

Räumlich explizite Modellierung der NaiS-Standortstypen zur Analyse der Waldbestockung

Daniel Scherrer^{1,*}, Andri Baltensweiler¹, Christoph Fischer¹, Monika Frehner², Rafael Wüest Karpati¹, Thomas Wohlgemuth¹

¹Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL (CH)

²Forstingenieurbüro Frehner (CH)

Abstract

Die Waldstandortkunde ist eine wichtige Grundlage für die waldbauliche Planung, indem sie Standorttypen definiert und für diese Baumartenempfehlungen formuliert. In der Schweiz wurde im Rahmen von Projekten «Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald» (NaiS) in den letzten Jahren ein Standard von Standorttypen erarbeitet, der landesweite Bedeutung erlangte. Für eine Mehrheit der Kantone existieren Kartierungen von unterschiedlich definierten Waldstandortseinheiten, jedoch fehlt eine flächendeckende, konsistente Kartierung von Standorttypen. Basierend auf der Zuordnung von 240 Standorttypen gemäss NaiS zu allen 6357 Probeflächen des Schweizerischen Landeforstinventars (LFI; Projekt «NaiS-LFI»), kantonalen Standortkartierungen, einer Vielzahl von flächendeckend verfügbaren Umweltdaten und «Machine Learning»-Techniken modellierten wir die schweizweite Verteilung der NaiS-Standorttypen. Unsere Modelle erreichen eine Vorhersagegenauigkeit von 57% bezüglich der drei wahrscheinlichsten Standorttypen auf dem jeweiligen Waldpixel von 25 × 25 m. Wenn die Standorttypen mit gleichem Mischung- und Verjüngungsziel betrachtet werden (Aggregation zu 42 Wald-einheiten), dann steigt die Vorhersagegenauigkeit auf 75%. Angesichts des Umstands, dass 80% der Standorttypen auf weniger als 1% der LFI-Probeflächen kartiert wurden, ist dieses Resultat zufriedenstellend. Die Modellierung liefert damit nützliche Übersichten auf nationaler oder regionaler Ebene. Zwei Fallbeispiele zeigen potenzielle Anwendungen des Modells in der Praxis: Im ersten stellen wir dar, zu welchen Anteilen die NaiS-Standorttypen in der Schweiz sich als Folge des Klimawandels verschieben könnten, im zweiten, wo die aktuelle Bestockung im Kanton Zürich stark von der potenziellen natürlichen Baumartenzusammensetzung abweicht.

Keywords: forest sites, potential natural forest communities, site factors, modelling

doi: 10.3188/szf.2021.0278

* Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail daniel.scherrer@wsl.ch

Die Waldstandortkunde hat in der Schweiz eine lange Tradition (Leibundgut 1951, Ellenberg & Klötzli 1972, Schmider et al 1993, Frehner et al 2009). Sie ist ein wichtiges Werkzeug für die waldbauliche Planung (Frehner et al 2019; tree-app.ch). Das Bundesgesetz über den Wald vom 4. Oktober 1991 (WaG, SR 921.0) verlangt naturnahen Waldbau mit standortgerechten Baumarten und die Erfassung der Standortverhältnisse. Aufgrund dessen wurden in zahlreichen Kantonen standortkundliche Waldkartierungen realisiert (zum Beispiel Aargau, Basel-Landschaft, Solothurn, Freiburg, Luzern, Schaffhausen, St. Gallen, Thurgau, Zürich). Das dabei gewonnene Wissen führte dazu, dass viele neue Waldstandorttypen definiert worden sind, insbesondere im Berggebiet. Dadurch verviel-

fachte sich die Anzahl der «klassischen» 71 Einheiten (Ellenberg & Klötzli 1972) auf mehrere Hundert.

Mit Ausnahme von Emil Schmid's Vegetationskarte (Schmid 1944–1950) ist in der Schweiz kein flächendeckendes Kartenwerk vorhanden, das die Unterschiede der Waldvegetation in grossem Massstab darstellt. Jedoch existieren viele kantonale Gliederungen, die mit zum Teil unterschiedlichen Methoden erstellt wurden, grundsätzlich aber meist dem System von Ellenberg & Klötzli (1972) folgen. Für viele – aber nicht für alle – standortkundlichen Einheiten liegen alte und neue Vegetationsaufnahmen vor (Wohlgemuth 2012).

Als Alternative zu zeitintensiven Kartierungen und als Ergänzung dazu wurde bereits vor 30 Jahren damit begonnen, Waldstandorttypen zu modellie-

ren. Den ersten Karten mit grober räumlicher Auflösung (zum Beispiel Brzeziecki et al 1995) folgten solche mit aktuell regionalem oder lokalem Bezug (zum Beispiel Onsernonetal, Carraro et al 2020; Graubünden, Ingenieure Bart AG 2011).

In diesem Artikel präsentieren wir ein Konzept zur flexiblen und räumlich hochauflösenden Modellierung der Waldstandorttypen gemäss NaiS (Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald; Frey et al 2021) für die gesamte Schweiz. Wir zeigen auf, wie präzise die sogenannten NaiS-Standorttypen auf verschiedenen räumlichen Skalen und systematischen Gliederungsebenen abgebildet werden können. Im ersten Anwendungsbeispiel demonstrieren wir, zu welchen Anteilen die NaiS-Standorttypen sich in der Schweiz als Folge des Klimawandels verschieben könnten, im zweiten, wo die aktuelle Bestockung im Kanton Zürich stark von der potenziellen natürlichen Baumartenzusammensetzung abweicht.

