

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen
Studiengang Umweltnaturwissenschaften

**Dendroökologische Identifikation von Release-Effekten
mittels Boundary-Line-Methode zur Rekonstruktion
vergängerer Lawinenereignisse**

Fallstudie in einem subalpinen Fichten-Lärchen-Bestand
in den Schweizer Alpen

Bachelorarbeit
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Bachelor of Science

vorgelegt von
Markus Erhard Schorn

Matrikelnummer: 3939811

Betreuer: PD Dr. Hans-Peter Kahle
Professur für Waldwachstum

Korreferent: Dr. Patrick Pyttel
Professur für Waldbau

Bearbeitungszeitraum: 15. Januar 2018 bis 15. April 2018

Inhaltsverzeichnis

1.	Zusammenfassung	2
2.	Einleitung	2
3.	Material und Methoden	4
3.1.	Standort	4
3.2.	Bestand	5
3.3.	Untersuchungsbäume	6
3.4.	Feld- und Laborarbeit	7
3.5.	Datenanalyse	8
4.	Ergebnisse	13
4.1.	Identifizierte Freistellungen und deren zeitliche Verteilung	13
4.2.	Verteilung der Freistellungen nach Größenklassen	15
4.3.	Visuelle Analysen potenzieller Störungsereignisse	16
5.	Diskussion	19
5.1.	Diskussion der Methoden	19
5.2.	Diskussion der Ergebnisse	21
6.	Fazit	23
7.	Literaturverzeichnis	24
8.	Anhang	28
	Anhang 1: Präparation und Vermessung der Proben – Übersicht	28
	Anhang 2: COFECHA	36
	Anhang 3: Verwendete Datensätze zur Berechnung der Boundary-Lines	41
	Erklärung zur eigenständigen Anfertigung	42

1. Zusammenfassung

Einem großen Teil der Gebirgswälder in den Schweizer Alpen kommt die Funktion eines Schutzwaldes zu. Lawinen stellen dabei das häufigste Störungsereignis dar, demgegenüber Wälder Schutzwirkung entfalten können. Die Wirkung von Lawinen in Waldbeständen ist jedoch im Vergleich zu anderen Störungsarten wenig erforscht. In der vorliegenden Arbeit wird daher untersucht, wann und wie große Störungsereignisse in der Vergangenheit einen Waldbestand beeinflusst haben. Hierfür wurden Jahrringdaten für sämtliche Bäume einer 0,9 ha großen Marteloskop-Fläche aufgenommen und diese mittels der Boundary-Line-Methode auf das Vorliegen von Release-Effekten untersucht. In Verbindung mit einer GIS-gestützten visuellen Analyse der räumlichen Verteilung dieser Freistellungen und unter Einbeziehung historischen Wissens über vergangene Lawinengroßereignisse wird geprüft, inwiefern es sich bei diesen Störungen um Lawinenabgänge gehandelt haben kann. Mithilfe dieses Vorgehens wird ermittelt, inwieweit große Lawinenereignisse, die einen Bestand beeinflusst haben, mit der Boundary-Line-Methode rekonstruiert werden können.

Es wurden zwei große Störungsereignisse im untersuchten Bestand identifiziert. Eines davon stellt die Folgen eines großen Lawinenabgangs im Jahr 1817 dar, dem wohl zahlreiche höhergelegene Bäume zum Opfer fielen und der so das Kronendach des Bestandes öffnete. Für das zweite Ereignis wird davon ausgegangen, dass es sich um einen Ausläufer einer großen Staublawine im Jahr 1999 handelt, der keine so deutliche Öffnung des Kronendachs verursachte. Dennoch wurde einigen Bäumen Zugang zu mehr Licht und Ressourcen verschafft, vermutlich infolge des Mitreißen großer Äste von Konkurrenzstämmen durch die Lawine. Insgesamt wird festgestellt, dass die Boundary-Line-Methode durchaus geeignet scheint, von Lawinen verursachte Störungsereignisse zu erfassen, jedoch zusätzliche Auswertungen nötig wären, um diese These weiter zu stützen.

2. Einleitung

Forstliche Ökosysteme üben vielerlei Wirkungen aus, die von Relevanz für den Menschen und seine Umwelt sind. Diese können ökologischer, hydrologischer, klimatischer, sozialer oder wirtschaftlicher Natur sein (Leibundgut 1985). Beispiele hierfür sind die Bereitstellung von natürlichen Ressourcen (insbes. Holz), Kohlenstoffspeicherung, Aufbereitung von Trinkwasser, Nutzung für Freizeitaktivitäten und zur Erholung oder der Schutz vor Naturgefahren (Grêt-Regamey et al. 2008).

Gebirgswäldern im Speziellen kommt häufig die Funktion eines Schutzwaldes zu, da sie durch ihren Aufbau und ihre positiven Wirkungen auf boden- und schneephysikalische Prozesse in der Lage sind, das Vorkommen von Naturgefahren zu verringern oder gar zu

verhindern (Brändli 2010). Als Schutzwald wird ein Wald bezeichnet, dessen Hauptaufgabe darin besteht, Menschen und Infrastrukturanlagen vor Naturgefahren zu schützen (BUWAL/WSL 2005; Brang et al. 2006). In der Schweiz trifft dies auf rund 43 % aller Waldflächen zu (Brändli 2010). Waldökosysteme können Schutzwirkungen gegenüber Steinschlag, Murgängen, Hangrutschungen, Erosion, Hochwasser und Lawinen entfalten (Frehner et al. 2005).

Unter diesen Naturgefahren gehören Lawinen zu den häufigsten Störungsereignissen für Gebirgswälder in den Alpen (Kulakowski et al. 2017). Insgesamt nehmen von Lawinen verursachte Schäden mit fortschreitendem Klimawandel weltweit ab und es wird angenommen, dass Lawinenereignisse auch in Zukunft weiterhin seltener werden (Fuchs et al. 2004; Kulakowski et al. 2017). Trotzdem stellen sie lokal eine große Gefahr für menschliche Siedlungen und Infrastruktur dar. Lawinen beeinflussen die Struktur eines Waldes, umgekehrt kann aber auch die Waldstruktur Einfluss auf die Entstehung und den Verlauf von Lawinenabgängen nehmen. Effektives Schutzwaldmanagement kann also dazu beitragen, Lawinen besser zu verhindern (Bebi et al. 2009). Grundvoraussetzung, um ein solches positives Ökosystemmanagement betreiben zu können, ist das Verständnis für natürliche Dynamiken und Prozesse (Kulakowski et al. 2017). Die Wirkung von Lawinen in Waldbeständen ist jedoch im Vergleich zu anderen Arten von Störungsereignissen wenig erforscht (Bebi et al. 2009). Alte, wenig bzw. seit langer Zeit nicht mehr genutzte Bestände stellen optimale Forschungsobjekte dar, da sie Einblick in natürliche Prozesse über viele Jahrhunderte geben können (Kulakowski et al. 2017). Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist daher, herauszufinden, wann es in einem solchen Gebirgswaldbestand in der Vergangenheit große Lawinenereignisse gab, und wo und wie diese gewirkt haben.

Um vergangene Störungsereignisse in einem forstlichen Ökosystem zu identifizieren und zu datieren, gibt es verschiedene Vorgehensweisen. Eine häufig herangeführte dendroökologische Methode beruht auf der Untersuchung der Wachstumsdaten noch vorhandener und somit das Störungsereignis überlebender Bäume auf sogenannte Freistellungs- oder Release-Effekte (Lorimer und Frelich 1989; Schweingruber 1983). Bei diesen handelt es sich um plötzlich auftretende, langanhaltende Wachstumssprünge, die darauf schließen lassen, dass Konkurrenten des jeweiligen Baumes in der Folge eines Ereignisses beschädigt, umgeknickt oder getötet wurden und dem überlebenden Baum somit schlagartig mehr Licht, Nährstoffe und andere Ressourcen zur Verfügung standen (Lorimer und Frelich 1989).

In der vorliegenden Arbeit werden die Wachstumsdaten eines alten und seit langer Zeit nicht intensiv genutzten Gebirgswaldbestandes in den Schweizer Alpen (Bebi 2018) unter Verwendung der von Black und Abrams (2003) entwickelten Boundary-Line-Methode auf

störungsbedingte Freistellungseffekte untersucht. Weiterhin wird ermittelt, wie sich diese Effekte auf verschiedene Größenklassen von Bäumen verteilen. In Verbindung mit einer GIS-gestützten visuellen Analyse, der räumlichen Verteilung dieser Freistellungseffekte wird erörtert, inwiefern Rückschlüsse auf vergangene Störungs-, insbesondere Lawineneignisse, gezogen werden können. Unter Einbeziehung von Kenntnissen über historische Lawinengroßereignisse wird untersucht, inwiefern die Methode somit geeignet ist, Lawinenabgänge, die einen Waldbestand beeinflusst haben, zu identifizieren und wie weit die Betrachtung unterschiedlicher Größenklassen hierfür hilfreich ist.

3. Material und Methoden

3.1. Standort

Die Untersuchungsfläche befindet sich im Dischma-Tal, einem Seitental der Landschaft Davos im Kanton Graubünden in den Schweizer Alpen. Die Fläche liegt bei $46^{\circ}46'15.417''$ N und $9^{\circ}52'37.796''$ E auf einer durchschnittlichen Meereshöhe von ca. 1.830 m. ü. NN (vgl. Abbildung 1). Die Neigung des nach Nordosten exponierten Hangs beträgt rund 35 – 40 Grad. Das Klima des Dischma-Tals ist beeinflusst von seiner Lage im Übergangsbereich von den nördlichen Zwischenalpen zu den Zentralalpen und wird von einem mittleren

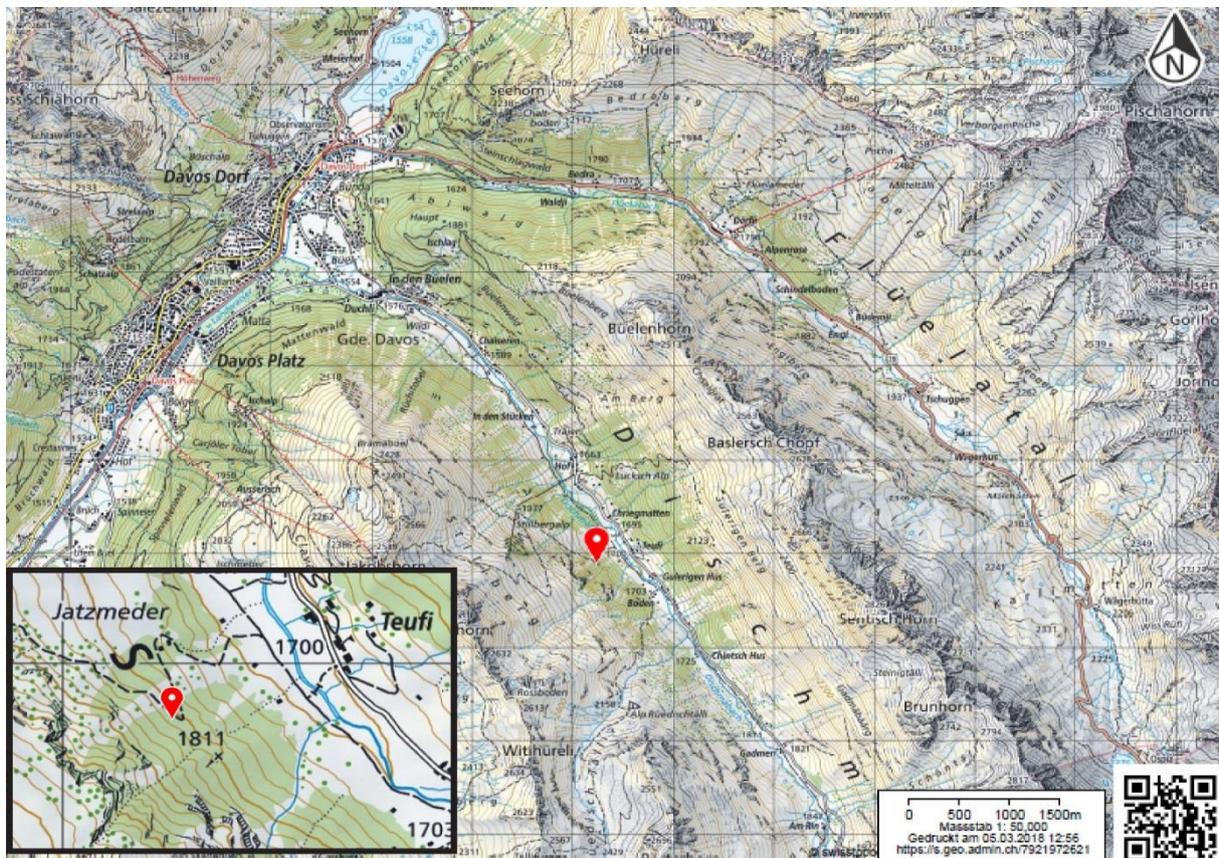


Abbildung 1: Topographische Karte von Davos sowie Flüela- und Dischma-Tal. Der rote Pfeil markiert die Lage des untersuchten Bestands (www.map.geo.admin.ch)

Jahresniederschlag von 1.060 mm und einer Jahresmitteltemperatur von 3,9° C beschrieben (Bebi 1999; SLF 2015). Geologisch ist das gesamte Tal der kristallinen Silvretta-Decke zuzurechnen (Streckeisen 1986).

Die untersuchte Fläche zieht sich bis fast zur Waldgrenze hinauf. Darüber grenzt eine offene, weitgehend baum- und strauchlose Landschaft an, die sich zum Jakobshorn hin bis auf eine Meereshöhe von gut 2.600 m erstreckt und als potentielles Lawinenanrissgebiet in Frage kommt. Am nordwestlichen Rand des Untersuchungsgebiets grenzt ein Lawinenzug an, wie in der Vergrößerung in Abbildung 1 links unten zu erkennen.

3.2. Bestand

Beim untersuchten Bestand handelt es sich um einen von der Gemeinen Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) dominierten Wald, der standortkundlich zu großen Teilen einem typischen Hochstauden-Fichtenwald (*Adenostylo alliariae-Piceetum typicum*) entspricht (Simmler 2017; vgl. Ott 1997). Stellenweise kommen aufgrund kleinräumiger Variabilität der Standortfaktoren auch Preiselbeer-Fichten-Waldgesellschaften (*Larici-Piceetum*) bzw. an feuchteren Abschnitten auch das wollreitgrasreiche *Homogyno-Piceetum calamagrostietosum villosae* vor. Neben der Fichte treten Lärche (*Larix decidua* Mill.), Vogelbeere (*Sorbus aucuparia* L.) und Zirbelkiefer bzw. Arve (*Pinus cembra* L.) als Begleitbaumarten auf.

