

Räumliche Erfassung von Waldgeschichte und Schutzwirkung eines subalpinen Fichten-Lärchenbestandes



Masterarbeit an der ETH Zürich in Zusammenarbeit mit dem SLF Davos

Gianna Seraina Könz

**Departement Umweltsystemwissenschaften
Wald- und Landschaftsmanagement**

Mai 2018

Referent: Dr. Peter Bebi, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF,
Davos

Korreferent: Dr. Frank Krumm, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee
und Landschaft WSL, Birmensdorf

Zusammenfassung

Die nachhaltige Bewirtschaftung von Schutzwäldern basiert auf Kenntnissen der Waldentwicklung und der natürlichen Störungsdynamik. Aufgrund des Mangels an detaillierten Überlieferungen und des starken anthropogenen Einflusses auf die Wälder der Alpen ist wenig über die natürliche Störungsdynamik und Entwicklung subalpiner Wälder bekannt. In der vorliegenden Arbeit wird die Waldgeschichte und die Schutzwirkung eines extensiv genutzten, nordost-exponierten Fichten-Lärchenwaldes in Davos unter dem Einfluss natürlicher Störungsdynamik untersucht. Im untersuchten Wald wurde im Jahr 2015 ein Marteloskop (Übungs- und Demonstrationsfläche mit räumlicher Information der Bäume) eingerichtet. Um die Waldentwicklung zu rekonstruieren werden in der 1.34 ha grossen Untersuchungsfläche alle Verjüngungsansätze (> 50 cm Höhe) erfasst. Bestehende waldstrukturelle und dendroökologische Aufnahmen der Bäume (> 7 cm BHD) werden ergänzt. Mittels der Bertalanffy-Wachstumsgleichung werden artspezifische Zusammenhänge zwischen Baumhöhe und Baumalter hergeleitet. Die räumliche Waldentwicklung wird in Bezug zur lokalen Geschichte gesetzt, und Vermutungen bezüglich Störungsdynamik werden mittels Lawinen- und Steinschlagsimulationen auf ihre Plausibilität überprüft. Die Etablierung und das Wachstum der Verjüngung ist insbesondere von der Sonnenscheindauer abhängig und weist einen markanten Höhengradienten auf. Der Bestand hat ein hohes Alter (Maximales Alter der Fichten: 350 Jahre) und besteht aus zwei Hauptaltersklassen (50-100 Jahre und 250-300 Jahre). Die räumliche Verteilung des Alters, der Artenzusammensetzung und der abrupten Wachstumsanstiege deuten auf die wichtige Rolle von natürlichen Störungen hin. Durch die Nutzungs- und Störungsgeschichte der Landschaft Davos kann die Walddynamik weitgehend rekonstruiert und erklärt werden. Die Simulationen der Naturgefahren-Simulationssoftware Rapid Mass Movements (RAMMS) bestätigen, dass es bei extremen Lawinenereignissen zu partieller Waldzerstörung kommen kann. Derzeit ist genügend Verjüngung vorhanden, um die Schutzfähigkeit des Waldes langfristig zu gewährleisten. Ohne weitere Störungen oder forstliche Eingriffe wird der Fichtenanteil des Bestandes zunehmen und der Wald könnte lokal zu Einschichtigkeit tendieren.

Stichwörter: Waldentwicklung, *Picea abies*, *Larix decidua*, Dendrochronologie, Verjüngung, Störungsdynamik, RAMMS, Bertalanffy-Wachstumsgleichung, Marteloskop

Abstract

The sustainable management of protection forest relies on detailed knowledge of forest development and natural disturbance dynamics. Given the few transmitted written records and the strong anthropogenic impact on the subalpine forests in the alps, little is known about the natural disturbance dynamics and development of subalpine forests. The present work examines the forest development and the protective effect of a subalpine spruce and larch forest near Davos under the effect of natural disturbance dynamics. The studied forest was converted to a marteloscope (demonstration and practice area with spatial tree information) in 2015. For the reconstruction of the forest development of the 1.34 ha large study area, the forest regeneration (> 50 cm height) is recorded. Consisting structural and dendroecological information of the trees (> 7 cm DBH) is complemented. The Bertalanffy growth equation is used to derive species specific height-age relationships. The spatial distribution of forest development is confronted with the local history. Assumptions of possible disturbance dynamics are verified through rockfall and avalanche simulations. The establishment and growth of the regeneration is influenced strongest by sunshine and shows a clear height gradient. The stand shows two main age classes (50-100 years respectively 250-300 years) and a high age (maximal spruce age: 350 years). The spatial distribution of the age, the species composition and the release effects point out to the important role of natural disturbances. The forest dynamics can largely be reconstructed and explained by the history of Davos. The simulations of the natural hazards simulation software 'rapid mass movements' (RAMMS) confirm that the forest can be destructed partially in extreme avalanche events. Presently the forest shows sufficient regeneration to fulfil the protection function. Without further disturbance or forestry interventions the spruce share will increase and the forest could locally develop towards a one-layered structure.

Key words: forest development, *Picea abies*, *Larix decidua*, dendrochronology, regeneration, disturbance dynamics, RAMMS, Bertalanffy growth equation, Marteloscope

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Abstract	II
Inhaltsverzeichnis	III
1. Einleitung.....	1
2. Material und Methoden	4
2.1. Untersuchungsgebiet	4
2.2. Verjüngung.....	7
2.2.1. Datenerhebung.....	7
2.2.2. Qualitative Analyse.....	9
2.2.3. Multivariate Analyse	10
2.3. Dendrochronologische Analyse	11
2.3.1. Feldaufnahmen	11
2.3.2. Laborarbeiten.....	11
2.3.3. Wachstumsmodellierung	13
2.3.4. Bestandesdynamik.....	15
2.3.5. Freistellungseffekte	15
2.4. RAMMS Simulationen	16
2.4.1. Lawinensimulationen	16
2.4.2. Steinschlagsimulationen.....	20
3. Resultate.....	22
3.1. Verjüngung.....	22
3.1.1. Qualitative Analyse.....	22
3.1.2. Multivariate Analyse	31
3.2. Dendrochronologische Analyse	33
3.2.1. Datengrundlagen	33
3.2.2. Wachstumsmodellierung	33
3.2.3. Bestandesdynamik.....	38
3.2.4. Freistellungseffekte	41
3.3. RAMMS Simulationen	43
3.3.1. Lawinensimulationen	43
3.3.2. Steinschlagsimulationen.....	47
4. Diskussion	49
4.1. Verjüngung.....	49

4.2.	Dendrochronologie.....	53
4.2.1.	Wachstumsmodellierung	53
4.2.2.	Bestandesdynamik	54
4.2.3.	Freistellungseffekte	58
4.3.	RAMMS Simulationen	60
4.3.1.	Lawinensimulationen	60
4.3.2.	Steinschlagsimulationen.....	61
4.4.	Diskussion der Methoden	63
5.	Schlussfolgerungen	65
6.	Danksagung.....	67
7.	Literatur.....	68
8.	Glossar.....	75
9.	Abbildungsverzeichnis	77
10.	Tabellenverzeichnis	81
Anhang 1:	Zusätzliche Resultate	82
Anhang 2:	Lawinen- und Steinschlagparameter.....	86
Anhang 3:	K-Werte für Waldpolygone.....	88
Anhang 4:	Model-Builder Diagramme ArcMap.....	89

1. Einleitung

Subalpine Wälder erfüllen zahlreiche Waldfunktionen und Ökosystemleistungen, welche vom Schutz vor Naturgefahren über Holznutzung bis hin zu ökologischen Leistungen und Erholungsnutzen reichen (Millennial Ecosystem Assessment Board 2005, Brändli 2010). Der Schutz vor Naturgefahren spielt in Gebirgsregionen, welche von gravitativen Prozessen wie Lawinen, Steinschlag und Erdbeben geprägt sind, eine übergeordnete Rolle. Rund 43 % des Schweizer Waldes übernimmt eine direkte oder indirekte Schutzfunktion für Verkehrswege und Siedlungen (Brändli 2010). Ziel des Gebirgswaldmanagements ist es, natürliche Prozesse der Naturwälder optimal zu nutzen, um mit möglichst kleinem Pflegeaufwand Störungen zu minimieren (Frehner et al. 2005). Dabei bieten artenreiche, standortgemässe, stufige Bestände mit ausreichend Verjüngung die Basis für die Erhaltung stabiler Waldzustände mit langfristiger Schutzfunktion (Hillgarter 1971, Ott et al. 1997, Brang et al. 2001, Schönenberger 2001, Brang und Duc 2002, Frehner et al. 2005). Flächige Verjüngungs- und Zerfallsphasen können zeitweise eine verminderte Schutzwirkung aufweisen (Korpel 1995, Frehner et al. 2005, Brang et al. 2011). Nach Hillgarter (1971) ist die Stufung nur eine Übergangsphase unbewirtschafteter Wälder, welche im Laufe ihrer Entwicklung zu Einschichtigkeit, Gleichförmigkeit und unzureichendem Nachwuchs tendieren. In subalpinen Wäldern etabliert sich die Verjüngung nicht flächig, sondern auf günstigen Kleinstandorten (Frehner et al. 2005). Das Aufkommen und Überleben von Verjüngung ist abhängig von Standortfaktoren und mikroklimatischen Bedingungen, welche im Gebirgswald eine grosse räumliche und zeitliche Variation aufweisen (Indermühle 1978, Brang und Duc 2002). Als wichtiger limitierender Faktor wird die Sonnenscheindauer und die damit verbundene Wärmezufuhr genannt (Frehner 1989, Lüscher 1989, Brang 1998, Frehner 2002). Weiter spielen das Samenangebot, die Konkurrenz durch Kraut- und Strauchschicht und der Verbiss durch Wildtiere eine wichtige Rolle (Frehner et al. 2005). Wissenslücken bezüglich Verjüngungsmortalität und Durchwuchszeit erschweren die Einschätzung der minimal notwendigen Verjüngung (Ott et al. 1997, Brang und Duc 2002, Bühler 2005).

Die Struktur und Zusammensetzung von Waldökosystemen ist dynamisch und fluktuiert in einem Zeitrahmen von mehreren Jahrhunderten (Hillgarter 1971, Pickett und White 1985, Kulakowski und Bebi 2004, Kraus und Krumm 2013). Natürliche Störungsereignisse haben einen bedeutenden Einfluss auf die Ökologie und die Struktur subalpiner Wälder (Kulakowski et al. 2006, Bebi et al. 2009, Kraus und Krumm

2013, Bebi et al. 2017). Insbesondere die natürliche Schneedynamik beeinflusst die strukturelle Diversität auf Bestandes- und Landschaftsebene (Vacchiano et al. 2008, Bebi et al. 2009). Durch bestandesgeschichtliche und dendrochronologische Untersuchungen in Wäldern mit wenig menschlichem Einfluss kann die regionale Störungsdynamik rekonstruiert werden (Tande 1979, Means 1982, Bebi et al. 2004, Casteller et al. 2007). Ein besseres Verständnis der Störungsdynamik ermöglicht Rückschlüsse auf die bestandesformenden Prozesse und liefert wichtige Erkenntnisse für die Bewirtschaftung von Schutzwäldern (Schönenberger 2001, Kulakowski und Bebi 2004, Splechtna et al. 2005). Über das langfristige Störungsregime der Alpen ist wenig bekannt, da die Wälder der Schweizer Alpen jahrhundertlang stark anthropogen beeinflusst wurden und Hinweise auf natürliche Störungen weitgehend verloren gegangen sind (Kulakowski und Bebi 2004, Bebi et al. 2017). Die natürliche Störungsdynamik wurde zudem in den letzten Jahrhunderten vielerorts durch Schutzmassnahmen unterbunden (Kulakowski et al. 2006, Bebi et al. 2017). Zahlreiche Studien haben die Störungsdynamik in den gemässigten Wäldern Europas untersucht (u. a. Splechtna et al. 2005, Nagel et al. 2007, Firm et al. 2009). Bei den bisher durchgeführten Studien in fichtendominierten subalpinen Wäldern liegt der Fokus auf grossräumigen Ereignissen wie Windstürme und Borkenkäferbefall (Szewczyk et al. 2011, Svoboda et al. 2012, Holeksa et al. 2017, Meigs et al. 2017) oder auf Effekten forstlicher Eingriffe (Cherubini et al. 1996).

Die vorliegende Masterarbeit untersucht die Struktur und Dynamik eines extensiv genutzten Fichten-Lärchenwaldes anhand von Verjüngungsuntersuchungen, Altersverteilungen und dendrochronologischen Analysen. Die vorhandene Lawinen- und Steinschlagdynamik des Untersuchungsgebietes wurde in der Vergangenheit nicht beeinflusst, da der Wald keine direkte Schutzfunktion hat. Hinweise auf Störungsdynamik werden mittels der Naturgefahren-Simulationssoftware Rapid Mass Movements (RAMMS) auf ihre Plausibilität überprüft. Die Entwicklung des Waldes und die Störungsdynamik werden in den historischen Kontext der Landschaft Davos gesetzt. Im untersuchten Wald wurde im Jahr 2015 im Rahmen des Integrate+ Projektes in einer Zusammenarbeit des Europäischen Forstinstituts (EFI) und der WSL/SLF eine Marteloskopfläche eingerichtet. Marteloskope sind Übungs- und Demonstrationsflächen auf welchen der Einfluss virtueller Anzeichnungen auf die Entwicklung unterschiedlicher Waldparameter untersucht werden kann (Mordini 2009, Kraus et al. 2016b, Kraus et al. 2018). Sie sind eine wichtige Datengrundlage für wissenschaft-

liche Untersuchungen der Bestandesdynamik (Kraus et al. 2018, Larrieu et al. 2018). Durch die detaillierte Erfassung der Waldgeschichte und der Waldwirkungen soll ein besseres Verständnis der natürlichen Prozesse eines extensiv bewirtschafteten Waldes und deren Einfluss auf die Schutzwirkung erlangt werden. Dabei werden die folgenden Fragen beantwortet:

Welche Standortsfaktoren und Prozesse sind bestimmend, welche sind positiv und welche negativ für die Verjüngung in der Marteloskopfläche „Dischma“?

Hypothese: Die Entwicklung der Verjüngung ist abhängig von der Lichtverfügbarkeit, der Vegetationskonkurrenz und dem Wildverbiss. Die vier untersuchten Baumarten reagieren mit unterschiedlicher Sensitivität auf diese Faktoren.

Ist der Wald der Marteloskopfläche langfristig schutzwirksam?

Hypothese: Durch Rekonstruktion der Bestandesdynamik über mehrere Jahrhunderte können Einschätzungen des zukünftigen Schutzpotenzials gemacht werden. Aufgrund von Altersberechnung der Bäume kann eingeschätzt werden, ob genügend Verjüngung vorhanden ist, um die Schutzfunktion nachhaltig zu gewährleisten.

Welche Rückschlüsse lassen sich aufgrund der Waldstruktur und der Waldentwicklung auf die Störungsgeschichte ziehen?

Hypothese: Einige Strukturmerkmale des untersuchten Waldes sind eindeutig auf Lawinen- und Steinschlagaktivität zurückzuführen. Aufgrund der Entwicklung der Waldstruktur wird ersichtlich, wo und in welchem Zeitraum sich Störungsereignisse abgespielt haben. Nach waldzerstörenden Lawinenniedergängen werden abrupte Wachstumsanstiege erwartet.

Liefern RAMMS-Simulationen plausible Erklärungen für beobachtete Muster der Waldstruktur und Waldentwicklung, welche auf Störungen hinweisen?

Hypothese: Die räumliche Verteilung der Lärchendominanz, der abrupten Wachstumsanstiege und der jüngeren Bäume deckt sich mit der simulierten Waldzerstörung. Die Verteilung von verletzten Bäumen deckt sich mit den Steinschlagsimulationen.

2. Material und Methoden

2.1. Untersuchungsgebiet

Der untersuchte Fichten-Lärchenwald befindet sich im Dischmatal (46°46'15N, 9°52'37E, Davos, GR) an einem nordost-exponierten Hang auf einer Höhe von 1783 bis 1882 m ü. M (Abb. 1). Das Dischmatal liegt im Übergangsbereich der nördlichen Zwischenalpen und der Zentralalpen (Bebi 1999). Davos (1560 m ü. M.) weist eine Jahresmitteltemperatur von 3.8 °C und einen mittleren Jahresniederschlag von rund 1000 mm auf (Bebi et al. 2012). Auf einer 1.34 ha grossen Waldfläche mit einer mittleren Hangneigung von 38° wurde im Jahr 2015 im Rahmen des Integrate+ Projektes in Zusammenarbeit zwischen dem Europäischen Forstinstitut (EFI) und der WSL/SLF eine Marteloskopfläche eingerichtet (Bebi und Krumm 2015).

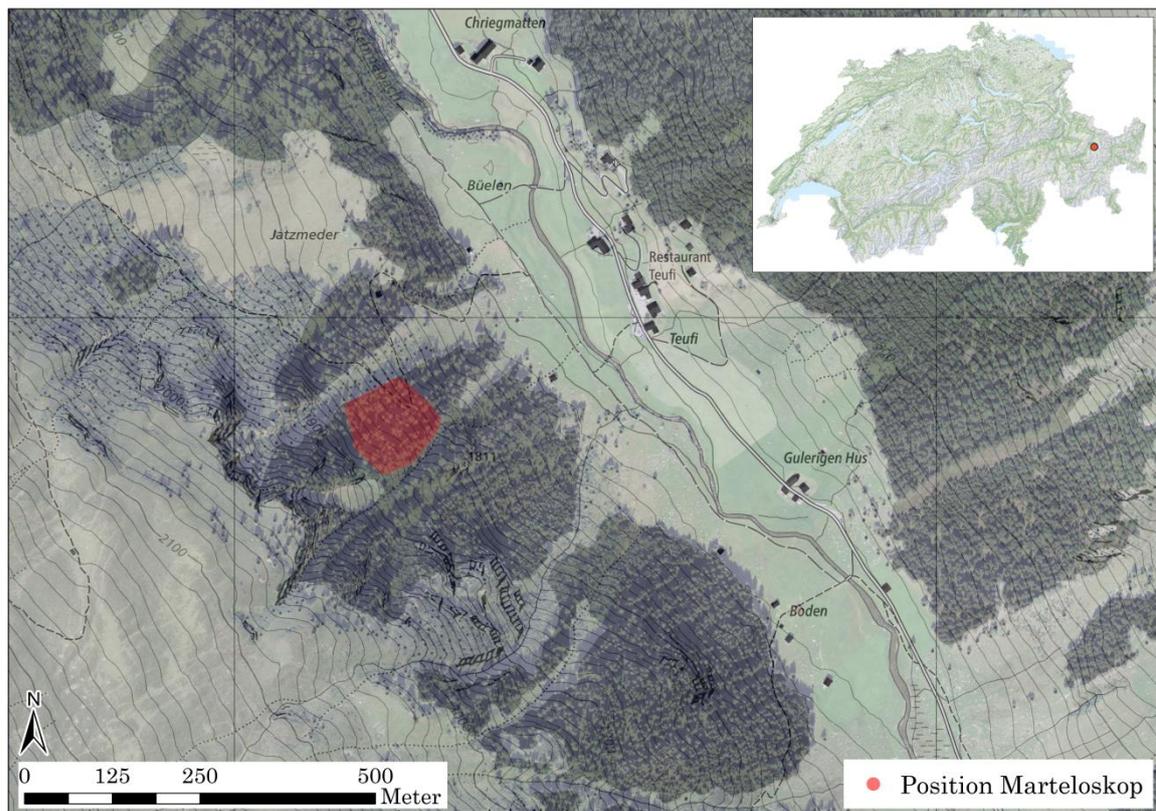


Abb. 1: Die Position der Marteloskopfläche im Dischmatal (Orthophoto und Landeskarte: © Bundesamt für Landestopografie swisstopo).

In der Marteloskopfläche wurden alle Bäume über der Kluppschwelle von 7 cm BHD räumlich eingemessen und nummeriert. Für jeden Baum wurde Art, Höhe und Durchmesser erhoben (Bebi und Krumm 2015). Die Marteloskope des Integrate+ Pro-

jektes zeichnen sich durch eine detaillierte Erfassung von ökologischen und ökonomischen Werten aus (Kraus et al. 2018). Des Weiteren stehen hoch aufgelöste LiDAR-Daten für dieses Gebiet zur Verfügung. Die 488 erfassten Bäume über der Kluppschwelle bestehen aus 77 % Fichten (*Picea abies*), 14 % Lärchen (*Larix decidua*) und 9 % Vogelbeeren (*Sorbus aucuparia*). Die Arve (*Pinus cembra*) ist lediglich einmal vorhanden, wird jedoch oberhalb der Marteloskopfläche häufiger. Zusätzlich sind Grünerlen (*Alnus viridis*) und vereinzelt Weiden (*Salix sp.*) in der Fläche vorhanden.

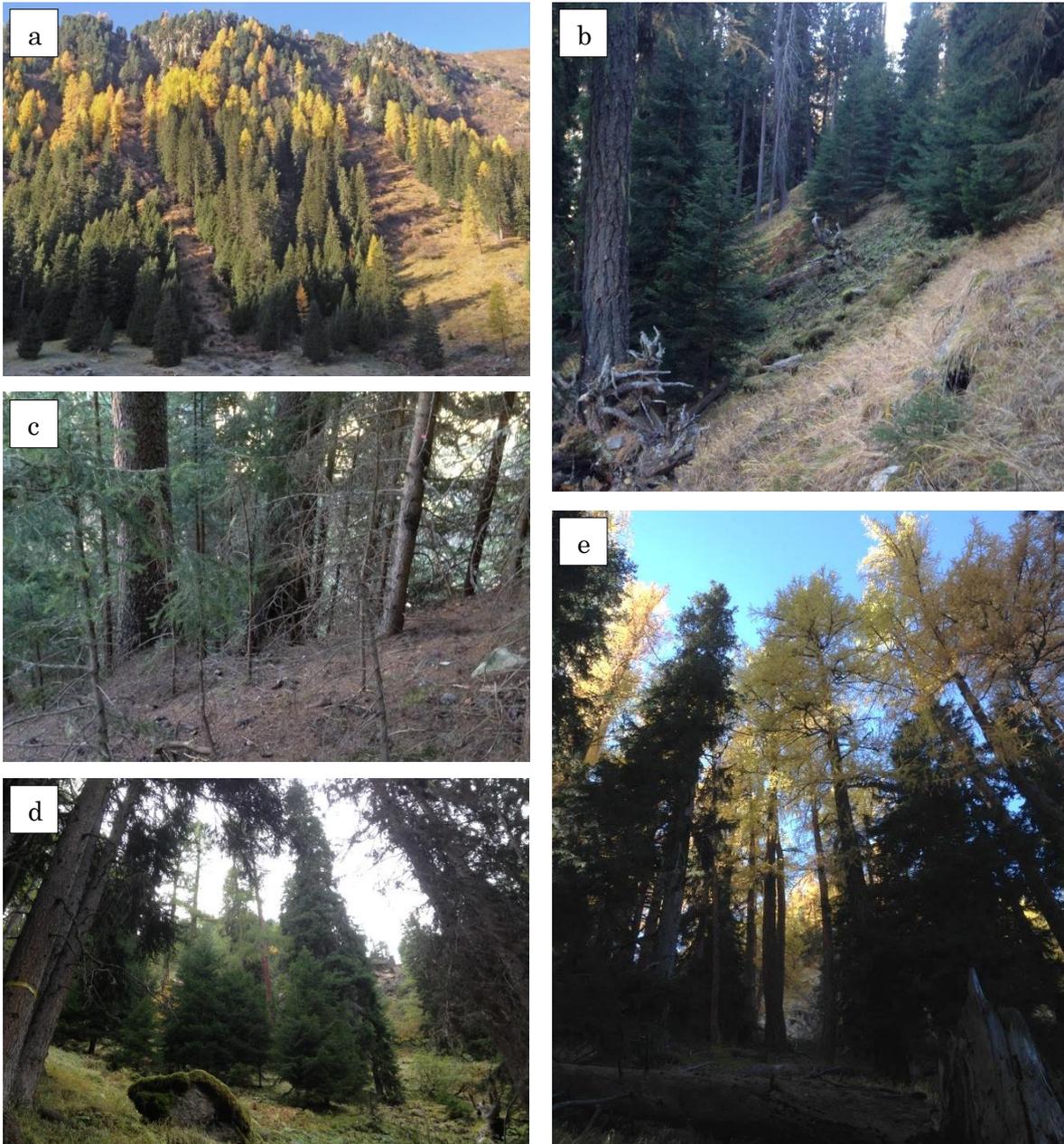


Abb. 2: (a) Gegenhangaufnahme der Marteloskopfläche; (b) Wollreitgrasreicher Bereich des Bestandes; (c) Dichter Bereich des Bestandes ohne Bodenvegetation; (d) Hochstaudenreicher Bereich des Bestandes; (e) Lärchendominierter Bereich des Bestandes (Fotografien: G. Könz, 2017).

Es handelt sich gemäss Definition der Waldstandorte nach Frehner et al. (2005) und Ott et al. (1997) um einen strukturierten Alpenlattich-Fichtenwald mit Wollreitgras (*Homogyno-Piceetum calamagrostietosum villosae*, 57C) mit Übergängen in einen Typischen Hochstauden-Fichtenwald (*Adenostylo alliariae-Piceetum typicum*, 60) respektive Lärchen-Arvenwald mit Alpenrose (*Larici-Pinetum cembrae typicum*, 59). Der Bestand weist trotz eines hohen Vorrats (ca. 850 m³/ha) auch Teilgebiete mit viel Verjüngung auf. Die Waldfläche wird im Westen und im Osten durch Lawinenzüge begrenzt (Abb. 1, Abb. 2). Oberhalb (südwestlich) der Marteloskopfläche befindet sich ein circa 40 m hohes Felsband aus welchem sich regelmässig Steine lösen, welche die Marteloskopfläche durchqueren.

2.2. Verjüngung

2.2.1. Datenerhebung

Um die Entwicklung des Waldes zu untersuchen, wurde in der gesamten Marteloskopfläche die Verjüngung aufgenommen. Bäume über 50 cm Höhe und unter 7 cm BHD wurden in Form von Verjüngungsansätzen erhoben. Ein Verjüngungsansatz beschreibt die typische natürliche Verjüngung des Gebirgswaldes, welche in kleinen Gruppen aufkommt (Ott et al. 1997). Ein Verjüngungsansatz wurde durch eindeutige räumliche Trennung oder durch eine maximale Distanz von 3 m zwischen den einzelnen Individuen definiert. Die Verjüngung wurde auf einer Karte im Massstab 1:300 mit 1 m-Höhenlinien und den nummerierten Bäumen als Orientierungshilfe eingetragen und digitalisiert. Bei jedem Verjüngungsansatz wurden der Zuwachs und die Höhe der drei höchsten Bäume aufgenommen. Falls die höchsten Bäume des Verjüngungsansatzes eine sehr schlechte Vitalität aufwiesen, wurden kleinere, jedoch vitalere, Individuen vermessen, von welchen erwartet wird, dass sie den Verjüngungsansatz in Zukunft dominieren werden. Als Merkmale wurden jeweils die Anzahl Bäume pro Ansatz, der Ansatzdurchmesser, das Substrat und die dominante Vegetation unter dem Schirm des Verjüngungsansatzes aufgenommen (nachfolgend zusammengefasst als Mikrovegetation). Das Substrat wurde in die vier Kategorien Rohhumus, Stein (sichtbarer Stein oder Fels), Totholz und Wurzelteller eingeteilt. Zusätzlich wurde gutachtlich festgehalten, ob mindestens einer der Bäume im Verjüngungsansatz Säbelwuchs, Verbiss, Wunden oder Schneeschimmel aufwies und ob es sich um einen sehr dichten Verjüngungsansatz handelte. Die acht wichtigsten Vegetationskategorien (Wollreitgras, Vegetationsfrei, Moos, Hochstauden, Zwergsträucher, Farn, Grünerlen und Himbeeren) wurden im Feld erhoben und mit einer Genauigkeit von 1 bis 2 m in der gesamten Marteloskopfläche kartiert.

Die Höhe über Meer, die Exposition und die Neigung wurden aus dem digitalen Geländemodell (nachfolgend DGM) mit 1 m Auflösung in ArcMap (ESRI 2011) berechnet. Für die Berechnung des unbedeckten Himmelanteils wurde um jeden Verjüngungsansatz das Vegetationshöhenmodell (nachfolgend VHM) mit 1 m Auflösung auf einen Radius von 10 respektive 30 m zugeschnitten. Die mittlere Höhe des jeweiligen Verjüngungsansatzes wurde mit den Werten aller Zellen des VHM innerhalb des Radius verglichen. Rasterzellen des VHM mit einem tieferen Wert als die mittlere Höhe der Verjüngungsansätze wurden als unbedeckt definiert und in Verhältnis zur totalen Anzahl Zellen gestellt. Ein Radius von 30 m ergab analog zu Malle (2017) signifikan-

tere Resultate und wurde für die Analysen verwendet. Die Sonne scheint insbesondere während den Monaten Juni und Juli in die Waldöffnungen, weshalb die direkte Sonnenscheindauer während dieser Zeit entscheidend für das Wachstum ist (Imbeck und Ott 1987). Die Juni-Sonnenscheindauer jedes Verjüngungsansatzes wurde auf einer Höhe von 0.5 m über dem DGM (1 m Auflösung) mittels des ArcMap Werkzeugs „Points to Solar Radiation“, welches Höhe, Neigung und Ausrichtung betrachtet, berechnet und mit dem bedeckten Himmelsanteil korrigiert. Die im Feld erhobenen und die berechneten Variablen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Erhobene und berechnete Variablen für die Untersuchungen der Verjüngung.

Variable	Einheit	Typ	Quelle
Anzahl	[-]	Diskret	Feldaufnahme
Durchmesser	[cm]	Kontinuierlich	Feldaufnahme
Zuwachs	[cm]	Kontinuierlich	Feldaufnahme
Höhe Frühling 2017	[cm]	Kontinuierlich	Berechnung
Höhe Herbst 2017	[cm]	Kontinuierlich	Feldaufnahme
Mikrovegetation	[-]	Kategorial	Feldaufnahme
Substrat	[-]	Kategorial	Feldaufnahme
Säbelwuchs	[-]	Binär	Feldaufnahme
Verbiss	[-]	Binär	Feldaufnahme
Verletzung	[-]	Binär	Feldaufnahme
Schneesimmel	[-]	Binär	Feldaufnahme
Dichter Ansatz	[-]	Binär	Feldaufnahme
Unbedeckter Himmelanteil	[%]	Kontinuierlich	GIS Analyse
Sonnenscheindauer	[h im Juni]	Kontinuierlich	GIS Analyse
Höhe über Meer	[m]	Kontinuierlich	GIS Analyse
Exposition	[-]	Kontinuierlich	GIS Analyse
Neigung	[°]	Kontinuierlich	GIS Analyse
Vegetation	[-]	Kategorial	Feldaufnahme
Baumart	[-]	Kategorial	Feldaufnahme

2.2.2. Qualitative Analyse

Die statistischen Analysen wurden in der Statistik-Software R (R Core Team 2017) auf einem Signifikanzniveau von 5 % durchgeführt. Die Pearson-Korrelation zwischen dem Höhenzuwachs respektive der Baumhöhe und den aufgenommenen Variablen (Tabelle 1) wurde überprüft. Für kategoriale Variablen wurde mittels Welch-Tests überprüft, ob sich der Höhenzuwachs respektive die Baumhöhe zwischen den Kategorien signifikant unterscheidet. Die Unterschiede zwischen den Baumarten wurden ebenfalls mittels Welch-Tests überprüft.

Um festzustellen, ob die Verteilung der Verjüngungsansätze von der vorhandenen Vegetation abhängig ist, wurde der Unterschied zwischen der erwarteten und beobachteten Anzahl Verjüngungsansätze pro Vegetationstyp statistisch überprüft. Dazu wurde in ArcMap die Vegetationskartierung mittels des Werkzeugs „Create Fishnet“ in gleichmässige Quadrate mit jeweils einem zentrierten Punkt eingeteilt. Alle Punkte, welche nicht mit der Vegetationskartierung koinzidierten oder von dieser nur angeschnitten waren, wurden von der Analyse ausgeschlossen, um eine identische Anzahl tatsächlicher und erwarteter Beobachtungen zu erhalten.

Die beobachtete Sonnenscheindauer der Fichten- und Lärchenverjüngung wurde mit Faustregeln der Forstpraxis verglichen. Für die Fichten werden in der subalpinen Stufe mindestens 2 Stunden direktes Sonnenlicht pro Tag im Juni benötigt, da dann der Anteil Fichten mit geringem Wachstum klein ist (Ott et al. 1997, Frehner 2002). Zusätzlich wird ein unbedeckter Himmelanteil von mindestens 20 % als vorteilhaft beschrieben (Frehner 2002). Für die Lärche sind mindestens 5 Stunden pro Tag für das Überleben, respektive 8 Stunden für eine gute Vitalität notwendig (Krebs 2001).

2.2.3. Multivariate Analyse

Um den Höhenzuwachs zu modellieren und den Einfluss der Variablen auf den Höhenzuwachs besser zu verstehen, wurden generalisierte lineare Modelle (GLM) erstellt. Nach Paliy und Shankar (2016) kann eine unimodale Funktion durch mehrere lineare Funktionen angenähert werden. Damit die Modelle die Normalitätsannahme erfüllen, wurde eine logarithmische Transformierung des Zuwachses durchgeführt. Mittels der Funktion „StepAIC“ wurde zwischen der minimalen und maximalen Variablenanzahl das Modell mit dem tiefsten AIC (Akaike 1992) und dem höchsten R^2 ausgewählt. Die multivariate Analyse wurde für alle Baumarten gemeinsam ($n = 269$), für die Fichten ($n = 230$) und für die Kombination von Fichten und Lärchen ($n = 247$) durchgeführt. Aufgrund der geringen Anzahl Beobachtungen und der grossen Variation der Daten wurden keine Modelle für die Lärchen ($n = 17$), Arven ($n = 11$) und Vogelbeeren ($n = 11$) erstellt. Um die Modelle auf Plausibilität zu überprüfen wurde eine zufällige Stichprobe von 30 Fichten von der Berechnung des Modells ausgeschlossen. In einem Vergleich wurde der Unterschied zwischen den erwarteten und modellierten Werten dieser Stichprobe untersucht.

2.3. Dendrochronologische Analyse

2.3.1. Feldaufnahmen

Eine Vollbeprobung aller bisher noch nicht beprobter Nadelbäume der Marteloskopfläche wurde durchgeführt. Dazu wurde die bestehende Datengrundlage (143 Bäume) aus Simmler (2017) um 301 Bäume ergänzt. Die Proben wurden auf einer durchschnittlichen Höhe von 1 m auf der jeweils oberen Seite des Baumes entnommen (hauptsächliche Bohrrichtung: Nord-Ost), um Reaktionsholz zu vermeiden (Grissino-Mayer 2003).

2.3.2. Laborarbeiten

109 Bohrproben (36 %) wurden in Davos analog zu Simmler (2017) mit zunehmender Körnung (60, 120, 240) geschliffen und mittels einer LINTAB Messbank (Genauigkeit 0.01 mm) und der TSAP-Win Software (Rinn 2003) analysiert. Die restlichen 192 Bohrproben (64 %) wurden an der Professur für Waldwachstum der Albert-Ludwigs-Universität in Freiburg (Deutschland) mit einer Ultrapräzisions-Diamantfräse geschliffen und analysiert. 121 der in Freiburg analysierten Proben (77 %) wurden mit einem Mikrotek Flachbettscanner und der Software WinDendro (Genauigkeit 0.001 mm, gerundet auf 0.01 mm) analysiert, und 36 Proben mit undeutlichen Jahrringen (23 %) wurden mit dem Messtisch VIAS TimeTable und der Software PAST4 (Genauigkeit 0.01 mm) analysiert. Um sicherzustellen, dass die drei Methoden die gleichen Resultate erzielen, wurden jeweils 10 zufällig gewählte Proben kreuzgetestet.

