



Fotos: ©Waldökologie, ETH Zürich

## **Verbesserung des Steinschlagprofils für Schweizer Schutzwälder im Rahmen von NaiS: Abschlussbericht**

**Dr. Ulrike Hiltner & Prof. Dr. Harald Bugmann**

Professur Waldökologie, Institut für Terrestrische Ökosysteme,  
Department Umweltsystemwissenschaften, ETH Zürich, Universitätsstrasse 16, 8092 Zürich

Korrespondenz: Ulrike Hiltner (E-Mail: [ulrike.hiltner@usys.ethz.ch](mailto:ulrike.hiltner@usys.ethz.ch), Tel: +41 4463-25759)

Projektförderung:	Bundesamt für Umwelt – BAFU
Kontaktpersonen:	Stéphane Losey, Benjamin Lange
Projektlaufzeit:	01.09.2020 – 31.08.2021
Aktualisierung:	01.11.2022

Datenquellen:  
EFM-Versuchsflächen der WSL  
Schweizer Karte der Vegetationshöhenstufen  
DAYMET Klimadaten der WSL

Kontaktpersonen:  
Dr. David Forrester  
Dr. Andreas Zischg, Dr. Monika Frehner  
Dr. Dirk Schmatz

Anmerkung: Der Bericht ist für interne Zwecke gedacht, Weitergabe nur nach Rücksprache mit den Autoren.

## Inhalt

Zusammenfassung.....	2
1    Einleitung.....	3
2    Methoden .....	4
2.1    Das Waldmodell ForClim.....	4
2.2    Übersicht der methodischen Vorgehensweise .....	6
2.3    Validierung des Modells.....	6
2.3.1    Auswahl der Waldbestände .....	6
2.3.2    Verarbeitung der Klimadaten .....	8
2.3.3    Schätzung des Bodenwasserspeichervermögens und der Nährstoffverfügbarkeit .....	8
2.3.4    Simulationseinstellungen .....	8
2.3.5    Analysen.....	8
2.4    Simulation der nachhaltigen Grundfläche und ihrer Verteilung .....	9
2.4.1    Ableitung generischer Waldbestände .....	9
2.4.2    Simulationseinstellungen .....	11
2.5    Statistische Modellierung der Grundflächenverteilung .....	12
3    Ergebnisse .....	12
3.1    Auswahl der geeignetsten ForClim-Varianten anhand der EFM-Bestandesdaten.....	12
3.2    Validierung der simulierten Grundflächen- und Stammzahlverteilungen über die Grössenklassen.....	13
3.3    Eigenschaften der generischen Bestände ohne Bewirtschaftung .....	16
3.4    Ableitung der Grundflächenverteilung über die Grössenklassen.....	16
4    Synthese .....	18
4.1    Validierung von ForClim mit empirischen Daten .....	18
4.2    Ableitung verbesserter Grundflächenverteilungen für die vier Höhenstufen .....	19
5    Schlussfolgerungen .....	20
6    Ausblick .....	20
Dank.....	20
Literatur .....	21

## Zusammenfassung

Wir beschreiben einen Ansatz zur Bestimmung der nachhaltigen Grundflächenverteilung über die Stammdurchmesserklassen für unterschiedlich bewirtschaftete Schutzwälder in verschiedenen Vegetationshöhenstufen der Schweiz. Der Ansatz verbindet dynamische Waldmodellierung mit empirischen Waldinventurdaten und soll dazu beitragen, das Anforderungsprofil im Rahmen des Steinschlagtools von NaiS (Nachhaltigkeit im Schutzwald) zu verbessern. Das Projekt baut auf der Vorarbeit einer Pilotstudie von Dr. Timothy Thrippleton et al. auf und wurde weiterentwickelt.

Im aktuellen Steinschlag-Anforderungsprofil wird die Bestandesgrundfläche gleichmässig über die Stammdurchmesserklassen (hiernach Grössenklassen) verteilt und daraus die zu erreichende Stammzahl je Grössenklasse errechnet. Diese Annahme tendiert zu unrealistischen Vorgaben, weil die Stammzahl in kleineren Grössenklassen überschätzt wird. In der Praxis der Schutzwaldpflege erscheinen diese Vorgaben oft unerreichbar, und eine verbesserte Berechnung der Grundflächenverteilungen ist nötig. Weil diese je nach Standort, Bestandesstruktur, Baumartenzusammensetzung und Bewirtschaftungsart variiert, ist für deren Herleitung ein dynamischer Ansatz nötig.

Dynamische Waldmodelle stellen die Sukzession von Gebirgswäldern unter vielfältigen Standortbedingungen und Bewirtschaftungsregimes dar. Wir nutzten das dynamische Waldmodell ForClim, um für verschiedene Waldbestände in vier Vegetationshöhenstufen (unter-, ober-, hochmontan und subalpin; hiernach Höhenstufen) die Grundflächenverteilung über die Grössenklassen zu simulieren. Dabei berücksichtigten wir verschiedene Bewirtschaftungsszenarien. An die Simulationsergebnisse jeder Höhenstufe passten wir ein statistisches Modell an, welches die Grundflächenverteilung als Funktion der Grössenklasse gut abbildet. Die konkreten Projektziele waren:

1. Validierung des Waldmodells ForClim für die vier Höhenstufen auf Grundlage von Waldinventur- und Ertragsdaten der EFM-Versuchsflächen, um in der Modellanwendung zuverlässige und robuste Ergebnisse zu erhalten, die in NaiS einfließen können;
2. Ableitung nachhaltig erzielbarer Bestandesgrundflächen über die relevanten Grössenklassen.

**Basierend auf den Projektergebnissen empfehlen wir, die abgeleiteten statistischen Modelle im NaiS-Steinschlag-Tool zu implementieren.** Perspektivisch wäre es sinnvoll zu untersuchen, ob die Anforderungsprofile unter den Bedingungen des Klimawandels noch erreicht werden können, oder ob eine Anpassung der Bewirtschaftung nötig wird.

## 1 Einleitung

Die Schutzwirkung von Gebirgswäldern spielt eine entscheidende Rolle beim Risikomanagement von Naturgefahren, so unter anderem im Hinblick auf den Schutz vor Steinschlag (Dorren et al., 2015, 2005). Je nach Steingröße, Baumartenzusammensetzung und Waldstruktur sind Waldbestände in der Lage, das Steinschlagrisiko durch das Abbremsen oder Stoppen von Steinen erheblich zu reduzieren. Die Verteilung der Grundfläche über die Grössenklassen ist besonders wichtig, denn Bäume in kleineren Klassen mit einer höheren Dichte an Stämmen erhöhen die Trefferwahrscheinlichkeit für rollende Steine, wogegen Stämme in grösseren Klassen grössere Steine tendenziell stoppen (Dorren et al., 2005). Um einen nachhaltigen Schutz vor Steinschlag zu gewährleisten, ist die Erhaltung einer bestimmten Verteilung der Bäume über die Durchmesserklassen von zentraler Bedeutung. In der Schweiz dient die Bewirtschaftungsrichtlinie "Nachhaltigkeit in Schutzwäldern" (NaiS) als rechtlich verbindliche Rahmenbedingung für die Forstwirtschaft (Frehner und Schwitter, 2005). NaiS ist in den letzten Jahren in verschiedener Hinsicht weiterentwickelt worden, u.a. bezüglich des Anforderungsprofils für Steinschlagschutzwälder (Dorren et al., 2015).

Im Rahmen von NaiS wird für Steinschlag ein Mindestprofil an Waldeigenschaften festgelegt, die zur Gewährleistung der Schutzfunktion erforderlich sind. Dieses Profil wird mit Hilfe einer App<sup>1</sup> ermittelt, die auf dem Modell Rockfor.net basiert (Berger and Dorren, 2007). Abhängig von den Eigenschaften der Steine, Hangneigung, Baumartenzusammensetzung und Baumgrößenverteilung ermittelt die App die Werte der minimalen und idealen nachhaltigen Grundfläche sowie die entsprechende Baumgrößenverteilung. Bisher werden dazu die Schätzwerte der nachhaltig erreichbaren Bestandesgrundfläche gleichmässig über alle Grössenklassen verteilt, um die Anzahl der Bäume pro Grössenklasse zu berechnen. Diese Annahme führt insbesondere in den unteren Grössenklassen zu sehr hohen Vorgaben bezüglich der Anzahl der Bäume (GWG, 2018). Für die Schutzwaldpflege ist eine verbesserte Berechnung der Grundflächenverteilung über die Grössenklassen essenziell. Da die Verteilung der Bestandesgrundfläche jedoch zeitlich und räumlich (z.B. über Standorte und Höhenstufen hinweg) stark variiert, ist es nicht trivial, allgemeingültige, nachhaltige und realistische Stammzahlverteilungen für Gebirgswälder abzuleiten.

Eine Möglichkeit, einen Beitrag zur Lösung dieses komplexen Problems zu leisten, ist der Einsatz von dynamischen Waldmodellen. Sie ermöglichen eine flexible Berücksichtigung sowohl standortspezifischer Umweltfaktoren als auch von Bewirtschaftungsregimes. Sie erlauben zudem, die Walddynamik und damit die zeitliche Entwicklung der Waldstruktur (z.B. Stammzahl- und Grundflächenverteilung, Baumartenzusammensetzung) über lange Zeiträume zu simulieren. Basierend auf einer erfolgreichen Pilotstudie für die obermontane Höhenstufe (Thrippleton et al., 2020a) verwenden wir in diesem Projekt das dynamische Waldmodell ForClim (Bugmann, 2001; Bugmann, 1996). ForClim wird seit über 20 Jahren an der Professur für Waldökologie der ETH Zürich weiterentwickelt und erwies sich als geeignet für die Simulation von Schweizer Gebirgswäldern, u.a. weil es ein breites Spektrum an Bewirtschaftungsszenarien berücksichtigen kann (Mina et al., 2017; Rasche et al., 2011; Thrippleton et al., 2020b). Darüber hinaus wurden kürzlich in einer Modellerweiterung verschiedene Modellvarianten entwickelt, die eine flexiblere Berücksichtigung von standortspezifischen Bedingungen, z. B. bezüglich der Verjüngung, des Baumwachstums und der Baumsterblichkeit, ermöglichen (Huber et al., 2020).

---

<sup>1</sup> permanente URL der App: <http://www.gebirgswald.ch/de/anforderungen-steinschlag.html>

In einem ersten Schritt verwendeten wir das Waldmodell für die Simulation der Grundflächenverteilungen über Grössenklassen vieler Waldbestände in den vier Höhenstufen unter-, ober-, hochmontan und subalpin. Wir validierten die simulierten Grundflächenverteilungen mithilfe von Waldinventur- und Ertragsdaten von EFM-Versuchsflächen der WSL (Forrester et al., 2019), um zuverlässige und robuste Ergebnisse zu erhalten, die in NaiS einfließen können.

In einem zweiten Schritt entwickelten wir für jede Höhenstufe generische Waldbestände, die anhand der Zusammensetzung der vorherrschenden Baumarten, der Standortbedingungen (z.B. Klima, Boden) sowie charakteristischer Bewirtschaftungsregimes definiert wurden. Thrippleton et al. (2020a) zeigten, dass sich die Grundflächenverteilungen der einzelnen Waldbestände ähnelten, sodass sie in den Analysen nicht unterschieden wurden. Aufgrund dieses Ergebnisses erzeugten wir generische Waldbestände für jede Höhenstufe (z.B. vorherrschende Artenzusammensetzung und mittlere Standorteigenschaften). Für diese Waldbestände entwickelten wir jeweils ein Set an Bewirtschaftungsszenarien. Aus der simulierten Bestandesgrundfläche und ihrer Verteilung über die Grössenklassen leiteten wir für jede Höhenstufe mittels statistischer Modellierung die nachhaltig erzielbare Grundflächenverteilung ab.