Im Jahr 2015 wurde im Bestand auf einer Fläche von 0,9 ha ein Marteloskop eingerichtet (Bruciamacchi 2006; Pyttel et al. 2018). Sämtliche Bäume mit einem Brusthöhendurchmesser (BHD) von mehr als 7 cm innerhalb der Fläche wurden nummeriert und deren Höhe, BHD und genaue geographische Position vermessen sowie Grundfläche und Volumen berechnet. Insgesamt erfüllten 488 Bäume dieses Kriterium, von denen die Mehrheit Fichten sind, wie Tabelle 1 entnommen werden kann.

Tabelle 1: Bäume nach Baumarten im untersuchten Bestand

	Bäume gesamt	Fichte	Lärche	Vogelbeere	Arve
Anzahl	488	376	68	43	1
Prozent	100 %	77 %	14 %	9 %	0 %

Der Marteloskop-Bestand wartet mit einem außergewöhnlich großen Vorrat von hochgerechnet rd. 1.388 m³/ha bei einer Grundfläche von gut 100 m²/ha auf (Bebi und Krumm 2015). Hauptgrund dafür dürfte der äußerst geringe menschliche Einfluss sein - aufgrund der Steilheit und der schlechten Zugänglichkeit wurde der Bestand lt. Bebi (2018) mindestens seit Ende des Zweiten Weltkriegs kaum genutzt. Aber auch die Projektion der Hangneigung in die Ebene zur Berechnung des Volumens muss als Grund herangeführt werden (vgl. Simmler

2017). Fast der gesamte Vorrat wird von Fichte und Lärche gebildet. Die Begleitbaumarten Vogelbeere und Arve spielen hier eine verschwindend geringe Rolle (Abbildung 2). Die Durchmesser-Verteilung in der Abbildung deutet außerdem auf einen sehr heterogenen Bestand hin. Große BHD sind sehr stark vertreten, vor Allem solche von um die 70 cm.

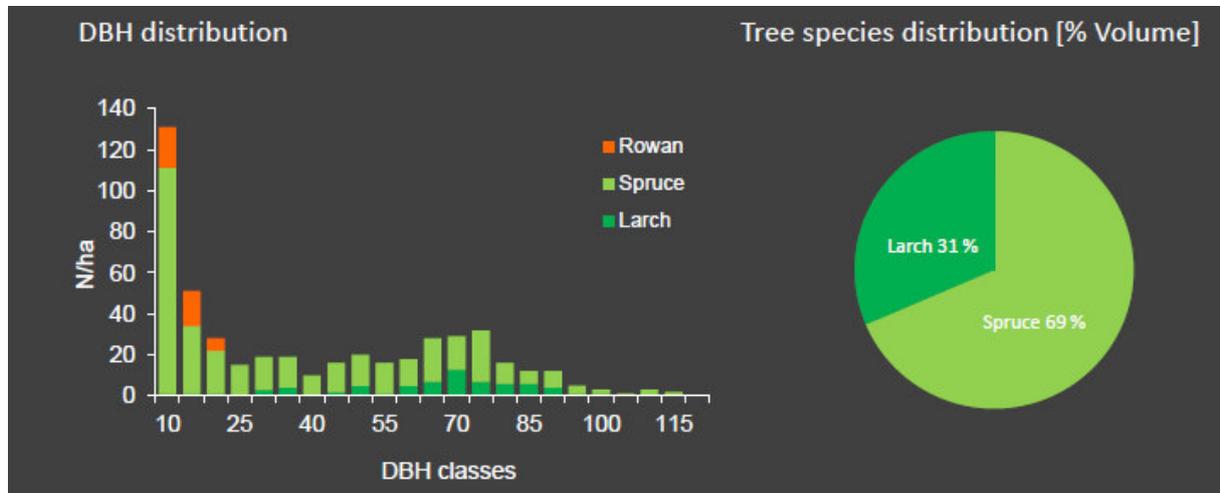


Abbildung 2: Durchmesser- und Volumenverteilung des untersuchten Bestands (aus: Bebi und Krumm o.J. [2015])

3.3. Untersuchungsbäume

Von sämtlichen kartierten Fichten und Lärchen der Marteloskop-Fläche wurde versucht, mithilfe eines Zuwachsbohrers einen Bohrkern zu entnehmen, um sowohl zeitlich als auch räumlich hochauflösende Wachstumsdaten des Bestandes zu erhalten. Vogelbeeren und Arve wurden nicht berücksichtigt, da Proben dieser Arten aufgrund ihrer holzanatomischen Eigenschaften im Allgemeinen deutlich schwerer zu vermessen sind. Außerdem wurde davon ausgegangen, dass der - hinsichtlich des vermutlich meist geringen Alters insbesondere der Vogelbeeren - begrenzte Mehrwert an Wachstumsdaten diesen zeitlichen Aufwand nicht rechtfertigt.

Von den 444 so untersuchten Bäumen konnten letztlich Daten von 318 Individuen vollständig verwendet werden und von weiteren 38 wenigstens teilweise. Von 37 dieser Bäume konnte aufgrund von Fäulnis kein vollständiger Bohrkern entnommen werden. Eine weitere Probe konnte nur teilweise analysiert werden, da sie sehr brüchig war und einzelne Bruchstücke fehlten oder die richtige Reihenfolge der Bruchstücke beim Aufkleben auf den Probenträger nicht rekonstruiert werden konnte. Von 88 Bäumen war es entweder nicht möglich, einen Bohrkern zu entnehmen, oder ein entnommener Bohrkern konnte nicht vermessen werden. Die Gründe hierfür sind in Tabelle 2 aufgelistet. Insgesamt liegen somit von rund 80 % aller untersuchten Bäume verwendbare Wachstumsdaten vor.

Tabelle 2: Gründe für nicht vorhandene Daten

	Probebäume ohne Daten	zu faul	nicht zugänglich	schlechtes Crossdating	zu brüchig	zu enge Jahrringe
Anzahl	88	41	3	11	20	13
Prozent	100 %	47 %	3 %	13 %	23 %	15 %

3.4. Feld- und Laborarbeit

3.4.1. Probenahme und -verarbeitung

Die vorliegende Arbeit entstand in Zusammenarbeit mit dem WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) in Davos, welches Wachstumsdaten von 112 der Bäume des Marteloskops aus der Arbeit von Simmler (2017) zur Verfügung gestellt hat. Von 31 weiteren Bäumen, die in Simmlers Arbeit beprobt wurden, liegen keine Daten vor.

Den weiteren 301 Fichten und Lärchen wurden wie oben beschrieben mithilfe eines Zuwachsbohrers soweit möglich ein Bohrkern je Baum entnommen. Die Bohrung wurde so weit unten am Stamm wie möglich und nicht auf größerer Höhe als 1,30 m durchgeführt. Bohrkern wurden stets an der hangzugeneigten Seite des Baums entnommen, um Druckholz zu vermeiden (Schweingruber 1983).

Die so erhaltenen Proben wurden vor Ort im Labor des SLF auf Probenträgern fixiert. 192 Proben wurden im Jahrringlabor der Universität Freiburg mit einer Ultrapräzisions-Diamantfräse für die weitere Analyse präpariert (Spiecker et al. 2000), von 157 davon konnten Daten in der Arbeit verwendet werden. 121 dieser Bohrkern wurden anschließend mit einem *Mikrotek* Flachbettscanner eingescannt und die Jahrringbreiten mithilfe der Software *WinDENDRO* vermessen (Regent Instruments 2017). Die Genauigkeit dieser Software beträgt 0,001 mm, die Daten wurden jedoch im Rahmen des Crossdatings (siehe unten) auf eine Genauigkeit von 0,01 mm gerundet. Für 36 weitere Proben wurden die Jahrringbreiten mit der Software *PAST4* in Verbindung mit dem Messtisch *VIAS TimeTable* mit einer Genauigkeit von 0,01 mm gemessen (SCIEM 2010; VIAS/SCIEM 2009).

Im Labor des SLF wurden 109 Bohrkern mit einem Bandschleifer mit steigender Körnung aufbereitet und die Jahrringbreiten mit der Software *TSAP-Win* in Verbindung mit dem *Lintab 5*-Messtisch ebenfalls mit einer Genauigkeit von 0,01 mm gemessen (RinnTech 2010). Daten von 86 dieser Proben konnten in der Arbeit verwendet werden.

Um sicherzustellen, dass mit diesen unterschiedlichen Vorgehensweisen die gleichen Ergebnisse erzielt werden, wurden jeweils 10 zufällig ausgewählte Proben mit einer jeweils anderen Methode gegengemessen. Eine Auflistung der unterschiedlichen Methoden je Probe ist Anhang 1 zu entnehmen.

3.4.2. Crossdating

Sämtliche Proben, die in Freiburg analysiert wurden, wurden visuellem Crossdating mithilfe von *PAST4* unterzogen. Für die in Davos prozessierten Proben wurde dies mit der *TSAP-Win*-Software durchgeführt. Als Referenzchronologien wurden für Fichte der Datensatz *SWIT179* und für Lärche *SWIT185* aus der *International Tree Ring Data Bank* (ITRDB) herangezogen (Bigler o.J.; Bigler und Meile o.J.).

Das visuelle Crossdating der Jahrringdaten wurde anschließend mithilfe des Computerprogramms *COFECHA* quantitativ überprüft (Holmes 1983). Hierbei handelt es sich um eine Software, mit deren Hilfe die Qualität und Genauigkeit der Messungen und des Crossdatings auf der Grundlage quantitativer statistischer Methoden evaluiert werden. Mögliche Fehler beim Crossdating können somit identifiziert werden. *COFECHA* unterteilt dafür sämtliche Jahrringserien in laufende Segmente und überprüft, ob das Segment an einer anderen Stelle der Master-Chronologie eine höhere Korrelation aufweist. Sollte dies der Fall sein, werden diese Segmente im Output des Programms markiert (Grissino-Mayer 2001). Relevante Teile dieses Outputs sind in Anhang 2 einzusehen.

Die insgesamt 297 Jahrringserien der so erhaltenen Chronologie für *P. abies* umfassen die Jahre 1703 bis 2017 und weisen einen Interserienkorrelationswert von 0,533 bei einer mittleren Sensitivität von 0,187 auf. Der Wert für das *expressed population signal* (EPS) beträgt 0,959. Der *COFECHA*-Output beinhaltet 156 markierte Segmente, die nach nochmaliger visueller Kontrolle als richtig datiert erachtet wurden. Die Chronologie für *L. decidua* besteht aus 59 Jahrringserien und umfasst die Jahre 1721 bis 2017. Der Wert für die Interserienkorrelation liegt bei 0,650 und für die mittlere Sensitivität bei 0,277. Der EPS-Wert beträgt 0,960. Der *COFECHA*-Output weist auch nach erneuter Überprüfung noch 16 markierte Segmente auf, die aber ebenfalls als richtig datiert eingestuft wurden.

3.5. Datenanalyse

3.5.1. Identifikation der Release-Effekte

Die so erhaltenen Wachstumsdaten des Bestandes wurden, wie einleitend erwähnt, auf plötzliche Wachstumsanstiege, sogenannte Release- oder Freistellungseffekte, untersucht. Für die Definition und Identifikation solcher Release-Effekte wurden in der Vergangenheit verschiedene Herangehensweisen entwickelt. Eine ehemals häufig angewendete Methode ist die sogenannte *radial-growth averaging technique*, die von Lorimer und Frelich (1989) vorgeschlagen und von Nowacki und Abrams (1997) verfeinert wurde. Hierfür werden über zehn Jahre gemittelte prozentuale Wachstumsveränderungen berechnet und Schwellenwerte eingeführt, bei deren Überschreiten das Vorliegen einer bedeutenden (*major release*) bzw. moderaten Freistellung (*moderate release*) unterstellt wird. Dies hat den Nachteil, dass für ein geringes Wachs-

tum vor einem möglichen Ereignis deutlich mehr Releases identifiziert werden als bei einem ohnehin schon großen Wachstum. Ursache hierfür ist, dass Bäume mit zuvor geringem Wachstum einen Schwellenwert von beispielsweise 100 % Wachstumssteigerung aus physiologischen Gründen vergleichsweise einfach überschreiten, während dies für Bäume, die im Durchschnitt ohnehin schon z.B. 4 mm pro Jahr wachsen, aus baumphysiologischer Sicht nahezu unmöglich ist (jedenfalls für die hier untersuchten Baumarten). Im Ergebnis werden Releases für langsam wachsende Bäume über- und für schnell wachsende Bäume unterschätzt (Black und Abrams 2003; Fraver und White 2005).

In dieser Arbeit wird daher die von Black und Abrams (2003) vorgeschlagene Boundary-Line-Methode herangeführt. Diese beruht darauf, die prozentualen Wachstumsveränderungen anhand ihrer zuvor berechneten baumphysiologisch maximal möglichen Reaktion auf eine Freistellung, die als namensgebende Boundary-Line dargestellt wird, zu skalieren. Die Schwellenwerte sind hier also keine feststehenden Werte, sondern werden abhängig vom vorherigen Wachstum definiert.

Dafür wurden zunächst für jeden vorliegenden Datenpunkt jeder Jahrringserie - mit Ausnahme der jeweils ersten und letzten zehn Jahre - Werte für die über zehn Jahre gemittelte prozentuale Wachstumsveränderung (*percent growth change, %GC*) nach Nowacki und Abrams (1997) berechnet, wie in Gleichung 1 dargestellt. M_1 stellt hierbei das durchschnittliche Wachstum des jeweiligen Jahres zuzüglich der vorangegangenen neun Jahre, M_2 das durchschnittliche Wachstum der folgenden zehn Jahre dar (vgl. Abbildung 3). Anschließend wurde das durchschnittliche Wachstum der vorhergehenden zehn Jahre als *prior growth* (PG) für jedes Jahr, mit Ausnahme der jeweils ersten zehn Jahre, ermittelt (vgl. ebenfalls Abbildung 3).

$$\%GC = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \quad (1)$$

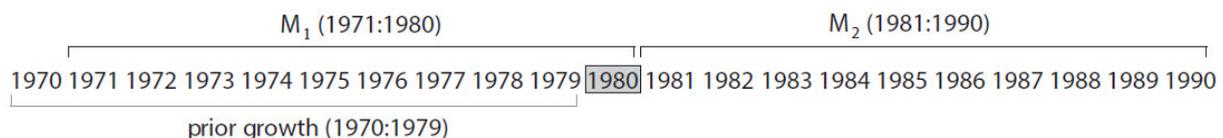


Abbildung 3: Grafische Darstellung der Bestandteile von Gleichung 1 zur Berechnung der prozentualen Wachstumsveränderung (nach: Black und Abrams 2004)

In einem sogenannten Scatter-Plot wurden die beiden Werte für jeden Datenpunkt gegeneinander aufgetragen. Die Daten wurden anschließend in 0,5 mm-Segmente vorherigen Wachstums (= PG) aufgeteilt und die jeweils zehn höchsten %GC-Werte jedes Segments herausgefiltert. Um die maximal mögliche Release-Response in der gesuchten Boundary-Line darzustellen, wurde ein Regressionsmodell ausschließlich an diese Punkte gefittet. Werte

kleiner als Null schieden hierbei aus, da eine negative Wachstumsveränderung keinesfalls ein Freistellungsereignis darstellen kann. Es wurden exponentielle, logarithmische und Potenzialmodelle gefittet, anhand ihres AIC, AICc und R^2 verglichen und dasjenige mit dem niedrigsten AIC und AICc bzw. dem höchsten R^2 als bester Fit ausgewählt (Akaike 1973; Sugiura 1978). Im Gegensatz zu Black und Abrams (2003) räumte der Autor der vorliegenden Arbeit dem AICc hierbei den höchsten Stellenwert ein, da der R^2 -Wert für nichtlineare Regressionen im statistischen Sinne nicht definiert ist und daher nur begrenzte Aussagekraft hat (Kvålseth 1985).

