

Masterarbeit an der ETH Zürich in Zusammenarbeit mit dem SLF Davos

Dynamik in einschichtigen, dichten Fichtenbeständen

Eine Untersuchung in nordwestexponierten Verjüngungsschlitzen



Mario Guetg

14.04.2020 Davos

Departement Umweltsystemwissenschaften Wald- und Landschaftsmanagement

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

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

Zusammenfassung

Schutzwälder sind in der Schweiz von zentraler Bedeutung für das Naturgefahrenmanagement. Vielerorts schützen sie die bestehende Infrastruktur vor Lawinen, Steinschlägen, Murgängen und anderen Naturgefahren. In den Alpen sind die Schutzwälder aufgrund der topografischen Begebenheiten und des daraus folgenden erhöhten Naturgefahrenrisikos besonders wichtig. Aus verschiedensten Gründen befinden sich diese Schutzwälder vermehrt in einem kritischen Zustand. Als besonders kritisch gilt die Situation in dichten, einschichtigen Fichtenbeständen, welche aufgrund der fehlenden Verjüngung und der bereits stark verkürzten Kronen oft eine tiefe Resilienz und Resistenz aufweisen. Für eine Verbesserung der Stabilität ist eine adäquate Bewirtschaftung solcher Bestände von zentraler Bedeutung. Das Ziel dieser Arbeit war es daher Erfolgsfaktoren für eine adäquate Bewirtschaftung solcher Bestände zu identifizieren. Daher wurde die Dynamik in fünf einschichtigen, dichten, subalpinen Fichtenbeständen im östlichen Teil Graubündens mehrere Jahre nach dem jeweiligen Verjüngungsschlag untersucht.

In den untersuchten Beständen wurden jeweils drei 10 m x 10 m grosse Probeflächen am Schlagrand und im dichten Bestand angelegt. In diesen wurden der Brusthöhendurchmesser, die Baumhöhe, die Kronenlänge und der Baumzustand bestimmt. Neben den Baumparametern wurden in beiden Flächen auch Bohrkerne entnommen, um das Alter zu bestimmen und die Zuwachsreaktionen der Randbäume, welche durch die Verjüngungseingriffe verursacht wurden, zu untersuchen. Die Bohrkerne beziehungsweise die Parameter der Schlagränder wurden mit jenen aus dem dichten Bestand, welcher die natürliche Bestandesstruktur repräsentieren soll, verglichen und auf Eigenheiten untersucht. Mittels Boundary-Line Methode wurde zudem versucht, den Eingriff anhand der verursachten Freistellungseffekte zu datieren. Um die Untersuchung zur Dynamik zu vervollständigen, wurden Transekte angelegt, damit die Verjüngung an verschiedenen Punkten zwischen dunklem Bestand und der Mitte des Schlages untersucht werden konnte. Zusätzlich zu den aufgenommenen Daten wurden Daten von zwanzig 22 m x 22 m grossen Probeflächen in dichten, seit längerem unbewirtschafteten Fichtenbeständen aus einer früheren Arbeit aufgegriffen.

Die Mortalität in der äusseren Randfläche war rund doppelt so hoch wie jene in der Bestandesfläche. Die abgestorbenen Bäume der Randfläche hatten signifikant kürzere Kronen, kleinere Brusthöhendurchmesser und einen höheren Schlankheitsgrad als die lebenden. Die Abhängigkeit des Brusthöhendurchmessers vom Alter war stark standortsabhängig und nicht in allen Beständen gleich. Obwohl einzeln betrachtet nur in zwei der fünf Bestände ein signifikanter Zusammenhang nachgewiesen werden konnte, zeigte der Brusthöhendurchmesser über alle Bestände eine signifikante Abhängigkeit vom Alter. Die aufgrund der Freistellung verursachte Zuwachssteigerung war auf die äussersten Randbäume beschränkt und betrug im Mittel rund 50%. Die Reaktion der Bäume auf eine Freistellung korrelierte nicht signifikant mit dem Alter oder der Kronenlänge. Um einen Eingriff beziehungsweise eine Störung genau datieren zu können, ist die Boundary-Line-Methode nur beschränkt anwendbar. Auch die überarbeiteten Kriterien für die Bestimmung von moderaten und bedeutenden Freistellungen konnten den Eingriff nicht auf das Jahr genau datieren. Die Verjüngung war weder abhängig von der Lückenbreite noch von der Lage im Verjüngungsschlitz. Dies bedeutet, dass es keinen signifikanten Unterschied im Vorkommen der Verjüngung zwischen der Mitte und dem Rand des Schlages gab, allerdings unterschieden sich die Verjüngungsdichten in der Schlagfläche respektive am Schlagrand signifikant von den Verjüngungsdichten im Bestandesinneren.