Daten und Methoden

Modellierung der NaiS-Standorttypen

Die hier präsentierten Modelle basieren auf den Daten des kürzlich abgeschlossenen Projekts «NaiS-LFI» (ARGE Frehner et al 2020), in dessen Rahmen die Standorttypen (ST) auf den 50 × 50 m grossen Interpretationsflächen der terrestrischen Probestellen des vierten Schweizerischen Landesforstinventars (LFI4; Brändli et al 2020) kartiert oder zugeordnet wurden. Insgesamt wurden auf 6357 bewaldeten und zugänglichen LFI-Interpretationsflächen 265 verschiedene NaiS-Standorttypen (Frey et

al 2021) sowie neun Gebüschseinheiten nach Delarze et al (2015) verzeichnet. Diese sind räumlich jedoch sehr ungleich verteilt: Während 79.2% (195) der ST auf weniger als 1% der Interpretationsflächen kartiert wurden und 31.2% (75) sogar auf weniger als 0.1% derselben, dominieren sieben ST der Buchenwälder und zwei ST der Buchen-Tannenwälder auf über 30% aller LFI-Interpretationsflächen (Abbildung 1). Diese extrem schiefe Häufigkeitsverteilung der ST stellt die Modellierung vor grosse Herausforderungen, weshalb die NaiS-LFI-Daten je nach Fragestellung ergänzt werden müssen, zum Beispiel mit Angaben aus kantonalen Kartierungen oder mit zusätzlichen Koordinaten von Aufnahmen seltener ST. Für die landesweite Analyse (Anwendungsbeispiel 1) verwendeten wir die statistisch repräsentativen Daten von NaiS-LFI (Modell NaiS-LFI). Für die regionale Fragestellung (Anwendungsbeispiel 2) ergänzten wir den landesweiten Datensatz mit Zuordnungen von ST aus der Standortkartierung des Kantons Zürich (ein Punkt alle 250 m; Model NaiS-LFI + ZH; Schmider et al 1993). Da auf einer LFI-Interpretationsfläche oft mehrere ST kartiert wurden, beschränkten wir unsere Auswahl auf diejenigen, die mindestens 33% einer LFI-Interpretationsfläche bedecken (n=240; 232 von 265 NaiS-Standorttypen und 8 von 9 Gebüschseinheiten).

Nebst den im Projekt NaiS-LFI kartierten ST gibt es in der Schweiz noch Dutzende andere. Für lokale Anwendungen ist diese Feingliederung adäquat, dagegen für regionale und nationale Übersichten in der Regel zu detailliert. Übersicht schafft die Aggregation zu 17 Waldeinheiten mit gleichen Hauptbaumarten (Grobgliederung, Ggrob) und 42 Waldeinheiten mit jeweils gleichem Mischungs- und

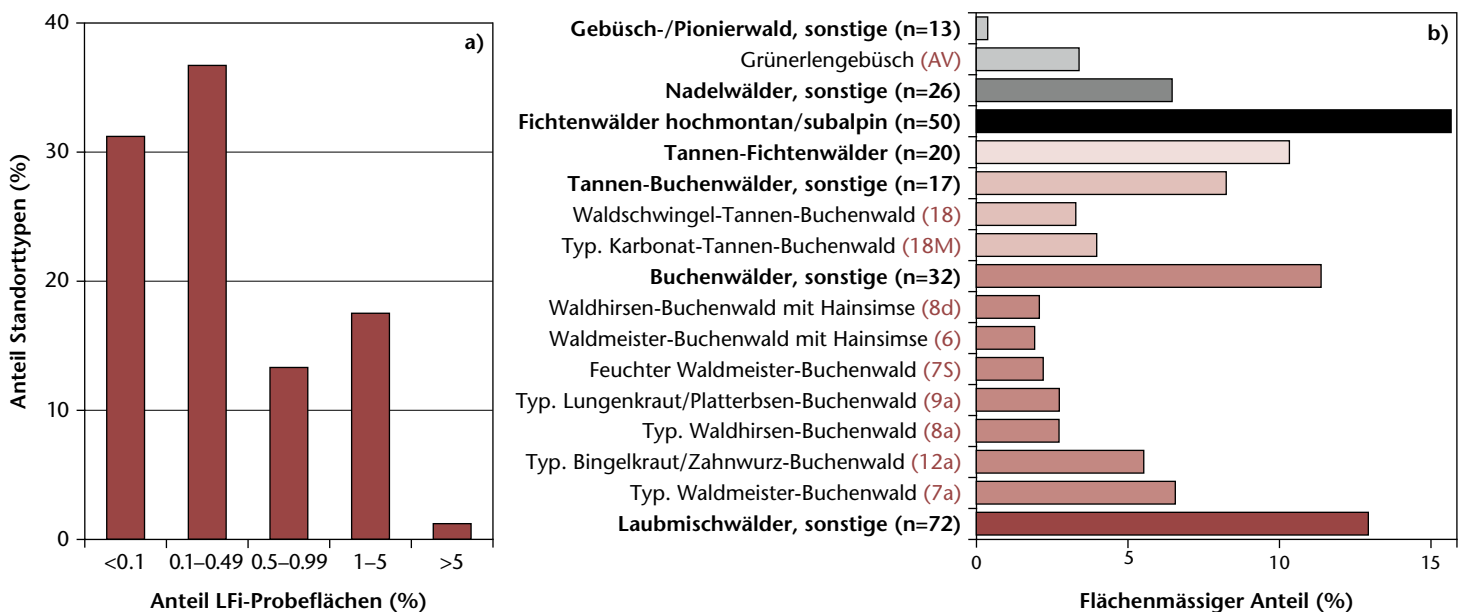


Abb 1 Anteil der Standorttypen (ST; N=240, 232 Waldstandorttypen und 8 Gebüschseinheiten), gruppiert nach deren Häufigkeit in den zugänglichen Probestellen des vierten Landesforstinventars (N=6357; a). Flächenmässiger Anteil (%) der verschiedenen ST über alle Probeflächen (b). Aggregationen von ST (n = Anzahl zusammengefasster ST, fett). Nummern der ST gemäss NaiS (rot).