Da davon auszugehen ist, dass unterschiedliche Baumarten auch unterschiedlich auf Freistellungen reagieren, ist die Boundary-Line für jede Spezies separat zu berechnen. Weiterhin ist zu beachten, dass für die Definition dieser Boundary-Line ein ausreichend großer Datensatz zur Verfügung stehen sollte, der weit über den anschließend auf vorliegende Release-Effekte zu untersuchenden Bestand hinausgeht. Black und Abrams (2003) schlagen vor, eine einzige speziesweit und komplett unabhängig vom Standort gültige Boundary-Line zu definieren und somit möglichst viele Datensätze der jeweiligen Baumart ungeachtet deren Herkunft in die Berechnung mit einzubeziehen. Für die vorliegende Arbeit wurden für *P. abies* zusätzlich zu den 297 vorliegenden Jahrringserien des Marteloskop-Bestands 202 weitere Serien von 11 Standorten aus der ITRDB einbezogen. Für *L. decidua* wurden Daten der vorliegenden 59 Individuen um 86 Jahrringserien von sechs Standorten aus der ITRDB ergänzt. Für beide Baumarten wurde bei der Auswahl zusätzlicher Daten auf eine Herkunft ebenfalls aus den Schweizer Alpen und eine Höhenlage von mindestens 1.600 m geachtet, um der besonderen Situation nahe der Waldgrenze gerecht zu werden. Dieser Ansatz wird gestützt von der Tatsache, dass Szewczyk et al. (2011) grundlegend andere Ergebnisse für deren Boundary-Line für *P. abies* erhalten als Splechtna et al. (2005). Erstere errechnen in ihrer Arbeit gar unterschiedliche Boundary-Lines für zwei nicht gänzlich unähnliche Standorte, die beide in den westlichen Karpaten liegen. Welche Datensätze verwendet wurden, ist Anhang 3 zu entnehmen.

Die auf diese Art und Weise errechnete und in der vorliegenden Arbeit verwendete Boundary-Line für *P. abies* wird von der Gleichung $y = 519,89 \cdot x^{-0,29} - 336,18$ beschrieben, für diejenige für *L. decidua* gilt $y = 278,19 \cdot x^{-0,44} - 131,23$. Beide sind in Abbildung 4 zusammen mit Scatter-Plots sämtlicher in die Berechnung einbezogener Datenpunkte dargestellt.

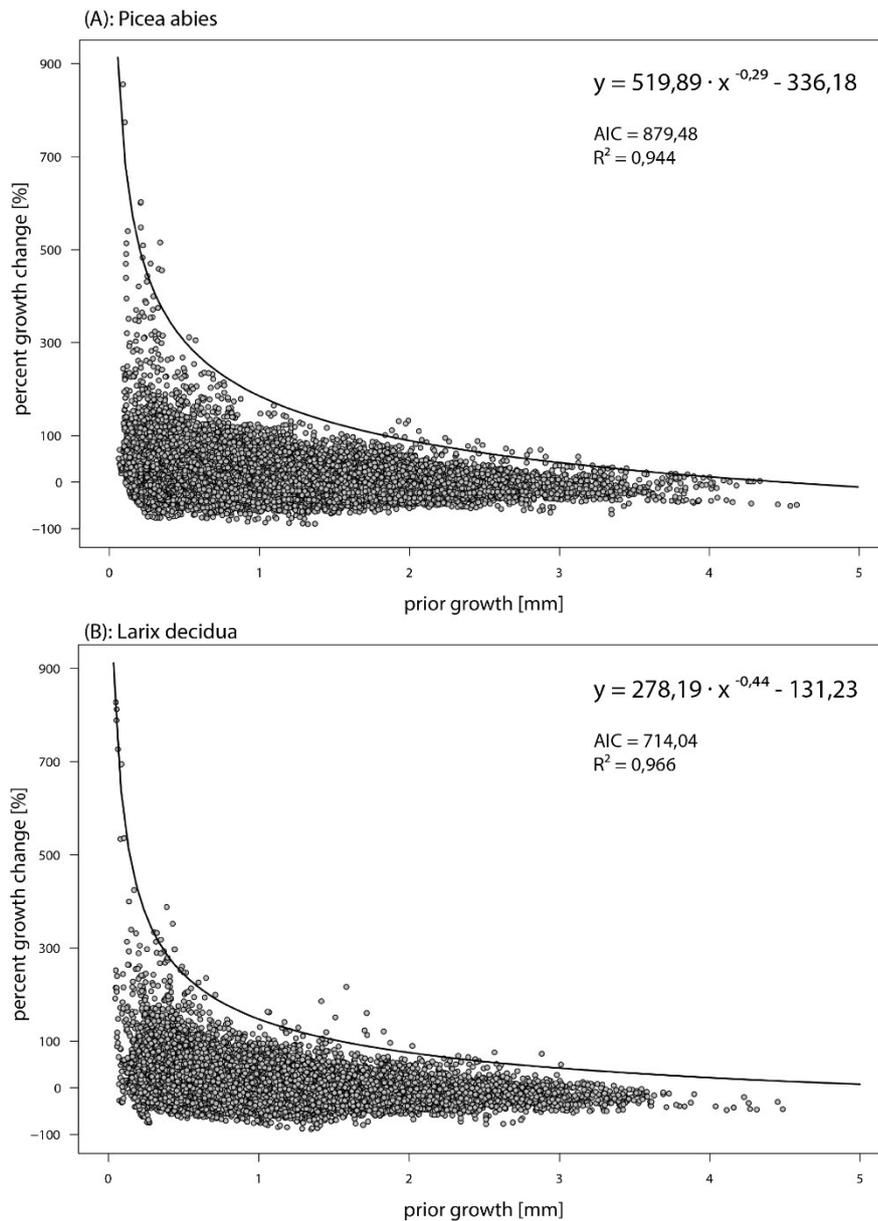


Abbildung 4: Boundary-Lines für (A) *P. abies* und (B) *L. decidua* sowie sämtliche in deren Berechnung einbezogene Datenpunkte

%GC-Werte von weniger als 10 % dabei ausgeschieden, da davon ausgegangen wird, dass bei einer solch geringen Wachstumsveränderung auch bei bereits großem Wachstum keinesfalls eine Freistellung vorliegen kann.

Die so isolierten Maxima werden anschließend ins Verhältnis zu ihrem jeweiligen Boundary-Line-Wert gesetzt, der vom vorherigen Wachstum abhängig ist. Werte von über 50 % werden von Black und Abrams (2003) als bedeutende Freistellung (*major release*) eingestuft, Werte zwischen 20 und 49,99 % als moderate Freistellung (*moderate release*). Sofern in dieser Arbeit von moderaten oder bedeutenden Freistellungen bzw. moderaten oder major Releases die Rede ist, beruht die Unterscheidung ebenfalls auf diesen Schwellenwerten.

In einem nächsten Schritt werden die Maxima der einzelnen Wachstumsimpulse in den %GC-Daten des zu untersuchenden Bestandes isoliert. Dieser Schritt ist notwendig, da die %GC-Werte laufende Mittelwerte sind und sich somit bei einer Änderung des Wachstums wellenartig zu einem Maximum oder Minimum auf- bzw. abschwängen. Für die Untersuchung nach Release-Effekten ist aber ausschließlich das jeweilige Maximum eines Wachstumsimpulses zu betrachten, nicht die Punkte davor und danach. Dem Ansatz von Black und Abrams (2003) folgend, wurden

Für sämtliche dieser Auswertungen wurde die Programmiersprache und -umgebung für statistische Datenverarbeitung *R* unter Zuhilfenahme des *dplr*-Paketes benutzt (R Core Team 2017; Bunn 2008).

3.5.2. BHD-Klassen

Für einige der weiterführenden Analysen wurden die Daten nach ihrem jeweiligen BHD zum betreffenden Zeitpunkt in Größenklassen eingeteilt. Um für jeden Datenpunkt einen errechneten BHD zu erhalten, wurden die Jahrringbreiten bis zum jeweiligen Zeitpunkt aufsummiert und verdoppelt (= JRB). Außerdem wurden Korrekturen für die Exzentrizität sowie für die Verfehlung des Marks vorgenommen. Hierfür wurde zunächst das Verhältnis der JRB im Jahr 2015 (das Jahr, in dem sämtliche tatsächlichen BHD vermessen wurden) zu den tatsächlichen BHD für alle Bäume, bei denen das Mark getroffen wurde, ermittelt (= ca. 1,18). Sämtliche JRB-Werte wurden somit um diesen Faktor korrigiert. Anschließend wurde ermittelt, wie groß die absolute Differenz dieses korrigierten JRB-Wertes im Jahr 2015 zum tatsächlichen BHD für jeden Baum, dessen Mark beim Beprobieren verfehlt wurde, ist. Dieser Wert wurde jeweils hinzugerechnet.

Grenzwerte für die Einteilung in BHD-Klassen wurden bei 20 cm und bei 40 cm gesetzt. Die Werte beruhen auf der Annahme, dass Bäume mit einem Durchmesser von weniger als 20 cm bei einer mittelgroßen Lawine umgebogen werden können, jedoch aufgrund ihrer Flexibilität meist nicht brechen (Kajimoto et al. 2004; Bebi et al. 2009). Bäume mit Durchmessern zwischen 20 und 40 cm weisen die größte Wahrscheinlichkeit auf, von einer solchen Lawine letal geschädigt zu werden. Bäume mit Durchmessern von mehr als 40 cm können kleinen bis mittelschweren Lawinenereignissen standhalten, bei großen Lawinen jedoch aufgrund der großen Angriffsfläche ebenfalls gebrochen oder entwurzelt werden (Johnson 1987; Bebi et al. 2009).

3.5.3. Visuelle Analysen

Um Häufungen von Freistellungseffekten in einzelnen Jahren und die Art eines möglicherweise vorliegenden Störungsereignisses besser deuten zu können, wurde für solche Ereignisjahre die räumliche Verteilung der Bäume, die Release-Responses zeigen, visuell analysiert. Hierfür konnte auf Daten über genaue geografische Positionen für sämtliche Probestämme zurückgegriffen werden, die im Rahmen der Marteloskop-Einrichtung aufgenommen wurden. Mithilfe der Software *ArcMap* aus dem *ArcGIS*-Paket der Firma *ESRI* wurden Karten erstellt, in denen alle Bäume der untersuchten Fläche mit der Intensität ihrer jeweiligen Release-Response sowie ihrer respektiven Größenklasse dargestellt sind.

3.5.4. Historisches Wissen über große Lawinenereignisse

Diversen Quellen wurden Überlieferungen und Aufzeichnungen über historische Lawinengroßereignisse in den Schweizer Alpen entnommen. Hierbei wurden insbesondere die Winter 1748/49, 1816/17, 1916/17, 1950/51, 1967/68 und 1998/99 als ausgeprägte Lawinenwinter identifiziert (Rohr 2015; Wiesinger und Adams 2007; Laternser und Ammann 2001; Brugnara et al. 2016). Besonders die Jahre 1951 und 1999 haben nachweislich auch im Dischma-Tal beträchtliche Schäden hinterlassen (Wiesinger und Adams 2007; Laternser und Ammann 2001). Persönlicher Kommunikation mit Peter Bebi (2018) - eines Mitarbeiters des SLF, dessen Familie aus dem Dischma-Tal stammt – zufolge wurden außerdem infolge der Lawinenereignisse im Jahr 1817 rund 50 Gebäude im damals noch spärlich besiedelten Tal beschädigt. Auch im Jahr 1968 sind zahlreiche Lawinenabgänge im Dischma-Tal bekannt (Bebi 2018). Genauere Aufzeichnungen bzw. Überlieferungen, inwieweit der untersuchte Bestand hiervon betroffen war, liegen nicht vor.

4. Ergebnisse

4.1. Identifizierte Freistellungen und deren zeitliche Verteilung

Insgesamt wurden in den 44.797 Datenpunkten 1.324 Maxima von Wachstumsimpulsen identifiziert, die einen %GC-Wert von 10 % oder mehr vorweisen und somit grundsätzlich als Release in Frage kommen. Davon entsprachen 599 Datenpunkte einem Wert von 20 % oder mehr in Relation zum jeweiligen Boundary-Line-Wert, sodass sie tatsächlich als Freistellung eingestuft wurden. 473 dieser Fälle stellen eine moderate Freistellung dar, 126 sind als bedeutende Freistellung zu betrachten. Von den insgesamt 599 Releases wurden 364 bei Bäumen der Spezies *P. abies* festgestellt, wovon 287 als moderate und 77 als major Releases einzustufen sind. Für *L. decidua* wurden 186 moderate und 49 bedeutende und somit insgesamt 235 Freistellungen identifiziert.

Wie sich diese Releases auf die Jahre 1713 bis 2007 verteilen, kann Abbildung 5 entnommen werden. Dargestellt ist für jedes Jahr der prozentuale Anteil der Bäume, bei denen ein moderater oder bedeutender Freistellungseffekt identifiziert wurde, im Verhältnis zur Größe der Stichprobe für das jeweilige Jahr. Zu beachten ist, dass ein gleicher prozentualer Anteil für zwei Jahre sehr unterschiedlichen absoluten Werten entsprechen kann, da die Größe der Stichprobe stark variiert und generell abnimmt, je weiter das entsprechende Jahr in der Vergangenheit liegt.

In 161 von 294 Jahren liegt mindestens eine Freistellung vor, in 59 davon auch mindestens ein major Release. In nur drei Jahren wurden bei mehr als 10 % aller jeweils beprobten Bäume Releases identifiziert und in nur zwei Jahren major Releases bei mehr als 5 % der Stichprobe.