## 2 Methoden

### 2.1 Das Waldmodell ForClim

ForClim ist ein prozessbasiertes Waldsukzessionsmodell, das die Dynamik von Waldbeständen auf einer Vielzahl kleiner Flächen (engl. «patches», ca. 400 – 1000 m<sup>2</sup>) simuliert (Bugmann, 1996). Auf jedem Patch wird die Verjüngung, das Wachstum und die Mortalität einzelner Bäume in Kohorten (d.h. Gruppen von Bäumen gleicher Grösse) unabhängig voneinander und zeitlich variabel simuliert. Auf Einzelbaumebene spielen Umweltfaktoren wie Wasserverfügbarkeit und Temperatur sowie die Konkurrenz um Licht eine wichtige Rolle, denn durch sie wird die Baumentwicklung limitiert. Werden bestimmte Schwellenwerte über- oder unterschritten, führt dies z.B. zu einer Reduktion der Zuwachsraten und einem Anstieg der Mortalitätswahrscheinlichkeit.

ForClim ist modular aufgebaut (Abb. 1). Im Wettermodul werden die Klimafaktoren von monatlichen Werten der Niederschlagssummen und Mitteltemperaturen ( $\pm$  einer gewissen Streuung) stochastisch, mit einem Wettergenerator, ermittelt. Auf Grundlage der Wetterdaten werden im Wassermodul Verdunstung, Bodenwassergehalt und ein Trockenheitsindex berechnet. Aus diesen sog. bioklimatischen Bedingungen werden im Pflanzenmodul die Verjüngung, das Wachstum und die Mortalität der Bäume bestimmt. Jede Baumart

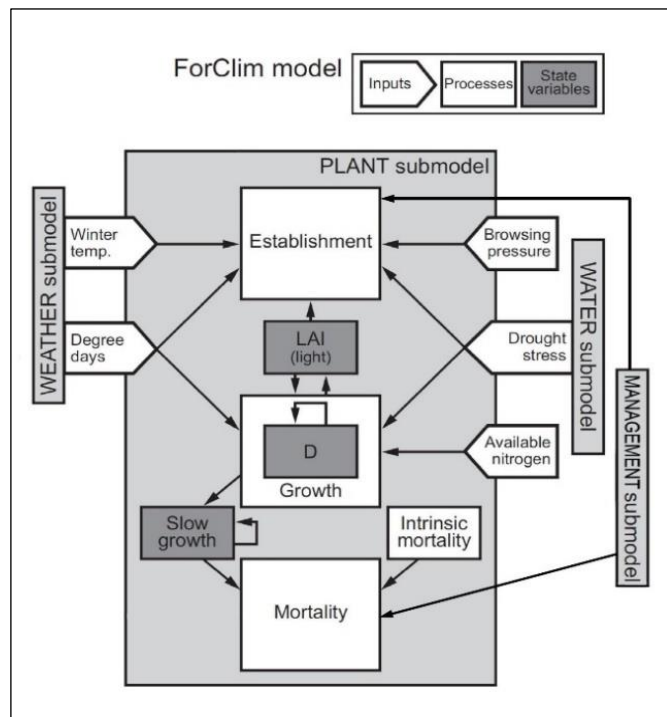


Abbildung 1: Konzeptioneller Aufbau des Waldmodells ForClim (aus Thrippleton et al., 2020a).

wird in ForClim mit spezifischen Eigenschaften, wie beispielsweise einer bestimmten Toleranz für Beschattung, Frost und Trockenheit, modelliert. Die Modellausgaben werden in jährlichen Zeitintervallen für jeden Einzelbaum berechnet und können durch Aufsummieren auf die Patch- und auf Bestandesebene hochskaliert werden. Im Bewirtschaftungsmodul werden Bäume, die bestimmte Kriterien erfüllen, entsprechend spezifischer Regeln von den Patches entfernt. Verschiedene Bewirtschaftungsformen wie Schirmschlag, Durchforstung, Z-Baum-Pflege, Einzelbaum- und Gruppenplenterung und Kahlschlag sind im Modell implementiert (Rasche et al., 2011; Thrippleton et al., 2020b).

Für die Modellvalidierung griffen wir auf die flexible ForClim-Funktion der *Relative Diameter Classes* (RDC; Mina et al., 2017) zurück, um die unterschiedlichen Bewirtschaftungsregime vieler verschiedener Waldbestände wiederzugeben. Mit RDC ist die Ernte eines prozentualen Anteils der Bestandesgrundfläche, die für jede gewünschte Baumart in fünf relative Grössenklassen aufgeteilt wird, möglich. Die fünf Grössenklassen werden anteilig und in Abhängigkeit der aktuell minimalen und maximalen Stammdurchmesser im Bestand berechnet. Auch die Zeitpunkte der Eingriffe können flexibel festgelegt werden.

Zur Simulation der Modellausgaben, die zur Herleitung der nachhaltigen Grundflächenverteilung je Höhenstufe dienen, verwendeten wir die (i.) Einzelbaumplenterung und (ii.) gruppenweise Gebirgsplenterung:

(i.) Bei der Einzelbaumplenterung werden alle Bäume mit einem BHD oberhalb eines nutzerdefinierten Zieldurchmessers entfernt. Die Bestandesgrundfläche soll annähernd konstant bleiben. Wenn die angestrebte Bestandesgrundfläche durch die Entnahmen oberhalb des Zieldurchmessers noch nicht erreicht ist, werden zusätzlich Bäume unterhalb des Zieldurchmessers entfernt. Die Auswahl der Bäume erfolgt dabei zufällig.

(ii.) Die Gebirgsplenterung (MFP) zielt auf die gruppenweise Entnahme von Bäumen auf kleinen Flächen (d.h. Baumkollektiven) ab, um die strukturelle Heterogenität des Waldes zu erhalten oder zu verbessern und die Verjüngung einzuleiten. Dabei werden alle Bäume auf kleinen Flächen (*Patches*), die einen vom Benutzer festgelegten Durchmesser überschreiten, entfernt. Es werden Patches geerntet, bis die gewünschte Eingriffsstärke erreicht ist. Eingriffe werden nur durchgeführt, wenn zum Eingriffszeitpunkt genügend erntefähiges Holzvolumen vorhanden ist. Die MFP-Funktion stellt sicher, dass auf jeder Fläche nur einmal geerntet wird, bis alle Flächen behandelt sind (d. h. ein Umtriebszyklus ist abgeschlossen).

Des Weiteren bietet ForClim die Möglichkeit, Simulationen der Waldsukzession entweder ab einer Freifläche oder ab einer spezifischen Bestandesstruktur (z.B. Baumgrössenverteilung und Artenzusammensetzung) zu beginnen, die aus den Daten eines Einzelbaumes von Waldinventurdaten abgeleitet wird.

Die Analysen des aktuellen Projektes führten wir mit der ForClim-Version 4.0.1 durch. Mit dieser Modellversion kann man unterschiedliche Annahmen für Verjüngung, Wachstum und Mortalität der Bäume in sog. Modellvarianten testen. Insgesamt sind 12 Varianten vorhanden (Huber et al., 2020), über die Tab. S1.1 im Anhang eine Übersicht gibt. Eine ausführliche Modellbeschreibung findet sich z.B. in Bugmann (1996, 2001) und für das Bewirtschaftungsmodul in Rasche et al. (2012, 2011), Bircher et al. (2015), Mina et al. (2017) und Thrippleton et al. (2020b).

## 2.2 Übersicht der methodischen Vorgehensweise

Das Projekt wurde in drei aufeinander aufbauende Arbeitspakete eingeteilt werden: (1) die *Validierung* der simulierten Stammzahl- und Grundflächenverteilungen über Grössenklassen mit gemessenen Daten von Waldbeständen in vier Höhenstufen, (2) die *Modellanwendung* für die Entwicklung von Simulationsszenarien zur Bereitstellung von Daten für (3) die *statistische Modellierung* der nachhaltig erreichbaren Grundflächenverteilung generischer Waldbestände in diesen Höhenstufen (Tab. 1). In den folgenden Unterkapiteln (Kap. 2.3 – 2.5) stellen wir die zugrundeliegenden Methoden detailliert vor.

**Tabelle 1: Übersicht über die Arbeitsschritte des Projektes sowie die verwendete Datengrundlage und die Simulationseinstellungen im Waldmodell ForClim.**

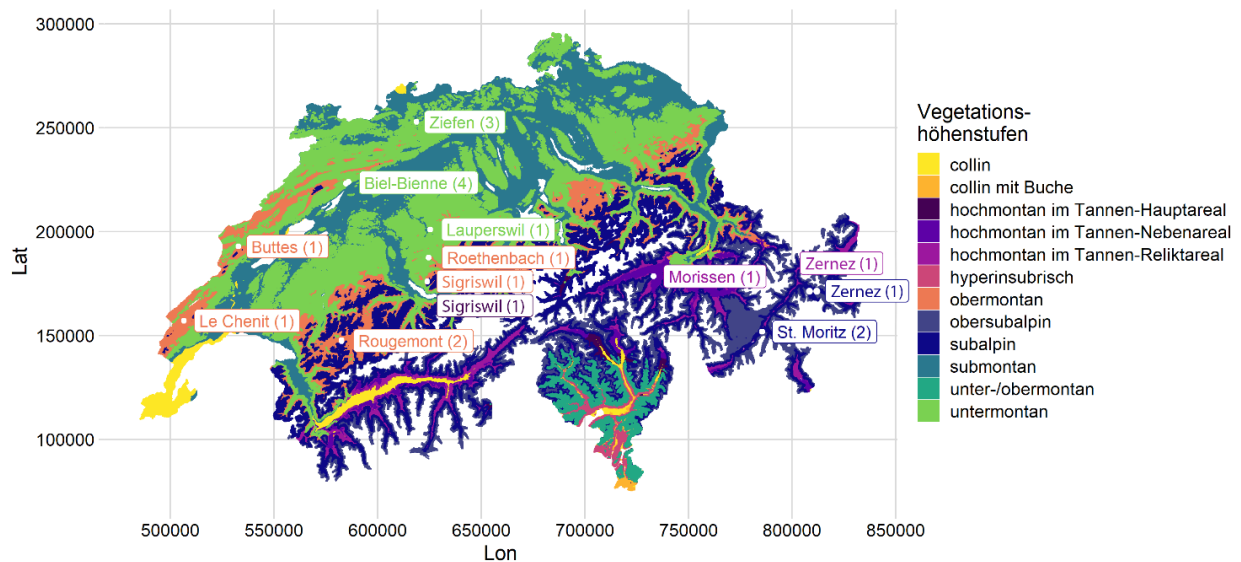
	Validierungsprozess		Modellanwendung	Statistische Modellierung
Arbeitsschritt	Modellinitialisierung	Validierung der Grundflächenverteilung über Grössenklassen	Entwicklung von Simulationsszenarien	Ableitung von <i>Generalized Additive Models</i> (GAMs)
Waldbestände	20 repräsentative Waldbestände, verteilt über vier Höhenstufen		Generische Waldbestände je Höhenstufe	
Datengrundlage	1. Erstinventur der EFM-Daten (Forrester et al., 2019) 2. Karte der Vegetationshöhenstufen der Schweiz (Zischg et al., 2021) 3. Lokale DAYMET-Klimadaten der WSL (s. Fussnote 3) 4. Karte der Bodenwasserspeicherkapazität (Tschumi, 2012)	1. Inventuren der EFM-Daten ohne Erstinventur (Forrester et al., 2019) 2. Ertragstabellen der EFM-Daten (Forrester et al., 2019) 3. Klimadaten, Höhenstufen- und Bodenwasserkarte wie bei <i>Modellinitialisierung</i>	1. Regionale DAYMET-Klimadaten der WSL zugeordnet je Höhenstufe	1. Ergebnisse der Simulationsszenarien (s. <i>Simulationsprozess</i> )
Simulationseinstellungen	Initialisierung: Simulation ab jeweiliger Bestandesstruktur Zeitpunkt: erstes Inventurjahr Alle vorhandenen Baumarten Lokale Standortbedingungen Simulation: Zeitraum: erstes – letztes Inventurjahr Management: RDC-Funktion, Parameterwerte aus Ertragsdaten, Alle vorhandenen Baumarten, Lokale Standortbedingungen		Simulation: Ab Freifläche, Zeitschritte 0 – 2000, Management: Plenterung (unter-, obermontan), MFP-Funktion (hochmontan, subalpin) Zeitraum Management: Zeitschritte 1500 – 2000 Parametervariation: Eingriffsstärke, Zieldurchmesser	

