

## Bergwald im Wandel: Analyse der räumlichen Verschiebung der Waldverjüngung über die Zeit

**Masterarbeit von Manuel Schmid**

**Vorgelegt bei Jean-Jacques Thormann und Hannes Horneber**

**Bern, 5. April 2024**

**Berner Fachhochschule**

Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften  
MSc in Life Sciences – Regionalmanagement in Gebirgsräumen

## Selbstständigkeitserklärung und Gewährung der Nutzungsrechte

Durch meine Unterschrift erkläre ich, dass

- ich die „Richtlinien über den Umgang mit Plagiaten an der Berner Fachhochschule“ kenne und mir die Konsequenzen bei deren Nichtbeachtung bekannt sind,
- ich diese Arbeit in Übereinstimmung mit diesen Grundsätzen erstellt habe,
- ich diese Arbeit persönlich und selbständig erstellt habe,
- ich mich einverstanden erkläre, dass meine Arbeit mit einer Plagiat-Erkennungssoftware getestet und in die BFH-Datenbank der Software aufgenommen wird,
- ich der HAFL ein kostenloses, unbefristetes, nicht-exklusives Nutzungsrecht an meiner Arbeit gewähre.

Ort, Datum: Bern, 5. April 2024

Unterschrift .....



## Mitteilung über die Verwendung von studentischen Arbeiten der Hochschule für Agrar-, Forst und Lebensmittelwissenschaften HAFL

Alle Rechte an Semesterarbeiten, Minorarbeiten sowie Bachelor und Master Theses der Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL sind im Besitze des/der Verfasser/in der Arbeit. Die HAFL geniesst jedoch ein kostenloses, unbefristetes, nicht-exklusives Nutzungsrecht an den Arbeiten ihrer Studierenden.

Semesterarbeiten, Minorarbeiten sowie Bachelor und Master Theses sind Bestandteile des Ausbildungsprogramms und werden von den Studierenden selbständig verfasst. Die HAFL übernimmt keine Verantwortung für eventuelle Fehler in diesen Arbeiten und haftet nicht für möglicherweise daraus entstehende Schäden

Zollikofen, Dezember 2015  
Die Direktion

# Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	5
Abbildungsverzeichnis	5
Abstract	8
1 Einleitung	9
2 Stand der Forschung	10
2.1 Bedeutung und Funktion des Waldes in der Schweiz	10
2.2 Naturwälder und deren Bedeutung	11
2.2.1 Natürliche Waldverjüngung – aktuelle Situation in der Schweiz	12
2.3 Klimawandel im Bergwald	12
2.3.1 Klimawandel und Baumgrenze	13
2.3.2 Klimawandel und Exposition	13
2.3.3 Klimawandel und Hangneigung	14
2.4 Remote Sensing – ein Überblick	14
2.5 Light Detection and Ranging LiDAR	14
2.5.1 Methoden der LiDAR Datengewinnung	15
2.5.2 Methoden der LiDAR Datenverarbeitung	16
2.6 Anwendung von ALS in der Forstwissenschaft	17
2.6.1 Gründe für die Anwendung von ALS	17
2.6.2 Anwendungsbereich ALS	17
2.6.3 Erkennung von Waldverjüngung anhand von ALS	17
2.7 Kombination von ALS mit weiteren Datenquellen	18
2.8 LiDAR basierte Erkennung von Waldverjüngung – das Verfahren der HAFL	19
2.8.1 Berechnungsweise LiDAR basierte Erkennung von Waldverjüngung	19
2.9 Forschungsfragen	21
3 Methodik	22
3.1 Der Schweizerische Nationalpark SNP	22
3.2 Il Fuorn – das Untersuchungsgebiet	24
3.2.1 Häufigste Baumarten Il Fuorn	24
3.3 Datenerhebung	27
3.3.1 Feldaufnahmen im Nationalpark	27
3.3.2 Datenaufbereitung – Daten SNP	29
3.4 Methoden Auswertung – Räumliche Verschiebung der Waldverjüngung über die Zeit	29
3.4.1 Datenscreening	29
3.4.2 Vorarbeiten Modellbildung	30
3.4.3 Modellbildung	31
3.4.4 Modellvalidierung	32
3.5 Methoden Auswertung – LiDAR basierte Erkennung der Waldverjüngung	32
3.5.1 Daten Swisstopo	33
3.5.2 Datenverarbeitung mit UC4-Tilewise	33
3.5.3 Bestimmen der Metriken zum Vergleich der Daten	38
3.5.4 Testszenarios bestimmen	40
4 Ergebnisse	40
4.1 Ergebnisse: räumliche Verschiebung der Waldverjüngung über die Zeit	40
4.1.1 Resultate Data-Screening: räumliche Verschiebung der Waldverjüngung über die Zeit	40
4.1.2 Veränderung der Verjüngung allgemein	42
4.1.3 Generelles Modell	48
4.1.4 Modell Arve	50
4.1.5 Modell Fichte	50
4.1.6 Modell Föhre	51
4.1.7 Modell Lärche	53
4.1.8 Zusammenfassung der Resultate aus den Modellen	54
4.2 Ergebnisse: LiDAR basierte Erkennung von Waldverjüngung	55

4.2.1	Resultate Datascreening: LiDAR basierte Erkennung von Waldverjüngung	55
4.2.2	Beispiele der Ausgabe-Layer	55
4.2.3	Ergebnisse Stufe 1 - Vergleich Anzahl Bäumen mit relativer Punktedichte	58
4.2.4	Ergebnisse Stufe 2 - Vergleich relative Punktedichte mit vorhandener oder nicht vorhandener Verjüngung	58
4.2.5	Ergebnisse Stufe 3 - Konfusionsmatrix	59
4.2.6	Qualitätstest	61
5	Diskussion	61
5.1	Diskussion der Forschungsfrage 1: Zeitliche und räumliche Analyse der Waldverjüngung	61
5.1.1	Hypothese 1.1 - Unterschiede zwischen den Baumarten	61
5.1.2	Hypothese 1.2 - Zunahme der Waldverjüngung	62
5.1.3	Hypothese 1.3 - Verschiebung der Waldverjüngung nach oben	63
5.1.4	Hypothese 1.4 - Keine Verschiebung bezüglich Exposition oder Hangneigung	64
5.1.5	Zusammenfassung der Diskussion der Forschungsfrage 1	64
5.2	Diskussion der Forschungsfrage 2: Zeitliche und räumliche Analyse der Waldverjüngung	65
5.2.1	Hypothese 2.1 - Unterschiedliche Qualität der Verjüngungserkennung nach Baumhöhe	65
5.2.2	Hypothese 2.2 - Resultate sind stark von Parametern abhängig	66
5.2.3	Zusammenfassung der Diskussion zur Forschungsfrage 2	68
6	Schlussfolgerungen	68
6.1	Räumliche Verschiebung der Waldverjüngung über die Zeit	68
6.2	LiDAR basierte Erkennung von Waldverjüngung	68
7	Literaturverzeichnis	70
	Dank	78
	Anhang 1: SNP Anleitung Verbissaufnahmen	79
	Anhang 2: Aufnahmeblatt 2022	84
	Anhang 3: Tabelle Neigungskorrektur	85
	Anhang 4: Modell-Validierung - Räumliche Verschiebung der Waldverjüngung über die Zeit	86
	Digitaler Anhang	94

## Abkürzungsverzeichnis

ABA	Area based approach
AIC	Akaike information criterion
ALS	Airborne Laser Scanning
AUC	Area Under Curve
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BHD	Brusthöhendurchmesser
CHM	Canopy Height Model
CTH	Canopy / Ground Treshold
DSM	Digital Surface Model
DTM	Digital Terrain Model
GIS	Geografische Informationssysteme
GLMM	Generalised Linear Mixed-Effects Models
GPS	Global Positioning System
ITD	Individual Tree Detection
IUCN	International Union for Conservation of Nature and Natural Resources
LFI	Landesforstinventar
LiDAR	Light Detection and Ranging
mALS	Multichannel Airborne Laser Scanning
RMSE	Root Mean Squared Error
ROC	Receiver Operating Characteristic
SNP	Schweizerischer Nationalpark
TLS	Terrestrial Laser Scanning
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
VHM	Vegetationshöhenmodell
WSL	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 – Waldfunktionen und Waldleistungen nach (BAFU 2022a)	11
Tabelle 2 – Entwicklungsstufen 4m Radius (Schweizerischer Nationalpark 2012)	28
Tabelle 3 – Entwicklungsstufen 8m Radius (Schweizerischer Nationalpark 2012)	28
Tabelle 4 – Zusammenfassung der Entwicklungsstufen in Altersklassen (eigene Darstellung)	29
Tabelle 5 – Parameter, Erklärung und Einheit (Eigene Darstellung)	35
Tabelle 6 – Fixe Parameter, Erklärung und Einheit (Eigene Darstellung)	35
Tabelle 7 – Fixe Parameter, Erklärung und Einheit für die Höhenklasse v234 und a2 (Eigene Darstellung)	36
Tabelle 8 – Veränderbare Parameter, Erklärung und Einheit (Eigene Darstellung)	36
Tabelle 9 – Übersicht Punkte- und Rasterfiles (eigene Darstellung)	37
Tabelle 10 – Übersicht Punkte- und Rasterfiles REJ1 (eigene Darstellung)	37
Tabelle 11 – Konfusionsmatrix (in Anlehnung an (Dalianis 2018)	39
Tabelle 12 – Metriken Stufe 3 (in Anlehnung an (Dalianis 2018)	39
Tabelle 13 – Übersicht der Metriken (Quelle: eigene Darstellung)	39
Tabelle 14 – Parameter Testszenerien (Eigene Darstellung)	40
Tabelle 15 – Binäre Verteilung Verjüngung nach Jahren und Baumarten in % (eigene Darstellung)	44
Tabelle 16 – Zusammenfassung topografische Einflussfaktoren (eigene Darstellung)	54
Tabelle 17 – Resultate Stufe 1 (eigene Darstellung)	58
Tabelle 18 – Resultate Stufe 2 (eigene Darstellung)	59
Tabelle 19 – Resultate Stufe 3 (eigene Darstellung)	60
Tabelle 20 – Auswertung der Qualitätskriterien (eigene Darstellung)	61
Tabelle 21 – Übersicht digitaler Anhang (eigene Darstellung)	94

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 – Beschaffung von LiDAR Daten (swisstopo).....	15
Abbildung 2 – Punktelwolke – Gebiet Il Fuorn (swisstopo) .....	15
Abbildung 3 – Canopy treshold (Imangholiloo et al. 2020) .....	18
Abbildung 4 – Ausschnitt Waldmonitoring Waldverjüngung Hinweiskarte mit der Stadt Bern, v.a. dem Bremgartenwald im Hintergrund (HAFL).....	19
Abbildung 5 – Beispiel Vegetationshöhenmodell (Horneber et al. 2021) .....	20
Abbildung 6 – Berechnung Waldverjüngung (Horneber et al. 2021) .....	20
Abbildung 7 – Beispiel Validierung Bremgartenwald mit Verjüngung (Horneber et al. 2021) .....	21
Abbildung 8 – Beispielvalidierung Williwald ohne Verjüngung (Horneber et al. 2021).....	21
Abbildung 9 – Perimeter Nationalpark und Perimeter untersuchtes Gebiet (in Anlehnung an (Bundesamt für Landestopografie swisstopo 2022b) .....	23

Abbildung 10 – Karte Übersicht der Plots (in Anlehnung an Bundesamt für Landestopografie swisstopo 2022a) .....	24
Abbildung 11 – Arven-Keimlinge (eigene Aufnahmen) .....	25
Abbildung 12 – Fichten-Keimling und Fichtenverjüngung (eigene Aufnahme) .....	26
Abbildung 13 – Bergföhren Keimlinge und dichte Legföhrenbestände (eigene Aufnahmen) .....	26
Abbildung 14 – Junge Lärche (eigene Aufnahme).....	27
Abbildung 15 – Anzahl Arvenverjüngung (v) für das Jahr 2022 (eigene Darstellung) .....	31
Abbildung 16 – Modell mit allen möglichen Faktoren (eigene Darstellung) .....	32
Abbildung 17 – Klassifizierung nach swisstopo (swisstopo).....	33
Abbildung 18 – Histogramme und Boxplots topografische Faktoren (eigene Darstellung) .....	41
Abbildung 19 – Korrelationen zwischen den topografischen Variablen (eigene Darstellung) .....	42
Abbildung 20 – Binäre Verteilung der Verjüngung, nach Jahren in % (eigene Darstellung) .....	43
Abbildung 21 – Vorhandensein von Verjüngung nach topografischen Faktoren und Jahren (eigene Darstellung) .....	43
Abbildung 22 – Binäre Verteilung Verjüngung nach Jahren und Baumarten in % (eigene Darstellung) ....	44
Abbildung 23 – Vorhandensein von Arvenverjüngung nach topografischen Faktoren und Jahren (eigene Darstellung) .....	45
Abbildung 24 – Vorhandensein von Fichtenverjüngung nach topografischen Faktoren und Jahren (eigene Darstellung) .....	46
Abbildung 25 – Vorhandensein von Föhrenverjüngung nach topografischen Faktoren und Jahren (eigene Darstellung) .....	47
Abbildung 26 – Vorhandensein von Lärchenverjüngung nach topografischen Faktoren und Jahren (eigene Darstellung) .....	48
Abbildung 27 – Übergeordnetes Modell (eigene Darstellung).....	48
Abbildung 28 – Random- und Fixed-Effects, übergeordnetes Modell (eigene Darstellung).....	49
Abbildung 29 – Modell Arve (eigene Darstellung) .....	50
Abbildung 30 – Fixed-Effects, Modell Arve (eigene Darstellung).....	50
Abbildung 31 – Modell Fichte (eigene Darstellung) .....	51
Abbildung 32 – Random- und Fixed-Effects, Modell Fichte (eigene Darstellung) .....	51
Abbildung 33 – Modell Föhre (eigene Darstellung).....	52
Abbildung 34 – Random- Fixed-Effects, Modell Föhre (eigene Darstellung) .....	52
Abbildung 35 – Modell Lärche (eigene Darstellung) .....	53
Abbildung 36 – Random- und Fixed-Effects, Modell Lärche (eigene Darstellung) .....	53
Abbildung 37 – Anzahl Plots mit oder ohne Anwesenheit der jeweiligen Altersklassen (eigene Darstellung) .....	55
Abbildung 38 – Karten r_ccoverage und r_cccovered im Massstab 1:30'000 und 1:500 (Quelle: in Anlehnung an Bundesamt für Landestopografie swisstopo 2022a) .....	56

Abbildung 39 - Karten reldens_v234 und reldenweighted_v234 im Massstab 1:30'000 und 1:500 (Quelle: in Anlehnung an Bundesamt für Landestopografie swisstopo 2022a).....	57
Abbildung 40 - Verjüngung nach Jahren und Baumarten in zwei Entwicklungsstufen (eigene Darstellung) .....	63
Abbildung 41 - Anova, übergeordnetes Modell (eigene Darstellung) .....	86
Abbildung 42 - AIC sowie Residuen-Skala, übergeordnetes Modell (eigene Darstellung) .....	86
Abbildung 43 - Modellvalidierung, übergeordnetes Modell .....	86
Abbildung 44 - Modellvalidierung - Residuen der Faktoren, übergeordnetes Modell (eigene Darstellung) .....	87
Abbildung 45 - Modellvalidierung - Anova, Modell Arve (eigene Darstellung) .....	87
Abbildung 46 - Modellvalidierung - AIC, Residuals, Modell Arve (eigene Darstellung) .....	87
Abbildung 47 - Modellvalidierung - Residuen der Faktoren, Modell Arve (eigene Darstellung) .....	88
Abbildung 48 - Modellvalidierung - Residuen der Faktoren, Modell Arve (eigene Darstellung) .....	88
Abbildung 49 - Modellvalidierung - Anova, Modell Fichte (eigene Darstellung) .....	88
Abbildung 50 - Modellvalidierung - AIC, Residuals, Modell Fichte (eigene Darstellung) .....	89
Abbildung 51 - Modellvalidierung - Residuen der Faktoren, Modell Fichte (eigene Darstellung) .....	89
Abbildung 52 - Modellvalidierung - Residuen der Faktoren, Modell Fichte (eigene Darstellung) .....	89
Abbildung 53 - Modellvalidierung - Anova, Modell Bergföhre (eigene Darstellung) .....	90
Abbildung 54 - Modellvalidierung - AIC, Residuals, Modell Bergföhre (eigene Darstellung) .....	90
Abbildung 55 - Modellvalidierung - Residuen der Faktoren, Modell Bergföhre (eigene Darstellung) .....	91
Abbildung 56 - Modellvalidierung - Residuen der Faktoren, Modell Bergföhre (eigene Darstellung) .....	91
Abbildung 57 - Modellvalidierung - Anova, Modell Lärche (eigene Darstellung) .....	91
Abbildung 58 - Modellvalidierung - AIC, Residuals, Modell Lärche (eigene Darstellung) .....	92
Abbildung 59 - Modellvalidierung - Residuen der Faktoren, Modell Lärche (eigene Darstellung) .....	92
Abbildung 60 - Modellvalidierung - Residuen der Faktoren, Modell Lärche (eigene Darstellung) .....	93

## Abstract

Kürzere Winter und höhere Temperaturen verändern die Voraussetzungen für die Vegetation in den Berggebieten. Das beeinflusst auch die natürliche Waldverjüngung. Diese natürliche Waldverjüngung ist eine wichtige Grundlage für die Anpassungsfähigkeit des Bergwaldes. Damit die natürlichen Prozesse der Verjüngung besser verstanden werden, ist weitere Forschung erforderlich. Remote Sensing, insbesondere Light Detection and Ranging LiDAR, hat sich als effiziente und zuverlässige Methode für das Vermessen von Wäldern etabliert. Die HAFL hat ein Verfahren zur LiDAR basierten Erkennung von Waldverjüngung eingeführt. Dieses Verfahren wurde anhand von Laubmischwäldern im Mittelland entwickelt und getestet.

In dieser Arbeit wird an einem Fallbeispiel untersucht, ob durch die veränderten klimatischen Bedingungen in den letzten 20 Jahren eine räumliche Verschiebung in der natürlichen Waldverjüngung festgestellt wird. Am gleichen Fallbeispiel wird untersucht, ob und wie die Waldverjüngung mit dem Verfahren der HAFL auch im Gebirgswald quantifiziert werden kann.

Für diese Aufgabenstellung wurde eine feldbasierte Datenreihe aus den Jahren 2003 und 2012 zu Verjüngung und Verbiss im Gebiet Il Fuorn des Schweizerischen Nationalpark SNP fortgeführt und analysiert. Dabei wurden die topografischen Faktoren Höhenlage, Hangneigung und Exposition als mögliche Treiber der Verjüngung getestet und mittels Generalized Linear Mixed-Effects Models (GLMM) statistisch geprüft. Es wurden Interaktionen zwischen diesen topografischen Faktoren und den Erhebungsjahren gesucht, um die Verschiebung über die Zeit festzustellen. Das LiDAR basierte Verfahren der HAFL wurde mittels verschiedener Parametrisierungen auf das Untersuchungsgebiet angewendet und die Resultate wurden anhand statistischer Methoden mit den erhobenen Daten verglichen.

Der Erhebungszeitpunkt wird zwar fast bei allen Modellen als signifikanter Treiber (positiv) für die Wahrscheinlichkeit der Waldverjüngung erkannt, aber eine räumliche Verschiebung über die Zeit wird nur für die Föhrenverjüngung festgestellt. Diese hat sich über die Zeit hangaufwärts verschoben.

Das LiDAR Verfahren liefert gute Ergebnisse für Verjüngung zwischen 1.3 und 5m. Die Erkennung der Verjüngung von <1.3m ist, wie erwartet, deutlich weniger genau. Für die Verjüngung von <1.3m werden keine verlässlichen Resultate erzielt.

Der Faktor Zeit hat bei allen Baumarten, mit Ausnahme der Fichte, einen signifikanten Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit der Waldverjüngung; die Anzahl der Standorte mit vorhandener Verjüngung hat über die Zeit zugenommen. Die untersuchten Baumarten unterscheiden sich in ihrer räumlichen Verteilung zu stark, um artenübergreifende Aussagen zu machen. Nur die Föhrenverjüngung hat sich im Laufe der Zeit räumlich verschoben. Unter der Voraussetzung, dass die Parameter an die lokalen Verhältnisse angepasst sind, liefert das LiDAR basierte Verfahren der HAFL für Verjüngung zwischen 1.3 und 5m gute Resultate. Für die Erkennung von Verjüngung unter 1.3m empfiehlt es sich, die LiDAR Daten mit weiteren Datenquellen zu ergänzen und weitere Verfahren zu testen.

Keywords: Waldverjüngung, Klimawandel, Fernerkundung, LiDAR

# 1 Einleitung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der natürlichen Waldverjüngung im Gebiet «Il Fuorn» im Schweizerischen Nationalpark SNP und den zu erwartenden Veränderungen in Bezug auf den Klimawandel. Unter Waldverjüngung wird die Fähigkeit einer Art bestehende Populationen zu erhalten und neue Lebensräume zu besetzen verstanden (Käber et al. 2023). Die natürliche Waldverjüngung wird von vielen Faktoren beeinflusst. Das Nais nennt beispielsweise das Samengebot, die Verfügbarkeit von Licht im Bestand, die Konkurrenz durch die Kraut- und Strauchschicht sowie den Verbiss durch Wildtiere als solche Faktoren (Fachstelle für Gebirgswaldpflege). Das Zusammenspiel dieser Faktoren ist noch nicht genügend erforscht um die grossräumigen Faktoren der Waldverjüngung ganzheitlich zu verstehen (Käber et al. 2023). Die Verjüngung und die Zusammensetzung der Verjüngung ist enorm wichtig, denn sie bestimmt die zukünftige Zusammensetzung des Waldes (Imesch et al. 2015). Damit sich der Wald natürlich verjüngen kann, braucht es ein natürliches Gleichgewicht (Bebi et al. 2023).

Der Klimawandel verändert die Ökosysteme weltweit (Vanneste et al. 2017). Er zeigt sich beispielsweise durch Effekte in der Temperatur (Dullinger et al. 2004) oder der Niederschlagsmenge (Engler et al. 2011). Die Ökosysteme in Berggebieten sind besonders vom Wandel betroffen (Fang und He 2020). Die Reaktion der Waldverjüngung auf den Klimawandel ist besonders interessant, da sie bestimmt, wie die Wälder der Zukunft aussehen und inwiefern diese Wälder die Ökosystemdienstleistungen wahrnehmen können (Felipe-Lucia et al. 2018; Bebi et al. 2023). Damit die Waldleistungen auch in der Zukunft erbracht werden können und auch für resilientere Wälder ist eine artenreiche, zukunftsfähiger Baumarten extrem wichtig (Bebi et al. 2023).

Für die Erhebung von Verjüngungsdaten gibt es verschiedene Methoden. Die Daten können einerseits im Feld vor Ort oder auch mittels Fernerkundung erhoben werden. Light Detection and Ranging (LiDAR) ist eine Methode der Fernerkundung, die in der Forstwissenschaft immer häufiger verwendet wird (Puliti et al. 2019). Ein Grund für die grössere Verbreitung der LiDAR Anwendungen liegt in der gestiegenen Verfügbarkeit der LiDAR Daten. LiDAR Daten liefern genaue Daten und können dennoch auf grosse Flächen angewandt werden. Die Literaturanalyse zeigt, dass LiDAR vor allem in Wäldern mit mittlerer Bestandeshöhe und vor allem in wirtschaftlich genutzten Wäldern angewendet wird. Die Hochschule für Agrar-, Forst und Lebensmittelwissenschaften HAFL hat ein Verfahren entwickelt, dass die Waldverjüngung auch unter einem Kronendach erkennen soll. Dieses Verfahren wurde vor allem im Mittelland und anhand von Waldmischwäldern entwickelt und auch in dieser Umgebung getestet.

Die Arbeit wurde in enger Zusammenarbeit mit dem SNP verfasst. Ein Forschungsschwerpunkt des SNP liegt in der Erforschung des Klimawandels. Der menschliche Einfluss im Nationalpark ist auch ein Minimum reduziert. Das Gebiet unterliegt nur dem Willen der Natur, ohne menschliches Management. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass der Klimawandel innerhalb des SNP in seiner «reinen» Form untersucht werden kann. Auch der Prozess-Schutz, das heisst der minimierte Einfluss der Menschen, wird im Park fokussiert untersucht. Somit sind Verfahren, die den menschlichen Einfluss reduzieren, erwünscht.

Das Ziel des ersten Teils dieser Arbeit ist herauszufinden, ob die sich die Waldverjüngung im Gebiet Il Fuorn innerhalb der letzten zwei Jahrhunderten räumlich verschoben hat.

Der zweite Teil der Arbeit untersucht, wie gut das LiDAR Verfahren der HAFL in einem Bergwald mit komplexen topografischen Bedingungen angewendet werden kann. Für den Nationalpark ist dieses Vorgehen deshalb interessant, weil durch die LiDAR Datenerhebung die menschliche Störung bei der Datenerhebung minimiert wird. Durch das Verwenden dieser Daten, findet keine menschliche Störung im Park statt, zudem liegen die Daten bereits in verarbeitbarer Form und grossflächig vor.

Für diese Arbeit wurde eine feldbasierte Datenreihe des Nationalparks weitergeführt. Im Abstand von rund 10 Jahren werden im Ofenpassgebiet an 227 Standorten die natürliche Waldverjüngung und deren Verbiss erhoben. Dabei werden je vorhandener Baumart (Arve, Fichte, Föhre, Lärche) 9 Entwicklungsstufen (Baumgrössen) erhoben. Die Daten wurden im Jahr 2022 nach den Jahren 2003 und 2012 das dritte Mal erhoben. Somit liegt eine umfangreiche Datenbasis vor. Anhand dieser Aufnahmen und den topografischen Merkmalen der Standorte wird untersucht, ob sich die natürliche Waldverjüngung in den vergangenen 20 Jahren räumlich verschoben hat. Dabei wird die Höhenlage, die Neigung und die Exposition des Standortes berücksichtigt. Anhand statistischer Modelle wird die räumliche Verschiebung über die Zeit untersucht.

Die LiDAR Daten, die für diese Arbeit verwendet werden, wurden durch swisstopo (swisstopo) im Jahr 2021 erhoben. Diese Daten werden unabhängig der Forschung im Nationalpark periodisch erfasst und sind öffentlich verfügbar.

Das Verfahren wurde anhand von Mischwäldern entwickelt. Getestet wurde das Verfahren ebenfalls in Laubmischwäldern vor allem im Mittelland durch Begehungen und Vergleichen mit Marteloskopien. Durch das Anwenden des Verfahrens im Nationalpark, in einem Bergföhrenwald in einer anspruchsvollen Topografie, wird das Verfahren unter schweren Bedingungen getestet. Das Verfahren der HAFL lässt sich anhand verschiedener Parameter verändern. Es wird eine Selektion an Parameter-Kombinationen gemacht. Die Ergebnisse daraus werden anhand statistischer Metriken getestet und diskutiert.

Die Arbeit verschafft zuerst einen Überblick über den aktuellen Stand der Forschung der verschiedenen Themengebiete. Daraus werden die Forschungsfragen abgeleitet. Im nächsten Schritt werden die Methoden für beide Themengebiete vorgestellt und erklärt. Darauf folgen die Ergebnisse und die Diskussion nach Themengebiet. Die Erkenntnisse der Arbeit werden mit den Schlussfolgerungen zusammengefasst.

## 2 Stand der Forschung

### 2.1 Bedeutung und Funktion des Waldes in der Schweiz

Mit rund einem Drittel deckt der Wald einen wesentlichen Teil der Schweizer Landesfläche ab (BAFU 2023b). Der Wald übt diverse Funktionen aus. Die Funktionen wurden vom BAFU in einem Merkblatt festgehalten (BAFU 2022a), diese werden in der folgenden Tabelle aufgeführt und einige Beispiele zu den jeweiligen Funktionen und Leistungen sind erwähnt.

<b>Funktion</b>	<b>Waldleistungen</b>
Nutzfunktion	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Produktion von Holz (Stamm- Industrie- und Energie Holz)</li> <li>– Produktion von Beeren, Pilzen, medizinischen Pflanzen oder Wildbret etc.</li> </ul>
Schutzfunktion	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Schutz vor gravitativen Naturgefahren (Steinschlag, Lawinen, Rutschungen, Erosion, und Hochwasser)</li> </ul>
Wohlfahrtsfunktion: Erholung und Gesundheit	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Raum für Erholung, Sport, Abenteuer, Inspiration, Kultur, Spiritualität und Religion</li> <li>– Regulierung von Klima und Mikroklima</li> <li>– Sauerstoffproduktion</li> <li>– Trinkwasserbereitstellung, Wasserfiltrierung</li> <li>– Prägung des Landschaftsbildes</li> </ul>
Wohlfahrtsfunktion: Lebensraum für Tiere und Pflanzen	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Bereitstellen von Naturwerten und Habitat-Leistungen</li> <li>– Lebensraum für die einheimische Artenvielfalt</li> <li>– Aufrechterhalten von Nährstoffkreisläufen, Regulierung von Lebenszyklen</li> </ul>
Wohlfahrtsfunktion: übrige Aufgaben	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Hydrologische Regulierung, Wasserspeicherung und -rückhalt</li> <li>– Kohlenstoffsequestrierung und -speicherung im Wald sowie Kohlenstoffspeicherung im Holz</li> <li>– Bodenbildung und Bodenstabilisierung</li> </ul>

Tabelle 1 - Waldfunktionen und Waldleistungen nach (BAFU 2022a)

Damit der Wald alle diese Funktionen erfüllen kann, braucht es eine gute Waldplanung und eine entsprechende Waldpolitik. Gerade damit die Schutzfunktion sichergestellt werden kann, braucht es stufige und stabile Wälder mit genügend Verjüngung (BAFU 2020).

Der Wald in der Schweiz hat eine enorm wichtige Funktion bezüglich der Biodiversität. Rund 40% von den in der Schweiz lebenden Arten leben im oder vom Wald (Rigling und Schaffer 2015).

Der Zustand des Waldes wird in der Schweiz kontinuierlich erfasst und gegebenenfalls werden walddpolitische oder waldplanerische Massnahmen daraus abgeleitet (BAFU 2023a). Dazu wird das Landesforstinventar (LFI) erhoben. Zurzeit läuft die fünfte Inventur, diese wird während der Periode von 2018-2026 erhoben (LFI Landesforstinventar 2023) und wird von der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) und dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) erhoben. Dabei wird auch die Waldflächenentwicklung dokumentiert. Die Waldentwicklung ist zurzeit regional und nach Höhenlage unterschiedlich. Im Mittelland hat sich die Waldfläche zwischen 1985 und 2013 nicht wesentlich verändert. Auf der Alpensüdseite und den Alpen hingegen, hat sie stark zugenommen (BAFU 2023b). Der Wald hat in dieser Zeit zwischen einer Höhe von 1'000 m ü. M. und der Vegetationsgrenze vor allem zugenommen (BAFU 2023b).

## 2.2 Naturwälder und deren Bedeutung

Für Naturwälder gibt es keine einheitliche Definition. In Europa wird der Begriff «Naturwald» für Wälder verwendet, die sich seit längerer Zeit natürlich, also ohne Eingriffe des Menschen entwickeln und verjüngen. Naturwälder zeigen, im Gegensatz zu Urwäldern, Spuren von früherer menschlicher Nutzung. Ein wichtiger Faktor für den Naturwald ist, dass er sich ohne menschlichen Einfluss verjüngt hat. Naturwälder durchleben den gesamten natürlichen Entwicklungszyklus durch. Von der Verjüngung bis hin zur

Zerfallsphase. Somit weisen die Naturwälder viel Totholz und alte Bäume auf. Ganzer Abschnitt nach (Commarmot und Brang 2011).

Diese Naturwälder haben oft auch hohe spirituelle oder ästhetische Werte (Wirth et al. 2009). Zudem bilden sie besonders wichtige und interessante Forschungsobjekte (ebd.). Je besser die Naturwälder verstanden werden, desto besser können sie auch geschützt werden (Martin et al. 2023).

Im Produktionswald erreichen die Bäume maximal die Hälfte ihres möglichen biologischen Alters, dadurch durchlebt der Wald nicht den ganzen Entwicklungszyklus (Imesch et al. 2015). Deshalb fehlt in menschlich genutzten Wäldern oftmals Alt- und Totholz. Gerade auf dieses Totholz sind jedoch viele Arten angewiesen. Durch die Defizite dieses Entwicklungsstadiums sind deshalb viele dieser Arten stark gefährdet (ebd.).

Die Schweiz will anhand von Waldreservaten die natürlichen Wälder fördern. Bis 2030 sollen 10% der Waldflächen durch Waldreservate geschützt sein (BAFU 2022b). Im Jahr 2015 lag der Anteil der Waldreservate bei 6.5% (ebd.).

### **2.2.1 Natürliche Waldverjüngung – aktuelle Situation in der Schweiz**

Der Wald und damit auch die Verjüngung werden in der Schweiz kontinuierlich anhand des Landesforstinventars LFI überwacht (LFI Landesforstinventar 2023). Zurzeit läuft die fünfte Datenerhebung. Die WSL hat im Zusammenhang mit der Veröffentlichung der ersten Resultate des LFI 5 zwei Punkte erwähnt. Einer davon ist die ungenügende Verjüngung. Im Durchschnitt ist ein Viertel des Schweizer Waldes davon betroffen, in den Alpen und vor allem auf den Alpensüdseite deutlich mehr (WSL 2023).

Die Gründe dafür liegen teilweise in der Trockenheit. Die höheren Lagen und die Alpennordseite sind zwar am wenigsten von Trockenheit betroffen, doch sind die Wälder in diesen Lagen während den letzten Jahren dichter geworden (BAFU 2023c). In dunklen, dichten Wäldern, wachsen die jungen Bäume vieler Baumarten schlecht (BAFU 2020).

Abgesehen von der Waldstruktur, weisen sowohl das LFI 4 und als auch die ersten Resultate des LFI 5 auf einen hohen Wildverbiss hin, der die natürliche Waldverjüngung zusätzlich unter Druck setzt (BAFU 2023c). Forstwissenschaftler weisen schon länger auf den starken Wildverbiss hin (Bebi et al. 2023). Sie fordern von der Forschung, den Einfluss des Klimawandels, der Waldgeschichte, der Huftierbestände (inklusive der sich verändernden Wirkung durch Prädatoren) auf den Wald und dessen Leistungen regional differenziert und quantifiziert zu untersuchen (Bebi et al. 2023).

Zusammengefasst heisst das, dass die natürliche Verjüngung in der Schweiz zurzeit vielerorts ungenügend ist.

### **2.3 Klimawandel im Bergwald**

Berggebiete spüren den Klimawandel besonders stark (Fang und He 2020). Dies beeinflusst auch die Flora und Fauna, die durch tiefe Temperaturen limitiert wird (Vanneste et al. 2017) und somit sind auch die Bergwälder und die Verjüngung in diesen Wäldern betroffen. Durch wärmere Temperaturen verlängert sich die Wachstumszeit der Bäume (Saxe et al. 2001).

Die Veränderung in den Beständen wird anhand von verschiedenen Faktoren gemessen. Im räumlichen Kontext werden oft die topografischen Faktoren Höhenlage, Neigung und Ausrichtung der verschiedenen Waldbestände untersucht (Morley et al. 2019; Fang und He 2020).

Es wird erwartet, dass der Klimawandel und seine Auswirkungen, gerade in den Berggebieten, im Rest des 21. Jahrhundert stark zunehmen werden (Gobiet et al. 2014).

### 2.3.1 Klimawandel und Baumgrenze

Durch die erwartete Klimaerwärmung könnte die Baumgrenze um 300-600 Meter steigen (Hagedorn et al. 2019). Die alpine obere Baumgrenze ist ein Schlüsselthema, sowohl für die Erkennung als auch für das Verständnis klimabedingter ökologischer Prozesse, die wichtig für die Biodiversitätsmuster und die ökologischen Dienstleistungen für die Menschheit sind (Kullman 2007). Eine Metastudie über das letzte Jahrhundert hat gezeigt, dass die Baumgrenze an den meisten Orten gestiegen oder mindestens gleich geblieben ist (Harsch et al. 2009).

Es gibt auch Gebiete, die über einen längeren Zeitraum keine Erhöhung der Waldgrenze aufgezeigt haben, aber einen Anstieg in der durchschnittlichen Höhenlage des etablierenden Waldes über einen längeren Zeitraum festgestellt haben (Morley et al. 2020). Auch die Resultate von Barthi et al. (Bharti et al. 2012) zeigten vor allem eine Verdichtung des Waldes und nicht eine Verschiebung der Waldgrenze. Diese beiden Veränderungen, also die Verschiebung der Baumgrenze und die Verdichtung der Wälder, sind voneinander abhängig (Feuillet et al. 2020).

Die Verschiebung der Waldgrenze kann zeitlich verzögert werden, beispielsweise durch langsam wachsende Spezies oder seltene Saatereignisse (Hagedorn et al. 2019) oder durch Abhängigkeiten im Untergrund (Hagedorn et al. 2019). Höhere Baumgrenzen können einen negativen Einfluss auf die Biodiversität haben (Hofgaard und Wilmann 2002). Es werden auch andere Änderungen wie beispielsweise in der Baumdichte oder der seitlichen Ausbreitung beobachtet (Morley et al. 2020).

Im Zusammenhang mit der höheren Waldgrenze muss aber auch die frühere menschliche Nutzung in Betracht gezogen werden (de Wit et al. 2014). Es ist möglich, dass die heutzutage grösseren Verschiebungen in Gebieten festgestellt werden, die stark von Menschen genutzt wurden, in anderen Gebieten, ohne menschliche Nutzung, ist diese Verschiebung eher noch begrenzt (de Wit et al. 2014).

Andere Forschende sind der Meinung, dass der Shift der Baumgrenze bereits durch die topografischen und geomorphologischen Gegebenheiten stark eingeschränkt ist (Macias-Fauria und Johnson 2013).

Geht es nur um die Höhenverschiebung der Baumgrenze über einen bestimmten Zeitraum, haben die Hangneigung, und die Exposition keinen signifikanten Einfluss (Wang et al. 2022). Andererseits wurde in Alaska im Zeitraum zwischen 1945 und 2005 nur an nördlich exponierten Lagen eine Erhöhung der Baumgrenze von rund 50 m dokumentiert (Dial et al. 2007).

### 2.3.2 Klimawandel und Exposition

Hinsichtlich der Exposition und der räumlichen Verschiebung über die Zeit wurden von verschiedenen Forschenden unterschiedliche Erkenntnisse gewonnen.

Die Tagestemperaturen unterscheiden sich je nach Exposition (Solár und Janiga 2013). So unterscheiden sich auch die Bodentemperaturen nach Exposition und bestimmen damit wichtige Bodenparameter (Hamid et al. 2021). Zudem hat die Exposition auch einen Einfluss auf das direkte Sonnenlicht, Temperaturen am Morgen und Maximaltemperaturen am Nachmittag (Yirdaw et al. 2015). Alle diese Faktoren beeinflussen die Walverjüngung.

Die Ergebnisse der verschiedenen Forschenden sind stark vom Untersuchungsgebiet abhängig. Beispielsweise wird in Nordeuropa die Sommertemperatur als wichtiger Faktor für den Erfolg der Waldverjüngung identifiziert (Kullman 2007). Wobei Temperaturänderungen vor allem bei süd- und ostexponierten Lagen gefunden wurden (Winkler et al. 2016). Tiefere Änderungen wurden bei westexponierten Lagen und noch tiefere Änderungen bei nordexponierten Lagen festgestellt, wobei auch diese Veränderungen je nach Region unterschiedlich sind (ebd.).

Eine Studie in Äthiopien hat einen Unterschied in der Höhe der Baumgrenze auf zwischen west- und ost-exponierten Lagen festgestellt, wobei die Baumgrenze bei ostexponierten Lagen um 100 m höher lag (Yirdaw et al. 2015). Eine in Norwegen und Schweden durchgeführte Studie fand hingegen die höchsten Lagen der Waldgrenze an südlich exponierten und die tiefsten an nördlich exponierten Lagen (Dalen und Hofgaard 2005).

### **2.3.3 Klimawandel und Hangneigung**

Die Hangneigung wird in mehreren Studien erwähnt. In Bezug auf die Hangneigung haben Fang und He (2020) keinen Unterschied über die Zeit festgestellt.

Vor allem an Hängen mit einer Neigung von 0-20° haben Morley et al. (Morley et al. 2020) einen Anstieg an Waldbedeckung festgestellt, Flächen mit einer Neigung >46° zeigten nur einen vernachlässigbaren Unterschied (Morley et al. 2020). Das könnte daran liegen, weil steile Hänge eher gravitativen Prozessen wie beispielsweise Lawinen ausgesetzt sind und so die Waldverjüngung erschwert (Feuillet et al. 2020).

## **2.4 Remote Sensing – ein Überblick**

Remote Sensing gewinnt mit zunehmender Verbreitung von Technik und Datenverfügbarkeit an Bedeutung als störungsfreie – von Feldbegehungen unabhängige Methode der Datengewinnung. In diesem Kapitel werden die Grundlagen dazu erarbeitet. Remote Sensing wird folgendermassen definiert: «Remote sensing is the science and art of obtaining information about an object, area, or phenomenon through the analysis of data acquired by a device that is not in contact with the object, area, or phenomenon under investigation» (Lillesand et al. 2015). Übersetzt und abgekürzt ist es die Wissenschaft über die Gewinnung und Verarbeitung von Informationen über Objekte oder Gebiete, ohne in Kontakt mit dem zu untersuchenden Objekt oder Gebiet zu sein.

Beim Remote Sensing wird oft zwischen aktiven und passiven Sensoren unterschieden (Horning 2008). Wobei aktive Sensoren ihre eigenen Signale senden und messen, wenn sie von der Erdoberfläche zurückgestrahlt werden und passive Sensoren beispielsweise Sonnenenergie, die von der Erdoberfläche zurückgeworfen oder emittiert werden, messen (Horning 2008).

Die Anwendung von Fernerkundung auf Waldflächen wurde vor allem von den Kanadiern vorangetrieben, sie arbeiteten mit Stereofotos und Bodenspuren und Radar, russische Forscher kamen auf die Idee anhand von Lasern Bäume zu vermessen (Nelson 2013).

## **2.5 Light Detection and Ranging LiDAR**

LiDAR ist ein aktives System, welches eigene Energie verwendet, um Ziele zu beleuchten und es besteht aus einem Signalgenerator und einem Receiver (Horning 2008). Anders als bei Radar werden bei LiDAR Laserimpulse von Laserlicht gesendet um das Gelände zu beleuchten (Lillesand et al. 2015). Diese Technologie liefert horizontale und vertikale Daten mit hoher Genauigkeit (Lim et al. 2003).