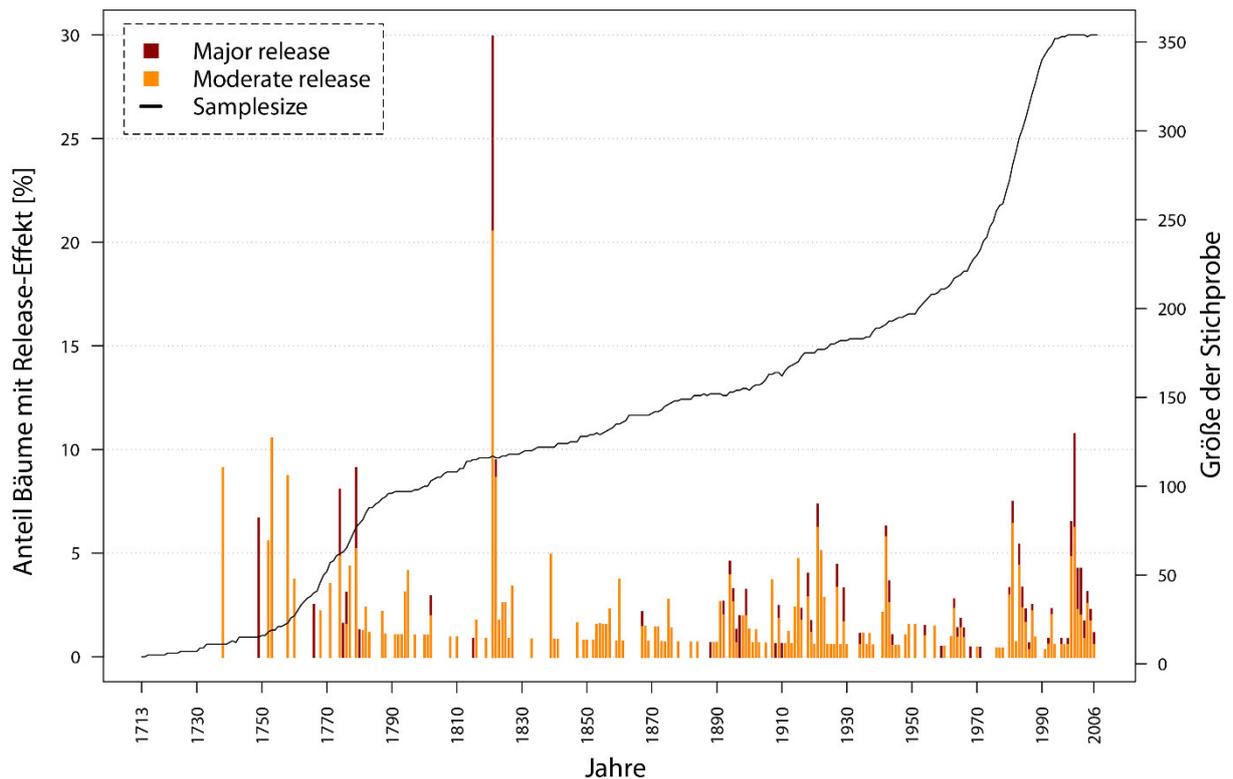


Abbildung 5: Prozentualer Anteil an Bäumen je Jahr, bei denen ein moderater (orange) bzw. bedeutender (rot) Freistellungseffekt identifiziert wurde. Die unterschiedliche Stichprobengröße (schwarze Linie) für jedes Jahr ist zu beachten.

Der höchste prozentuale Wert tritt im Jahr 1821 auf, wo 20,5 % aller 117 Bäume eine moderate Release-Response zeigen und bei weiteren 9,4 % gar eine bedeutende Freistellung vorliegt. Die größte absolute Zahl festgestellter Release-Effekte liegt im Jahr 2000 vor, wo 38 Bäume einen Freistellungseffekt zeigen. Bei einer Stichprobengröße von 354 entspricht das rund 10,7 %. 16 davon sind als bedeutend (4,5 %) und 22 als moderat (6,2 %) einzustufen. Auch im Jahr 1999 und den Folgejahren 2001 und 2002 sind leicht erhöhte Werte zu erkennen. In den Jahren 1749, 1774, 1779 und 2000 werden Werte für major Releases von jeweils mehr als 3 % erreicht. Eine gewisse Häufung sowohl von moderaten als auch bedeutenden Freistellungen tritt außerdem in den Jahren zwischen 1888 und 1930 sowie zwischen 1980 und 1989 auf, wo in fast jedem Jahr eine solche vorliegt. Dabei wird allerdings in keinem der Jahre ein besonders hoher Wert erreicht, insbesondere nicht für bedeutende Freistellungen.

Insgesamt ist also festzustellen, dass mit dem Jahr 1821 nur ein eindeutiges Störungsereignis identifiziert werden konnte. Angesichts der hohen absoluten Zahl an bedeutenden Freistellungen kommen auch die Jahre 1999/2000 für das Vorliegen eines Ereignisses in Frage. Das Jahr 1749 fällt wie oben beschrieben auf den ersten Blick ebenfalls ins Auge. Die Ursache dafür liegt jedoch hauptsächlich in der sehr kleinen Stichprobengröße von nur 15 Bäumen. Ein einzelner Baum ist hier für den recht hohen Anteil an Bäumen mit major Release verantwortlich, sodass dieses Jahr von einer weitergehenden Untersuchung ausscheidet, obwohl der

Winter 1748/49 als ausgesprochen starker Lawinenwinter überliefert ist. Ähnliches gilt für die Jahre 1774 und 1779, in denen absoluten Werte von nur zwei bzw. drei major Releases festgestellt wurden.

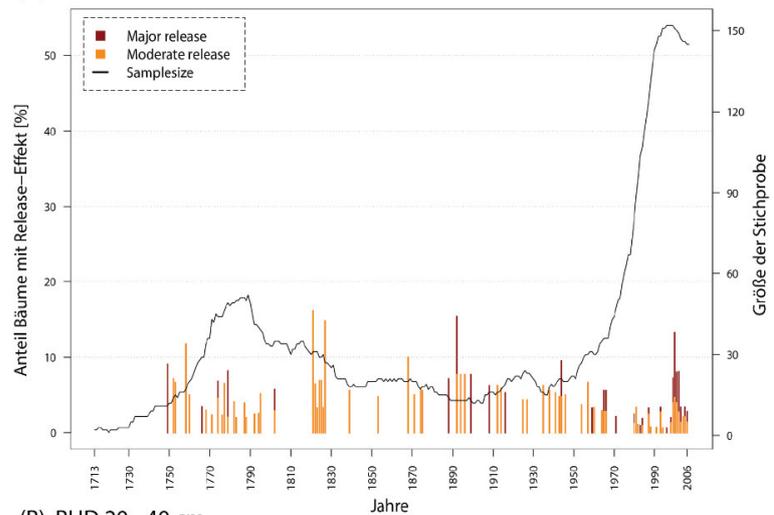
Auffällig ist, dass in der Folge des Winters 1950/51, des extremsten Lawinenwinters der vergangenen ca. 200 Jahre, nur einige wenige moderate Release-Effekte zu erkennen sind (Latenser und Ammann 2001). Ähnliches gilt für das Jahr 1968. Für beide Jahre ist bekannt, dass zahlreiche Lawinen im Dischma-Tal auftraten (Bebi 2018). Inwiefern der Bestand betroffen war ist jedoch wie erwähnt nicht überliefert.

4.2. Verteilung der Freistellungen nach Größenklassen

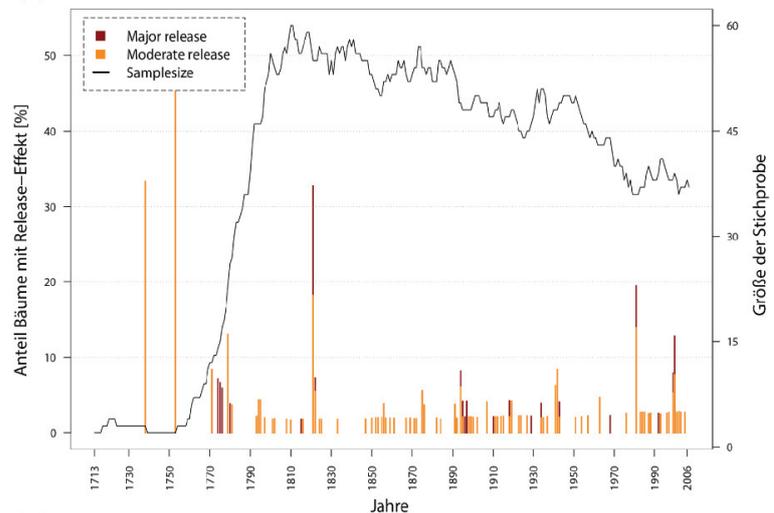
Die Verteilung der festgestellten Releases je Jahr auf die drei Größenklassen ist in Abbildung 6 dargestellt. Auch hier ist die stark variierende und sich je Größenklasse deutlich unterscheidende Stichprobengröße bei der Interpretation der Ergebnisse zu beachten.

Die Stichprobe für die kleinste Größenklasse umfasst für den Großteil der Jahre weniger als 30 Individuen. Grund hierfür dürfte in erster Linie sein, dass das Mark nur bei 16,9 % aller Proben getroffen wurde. Daher wurde bei

(A): BHD < 20 cm



(B): BHD 20 - 40 cm



(C): BHD > 40 cm

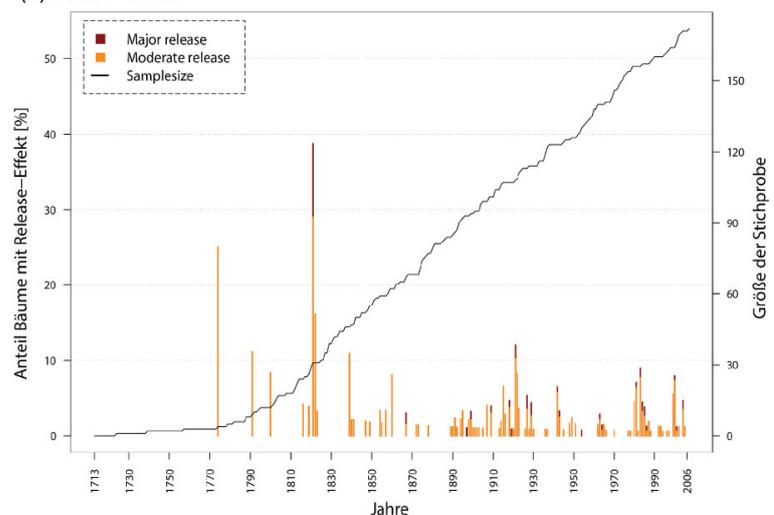


Abbildung 6: Prozentualer Anteil an Bäumen je Jahr, bei denen ein Release-Effekt festgestellt wurde, aufgeteilt nach Klassen für Bäume mit (A) BHD kleiner als 20 cm; (B) BHD zwischen 20 und 40 cm und (C) BHD größer 40 cm

der BHD-Korrektur für Markverfehlung (vgl. 3.5.2.) bei 296 Proben eine Hinzurechnung vorgenommen, was dazu führt, dass diese Bäume auch in den ersten Jahren, für die Wachstumsdaten vorliegen, bereits einen vergleichsweise großen BHD haben. Die Aussagekraft der Ergebnisse ist für diese Größenklasse somit leider stark eingeschränkt. Erkennbar ist jedoch ein geringerer Ausschlag für das Ereignis im Jahr 1821 als bei Bäumen mit einem BHD von mehr als 20 cm. Im Gegensatz zu den anderen Größenklassen werden hier auch in den Folgejahren bis 1827 noch einige moderate Releases festgestellt.

In der Klasse der Bäume mit einem BHD zwischen 20 und 40 cm fällt im Unterschied zu den in Abbildung 5 dargestellten Ergebnissen ein deutlicher Peak im Jahr 1981 auf, wo für 13,9 % aller Bäume dieser Größenklasse eine moderate und für 5,6 % eine bedeutende Freistellung identifiziert wurde. Bei den Bäumen der kleinsten Größenklasse sind im gleichen Jahr nur vereinzelte Releases erkennbar, gleichzeitig steigt die Zahl dieser Bäume jedoch stark an.

Für Bäume mit einem BHD von mehr als 40 cm ist ausschließlich für das Jahr 1821 ein hoher Anteil an Releases feststellbar. Auch im Jahr 1921 liegen für 12,0 % aller beprobten Bäume dieser Größenklasse Freistellungen vor, davon stellen jedoch nur 1,9 Prozentpunkte major Releases dar.

4.3. Visuelle Analysen potenzieller Störungsereignisse

Auf der Grundlage der dargestellten Ergebnisse wurden die möglichen Ereignisse in den Jahren 1821 und 1999 bzw. 2000 wie unter Punkt 3.5.3. geschildert weitergehend untersucht. Hierbei wurden die beiden letztgenannten zu einem Ereignis zusammengefasst, da in beiden Jahren vergleichsweise viele Freistellungen vorlagen und eine verzögerte Reaktion auf ein mögliches Ereignis bei einigen Individuen durchaus vorstellbar ist.

4.3.1. Ereignis 1821

Im Jahr 1821 wurden bei 11 von 117 Bäumen, für die im betreffenden Jahr Daten vorliegen, ein bedeutender und bei 24 weiteren ein moderater Freistellungseffekt festgestellt. Hiervon entfielen sämtliche bedeutenden Releases auf Vertreter

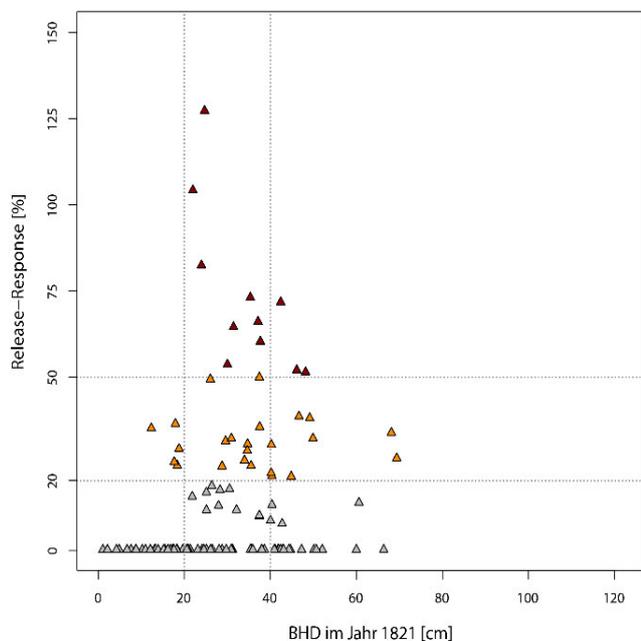


Abbildung 7: Abstufung der Release-Responses aller Bäume im Jahr 1821 nach Intensität in Abhängigkeit vom BHD. In gestrichelten Linien sind horizontal die Schwellenwerte für moderate bzw. major Releases und vertikal diejenigen für die Größenklassen dargestellt.

der Spezies *L. decidua*. Die moderaten Freistellungen verteilten sich annähernd gleichmäßig auf Fichten und Lärchen. In Abbildung 7 ist dargestellt, wie sich die Release-Responses sämtlicher Bäume nach deren Intensität in Abhängigkeit vom BHD verteilen. Hier wird deutlich, dass der Hauptteil der major Releases in der zweiten Größenklasse auftritt und kein einziger davon bei den kleinsten Bäumen. Auch moderate Releases sind bei diesen selten.