Die Jahrringdaten wurden analog zu Simmler (2017) mit Referenzchronologien der Internationalen Tree-Ring Data Bank (SWIT179 für Fichte (Bigler) und SWIT185 für Lärche (Bigler und Meile)) im Statistik Programm COFECHA (Holmes 1992) kreuzdatiert und gegebenenfalls korrigiert. Für die Korrektur des Verfehlens des Marks wurde die Methode von Duncan (1989) angewendet. Die Anzahl fehlender Jahrringe (K) wurde durch die Gleichungen 1 und 2, wie in Abb. 3 dargestellt, berechnet. Für das arithmetische Mittel von X wurden die Jahrringbreiten der ersten 5 vollständigen Jahre genommen.

$$r = \frac{L^2}{8h} + \frac{h}{2} \quad (1) \quad K = \frac{r}{\bar{X}} \quad (2)$$

2.3.3. Wachstumsmodellierung

Um die Bestandesdynamik auf vollständige Weise zu analysieren, wurde aus den Informationen der dendrochronologischen Daten unter Anwendung der Bertalanffy-Wachstumsgleichung (Bertalanffy 1957) das Alter aller Bäume über der Kluppschwelle approximiert.

$$h(t) = h_{max} * (1 - e^{(-g*t)})^3 \quad (5)$$

Nach Fekedulegn et al. (1999) eignet sich die Bertalanffy-Wachstumsgleichung gut, um ein System einer biologischen Variablen zu modellieren, die einen ganzen Lebenszyklus durchläuft. Die Bertalanffy-Wachstumsgleichung wird meist für die Modellierung der Wachstumsprozesse von Fischen angewendet (u. a. Amaral und Cabral 2004), wurde jedoch ebenfalls für Bäume angewendet (Zeide 1993, Kahn 1994, Rammig et al. 2007). Für die maximale Baumhöhe (h_{max}) wurde in Fekedulegn et al. (1999) die Oberhöhe (h_{dom}) benutzt. Diese wird nach Soest et al. (1956) folgendermaßen definiert:

$$\text{Oberhöhe } (h_{dom}) = \text{Mittlere Höhe der 100 dicksten Bäume pro Hektare} \quad (6)$$

Mit Gleichung 7 wurden aus den dendrochronologisch datierten Bäume der Mittelwert und die Standardabweichung der Wachstumsfaktoren für die Fichten und Lärchen berechnet.

$$g = -\frac{\ln\left(1 - \left(\frac{h(t)}{h_{dom}}\right)^{\frac{1}{3}}\right)}{t} \quad (7)$$

Durch das Einsetzen der durchschnittlichen Wachstumsfaktoren (g) und der Oberhöhe in Gleichung 8 wurde das Alter der Bäume ohne dendrochronologische Daten geschätzt.

$$t = -\frac{\ln\left(1 - \left(\frac{h(t)}{h_{dom}}\right)^{\frac{1}{3}}\right)}{g} \quad (8)$$

Für die dominanten Individuen der Verjüngungsansätze wurde das Alter durch folgende vier Methoden berechnet und verglichen:

1. Mit den Wachstumsfaktoren der dendrochronologisch datierten Bäume und Gleichung 8.
2. Direkt aus dem gemessenen Höhenunterschied zwischen 2016 (Frühling 2017) und 2017 (Herbst 2017), mittels Umformulierung der Bertalanffy-Wachstumsgleichung in die altersunabhängige Gleichungen 9 (Rammig et al. 2007) und 10.

$$h(t + 1) = h_{dom} * \left(1 - \left(1 - \left(\frac{h(t)}{h_{dom}} \right)^{\frac{1}{3}} \right) * e^{-g} \right)^3 \quad (9)$$

$$g = -\ln \left(\frac{1 - \left(\frac{h(t+1)}{h_{dom}} \right)^{\frac{1}{3}}}{1 - \left(\frac{h(t)}{h_{dom}} \right)^{\frac{1}{3}}} \right) \quad (10)$$

Die individuellen Wachstumsfaktoren wurden anschliessend in Gleichung 8 eingesetzt, um das Alter der einzelnen Individuen zu berechnen.

3. Mit dem linearen Modell der Fichten und Lärchen der multivariaten Analyse wurden die Höhen der dominanten Individuen der Verjüngung für 2018 und 2019 modelliert. Für jeden Baum wurde ein durchschnittlicher Wachstumsfaktor von 2016 (Frühling 2017) bis 2019 mittels Gleichung 10 berechnet, um das Alter der einzelnen Individuen anschliessend mittels Gleichung 8 abzuschätzen.
4. Zuletzt wurde das Alter der Verjüngung direkt durch die lineare Gleichung 3 für die Fichte und die lineare Gleichung 4 für die Lärche berechnet.

2.3.4. Bestandesdynamik

Aufgrund der Wachstumsmodellierung und der Altersberechnungen wurde die Entwicklung des Bestandes sowohl räumlich wie auch zeitlich untersucht. Dabei wurden die Bäume über der Kluppschwelle und die Verjüngungsansätze betrachtet. Die Entwicklung wurde zudem anhand eines Luftbildvergleiches analysiert.

2.3.5. Freistellungseffekte

Freistellungseffekte oder Release-Effekte sind abrupte Wachstumsanstiege der Jahrringe. Die Berechnung der Freistellungseffekte ist eine wichtige Methode für die Untersuchung der Störungsgeschichte von mehrschichtigen, ungleichaltrigen Waldbeständen (Lorimer und Frelich 1989, Frelich 2002). Freistellungseffekte werden als Antwort auf das Ausfallen von Konkurrenten oder starke klimatische Effekte interpretiert (Henry und Swan 1974, Glitzenstein et al. 1986). Die Freistellungseffekte der Marteloskopfläche wurden analog zu Schorn (2018) für 312 vollständige Proben und 44 Fragmente nach der Boundary-Line-Methode von Black und Abrams (2003) berechnet. Die vorhandenen Daten wurden in Schorn (2018) mit Jahrringserien von 202 Fichten und 86 Lärchen ähnlicher Standorte ergänzt, um aus dem Verhältnis zwischen den prozentualen Wachstumsänderungen und dem durchschnittlichen Zuwachs Grenzlinien (Boundary-Lines) für die Fichten und Lärchen zu bestimmen (siehe Anhang 1.2). Diese Grenzlinien beschreiben die baumartenspezifische, maximal mögliche Reaktion auf eine Freistellung. Wachstumsimpulse wurden in Verhältnis zu diesen Grenzlinien gestellt, und in moderate Freistellungseffekte (*moderate releases*: Erhöhung des Wachstums um 20 bis 49.9 %) und bedeutende Freistellungseffekte (*major releases*: Erhöhung des Wachstums um mehr als 50 %) unterteilt. Die Freistellungseffekte wurden mit historischen Begebenheiten der Landschaft Davos verglichen, und Hinweise auf die Bestandesgeschichte wurden diskutiert.

2.4. RAMMS Simulationen

Durch Lawinen- und Steinschlagsimulationen wurden Muster der Waldentwicklung und Waldstruktur genauer untersucht und erklärt. Dabei wurde auf die Altersverteilung der Bäume, dem Vorhandensein von Lärchen, die Entstehung von Waldlücken und Freistellungseffekte eingegangen.

2.4.1. Lawinensimulationen

Waldparameter

Der Wald wird durch eine dominante Höhe über 3 m, einer maximalen Distanz von 25 m zwischen Bäumen und einem Kronendeckungsgrad von mindestens 20 % definiert (Keller 2005, Teich et al. 2014). Für die Definition der Waldbedeckung wurden alle Zellen des VHM (1 m Auflösung) mit einer Höhe über 3 m als Wald klassifiziert und mit dem Orthophoto des Jahres 2017 verglichen. Die Waldpolygone wurden in ArcMap mit einer Toleranz von 5 m und der Einstellung „Kritische Biegung beibehalten“ vereinfacht. Zusätzlich wurden Polygone mit einer Flächengröße unter 300 m² entfernt. Der Wald wurde manuell aufgrund seiner Artenzusammensetzung und Struktur in unterschiedliche Waldpolygone eingeteilt. Dabei wurde zwischen fichten-, lärchen- und arvendominierten Bereichen unterschieden. Zusätzlich wurden Bereiche ähnlicher Baumhöhen ausgeschieden. Der für die Simulationen benötigte BHD wurde einerseits aus den gemessenen Daten der Marteloskopfläche übernommen und andererseits aus Fernerkundungsdaten berechnet. Für die Berechnung wurden alle Werte des VHM (1 m Auflösung) unter 3 m entfernt und die durchschnittliche Höhe pro Waldpolygon berechnet. Der BHD wurde anschliessend mit der in RAMMS implementierten Gleichung 11 hergeleitet.

$$\text{BHD} = \text{Höhe}^{1.25} \rightarrow \text{Höhe} = \text{BHD}^{0.8} \quad (11)$$

Brožová (2018) verglich diese Formel mit Feldanalysen für die Arve (*Pinus cembra*) und Lärche (*Larix decidua*) mit dem Resultat, dass der vorhergesagte BHD für die Arve gut mit den beobachteten Werten übereinstimmt, sich aber für die Lärche signifikant (p-Wert < 0.001) von dem beobachteten BHD unterscheidet. Diese Resultate wurden mit Untersuchungen für die Fichte (*Picea abies*), die Lärche (*Larix decidua*) und die Vogelbeere (*Sorbus aucuparia*) aus der Marteloskopfläche ergänzt. Dazu wurden die berechneten und gemessenen Werte des BHD mittels eines gepaarten Student's t-Test verglichen.

Der Wald kann kaum zur Abbremsung grosser Lawinen ($> \text{ca. } 10'000 \text{ m}^3$) beitragen, spielt jedoch bei der Verminderung potenzieller Anrissgebiete eine grosse Rolle (Gubler und Rychetnik 1991, Newesely et al. 2000, Gruber und Bartelt 2007). Reichweiten von kleinen und mittleren Lawinen ($< \text{ca. } 10'000 \text{ m}^3$) können allerdings durch den Wald beeinflusst werden, indem Schneemasse abgelagert wird und die Lawine verlangsamt wird (Teich et al. 2014). Dies wird in RAMMS durch den K-Wert (detrainment coefficient [$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$]) beschrieben, welcher vom Waldtyp, dem Kronendeckungsgrad und der Bodenrauigkeit abhängt (Feistl et al. 2014b, Teich et al. 2014). Die Bodenrauigkeit wurde mittels der VRM-Methode (Vector ruggedness measure) nach Sappington et al. (2007) aus dem DGM (0.5 m Auflösung) abgeschätzt (bereitgestellt von Yves Bühler, Oktober 2017). Diese Methode vergleicht für jede Zelle die Variabilität zwischen den Vektoren der Neigung und Ausrichtung der benachbarten Zellen (Abb. 4). Die resultierende Bodenrauigkeit ist ein einheitsloser Wert zwischen 0 (geringe Rauigkeit) und 1 (hohe Rauigkeit). Diese Methode hat gegenüber anderen Methoden den Vorteil, dass steile jedoch gleichmässige Flächen nicht als rau ausgeschieden werden (Abb. 4, B). Für die Zuweisung des K-Wertes wurde die Bodenrauigkeit in die drei Kategorien 'smooth', 'knobby' und 'rough' unterteilt. Dazu wurden die in der Literatur vorgefundene Schwellenwerte von 0.01 und 0.02 angewendet (Bühler et al. 2013, Veitinger et al. 2016).

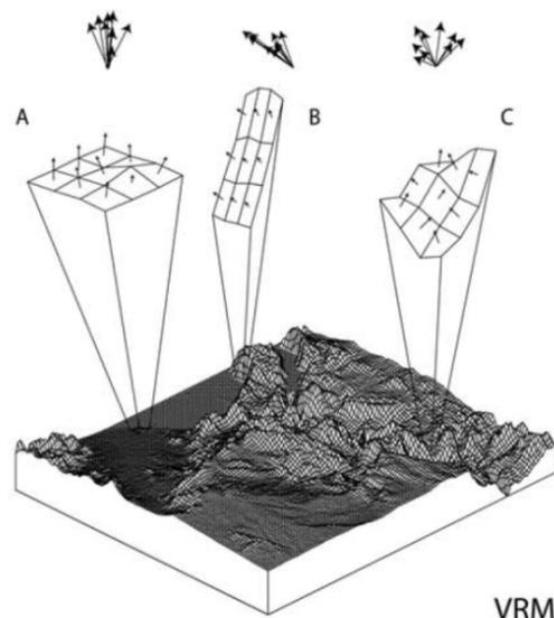


Abb. 4: Vektoren-Dispersionsmethode (VRM) aus Sappington et al. (2007). Die Bodenrauigkeit wird durch die Variabilität der Vektoren bestimmt. Flache Bereiche (A) und steile jedoch gleichmässige Bereiche (B) weisen tiefe VRM-Werte auf. Steile, unebene Bereiche (C) weisen hohe VRM-Werte auf.

Anrissgebiete

Potenzielle Anrissgebiete hängen von a) Geländeparametern wie Neigung, Exposition, Rauigkeit und Vegetationsdecke; b) meteorologischen Parametern wie Wind, Temperatur und Schneefall; und c) Schneedeckenparameter wie schwachen Schichten, Korngrösse und -form ab (Schweizer et al. 2003, Bühler et al. 2013). Lawinenanrisse entstehen typischerweise bei Hangneigungen zwischen 30° und 50° (Schweizer et al. 2003, McClung und Schaerer 2006). Schneeanlagerungen in Gelände über 45° Neigung entlasten sich häufig und die Bildung von Schneebrettlawinen wird verhindert (Margreth 2007). Nach Veitinger et al. (2016) entstehen keine Lawinen bei einer hohen Bodenrauigkeit (über dem VRM-Schwellenwert von 0.02). Die Schutzfunktion des Waldes ist stark abhängig von seiner Struktur und Zusammensetzung, der Topografie und der Schneeeigenschaften (Viglietti et al. 2010). Der Schneedeckenaufbau im Wald unterscheidet sich stark vom Schneedeckenaufbau auf offener Fläche (Imbeck und Ott 1987). Durch die interzeptionsbedingte stärkere Strukturierung der Schneedecke wird ein Lawinenanriss im dichten Wald weitgehend verhindert (Gubler und Rychetnik 1991, Newesely et al. 2000, Gruber und Bartelt 2007). Für das Verhindern von Waldlawinen soll gemäss der Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion (NaiS) in subalpinen Nadelwäldern bei einer Hangneigung von 40° eine Lückenlängen von 40 m respektive eine Lückenbreite von 15 m nicht überschritten werden (Frehner et al. 2005).

Für die Simulationen wurden automatisch identifizierte Anrissgebiete für das 300-jährige Ereignis angewendet, welche aufgrund der drei Parametergruppen ausgeschieden wurden (Bühler et al. 2013, Bühler et al. 2017). Die in der Marteloskopfläche vorhandenen Lücken sind zu klein, um potenzielle Anrissgebiete darzustellen.

Lawinenparameter

Die 3-Tages-Neuschneesumme gilt als Mass für die Wahrscheinlichkeit der Auslösung von spontanen Grosslawinen (SLF 2000). Kritische Schwellenwerte liegen im Bereich von 75 bis 100 cm (Schneebeli 1998). Für die Höhen der Anrissgebiete wurde die mittels Gumbel Extremwertverteilung berechnete 3-Tages-Neuschneesumme des 300-jährigen Ereignisses der Messstation Davos Stilli (SLF, 1563 m ü. M.) von 1.44 m genommen. Die 1.44 m wurden auf die Meereshöhe der Anrissgebiete extrapoliert, mit der Hangneigung korrigiert und mit Windverfrachtungen von 0.5 m ergänzt (Bühler et al. 2013, Bühler et al. 2017). Die maximal zu erwartende Anrissge-

biere des 300-jährigen Ereignisses und die mittleren berechneten Anrisshöhen sind in Abb. 5 dargestellt.

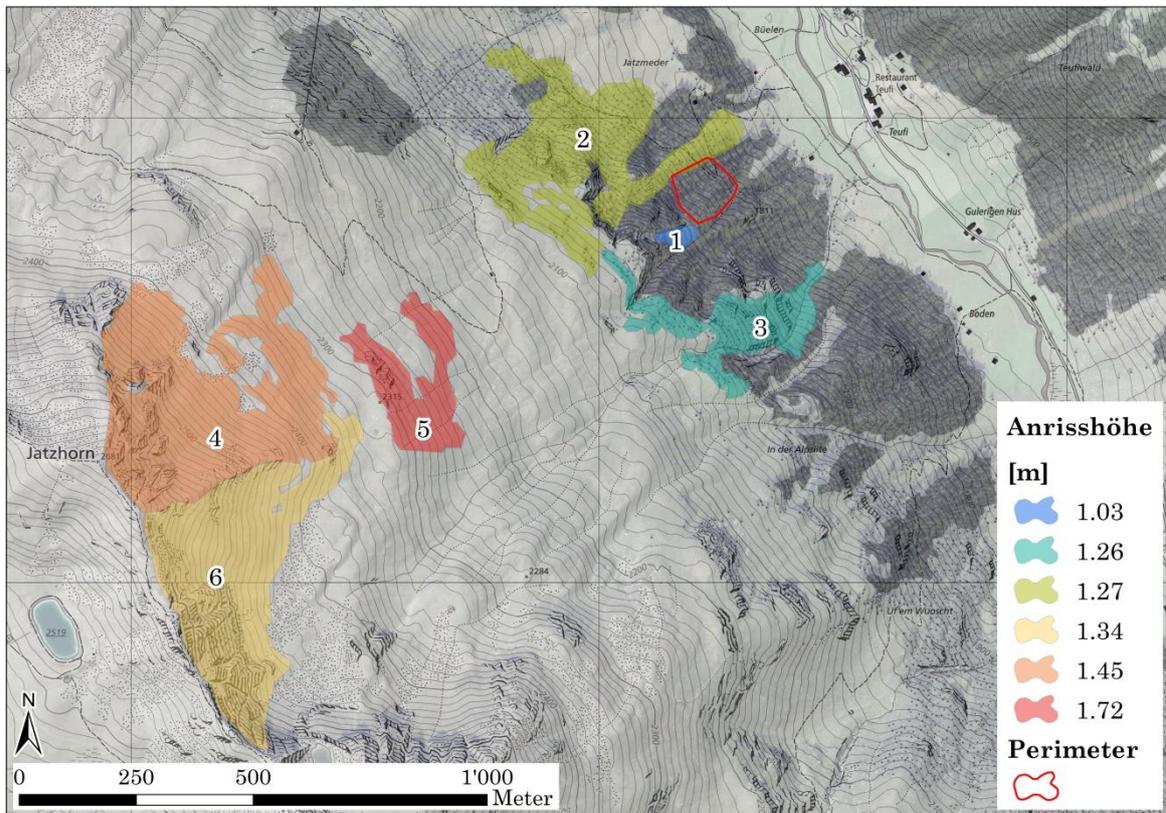


Abb. 5: Anrissgebiete für das 300-jährige Ereignis mit den jeweiligen mittleren Anrisshöhen. Das Anrissgebiet 5 weist aufgrund der geringen Neigung eine grössere Anrisshöhe auf. Rot umrandet der Perimeter der Marteloscopffläche (Orthophoto und Landeskarte: © Bundesamt für Landestopografie swisstopo).

Die Anrissgebiete wurden auf ihr Waldzerstörungspotenzial in der Marteloscopffläche untersucht. Dabei wurden Lawinen für den Waldzustand 2017 und einem Waldszenario 1817 mit der wissenschaftlichen Version des RAMMS::AVALANCHE Moduls simuliert. Die Simulationen wurden mit der bestmöglichen Auflösung des jeweiligen Anrissgebietes durchgeführt (Anhang 2.1), damit alle wichtigen Kennzeichen des Geländes erhalten bleiben (Bartelt et al. 2013). Für die Erosion wurde die geschwindigkeits- und geländebeeinflusste Variante gewählt (Velocity/Slope driven law). Eines der ältesten Häuser der Ansiedlung Teufi hat das Baujahr 1726 vermerkt. Es soll noch ältere Bereiche des Hauses geben (persönliche Mitteilung von Peter Bebi, März 2018). Der Stall in unmittelbarer Nähe dieses Hauses wurde im Lawinenwinter 1951 von einer Lawine erfasst. Die Reichweite der Lawinen wurde folglich für den Maximalfall simuliert, in welchem das älteste Haus von den Lawinen nicht erreicht wird. Aufgrund fehlender Informationen bezüglich Schneedichte, Temperatur und Erosi-

onsverhalten wurden die von Experten getesteten Parameter für kalte, trockene Lawinen mit schwacher Bindung gewählt (Bartelt et al. 2018) und aufgrund der maximal erwarteten Reichweiten angepasst (Anhang 2.1). Damit die Lawinen genügend Geschwindigkeit erreichen, wurde für die Anrissgebiete der Reibungskoeffizient μ auf 0.01 reduziert und der Koeffizient der turbulenten Reibung ξ auf 4000 m/s^2 erhöht. Dies würde einem Schneebrett entsprechen, welches aufgrund einer schwachen Schneesicht abbricht (persönliche Mitteilung von Perry Bartelt, März 2018).

2.4.2. Steinschlagsimulationen

Das circa 40 m hohe Felsband oberhalb der Marteloskopfläche besteht aus Paragneisen der Silvretta-Kristallindecke (Bundesamt für Landestopografie swisstopo 2017). Nach Kistler (2017) befinden sich typische Kubaturen des Steinschlages im Bereich von 0.1 m^3 mit einzelnen abgelagerten Steinen am Fusse des Hangs von über 1 m^3 . Die Durchquerung der Steine wird durch zahlreiche Wunden an Baumstämmen und durch das Vorhandensein von abgebremsten Steinen gut dokumentiert (Abb. 6).



Abb. 6: Felsband oberhalb der Marteloskopfläche, Bäume mit steinschlagbedingten Wunden und ein abgebremster Stein (Fotografien: G. Könz, 2017).

In der wissenschaftlichen Version des RAMMS::ROCKFALL Moduls kann der Wald durch individuelle Baumpositionen, -höhen und -durchmesser abgebildet werden. Da die Marteloskopfläche das Felsband nicht ganz erreicht, wurden von den 79 fehlenden, zwischen der Fläche und dem Felsband liegenden Bäumen die Baumart, der BHD und Verletzungen erhoben. Es sind 34 Vogelbeeren, 21 Fichten, 19 Lärchen und 5 Arven aufgenommen worden. Für die Positionierung der Bäume wurden das digitale Oberflächenmodell (DOM) und die nummerierten Bäume als Orientierungshilfe genommen. Die Höhe wurde den Bäumen in ArcMap aufgrund des VHM (0.2 m Genauigkeit) mit der Einstellung „Interpolate values at the point locations“ zugewiesen. Für die Bäume unterhalb der Marteloskopfläche wurden die Positionen manuell im ArcMap anhand des VHM (1 m Auflösung) ergänzt. Der BHD dieser Bäume wurde durch Gleichung 11 (siehe Seite 16) aus dem VHM (1 m Auflösung) berechnet.

Die angewandten Steinschlagparameter wurden aufgrund von Steinschlagexperimenten in einem Tannen-Fichtenwald in Surava für einen mittelweichen Boden kalibriert (bearbeitet von Sandro Degonda, Anhang 2.2). Die Simulationen wurden für Steingrößen von 0.1 m³ und 1 m³ durchgeführt. Die Bodenrauigkeit wurde aufgrund der VRM-Schwellenwerte von 0.02 und 0.04 in drei Klassen (Tief, Mittel und Hoch) eingeteilt (empfohlen von Yves Bühler, Dezember 2017). Jeder dieser Klassen wurde für die Simulation eine Hindernishöhe zugeteilt. Zwei Varianten der Hindernishöhe (Tabelle 2) wurden untereinander und mit einer konstanten Hindernishöhe von 0.2 m verglichen.

Tabelle 2: Zwei Varianten der Hindernisgrößen für die VRM-Rauigkeitsklassen.

Rauigkeit	Variante max	Variante min
Tief	0.2 m	0.2 m
Mittel	0.6 m	0.4 m
Hoch	1.0 m	0.5 m

Die räumliche Verteilung der simulierten Baumtreffer wurde mit den beobachteten Verletzungen verglichen. Die Verletzungen wurden im Sommer 2016 von Frank Krumm nach der Anleitung „Catalogue of tree microhabitats“ von Kraus et al. (2016a) aufgenommen. Für die Analyse wurde mittels den Kategorien „Trunk and mould cavities CV21“, „Bark loss/exposes sapwood IN11-IN14“ und „Broken tree crown/fork IN22“ die Variable „Steinschlagtreffer“ (0 bis 2 Steinschlagtreffer) erstellt.

3. Resultate

3.1. Verjüngung

3.1.1. Qualitative Analyse

Auf der Marteloskopfläche wurden 132 Verjüngungsansätze über 50 cm Höhe und unter 7 cm BHD erhoben (Abb. 7). 42 % der Verjüngungsansätze bestanden aus einem einzelnen Baum. Jeweils 11 % der Verjüngungsansätze umfassten zwei respektive drei Bäume. 36 % der Verjüngungsansätze enthielten mehr als drei Bäume. Im nord-östlichen, dichten Bereich des Bestandes wurden 4 Verjüngungsansätze mit über 30 Bäumen erhoben. Hier wies die Verjüngung einen tendenziell flächigen Aspekt auf.

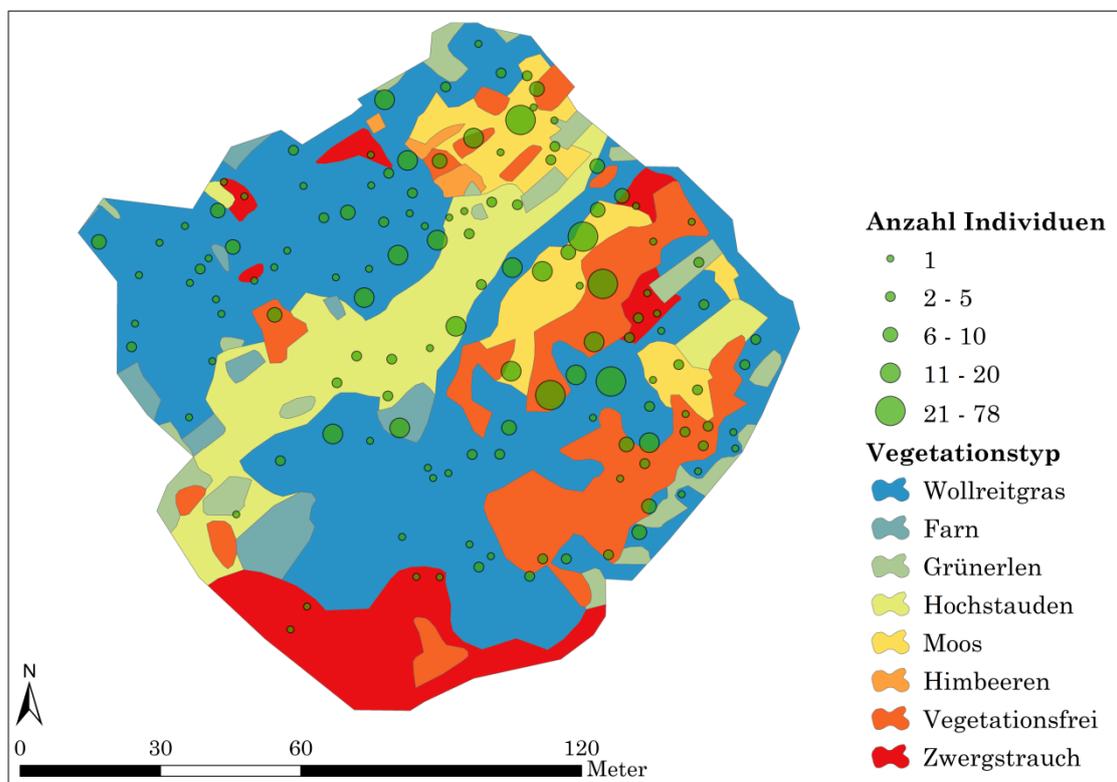


Abb. 7: Verteilung der Verjüngungsansätze der Marteloskopfläche auf den unterschiedlichen Vegetationstypen. Die Grösse der grünen Punkte ist proportional zur Anzahl Individuen pro Verjüngungsansatz.

Gesamthaft wurden 645 Fichten (*Picea abies*), 20 Lärchen (*Larix decidua*), 15 Arven (*Pinus cembra*) und 50 Vogelbeeren (*Sorbus aucuparia*) über 50 cm Höhe erfasst. Die Bestimmung der genauen Anzahl Vogelbeeren wies aufgrund des starken Verbisses und der Aufnahme nach dem Laubfall eine gewisse Unsicherheit auf. Zu den 269 do-

minantesten Bäumen der Verjüngungsansätze (1 bis 3 pro Verjüngungsansatz) wurden 230 Fichte, 17 Lärchen, 11 Arven und 11 Vogelbeeren eingeteilt.

Im nördlicheren, tiefer gelegenen Teil der Marteloskopfläche wurde eine höhere Verjüngungsdichte beobachtet (Abb. 8). Auffällig war nicht nur die höhere Anzahl Verjüngungsansätze, sondern auch die höhere Anzahl Individuen pro Verjüngungsansatz (Abb. 7). Die Verteilung der Dichte aller Verjüngungsansätze war stark von der Fichtenverjüngung dominiert. Diese kam insbesondere in der nördlicheren, unteren Hälfte der Marteloskopfläche gehäuft vor (Abb. 8). Die Vogelbeerenverjüngung befand sich ebenfalls vorwiegend im nördlichen Bereich der Marteloskopfläche. Die Lärchenverjüngung kam geklumpt im südwestlichen Bereich der Marteloskopfläche vor, wo auch Lärchen im Oberwuchs vorhanden waren. Im lärchendominierten südlichen Bereich der Fläche war die Verjüngung nicht von Lärchen, sondern von Arven dominiert.

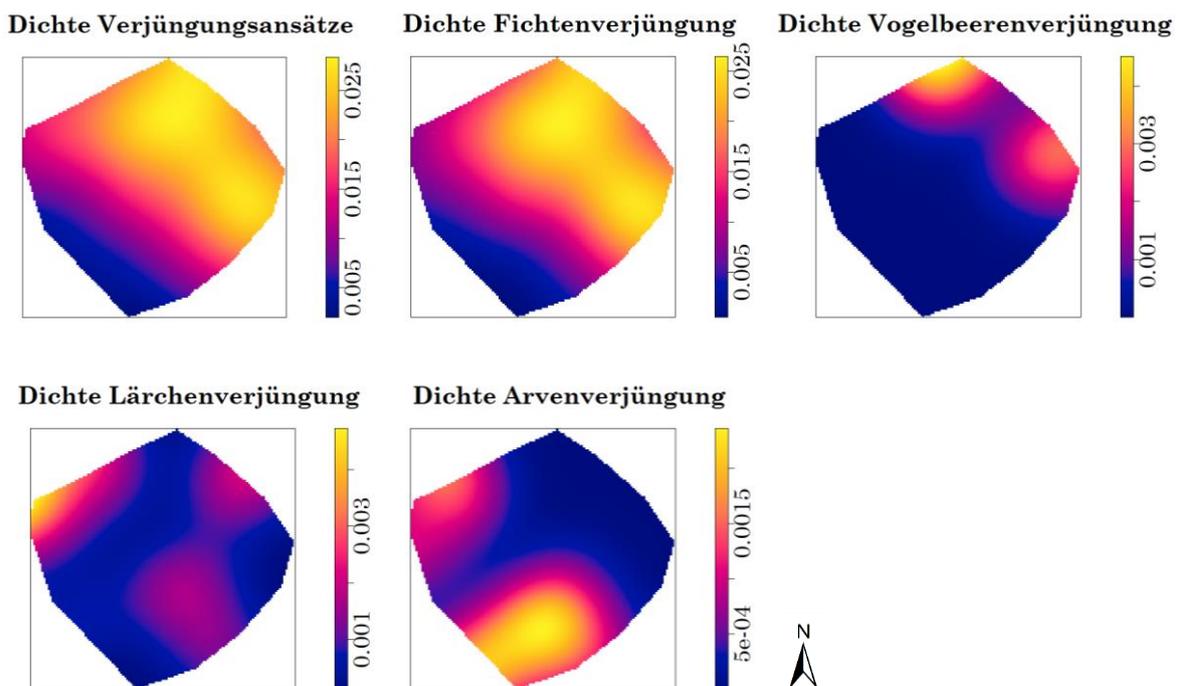


Abb. 8: Räumliche Verteilung der Verjüngungsansätze und der dominanten Individuen der vier Baumarten aufgrund der Kerndichteschätzung.

Vegetation

Die Hälfte der dominanten Individuen der Verjüngungsansätze befand sich auf Wollreitgras (51 %), gefolgt von vegetationsfreien Stellen (17 %) und Moos (13 %). Der Prozentanteil dominanter Individuen variierte stark zwischen der Vegetation und der Mikrovegetation (Tabelle 3). In der Mikrovegetation dominierte Moos bei allen Arten (43 %), gefolgt von Wollreitgras (31 %).

Tabelle 3: Prozent dominanter Individuen der Verjüngungsansätze pro Vegetations- und Mikrovegetationskategorien und Anzahl Verjüngungsansätze pro Flächeneinheit der Vegetationskategorien.

	dominante Individuen [%]		Anzahl Ansätze pro Hektar
	Vegetation	Mikrovegetation	
Wollreitgras	51	31	100
Vegetationsfrei	17	17	90
Moos	13	43	140
Hochstauden	10	7	70
Zwergsträucher	7	2	100
Farn	1	-	20
Grünerle	1	-	30

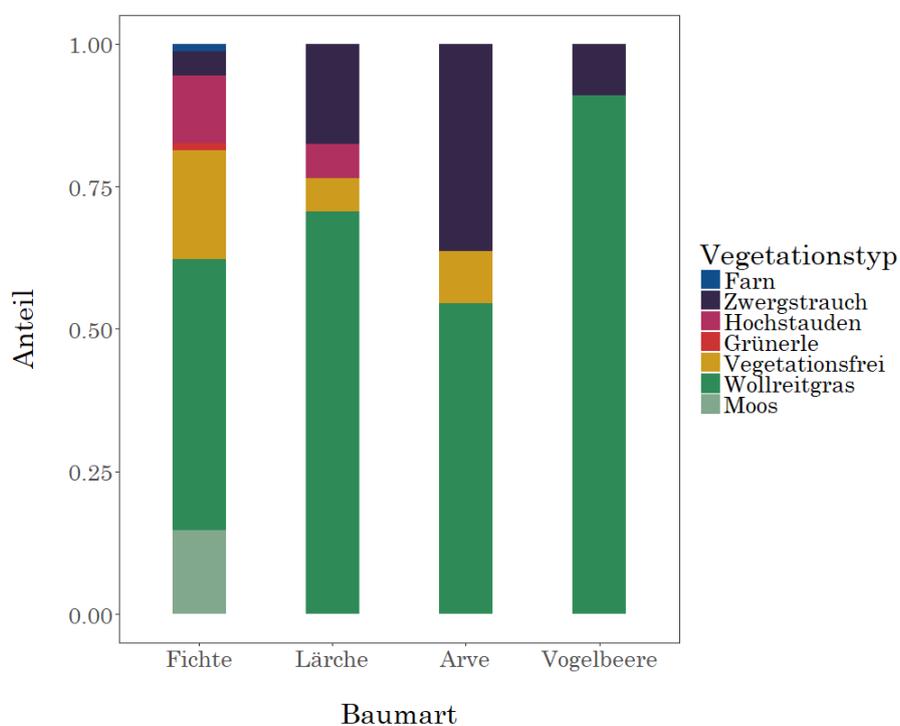


Abb. 9: Verteilung der dominanten Individuen der vier Baumarten nach Vegetationstypen.