Grundsätzlich wird unterschieden in terrestrisches und luftgestütztes Laserscanning (Bundesamt für Landestopografie swisstopo). Die beiden Methoden sind auch bekannt als terrestrial laser scanning (TLS) und airborne laser scanning (ALS) und werden in der Wissenschaft und Praxis für verschiedene Zwecke eingesetzt (Kankare et al. 2014). Beim terrestrischen Scanning wird von einem fixem Punkt aus gemessen, beim luftgestützten Scanning bewegt sich der Sensor und die Position sowie die Orientierung des Scanners müssen miterfasst werden (Bundesamt für Landestopografie swisstopo), dies wird

meistens anhand eines eingebauten Global Positioning System GPS gemacht (Lillesand et al. 2015). Etwas neuer ist noch das Multispektrale ALS mALS. Solche Systeme liefern Punktwolken mit hoher Punktedichte kombiniert mit multispektralen Intensitäts-Daten (Imangholiloo et al. 2020).

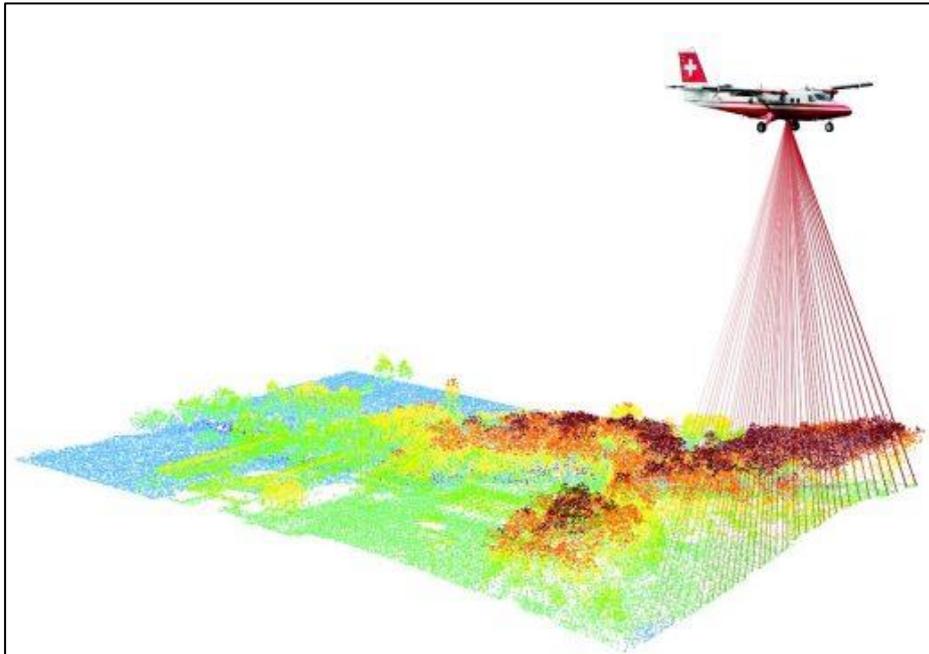


Abbildung 1 – Beschaffung von LiDAR Daten (swisstopo)

Das Resultat von LiDAR Aufnahmen sind 3-dimensionale Punktwolken. Die gesamte Punktwolke für das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit (Il Fuorn im Schweizer Nationalpark) ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Diese Punktwolke enthält rund 133 Millionen Punkte.

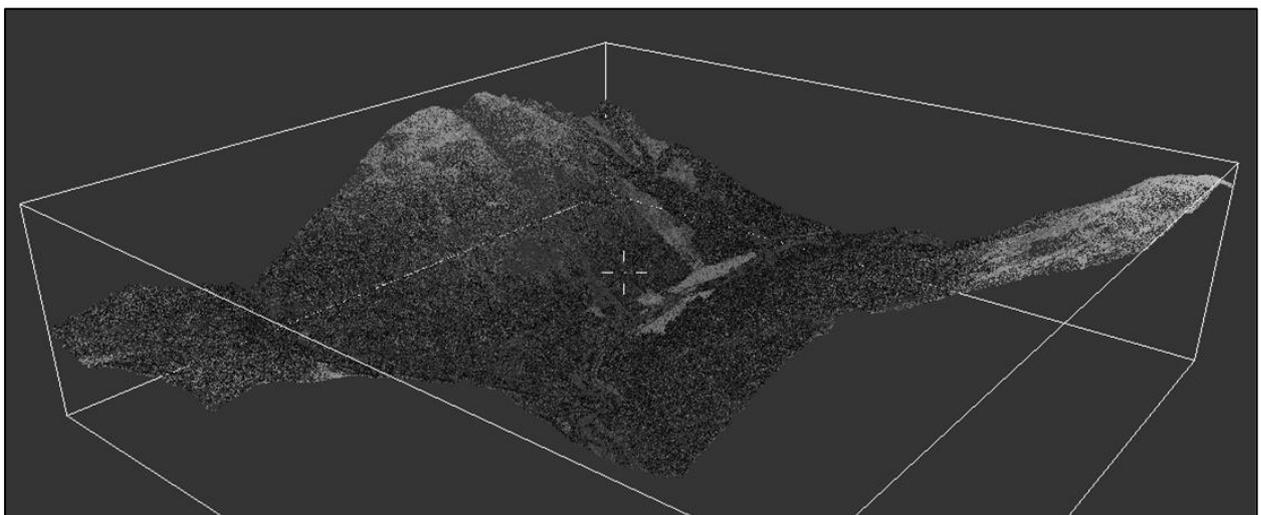


Abbildung 2 – Punktwolke – Gebiet Il Fuorn (swisstopo)

## 2.5.1 Methoden der LiDAR Datengewinnung

### Terrestrial Laser Scanning TLS

TLS wurde oft verwendet für die Erfassung und Beurteilung der Strukturellen Vielfalt von Waldflächen. Mit ALS können aber grössere Flächen erfasst werden (LaRue et al. 2020). LaRue et al. haben die Unterschiede zwischen ALS und TLS verglichen und starke univariate Übereinstimmung bei den Kronenhöhen, Offenheit (openness), Heterogenität der inneren Schicht und Blattflächen gefunden (LaRue et al. 2020). Im Bereich der Heterogenität der äusseren Schicht des Kronendachs haben sie aber nur eine minimale Übereinstimmung festgestellt (LaRue et al. 2020).

#### Airbone Laser Scanning ALS

Schon in der Mitte der 1960er Jahre wurden erstmals ALS LiDAR Daten für forstwissenschaftliche Zwecke verwendet (Vauhkonen et al. 2014). Noch früher wurde vor allem mit Luftbildern gearbeitet (Feduck et al. 2018). Heute findet Remote und auch LiDAR und ALS im Forstbereich in verschiedener Weise Anwendung (Arumäe et al. 2020). ALS hat im Bereich von Waldinventaren enorm an Bedeutung gewonnen (Arumäe et al. 2020). Waldmerkmale wie beispielsweise die Höhe der Baumkronen können direkt mit LiDAR Daten gemessen werden (Lim et al. 2003). ALS hat sich als primäre Datenquelle für 3-D-Informationen über die vertikale Struktur des Waldes etabliert (Vastaranta et al. 2013).

#### Unmanned Aerial Vehicles UAV (Drohnen)

Mit Drohnen können Informationen in sehr hoher Auflösung erfasst werden (Feduck et al. 2018). Dazu können sie sehr vielfältig eingesetzt werden und werden durch die hohe Verfügbarkeit zunehmend eingesetzt (Puliti et al. 2019). Sie bieten für kleinflächiges Forstmanagement sehr genaue Daten, sie werden aber auch für die Analyse grösserer Flächen eingesetzt (Puliti et al. 2019).

Über die Kosteneffizienz von Drohnen scheint man sich noch uneinig zu sein. Einige Forschende sind der Meinung, dass Drohnen im Vergleich zu LiDAR Aufnahmen kostengünstiger und einfacher wären (Feduck et al. 2018). Andere sind der Meinung, dass es noch nicht klar wäre, unter welchen Bedingungen Drohnenanwendungen kosteneffizient sind, was derzeit einen umfassenden Einsatz von UAV im Forstsektor verhindere (Puliti et al. 2019). Wieder andere sind der Meinung, der Arbeitsaufwand werde durch den Einsatz von UAV reduziert und es könnten viele Kosten gerade in Bezug auf physische Aufnahmen gespart werden (Feduck et al. 2018).

### 2.5.2 Methoden der LiDAR Datenverarbeitung

Grundsätzlich wird in zwei Kategorien unterschieden: einerseits in eine Flächenbasierte Vorgehensweise, Area based approach ABA und andererseits auf Einzelbaum Erkennung, Single/Individual Tree detection ITD.

#### Flächenbasiertes Vorgehen - ABA

Das grundlegende Konzept bei ABA ist, dass die 3D-Punktwolke, die aus den Höhen aller Echos für eine bestimmte Fläche, beispielsweise einer Probefläche, besteht. Daraus werden Daten, die Informationen zur Charakterisierung der Bodenoberfläche und der vertikalen Verteilung des biologischen Materials in den Vegetationsschichten gewonnen (Vauhkonen et al. 2014). ABA konnte relativ schnell durch zuverlässige Resultate überzeugen und fand schnell Anwendung in der Praxis (Wallace et al. 2014).

#### Single / Individual Tree Detection ITD

Von Single-Tree Detection oder Individual Tree Detection ITD spricht man, wenn einzelne Bäume identifiziert werden (Vauhkonen et al. 2014). Werden einzelne Bäume erkannt, können Faktoren wie

beispielsweise die Baumhöhe berechnet werden (Zhao et al. 2018). LiDAR gilt als das vielversprechendste Instrument zur Fernkartierung einzelner Bäume (Zhao et al. 2018). Während der ABA durch zuverlässige und konstante Resultate grosse Verbreitung in der Praxis hatte, wurde der ITD länger nicht in der Praxis angewendet (Wallace et al. 2014). Dies, weil dieses Vorgehen Probleme bei der Erfassung und Abgrenzung einzelner Bäumen unter unterschiedlichen Bedingungen aufwies und eine Tendenz zu grösseren Bäumen aufwies (Wallace et al. 2014). Durch den Einsatz von UAV und höherer Punktedichte, zwischen 61-163 Punkte pro m<sup>2</sup>, konnte auch bei dieser Methode die Genauigkeit deutlich verbessert werden (Wallace et al. 2014).

## **2.6 Anwendung von ALS in der Forstwissenschaft**

### **2.6.1 Gründe für die Anwendung von ALS**

Remote Sensing ist oftmals aufgrund der schwierigen Erreichbarkeit der Gebiete eine gute Lösung (Bharti et al. 2012). Daher bietet sich in Berggebieten Remote Sensing als gute Option an (Morley et al. 2019). Zudem erlaubt die Forschung anhand von Remote Sensing Daten eine unvoreingenommene Forschung (Morley et al. 2020).

ALS hat den Vorteil, dass Punkte auch durch die Kronen hindurch kommen und somit das ganze Vertikale Spektrum abdecken (Vastaranta et al. 2013). Obwohl schon nur die Verwendung von verschiedenen Sensoren einen Einfluss auf die Daten hat (Næsset 2009), können Methoden die für die Analyse von ALS Daten erstellt wurden, auch auf weitere Flächen transferiert werden, sofern diese eine ähnliche Baumartenzusammensetzung haben (Karjalainen et al. 2019).

Werden Aufnahmen zu mehreren Zeitpunkten wiederholt, können die Daten miteinander verglichen werden, damit kann beispielsweise die Biomassenveränderung zwischen den Zeitpunkten zu messen (Økseter et al. 2015; Zhao et al. 2018). Diese Forschung ist aber noch relativ neu und noch nicht sehr gut untersucht (Zhao et al. 2018).

Feldaufnahmen sind zeitaufwändig. Durch den Einsatz von Remote Sensing können die Kosten gesenkt werden (Feduck et al. 2018; Imangholiloo et al. 2020).

### **2.6.2 Anwendungsbereich ALS**

ALS wird einerseits in der kommerziellen Forstwirtschaft eingesetzt. Gerade das Erkennen der Waldverjüngung ist für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung sehr wichtig (Imangholiloo et al. 2020). In Finnland wird beispielsweise eine erste Ausdünnung der Wälder gemacht, wenn die Bestände bei einer mittleren Höhe von 3m und einer Dichte von 2'000 Bäumen pro ha liegen. So wird der durchschnittliche Durchmesser später bei einer durchschnittlichen Höhe von 14m um 15% erhöht im Vergleich zu Beständen ohne Ausdünnung (Huuskonen und Hynynen 2006).

ALS wird aber auch für forstwissenschaftliche Zwecke eingesetzt, beispielsweise um die Veränderung der alpinen Baumgrenze über einzelne oder mehrere Zeiträume zu messen (Thieme et al. 2011; Hauglin et al. 2017).

### **2.6.3 Erkennung von Waldverjüngung anhand von ALS**

Lange Zeit wurde ALS vor allem bei älteren Beständen eingesetzt (Ole Ørka et al. 2016). Auch Drohnen wurden vor allem an Standorten mit Beständen von mittleren bis alten Beständen eingesetzt. Nur wenige Studien befassten sich in diesem Zusammenhang mit Beständen in der Verjüngungsphase (Puliti et al. 2019). Bei der Waldverjüngung wird vor allem die Anzahl (Dichte) und Höhe der Bäume wird

untersucht (Næsset und Bjerknes 2001; Korhonen et al. 2013; Puliti et al. 2019). Wobei Baumhöhen mit sehr höherer Genauigkeit erfasst werden als die Baumdichten (Næsset und Nelson 2007; Puliti et al. 2019).

Je kleiner die Bäume sind, desto kleiner ist die Wahrscheinlichkeit, dass sie als solche erkannt werden. Die Punkte müssen zwischen jungen Bäumen, Bodenvegetation, Boden und Steinen richtig zugeteilt werden (Næsset und Nelson 2007). Bei der Erkennung von ganz kleinen Bäumen haben Daten mit tieferer Punktedichte wie beispielsweise 1-15 Punkte pro  $m^2$  mehr Mühe, da tiefe Vegetation wie Büsche auch auf dieser Höhe auftreten (Korpela et al. 2008). Daher wird oft ein ground/canopy treshhold (CTH) von 50cm angewendet, also es wird nur Verjüngung  $>50cm$  untersucht (Imangholiloo et al. 2020). Teilweise liegt dieser CTH sogar bei 1m (ebd.). Hier eine Illustration dazu:

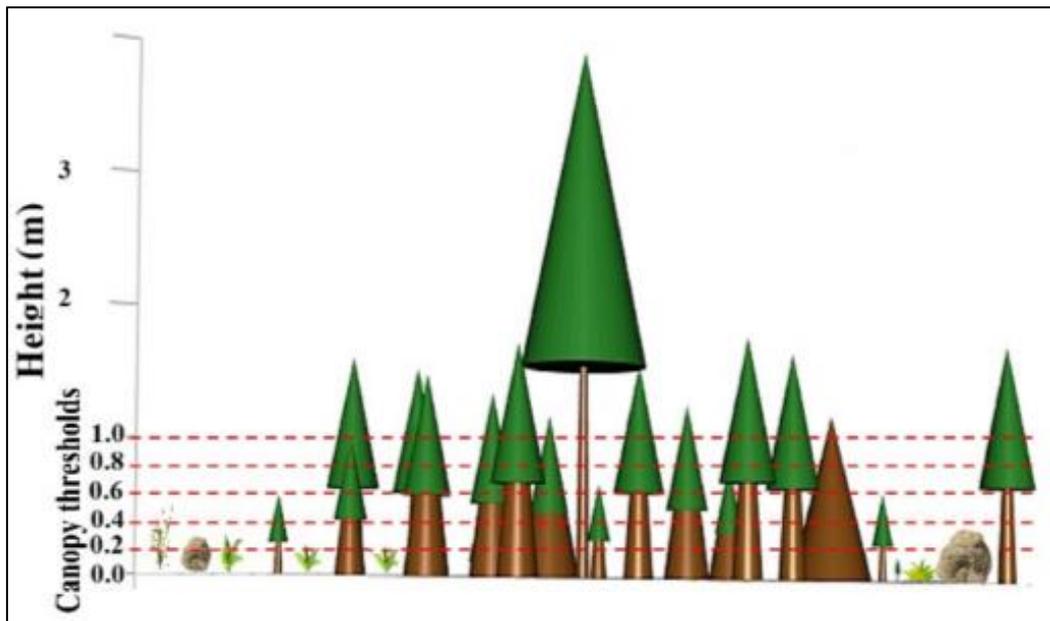


Abbildung 3 – Canopy treshhold (Imangholiloo et al. 2020)

Werden Untersuchungen zur Verschiebung der Waldgrenze gemacht, wurden die Bäume  $>1m$  mit einer sehr hohen Genauigkeit erkannt, sobald die Punktedichte  $>6.8$  Punkte pro  $m^2$  lag (Thieme et al. 2011). Auch andere Studien mit diesem Kontext kommen auf sehr ähnliche Resultate, wenn ein Baum  $>1m$  von mind. 1 Laserpunkt getroffen wird, wird er mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit auch als Baum eingestuft (Næsset und Nelson 2007). Die einzelnen Bäume wurden in der Studie sehr gut erkannt, die Baumhöhe jedoch wurde systematisch unterschätzt (Næsset und Nelson 2007).

## 2.7 Kombination von ALS mit weiteren Datenquellen

Forschende haben aufgrund ihrer Resultaten darauf geschlossen, dass LIDAR Daten alleine für ganz junge Bestände mit einer Ungenauigkeit von 15-25cm nicht ausreichen (Korpela et al. 2008). Daher sehen sie es als sinnvoll diese Daten mit weiteren Datenquellen, wie beispielsweise Luftbildern zu ergänzen (Korpela et al. 2008).

Es gibt heutzutage auch die Möglichkeit, dass die ALS Daten direkt mit mehreren Sensoren, beispielsweise LiDAR in Kombination mit RGB-Sensoren gleichzeitig erhoben werden. Solche kombinierten Aufnahmen werden multispektral ALS kurz mALS genannt. Mit diesen mALS können nicht nur einzelne Bäume erkannt, sondern diese auch noch einer Baumart zugeordnet werden (Yu et al. 2017; Shi et al.

2018). Aktuelle Studien zeigen, dass mit der Kombination aus LiDAR Daten mit hoher Dichte und multi-spektralen Intensitäten, mALS, genauere Resultate zumindest im Bereich der Individual Tree Detection ITD erzielt werden als nur mit LiDAR Daten (Imangholiloo et al. 2020). Die Baumhöhen, werden aber mit den kombinierten Daten nicht besser erkannt (ebd.).

Durch die Kombination von ALS und SPOT5 Satelliten-Daten konnten bei der Erkennung der Waldgrenzen-Verschiebung bessere Resultate erzielt werden (Reese et al. 2014). Trotz der Kombination dieser Datenquellen konnten aber die Bäume <1m nicht besser identifiziert werden (Reese et al. 2014). Auch Sentinel2 Daten (Auflösung 10m) wurden mit ALS-Daten kombiniert um die Waldverjüngung besser zu erkennen (Landry et al. 2020). Hierbei wurde aber bei der Kombination der Datenquellen keine signifikante Verbesserung der Erkennung der Setzlings-Dichte hatte (Landry et al. 2020).

## 2.8 LiDAR basierte Erkennung von Waldverjüngung – das Verfahren der HAFL

Die LiDAR basierte Erkennung von Waldverjüngung wurde an der HAFL für das Projekt Waldmonitoring.ch entwickelt. Waldmonitoring.ch ist ein Forschungsprojekt der Berner Fachhochschule BFH Hochschule für Agrar- Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL (HAFL). Das Projekt wird für das Bundesamt für Umwelt BAFU erarbeitet (ebd.). Ziel des Projektes ist es, dass Fernerkundungsdaten für konkrete Anwendungszwecke mit einem klaren Mehrwert für die Praxis eingesetzt werden können (HAFL). Auf Waldmonitoring.ch existieren bereits verschiedene Anwendungszwecke. Einer davon ist eine Hinweiskarte zur Waldverjüngung (HAFL). Die Karte zeigt auf Basis von LiDAR Daten, wo vermutlich Verjüngung in Waldbeständen existiert (Horneber 2023, persönliche Mitteilung). Auf der Weboberfläche kann zwischen einer Waldverjüngung von 0-2m oder 0-5m ausgewählt werden, zudem kann die Überschirmung (Blätterdach >12m) angezeigt werden (HAFL). Diese Karte ist aber nur als Testversion für das Gebiet der Burgergemeinde Bern online verfügbar (HAFL).

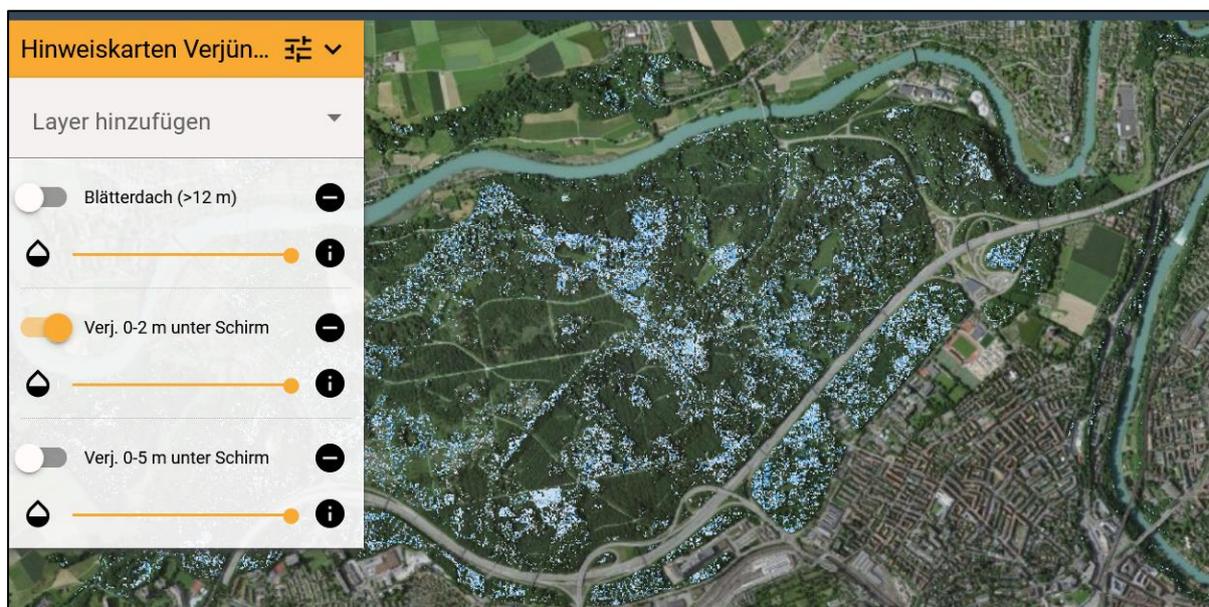


Abbildung 4 – Ausschnitt Waldmonitoring Waldverjüngung Hinweiskarte mit der Stadt Bern, v.a. dem Bremgartenwald im Hintergrund (HAFL)

### 2.8.1 Berechnungsweise LiDAR basierte Erkennung von Waldverjüngung

Für das Verfahren der HAFL werden ausschliesslich LiDAR Daten als Input verwendet. Diese werden anhand eines Digital Terrain Model DTM normalisiert und mittels Klassifizierung von swisstopo auf die

Vegetationspunkte gefiltert (swisstopo; Horneber 2023, persönliche Mitteilung). Mit Satellitenbildern, oder dem Toolkit Bestandeskarte TBk gibt es weitere Analyseöglichkeiten, welche in die Berechnung miteinbezogen werden könnten (Horneber 2023, persönliche Mitteilung).

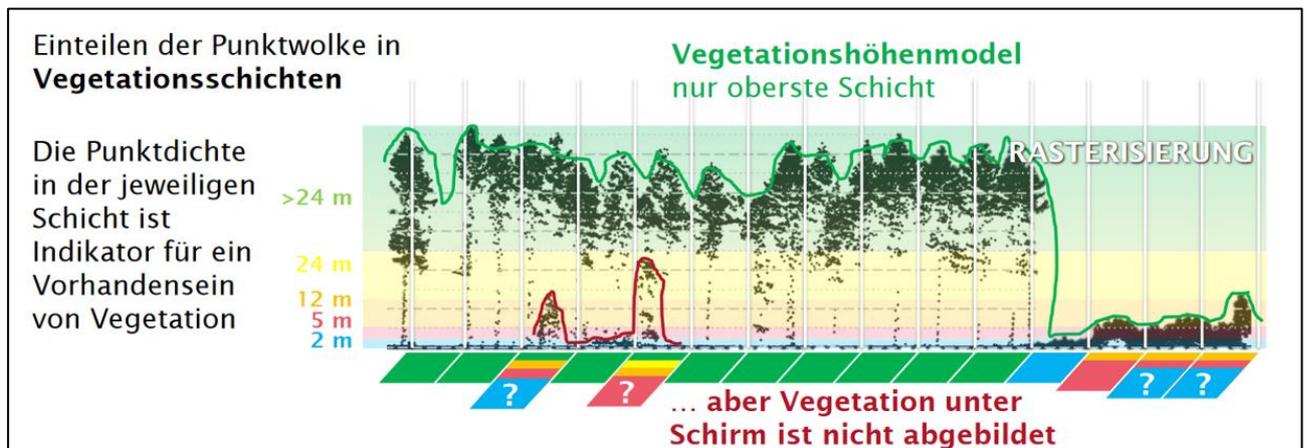


Abbildung 5 – Beispiel Vegetationshöhenmodell (Horneber et al. 2021)

Das Vorhandensein von Waldverjüngung wird beim Verfahren der HAFL berechnet in dem die relative Punktdichte unterhalb des Schirmes berechnet wird (Horneber et al. 2021). Sind Punkte stark überschirmt, werden sie anhand eines Faktors gewichtet:



Abbildung 6 – Berechnung Waldverjüngung (Horneber et al. 2021)

Die Wahrscheinlichkeit zur Anwesenheit von Waldverjüngung hängt von verschiedenen Parametern ab, deren Werte noch nicht final bestimmt sind, beispielsweise der Faktor-Schirm oder der Treshold für die Überschirmung (Horneber 2023, persönliche Mitteilung).

Die Daten wurden durch Begehungen im Feld, und mit Vergleichen mit Marteloskop-Begehungen im Mittelland verglichen, aber noch nicht auf wissenschaftlicher Basis validiert (Horneber 2023, persönliche Mitteilung). Die Marteloskop-Begehungen zeigten aber eine gute Übereinstimmung mit der Waldverjüngung Hinweiskarte auf, wie die folgenden Abbildungen zeigen (Horneber et al. 2021).

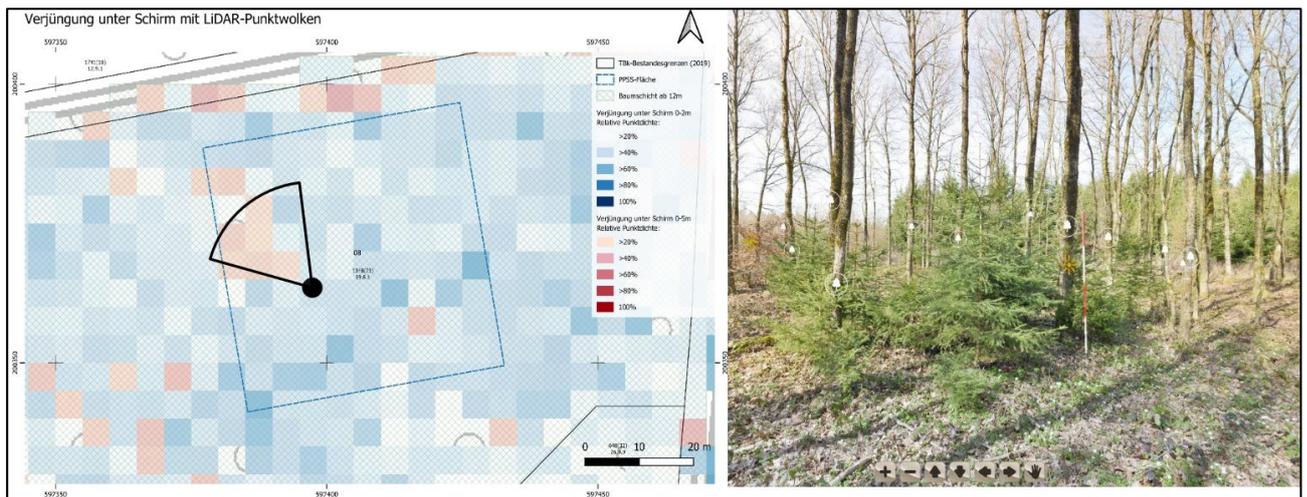


Abbildung 7 – Beispiel Validierung Bremgartenwald mit Verjüngung (Horneber et al. 2021)

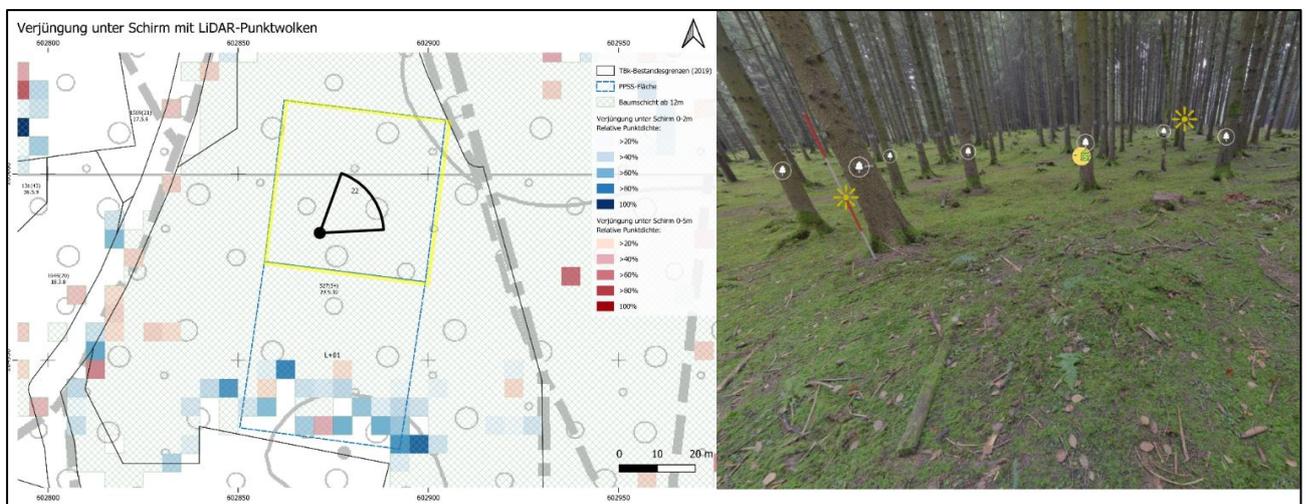


Abbildung 8 – Beispielvalidierung Williwald ohne Verjüngung (Horneber et al. 2021)

## 2.9 Forschungsfragen

Die erste Forschungsfrage bezieht sich auf die zeitliche Analyse. Anhand der Analysen in den Kapiteln 2.1 bis 2.3 wurde die erste Forschungsfrage entwickelt.

**Forschungsfrage 1:** Wie hat sich die Waldverjüngung in den vergangenen 20 Jahren in Bezug auf Höhenlage (m ü. M), Hangneigung und Exposition verändert?

Auf der Basis der Literaturrecherche wurden dazu die folgenden Hypothesen gebildet:

Hypothese 1.1: Die Baumarten reagieren aufgrund ihrer ökologischen Unterschiede und Präferenzen unterschiedlich auch die klimatischen Veränderungen.

Hypothese 1.2: Die Waldverjüngung hat über die Zeit zugenommen.

Hypothese 1.3: Die Waldverjüngung hat sich über den untersuchten Zeitraum räumlich nach oben verschoben.

Hypothese 1.4: Es wird im zeitlichen Vergleich keine Verschiebung bezüglich der Hangneigung und der Exposition festgestellt.

Die zweite Forschungsfrage wurde unter Berücksichtigung der Kapitel 2.4 bis 2.8 entwickelt und bezieht sich auf die Anwendbarkeit des Verfahrens zur Erkennung von Waldverjüngung im Berggebiet.

Forschungsfrage 2: Wie gut erkennt das von der HAFL entwickelte Verfahren zur Erkennung von Waldverjüngung die Verjüngung im Bergwald?

Auf der Basis der Literaturrecherche wurden dazu die folgenden Hypothesen gebildet:

Hypothese 2.1: Die Verjüngung >1.3m wird schlechter erkannt als die Verjüngung >1.3m.

Hypothese 2.2: Wie genau die Verjüngung erkannt wird, hängt stark von den gesetzten Parametern ab.

## 3 Methodik

### 3.1 Der Schweizerische Nationalpark SNP

Der SNP wurde mit 1914 gegründet und ist somit der älteste Nationalpark in den Alpen (Schweizerischer Nationalpark). Er erfüllt den höchsten Schutzstandard der Weltnaturschutzunion (IUCN), den Standard IUCN 1a (IUCN 2023). Im Jahr 2021 wurde der Park auf die Grüne Liste der IUCN aufgenommen, damit werden Schutzgebiete mit ausgezeichnetem Management und erfolgreichen Naturschutzbestimmungen ausgezeichnet (Schweizerischer Nationalpark 2021). Der Park umfasst ungefähr 100km offizielle Wanderrouten, welche um die 120'000 Besuchende pro Jahr anziehen (Schweizerischer Nationalpark).

Der SNP liegt im Kanton Graubünden, im Osten der Schweiz und umfasst eine Fläche von rund 170km<sup>2</sup> (Schweizerischer Nationalpark). Davon sind rund 51% vegetationsfrei (Geröll, Fels, Hochgebirge), 28% Wald (davon 99.5% Nadelwald) und 21% alpine Matten (Schweizerischer Nationalpark).

Das Klima im Nationalpark ist trocken, rau mit starker Sonneneinstrahlung und geringer Luftfeuchtigkeit (Schweizerischer Nationalpark). Der tiefste Punkt des Parkes liegt auf 1400 m ü. M. und der höchste Punkt auf 3'174 m ü. M. (Schweizerischer Nationalpark).

Die folgende Karte zeigt das Gebiet des SNP in Orange und das untersuchte Gebiet in blau. Diese Karte, sowie alle nachfolgenden Karten wurden mit QGIS, Version 3.30.0 erstellt (QGIS Development Team 2022).

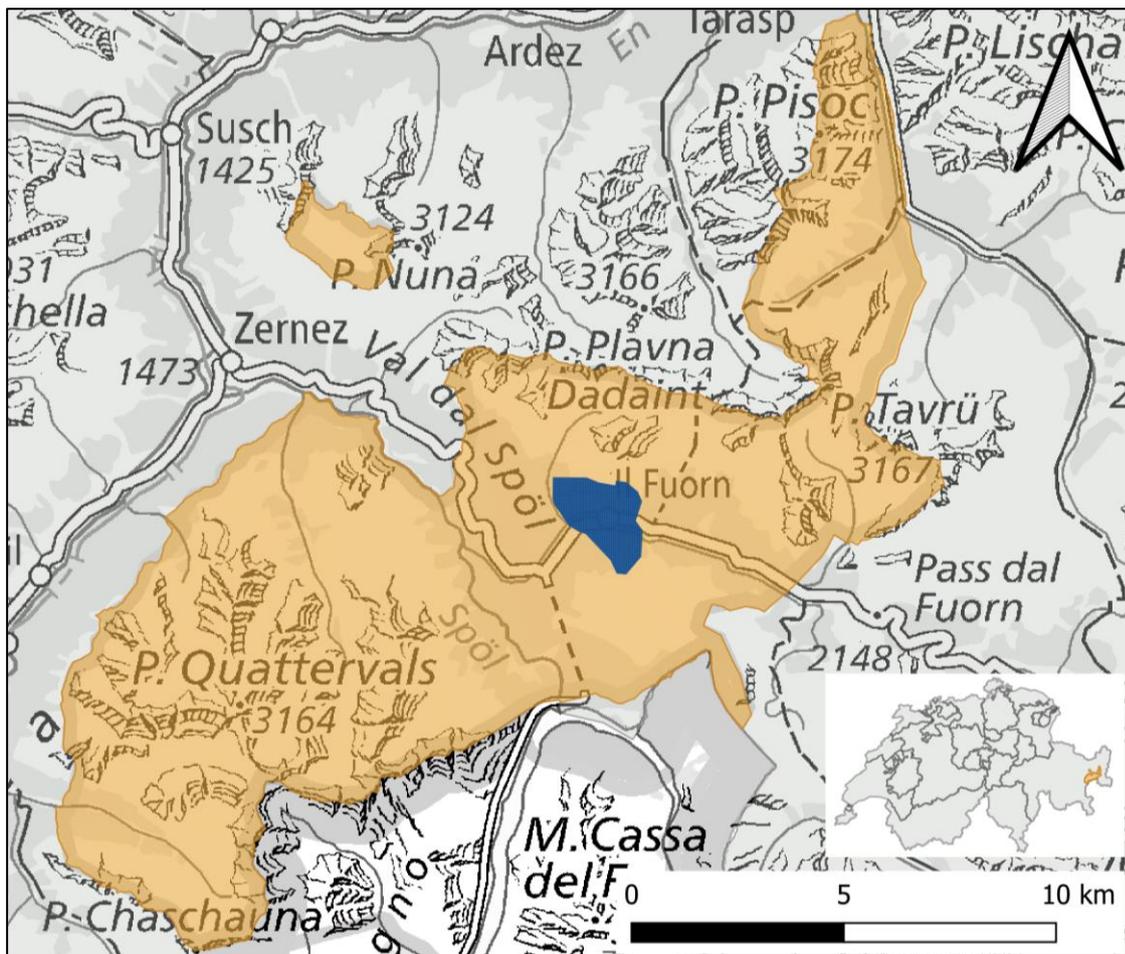


Abbildung 9 – Perimeter Nationalpark und Perimeter untersuchtes Gebiet (in Anlehnung an (Bundesamt für Landestopografie swisstopo 2022b))

Der SNP hat drei Hauptziele: die Natur zu schützen, zu erforschen und die Öffentlichkeit zu sensibilisieren und informieren (Schweizerischer Nationalpark). Heute liegen die Forschungsschwerpunkte des SNP unter anderem in den Bereichen «Klimawandel» und «Prozess-Schutz» (Wipf 2023, persönliche Mitteilung). Wobei unter Prozess-Schutz die Entwicklung der Natur ohne menschliche Einflüsse verstanden wird (Wipf 2023, persönliche Mitteilung). Gerade im Waldflächen ohne Management und ohne Wildtierregulierung sind in der Schweiz selten und daher bietet der Nationalpark spannende Erkenntnisse in diesem Bereich (Wipf 2023, persönliche Mitteilung).

Aufgrund der langen Forschungstätigkeiten im Gebiet, stehen viele Daten über einen grossen Zeitraum zur Verfügung (Schweizerischer Nationalpark). Um den Einfluss des Wildes auf den Wald zu quantifizieren, wurden im Nationalpark zwei Flächen bestimmt, auf welchen im Abstand von 10 Jahren Verjüngungs- und Verbissaufnahmen gemacht werden. Eine der Flächen liegt im Val Trupchun, die andere im Gebiet Il Fuorn. Die Fläche im Trupchun wurde etwas früher ausgeschieden, es existieren Daten aus den Jahren 1991, 2003, 2011 und 2021 (Fluri et al. 2023). Für das Gebiet Il Fuorn lagen die Daten aus den Jahren 2003 und 2012 vor. Die Daten für das Jahr 2022 wurden als Teil dieser Masterarbeit erhoben. Auf dem Untersuchungsgebiet wurde im Abstand von jeweils 100m ein Plot-Raster verteilt. Im ersten Jahr wurden die Plots markiert, indem ein Metallpflock mit einem Plastik-Markierungsdeckel als Zentrumspunkt in den Boden eingelassen wurde.

### 3.2 II Fuorn – das Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet liegt an der Ofenpasstrasse, welche die Verbindung zwischen dem Val Müstair und Zernez bildet. Die Fläche des Untersuchungsgebietes beträgt ungefähr 2.74km<sup>2</sup> und erstreckt sich von ca. 1'750 m ü. M. bis auf 2'350 m ü. M. Gemäss Nais liegt das Gebiet daher in den Subalpinen und Obersubalpinen Höhenzonen (Fachstelle für Gebirgswaldpflege).

Das Gebiet kann in zwei Teile aufgeteilt werden. Ein Teil liegt nördlich der Ofenpasstrasse am Berg «Piz dal Fuorn» und ist grösstenteils südlich exponiert. Der andere Teil liegt südlich der Passstrasse am «Munt la Schera» und ist mehrheitlich nördlich exponiert.