In Abbildung 8 sind sämtliche Bäume des Marteloskop-Bestands mit ihrer genauen Position vor dem Hintergrund einer topografischen Karte abgebildet. Die Bäume, für die Daten für das Jahr 1821 vorliegen, sind farblich abgestuft nach der Intensität ihrer jeweiligen Release-Response in diesem Jahr und als unterschiedlich große Kreise je nach Größenklasse (maßgebend ist der BHD im Jahr 1821) dargestellt. Bäume, die im betreffenden Jahr noch nicht vorhanden waren, sind in Form schwarzer Kreuze und die 88 Bäume, für die keine Jahrringdaten vorliegen, als graue Kreise abgebildet. Zu erkennen ist, dass ein Großteil der Bäume, die heute nahe des Lawinenzugs am nordwestlichen Rand der Fläche stehen, im Jahr 1821 noch nicht vorhanden waren. Bei einigen der höhergelegenen Bäume (im Bild links unten) handelt es sich um heute durchmesserstarke Lärchen. Da diese Baumart zur Regeneration auf günstige Lichtverhältnisse angewiesen ist, liegt der Schluss nahe, dass sich diese in der Folge eines

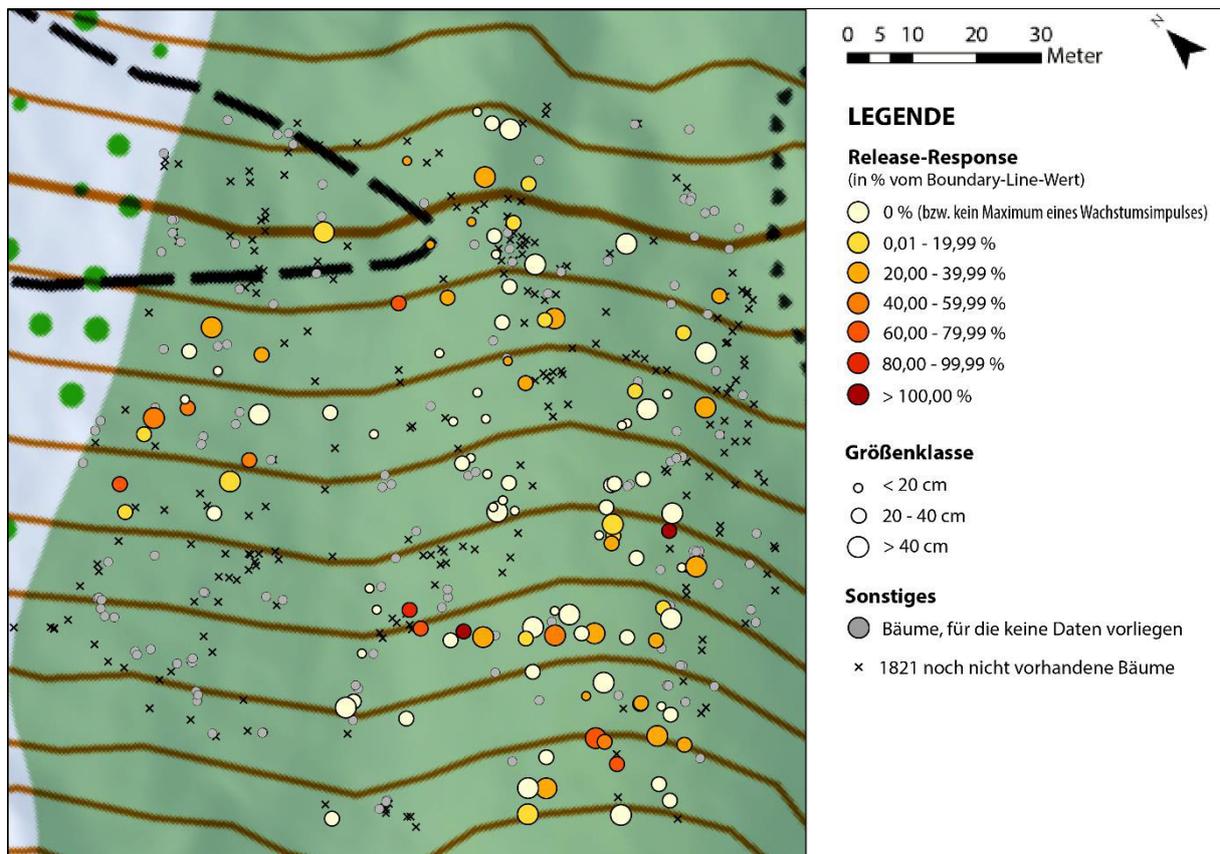


Abbildung 8: Räumliche Verteilung sämtlicher Bäume des heutigen Bestands. Bäume, für die Daten für das Jahr 1821 vorliegen, sind farblich abgestuft nach der Intensität ihrer jeweiligen Release-Response in diesem Jahr und als unterschiedlich große Kreise je nach Größenklasse (BHD im Jahr 1821) dargestellt. Abgebildet sind auch Bäume, für die keine Daten vorliegen (graue Kreise) sowie Bäume des heutigen Bestandes, die im Jahr 1821 noch nicht vorhanden waren (schwarze Kreuze). Die Bildoberseite ist tiefer am Hang gelegen, die Bildunterseite höher.

Störungsereignisses in entstandenen Freiräumen angesiedelt haben. Die Bäume, für die in diesem Bereich keine Daten vorliegen, sind hauptsächlich eher junge Vogelbeeren. Weiterhin fällt auf, dass sich starke Release-Effekte von über 40 % vornehmlich in der oberen Hälfte des Bestandes und hier insbesondere auf der südlichen Seite finden lassen (im Bild rechts unten). Nach unten hin scheinen die Release-Responses schwächer zu werden, obwohl auch im oberen Bereich einige Bäume angesiedelt sind, die auf keinerlei Freistellung schließen lassen.

4.3.2. Ereignis 1999/2000

In den Jahren 1999 und 2000 wurden bei zusammengenommen 61 der 356 vorhandenen Bäume, für die auch Daten vorliegen, Freistellungseffekte festgestellt, wovon 39 als moderat und 22 als bedeutend einzustufen sind. Lediglich sechs dieser Releases (fünf moderate und ein bedeutender) entfielen auf Lärchen, alle anderen auf Fichten. Abbildung 9 zeigt die Inten-

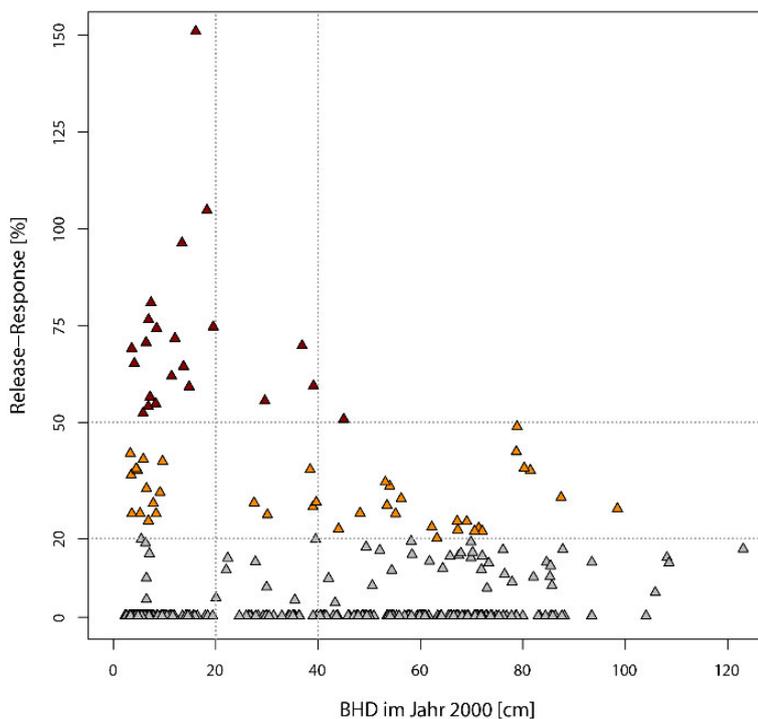


Abbildung 9: Intensität der Release-Responses in Abhängigkeit vom BHD für die Jahre 1999/2000 (vgl. Abbildung 7)

Abbildung 10 entnommen werden. Sowohl Bäume, die keine Freistellung anzeigen, als auch solche, bei denen hohe Werte für die Release-Response vorliegen, scheinen etwa gleichmäßig über die gesamte Fläche verteilt. Bei genauerer Betrachtung ist jedoch zu erkennen, dass fast alle Bäume mit Release-Responses von mehr als 60 % innerhalb eines im Bild senkrecht mittig verlaufenden, etwa 30 Meter breiten Streifens liegen.

sität der Release-Response sämtlicher Bäume für die besprochenen Jahre. Hierbei zeigt sich im Vergleich zu Abbildung 7 ein anderes, in Richtung kleinerer BHD verschobenes Bild. Während moderate Freistellungen bei allen BHD zu finden sind, lassen sich bedeutende fast ausschließlich bei den Bäumen der kleinsten Größenklasse nachweisen.

Die räumliche Verteilung der Freistellungseffekte in den Jahren 1999/2000 kann

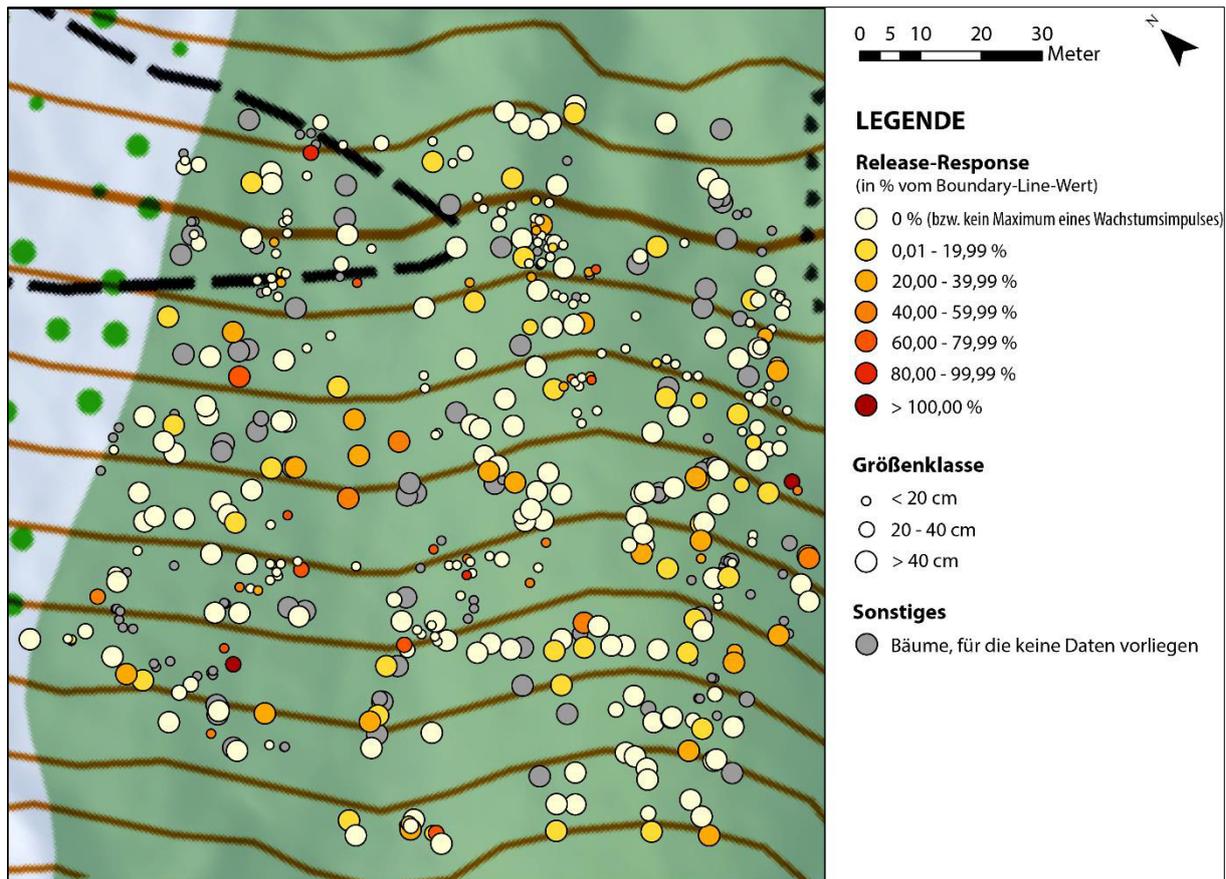


Abbildung 10: Räumliche Verteilung sämtlicher Bäume des heutigen Bestandes. Bäume, für die Daten vorliegen, sind farblich abgestuft nach der Intensität ihrer jeweiligen Release-Response in den Jahren 1999/2000 und als unterschiedlich große Kreise je nach Größenklasse (BHD im Jahr 2000) dargestellt. Bäume, für die keine Daten vorliegen, sind als unterschiedlich große graue Kreise nach Größenklasse (gemessener BHD im Jahr 2015) abgebildet.

5. Diskussion

5.1. Diskussion der Methoden

Bei der Interpretation dendroökologischer Daten ist grundsätzlich Vorsicht geboten, insbesondere, wenn Aussagen über die Zusammensetzung eines gesamten Bestandes in der Vergangenheit gemacht werden sollen. Zur Verfügung stehende Daten beruhen natürlicherweise stets auf zum Zeitpunkt der Probenahme noch lebenden bzw. vorhandenen Bäumen. Rückschlüsse auf die Struktur des Bestandes zu einem beliebigen Zeitpunkt in der Vergangenheit sind nur begrenzt möglich, da diese wohl auch maßgeblich von Bäumen beeinflusst wurde, die zwischen diesem Zeitpunkt und dem Zeitpunkt der Probennahme abgestorben sind oder entfernt wurden. Für die vorliegende Arbeit bedeutet dies vornehmlich, dass nicht nur die relative Häufigkeit auftretender Freistellungseffekte, sondern auch deren räumliche Verteilung ganz anders ausgesehen haben könnte als dargestellt, insbesondere im Jahr 1821.