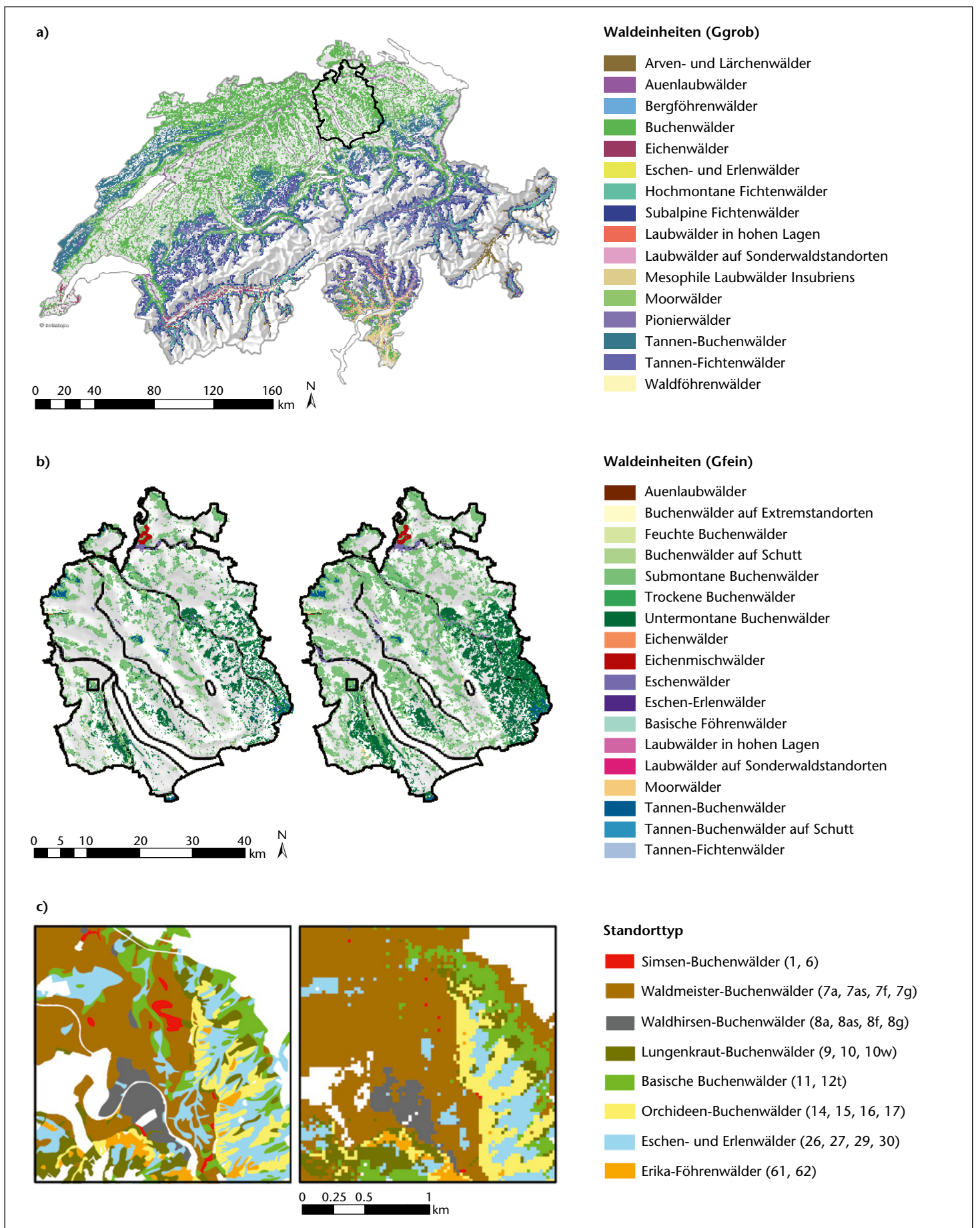


Abb 2 Karten der Standorttypen (ST) auf verschiedenen räumlichen Ebenen und mit unterschiedlicher Aggregation: a) landesweite Verbreitung der ST aggregiert nach Hauptbaumarten (Ggrob; 16 von 17 Waldeinheiten ohne Gebüschseinheiten) gemäss Modellierung. b) Regionale Verbreitung (Kanton Zürich) der ST aggregiert zu Einheiten mit gleichem Mischungs- und Verjüngungsziel (Gfein; 18 von landesweit 42 Waldeinheiten) gemäss kantonaler Kartierung (links; Schmider et al 1993) und Modellierung (rechts). c) lokaler Ausschnitt (Uetliberg ZH) mit Gliederung nach ST (25 von landesweit 240 ST) gemäss kantonaler Kartierung (links) und Modellierung (rechts).

Verjüngungsziel (Feingliederung, Gfein). Auf diese Weise wird zum Beispiel der ST «Trockener Linden-Buchenwald» (NaiS 13e, mit der Einheit 13 Linden-Zahnwurz-Buchenwald von Ellenberg & Klötzli 1972 verwandt) den Buchenwäldern auf Schutt (Gfein) zugeordnet, die ihrerseits zu den Buchenwäldern (Ggrob) gezählt werden (Abbildung 2).

Im Modell werden die Zielgrößen (ST) mit einer Vielzahl von Prädiktoren berechnet (meist zwischen 30 und 40). Die genaue Auswahl der Prädiktoren hängt von der Fragestellung ab, also vom Kartenausschnitt und von der gewünschten Jahreszahl einer Vorhersage, und kann flexibel angepasst werden. Die Prädiktoren müssen aber als flächendeckende Information mit konstanter Qualität verfügbar sein. In unserem Fall verwendeten wir eine Reihe von Prädiktoren, nämlich

- klimatische, zum Beispiel mittlere und maximale Sommer- und Wintertemperatur, Jahres- und Tagesschwankungen der Temperatur und Sommer- und Winterniederschlag basierend auf Daten von CH2018 (2018) und Downscaling (Broennimann 2018),
- topografische, zum Beispiel Derivate von Hangneigung, Hangposition, Oberflächenstruktur, Oberflächenkonkavität und Exposition (Baltensweiler et al 2017),
- geografische, zum Beispiel Informationen zur biogeografischen Region, Distanz zu einem Fluss oder See und Blockschutt basierend auf Karten von Swisstopo,
- geologische, zum Beispiel Bodeneignungskarte, Boden-pH (Wüest et al 2020), und
- biologische, zum Beispiel Tannenareal gemäss Frehner et al (2005). Dazu wurden ebenfalls die Produktivität aus Fernerkundungsdaten, die Vegetationshöhe und die Wahrscheinlichkeit des Vorkommens von Schlüsselarten wie Buche, Fichte oder Tanne verwendet (Wüest et al 2020).