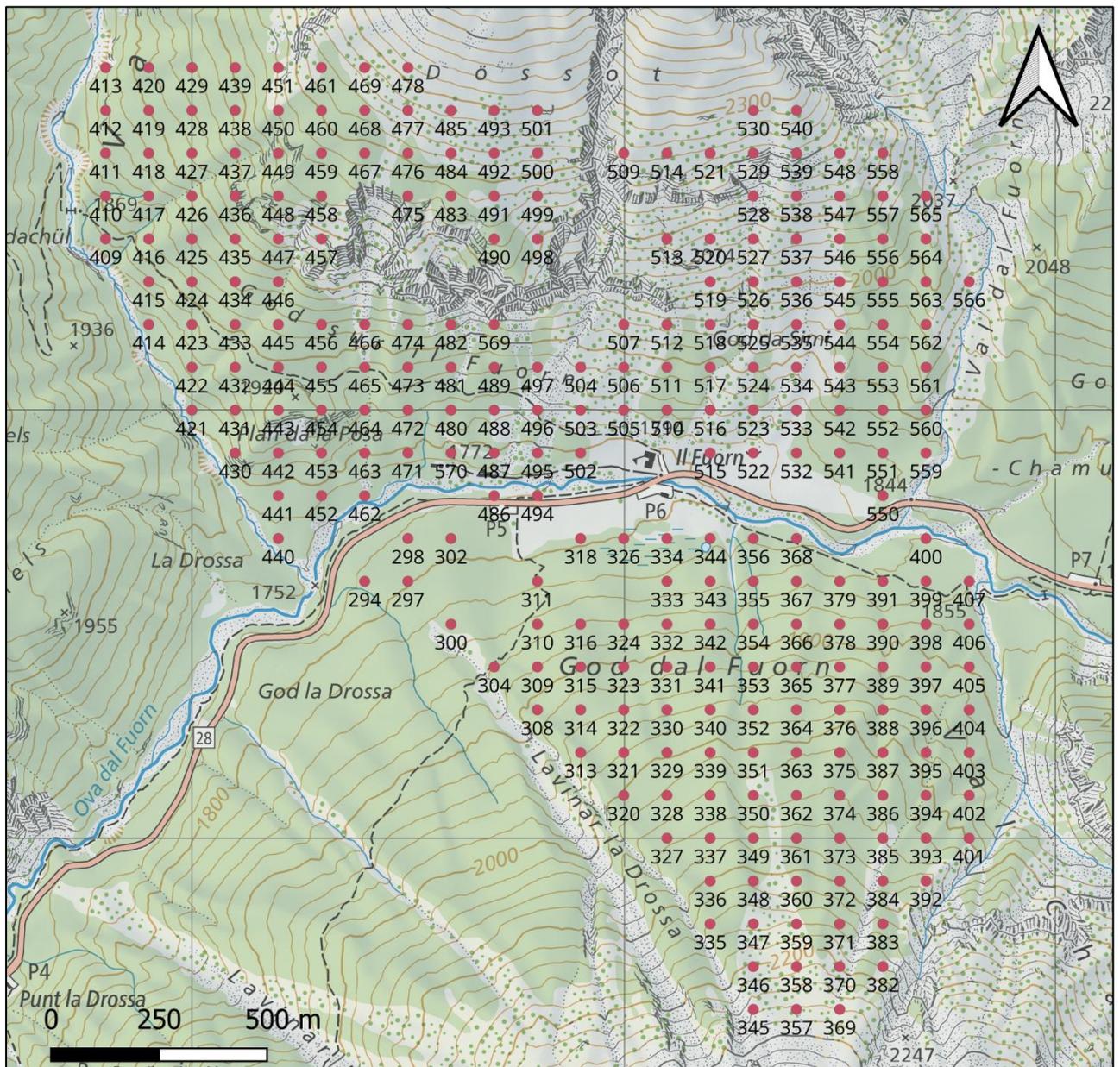


Abbildung 10 – Karte Übersicht der Plots (in Anlehnung an Bundesamt für Landestopografie swisstopo 2022a)

#### 3.2.1 Häufigste Baumarten II Fuorn

Hier werden die wichtigsten Baumarten, respektive die Baumarten, die gezählt und analysiert wurden kurz beschrieben. Dabei wird beim Beschrieb der Baumarten auf das Werk von Brändli (Brändli 1996) Bezug genommen. Bei den Bestimmungsmerkmalen wurde das Buch von Lüder (Lüder 2019) verwendet. Das Bestimmen der Baumarten bei den Aufnahmen war grundsätzlich nicht schwierig. Nur bei den

Keimlingen sehen sich die Bäume teilweise ähnlich. Deshalb wird hier jeweils kurz erwähnt auf welche Merkmale bei dieser Entwicklungsstufe geachtet wurde.

### **Arve *Pinus cembra***

Die Arve ist im Engadin weit verbreitet. Sie gilt als die höchststeigende Baumart Europas. Die Vertikale Verbreitung der Arve liegt in der Schweiz zwischen rund 1300-2600 m ü. M. Arven sind häufig auf Mittel- bis Steilhängen (ab 20° Steigung) zu finden, im Flachen Fehlen sie häufig. Die Arve gedeiht am besten an West- bis Nordostlagen, wo auch die häufigste natürliche Verjüngung auftritt. Die Arve verjüngt sich am besten auf mächtigen stark sauren Rohhumuspöhlern.

Junge Arven sind vor allem durch Beschädigungen von Schalenwild gefährdet. Sie überstehen diese aber verhältnismässig gut. Es wird angenommen, dass sich die Arve wieder stärker verbreitet, da sie Pionierbestände von Bergföhren und Lärchen laufend unterwandert oder sich auf verlassenen Alpweiden wieder ansiedelt.

Die Arve verbreitet ihre Pollen durch den Wind, die Samen werden hauptsächlich durch Tannenhäher verteilt (Gugerli et al. 2022). Da der Tannenhäher mehrere Arven-Nüsse pro Ort versteckt, treten die Arven häufig in kleinen Gruppen auf.

Die Nadeln der Arve sind ca. 10 cm lang, ziemlich steif und die Büschel bestehen aus 5 Nadeln (Lüder 2019).

Die Arve zu erkennen war bei den Keimlingen ziemlich einfach. Die jüngsten Bäumchen waren sogar noch mit den Nüsschen bedeckt. Die Nadeln sind bei den Keimlingen schon breiter und fester als bei den anderen Baumarten. Von Arven-Keimlingen konnten sehr gute Fotos gemacht werden. Die folgende Abbildung zeigt drei ersten Altersstufen der Keimlinge.



Abbildung 11 – Arven-Keimlinge (eigene Aufnahmen)

### **Fichte *Picea abies***

Die Fichte ist in der Schweiz weitverbreitet und dominiert einen weiten Standortbereich. Die Fichte besiedelte 1996 einen Bereich von ca. 250-2'200 m ü. M und der Median im Alpenraum lag bei rund 1'500 m ü. M. (Brändli 1996).

Entsprechend der breiten Verteilung der Fichten sind sie sehr anpassungsfähig und haben keine grossen Vorlieben bezüglich der Standorte. Sie verbreitet sich grundsätzlich überall, wo sich andere Baumarten auch verbreiten. Sie reagieren jedoch empfindlich auf Dürre und Frosttrockenheit.

Fichten können sehr alt werden. Die Nadeln der Fichte sind nur etwa 1-2.5 cm lang, ca. 1 mm dick und verteilen sich rund um den Zweig (Lüder 2019).

Die Fichten-Keimlinge gleichen den Föhren-Keimlingen stark. Junge Fichten sehen dem jungen Wachholder auf den ersten Blick sehr ähnlich, darauf muss man bei der Fichte stets achten.



Abbildung 12 – Fichten-Keimling und Fichtenverjüngung (eigene Aufnahme)

### **Berg- und Legföhre *Pinus uncinata* und *P. mugo***

Die Bergföhre kann entweder in Aufrechter (*P. uncinata*) oder liegender Form (Legföhre, *P. mugo*) vorkommen. Die Taxonomie dieses Artenkomplexes ist unklar (Sokołowska et al. 2021) und im Ofenpass-Gebiet überschneiden sich die beiden Arten. Berg- und Legföhren wurden bei den Verjüngungsaufnahmen nicht unterschieden. Aus diesem Grund wird nachfolgend immer von der Föhre die Rede sein.

Die Verbreitung der Bergföhre erstreckt sich von ca. 870 bis 2'100 m ü. M. und kommt vor allem in der subalpinen Zone vor. Der Median der Föhrenverbreitung in der Schweiz lag 1996 noch bei 1880 m ü. M., nur die Arve hat noch einen höheren Median. Bergföhren bevorzugen Süd- bis Nordwesthänge mit einer Neigung von 10 bis 40° und sind häufig oberhalb von Kuppen vorzufinden.

Die Föhre stellt nur geringe Ansprüche an den Boden, auch Trockenheit macht ihr nicht gross zu schaffen. In den Voralpen wächst sie vor allem auf sehr sauren Böden und in den Alpen mehrheitlich auf basischen Böden, vor allem im Nationalpark (Brändli 1996). Und die Wälder rund um den Ofenpass sind die grössten zusammenhängenden Föhrenwälder der Alpen (Schweizerischer Nationalpark; Brändli 1996). Föhren werden in der Regel 10-15 m hoch, selten bis 25 m. Die Nadeln sind gerade und stehen in Büscheln von zwei Nadeln. Ihre Samen verfügen über einen Flügel und werden durch den Wind verbreitet (Bezzola 2023).

Die Keimlinge der Föhren und die der Fichte sehen einander sehr ähnlich. Bei der Bestimmung wurde stark berücksichtigt, ob Fichten in der Nähe gesehen wurden. Grundsätzlich wurde beobachtet, dass die Nadeln der Föhren-Keimlinge weniger verdreht sind als die der Fichte.

Die dichten Legföhrenbestände sorgten bei der Erhebung teilweise für langsames vorankommen, erschwerten das Finden des Markierungsstabes und haben den einen oder anderen Kratzer bei den Beteiligten hinterlassen.

Die folgende Abbildung zeigt zwei Mal Föhrenkeimlinge und einmal die Tücken der Legföhrenbestände.



Abbildung 13 – Bergföhren Keimlinge und dichte Legföhrenbestände (eigene Aufnahmen)

## Lärche *Larix decidua*

Wälder mit Lärchendominanz befinden sich vor allem im Wallis sowie im Bündnerland, vor allem im Engadin, Münstertal und Puschlav. Durch die menschliche Verbreitung findet man die Lärche in der Schweiz in allen Höhenlagen. Ein Grossteil der Bestände befindet sich aber auf 1'400 m ü. M. oder höher. Der Median lag 1996 bei knapp 1'700 m ü. M. mit einer Baumgrenze auf rund 2'300 und einer Krüppelgrenze auf rund 2'400 m ü. M (Brändli 1996). Dadurch, dass die Lärche oft in diesen hohen Lagen anzutreffen ist, kommt sie oftmals auch an Hängen mit 30 bis 40° Neigung vor.

Die Lärche ist an süd- bis südwest-Expositionen stark vertreten.

Die Lärche braucht sehr viel Licht und kommt daher vor allem an Orten vor, die einen niedrigen Konkurrenzdruck nachweisen. Sie gilt als Rohbodenbesiedler und mag saure, junge, lockere Böden in lufttrockenen Lagen.

Lärchen sind klimatisch sehr anpassbar. Sie vertragen extreme Kälte genau so gut wie sommerliche Hitze. Auch gegen Verbiss- und Trittschäden ist die Lärche resistent.

Die Nadeln der Lärchen stehen überwiegend an Büscheln aus 15-50 Nadeln an Kurztrieben, an Langtrieben teilweise auch einzeln. Die Nadeln sind deutlich weicher und weniger spitz als die Nadeln der anderen Baumarten. Die Lärche trägt ihre Nadeln nur über den Sommer. Die Samen der Lärchen werden durch den Wind und durch Vögel verbreitet.

Die Keimlinge der Lärchen gleichen ein bisschen den Keimlingen der Arve. Die Nadeln sind aber etwas kürzer. Sind die jungen Bäumchen schon etwas grösser sind sie aufgrund ihrer weichen Nadeln und deren abgerundeten Form einfach zu identifizieren. Während den Aufnahmen wurde leider kein Foto von einem Lärchenkeimling gemacht.



Abbildung 14 - Junge Lärche (eigene Aufnahme)

## 3.3 Datenerhebung

### 3.3.1 Feldaufnahmen im Nationalpark

Aufnahmen im Gebiet Il Fuorn im SNP wurden im Zeitraum zwischen dem 20. Mai und dem 24. Juni 2022 gemacht. Die Aufnahmen setzen die Datenreihe des SNP aus den Jahren 2003 und 2012 fort. Im 10 Jahresrhythmus werden die Aufnahmen an denselben Standorten gemacht. Im Jahr 2022 wurden 227 Standorte gezählt, die Markierungen von 26 Standorten waren nicht auffindbar, wobei ein Grossteil davon schon im Jahr 2012 nicht mehr auffindbar waren.

Für die Aufnahme der Verjüngungs- und Verbissdaten im Nationalpark wurde die Aufnahmeanleitung, Waldverjüngung mit Beurteilung von Wildverbiss und Stammverletzungen im SNP (Schweizerischer Nationalpark 2012) angewandt. Im Gebiet wurden Bäume der Baumarten Arve *Pinus cembra*, Fichte *Picea*

*abies*, Berg- und Legföhre *Pinus mugo* (aufrechte und liegende Bergföhren wurden und der Kategorie «Föhre» erfasst) und Lärche *Larix decidua* gezählt. Auf dem Erfassungsblatt war auch noch die Vogelbeere *Sorbus aucuparia*, diese wurde aber im Jahr 2022 an keinem der Standorte vorgefunden. Die Zählungen wurden anhand einer Kreisfläche mit einem Radius von 4m für alle Bäume <130cm gemacht und die Verjüngung wurde anhand der folgenden Grösstentabelle erfasst:

EntwStufeName	EntwStufeBeschreibung
k	Keimlinge
v0	1-jährig - 10cm
v1	10 - 40cm
v2	40 - 70cm
v3	70 - 100cm
v4	100 - 130cm

Tabelle 2 - Entwicklungsstufen 4m Radius (Schweizerischer Nationalpark 2012)

In einer Kreisfläche mit einem Radius von 8m wurden die Bäume bis zu einem Brusthöhendurchmesser BHD von 24cm erfasst und die folgenden Grössenklassen eingeteilt:

EntwStufeName	EntwStufeBeschreibung
a2	130cm - 8cm BHD
b1	8cm BHD - 16cm BHD
b2	16cm BHD - 24cm BHD

Tabelle 3 - Entwicklungsstufen 8m Radius (Schweizerischer Nationalpark 2012)

Bäume mit einem grösseren BHD als 24cm wurden nicht erfasst. Die Kreisflächen werden je nach Neigung am Standort korrigiert und entsprechend wird der Radius vergrössert. Die Radien wurden aus dem Jahr 2012 übernommen und nicht neu berechnet. Die korrigierte Tabelle befindet sich im Anhang.

Bei der Zählung der Anzahl Bäume wurden auch die Schäden an den Bäumen erfasst. Dabei wurde unterschieden nach Verbisschäden, Schälungen/Stammschäden durch Wildtiere, Andere Schäden (Nager, Steine etc.).

Zudem wurden weitere Faktoren je Standort aufgenommen. Dazu gehört die Schätzung der Vegetationsschicht, unterteilt in Farn, Gras, Zwergsträucher, Moos, Kräuter und offene Flächen. Als Zwergsträucher wurden vor allem Erika *Erica carnea* L., Alpenrose *Rhododendron hirsutum* und Wachholder *Juniperus communis* subsp. *Alpina* Čelak vorgefunden.

Weiter wurde die Anzahl Sonnenstunden im Juni (Erhebung mit einem Sonnenkompass) und die Deckungsgrade der Baumschichten (Kronendichte) geschätzt.

Die Standorte sind mittels einem Eisenpflock mit einer Plastikkappe markiert. Fotos vom Plot und in alle vier Himmelsrichtungen aus dem Jahr 2022 und ein Metalldetektor halfen bei der Suche nach der Markierung. Die Aufnahmen wurden grösstenteils in Teams gemacht. Es wurde bei jedem Plot erfasst, welches Team den Plot aufgenommen hat.

Für die Zählungen war es den Teams erlaubt die Wanderwege des SNP zu verlassen. Es wurde aber immer darauf geachtet, die Pfade so oft wie möglich zu nutzen. Die Erhebungen wurden so geplant, dass die Natur und die Tiere vor Ort möglichst wenig gestört wurden. Die geplanten Plots für den kommenden Tag wurden jeweils am Abend vorher dem zuständigen Parkwächter kommuniziert. Damit ich und die Helfenden als Forschende im Park identifiziert wurden, trugen wir orange Westen mit aufgedrucktem Park-Logo.

### 3.3.2 Datenaufbereitung – Daten SNP

Die Daten wurden im Feld mit Papier und Bleistift erfasst und später digitalisiert. Zur Erfassung der Daten wurde ein standardisiertes Formular benutzt. Standorte, die nicht gefunden wurden, wurden als «NA» Werte erfasst.

#### Datenbereinigung

Die Daten aus den Jahren 2003 und 2012 wurden in die gleiche Struktur wie die Daten aus 2012 überführt. Die Daten wurden dabei kontrolliert und für zwei Standorte korrigiert (Doppelerfassung bei zwei Standorten).

### 3.4 Methoden Auswertung – Räumliche Verschiebung der Waldverjüngung über die Zeit

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie bei der Analyse der zeitlichen Analyse der Waldverjüngung vorgegangen wurde. Die Analyse wurde mit der Software R, Version 4.2.2. durchgeführt (R Core Team 2022).

#### 3.4.1 Datenscreening

Dieser Schritt beschreibt die Datenprüfung vor der Datenanalyse. Dabei wurden die Daten zuerst restrukturiert und wo möglich und nötig zusammengefasst. Danach wurden die Beziehungen zwischen den Variablen geprüft.

#### Unvollständige Daten herausfiltern

Im ersten Schritt des Datenscreenings wurden die Vollständigkeit des Datensatzes sichergestellt. Ausgegangen wird von einem Datensatz mit N=253 Plots. Für das Jahr 2003 enthalten n=43 Plots keine Werte, für 2012 sind es n=33 ohne Werte und für 2022 sind es n=26 ohne Werte. Total waren für n=190 Plots in allen drei Aufnahmejahren Werte vorhanden. Diese n=190 Plots waren die Ausgangslage für diese Analyse.

#### Reduktion der Entwicklungsstufen

Die 9 Entwicklungsstufen sind zu viele, um aussagekräftige Modelle zu berechnen. Um die Analysen zu vereinfachen, wurden die Entwicklungsstufen in Klassen zusammengefasst. Es wurde von 9 Entwicklungsstufen wurde 9 auf 4 Klassen reduziert. Die Reduktion auf die Klassen erfolgte sinngemäss: es wurden alle Verjüngungsstufen und Bestandesstufen zusammengefasst, wie die Tabelle 4 aufzeigt. Wo bei bei der Zusammenfassung die Anzahl der gezählten Bäume addiert wurden. Die Keimlinge und Aufwuchs-Kategorie (a2) bestehen sowieso je nur aus einer Klasse, die wurden auch nicht weiter zusammengefasst.

Detailliert		Altersklassen	
k	Keimlinge	k	Keimlinge
v0	1-jährig - 10cm	v	Verjüngung
v1	10 - 40cm		
v2	40 - 70cm		
v3	70 - 100cm		
v4	100 - 130cm		
a2	130cm - 8cm BHD	a2	Aufwuchs
b1	8cm BHD - 16cm BHD	b	Bestand
b2	16cm BHD - 24cm BHD		

Tabelle 4 – Zusammenfassung der Entwicklungsstufen in Altersklassen (eigene Darstellung)

## Selektion der Entwicklungsklassen

Die Keimlinge wurden im Jahr 2003 nicht aufgenommen, daher werden diese von der Analyse ausgeschlossen. Die Aufwuchs- und Bestandes-Klassen (a und b) wurden ebenfalls für die Analyse nicht berücksichtigt einerseits, weil diese Bäume schon zu gross sind und andererseits, weil für diese Klassen über den betrachteten Zeitraum keine grossen Veränderungen erwartet werden.

## Topografische Variablen und deren Transformation

Je Plot wurden die drei topografischen Variablen Höhe, Neigung und Exposition untersucht. Diese Variablen waren anhand der Plot-Liste des SNP verfügbar. Damit mit diesen Werten gearbeitet werden konnte, wurden diese transformiert.

Dabei wurden zur besseren Handhabung die Variablen Höhe und Neigung z-standardisiert. Bei der z-Standardisierung werden die Werte so transformiert, dass sie einen Mittelwert von 0 und eine Standardabweichung von 1 haben. Die z-Standardisierung ermöglicht den Vergleich von Mittelwerten und Abweichungen innerhalb einer Standardabweichung. Die Berechnung erfolgt, indem jedem Datenpunkt der Mittelwert subtrahiert wird und danach durch die Standardabweichung geteilt wird (Schäfer 2016). Für die Exposition lagen Kreiswerte von 0-360 vor, wobei der Wert 0 und 360 das gleiche bedeuten. Diese Werte wurden daher in zwei lineare Variablen Northness und Eastness unterteilt. Die Werte sagen aus, wie stark die Fläche entweder nach Norden oder nach Osten ausgerichtet sind und nehmen Werte zwischen -1 und 1 an.

Dabei wird die Northness ( $\cos\_Exposition$ ) mit dem Kosinus der Exposition berechnet:

$$\text{Northness} = \cos(\text{Exposition} * \pi / 180)$$

Die Eastness ( $\sin\_Exposition$ ) wird mit dem Sinus der Exposition berechnet

$$\text{Eastness} = \sin(\text{Exposition} * \pi / 180)$$

### 3.4.2 Vorarbeiten Modellbildung

#### Erstellen binärer Werte

Es hat sich herausgestellt, dass mit den gezählten Werten, trotz zahlreichen, zeitintensiven Versuchen, kein verlässliches Modell entwickeln lässt. Grund dafür ist die ungleichmässige Verteilung der Daten. Durch das Arbeiten mit den verschiedenen Altersklassen, verhältnismässig zu viele Daten mit einem Wert von 0. Man spricht in diesem Sinn von einem Zero-Inflated-Datensatz, was bei Zählungen oft vorkommt (Zuur et al. 2009). Die Abbildung 15 zeigt die Verteilung der Anzahl Arven in der Altersklasse «v» für das Jahr 2022, als Beispiel.

Es wurden erfolglose Versuche mit komplizierten Modellen wie beispielsweise Zero-Inflated Negative Binomial-Modellen gemacht. Daher wurde entschieden, die Anzahl der gezählten Bäume in binäre Werte (binom, 0/1) umzuwandeln. Dadurch hat sich die Komplexität des Datensatzes erheblich verringert. Die Berechnung erfolgte, indem alle gezählten Werte >0 mit 1 ersetzt wurden.

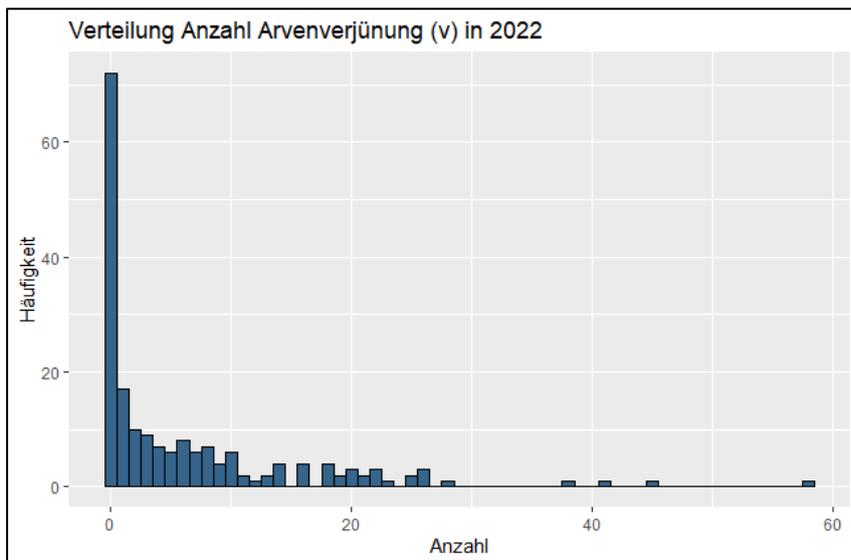


Abbildung 15 - Anzahl Arvenverjüngung (v) für das Jahr 2022 (eigene Darstellung)

### Prüfung der Beziehungen zwischen den erklärenden Variablen und Variablenselektion

Die erklärenden Variablen wurden analysiert und es wurde geprüft, ob es Ausreisser gibt. Dazu sie als Histogramm und Boxplot betrachtet.

Damit das Modell später nicht durch Korrelationen zwischen den erklärenden Variablen gestört wird, wurden anhand des Korrelationskoeffizienten paarweise getestet. Die Baumarten wurden bei diesen Analysen ebenfalls berücksichtigt.

### 3.4.3 Modellbildung

Es wurden mehrere Modelle gebildet. Die Modelle wurden in Anlehnung an Augmented Backward Elimination gebildet (Dunkler et al. 2014). Dabei werden zuerst alle Variablen, die als sinnvoll erscheinen in das Modell integriert. Im nächsten Schritt werden anhand der p-Werte die Variablen selektiert, die weiterhin im Modell bleiben. Dieser Schritt wird wiederholt, bis das Modell stabile Resultate liefert.

Es hat sich schnell gezeigt, dass die Baumarten räumlich zu unterschiedlich verteilt sind und da vor allem über die Zeit hinweg keine zuverlässigen einheitlichen Vergleiche gemacht werden können. Deshalb wurde ein allgemeines Modell sowie Modelle für die einzelnen Baumarten erstellt.

Die Modelle wurden mit der «glmer» Funktion aus dem R-Package lme4 gebildet (Bates et al. 2015). Es handelt sich bei allen Modellen um Generalized Linear Mixed-Effects Models GLMM. Es sind Mixed-Effects Models, weil die Plot-Nummer (PlotID) als Random-Effect verwendet wird. Random-Effects werden eingesetzt um hierarchische Gruppierungen in den Daten abzubilden (Rhodes et al. 2009). Random Effects werden häufig verwendet, wenn ein Untersuchungsgebiet mehrmals betrachtet wird (Pinheiro und Bates 2009).

Um den herauszufinden, ob der Einfluss dieser Variablen über die Zeit geändert hat, werden Interaktionen zwischen dem Erhebungsjahr (Jahr) und den topografischen Variablen im Modell gerechnet (Tsai und Gill 2013). Interaktionen dienen dazu Interaktionen zwischen den Faktoren herauszufinden und werden häufig bei mehreren Messzeitpunkten eingesetzt (IBM Corporation 1989 2021). Für das Finden des passenden Modells wurde zuerst ein Modell mit dem Jahr als Faktor, allen topografischen Variablen und allen Interaktionen zwischen den topografischen Variablen mit dem Faktor Jahr erstellt. Die Baumart wurde ebenfalls als Faktor benutzt und die Berechnungen erfolgten mit den nach EntwGrp1 gruppierten Daten. Die folgende Abbildung zeigt das Modell im R-Code.

```

mod1 <- glmer(binom ~ as.factor(Jahr) +
              as.factor(baumart) +
              sd_PlotHöhe +
              sd_PlotNeigung +
              cos_Exposition +
              sin_Exposition +
              as.factor(Jahr)*sd_PlotHöhe +
              as.factor(Jahr)*sd_PlotNeigung +
              as.factor(Jahr)*cos_Exposition +
              as.factor(Jahr)*sin_Exposition +
              (1|PlotID),
              data = data_BIN, family = "binomial")

```

Abbildung 16 – Modell mit allen möglichen Faktoren (eigene Darstellung)

Dieses Modell war das Ausgangsmodell für alle Berechnungen. Dieses Modell ist sehr kompliziert und konnte in keinem Fall in dieser Form gerechnet werden. Deshalb wurde nach der Modellberechnung eine Varianzanalyse (Anova) gerechnet und die nicht signifikanten Faktoren aus der Berechnung ausgeschlossen. Dabei konnte kein Faktor ausgeschlossen werden, solange er noch Bestandteil einer Interaktion war, diese mussten zuerst eliminiert werden. Dieser Vorgang wurde so lange wiederholt, bis alle Faktoren signifikant waren.

Als nächster Schritt wurde das Akaike Information Criterion AIC berechnet. Der AIC dient dazu Modelle vergleichbar zu machen. Dabei wird nicht nur die Modellgenauigkeit sondern auch deren Komplexität berücksichtigt (Chakrabarti und Ghosh 2011). Danach wurde die Funktion «drop1» in R verwendet. Diese Funktion rechnet für jeden Faktor im Modell aus, wie sich der AIC verändern würde, wenn dieser Faktor aus dem Modell eliminiert würde. Wenn der AIC ohne Variable tiefer war, wurde der entsprechende Variable aus dem Modell entfernt.

Dieses Vorgehen wurde für das allgemeine Modell sowie für die baumartenspezifischen Modell wiederholt.

### 3.4.4 Modellvalidierung

Sobald für ein Modell alle oben beschriebenen Schritte durchgerechnet wurden, wurde die Verteilung der Residuen im Modell geprüft. Das wurde anhand eines QQ-Plot mittels DHARMA-Package gemacht (Hartig 2022).

## 3.5 Methoden Auswertung – LiDAR basierte Erkennung der Waldverjüngung

In diesem Kapitel wird das Vorgehen bei der Verarbeitung der LiDAR Daten beschrieben. Dafür wurde mit LiDAR Daten von Swisstopo gearbeitet. Das Skript «UC4\_main\_tilewise» auf von Waldmonitoring.ch – berechnet die Waldverjüngung für ein Tile der Schweizer-Karte anhand von LiDAR Daten. Ein Tile ist ein Raster mit Quadraten von 1 km x 1 km. Die LiDAR Daten der Schweiz können je Tile heruntergeladen werden. Das erwähnte Skript verarbeitet diese LiDAR Daten dann zu Rasterdateien. Die wichtigsten Schritte dieser Verarbeitung werden in diesem Kapitel erklärt. Diese Outputs werden dann anhand bestimmter Metriken mit den gezählten Werten, gemäss Kapitel 3.3 verglichen. Die Metriken werden ebenfalls in diesem Kapitel beschrieben.

### 3.5.1 Daten Swisstopo

Die schweizweiten LiDAR Daten werden von swisstopo erhoben. Seit 2017 läuft die aktuelle Kampagne, die über 6 Jahre hinweg die ganze Landesfläche der Schweiz und Lichtenstein erfassen soll (swisstopo). Gemäss swisstopo weisen die LiDAR Daten die folgenden Eigenschaften auf:

- Punktedichte von mindestens 5 Punkten pro m<sup>2</sup>, Mittelwert bei 15-20 Punkten pro m<sup>2</sup>
- Klassifizierung: nicht klassifiziert, Boden, Vegetation, Gebäude, Wasser, Brücken
- Lagengenauigkeit: 20cm (1 Sigma)
- Höhengengenauigkeit 10cm (1 Sigma)

Das heisst die Klassifizierung der Punktwolke wird bereits von swisstopo vorgenommen. Die folgende Abbildung zeigt ein Beispiel, wie die Punkte klassifiziert werden.

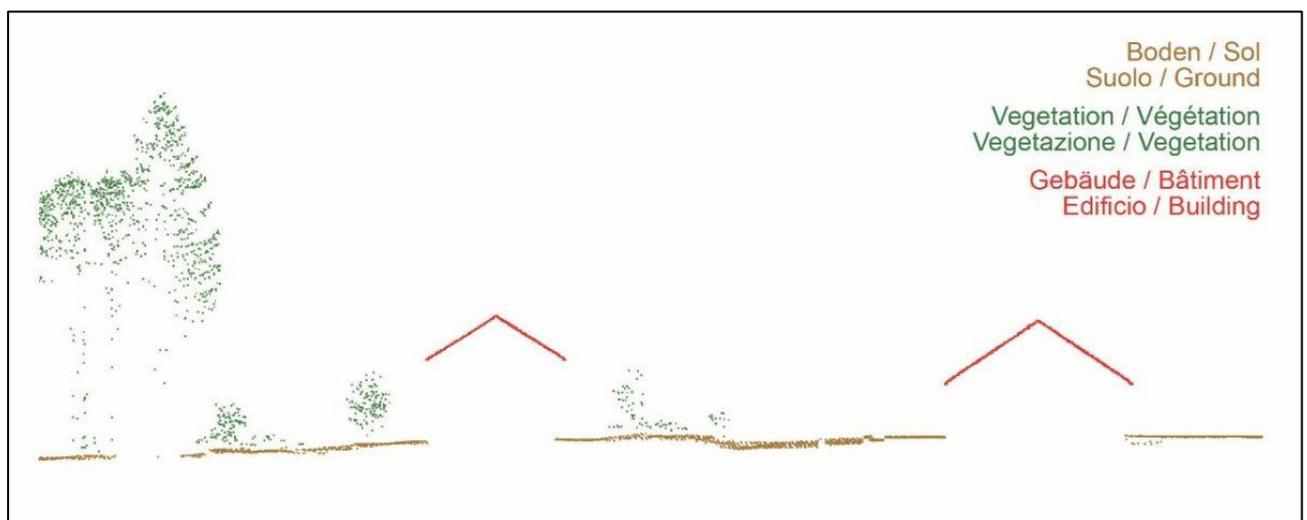


Abbildung 17 - Klassifizierung nach swisstopo (swisstopo)

Die Daten im Untersuchungsgebiet wurden im Jahr 2021 erhoben (swisstopo). Das heisst es gibt ein Jahr Unterschied zwischen dem Erfassen der LiDAR Daten und den Verjüngungszählungen im Jahr 2022. Diese Differenz wird nicht als problematisch erachtet. Für das Untersuchungsgebiet ist der nächste Flug für 2027 geplant.

### 3.5.2 Datenverarbeitung mit UC4-Tilewise

Das R-Skript «UC4\_main\_tilewise» stand bereits und wurde von Hannes Horneber erstellt. Es verarbeitet die LiDAR Daten einzelner Tiles in eine Raster-Datei, welche zeigt, wie hoch die relative Punktedichte pro Rasterzelle ist. Das Skript verwendet das Raster Paket (Hijmans 2023), welches durch das Terra-Package ersetzt wurde, aber zurzeit noch problemlos funktioniert. Zudem sind die Libraries Lidr (Rousset et al. 2023a), exactextract (Baston 2023) zu erwähnen.

Das Skript wurde für diese Masterarbeit optimiert, um eine effiziente lokale Ausführung auf einem Computer zu gewährleisten. Dazu wurden gewisse Schritte vereinfacht und lokal ausgeführt, welche sonst mit Online-Datenquellen laufen. Die wichtigsten Punkte dieses Skripts werden in diesem Kapitel erklärt. Nach dieser Optimierung wurde das Skript als Funktion abgespeichert, damit verschiedene Kombinationen automatisch nacheinander gerechnet werden können.

## Bestimmung Canopy Threshold CTH

Wie in vielen anderen Studien erwähnt wurde auch für diese ein CTH berücksichtigt. Viele Studien verwenden einen CTH von 0.5 m (Imangholiloo et al. 2020) aber in der Kombination mit den Verjüngungsaufnahme im Park, macht 0.4 m Sinn, da eine Entwicklungsstufe von 0.4-0.7m erfasst wurde. Es werden also nur die Höhenklassen > 0.4m berücksichtigt.

## Bestimmung der Höhenklassen

Es wurde mit zwei Höhenklassen gearbeitet. Einerseits wurden alle Verjüngungsstufen (v), die grösser als der CTH von 40cm sind, zusammengefasst. Diese Klasse umfasst die gezählten Grössenklassen «v2», «v3» und «v4» somit die Verjüngung in einer Höhe von 40-130cm. Diese Klasse wird von nun an v234 genannt.

Andererseits wurde mit der Entwicklungsstufe a2 gearbeitet. Diese Stufe enthält die Bäume >1.3 m und bis zu einem BHD von 8 cm. Die Schwierigkeit bei dieser Stufe war, dass bei den Aufnahmen im Feld die Baumhöhe nicht erfasst wurde. Deshalb musste diese geschätzt werden. Die Baumhöhe mittels BHD aufgrund von bestehender Literatur zu schätzen erwies sich als schwierig. Dies unter anderem, weil die lokalen Gegebenheiten, wie beispielsweise die Geologie berücksichtigt werden müssen. Daher wurden zwei andere Methoden für die Ermittlung der Höhe gewählt.

- 1) Einerseits wurde eine ITD (Einzelbaumerkennung) durchgeführt, dabei wurde nach dem lidR Handbuch und der lidR-R-Library vorgegangen (Roussel et al. 2023a; Roussel et al. 2023b). Dafür wurde zuerst ein Canopy Height Model CHM erstellt, die Treetops identifiziert und danach die eine Tree-Segmentation durchgeführt. Dafür wurde der dalponte2016 Algorithmus durchgeführt (Dalponte und Coomes 2016). Im nächsten Schritt wurden die Plot-Flächen aus den Zählungen (mit einem 8 m Radius) geklippt. Somit lagen für alle gezählten Flächen die nach der ITD berechneten Baumhöhen vor.

Für die Grössenzuteilung wurden Plots gesucht, welche zwar Bäume in der Entwicklungsstufe «a2» aber keine Bäume in den Entwicklungsstufen «b1» oder «b2» haben. Da wurden 15 Plots identifiziert. Alle segmentierten Bäume (n = 294) dieser Plots wurden in eine Tabelle geschrieben. Danach wurden alle Bäume < 1.3m ausgeschieden (n= 1), da sie nicht zur Entwicklungsstufe «a2» gehören. Zudem wurden alle Bäume > 10 m (n= 118) ausgeschieden, da diese Werte sehr unwahrscheinlich sind. Der Mittelwert der übriggebliebenen Bäume (175) lag bei 5.2m.

- 2) Ein bekannter Messwert, der aus der nur aus der Baumhöhe und dem BHD besteht, ist der Schlankheitsgrad. Wobei dieser wie folgt berechnet wird: Baumhöhe/BHD. Dabei sollte der Wert gemäss forstwirtschaftlicher Praxis zwischen 0.45 und 0.8 liegen (Rast). Nimmt man den Mittelwert von 0.4 und 0.8 ergibt das 0.625. Errechnet man nun mit diesem Wert die Baumhöhe, ergibt das genau 5m.

Anhand dieser zwei Berechnungen wird die Baumhöhe für die Klasse a2 auf 5m festgelegt.

Grundsätzlich rechnet das Skript zwei Höhenklassen in einem Durchgang. Da aber der CTH für die beiden Höhenklassen unterschiedlich ist, wird das Skript nur mit einer Höhenklasse pro Durchgang berechnet.

## Input

Als Input muss eine Liste mit den Tiles in Form eines Geopackages (.gpck) vorliegen. Diese Liste wurde für diese Arbeit anhand der Tiles erstellt und enthält die Tiles:

- 2810\_1172
- 2811\_1171
- 2811\_1172
- 2812\_1170
- 2812\_1171
- 2812\_1172

Für jedes dieser Tiles muss eine LiDAR Datei (.las) vorliegen. Die LiDAR Daten wurden bei swisstopo heruntergeladen (swisstopo). Zudem braucht es ein Digital Terrain Model DTM. Im diesem Fall wurden die DTM auch von swisstopo für alle Tiles heruntergeladen und zu einer Datei (.TIF) zusammengefügt (swisstopo).

## Einstellungen

In den Einstellungen werden die Parameter festgelegt. Diese Parameter wurden, wie in Kapitel 2.8 beschrieben beim Erstellen des Skripts gesetzt und mit Begehungen im Wald validiert. Nun gilt es diese Parameter zu testen. Die folgende Tabelle beschreibt die Parameter:

Parameter	Beschrieb	Einheit
RASTER_RES	Auflösung der Pixel für den Output,	m
RASTER_RES_HS	Raster Auflösung hohe Auflösung für Berechnung	m
REJ_HEIGHT_MIN	Minimale Höhe damit Punkte betrachtet werden (CTH)	m
REJ_HEIGHT1	Höhe Verjüngungsklasse 1	m
REJ_HEIGHT2	Höhe Verjüngungsklasse 2	m
CNPY_HEIGHT_MIN	Tiefster Punkt, der als Krone betrachtet wird	m
CNP_HEIGHT_MAX	Höchster Punkt, der als Krone betrachtet	m
TRESH_COVERED	Deckungsgrad bei welchem ein Punkt als bedeckt betrachtet wird	Werte von 0-1
FACTOR_COVERAGE_WEIGHT	Gewichtungsfaktor, wie stark die relative Punktdichte unter der Kronenabdeckung gewichtet wird	Ganzzahl

Tabelle 5 - Parameter, Erklärung und Einheit (Eigene Darstellung)

Es gibt Parameter, die anhand dieser Arbeit nicht verändert wurden. Diese Parameter und deren Werte sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Parameter	Beschrieb	Fixierter Wert in m
RASTER_RES_HS	Raster Auflösung hoch für Berechnung	0.5
CNP_HEIGHT_MAX	Höchster Punkt, der als Krone betrachtet wird	99

Tabelle 6 - Fixe Parameter, Erklärung und Einheit (Eigene Darstellung)

Je nach Höhenklasse werden die höhen-spezifischen Parameter fixiert. Diese sind in der folgenden Tabelle abgebildet:

Parameter	Beschrieb	Wert für v234 in m	Wert für a2 in m
REJ_HEIGHT1	Höhe Verjüngungsklasse 1	1.3	5
REJ_HEIGHT2	Höhe Verjüngungsklasse 2	5	6
CNPY HEIGHT_MIN	Tiefster Punkt, der als Krone betrachtet wird	5	6

Tabelle 7 - Fixe Parameter, Erklärung und Einheit für die Höhenklasse v234 und a2 (Eigene Darstellung)

Somit bleiben noch die Parameter, die anhand dieser Arbeit verändert und getestet werden:

Parameter	Beschrieb	Einheit
RASTER_RES	Auflösung der Pixel für den Output,	m
REJ_HEIGHT_MIN	Minimale Höhe damit Punkte betrachtet werden (CTH)	m
TRESH_COVERED	Deckungsgrad bei welchem ein Punkt als bedeckt betrachtet wird	Werte von 0-1
FACTOR_COVERAGE_WEIGHT	Gewichtungsfaktor, wie stark die relative Punktdichte unter der Kronenabdeckung gewichtet wird	Ganzzahl

Tabelle 8 - Veränderbare Parameter, Erklärung und Einheit (Eigene Darstellung)

## Vorbereitungen

In diesem Schritt wird die Tiles-Liste eingelesen und die Output-Ordner werden erstellt.

## Main-Loop

Im Main Loop werden die eigentlichen Raster berechnet. Dieser Vorgang wird für jedes Tile wiederholt. Als erster Schritt wird das LAS-File und das DTM-File eingelesen. Und es werden die Rasterdateien für die 3 Auflösungen (RASTER\_RES, RASTER\_RES\_HS, RASTER\_DS) erstellt. Als nächster Schritt wird das LAS-File anhand des DTM normalisiert. Das heisst, die topografischen Höhenunterschiede werden herausgerechnet und es entsteht ein Vegetationshöhenmodell VHM. Es werden alle Punkte in einem Raster (r\_npoints\_all) gespeichert. Danach werden anhand der Klassifizierung von Swisstopo die Bodenpunkte entfernt.

Die Punkte zwischen der minimalen (CNPY HEIGHT\_MIN) und maximalen Kronenhöhe (CNP\_HEIGHT\_MAX) werden selektiert, und ebenfalls als Raster (r\_npoints\_cov) der Kronenabdeckung gespeichert. Aus den Rastern mit allen Punkten und dem Raster der Kronenabdeckung wird berechnet, wie hoch die prozentuale Kronenabdeckung ist ( $r\_npoints\_cov / r\_npoints\_all$ ) und ebenfalls als Raster (r\_ccoverage) gespeichert. Der Wert in diesem Raster entscheidet darüber, ob die Werte in einer Zelle mit dem Gewichtungsfaktor (FACTOR\_COVERAGE\_WEIGHT) gewichtet werden oder nicht. Die Grenze, ob der Wert gewichtet wird oder nicht, wird mit dem Treshold der Kronenabdeckung (TRESH\_COVERED) festgelegt. Die rcc\_coverage kann in unserem Fall nicht NA sein, daher werden alle NA-Werte mit dem Wert null ersetzt (temp\_r\_ccoverage). Alle Pixel, die stärker bedeckt sind als der festgelegte Treshold werden auch als Raster gespeichert (r\_ccovered). Die beschriebenen Rasterdateien werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Punkte / Raster	Punkte	Berechnung
r_npoints_all	alle Punkte im Tile	-
r_npoints_cov	Alle Punkte, zwischen der tiefsten und höchsten Kronenhöhe	$Z \geq \text{CNPY\_HEIGHT\_MIN}$ , $Z < \text{CNPY\_HEIGHT\_MAX}$
r_ccoverage	Verhältnis der Punkte abgedeckt durch Kronenpunkte	$r\_npoints\_cov / r\_npoints\_all$
temp_r_ccoverage	Alle r_ccoverage, die NA wären mit dem Wert 0 ersetzt.	$temp\_r\_ccoverage = r\_ccoverage$ $temp\_r\_ccoverage[is.na(r\_ccoverage)] = 0$
r_ccovered	Pixel, die starker abgedeckt sind als der festgelegte Treshold	$r\_ccoverage > \text{THRESH\_COVERED}$

Tabelle 9 – Übersicht Punkte- und Rasterfiles (eigene Darstellung)

Der nächste Schritt wird für die beiden bestimmten Höhenklassen wiederholt. Da für diese Arbeit nur die erste Verjüngungsschicht verwendet wird, wird diese Berechnung beschrieben.