In diesem Zusammenhang ist außerdem erneut darauf hinzuweisen, dass meist aufgrund von Fäulnis von annähernd 20 % aller heute vorhandenen Bäume keine verwendbaren Daten

vorliegen, was die Aussagekraft der erzielten Ergebnisse weiter einschränkt. Hauptsächlich durchmesserstarke und alte Bäume sind von starken Kernfäuleschäden betroffen, sodass Daten vor allem von Bäumen fehlen, die die Datentiefe voraussichtlich deutlich erhöht hätten (vgl. Gruber 1995).

Bei der Beurteilung der Ergebnisse dieser Arbeit ist weiterhin zu beachten, dass die Resultate stark von der Berechnung der Boundary-Line und damit davon abhängen, welche Daten für diese berücksichtigt werden. Wie unter 3.5.1. erläutert, wurde bei der Auswahl der Datensätze einiges Augenmerk auf die geografische Herkunft einschließlich der Höhenlage gelegt. Nicht berücksichtigt werden konnte, welche Art von Bäumen die ausgewählten Datensätze beinhalten, ob es sich also vornehmlich um durchmesserstarke oder -schwache Bäume handelt und welche soziale Position diese im jeweiligen Bestand innehaben. Je nachdem kann dies unterschiedliche Auswirkungen auf die Berechnung der Boundary-Line haben. Sollten beispielsweise ausschließlich dominante Bäume enthalten sein, die weniger starke Reaktionen auf Freistellungen zeigen dürften als (zuvor) unterdrückte Individuen, würde die Boundary-Line nicht die angestrebte baumphysiologisch maximal mögliche Release-Response anzeigen (Black und Abrams 2003). Leider liegen keine Informationen hierzu vor.

Außerdem muss bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden, dass die Schwellenwerte für moderate bzw. major Releases von Black und Abrams (2003) recht willkürlich gewählt wurden, obwohl sie das Ergebnis doch erheblich beeinflussen. Bei der Wahl des unteren Schwellenwertes für moderate Releases in Höhe von 20 % wurde beispielsweise darauf geachtet, langfristige klimatische Effekte zu eliminieren, jedoch ohne einen wissenschaftlichen Ansatz aufzuzeigen. Leider war es im Rahmen des Umfangs der vorliegenden Arbeit nicht möglich, geeignetere Indikatoren für die Festlegung der Schwellenwerte zu entwickeln, sodass diese unverändert übernommen wurden.

Wie unter 3.5.2. ausführlich erläutert, wurden die Größenklassen auf der Grundlage der aufsummierten, verdoppelten und um einen „Exzentrizitätsfaktor“ korrigierten Summen der Jahrringbreiten bis zum jeweiligen Jahr gebildet. Da hierbei ein einziger Faktor für sämtliche Bäume unabhängig von z.B. Alter und Spezies ermittelt wurde, kann der jeweilige Wert nur eine grobe Annäherung an den tatsächlichen BHD zum respektiven Zeitpunkt darstellen. Weiterhin ist wie unter 4.2. angesprochen zu beachten, dass aufgrund der Verfehlung des Marks bei der Probenahme außerdem für 296 der 356 Proben eine Hinzurechnung vorgenommen wurde. Auch diese beruht auf einer groben Abschätzung. Hinzu kommt, dass die Verfehlung des Marks und die darauffolgende Korrektur dazu beiträgt, dass für eine Vielzahl der beprobten Bäume Daten nur für Zeiträume vorliegen, zu denen diese schon einen recht

großen BHD haben und somit die Stichprobengröße für die kleinste Größenklasse meist sehr gering ist.

5.2. Diskussion der Ergebnisse

5.2.1. Ereignis 1821

In der Gesamtbetrachtung sämtlicher beschriebener Ergebnisse ist davon auszugehen, dass die Häufung festgestellter Freistellungen im Jahr 1821 ein Störungsereignis anzeigt. Hierfür spricht nicht nur der mit Abstand höchste festgestellte prozentuale Wert identifizierter Releases, sondern auch deren räumliche Verteilung. Höher am Hang gelegene Bäume zeigten tendenziell stärkere Release-Responses. Dies deutet auf ein hangabwärts verlaufendes und durch die Bewaldung abgeschwächtes Störungsereignis hin, wie es für eine Lawine zutrifft. Alternativ kommt ein größeres Sturmereignis in Frage, das höhergelegene Bäume ebenfalls stärker betrifft als solche, die weiter unten am Hang und damit geschützter stehen. Dagegen spricht allerdings, dass das Dischma-Tal insgesamt und die untersuchte Fläche im Besonderen durch ihre Exposition gut geschützt vor großen Stürmen liegen, die meist aus westlicher Richtung heranziehen (Schmidtke und Scherrer 1997).

Trotz der in Abbildung 7 dargestellten Feststellung, dass sich die im Jahr 1821 identifizierten bedeutenden Freistellungen vornehmlich auf die mittlere Größenklasse verteilen, die wie unter 3.5.2. beschrieben eigentlich als diejenige eingestuft wurde, die von einer Lawine eher geschädigt als gefördert werden sollte, wird also davon ausgegangen, dass hier ein Lawinenereignis vorliegt. Namentlich wird angenommen, dass sich hier die Folgen des historisch dokumentierten Lawinenwinters 1816/17 zeigen (vgl. 3.5.4.). Worauf jedoch der zeitliche Versatz zwischen dem mutmaßlichen Störungsereignis und den festgestellten Freistellungseffekten beruht, kann nicht endgültig geklärt werden. Vor dem Hintergrund der extremen klimatischen Konstellation infolge des Vulkanausbruchs des Tambora in Indonesien, der 1816 ein „Jahr ohne Sommer“ herbeiführte, sind Ursache hierfür möglicherweise längerfristige Schäden, von denen sich die betreffenden Bäume erst langsam erholen konnten und deshalb verspätet das Maximum des auf die Freistellung folgenden Wachstumsschubs erreichten.

5.2.2. Ereignis 1999/2000

Die Häufung festgestellter Release-Effekte in den Jahren 1999 und 2000 ist erheblich schwerer zu deuten. Die Verteilung dieser Freistellungen räumlich über große Teile der Fläche und zeitlich über mehrere Jahre (auch in den Jahren 2001 und 2002 sind speziell in der kleinsten Größenklasse noch einige Releases zu erkennen) spricht eher gegen das Vorliegen eines Störungsereignisses. Die Tatsache, dass major Releases hauptsächlich die Klasse der Bäume

mit BHD unter 20 cm betreffen, deutet jedoch darauf hin, dass diese tatsächlich freigestellt wurden.

Aufgrund der großen räumlichen Verteilung der Freistellungen ist auch hier an ein Windwurfereignis zu denken. Der Orkan Lothar im Dezember 1999 jedoch erreichte den Kanton Graubünden und damit auch das Dischma-Tal nachweislich nicht (Ammann et al. 2001). Auch klimatische Effekte sind als Ursache für das Vorliegen der festgestellten Releases nicht ausgeschlossen. Jedoch sind sich die mittleren Werte für Temperatur und Niederschlag der beiden relevanten Zehnjahresperioden (M_1 und M_2 in Gleichung 1 bzw. Abbildung 3) mit 3,7 bzw. 3,9° C und 1.044 bzw. 1.076 mm sehr ähnlich (SLF 2015), sodass hierdurch keine major Releases identifiziert werden sollten.

Zwar ist bekannt, dass auch der Winter 1999 ein ausgeprägter Lawinenwinter war, ob dies aber auch die Marteloskop-Fläche betraf, ist nicht zweifelsfrei festgehalten. Aus Wiesinger und Adams (2007) lässt sich ableiten, dass am 12.02.1999 eine große Staublawine vom Jakobshorn über den beschriebenen Lawinenzug am nordwestlichen Rand der Fläche abging, die jedoch nur kleine Äste mitführte. Auch ist im Bestand heute auffällig wenig Totholz vorhanden, sodass nicht davon auszugehen ist, dass viele Bäume einer eventuellen Lawine zum Opfer fielen. Denkbar ist hingegen, dass ein Ausläufer der Lawine auch durch das Bachbett verlief, das etwa in der Mitte des unter 4.3.2. angesprochenen Streifens liegt, und dort einige Bäume entastete und so das Kronendach öffnete.

Unter Einbeziehung aller genannten Punkte ist somit davon auszugehen, dass auch hier die Folgen eines Lawinenereignisses zu Freistellungen insbesondere der kleineren Bäume geführt haben, wenn auch weniger ausgeprägt als im Jahr 1821.

5.2.3. Nicht identifizierte Ereignisse

Außer den Jahren 1817 und 1999 sind auch für die Winter 1916/17, 1950/51 und 1967/68 zahlreiche große Lawinenabgänge dokumentiert (vgl. 3.5.4.). Wie unter 4.1. ausgeführt, wurden für diese und die jeweils folgenden Jahre nur vereinzelte moderate Releases festgestellt. Die Gründe hierfür sind nicht abschließend aufzuklären. Einerseits besteht die Möglichkeit, dass die genannten Ereignisse schlicht die untersuchte Fläche nicht betrafen, andererseits kann genauso wenig ausgeschlossen werden, dass die Methode diese Ereignisse nicht identifizieren konnte. Angesichts der Tatsache, dass gerade für das Jahr 1951 keinerlei bedeutende Freistellungen auftreten (vgl. 4.1.), scheint ersteres hier wahrscheinlicher.

6. Fazit

Insgesamt konnten mithilfe der Identifikation von Release-Effekten anhand der Boundary-Line-Methode in der vorliegenden Arbeit zwei größere Lawinenereignisse rekonstruiert werden. Dass es in der Vergangenheit weitere schwere, den Bestand beeinflussende Lawinenabgänge gab, die von der Methode nicht gefunden werden konnten, scheint wie zuvor geschildert nicht ausgeschlossen, aber unwahrscheinlich. Grundsätzlich kann also angenommen werden, dass die Methode durchaus geeignet ist, vergangene größere Lawinenereignisse in einem Waldbestand zu identifizieren.

Um diese Identifikation aber zu verfeinern, wäre es hilfreich, nicht nur Release-Effekte, sondern auch Bäume mit sog. *rapid early growth* zu untersuchen. Dabei handelt es sich um eine von Lorimer et al. (1988) entwickelte Methode, die die Wahrscheinlichkeit angibt, dass Bäume in einer Lücke im Kronendach, die möglicherweise aufgrund eines Störungsereignisses entstanden ist, aufgewachsen sind. Überdies beschränkt sich die vorliegende Arbeit auf die Untersuchung der wachstumsfördernden Effekte eines Störungsereignisses auf Bäume, die die Störung unbeschadet überstanden haben. Eine Untersuchung auf Anzeichen für beschädigte Bäume in Form wachstumshemmender Effekte in den betreffenden Jahren könnte sich auf die Interpretation der Ergebnisse außerdem positiv auswirken.

Ob die Betrachtung bestimmter Durchmesser-Klassen förderlich ist, Lawinenereignisse besser identifizieren zu können, scheint auf der Grundlage der hier präsentierten Ergebnisse fraglich. Um genauere Aussagen hierüber treffen zu können, müsste jedoch die Genauigkeit der errechneten BHD-Werte für vergangene Jahre evaluiert und eventuell ausgewogenere Korrekturmethode hierfür herangezogen werden.

7. Literaturverzeichnis

- Akaike, Hirotugu (1973): Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. In: *2nd International Symposium on Information Theory, Tsahkadsor, Armenia, USSR, September 2-8, 1971*.
- Ammann, Walter J.; Bründl, Michael; Niemeyer, Stefan; Stöckli, Veronika (2001): Ereignisanalyse Orkan Lothar in der Schweiz: Eine vorläufige Bilanz. In: *Erstes Forum Katastrophenvorsorge "Extreme Naturereignisse und Vulnerabilität"*. Hg. v. Johann Georg Goldammer. Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge. Bonn.
- Bebi, Peter (1999): Erfassung von Strukturen im Gebirgswald als Beurteilungsgrundlage ausgewählter Waldwirkungen. Dissertation ETH Zürich Nr. 13192.
- Bebi, Peter (2018), März 2018. Persönliche Mitteilung.
- Bebi, Peter; Krumm, Frank (2015): Technical information on marteloscope Dischma. Hg. v. Integrate+ Marteloscopes. Online verfügbar unter <http://www.integrateplus.org/uploads/demo-sites/Info-sheet-Dischma.pdf>, zuletzt geprüft am 20.02.2018.
- Bebi, Peter; Kulakowski, Dominik; Rixen, Christian (2009): Snow avalanche disturbances in forest ecosystems - State of research and implications for management. In: *Forest Ecology and Management* 257 (9), S. 1883–1892.
- Bigler, Christof (o.J.): Davos GR Sertig - PCAB - ITRDB SWIT179. Online verfügbar unter <https://www.ncdc.noaa.gov/paleo/study/2737>, zuletzt geprüft am 06.03.2018.
- Bigler, Christof; Meile, Claudia (o.J.): Bergün GR Val Tuors - LADE - ITRDB SWIT185. Online verfügbar unter <https://www.ncdc.noaa.gov/paleo-search/study/6118>, zuletzt geprüft am 06.03.2018.
- Black, Bryan A.; Abrams, Marc D. (2003): Use of boundary-line growth patterns as a basis for dendroecological release criteria. In: *Ecological Applications* 13 (6), S. 1733–1749.
- Black, Bryan A.; Abrams, Marc D. (2004): Development and application of boundary-line release criteria. In: *Dendrochronologia* 22 (1), S. 31–42.
- Brändli, Urs-Beat (Hg.) (2010): Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004 - 2006. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. Bern.
- Brang, Peter; Schönenberger, Walter; Frehner, Monika; Schwitter, Raphael; Thormann, Jean-Jacques; Wasser, Berchthold (2006): Management of protection forests in the European Alps: an overview. In: *Forest Snow and Landscape Research* 80 (1), S. 23–44.