Die Verteilung der Arten war von der Vegetation abhängig (p-Wert = 0.003). Bei den Fichten wurde 48 % der Verjüngung auf Wollreitgras vorgefunden, 19 % an vegetationsfreien Standorten, 15 % auf Moos, 12 % auf Hochstauden, 4 % auf Zwergsträucher und jeweils 3 % auf Farn und unter Grünerlen. Bei den Lärchen wurde 70 % der Verjüngung auf Wollreitgras vorgefunden, 18 % auf Zwergsträuchern und jeweils ein Individuum (6 %) in den Hochstauden und an vegetationsfreien Stellen. 55 % der Arven wurden auf Wollreitgras vorgefunden, 47 % auf Zwergsträuchern und 9 % an vegetationsfreien Stellen. 91 % der Vogelbeeren wurden auf Wollreitgras vorgefunden (Abb. 9).

Die totale Fläche, auf welcher die Verjüngungsansätze aufgenommen wurden, beträgt 1.43 ha. Die Anzahl Individuen pro Vegetationstyp unterschied sich zwischen der Beobachtung und der gleichmässigen Verteilung (Abb. 10). Auf den Vegetationstypen Zwergstrauch, Wollreitgras und Moos kam mehr Verjüngung vor als aufgrund der gleichmässigen Verteilung erwartet. Dies sind auch die Vegetationstypen, welche pro Flächeneinheit am meisten Verjüngung aufwiesen (Tabelle 3).

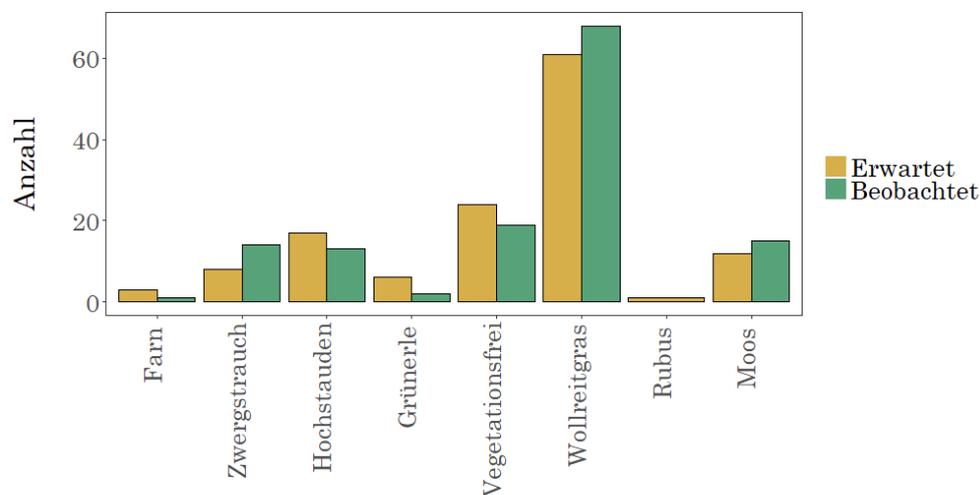


Abb. 10: Gleichmässige und beobachtete Verteilung der Verjüngungsansätze nach Vegetationstypen.

Substrat

70 % der dominanten Individuen der Verjüngungsansätze wurden auf Rohhumus vorgefunden, 22 % auf steinigem Untergrund, 6 % auf Totholz und 2 % auf Wurzeltellern. Der Grossteil der Fichten und Lärchen (67 respektive 71 %) wurden ebenfalls auf Rohhumus vorgefunden, gefolgt von Stein (24 respektive 23 %) und Totholz (7 respektive 6 %). 2 % der Fichtenverjüngung wurde zudem auf Wurzeltellern vorgefunden. 91 % der Arvenverjüngung und 100 % der Vogelbeerenverjüngung wurden auf Rohhumus vorgefunden (Abb. 11).

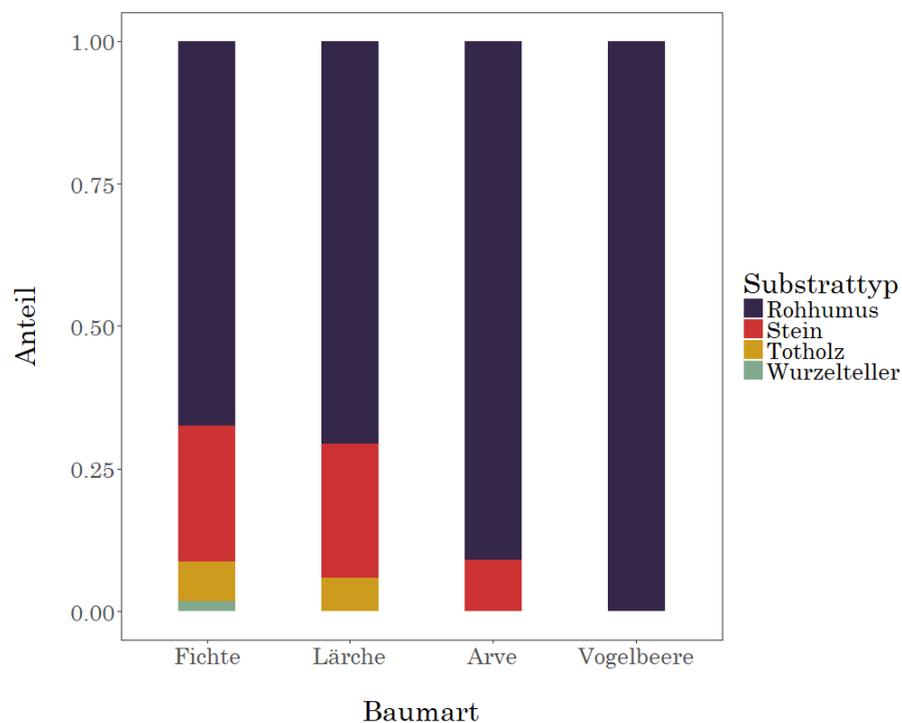


Abb. 11: Verteilung der dominanten Individuen der vier Baumarten nach Substrattypen.

Höhenzuwachs und Baumhöhe

Unterschiedliche Variablen hatten einen Einfluss auf den Höhenzuwachs (Tabelle 4) und auf die Baumhöhe (Tabelle 5). Mehr unbedeckter Himmelanteil und mehr Sonnenscheindauer hatten einen positiven Einfluss auf das Höhenwachstum (p -Wert < 0.001). Bei der Unterteilung in die vier Baumarten, war der Einfluss der Sonnenscheindauer ausschliesslich für die Fichtenverjüngung signifikant ($r = 0.41$, p -Wert < 0.001). Die vorhandene Sonnenscheindauer unterschied sich zwischen den Baumarten (Abb. 12). Die Lärche wies eine höhere mittlere Sonnenscheindauer als die anderen Baumarten auf (2.8 ± 1.2 Stunden pro Tag im Juni). Den dominanten Individuen der Fichtenverjüngung standen im Mittel 2.3 ± 0.8 , den Arven 1.9 ± 0.6 und den Vogelbeeren 2.3 ± 0.6 Stunden Sonnenscheindauer pro Tag im Juni zur Verfügung. Die Verjüngungsansätze wiesen im Mittel 21 ± 8 % unbedeckten Himmelanteil auf. Bei der Fichte betrug der durchschnittlich beobachtete unbedeckte Himmelanteil 21 ± 7 %, bei den Lärchen 23 ± 12 %, bei den Arven 19 ± 6 % und bei den Vogelbeeren 21 ± 5 %.

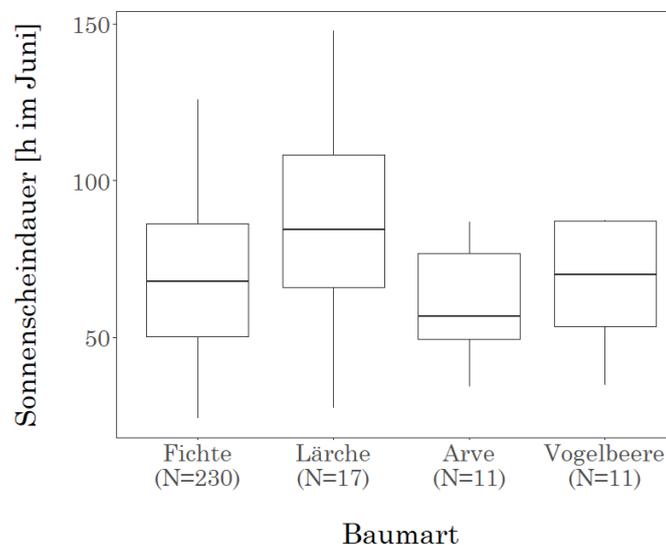


Abb. 12: Durchschnittliche Sonnenscheindauer für die unterschiedlichen Baumarten. Die beobachteten Unterschiede sind statistisch nicht signifikant.

60 % der dominanten Individuen der Fichtenverjüngung (140 von 230) wiesen eine Sonnenscheindauer von mehr als 2 Stunden pro Tag im Juni auf. Von diesen erreichten 21 Individuen nur knapp einen unbedeckten Himmelsanteil von über 20 %. Keine der Lärchen erreichte eine Sonnenscheindauer von 5 Stunden pro Tag. 20 % der Lär-

chen (4 von 17) befanden sich jedoch mit 4.9 (n = 3) respektive 4.6 Stunden pro Tag im Juni (n = 1) sehr nahe an diesem Grenzwert. Diese vier Lärchen befanden sich am Rande zum westlichen Lawinenkanal, wiesen gute Zuwächse auf und waren nicht von Fichtenverjüngung umgeben (Abb. 13a). 55 % der Verjüngungsansätze mit Fichten und Lärchen wiesen genügend Juni-Sonnenscheindauer auf. Auf Farn wiesen 100 % der dominanten Individuen der Fichtenverjüngung ausreichend Juni-Sonnenscheindauer auf, an vegetationsfreien Stellen 73 %, auf Hochstauden 67 %, auf Wollreitgras 61 %, auf Zwergsträuchern 50 %, auf Moos 47 %, und unter Grünerlen 0 % (Abb. 13b).

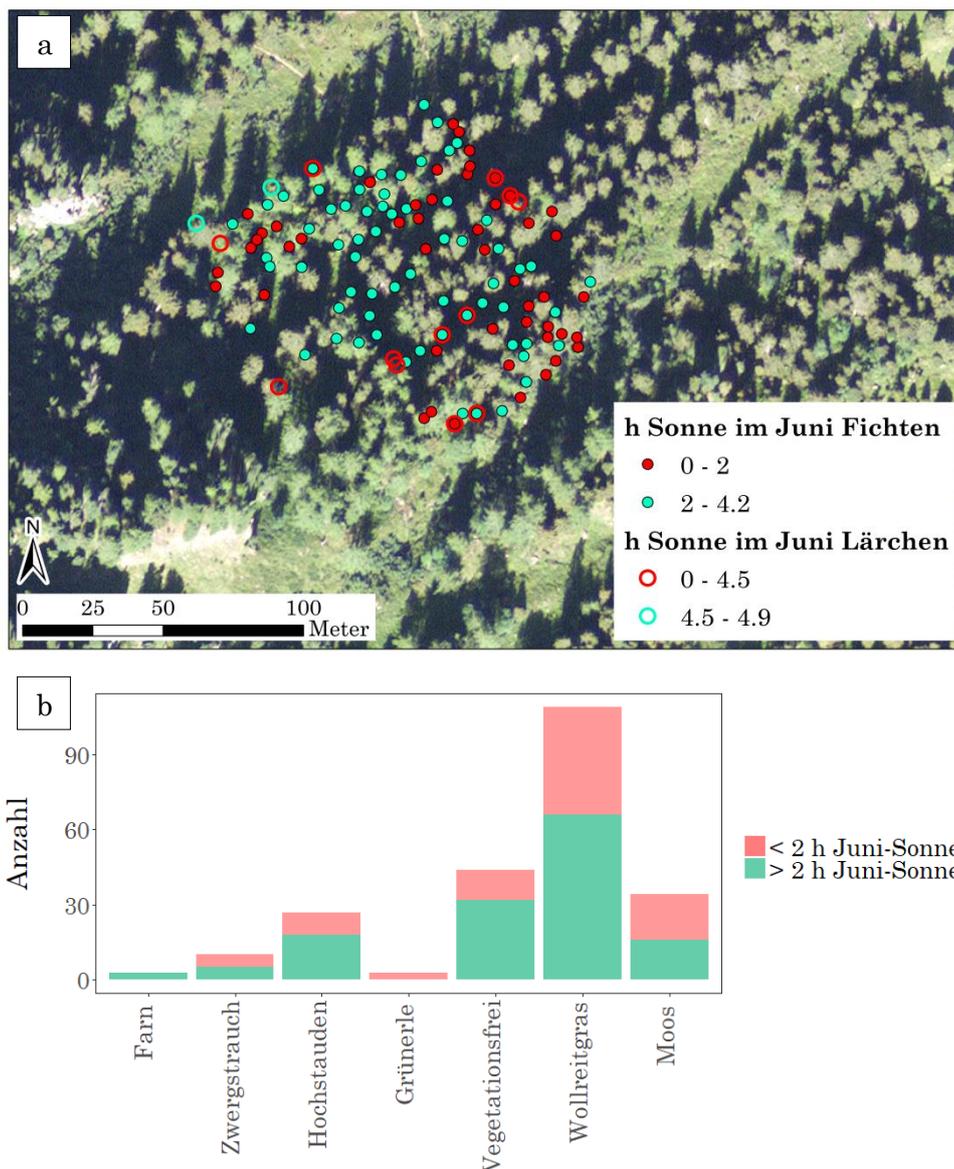


Abb. 13: (a) Verjüngungsansätze der Fichten (gefüllt) und Lärchen (ungefüllt) mit genügend (blaugrün) respektive ungenügend (rot) Juni-Sonnenscheindauer (Krebs 2001, Frehner et al. 2005) (Orthophoto: © Bundesamt für Landestopografie swisstopo). (b) Anzahl dominanter Individuen der Fichtenverjüngung pro Vegetationstyp mit über (blaugrün) respektive unter (rot) 2 Stunden Juni-Sonnenscheindauer pro Tag.

Der Höhenzuwachs war grösser bei höheren Individuen (p-Wert < 0.001). Die Korrelation zwischen Höhe und Zuwachs blieb für die Fichten ($r = 0.37$, p-Wert < 0.001), für die Arven ($r = 0.76$, p-Wert = 0.006) und für die Vogelbeeren ($r = 0.63$, p-Wert = 0.04) bestehen. Für die Lärche war dieser Zusammenhang hingegen nicht statistisch signifikant. Die Zuwachsunterschiede zwischen den 4 Baumarten waren statistisch signifikant (Abb. 14, p-Wert < 0.001). Der beobachtete Zuwachs war mit durchschnittlich 13 ± 5 cm am höchsten für die Lärchen, gefolgt von den Fichten (7 ± 7 cm), den Arven (5 ± 1 cm) und den Vogelbeeren (1 ± 2 cm). Der Unterschied zwischen den Fichten und Lärchen war ebenfalls statistisch signifikant (p-Wert = 0.046).

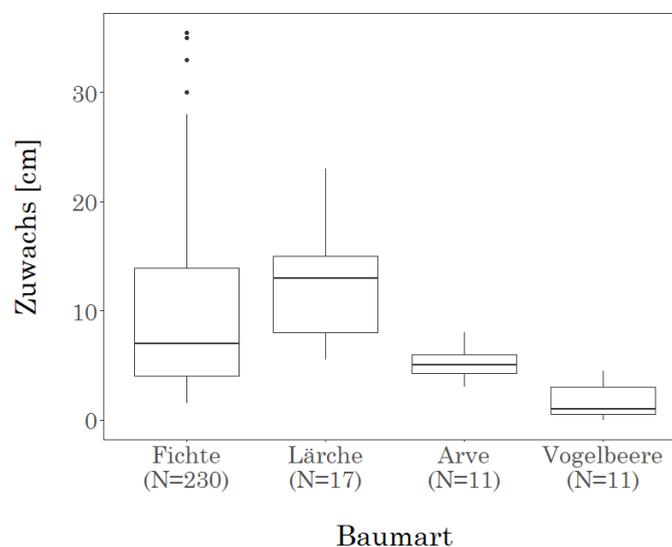


Abb. 14: Die Zuwächse der Fichten, Lärchen, Arven und Vogelbeeren sind signifikant unterschiedlich.

Verjüngungsansätze mit einem grösseren Durchmesser und mehr Individuen wiesen einen höheren Zuwachs auf (p-Wert = 0.047/0.008). Die Zuwachsunterschiede für die unterschiedlichen Vegetationstypen waren statistisch signifikant (p-Wert = 0.016). Die höchsten durchschnittlichen Zuwächse wurden im Vegetationstyp Farn (15 ± 8 cm), gefolgt von Wollreitgras (9 ± 8 cm) beobachtet. Die durchschnittlichen Zuwächse in den Vegetationstypen Zwergsträucher (6 ± 8 cm), Hochstauden (6 ± 7 cm) und Moos (6 ± 4 cm) waren sehr ähnlich. Die aufgezeichneten Zuwächse waren am kleinsten an vegetationsfreien Stellen (5 ± 5 cm) und unter Grünerlen (4 ± 9 cm). Bei höheren Hangneigungen war der Zuwachs kleiner (p-Wert = 0.022). In dichten Verjüngungsansätzen, war der Zuwachs ebenfalls kleiner (p-Wert = 0.049).

Tabelle 4: Zusammenhang zwischen Zuwachs und den signifikanten erklärenden Variablen aufgrund der Pearsons Korrelation respektive Welch-Test und zugehörige p-Werte.

Variable	Korrelation	p-Wert
Höhe Herbst 2017	0.42	< 0.001
Sonnenscheindauer	0.40	< 0.001
Unbedeckter Himmelanteil	0.38	< 0.001
Höhe Frühling 2017	0.38	< 0.001
Baumart		< 0.001
Durchmesser	0.16	0.008
Vegetation		0.016
Neigung	- 0.14	0.022
Dichter Ansatz	- 0.12	0.049
Anzahl	0.12	0.047

Die höchste Verjüngung wurde an Stellen mit langer Sonnenscheindauer und grösserem unbedecktem Himmelanteil (p-Wert < 0.001) vorgefunden. Verjüngungsansätze mit mehr Individuen waren höher (p-Wert < 0.001). Je höher die Zuwächse waren, desto höher waren auch die Bäume (p-Wert < 0.001). Dichte Verjüngungsansätze waren generell höher (p-Wert < 0.001). Kleinere Individuen waren stärker verbissen (p-Wert < 0.001). Grössere Individuen wiesen hingegen mehr Verletzungen auf (p-Wert = 0.002).

Der Höhenunterschied war sowohl zwischen den Baumarten (p-Wert = 0.003) als auch zwischen den Vegetations- respektive Mikrovegetationstypen (p-Wert = 0.007 respektive 0.001) statistisch signifikant. Dabei waren Lärchen am grössten (318 ± 182 cm), gefolgt von den Fichten (192 ± 155 cm), den Arven (95 ± 96 cm) und den Vogelbeeren (87 ± 153 cm). Die Verjüngungsansätze waren durchschnittlich am höchsten auf dem Vegetationstyp Farn (420 ± 75 cm), gefolgt von vegetationsfreien Stellen (319 ± 200 cm), Moos (181 ± 124 cm), Hochstauden (180 ± 124 cm), Wollreitgras (168 ± 142 cm), Zwergsträucher (145 ± 167 cm) und Grünerle (120 ± 158 cm). Bei der Mikrovegetation fanden sich die höchsten Individuen auf vegetationsfreien Stellen (320 ± 192 cm), gefolgt von Moos (154 ± 124 cm), Wollreitgras ($215 \text{ cm} \pm 158$), Hochstauden (172 ± 141 cm) und Zwergsträucher (95 ± 106 cm).

Tabelle 5: Zusammenhang zwischen Höhe am Ende des Jahrs 2017 und den signifikanten erklärenden Variablen anhand von Pearsons Korrelationen respektive Welch-Test und zugehörigere p-Werte.

Variable	Korrelation	p-Wert
Sonnenscheindauer	0.63	< 0.001
Unbedeckter Himmelaanteil	0.61	< 0.001
Durchmesser	0.47	< 0.001
Zuwachs	0.42	< 0.001
Anzahl	0.41	< 0.001
Verbiss	- 0.35	< 0.001
Dichter Ansatz	0.30	< 0.001
Mikrovegetation		0.001
Verletzung	0.19	0.002
Baumart		0.003
Vegetation		0.007

3.1.2. Multivariate Analyse

Da die Sonnenscheindauer und der unbedeckte Himmelaanteil sehr stark miteinander korreliert waren ($r = 0.99$, p-Wert < 0.001), wurde der unbedeckte Himmelaanteil für die Erstellung der linearen Modelle weggelassen. Für die Modellierung wurde nur die Höhe im Frühling 2017 benutzt. Die Modelle für die Vorhersage des Höhenzuwachses sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Modelle für die Vorhersage des Zuwachses für alle Baumarten, für die Fichten und für die Kombination von Fichten und Lärchen mit jeweiligen AIC und R^2 .

Modell	log (Zuwachs) ~	AIC	R^2
Alle Baumarten	Höhe + Vegetation + Art + Sonnenschein + Verletzung + Neigung + Mikrovegetation + Verbiss	420	0.45
Fichten	Sonnenschein + Vegetation + Höhe + Verletzung + Neigung + Verbiss + Mikrovegetation	359	0.42
Fichten und Lärchen	Sonnenschein + Vegetation + Höhe + Säbelwuchs + Verletzung + Neigung + Meereshöhe	445	0.40

Die vorausgesagten und beobachteten Zuwächse der Stichprobe waren für alle Modelle signifikant korreliert (Tabelle 7, Abb. 15). Für die Stichprobe der 30 Fichten betrug der Mittelwert des Höhenzuwachses 6 ± 7 cm. Die berechneten Zuwächse für die Stichprobe waren für das Modell aller Arten 7 ± 3 cm, und für die Modelle der Fichten und der Fichten und Lärchen jeweils 6 ± 3 cm.

Tabelle 7: Korrelationen zwischen beobachteten Zuwächsen und vorausgesagten Zuwächsen für die unterschiedlichen Modelle

Modell	Korrelation	p-Wert
Alle Baumarten	0.64	< 0.001
Fichten	0.62	< 0.001
Fichten und Lärchen	0.77	< 0.001

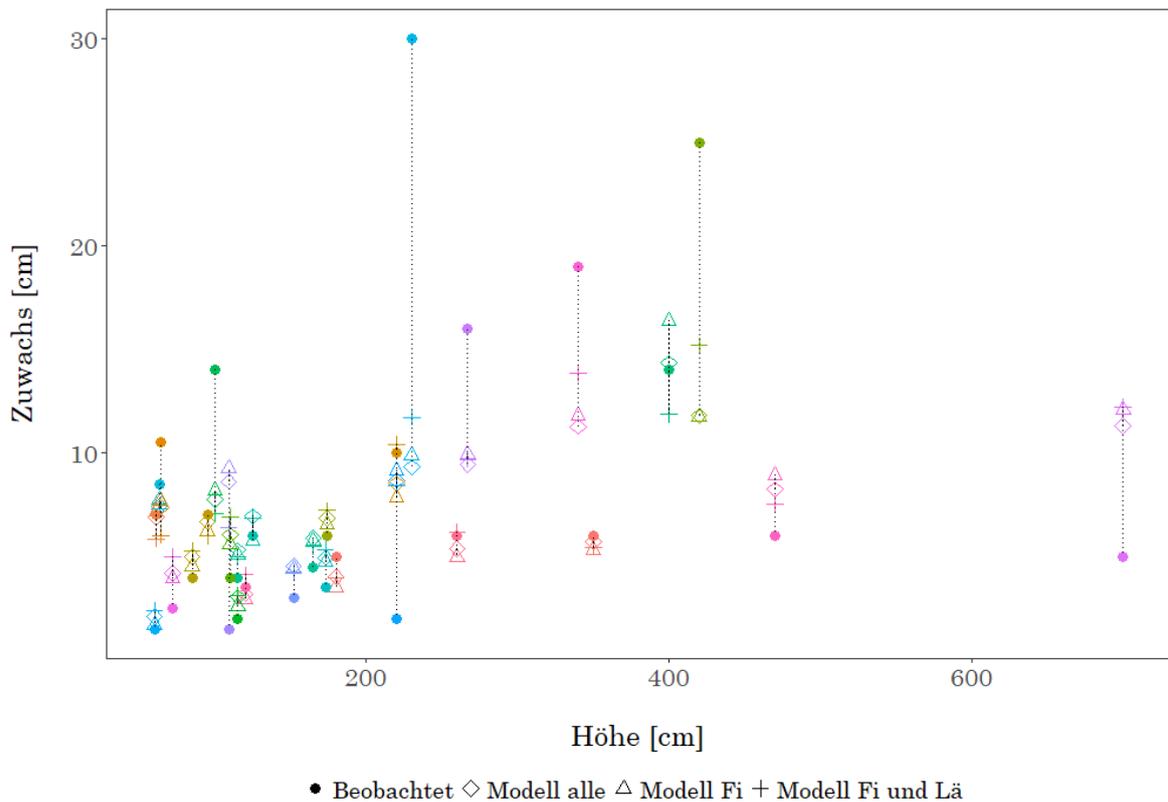


Abb. 15: Vergleich der mittels unterschiedlichen Modellen vorhergesagten Zuwächse und beobachteten Zuwächsen der Stichprobe. Die Farbgebung erfolgt aufgrund der Verjüngungs-ID und dient der Übersichtlichkeit.

3.2. Dendrochronologische Analyse

3.2.1. Datengrundlagen

Von einer gesamten Anzahl von 444 beprobten Bäumen, welche aus 375 Fichten, 68 Lärchen und einer Arve bestanden, konnten 312 (70 %) erfolgreich analysiert werden. Darunter befanden sich 258 Fichten und 54 Lärchen. Die fehlenden 132 Bäume konnten aus unterschiedlichen Gründen nicht vollständig respektive überhaupt nicht analysiert werden. Von 10 % der Proben konnte nur ein Stück analysiert werden. Diese wurden als Fragmente ausgeschieden und nur für gewisse Berechnungen miteinbezogen. Zu den Fragmenten wurden auch sechs Bäume eingeteilt, welche von Simmler (2017) ohne Angabe zur Bohrhöhe erhoben wurden. Rund 9 % der Bäume waren zu faul, um eine Probe zu entnehmen. 5 % der Proben waren zu brüchig um analysiert zu werden. 6 % der Proben ergaben eine zu schlechte Korrelation oder wiesen zu enge Jahrringe auf. Bei 20 % der erfolgreich analysierten Proben wurde das Mark getroffen.

Die Alterskorrektur aller Bäume aufgrund der Verfehlung des Marks betrug im Mittel 4 ± 10 Jahre. Die Alterskorrektur aufgrund der Bohrhöhe betrug 28 ± 4 Jahre für die Fichte und 17 ± 1 Jahre für die Lärche. Die aufgrund der Literaturwerten berechnete lineare Beziehung von Höhe und Alter der Lärche (Gleichung 4) war mit einem R^2 von 0.952 signifikant (p -Wert < 0.001).

3.2.2. Wachstumsmodellierung

Der Bestand wies eine approximative Oberhöhe von 36 m auf. Die grösste Fichte der Marteloskopfläche war 42.10 m, die grösste Lärche 41.41 m hoch. Der älteste dendrochronologisch datierte Baum war eine 353-jährige Fichte aus dem Jahr 1665. Die älteste dendrochronologisch datierte Lärche war 315 Jahre alt. Die Fichten waren im Durchschnitt 82 ± 97 Jahre alt. Die Lärchen waren im Durchschnitt 265 ± 63 Jahre alt. Der jüngste dendrochronologisch datierte Baum war eine Fichte von 49 Jahren. Für alle dendrochronologisch datierten Fichten über der Kluppschwelle ergab sich aufgrund der Bertalanffy-Wachstumsgleichung ein mittlerer Wachstumsfaktor von $0.014 \pm 0.004 \text{ Jahr}^{-1}$. Für die Lärchen ergab sich ein mittlerer Wachstumsfaktor von $0.017 \pm 0.006 \text{ Jahr}^{-1}$. Der Wachstumsfaktor der Lärchen war höher als derjenige der Fichten (Tabelle 8).

Tabelle 8: Aus den dendrochronologisch datierten Bäume über der Kluppschwelle berechneter Wachstumsfaktor für Fichten und Lärchen.

	Anzahl Proben	Ø Wachstumsfaktor
Fichte	234	$0.014 \pm 0.004 \text{ Jahr}^{-1}$
Lärche	26	$0.017 \pm 0.006 \text{ Jahr}^{-1}$

Für die Bäume über der Kluppschwelle ohne dendrochronologische Information wurde mittels der Bertalanffy-Wachstumsgleichung ein maximales Alter von 386 Jahre für eine Fichte berechnet. Das mittlere berechnete Alter betrug 128 ± 81 Jahre für die Fichten und 123 ± 94 Jahre für die Lärchen. Das geringste Alter wurde für eine 44-jährige Lärche berechnet. Für 28 Bäume (22 Fichten und 6 Lärchen) über 36.5 m Höhe konnte keine Altersberechnung durchgeführt werden.

Wenn sowohl das dendrochronologisch bestimmte Alter als auch das mittels Bertalanffy-Wachstumsgleichung berechnete Alter betrachtet wurden, betrug das mittlere Alter der Bäume über der Kluppschwelle 122 ± 95 Jahre, mit Fichten von 96 ± 93 Jahren und Lärchen von 264 ± 73 Jahren. Ein Grossteil der dendrochronologisch datierten Bäume lag innerhalb der Standardabweichungen der bestimmten Bertalanffy-Wachstumskurven. Grosse Abweichungen fanden sich insbesondere bei fortgeschrittenem Alter der Bäume (Abb. 16).

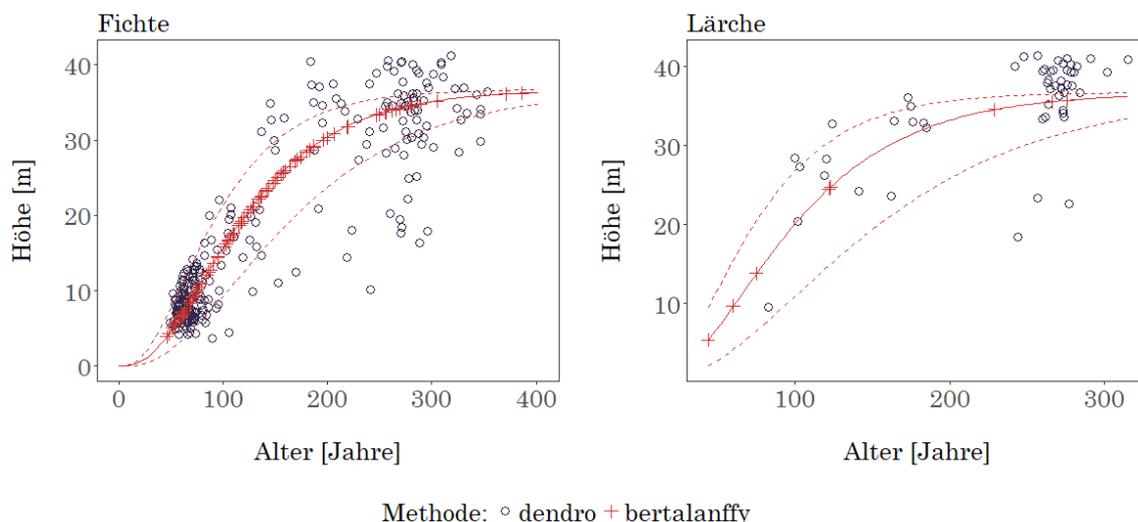


Abb. 16: Dendrochronologisch datierte Bäume (blaue Punkte) und mittels Bertalanffy-Wachstumsgleichung berechnete Alter (rote Kreuze). Durchgezogen die Wachstumskurve, gestrichelt die obere und untere Standardabweichung der Wachstumskurve.

Die Berechnung der Wachstumsfaktoren aus den Höhenunterschieden der Verjüngungsansätze zwischen 2016 und 2017 ergab ein mittlerer Wachstumsfaktor von $0.008 \pm 0.007 \text{ Jahr}^{-1}$ für die Fichten und von $0.011 \pm 0.004 \text{ Jahr}^{-1}$ für die Lärchen (Tabelle 9). Die Berechnung der Wachstumsfaktoren aus der beobachteten respektive berechneten Höhen zwischen 2016 und 2019 ergaben fast identische durchschnittliche Wachstumsfaktoren, jedoch mit einer kleineren Streuung.

Tabelle 9: Mittlerer Wachstumsfaktor für Fichten und Lärchen unter der Kluppschwelle von 7 cm BHD berechnet aus den Höhenunterschieden zwischen 2016 und 2016 respektive 2016 und 2019.

	Anzahl Proben	Ø Wachstumsfaktor
Fichte 2016-2017	230	$0.008 \pm 0.007 \text{ Jahr}^{-1}$
Lärche 2016-2017	17	$0.011 \pm 0.004 \text{ Jahr}^{-1}$
Fichte 2016-2019	230	$0.008 \pm 0.004 \text{ Jahr}^{-1}$
Lärche 2016-2019	17	$0.010 \pm 0.003 \text{ Jahr}^{-1}$

Die Berechnung des Alters der Bäume unter der Kluppschwelle mit den dendrochronologisch bestimmten Wachstumsfaktoren (Tabelle 8) ergab ein mittleres Alter von 34 ± 10 Jahren. Mittels den aus den Verjüngungsansätzen berechneten Wachstumsfaktoren (Tabelle 9) ergab sich ein Alter von 59 ± 54 Jahren respektive 56 ± 32 Jahren. Die Berechnung aufgrund der linearen Gleichungen ergab ein mittleres Alter von 36 ± 15 Jahren. In Tabelle 10 und Abb. 17a ist das mittels unterschiedlichen Methoden berechnete Alter dargestellt.

Tabelle 10: Mit unterschiedlichen Methoden berechnete durchschnittliche Alter der Fichten und Lärchenverjüngung einer mittleren Höhe von 2 m.

Methode	Ø Alter	Min Alter	Max Alter
Bertalanffy – Dendro	34 ± 10 Jahre	18 Jahre	63 Jahre
Bertalanffy – 2016-2017	59 ± 54 Jahre	11 Jahre	330 Jahre
Bertalanffy – 2016-2019	56 ± 32 Jahre	17 Jahre	196 Jahre
Lineare Gleichung	36 ± 15 Jahre	14 Jahre	92 Jahre

Die Fichten und Lärchen sind zwischen 2016 und 2017 $8 \pm 7 \text{ cm}$ gewachsen. Der durchschnittliche Zuwachs war $6 \pm 2 \text{ cm}$ für die Altersberechnung mit den dendrochronologisch bestimmten Wachstumsfaktoren. Durch die Berechnung des Alters aus den Höhenunterschieden zwischen 2016 und 2017 respektive zwischen 2016 und 2019 ergab sich ein durchschnittlicher Zuwachs von $3 \pm 3 \text{ cm}$ respektive $3 \pm 2 \text{ cm}$.

Für die lineare Altersberechnung ergab sich ein Zuwachs von 5 ± 2 cm. Der mittels Wachstumsfaktoren der dendrochronologisch datierten Bäume über der Kluppschwelle berechneter Zuwachs kommt dem beobachteten Zuwachs am nächsten (Abb. 17b).