In einem ersten Schritt werden alle Punkte < der gesuchten Höhe herausgefiltert (REJ\_HEIGHT1) und als Raster abgespeichert (r\_npoints\_rej1\_hs). Danach wird ein Patchfilter verwendet, um Einzelne Punkte herauszufiltern. Beim Patchfilter kann angegeben werden wie viele Pixel mindestens zusammenhängend benötigt werden, damit ein Wert nicht als alleinstehend klassifiziert wird und in welche Felder alle als zusammenhängend zählen. In diesem Fall wird der Patchfilter mit 5 Pixel als Patch-Grösse und in 8 Richtungen bestimmt. Bis zu diesem Punkt wurden die Berechnungen auf einer detaillierten Ebene mittels hoher Auflösung (RASTER\_RES\_HS) gemacht. Als nächster Schritt werden die Werte auf die gewünschte Auflösung aggregiert (RASTER\_RES) und in einem Raster gespeichert (r\_npoints\_rej1). Mit diesen Werten wird danach die relative Punktedichte (r\_reldens\_rej1) sowie die gewichtete relative Punktedichte (r\_reldensweighted\_rej1) berechnet. Auch hier werden die Punkte- und Raster-Dataframes tabellarisch zusammengefasst.

Punkte / Raster	Punkte	Berechnung
r_npoints_rej1_hs	Alle Pixel, die in der REJ1 Punkte haben.	$Z < \text{REJ\_HEIGHT1}$
r_dtl_rej1	Alle Pixel, die mehr als 0 Punkte haben.	$r\_npoints\_rej1\_hs > 0$
r_dtl_rej1	Mit Patchfilter gefiltert.	<code>patchFilter(r_dtl_rej1, area=5, directions=8)</code>
r_rej1_dtlp	Aggregation des hochaufgelösten Rasters auf die RASTER_RES	<code>aggregate(r_dtl_rej1, RASTER_RES/RASTER_RES_HS, fun="sum")</code>
r_npoints_rej1	Alle Punkte auf der REJ1, aggregiert auf die RASTER_RES	<code>aggregate(r_npoints_rej1_hs, RASTER_RES/RASTER_RES_HS, fun="sum")</code>
r_reldens_rej1	Relative Punktedichte der Punkte der REJ1 zu allen Punkten.	$r\_npoints\_rej1 / r\_npoints\_all$
r_reldensweighted_rej1	Gewichtete Relative Punktedichte der Punkte der REJ1 zu allen Punkten.	$r\_reldens\_rej1 + r\_reldens\_rej1 * temp\_r\_ccoverage * \text{FACTOR\_COVER\_AGE\_WEIGHT}$

Tabelle 10 – Übersicht Punkte- und Rasterfiles REJ1 (eigene Darstellung)

## Output

In diesem letzten Teil des Skriptes werden die Output-Dateien geschrieben und gespeichert und sind Raster-Dateien. Diese werden pro Tile in einen Ordner gespeichert und am Schluss, wenn alle Tiles berechnet wurden, zusammengefügt. Somit bestehen für die weitere Analyse einzelne TIF und VRT-Dateien zur Verfügung.

### 3.5.3 Bestimmen der Metriken zum Vergleich der Daten

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie die verschiedenen Outputs des UC4 mit den Zählungen validiert wurden. Eine Schwierigkeit bestand darin, dass der Output des UC4 mit der (gewichteten) relativen Punktedichte einen Wert von 0 bis 100 resp. gewichtet einen Wert von 0 bis >100 annimmt und die gezählten Werte nicht dieselbe Datenstruktur haben. Deshalb wurde die Validierung auf 3 Stufen durchgeführt. Bei der ersten Stufe wurden die UC4 Werte mit der Anzahl der gezählten Bäume verglichen. Bei der zweiten Stufe wurden die UC4 Werte mit einem binären Wert (0/1) der Zählungen verglichen. Dabei wurden die gezählten Werte >0 mit 1 ersetzt. Bei der dritten Stufe wurden auch die UC4 Werte auf Basis eines Thresholds auf binäre Werte umgewandelt und mit den binären Werten der Zählungen verglichen. Damit die Werte verglichen werden können, müssen diese zuerst aus dem Raster extrahiert werden. Dies wurde mit dem `exact_extract` Package gemacht (Baston 2023). Dabei werden für die Höhenklasse `v234` die Werte von aus einem 4 m Radius und bei der Höhenklasse `a2` bei einem Radius von 8 m extrahiert.

#### Stufe 1 – Vergleich Anzahl Bäumen mit relativer Punktedichte

Damit die Werte auf dieser Stufe besser miteinander verglichen werden konnten, wurden beide Werte, der Output von UC4 sowie die Anzahl Bäume der Zählungen, z-standardisiert. Die z-Standardisierung wird im Kapitel 3.4.1 erklärt.

Mit diesen Werten wurde eine lineare Regression gerechnet. Basierend auf diesem Modell wurde ein  $R^2$  gerechnet. Der  $R^2$  ergibt einen Wert zwischen 0 und 1 und sagt aus wie viel der Prozent Varianzen durch das Modell erklärt wurde (Flandorfer 2019). Wobei ein hoher  $R^2$  Wert auch bei schlechten Modellen und ein tiefer Wert bei guten Modellen vorkommen kann, deshalb wird diese Metrik oft nicht als einzige Metrik angewendet.

Ebenso in dieser Arbeit wird auf dieser Stufe zusätzlich der Root Mean Squared Error RMSE respektive der prozentuale RMSE berechnet (Chai und Draxler 2014). Der RMSE ist eine Metrik zur Bewertung der Genauigkeit von Vorhersagemodellen. Der RMSE misst die durchschnittliche Abweichung zwischen den beobachteten Werten und den vorhergesagten Werten und gibt diese Abweichung in der gleichen Einheit wie die zugrunde liegenden Daten wieder. Der RMSE % wird berechnet, indem der RMSE durch den effektiven Wert geteilt wird und mit 100 multipliziert wird.

#### Stufe 2 – Vergleich relative Punktedichte mit vorhandener oder nicht vorhandener Verjüngung

Auf der zweiten Stufe wird der Output des UC4 mit dem binären Wert der Zählungen verglichen. Dafür wird die Area Under Curve für die ROC-Kurve (receiver operating characteristic) AUC-ROC berechnet. Wobei die ROC-Kurve den Zusammenhang zwischen den richtig-positiven und falsch-positiven Fällen darstellt (Hilgers et al. 2019). Die AUC berechnet dann die Fläche unterhalb der ROC-Kurve. Sie kann einen Wert zwischen 0 und 1 annehmen, wobei Werte von 0.5 zufällige Prognosen und 1.0 perfekte Vorhersagen bestimmen (Marzban 2004).

### Stufe 3 – Konfusionsmatrix

Bei der Stufe 3 werden zwei binäre Werte miteinander verglichen. Damit die Werte aus UC4 in binäre Werte umgewandelt werden können, braucht es einen Treshold bei dem die Werte  $> 1$  und die Werte  $> 0$  eingestuft werden. Dieser Treshold wurde nicht fixiert, sondern auch mit verschiedenen Varianten getestet (MIN\_TRESHOLD).

Die Werte aus UC4 und den Zählungen werden in einer Konfusionsmatrix einander gegenübergestellt:

		Wert aus UC4	
		Positiv (1)	Negativ (0)
Wert aus Zählungen	Positiv (1)	true positive (tp)	false negative (fn)
	Negativ (0)	false positive (fp)	true negative (tn)

Tabelle 11 – Konfusionsmatrix (in Anlehnung an (Dalianis 2018))

Danach werden die die Precision, Recall, F1-Score und die Accuracy berechnet. Die folgende Tabelle erklärt die Metriken.

Stufe	Beschrieb	Formel
Precision	Die Precision konzentriert sich auf die positiven Werte. Die Precision sagt aus, wie hoch der Anteil der korrekt als positiv eingestuften Werte im Verhältnis aller positiven Werte ist.	$P = \frac{tp}{tp + fp}$
Recall	Der Recall konzentriert sich auf die negativen Werte. Der Recall sagt aus, wie hoch der Anteil der korrekt als negativ eingestuften Werte im Verhältnis aller negativen Werte ist.	$R = \frac{tn}{tn + fp}$
F1-Score	Der F1-Score ist eine Kombination aus Precision und Recall. Er dient dazu die Balance zwischen Precision und Recall zu bewerten. Er kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei je höher, desto besser ist.	$F_1 = F = 2 * \frac{P * R}{P + R}$
Accuracy	Die Accuracy zeigt der Prozentsatz der korrekt vorhergesagten Werten im Verhältnis der gesamten Werten.	$A = \frac{tp + tn}{tp + tn + fp + fn}$

Tabelle 12 – Metriken Stufe 3 (in Anlehnung an (Dalianis 2018))

Die gewählten Metriken werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Stufe	Wert UC4	Wert Zählung	Metrik
Stufe 1	z-normalisierte Outputs UC4	z-normalisierte Werte der gezählten Bäume	R <sup>2</sup>
Stufe 1	Output UC4	Anzahl gezählter Bäume	RMSE %
Stufe 2	z-normalisierte Outputs UC4	Binäre Werte der Zählungen (0/1)	AUC-ROC
Stufe 3	Binäre Werte Output UC4 (0/1)	Binäre Werte der Zählungen (0/1)	Precision Recall F1-Score Accuracy

Tabelle 13 – Übersicht der Metriken (Quelle: eigene Darstellung)

Zusätzlich zu diesen Werten wurden noch zwei Qualitätskontrollen eingebaut. Einerseits wird geprüft wie viel der Plot-Fläche mit Werten abgedeckt wird. Dieser Wert wird auf 10% gesetzt. Das mag tief erscheinen, sind aber bei den Plot-Flächen mit 4 m Radius bereits 5 m<sup>2</sup>. Damit soll verhindert werden, dass Werte in die Auswertung einfließen, die den Plot nicht ausreichend repräsentieren. Berechnet wurde die Abdeckung anhand der quadrierten Raster-Auflösung (RASTER\_RES) x der Anzahl Felder mit Werten beim gegebenen Plot, die ebenfalls mit dem exact\_extract-Funktion extrahiert wurden. Als zweite Kontrolle wird die Anzahl von Plots in der Auswertung mitgegeben. So kann überprüft werden, wie viele der 253 Plots in die Auswertung eingeflossen sind.

### 3.5.4 Testszenarios bestimmen

Während dem Verfassen der Arbeit wurde viel mit den Parametern getestet und >150 Tests durchgeführt. Es für diese Masterarbeit wurden 5 Testszenarios definiert und ausgewählt. Mit diesen Parametern wurde das Skript für beide Grössenklassen gerechnet. Die folgende Tabelle zeigt die Testszenarios:

Parameter	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5
RASTER_RES	0.5	0.5	0.5	2	5
REJ_HEIGHT_MIN	0.4/1.3	0	0	0	0
TRESH_COVERED	0.33	0.33	0.5	0.33	0.33
FACTOR_COVERAGE_WEIGHT	2	2	4	2	2
MIN_TRESHOLD	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Tabelle 14 - Parameter Testszenarios (Eigene Darstellung)

## 4 Ergebnisse

In diesem Teil der Arbeit werden die Ergebnisse der Analysen beschrieben. Die Ergebnisse werden aufgeteilt in die Ergebnisse der zeitlichen Analyse und die Ergebnisse der LiDAR Analyse. Die Interpretation der Ergebnisse erfolgt im Folgekapitel.

### 4.1 Ergebnisse: räumliche Verschiebung der Waldverjüngung über die Zeit

In diesem Kapitel werden die Modelle und deren Resultate erklärt. Zur besseren Übersicht befinden sich die Ergebnisse der Modell-Validierung im Anhang.

#### 4.1.1 Resultate Data-Screening: räumliche Verschiebung der Waldverjüngung über die Zeit

In diesem Kapitel werden die Resultate aus dem Datenscreening dargestellt. Dabei werden zuerst die die topografischen Faktoren analysiert. In einem zweiten Schritt wird die Veränderung im Vorhandensein von Verjüngung analysiert und zuletzt werden die Baumarten einzeln betrachtet.

#### Topografische Faktoren

In diesem Schritt wurden nur die topografischen Faktoren betrachtet. Diese ändern sich für den ganzen Datensatz nicht. Für die Faktoren wurde ein Histogramm sowie ein Boxplot je Faktor erstellt. Diese sind in der folgenden Abbildung ersichtlich. Es wurde vor allem darauf geachtet, dass die Daten keine Ausreisser aufweisen, was nicht der Fall war. Die Verteilung der Northness in der Abbildung 18 zeigt die

Ausrichtung des untersuchten Gebietes. Die Verteilung zeigt klar, dass zwei gegenüberliegende Bergseiten untersucht wurden.

Da ein binominales GLMM vorgesehen ist, müssen die Daten nicht normalverteilt sein.

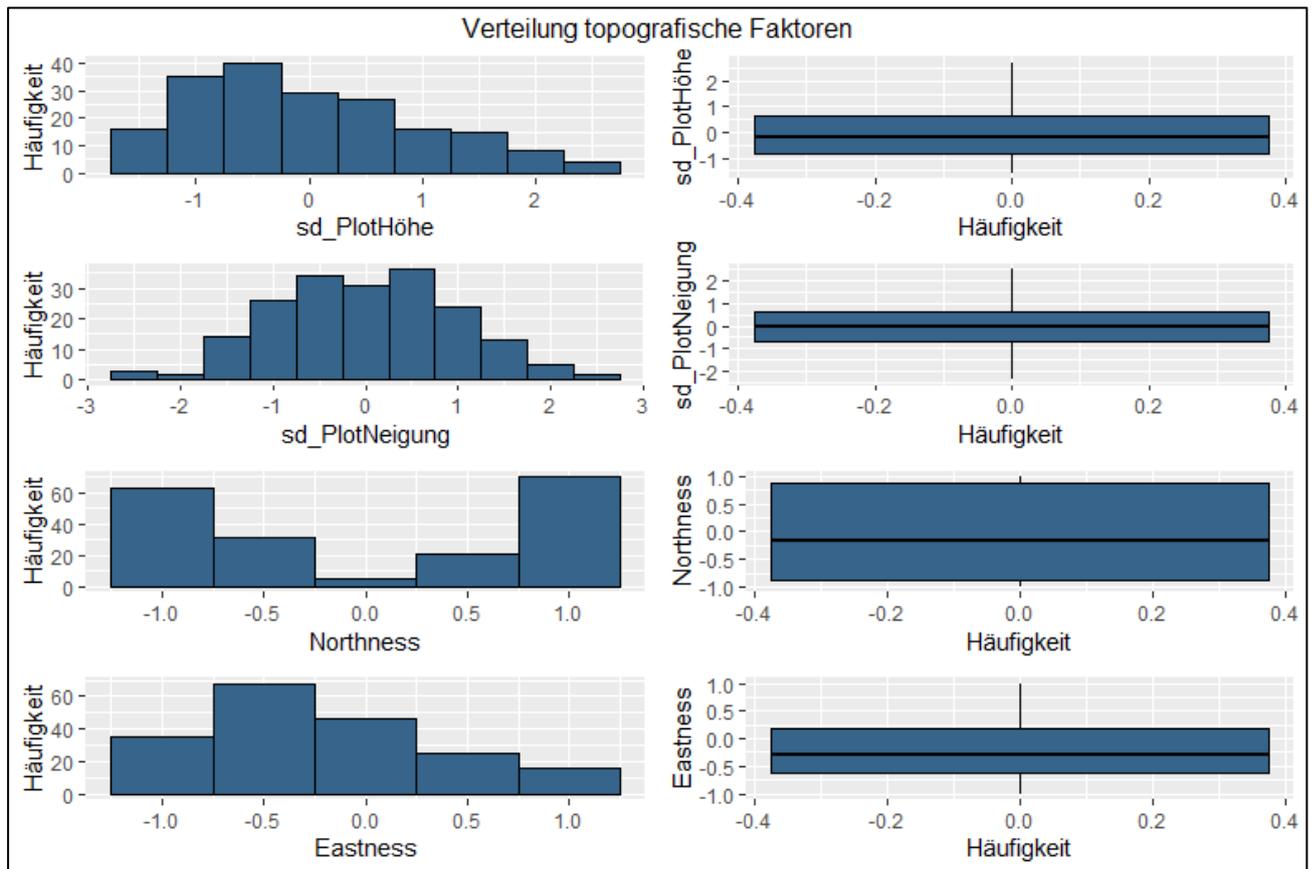


Abbildung 18 - Histogramme und Boxplots topografische Faktoren (eigene Darstellung)

Als nächste Analyse wurden die Korrelationen zwischen den topografischen Faktoren betrachtet. Damit soll sicher geprüft werden, dass keine Korrelationen zwischen den Faktoren bestehen, die die erarbeiteten Modelle stören könnten. Die nachfolgende Korrelationsmatrix zeigt die Scatterplots sowie die Korrelations-Koeffizienten zwischen den Faktoren. Wobei die Grösse der Schrift die Stärke der Korrelation abbildet. Die höchste Korrelation weisen die Variablen `sd_PlotHöhe` und `sd_PlotNeigung` auf, was nicht überraschend ist. Der Korrelationskoeffizient von 0.3 ist als mittelstark (Cohen 1988) einzustufen und daher unproblematisch.

Es wurden keine starken Korrelationen festgestellt. Auch die Histogramme und Boxplots weisen nicht auf fehlerhafte Daten hin. Somit können alle topografischen Faktoren beibehalten und für die Modelle verwendet werden.

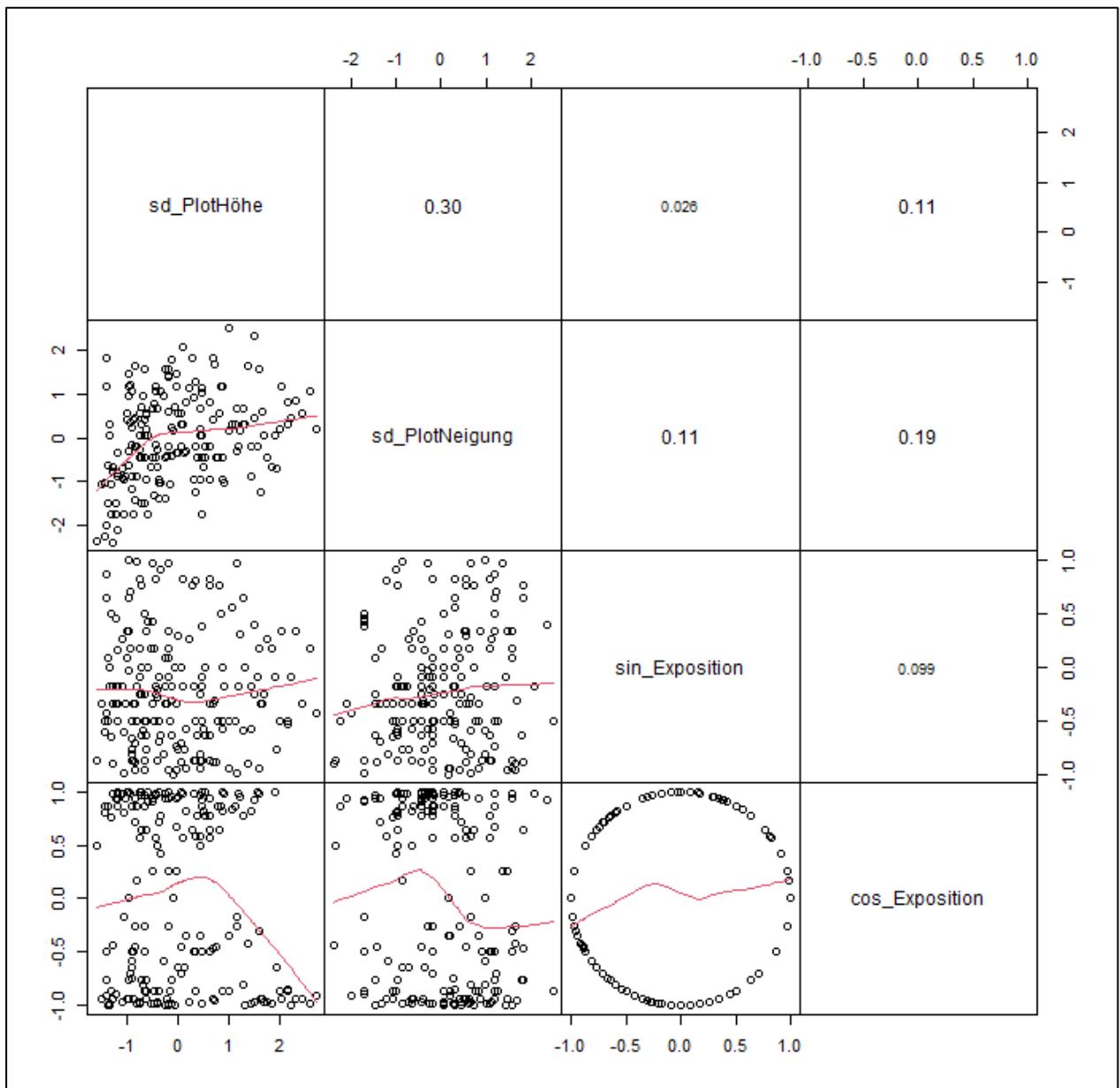


Abbildung 19 – Korrelationen zwischen den topografischen Variablen (eigene Darstellung)

#### 4.1.2 Veränderung der Verjüngung allgemein

Die Anzahl der Plots mit Verjüngung hat über die Jahre hinweg zugenommen. Im Jahr 2022 wurden fast an allen Plots Verjüngung gefunden, 2003 lag dieser Wert nur etwas über 75%. Der grosse Unterschied scheint aber zwischen 2003 und 2012 stattgefunden zu haben. Die folgende Abbildung zeigt das prozentuale Vorhandensein der Verjüngung über die drei Messzeitpunkte.

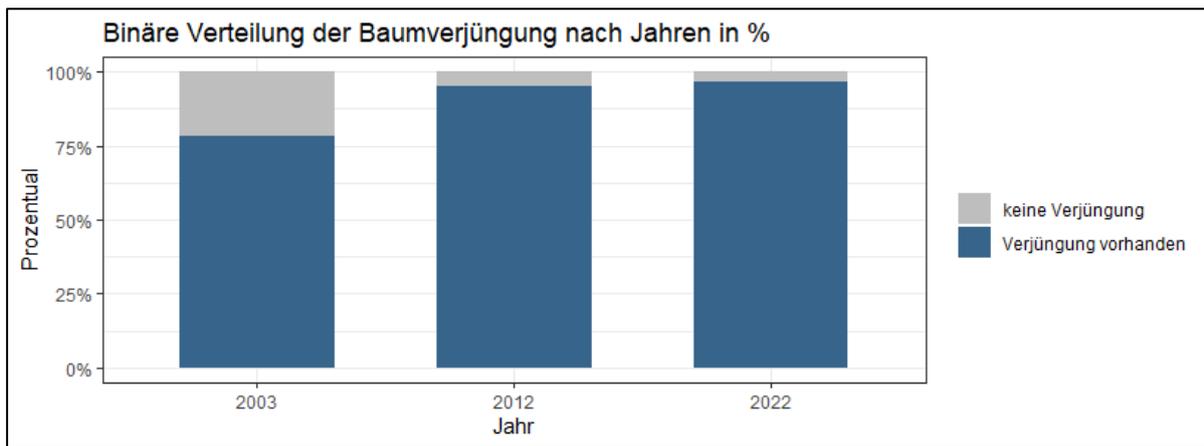


Abbildung 20 - Binäre Verteilung der Verjüngung, nach Jahren in % (eigene Darstellung)

Die nächste Abbildung zeigt eine Analyse über das Vorhandensein der Verjüngung aufgeteilt nach topografischen Faktoren und Jahren.

Grundsätzlich ist bei höher gelegenen Plots mit weniger Verjüngung zu rechnen. Bei der Plot-Höhe sieht es über die Jahre hinweg nach einer Verschiebung aus oder mindestens nach Unregelmässigkeiten aus. Der Median der Plots mit Verjüngung scheint im Jahr 2003 tiefer zu liegen als im Jahr 2022. Ob diese Verschiebung signifikant ist, wird das Modell zeigen. Bei der Plot-Neigung sieht die leichte Verschiebung zu mehr Verjüngung an steileren Plots, über die Zeit weniger deutlich. Der Median für Plots ohne Verjüngung ist auf das Jahr 2022 massiv gesunken. Bei der Northness sieht man auch eine leichte Vergrösserung des Spektrums in welchem Verjüngung vorkommt. Bei der Eastness scheint die Entwicklung gerade in die andere Richtung zu gehen.

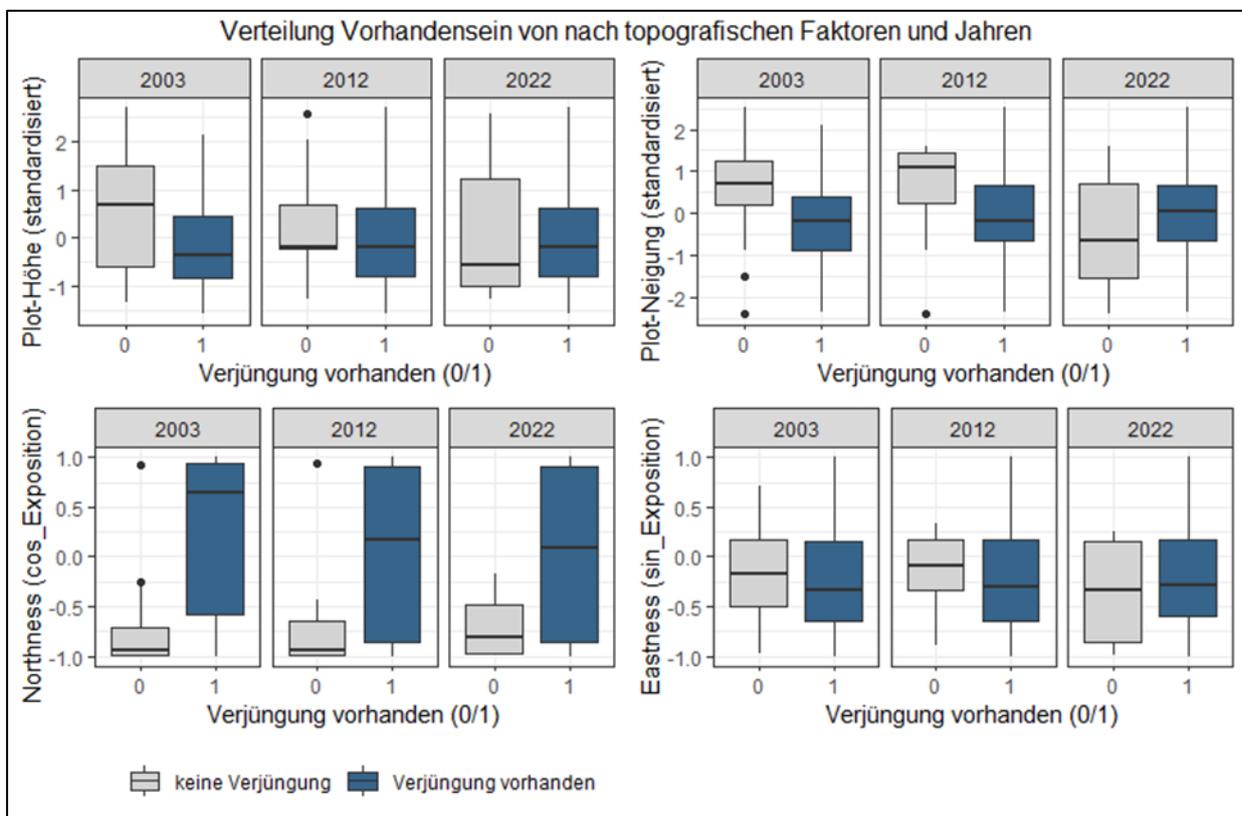


Abbildung 21 - Vorhandensein von Verjüngung nach topografischen Faktoren und Jahren (eigene Darstellung)

### Veränderung im Vorhandensein der Verjüngung nach Baumarten

Die Baumarten unterscheiden sich wesentlich voneinander. Dies zeigt sich bereits in der grafischen Darstellung deutlich. Die Fichten und Lärchen sind nur an wenigen Standorten vorhanden. Die Arve ist schon an deutlich mehr Standorten vorhanden, im Jahr 2022 wurde sie an einem Viertel der Standorte gefunden. Föhrenverjüngung wurde schon im Jahr 2003 an mehr als 50% der Standorte gefunden. Auch zu sehen auf der folgenden Abbildung ist, dass das Vorhandensein der Verjüngung bei allen Baumarten über den untersuchten Zeitraum gestiegen ist.

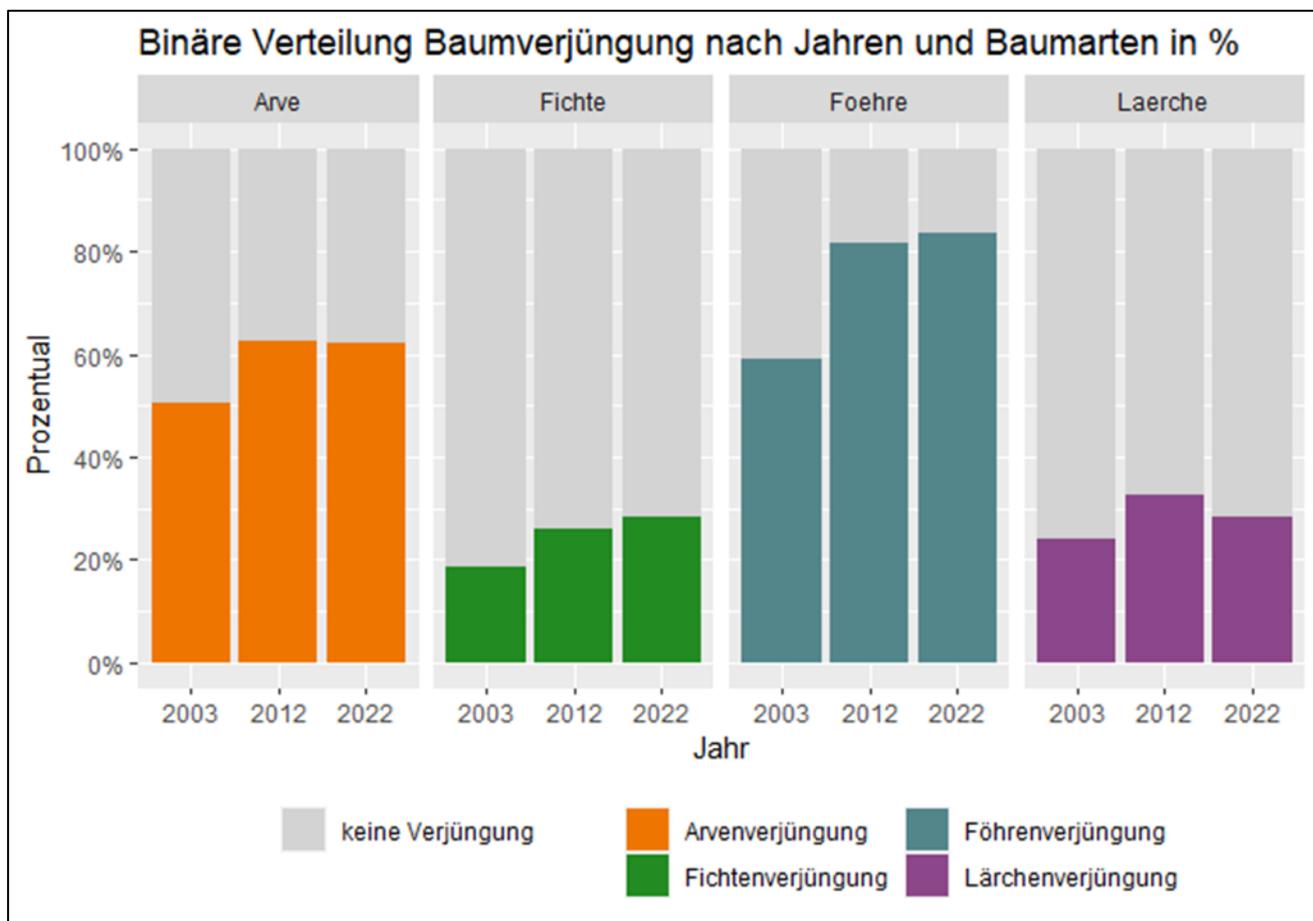


Abbildung 22 - Binäre Verteilung Verjüngung nach Jahren und Baumarten in % (eigene Darstellung)

Und die Tabelle dazu:

Baumart	Total	2003		2012		2022	
		Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
Arve	mit Verjüngung	96	50.5%	118	62.1%	117	61.6%
	Ohne Verjüngung	94	49.5%	72	37.9%	73	38.4%
Fichte	mit Verjüngung	35	18.4%	49	25.8%	54	28.4%
	Ohne Verjüngung	155	81.6%	141	74.2%	136	71.6%
Föhre	mit Verjüngung	112	58.9%	155	81.6%	159	83.7%
	Ohne Verjüngung	78	41.1%	35	18.4%	31	16.3%
Lärche	mit Verjüngung	46	24.2%	62	32.6%	54	28.4%
	Ohne Verjüngung	144	75.8%	128	67.4%	136	71.6%

Tabelle 15 - Binäre Verteilung Verjüngung nach Jahren und Baumarten in % (eigene Darstellung)

## Arve – Veränderung der topografischen Faktoren über die Jahre

Der Median der Plots mit Arvenverjüngung liegt höher als der Median der Plots ohne Verjüngung. Über Die Zeit hinweg sieht man bei der Arve eine Verschiebung in der Plot-Höhe zwischen den Jahren 2012 und 2022. Während der Median in den Jahren 2012 und 2022 der Plots mit- und ohne Verjüngung noch fast gleich hoch sind, ist der Median im Jahr 2022 der Plots mit Verjüngung höher als der Median der Plots ohne Verjüngung.

Ob es bei der Plot-Neigung eine Veränderung über die Zeit gegeben hat, ist schwierig einzuschätzen. Der Median scheint nahezu konstant zu bleiben, es gibt zwischen 2012 und 2022 eine leichte Erhöhung bei den Plots mit Verjüngung.

Die Northness scheint sich über die Jahre verändert zu haben. Während die Verjüngung im Jahr 2003 nur ein verhältnismässig kleines Spektrum abdeckt (zwar mit etlichen Ausreissern), vergrössert sich dieses auf das Jahr 2012 und 2022 erheblich.

Bei der Eastness ist eine Veränderung wieder schwer erkennbar.

Bei der Arve scheinen alle Faktoren interessant zu sein. Es wird spannend, ob sich die Faktoren Plot-Höhe und Northness sich tatsächlich über die Jahre hinweg signifikant verändert haben.

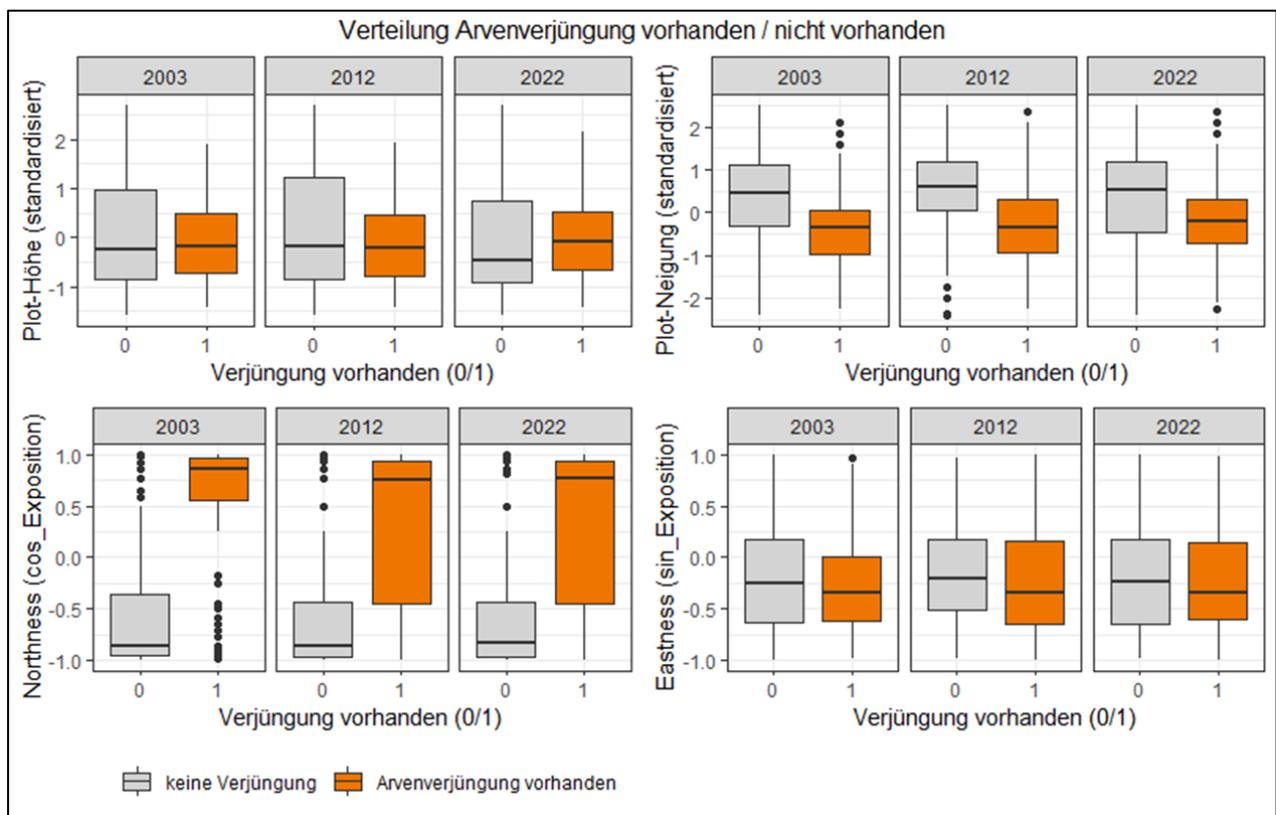


Abbildung 23 – Vorhandensein von Arvenverjüngung nach topografischen Faktoren und Jahren (eigene Darstellung)

## Fichte – Veränderung der topografischen Faktoren über die Jahre

Bei der Fichtenverjüngung ist bezüglich der Plot-Höhe über die Jahre anhand der nachfolgenden Abbildung kein Unterschied festzustellen.

Auch bei der Plot-Neigung sind anhand der Darstellung keine Unterschiede ersichtlich.

Bei der Northness hingegen scheint sich die Fichte über die drei Messzeitpunkte etwas weiter auszubreiten.

Bei der Eastness ist auch eine leichte Erweiterung ersichtlich. Diese fand hier jedoch vor allem zwischen den Jahren 2003 und 2012 statt.

Es sind also sicherlich alle Faktoren interessant in das Modell zu integrieren, wobei bei der Plot-Höhe und Plot-Neigung keine Veränderung zwischen den Jahren zu vermuten ist. Bei der Fichtenverjüngung muss auch berücksichtigt werden, dass diese im Jahr mit dem höchsten Vorkommen nur bei rund 30% der Plots, bei n= 54 Plots, gefunden wurde.

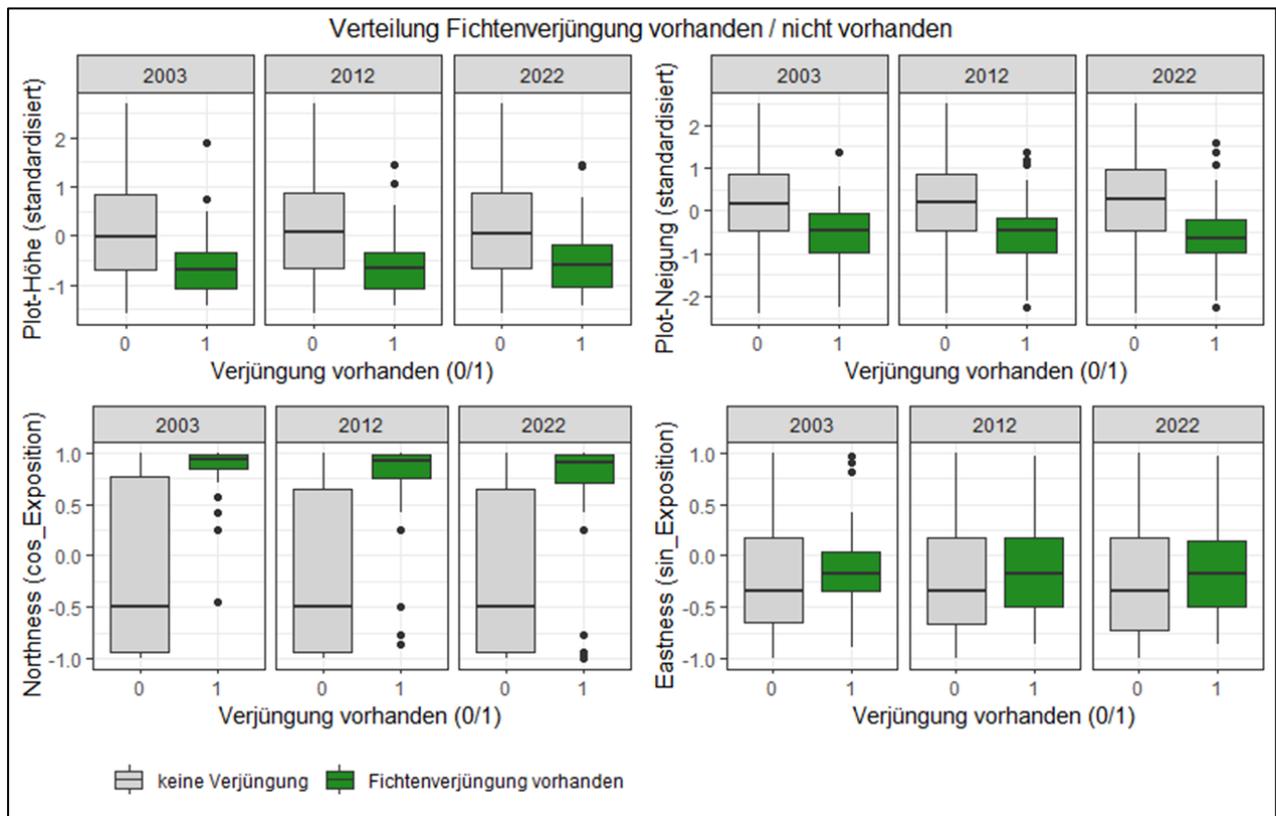


Abbildung 24 - Vorhandensein von Fichtenverjüngung nach topografischen Faktoren und Jahren (eigene Darstellung)

### Föhre – Veränderung der topografischen Faktoren über die Jahre

Bei der Föhrenverjüngung gibt es eine sichtbare Verschiebung der Plot-Höhe. Vor allem der Median der Plots ohne Verjüngung ist sichtbar gesunken. Diese Verschiebung trat vor allem zwischen den Jahren 2003 und 2012 auf.