## 2.3 Validierung des Modells

### 2.3.1 Auswahl der Waldbestände

Für die Initialisierung und Validierung der Simulationsergebnisse von ForClim verwendeten wir Waldinventur- und Ertragsdaten von 20 EFM-Versuchsflächen (Forrester et al., 2019). Bei der Auswahl dieser Daten war das Ziel, für jede Höhenstufe repräsentative Waldbestände bezüglich der Baumartenzusammensetzung zu finden, die über längere Zeiträume ( $\geq 50$  Jahre) inventarisiert und in regelmässigen Abständen bewirtschaftet wurden und in denen die letzte Inventur nach 2011 durchgeführt (Aktualität) wurde. Zudem sollte die Bestandesgeschichte wenig undokumentierte Ereignisse wie Störungen mit hohen Baummortalitätsraten aufweisen. Für letzteres legten wir als Kriterium fest, dass in mehr als 75% aller Inventuren pro Versuchsfläche das Verhältnis der Baummortalität

zur Gesamtstammzahl jährlich maximal 5% betrug. Abb. 2 zeigt die geographische Lage der 20 ausgewählten Waldbestände innerhalb der vier Höhenstufen, die wir nach Zischg et al. (2021) zuordneten. Die Standorteigenschaften sind in Tab. S1.2 dargestellt.



**Abbildung 2:** Karte der Vegetationshöhenstufen der Schweiz mit den Standorten der 20 EFM-Bestände. Die Anzahl der EFM-Bestände je Ort wird in Klammern angegeben. (CRS: CH 1903/LV03, Daten: Zischg et al. (2021)).

Die EFM-Daten enthielten die Ortsnamen, Flächennummern und -größen der Versuchsflächen als Metadaten. Von jedem gemessenen Baum nutzten wir die Informationen zu Art, Stammdurchmesser auf Brusthöhe (BHD; Kluppschwelle = 8 cm) und Zustand ('lebend', 'gefällt', 'tot' oder 'verschwunden'). Für die Bäume des Status 'verschwunden' fehlten die BHD-Messwerte, weshalb wir für diese den zuletzt gemessenen Wert annahmen. Wir verwendeten die 20 EFM-Versuchsflächen wie folgt:

- i. Für die Initialisierung von ForClim nutzten wir das erste Inventurjahr und berücksichtigten nur die Bäume im lebenden Zustand, um daraus die vorhandenen Baumarten, deren Stammzahl- und Grundflächenverteilung je Grössenklasse abzuleiten.
- ii. Die Parameterwerte der RDC-Funktion im Managementmodul von ForClim leiteten wir aus den Ertragsdaten der EFM-Versuchsflächen ab, d.h. wir berücksichtigten nur die Bäume des Status 'gefällt' und 'verschwunden'<sup>2</sup>. Daraus ermittelten wir das Jahr der Eingriffe und berechneten den prozentualen Anteil der geernteten Bestandesgrundfläche sowie den entsprechenden Anteil daran pro Baumart und relativer Grössenklasse (RDC). Jede der insgesamt fünf RDCs hatte eine Klassenbreite von 20%, dynamisch berechnet aus dem Wertebereich des minimalen und maximalen gemessenen BHDs eines Inventurjahres.
- iii. Für die Validierung der Grundflächenverteilungen über die Grössenklassen verwendeten wir alle Inventurjahre ausser des ersten, damit die Ergebnisvalidierung mit unabhängigen Daten durchgeführt werden konnte. Wir berechneten die Stammzahl- und Grundflächenverteilungen über alle Grössenklassen je Baumart (s. Gl. 1 und 2). Zudem ermittelten wir für jeden Inventurzeitpunkt zwei Datenpunkte der Stammzahlen und Grundflächen je Baumart. Für den ersten Datenpunkt berücksichtigten wir neben den lebenden auch die gefällten

<sup>2</sup> Die Bäume des Status 'verschwunden' berücksichtigten wir bei der Parametrisierung der RDC-Funktion, damit sie in ForClim geerntet werden konnten.



und die toten und verschwundenen Bäume; dies stellt die Waldstruktur vor dem Eingriff dar. Der zweite Datenpunkt ergab sich aus den Werten der lebenden Bäume, was die Waldstruktur nach dem Eingriff und ohne die abgestorbenen Bäume reflektiert.

### 2.3.2 Verarbeitung der Klimadaten

Wir verwendeten für die Parametrisierung des Wettermoduls interpolierte Klimadaten der Schweiz mit einer räumlichen Auflösung von 100 m x 100 m und in täglichen Zeitschritten. Für die 20 Waldbestände (Abb. 2; Tab. S1.2) extrahierten wir die Zeitreihen der Mitteltemperatur und Niederschlagssumme aus der DAYMET<sup>3</sup>-Datenbank der WSL. Aus diesen zwei Variablen berechneten wir jeweils monatliche Mittelwerte und Standardabweichungen sowie monatliche Werte des Pearsons-Korrelationskoeffizienten zwischen der Temperatur und Niederschlagssumme (gemittelt über den Zeitraum 01.01.1931 – 31.12.2019).

### 2.3.3 Schätzung des Bodenwasserspeichervermögens und der Nährstoffverfügbarkeit

Wir verwendeten die Karte des Bodenwasserspeichervermögens der Schweiz (Tschumi, 2012), um die Kategorien für die 20 EFM-Versuchsflächen abzulesen. Wir ordneten den Kategorien entsprechende Parameterwerte für die *Bucket Size* (entspricht der nutzbaren Feldkapazität) und der Nährstoffverfügbarkeit zu. Diese nutzbare Feldkapazität wird im Wassermodul für die Berechnung des Bodenwasserhaushaltes benötigt; die Nährstoffverfügbarkeit geht direkt ins Zuwachs-Modul ein (Bugmann, 1994).

### 2.3.4 Simulationseinstellungen

Wir führten die Simulationen jedes Bestandes mit allen 12 Modellvarianten von ForClim durch (s. Tab. S1.1). Sie begann ab der jeweiligen Bestandesstruktur, d.h., wir teilten ForClim die Stammzahl-, Grundflächenverteilung und Spezies zum Zeitpunkt der ersten Waldinventur mit (s. Kap. 2.3.1), und endete im letzten Inventurjahr. Die Parameterwerte, die im Waldmodell das Klima (s. Kap. 2.3.2), die Bodenbedingungen (s. Kap. 2.3.3) und die RDC-Funktion bestimmen, waren standortspezifisch.

### 2.3.5 Analysen

Um die am besten geeignete Modellvariante von ForClim je Höhenstufe auszuwählen, entwickelten wir eine Zielfunktion  $Q$ , mit deren Hilfe sich die Simulationsergebnisse der 12 Modellvarianten anhand eines Indexwerts quantitativ miteinander vergleichen lassen.  $Q$  baut auf dem mittleren quadratischen Fehler ( $RMSE$ ) der beobachteten und simulierten Stammzahlen ( $N$ ) und Grundflächen ( $G$ ) übereinstimmender Jahre und Baumarten auf:

$$Q = RMSE(N) \cdot RMSE(G) \quad (3)$$

Ein tiefer Wert von  $Q$  zeigt eine bessere Eignung der Modellvariante an, denn die  $RMSE$  zwischen den simulierten und beobachteten Datenreihen sind geringer. Wir wählten die Modellvariante mit dem geringsten Wert  $Q$  für die

---

<sup>3</sup> DAYMET ist eine Interpolationssoftware, die für die Erstellung von gerasterten Schätzwerten der täglichen Wetterparameter über grosse Regionen entwickelt wurde (Thornton et al., 1997; s. <https://daymet.ornl.gov/>). Datenherkunft: Bioklimatische Karten der Schweiz © WSL auf Grundlage der Stationsdaten des Bundesamtes für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz. Datenaufbereitung: Landschaftsdynamik, WSL.

Simulation der Grundflächenverteilungen über die Grössenklassen je Höhenstufe. Um den Anteil jedes EFM-Bestandes ( $B$ ) am Wert  $Q$  je Höhenstufe abzuschätzen zu können, berechneten wir deren relativen Anteile ( $Q_{rel}$ ):

$$Q_{rel} = \frac{Q_B}{Q}. \quad (4)$$

In einer weiteren Analyse verglichen wir die simulierten und gemessenen artspezifischen Werte der Stammzahl- und Grundflächenentwicklungen über den gesamten Simulationszeitraum sowie die Stammzahl- und Grundflächenverteilungen über die Grössenklassen in einem mittleren sowie im letzten Inventurjahr.

Für die Validierung berechneten wir schliesslich die relativen Fehler  $\varepsilon_{rel}$  zwischen den simulierten ( $sim$ ) und gemessenen ( $gem$ ) Stammzahlen  $N$  und Grundflächen  $G$  jeder Baumart zu jedem Vergleichszeitpunkt (d.h. Jahre mit Inventur) bezogen auf den Gesamtbestand ( $ges$ ) wie folgt:

$$\varepsilon_{rel,N} = (N_{sim} - N_{gem}) / N_{gem,ges} \quad (5.1), \text{ beziehungsweise}$$

$$\varepsilon_{rel,G} = (G_{sim} - G_{gem}) / G_{gem,ges} \quad (5.2).$$

Die Ergebnisse der Validierung bewerteten wir anhand der folgenden Kategorien:

1. Sehr gut: von allen Baumarten im Bestand betrug der relative Fehler zwischen den gemessenen und simulierten Stammzahlen sowie Grundflächen während des gesamten Vergleichszeitraumes weniger als 0.25.
2. Gut: von mindestens einer Baumart im Bestand lag der mittlere relative Fehler zwischen den gemessenen und simulierten Stammzahlen sowie Grundflächen mindestens einmal während des gesamten Vergleichszeitraumes zwischen 0.25 und 0.5.
3. zufriedenstellend: von mindestens einer Baumart im Bestand lag der mittlere relative Fehler zwischen den gemessenen und simulierten Stammzahlen sowie Grundflächen mindestens einmal während des gesamten Vergleichszeitraumes zwischen 0.5 und 0.75.

## 2.4 Simulation der nachhaltigen Grundfläche und ihrer Verteilung

### 2.4.1 Ableitung generischer Waldbestände

Thrippleton et al. (2020a) zeigten in der Pilotstudie, dass sich die mittleren relativen Grundflächenverteilungen (gemittelt über die Simulationszeit) der einzelnen Waldbestände innerhalb der obermontanen Höhenstufe kaum unterscheiden. Daher unterschieden sie die einzelnen EFM-Bestände innerhalb einer Höhenstufe in ihrer Analyse nicht. Diesen Ansatz übernahmen wir in diesem Projekt, indem wir generische Waldbestände definierten (d.h. gemittelt je Höhenstufe; Tab. 1). Diese unterscheiden sich voneinander durch die Baumartenzusammensetzung, die Standortbedingungen sowie das Bewirtschaftungsregime (Tab. 2).