Alle Daten sind schweizweit mit einer räumlichen Auflösung von 25 × 25 m verfügbar.

Als Modellierungsmethode verwenden wir «Random Forest»-Modelle, die Datensätze klassieren (Breimann 2001). Dieser «Machine Learning»-Algorithmus basiert auf einer Vielzahl von Entscheidungsbäumen («decision trees») und entwickelt ein «Set von Regeln», um die Wahrscheinlichkeit eines ST basierend auf einer Kombination von Prädiktoren zu bestimmen. «Random Forest»-Modelle sind besonders geeignet für komplexe kategoriale Daten (hier ST), da sie eine Vielzahl von sowohl numerischen als auch kategorialen Prädiktoren und ihre Interaktionen berücksichtigen und dadurch ökologische Zusammenhänge abbilden können. Das Modell liefert für jedes Waldpixel von 25 × 25 m in der Schweiz (>28.5 Mio.; basierend auf LFI4-Waldmaske; Waser et al 2015) die Wahrscheinlichkeit für das Vorkommen jedes ST, also in unserem Falle 240 Wahr-

scheinlichkeiten für ebenso viele ST. Zur Überprüfung der Modellgenauigkeit verwendeten wir eine Kreuzvalidierung. Dabei wird als Teil der Random-Forest-Routine immer ein zufällig ausgewählter Teil der Daten verwendet, um das Modell zu trainieren (80%), und ein anderer (unabhängiger) Teil, um das Modell zu validieren (20%). Zur vereinfachten grafischen Darstellung der Resultate verwenden wir in diesem Manuskript immer die ST mit der höchsten Wahrscheinlichkeit pro Waldpixel.

Beispiel 1: Anteilsmässige Veränderung der Standorttypen

Eine mögliche Anwendung unserer Modelle ist die Analyse der potenziellen Veränderungen der ST in den nächsten Jahrzehnten. Unser Beispiel fokussierte auf den Effekt des Klimawandels, doch auch Landnutzungs- (zum Beispiel Aufgabe von Weideflächen) oder Bewirtschaftungsänderungen (zum Beispiel Waldbau) können problemlos in das Modell integriert werden. Wir beschränkten uns bei der Modellbildung auf topografische und klimatische Prädiktoren, da diese im Gegensatz zu biologischen entweder zeitlich konstant sind (zum Beispiel Hangneigung) oder Daten zu den zukünftig erwarteten Werten existieren (zum Beispiel Temperatur und Niederschlag). Wir speisten unser Modell mit (Klima-)Daten für die Zeiträume 1981–2010 und 2071–2100 (RCP 8.5; CH2018 2018) und verglichen die berechneten ST für jedes Waldpixel (25 × 25 m). Zur Vereinfachung der Resultate nahmen wir an, dass alle Waldpixel gemäss LFI-Waldmaske auch in der Zukunft bewaldet sind und keine zusätzlichen Waldflächen entstehen (zum Beispiel keine Verschiebung der Baumgrenze oder Verwaldung von Weiden). Ausserdem beschränkten wir das Modell auf die heute vorkommenden ST, was bedeutet, dass zum Beispiel in der hyperinsubrischen Stufe keine neuen, besser an Wärme angepasste ST entstehen. Deshalb macht das Modell für die geografischen Lagen, in denen zukünftig neue, das heisst bisher nicht in der Schweiz vorkommende klimatische Bedingungen erwartet werden, keine Vorhersagen, sondern kennzeichnet diese als «Neue Bedingungen».

Beispiel 2: Quantifizierung der standortfremden Bestockung

Unsere Modelle können auch genutzt werden, um abzuschätzen, wie stark die aktuelle Waldbestockung von derjenigen des Naturwalds abweicht. Wegen der historischen und aktuellen Bewirtschaftung (zum Beispiel Fichtenpflanzungen im Tiefland) kann die tatsächliche Bestockung zum Teil stark von der erwarteten Baumartenzusammensetzung gemäss ST (idealisiertem Naturwald) abweichen. Ein hoher Anteil von «standortfremden» Baumarten kann daher angesichts höherer Temperaturen und häufiger auftretender Trockenheit ein potenzielles ökonomi-

sches Risiko darstellen, da diese Arten in der Folge anfälliger für Krankheiten/Parasiten sind (zum Beispiel Trockenheit und Borkenkäfer) und auszufallen drohen. Als Anwendungsbeispiel wählten wir die potenziellen Buchenwaldstandorte des Kantons Zürich. Hier haben Nadelhölzer natürlicherweise nur einen geringen Anteil. Da aber während rund 150 Jahren vielerorts die Fichte für die Holzproduktion angebaut wurde, ist ihr flächenhafter Anteil weit grösser als jener, der in den kartierten ST ausgewiesen ist (Bürgi & Schuler 2003). Wir analysierten den Anteil Nadelhölzer pro Hektare Buchenwald basierend auf Fernerkundungsdaten (Flächenanteil in der Kronen-

schicht; Waser et al 2017). Dies erlaubte es uns, eine Karte zu erstellen, die die Abweichung zwischen potenzieller natürlicher und tatsächlicher Bestockung visualisiert sowie statistische Aussagen über den Anteil der Nadelhölzer auf Buchenstandorten im Kanton Zürich liefert.