Bei der Plot-Neigung ist über die Messzeitpunkte ebenfalls eine Angleichung der Median-Werte der Plots mit und ohne Verjüngung zu beobachten.

Bei der Northness ist zu beobachten, dass die Plots ohne Verjüngung sich deutlich zurückziehen und weniger vom Spektrum abdecken. Die Verjüngung war aber schon im Jahr 2003 ziemlich stark verbreitet.

Bei der Eastness ist über die Zeit keine Veränderung ersichtlich.

Alle topografischen Faktoren scheinen ihren Teil dazu beizutragen, ob Verjüngung vorhanden ist oder nicht. Bei den drei Faktoren Plot-Höhe, Plot-Neigung und Northness wird der zeitliche Vergleich sehr interessant sein.

Die Föhre ist bereits im Jahr 2003 an mehr als 50% der Standorte vertreten und dieser Anteil nimmt über die Jahre bis auf fast 70% zu.

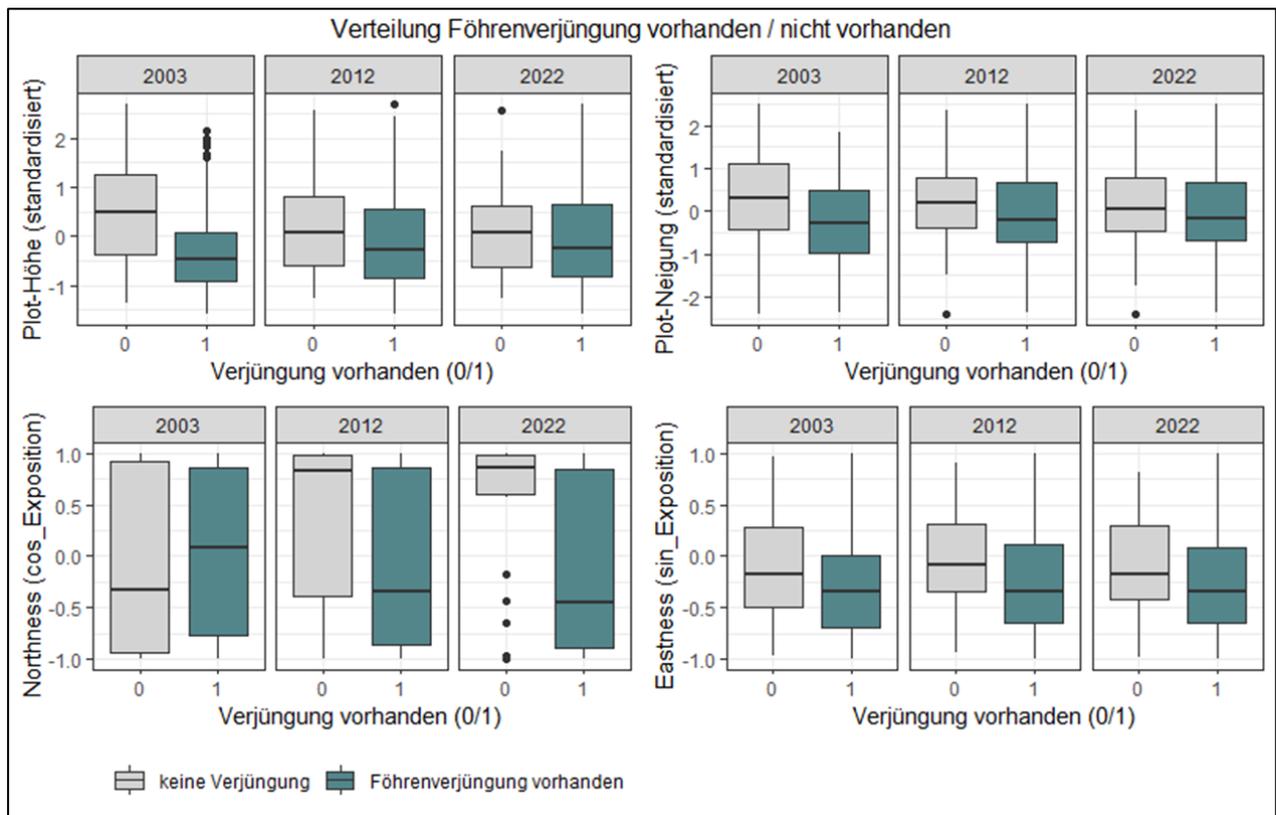


Abbildung 25 - Vorhandensein von Föhrenverjüngung nach topografischen Faktoren und Jahren (eigene Darstellung)

### Lärche - Veränderung der topografischen Faktoren über die Jahre

Spannend bei der Lärche ist, dass der Median der Plots mit Verjüngung höher liegt als der Median der Plots ohne Verjüngung. Dieser Unterschied scheint sich über die Jahre noch leicht zu vergrössern.

Bei der Plot-Neigung ist anhand der nachfolgenden Abbildung keine deutliche Verschiebung ersichtlich. Ob sich das Vorhandensein der Verjüngung abhängig von den Messzeitpunkten verändert, kann die grafische Darstellung unten nicht beantworten.

Bei der Northness scheint es im Jahr 2012 im Vergleich zum Jahr 2003 eine wesentliche Veränderung bezüglich der Verbreitung der Standorte ohne Verjüngung zu geben. Diese Veränderung ist im Jahr 2022 aber nicht mehr ersichtlich.

Bei der Eastness ist über die Messzeitpunkte hinweg keine Veränderung ersichtlich.

Bei der Lärche bleibt zu berücksichtigen, dass sie im Jahr 2022, das Jahr mit dem höchsten Vorkommen, nur an ca. 15% der Plots gefunden wurde. Es wurden in diesem Jahr also an weniger als n=30 Plots Lärchenverjüngung gefunden.

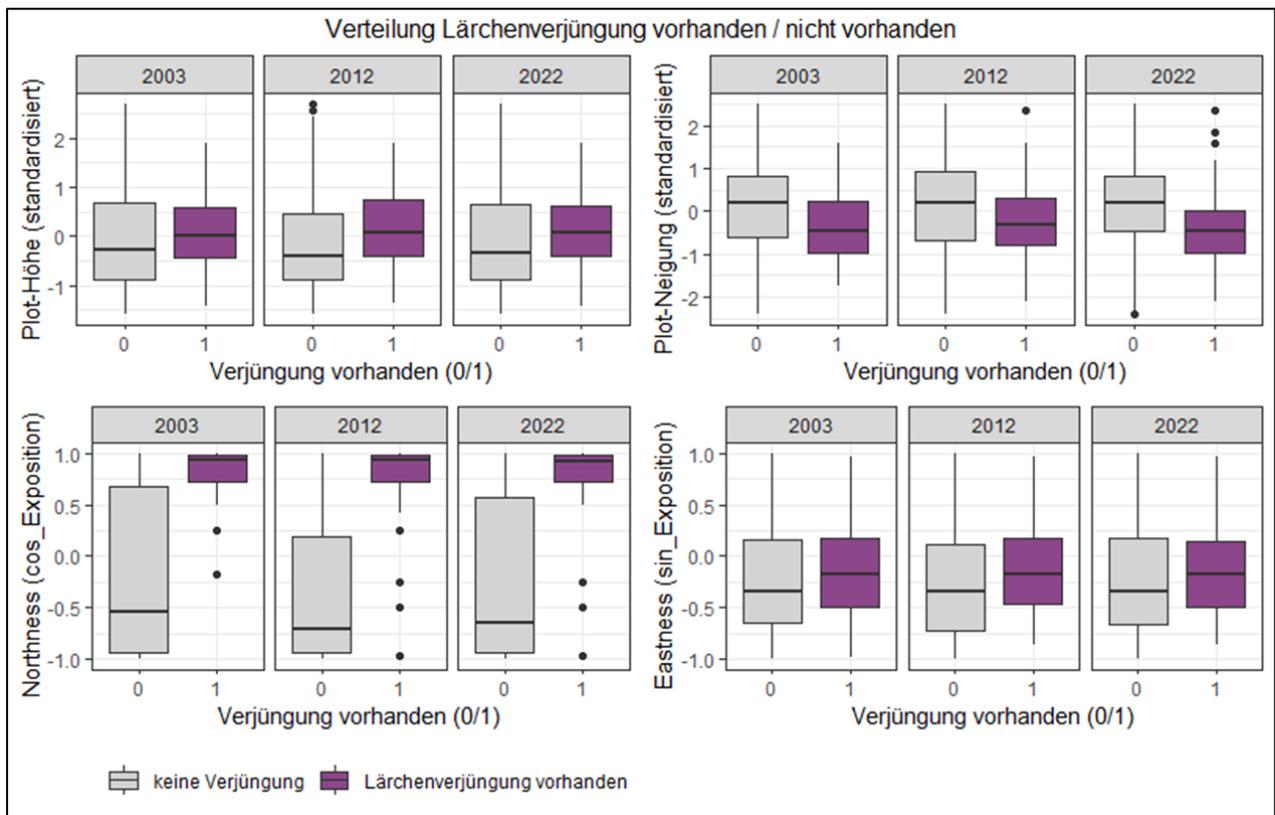


Abbildung 26 - Vorhandensein von Lärchenverjüngung nach topografischen Faktoren und Jahren (eigene Darstellung)

#### 4.1.3 Generelles Modell

Wie in Kapitel 3.4.3 beschrieben, wurde ein übergeordnetes Modell gerechnet, in welchem alle Baumarten und alle Jahre berücksichtigt wurden. Dabei wird, wie erwähnt nur die Verjüngung (<1.3m) berücksichtigt. Ausgegangen wurde vom Basis-Modell. Die folgende Abbildung zeigt das übergeordnete Modell.

```
mod1 <- glmr(binom ~ as.factor(Jahr) +
  baumart +
  # sd_PlotHöhe +
  sd_PlotNeigung +
  cos_Exposition +
  # sin_Exposition +
  # as.factor(Jahr)*sd_PlotHöhe +
  # as.factor(Jahr)*sd_PlotNeigung +
  # as.factor(Jahr)*cos_Exposition +
  # as.factor(Jahr)*sin_Exposition +
  (1|PlotID),
  data = data_BIN, family = "binomial")
```

Abbildung 27 - Übergeordnetes Modell (eigene Darstellung)

Bei diesem Modell ist klar ersichtlich, dass unter Berücksichtigung aller Baumarten kein Modell gefunden werden konnte, welches Interaktionen zwischen den Jahren und den topografischen Elementen aufzeigt. Auch die Plot-Höhe und die Eastness (sin\_Exposition), also die Ausrichtung nach Osten werden im Modell nicht berücksichtigt. Somit bleiben nebst dem Erhebungsjahr noch die Plot-Neigung und die Northness als Faktoren im Modell, um die Wahrscheinlichkeit, dass Verjüngung in einem Plot auftrat, zu erklären.

Die Einflüsse der Fixed-Effects sind in der folgenden Abbildung 28 zu sehen. Das Modell zeigt klar, dass zwischen den Jahren 2003 und 2012 sowie zwischen 2003 und 2022 signifikante Unterschiede bestehen, in den Jahren 2012 und 2022 gibt es signifikant an mehr Plots Verjüngung als im Jahr 2002. Auch die Baumarten unterschieden sich signifikant voneinander. Wobei es deutlich weniger Standorte mit Fichten- und Lärchenverjüngung als Standorte mit Arven-Verjüngung hat und deutlich mehr Standorte mit Föhrenverjüngung als Standorte mit Arven-Verjüngung. Auch die topografischen Variablen haben einen Einfluss die Verjüngungswahrscheinlichkeit. Mit steigender Neigung nimmt die Anzahl Plots mit Verjüngung ab und mit steigender Northness nimmt die Anzahl an Standorten mit Verjüngung zu. Bei diesem Modell muss berücksichtigt werden, dass alle Baumarten im Modell integriert sind und sich diese, wie das Modell deutlich aufzeigt, signifikant unterscheiden. Es ist also durchaus sinnvoll die Baumarten separat zu untersuchen.

```

Random effects:
  Groups Name          Variance Std.Dev.
PlotID (Intercept) 0.8997  0.9485
Number of obs: 2280, groups: PlotID, 190

Fixed effects:
              Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept)   -0.06162   0.14842  -0.415   0.678
as.factor(Jahr)2012  0.90559   0.14061   6.440 1.19e-10 ***
as.factor(Jahr)2022  0.90559   0.14061   6.440 1.19e-10 ***
baumartFichte    -2.24941   0.17146  -13.119 < 2e-16 ***
baumartFoehre    1.07034   0.15598   6.862 6.79e-12 ***
baumartLaerche   -1.92351   0.16409  -11.722 < 2e-16 ***
sd_PlotNeigung   -0.53261   0.09210  -5.783 7.35e-09 ***
cos_Exposition    1.31953   0.11650  11.326 < 2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Correlation of Fixed Effects:
      (Intr) a. (J)201 a. (J)202 bmrtFc bmrtFh bmrtLr sd_p1N
as.f(J)2012 -0.455
as.f(J)2022 -0.455  0.531
baumartFcht -0.412 -0.107  -0.107
baumartFohr -0.485  0.058   0.058   0.343
baumartLrch -0.430 -0.095  -0.095   0.515  0.367
sd_PlotNngg -0.001 -0.047  -0.047   0.096 -0.048  0.085
cos_Expostn  0.004  0.093   0.093  -0.208  0.089 -0.185  0.090

```

Abbildung 28 - Random- und Fixed-Effects, übergeordnetes Modell (eigene Darstellung)

Ebenso können die Korrelationen zwischen den Fixed-Effects betrachtet werden. Diese sollten nicht zu stark sein, um das Modell nicht zu stören. Im Falle des übergeordneten Modells liegt der höchste Korrelationskoeffizient bei 0.531. Diese Korrelation wurde gemessen zwischen den beiden Messzeitpunkten 2012 und 2022. Die Höhe des Korrelationskoeffizienten stört das Modell nicht und ist daher unproblematisch. Weitere hohe positive Korrelationen sind zwischen den Baumarten Föhre - Fichte, Fichte - Lärche und zu beobachten. Die Arve hingegen weist zu den anderen drei Baumarten vergleichsweise starke negative Korrelationskoeffizienten aus. Aber auch diese Korrelationen stören das Modell nicht.

#### 4.1.4 Modell Arve

Bei der Arve entstand das folgende Modell. Nebst dem Jahr ist nur noch die Northness als signifikanter Faktor im Modell enthalten. Bei der Arve konnte keine signifikante Interaktion zwischen den Jahren und den topografischen Faktoren festgestellt werden.

```
mod2 <- glmer(binom ~ as.factor(Jahr) +
  # sd_PlotHöhe +
  # sd_PlotNeigung +
  # sin_Exposition +
  cos_Exposition +
  # as.factor(Jahr)*sd_PlotHöhe +
  # as.factor(Jahr)*sd_PlotNeigung +
  # as.factor(Jahr)*cos_Exposition +
  # as.factor(Jahr)*sin_Exposition +
  (1|PlotID),
  data = data_Arve, family = "binomial")
```

Abbildung 29 - Modell Arve (eigene Darstellung)

Zwischen den Messzeitpunkten 2003 und 2012 und 2003 und 2022 gibt es ebenfalls signifikante Unterschiede. Bei der Arve nehmen die Plots mit Verjüngung mit zunehmender Ausrichtung nach Norden stark zu. Aber hierzu konnte keine signifikante Interaktion zwischen den Jahren, festgestellt werden. Somit kann davon ausgegangen werden, dass sich die räumliche Verteilung der Arve über die Zeit nicht stark verändert hat.

Das Modell zeigt eine relativ starke positive Korrelation zwischen den Messzeitpunkten 2012 und 2022, die das Modell aber nicht stören.

```
Random effects:
 Groups Name      Variance Std.Dev.
 PlotID (Intercept) 8.42    2.902
Number of obs: 570, groups: PlotID, 190

Fixed effects:
              Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept)    0.06098    0.33412   0.183 0.855189
as.factor(Jahr)2012  1.37553    0.37777   3.641 0.000271 ***
as.factor(Jahr)2022  1.31416    0.37506   3.504 0.000459 ***
cos_Exposition    3.61866    0.63397   5.708 1.14e-08 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Correlation of Fixed Effects:
              (Intr) a.(J)201 a.(J)202
as.f(J)2012  -0.439
as.f(J)2022  -0.442  0.567
cos_Expostn  0.032  0.340  0.328
```

Abbildung 30 - Fixed-Effects, Modell Arve (eigene Darstellung)

#### 4.1.5 Modell Fichte

Beim Modell für die Fichte ist speziell, dass der Messzeitpunkt nicht als signifikanter Faktor im Modell vorhanden ist. Bei der Fichte gibt es als statistisch gesehen keine wesentliche Veränderung über den untersuchten Zeitraum.

```

mod3 <- glmer(binom ~ #as.factor(Jahr) +
  sd_PlotHöhe +
  # sd_PlotNeigung +
  # sin_Exposition +
  cos_Exposition +
  # as.factor(Jahr)*sd_PlotHöhe +
  # as.factor(Jahr)*sd_PlotNeigung +
  # as.factor(Jahr)*cos_Exposition +
  # as.factor(Jahr)*sin_Exposition +
  (1|PlotID),
  data = data_Fichte, family = "binomial")

```

Abbildung 31 – Modell Fichte (eigene Darstellung)

Signifikant bei der Fichte waren die Plot-Höhe und deren Northness. Wobei die Wahrscheinlichkeit der Verjüngung mit steigender Plot-Höhe abnimmt. Der entscheidende Faktor für die Verjüngung scheint aber die Northness zu sein. Mit steigender nördlicher Ausrichtung nimmt die Anzahl Plots mit Verjüngung stark zu.

Bei der Plot-Höhe und der Northness werden relativ starke Korrelationen gezeigt. Gemäss der Modell-Evaluierung stören diese aber das Modell nicht.

```

Random effects:
 Groups Name          Variance Std.Dev.
PlotID (Intercept) 10.15   3.185
Number of obs: 570, groups: PlotID, 190

Fixed effects:
              Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept)   -4.1617    0.7257  -5.735 9.75e-09 ***
sd_PlotHöhe   -2.6025    0.6225  -4.181 2.90e-05 ***
cos_Exposition  4.2012    0.7659   5.486 4.12e-08 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Correlation of Fixed Effects:
              (Intr) sd_PlH
sd_PlotHöhe  0.735
cos_Expostn -0.796 -0.680

```

Abbildung 32 – Random- und Fixed-Effects, Modell Fichte (eigene Darstellung)

#### 4.1.6 Modell Föhre

Für das Modell der Föhre wurden die Plot-Höhe, die Eastness sowie die Interaktion zwischen Jahr und Plot-Höhe im Modell berücksichtigt. Das heisst bei der Föhre wurde eine signifikante Verschiebung zwischen den Jahren und der Plot-Höhe festgestellt. Die Neigung und die Northness scheinen das Vorhandensein der Föhrenverjüngung nicht entscheidend zu beeinflussen.

```

mod4 <- glmer(binom ~ as.factor(Jahr) +
  sd_PlotHöhe +
  # sd_PlotNeigung +
  sin_Exposition +
  # cos_Exposition +
  as.factor(Jahr)*sd_PlotHöhe +
  # as.factor(Jahr)*sd_PlotNeigung +
  # as.factor(Jahr)*cos_Exposition +
  # as.factor(Jahr)*sin_Exposition +
  (1|PlotID),
  data = data_Foehre, family = "binomial")

```

Abbildung 33 - Modell Föhre (eigene Darstellung)

Die Föhrenverjüngung hat über die Zeit zugenommen. Wobei das Jahr 2022 noch stärker beeinflusst als das Jahr 2012. Die Plot-Höhe ist auch ein wesentlicher Faktor. Bei steigender Höhe nimmt die Wahrscheinlichkeit der Verjüngung stark ab. Bei der Föhre gibt es eine signifikante Interaktion zwischen der Plot-Höhe und den Messzeitpunkten. Diese Interaktion zeigt, dass sich die die Föhrenverjüngung über die letzten zwei Jahrzehnte nach oben verschoben hat. Zudem ist die östliche Ausrichtung bei der Föhre auch ein entscheidender Faktor, wobei das Vorhandensein der Föhrenverjüngung mit steigender Ausrichtung nach Osten abnimmt.

Es werden wieder relativ bis sehr starke Korrelationen im Modell gezeigt. Gemäss der Modellvalidierung stellen diese aber für das Modell keine Probleme dar.

```

Random effects:
 Groups Name          Variance Std.Dev.
 PlotID (Intercept) 104      10.2
Number of obs: 570, groups: PlotID, 190

Fixed effects:
              Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept)      3.0321    1.0361   2.926  0.00343 **
as.factor(Jahr)2012  5.7095    1.0434   5.472  4.46e-08 ***
as.factor(Jahr)2022  6.3070    1.1291   5.586  2.32e-08 ***
sd_PlotHöhe     -4.8805    1.0280  -4.747  2.06e-06 ***
sin_Exposition   -3.3685    1.3012  -2.589  0.00963 **
as.factor(Jahr)2012:sd_PlotHöhe  3.4819    0.8117   4.289  1.79e-05 ***
as.factor(Jahr)2022:sd_PlotHöhe  3.8422    0.9063   4.239  2.24e-05 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Correlation of Fixed Effects:
      (Intr) a.(J)201 a.(J)202 sd_PlH sn_Exp a(J)201
as.f(J)2012  0.329
as.f(J)2022  0.346  0.866
sd_PlotHöhe -0.372 -0.662  -0.661
sin_Expstn  0.131 -0.209  -0.210  0.214
a(J)2012:_P  0.171  0.467  0.497  -0.705 -0.106
a(J)2022:_P  0.209  0.515  0.537  -0.680 -0.117  0.773

```

Abbildung 34 - Random- Fixed-Effects, Modell Föhre (eigene Darstellung)

#### 4.1.7 Modell Lärche

Bei der Lärche sind nebst dem Erhebungsjahr auch die Plot-Höhe, die Plot-Neigung sowie die Northness entscheidend. Bei der Lärche konnten keine Interaktionen zwischen dem Jahr und den topografischen Faktoren festgestellt werden.

```
mod5 <- glmer(binom ~ as.factor(Jahr) +
  sd_PlotHöhe +
  sd_PlotNeigung +
  # sin_Exposition +
  cos_Exposition +
  # as.factor(Jahr)*sd_PlotHöhe +
  # as.factor(Jahr)*sd_PlotNeigung +
  # as.factor(Jahr)*cos_Exposition +
  # as.factor(Jahr)*sin_Exposition +
  (1|PlotID),
  data = data_Laerche, family = "binomial")
```

Abbildung 35 - Modell Lärche (eigene Darstellung)

Bei der Lärche gibt es eine signifikante Zunahme zwischen dem Jahr 2003 und 2012 aber nicht zwischen den Jahren 2003 und 2022, da die Verjüngungswahrscheinlichkeit zwischen 2012 und 2022 wieder zurückgegangen ist. Die Plot-Höhe ist ein entscheidender Faktor; mit steigender Plot-Höhe nimmt die Wahrscheinlichkeit der Lärchenverjüngung zu. Bei steigender Neigung nimmt die Lärchenverjüngung ab. Der wesentlichste Faktor jedoch ist die Northness. Bei steigender Northness nimmt das Vorhandensein von Lärchenverjüngung stark zu.

Auch in diesem Modell gibt es starke Korrelationen zwischen den Faktoren. Diese stören aber das Modell nicht.

Bei der Modellvalidierung ist aufgefallen, dass die Residuen der Faktoren Plot-Höhe und Plot-Neigung beim dritten Quantil signifikant abweichen. Das Modell an sich zeigt aber keine Abweichungen in den Residuen.

```
Random effects:
  Groups Name          Variance Std.Dev.
  PlotID (Intercept) 10.16    3.187
Number of obs: 570, groups: PlotID, 190

Fixed effects:
              Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept)   -4.8056    0.8219  -5.847 5.01e-09 ***
as.factor(Jahr)2012  1.5213    0.4741   3.209 0.001333 **
as.factor(Jahr)2022  0.7632    0.4462   1.710 0.087177 .
sd_PlotHöhe    1.8220    0.5284   3.448 0.000565 ***
sd_PlotNeigung -1.2253    0.4726  -2.593 0.009525 **
cos_Exposition  5.5761    0.9657   5.774 7.74e-09 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Correlation of Fixed Effects:
              (Intr) a.(J)201 a.(J)202 sd_PlH sd_PlN
as.f(J)2012  -0.533
as.f(J)2022  -0.404  0.532
sd_PlotHöhe  -0.616  0.196  0.104
sd_PlotNgng  0.435 -0.158 -0.082 -0.528
cos_Expostn  -0.817  0.298  0.147  0.667 -0.386
```

Abbildung 36 - Random- und Fixed-Effects, Modell Lärche (eigene Darstellung)

#### 4.1.8 Zusammenfassung der Resultate aus den Modellen

Hier werden die Ergebnisse der statistischen Modelle kurz zusammengefasst. Über die Baumarten hinweg ist zu beobachten, dass:

- die Wahrscheinlichkeit von Waldverjüngung mit steigender Hangneigung abnimmt,
- die Wahrscheinlichkeit von Waldverjüngung mit steigender Ausrichtung nach Norden zu nimmt und
- die Wahrscheinlichkeit von Verjüngung über die Jahre hinweg gestiegen ist.

Bei der Arve steigt die Wahrscheinlichkeit der Verjüngung mit zunehmender Ausrichtung gegen Norden und die Wahrscheinlichkeit der Verjüngung nimmt über die Jahre zu.

Bei der Fichte nimmt die Wahrscheinlichkeit der Verjüngung mit steigender Plot-Höhe ab und mit zunehmender Ausrichtung gegen Norden nimmt sie zu.

Bei der Föhre nimmt die Wahrscheinlichkeit der Verjüngung mit steigender Höhe ab, aber die Wahrscheinlichkeit die Föhre in höheren Lagen vorzufinden, steigt über den untersuchten Zeitraum. Mit zunehmender Ausrichtung gegen Osten nimmt die Wahrscheinlichkeit der Föhrenverjüngung ab. Über den untersuchten Zeitraum nimmt die Wahrscheinlichkeit der Föhrenverjüngung zu.

Bei der Lärche ist speziell, dass die Wahrscheinlichkeit der Verjüngung zwischen 2003 und 2012 deutlich zunimmt, aber zwischen 2003 und 2022 kein signifikanter Unterschied festgestellt wird, da die Verjüngung zwischen 2012 und 2022 wieder abgenommen hat. Auch spannend ist, dass die Wahrscheinlichkeit der Lärchenverjüngung mit steigender Höhe zunimmt. Mit steigender Neigung nimmt die Wahrscheinlichkeit der Lärchenverjüngung ab.

Die Wahrscheinlichkeit der Verjüngung zeigt nur im Modell der Lärche über die Zeit keine signifikante Zunahme.

Die Plot-Höhe hat bei den Modellen der Fichte, der Föhre und der Lärche einen signifikanten Einfluss. Wobei bei der Fichte und der Föhre die Wahrscheinlichkeit der Verjüngung mit steigender Höhe abnimmt und bei der Lärche die Wahrscheinlichkeit der Verjüngung mit steigender Höhe zunimmt.

Die Ausrichtung hat bei allen Modellen signifikanten Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit der Waldverjüngung. Beim generellen Modell, bei der Arve, bei der Fichte und der Lärche steigt die Wahrscheinlichkeit zur Waldverjüngung mit zunehmender Ausrichtung nach Norden. Bei der Föhre nimmt die Wahrscheinlichkeit zur Verjüngung mit steigender östlicher Ausrichtung ab.

Die Tabelle 16 fasst gibt einen Überblick über diese Zusammenfassung. Die Pfeile zeigen die Richtung der Einflüsse an.

	Höhe	Neigung	Northness	Eastness
Generell	-	↘	↗	-
Arve	-	-	↗	-
Fichte	↘	-	↗	-
Föhre	↘	-	-	↘
Lärche	↗	↘	↗	

Tabelle 16 - Zusammenfassung topografische Einflussfaktoren (eigene Darstellung)

## 4.2 Ergebnisse: LiDAR basierte Erkennung von Waldverjüngung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse zur zweiten Forschungsfrage beschrieben. Auch hier wurden die Daten zuerst analysiert. Darauf folgen die Ergebnisse aus dem UC4.

### 4.2.1 Resultate Datascreening: LiDAR basierte Erkennung von Waldverjüngung

Auch bei diesem Teil der Arbeit wurde ein kurzes Datascreening gemacht. Hier ging es darum zu sehen, an wie vielen Plots die untersuchten Altersklassen vorhanden respektive nicht vorhanden waren. Die folgende Grafik zeigt bei wie vielen Plots die Altersklassen vorhanden waren.

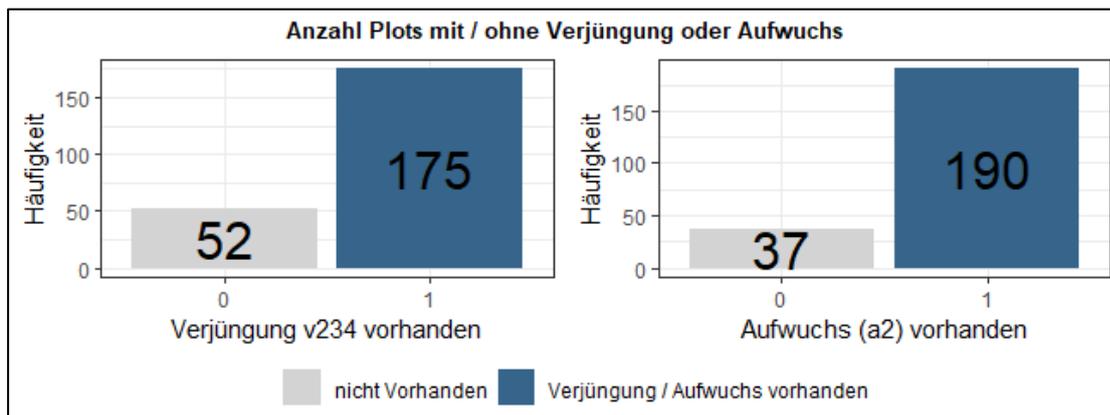


Abbildung 37 – Anzahl Plots mit oder ohne Anwesenheit der jeweiligen Altersklassen (eigene Darstellung)

Die Abbildung zeigt, dass bei beiden Altersklassen die Anzahl der Plots mit der Anwesenheit der jeweiligen Altersklasse überwiegen. Bei der Altersklasse v234 ist auf rund 23% nicht vorhanden. Bei der Altersklasse a2 ist nur bei 16% nicht vorhanden. Diese Untervertretung der Plots ohne Vorhandensein der entsprechenden Altersklassen müssen bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden.

### 4.2.2 Beispiele der Ausgabe-Layer

Hier werden die wichtigsten Ausgabe-Layer kurz vorgestellt. Dabei werden nur Auszüge aus den Resultaten dargestellt. Die Layer werden anhand der Ergebnisse des Test4 dargestellt. Dieser Test wurde ausgewählt, da er mit 2m Rastergrösse einen guten Überblick gibt. Die Karten werden jeweils in einem Masstab von 1:30'000 für die Übersicht über das ganze Gebiet und in einem 1:500 Masstab für die Übersicht auf einen einzelnen Plot dargestellt. Die detaillierte Variante (1:500) zeigt immer denselben Plot. Es ist der Plot mit der PlotID 455. Der Ring des Plots wird mit einem Radius von 4m dargestellt und daher werden auch die Werte der Altersklasse v234 dargestellt.

Layer r\_ccoverage und r\_ccovered

Die beiden Layer beziehen sich auf die Kronenabdeckung und werden im Kapitel 3.5.2 beschrieben. Wo bei der r\_ccoverage-Layer anzeigt wie viel Prozent der Fläche durch Kronen abgedeckt ist und der r\_ccovered basierend auf den gesetzten Treshold einen binären Wert (0/1) aufweist.

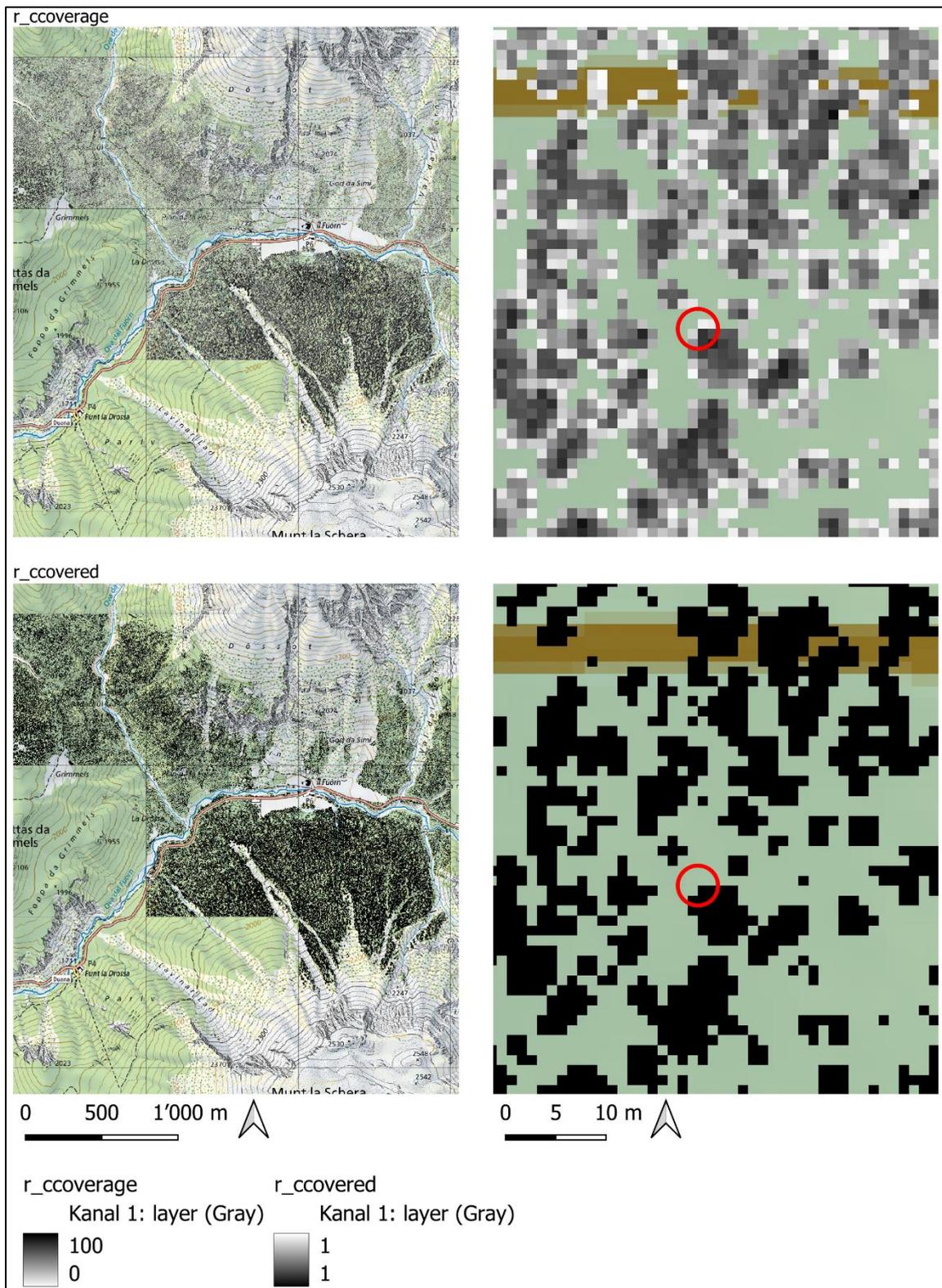
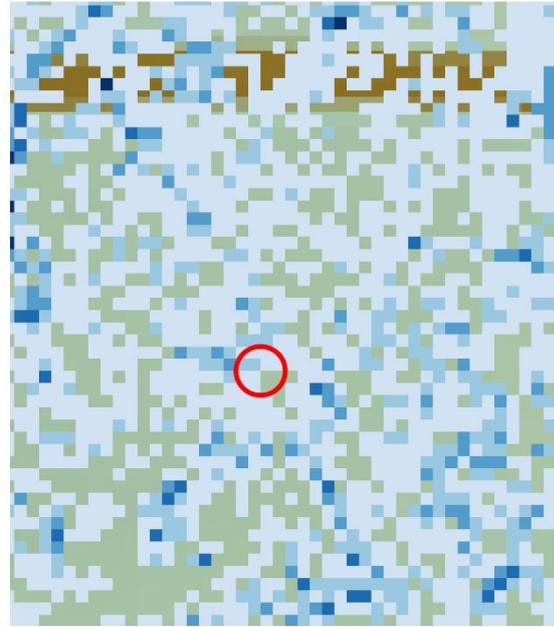
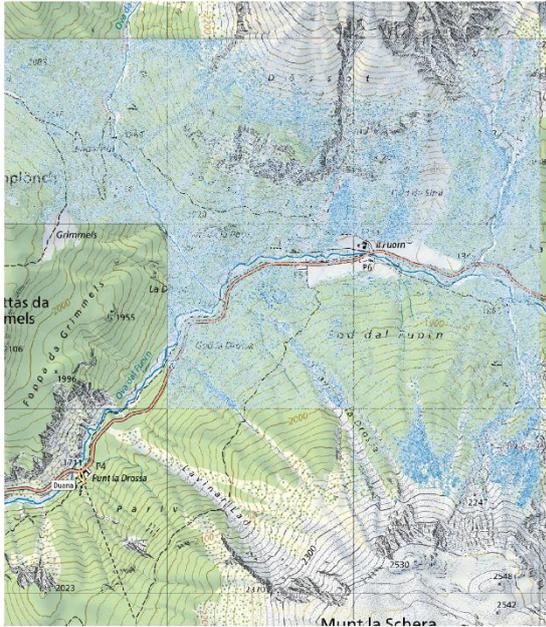


Abbildung 38 – Karten r\_coverage und r\_covered im Massstab 1:30'000 und 1:500 (Quelle: in Anlehnung an Bundesamt für Landestopografie swisstopo 2022a)

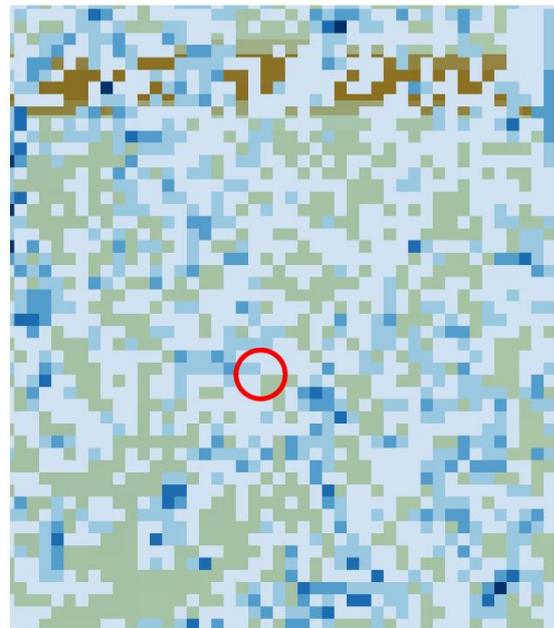
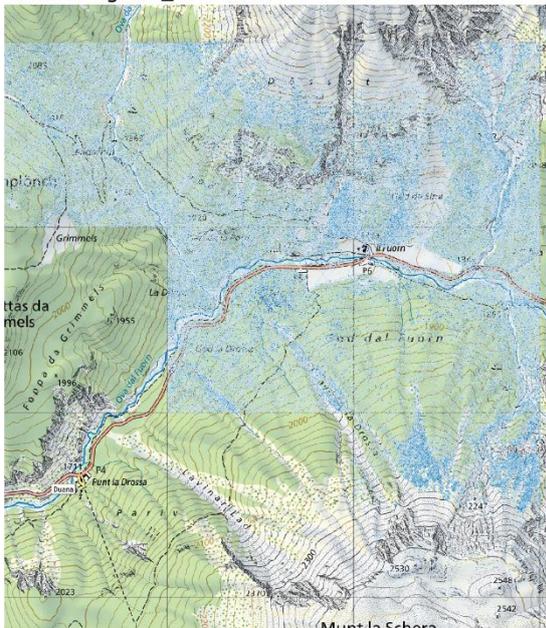
### Reldens und Reldensweighted

Diese beiden Layer zeigen die relative Punktedichte der Verjüngung. Auch diese Layer werden im Kapitel 3.5.2 detailliert beschrieben.

reldens\_v234



reldensweighted\_v234



0 500 1'000 m

0 5 10 m

r\_reldens\_v234

r\_reldensweighted\_v234

Kanal 1: layer (Gray)

Kanal 1: layer (Gray)

≤ 20.0000

≤ 20.0000

20.0000 - 40.0000

20.0000 - 40.0000

40.0000 - 60.0000

40.0000 - 60.0000

60.0000 - 80.0000

60.0000 - 80.0000

> 80.0000

80.0000 - 100.0000

> 100.0000

Abbildung 39 - Karten reldens\_v234 und reldensweighted\_v234 im Massstab 1:30'000 und 1:500 (Quelle: in Anlehnung an Bundesamt für Landestopografie swisstopo 2022a)

#### 4.2.3 Ergebnisse Stufe 1 – Vergleich Anzahl Bäumen mit relativer Punktedichte

Die folgende Tabelle zeigt die Resultate der Stufe 1. Hier werden die Werte der Zählungen und die prognostizierten Werte anhand der Anzahl Bäumen verglichen. Die Tabelle zeigt die gewichteten, ungewichteten Resultate nach Altersklasse.

	v234				a2			
	ungewichtet		gewichtet		ungewichtet		gewichtet	
	R <sup>2</sup>	RMSE %						
Test1	0.02	204	0.04	230	0.24	108	0.11	131
Test2	0.04	215	0.06	244	0.39	111	0.33	138
Test3	0.04	215	0.05	284	0.39	111	0.09	171
Test4	0.03	159	0.06	159	0.50	91	0.46	100
Test5	0.02	165	0.05	156	0.54	87	0.47	91

Tabelle 17 – Resultate Stufe 1 (eigene Darstellung)

##### Altersklasse v234

Bei der Altersklasse v234 sind die R<sup>2</sup>-Werte alle <0.1, also generell sehr tief. Die gewichteten Werte sind höher als die Werte ohne Gewichtung, aber immer noch sehr tief. Die Werte sind bei allen Testszenarien sehr tief. Auch der RSME % ist sehr tief. Ein Wert >100% zeigt, dass der durchschnittliche Fehler der prognostizierten Werte grösser ist als der Mittelwert der Zielvariable.