Diese Arbeit zeigt, dass die Priorität der Bewirtschaftung vermehrt auf den noch jungen einschichtigen Fichtenbeständen liegen sollte. In diesen noch jungen Beständen sind die Kronen noch nicht zu stark verkürzt und die Struktur des Bestandes kann noch massgeblich beeinflusst werden. Falls ein früher Eingriffszeitpunkt allerdings verpasst wurde und die Kronen bereits stark verkürzt sind, ist der Eingriffszeitpunkt nicht mehr entscheidend. Trotzdem ist es für eine nachhaltige Schutzwaldpflege in vielen Fällen wichtig, dass über kurz oder lang eingegriffen wird, um die Verjüngung zu fördern. Bei diesen Eingriffen ist es zentral, stabile Ränder auszubilden, um Zwangsnutzungen zu verhindern und die Mortalität so tief wie möglich zu halten. Diese Arbeit zeigt, dass die Stabilität im Randbereich am besten mit Bäumen mit einer langen Krone, einem hohen Brusthöhendurchmesser und einem tiefen Schlankheitsgrad gewährleistet werden kann und diese vermehrt stehen gelassen werden sollten. Zudem sollte nach Möglichkeit versucht werden, die Ränder an anderen Baumarten, wie zum Beispiel Lärchen oder Föhren zu fixieren, um Folgeschäden zu verringern. Die Breite des Schlages spielt für die Verjüngung nur dann eine Rolle, falls weniger als zwei Stunden Junisonnen verfügbar werden. Ansonsten sollte vor allem darauf geachtet werden, die Richtlinien gemäss NaiS (Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald) einzuhalten, damit die Schutzwirkung des Waldes möglichst wenig beeinträchtigt wird.

Stichwörter: Schutzwaldpflege, Picea Abies, Freistellungseffekte, Gebirgswaldmanagement, Resilienz, Resistenz

Summary

Protective forests are of central importance in Switzerland's natural hazard management. In many places, they protect the existing infrastructure from avalanches, rockfalls, debris flows and other natural hazards. In the Alps, the protective forests are particularly important due to the topographical conditions and the resulting increased risk. For various reasons, however, protective forests in the Alps are increasingly considered as being in a critical condition. In particular single-layer, dense spruce stands, are often characterized by a low resilience and resistance due to the lack of rejuvenation and the already greatly shortened crowns. Adequate management is therefore very challenging. The overall aim of this thesis was thus to determine success-factors for adequate management interventions in such forests. Therefore, the dynamics in five dense, single-layer spruce stands in the subalpine zone of the eastern part of Grisons have been examined several years after regeneration cuts.

In each of the examined stands, six 10 m x 10 m plots were created, three at the edge of the cut and three in the dense stock. The diameter at breast height, tree height, crown length and tree condition were recorded in these plots. In addition to the tree parameters, drill cores were taken from both areas to determine the age and to examine the growth reactions of the edge trees, which were caused by the rejuvenation interventions. The drill cores and the parameters of the intervention edges were compared with those from the dense stand, which is supposed to represent the natural stand structure, and examined for peculiarities. The boundary-line method was also used to attempt to date the release effects caused by the intervention. To complete the study, tree regeneration was examined on transects across the intervention edges. Additionally, data of twenty 22 m x 22 m plots in dense, unmanaged spruce stands from a previous work were included in this thesis.

The mortality in the edge area was around twice as high as in the dense stock. The dead trees on the edge had significantly shorter crowns, smaller diameter and a higher degree of slenderness than the living ones. The dependency of the diameter at breast height on age was very location dependent. Although, considered for itself, only two of the five stocks showed a significant relationship, the diameter showed a significant dependence on age across all stocks. The increase in growth caused by the regeneration cut was limited to the outermost edge trees and averaged around 50%. The release effects showed no significant correlation with age or crown length. The boundary line method can only be used to a limited extent if an intervention is to be dated exactly to the year. The revised criteria for determining moderate and major release effects could not date the intervention exactly to the year. The rejuvenation was neither dependent on the gap width nor on the position in the intervention gap. This means that there was no significant difference in the occurrence of the rejuvenation between the centre and the edge of the field, but these transect points differed significantly from the transect points in the stock.