Resultate

Genauigkeit der Modellvorhersagen

Das Modell NaiS-LFI, das ausschliesslich auf den repräsentativen Daten des Projekts NaiS-LFI basiert, weist über die ganze Schweiz gesehen eine Vorhersagegenauigkeit für die höchstwahrscheinliche Einheit («Top 1») von 30% für die ST, von 51% für die feine Gliederung (Gfein) und von 71% für die grobe Gliederung (Ggrob) auf (Tabelle 1). Weil auf vielen Waldpixeln (25 × 25 m) mehrere ST etwa gleich wahrscheinlich sind und auf zahlreichen LFI-Interpretationsflächen mehr als ein ST kartiert wurde, ist es angebracht, die Vorhersagegenauigkeit der drei wahrscheinlichsten ST (Top 3) zu betrachten. In diesem Fall erreicht das Modell NaiS-LFI eine Vorhersagegenauigkeit von 57% für den ST. Mit dem detaillierten Modell für den Kanton Zürich (NAIS-LFI + ZH) sind die ST gar zu 89% korrekt vorhergesagt (Tabelle 1). Die Vorhersagegenauigkeit einzelner ST ist enorm unterschiedlich. Bei häufig kartierten ST (>100 LFI-Probeflächen) erreicht sie 82%, bei sehr seltenen (<5 LFI-Probeflächen) dagegen 0%. Die Modellvorhersagen sind auf Ebene Gfein (42) präziser für zonale (55%) als für azonale (30%) Wald-einheiten. Insgesamt sind die Modelle in der Lage, die Mehrheit der räumlichen Muster der Waldeinheiten korrekt wiederzugeben (Abbildung 2).

Ebene	Modell NaiS-LFI				Modell NaiS-LFI + ZH	
	Schweiz		Zürich		Zürich	
	Top 1	Top 3	Top 1	Top 3	Top 1	Top 3
Standorttyp	30%	57%	46%	68%	66%	89%
Gfein	51%	75%	61%	88%	78%	94%
Ggrob	71%	87%	89%	97%	93%	98%

Tab 1 Vorhersagegenauigkeit der Modelle NaiS-LFI und NaiS-LFI + ZH für die drei systematischen Ebenen NaiS-Standorttyp (240 Einheiten), Feingliederung (Gfein; 42 Einheiten) und Grobgliederung (Ggrob; 17 Einheiten), sowohl für die ganze Schweiz als auch für den Kanton Zürich, basierend auf den NaiS-LFI-Daten alleine und in Kombination mit Daten aus der Kartierung der Waldstandorte im Kanton Zürich (Schmider et al 1993). Top 1 gibt die korrekte Zuordnung der wahrscheinlichsten Einheit an, Top 3 diejenige der drei wahrscheinlichsten Einheiten.

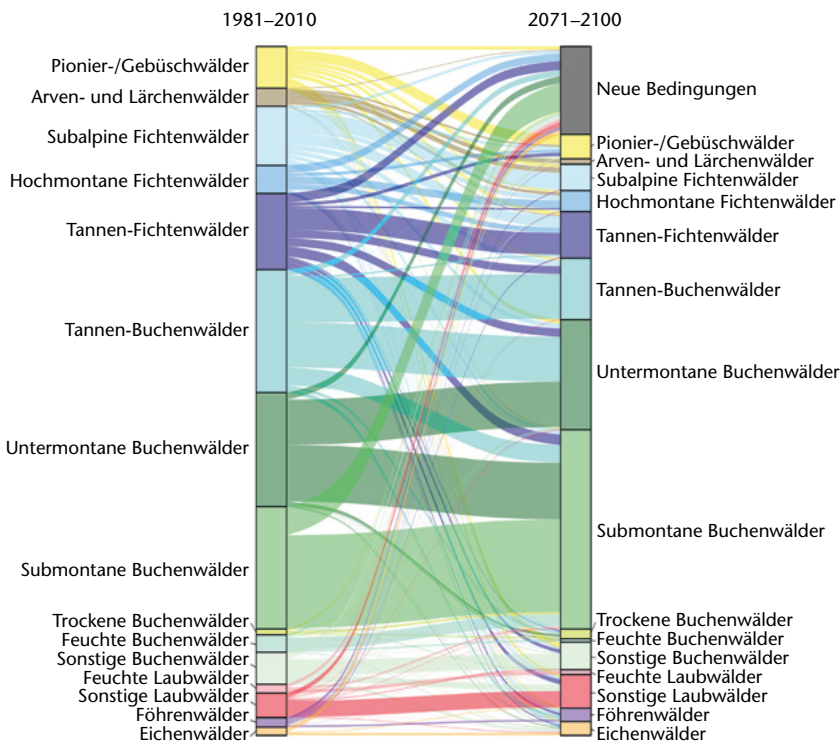


Abb 3 Häufigkeitsverteilung der wichtigsten Waldeinheiten (vertreten auf mindestens 1% der Schweizer Waldfläche) gemäss Modellierung unter heutigem (1980–2010) und zukünftigem (2070–2100, RCP 8.5) Klima. Die Verbindungen zeigen, in welche Richtung sich die heutigen Waldeinheiten als Folge des Klimawandels verändern könnten. «Neue Bedingungen» zeigt den Anteil der heutigen Waldfläche, in der das erwartete Klima ausserhalb der Klimaamplitude der heutigen Schweiz liegen könnte (zum Beispiel trockener oder heisser). In diesen Gebieten kann das Modell keine verlässlichen Vorhersagen machen, und es könnten dort neue Standorttypen entstehen (zum Beispiel Gesellschaften mit mediterranen Baumarten).

Anteilmässige Veränderung von Standorttypen

Die Vorhersagen für die zukünftige Verteilung der ST mit unseren Modellen entsprachen den erwarteten zonalen Verschiebungen der Höhenstufen. So wurden zum Beispiel 10.5% der Tannen-Fichtenwälder zu Tannen-Buchenwäldern und 49.5% der untermontanen Buchenwälder zu submontanen Buchenwäldern (Abbildung 3). Gemäss den Berechnungen nahm der Anteil der feuchten Buchenwälder um 72% ab, und die Anteile der trockenen Buchenwälder, der Eichenwälder und der Föhrenwälder nahmen stark zu (+68%, +69%, +39%; Abbildung 3). In den höchsten Lagen des heutigen Waldareals (LFI4) sagte das Modell eine starke Abnahme der Arven- und Lärchenwälder zugunsten von Fichtenwäldern vorher (–70%; Abbildung 3), dies unter der Annahme, dass die Waldgrenze unverändert bleibt. Auf 14.5% der heutigen Waldfläche dürften gemäss Vorhersage für die Schweiz neuartige klimatische Bedingungen eintreten, die zu neuen ST führen könn-