##### Altersklasse a2

Der R<sup>2</sup> Wert bei dieser Altersklasse variiert stark. Ungewichtet ist der R<sup>2</sup>-Wert jeweils höher als gewichtet. Die ungewichteten R<sup>2</sup>-Werte bei den Tests 2-5, vor allem bei den Tests4 und Test5 vergleichsweise hohe Werte. Auch der RMSE % liegt bei den ungewichteten Daten jeweils tiefer als bei den gewichteten. Auch beim RMSE % schneiden die Tests 4 und 5 am besten ab.

##### Vergleich der Altersklassen

Unabhängig davon, ob die Werte gewichtet oder nicht gewichtet sind, die Altersklasse a2 wird in allen Tests deutlich besser erkannt als die Altersklasse v234. Teilweise sind die Werte der Altersklasse a2 um ein vielfaches besser. Der Test5, der für die Altersklasse a2 am besten den höchsten R<sup>2</sup>-Wert aufweist, ist bei der Altersklasse v234 nicht der höchste R<sup>2</sup>-Wert. Jedoch zeigt der Test5 bei beiden Altersklassen den tiefsten RMSE % Wert, wenn die Resultate gewichtet werden.

#### 4.2.4 Ergebnisse Stufe 2 – Vergleich relative Punktedichte mit vorhandener oder nicht vorhandener Verjüngung

Bei dieser Stufe werden die Punktedichte Werte mit den binären Werten verglichen. Dabei wird die Metrik AUC-ROC gerechnet.

	v234		a2	
	ungewichtet	gewichtet	ungewichtet	gewichtet
AUC_ROC				
Test1	0.48	0.55	0.66	0.68
Test2	0.59	0.63	0.75	0.83
Test3	0.59	0.63	0.75	0.80
Test4	0.64	0.68	0.81	0.85
Test5	0.68	0.73	0.84	0.88

Tabelle 18 - Resultate Stufe 2 (eigene Darstellung)

Die Beurteilung der Ergebnisse erfolgt folgendermassen:

- AUC ~ 0.5 - keine Verlässlichkeit
- AUC 0.5-0.7 schwache Verlässlichkeit
- AUC 0.7-0.8 akzeptable Verlässlichkeit
- AUC 0.8-0.9 sehr gute Verlässlichkeit
- AUC > 0.9 exzellente Verlässlichkeit

Bei diesen Werten handelt es sich um eine Standardzuteilung (Hosmer et al. 2013). Diese Einteilung wurde aber für diese Arbeit als sinnvoll erachtet.

#### Altersklasse v234

Die AUC-Werte unterscheiden sich stark. Die gewichteten Werte liegen konstant leicht höher als die ungewichteten Werte. Die Werte der Tests1 bis Test3 sind eher tief. Die Werte von den Tests4 und Test5 zeigen höhere Werte. Das einzige Resultat mit akzeptabler Verlässlichkeit ist der gewichtete Test5. Wo bei der Wert des Test5 am besten abschliesst.

#### Altersklasse a2

Auch bei der Altersklasse a2 weisen die gewichteten Werte eine leicht bessere Übereinstimmung mit den effektiven Werten überein. Hier ist nur das Resultat des Tests1 zu unzuverlässig, gewichtet sowie ungewichtet. Die Resultate der ungewichteten Test2 und Test3 weisen akzeptable Werte aus. Die ungewichteten Ergebnisse der Test4 und Test5 weisen gute Werte auf. Bei den gewichteten Resultaten liegen die Ergebnisse des Test2 bis Test5 alle >0.8 und weisen somit sehr gute Werte auf.

#### Vergleich der Altersklassen

Wie schon auf der Stufe 1, sind auch bei der Stufe 2 die Werte der Altersklasse a2 deutlich besser. Bei der Altersklasse v234 werden vor allem akzeptable Werte gemessen. Die AUC-ROC-Werte bei der Altersklasse zeigt Resultate die gut bis schon fast exzellent sind. Bei beiden Altersklassen zeigt der gewichtete Wert des Test5 das beste AUC-ROC Resultat.

### 4.2.5 Ergebnisse Stufe 3 - Konfusionsmatrix

Bei dieser Stufe werden die Outputs des UC4 anhand eines Treshold von 0.5 in eine binäre Variable verwandelt und diese wird danach mit den binären Werten der Zählungen verglichen.

	ungewichtet				gewichtet			
	precision	recall	f1-score	accuracy	precision	recall	f1-score	accuracy
<b>v234</b>								
Test1	0.22	0.98	0.37	0.24	0.22	0.94	0.36	0.26
Test2	0.23	0.98	0.38	0.25	0.24	0.98	0.39	0.30
Test3	0.23	0.98	0.38	0.25	0.25	0.90	0.39	0.36
Test4	0.23	1.00	0.37	0.23	0.23	1.00	0.37	0.23
Test5	0.23	1.00	0.37	0.23	0.23	1.00	0.37	0.23
<b>a2</b>								
Test1	0.15	0.91	0.26	0.21	0.17	0.82	0.28	0.34
Test2	0.21	0.92	0.34	0.41	0.32	0.84	0.46	0.68
Test3	0.21	0.92	0.34	0.41	0.67	0.43	0.52	0.87
Test4	0.17	0.97	0.29	0.23	0.18	0.95	0.30	0.29
Test5	0.18	1.00	0.30	0.23	0.20	0.97	0.33	0.36

Tabelle 19 - Resultate Stufe 3 (eigene Darstellung)

#### Altersklasse v234

Die Precision-Werte liegen gewichtet als auch ungewichtet und unter den Tests sehr nahe zusammen. Da sind kaum Abweichungen zu erkennen. Die Werte sind tendenziell tief. Die Verjüngung wird also nur mit tiefer Wahrscheinlichkeit, knapp bei einem Viertel auch als Verjüngung erkannt. Die Recall Werte im Gegenzug sind entsprechend hoch, gewichtet sowie ungewichtet. Die Plots ohne Verjüngung werden mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit auch als solche erkannt. Auch beim f1-Score sind die Werte gewichtet, sowie ungewichtet sehr ähnlich. Dieser Score liegt mit knapp 40% eher tief. Dasselbe gilt für die Accuracy. Diese fällt gewichtet teilweise etwas besser aus als ungewichtet. Das beste Resultat (gewichtet) wird durch die Parameter-Wahl im Test5 berechnet. Dennoch sind die Werte zu tief, um einen verlässlichen Wert darzustellen.

#### Altersklasse a2

Bei der Altersklasse a2 unterscheiden sich die Precision-Werte gewichtet und ungewichtet stark. Die gewichteten Werte erzielen die besseren Resultate. Dabei unterscheiden sich die Werte zwischen den verschiedenen Testszenarien auch deutlich. Der Test3 schneidet mit bezüglich der Precision deutlich am besten ab. Mit diesen Parametern werden rund zwei Drittel der Flächen mit Verjüngung auch als solche Flächen erkannt. Beim Recall hingegen weisen alle Tests, gewichtet und ungewichtet deutlich höhere Werte auf als der Test3. In diesem Fall werden nur rund 44% der Flächen ohne Verjüngung auch als solche erkannt. Bei den anderen Tests werden >80% der Flächen ohne Verjüngung auch als solche erkannt. Die Werte liegen bei den ungewichteten Werten höher als bei den gewichteten. Beim f1-Score dagegen sind wieder die gewichteten Werte besser. Dabei zeigt wieder der Test3 das beste Resultat. Ebenso bei der Accuracy. Diese liegt bei den gewichteten Werten allgemein wieder höher als bei den ungewichteten. Aber auch da gibt es zwischen den verschiedenen Testszenarien grosse Unterschiede. Auffällig ist, dass der Test1 überall am schlechtesten abschliesst.

#### Vergleich der Altersklassen

Bei der Precision bleiben die Werte der Altersklasse v234 auch gewichtet tief. Bei der Altersklasse a2 hingegen, werden die Werte je nach Test deutlich besser. Ungewichtet sind die Precision-Werte der

Altersklasse v234 höher als die Werte der Altersklasse a2. Beim Recall sind die Werte über beide Altersklassen ähnlich hoch. Wobei bei der Altersklasse v234 die Werte beim Gewichten ähnlich hoch bleiben und die Werte der Altersklasse a2 teilweise deutlich sinken. Während bei der Altersklasse v234 der f1-Score von ungewichtet zu gewichtet beinahe nicht ändert oder sogar verschlechtert, verbessert sich der Wert bei der Altersklasse a2 konstant, teilweise sogar deutlich. Die Accuracy liegt ungewichtet bei der Altersklasse v234 über alle Testresultate sehr nahe zusammen, während sie bei der Altersklasse mehr abweicht. Bei den Tests Test1 und Test4 und Test5 sind die ungewichteten Accuracy-Werte der beiden Altersklassen sehr ähnlich. Bei den Tests Test2 und Test3 sind die ungewichteten Accuracy-Werte der Altersklasse a2 deutlich höher als die der Altersklasse v234. Gewichtet sind die Accuracy Werte der Altersklasse a2 generell höher als die der Altersklasse v234. Vor allem bei den Tests Test2 und Test3 sind die Resultate der Altersklasse a2 wesentlich besser.

#### 4.2.6 Qualitätstest

Die folgende Tabelle zeigt Messgrößen, die anhand der Qualitätssicherstellung gemessen wurden. Das ist der Anteil der Plot-Fläche, die mit Werten abgedeckt ist und die Anzahl der Plots, die nach Ausschluss noch integriert sind. Der Ausgangswert für die Anzahl Plots lag bei  $N = 227$ . Beim Test 1 werden in beiden Altersklassen am meisten Plots ausgeschlossen. Bei diesem Test wurde ein CTH angewendet. Beim Test5 werden alle gezählten Flächen berücksichtigt, beim Test4 nur bei der Altersklasse a2. Bei der Altersklasse v234 werden mehr Plots ausgeschlossen als bei der Altersklasse a2.

	v234		a2	
	Abdeckung	Anzahl Plots	Abdeckung	Anzahl Plots
Test1	0.10	124	0.10	190
Test2	0.10	176	0.10	222
Test3	0.10	176	0.10	222
Test4	0.10	216	0.17	227
Test5	0.75	227	0.75	227

Tabelle 20 - Auswertung der Qualitätskriterien (eigene Darstellung)

## 5 Diskussion

### 5.1 Diskussion der Forschungsfrage 1: Zeitliche und räumliche Analyse der Waldverjüngung

In diesem Kapitel werden die Resultate zur ersten Forschungsfrage und den dazugehörigen Hypothesen diskutiert. Die Forschungsfrage hierzu lautet:

Forschungsfrage 1: Wie hat sich die Waldverjüngung in den vergangenen 20 Jahren in Bezug auf Höhenlage (m ü. M), Hangneigung und Exposition verändert?

#### 5.1.1 Hypothese 1.1 – Unterschiede zwischen den Baumarten

Hypothese 1.1: Die Baumarten reagieren aufgrund ihrer ökologischen Unterschiede und Präferenzen unterschiedlich auch die klimatischen Veränderungen.

Das generelle Modell zeigt, dass sich die Baumarten signifikant voneinander unterscheiden. Die Wahrscheinlichkeit der Föhrenverjüngung ist am höchsten, gefolgt von der Arve, der Lärche und der Fichte. Diese Analyse zeigt, dass für jede Baumart ein eigenes Modell benötigt wird. Die einzelnen Modelle der

Baumarten zeigen, dass diese unterschiedlich auf die Veränderungen reagieren. Die Föhre ist die einzige Baumart, bei welcher eine Verschiebung über die Zeit hinweg beobachtet werden konnte. Die Unterschiede könnten an den unterschiedlichen ökologischen Voraussetzungen liegen. Die Arve ist natürlich auf einer Höhe von 1'300 bis 2'600 m ü. M. angesiedelt, die obere Grenze der Föhre liegt rund 500 m tiefer auf ca. 2'100 m ü. M. (Brändli 1996). Die Resultate zeigen, dass die Wahrscheinlichkeit für Fichten- und Föhrenverjüngung mit steigender Plot-Höhe abnehmen, bei der Arve hat die Plot-Höhe keinen Einfluss und die Wahrscheinlichkeit für die Lärchenverjüngung nimmt mit steigender Plot-Höhe zu. Dabei spielt sicher auch eine Rolle, dass ein grosser Teil der Standorte südlich exponiert sind und daher eine höhere Trockenheit aufweisen und gerade bei südlich exponierten Lagen Temperaturunterschiede festgestellt wurden (Winkler et al. 2016). Die Föhren, die mit dieser, die mit dieser Trockenheit umgehen können (Brändli 1996), reagieren anders als die anderen Baumarten. Bei der Föhre nimmt die Wahrscheinlichkeit mit steigender nördlicher Ausrichtung nämlich nicht zu. Auch die Art der Samenverbreitung ist unterschiedlich und beeinflusst die räumliche Verteilung der Baumarten und deren Verjüngung. Die Arve wird hauptsächlich durch den Tannenhäher verbreitet und dieser hat somit auch einen Einfluss darauf, wo sich die Arve verjüngt (Gugerli et al. 2022). Auch zu berücksichtigen ist, dass nicht alle Arten gleichermassen verbissen werden, wobei die Lärche am stärksten angegangen wird (Fluri et al. 2023).

Diese Hypothese wird bestätigt.

### **5.1.2 Hypothese 1.2 – Zunahme der Waldverjüngung**

Hypothese 1.2: Die Waldverjüngung hat über die Zeit zugenommen.

Die Anzahl der Plots mit Verjüngung hat insgesamt über die Zeit zugenommen, das zeigt die Abbildung 20. Betrachtet man die einzelnen Baumarten, dann gibt es im Jahr 2022 bei allen Baumarten mehr Plots mit Verjüngung als es das noch im Jahr 2003 gab, dies ist auf der Abbildung 22 ersichtlich. Wobei das Erhebungsjahr ausser bei der Fichte als signifikanter im Modell stehen blieb.

Ein Einflussfaktor kann darin liegen, dass die Temperaturen fast bei allen Expositionen zugenommen haben (Winkler et al. 2016) und die Temperatur als eine der entscheidenden limitierenden Faktoren für die Vegetation im Berggebiet und somit auch für die Waldverjüngung gilt (Vanneste et al. 2017).

Weiter ist es sehr spannend, dass die Anzahl der Plots zwischen den Jahren 2003 und 2012 stark zunimmt, aber zwischen 2012 und 2022 weniger stark zunimmt (generell, Fichte, Föhre) oder sogar abnimmt (Arve, Lärche). Gründe die diesen Unterschied erklären, wurden keine gefunden. Die Studie aus dem Val Trupchun (ebenfalls im SNP), die mit der gleicher Methodik erhoben wurde, weist in der durchschnittlichen Anzahl der Verjüngung pro Plot eine kontinuierliche Steigung über die die Messzeitpunkte 1991, 2003, 2011 und 2021 auf (Fluri et al. 2023).

Durch die Zunahme der Anzahl Plots mit Verjüngung, gibt es eine höhere Dichte an Plots mit Verjüngung. Eine Aussage über die Verjüngungsdichte an sich, also die Anzahl junger Bäume kann anhand dieser Arbeit keine Aussage gemacht werden. Andere Studien hingegeben haben solche Verdichtungen festgestellt. (Bharti et al. 2012; Morley et al. 2019).

Es gilt zu berücksichtigen, dass die Verjüngungsklassen für die Modellbildung stark zusammengefasst wurden. Diese Zusammenfassung war sinnvoll, um eine Aussage über die generelle Verjüngung zu geben. Werden die Entwicklungsstufen der Verjüngung ( $v$ ) statistisch betrachtet, zeigen sich signifikante Unterschiede. Die folgende Abbildung zeigt beispielsweise, wie die Verteilung aussieht, wenn die

Entwicklungsstufen weniger stark zusammengefasst, und noch in zwei Stufen v01 und v234 aufgeteilt bleiben.

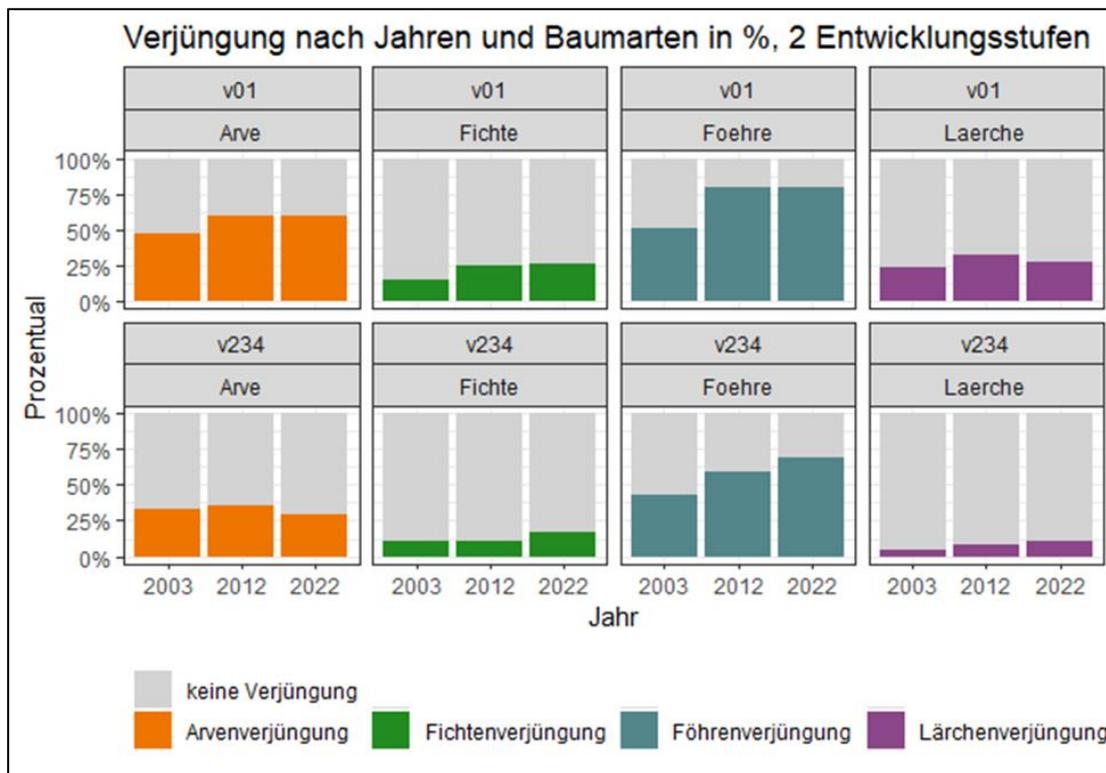


Abbildung 40 - Verjüngung nach Jahren und Baumarten in zwei Entwicklungsstufen (eigene Darstellung)

Für andere Fragestellungen macht gegebenenfalls also Sinn, die Verjüngung nicht so stark zu aggregieren. Die Lärche beispielsweise kam in der Verjüngungsklasse (v) im Jahr 2022 an weniger Plots vor als noch im Jahr 2012. Wird die Verjüngungsklasse unterteilt, dann ist ersichtlich, dass die Abnahme nur bei der jüngeren Entwicklungsstufe (v01) stattfand und bei den älteren Entwicklungsstufen (v234) zugenommen hat.

Da nur das Vorhandensein der Waldverjüngung untersucht wurde, kann diese Hypothese weder bestätigt noch verworfen werden. Festgehalten aber wird, dass die Anzahl Plots mit Verjüngung zwischen 2003 und 2022 über alle Baumarten und somit auch generell angestiegen ist.

### 5.1.3 Hypothese 1.3 - Verschiebung der Waldverjüngung nach oben

Hypothese 1.3: Die Waldverjüngung hat sich über den untersuchten Zeitraum räumlich nach oben verschoben.

Eine Interaktion zwischen der Zeit und der Höhenlage wurde nur bei der Föhre festgestellt. Gründe hierfür können unterschiedlicher Natur sein. Bei der Arve beispielsweise spielt die Plot-Höhe keine entscheidende Rolle für die Wahrscheinlichkeit der Waldverjüngung. Mit der natürlichen Verbreitung zwischen 1'300 bis 2'600 m ü. M. (Brändli 1996) übersteigt ihr natürliches Vorkommen den höchstgelegenen Punkt im Untersuchungsgebiet (2'350 m ü. M.) deutlich.

Es könnte hingegen auch sein, dass gerade die Arve, aber auch die Lärche ihr Potential bezüglich Höhenanstieg im Gebiet erreicht hat und die topografischen Bedingung keine weitere Ausbreitung zulassen (Macias-Fauria und Johnson 2013).

Ein weiterer Grund kann darin liegen, dass diese Fläche nun schon mehr als 100 Jahre nicht bewirtschaftet wurde und daher die Verschiebung der Baumverjüngung nach oben mehr Zeit beansprucht, als an Orten, wo die Bewirtschaftung weniger lang zurück liegt (de Wit et al. 2014). Die Verschiebung nach oben kann auch durch langsames Wachstum verzögert werden (Hagedorn et al. 2019). Zudem kommen noch die Abhängigkeiten für die Verteilung der Samen, Beispiel Tannenhäher bei der Arve (Gugerli et al. 2022) oder die Häufigkeit der Saateignisse (Hagedorn et al. 2019) zu tragen.

Weiter gilt es hierzu zu bemerken, dass viele Plots innerhalb des bestehenden Waldes sind. Nur eine kleine Anzahl befindet sich an der Wald- respektive Baumgrenze. Wenn die Ausdehnung des Waldes gemessen werden soll, müssen auch mehr Plots an Flächen ausserhalb des bisherigen Waldperimeters aufgenommen werden. Im allgemeinen Modell wird die Plot-Höhe nicht als signifikanter Faktor ausgewiesen. Dies lässt darauf schliessen, dass die Plots an höheren Lagen entweder nicht gleichermaßen vertreten sind oder in allen Höhenlagen Verjüngung vorhanden ist.

Diese Hypothese kann nur bedingt, nämlich nur für die Föhre, bestätigt werden.

#### **5.1.4 Hypothese 1.4 – Keine Verschiebung bezüglich Exposition oder Hangneigung**

Hypothese 1.4: Es wird im zeitlichen Vergleich keine Verschiebung bezüglich der Hangneigung und der Exposition festgestellt.

Die Exposition sowie die Hangneigung beeinflussen die Wahrscheinlichkeit für Waldverjüngung. Aber weder bei der Exposition noch bei der Hangneigung wurde eine signifikante Verschiebung über die Zeit festgestellt, weder generell noch bei einer einzelnen Baumart.

Im Gegensatz zur Höhe der Waldgrenze sind die Veränderungen bezüglich der Exposition und der Hangneigung über die Zeit deutlich weniger erforscht.

Veränderung bezüglich der Exposition werden aufgrund der Veränderungen in der Luft- sowie Bodentemperatur erwartet. Die Veränderungen zeigen sich anhand der Luft- sowie der Bodentemperatur (Yrindaw et al. 2015; Hamid et al. 2021). Winkler et al. (2016) haben die grössten Temperaturunterschiede in bei südexponierten Lagen gefunden. Die Föhre ist die einzige Baumart, bei welcher mit abnehmender nördlicher Exposition die Wahrscheinlichkeit der Verjüngung zunimmt. Sie ist bekannt dafür, dass sie auch an trockenen Standorten gut zurechtkommt.

Diese Hypothese wird bestätigt.

#### **5.1.5 Zusammenfassung der Diskussion der Forschungsfrage 1**

Die Punkte aus der Diskussion werden hier kurz zusammengefasst:

- Die Baumarten unterscheiden sich untereinander stark.
- Die Anzahl Plots mit Verjüngung haben zwischen 2003 und 2022 zugenommen. Da nur die Wahrscheinlichkeit der Waldverjüngung berechnet wurde, kann keine Aussage über die Zu- oder Abnahme der Verjüngung gemacht werden.
- Über den untersuchten Zeitraum wurde keine generelle Verschiebung der Waldverjüngung gegen oben festgestellt. Nur bei der Föhre wurde eine solche räumliche Verschiebung beobachtet.
- Über den untersuchten Zeitraum wurde keine Verschiebung hinsichtlich der Hangneigung oder der Exposition festgestellt.

## 5.2 Diskussion der Forschungsfrage 2: Zeitliche und räumliche Analyse der Waldverjüngung

In diesem Kapitel werden die Resultate zur zweiten Forschungsfrage und den dazugehörigen Hypothesen diskutiert. Die Forschungsfrage hierzu lautet:

Forschungsfrage 2: Wie gut erkennt das von der HAFL entwickelte Verfahren zur Erkennung von Waldverjüngung die Verjüngung im Bergwald?

### 5.2.1 Hypothese 2.1 – Unterschiedliche Qualität der Verjüngungserkennung nach Baumhöhe

Hypothese 2.1: Die Verjüngung >1.3m wird besser erkannt als die Verjüngung <1.3m.

Ergebnisse auf der Stufe 1 – Vergleich Anzahl Bäumen mit relativer Punktedichte

Die Resultate der Altersklasse v234 auf der Stufe 1 sind ungenügend. Die  $R^2$ -Werte sind zu tief und die RMSE % sind zu hoch, um anhand der LiDAR Daten Rückschlüsse auf die Anzahl der Verjüngung zu schliessen.

Bei der Altersklasse a2 sind die Resultate zuverlässiger. Die Szenarien bei Test4 und Test5 schneiden gewichtet sowie ungewichtet nicht schlecht ab. Wobei die ungewichteten Werte noch besser sind als die gewichteten Werte. Die  $R^2$ -Werte liegen bei der ungewichteten Variante bei 0.5 für den Test4 und 0.54 für den Test5. In diesem ambitionierten Kontext sind diese Werte als gut zu beurteilen.

Die RMSE% sind auch bei den Test4 und Test5 am tiefsten. Aber dennoch liegen die prognostizierten im besten Fall 87% des Mittelwerts der effektiven Werte von den effektiven Werten entfernt.

Die Resultate der Altersklasse a2 lassen sich hinsichtlich des  $R^2$  mit den Werten von Puliti et al. (Puliti et al. 2019) vergleichen. Sie haben unter Anwendung von UAV hinsichtlich der Baumdichte (Anzahl Bäume/ha) ein  $R^2$  von 0.61 und ein RMSE% von 36% erhalten (Puliti et al. 2019). Wobei sie die Daten von jungen Beständen (ab 0.5m) mittels UAV und einer Punktedichte von 300 Punkten/m<sup>2</sup> erhoben haben. Was deutlich höher ist als die verwendete Punktedichte in dieser Arbeit. Zum Vergleich haben sie die UAV-Daten mit den ALS-Daten (für Norwegen ebenfalls frei verfügbar, ~ 5 Punkte/m<sup>2</sup>) verglichen. Die ALS Resultate waren deutlich tiefer, sie erzielten damit aber einen deutlich tieferen  $R^2$ -Wert von 0.18. Der RMSE % bei dieser Untersuchung lag mit 52% (Puliti et al. 2019) immer noch tiefer liegt als in der vorliegenden Arbeit. Auch die Resultate von Imangholiloo et al. (2019;2020) erzielten hinsichtlich RMSE% deutlich tiefere Werte.

Dazu muss betont werden, dass in der vorliegenden Arbeit Bestände im Berggebiet mit schwierigerer Topografie mit unterschiedlichen Bestandes-Höhen untersucht wurden und das Ergebnis aus dem Verfahren der HAFL die relative Punktedichte ist und nicht eine Baumdichte darstellt. Es wäre sehr erstaunlich gewesen, wenn gerade die jungen Bäume der Stufe v234 auf dieser Untersuchungsstufe zuverlässige Resultate geliefert hätten.

Ergebnisse der Stufe 2 – Vergleich relative Punktedichte mit vorhandener oder nicht vorhandener Verjüngung

Auch auf dieser Stufe wird die Altersklasse v234 auch nicht wirklich gut erkannt. Einzig der Test5 mit den gewichteten Werten erzielt ein akzeptables Ergebnis.

Anders ist es bei der Altersklasse a2. Da erzielen die Tests 2-5, gewichtet und ungewichtet akzeptable bis sehr gute Ergebnisse. Wobei die Ergebnisse der gewichteten Werte überall über den ungewichteten Ergebnissen liegen. Test3 erzielt gewichtet eine sehr gute Verlässlichkeit. Die Tests 4 und 5 zeigen gewichtet sowie ungewichtet eine sehr hohe Verlässlichkeit. Wobei die Werte des Test5 gewichtet den höchsten Wert darstellt.

Die Unterschiede zwischen den Altersklassen sind auf dieser Stufe deutlich tiefer als auf der ersten Stufe, dennoch werden die besten Resultate alle bei der Altersklasse a2 erzielt. Es wurden keine Studien gefunden, die in diesem Themenbereich mit einer AUC-ROC Kurve verglichen haben, daher kann hier kein Vergleich hinzugezogen werden.

#### Ergebnisse der Stufe 3 – Konfusionsmatrix

Der Recall Wert ist überall sehr hoch; in beiden Altersklassen, gewichtet sowie ungewichtet. Was so viel heisst, dass Orte ohne Verjüngung auch als Orte ohne Verjüngung erkannt werden. Für den Vergleich zwischen den Testszenarien ist entscheidend, wie gut die vorhandene Verjüngung erkannt wird, also der Precision-Wert. Bei der Altersklasse v234 wird die vorhandene Verjüngung nicht genügend erkannt. Dies ist sowohl gewichtet als auch ungewichtet der Fall. Die berechneten Werte geben keine zuverlässigen Resultate aus. Bei der Altersklasse a2 sieht es nur bei wenigen Testszenarien deutlich anders aus. Der gewichtete Test2 liefert ein akzeptables Ergebnis, der gewichtete Test3 sogar ein gutes. Dies hat dann zum Ergebnis, dass beim Test3 die Accuracy einen akzeptablen Wert annimmt. Somit werden auch bei dieser Stufe bei der älteren Altersklasse die besseren Resultate erzielt.

#### Stufenübergreifende Diskussion

Die Verjüngung der Altersklasse a2 wurde über alle Stufen präziser erkannt. Das war zu erwarten. Dass Verjüngung <1m oder in diesem Fall <1.3m nicht präzise als solche erkannt wird, ist nicht neu. Weil ALS Aufnahmen in ganz jungen Wäldern lange nicht die gewünschte Qualität hervorgebracht hatten, wurden resp. werden Verjüngungsaufnahmen grösstenteils noch durch Feldbegehungen erfasst, was Zeit- und Ressourcen aufwändig ist (Imangholiloo et al. 2019).

Durch das Verwenden Datenkombinationen mit multispektralen Daten, können aber auch ganz kleine Bäume besser erfasst und erkannt werden. In einem Bestand mit jungen Bäumen (ab 10cm Höhe und 5cm Kronendurchmesser) haben Forscher mittels LiDAR Punktwolken und RGB-Bildern kleinste Bäume analysiert und zuverlässige Resultate erzielt (Feduck et al. 2018). Wobei die Aufnahmen mit einer Standard RGB Kamera und mit einer Auflösung von 5mm gemacht (Feduck et al. 2018).

Solche Verfahren haben aber dann wieder zum Nachteil, dass sie weniger grossflächig angewendet werden können, die erwähnte Studie untersuchte eine Fläche von 200ha (ebd.) Zudem Diese Flüge finden in diesem Fall näher am Boden statt und somit stellen wieder eine Störung dar.

Auch bei der Analyse von Advanced Seedlings-Beständen (>1.3m bis 7/resp. 9m) werden durch die Kombination von mehreren Datenquellen sehr gute Resultate erzielt (Imangholiloo et al. 2019; Imangholiloo et al. 2020).

Hierzu muss auch erwähnt werden, dass die Erkennung der Waldverjüngung für die Altersklasse v234 (0.4 bis 1.3m) anhand des Projektes Waldmonitoring.ch weder validiert noch angewendet wurde. Die Altersklassen, die zurzeit angewendet sind 0-2m und 0-5m.

Diese Hypothese wird bestätigt.

#### **5.2.2 Hypothese 2.2 – Resultate sind stark von Parametern abhängig**

Hypothese 2.2: Wie genau die Verjüngung erkannt wird, hängt stark von den gesetzten Parametern ab.

Ergebnisse auf der Stufe 1 – Vergleich Anzahl Bäumen mit relativer Punktedichte

Auf dieser Stufe unterscheiden sich die verschiedenen Testszenarien teilweise deutlich, und zwar bei beiden Altersklassen. Die Resultate der gewichteten und ungewichteten Daten unterscheiden sich

grösstenteils. Wobei teilweise die gewichteten und teilweise die ungewichteten Werte die besseren Resultate erzeugen. Somit spielt die Gewichtung sicherlich eine Rolle, aber auch die anderen Parameter tragen zu diesen Unterschieden bei.

Bei der Altersklasse a2 schneidet der Test5 am besten und der Test1 am schlechtesten ab.

Ergebnisse der Stufe 2 – Vergleich relative Punktedichte mit vorhandener oder nicht vorhandener Verjüngung

Auf dieser Stufe sind alle gewichteten Resultate besser als die ungewichteten. Somit spielt die Gewichtung hier sicherlich eine entscheidende Rolle. Wobei bei der Rangierung der Testergebnisse gewichtet sowie ungewichtet gleich ist, was für beide Altersklassen gilt.

Bei beiden Altersklassen v234 schneiden der Test5 am besten und der Test1 am schlechtesten ab.

Ergebnisse der Stufe 3 – Konfusionsmatrix

Bei der Altersklasse v234 ist eine Aussage auf dieser Stufe sehr schwierig, respektive es ist keine Aussage möglich. Die Ergebnisse liegen dafür zu nahe zusammen – gewichtet sowie ungewichtet.

Bei der Altersklasse a2 hingegen werden mit den gewichteten Daten die deutlich besseren Ergebnisse erzielt als mit den ungewichteten Daten. Die Ergebnisse des Test1 sind wiederum am tiefsten. Das beste Resultat zeigt der Test3, und zwar mit Abstand.

Stufenübergreifende Diskussion

Die Parameter spielen eine entscheidende Rolle, wie die Testresultate ausfallen. In den meisten Fällen, wo brauchbare Werte erzielt werden, sind die Daten gewichtet. Somit ist die Gewichtung in den meisten Fällen gerechtfertigt.

Die Resultate der Altersklasse v234 sind über alle Stufen hinweg nicht überwältigend. Diese Altersklasse umfasst die Bäume in einer Höhe von 0.4 bis 1.3m. Die meisten Studien arbeiten mit einem Canopy Threshold CTH von 0.5 bis 1m (Imangholiloo et al. 2020). In den topografisch schwierigen Verhältnissen im Gebiet Il Fuorn, ist es daher wenig überraschend, dass diese Resultate ungenügend ausfallen. Wie bereits bei der ersten Hypothese zu dieser Forschungsfrage beschrieben, werden kleine Bäume besser erkannt, wenn mehrere Datenquellen kombiniert werden, und die LiDAR Daten beispielsweise mit RGB Daten ergänzt werden (Feduck et al. 2018).

Bei der Altersklasse a2 sind hat der Test5 bei den ersten beiden Stufen die besten Resultate erzielt. Bei diesem Test wurde im Vergleich mit den anderen Tests mit der tiefsten Rasterauflösung gearbeitet. Die anderen Parameter wurden beispielsweise im Vergleich zum Test2 und Test4 nicht geändert. Somit hat die Raster-Auflösung einen zentralen Einfluss auf das Resultat. Bei der letzten Stufe jedoch hat der Test3 am die besten Resultate erzielt. Bei diesem Testszenario wurden die Daten einerseits deutlich stärker gewichtet und andererseits wurde ein höherer Threshold-Coverage (Threshold Kronenabdeckung bevor gewichtet wird) als bei den anderen Szenarien verwendet. Diese Faktoren spielen also auch eine Rolle. Der Test1 hingegen wies bei nahezu allen berechneten Tests die schlechtesten Resultate auf. Dies war das einzige Szenario, bei welchem der CTH ebenfalls auf die LiDAR Punkte angewendet wurde. Es wurden also nur die Punkte >0.4 resp. >1.3m berücksichtigt. Daraus lässt sich schliessen, dass bei der Berechnungsart mit den relativen Punktedichten alle LiDAR Punkte berücksichtigt werden müssen. Im Gegensatz zu anderen Studien (Imangholiloo et al. 2020) CTH in diesem Fall verschlechtert die Resultate erheblich. Somit hat auch dieser Parameter einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Resultate.

Diese Hypothese wird bestätigt.

### 5.2.3 Zusammenfassung der Diskussion zur Forschungsfrage 2

Die Punkte aus der Diskussion werden hier kurz zusammengefasst:

- Die Verjüngung  $>1.3\text{m}$  wird deutlich präziser erkannt als die Verjüngung  $<1.3\text{m}$
- Wie präzise die Verjüngung erkannt wird, hängt stark von den gesetzten Parametern ab.

## 6 Schlussfolgerungen

### 6.1 Räumliche Verschiebung der Waldverjüngung über die Zeit

Die Anzahl der Plots mit Verjüngung im untersuchten Gebiet hat während den letzten 20 Jahren signifikant zugenommen. Von den untersuchten Faktoren hatten die Plot-Neigung und die Northness einen signifikanten Einfluss auf das baumartenübergreifende Modell. Es wurde aber in diesem baumartenübergreifenden Modell keine räumliche Verschiebung der Verjüngung festgestellt. Die Baumarten unterscheiden sich stark. Nur bei der Föhre wurde eine Interaktion zwischen dem Erhebungszeitpunkt und der Plot-Höhe gefunden. Die Verjüngung der Föhre hat sich über die Zeit nach oben verschoben.

Im generellen Modell sowie bei allen Baumarten ausser der Fichte ist das Erhebungsjahr, also der Zeitfaktor, entscheidend für das Vorhandensein der Verjüngung. Somit hat sich die Waldverjüngung über die Zeit verändert. Daraus wird geschlossen, dass es zwar keine räumliche Verschiebung der Wahrscheinlichkeit für Verjüngung gibt, aber eine höhere Dichte an Plots mit vorhandener Verjüngung gibt. Dies ist nicht zu verwechseln mit der Verjüngungsdichte, also der Anzahl junger Bäume je Fläche.

Für diese Arbeit wurde nur eine beschränkte Auswahl an Variablen in die Modelle integriert. Anhand von den bestehenden Daten könnten viele weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Die effektiven Werte der Zählungen auszuwerten und über die Messzeitpunkte, ohne Berücksichtigung der Plot bezogenen Faktoren, zu vergleichen stellt eine weitere Möglichkeit zur Datenverwendung dar. Die im Jahr 2022 zusätzlich erhobenen Daten, beispielsweise der Kronenabdeckung, Bodenbedeckung etc. bieten für die Zukunft ein grosses Potential an weiteren Untersuchungsmöglichkeiten.

Die Plots befinden sich fast ausschliesslich innerhalb des bestehenden Waldperimeters. Nur wenige der Plots befinden sich an der Grenze des Waldes. Wenn die Ausbreitung des Waldes oder die Verschiebung der Waldgrenze weiter untersucht werden soll, wäre es sinnvoll, das bestehende Raster bewusst mit Punkten zu ergänzen, welche ausserhalb des Waldes liegen.

Der Klimawandel und seine Auswirkungen auf die Bergregionen werden im verbleibenden 21. Jahrhundert stark zunehmen. Die Datenreihe, die der SNP pflegt, birgt auch für die Zukunft ein sehr hohes Potential und sollte mindestens im gegebenen Umfang weitergeführt werden.

### 6.2 LiDAR basierte Erkennung von Waldverjüngung

Es wurde untersucht, wie mit dem Verfahren der HAFL die Waldverjüngung basiert auf LiDAR Daten erkannt wird. Die Resultate für die Altersklasse v234 (0.4 bis 1.3m) sind mit diesem Verfahren nicht zuverlässig. Damit auch für diese Altersklasse aussagekräftige Resultate erzeugt werden können, müssten die Daten in einer höheren Auflösung, sprich einer höhere Punktedichte erhoben und mit weiteren Datenquellen wie beispielsweise RGB-Daten kombiniert werden. Das Angebot der verfügbaren technischen Mittel hat sich in den zwei Jahrzehnten deutlich vergrössert. Es ist anzunehmen, dass sich in Zukunft

weitere Verfahren zur Verjüngungserkennung auf Basis von Fernerkundung, auch für ganz kleine Bäume, etablieren werden. Diese technischen Entwicklungen gilt es zu verfolgen, zu testen und gegebenenfalls anzuwenden.

Die Resultate für die Altersklasse a2 (1.3 bis 5m) hingegen sind, je nach gesetzten Parametern, genügend bis sehr gut. Die Anzahl der in dieser Arbeit vorgestellten Testszenarien ist begrenzt und zeigt nur eine Auswahl an Möglichkeiten. Es gibt unzählige weitere Kombinationen zum Testen. Je nach Fragestellung und topografischen Bedingungen gilt es, die Parameter entsprechend zu wählen. Es ist in diesem Fall zu empfehlen, die erzielten Resultate im Feld stichprobenweise zu überprüfen und verschiedenen Parameterkombinationen zu vergleichen. Obwohl die Bäume in dieser Altersklasse schon gut erkannt werden, sollten auch hierzu die technologischen Fortschritte verfolgt, getestet und angewendet werden.

