waldbauliche Bedeutung der Weisstanne in den Zwischenalpen. Ein Beitrag für die waldbauliche Praxis. Schweiz Z Forstwes 154: 90–98. doi: 10.3188/szf.2003.0090
- 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 März 2015. Chur: Abenis AG. 151 p.
- LYR H, FIEDLER HJ, TRANQUILINI W (1992) Physiologie und Ökologie der Gehölze. Jena: Fischer. 620 p.
- WILLNER W (2002) Syntaxonomische Revision der südmitteleuropäischen Buchenwälder. Phytocoenologia 32: 337–453.

### Nouvelles cartes climatiques développées pour les forêts face au changement climatique

Dans le cadre du programme de recherche «forêt et changement climatique», il a été analysé quels sont les facteurs qui permettent d'expliquer les limites entre les étages de végétation ainsi que les aires de répartition du hêtre, du sapin et du chêne pubescent. Pour cela, des bases cartographiques de haute résolution ont été élaborées pour les paramètres climatiques suivants: température de l'air, continentalité thermique, humidité relative de l'air et évaporation. Comme base pour la carte de la température de l'air, l'intensité et l'importance des masses d'air froid ont été de plus déterminées et une correction pour l'exposition a été effectuée. Des cartes pour le foehn du nord et du sud ont été nouvellement créées. Celles-ci livrent des indications sur la fréquence (en pour cent) et la force du foehn ainsi que sur la température, l'humidité relative de l'air et l'évaporation potentielle. La détermination de l'étage de végétation et de l'aire de répartition du hêtre, du sapin et du chêne pubescent avec le climat actuel et avec des projections des climats à venir sont les utilisations immédiates de ces cartes.