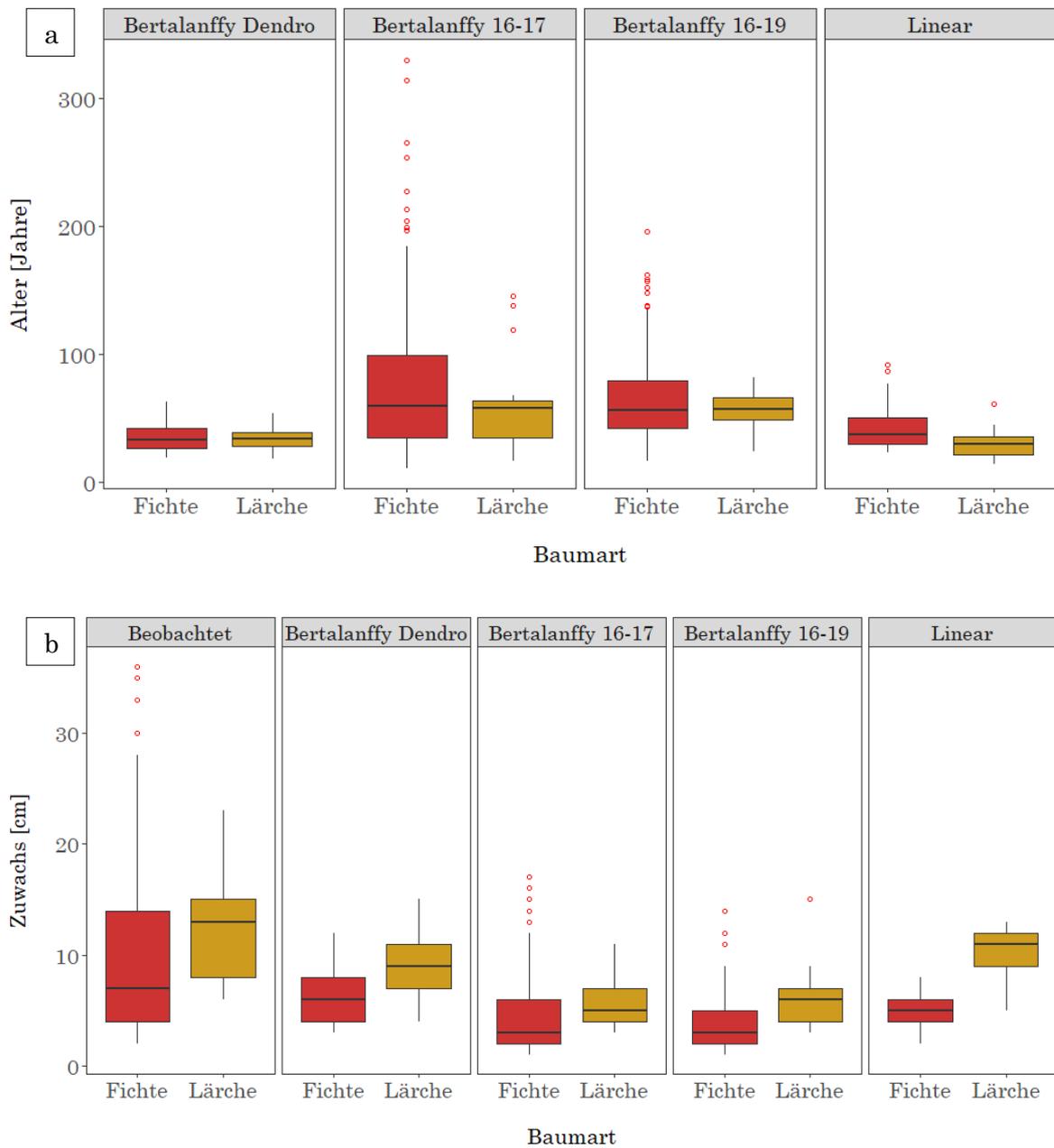


Abb. 17: Mittleres Alter (a) und mittlerer Zuwachs (b) der dominanten Individuen der Verjüngungsansätze einer mittleren Höhe von 2 m, berechnet mit vier unterschiedlichen Methoden.

Die Altersverteilung der dominanten Individuen der Verjüngungsansätze passte je nach angewandter Methode unterschiedlich gut mit der Altersverteilung der dendrochronologisch datierten Bäume und mit den dendrochronologisch berechneten Wachstumskurven der Fichten zusammen (Abb. 18). Die besten visuellen Resultate wurden mit den dendrochronologisch bestimmten Wachstumsfaktoren erzielt, gefolgt von der Altersberechnung durch lineare Wachstumsmodelle. Die Berechnungen direkt aus den Höhenunterschieden der Verjüngung wies eine sehr grosse Streuung auf, wobei die Methode mit dem über mehrere Jahre gemittelten Wachstumsfaktor eine geringere Streuung aufwies.

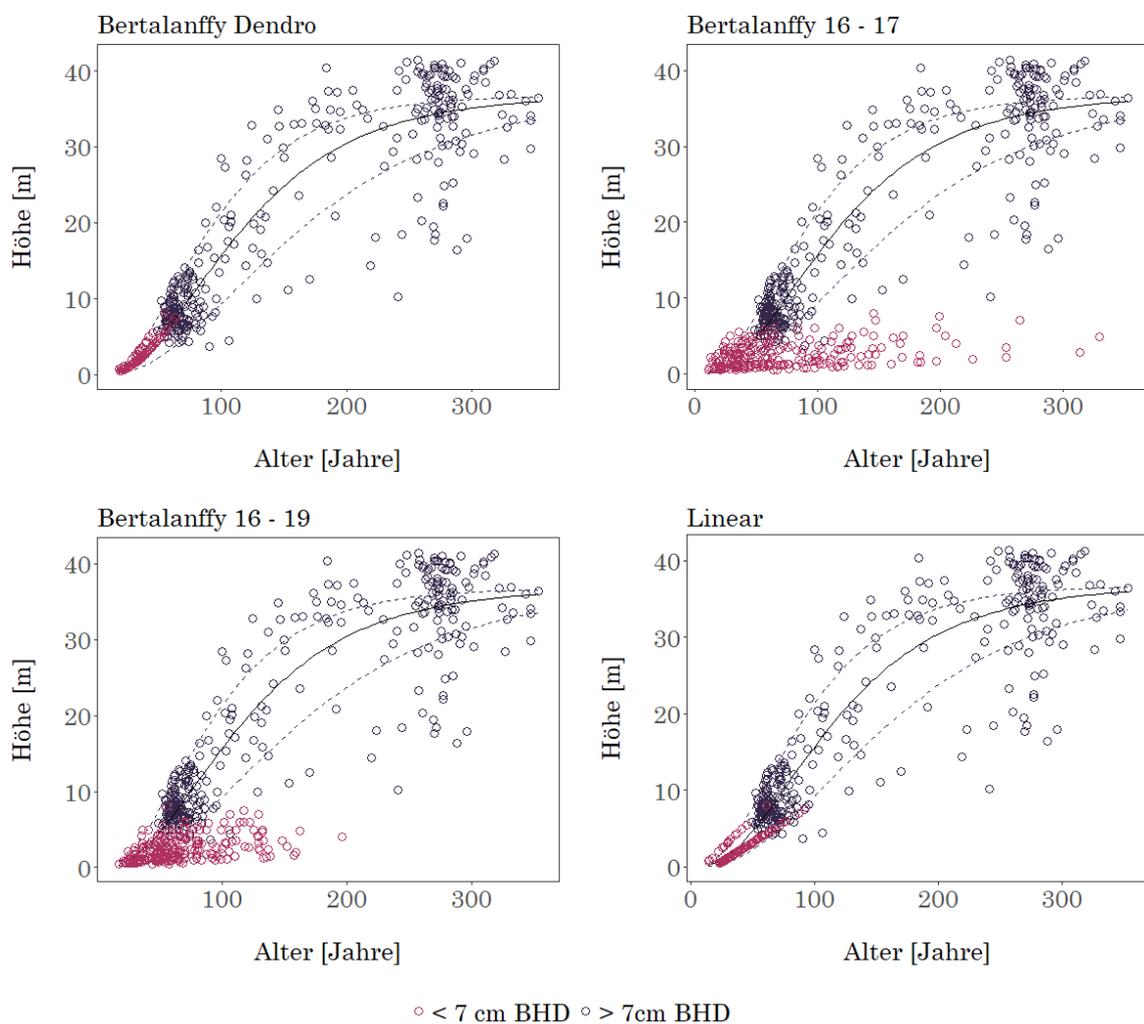


Abb. 18: Dendrochronologisch datierte Bäume über der Kluppschwelle mit Wachstumskurve der Fichten (blau) und die mittels unterschiedlichen Methoden berechneten Alter der Bäume unter der Kluppschwelle (rosa).

3.2.3. Bestandesdynamik

Der Bestand wies zwei Hauptaltersklassen auf (Abb. 19). Sowohl Fichten wie auch Lärchen haben sich zu einem grossen Anteil in der Zeit um 1750 etabliert. Die Anzahl Fichten nahm nach 1900 stark zu. Durch Hinzufügen der Bäume ohne dendrochronologische Information änderte sich das Bild kaum, ausser dass vereinzelte Lärchen sich erst nach 1950 verjüngt haben (Abb. 19).

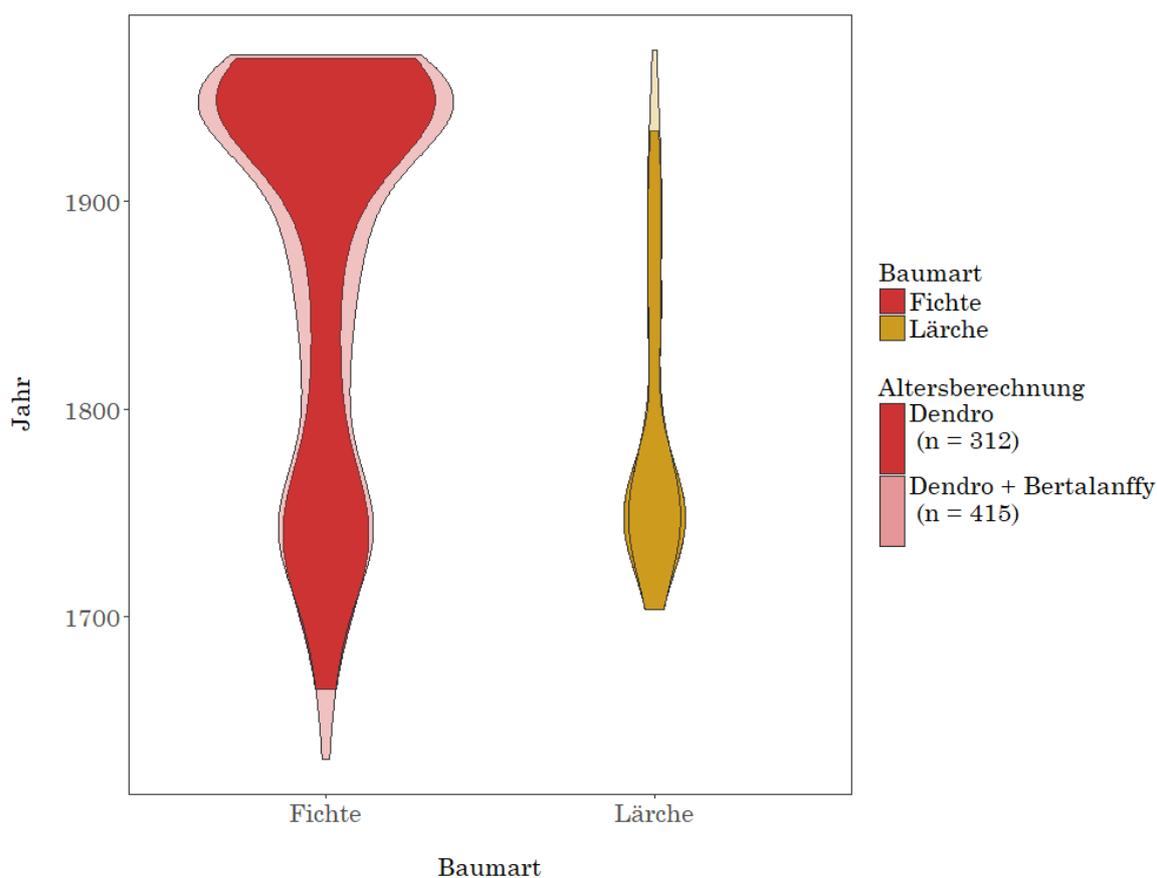


Abb. 19: Anteil Fichten und Lärchen in den unterschiedlichen Jahren. Die Grösse ist proportional zur Anzahl Beobachtungen. Gefüllt die dendrochronologisch bestimmten Alter. Transparent hinterlegt die Summe der dendrochronologisch bestimmten Alter und der mittels Bertalanffy-Wachstumsgleichung berechneten Alter.

Bei der räumlichen Betrachtung der Altersverteilung wird ersichtlich, dass sich die ältesten dendrochronologisch datierten Bäume in der Mitte des Bestandes auf einer Kuppe befinden (Abb. 20). Junge Bäume befinden sich insbesondere an den Randbereichen zu den Lawinenzügen.

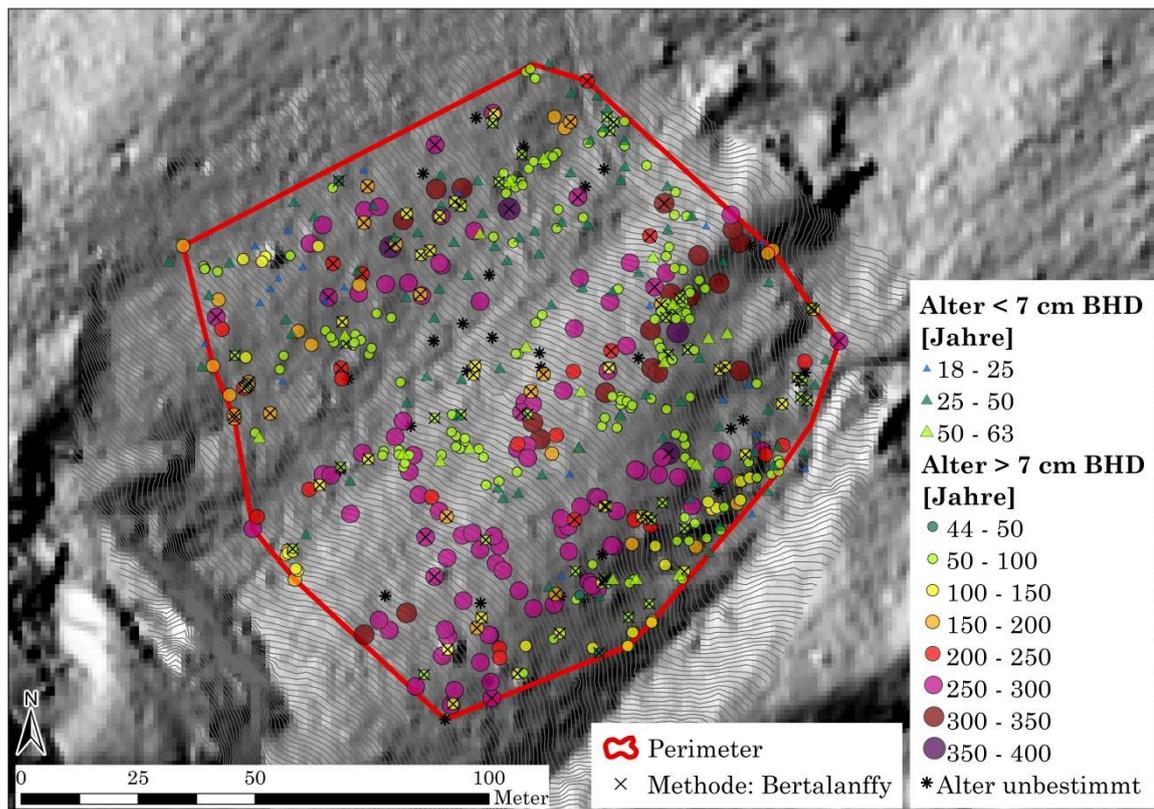


Abb. 20: Räumliche Altersverteilung der Bäume über der Kluppschwelle (Punkte) und unter der Kluppschwelle (Dreiecke). Für die Bäume unter der Kluppschwelle wurde die Altersberechnung mit Wachstumsfaktoren der dendrochronologisch datierten Bäume angewendet. Die 28 Bäume, für welche keine Altersberechnung durchgeführt werden konnte sind als schwarze Sterne dargestellt. Das mittels Bertalanffy-Wachstumsgleichung berechnete Alter ist mit einem schwarzen Kreuz gekennzeichnet. Im Hintergrund die DGM-Schummerung (1 m Auflösung) und 1 m-Höhenlinien.

Aus dem Luftbildvergleich sind, abgesehen von einer Zunahme der Dichte, keine grossen Veränderungen der Waldstruktur zwischen 1946 und 2017 ersichtlich (Abb. 21). Die Dufourkarte, welche zwischen 1832 und 1861 entstand, bestätigt, dass die untersuchte Fläche bereits zu diesem Zeitpunkt bewaldet war.

1832 – 1861



1946



1954



1967



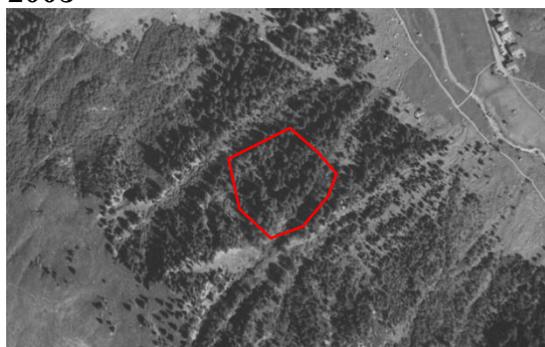
1979



1985



2003



2017



Abb. 21: Entwicklung des Bestandes seit 1832 aufgrund einer Analyse der Dufourkarte und Orthophotos. Auf der Dufourkarte sind zusätzlich die Bäume aufgeführt, welche aufgrund der Messungen und Berechnungen der vorliegenden Arbeit im Jahre 1832 vorhanden waren. In rot die Lage der Marteloskopfläche. (Dufourkarte und Orthophotos: © Bundesamt für Landestopografie swisstopo).

3.2.4. Freistellungseffekte

Gesamthaft konnten 364 Freistellungseffekte bei den Fichten und 234 Freistellungseffekte bei den Lärchen beobachtet werden. Davon waren bei der Fichte 77 bedeutende Freistellungseffekte und bei der Lärche 49 bedeutende Freistellungseffekte vorhanden. Gehäufte bedeutende Freistellungseffekte wurden in den Jahren 1821 für die Lärche und in den Jahren 1999 bis 2002 für die Fichte beobachtet (Abb. 22). Zwischen 1830 bis 1870 konnten keine Freistellungseffekte beobachtet werden. In diesen Jahren wurde von keinen Lawinenereignissen berichtet (Laely 1984).

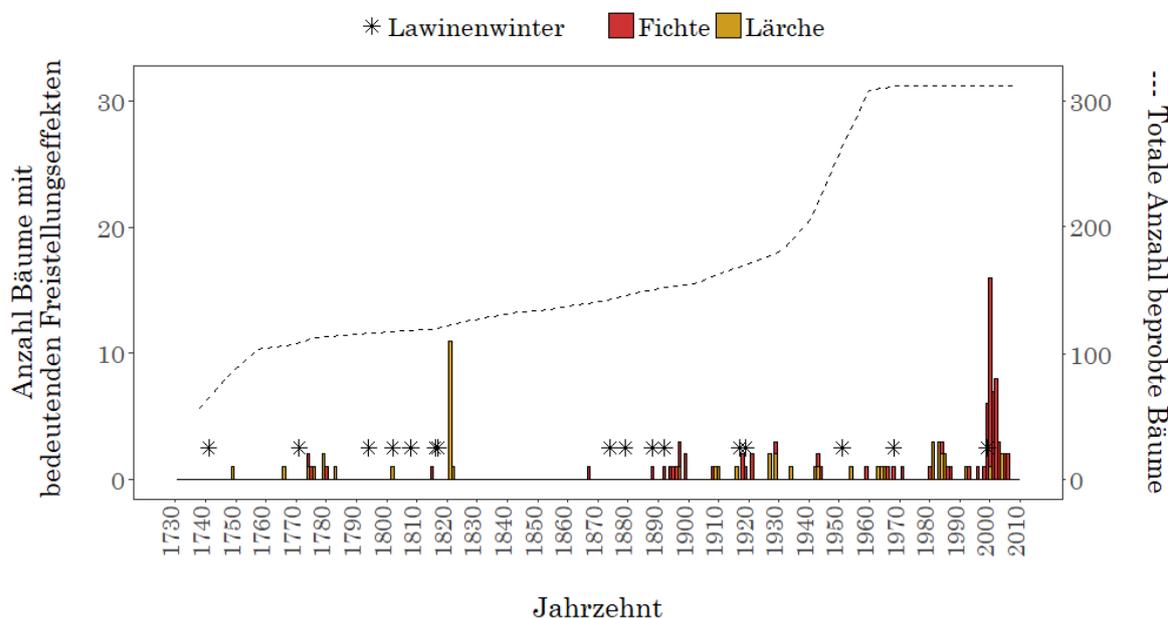


Abb. 22: Verteilung der bedeutenden Freistellungseffekte der Fichten (rot) und Lärchen (gelb). Mit Sternen sind die Jahre gekennzeichnet, für welche in der Lawinenchronik der Landschaft Davos (Laely 1984) viele Lawinen aufgezeichnet wurden. Zusätzlich wurden die Lawinenwinter 1951, 1968 und 1999 hinzugefügt. Gestrichelt die totale Anzahl untersuchte Proben pro Jahr.

Die Freistellungseffekte konnten gehäuft am Rande der Marteloskopfläche festgestellt werden. Die bedeutenden Freistellungseffekte konnten insbesondere im westlichen und im südlichen Bereich nachgewiesen werden (Abb. 23). Im Bereich der ältesten dendrochronologisch datierten Bäume (Abb. 20) konnten sehr wenige bedeutende Freistellungseffekte beobachtet werden (Abb. 23).

Dichte bedeutender Freistellungseffekte

Dichte moderater Freistellungseffekte

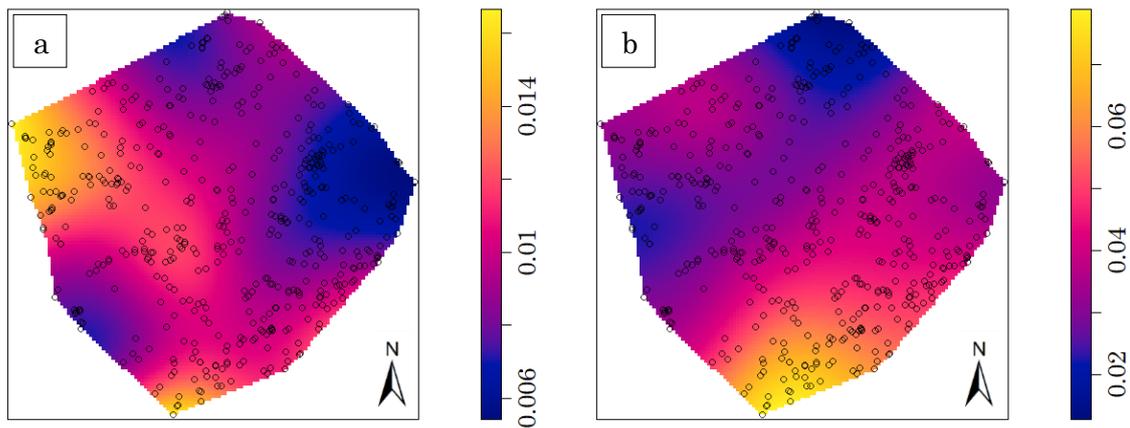


Abb. 23: Dichte der bedeutenden Freistellungseffekte (a) und der moderaten Freistellungseffekte (b) aufgrund der Kerndichteschätzung.

Die bedeutenden Freistellungseffekte des Jahres 1821 konnten insbesondere in den Lärchenbeständen an den Lawinenzuggrenzen festgestellt werden (Abb. 24a). Einige der Fichten im Inneren der Marteloskopfläche haben moderate Freistellungseffekte aufgewiesen. Die Freistellungseffekte zwischen 1999 und 2002 waren auf der gesamten Marteloskopfläche verteilt (Abb. 24b).

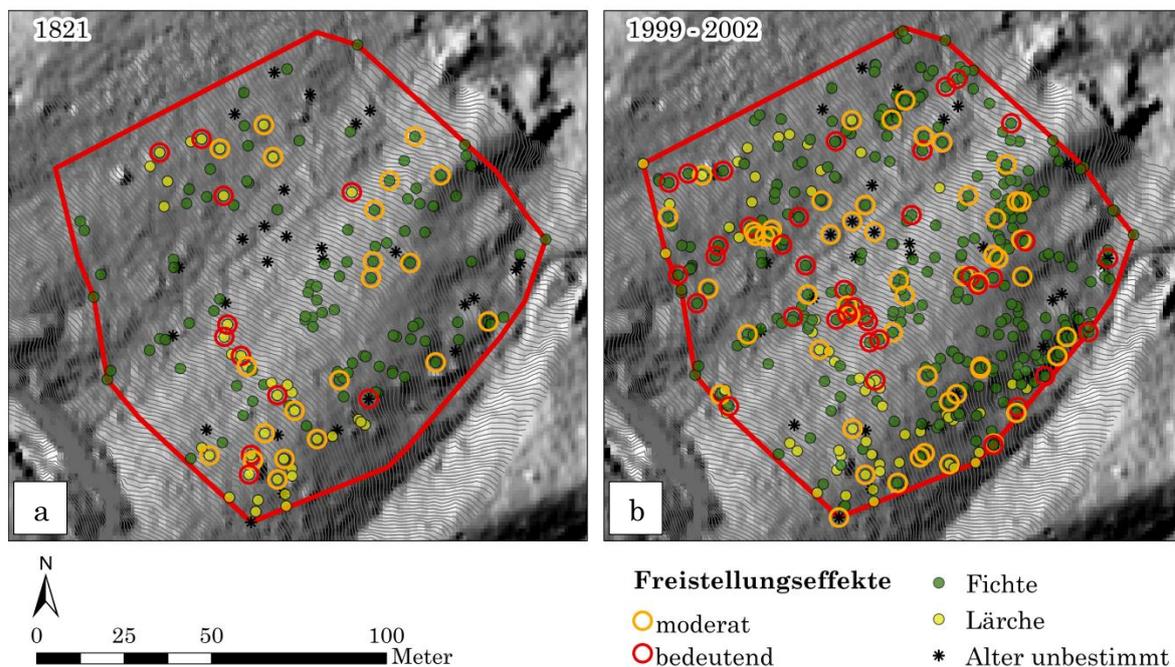


Abb. 24: Moderate Freistellungseffekte (orange) und bedeutende Freistellungseffekte (rot) für das Jahr 1821 (a) und zwischen 1999 und 2002 (b). In rot der Perimeter der Marteloskopfläche. Im Hintergrund die DGM-Schummerung (1 m Auflösung) und 1 m-Höhenlinien.

3.3. RAMMS Simulationen

3.3.1. Lawinensimulationen

BHD-Höhe-Verhältnis

Mit steigendem BHD nahm die Höhe der Bäume zu ($r = 0.93$, p -Wert < 0.001). Sowohl für die Fichte als auch für die Lärche und die Vogelbeere unterschied sich der beobachtete und berechnete BHD der einzelnen Baumindividuen hoch signifikant (p -Wert < 0.001). Der berechnete BHD war generell höher als der gemessene BHD, wobei die Differenz bei der Lärche grösser als bei der Fichte war (Abb. 25). Bei der Vogelbeere wurde der BHD in der Regel unterschätzt.

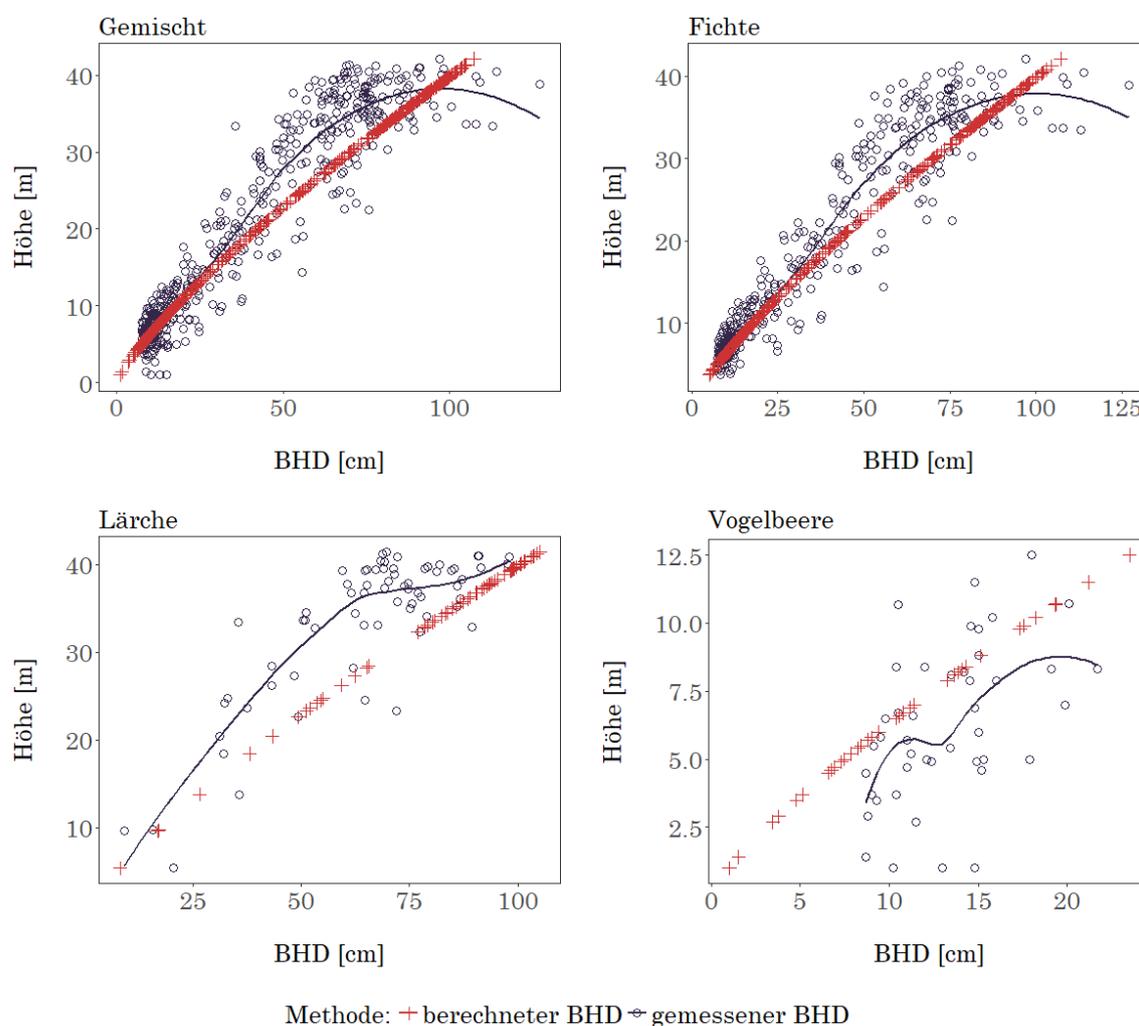


Abb. 25: Beobachtetes und mittels Gleichung 11 (siehe Seite 16) berechnetes Verhältnis zwischen Höhe und BHD.

Auch wenn der durchschnittlich berechnete BHD der ausgeschiedenen Waldpolygone in der Marteloskopfläche mit dem durchschnittlichen gemessenen BHD verglichen wurde, ergab sich eine Überschätzung des BHD. So wurde für den fichtendominierten Bereich der Marteloskopfläche ein BHD von 55 cm berechnet und ein BHD von 39 cm gemessen. Für den südöstlichen, lärchendominierten Bereich der Marteloskopfläche wurden durchschnittlich 58 cm berechnet und 50 cm gemessen.

Lawinenaktivität

Für den Lawinenkanal im Westen der Marteloskopfläche wurden mehrere Lawinnenniedergänge dokumentiert, beispielsweise im Lawinenwinter 1950/51, am 08.04.1993, am 23.04.2008 und am 31.12.2009 (SLF 1952, BAFU 2016). Bei der Lawine im Jahre 2008 wurde Waldzerstörung dokumentiert. Für den Lawinenkanal Ost wurde keine Dokumentation von Lawinnenniedergänge gefunden. Aufgrund einer Analyse von Luftbildern und Orthophotos konnte auf Lawinnenniedergänge mit Waldzerstörung zwischen 1930 und 1945 und im Winter 2014/2015 geschlossen werden. Von der Wasserscheide beim Jatzhorn wurden dokumentierte Lawinen für das Jahr 1950/51, 1999, 2004, 2007, 2008 und 2013 gefunden, welche die Marteloskopfläche jedoch laut Aufzeichnung nicht tangiert haben (SLF 1952, Wiesinger und Adams 2008, Kühne 2015, BAFU 2016).

Die Analysen der Bestandesdynamik und der Freistellungseffekte wiesen auf zwei mögliche Haupt-Lawinenereignisse hin. Das Aufkommen der Lärchen zwischen 1730 und 1760 könnte durch eine grosse Lawine bedingt sein, die zu erheblicher Waldzerstörung geführt hat. Die Freistellungseffekte der Lärche nach 1817 könnten auf ein weiteres Lawinenereignis hinweisen, bei welchem die Lärchen nach der Zerstörung der konkurrierenden Fichten einen Vorteil erlangten.

Simulationen

Da der effektive Waldzustand im Jahr 1730 respektive 1817 schwierig zu rekonstruieren war, wurden die Simulationen mit dem Waldzustand 2017 und mit einem hypothetischen Waldzustand für 1817 durchgeführt (Anhang 1.3). Die zwei Waldszenarien führten in keinem der Anrissgebiete zu grundlegenden Änderungen der Auslauflängen oder Waldzerstörung. Wenn mit dem Waldszenario 1817 simuliert wurde, ergab sich im Vergleich zum Waldszenario 2017 jeweils minimal mehr Waldzerstörung.

Eine Feldbeobachtung ergab, dass die Grünerlen bei einer genügend hohen Schneedecke (ca. 150 cm, 28. Januar 2018) komplett zugedeckt sind (Abb. 26a, Abb. 26b).