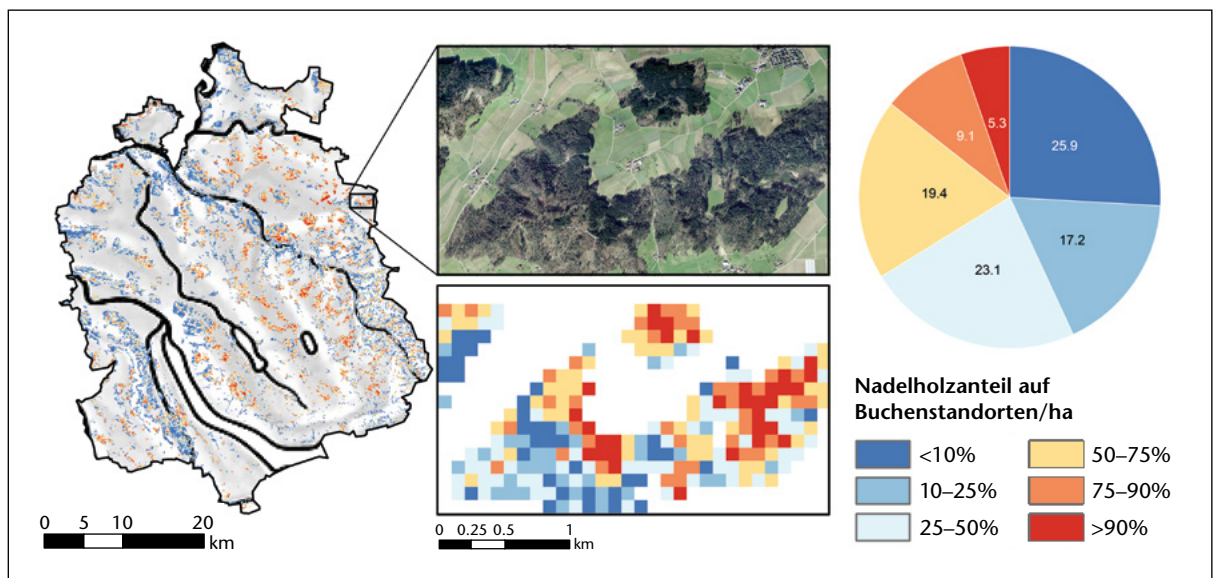


Abb 4 Nadelholzanteil pro Hektare, hauptsächlich Fichte, auf Buchenwaldstandorten gemäss der Modellierung der Standorttypen für den Kanton Zürich. a) Übersicht über den Kanton Zürich, b) Luftbild einer ausgewählten Fläche, aufgenommen im Herbst, c) Nadelholzanteil auf der Fläche, kartiert auf Basis von Fernerkundungsdaten, d) statistischer Überblick über den Nadelholzanteil auf den Buchenwaldstandorten des Kantons Zürichs.

ten. Dies waren mehrheitlich geografische Lagen, die heute als submontane Buchenwälder (32.5%), Tannen-Fichtenwälder (10.5%) und Eichenwälder (6%) klassifiziert wurden.

Quantifizierung der standortfremden Bestockung

Der Nadelholzanteil (als Projektionsfläche pro Hektare) auf den Buchenwaldstandorten des Kantons Zürich ist sehr variabel. Während er auf rund einem Viertel dieser Standorte weniger als 10% ausmachte, betrug er auf einem Drittel derselben mehr als 50%. Jede zwanzigste Hektare bestand sogar fast ausschliesslich aus Nadelholz (>90%, Abbildung 4).

Diskussion

Modellierungskonzept

Das präsentierte Konzept erlaubt die Modellierung der ST über die ganze Schweiz in einer hohen räumlichen Auflösung von 25 × 25 m. Damit lassen sich sowohl die wichtigsten Vegetationsmuster als auch die Verbreitung der häufigsten ST gut abbilden. In zahlreichen Fällen (schweizweit circa 45%, im Kanton Zürich circa 50%), in denen der modellierte ST nicht mit dem kartierten übereinstimmte, liessen sich beide ST derselben Gfein-Wald-einheit (n=42) zuordnen. Die Modelle waren jedoch sehr ungenau in der Vorhersage seltener ST. Dies ist nicht überraschend, da bei diesen ST die Datengrundlage nicht ausreicht, um die Modelle zu trainieren. Generell können keine übereinstimmenden Vorhersagen für ST mit weniger als 50 bis 100 Beobachtungen erwartet werden (>80% der ST basierend auf NaiS-LFI). Hinzu kommt, dass viele der seltenen

ST nicht primär durch das Makroklima definiert werden, sondern durch kleinräumige Faktoren wie Blockschutt (zum Beispiel 48 – Blockschutt-Tannen-Fichtenwald) oder Schutt (zum Beispiel 23 – Mehlbeer-Ahornwald) und somit Sonderwaldstandorte darstellen (Frehner et al 2009). Daten zu diesen kleinräumigen Faktoren sind aufwendig zu erheben und deshalb oft nicht flächendeckend verfügbar. Daher ist es erforderlich, die Daten für seltene ST zu ergänzen oder diese, wie hier gezeigt, zu größeren Waldeinheiten (Gfein, Ggrob) zu aggregieren, wodurch sich die Aussagekraft erhöht.

Mit den Modellen lassen sich die wahrscheinlichsten geografischen Lagen eines bestimmten ST vorhersagen. In diesen Fällen ist die Problematik mit seltenen ST wesentlich geringer, da die Modelle die Wahrscheinlichkeitsmuster, basierend auf den Faktorenkarten, räumlich korrekt vorhersagten. Kommen aber mehrere ST mit ähnlicher Wahrscheinlichkeit für eine Lokalität infrage, werden infolge fehlender landesweit verfügbarer Prädiktoren von Kleinstrukturen (zum Beispiel Blockschutthal-den) die zonalen und weit verbreitete ST bevorzugt und demzufolge seltene ST unterschätzt. Diese Eigenheit der Random-Forest-Modelle bietet jedoch auch Chancen zum besseren Verständnis seltener ST: So werden einige seltene ST beziehungsweise Waldeinheiten gut vorhergesagt, da sie nur unter speziellen Bedingungen beziehungsweise gewissen Prädiktorenkombinationen zu finden sind (zum Beispiel mesophile Wälder Insubriens oder Auenlaubwälder, deren Lebensraum entlang von Flüssen kartografisch einfach ableitbar sind). Demgegenüber können andere ST mit den hier verwendeten Prädiktoren nicht voneinander abgegrenzt werden (zum Beispiel Eschen- und Erlenwälder). Eine vertiefte

Analyse dieser Muster wird helfen, fehlende Informationen zu identifizieren und zu beschaffen, um die Modelle zu verbessern.