## 7 Literaturverzeichnis

- Arumäe T, Lang M, Laarmann D, 2020. Thinning- and tree-growth-caused changes in canopy cover and stand height and their estimation using low-density bitemporal airborne lidar measurements – a case study in hemi-boreal forests. *European Journal of Remote Sensing*, 53 (1), 113–123.
- BAFU, 2020. Viertes Landesforstinventar: Wie geht es dem Schweizer Wald? BAFU Bundesamt für Umwelt, 25.11.2020. Abgerufen am 09.12.2023, <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wald/dossiers/viertes-landesforstinventar-wie-geht-es-dem-schweizer-wald.html>
- BAFU, 2022a. Merkblatt Waldfunktionen und Waldleistungen, 15.11.2022. Abgerufen am 09.12.2023, [https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wald-holz/fachinfo-daten/merkblatt-wald-funktionen-leistungen.pdf.download.pdf/Merkblatt\\_Waldfunktion-Leistung.pdf](https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wald-holz/fachinfo-daten/merkblatt-wald-funktionen-leistungen.pdf.download.pdf/Merkblatt_Waldfunktion-Leistung.pdf)
- BAFU, 2022b. Waldreservate, 14.07.2022. Abgerufen am 31.03.2024, <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/biodiversitaet/fachinformationen/oekologische-infrastruktur/waldreservate.html>
- BAFU, 2023a. Waldbeobachtung. BAFU Bundesamt für Umwelt, 19.07.2023. Abgerufen am 09.12.2023, <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wald/fachinformationen/zustand-wald/waldbeobachtung.html>
- BAFU, 2023b. Waldfläche in der Schweiz. BAFU Bundesamt für Umwelt, 01.09.2023. Abgerufen am 09.12.2023, <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wald/fachinformationen/zustand-wald/waldflaeche-in-der-schweiz.html>
- BAFU, 2023c. Zwischenergebnisse des fünften Landesforstinventars (LFI5). BAFU Bundesamt für Umwelt, 30.05.2023. Abgerufen am 09.12.2023, <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wald/fachinformationen/zustand-wald/waldbeobachtung/lfi5.html>
- Baston D, 2023. Package ‘exactextractr’, 20.09.2023. Abgerufen am 23.12.2023, <https://cran.r-project.org/web/packages/exactextractr/exactextractr.pdf>
- Bates D, Mächler M, Bolker B, Walker S, 2015. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67 (1).
- Bebi P, Leuch BA, Bugmann H, Conedera M, Frehner M, Insinna P, Kupferschmid AD, Lévesque M, Moos C, Muhmenthaler J, Oncelli A, Thormann J-J, Zürcher S, 2023. Wildhuftiere und Waldverjüngung: Wenn die Zeit davonläuft. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 174 (5), 274–279.
- Bezzola D, 2023. Ökologisches Porträt der Bergföhren im Nationalpark. Protected Areas Research Center for Spatial Information PARCS, 24.02.2023. Abgerufen am 02.01.2024, [http://www.parcs.ch/snp/pdf\\_public/2023/52101\\_20230224\\_163604\\_2023\\_0776kologischesPortraitderBergfo776hrenimNationalpark\\_vonDuriBezzola\\_definitiveVersion.pdf](http://www.parcs.ch/snp/pdf_public/2023/52101_20230224_163604_2023_0776kologischesPortraitderBergfo776hrenimNationalpark_vonDuriBezzola_definitiveVersion.pdf)
- Bharti RR, Adhikari BS, Rawat GS, 2012. Assessing vegetation changes in timberline ecotone of Nanda Devi National Park, Uttarakhand. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18, 472–479.
- Brändli U-B, 1996. Die häufigsten Waldbäume der Schweiz. Ergebnisse aus dem Landesforstinventar 1983-85 : Verbreitung, Standort und Häufigkeit von 30 Baumarten. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf, 278 S.
- Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2022a. Swiss Map Raster 25. Abgerufen am 01.01.2024, <https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/maps/smr/smr25.html>
- Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2022b. Swiss Map Raster 500. Abgerufen am 01.01.2024, <https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/maps/smr/smr500.html>

- Chai T, Draxler RR, 2014. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?
- Chakrabarti A, Ghosh JK, 2011. AIC, BIC and Recent Advances in Model Selection. In: *Philosophy of Statistics*. Elsevier, S. 583–605.
- Cohen J, 1988. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. Routledge.
- Commarmot B, Brang P, 2011. Was sind Naturwälder, was Urwälder? In: *Waldreservate - 50 Jahre natürliche Waldentwicklung in der Schweiz*, S. 13–25. Abgerufen am 30.03.2024.
- Dalen L, Hofgaard A, 2005. Differential Regional Treeline Dynamics in the Scandes Mountains. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 37 (3), 284–296.
- Dalianis H, 2018. Evaluation Metrics and Evaluation. In: Gray MJ, Gregory Chinchir V (Hrsg.). *Ranavirus: Lethal Pathogens of Ectothermic Vertebrates*. Springer, Cham, S. 45–53.
- Dalponte M, Coomes DA, 2016. Tree-centric mapping of forest carbon density from airborne laser scanning and hyperspectral data. *Methods in ecology and evolution*, 7 (10), 1236–1245.
- de Wit HA, Bryn A, Hofgaard A, Karstensen J, Kvalevåg MM, Peters GP, 2014. Climate warming feedback from mountain birch forest expansion: reduced albedo dominates carbon uptake. *Global Change Biology*, 20 (7), 2344–2355.
- Dullinger S, Dirnböck T, Grabherr G, 2004. Modelling climate change-driven treeline shifts: relative effects of temperature increase, dispersal and invasibility. *Journal of Ecology*, 92 (2), 241–252.
- Dunkler D, Plischke M, Leffondré K, Heinze G, 2014. Augmented backward elimination: a pragmatic and purposeful way to develop statistical models. *PloS one*, 9 (11), e113677.
- Engler R, Randin CF, Thuiller W, Dullinger S, Zimmermann NE, Araujo MB, Pearman PB, Le Lay G, Piedallu C, Albert CH, Choler P, Coldea G, Lamo X de, Dirnböck T, Gegout JC, Gomez-Garcia D, Grytnes JA, Heegaard E, Hoistad F, Nogues-Bravo D, Normand S, Puscas M, Sebastia MT, Stanisci A, Theurillat JP, Trivedi, Vittoz P, Guisan A, 2011. 21st century climate change threatens mountain flora unequally across Europe. *Global Change Biology*, 17 (7), 2330–2341. Abgerufen am 03.04.2024, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2486.2010.02393.x>
- Fang S, He Z, 2020. Fifty Years of Change in a Coniferous Forest in the Qilian Mountains, China—Advantages of High-Definition Remote Sensing. *Forests*, 11 (11), 1188.
- Feduck C, McDermid G, Castilla G, 2018. Detection of Coniferous Seedlings in UAV Imagery. *Forests*, 9 (7), 432.
- Felipe-Lucia MR, Soliveres S, Penone C, Manning P, van der Plas F, Boch S, Prati D, Ammer C, Schall P, Gossner MM, Bauhus J, Buscot F, Blaser S, Blüthgen N, Frutos A de, Ehbrecht M, Frank K, Goldmann K, Hänsel F, Jung K, Kahl T, Nauss T, Oelmann Y, Pena R, Polle A, Renner S, Schloter M, Schöning I, Schrupf M, Schulze E-D, Solly E, Sorkau E, Stempfhuber B, Tschapka M, Weisser WW, Wubet T, Fischer M, Allan E, 2018. Multiple forest attributes underpin the supply of multiple ecosystem services. *Nature communications*, 9 (1), 4839.
- Feuillet T, Birre D, Milian J, Godard V, Clauzel C, Serrano-Notivoli R, 2020. Spatial dynamics of alpine tree lines under global warming: What explains the mismatch between tree densification and elevational upward shifts at the tree line ecotone? *Journal of Biogeography*, 47 (5), 1056–1068.
- Flandorfer P, 2019. Durchführung und Interpretation der Regressionsanalyse, 24.11.2023. Abgerufen am 23.12.2023, <https://www.scribbr.ch/statistik-ch/regressionsanalyse/>
- Fluri J, Anderwald P, Korner-Nievergelt F, Wipf S, Amrhein V, 2023. The Influence of Wild Ungulates on Forest Regeneration in an Alpine National Park. *Forests*, 14 (6), 1272.
- GLM - Messwiederholungen, 2021, 08.04.2023. Abgerufen am 25.12.2023, <https://www.ibm.com/docs/de/spss-statistics/saas?topic=statistics-glm-repeated-measures>

- Gobiet A, Kotlarski S, Beniston M, Heinrich G, Rajczak J, Stoffel M, 2014. 21st century climate change in the European Alps--a review. *The Science of the total environment*, 493, 1138–1151.
- Gugerli F, Brodbeck S, Bebi P, Bollmann K, Dauphin B, Gossner M, Krumm F, Peter M, Queloz V, Reiss G, Rellstab C, Stofer S, Arx G von, Wasem U, Zweifel R, 2022. Die Arve - Portrait eines Gebirgswaldbaums. WSL Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft.
- HAFL (Hochschule für Agrar- Forst- und Lebensmittelwissenschaften), ohne Datum. IMRESSUM. Abgerufen am 27.03.2023, <https://waldmonitoring.ch/>
- HAFL (Hochschule für Agrar- Forst- und Lebensmittelwissenschaften), ohne Datum. Waldverjüngung Hinweiskarte. Abgerufen am 27.03.2023, [https://waldmonitoring.ch/verjuengung?layers=kartenwerk%3Averj\\_blaetterdach\\_groesser\\_12m%2Ckarten-werk%3Averj\\_0-2m\\_unter\\_schirm%2Ckartenwerk%3Averj\\_0-5m\\_unter\\_schirm&opacity=1%2C1%2C1&visibility=false%2Ctrue%2Cfalse&x=826958&y=5934934&zoom=15.2311](https://waldmonitoring.ch/verjuengung?layers=kartenwerk%3Averj_blaetterdach_groesser_12m%2Ckarten-werk%3Averj_0-2m_unter_schirm%2Ckartenwerk%3Averj_0-5m_unter_schirm&opacity=1%2C1%2C1&visibility=false%2Ctrue%2Cfalse&x=826958&y=5934934&zoom=15.2311)
- Hagedorn F, Gavazov K, Alexander JM, 2019. Above- and belowground linkages shape responses of mountain vegetation to climate change. *Science (New York, N.Y.)*, 365 (6458), 1119–1123.
- Hamid M, Khuroo AA, Malik AH, Ahmad R, Singh CP, 2021. Elevation and aspect determine the differences in soil properties and plant species diversity on Himalayan mountain summits. *Ecological Research*, 36 (2), 340–352.
- Harsch MA, Hulme PE, McGlone MS, Duncan RP, 2009. Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming. *Ecology letters*, 12 (10), 1040–1049.
- Hartig F, 2022. DHARMA: residual diagnostics for hierarchical (multi-level/mixed) regression models, 09.08.2022. Abgerufen am 26.12.2023, <https://cran.r-project.org/web/packages/DHARMA/vignettes/DHARMA.html>
- Hauglin M, Bollandås OM, Gobakken T, Næsset E, 2017. Monitoring small pioneer trees in the forest-tundra ecotone: using multi-temporal airborne laser scanning data to model height growth. *Environmental monitoring and assessment*, 190 (1), 12.
- Hijmans RJ, 2023. raster: Geographic Data Analysis and Modeling, 14.10.2023. Abgerufen am 13.01.2023, <https://cran.r-project.org/web/packages/raster/index.html>
- Hilgers R-D, Heussen N, Stanzel S, 2019. ROC-Kurve. In: (Gressner) (Hrsg.). *Lexikon der Medizinischen Laboratoriumsdiagnostik*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, S. 2080.
- Hofgaard A, Wilmann B, 2002. Plant distribution pattern across the forest-tundra ecotone: The importance of treeline position. *Écoscience*, 9 (3), 375–385.
- Horneber HO, 2023. Besprechung vom 15. März 2023. Mündlich vom 15.03.2023.
- Horneber HO, Erbach A, Rosset C, 2021. Wissenstransfer Fernerkundung für die forstliche Praxis. Workshop 3: Input aus der Forschung.
- Horning N, 2008. Remote Sensing. In: *Encyclopedia of Ecology*. Elsevier, S. 2986–2994.
- Hosmer DW, Lemeshow S, Sturdivant RX, 2013. *Applied logistic regression* (3. ed.). Wiley, Hoboken, New Jersey, 500 S.
- Huuskonen S, Hynynen J, 2006. Timing and intensity of precommercial thinning and their effects on the first commercial thinning in Scots pine stands. *Silva Fennica*, 40 (4).
- Imangholiloo M, Saarinen N, Holopainen M, Yu X, Hyypä J, Vastaranta M, 2020. Using Leaf-Off and Leaf-On Multispectral Airborne Laser Scanning Data to Characterize Seedling Stands. *Remote Sensing*, 12 (20), 3328.
- Imangholiloo M, Saarinen N, Markelin L, Rosnell T, Näsi R, Hakala T, Honkavaara E, Holopainen M, Hyypä J, Vastaranta M, 2019. Characterizing Seedling Stands Using Leaf-Off and Leaf-On

- Photogrammetric Point Clouds and Hyperspectral Imagery Acquired from Unmanned Aerial Vehicle. *Forests*, 10 (5), 415.
- Imesch N, Stadler B, Bolliger M, Schneider O, 2015. Biodiversität im Wald: Ziele und Massnahmen. Vollzugshilfe zur Erhaltung und Förderung der biologischen Vielfalt im Schweizer Wald. Bundesamt für Umwelt, [https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/biodiversitaet/uv-umwelt-vollzug/biodiversitaet\\_imwaldzieleundmassnahmen.pdf.download.pdf/biodiversitaet\\_imwaldzieleundmassnahmen.pdf](https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/biodiversitaet/uv-umwelt-vollzug/biodiversitaet_imwaldzieleundmassnahmen.pdf.download.pdf/biodiversitaet_imwaldzieleundmassnahmen.pdf). Abgerufen am 30.03.2024.
- IUCN, 2023. Swiss National Park. Green List. International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, 2023. Abgerufen am 09.11.2023, <https://iucngreenlist.org/sites/swiss-national-park/>
- Käber Y, Bigler C, HilleRisLambers J, Hobi M, Nagel TA, Aakala T, Blaschke M, Brang P, Brzeziecki B, Carrer M, Cateau E, Frank G, Fraver S, Idoate-Lacasia J, Holik J, Kucbel S, Leyman A, Meyer P, Motta R, Samonil P, Seebach L, Stillhard J, Svoboda M, Szwagrzyk J, Vandekerckhove K, Vostarek O, Zlatanov T, Bugmann H, 2023. Sheltered or suppressed? Tree regeneration in unmanaged European forests. *Journal of Ecology*, 111 (10), 2281–2295.
- Kankare V, Vauhkonen J, Tanhuanpää T, Holopainen M, Vastaranta M, Joensuu M, Krooks A, Hyypä J, Hyypä H, Alho P, Viitala R, 2014. Accuracy in estimation of timber assortments and stem distribution – A comparison of airborne and terrestrial laser scanning techniques. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 97, 89–97.
- Karjalainen T, Korhonen L, Packalen P, Maltamo M, 2019. The transferability of airborne laser scanning based tree-level models between different inventory areas. *Canadian Journal of Forest Research*, 49 (3), 228–236.
- Korhonen L, Pippuri I, Packalén P, Heikkinen V, Maltamo M, Heikkilä J, 2013. Detection of the need for seedling stand tending using high-resolution remote sensing data. *Silva Fennica*, 47 (2).
- Korpela I, Tuomola T, Tokola T, Dahlin B, 2008. Appraisal of seedling stand vegetation with airborne imagery and discrete-return LiDAR – an exploratory analysis. *Silva Fennica*, 42 (5).
- Kullman L, 2007. Tree line population monitoring of *Pinus sylvestris* in the Swedish Scandes, 1973–2005: implications for tree line theory and climate change ecology. *Journal of Ecology*, 95 (1), 41–52.
- Landry S, St-Laurent M-H, Pelletier G, Villard M-A, 2020. The Best of Both Worlds? Integrating Sentinel-2 Images and airborne LiDAR to Characterize Forest Regeneration. *Remote Sensing*, 12 (15), 2440.
- LaRue E, Wagner F, Fei S, Atkins J, Fahey R, Gough C, Hardiman B, 2020. Compatibility of Aerial and Terrestrial LiDAR for Quantifying Forest Structural Diversity. *Remote Sensing*, 12 (9), 1407.
- Laserscanning, ohne Datum. Abgerufen am 29.05.2023, <https://www.swisstopo.admin.ch/de/wissens-fakten/geodaesie-vermessung/messverfahren/laser-scanning.html>
- LFI Landesforstinventar, 2023. Über das LFI. Weshalb ein Landesforstinventar, 29.11.2023. Abgerufen am 09.12.2023, <https://www.lfi.ch/lfi/lfi.php>
- Lillesand TM, Chipman JW, Kiefer RW, 2015. Remote sensing and image interpretation (7. ed.). Wiley, Hoboken, NJ, 719 S.
- Lim K, Treitz P, Wulder M, St-Onge B, Flood M, 2003. LiDAR remote sensing of forest structure. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 27 (1), 88–106.
- Lüder R, 2019. Bäume bestimmen. Knospen, Blüten, Blätter, Früchte ; der Naturführer für alle Jahreszeiten (2., erweiterte Auflage). Haupt Verlag, Bern, 368 S.

- Macias-Fauria M, Johnson EA, 2013. Warming-induced upslope advance of subalpine forest is severely limited by geomorphic processes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110 (20), 8117–8122.
- Martin M, Donoso P, Arsenault A, Bergeron Y, 2023. Editorial: Vanishing old-growth forests: what are their roles and values for society under global change? *Frontiers in Forests and Global Change*, 6.
- Marzban C, 2004. The ROC Curve and the Area under It as Performance Measures. *Weather and Forecasting*, 19 (6), 1106–1114.
- Morley PJ, Donoghue DN, Chen J-C, Jump AS, 2019. Quantifying structural diversity to better estimate change at mountain forest margins. *Remote Sensing of Environment*, 223, 291–306.
- Morley PJ, Donoghue DNM, Chen J-C, Jump AS, 2020. Montane forest expansion at high elevations drives rapid reduction in non-forest area, despite no change in mean forest elevation. *Journal of Biogeography*, 47 (11), 2405–2416.
- Næsset E, 2009. Effects of different sensors, flying altitudes, and pulse repetition frequencies on forest canopy metrics and biophysical stand properties derived from small-footprint airborne laser data. *Remote Sensing of Environment*, 113 (1), 148–159.
- Næsset E, Bjercknes K-O, 2001. Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment*, 78 (3), 328–340.
- Næsset E, Nelson R, 2007. Using airborne laser scanning to monitor tree migration in the boreal–alpine transition zone. *Remote Sensing of Environment*, 110 (3), 357–369.
- NaiS-Download, ohne Datum. Abgerufen am 24.12.2023, <https://www.gebirgswald.ch/de/nais-download.html>
- Nelson R, 2013. How did we get here? An early history of forestry lidar 1. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 39 (sup1), S6-S17.
- Økseter R, Bollandsås OM, Gobakken T, Næsset E, 2015. Modeling and predicting aboveground biomass change in young forest using multi-temporal airborne laser scanner data. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1–12.
- Ole Ørka H, Gobakken T, Næsset E, 2016. Predicting Attributes of Regeneration Forests Using Airborne Laser Scanning. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 42 (5), 541–553.
- Pinheiro JC, Bates DM, 2009. *Mixed-effects models in S and S-PLUS*. With 172 illustrations. Springer, New York, 528 S.
- Puliti S, Solberg S, Granhus A, 2019. Use of UAV Photogrammetric Data for Estimation of Biophysical Properties in Forest Stands Under Regeneration. *Remote Sensing*, 11 (3), 233.
- QGIS Development Team, 2022. QGIS Geographic Information System. Abgerufen am 06.01.2024, <https://www.qgis.org/>
- R: A Language and Environment for Statistical Computing, 2022. Abgerufen am 26.12.2023, <https://www.R-project.org/>
- Rast S, ohne Datum. Berechnung des Schlankheitsgrads (h/d-Wert) von Nadelbäumen. Abgerufen am 22.12.2023, <https://www.forst-rast.de/pflrechner07.html>
- Reese H, Nyström M, Nordkvist K, Olsson H, 2014. Combining airborne laser scanning data and optical satellite data for classification of alpine vegetation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 27, 81–90.
- Rhodes JR, McAlpine CA, Zuur AF, Smith GM, Ieno EN, 2009. GLMM Applied on the Spatial Distribution of Koalas in a Fragmented Landscape. In: Zuur AF, Ieno EN, Walker N, Saveliev AA, Smith GM (Hrsg.).

- Mixed effects models and extensions in ecology with R. Springer New York, New York, NY, S. 469–492.
- Rigling A, Schaffer HP, 2015. Waldbericht 2015. Zustand und Nutzung des Schweizer Waldes, 27.08.2015. Abgerufen am 30.03.2024, [https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wald-holz/uz-umwelt-zustand/waldbericht\\_2015.pdf.download.pdf/waldbericht\\_2015.pdf](https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wald-holz/uz-umwelt-zustand/waldbericht_2015.pdf.download.pdf/waldbericht_2015.pdf)
- Roussel J-R, Auty D, Coops NC, 2023a. Airborne LiDAR Data Manipulation and Visualization for Forestry Applications, 22.12.2023, <https://cran.r-project.org/package=lidR>
- Roussel J-R, Goodbody TR, Tompalski P, 2023b. The lidR package, 15.08.2023. Abgerufen am 22.12.2023, <https://r-lidar.github.io/lidRbook/index.html>
- Saxe H, Cannell MGR, Johnsen Ø, Ryan MG, Vourlitis G, 2001. Tree and forest functioning in response to global warming. *The New phytologist*, 149 (3), 369–399. Abgerufen am 03.04.2024.
- Schäfer T, 2016. Methodenlehre und Statistik. Einführung in Datenerhebung, deskriptive Statistik und Inferenzstatistik. Springer, Wiesbaden, 268 S., <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1617201>
- Schweizerischer Nationalpark, ohne Datuma. Bergföhrenwald. Abgerufen am 02.01.2024, <https://www.nationalpark.ch/de/flora-und-fauna/lebensraeume/bergfoehrenwald/>
- Schweizerischer Nationalpark, ohne Datumb. Forschen. Abgerufen am 14.05.2023, <https://www.nationalpark.ch/de/about/ueber-uns/institution/ziele/forschen/>
- Schweizerischer Nationalpark, ohne Datumc. Über uns. Abgerufen am 14.05.2023, <https://www.nationalpark.ch/de/about/ueber-uns/>
- Schweizerischer Nationalpark, ohne Datumd. Zahlen und Fakten. Abgerufen am 09.11.2023, <https://www.nationalpark.ch/de/about/ueber-uns/naturoase/zahlen-und-fakten/>
- Schweizerischer Nationalpark, ohne Datume. Ziele. Abgerufen am 14.05.2023, <https://www.nationalpark.ch/de/about/ueber-uns/institution/ziele/>
- Schweizerischer Nationalpark, 2012. Aufnahmeanleitung. Waldverjüngungserhebung mit Beurteilung von Wildverbiss und Stammverletzungen im SNP.
- Schweizerischer Nationalpark, 2021. Der Schweizerische Nationalpark neu auf der Grünen Liste der IUCN. Medienmitteilung vom 20. April 2021, 20.04.2021. Abgerufen am 09.11.2023, <https://www.nationalpark.ch/de/about/mediencorner/medienmitteilungen/medienmitteilungen-2021/der-schweizerische-nationalpark-neu-auf-der-gruenen-liste-der-iucn/>
- Shi Y, Wang T, Skidmore AK, Heurich M, 2018. Important LiDAR metrics for discriminating forest tree species in Central Europe. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 137, 163–174.
- Sokołowska J, Fuchs H, Celiński K, 2021. New Insight into Taxonomy of European Mountain Pines, *Pinus mugo* Complex, Based on Complete Chloroplast Genomes Sequencing. *Plants (Basel, Switzerland)*, 10 (7).
- Solár J, Janiga M, 2013. Long-term Changes in Dwarf Pine (*Pinus mugo*) Cover in the High Tatra Mountains, Slovakia. *Mountain Research and Development*, 33 (1), 51–62.
- swisstopo, ohne Datuma. Beschaffung von LiDAR-Daten. Abgerufen am 22.11.2023, <https://www.swisstopo.admin.ch/de/wissen-fakten/geoinformation/lidar-daten.html#ui-collapse-261>
- swisstopo, ohne Datumb. swissALTI3D.
- swisstopo, ohne Datumc. swissSURFACE3D. Abgerufen am 22.12.2023, <https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/height/surface3d.html>

- Thieme N, Martin Bollandsås O, Gobakken T, Næsset E, 2011. Detection of small single trees in the forest-tundra ecotone using height values from airborne laser scanning. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 37 (3), 264–274.
- Tsai T, Gill J, 2013. Interactions in Generalized Linear Models: Theoretical Issues and an Application to Personal Vote-Earning Attributes. *Social Sciences*, 2 (2), 91–113.
- Vanneste T, Michelsen O, Graae BJ, Kyrkjeeide MO, Holien H, Hassel K, Lindmo S, Kapás RE, Frenne P de, 2017. Impact of climate change on alpine vegetation of mountain summits in Norway. *Ecological Research*, 32 (4), 579–593.
- Vastaranta M, Wulder MA, White JC, Pekkarinen A, Tuominen S, Ginzler C, Kankare V, Holopainen M, Hyyppä J, Hyyppä H, 2013. Airborne laser scanning and digital stereo imagery measures of forest structure: comparative results and implications to forest mapping and inventory update. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 39 (5), 382–395.
- Vauhkonen J, Maltamo M, McRoberts RE, Næsset E, 2014. Introduction to Forestry Applications of Airborne Laser Scanning. In: Maltamo M, Næsset E, Vauhkonen J (Hrsg.). *Forestry Applications of Airborne Laser Scanning. Concepts and Case Studies*. Springer Netherlands; Imprint: Springer, Dordrecht, S. 1–16.
- Wallace L, Lucieer A, Watson CS, 2014. Evaluating Tree Detection and Segmentation Routines on Very High Resolution UAV LiDAR Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52 (12), 7619–7628.
- Winkler M, Lamprecht A, Steinbauer K, Hülber K, THEURILLAT J-P, Breiner F, CHOLER P, Ertl S, Gutiérrez Girón A, Rossi G, VITTOZ P, Akhalkatsi M, Bay C, Benito Alonso J-L, Bergström T, Carranza ML, Corcket E, Dick J, Erschbamer B, Fernández Calzado R, Fosaa AM, Gavilán RG, Ghosn D, Gigauri K, Huber D, Kanka R, Kazakis G, Klipp M, Kollar J, Kudernatsch T, Larsson P, Mallaun M, Michelsen O, Moiseev P, Moiseev D, Molau U, Molero Mesa J, Di Morra Cella U, Nagy L, Petey M, Puşcaş M, Rixen C, STANISCI A, Suen M, Syverhuset AO, Tomaselli M, Unterluggauer P, Ursu T, Villar L, Gottfried M, Pauli H, 2016. The rich sides of mountain summits - a pan-European view on aspect preferences of alpine plants. *Journal of Biogeography*, 43 (11), 2261–2273.
- Wipf S, 2023. Besprechung 16. Januar 2023 vom 16.01.2023.
- Wirth C, Gleixner G, Heimann M, 2009. Old-Growth Forests: Function, Fate and Value – an Overview. In: Wirth C, Gleixner G, Heimann M (Hrsg.). *Old-Growth Forests*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, S. 3–10.
- WSL, 2023. Der Schweizer Wald leidet unter den Wetterextremen. WSL Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, 30.05.2023. Abgerufen am 09.12.2023, <https://www.wsl.ch/de/news/der-schweizer-wald-leidet-unter-den-wetterextremen/>
- Yirdaw E, Starr M, Negash M, Yimer F, 2015. Influence of topographic aspect on floristic diversity, structure and treeline of afro-montane cloud forests in the Bale Mountains, Ethiopia. *Journal of Forestry Research*, 26 (4), 919–931.
- Yu X, Hyyppä J, Litkey P, Kaartinen H, Vastaranta M, Holopainen M, 2017. Single-Sensor Solution to Tree Species Classification Using Multispectral Airborne Laser Scanning. *Remote Sensing*, 9 (2), 108.
- Zhao K, Suarez JC, Garcia M, Hu T, Wang C, Londo A, 2018. Utility of multitemporal lidar for forest and carbon monitoring: Tree growth, biomass dynamics, and carbon flux. *Remote Sensing of Environment*, 204, 883–897.

Zuur AF, Ieno EN, Walker NJ, Saveliev AA, Smith GM, 2009. Zero-Truncated and Zero-Inflated Models for Count Data. In: Zuur AF, Ieno EN, Walker N, Saveliev AA, Smith GM (Hrsg.). Mixed effects models and extensions in ecology with R. Springer New York, New York, NY, S. 261–293.

Quelle Titelbild: eigene Bilder, Darstellung nach swisstopo

## Dank

An erster Stelle möchte ich mich bei den Betreuungspersonen bedanken. Sonja Wipf für die Möglichkeit diese Arbeit im Park zu schreiben, die Einführung ins Thema und die regelmässigen Austausche, die immer wieder richtungsweisend waren. Auch sonst für alle Unterstützung während der ganzen, doch langen Dauer beim Verfassen der Arbeit. Dies geht von spontanen Übernachtungsmöglichkeiten bis hin zum Durchlesen und Feedback geben zum ersten Wurf der Arbeit. Auch ein grosser Dank gilt Hannes Horneber, der alle Daten und Informationen zum waldmonitoring.ch zur Verfügung gestellt und auch geduldig erklärt hat. Auch danke ich ihm für die Unterstützung der Arbeit und die Beantwortung von vielen Fragen. Grosser Dank geht auch an Jean-Jacques Thormann, der die Verbindung zum Park hergestellt hat, die Arbeit betreut und gesteuert hat.

Nicht direkter Betreuer aber gerade so wichtige Unterstützung hat Nelson Marreros im Bereich der statistischen Auswertungen und Modelle gegeben. Vielen Dank für die investierte Zeit, Geduld und Recherchen. Ebenso danke ich Attilio Benini, der bei R-Fragen weitergeholfen hat.

Ein grosser Dank geht an alle Beteiligten der Feldarbeit. Allen voran Josh King, der als Praktikant beim SNP fast an allen Aufnahmetagen dabei war. Wir hatten einerseits eine super effiziente Arbeitsweise aber auch eine sonst eine sehr gute Zeit – thank you. Aber auch den vielen freiwilligen Helferinnen und Helfer, die sich an der Arbeit beteiligt haben. Sie haben grossen Einsatz gezeigt und waren schnell einsatzbereit. Es sind zu viele, um diese nun einzeln aufzuzählen. Der Dank gilt dem ganzen SNP-Team welches immer sehr motiviert, motivierend und unterstützend zur Seite stand.

Zudem möchte ich auch meinen Eltern danken, die sich an der Feldarbeit beteiligt haben, die Arbeit Korrektur gelesen haben und mich bei den Höhen und Tiefen während über die ganze Zeit begleitet haben. Auch danke ich sonst meinem Umfeld für die Unterstützung und Geduld während der ganzen Zeit. Auch bei allen, die mich beim Wandern immer wieder vom Bäume zählen abgehalten haben.

Ein weiterer Dank gilt meinem Arbeitgeber, dem Kanton Bern für die Flexibilität während der Datenerhebung sowie für den unbezahlten Urlaub für das Verfassen dieser Arbeit.

In diesem Sinne – Danke an alle Beteiligten!

# Anhang 1: SNP Anleitung Verbissaufnahmen

## Aufnahmeanleitung

Waldverjüngungserhebung mit Beurteilung von Wildverbiss und Stammverletzungen im SNP

### Zweck

Diese Anleitung beschreibt das Vorgehen im Feld bei der Erhebung der Waldverjüngung mit Beurteilung des Wildverbisses und Stammverletzungen im Schweizerischen Nationalpark (SNP). Sie soll dazu dienen, dass die Verjüngungsinventur im Schweizerischen Nationalpark von jedem beteiligten Feldmitarbeiter gleich ausgeführt wird und die aufgenommenen Daten der Wiederholungsinventuren vergleichbar sind. Entstanden ist dieses Dokument bei der zweiten Inventur auf Il Fuorn im Jahr 2012. Es ist eine Zusammenstellung aus Methodenbeschreibungen des Projektes UWIWA, Praktikumsberichten beteiligter Studenten und mündlicher Überlieferungen.

Ein klares Aufnahmeverfahren ist für die Datengenerierung im Feld ebenso unerlässlich wie das exakte Vorgehen. Eine saubere statistische Auswertung bedingt konsistente Daten, d.h. klare Regeln bei der Datenaufnahme. Vorliegende Anleitung soll daher nicht angepasst oder verändert werden und gilt von allen Feldmitarbeitern eingehalten zu werden.

### Vorbereitung der Feldarbeit

Bevor mit der Aufnahme im Feld begonnen werden kann, müssen die Materialien und Formulare bereitgestellt werden.

Für die Wiederholungsaufnahme benötigtes Material:

- GPS-Gerät zum Auffinden der Stichproben
- Messband
- Skistock zum Befestigen des Messbandes im Stichprobenzentrum
- Doppelmeter
- Stab mit Höhenklassendifferenzierung
- Schreibunterlage
- Karte mit Stichprobenraster
- Bleistift, Filzstift, Radiergummi
- Aufnahmeformulare
- Kamera zur Dokumentation
- Markierungsdeckel und Metallrohre (Ersatz für abgefressene)
- Durchmessermaßband
- Metalldetektor
- Erste Hilfe Set oder kleine Apotheke
- Kompass
- Neigungsmesser

In der Val Trupchun sind die Plots zusätzlich mit roter Farbe an Bäumen oder Steinen versichert. Aus diesem Grund ist es wahrscheinlich notwendig, die Farbe zu erneuern und folgendes Material bereitzustellen:

- Markierungsfarbe (rot, Spraydose)

(Material ist im CPW Turm deponiert.)

### Aufsuchen der Stichprobenflächen

Für das Auffinden der Stichprobenflächen ist ein GPS-Gerät notwendig. Die Stichprobenmittelpunkte sind mittels Metallrohren und Plastikdeckel markiert. In der Erstaufnahme auf Il Fuorn wurden gelbe Deckel verwendet, bei der Zweitaufnahme fehlende mit roten ersetzt. Die Suche danach kann mit einem Metalldetektor vereinfacht werden und ist teilweise unerlässlich. Es empfiehlt sich, bei erfolgloser Suche nebst der eingemessenen Koordinaten auch die theoretischen Koordinaten zu suchen.

In der Val Trupchun sind rote Punkte an Bäumen und Steinen eine enorme Hilfe für das schnelle Auffinden der Stichprobenzentren. Azimut und Distanzangaben finden sich in der Tabelle „Versicherungen“. Aktualisieren der Angaben zu Versicherungsbäumen nicht vergessen!

### Verjüngungs- und Verbissaufnahmen

Es werden zwei Kreisflächen ausgehend vom Stichprobenzentrum aufgenommen. In der ersten Kreisfläche mit Horizontalradius 4 m werden Bäume im Anwuchs und Aufwuchs ab einem Alter von 1 Jahr bis zu einer Höhe von 1.3 m erfasst. Die Aufnahme erfolgt in folgenden Höhenklassen:

EntwStufeName	EntwStufeBeschreibung
k	Keimlinge
v0	1-jährig - 10cm
v1	10 - 40cm
v2	40 - 70cm
v3	70 - 100cm
v4	100 - 130cm

In der zweiten Kreisfläche, ebenfalls vom Zentrum aus gemessen, wird der Horizontalradius von 8 m angewandt und folgende Klassen unterschieden:

EntwStufeName	EntwStufeBeschreibung
a2	130cm - 8cm BHD
b1	8cm BHD - 16cm BHD
b2	16cm BHD - 24cm BHD

### Radiuskorrektur in Abhängigkeit der Neigung

Um stets die gleiche Horizontalfläche von 4 m bzw. 8 m zu beproben, werden die Kreisradien neigungskorrigiert. Im Feld wird dann der korrigierte Radius hangparallel gemessen, d.h. der korrigierte Radius entspricht dem Schrägmass. Angaben zur Stichprobenneigung finden sich in der Datenbank.

### Stichprobenstatus

Als erstes wird entschieden, ob eine Stichprobe aufgenommen wird. Eine nicht aufnehmbare Stichprobe kriegt den Status „nicht aufgenommen“. Stichproben, welche nicht gefunden werden können, kriegen den Status „nicht gefunden“. Bei der Wiederholungsinventur wird das Nichtfinden der Markeirung der einzige Grund sein für eine Nichtaufnahme.

### Waldcharakter

Beurteilt wird der Bestand, in dem die Stichprobe liegt. Kategorien gemäss Formular.

### Brandspuren

Verkohlte Bäume, Kohlenstücke oder andere Hinweise auf Feuer.

#### Vegetation

Vorherrschende, den Aspekt bestimmende Pflanzengruppe wird festgehalten. Gras, Moos, Zwergsträucher als häufigste auf dem Aufnahmeblatt. Farn, Hochstauden, etc. können eingetragen werden.

#### Deckungsgrade

Schätzung der Überschirmung der Bodenvegetation (Kräuter, Gras, Moos, Zwergsträucher), der Strauchvegetation und der Baumschicht in der 50 m<sup>2</sup> Fläche.

#### Oberbodeneigenschaften und Humusform

Erfasst wird, ob eine Streuschicht vorhanden ist oder nicht. Weiter wird die Humusform beurteilt und in den Klassen Mull, Moder oder Rohhumus festgehalten.

#### Auszählen der Stammzahlen

Im Stichprobenzentrum beim Eisenrohr wird Richtung Norden der Skistock eingesteckt. Das Massband wird fixiert und in entsprechenden neigungskorrigierten 4m Horizontalradien werden alle Bäume pro Baumart in jeder Entwicklungsstufe gezählt. In der grösseren Fläche mit 8m Horizontalradius werden nur Bäume über 1.3 m gezählt.

Bei Zwieselwuchs oder mehrstämmigen Individuen ist stets die Durchmesserhöhe massgebend, ob ein oder mehrere Stämme gezählt werden. Tritt die Verzweiselung unter 1.3 m auf, so werden zwei Stämme gezählt. Tritt die Verzweiselung allerdings über 1.3 m auf, wird nur der Hauptstamm gezählt. Das gleiche gilt für alle mehrstämmigen Bäume. Es gilt für Zwieselbäume, dass der dünnere Zwieselstamm mindestens halb so dick sein muss wie der dickere. Diese Definition wird auch übertragen auf mehrstämmige Bäume.

Es werden nur aufrechte Stämme gezählt. Als aufrecht gelten alle Stämme, welche weniger als 45 Grad geneigt sind.

Mindestens der Mittelpunkt der Stammachse muss innerhalb des Aufnahmeradius liegen, damit ein Baum zur Stichprobe gezählt wird.

#### Ansprache auf Verbiss

Beurteilt wird der Jahresverbiss der Terminaltriebe. Es wird der Endtrieb des Vorjahres betrachtet, wobei ein mögliches Verbissereignis entweder im Sommer des Vorjahres oder im vergangenen Winter stattgefunden haben kann.

#### Ansprache der Stammverletzungen

Stammverletzungen werden beurteilt nach Verursacher. Unterschieden werden Schäl- und Feg-/Schlag-schäden.

#### Anfügen von Bemerkungen

Das Aufnahmeformular enthält Platz für etwaige Bemerkungen zum Bestand, besonderen Verhältnissen und Beobachtungen auf der Stichprobenfläche.