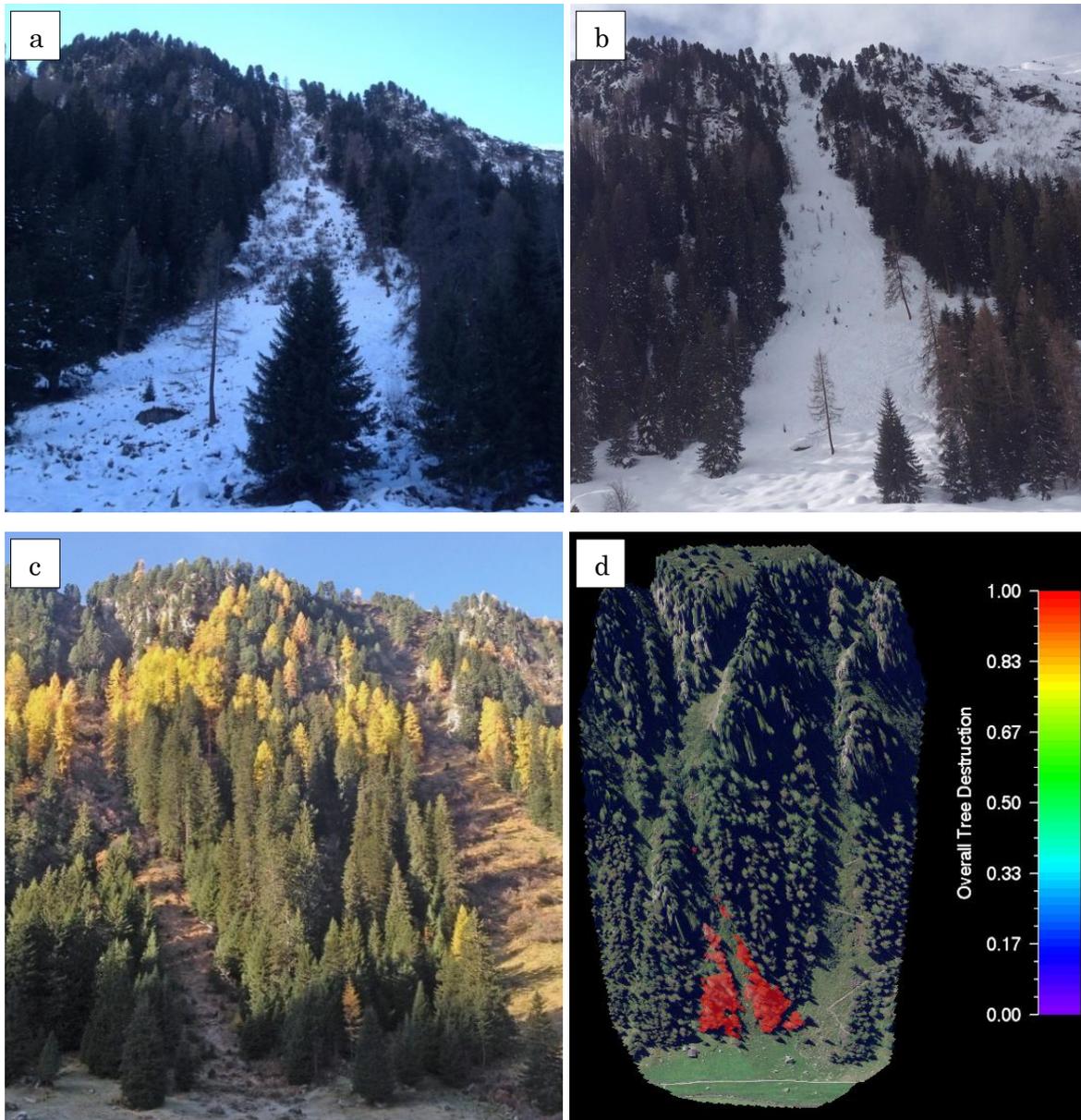


Abb. 26: Lawinenzug West am 22. November 2017 bei einer Schneehöhe von ca. 20 cm (a) und am 28. Januar 2018 bei einer Schneehöhe von ca. 150 cm (b). Am Rande des Lawinenzuges im Osten der Marteloskopfläche sind jungen Fichten zu erkennen (c). In diesem Bereich wird für die Anrissgebiete 1, 3, 4 und 5 Waldzerstörung simuliert (d). (Fotografien: G. Könz, 2017 und 2018; Orthophoto: © Bundesamt für Landestopografie swisstopo).

Für das Anrissgebiet 1 (Abb. 5) wurde für kein Waldszenario Waldzerstörung in der Marteloskopfläche simuliert, obwohl die Lawine die Martelospfläche durchfließt (Anhang 1.4). Die Simulationen ergaben jedoch Waldzerstörung im unteren Bereich

des Lawinenzuges, welche sich gut mit dem sichtbar jüngeren Waldbereich deckt (Abb. 26c, Abb. 26d). In diesem Bereich wurde auch für die Anrissgebiete 3, 4 und 5 Waldzerstörung simuliert. Für die Anrissgebiete 3 und 5 wurde Waldzerstörung im südöstlichen Bereich der Marteloskopfläche simuliert (Abb. 27). Die Waldzerstörung des Anrissgebietes 5 war dabei grösser als diejenige des Anrissgebietes 3. Die Anrissgebiete 2 und 4 ergaben Waldzerstörung am westlichen Rande der Marteloskopfläche. Die Waldzerstörung in der Marteloskopfläche des Anrissgebietes 4 wurde allein durch die Staubwolke hervorgerufen. Das Anrissgebiet 6 direkt unterhalb des Jatzhorns führte zu keiner Waldzerstörung in der Marteloskopfläche. Den Simulationen zufolge fliesst diese Lawinen im Osten an der Marteloskopfläche vorbei und erreicht die Siedlung Teufi (Anhang 1.4).

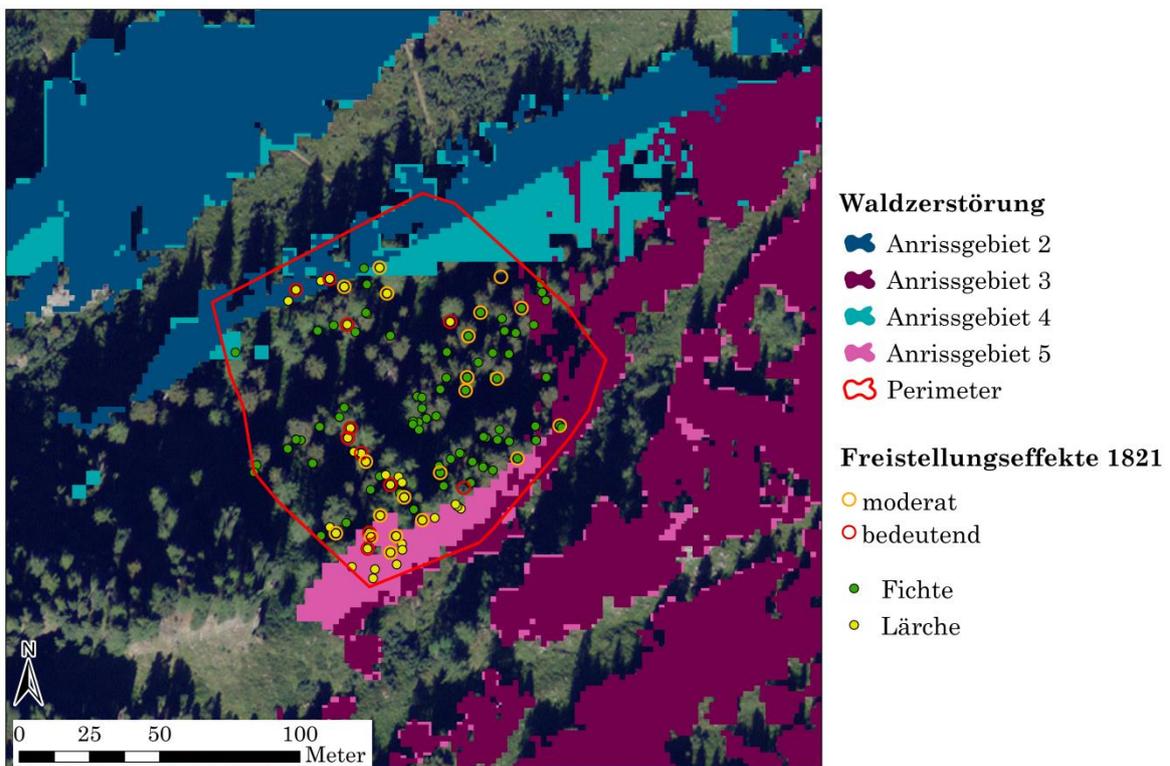


Abb. 27: Simulierte Waldzerstörung für das Waldszenario 1817 für die Anrissgebiete 2 (dunkelblau), 3 (violett), 4 (hellblau) und 5 (rosa). Zudem sind die Freistellungseffekte des Jahres 1821 und die überlebenden Bäume der Marteloskopfläche (roter Perimeter) dargestellt. (Orthophoto: © Bundesamt für Landestopografie swisstopo).

3.3.2. Steinschlagsimulationen

Die beobachteten Steinschlagverletzungen waren relativ homogen über die Marteloskopfläche verteilt und fanden sich leicht gehäuft im südöstlichen Bereich der Marteloskopfläche vor (Abb. 28a). Dies bestätigte sich auch durch das Hinzufügen der Informationen der Verletzungen an den zusätzlichen Bäumen unter der Felswand. Für die Steinschlagsimulationen fanden sich die Baumtreffer jedoch gehäuft im südwestlichen Bereich der Marteloskopfläche vor (Abb. 28b). Dieses Resultat war bezüglich Steingrösse, Bodenrauigkeit und realistischen Anpassungen des Anrissgebietes robust. Die Dichte der beobachteten Verletzungen war deutlich tiefer und homogener auf der ganzen Fläche verteilt als die Dichte der simulierten Baumtreffer.

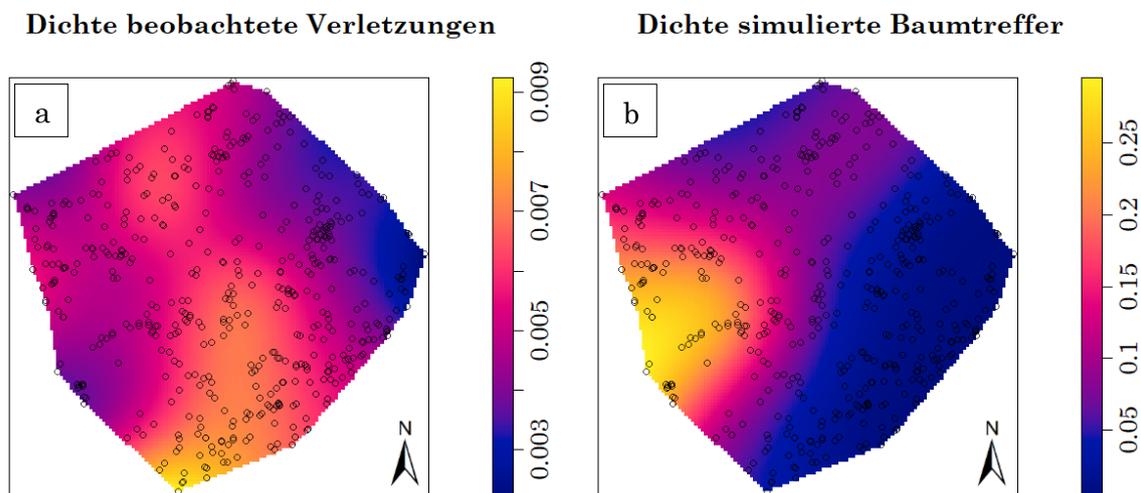


Abb. 28: Kerndichteschätzung der beobachteten Baumverletzungen (a) und der simulierten Baumtreffer mit 0.1 m^3 Steinen und der maximalen Rauigkeitsvariante (b).

Aufgrund der Simulationen passierte der Grossteil der Steine die Marteloskopfläche im nordsüdlichen Bereich (Abb. 29). Im südöstlichen Bereich wurden kaum Stein-schlagtrajektorien simuliert. Die Marteloskopfläche wies jedoch in diesem Gebiet erhöhte Baumverletzungen auf.

Für die Simulation des 0.1 m^3 Steines und der maximalen Rauigkeitsvariante ohne Wald veränderte sich die maximale Auslauflänge abgesehen von einem einzelnen Ausreisser nicht. Es rollten jedoch fast alle Steine bis ganz nach unten und der Schwerpunkt der Auslauflängen befand sich im Vergleich zu der Simulation mit Wald um 107.4 m weiter unten.

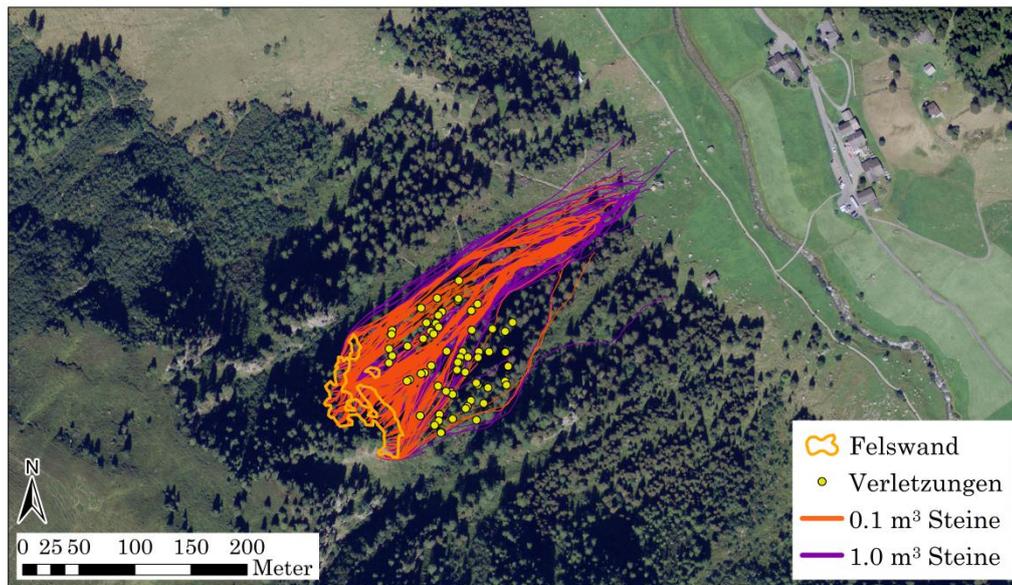


Abb. 29: Verlauf der Steinschlagtrajektionen mit einem 0.1 m^3 (orange) und einem 1 m^3 Stein (violett). Die beobachteten verletzten Bäume sind hellgelb markiert. In dunkelgelb das definierte Anrissgebiet. (Ortho-photo: © Bundesamt für Landestopografie swisstopo).

Je höher die Hindernishöhen gewählt wurden, desto kürzer waren die Auslauflängen, kleiner die Sprunghöhen und tiefer die Geschwindigkeit. Der Schwerpunkt der Ablagerungen der Variante der minimalen Hindernissgrößen war 4.7 m weiter unten als diejenige der maximalen Hindernissgrößen. Der Schwerpunkt der Ablagerungen der Variante der konstanten Hindernissgrößen befand sich nochmals 8.9 m weiter unten. Der durchschnittliche Endpunkt der modellierten Steinschlagtrajektorien von 1 m^3 Steinen befand sich bei ansonsten gleichbleibenden Eingaben im Vergleich zu 0.1 m^3 Steinen 22.9 m weiter oben. Einzelne Steine rollten jedoch weiter nach unten (Abb. 29).

4. Diskussion

4.1. Verjüngung

Die Resultate der vorliegenden Arbeit bestätigen, dass der Höhenzuwachs der Verjüngung von einem komplexen Zusammenspiel unterschiedlicher Faktoren beeinflusst wird und stark standortabhängig ist (Lüscher 1989, Aas et al. 1995, Frehner 2002). In der Marteloskopfläche sind neben der Baumhöhe die Sonnenscheindauer und der unbedeckte Himmelanteil die wichtigsten positiven Faktoren für den Höhenzuwachs der Verjüngung. Diese Feststellung deckt sich mit Ergebnissen zahlreicher Studien, welche den positiven Einfluss der Sonnenscheindauer und der damit verbundenen Wärmezufuhr beschreiben (u. a. Frehner 1989, Lüscher 1989, Brang 1998, Frehner 2002). Der niedrige Höhenzuwachs von sehr dichten Verjüngungsansätzen ist ein weiterer Hinweis auf den positiven Effekt der Sonnenscheindauer. Des Weiteren wird der Höhenzuwachs von der Hangneigung, der Baumart, der Vegetation und der Anzahl Individuen pro Verjüngungsansatz beeinflusst. Die Beobachtung von höherem Zuwachs in flacheren Bereichen bestätigt, dass Schneekriechen und Schneegleiten wichtige limitierende Faktoren der Verjüngung des Alpenlattich-Fichtenwalds mit Wollreitgras sein können (Ott et al. 1997). Entgegen der Erwartung, dass bei Bäumen über 50 cm Höhe die Vegetation keinen grossen Einfluss auf den Höhenzuwachs mehr hat (Ott et al. 1997), waren die Zuwächse zwischen den Vegetationstypen statistisch signifikant. Die höchsten Zuwächse wurden in den Vegetationstypen Farn und Wollreitgras vorgefunden. Der Einfluss des Verbisses konnte nur für die Baumhöhe nachgewiesen werden. Je stärker der Verbiss ist, desto kleiner sind die Individuen. Dies könnte jedoch auch auf die schlechtere Erreichbarkeit grösserer Individuen zurückzuführen sein. Sehr kleine Individuen sollten allerdings von der Schneedecke profitieren und weniger verbissen sein (Pruitt 1960, Stöckli 2002). Da die Bäume unter 50 cm nicht erhoben wurden, konnte dieser Effekt nicht untersucht werden.

Verjüngungsansätze mit einem hohen Zuwachs und einer grossen Höhe sind meist individuenreich. Der durchschnittlich beobachtete Radius der Verjüngungsansätze von 1.8 m entspricht ungefähr dem durchschnittlichen Radius von Verjüngungsansätzen von 1.3 m nach Frehner et al. (2005). Dies bestätigt die Aussage, dass die Verjüngung im Gebirgswald aufgrund der grossen räumlichen und zeitlichen Variationen der Verjüngungsgunst häufig geklumpt aufkommt (Ott et al. 1997, Brang und Duc 2002). In der Marteloskopfläche bestehen jedoch fast die Hälfte der

Verjüngungsansätze aus einem einzelnen Individuum und in den dichten Bereichen des Bestandes weist die Fichtenverjüngung ein flächiges Aufkommen auf.

Der grösste Effekt der Vegetationskonkurrenz wird für das Keimlings- und Sämlingsstadium beobachtet (Ott et al. 1997). Die höchste Anzahl Verjüngungsansätze wurden in den Vegetationstypen Moos, Zwergstrauch und Wollreitgras vorgefunden. Dies steht in Widerspruch zur Aussagen, dass dichte Wollreitgrasteppiche einer der wichtigsten limitierenden Faktoren für die Verjüngung im Alpenlattich-Fichtenwald mit Wollreitgras sind (Ott et al. 1997). Wollreitgras hat einen grossen Einfluss bezüglich Wasserkonkurrenz (Duryea und Brown 2012, Grass 2014). In der nordost-exponierten, relativ feuchten Marteloskopfläche sollte das Wasser kein limitierender Faktor sein. Zusätzlich ist das Wollreitgras aufgrund der hohen Bodenrauigkeit weniger dicht. Auf Ebene der Mikrovegetation sinkt der Anteil Wollreitgras auf 31 % und der Anteil Moos steigt auf 43 %. Die kleinräumige Moosdominanz unter den Verjüngungsansätzen könnte jedoch auch durch die Verjüngung selbst verursacht sein. Die Ergebnisse dieser Analysen zeigen auf, dass die Skala der Vegetationsaufnahme einen grossen Einfluss auf die Ergebnisse haben kann.

Der durchschnittlich bei der Fichtenverjüngung gemessene Höhenzuwachs von 7 cm entspricht dem über 10 Jahre (2002 - 2012) gemittelten jährlichen Höhenzuwachs der Fichtenverjüngung von 8.6 cm in den Regionen Davos und Sedrun (Wölfle 2013). Die mittels ArcMap berechnete mittlere Sonnenscheindauer von 2.3 Stunden pro Tag im Juni ist ebenfalls vergleichbar mit den Resultaten von Wölfle (2013), welche im Jahr 2012 an nord-exponierten Hängen des Dischmatal für Fichtenverjüngung mittels Sonnenkompass eine mittlere Sonnenscheindauer von 2.8 Stunden feststellten. Die Korrelation zwischen unbedecktem Himmelanteil und Sonnenscheindauer ist nach Frehner (2002) tiefer (0.47 an Nordhängen respektive 0.9 an Südhängen). Eine direkte Validierung und Kalibrierung des angewendeten Ansatzes würde eine ArcGIS gestützte Berechnung der Sonnenscheindauer für die Verjüngung aufgrund von Höhenmodellen ermöglichen.

Durch eine Ausweitung des Datensatzes der Lärchen-, Arven- und Vogelbeerenverjüngung könnten die artspezifischen Standortsansprüche genauer untersucht werden. Bereits mit der vorhandenen Stichprobe können Unterschiede bezüglich Höhenzuwachs, Baumhöhe und räumliche Verteilung nachgewiesen werden. Die Lärche weist im Vergleich zur Arve und der Fichte in der Jugend ein rasches Höhenwachstum auf

(Aas et al. 1995). Nach Aas et al. (1995) weist auch die Vogelbeere ein rasches Jugendwachstum auf. Der beobachtete Zuwachs der Vogelbeeren ist jedoch im Vergleich zu den anderen Baumarten am kleinsten. Dies kann durch den starken Wilddruck auf die Vogelbeere erklärt werden (Aas et al. 1995). 55 % der Vogelbeerenverjüngung in der Marteloskopfläche weist Verbissspuren auf. Im Vergleich dazu sind 33 % der Fichten-, 6 % der Lärchen- und 9 % der Arvenverjüngung verbissen. Der Rothirsch (*Cervus elaphus*) soll die Wälder des Dischmatal bis in die sechziger Jahre als Winterstandsbereich genutzt haben (Bebi et al. 2001). Die Relevanz des Wildverbisses auf die Bestandesstruktur und -entwicklung wäre ein interessanter Aspekt für weiterführende Untersuchungen.

Als gute Keimmöglichkeiten von Fichten gelten Moderholz und kleintopographische Erhöhungen (Hillgartner 1971, Zielonka 2006). Die Anzahl der auf Moderholz vorgefundenen Fichten war in dieser Studie jedoch sehr klein. Der Grossteil der auf Moderholz gesichteten Fichten hatte allerdings die Höhe von 50 cm noch nicht erreicht und wurden daher nicht berücksichtigt. Das vorhandene Totholz weist vermutlich einen zu niedrigen Zersetzungsgrad auf, um das Überleben der Verjüngung zu ermöglichen. Die Lärche reagiert noch empfindlicher als die Fichte auf Rohhumusaufgaben (Ott et al. 1997, Frehner et al. 2005). Der Anteil auf Rohhumus vorgefundene Fichten- und Lärchenverjüngung ist deutlich kleiner als bei der Arve und der Vogelbeere. Ob kleintopographische Erhöhungen einen positiven Effekt auf den Höhenzuwachs der Verjüngung haben, sollte in Folgeuntersuchungen festgestellt werden.

Die räumliche Verteilung der Verjüngung weist einen markanten Höhengradienten auf. Im tiefer gelegeneren Bereich der Marteloskopfläche kommt deutlich mehr Fichtenverjüngung auf. Das Marteloskop grenzt an die obersubalpine Höhenstufe (ca. 1800-2350 m ü. M.), welche durch die Absenz der Fichte von der subalpinen Stufe unterschieden wird (Frehner et al. 2005). Die Fichte kommt oberhalb der Marteloskopfläche aufgrund von Wärmemangel, Schnee und dem mit der Alpenrose assoziierten Fichtennadelrost (*Chrysomyxa rhododendri*) kaum mehr vor (Aas et al. 1995, Frehner et al. 2005). Im südlichen Bereich der Marteloskopfläche ist insbesondere Lärchen- und Arvenverjüngung vorhanden. Auffällig ist die geringe, ausschliesslich aus Arven bestehende, Verjüngungsdichte im südwestlichen Bereich der Marteloskopfläche. Es sind sowohl Fichten- als auch Lärchensamenbäume vorhanden. Die generelle tiefe Verjüngungsdichte könnte auf Schneeschimmel, Ausaperungszeitpunkt, oder Schneegleiten und Schneekriechen zurückzuführen sein.

Die Neigungen dieses Bereichs sind jedoch nur leicht höher als die durchschnittliche Neigung der gesamten Fläche (39° im Vergleich zu 38°). Die Rohhumusaufgabe und die starke Präsenz der Alpenrosen, könnte das Erreichen eines günstigen Keimbettes für die leichten Fichten- und Lärchensamen im Gegensatz zu den schwereren, durch den Tannenhäher (*Nucifraga caryocatactes*) verbreitete Arvensamen behindern (Aulitzky et al. 1982, Mattes 1982). In der Marteloskopfläche deckt sich die Arvenverjüngung mit den nach Kistler (2017) berechneten dichteren Waldbereichen der Marteloskopfläche. Die räumliche Verteilung der Arvenverjüngung bestätigt die Ergebnisse von Närmann et al. (2017). Dieser Studie zufolge befinden sich bevorzugte Versteckorte aufgrund der kürzeren Flugdistanzen in Nähe arvendominierter Wälder und aufgrund der niedrigeren Schneedecke und verspäteten Keimung unter dichter Kronenbedeckung.

Um die Struktur stufiger Bestände langfristig zu erhalten ist ausreichende, überlebensfähige und räumlich gut verteilte Verjüngung notwendig (Bachofen 2009). Trotz des hohen Vorrats weist die Waldfläche eine grosse Anzahl Verjüngungsansätze auf. Mit gesamthaft 132 Verjüngungsansätzen respektive knapp 100 Verjüngungsansätze pro Hektare zwischen 50 cm Höhe und 7 cm BHD werden die minimalen Anforderungen des Alpenlattich-Fichtenwald mit Wollreitgras (mindestens 70 Verjüngungsansätze zwischen 40 cm Höhe und 12 cm BHD pro Hektare (Frehner et al. 2005)) klar erreicht. 45 % der Verjüngungsansätze weisen gemäss Beurteilungsansatz von Frehner et al. (2005) zu wenig Licht auf, um zukunftsfähig zu sein. Insbesondere im nordöstlichen Bereich hat ein Grossteil der Verjüngung nicht genügend Licht. Der offenere Bereich des Bestandes im Nord-Westen weist hingegen viel Verjüngung mit genügend Licht auf. Die Lärchenverjüngung kann unter momentanen Bedingungen nur am Rande der Marteloskopfläche aufkommen. Um genauere Aussagen über die Mortalität der Verjüngung zu machen, müssten mehrjährige Feldaufnahmen durchgeführt werden.

4.2. Dendrochronologie

4.2.1. Wachstumsmodellierung

Die Einschätzung des ungefähren Alters der Verjüngung ist eine grundlegende Voraussetzung, um Aussagen betreffend ausreichend Verjüngung für einen langfristig schutzfähigen Wald zu machen. Jugendliche Wachstumsraten sind sehr variabel und werden stark von mikroklimatischen Bedingungen beeinflusst (Motta und Nola 2001). Die Einschätzung des Alters weist daher grosse Unsicherheiten auf (Ott et al. 1997, Brang und Duc 2002, Bühler 2005). Die vorliegende Arbeit bestätigt diese Unsicherheit und zeigt auf, dass die Berechnung des Alters entscheidend von der verwendeten Methode abhängig ist.

Die Altersberechnung der Bäume unter der Kluppschwelle trifft sich für alle vier Methoden mit dem dendrochronologisch bestimmten Alter der Bäume über der Kluppschwelle. Das mit den dendrochronologisch bestimmten Wachstumsfaktoren und mit den linearen Gleichungen bestimmte Alter ergibt optisch den besten Übergang zum Alter der Bäume über der Kluppschwelle. Zudem ist der berechnete durchschnittliche Zuwachs dieser zwei Methoden dem beobachteten Zuwachs sehr ähnlich. Das berechnete durchschnittliche Alter (36 ± 15 Jahre respektive 34 ± 10 Jahre auf einer Höhe von 2 m) befindet sich im Grössenbereich anderer Analysen von Fichtenverjüngung in den Alpen. So wurde für Fichtenverjüngung hochmontaner und subalpiner Gebirgswälder für eine Höhe von 1.89 m ein durchschnittliches Alter von 37 Jahren bestimmt (Brang und Duc 2002). In nord- bis nordost-exponierten Hängen der inneralpiner Alpen wurde im subalpiner Gebirgswald bei einer Höhe von 5 m ein Alter von 35 bis 105 Jahren festgestellt (Lüscher 1989). Die im Jahr 1975 in der Versuchsfläche Stillberg (2070 bis 2230 m ü. M.) aufgeforsteten Bäume weisen bei einem Alter von 40 Jahren circa 2.2 m auf (Brožová 2018).

In der Literatur sind jedoch auch deutlich höhere Verjüngungsalter dokumentiert. So haben nach Hillgarter (1971) die Bäume im Fichtenurwald Scatlé auf einer Höhe von 50 cm bereits ein Alter von 25 Jahren. In Südfinnland weisen Fichten mit einem durchschnittlichen Höhenzuwachs von circa 5 cm pro Jahr auf einer Höhe von 1.3 m ein Alter von 60 Jahren auf (Eerikäinen et al. 2014). Diese Resultate stimmen eher mit den direkt aus den Höhenunterschieden der Verjüngungsansätze berechneten Alter überein. Bei dieser Methode werden auch diejenigen Individuen der Verjüngung repräsentiert, welche nicht überleben oder lange Zeit mit minimalem Zuwachs im

Schatten ausharren. Daher weisen diese Altersberechnungen eine sehr hohe Streuung auf, was vereinzelt zu extrem hohen Altersschätzungen führt. Die Streuung ist des Weiteren auf die Datenerhebung eines einzigen Jahres und auf die grossen Unterschiede der Zuwächse bei verschiedenen Höhen zurückzuführen. Um diese Streuung für zukünftige Untersuchungen zu reduzieren müssten mehrjährige Messreihen der Höhenzuwächse erhoben werden und mit weiteren Untersuchungsgebieten ergänzt werden. Wenige Informationen sind insbesondere über das Höhenwachstum von Lärchen vorhanden. Die Erstellung standort- und baumartenspezifischer Höhen-Alter-Verhältnisse könnte die Einschätzung der Durchwuchszeit und dadurch die Herleitung der benötigten Verjüngung für die Praxis erleichtern. Dafür sind Langzeitstudien des Zuwachses und der Mortalität der Verjüngung notwendig.

4.2.2. Bestandesdynamik

Der Bestand ist sehr alt. Der älteste dendrochronologisch datierte Baum ist eine 353-jährige Fichte aus dem Jahr 1665. Die älteste Lärche ist 315-jährig und stammt aus dem Jahr 1703. Die Bäume der Marteloskopfläche könnten jedoch aufgrund der physiologischen Altersgrenze von Fichten und Lärchen noch älter sein. Die physiologische Altersgrenze von Fichten liegt zwischen 300 und 650 Jahre im Fichtenurwald Scatlé (Hillgarter 1971) respektive zwischen 397 und 445 Jahre in einem Waldreservat im Trentino, Italien (Motta et al. 2002). Nach Aas et al. (1995) wurden in Fichtenurwäldern Altersschätzungen von über 500 Jahren festgehalten. Die Lärche kann bis 1000 Jahre alt werden (Aas et al. 1995). Dass die physiologische Altersgrenze nicht erreicht wird, könnte auf die intensiven Rodungen vor der Festsetzung etlicher Bannwälder im 16. und 17. Jahrhundert (Laely 1984) oder auf die starke Beeinflussung der Wälder durch Holznutzung und Beweidung bis zum Ende des 19. Jahrhunderts (Günter 1980, Laely 1984, Kulakowski und Bebi 2004) zurückzuführen sein. Wenn der Wald der Marteloskopfläche niemals genutzt worden wäre, würde zudem mehr Totholz erwartet werden. Die Marteloskopfläche weist mit gesamthaft 96.9 m^3 respektive $72.3 \text{ m}^3/\text{ha}$ (Morgenthaler 2016) ein tieferes Totholzvolumen auf, als in Urwäldern derselben Sukzessionsphase dokumentiert wurde (Nilsson et al. 2003, Bütler und Lachat 2009, Meigs et al. 2017). Vermutlich wurde das Totholz folglich noch mindestens bis zum Ende des 2. Weltkriegs genutzt. Dass die berechneten Wachstumsfaktoren tiefer als die Wachstumsfaktoren von Offenlandbedingungen nach Rammig et al. (2007) sind, weist darauf hin, dass die Marteloskopfläche bereist längere Zeit bestockt ist.

Der Grossteil der ältesten dendrochronologisch datierten Bäume befinden sich in der nordöstlichen Seite der Marteloskopfläche auf einer topographischen Erhebung. Dies könnte ein Hinweis auf grosse Lawinenereignisse sein, welche nur Bäume an erhobenen Positionen verschont haben. Es ist nicht ausgeschlossen, dass ältere Bäume an anderen Stellen in der Marteloskopfläche vorhanden sind, wie durch die durchgeführte Altersberechnung impliziert wird. Diese sind jedoch von Fäule betroffen, und es konnten keine dendrochronologische Altersdatierung durchgeführt werden. Die topographische Erhebung scheint sich folglich nicht nur positiv auf die Lebensdauer der Bäume auszuwirken, sondern auch auf einen geringeren Fäulnissbefall. Die vorhandenen Waldlücken könnten aufgrund von Schnee- oder Steinschlagdynamik, von Beweidung oder schlechter Verjüngungsbedingungen entstanden sein. So ist beispielsweise in der langen, westlichen Lücke ein Bachverlauf vorhanden, welcher zu schlechten Verjüngungsbedingungen und erhöhter Aktivität gravitativer Naturgefahrenprozessen führt.

Da die Lärche häufig ein höheres Alter als die Fichte aufweist (Aas et al. 1995), ist es interessant, dass der älteste Baum der Marteloskopfläche eine Fichte und keine Lärche ist. Es ist unwahrscheinlich, dass die Lärchenverjüngung unter einem geschlossenen Fichtenbestand aufkommt (Ott et al. 1997), was durch die Verjüngungsbeobachtungen der vorliegenden Arbeit bestätigt werden konnte. Dies deutet darauf hin, dass das Aufkommen der Lärche zwischen 1730 und 1760 erst durch Störungen ermöglicht wurde. Bei diesen Störungen könnte es sich um Lawinen und Steinschlag, jedoch auch um menschliche Aktivität wie Beweidung und Holznutzung handeln. Womöglich handelt es sich auch um eine Kombination unterschiedlicher Faktoren. Ein Anstieg der Holznutzung könnte aufgrund des Baus der Häuser bei der Teufi stattgefunden haben (Baujahr 1726). Die Lärche ist gegenüber Lawinen widerstandsfähiger und weniger schneebruchgefährdet als die Fichte (Aas et al. 1995, Feistl et al. 2014a). Viehtritt kann im Alpenlattich-Fichtenwald mit Wollreitgras die Verjüngungsgunst der Lärche erhöhen und der Entwicklung dichter, unstrukturierter Bestände entgegenwirken (Bebi et al. 2001, Frehner et al. 2005, Mayer und Stöckli 2005).

Der Bestand weist zwei Hauptaltersklassen auf. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der von Simmler (2017) analysierten Stichprobe des Bestandes. Die Altersstruktur muss mit Vorsicht interpretiert werden. Jahre mit wenig Bäumen können sowohl auf eine schlechte Verjüngungsgunst als auch auf ein sekundäres Absterben der Bäume

hindeuten (Johnson et al. 1994). Im heutigen Bestand sind sehr viele Bäume vorhanden, welche um 1750 aufgekommen sind. Gründe hierfür könnten die relativ offenen Bestände nach einem Störungsereignis sein, welche auch gute Bedingungen für das Aufkommen der Lärche aufwiesen. Zwischen den Jahren 1800 und 1900 hat sich wenig Verjüngung etabliert. Dies kann auf dichte Bestände (Laely 1984), auf eine intensive Beweidung (Kulakowski und Bebi 2004) oder auf das kühlere Klima (Pfister 1999) zurückgeführt werden. Der Kreisförster Lietha beschrieb die Situation des Waldes in der Landschaft Davos zu diesem Zeitpunkt wie folgt: „Bei der hohen Wichtigkeit der Waldungen Ihrer Landschaft in so vielen Beziehungen, ist der Zustand, in dem sie sich gegenwärtig befinden, bedenklich. Meist alt und überständig, ohne gesunden, lebenskräftigen Nachwuchs, zeigt er, wenn nicht bei Zeiten der Natur zur Hülfe gekommen wird, für die Zukunft eine waldleere Oede an.“ (Laely 1984). Die starke Beweidung wurde im kreisforstamtlichen Jahresbericht des Jahres 1873 (Staatsarchiv GR, Berichte der Kreisämter IX 1 f 5) folgendermassen festgehalten: „[...] vom 1. Oktober bis 1. Mai [...] findet der Weidegang der Ziegen in fast allen Gemeindewaldungen statt.“ (Günter 1980). Für den Wald der Marteloskopfläche konnte Günter (1980) keinen Nachweis für Beweidung finden. Vermutlich war die beweidete Fläche jedoch grösser als in den Archiven dokumentiert, da sich die Bauern nicht an die Vorschriften hielten und die Weidegebiete nicht eingezäunt waren (Günter 1980). Nach 1900 nimmt die Verjüngung wieder zu. Dies kann auf die kriegsbedingte Abnahme der Beweidung (Motta et al. 2002) oder aufgrund des Weideverbots im Schutzwald nach 1858 (Laely 1984) zurückzuführen sein. Des Weiteren spielten vermutlich die Einführung des ersten Forstgesetzes im Jahr 1876 (Kulakowski und Bebi 2004), die von Coaz angeordneten Verjüngungshiebe (Laely 1984) und das mildere Klima (Pfister 1999) eine Rolle. Zwischen 1946 und 2017 hat die Dichte des Waldes aufgrund der extensiven Nutzung und guten Klimabedingungen zugenommen (Bebi et al. 2001). Um den Bestand in einem noch längeren Zeitraum zurückzuverfolgen, könnten Pollenanalysen interessant sein. Es wurde in den früheren Jahrhunderten selten über das Dischma berichtet (Vögele 1984), was eine geschichtliche Rekonstruktion erschwert.