- Bruciamacchi, M. (2006): Le marteloscope, un outil pour apprendre la gestion durable-exemple d'évaluation de différents scénarios au marteloscope de Zittersheim (Vosges du Nord). In: Bois mort et à cavités – une clé pour des forêts vivantes. Hg. v. D. Valauri, J. André, B. Dodelin, R. Eynard Machet und D. Rambaud. Paris: Lavoisier.
- Brugnara, Yuri; Brönnimann, Stefan; Zamuriano, Marcelo; Schild, Jonas; Rohr, Christian; Segesser, Daniel Marc (2016): Dezember 1916. Weißer Tod im Ersten Weltkrieg. Bern: Geographica Bernensia.
- Bunn, Andrew G. (2008): A dendrochronology program library in R (dplR). In: *Dendrochronologia* 26 (2), S. 115–124.
- BUWAL/WSL (2005): Waldbericht 2005. Zahlen und Fakten zum Zustand des Schweizer Waldes. Hg. v. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) und Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL). Bern/Birmensdorf.
- Fraver, Shawn; White, Alan S. (2005): Identifying growth releases in dendrochronological studies of forest disturbance. In: *Canadian Journal of Forest Research* 35 (7), S. 1648–1656.
- Frehner, Monika; Wasser, Brächt; Schwitter, Raphael (2005): Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Hg. v. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Bern.
- Fuchs, S.; Bründl, M.; Stötter, J. (2004): Development of avalanche risk between 1950 and 2000 in the Municipality of Davos, Switzerland. In: *Natural Hazards and Earth System Science* 4 (2), S. 263–275.
- Grêt-Regamey, Adrienne; Bebi, Peter; Bishop, Ian D.; Schmid, Willy A. (2008): Linking GIS-based models to value ecosystem services in an Alpine region. In: *Journal of environmental management* 89 (3), S. 197–208.
- Grissino-Mayer, Henri D. (2001): Evaluating Crossdating Accuracy. A Manual and Tutorial for the Computer Program COFECHA. In: *Tree-Ring Research* 57 (2), S. 205–221.
- Gruber, Dominik (1995): Die Kernfäuleschäden an Fichte (*Picea abies* Karst.) in der Schweiz nördlich der Alpen: Untersuchungen über das Schadenausmass, die ökologischen, waldbaulichen und mykologischen Einflussfaktoren sowie die ökonomischen Auswirkungen. Dissertation ETH Zürich Nr. 11297.
- Holmes, Richard L. (1983): Computer-Assisted Quality Control in Tree-Ring Dating and Measurement. In: *Tree-Ring Bulletin* 43, S. 51–67.

- Johnson, E. A. (1987): The relative importance of snow avalanche disturbance and thinning on canopy plant populations. In: *Ecology* 68 (1), S. 43–53.
- Kajimoto, Takuya; Daimaru, Hiromu; Okamoto, Toru; Otani, Tatsuya; Onodera, Hiromichi (2004): Effects of snow avalanche disturbance on regeneration of subalpine *Abies mariesii* forest, Northern Japan. In: *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 36 (4), S. 436–445.
- Kulakowski, Dominik; Seidl, Rupert; Holeksa, Jan; Kuuluvainen, Timo; Nagel, Thomas; Panayotov, Momchil et al. (2017): A walk on the wild side. Disturbance dynamics and the conservation and management of European mountain forest ecosystems. In: *Forest Ecology and Management* 388, S. 120–131.
- Kvålseth, Tarald O. (1985): Cautionary note about R2. In: *The American Statistician* 39 (4), S. 279–285.
- Latenser, Martin; Ammann, Walter J. (2001): Der Lawinenwinter 1951. In: *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 152 (1), S. 25–35.
- Leibundgut, Hans (1985): Der Wald in der Kulturlandschaft. Bedeutung, Funktion und Wirkungen des Waldes auf die Umwelt des Menschen. Bern: Haupt.
- Lorimer, Craig G.; Frelich, Lee E. (1989): A methodology for estimating canopy disturbance frequency and intensity in dense temperate forests. In: *Canadian Journal of Forest Research* 19, S. 651–663.
- Lorimer, Craig G.; Frelich, Lee E.; Nordheim, Erik V. (1988): Estimating gap origin probabilities for canopy trees. In: *Ecology* 69 (3), S. 778–785.
- Nowacki, Gregory J.; Abrams, Marc D. (1997): Radial-growth averaging criteria for reconstructing disturbance histories from presettlement-origin oaks. In: *Ecological Monographs* 67 (2), S. 225–249.
- Ott, Ernst (1997): Gebirgsnadelwälder. Ein praxisorientierter Leitfaden für eine standortgerechte Waldbehandlung. Bern: Haupt.
- Pyttel, Patrick; Kraus, Daniel; Schuck, Andreas; Krumm, Frank; Bauhus, Jürgen (2018): Mit "Marteloskopien" lehren und lernen. In: *AFZ-DerWald* (4), S. 26–29.
- R Core Team (2017): R. A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Wien. Online verfügbar unter <https://www.R-project.org/>.
- Regent Instruments (2017): WinDENDRO. An image analysis system for tree-ring analysis.
- RinnTech (2010): TSAP-WIN: Time Series Analysis and Presentation Dendrochronology and Related Applications. Heidelberg.

- Rohr, Christian (2015): Leben mit dem "Weissen Tod". Zum Umgang mit Lawinen in Graubünden seit der Frühen Neuzeit. In: *Bündner Kalender* 174, S. 52–59.
- Schmidtke, Hubertus; Scherrer, Hans-Ulrich (1997): Sturmschäden im Wald. Projektschlussbericht im Rahmen des nationalen Forschungsprogrammes "Klimaänderungen und Naturkatastrophen", NFP 31. Zürich: vdf Hochschul-Verlag an der ETH.
- Schweingruber, Fritz Hans (1983): Der Jahrring. Standort, Methodik, Zeit und Klima in der Dendrochronologie. Bern: Haupt.
- SCIEM (2010): PAST4. Wien.
- Simmler, Kevin (2017): Dendrochronological study of the structure and dynamics in a subalpine spruce-larch-stand in Davos (Switzerland). Bachelor-Arbeit ETH Zürich.
- SLF (2015): Klimadaten Stillberg, Davos (unveröffentlicht).
- Spiecker, Heinrich; Schinker, Martin; Hansen, Jörg; Park, Young-In; Ebding, Tilmann; Döll, Walter (2000): Cell structure in tree rings: novel methods for preparation and image analysis of large cross sections. In: *IAWA Journal* 21 (3), S. 361–373.
- Splechtna, Bernhard E.; Gratzner, Georg; Black, Bryan A. (2005): Disturbance history of a European old-growth mixed-species forest – A spatial dendro-ecological analysis. In: *Journal of Vegetation Science* 16 (5), S. 511–522.
- Streckeisen, Albert (1986): Überblick über die Geologie der Landschaft Davos. In: *Bulletin der Vereinigung Schweiz. Petroleum-Geologen und -Ingenieure* 52 (123), S. 9–16.
- Sugiura, Nariaki (1978): Further analysis of the data by akaike's information criterion and the finite corrections. In: *Communications in Statistics - Theory and Methods* 7 (1), S. 13–26.
- Szewczyk, Janusz; Szwagrzyk, Jerzy; Muter, Elżbieta (2011): Tree growth and disturbance dynamics in old-growth subalpine spruce forests of the Western Carpathians. In: *Canadian Journal of Forest Research* 41 (5), S. 938–944.
- VIAS/SCIEM (2009): TimeTable measuring device. Wien.
- Wiesinger, Thomas; Adams, Marc (2007): Schnee und Lawinen in den Schweizer Alpen. Winter 1998/1999. Wetter, Schneedecke und Lawinengefahr. Winterbericht SLF. Hg. v. Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF. Davos.

8. Anhang

Anhang 1: Präparation und Vermessung der Proben – Übersicht

TreeID	Präparation		Jahrringbreitenmessung			Crossdating	
	Bandschleifer	Ultrafräse	TSAP-Win	PAST4	WinDendro	TSAP-Win	PAST4
2	x		x			x	
3	x		x			x	
12	x		x	x		x	
14	x		x			x	
15	x		x			x	
17	x		x			x	
18	x		x	x		x	
19	x		x			x	
21	x		x			x	
22	x		x			x	
23	x		x			x	
24	x		x			x	
25	x		x			x	
26	x		x			x	
27	x		x			x	
28	x		x			x	
30	x		x			x	
31	x		x			x	
32	x		x			x	
33	x		x			x	
34	x		x			x	
35	x		x			x	
36	x		x			x	
37	x		x			x	
38	x		x			x	
39	x		x			x	
40	x		x			x	
41	x		x			x	
42	x		x			x	
45	x		x			x	
46	x		x			x	
48	x		x			x	
49	x		x			x	
50	x		x			x	
51	x		x			x	
52	x		x			x	
53	x		x			x	
55	x		x			x	
56	x		x			x	
57	x		x			x	
58	x		x			x	
60	x		x			x	
61	x		x			x	
63	x		x			x	
64	x		x			x	
65	x		x			x	
66	x		x			x	
67	x		x			x	

TreeID	Präparation		Jahringbreitenmessung			Crossdating	
	Bandschleifer	Ultrafräse	TSAP-Win	PAST4	WinDendro	TSAP-Win	PAST4
68	x		x			x	
69	x		x			x	
70	x		x			x	
71	x		x			x	
75	x		x			x	
76	x		x			x	
77	x		x			x	
80	x		x			x	
81	x		x			x	
82	x		x			x	
83	x		x			x	
84	x		x			x	
85	x		x			x	
86	x		x			x	
87	x		x			x	
88	x		x			x	
89	x		x			x	
90	x		x			x	
91	x		x			x	
92	x		x			x	
93	x		x			x	
95	x		x			x	
96	x		x			x	
97		x			x		x
98		x			x		x
100		x	x		x		x
102		x			x		x
105	x		x			x	
109	x		x			x	
111		x			x		x
112		x			x		x
114		x			x		x
115		x			x		x
116	x		x			x	
118	x		x			x	
119	x		x			x	
120		x			x		x
121		x			x		x
123	x		x			x	
124		x		x	x		x
125	x		x			x	
126		x			x		x
128		x			x		x
129		x			x		x
130		x			x		x
131	x		x			x	
132	x		x			x	
134		x	x	x			x

TreeID	Präparation		Jahrringbreitenmessung			Crossdating	
	Bandschleifer	Ultrafräse	TSAP-Win	PAST4	WinDendro	TSAP-Win	PAST4
135	x		x			x	
137	x		x			x	
138		x			x		x
139		x		x	x		x
140		x		x			x
141	x		x	x		x	
145		x		x			x
146	x		x			x	
148		x			x		x
151		x		x	x		x
152	x		x			x	
154		x			x		x
155		x			x		x
156		x			x		x
157	x		x			x	
158		x			x		x
159	x		x	x		x	
160	x		x			x	
161		x			x		x
162	x		x			x	
163	x		x			x	
164	x		x			x	
165	x		x			x	
166	x		x			x	
167	x		x			x	
169	x		x			x	
170	x		x			x	
171		x		x			x
173		x			x		x
174		x			x		x
175		x		x			x
176	x		x			x	
177		x			x		x
178		x			x		x
180	x		x			x	
181		x	x		x		x
182		x			x		x
183		x	x		x		x
184		x			x		x
185		x			x		x
186	x		x			x	
187		x			x		x
188	x		x	x		x	
189	x		x			x	
190		x			x		x
191		x			x		x
192		x			x		x
194		x			x		x

TreeID	Präparation		Jahringbreitenmessung			Crossdating	
	Bandschleifer	Ultrafräse	TSAP-Win	PAST4	WinDendro	TSAP-Win	PAST4
195		X			X		X
196		X			X		X
197		X			X		X
198		X		X	X		X
199		X			X		X
200		X			X		X
202		X			X		X
203		X			X		X
205		X		X			X
206		X			X		X
207	X		X			X	
208	X		X	X		X	
209		X			X		X
210		X			X		X
211		X			X		X
213		X			X		X
214		X			X		X
215		X		X	X		X
216		X			X		X
217		X		X			X
219	X		X			X	
220		X			X		X
221		X			X		X
222		X			X		X
224	X		X			X	
225		X			X		X
226		X		X			X
227	X		X			X	
228	X		X			X	
229	X		X			X	
230		X		X			X
232		X			X		X
233	X		X			X	
234	X		X			X	
236		X		X			X
237		X			X		X
238		X	X		X		X
239	X		X			X	
240		X			X		X
242	X		X			X	
243	X		X			X	
244	X		X			X	
245	X		X			X	
246	X		X			X	
247	X		X			X	
248	X		X			X	
249	X		X			X	
250	X		X			X	

TreeID	Präparation		Jahringbreitenmessung			Crossdating	
	Bandschleifer	Ultrafräse	TSAP-Win	PAST4	WinDendro	TSAP-Win	PAST4
251	x		x			x	
252	x		x			x	
253		x			x		x
254		x		x			x
255		x			x		x
258		x		x			x
259		x		x			x
260	x		x			x	
261	x		x			x	
262	x		x			x	
263	x		x			x	
264		x			x		x
265		x			x		x
266	x		x	x		x	
267		x			x		x
268		x			x		x
269		x			x		x
270	x		x			x	
271	x		x			x	
272	x		x			x	
273	x		x			x	
276	x		x			x	
279	x		x			x	
280	x		x			x	
281	x		x			x	
282	x		x			x	
283	x		x			x	
284	x		x			x	
286	x		x			x	
287		x			x		x
288	x		x			x	
289		x			x		x
290		x			x		x
292		x			x		x
293		x			x		x
294		x			x		x
298		x			x		x
300	x		x			x	
301		x			x		x
303		x			x		x
304		x			x		x
305		x			x		x
306		x			x		x
307		x	x		x		x
308		x			x		x
310	x		x			x	
311		x			x		x
312		x			x		x

TreeID	Präparation		Jahringbreitenmessung			Crossdating	
	Bandschleifer	Ultrafräse	TSAP-Win	PAST4	WinDendro	TSAP-Win	PAST4
314		X			X		X
316		X			X		X
317	X		X			X	
318	X		X			X	
321		X			X		X
322		X		X	X		X
324	X		X			X	
325		X			X		X
327	X		X			X	
328		X		X			X
331		X	X	X			X
333		X		X	X		X
334		X		X	X		X
335	X		X			X	
336		X		X			X
337	X		X			X	
342		X		X			X
343		X			X		X
344		X			X		X
346		X	X		X		X
347		X		X			X
348	X		X			X	
349		X			X		X
350	X		X			X	
354		X		X			X
355	X		X			X	
357	X		X			X	
358	X		X			X	
359		X			X		X
360		X			X		X
361		X			X		X
362		X			X		X
363		X			X		X
366	X		X			X	
367	X		X			X	
371	X		X			X	
372	X		X			X	
373	X		X			X	
374	X		X			X	
375	X		X			X	
376	X		X			X	
377	X		X			X	
379	X		X			X	
380	X		X			X	
381		X			X		X
385	X		X			X	
387		X			X		X
390		X		X			X

TreeID	Präparation		Jahringbreitenmessung			Crossdating	
	Bandschleifer	Ultrafräse	TSAP-Win	PAST4	WinDendro	TSAP-Win	PAST4
391		X			X		X
392		X	X		X		X
393	X		X			X	
394	X		X			X	
395		X			X		X
396		X			X		X
397	X		X			X	
398		X			X		X
400	X		X			X	
401	X		X			X	
403		X	X	X	X		X
404	X		X			X	
405		X			X		X
406		X		X			X
407	X		X			X	
408	X		X			X	
409		X			X		X
410		X		X			X
411	X		X	X		X	
412	X		X			X	
413	X		X			X	
414		X		X			X
416		X			X		X
417		X			X		X
418		X			X		X
421		X			X		X
422	X		X			X	
423	X		X			X	
424	X		X			X	
425		X			X		X
426		X		X			X
427	X		X			X	
428		X			X		X
429		X			X		X
430		X			X		X
431		X			X		X
432	X		X			X	
433	X		X			X	
434	X		X			X	
435	X		X			X	
437	X		X			X	
439		X		X			X
443	X		X			X	
444	X		X			X	
446	X		X			X	
447	X		X			X	
448	X		X			X	
449	X		X			X	