Die Parametrisierungen der ForClim-Funktionen für Plenterung und Gebirgsplenterung basierten auf der Studie von Bircher (2015), in der mittels Expertengesprächen sog. *best-practice* Bewirtschaftungsregime je Höhenstufe vorgeschlagen wurden. Für jeden generischen Waldbestand simulierten wir ein Set an Bewirtschaftungsszenarien, wobei sich diese bei der Plenterung durch variierende Zieldurchmesser und Eingriffsstärken unterschieden. Bei der Gebirgsplenterung setzten wir den minimalen BHD der zu entfernenden Bäume auf 12 cm, d.h. Jungwald wurde stehen gelassen, alle grösseren Bäume auf dem Patch wurden entfernt.

**Tabelle 2: Annahmen bezüglich Baumartenzusammensetzung, Bewirtschaftungsregimes und Standorteigenschaften, durch welche sich die generischen Waldbestände der vier Vegetationshöhenstufen unterscheiden. Erläuterungen zur Notation in der Tabelle:**

**BHD: Stammdurchmesser auf Brusthöhe**

**(1) P: Einzelbaumpflanzung**

**(2) G: Gebirgspflanzung.**

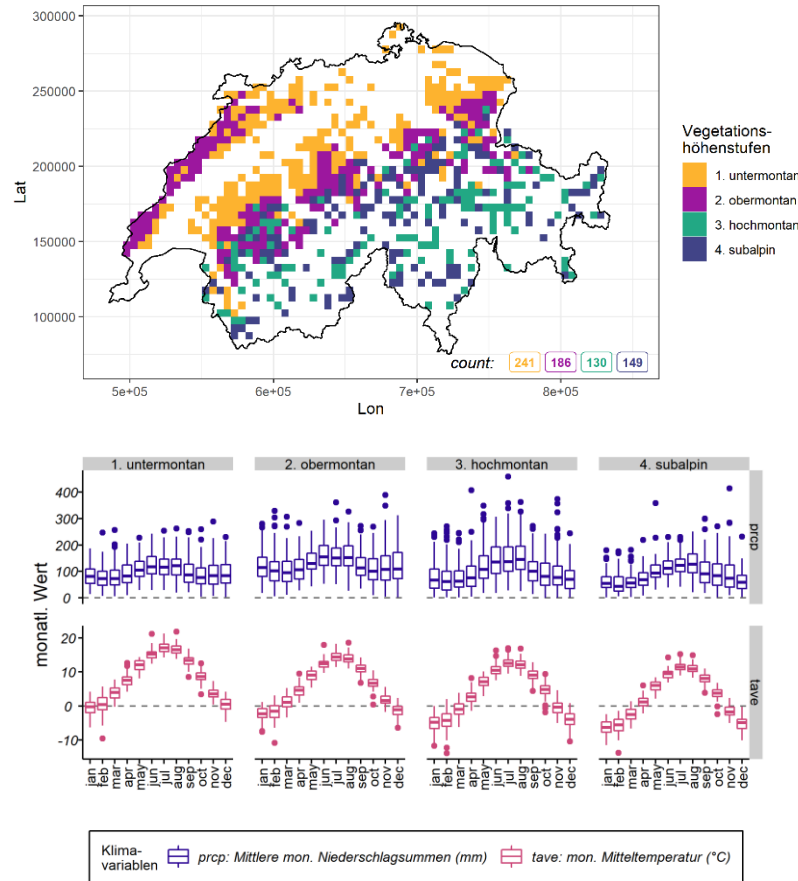
Höhenstufe	Artenzusammensetzung	Bewirtschaftungsreime	Eingriffszyklus (a)	Bewirtschaftungsparameter: P <sup>(1)</sup> : verbleibende Grundfl. (m <sup>2</sup> /ha), bzw. G <sup>(2)</sup> : Eingriffsstärke (%)	P <sup>(1)</sup> : Zieldurchmesser, bzw. G <sup>(2)</sup> : Min. BHD für Fällung (cm)	Nutzbare Feldkapazität (cm)	Stickstoffverfügbarkeit (kg/ha)
<b>Untermontan</b>	<i>Abies alba</i> <i>Acer pseudoplatanus</i> <i>Fagus sylvatica</i> <i>Picea abies</i>	Pflanzung	10	20, 30, 40	40, 60, 80	16	80
<b>Obermontan</b>	<i>Abies alba</i> <i>Acer pseudoplatanus</i> <i>Fagus sylvatica</i> <i>Picea abies</i>	Pflanzung	10	30, 40, 50	40, 60, 80	16	80
<b>Hochmontan</b>	<i>Abies alba</i> <i>Picea abies</i>	Gebirgspflanzung	25	10, 25, 35	12	16	80
<b>Subalpin</b>	<i>Picea abies</i>	Gebirgspflanzung	30	10, 25, 35	12	16	80

Die Parametrisierung des Wettermoduls basierte auf den interpolierten Wetterdaten der DAYMET-Datenbank der WSL (vgl. Kap. 2.3.2). Allerdings unterschied sich das Vorgehen der Datenextraktion von jenem in der Validierung. Hier war das Ziel, repräsentative Klimaparameter pro Höhenstufe zu erhalten: Für jede Höhenstufe wurden deshalb die mittleren Klimabedingungen aus den täglichen Werten für die Mitteltemperatur und die Niederschlagssumme über den Zeitraum 01.01.1980 – 31.12.2010 abgeleitet. Um die Gitterzellen der DAYMET-Daten (Auflösung 100 m · 100 m) zu bestimmen, aus denen die benötigten Klimavariablen extrahiert werden sollten, legten wir zuerst ein 5 km-Gitternetz über die Schweiz. Jedem der so gewonnenen Gitterpunkte ordneten wir dann eine Höhenstufe

nach Zischg et al. (2021) zu, extrahierten für jeden Punkt die gewünschten Datenreihen mit täglichen Werten aus der Datenbank und aggregierten sie zu monatlichen Werten (Abb. 3, oben). Von der untersten bis zur obersten Höhenstufe nehmen die Monatsmitteltemperaturen ab und die monatlichen Niederschläge zu (Abb. 3, unten), was plausibel ist. In einem nächsten Schritt fassten wir die Datensätze jeder Höhenstufe zu monatlichen Mittelwerten und Standardabweichungen der Temperatur und Niederschlagssummen sowie zu monatlichen Pearson-Korrelationskoeffizienten zwischen Temperatur und Niederschlag zusammen (Mittelwerte s. Tab. S1.3).

## 2.4.2 Simulationseinstellungen

Für die Simulation der generischen Waldbestände der obermontanen, hochmontanen und subalpinen Höhenstufen verwendeten wir die ForClim-Variante 1; für den untermontanen Waldbestand wurde Variante 13 verwendet (Tab. S1.1). Alle Simulationen begannen im Jahr 0 ab einer Freifläche und endeten nach 2000 Jahren. Unter der Annahme, dass die Wälder nach 1300 simulierten Jahren einen Gleichgewichtszustand erreicht hatten, verwendeten wir die Jahre 1300 – 2000 für die Analysen. Die Zeitschritte <1500 dienten als unbewirtschaftete Referenz, und



**Abbildung 3: (Oben) Zuordnung der aus der DAYMET-Datenbank extrahierten Pixel für die Berechnung der mittleren Klimabedingungen je Höhenstufe zur Erstellung der generischen Waldbestände (Auflösung 5000 m). Farbige Ziffern zeigen die Anzahl der extrahierten Datenreihen. (Unten) Übersicht über die innerjährliche Verteilung der Temperatur und Niederschläge für die verschiedenen Höhenzonen, basierend auf den für die Modellanwendung extrahierten Daten der DAYMET-Datenbank (s. Tab. 1). Diese Datengrundlage diente zur Ableitung der Parameterwerte des Wettermoduls (s. Kap. 2.1).**

alle waldbaulichen Eingriffe fanden in den Zeitschritten 1500 – 2000 statt. In Tab. 2 und Tab. S1.3 sind die Parameterwerte für jeden generischen Waldbestand aufgelistet, welche sich durch das Klima und die Bewirtschaftung unterscheiden.

## 2.5 Statistische Modellierung der Grundflächenverteilung

Für die Analyse der Grundflächenverteilungen über die Grössenklassen berechneten wir zuerst die relative simulierte Bestandesgrundfläche ( $G_{rel}$ ) jeder Grössenklasse ( $C$ ; Klassenbreite = 4 cm, Kluppschwelle = 12 cm) und jedes Zeitschrittes, um vergleichbare Ergebnisse über alle Höhenstufen hinweg zu erhalten:

$$G_{rel} = \frac{G_C}{G}, \quad (5)$$

wobei  $G$  die absolute Bestandesgrundfläche ist.

In einem nächsten Schritt visualisierten wir die relativen Grundflächenverteilungen (Gl. 5) für jeden generischen Waldbestand und jedes Bewirtschaftungsszenario (typische Bewirtschaftungsregime je Höhenstufe, Variation von Zieldurchmessern und Eingriffsstärken; s. Tab. 2). Die relative Bestandesgrundflächenverteilung variierte mit den Simulationszeitschritten, daher wählten wir eine jährliche Auflösung für die Ableitung der statistischen Modelle.

Für die statistische Modellierung der Grundflächenverteilungen wählten wir generalisierte additive Modelle (GAMs), weil sie komplexe nichtlineare Zusammenhänge flexibel erfassen können (Hastie und Tibshirani, 1986; Wood, 2017). Mit GAMs kann eine univariate abhängige Variable (hier  $G_{rel}$ ) anhand von mehreren unabhängigen Variablen (hier Durchmesserklasse ( $C$ ), Zieldurchmesser ( $Z$ ), Eingriffszyklus ( $I$ ) und Eingriffsstärke ( $R$ ; prozentualer Anteil der geernteten Bestandesgrundfläche) abgeschätzt werden. Die beste Anpassung zur Abschätzung von  $G_{rel}$  zeigte das GAM  $g$  mit der folgenden allgemeinen Formulierung:

$$g(E(G_{rel})) = \beta_0 + f_c(C) + f_z(Z) + f_r(R) + f_i(I) + \varepsilon, \quad \text{mit } \varepsilon \sim N(0, \sigma^2) \quad (6)$$

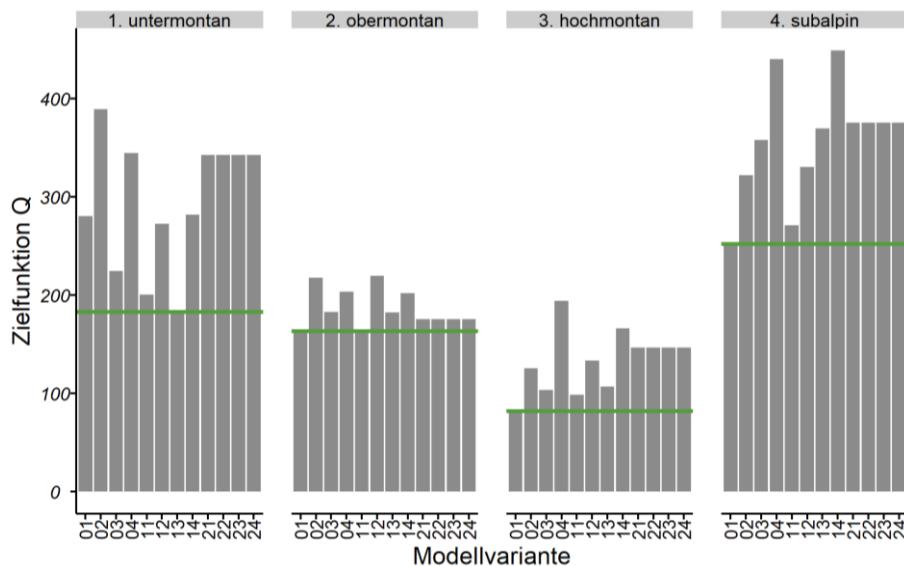
wobei  $E(G_{rel})$  der Erwartungswert der relativen Grundfläche,  $\beta_0$  der Y-Achsenabschnitt und  $\varepsilon$  der normalverteilte Fehler ist, der mit einer Varianz  $\sigma^2$  um den Erwartungswert 0 schwankt. Mit der allgemeinen Formulierung (Gl. 6) schätzten wir die Bestandesgrundflächenverteilungen über die Grössenklassen der Bewirtschaftungsszenarien jeder Höhenstufe.