Der Wald verhindert zurzeit das Anreissen von Lawinen in der Marteloskopfläche und weist einen guten Schutz vor Steinschlagereignissen auf. Aufgrund der topographischen Lage bleibt das Kernstück des Waldes weitgehend von extremen Lawinenereignissen geschützt. In diesem bereits sehr dichten Bereich des Waldes

könnte der Bestand zu Einschichtigkeit und Stabilitätsverlust tendieren. Alternativ könnte die Struktur durch kleinflächige Schadenereignisse wie Einzelbaummortalität erhalten bleiben (Lertzman und Krebs 1991, McCarthy 2001). Die Entstehung von solchen Überschildungslücken weist jedoch eine grosse zeitliche und räumliche Unsicherheit auf und birgt daher ein Risiko für die Schutzfunktion. In einem direkten Schutzwald könnte diese Unsicherheit durch forstliche Eingriffe limitiert werden. Die Marteloskopfläche, welche keine direkte Schutzfunktion übernimmt, ermöglicht hingegen die Beobachtung der zukünftigen Entwicklung, um Praktiker bei der Auswahl geeigneter und zeitgerechter Eingriffe zu unterstützen. In den restlichen Bereichen weist der Bestand aufgrund seiner Struktur und Mischung eine hohe Resilienz auf.

Die Berechnung des Alters der Verjüngung konnte nicht abschliessend geklärt werden. Aufgrund der Beobachtungen und der NaiS-Anforderungen wird jedoch angenommen, dass genügend Verjüngung vorhanden ist um die Stufigkeit langfristig aufrechtzuerhalten (Frehner et al. 2005). Die Mischung erfüllt das Minimalprofil der NaiS-Anforderungen für den Alpenlattich-Fichtenwald mit Wollreitgras (Frehner et al. 2005). Die Präsenz der Vogelbeere trägt ebenfalls zur Resilienz des Waldes bei, da es als Vorwaldbaumart die Vegetationskonkurrenz entschärfen kann (Aas et al. 1995, Ott et al. 1997). Die Mischung der Verjüngung ist mit 88 % Fichte, 7 % Vogelbeere, 3 % Lärche und 2 % Arve ebenfalls zielgerecht. Sie weist jedoch im Vergleich zum Altbestand deutlich mehr Fichte und weniger Lärche und Vogelbeere auf. Es wird zudem erwartet, dass unter momentanen Bedingungen die Lärchen, Vogelbeeren und Arven unter der Kluppschwelle kaum in die Oberschicht gelangen werden. Ohne Störungen oder forstliche Eingriffe wird der Fichtenanteil des Bestandes vermutlich zu nehmen. Aufgrund der hohen Lebenserwartung der Lärche wird die Mischung jedoch lange erhalten bleiben. Um eine hohe Resilienz beizubehalten wäre es zielführend, den Fichtenanteil zumindest nicht noch mehr zu erhöhen. Eine gute Risikoverteilung durch Artenvielfalt ist vor dem Hintergrund des Klimawandels, welche in Zukunft zu intensiveren respektive häufigeren Störungen führen könnte, von überragender Wichtigkeit (Dale et al. 2001, Kulakowski et al. 2017). Ein zu hoher Fichtenanteil ist insbesondere auch aufgrund der klimawandelbedingten Zunahme des Befallsrisikos durch den Buchdrucker (*Ips typographus*) nachteilig (Jakoby et al. 2015).

4.2.3. Freistellungseffekte

Freistellungseffekte sind typisch für Bäume welche im Lawinenzug und am Rande des Lawinenzuges liegen (Casteller et al. 2007). Der Vergleich der Freistellungseffekte mit historischen Daten ergab interessante Parallelen. Jahre mit vielen dokumentierten Lawinen gehen mit einer höheren Anzahl bedeutender Freistellungseffekte überein. In Jahren, wo keine Lawinen dokumentiert wurden, konnten auch wenig bedeutende Freistellungseffekte nachgewiesen werden. Die grosse Ansammlung von Freistellungseffekte im Jahr 1821 könnte auf die Jahre 1816 und 1817 zurückzuführen sein. Das Jahr 1816 ging als Jahr ohne Sommer in die Geschichte ein, gefolgt von einem schneereichen Winter. Die kalten Bedingungen sind auf den Ausbruch des Vulkans Tambora in Indonesien und die dadurch in die Atmosphäre gelangten grossen Aschenmengen zurückzuführen (Pfister 1999). Für die Region Davos sind die Begebenheiten von Laely (1984) folgendermassen beschrieben worden: “Das Jahr 1816 war ein Fehljahr zu Berg und Tal. [...] In den hohen Alpweiden blieb der Schnee liegen. Dazu schneite es jede Woche ein- oder zweimal bis in den Wald herunter. [...] Zwischen hinein hatte sich ein schwerer Winter eingestellt. Die Chronisten berichten von 7 Währschuo hohem Schnee und gewaltigen Lawinen, die überall verheerend niedergingen. [...] Ganz schlimm haben die Lawinen in jenem Winter [...] im ganzen Tal Dischma gehaust.“ Auch nach Bruhin (1888) war die Lawinenaktivität im Dischmatal sehr hoch und es wird von 50 zerstörten Gebäuden berichtet (Weidmann 2018a). Die bedeutenden Freistellungseffekte des Jahres 1821 wurden ausschliesslich bei den Lärchen festgestellt. Die Lärchen wiesen zu diesem Zeitpunkt ein Alter von circa 70 Jahren auf. Die naheliegende Erklärung ist eine Zerstörung der Fichtenkonkurrenz durch Lawinen. Eine weitere mögliche Interpretation wäre, dass die Fichten, welche eine frostfreie Vegetationsperiode von 2 bis 2.5 Monate brauchen (Aas et al. 1995) aufgrund der mehrjährigen Kälteperiode eingegangen sind und die Lärchen davon profitiert haben. Die bedeutenden Freistellungseffekte wurden insbesondere bei Bäumen mit einem BHD über 20 cm beobachtet (Schorn 2018). Die moderaten Freistellungseffekte der Fichten im Inneren der Marteloskopfläche könnten auf Schneebelastung hinweisen, durch welche beispielsweise Kronenbrüche verursacht wurden, die im Bestand speziell bei den Fichten sehr häufig anzutreffen sind. Die Klumpung von Freistellungseffekten in den Jahren 1892 bis 1900 könnten auf den Winter 1892 hinweisen, in welchem 3-Tages-Neuschneesummen von 3 m beobachtet wurden, was seit 1817 nicht mehr der Fall gewesen war (Weidmann 2018b).

Nach Wiesinger und Adams (2008) brach am 12.02.1999 eine Staublawine unterhalb des Jatzhorns los und verschüttete die Strasse leicht mit Staub und kleinen Ästen. Zunahmen der bedeutenden Freistellungseffekte sind ab dem Jahr 2000 zu verzeichnen. Die bedeutenden Freistellungseffekte befinden sich insbesondere bei BHD unter 20 cm (Schorn 2018). Betroffen sind jedoch fast ausschliesslich die Fichten, was gegen ein Lawinenereignis spricht. Bei einer natürlichen Störung müssten zudem die abgestorbenen Konkurrenten noch im Bestand sichtbar sein. Eine andere Erklärung könnte sein, dass das Klima günstiger geworden ist und die Fichten aufgrund der wärmeren Bedingungen und mehr Stickstoffeintrag aus der Atmosphäre einen abrupten Anstieg des Jahrringwachstums aufweisen (Nickel et al. 2015, Pluess et al. 2016).

Es konnten keine Hinweise auf flächige Bestandeszerstörung gefunden werden. Isolierte bedeutende Freistellungseffekte könnten auf extensive Holznutzung hinweisen. In der Marteloskopfläche konnten vereinzelte Baumstrünke beobachtet werden, welche auf Holznutzung vor circa 60-100 Jahren hinweisen.

4.3. RAMMS Simulationen

4.3.1. Lawinensimulationen

Der mittels der RAMMS-Formel berechnete BHD wird sowohl für die Fichten als auch für die Lärchen überschätzt. Die Erstellung einer baumarten- und höhenlagen-spezifischen Formel würde die Berechnungen des BHD verbessern. Die beobachteten Höhen im Bestand sind jedoch höher als die für den Standortstyp Alpenlattich-Fichtenwald mit Wollreitgras erwarteten 25-35 m (Frehner et al. 2005) und daher eventuell nicht sehr repräsentativ.

Für die Grünerle (*Alnus viridis*) ist trotz ihrer einzigartigen Eigenschaften keine Artengruppe in RAMMS vorgesehen. Die Grünerle hat bei einer grossen Schneedecke eine geringe Schutzfunktion und kann unter Umständen sogar Lawinen auslösen, da der auf den Ästen gelagerte Schnee in Bewegung kommen kann (Tricart 1976, Frehner et al. 2005, Gauquelin und Courbaud 2006). Andererseits können grössere Sträucher bei einer niedrigen Schneedecke die Bodenrauigkeit erhöhen und die Schneedecke stabilisieren (Newesely et al. 2000). In der vorliegenden Arbeit wurde beobachtet, dass die Grünerle bei hohen Schneemengen komplett zugedeckt ist. Daher wurde die Grünerlen für die Simulationen weder als Wald noch als zusätzliche Rauigkeit ausgeschieden, wie beispielsweise in Brožová (2018).

Für die Simulation möglicher Lawinenereignisse aus dem 19. Jahrhundert gibt es wenig Informationen bezüglich Schneedeckenaufbaus und klimatischer Bedingungen. Die Simulation der Lawine und der Waldzerstörung ist stark abhängig von der Auflösung des Geländemodells (Bartelt et al. 2013). Bei feinerer Auflösung wurden generell kürzere Fliesslängen jedoch höhere Waldzerstörung beobachtet. Zusätzlich spielt die Parameterwahl eine wichtige Rolle. Die Annahme des 300-jährigen Ereignisses der 3-Tages-Neuschneesummen und der Anrissgebiete wurde gewählt, um die grösstmögliche Waldzerstörung zu untersuchen. Die gewählten Anrissgebiete entsprechen den maximal möglichen Anrissgebieten und haben nicht den Anspruch, realistische Anrissgebiete darzustellen. Die einzige bekannte Information ist, dass das älteste Haus in Teufi seit mindestens 1726 besteht und seither niemals vollständig von einer Lawine zerstört wurde. Aufzeichnungen des Einflusses von Lawinen auf die Waldzerstörung finden sich in der Schweiz seit 1891 (Bebi et al. 2017).

Durch die Simulationen können Hinweise auf den Einfluss von Lawinen auf den Wald gewonnen werden, insbesondere in den Bereichen, wo Lärchen vorkommen und in den

Bereichen, wo im Jahr 1821 bedeutende Freistellungseffekte berechnet wurden. Die Waldzerstörung deckt sich ebenfalls gut mit der Lärchenverteilung, den bedeutenden Freistellungseffekten des Jahres 1821 und der Altersverteilung der Bäume. So wird beispielsweise für den südwestlichen Bereich, wo der erste datierte Baum erst im Jahre 1796 aufgekommen ist, Waldzerstörung simuliert. Die Simulationen der Waldzerstörungen bestätigen die Hypothese, dass die Lärchendominanz zumindest teilweise auf Lawindynamik zurückgeführt werden kann. Für das gewählte Extremereignis gibt es aufgrund der RAMMS Simulationen Bereiche des Waldes, welche nicht zerstört werden. Eine vollständige Waldzerstörung kann nicht ausgeschlossen werden – dies ist jedoch aufgrund der dendrochronologischen Resultate seit mindestens 1700 nicht vorgekommen.

4.3.2. Steinschlagsimulationen

Dass die beobachteten und simulierten Baumtreffer sich wider Erwartung unterscheiden, könnte darauf zurückgeführt werden, dass beim Steinschlag der Zufallsfaktor eine wichtige Rolle spielt. Die beobachtete Dichte der Wunden ist kleiner als die simulierte Dichte der Wunden, da bei den Simulationen angenommen wird, dass sich überall aus der Felswand Steine lösen. Zusätzlich hat nicht jeder Baumtreffer eine Wunde zur Folge.

Bei der Aufnahme der Verletzungen wurde nicht erhoben, ob es sich um Steinschlagverletzungen handelt oder nicht. Die Verletzungen im südöstlichen Bereich könnten auch auf Schneedynamik und dadurch erzeugte Stamm- und Kronenbrüchen oder Verletzungen durch umfallende Bäume zurückzuführen sein. Die Aufnahme der Verletzungshöhe und der Verletzungsursache wäre eine wertvolle Zusatzinformation für die Marteloskopfläche. Nach Kistler (2017) ist die Stammzahldichte im südöstlichen Bereich leicht erhöht. Dies könnte ein weiterer Grund für die erhöhte Anzahl der ansonsten sehr homogen verteilten Verletzungen sein.

Im südwestlichen Bereich sind viele Vogelbeeren vorhanden. Hier kann einerseits interpretiert werden, dass das Alter der Vogelbeeren relativ niedrig ist und deshalb die Akkumulation von Wunden im Vergleich zu den vorhergesagten Baumtreffern klein ist. Das Vorkommen der Vogelbeeren könnte andererseits auch auf einen Felssturz mit Waldzerstörung hinweisen. In diesem Bereich stammt der älteste dendrochronologisch datierte Baum aus dem Jahr 1796. Die erhöhte simulierte Steinschlagaktivität im südwestlichen Bereich geht mit dem hohen Anteil Freistellungseff-

fekte in diesem Bereich überein. Es kann jedoch aufgrund der Freistellungseffekte nicht deutlich auf eine Lückenbildung und somit auch nicht auf einen Zeitpunkt eines möglichen Felssturzes geschlossen werden. Falls ein Felssturz zu Grunde lag, fand dieser vermutlich vor dem ersten beobachteten Freistellungseffekt im Jahr 1731 statt. Die Plausibilität eines Felssturzes müsste aufgrund der Untersuchung von liegenden Steinen untersucht werden. Die Altersbestimmung der Vogelbeeren könnte einen weiteren Hinweis auf den Zeitpunkt von Störungsereignissen liefern. Die Steine durchqueren den erhobenen Bereich der Marteloskopfläche kaum. In diesem Bereich finden sich auch die ältesten dendrochronologisch datierten Bäume.

Der Wald bietet einen guten Schutz vor Steinschlag. Für präzisere Steinschlagsimulationen müssten Aufnahmen der Bodenrauigkeit, der Narbenhöhe, der Struktur und Aktivität des Felsbandes und der Steinablagerungen in und unterhalb der Marteloskopfläche durchgeführt werden. Die Erstellung eines Verhältnisses zwischen im Feld gemessener Höhe der Bodenrauigkeit und den VRM-Schwellenwerten würden eine hoch aufgelöste Angabe der Bodenrauigkeit für die Simulationen ermöglichen.

4.4. Diskussion der Methoden

Die dendrochronologische Datierung der Bäume birgt, aufgrund der Korrekturen der Verfehlung des Marks und der Bohrhöhe, gewisse Unsicherheiten (Motta und Nola 2001). Für eine möglichst präzise Altersabschätzung müssten die Bohrproben auf Bodenhöhe auf der Talseite des Baumes aufgenommen werden (Grissino-Mayer 2003). Nadelbäume weisen jedoch auf der Talseite meist Reaktionsholz auf, welches für die Analyse der Jahrringbreiten nachteilig ist (Grissino-Mayer 2003). Aufgrund der Bodenrauigkeit kann die Bohrhöhe zudem nur auf Dezimeter-Genauigkeit bestimmt werden. Das Alter der Bäume, wo das Mark nicht getroffen wurde, weist eine höhere Streuung auf als das Alter der Bäume, bei welchen direkt das Mark getroffen wurde.

In Simmler (2017) wurde die Anzahl fehlender Jahrringe aufgrund der Bohrhöhe mit der Bertalanffy-Wachstumsgleichung und den Wachstumsfaktoren nach Rammig et al. (2007) berechnet ($0.030 \pm 0.003 \text{ Jahr}^{-1}$ für die Fichte respektive $0.037 \pm 0.008 \text{ Jahr}^{-1}$ für die Lärche). Diese Wachstumsfaktoren wurden jedoch für Flächen ohne Überschildung berechnet. Aufgrund der Bestandesstruktur wird angenommen, dass der Grossteil der Fichten unter Schirm aufgekommen ist und dass die Korrektur mittels der Wachstumsfaktoren für Freiflächen zu einer Unterschätzung des effektiven Alters führen würde. Aus diesem Grund wurde die Alterskorrektur mit linearen Gleichungen überschilderter Verjüngung durchgeführt (Motta und Nola 2001, Brang und Duc 2002, Li et al. 2003). Der Unterschied zwischen dem von Simmler (2017) und in der vorliegenden Arbeit angewandten Ansatz ist wie erwartet für die Fichte höher als für die Lärche, welche insbesondere unter Freilandbedingungen aufkommt. Für die durchschnittliche Bohrhöhe von 1 m beträgt die Differenz zwischen den zwei Methoden 17 Jahre für die Fichte (11 ± 2 Jahre respektive 28 ± 4 Jahre) beziehungsweise 7 Jahre für die Lärche (10 ± 1 Jahre respektive 17 ± 1 Jahre). Wenn die Wachstumsfaktoren von Flächen ohne Überschildung angewendet werden, müssten die Bäume im Durchschnitt 9 cm pro Jahr wachsen. Dies ist insbesondere für die Sämlings- und Anwuchsphase eines überschilderten Bestandes auf 1800-1900 m ü. M. zu hoch (Frehner 2002).

Für die unterschiedlichen angewandten Methoden lassen sich keine signifikanten Unterschiede nachweisen (Abb. 30a). Zwei Bohrkerne eines identischen Baumes können hingegen eine deutlich höhere Variation aufweisen (Abb. 30b).

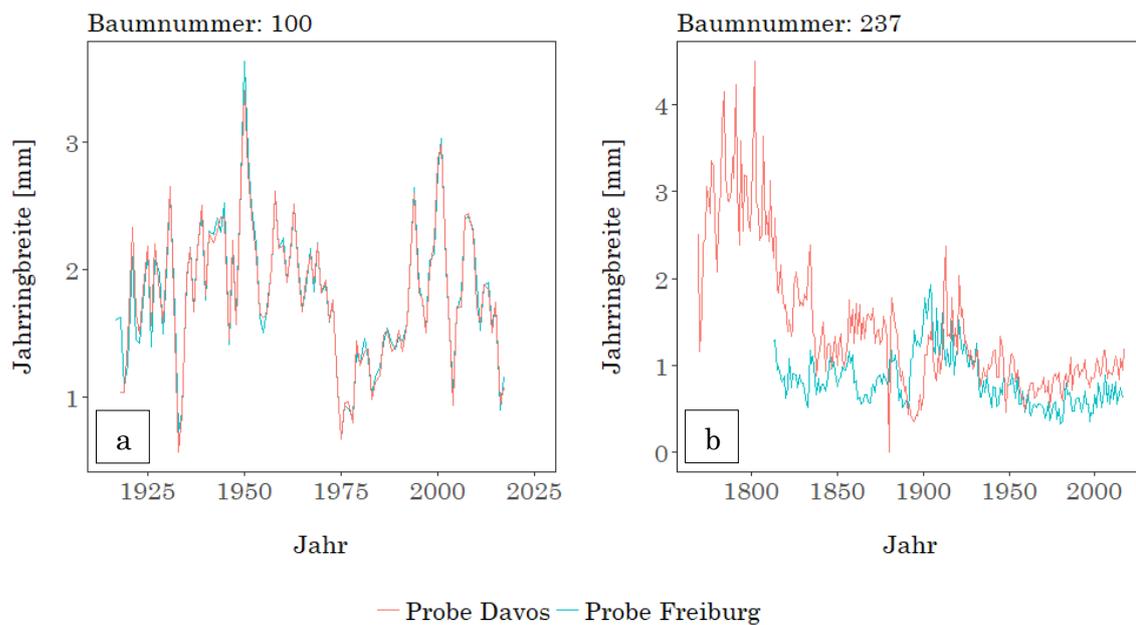


Abb. 30: Gleiche Bohrprobe mit unterschiedlichen Methoden gemessen (a) und verschiedene Bohrproben desselben Baumes mit unterschiedlichen Methoden gemessen (b).

5. Schlussfolgerungen

Die zahlreichen in dieser Arbeit untersuchten Parameter geben unterschiedliche Hinweise auf die Waldentwicklung und Störungsdynamik eines extensiv bewirtschafteten subalpinen Fichten-Lärchenwaldes. Den grössten positiven Einfluss auf den Höhenzuwachs der Verjüngung in der untersuchten Marteloskopfläche im Dischma haben die Sonnenscheindauer, die Baumhöhe, eine geringere Hangneigung und eine grössere Anzahl Individuen pro Verjüngungsansatz. Für die verschiedenen Baumarten sind unterschiedliche Bereiche der Marteloskopfläche verjüngungsgünstig. In der Marteloskopfläche ist ein klarer Höhengradient erkennbar. In der unteren, nördlicheren Hälfte der Marteloskopfläche kommen mehr und üppigere Verjüngungsansätze auf. Diese sind insbesondere von der Fichte dominiert.

Der Wald verhindert zurzeit das Anreissen von Lawinen in der Marteloskopfläche und weist einen guten Schutz vor Steinschlagereignissen auf. Im Bestand ist derzeit ausreichend Verjüngung vorhanden. Diese weist jedoch im Vergleich zum Altbestand einen deutlich höheren Fichtenanteil auf. Aufgrund der topographischen Lage bleibt das Kernstück des Waldes weitgehend von extremen Lawinenereignissen geschützt. Dieser Bereich des Waldes könnte sich in Richtung eines einschichtigen Bestandes entwickeln. In einem direkten Schutzwald wären in diesem Bereich forstliche Eingriffe nützlich, um durch kontinuierliche Mischung und Struktur das Risiko zu minimieren und die Schutzfunktion langfristig zu gewährleisten. Im südlichen, oberen Bereich weist der Bestand aufgrund der Struktur und der Mischung eine hohe Resilienz auf und es wird erwartet, dass der Bestand aufgrund der Schneedynamik und kleinräumigen Verjüngungsgunst langfristig strukturiert und schutzfähig bleibt.

Der Bestand ist durch ein hohes Alter gekennzeichnet. Der älteste dendrochronologisch datierte Baum ist eine 353-jährige Fichte. Die älteste Lärche ist 315-jährig. Die Bäume unter der Kluppschwelle weisen je nach angewandter Methode im Durchschnitt zwischen 34 und 59 Jahre auf. Die zwei Hauptaltersklassen des Bestandes weisen ein Alter von 50-100 respektive 250-300 Jahre auf. Aufgrund der Nutzungs- und Klimageschichte kann die Altersstruktur weitgehend erklärt werden. Entscheidend für die Walddynamik sind grössere Schadenereignisse, welche in niedrigerer Frequenz auftreten. Die beobachtete Struktur und Artenzusammensetzung des Bestandes weist auf eine wichtige Rolle von Lawinen hin. Deutliche Hinweise hierfür liefert die grosse Anzahl an Freistellungseffekten der Lärchen nach den Jahren 1816

und 1817, in welchen von zahlreichen Lawinen im Dischma berichtet wird. Durch die Störungsdynamik konnte die Lärche in den Randbereichen aufkommen und überleben. Die RAMMS Simulationen bestätigen die erwartete Lawinen- und Stein-schlagdynamik.

Die Ergebnisse dieser Studie erweitern das Wissen über die Walddynamik eines naturnahen subalpinen Fichten-Lärchenwaldes unter Einfluss von Lawinen und Stein-schlag. Verbesserte Kenntnisse der Walddynamik über mehrere Jahrhunderte können Praktiker bei der Auswahl geeigneter und zeitgerechter Eingriffe unterstützen. In zukünftigen Studien sollten die Unsicherheiten der Altersbestimmung verbessert werden, um die Walddynamik und Störungsereignisse mit grösserer Sicherheit rekonstruieren zu können.

6. Danksagung

Ich möchte mich ganz herzlich bei meinen Betreuern Dr. Peter Bebi und Dr. Frank Krumm für die Unterstützung während der Arbeit und für die Bereitstellung der bereits erhobenen Daten der Marteloskopfläche bedanken. Ein grosser Dank geht auch an Dr. Yves Bühler, Marc Christen und Dr. Perry Bartelt für die Unterstützung bei den Lawinensimulationen.

Bedanken möchte ich mich bei Markus Schorn von der Universität Freiburg für die Zusammenarbeit bei der Feldarbeit, der Analyse eines Teils der Bohrkerne und für die Bereitstellung des R-Skripts zur Berechnung der Freistellungseffekte. Ein weiterer Dank geht an den Zivildienstleistenden Sandro Degonda für die Unterstützung bei der Feldarbeit und bei der Erarbeitung der Steinschlagsimulationen. Zusätzlich möchte ich den Zivildienstleistenden Kevin Simmler für die Einführung in das Dendrolabor und für die Unterstützung bei der Feldarbeit und bei der Analyse der Bohrkerne herzlich danken. Weiter haben mich Livia Moser und Giorgio Renz tatkräftig bei der Feldarbeit unterstützt. Ein herzlicher Dank geht an Simon Cramer für die kompetente Unterstützung bei statistischen Fragen. Bedanken möchte ich mich auch bei Elena Könz für die Bearbeitung des Titelbildes und bei Duri Könz, Thea Mi Weiß, Giorgio Renz und Marianna Könz für die konstruktiven Rückmeldungen und Korrekturvorschläge. Zusätzlich danken möchte ich Natalie, Edoardo, Valentina und Daniel für den regen Austausch und die Anspornung während der Arbeit.

7. Literatur

- Aas, G, Sieber, M, Holdenrieder, O, Schütz, J-P, Brang, P. Mitteleuropäische Waldbaumarten. Artbeschreibung und Ökologie unter besonderer Berücksichtigung der Schweiz. Professur für Waldbau und Professur für Forstschutz & Dendrologie der ETH Zürich, In press 1995.
- Akaike, H. 1992. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. Pages 610-624 Breakthroughs in statistics. Springer.
- Amaral, V, Cabral, H. 2004. Ecology of the whiskered sole in the Sado Estuary, Portugal. *Journal of fish biology* **64**:460-474.
- Aulitzky, H, Turner, H, Mayer, H. 1982. Bioklimatische Grundlagen einer standortsgemässen Bewirtschaftung des subalpinen Lärchen-Arvenwaldes: Gebirgsprogramm: 17. Beitrag.
- Bachofen, H. 2009. Nachhaltige Verjüngung in ungleichförmigen Beständen | Sustainable recruitment in uneven aged stands. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* **160**:2-10.
- BAFU. 2016. Naturereigniskataster StorMe. Bundesamt für Umwelt
- Bartelt, P, Bühler, Y, Christen, M, Deubelbeiss, Y, Salz, M, Schneider, M, Schumacher, L. 2013. RAMMS. User Manual v1.5 Avalanche.
- Bartelt, P, Christen, M, Buser, O. Snow Entrainment: Avalanche Interaction with an Erodable Substrate. WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF, In press 2018.
- Bebi, P. 1999. Erfassung von Strukturen im Gebirgswald als Beurteilungsgrundlage ausgewählter Waldwirkungen. ETH Zurich.
- Bebi, P, Casteller, A, Mayer, AC, Stöckli, V. 2004. Jahrringe als Indikatoren für extreme Standortbedingungen im Gebirge: Schnee, Lawinen und Permafrost | Growth rings as indicators of extreme site conditions in the mountains: snow, avalanches and permafrost. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* **155**:208-212.
- Bebi, P, Kienast, F, Schönenberger, W. 2001. Assessing structures in mountain forests as a basis for investigating the forests' dynamics and protective function. *Forest Ecology and Management* **145**:3-14.
- Bebi, P, Krumm, F. 2015. Integrate+ Marteloscopes. Technical information <http://www.integrateplus.org/uploads/demo-sites/Info-sheet-Dischma.pdf>. (22.03.2018).
- Bebi, P, Kulakowski, D, Rixen, C. 2009. Snow avalanche disturbances in forest ecosystems—State of research and implications for management. *Forest Ecology and Management* **257**:1883-1892.
- Bebi, P, Seidl, R, Motta, R, Fuhr, M, Firm, D, Krumm, F, Conedera, M, Ginzler, C, Wohlgemuth, T, Kulakowski, D. 2017. Changes of forest cover and disturbance regimes in the mountain forests of the Alps. *Forest Ecology and Management* **388**:43-56.
- Bebi, P, Teich, M, Hagedorn, F, Zurbriggen, N, Brunner, SH, Grêt-Regamey, A. 2012. Veränderung von wald und waldleistungen in der landschaft Davos im zuge des klimawandels. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* **163**:493-501.
- Bertalanffy, Lv. 1957. Quantitative laws in metabolism and growth. *The quarterly review of biology* **32**:217-231.
- Bigler, C. Davos GR Sertig - PCAB - ITRDB SWIT179 <https://www.ncdc.noaa.gov/paleo-search/study/2737>. (15.03.2018).
- Bigler, C, Meile, C. Bergün GR Val Tuors - LADE - ITRDB SWIT185 <https://www.ncdc.noaa.gov/paleo-search/study/6118>. (15.03.2018).

- Black, BA, Abrams, MD. 2003. Use of boundary-line growth patterns as a basis for dendroecological release criteria. *Ecological Applications* **13**:1733-1749.
- Brändli, U-B. 2010. Schweizerisches Landesforstinventar: Ergebnisse der dritten Erhebung: 2004-2006. Swiss Federal Research Institute (WSL).
- Brang, P. 1998. Early seedling establishment of *Picea abies* in small forest gaps in the Swiss Alps. *Canadian Journal of Forest Research* **28**:626-639.
- Brang, P, Duc, P. 2002. Zu wenig Verjüngung im Schweizer Gebirgs-Fichtenwald: Nachweis mit einem neuen Modellansatz | A new modelling approach suggests insufficient regeneration in Swiss Norway spruce mountain forests. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* **153**:219-227.
- Brang, P, Heiri, C, Bugmann, H. 2011. Waldreservate. 50 Jahre natürliche Waldentwicklung in der Schweiz. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf; ETH Zürich. Zürich. Haupt Verlag, Bern, Stuttgart, Wien. 272 p.
- Brang, P, Schönenberger, W, Ott, E, Gardner, B. 2001. Forests as protection from natural hazards. *The forests handbook* **2**:53-81.
- Brožová, N. 2018. Forest Effects on Avalanche Dynamics: Evaluation and Improvement of the Avalanche Model RAMMS. Unpublished master's thesis. Universität für Bodenkultur Wien.
- Bruhin, TA. 1888. Die Lawinennoth in der Schweiz im Jahre 1888. *Neue Bündner Zeitung*.
- Bühler, U. 2005. Jungwaldentwicklung als Eingangsgrösse in die Jagdplanung: Erfahrungen aus dem Kanton Graubünden. Pages 59-65 *Wald und Huftiere—eine Lebensgemeinschaft im Wandel*. Forum für Wissen.
- Bühler, Y, Christen, M, Margreth, S, Stoffel, L, Schär, M, Stoffel, A, Bebi, P, Marty, C. 2017. Vorprojekt Gefahrenhinweiskarte Lawinen Kanton Graubünden. WSL, Institut für Schnee und Lawinenforschung SLF **36**.
- Bühler, Y, Kumar, S, Veitinger, J, Christen, M, Stoffel, A. 2013. Automated identification of potential snow avalanche release areas based on digital elevation models. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **13**:1321.
- Bundesamt für Landestopografie swisstopo. 2017. GeoCover 1197 Davos. <https://map.geo.admin.ch/?lang=de&topic=ech&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-farbe&layers=ch.swisstopo.geologie-geocover>. (15.02.2018).
- Bütler, R, Lachat, T. 2009. Wälder ohne Bewirtschaftung: eine Chance für die saproxyliche Biodiversität | Forests without harvesting: an opportunity for the saproxylic biodiversity. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* **160**:324-333.
- Casteller, A, Stöckli, V, Villalba, R, Mayer, AC. 2007. An Evaluation of Dendroecological Indicators of Snow Avalanches in the Swiss Alps. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*:218-228.
- Cherubini, P, Schweingruber, FH, Piussi, P. 1996. Spatiotemporal growth dynamics and disturbances in a subalpine spruce forest in the Alps: a dendroecological reconstruction. *Canadian Journal of Forest Research* **26**:991-1001.
- Crawley, M. 2007. *The R book*. .
- Dale, VH, Joyce, LA, McNulty, S, Neilson, RP, Ayres, MP, Flannigan, MD, Hanson, PJ, Irland, LC, Lugo, AE, Peterson, CJ. 2001. Climate change and forest disturbances: climate change can affect forests by altering the frequency, intensity, duration, and timing of fire, drought, introduced species, insect and pathogen outbreaks, hurricanes, windstorms, ice storms, or landslides. *BioScience* **51**:723-734.
- Duncan, R. 1989. An evaluation of errors in tree age estimates based on increment cores in kahikatea (*Dacrycarpus dacrydioides*). *New Zealand natural sciences* **16**:1-37.

- Duryea, ML, Brown, GN. 2012. Seedling Physiology and Reforestation Success: Proceedings of the Physiology Working Group Technical Session. Springer Science & Business Media.
- Eerikäinen, K, Valkonen, S, Saksa, T. 2014. Ingrowth, survival and height growth of small trees in uneven-aged *Picea abies* stands in southern Finland. *Forest Ecosystems* 1:5.
- ESRI. 2011. Arc GIS Desktop: Release 10.4.1 Redlands. CA: Environmental System Research Institute.
- Feistl, T, Bebi, P, Margreth, S, Bartelt, P. 2014a. Forest damage by wet and powder snow avalanches. International Snow Science Workshop ISSW, Banff, BC, Canada.
- Feistl, T, Bebi, P, Teich, M, Bühler, Y, Christen, M, Thuro, K, Bartelt, P. 2014b. Observations and modeling of the braking effect of forests on small and medium avalanches. *Journal of Glaciology* 60:124-138.
- Fekedulegn, D, Mac Siúrtáin, MP, Colbert, JJ. 1999. Parameter Estimation of Nonlinear Models in Forestry.
- Firm, D, Nagel, TA, Diaci, J. 2009. Disturbance history and dynamics of an old-growth mixed species mountain forest in the Slovenian Alps. *Forest Ecology and Management* 257:1893-1901.
- Frehner, M. 1989. Beobachtungen zur Einleitung der Naturverjüngung an einem nordexponierten Steilhang im subalpinen Fichtenwald. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 140:1013-1022.
- Frehner, M. 2002. Untersuchungen über den Einfluss unterschiedlicher Kleinstandorte und der Pflanztechnik auf Fichtenpflanzungen in subalpinen Lawinenschutzwäldern. ETH Zurich.
- Frehner, M, Wasser, B, Schwitter, R. 2005. Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern 564.
- Frelich, LE. 2002. Forest dynamics and disturbance regimes: studies from temperate evergreen-deciduous forests. Cambridge University Press.
- Gauquelin, X, Courbaud, B. 2006. Guide des sylvicultures de montagne—Alpes du Nord françaises. Cemagref, CRPF Rhône-Alpes, ONF.
- Ginzler, C, Hobi, ML. 2016. Das aktuelle Vegetationshöhenmodell der Schweiz: spezifische Anwendungen im Waldbereich. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 167:128-135.
- Glitzenstein, JS, Harcombe, PA, Streng, DR. 1986. Disturbance, succession, and maintenance of species diversity in an east Texas forest. *Ecological Monographs* 56:243-258.
- Grass, L. 2014. Zur Verjüngungsökologie der Lärche. Fallbeispiel Valchava. Unpublished master's thesis. ETH Zürich.
- Grissino-Mayer, HD. 2003. A manual and tutorial for the proper use of an increment borer. Tree-ring research.
- Gruber, U, Bartelt, P. 2007. Snow avalanche hazard modelling of large areas using shallow water numerical methods and GIS. *Environmental Modelling & Software* 22:1472-1481.
- Gubler, H, Rychetnik, J. 1991. Effects of forests near the timberline on avalanche formation. *Snow, Hydrology and Forests in High Alpine Areas*:19-37.
- Günter, T. 1980. Die Wälder der Landschaft Davos. Diplomarbeit, Geographisches Institut, Univ. Zürich.
- Henry, J, Swan, J. 1974. Reconstructing Forest History from Live and Dead Plant Material--An Approach to the Study of Forest Succession in Southwest New Hampshire. *Ecology* 55:772-783.