## Anhang

a. Deckungsgrade der Baumschicht zur Schulung und Eichung des Augenmasses

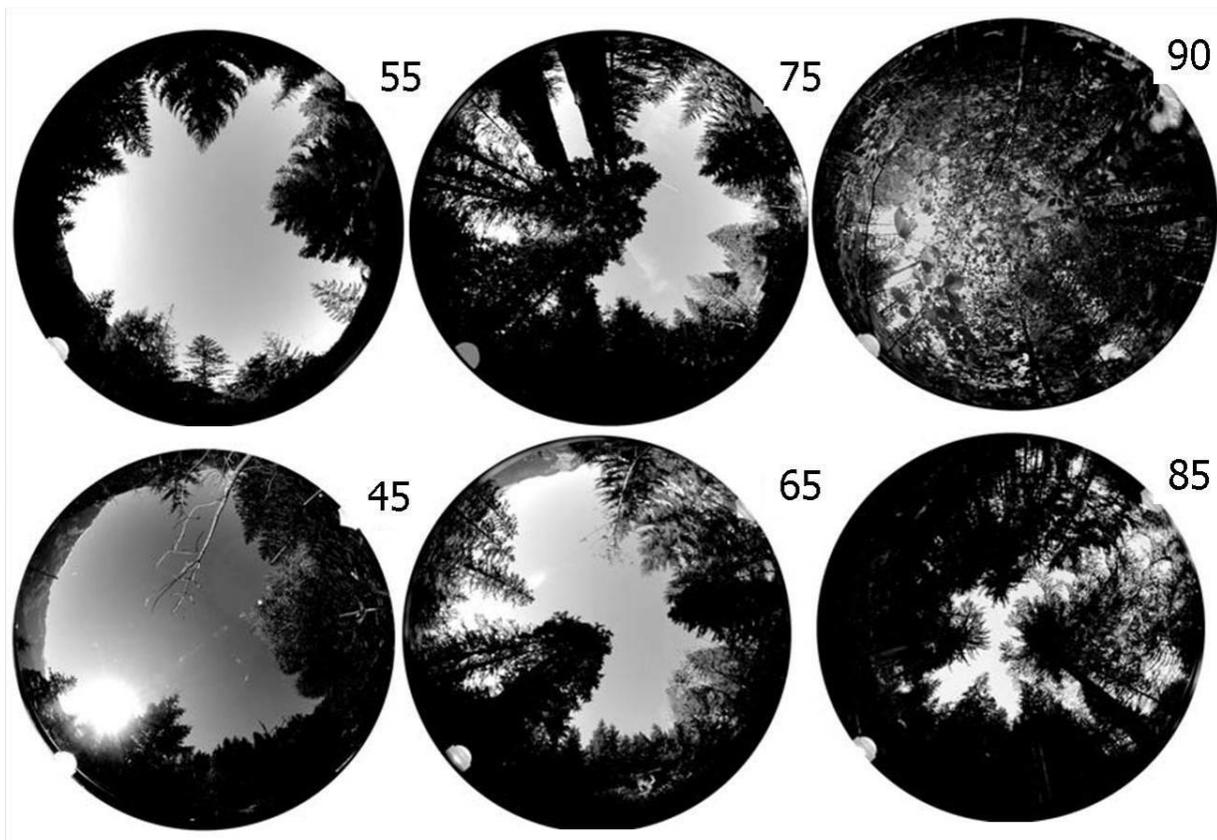


Abbildung 1: Beispiele für die Beschattung; Angaben in % (aus Keller 2005, S. 168).

b. Radius Tabelle

[%]	4	8	[%]	4	8	[%]	4	8
1	4.00	8.00	48	4.21	8.43	95	4.70	9.40
2	4.00	8.00	49	4.22	8.44	96	4.71	9.42
3	4.00	8.00	50	4.23	8.46	97	4.72	9.44
4	4.00	8.00	51	4.24	8.48	98	4.73	9.47
5	4.00	8.00	52	4.25	8.49	99	4.74	9.49
6	4.00	8.01	53	4.26	8.51	100	4.76	9.51
7	4.00	8.01	54	4.26	8.53	101	4.77	9.54
8	4.01	8.01	55	4.27	8.55	102	4.78	9.56
9	4.01	8.02	56	4.28	8.56	103	4.79	9.59
10	4.01	8.02	57	4.29	8.58	104	4.80	9.61
11	4.01	8.02	58	4.30	8.60	105	4.82	9.63
12	4.01	8.03	59	4.31	8.62	106	4.83	9.66
13	4.02	8.03	60	4.32	8.64	107	4.84	9.68
14	4.02	8.04	61	4.33	8.66	108	4.85	9.71
15	4.02	8.04	62	4.34	8.68	109	4.86	9.73
16	4.03	8.05	63	4.35	8.70	110	4.88	9.75
17	4.03	8.06	64	4.36	8.72	111	4.89	9.78
18	4.03	8.06	65	4.37	8.74	112	4.90	9.80
19	4.04	8.07	66	4.38	8.76	113	4.91	9.83
20	4.04	8.08	67	4.39	8.78	114	4.93	9.85
21	4.04	8.09	68	4.40	8.80	115	4.94	9.88
22	4.05	8.10	69	4.41	8.82	116	4.95	9.90
23	4.05	8.10	70	4.42	8.84	117	4.96	9.92

<b>24</b>	4.06	8.11	<b>71</b>	4.43	8.86	<b>118</b>	4.97	9.95
<b>25</b>	4.06	8.12	<b>72</b>	4.44	8.88	<b>119</b>	4.99	9.97
<b>26</b>	4.07	8.13	<b>73</b>	4.45	8.90	<b>120</b>	5.00	10.00
<b>27</b>	4.07	8.14	<b>74</b>	4.46	8.92	<b>121</b>	5.01	10.02
<b>28</b>	4.08	8.15	<b>75</b>	4.47	8.94	<b>122</b>	5.02	10.05
<b>29</b>	4.08	8.16	<b>76</b>	4.48	8.97	<b>123</b>	5.04	10.07
<b>30</b>	4.09	8.17	<b>77</b>	4.49	8.99	<b>124</b>	5.05	10.10
<b>31</b>	4.09	8.19	<b>78</b>	4.50	9.01	<b>125</b>	5.06	10.12
<b>32</b>	4.10	8.20	<b>79</b>	4.52	9.03	<b>126</b>	5.07	10.15
<b>33</b>	4.10	8.21	<b>80</b>	4.53	9.05	<b>127</b>	5.09	10.17
<b>34</b>	4.11	8.22	<b>81</b>	4.54	9.08	<b>128</b>	5.10	10.20
<b>35</b>	4.12	8.23	<b>82</b>	4.55	9.10	<b>129</b>	5.11	10.22
<b>36</b>	4.12	8.25	<b>83</b>	4.56	9.12	<b>130</b>	5.12	10.25
<b>37</b>	4.13	8.26	<b>84</b>	4.57	9.14	<b>131</b>	5.14	10.27
<b>38</b>	4.14	8.27	<b>85</b>	4.58	9.16	<b>132</b>	5.15	10.29
<b>39</b>	4.14	8.29	<b>86</b>	4.59	9.19	<b>133</b>	5.16	10.32
<b>40</b>	4.15	8.30	<b>87</b>	4.61	9.21	<b>134</b>	5.17	10.34
<b>41</b>	4.16	8.32	<b>88</b>	4.62	9.23	<b>135</b>	5.18	10.37
<b>42</b>	4.17	8.33	<b>89</b>	4.63	9.26	<b>136</b>	5.20	10.39
<b>43</b>	4.17	8.35	<b>90</b>	4.64	9.28	<b>137</b>	5.21	10.42
<b>44</b>	4.18	8.36	<b>91</b>	4.65	9.30	<b>138</b>	5.22	10.44
<b>45</b>	4.19	8.38	<b>92</b>	4.66	9.33	<b>139</b>	5.23	10.47
<b>46</b>	4.20	8.39	<b>93</b>	4.67	9.35	<b>140</b>	5.25	10.49
<b>47</b>	4.20	8.41	<b>94</b>	4.69	9.37	<b>141</b>	5.26	10.52

Tabelle 1: Radien im Schrägmass der Horizontalmasse 4 m und 8m in Abhängigkeit der Hangneigung.



## Anhang 3: Tabelle Neigungskorrektur

<b>[%]</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>[%]</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>[%]</b>	<b>4</b>	<b>8</b>
1	4.00	8.00	48	4.21	8.43	95	4.70	9.40
2	4.00	8.00	49	4.22	8.44	96	4.71	9.42
3	4.00	8.00	50	4.23	8.46	97	4.72	9.44
4	4.00	8.00	51	4.24	8.48	98	4.73	9.47
5	4.00	8.00	52	4.25	8.49	99	4.74	9.49
6	4.00	8.01	53	4.26	8.51	100	4.76	9.51
7	4.00	8.01	54	4.26	8.53	101	4.77	9.54
8	4.01	8.01	55	4.27	8.55	102	4.78	9.56
9	4.01	8.02	56	4.28	8.56	103	4.79	9.59
10	4.01	8.02	57	4.29	8.58	104	4.80	9.61
11	4.01	8.02	58	4.30	8.60	105	4.82	9.63
12	4.01	8.03	59	4.31	8.62	106	4.83	9.66
13	4.02	8.03	60	4.32	8.64	107	4.84	9.68
14	4.02	8.04	61	4.33	8.66	108	4.85	9.71
15	4.02	8.04	62	4.34	8.68	109	4.86	9.73
16	4.03	8.05	63	4.35	8.70	110	4.88	9.75
17	4.03	8.06	64	4.36	8.72	111	4.89	9.78
18	4.03	8.06	65	4.37	8.74	112	4.90	9.80
19	4.04	8.07	66	4.38	8.76	113	4.91	9.83
20	4.04	8.08	67	4.39	8.78	114	4.93	9.85
21	4.04	8.09	68	4.40	8.80	115	4.94	9.88
22	4.05	8.10	69	4.41	8.82	116	4.95	9.90
23	4.05	8.10	70	4.42	8.84	117	4.96	9.92
24	4.06	8.11	71	4.43	8.86	118	4.97	9.95
25	4.06	8.12	72	4.44	8.88	119	4.99	9.97
26	4.07	8.13	73	4.45	8.90	120	5.00	10.00
27	4.07	8.14	74	4.46	8.92	121	5.01	10.02
28	4.08	8.15	75	4.47	8.94	122	5.02	10.05
29	4.08	8.16	76	4.48	8.97	123	5.04	10.07
30	4.09	8.17	77	4.49	8.99	124	5.05	10.10
31	4.09	8.19	78	4.50	9.01	125	5.06	10.12
32	4.10	8.20	79	4.52	9.03	126	5.07	10.15
33	4.10	8.21	80	4.53	9.05	127	5.09	10.17
34	4.11	8.22	81	4.54	9.08	128	5.10	10.20
35	4.12	8.23	82	4.55	9.10	129	5.11	10.22
36	4.12	8.25	83	4.56	9.12	130	5.12	10.25
37	4.13	8.26	84	4.57	9.14	131	5.14	10.27
38	4.14	8.27	85	4.58	9.16	132	5.15	10.29
39	4.14	8.29	86	4.59	9.19	133	5.16	10.32
40	4.15	8.30	87	4.61	9.21	134	5.17	10.34
41	4.16	8.32	88	4.62	9.23	135	5.18	10.37
42	4.17	8.33	89	4.63	9.26	136	5.20	10.39
43	4.17	8.35	90	4.64	9.28	137	5.21	10.42
44	4.18	8.36	91	4.65	9.30	138	5.22	10.44
45	4.19	8.38	92	4.66	9.33	139	5.23	10.47
46	4.20	8.39	93	4.67	9.35	140	5.25	10.49
47	4.20	8.41	94	4.69	9.37	141	5.26	10.52

# Anhang 4: Modell-Validierung – Räumliche Verschiebung der Waldverjüngung über die Zeit

## Übergeordnetes Modell

Die Anova zeigt, dass alle Faktoren im Modell hoch signifikant sind.

```
Analysis of Deviance Table (Type II wald chisquare tests)

Response: binom

```

	Chisq	Df	Pr(>Chisq)	
as.factor(Jahr)	54.184	2	1.715e-12	***
baumart	397.476	3	< 2.2e-16	***
sd_PlotNeigung	33.440	1	7.350e-09	***
cos_Exposition	128.283	1	< 2.2e-16	***

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Abbildung 41 – Anova, übergeordnetes Modell (eigene Darstellung)

Die Residuen im Modell zeigen, dass die minimalen und maximalen Werte etwas ungleich verteilt sind. Der Median liegt aber nahe bei null und die Werte des Q1 und Q3 liegen absolut betrachtet nahe zusammen.

AIC	BIC	logLik	deviance	df.resid
2161.7	2213.3	-1071.9	2143.7	2271

scaled residuals:				
Min	1Q	Median	3Q	Max
-7.3656	-0.4781	-0.1645	0.5653	3.5683

Abbildung 42 – AIC sowie Residuen-Skala, übergeordnetes Modell (eigene Darstellung)

Der QQ-Plot der Residuen des Modells zeigt keine Auffälligkeiten. Auch die Tests aus dem DHARMA-Package zeigen keine signifikanten Unterschiede. Die Residuen des Modells zeigen auch im Vergleich zu den vorhergesagten Residuen keinen signifikanten Unterschied

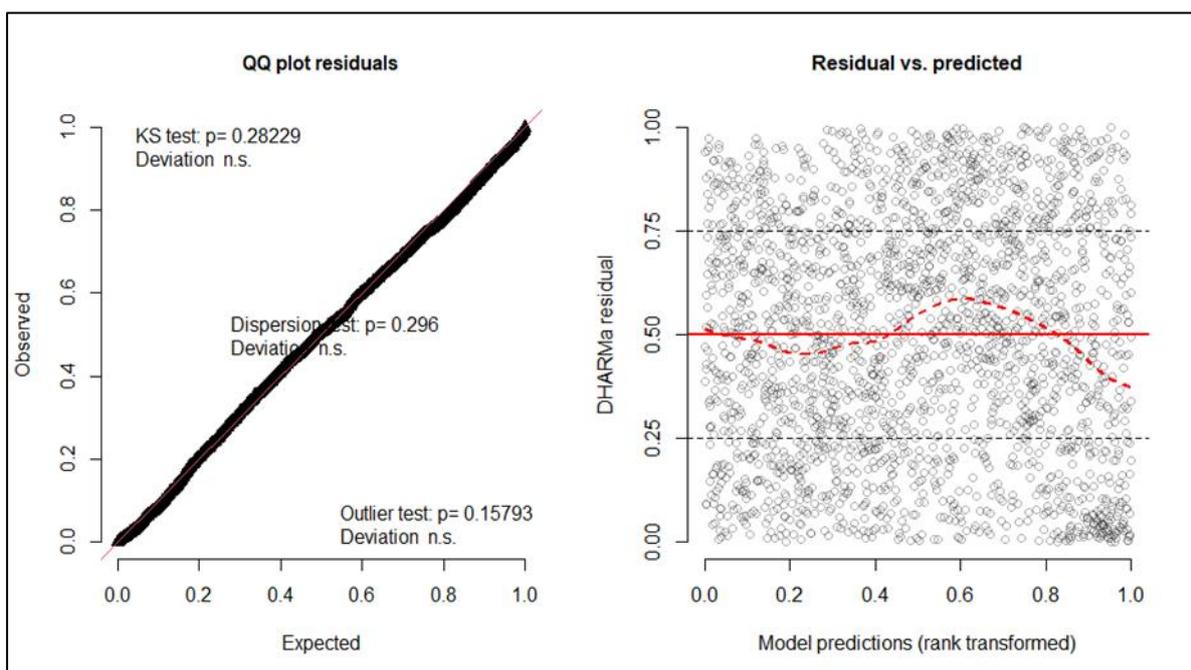


Abbildung 43 – Modellvalidierung, übergeordnetes Modell

Die Residuen der einzelnen Faktoren zeigen ebenfalls keinen signifikanten Unterschied zu den vorhergesagten Residuen auf.

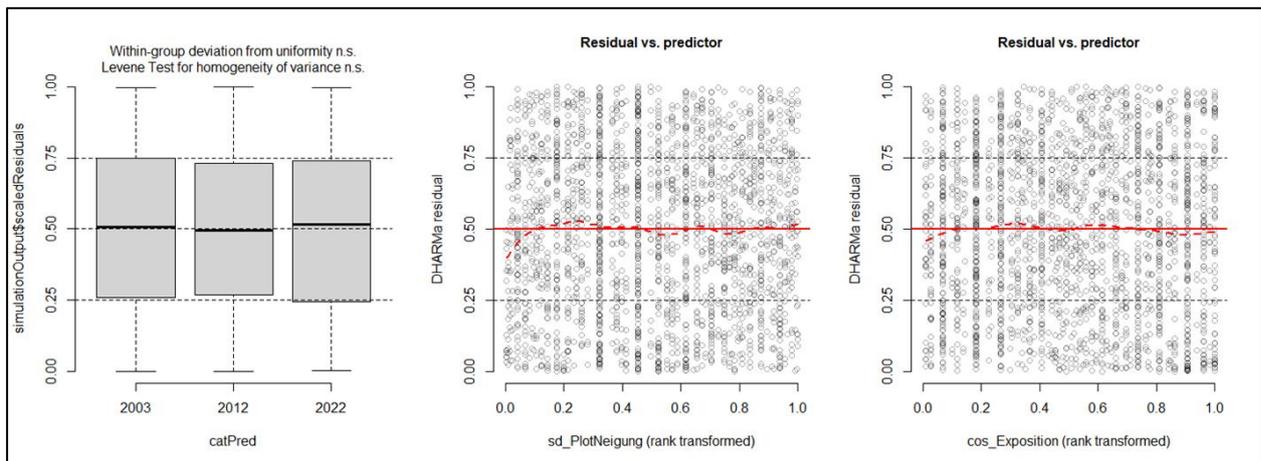


Abbildung 44 - Modellvalidierung - Residuen der Faktoren, übergeordnetes Modell (eigene Darstellung)

### Modell Arve

Die Anova zeigt, dass alle Faktoren im Modell hoch signifikant sind.

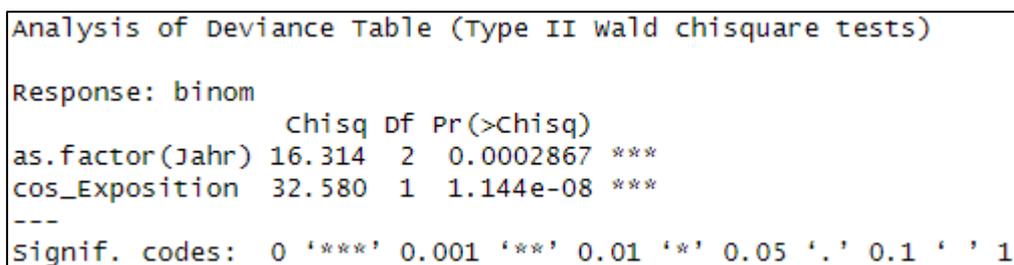


Abbildung 45 - Modellvalidierung - Anova, Modell Arve (eigene Darstellung)

Der Median der Residuen liegt sehr nahe bei null und die Werte des Q1 und Q3, sowie die minimalen und maximalen Werte liegen absolut betrachtet nahe zusammen.

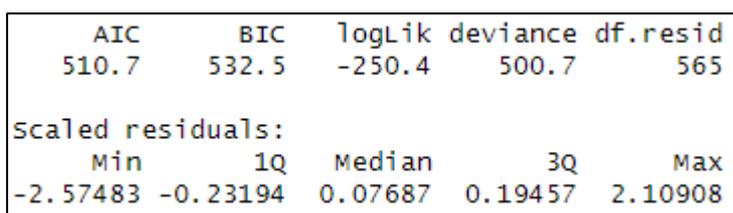


Abbildung 46 - Modellvalidierung - AIC, Residuals, Modell Arve (eigene Darstellung)

Der QQ-Plot der Residuen des Modells zeigt keine Auffälligkeiten. Auch die Tests aus dem DHARMA-Package zeigen keine signifikanten Unterschiede. Die Residuen des Modells zeigen auch im Vergleich zu den vorhergesagten Residuen keinen signifikanten Unterschied.

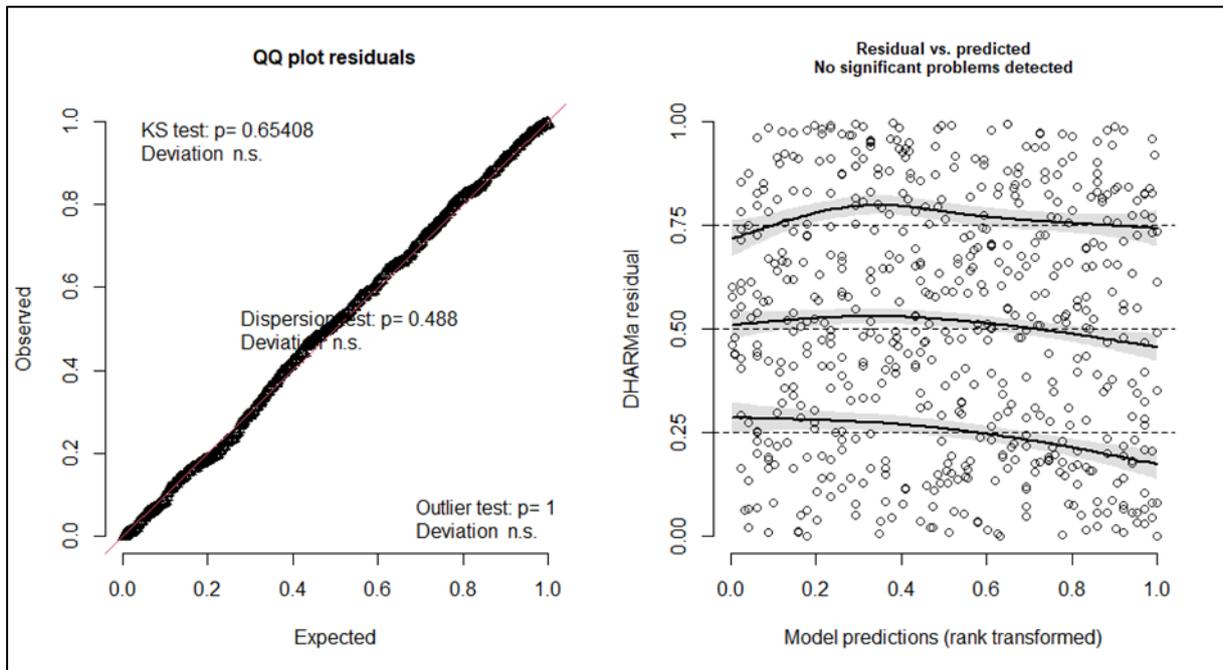


Abbildung 47 - Modellvalidierung - Residuen der Faktoren, Modell Arve (eigene Darstellung)

Die Residuen der einzelnen Faktoren zeigen ebenfalls keinen signifikanten Unterschied zu den vorhergesagten Residuen auf.

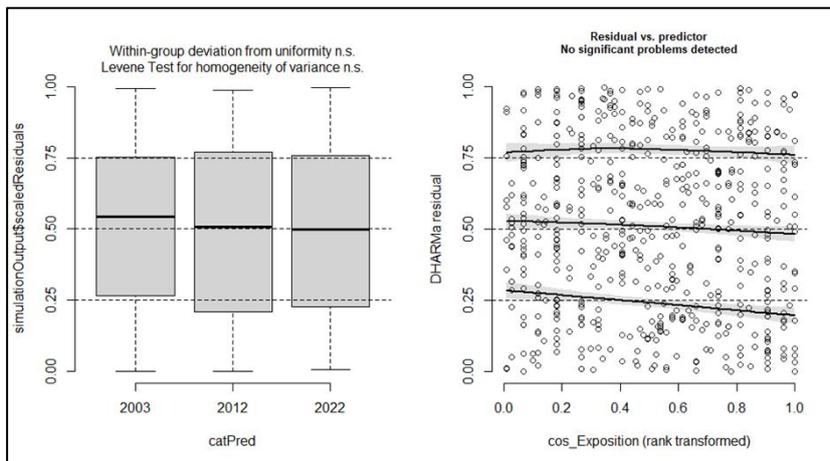


Abbildung 48 - Modellvalidierung - Residuen der Faktoren, Modell Arve (eigene Darstellung)

### Modell Fichte

Die Anova zeigt, dass alle Faktoren im Modell hoch signifikant sind.

```

Analysis of Deviance Table (Type II wald chisquare tests)

Response: binom
             chisq Df Pr(>Chisq)
sd_Plothöhe  17.480  1  2.903e-05 ***
cos_Exposition 30.091  1  4.123e-08 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

Abbildung 49 - Modellvalidierung - Anova, Modell Fichte (eigene Darstellung)

Der Median der Residuen liegt sehr nahe bei null. Die Werte des Q1 und Q3 liegen absolut betrachtet nahe zusammen. Die minimalen- und maximalen Werte liegen verhältnismässig weit auseinander, dies

wird aber hier nicht als problematisch erachtet, da die anderen Validierungsfaktoren keine Hinweise für ein nicht valables Modell liefern.

AIC	BIC	logLik	deviance	df.resid
339.3	356.7	-165.6	331.3	566

scaled residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-1.6540	-0.1542	-0.0317	-0.0006	4.7973

Abbildung 50 - Modellvalidierung - AIC, Residuals, Modell Fichte (eigene Darstellung)

Der QQ-Plot der Residuen des Modells zeigt keine Auffälligkeiten. Auch die Tests aus dem DHARMA-Package zeigen keine signifikanten Unterschiede. Die Residuen des Modells zeigen auch im Vergleich zu den vorhergesagten Residuen keinen signifikanten Unterschied

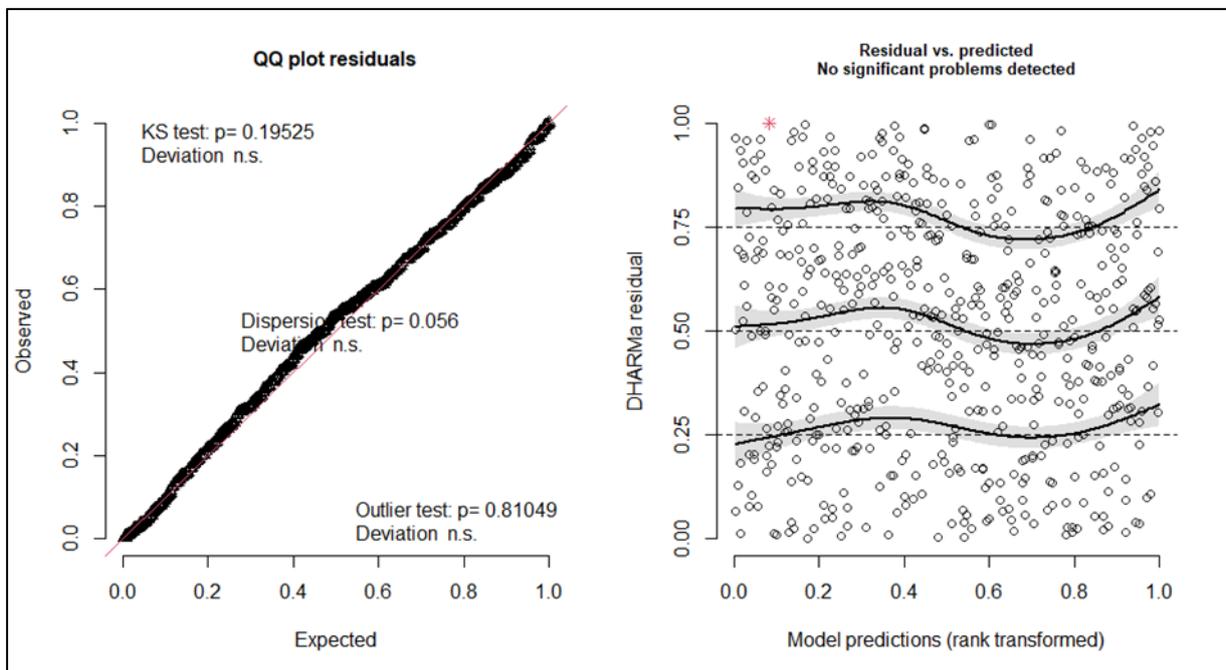


Abbildung 51 - Modellvalidierung - Residuen der Faktoren, Modell Fichte (eigene Darstellung)

Die Residuen der einzelnen Faktoren zeigen ebenfalls keinen signifikanten Unterschied zu den vorhergesagten Residuen auf.

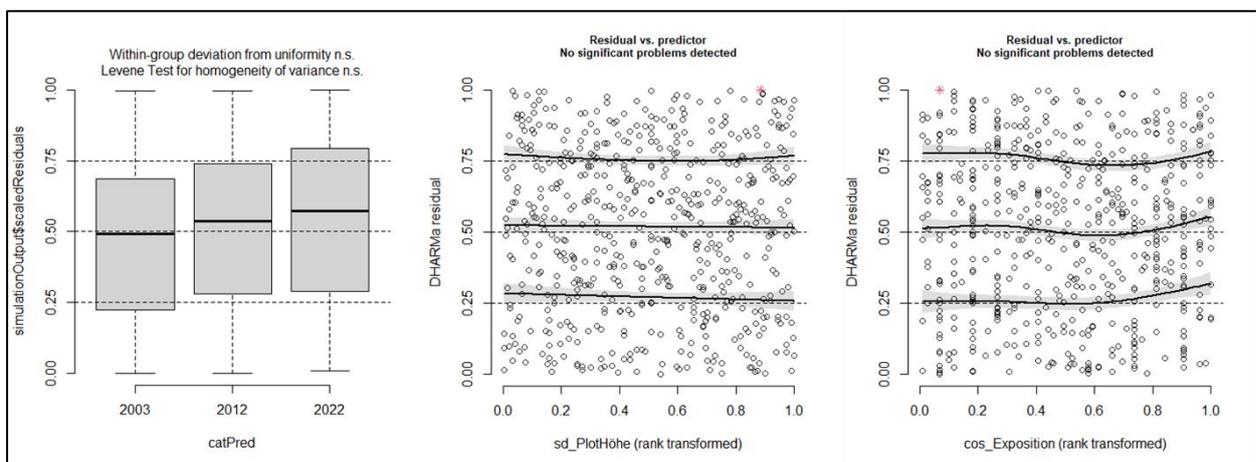


Abbildung 52 - Modellvalidierung - Residuen der Faktoren, Modell Fichte (eigene Darstellung)

## Modell Föhre

Die Anova zeigt, dass alle Faktoren im Modell, abgesehen von der Höhe hoch signifikant sind. Die Höhe wird als Faktor im Modell belassen, da dieser in der Interaktion mit dem Erhebungsjahr hoch signifikant ist.

```
Analysis of Deviance Table (Type II wald chisquare tests)

Response: binom

              chisq Df Pr(>Chisq)
as.factor(Jahr)    15.0610  2  0.0005365 ***
sd_PlotHöhe        4.3581  1  0.0368333 *
sin_Exposition     6.7014  1  0.0096335 **
as.factor(Jahr):sd_PlotHöhe 20.5223  2  3.496e-05 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Abbildung 53 - Modellvalidierung - Anova, Modell Bergföhre (eigene Darstellung)

Die Residuen im Modell zeigen, dass die minimalen und maximalen Werte etwas ungleich verteilt sind. Der Median liegt aber nahe bei null und die Werte des Q1 und Q3 liegen absolut betrachtet nahe zusammen.

```
      AIC      BIC  logLik deviance df.resid
444.5    479.3   -214.2    428.5     562

Scaled residuals:
   Min       1Q   Median       3Q      Max
-3.8474 -0.0005  0.0037  0.0349  2.5112
```

Abbildung 54 - Modellvalidierung - AIC, Residuals, Modell Bergföhre (eigene Darstellung)

Der QQ-Plot der Residuen des Modells zeigt keine Auffälligkeiten. Auch die Tests aus dem DHARMA-Package zeigen keine signifikanten Unterschiede. Die Residuen des Modells zeigen auch im Vergleich zu den vorhergesagten Residuen keinen signifikanten Unterschied

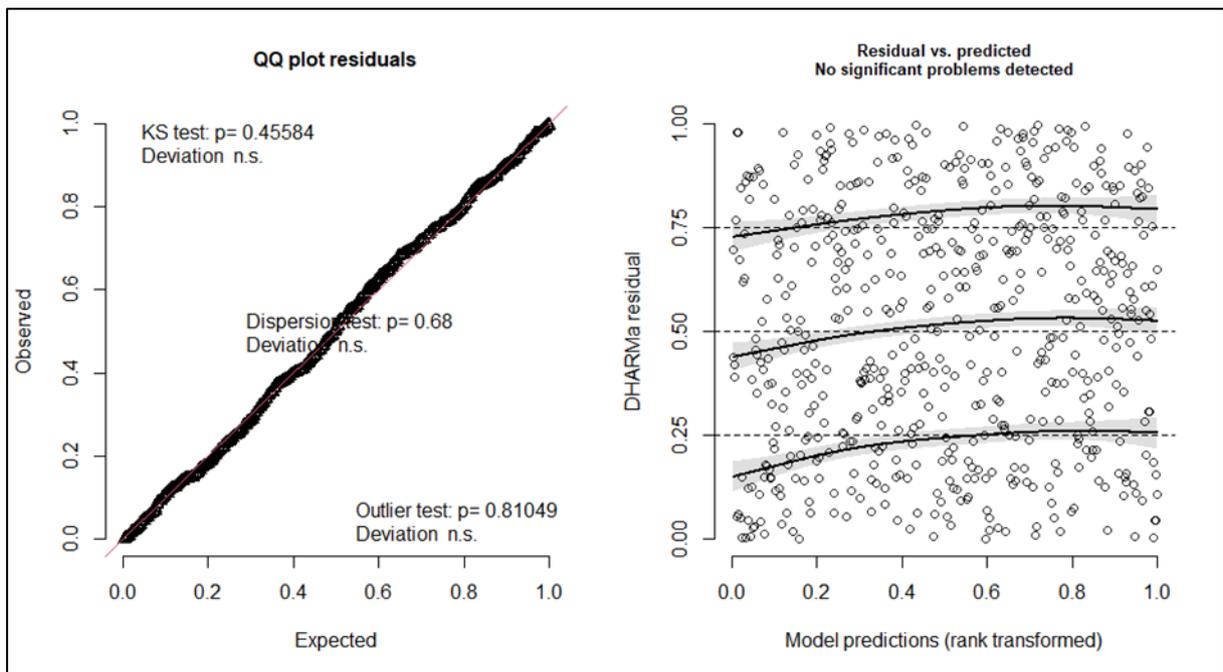


Abbildung 55 - Modellvalidierung - Residuen der Faktoren, Modell Bergföhre (eigene Darstellung)

Die Residuen der einzelnen Faktoren zeigen ebenfalls keinen signifikanten Unterschied zu den vorhergesagten Residuen auf.

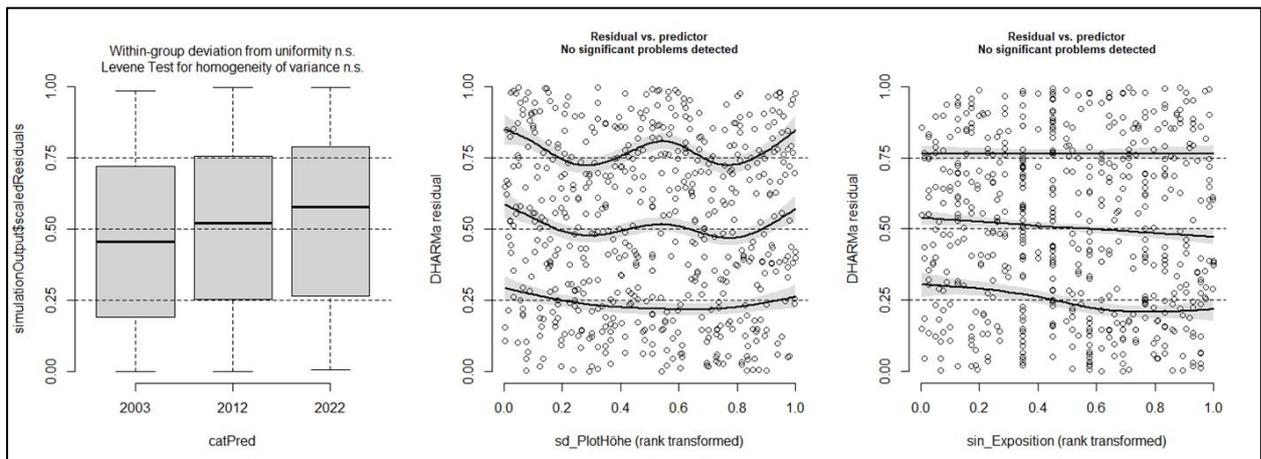


Abbildung 56 - Modellvalidierung - Residuen der Faktoren, Modell Bergföhre (eigene Darstellung)

### Modell Lärche

Die Anova zeigt, dass alle Faktoren im Modell hoch signifikant sind.

```

Analysis of Deviance Table (Type II wald chisquare tests)

Response: binom
          chisq Df Pr(>Chisq)
as.factor(Jahr) 10.2957 2 0.0058118 **
sd_PlotHöhe     11.8894 1 0.0005646 ***
sd_PlotNeigung  6.7216 1 0.0095251 **
cos_Exposition  33.3404 1 7.736e-09 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
  
```

Abbildung 57 - Modellvalidierung - Anova, Modell Lärche (eigene Darstellung)

Die Residuen im Modell zeigen, dass die minimalen und maximalen Werte etwas ungleich verteilt sind. Der Median liegt aber nahe bei null und die Werte des Q1 und Q3 liegen absolut betrachtet nahe zusammen.

AIC	BIC	logLik	deviance	df.resid
347.0	377.4	-166.5	333.0	563
Scaled residuals:				
Min	1Q	Median	3Q	Max
-2.34606	-0.08728	-0.01022	0.13051	2.89806

Abbildung 58 - Modellvalidierung - AIC, Residuals, Modell Lärche (eigene Darstellung)

Der QQ-Plot der Residuen des Modells zeigt keine Auffälligkeiten. Auch die Tests aus dem DHARMA-Package zeigen keine signifikanten Unterschiede. Die Residuen des Modells zeigen auch im Vergleich zu den vorhergesagten Residuen keinen signifikanten Unterschied

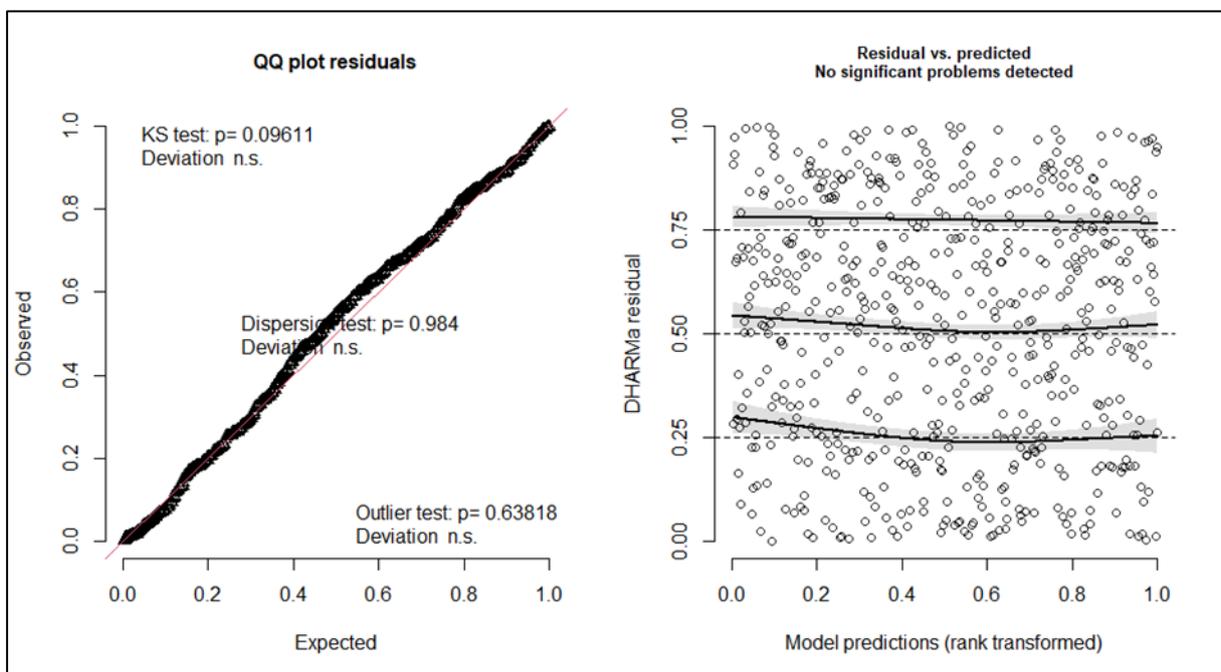


Abbildung 59 - Modellvalidierung - Residuen der Faktoren, Modell Lärche (eigene Darstellung)

Residuen der einzelnen Faktoren weisen teilweise bei Q3 signifikante Unterschiede aus. Das für die Faktoren Plot-Höhe und Plot-Neigung. Dies wird als nicht wesentliche Störung betrachtet.

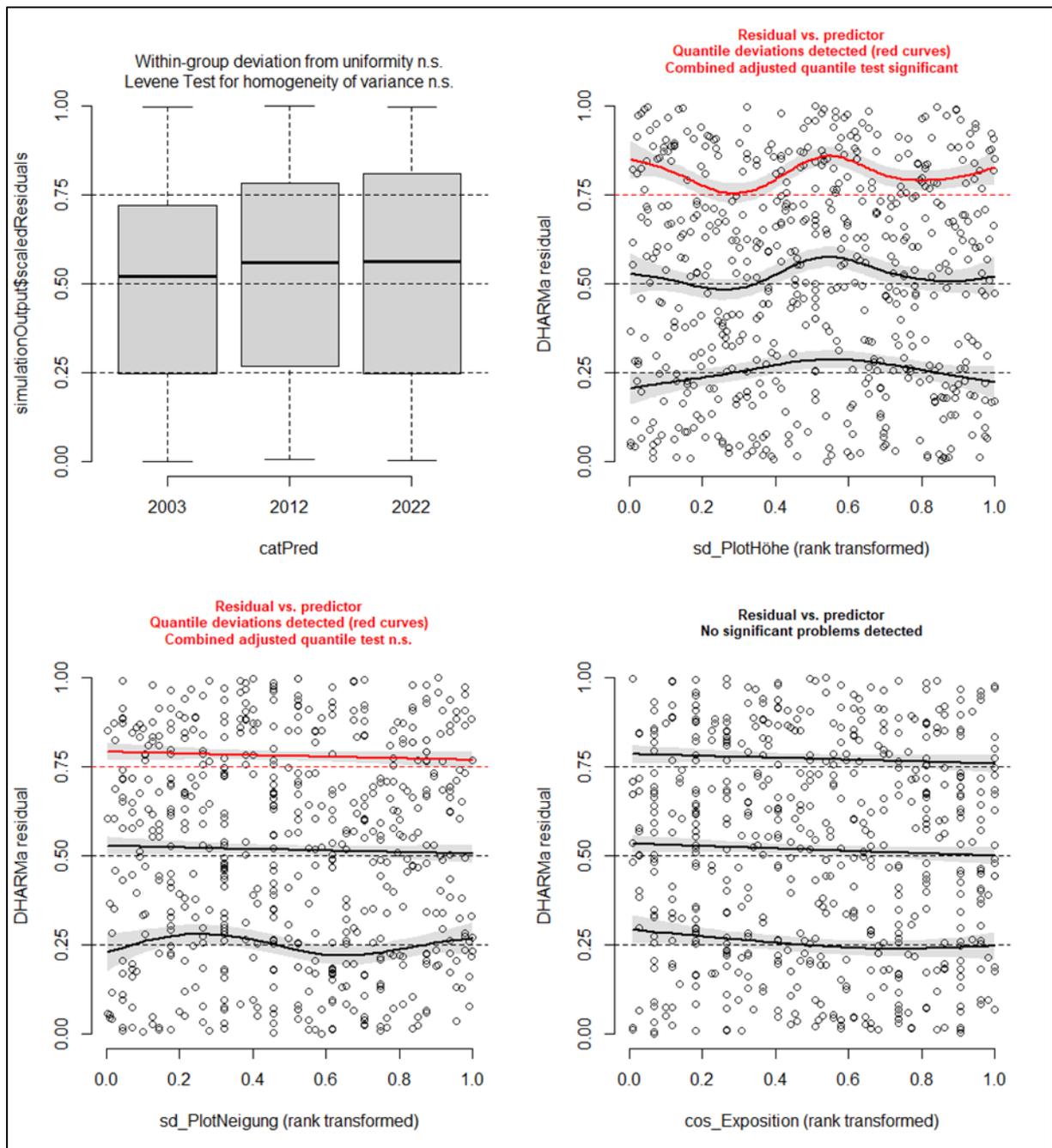


Abbildung 60 - Modellvalidierung - Residuen der Faktoren, Modell Lärche (eigene Darstellung)

## Digitaler Anhang

Hier eine kurze Übersicht, was als digitaler Anhang abgegeben wird. Da der Datenupload in Moodle sehr begrenzt ist, wurden keine der öffentlich verfügbaren Inputdaten hochgeladen. Bei Bedarf können diese gerne über andere Plattformen zur Verfügung gestellt werden.

Ordner	Enthält
Daten_Zählungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Daten der Zählungen in Excel und CSV</li> <li>– Plot-Informationen</li> </ul>
Zeitliche_Analyse	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Inputdaten</li> <li>– R-Projekt bestehend aus den folgenden Skripten (die auch in dieser Reihenfolge ausgeführt werden):               <ul style="list-style-type: none"> <li>– Libraries and Paths</li> <li>– Data_Preparation</li> <li>– DataScreening_final</li> <li>– GLM binominal</li> </ul> </li> </ul>
LiDAR_Analyse	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Input Daten               <ul style="list-style-type: none"> <li>– DTM</li> <li>– Tile_List</li> <li>– Tiles</li> <li>– AGR_Plots2022_2</li> </ul> </li> <li>– R-Projekt bestehen aus den folgenden Skripten (die auch in dieser Reihenfolge ausgeführt werden)               <ul style="list-style-type: none"> <li>– PlotsPrep</li> <li>– LAS und DTM</li> <li>– DataScreening</li> <li>– UC4_main_tilewise_new_norm_function</li> <li>– Zonal Function</li> </ul> </li> </ul>

Tabelle 21 - Übersicht digitaler Anhang (eigene Darstellung)