Zusammenfassend erachten wir das hier präsentierte Modellierungskonzept als eine brauchbare und flexible Grundlage für eine Vielzahl von Anwendungen und Fragestellungen. Wie anhand der zwei Fallbeispiele gezeigt wurde, kann es mit kleinem Aufwand für eine konkrete Anwendung optimiert werden (hier: Kanton Zürich und Klimawandel) und ermöglicht dann zielgerichtete Auswertungen. Bei den Resultaten handelt es sich um Modellberechnungen, die naturgemäss mit Unsicherheiten behaftet sind, insbesondere auf Ebene der ST. Die Resultate können jedoch eine nützliche Planungshilfe für den Waldbau bilden. Insbesondere kann das Modell auf der Ebene der Gfein-Einheiten als Entscheidungshilfe für Fragen zur adaptiven Waldbewirtschaftung (Brang et al 2014) dienen, es sollte aber im Einzelfall immer mit Erfahrungswissen verknüpft werden.

Anwendungsbeispiele

Das Modell zum zukünftigen Vorkommen der ST erlaubt nicht nur einen Überblick über die Verschiebungen der ST mit dem Klimawandel (Abbildung 3). Es ermöglicht sowohl eine Identifizierung der Zonen oder Gebiete, in denen die grössten/kleinste Standortveränderungen zu erwarten sind, als auch eine Quantifizierung der treibenden Faktoren, zum Beispiel Temperatur versus Trockenheit. Diese Informationen können in die lokalen, regionalen und nationalen waldbaulichen Langzeitplanungen einfließen. Dies zum Beispiel, indem die Standorte lokalisiert werden, auf denen die aktuelle Bestockung im Hauptbestand oder in der aufkommenden Verjüngung stark von der optimalen zukünftigen Baumartenzusammensetzung abweichen.

Unsere Fallstudie zum Nadelholzanteil auf den Buchenwaldstandorten im Kanton Zürich lässt eine Kartierung der «Naturnähe» beziehungsweise «Naturferne» der Waldbestände zu, ableitbar aus der Differenz von potenzieller und aktueller Bestockung. In einem weiteren Schritt könnte analysiert werden, wo die naturfernen Bestände überdurchschnittlich viele Schadenfälle (etwa durch Sturm und Borkenkäferbefall) aufweisen. Damit liesse sich quantifizieren, wo der hohe Nadelholzanteil ein waldbauliches Risiko darstellt, und es liesse sich davon ableiten, ob dieses entsprechend verringert werden sollte.

Ausblick

Unser Modellierungskonzept ist sowohl in den warmen Tieflagen als auch an der Waldgrenze stark limitiert. Grundlagen zu Waldstandorten aus

wärmeren Lagen müssen beschafft werden, um die künftigen ST in weiter entwickelten Modellen auch in den wärmsten Regionen (Wallis, Tessin, Nord- und Westschweiz) realistischer abzubilden (siehe Fischer et al 2019). Um das Höhersteigen der Wälder realistisch zu modellieren, sind Kriterien für die Waldausdehnung zu definieren (zum Beispiel Nutzungsaufgabe von Alpweiden) und in das Modellierungskonzept zu integrieren. ■

Eingereicht: 27. Oktober 2020, akzeptiert (mit Review): 19. April 2021

Literatur

- ARGE FREHNER M, DIONE SA, IWA – WALD UND LANDSCHAFT AG (2020) NaiS-LFI – Zuordnung der LFI-Stichprobenpunkte zu Waldgesellschaften. Erläuternder Schlussbericht. Bern: Bundesamt Umwelt. 68 p.
- BALTENSWEILER A, WALTHER L, GINZLER C, SUTTER F, PURVES RS ET AL (2017) Terrestrial laser scanning improves digital elevation models and topsoil pH modelling in regions with complex topography and dense vegetation. *Environ Model Softw* 95: 13–21.
- BRÄNDLI UB, ABEGG B, ALLGAIER LEUCH B, BISCHOF S, CIOLDI F ET AL (2020) Das Landesforstinventar. In: Brändli UB, Abegg B, Allgaier Leuch B, editors. Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der vierten Erhebung 2009–2017. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch.anstalt WSL. pp. 11–33.
- BRANG P, SPATHELF P, LARSEN JB, BAUHIUS J, BONČINA A ET AL (2014) Suitability of close-to-nature silviculture for adapting temperate European forests to climate change. *Forestry* 87: 492–503.
- BREIMAN L (2001) Random Forests. *Mach Learn* 45: 5–32.
- BRÖNNIMANN O (2018) CHclim25: A high spatial and temporal resolution climate dataset for Switzerland. Lausanne: Univ Lausanne. 3 p.
- BRZEZIECKI B, KIENAST F, WILDI O (1995) Modeling potential impacts of climate change on the spatial distribution of zonal forest communities in Switzerland. *J Veg Sci* 6: 257–268.
- BÜRGI M, SCHULER A (2003) Driving forces of forest management – an analysis of regeneration practices in the forests of the Swiss Central Plateau during the 19th and 20th century. *For Ecol Manage* 176: 173–183.
- CARRARO G, GIANONI P, KEMPER A (2020) La vegetazione forestale della Valle Onsernone e le sue tendenze evolutive. Bern: Haupt, Bristol-Schriftenreihe 61. 337 p.
- CH2018 (2018) CH2018. Climate scenarios for Switzerland, Technical Report. Zurich: National Centre for Climate Services. 271 p.
- DELARZE R, GONSETH Y, EGGENBERG S, VUST M (2015) Lebensräume der Schweiz: Ökologie–Gefährdung–Kennarten Bern: Ott, 3 ed. 456 p.
- ELLENBERG H, KLÖTZLI F (1972) Waldgesellschaften und Waldstandorte der Schweiz. Eidgenöss. Forsch.anstalt WSL, Mitt 48(4): 589–930.
- FISCHER HS, MICHLER B, FISCHER A (2019) High resolution predictive modelling of potential natural vegetation under recent site conditions and future climate scenarios: Case study Bavaria. *Tuexenia* 39: 9–40.
- FREHNER M, WASSER B, SCHWITTER R (2005) Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Bern: Bundesamt Umwelt Wald Landschaft. 564 p.
- FREHNER M, BURNAND J, CARRARO G, FREY H, LÜSCHER P (2009) Bestimmen des Standortstyps. Anhang 2 A der Wegleitung Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Bern: Bundesamt Umwelt Wald Landschaft.