- Hillgarter, F-W. 1971. Waldbauliche und ertragskundliche Untersuchungen im subalpinen Fichtenurwald Scatlé/Brigels. ETH Zurich.
- Holeksa, J, Jaloviar, P, Kucbel, S, Saniga, M, Svoboda, M, Szewczyk, J, Szwagrzyk, J, Zielonka, T, Żywiec, M. 2017. Models of disturbance driven dynamics in the West Carpathian spruce forests. *Forest Ecology and Management* **388**:79-89.
- Holmes, R. 1992. Program COFECHA: Version 3. The University of Arizona, Tucson.
- Imbeck, H, Ott, E. 1987. Verjüngungsökologische Untersuchungen in einem hochstaudenreichen subalpinen Fichtenwald, mit spezieller Berücksichtigung der Schneeablagerung und der Lawinenbildung. Eidgenössische Institut für Schnee-und Lawinenforschung.
- Indermühle, MP. 1978. Struktur-, Alters-und Zuwachsuntersuchungen in einem Fichten-Plenterwald der subalpinen Stufe. ETH Zurich.
- Jakoby, O, Wermelinger, B, Stadelmann, G, Lischke, H. 2015. Borkenkäfer im Klimawandel. ETH Zurich.
- Johnson, E, Miyanishi, K, Kleb, H. 1994. The hazards of interpretation of static age structures as shown by stand reconstructions in a *Pinus contorta* - *Picea engelmannii* forest. *Journal of Ecology*.
- Kahn, M. 1994. Modellierung der Höhenentwicklung ausgewählter Baumarten in Abhängigkeit vom Standort. Forstwissenschaftliche Fakultät der Universität der Universität München und Bayerische forstliche Versuchs-und Forschungsanstalt.
- Keller, M. 2005. Schweizerisches Landesforstinventar: Anleitung für die feldaufnahmen der Erhebung 2004-2007.
- Kistler, M. 2017. Analyse von Modellen zur Quantifizierung von Baumtreffern im Steinschlagschutzwald. Unpublished master's thesis. ETH Zürich.
- Korpel, S. 1995. Die Urwälder der westkarpaten.
- Kraus, D, Bütler, R, Krumm, F, Lachat, T, Mergner, U, Paillet, Y, Schuck, A, Winter, S. 2016a. Catalogue of tree microhabitats - Referenzliste für Feldaufnahmen. Integrate+ Technical Paper **13**:16.
- Kraus, D, Krumm, F. 2013. Integrative Ansätze als Chance für die Erhaltung der Artenvielfalt in Wäldern. European Forest Institute.
- Kraus, D, Mergner, U, Schuck, A, Krumm, F, Haussmann, T. 2016b. Integrate+: Wieviel Naturschutz kann der bewirtschaftete Wald leisten? Der Dauerwald. *Zeitschrift für naturgemässe Waldwirtschaft* **54**:6.
- Kraus, D, Schuck, A, Krumm, F, Bütler, R, Cosyns, H, Courbaud, B, Larrieu, L, Mergner, U, Pyttel, P, Varis, S. 2018. Seeing is building better understanding - the Integrate+ Marteloscopes. Integrate+ Technical Paper.
- Krebs, B. 2001. Untersuchungen zum Höhenwachstum des Lärchenaufwuchses in Abhängigkeit vom direkten und diffusen Licht im Engadin.
- Kühne, R. Technischer Bericht Gefahrenkarte Lawinen Davos 2015. tur gmbh, In press 2015.
- Kulakowski, D, Bebi, P. 2004. Range of variability of unmanaged subalpine forests. Pages 47-54 *Forum für Wissen*.
- Kulakowski, D, Rixen, C, Bebi, P. 2006. Changes in forest structure and in the relative importance of climatic stress as a result of suppression of avalanche disturbances. *Forest Ecology and Management* **223**:66-74.
- Kulakowski, D, Seidl, R, Holeksa, J, Kuuluvainen, T, Nagel, TA, Panayotov, M, Svoboda, M, Thorn, S, Vacchiano, G, Whitlock, C. 2017. A walk on the wild side: disturbance dynamics and the conservation and management of European mountain forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* **388**:120-131.
- Laely, A. 1984. Davoser Heimatkunde. *Genossenschaft Davoser Revue*.

- Larrieu, L, Paillet, Y, Winter, S, Bütler, R, Kraus, D, Krumm, F, Lachat, T, Michel, AK, Regnery, B, Vandekerckhove, K. 2018. Tree related microhabitats in temperate and Mediterranean European forests: A hierarchical typology for inventory standardization. *Ecological Indicators* **84**:194-207.
- Lertzman, KP, Krebs, CJ. 1991. Gap-phase structure of a subalpine old-growth forest. *Canadian Journal of Forest Research* **21**:1730-1741.
- Li, MH, Yang, J, Kräuchi, N. 2003. Growth responses of *Picea abies* and *Larix decidua* to elevation in subalpine areas of Tyrol, Austria. *Canadian Journal of Forest Research* **33**:653-662.
- Lorimer, CG, Frelich, LE. 1989. A methodology for estimating canopy disturbance frequency and intensity in dense temperate forests. *Canadian Journal of Forest Research* **19**:651-663.
- Lüscher, F. 1989. Untersuchungen zur Höhenentwicklung der Fichtennaturverjüngung im inneralpinen Gebirgswald. ETH Zurich.
- Malle, JT. 2017. Temperature and wind influences on subcanopy snowpack dynamics. Unpublished master's thesis. Universität für Bodenkultur Wien
- Margreth, S. 2007. Lawinenverbau im Anbruchgebiet. Technische Richtlinie als Vollzugshilfe. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Mattes, H. 1982. Die Lebensgemeinschaft von Tannenhäher, *Nucifraga caryocatactes* (L.), und Arve, *Pinus cembra* L., b und ihre forstliche Bedeutung in der oberen Gebirgswaldstufe. Eidgenössische Anst. für das forstliche Versuchswesen.
- Mayer, AC, Stöckli, V. 2005. Long-term impact of cattle grazing on subalpine forest development and efficiency of snow avalanche protection. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* **37**:521-526.
- McCarthy, J. 2001. Gap dynamics of forest trees: a review with particular attention to boreal forests. *Environmental reviews* **9**:1-59.
- McClung, D, Schaerer, PA. 2006. The avalanche handbook. The Mountaineers Books.
- Means, JE. 1982. Developmental history of dry coniferous forests in the central western Cascade Range of Oregon. Forest Service.
- Meigs, GW, Morrissey, RC, Bače, R, Chaskovskyy, O, Čada, V, Després, T, Donato, DC, Janda, P, Lábusová, J, Seedre, M. 2017. More ways than one: Mixed-severity disturbance regimes foster structural complexity via multiple developmental pathways. *Forest Ecology and Management* **406**:410-426.
- Millennial Ecosystem Assessment Board. 2005. Millennium ecosystem assessment. Washington, DC: New Island **13**.
- Mordini, M. 2009. Modellierung und Beurteilung der ökologischen und ökonomischen Wirkungen von waldbaulichen Eingriffen—Einrichtung zweier Marteloskope in eichenreichen Flächen. ETH Zürich.
- Morgenthaler, R. 2016. Beurteilung des Naturschutzwertes und der Stabilität zweier Marteloskopflächen im subalpinen Gebirgswald. Unpublished bachelor's thesis. Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften.
- Motta, R, Nola, P. 2001. Growth trends and dynamics in sub-alpine forest stands in the Varaita Valley (Piedmont, Italy) and their relationships with human activities and global change. *Journal of Vegetation Science* **12**:219-230.
- Motta, R, Nola, P, Piussi, P. 2002. Long-term investigations in a strict forest reserve in the eastern Italian Alps: spatio-temporal origin and development in two multi-layered subalpine stands. *Journal of Ecology* **90**:495-507.
- Nagel, TA, Levanic, T, Diaci, J. 2007. A dendroecological reconstruction of disturbance in an old-growth *Fagus-Abies* forest in Slovenia. *Annals of Forest Science* **64**:891-897.

- Närmann, F, Küfmann, C, Neuschulz, EL. 2017. Präferenzen des Tannenhähers *Nucifraga caryocatactes* beim Anlegen von Samenverstecken. *Zeitschrift bayerischer und baden-württembergischer Ornithologen* **55**.
- Newesely, C, Tasser, E, Spadinger, P, Cernusca, A. 2000. Effects of land-use changes on snow gliding processes in alpine ecosystems. *Basic and Applied Ecology* **1**:61-67.
- Nickel, S, Schröder, W, Jenssen, M. 2015. Veränderungen deutscher Wälder durch Klimawandel und Stickstoffdeposition. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* **166**:325-334.
- Nilsson, SG, Niklasson, M, Hedin, J, Aronsson, G, Gutowski, JM, Linder, P, Ljungberg, H, Mikusiński, G, Ranius, T. 2003. Erratum to "Densities of large living and dead trees in old-growth temperate and boreal forests". *Forest Ecology and Management* **178**:355-370.
- Nowacki, GJ, Abrams, MD. 1997. Radial-growth averaging criteria for reconstructing disturbance histories from presettlement-origin oaks. *Ecological Monographs* **67** **2**:225-249.
- Ott, E, Frehner, M, Frey, H-U, Lüscher, P. 1997. Gebirgsnadelwälder: Ein praxisorientierter Leitfaden für eine standortgerechte Waldbehandlung. Haupt.
- Paliy, O, Shankar, V. 2016. Application of multivariate statistical techniques in microbial ecology. *Mol Ecol* **25**:1032-1057.
- Pfister, C. 1999. *Wetternachhersage. 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen 1496-1995*. Verlag Paul Haupt, Bern.
- Pickett, STA, White, PS. 1985. *The ecology of natural disturbance and patch dynamics*. Academic Press.
- Pluess, AR, Augustin, S, Brang, P. 2016. *Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptionsstrategien*. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL). Haupt-Verlag, Bern, Stuttgart, Wien.
- Pruitt, WO. 1960. Animals in the snow. *Scientific American* **202**:60-69.
- R Core Team. 2017. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria.
- Rammig, A, Bebi, P, Bugmann, H, Fahse, L. 2007. Adapting a growth equation to model tree regeneration in mountain forests. *European Journal of Forest Research* **126**:49-57.
- Rinn, F. 2003. *TSAP-Win, Software for tree-ring measurement, analysis and presentation*. <http://www.rinntech.com>. (23.04.2018).
- Sappington, JM, Longshore, KM, Thompson, DB. 2007. Quantifying landscape ruggedness for animal habitat analysis: a case study using bighorn sheep in the Mojave Desert. *Journal of wildlife management* **71**:1419-1426.
- Schneebeli, M. 1998. *Wechselwirkungen zwischen Klima, Lawinen und technischen Massnahmen*. vdf Hochschulverlag AG.
- Schönenberger, W. 2001. Trends in mountain forest management in Switzerland. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* **152**:152-156.
- Schorn, ME. 2018. *Dendroökologische Identifikation von Release-Effekten mittels Boundary-Line-Methode zur Rekonstruktion vergangener Lawinenereignisse. Fallstudie in einem subalpinen Fichten-Lärchen-Bestand in den Schweizer Alpen*. Unpublished bachelor's thesis. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.
- Schweizer, J, Bruce Jamieson, J, Schneebeli, M. 2003. Snow avalanche formation. *Reviews of Geophysics* **41**.
- Simmler, K. 2017. *Dendrochronological study of the structure and dynamics in a subalpine spruce-larch stand in Davos (Switzerland)*. Unpublished bachelor's thesis. ETH Zürich.

- SLF. 1952. Schnee und Lawinen in den Schweizer Alpen, Winter 1950/51, Davos, Switzerland: Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung.
- SLF. 2000. Der Lawinenwinter 1999. Ereignisanalyse, Davos, Switzerland: Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung.
- Soest, Jv, Ayrat, P, Schober, R, Hummel, F. 1956. The standardization of symbols in forest mensuration. International Union of Forestry Research Organizations Approved by IUFRO.
- Splechtna, BE, Gratzner, G, Black, BA. 2005. Disturbance history of a European old-growth mixed-species forest—A spatial dendro-ecological analysis. *Journal of Vegetation Science* **16**:511-522.
- Stöckli, V. 2002. Die Bedeutung der winterlichen Schneedecke für junge Fichten im Gebirgswald: Ergebnisse aus dem Lusiwald bei Davos. *Bauhinia* **16**:23-32.
- Svoboda, M, Janda, P, Nagel, TA, Fraver, S, Rejzek, J, Bače, R. 2012. Disturbance history of an old-growth sub-alpine *Picea abies* stand in the Bohemian Forest, Czech Republic. *Journal of Vegetation Science* **23**:86-97.
- Szewczyk, J, Szwagrzyk, J, Muter, E. 2011. Tree growth and disturbance dynamics in old-growth subalpine spruce forests of the Western Carpathians. *Canadian Journal of Forest Research* **41**:938-944.
- Tande, GF. 1979. Fire history and vegetation pattern of coniferous forests in Jasper National Park, Alberta. *Canadian Journal of Botany* **57**:1912-1931.
- Teich, M, Fischer, J, Feistl, T, Bebi, P, Christen, M, Grêt-Regamey, A. 2014. Computational snow avalanche simulation in forested terrain. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **14**:2233.
- Tricart, J. 1976. Aspects écologiques de l'aménagement. Pages 624-626 *Annales de Géographie*. JSTOR.
- Vacchiano, G, Dobbertin, M, Egli, S, Giordano, L, Gonthier, P, Mazzoglio, P, Motta, R, Nola, P, Nicolotti, G, Patetta, A. 2008. Il deperimento del pino silvestre nelle Alpi occidentali: natura e indirizzi di gestione.
- Veitinger, J, Purves, RS, Sovilla, B. 2016. Potential slab avalanche release area identification from estimated winter terrain: a multi-scale, fuzzy logic approach. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **16**:2211.
- Viglietti, D, Letey, S, Motta, R, Maggioni, M, Freppaz, M. 2010. Snow avalanche release in forest ecosystems: a case study in the Aosta Valley Region (NW-Italy). *Cold Regions Science and Technology* **64**:167-173.
- Vögele, A-E. 1984. Untersuchungen zur Geomorphologie und Jugquartären Talgeschichte des Dischma (Davos, Graubünden). Universität Zürich-Irchel.
- Weidmann, M. 2018a. Graubünden und Naturgefahren (GraNat). Auswirkungen von Lawinen auf Siedlungen in Graubünden. Lawinen in Davos-Dischma, 1817. <http://www.gra-nat.ch/ereignisse-lawine-lawinen-und-siedlungen/1184>. (23.04.2018).
- Weidmann, M. 2018b. Graubünden und Naturgefahren (GraNat). Der Lawinenwinter 1892 in Graubünden. <http://www.gra-nat.ch/lawinenwinter-1892-graubnden>. (23.04.2018).
- Wiesinger, T, Adams, M. 2008. Schnee und Lawinen in den Schweizer Alpen Winter 1998/1999. SLF, Davos.
- Wölfle, S. 2013. Entwicklungspotenzial von Fichtenverjüngung im subalpinen Gebirgswald in Abhängigkeit von verschiedenen Umweltfaktoren in Sedrun und Davos. ETH Zürich, Departement Umweltsystemwissenschaften.
- Zeide, B. 1993. Analysis of growth equations. *Forest science* **39**:594-616.
- Zielonka, T. 2006. When does dead wood turn into a substrate for spruce replacement? *Journal of Vegetation Science* **17**:739-746.

8. Glossar

AIC	Akaike information criterion Je tiefer der Wert desto besser das Modell (Akaike 1992)
Anwuchs	Verjüngung ab dem 4. Jahr bis circa 40 cm Höhe
BHD	Brusthöhendurchmesser Baumstammdurchmesser auf 1.3 m Höhe über dem Boden
DGM	Digitales Geländemodell (ohne Vegetation) Englisch: Digital terrain model (DTM)
DOM	Digitales Oberflächenmodell (mit Vegetation) Englisch: Digital surface model (DSM / DHM)
Durchwuchszeit	Zeit die Bäume eines Bestandes brauchen um eine Entwicklungsstufe zu durchwachsen (Abhängig von Baumart und Standortsbonität)
Freistellungseffekt	Release-Effekt Abrupter Anstieg des Jahrringwachstums
Hochstauden	Hochwachsende mehrjährige krautige Pflanzen
Kerndichteschätzung	Statistische Methode für die Abschätzung der Wahrscheinlichkeitsverteilung von Zufallsvariablen Englisch: Kernel density estimation (KDE)
LiDAR	Light detection and ranging Methode zur Abstands- und Geschwindigkeitsmessung
Marteloskop	Übungs- und Demonstrationsfläche für die Anzeichnung von Holzschlägen (Mordini 2009, Kraus et al. 2016b)
NaiS	Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald Wegleitung für Pflegemaßnahmen in Wälder mit Schutzfunktion (Frehner et al. 2005)

Obersubalpin	Ökologische Höhenstufe auf 1800-2350 m ü. M.
Plenterwald	Wald mit stufiger Struktur und Bäumen aller Entwicklungsstufen auf kleiner Fläche
RAMMS	Rapid mass movement simulation Zweidimensionales Simulationsmodell für Massenbewegungen
Reaktionsholz	Exzentrisches Dickenwachstum eines Baumes um seine lotrechte Position beizubehalten
Resilienz	Kapazität eines Ökosystems sich von Störungen zu erholen ohne in einen anderen Zustand zu wechseln
Sämling	1- bis 3-jährige Jungpflanze
Student's t-Test	Anzahl Standardfehler zwischen den Durchschnitten zweier Proben (Crawley 2007)
Subalpin	Ökologische Höhenstufe auf 1600-2100 m ü. M.
VHM	Vegetationshöhenmodell (Ginzler und Hobi 2016) Differenz zwischen DOM und DGM Englisch: Canopy height model (CHM)
Vorrat	Schaftholzvolumen der stehenden Bäume mit BHD über der Kluppschwelle [m ³ /ha]
VRM	Vector ruggedness measure Mass für die Bodenrauigkeit (Sappington et al. 2007)
Welch-Test	Statistischer Test für den Vergleich der Mittelwerte unterschiedlicher Proben

9. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Die Position der Marteloskopfläche im Dischmatal (Orthophoto und Landeskarte: © Bundesamt für Landestopografie swisstopo).	4
Abb. 2: (a) Gegenhangaufnahme der Marteloskopfläche; (b) Wollreitgrasreicher Bereich des Bestandes; (c) Dichter Bereich des Bestandes ohne Bodenvegetation; (d) Hochstaudenreicher Bereich des Bestandes; (e) Lärchendominierter Bereich des Bestandes (Fotografien: G. Könz, 2017).	5
Abb. 3: Berechnung der fehlenden Jahrringe aufgrund der Verfehlung des Marks nach Duncan (1989).....	12
Abb. 4: Vektoren-Dispersionsmethode (VRM) aus Sappington et al. (2007). Die Bodenrauigkeit wird durch die Variabilität der Vektoren bestimmt. Flache Bereiche (A) und steile jedoch gleichmässige Bereiche (B) weisen tiefe VRM-Werte auf. Steile, unebene Bereiche (C) weisen hohe VRM-Werte auf.....	17
Abb. 5: Anrissgebiete für das 300-jährige Ereignis mit den jeweiligen mittleren Anrisshöhen. Das Anrissgebiet 5 weist aufgrund der geringen Neigung eine grössere Anrisshöhe auf. Rot umrandet der Perimeter der Marteloskopfläche (Orthophoto und Landeskarte: © Bundesamt für Landestopografie swisstopo).	19
Abb. 6: Felsband oberhalb der Marteloskopfläche, Bäume mit steinschlagbedingten Wunden und ein abgebremster Stein (Fotografien: G. Könz, 2017).	20
Abb. 7: Verteilung der Verjüngungsansätze der Marteloskopfläche auf den unterschiedlichen Vegetationstypen. Die Grösse der grünen Punkte ist proportional zur Anzahl Individuen pro Verjüngungsansatz.	22
Abb. 8: Räumliche Verteilung der Verjüngungsansätze und der dominanten Individuen der vier Baumarten aufgrund der Kerndichteschätzung.	23
Abb. 9: Verteilung der dominanten Individuen der vier Baumarten nach Vegetationstypen.....	24
Abb. 10: Gleichmässige und beobachtete Verteilung der Verjüngungsansätze nach Vegetationstypen.....	25
Abb. 11: Verteilung der dominanten Individuen der vier Baumarten nach Substrattypen.....	26
Abb. 12: Durchschnittliche Sonnenscheindauer für die unterschiedlichen Baumarten. Die beobachteten Unterschiede sind statistisch nicht signifikant.....	27
Abb. 13: (a) Verjüngungsansätze der Fichten (gefüllt) und Lärchen (ungefüllt) mit genügend (blaugrün) respektive ungenügend (rot) Juni-Sonnenscheindauer (Krebs 2001, Frehner et al. 2005) (Orthophoto: © Bundesamt für Landestopografie swisstopo). (b) Anzahl dominanter Individuen der Fichtenverjüngung pro Vegetationstyp mit über (blaugrün) respektive unter (rot) 2 Stunden Juni-Sonnenscheindauer pro Tag.....	28

Abb. 14: Die Zuwächse der Fichten, Lärchen, Arven und Vogelbeeren sind signifikant unterschiedlich.	29
Abb. 15: Vergleich der mittels unterschiedlichen Modellen vorhergesagten Zuwächse und beobachteten Zuwächsen der Stichprobe. Die Farbgebung erfolgt aufgrund der Verjüngungs-ID und dient der Übersichtlichkeit.....	32
Abb. 16: Dendrochronologisch datierte Bäume (blaue Punkte) und mittels Bertalanffy-Wachstumsgleichung berechnete Alter (rote Kreuze). Durchgezogen die Wachstumskurve, gestrichelt die obere und untere Standardabweichung der Wachstumskurve.....	34
Abb. 17: Mittleres Alter (a) und mittlerer Zuwachs (b) der dominanten Individuen der Verjüngungsansätze einer mittleren Höhe von 2 m, berechnet mit vier unterschiedlichen Methoden.....	36
Abb. 18: Dendrochronologisch datierte Bäume über der Kluppschwelle mit Wachstumskurve der Fichten (blau) und die mittels unterschiedlichen Methoden berechneten Alter der Bäume unter der Kluppschwelle (rosa).....	37
Abb. 19: Anteil Fichten und Lärchen in den unterschiedlichen Jahren. Die Grösse ist proportional zur Anzahl Beobachtungen. Gefüllt die dendrochronologisch bestimmten Alter. Transparent hinterlegt die Summe der dendrochronologisch bestimmten Alter und der mittels Bertalanffy-Wachstumsgleichung berechneten Alter.	38
Abb. 20: Räumliche Altersverteilung der Bäume über der Kluppschwelle (Punkte) und unter der Kluppschwelle (Dreiecke). Für die Bäume unter der Kluppschwelle wurde die Altersberechnung mit Wachstumsfaktoren der dendrochronologisch datierten Bäume angewendet. Die 28 Bäume, für welche keine Altersberechnung durchgeführt werden konnte sind als schwarze Sterne dargestellt. Das mittels Bertalanffy-Wachstumsgleichung berechnete Alter ist mit einem schwarzen Kreuz gekennzeichnet. Im Hintergrund die DGM-Schummerung (1 m Auflösung) und 1 m-Höhenlinien.	39
Abb. 21: Entwicklung des Bestandes seit 1832 aufgrund einer Analyse der Dufourkarte und Orthophotos. Auf der Dufourkarte sind zusätzlich die Bäume aufgeführt, welche aufgrund der Messungen und Berechnungen der vorliegenden Arbeit im Jahre 1832 vorhanden waren. In rot die Lage der Marteloskopfläche. (Dufourkarte und Orthophotos: © Bundesamt für Landestopografie swisstopo).	40
Abb. 22: Verteilung der bedeutenden Freistellungseffekte der Fichten (rot) und Lärchen (gelb). Mit Sternen sind die Jahre gekennzeichnet, für welche in der Lawinenchronik der Landschaft Davos (Laely 1984) viele Lawinen aufgezeichnet wurden. Zusätzlich wurden die Lawinenwinter 1951, 1968 und 1999 hinzugefügt. Gestrichelt die totale Anzahl untersuchte Proben pro Jahr.	41
Abb. 23: Dichte der bedeutenden Freistellungseffekte (a) und der moderaten Freistellungseffekte (b) aufgrund der Kerndichteschätzung.	42
Abb. 24: Moderate Freistellungseffekte (orange) und bedeutende Freistellungseffekte (rot) für das Jahr 1821 (a) und zwischen 1999 und 2002 (b). In rot der Perimeter der	

Marteloskopfläche. Im Hintergrund die DGM-Schummerung (1 m Auflösung) und 1 m-Höhenlinien.....	42
Abb. 25: Beobachtetes und mittels Gleichung 11 (siehe Seite 16) berechnetes Verhältnis zwischen Höhe und BHD.....	43
Abb. 26: Lawinenzug West am 22. November 2017 bei einer Schneehöhe von ca. 20 cm (a) und am 28. Januar 2018 bei einer Schneehöhe von ca. 150 cm (b). Am Rande des Lawinenzuges im Osten der Marteloskopfläche sind jungen Fichten zu erkennen (c). In diesem Bereich wird für die Anrissgebiete 1, 3, 4 und 5 Waldzerstörung simuliert (d). (Fotografien: G. Könz, 2017 und 2018; Orthophoto: © Bundesamt für Landestopografie swisstopo).....	45
Abb. 27: Simulierte Waldzerstörung für das Waldszenario 1817 für die Anrissgebiete 2 (dunkelblau), 3 (violett), 4 (hellblau) und 5 (rosa). Zudem sind die Freistellungseffekte des Jahres 1821 und die überlebenden Bäume der Marteloskopfläche (roter Perimeter) dargestellt. (Orthophoto: © Bundesamt für Landestopografie swisstopo).....	46
Abb. 28: Kerndichteschätzung der beobachteten Baumverletzungen (a) und der simulierten Baumtreffer mit 0.1 m ³ Steinen und der maximalen Rauigkeitsvariante (b).....	47
Abb. 29: Verlauf der Steinschlagtrajektionen mit einem 0.1 m ³ (orange) und einem 1 m ³ Stein (violett). Die beobachteten verletzten Bäume sind hellgelb markiert. In dunkelgelb das definierte Anrissgebiet. (Orthophoto: © Bundesamt für Landestopografie swisstopo).....	48
Abb. 30: Gleiche Bohrprobe mit unterschiedlichen Methoden gemessen (a) und verschiedene Bohrproben desselben Baumes mit unterschiedlichen Methoden gemessen (b).....	64
Abb. 31: Histogramme der Variablen der Verjüngungsuntersuchungen (in der Diagonalen) mit Pearson Korrelationskoeffizienten (rechts) und Paar-Plots (links) der unterschiedlichen Variablenpaarungen.....	82
Abb. 32: Grenzlinien (Boundary-Lines) der Fichten und Lärchen. Wachstumsänderungen: über zehn Jahre gemittelte prozentuale Wachstumsänderungen nach Nowacki und Abrams (1997). Durchschnittlicher Wachstum: durchschnittliches Wachstum der vorhergehenden zehn Jahre.....	83
Abb. 33: Waldpolygone für den Waldzustand 2017 (a) und 1817 (b) mit K-Wert und BHD (Orthophoto: © Bundesamt für Landestopografie swisstopo).....	84
Abb. 34: Simulierte Ausläufe (blau) und simulierte Waldzerstörung (rosa) der Lawinen der Anrissgebiete 1 bis 6. In rot die Lage der Marteloskopfläche. (Orthophoto: © Bundesamt für Landestopografie swisstopo).....	85
Abb. 35: Korrektur der Topologie der Vegetationskartierung.....	89
Abb. 36: Erstellen eines 30 m Radius und Berechnung der mittleren Höhe jedes Verjüngungsansatzes (oben) und Extraktion der Höhe des CHM (1 m Auflösung) für den 30 m Radius (unten).....	89

Abb. 37: Auswahl der Zellen des CHM, welche grösser als die mittlere Höhe des jeweiligen Verjüngungsansatzes sind.....	90
Abb. 38: Hinzufügen von neuen Feldern für die Berechnung der gesamten Anzahl Zellen pro 30 m Radius und für die Berechnung des Verhältnisses des unbedeckten Himmelanteils.....	90
Abb. 39: Prozentzahlen des unbedeckten Himmelanteils berechnen. Anschliessend werden die Dateien der .gdb mittels ArcPy als .csv exportiert.....	90
Abb. 40: Berechnung der Sonnenscheindauer mittels "Points to Solar Radioation"....	91
Abb. 41: Extrahieren der Meereshöhe, Neigung und Exposition für die einzelnen Verjüngungsansätze.....	91
Abb. 42: Berechnung der beobachteten und der erwarteten Verteilung der Verjüngungsansätze.....	92
Abb. 43: Berechnung der Waldpolygone. Durch explorativen Vergleich wurde als beste Variante die Methode „Kritische Biegung beibehalten“ mit 5 m Toleranz für die Vereinfachung und 300 m ² als Schwellenwert für die minimale Flächengrösse befunden.....	93

10. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Erhobene und berechnete Variablen für die Untersuchungen der Verjüngung.....	8
Tabelle 2: Zwei Varianten der Hindernisgrößen für die VRM-Rauigkeitsklassen.....	21
Tabelle 3: Prozent dominanter Individuen der Verjüngungsansätze pro Vegetations- und Mikrovegetationskategorien und Anzahl Verjüngungsansätze pro Flächeneinheit der Vegetationskategorien.	24
Tabelle 4: Zusammenhang zwischen Zuwachs und den signifikanten erklärenden Variablen aufgrund der Pearsons Korrelation respektive Welch-Test und zugehörige p-Werte.	30
Tabelle 5: Zusammenhang zwischen Höhe am Ende des Jahres 2017 und den signifikanten erklärenden Variablen anhand von Pearsons Korrelationen respektive Welch-Test und zugehörigere p-Werte.	31
Tabelle 6: Modelle für die Vorhersage des Zuwachses für alle Baumarten, für die Fichten und für die Kombination von Fichten und Lärchen mit jeweiligen AIC und R ²	31
Tabelle 7: Korrelationen zwischen beobachteten Zuwächsen und vorausgesagten Zuwächsen für die unterschiedlichen Modelle	32
Tabelle 8: Aus den dendrochronologisch datierten Bäume über der Kluppschwelle berechneter Wachstumsfaktor für Fichten und Lärchen.....	34
Tabelle 9: Mittlerer Wachstumsfaktor für Fichten und Lärchen unter der Kluppschwelle von 7 cm BHD berechnet aus den Höhenunterschieden zwischen 2016 und 2016 respektive 2016 und 2019.	35
Tabelle 10: Mit unterschiedlichen Methoden berechnete durchschnittliche Alter der Fichten und Lärchenverjüngung einer mittleren Höhe von 2 m.	35
Tabelle 11: Parameter für die Lawinen-Simulationen des 300-jährigen Ereignisses in Teufi. Diese entsprechen einer kalten, trockenen Lawine mit schwacher Bindung. ...	86
Tabelle 12: Parameter der Anrissgebiete des 300 jährigen Ereignisses.....	86
Tabelle 13: Steinschlagparameter der Steinschlagsimulationen in Teufi für einen mittelweichen Boden (medium soft).	87

Anhang 1: Zusätzliche Resultate

1.1 Korrelationsdiagramm



Abb. 31: Histogramme der Variablen der Verjüngungsuntersuchungen (in der Diagonalen) mit Pearson Korrelationskoeffizienten (rechts) und Paar-Plots (links) der unterschiedlichen Variablenpaarungen.

1.2 Grenzlinien (Boundary-Lines)

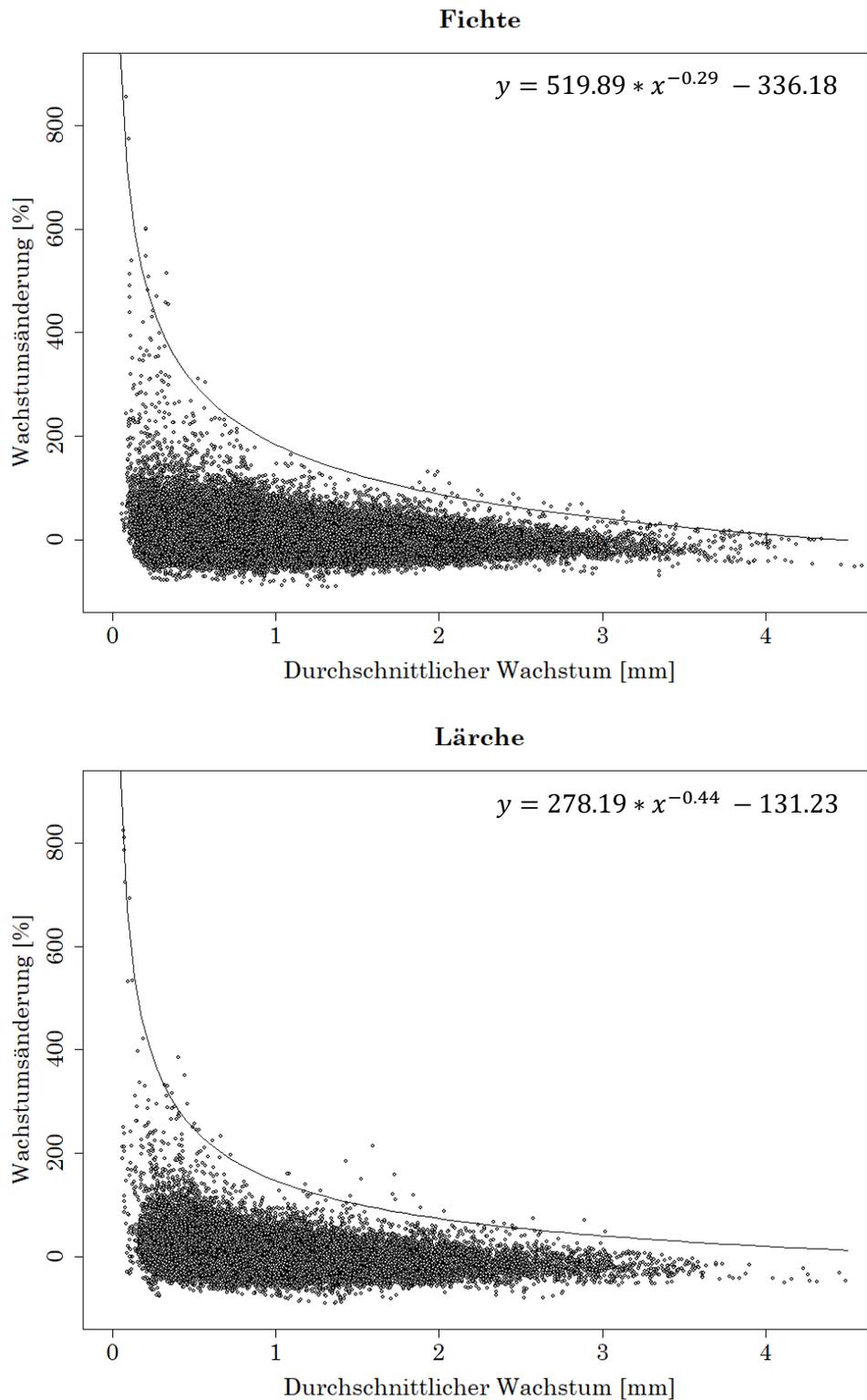


Abb. 32: Grenzlinien (Boundary-Lines) der Fichten und Lärchen. Wachstumsänderungen: über zehn Jahre gemittelte prozentuale Wachstumsänderungen nach Nowacki und Abrams (1997). Durchschnittlicher Wachstum: durchschnittliches Wachstum der vorhergehenden zehn Jahre.