This work indicates that more priority should be given to the management of early stages of uniform spruce forests. In these early stages, the crowns have not yet been shortened too much and the structure of the stand can still be decisively influenced. If however, an earlier intervention time has been missed and the crowns have already been shortened considerably, the time of the intervention is no longer decisive. In order to provide sustainable protection against natural hazards, it is nevertheless important to sooner or later promote forest rejuvenation by management interventions. During such interventions, it is crucial to form stable edges in order to keep mortality as low as possible. This work shows that the stability in the intervention edge area can best be guaranteed with trees characterized by a relatively long crown, a high diameter and a low degree of slenderness. Spruce trees with these characteristics as well as other tree species (e.g. Larch or Pine) near the edge may reduce

damages after an intervention. While the study confirmed that the size of the intervention cut should allow at least two hours of June sun for Spruce regeneration in subalpine forests, larger interventions seemed not to additionally foster rejuvenation. Otherwise care should be taken to comply with the guidelines according to NaiS (Sustainability und success monitoring in protective forests) so that the protective function of the forest is affected as little as possible.

Keywords: protection forest, Picea Abies, release effects, mountain forest management, resilience, resistance

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	I
Summary	III
Inhaltsverzeichnis	V
1. Einleitung.....	1
2. Material und Methoden	5
2.1. Untersuchungsgebiete.....	5
2.2. Feldaufnahmen	9
2.2.1. Probeflächen	9
2.2.2. Baumparameter.....	14
2.2.3. Verjüngung.....	15
2.2.4. Dendrochronologische Aufnahmen.....	15
2.3. Laborarbeit.....	15
2.4. Datenanalyse.....	16
2.4.1. Dendrochronologische Analyse.....	16
2.4.2. Freistellungseffekte	17
2.4.1. Statistische Analyse	21
3. Resultate.....	23
3.1. Baumparameter	23
3.2. Dendrochronologische Analyse.....	26
3.3. Freistellungseffekte	30
3.4. Verjüngung.....	35
4. Diskussion.....	37
4.1. Stabilität von Schlagrändern	37
4.2. Freistellungseffekte	41
4.3. Verjüngung.....	43
5. Schlussfolgerung	44
6. Danksagung	46
7. Literaturverzeichnis.....	47
8. Abbildungsverzeichnis.....	50
9. Tabellenverzeichnis.....	53
10. Glossar	54
11. Anhang.....	56
Eigenständigkeitserklärung	66

1. Einleitung

Die Wälder in der Schweiz erfüllen verschiedenste Funktionen. Nebst der Holzproduktion, dem Naturschutz und der Erholung ist der Schutz vor Naturgefahren eine der wichtigsten Waldfunktionen des Schweizer Waldes (Brändli 2010). Die Auswertung des dritten Landesforstinventars (LFI) ergab, dass rund 43% des Schweizer Waldes (dies entspricht 545'800 ha) eine Schutzfunktion gegenüber Naturgefahren übernimmt. Gemäss dieser Auswertung ist der Schutz vor Naturgefahren in den Alpen und auf der Alpensüdseite besonders wichtig und mit 64% beziehungsweise 56.6% Anteil der Gesamtwaldfläche sogar die häufigste Vorrangsfunktion. Dies bedeutet, dass der grösste Teil der Bewirtschaftung der Waldflächen in den Alpen und auf der Alpensüdseite auf den Schutz vor Naturgefahren ausgerichtet ist (Brändli 2010).