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Auswahl der geeignetsten ForClim-Varianten anhand der EFM-Bestandesdaten

Der Vergleich der gemessenen und simulierten Grundflächen und Stammzahlen mittels der Zielfunktion  $Q$  (Gl. 3) zeigte, dass die ForClim-Modellvarianten 01 mit dem ursprünglichen Verjüngungsmodul für die obermontanen, hochmontanen und subalpinen EFM-Bestände die beste Übereinstimmung aufwies (Abb. 4; vgl. Abb. S1.1 und Tab. S1.1). Modellvariante 13 mit einem anders formulierten Verjüngungsmodul (v.a. höhere Verjüngungsfreudigkeit) eignete sich am besten für die untermontanen EFM-Bestände. Die Modellvariante 11 (ebenfalls mit einem modifizierten Verjüngungsmodul) lieferte für die obermontanen Bestände einen ebenso geringen Wert für  $Q$  wie Variante 01, jedoch waren die relativen Differenzen zwischen den Grundflächen und Stammzahlen über die Zeit

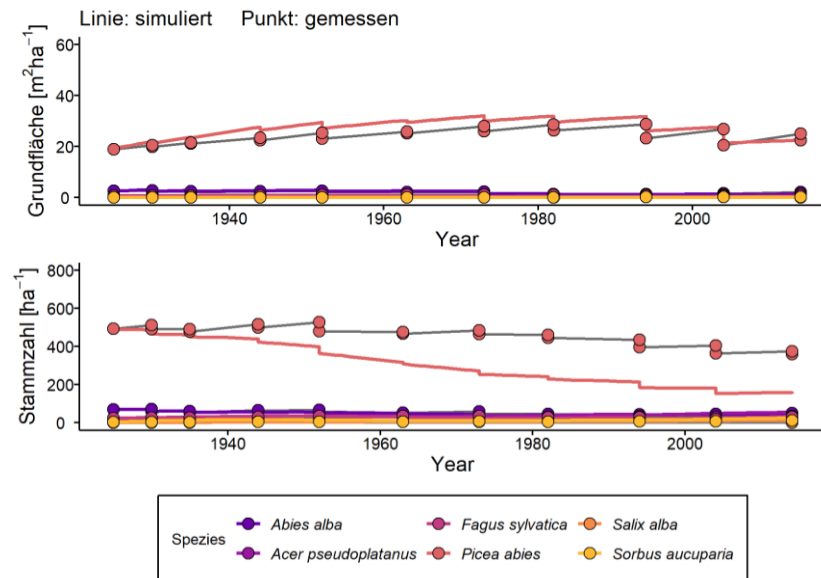
in Modellvariante 01 geringer. Entsprechend der Qualifikation für die Höhenstufen wählten wir die Modellvarianten 01 und 13 für die Validierung der Simulationsergebnisse der 20 EFM-Bestände und die Modellanwendung aus.



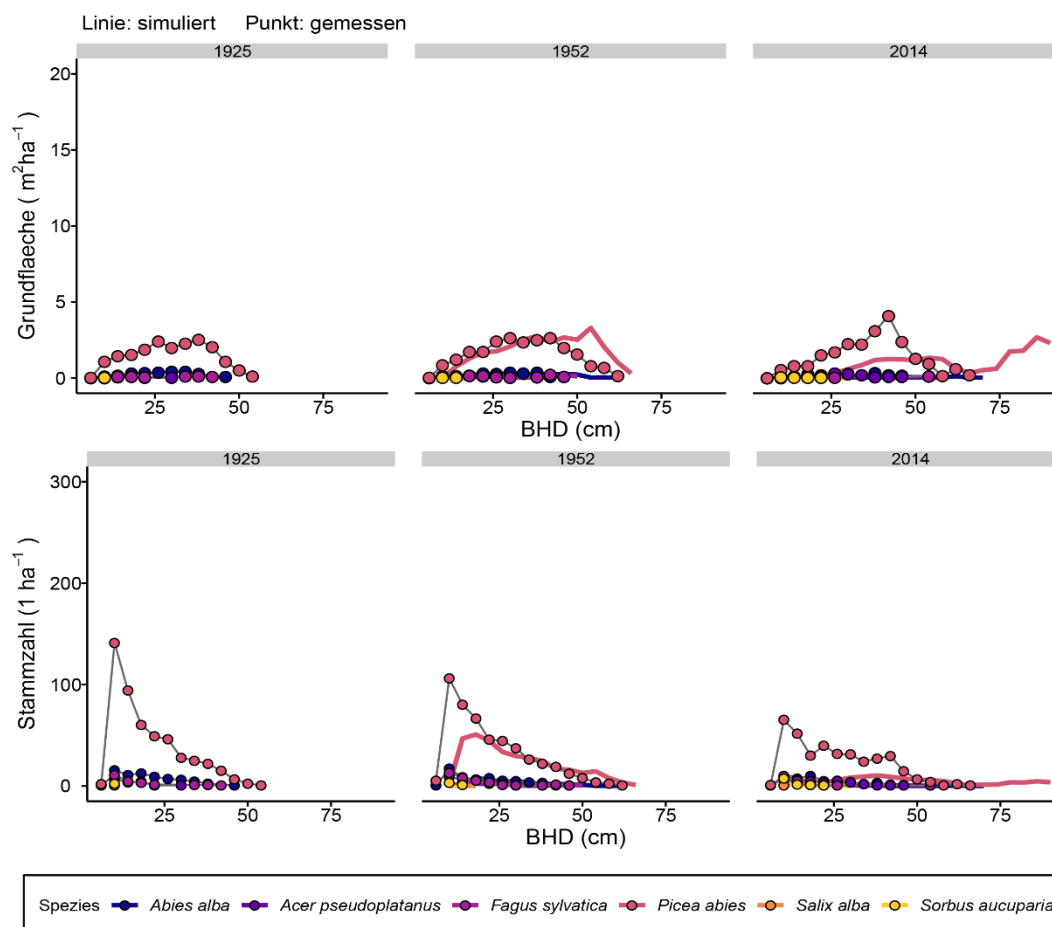
**Abbildung 4:** Bestimmung der am besten geeigneten Modellvariante von ForClim je Höhenstufe anhand der Zielfunktion  $Q$  (Gl. 3). Die grüne Linie zeigt die geringsten Werte für  $Q$  an. Der relative Anteil an  $Q$  pro EFM-Bestand geht aus Abb. S1.1 hervor.

### 3.2 Validierung der simulierten Grundflächen- und Stammzahlverteilungen über die Grössenklassen

Der zeitliche Verlauf der simulierten und gemessenen artspezifischen Grundflächen und Stammzahlen für den obermontanen Fichten-Tannen-Bestand in Le Chenit (VD) wird beispielgebend in Abb. 5 dargestellt. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass ForClim die Bestandesdynamik gut reproduzieren kann. Insgesamt resultierte eine gute Übereinstimmung zwischen dem gemessenen und simulierten Verlauf der Datenreihen pro Baumart, nur die Stammzahl von *P. abies* wurde ab den 1940er-Jahren unterschätzt (Abb. 6). Grundsätzlich wurden während der simulierten Eingriffe die gemessenen Anteile der Bestandesgrundfläche je Baumart entfernt. Allerdings kam es vor, dass im Modell einige wenige Bäume der obersten Durchmesserklassen ( $>62$  cm) nicht geerntet wurden, sodass es auf dem Waldboden zu dunkel war und die Verjüngung nicht realistisch stattfinden konnte. Vor allem für die dominierende Baumart *P. abies* waren die simulierten Stammzahlen der Grössenklassen über 62 cm höher als die gemessenen, und jene der unteren ( $<20$  cm) wurden vom Modell entsprechend unterschätzt (Abb. 5, unten: Jahre 1952 und 2014). Dies führte im Modell zu einer leicht verschobenen Bestandesstruktur gegenüber der beobachteten, sodass die simulierten Grundflächen der Grössenklassen mit einem BHD grösser als 54 cm überschätzt wurden (Abb. 5, oben: Jahre 1952 und 2014). Obwohl die simulierten Stammzahlen der kleinen Grössenklassen für Le Chenit unterschätzt wurden, fiel dies beim Vergleich der gemessenen und simulierten Grundflächen über die Zeit nicht stark auf (Abb. 5, oben), denn kleine Grössenklassen haben einen geringen Anteil an der Bestandesgrundfläche. Ein ähnliches Modellverhalten beobachteten wir auch in den Simulationsergebnissen vieler anderer der 19 EFM-Bestände (entsprechende Grafiken siehe elektronischer Anhang 'Figures/EFM-Bestaende').