1.3 Waldpolygone

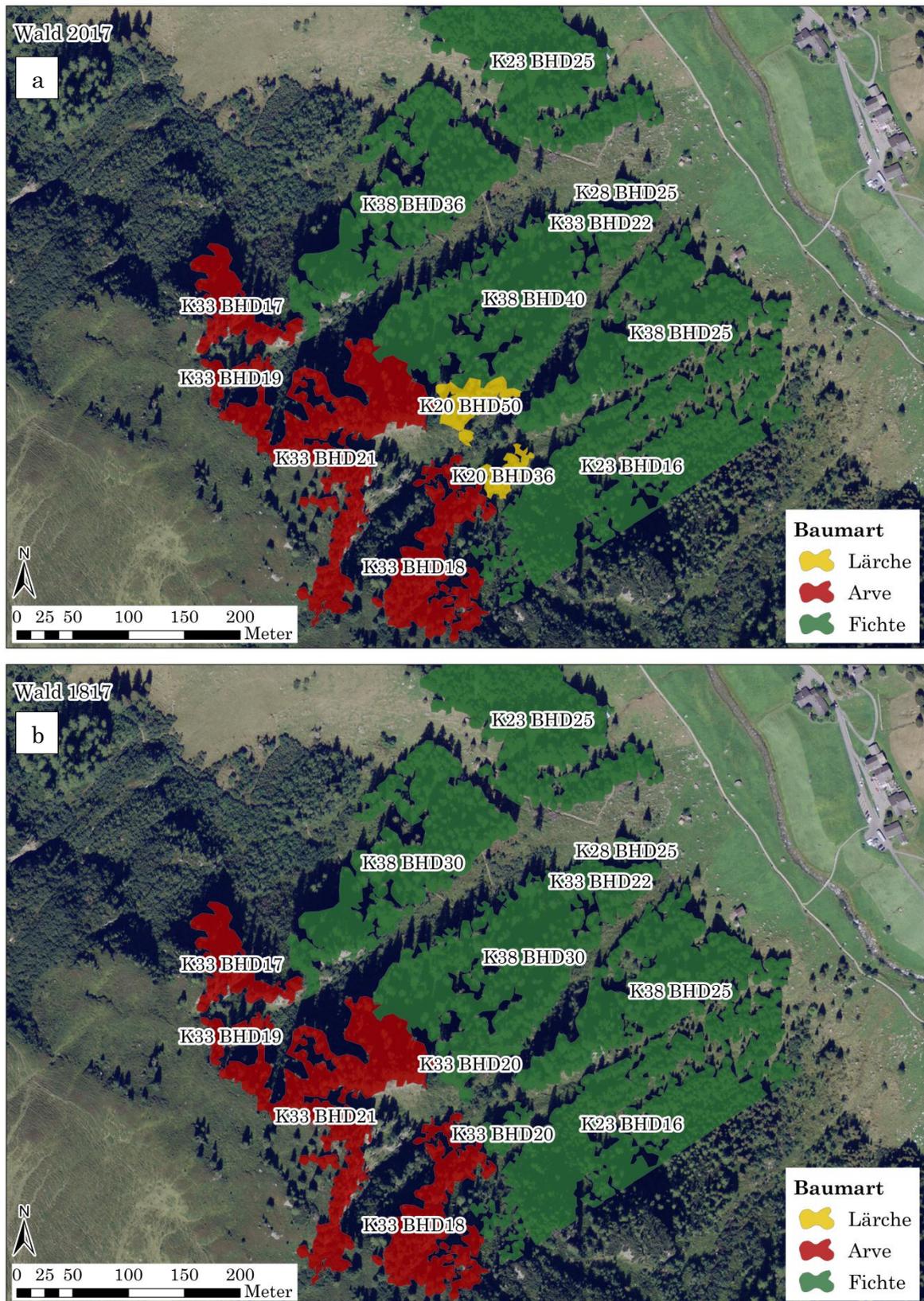


Abb. 33: Waldpolygone für den Waldzustand 2017 (a) und 1817 (b) mit K-Wert und BHD (Orthophoto: © Bundesamt für Landestopografie swisstopo).

1.4 Lawinensimulationen

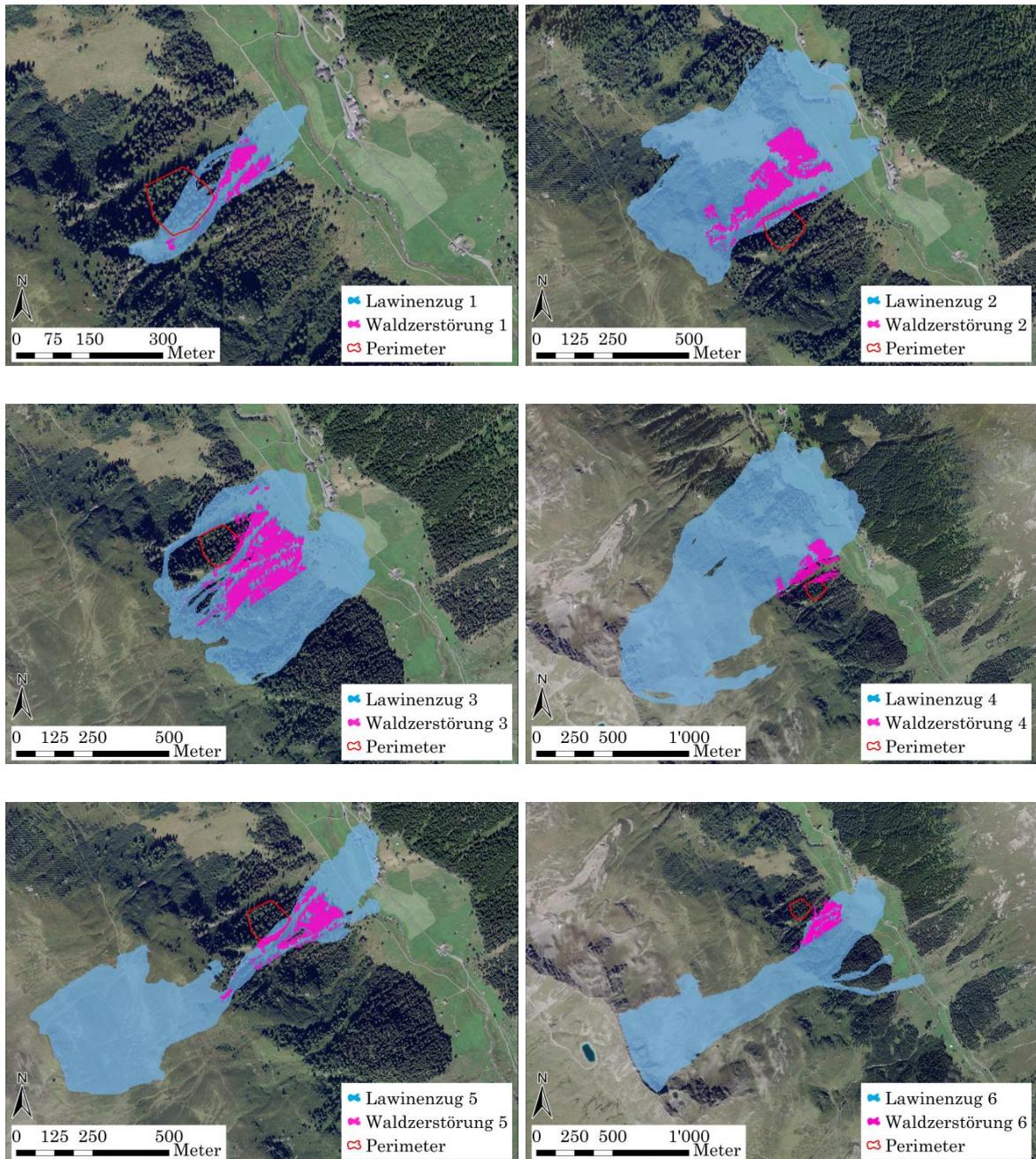


Abb. 34: Simulierte Ausläufe (blau) und simulierte Waldzerstörung (rosa) der Lawinen der Anrissgebiete 1 bis 6. In rot die Lage der Marteloscopfläche. (Orthophoto: © Bundesamt für Landestopografie swisstopo).

Anhang 2: Lawinen- und Steinschlagparameter

2.1 Lawinenparameter

Tabelle 11: Parameter für die Lawinen-Simulationen des 300-jährigen Ereignisses in Teufi. Diese entsprechen einer kalten, trockenen Lawine mit schwacher Bindung.

Parameter	Einheit	Wert
density	[kg/m ³]	450
ξ	[m/s ²]	2000
μ		0.55
cohesion	[Pa]	100
release density ρ	[kg/m ³]	150
initial temperature T_0	[°C]	-5
ΔD	[M]	0.05
ΔT	[°C]	0.5
erodibility		4
epsilon		0.4
generate		0.07
decay (B)	[1/s]	0.7
act energy	[kJ/m ³]	2
μ wet		0.12
dry-wet-transition	[mm]	100
cloud drag		2
frontal air entrainment		3
Stopping treshhold	[%]	5

Tabelle 12: Parameter der Anrissgebiete des 300 jährigen Ereignisses.

Anrissgebiet	Ø Meereshöhe [m]	Ø Anrisshöhe [m]	Auflösung [m]
1	1925	1.03	2
2	1940	1.27	2
3	1962	1.26	2
4	2463	1.45	5
5	2257	1.72	3
6	2501	1.34	5

2.2 Steinschlagparameter

Tabelle 13: Steinschlagparameter der Steinschlagsimulationen in Teufi für einen mittelweichen Boden (medium soft).

Parameter	Wert Start	Δ
μ min	0.3	0.05
μ max	2	0.1
β	125	50
κ	1.5	1
ε	0	0
scar D	0.26	0.2
scar H	0.035	0.05
rough DT	0.08	0.05
rough DR	2.34	0.05
Mscale	0.001	0.01
Mshift	30000	10000

Anhang 3: K-Werte für Waldpolygone

Choose the characteristics of forest area to obtain the corresponding K-value or Code.

forest type	crown coverage*	roughness**	K-value***	Code
evergreen / mixed	dense (> 70%) coverage	rough (stumps/shrubs/saplings); height > 100 cm	48	A
		knobby (scree/stepped/seedlings); height 20 - 100 cm	38	B
		smooth (grass/leaves/smooth rock); height < 20 cm	28	C
	scattered, grouped (40% - 70%) coverage	rough (stumps/shrubs/saplings); height > 100 cm	43	D
		knobby (scree/stepped/seedlings); height 20 - 100 cm	33	E
		smooth (grass/leaves/smooth rock); height < 20 cm	23	F
	open (20% - 40%) coverage	rough (stumps/shrubs/saplings); height > 100 cm	38	G
		knobby (scree/stepped/seedlings); height 20 - 100 cm	28	H
		smooth (grass/leaves/smooth rock); height < 20 cm	18	I
larch / deciduous trees	dense (> 70%) coverage	rough (stumps/shrubs/saplings); height > 100 cm	35	J
		knobby (scree/stepped/seedlings); height 20 - 100 cm	25	K
		smooth (grass/leaves/smooth rock); height < 20 cm	15	L
	scattered, grouped (40% - 70%) coverage	rough (stumps/shrubs/saplings); height > 100 cm	30	M
		knobby (scree/stepped/seedlings); height 20 - 100 cm	20	N
		smooth (grass/leaves/smooth rock); height < 20 cm	10	O
	open (20% - 40%) coverage	rough (stumps/shrubs/saplings); height > 100 cm	25	P
		knobby (scree/stepped/seedlings); height 20 - 100 cm	15	Q
		smooth (grass/leaves/smooth rock); height < 20 cm	5	R

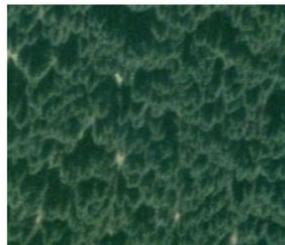
* Can be determined analysing orthophotos. Pictures below show example cases.

** Quantity for ground roughness as well as small vegetation and dead wood in the avalanche path. Examples below.

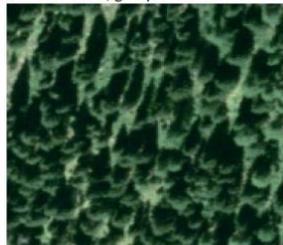
*** K in [Pa] represents the braking power per square meter that the forest exerts on the avalanche flow. It can be chosen manually if forest structure is not clear or in between two classes.

Crown coverage:

dense



scattered, grouped



open



Roughness:

rough



knobby



smooth



Features of ground roughness should be present every few meters. If there are only few large obstacles the roughness can be classified as knobby.

November 2013

Anhang 4: Model-Builder Diagramme ArcMap

3.1 Korrektur der Topologie

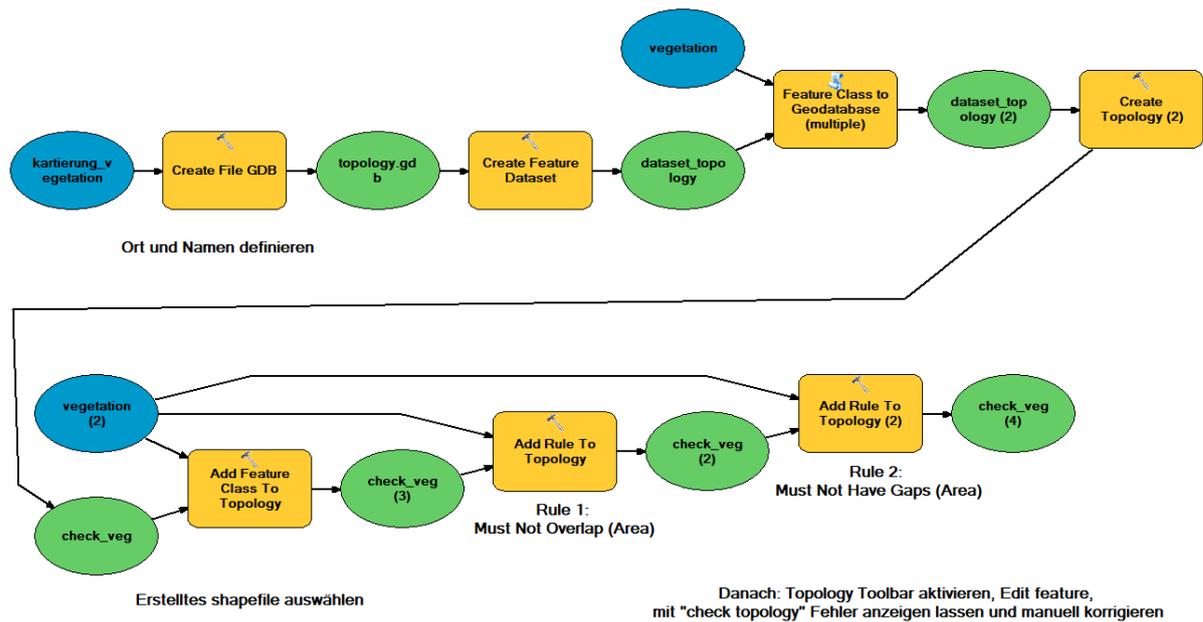


Abb. 35: Korrektur der Topologie der Vegetationskartierung.

3.2 Berechnung des unbedeckten Himmelanteils

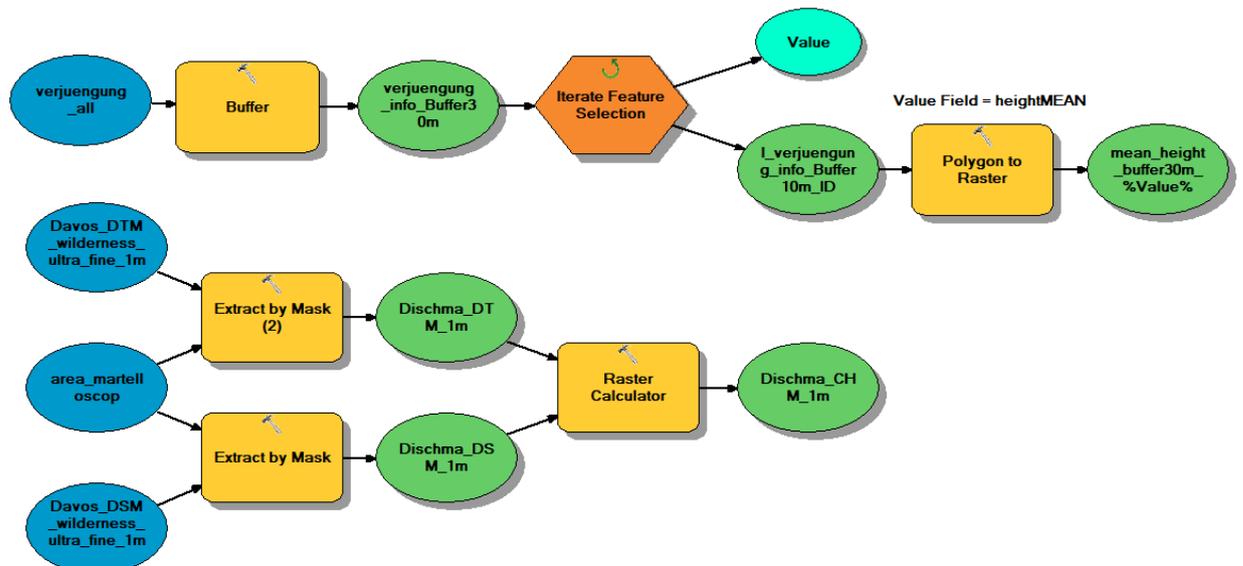


Abb. 36: Erstellen eines 30 m Radius und Berechnung der mittleren Höhe jedes Verjüngungsansatzes (oben) und Extraktion der Höhe des CHM (1 m Auflösung) für den 30 m Radius (unten).

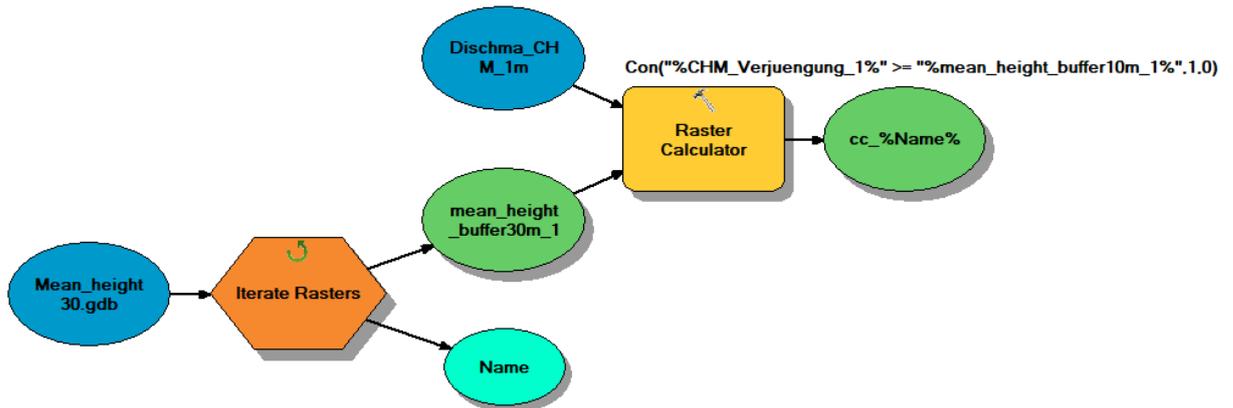


Abb. 37: Auswahl der Zellen des CHM, welche grösser als die mittlere Höhe des jeweiligen Verjüngungsansatzes sind.

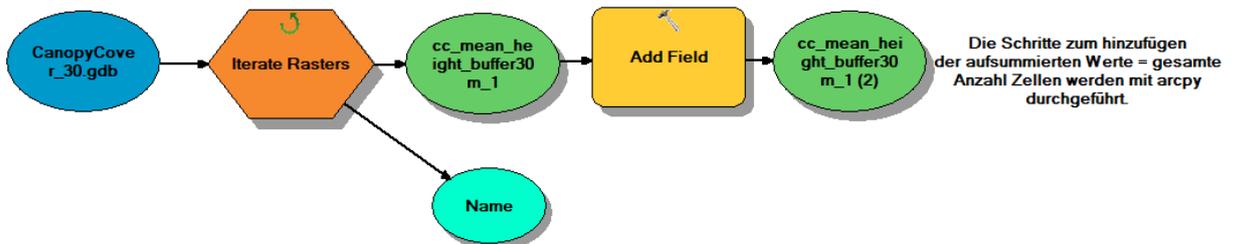


Abb. 38: Hinzufügen von neuen Feldern für die Berechnung der gesamten Anzahl Zellen pro 30 m Radius und für die Berechnung des Verhältnisses des unbedeckten Himmelanteils.

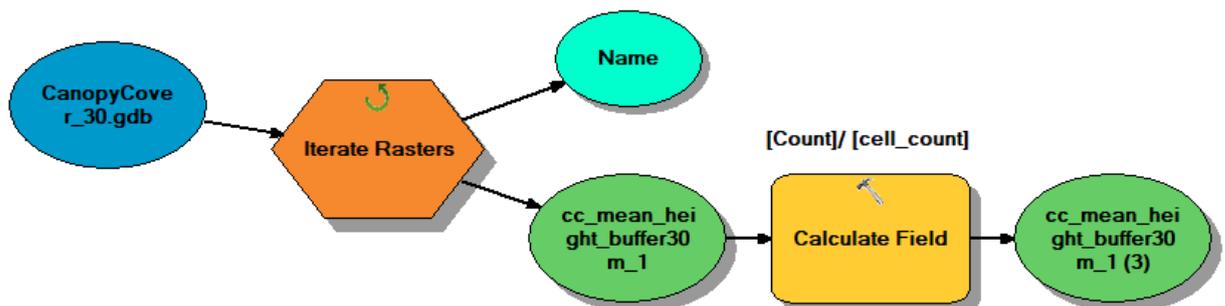


Abb. 39: Prozentzahlen des unbedeckten Himmelanteils berechnen. Anschliessend werden die Dateien der .gdb mittels ArcPy als .csv exportiert.

3.3 Berechnung der Sonnenscheindauer

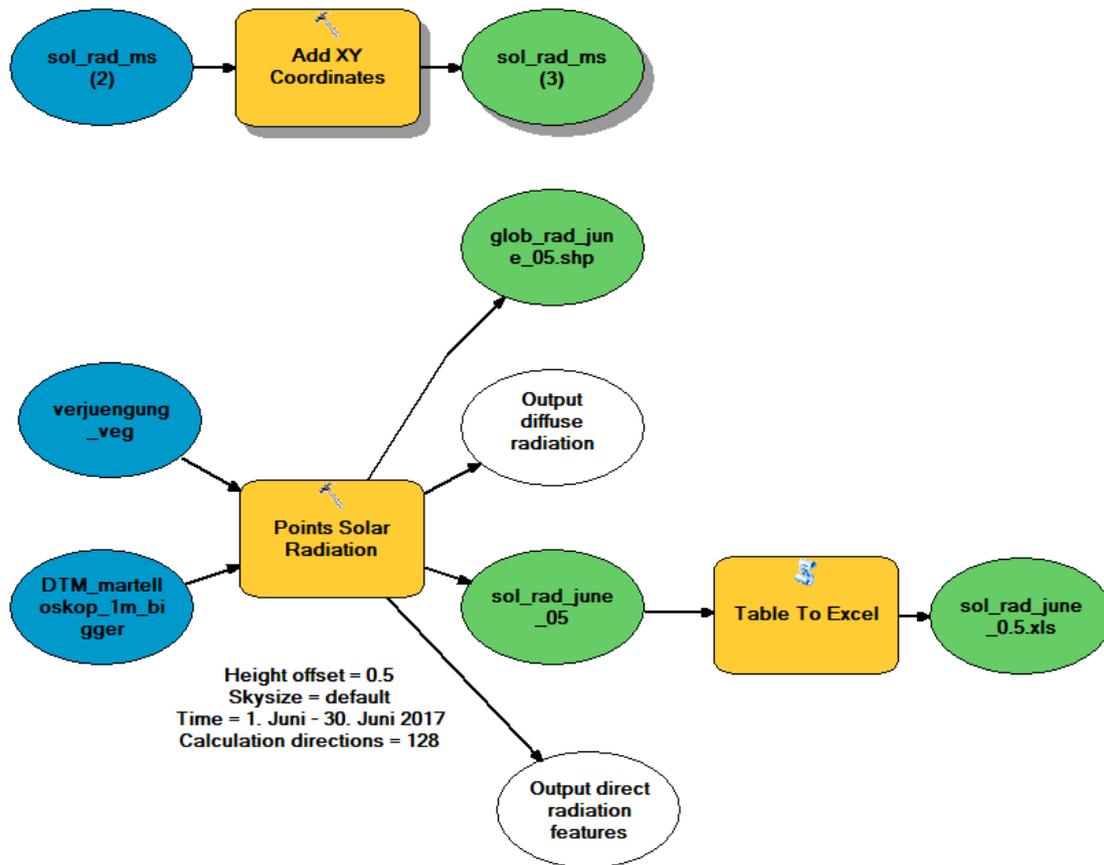


Abb. 40: Berechnung der Sonnenscheindauer mittels "Points to Solar Radiation".

3.4 Exposition und Neigung

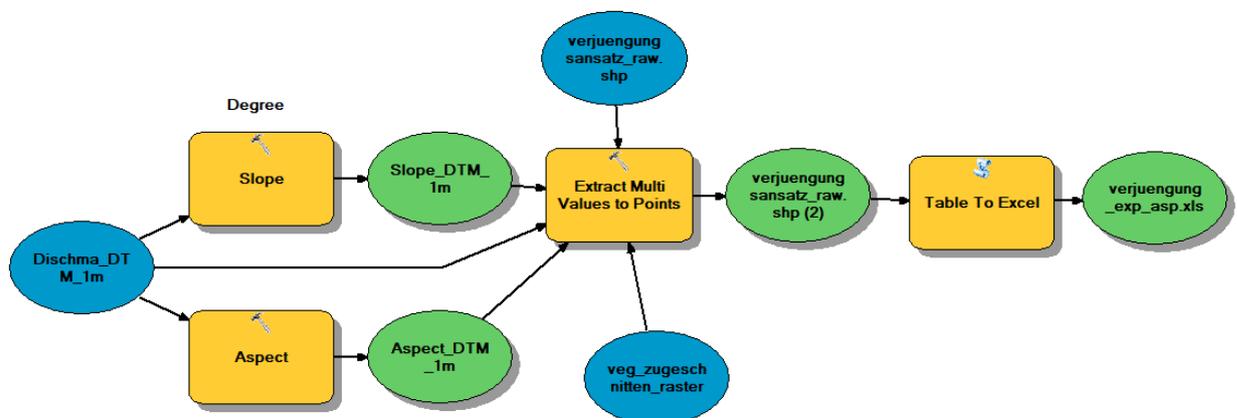


Abb. 41: Extrahieren der Meereshöhe, Neigung und Exposition für die einzelnen Verjüngungsansätze.

3.5 Beobachtete und erwartete Verteilung Verjüngungsansätze

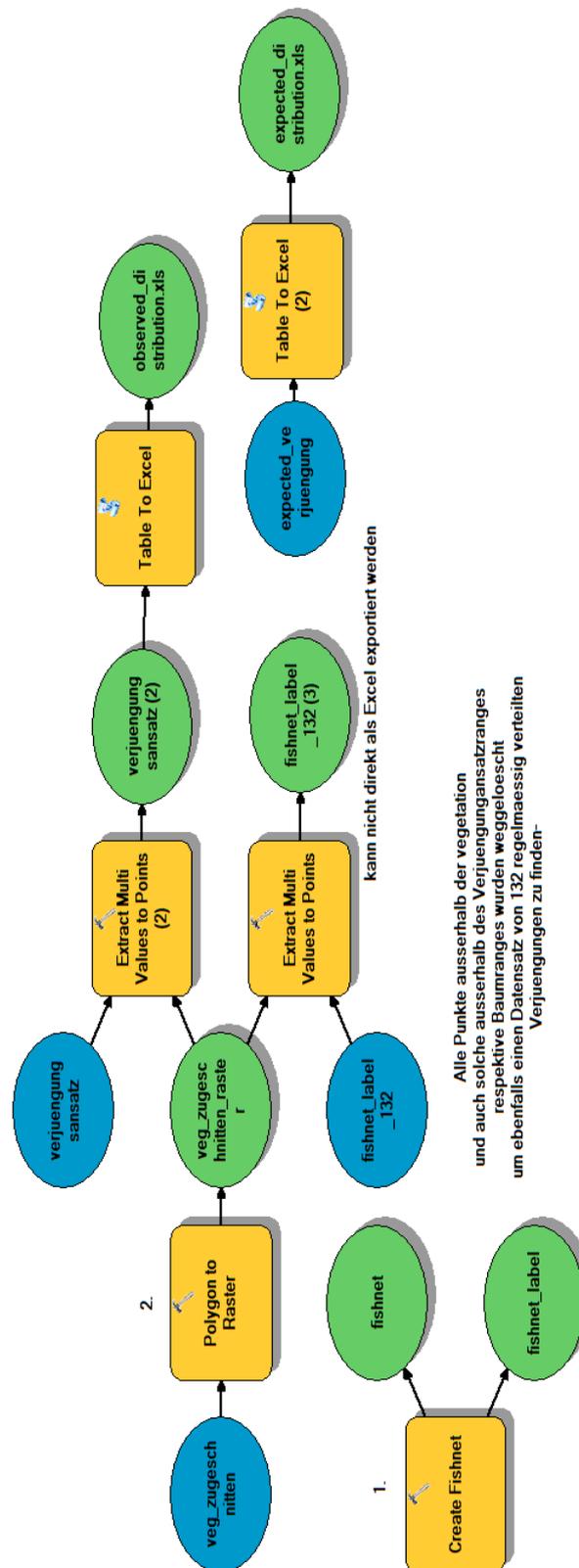


Abb. 42: Berechnung der beobachteten und der erwarteten Verteilung der Verjüngungsansätze.

3.6 Definition Waldpolygone

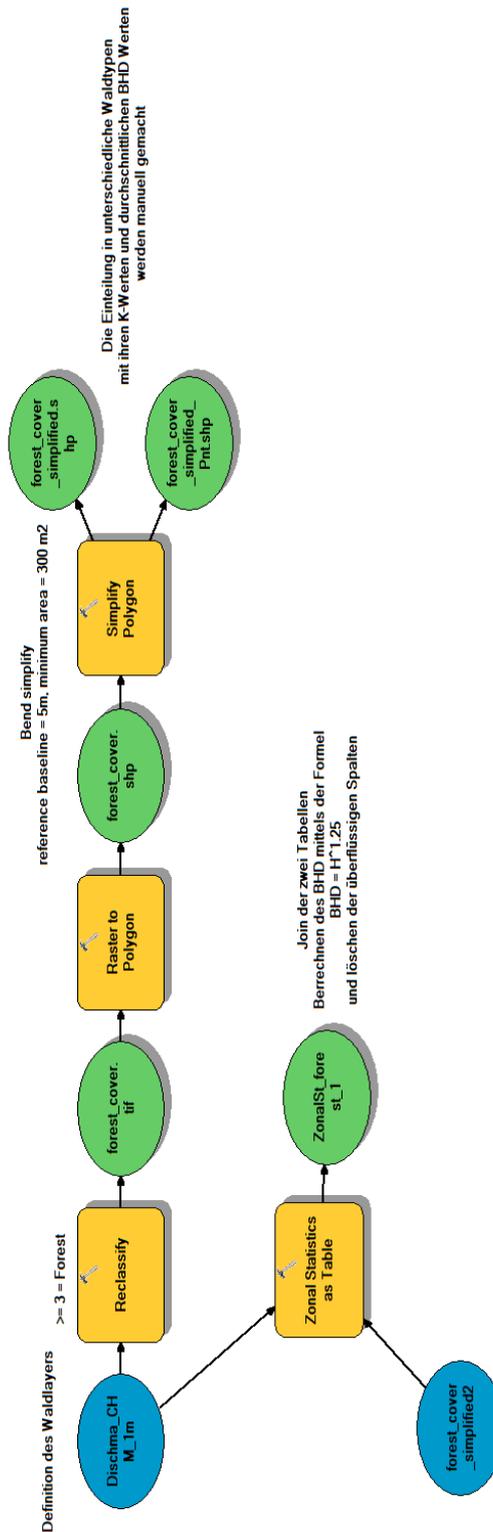


Abb. 43: Berechnung der Waldpolygone. Durch explorativen Vergleich wurde als beste Variante die Methode „Kritische Biegung beibehalten“ mit 5 m Toleranz für die Vereinfachung und 300 m² als Schwellenwert für die minimale Flächengröße befunden.



Eigenständigkeitserklärung

Die unterzeichnete Eigenständigkeitserklärung ist Bestandteil jeder während des Studiums verfassten Semester-, Bachelor- und Master-Arbeit oder anderen Abschlussarbeit (auch der jeweils elektronischen Version).

Die Dozentinnen und Dozenten können auch für andere bei ihnen verfasste schriftliche Arbeiten eine Eigenständigkeitserklärung verlangen.

Ich bestätige, die vorliegende Arbeit selbständig und in eigenen Worten verfasst zu haben. Davon ausgenommen sind sprachliche und inhaltliche Korrekturvorschläge durch die Betreuer und Betreuerinnen der Arbeit.

Titel der Arbeit (in Druckschrift):

Räumliche Erfassung von Waldgeschichte und Schutzwirkung eines subalpinen Fichten-Lärchenbestandes

Verfasst von (in Druckschrift):

Bei Gruppenarbeiten sind die Namen aller Verfasserinnen und Verfasser erforderlich.

Name(n):

Könz

Vorname(n):

Gianna Seraina

Ich bestätige mit meiner Unterschrift:

- Ich habe keine im Merkblatt „Zitier-Knigge“ beschriebene Form des Plagiats begangen.
- Ich habe alle Methoden, Daten und Arbeitsabläufe wahrheitsgetreu dokumentiert.
- Ich habe keine Daten manipuliert.
- Ich habe alle Personen erwähnt, welche die Arbeit wesentlich unterstützt haben.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die Arbeit mit elektronischen Hilfsmitteln auf Plagiate überprüft werden kann.

Ort, Datum

Davos, 09.05.2018

Unterschrift(en)

Bei Gruppenarbeiten sind die Namen aller Verfasserinnen und Verfasser erforderlich. Durch die Unterschriften bürgen sie gemeinsam für den gesamten Inhalt dieser schriftlichen Arbeit.