TreeID	Präparation		Jahringbreitenmessung			Crossdating	
	Bandschleifer	Ultrafräse	TSAP-Win	PAST4	WinDendro	TSAP-Win	PAST4
450		X			X		X
451	X		X			X	
453	X		X	X		X	
454		X			X		X
455		X			X		X
462	X		X			X	
463		X			X		X
464	X		X			X	
465		X			X		X
466		X			X		X
467		X		X	X		X
468	X		X			X	
469		X			X		X
473		X			X		X
474	X		X			X	
475	X		X	X		X	
483	X		X			X	
484		X			X		X
486		X		X			X
487		X			X		X

Anhang 2: COFECHA

a) Picea abies

```
>> 190      2015 absent in 3 of 292 series, but is not usually narrow: master index is .249
>> 217      1742 absent in 1 of 11 series, but is not usually narrow: master index is .323
>> 217      1822 absent in 1 of 76 series, but is not usually narrow: master index is 1.090
>> 254      1887 absent in 1 of 105 series, but is not usually narrow: master index is .088
>> 258      1960 absent in 1 of 155 series, but is not usually narrow: master index is -.262
>> 259      1989 absent in 1 of 276 series, but is not usually narrow: master index is 1.151
>> 298      1990 absent in 1 of 282 series, but is not usually narrow: master index is .948
>> 408      2017 absent in 1 of 192 series, but is not usually narrow: master index is -.036
>> 042      2012 absent in 1 of 294 series, but is not usually narrow: master index is .778
>> 060      2015 absent in 3 of 292 series, but is not usually narrow: master index is .249
```

```
*****
*C* Number of dated series      297 *C*
*O* Master series 1703 2017 315 yrs *O*
*F* Total rings in all series 32725 *F*
*E* Total dated rings checked 32721 *E*
*C* Series intercorrelation    .533 *C*
*H* Average mean sensitivity   .187 *H*
*A* Segments, possible problems 156 *A*
*** Mean length of series     110.2 ***
*****
```

ABSENT RINGS listed by SERIES:

(See Master Dating Series for absent rings listed by year)

```
087      1 absent rings: 1869
015      3 absent rings: 1910 1911 1912
167      9 absent rings: 1767 1768 1769 1770 1771 2013 2014 2015 2016
189      1 absent rings: 1911
190      3 absent rings: 2014 2015 2016
217      2 absent rings: 1742 1822
254      1 absent rings: 1887
258      2 absent rings: 1823 1960
259      2 absent rings: 1989 1993
298      1 absent rings: 1990
366      1 absent rings: 1992
408      1 absent rings: 2017
042      3 absent rings: 2012 2013 2014
444      2 absent rings: 1975 1980
060      3 absent rings: 2014 2015 2016
```

Seq	Series	Time_span	1700	1725	1750	1775	1800	1825	1850	1875	1900	1925	1950	1975
			1749	1774	1799	1824	1849	1874	1899	1924	1949	1974	1999	2024
1	002	1848 2017						.47	.43	.62	.77	.70	.57	.50
2	003_fr	1848 2017						.56	.53	.44	.76	.85	.66	.54
3	012	1841 2017						.52	.63	.62	.65	.69	.71	.57
4	017	1981 2017												.36B
5	018	1752 2017			.64	.72	.80	.74	.69	.57	.70	.74	.68	.64
6	019_fr	1945 2017										.81	.58	.52
7	034	1983 2017												.44
8	035	1985 2017												.11B
9	036	1994 2017												.01B
10	037	1987 2017												.02B
11	067_fr	1977 2016												.43
12	083_fr	1779 2016				.70	.79	.83	.81	.76	.82	.74	.51	.51
13	087	1757 2017			.67	.67	.67	.38	.35	.72	.67	.61	.66	.60
14	096	1906 2017									.47	.53	.58	.57
15	097	1920 2017									.53	.59	.55	.51
16	109	1986 2017												.08B
17	114	1994 2017												.37B
18	115	1992 2017												.44
19	116_fr	1806 2017				.68	.56	.55	.59	.59	.50	.32A	.40	
20	119_fr	1970 2017											.53	
21	120	1956 2017											.48	.54
22	123	1764 2017			.66	.73	.66	.60	.71	.67	.77	.72	.64	.55
23	125	1774 2017			-.14B	-.16B	-.18B	.21B	.31A	.33A	.61	.74	.61	.59
24	131	1762 2016			.58	.64	.79	.75	.64	.63	.71	.60	.49	.55
25	132	1771 2016			.67	.72	.72	.75	.85	.88	.88	.87	.82	.80
26	137_fr	1871 2017							.02B	.09B	.63	.70	.35B	.48
27	014	1766 2016			.51	.57	.71	.74	.69	.76	.78	.74	.60	.54
28	145_fr	1931 2017										.51	.36	.41
29	146	1979 2017												.00B
30	015	1848 2016					.59	.64	.33	.60	.76	.47	.43	
31	152_fr	1894 2017							.26A	.52	.66	.54	.62	
32	157_fr	1960 2017											.40B	.34
33	160_fr	1949 2017									.26A	.26A	.39	
34	163_fr	1883 2017							.50	.71	.64	.32B	.37	
35	167	1707 2016	.21B	.33A	.24B	.45	.65	.78	.77	.71	.78	.72	.54	.57
36	169	1752 2016			.54	.76	.72	.60	.59	.66	.85	.80	.62	.69
37	170_fr	1898 2017								.42	.49	.63	.50	.57
38	171	1905 2017									.54	.71	.62	.56
39	173	1873 2017							.23B	.29A	.79	.78	.62	.52
40	174	1875 2017								.22A	.49	.61	.50	.39
41	175_fr	1962 2017											.34	.38
42	176	1713 2017	.19B	.30A	.34	.48	.45	.28A	.48	.58	.39	.39	.38	.41
43	177	1743 2017		.30A	.34	.55	.35	.17B	.27A	.43	.70	.70	.71	.62
44	178	1773 2012			.61	.63	.71	.54	.32B	.53	.62	.58	.65	.61
45	180	1740 2007	.52	.61	.65	.70	.71	.73	.76	.83	.63	.15B	.14B	
46	181	1977 2017												.44
47	182	1976 2017												.52
48	183	1969 2017												.23B

b) Larix decidua

```

*****
*C* Number of dated series      59 *C*
*O* Master series 1721 2017 297 yrs *O*
*F* Total rings in all series 12072 *F*
*E* Total dated rings checked 12060 *E*
*C* Series intercorrelation    .650 *C*
*H* Average mean sensitivity   .277 *H*
*A* Segments, possible problems 16 *A*
*** Mean length of series     204.6 ***
*****

```

ABSENT RINGS listed by SERIES: (See Master Dating Series for absent rings listed by year)

```

105      2 absent rings: 1816 1854
121      1 absent rings: 1923
139      5 absent rings: 1910 1983 2004 2011 2012
151      4 absent rings: 1913 1914 1915 1920
166      1 absent rings: 1926
207      5 absent rings: 1900 1901 1902 1903 1904
333      1 absent rings: 1988
372      2 absent rings: 1892 1893

```

Seq	Series	Time_span	1725	1750	1775	1800	1825	1850	1875	1900	1925	1950	1975
			1774	1799	1824	1849	1874	1899	1924	1949	1974	1999	2024
1	089_fr	1779 2016			.59	.71	.60	.56	.70	.72	.72	.79	.63
2	098	1914 2017								.61	.69	.76	.80
3	100	1917 2017								.48	.62	.52	.65
4	102	1921 2017								.58	.67	.78	.80
5	105	1777 2017			.60	.71	.71	.55	.62	.71	.72	.76	.67
6	111	1777 2017			.73	.67	.51	.50	.61	.65	.79	.76	.69
7	112	1761 2017		.72	.77	.79	.71	.71	.72	.63	.68	.69	.59
8	118	1761 2017		.43	.71	.63	.67	.69	.57	.63	.68	.71	.72
9	121	1769 2017		.67	.69	.71	.68	.69	.68	.59	.72	.88	.83
10	124	1767 2017		.75	.76	.85	.79	.69	.77	.83	.85	.80	.77
11	126	1782 2017			.73	.81	.73	.75	.64	.53	.62	.72	.57
12	128	1763 2017		.57	.67	.76	.65	.70	.79	.76	.78	.81	.63
13	129	1791 2017			.78	.76	.71	.78	.81	.82	.82	.63	.59
14	130	1759 2017		.66	.75	.76	.59	.60	.71	.79	.77	.81	.84
15	134	1777 2017			.62	.83	.72	.70	.80	.83	.84	.76	.71
16	135_fr	1802 2017				.56	.57	.62	.70	.59	.66	.84	.73
17	138	1765 2017		.75	.74	.85	.90	.81	.79	.76	.74	.74	.71
18	139	1766 2017		.67	.70	.64	.56	.56	.68	.73	.55	.60	.47
19	140	1807 2017				.70	.72	.53	.50	.73	.71	.63	.61
20	141	1813 2017				.72	.65	.48	.58	.73	.76	.79	.82
21	148	1938 2017									.56	.54	.61
22	151	1767 2017		.71	.78	.84	.79	.78	.72	.69	.71	.69	.71
23	154	1762 2017		.64	.70	.70	.75	.80	.81	.80	.80	.75	.77
24	155	1771 2017		.70	.74	.78	.77	.69	.74	.78	.71	.76	.73
25	156	1768 2017		.65	.70	.75	.71	.69	.67	.72	.73	.71	.71
26	158	1769 2017		.83	.85	.84	.78	.76	.79	.78	.75	.80	.81
27	159	1758 2017		.67	.76	.80	.80	.79	.77	.75	.78	.72	.57
28	161	1750 2016		.46	.64	.55	.68	.67	.64	.71	.58	.30B	.29B
29	162_fr	1974 2017											.61
30	164	1778 2017			.74	.68	.60	.56	.67	.69	.72	.78	.71
31	165	1782 2016			.68	.73	.72	.55	.48	.67	.73	.78	.71
32	166	1785 2016			.43	.52	.66	.71	.79	.77	.75	.76	.70
33	207	1780 2017			.61	.64	.61	.38	.20B	.55	.72	.71	.73
34	271	1802 2016				.85	.78	.65	.69	.79	.79	.85	.82
35	272	1783 2016			.66	.85	.86	.82	.71	.67	.76	.68	.54
36	273	1755 2016		.30A	.50	.63	.64	.70	.72	.79	.77	.65	.64
37	286	1906 2016								.53	.58	.66	.71
38	318	1768 2017		.75	.80	.70	.64	.71	.64	.72	.76	.62	.57
39	321	1721 2017	.25A	.43	.75	.77	.67	.63	.76	.84	.77	.69	.64
40	333	1776 2017			.78	.76	.70	.73	.73	.62	.56	.63	.62
41	334	1771 2017		.70	.74	.61	.38	.25A	.44	.67	.71	.72	.62
42	337	1733 2017	.01B	.10B	.53	.65	.67	.63	.63	.76	.79	.63	.57
43	344	1771 2017		.49	.59	.71	.62	.68	.72	.78	.82	.83	.81
44	371	1781 2016			.61	.72	.76	.76	.70	.77	.83	.83	.77
45	372	1770 2016		.66	.68	.73	.62	.58	.69	.74	.78	.81	.76
46	387	1901 2015								.56	.64	.54	.60
47	403	1777 2017			.66	.78	.75	.72	.74	.84	.85	.79	.80
48	404	1771 2017		.53	.54	.61	.66	.70	.62	.70	.77	.59	.44
49	406_fr	1911 2017								.55	.57	.61	.64
50	414_fr	1845 2017					.69	.68	.62	.71	.76	.66	.69
51	417	1862 2017						.31A	.33	.64	.74	.79	.81
52	418	1863 2017						.15B	.17B	.42	.52	.58	.64
53	454	1942 2017									.78	.83	.87
54	462	1863 2017						.06B	.16B	.59	.57	.58	.61
55	467	1859 2017						.06B	.31A	.59	.67	.62	.65
56	473	1856 2016						.53	.47	.48	.70	.74	.56
57	065	1923 2016							.44	.56	.47	.57	
58	066	1939 2016								.64	.69	.82	
59	092	1975 2016											.13B
Av segment correlation			.13	.60	.68	.72	.68	.61	.63	.68	.71	.70	.67

Anhang 3: Verwendete Datensätze zur Berechnung der Boundary-Lines

a) *Picea abies*

ID	Standort	Höhenlage	Autor
SWIT107	Arosa GR Rot Tritt North	1.940 m	Schweingruber, F.H.
SWIT108	Arosa GR Arlenwald South	2.000 m	Schweingruber, F.H.
SWIT174	Grindelwald BE Nord (N3)	1.700 m	Schweingruber, F.H.
SWIT175	Grindelwald BE Süd (S3)	1.960 m	Schweingruber, F.H.
SWIT179	Davos GR Sertig	1.960 m	Bigler, C.
SWIT180	Brigels GR Scratle	1.600 m	Bigler, C.
SWIT181	Davos GR Dischma – Flüela	1.800 m	Bigler, C.
SWIT186	Bergün GR Val Tours	2.065 m	Bigler, C.; Bircher, N.; Meile, C.
SWIT193	Vals GR Riefawald	1.900 m	Bigler, C.; Kühne, K.
SWIT279	Grindelwald BE Mettla	1.850 m	Bigler, C.; Etter, S.
SWIT332	San Bernardino GR	1.660 m	Fonti, P.

b) *Larix decidua*

ID	Standort	Höhenlage	Autor
SWIT183	Andeer GR Caschlera	2.000 m	Bigler, C.; Tiri, R.
SWIT185	Bergün GR Val Tours	2.065 m	Bigler, C.; Meile, C.
SWIT190	Lucomagno TI Campo Solario	1.800 m	Bigler, C.; Pellegrino, R.
SWIT192	Vals GR Riefawald	1.900 m	Bigler, C.; Kühne, K.
SWIT331	San Bernardino GR	1.660 m	Fonti, P.
SWIT338	Sils GR Rabins	1.800 m	Bräker, O.U.; Zingg, A.

Erklärung zur eigenständigen Anfertigung

Ich versichere hiermit, dass ich die Arbeit vollumfänglich selbständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und alle wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken übernommenen Inhalte als solche kenntlich gemacht habe und die eingereichte Bachelorarbeit weder vollständig noch in wesentlichen Teilen Gegenstand eines anderen Prüfungsverfahrens ist oder war.

Freiburg, 13. April 2018

Markus Schorn