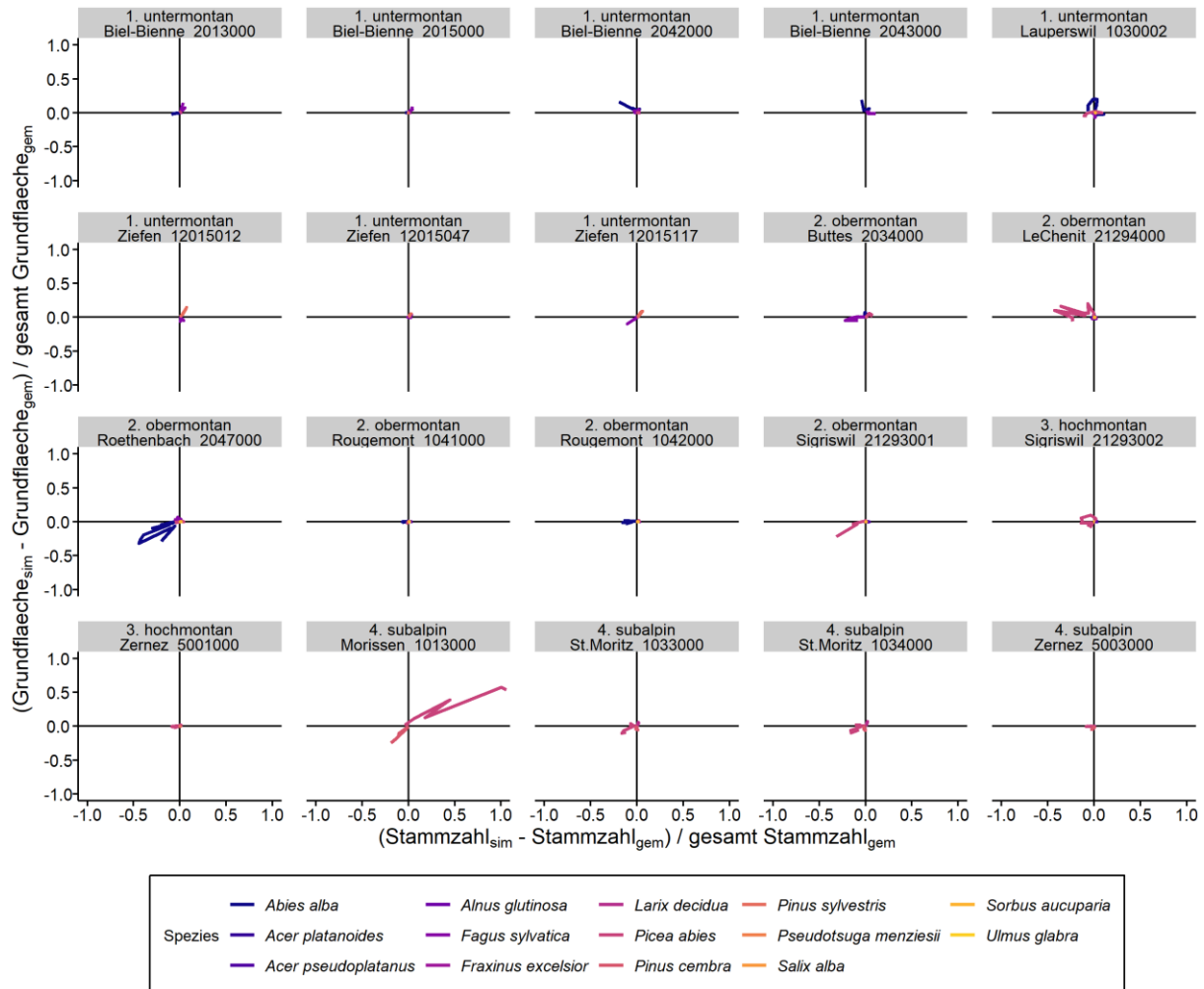


**Abbildung 5:** Vergleich der gemessenen und simulierten (oben) Grundflächen- und (unten) Stammzahlentwicklungen je Baumart für den EFM-Bestand in Le Chenit (VD). Die gemessenen Werte sind als Punkte und die Simulationsergebnisse als Linien dargestellt. Die grauen Linien verbinden die diskreten Messwerte miteinander zur besseren Übersicht. In jedem Inventurjahr sind die Datenpunkte der Zustandsvariablen vor und nach dem Eingriff angegeben.



**Abbildung 6:** Vergleich der gemessenen und simulierten (oben) Grundflächen- und (unten) Stammzahlverteilungen über die Größenklassen (BHD-Klassenbreite 4 cm) je Baumart für das mittlere (1952) und letzte Inventurjahr (2014) des EFM-Bestandes in Le Chenit (VD). Die gemessenen Werte sind als Punkte und die Simulationsergebnisse als Linien dargestellt. Die grauen Linien verbinden die Messwerte miteinander zur besseren Übersicht. Im Initialisierungsjahr 1925 stimmen die gemessenen und simulierten Daten perfekt überein.

Insgesamt waren die Validierungsergebnisse sehr zufriedenstellend, d.h. das Ergebnis des Validierungsprozesses war für 95% der getesteten EFM-Bestände sehr gut und für 5% zufriedenstellend (vgl. Abb. 7; Kap. 2.3.5). Die relativen Fehler zwischen simulierten und gemessenen Stammzahlen und Grundflächen (s. Gl. 5.1 und Gl. 5.2) waren in den meisten Fällen gering. Nur die Simulationsergebnisse für den Bestand in Morissen wichen deutlich von den beobachteten Daten ab (Abb. 7).



**Abbildung 7: Vergleich der Validierungsergebnisse aller 20 EFM-Bestände verteilt über vier Vegetationshöhenstufen. Die Paneele zeigen die bestandsspezifischen Entwicklungen der relativen Fehler (s. Gl. 5.1 und Gl. 5.2) zwischen den simulierten (sim) und den gemessenen (gem) Grundflächen über Stammzahlen für jede vorkommende Baumart. Je geringer die Differenzen zwischen den simulierten und gemessenen Datenpunkten sind, desto näher bleiben die farbigen Linien am Ursprung des Koordinatensystems (Schnittpunkt der schwarzen Linien).**

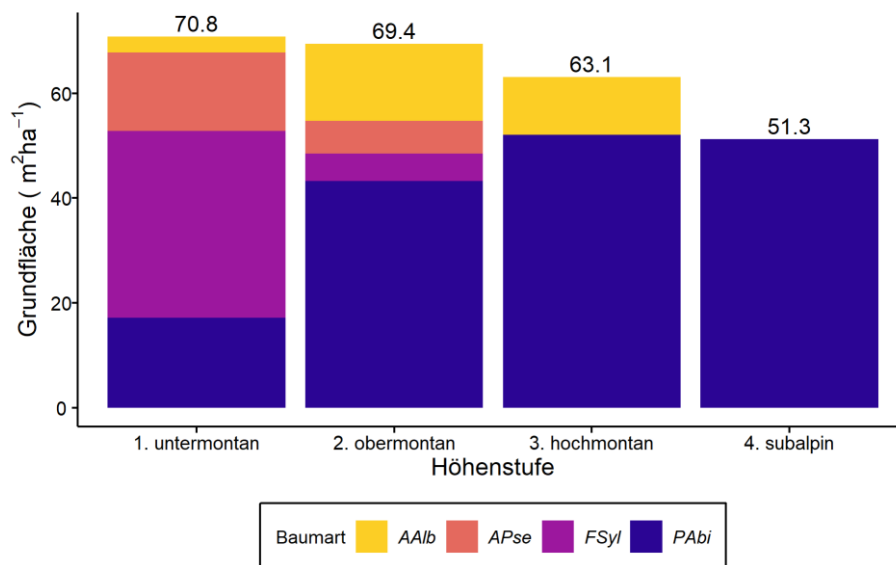
Für die vertiefte Analyse der Ergebnisse berücksichtigten wir folgende Aspekte: (i) Mithilfe der archivierten Bestandesbeschreibungen der WSL fanden wir heraus, dass es sich bei den vier Versuchsflächen in Biel um einen ehemaligen schwachen Niederdurchforstungsversuch (B-Grad) handelte, weshalb zwischen 1930 und den 1970er-Jahren vermehrt *F. sylvatica* einwuchs. Dieser Einwuchs wurde in den Inventurdaten von 1925, die zur Modellinitialisierung verwendet werden sollten, nicht berücksichtigt, weil die Bäume die Kluppschwelle von 8 cm noch nicht erreicht hatten. In diesem Fall fehlte ForClim zum Zeitpunkt der Modellinitialisierung die Information über die ungewöhnlich erhöhte Verjüngung der kommenden Jahre, und das Modell konnte die Walddynamik und -struktur deshalb nicht reproduzieren. Das Problem behoben wir in den Simulationen von drei der vier Bestände in Biel, indem wir die EFM-Daten erst ab dem Jahr 1979 (bzw. 1982) nutzten. (ii) Im Fall von Lauperswil wurde in



den letzten zwei Jahrzehnten ein Anstieg der Stammzahl von *A. alba* und *P. abies* beobachtet, den ForClim nicht reproduzierte. Vor diesem Zeitraum reproduzierte ForClim die Walddynamik und Struktur des Bestandes aber gut. Der Grund für die Abweichung konnte nicht eruiert werden. (iii) In Le Chenit, Röthenbach und Sigriswil kam es zu einer verstärkten Unterschätzung der simulierten Stammzahlen von *P. abies* bzw. *A. alba*. Wir nehmen an, dass in den EFM-Daten Umwelteffekte enthalten sind, welche ForClim nicht vollständig berücksichtigt.

### 3.3 Eigenschaften der generischen Bestände ohne Bewirtschaftung

Die Struktur der vier generischen Waldbestände im Gleichgewicht mit dem Klima ergab sich nur aufgrund der unterschiedlichen Standorteigenschaften ohne Berücksichtigung von Bewirtschaftung (d.h. potenzielle natürliche Vegetation; Abb. 8). Beispielsweise führten die feuchteren, wärmeren Klimabedingungen in der untermontanen Höhenstufe bei der Simulation zu einem stark buchendominierten Bestand mit Beimischung von Ahorn, Fichte und etwas Tanne. Die kühleren Standortbedingungen der obermontanen Stufe resultierten in einem Fichten-Tannen-Bestand mit etwas Buche und Ahorn. Grundsätzlich nahm die Bestandesgrundfläche mit zunehmender Höhe ab, und die simulierte Artenzusammensetzung entspricht den Erwartungen für die jeweilige Höhenstufe. Die mittlere Bestandesgrundfläche je Höhenstufe wird unter Bewirtschaftung reduziert auf etwa 30 m<sup>2</sup>/ha – 50 m<sup>2</sup>/ha je nach Bewirtschaftungsszenario (Abb. 9).



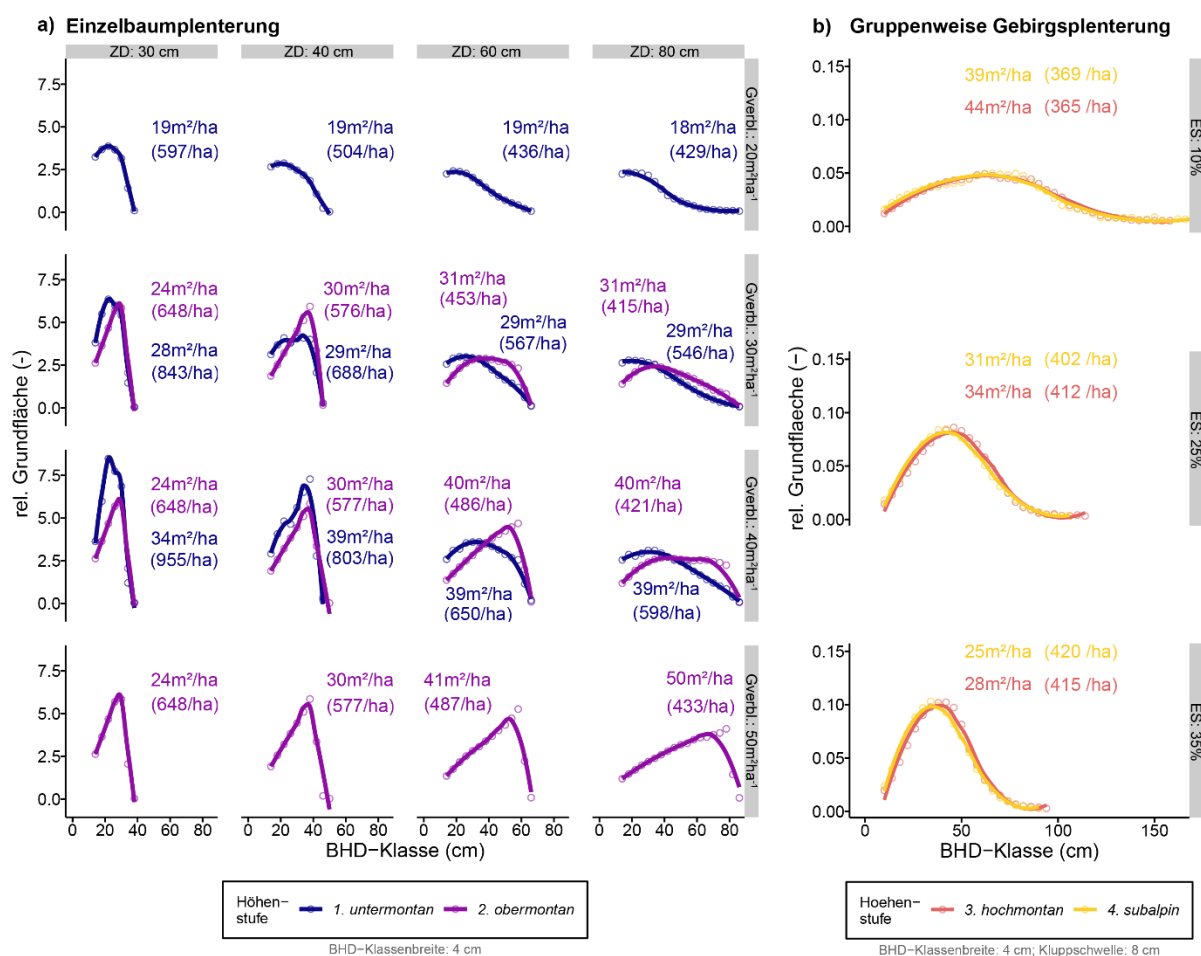
**Abbildung 8:** Mittlere artspezifische Grundfläche der generischen Waldbestände im Gleichgewichtszustand (potenzielle natürliche Vegetation, ohne Bewirtschaftung) in den verschiedenen Vegetationshöhenstufen (gemittelt über die simulierten Zeitschritte 1300 – 1499; Kluppschwelle = 12 cm BHD). Die Zahlen über den Balken zeigen die jeweilige Bestandesgrundfläche [m<sup>2</sup>/ha] im Gleichgewichtszustand. AAlb: *Abies alba*, APse: *Acer pseudoplatanus*, FSyl: *Fagus sylvatica*, PAbi: *Picea abies*.