- FREHNER M, HUBER B, GUBELMANN P, ZÜRCHER-GASSER N, ZIMMERMANN NE ET AL (2019)** Schlussbericht des Projektes «Adaptierte Ökogramme» im Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel». Birmensdorf: Eidgenöss. Forschungsanstalt WSL. doi: 10.3929/ethz-b-000341108
- FREY H, FREHNER M, BURNAND J, CARRARO G, RUTISHAUSER U (2021)** Zur Entstehung der NaiS-Standortstypen. *Schweiz Z Forstwes* 172: 146–155. doi: 10.3188/szf.2021.0146.
- INGENIEURE BART AG (2011)** Standort-Hinweiskarte Graubünden. Nesslau: Ingenieure Bart AG.
- LEIBUNDGUT H (1951)** Aufbau und waldbauliche Bedeutung der wichtigsten natürlichen Waldgesellschaften in der Schweiz. Bern: Eidgenöss. Inspektion Forstwesen Jagd Fischerei, 2. ed. 102 p.
- SCHMID E (1944–1950)** Vegetationskarte der Schweiz. Bern: Kümmerly & Frey.
- SCHMIDER P, KÜPER M, TSCHANDER B, KÄSER B (1993)** Die Waldstandorte im Kanton Zürich. Waldgesellschaften, Waldbau, Naturkunde. Zürich: VDF. 287 p.
- WASER LT, FISCHER C, WANG Z, GINZLER C (2015)** Wall-to-wall forest mapping based on digital surface models from image-based point clouds and a NFI forest definition. *Forests* 6: 4510–4528.
- WASER LT, GINZLER C, REHUSH N (2017)** Wall-to-wall tree type mapping from countrywide airborne remote sensing surveys. *Remote Sens* 9: 766.
- WOHLGEMUTH T (2012)** Swiss forest vegetation database. In: Dengler J, Oldeland J, Jansen F, Chytrý M, Ewald J, editors. *Vegetation databases for the 21st century*. Hamburg: Biocentre Klein Flottbek. p. 340.
- WÜEST RO, BERGAMINI A, BOLLMANN K, BALTENSWEILER A (2020)** LiDAR data as a proxy for light availability improve distribution modelling of woody species. *For Ecol Manage* 456: 117644.

Analyse des boisements par modélisation spatiale des types de stations NaiS

Les stations forestières constituent une base importante pour la planification sylvicole par la définition des types de stations et les recommandations pour le choix des essences. Dans le cadre des projets NaiS (gestion durable des forêts de protection) un standard des types de stations a été développé en Suisse au cours des dernières années qui a pris une importance nationale. Il existe des cartographies dans la majorité des cantons avec des unités de stations définies différemment, mais une cartographie couvrante et convergente des types de stations fait défaut. Nous avons modélisé la répartition des types de stations NaiS sur l'ensemble de la Suisse, en se basant sur l'attribution des 240 types selon NaiS aux 6357 placettes de l'Inventaire forestier national (IFN, projet «NaiS-IFN»), des cartes cantonales de stations, de nombreuses données environnementales couvrantes disponibles ainsi que des techniques d'apprentissage automatique («Machine Learning»). Nos modèles obtiennent une précision de la prévision de 57 % relative aux trois types de stations les plus probables sur le pixel forêt de 25 × 25 m. Lorsque les types de stations sont considérés avec le même objectif de mélange et de rajoinissement (agrégation de 42 unités forestières), la précision de la prévision atteint même 75%. Ce résultat est satisfaisant si l'on considère que 80% des types de stations sont cartographiés sur moins de 1% des placettes IFN. La modélisation fournit ainsi des aperçus utiles aux niveaux régional et national. Deux exemples nous montrent les applications potentielles du modèle dans la pratique: le premier nous indique quelle proportion des types de stations NaiS pourrait se décaler en Suisse en conséquence du changement climatique, le second nous montre, pour le canton de Zurich, dans quels cas le boisement actuel diffère fortement de la composition potentielle naturelle des essences.

Spatial explicit modelling of NaiS forest site types to analyse forest cover

Forest community ecology and site evaluation is an important basis for forestry planning that comprises the definition of site types and the recommendation of suitable tree species. During the last years, a national standard of forest site types has been established in the frame of NaiS-projects (Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald). While for a majority of cantons, forest site maps regarding different classification methods are available, a nationwide and consistent map of such site types is lacking. Here, we modelled the nationwide distribution of site types based on the assignment of 240 forest site types to the 6357 plots of the Swiss National forest Inventory, (NFI; Project "NaiS-NFI"), cantonal maps of forest site types, a large range of spatially explicit environmental variables and machine learning methods. The prediction accuracy of our models was 57% regarding the three most likely site types per 25 × 25 m forest pixel. When focusing on site types aggregated to units with identical mixture and recruitment targets (42 forest units), the prediction accuracy increased to 75%. Keeping in mind that 80% of all site types were present on less than 1% of the NFI sample plots, this result is encouraging. The model provides useful overviews at both national and regional scales. Two case studies are given to demonstrate potential applications of the model in forestry practice: firstly, we show the expected shifts of NaiS site types in Switzerland under projected climate change, and secondly, we illustrate where the current tree species composition in forests of the Canton of Zürich deviates strongly from the potential natural species composition.