### 3.4 Ableitung der Grundflächenverteilung über die Größenklassen

Für die vier Waldbestände ergaben sich bei der Ableitung der Grundflächenverteilungen mittels des GAMs gute Modellanpassungen unter Berücksichtigung der Dreifach-Interaktion zwischen Zieldurchmesser, Eingriffszyklus und Eingriffsstärke (Abb. 9). Die statistisch erklärte Variabilität (d.h. die Bestimmtheitsmasse) lag für alle Waldbestände zwischen 39% und 67% (Tab. 3). Aufgrund der hohen Anpassungsfähigkeit von GAMs war das statistische Modell fähig, die Grundflächenverteilungen über die Größenklassen der vier Waldbestände gut wiederzugeben. Für alle Höhenstufen ergaben sich unimodale Grundflächenverteilungen (Abb. 9).

**Tabelle 3: Bewertung der generalisierten additiven Modelle anhand der erklärten Devianz, des Bestimmtheitsmasses ( $R^2$ ) und des p-Wertes (Kluppschwelle = 12 cm BHD).**

Generischer Waldbestand	Erklärte Devianz	p-Wert	$R^2$
Untermontan	0.41	0.000	0.39
Obermontan	0.67	0.000	0.66
Hochmontan	0.70	0.000	0.67
Subalpin	0.68	0.000	0.65



**Abbildung 9: Simulierte Grundflächenverteilung über die Grössenklassen (farbige Punkte; BHD-Klassenbreite = 4 cm, Kluppschwelle = 12 cm BHD) sowie die generalisierten additiven Modelle für die jeweiligen Höhenstufen (farbige Linien). a) In den Untermontanen und Obermontanen Waldbeständen wurde Einzelbaumpflenterung und b) in den Hochmontanen und Subalpinen Waldbeständen Gebirgspflenterung simuliert. Die Ziffern in jedem Diagramm zeigen die mittleren absoluten Bestandesgrundflächen sowie jene in Klammern die mittleren absoluten Stammzahlen an (gemittelt über die simulierten Jahre 1700 – 2000). ZD: Zieldurchmesser, ES: Eingriffsstärke, Gverbl: verbleibende Bestandesgrundfläche. Die zugehörigen absoluten Stammzahlverteilungen sind aus Abb. S1.2 ersichtlich.**

Die nachhaltig erreichbaren Grundflächen können in Abhängigkeit der Bewirtschaftungsszenarien jeder Höhenstufe dargestellt werden (Tab. S1.4). Zusammen mit den abgeleiteten relativen Grundflächenverteilungen jeder

Höhenstufe kann aus der absoluten Bestandesgrundfläche der Anteil pro Grössenklasse rückgerechnet werden (Tab. S1.5).

## 4 Synthese

### 4.1 Validierung von ForClim mit empirischen Daten

Ein wichtiges Ziel dieses Projektes war, robuste Simulationsergebnisse für Waldbestände in verschiedenen Höhenstufen zu erzeugen, auf deren Basis die nachhaltige Grundflächenverteilung über die Grössenklassen geschätzt werden kann. Um die Zuverlässigkeit der Simulationsergebnisse bewertbar zu machen, validierten wir in einem ersten Schritt die Grundflächen- und Stammzahlverteilungen von 20 repräsentativen EFM-Beständen umfassend, verteilt über die vier Höhenstufen. Das Ergebnis des Validierungsprozesses war für 80% der getesteten EFM-Bestände sehr zufriedenstellend und für 20% gut (vgl. Abb. 7), d.h. eine zuverlässige Abbildung der Dynamik und Struktur dieser sehr verschiedenen Wälder mit dem Modell ForClim ist möglich.

Bei der Auswahl der repräsentativen EFM-Bestände war es wichtig, auf die Bestandesgeschichte zu achten, da diese Probleme bei der Validierung ergeben kann (z.B. fehlende Verjüngungsdaten unterhalb der Kluppschwelle bei vorhandener Verjüngung oder Störungsereignisse). Wenn in der Vergangenheit extreme Umwelt Ereignisse (z.B. Dürre, Windwurf, Insektenkalamität), welche z.B. zu erhöhter Baum mortalität führten, oder waldbauliche Eingriffe vorkamen, die in der Inventur nicht dokumentiert sind, können diese Ereignisse in den Simulationen der dynamischen Waldmodelle nicht berücksichtigt werden. Das erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass die Qualität der Validierung sinkt. In einigen von uns verwendeten Beständen kamen solche Ereignisse vor.

Beispielsweise gab es auf der Versuchsfläche Buttes in den 1940er-Jahren starken Windwurf mit Lückenbildung, in welche im Jahr 1947 gruppenweise Tannen gepflanzt wurden, die in der Inventur (Kluppschwelle BHD = 12 cm) nicht verzeichnet sind (Dr. David Forrester, *mündl. Mitt.*). Demzufolge fehlen die Ausgangsinformationen über diese Tannendickung, und das Modell ist deshalb nicht in der Lage, diese in der Simulation wiederzugeben. Ein weiteres Beispiel nicht dokumentierter Ereignisse gab es für die vier Versuchsflächen in Biel. Hier wurden Niederdurchforstungsversuche unterschiedlichen Grades (B-Grad und C-Grad) durchgeführt, bevor die Inventarisierung im Jahr 1914 begann, was vermutlich zu einer reichen Buchenverjüngung führte. Diese Eingriffe hatten zur Folge, dass von den 1920er- bis zu den 1970er-Jahren verstärkt *F. sylvatica* in den Inventuren einwuchs. Auch in diesen Fällen konnte ForClim die beobachtete Walddynamik deshalb nicht gut wiedergeben.

Aus diesen Gründen achteten wir bei der Auswahl der EFM-Bestände auf nicht stark schwankende Mortalitäts- und Einwuchsraten, die auf eine „ungestörte“ Walddynamik deuten. In den meisten Fällen verbesserte ein Ausschluss der «unzuverlässigen» Inventuren die Qualität der Validierungsergebnisse erheblich (vgl. Abb. 7: Buttes und  $\frac{3}{4}$  der Bestände in Biel).

Schliesslich kann festgehalten werden, dass die Datengrundlage für die Modellinitialisierung und die Parametrisierung des Bewirtschaftungsmoduls im Rahmen des Validierungsprozesses grundsätzlich sehr gut war, unter anderem aufgrund der hohen Konsistenz der Inventur- und Ertragsdaten und der grossräumigen Verbreitung der

EFM-Versuchsflächen über die ganze Schweiz. Auch die Qualität der Umweltdaten zur Ableitung der Parameterwerte für das Wetter- und Bodenwassermodul war sehr hoch. Wir betrachten es daher als einen grossen Erfolg, dass keinerlei Parameterkalibrierung<sup>4</sup> des Waldmodells nötig war.

#### **4.2 Ableitung verbesserter Grundflächenverteilungen für die vier Höhenstufen**

Für die statistische Modellierung wählten wir mit dem Modelltyp der GAMs einen pragmatischen Ansatz mit dem Ziel, die simulierten Grundflächenverteilungen der vier Höhenstufen möglichst exakt wiederzugeben. Die hohen erklärten Devianzen und Bestimmtheitsmasse (Tab. 3) zeigen, dass der Ansatz mittels GAMs geeignet war. Die besten Abschätzungen der Grundflächenverteilungen über die Grössenklassen erzielten wir unter Berücksichtigung der Dreifach-Interaktion der unabhängigen Proxyvariablen Zieldurchmesser, Eingriffszyklus und Eingriffsstärke. Generell waren die abgeleiteten GAMs unimodal und nach unten geöffnet mit Maxima zwischen 25 cm und 75 cm BHD. Der grösste Teil ihres Definitionsbereichs liegt zwischen 0 cm und ungefähr 80 cm BHD. Des Weiteren stellten wir eine hohe Sensitivität der GAMs auf Variationen in den Bewirtschaftungsszenarien fest, durch welche sich die Kurvenform flexibel veränderte (Breite, Maxima). Aufgrund ihrer hohen Flexibilität bei der Anpassung an nicht-lineare Zusammenhänge können GAMs anfällig sein für eine Überanpassung (Hastie & Tibshirani, 1986). Das hat zur Folge, dass ein GAM, das die Zusammenhänge eines spezifischen Falles wiedergibt, unter Umständen nicht in einem anderen Kontext verwendet werden kann. In den Bewirtschaftungsszenarien achteten wir aber auf eine breite Abdeckung der Simulationsbedingungen, so dass die GAMs kaum je im Extrapolationsmodus laufen sollten, wenn sie in das NaiS-Steinschlagtool eingebaut werden.

Um möglichst allgemeingültige Aussagen mit möglichst grossem Potential zur Anwendung auf viele Wälder der Schweiz treffen zu können, verwendeten wir generische Waldbestände für vier Höhenstufen, welche mittlere Bedingungen für Klima, Bodenwasserhaushalt, Artenzusammensetzung und Bewirtschaftungsregime widerspiegeln. Die Bewirtschaftungsszenarien sind von Waldbauexperten als charakteristisch für die entsprechenden Höhenstufen eingestuft worden (Bircher, 2015). Basierend auf unserem Ansatz wäre eine andere Spezifizierung der Simulationsszenarien einfach möglich:

- Im Bewirtschaftungsmodul von ForClim sind viele verschiedene Bewirtschaftungsformen (wie Schirmschlag, Durchforstung, Z-Baum-Pflege, Einzelbaum- und Gruppenplenterung) implementiert (Mina et al., 2017; Rasche et al., 2011; Thrippleton et al., 2020b), mit deren Hilfe durch Parametervariationen sehr viele verschiedene Bewirtschaftungsregime simuliert werden könnten.
- Da die DAYMET-Daten für die gesamte Schweiz vorliegen, könnten problemlos weitere Zeitreihen extrahiert werden, um z.B. lokale Klimabedingungen für das Wettermodul zu parametrisieren.
- ForClim ist für über 30 einheimische Baumarten parametrisiert. Durch die Auswahl anderer Baumartenzusammensetzungen könnten auch andere Waldtypen generiert werden.
- Standortbezogene Parameterwerte bezüglich des Bodens (z.B. Bodenwasser und Stickstoffverfügbarkeit) und der Topografie (Exposition, Hangneigung) könnten ebenfalls einfach angepasst werden.

---

<sup>4</sup> d.h. das Nachjustieren schlecht eingrenzbarer Parameterwerte durch den Modellierer zum Zweck einer verbesserten Übereinstimmung gemessener und beobachteter Daten (Railsbeck & Grimm, 2019), was den Wert einer Validations-Studie erheblich reduziert oder sogar ganz zunichtemacht.

## 5 Schlussfolgerungen

Wir entwickelten einen neuartigen Ansatz zur Bestimmung der nachhaltig erreichbaren Grundflächenverteilung über die Grössenklassen für Schutzwälder in vier Vegetationshöhenstufen der Schweiz. Die Verknüpfung dynamischer Waldmodellierung mit empirischen Waldinventurdaten trägt dazu bei, ein verbessertes Steinschlagprofil im Rahmen des Steinschlagtools von NaiS zu identifizieren. Durch den sorgfältigen Vergleich simulierter und gemessener Stammzahl- und Grundflächenverteilungen für zahlreiche Waldbestände in der unter-, ober-, hochmontanen und subalpinen Höhenstufe erhielten wir robuste Simulationsergebnisse, die wir zur Ableitung der nachhaltig erzielbaren Grundflächenverteilung über die Grössenklassen mittels statistischer Modellierung verwendeten. In Abhängigkeit der Höhenstufe berücksichtigt das statistische Modell unterschiedliche typische Bewirtschaftungsstrategien, die anhand von drei Proxyvariablen (Eingriffszyklus, Eingriffsintensität und Zieldurchmesser) definiert sind. Dieser Ansatz ist einfach übertragbar z.B. auf andere Waldtypen oder Bewirtschaftungsszenarien, da neue Parametrisierungen für das Modell rasch entwickelt und implementiert werden können.

Basierend auf den Ergebnissen unseres Projektes empfehlen wir, die von uns errechnete Verteilung der Bestandesgrundflächen über die Grössenklassen im NaiS-Steinschlagtool zu implementieren. Weil sich die Verteilungen der Bestandesgrundflächen der Höhenstufen voneinander unterscheiden, sollten höhenstufenspezifische Beziehungen berücksichtigt werden.

## 6 Ausblick

In diesem Projekt berücksichtigten wir die heutigen Klimaeffekte auf das Waldwachstum. Der Klimawandel wird die Dynamik und Struktur von Gebirgswäldern vielfältig beeinflussen und tut dies teilweise bereits (z.B. neue Verjüngungsdynamik). Das heisst, es werden Variationen vor allem bezüglich der Höhenzonierung und der Artenzusammensetzung der Wälder erwartet (Lindner et al., 2014, 2010; Mina et al., 2017; Thrippleton et al., 2020b). Das steigende Bewusstsein bezüglich der Wichtigkeit von Schutzwäldern und ihren Ökosystemfunktionen rief bereits seit längerer Zeit Forschungsinteresse hervor (Bugmann, 1997; Kienast, 1991; Lexer and Bugmann, 2017; Lingua et al., 2020). Aufgrund des erwarteten Fortschreitens des Klimawandels und der langen Planungshorizonte in der Forstwirtschaft stellen dynamische Waldmodelle wichtige Werkzeuge für die Klimafolgenforschung dar, denn sie können helfen Adaptationsstrategien (z.B. im Sinne des adaptiven Waldmanagements) zu entwickeln (Mina et al., 2017; Yousefpour et al., 2012). Es wäre deshalb zu untersuchen, ob die Anforderungsprofile für Steinschlagschutzwälder in der Schweiz unter den Bedingungen des zukünftigen Klimawandels noch erreicht werden können oder ob eine zielführende Anpassung der Waldbewirtschaftung nötig und möglich sein wird.

## Dank

Wir möchten uns herzlich bei *Stéphane Losey*, *Benjamin Lange* und *Katrin Kühne* für die fruchtbaren Diskussionen während des Projektes über den gewählten Ansatz und die Simulationsergebnisse bedanken. Ausserdem danken wir *Dr. Timothy Thrippleton* für seine Vorarbeit in der Pilotstudie dieses Projektes, *Dr. David Forrester* für die Bereitstellung der Waldinventur- und Ertragsdaten der EFM-Versuchsflächen, *Dr. Andreas Zischg* und *Dr. Monika Frehner* für die Bereitstellung der aktualisierten Vegetationshöhenstufenkarte sowie *Dr. Dirk Schmatz* für die Bereitstellung der DAYMET-Klimadaten.

## Literatur

- Berger, F., Dorren, L.K.A., 2007. Principles of the tool Rockfor.net for quantifying the rockfall hazard below a protection forest. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwes.* 158, 157–165. <https://doi.org/10.3188/szf.2007.0157>
- Bircher, N., 2015. To die or not to die: forest dynamics in Switzerland under climate change. ETH Zürich.
- Bircher, N., Cailleret, M., Bugmann, H., 2015. The agony of choice: Different empirical mortality models lead to sharply different future forest dynamics. *Ecol. Appl.* 25, 1303–1318. <https://doi.org/10.1890/14-1462.1>
- Bugmann, H., 2001. A Review of Forest Gap Models. *Clim. Change* 51, 259–305. <https://doi.org/10.1023/A:1012525626267>
- Bugmann, H., 1997. Sensitivity of forests in the European Alps to future climatic change. *Clim. Res.* 8, 35–44. <https://doi.org/10.3354/cr008035>
- Bugmann, H., 1994. On the Ecology of Mountainous Forests in a Changing Climate: A Simulation Study. ETH Zürich.
- Bugmann, Harald K.M., 1996. A simplified forest model to study species composition along climate gradients. *Ecology* 77, 2055–2074. <https://doi.org/10.2307/2265700>
- Bugmann, Harald K. M., 1996. A Simplified Forest Model to Study Species Composition Along Climate Gradients. *Ecology* 77, 2055–2074. <https://doi.org/10.2307/2265700>
- Dorren, L., Berger, F., Frehner, M., Huber, M., Kühne, K., Métral, R., Sandri, A., Schwitter, R., Thormann, J.-J., Wasser, B., 2015. Das neue NaiS-Anforderungsprofil Steinschlag. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwes.* 166, 16–23. <https://doi.org/10.3188/szf.2015.0016>
- Dorren, L., Berger, F., Maier, B., 2005. Der Schutzwald als Steinschlagnetz: Effekte von Baumart, Stammdurchmesser und Stammzahl auf den Steinschlagschutz. *LWF Aktuell* 25–27.
- Forrester, D.I., Nitzsche, J., Schmid, H., 2019. The Experimental Forest Management project: An overview and methodology of the long-term growth and yield plot network 73.
- Frehner, M., Schwitter, R., 2005. Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald - Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion, Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- GWG, 2018. Behandlung von Buchen-Schutzwäldern in der unter- und submontanen Stufe. Delémont, JU.
- Hastie, T.J., Tibshirani, R.J., 1986. Generalized Additive Models. *Stat. Science* 1, 297–318.
- Huber, N., Bugmann, H., Lafond, V., 2020. Capturing ecological processes in dynamic forest models: why there is no silver bullet to cope with complexity. *Ecosphere* 11. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3109>
- Kienast, F., 1991. Simulated effects of increasing atmospheric CO<sub>2</sub> and changing climate on the successional characteristics of Alpine forest ecosystems. *Landsc. Ecol.* 5, 225–238.
- Lexer, M.J., Bugmann, H., 2017. Mountain forest management in a changing world. *Eur. J. For. Res.* <https://doi.org/10.1007/s10342-017-1082-z>
- Lindner, M., Fitzgerald, J.B., Zimmermann, N.E., Reyer, C., Delzon, S., van der Maaten, E., Schelhaas, M.-J., Lasch, P., Eggers, J., van der Maaten-Theunissen, M., Suckow, F., Psomas, A., Poulter, B., Hanewinkel, M., 2014. Climate change and European forests: What do we know, what are the uncertainties, and what are the implications for forest management? *J. Environ. Manage.* 146, 69–83. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2014.07.030>
- Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., Lexer, M.J., Marchetti, M., 2010. Forest Ecology and Management Climate change impacts , adaptive capacity , and vulnerability of European forest ecosystems 259, 698–709. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.023>
- Lingua, E., Bettella, F., Pividori, M., Marzano, R., Garbarino, M., Piras, M., Kobal, M., Berger, F., 2020. The Protective Role of Forests to Reduce Rockfall Risks and Impacts in the Alps Under a Climate Change Perspective, *Climate Change Management*. Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37425-9\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37425-9_18)
- Mina, M., Bugmann, H., Klopčič, M., Cailleret, M., 2017. Accurate modeling of harvesting is key for projecting future forest dynamics: a case study in the Slovenian mountains. *Reg. Environ. Chang.* 17, 49–64.

<https://doi.org/10.1007/s10113-015-0902-2>

- Railsbeck, S.F., Grimm, V., 2019. *Agend-Based and Individual-Based Modeling - A Practical Introduction*, 2nd ed. Princeton University Press, Princeton.
- Rasche, L., Fahse, L., Zingg, A., Bugmann, H., 2012. Enhancing gap model accuracy by modeling dynamic height growth and dynamic maximum tree height. *Ecol. Modell.* 232, 133–143. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.03.004>
- Rasche, L., Fahse, L., Zingg, A., Bugmann, H., 2011. Getting a virtual forester fit for the challenge of climatic change. *J. Appl. Ecol.* 48, 1174–1186. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.02014.x>
- Thornton, P.E., Running, S.W., White, M.A., 1997. Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain. *J. Hydrol.* 190, 214–251. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03128-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03128-9)
- Thrippleton, T., Bugmann, H., Frehner, M., 2020a. Ein modellbasierter Ansatz zur Bestimmung der Grundflächenverteilung über die Durchmesserklassen für das NaiS-Steinschlagprofil: Eine Pilotstudie für die obermontane Höhenstufe der nördlichen Randalpen und des Juras. ETHZ, BAFU (interner Bericht) 18.
- Thrippleton, T., Lüscher, F., Bugmann, H., 2020b. Climate change impacts across a large forest enterprise in the Northern Pre-Alps: dynamic forest modelling as a tool for decision support. *Eur. J. For. Res.* 139, 483–498. <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01263-x>
- Tschumi, B., 2012. Digitale Bodeneignungskarte der Schweiz - Wasserspeichervermögen (Bundesamt für Landwirtschaft) [WWW Document]. [geoadmin.ch](https://www.geo.admin.ch/?lang=de&topic=ech&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-grau&layers=ch.swisstopo.zeitreihen,ch.bfs.gebaeude_wohnungs_register,ch.bav.haltestellen-oev,ch.swisstopo.swisstlm3d-wanderwege,ch.blw.bodeneignung-wasserspeichervermoegen,KML%7C). URL [https://www.geo.admin.ch/?lang=de&topic=ech&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-grau&layers=ch.swisstopo.zeitreihen,ch.bfs.gebaeude\\_wohnungs\\_register,ch.bav.haltestellen-oev,ch.swisstopo.swisstlm3d-wanderwege,ch.blw.bodeneignung-wasserspeichervermoegen,KML%7C](https://www.geo.admin.ch/?lang=de&topic=ech&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-grau&layers=ch.swisstopo.zeitreihen,ch.bfs.gebaeude_wohnungs_register,ch.bav.haltestellen-oev,ch.swisstopo.swisstlm3d-wanderwege,ch.blw.bodeneignung-wasserspeichervermoegen,KML%7C)
- Wood, S.N., 2017. *Generalized Additive Models: An Introduction with R*, 2nd ed. CRC Press, Chapman & Hall, Boca Raton, London, New York.
- Yousefpour, R., Jacobsen, J.B., Thorsen, B.J., Meilby, H., Hanewinkel, M., Oehler, K., 2012. A review of decision-making approaches to handle uncertainty and risk in adaptive forest management under climate change. *Ann. For. Sci.* 69, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0153-4>
- Zischg, A., Huber, B., Frehner, M., Könz, G., 2021. *Vegetationshöhenstufen auf der Grundlage der CH2018 Szenarien für die Schweiz* “. Chur, Bern.