Oft wird im Zusammenhang mit der Schutzfunktion des Waldes der Begriff Schutzwald verwendet. Als solche gelten gemäss der Definition des Projektes SilvaProtect alle Wälder, die ein anerkanntes Schadenspotential gegen eine bestehende Naturgefahr schützen oder die damit verbundenen Risiken reduzieren (Losey und Wehrli 2013). Solche Wälder können unter anderem vor Lawinen, Steinschlägen, Erosion, flachgründigen Rutschungen, Murgängen und Hochwasser schützen (Brang et al. 2006). Konkret heisst das, sie können das Anbrechen von Lawinen verhindern, Steine aufhalten, Hänge stabilisieren, die Oberflächenerosion und den Eintrag von Holz und Geschiebe in Gerinne reduzieren. In vielen Gebieten ist es den Menschen nur durch die Wirkung von Schutzwäldern möglich zu wohnen, zu wirtschaften und sich in der Landschaft zu bewegen (Bebi et al. 2016). In den letzten 100 Jahren haben die Schutzanforderungen aufgrund der zunehmenden Bedeutung des Wintertourismus und der Verkehrsnetze und anlässlich der allgemeinen Expansion von Siedlungen und Infrastruktur stark zugenommen (Motta und Haudemand 2000, Duc et al. 2004). Da der Schutzwald natürlich nachwächst, erbringt dieser den kostengünstigsten und gleichzeitig ökologisch wertvollsten Schutz gegen Naturgefahren (Brang et al. 2006, Wasser und Perren 2014). Die Schutzwirkung der Schutzwälder ist allerdings über die Zeit nicht konstant. Aufgrund der natürlichen Bestandesentwicklung, den zahlreichen abiotischen und biotischen Einflüssen und den sich verändernden Umweltbedingungen verändert sich die Schutzwirkung ständig (Bebi et al. 2016).

Die natürliche Bestandesentwicklung im Schutzwald verläuft grundsätzlich gleich wie in anderen Waldökosystemen (Brang et al. 2004). Im Schutzwald werden häufig ebenfalls vier Entwicklungsstufen unterschieden, welche eine unterschiedlich grosse Schutzwirksamkeit zeigen (Mayer 1978). Die erste Stufe, die Verjüngungsphase, ist geprägt durch geringe Konkurrenz zwischen den Bäumen und einer flächigen Etablierung der Verjüngung. Während der zweiten Stufe, der Selbstdifferenzierungsphase, findet aufgrund des steigenden Holzvorrates ein intensiver Konkurrenzkampf zwischen den bereits etablierten Bäumen statt. Dieser führt dazu, dass die Mortalität stark zunimmt, aber kaum natürliche Verjüngung aufkommt. Die dritte Stufe, die Zerfallsphase, ist erreicht, sobald die Baummortalität so gross wird, dass die neu entstandenen Lücken nicht mehr durch die bereits etablierten Bäume geschlossen werden können und sich die Verjüngung wiedereinstellen kann. Das Equilibrium, die vierte Entwicklungsstufe, repräsentiert eine Art Gleichgewicht, in dem sich die Baummortalität und die Verjüngung die Waage halten. Die Dynamik der verschiedenen Phasen kann aufgrund von unterschiedlichen Standorten und Störungsintensitäten stark variieren (Peet 2000).

Aufgrund der veränderten Nutzungsintensität gibt es in den Schweizer Alpen vermehrt dichte und einschichtige Fichtenwälder, das heisst dichte Wälder mit ungefähr gleich hohen Bäumen, als noch im 19. Jahrhundert (AWN 2014). Infolge einer intensiven Nutzung waren damals viele Wälder offener, als sie es heute sind. Seither fand allerdings sowohl in der Land- als auch in der Forstwirtschaft eine Extensivierung statt, die dazu führte, dass die Waldfläche und die Walddichte stark zugenommen

haben. Zudem mussten anlässlich der Übernutzungen stellenweise Aufforstungen durchgeführt werden, so dass die Waldfläche und Walddichte zusätzlich zunahm. Weil zu Beginn der Extensivierung beziehungsweise der Aufforstungen relativ günstige Verjüngungsverhältnisse herrschten (Lichtverfügbarkeit und freigelegte Mineralerde) gibt es heute mehr gleichförmige und dichte Fichtenschutzwälder, als dies unter natürlichen Umständen der Fall wäre (Bachofen und Zingg 2005, Bebi et al. 2013). Eine kontinuierliche Schutzwirkung des Waldes wird allerdings am besten mit ungleichförmigen, ungleichartigen, standortsgemässen, gesunden und stabilen Beständen erreicht (Hillgarter 1971, Ott et al. 1997). Nebst der Gleichförmigkeit ist auch die Stabilität in solchen einschichtigen, dichten Fichtenbeständen ein grosses Problem. Die Stabilität von Waldbeständen wird durch zwei wichtige Aspekte beeinflusst: der Resilienz und der Resistenz (Thomasius 1988, Höllerl 2009, Köttl 2017). Als Resilienz bezeichnet man die Fähigkeit, sich nach Störungen wie zum Beispiel Lawinen oder Windwurf zu erholen und wieder in den vorangegangenen Ausgangszustand zurückzukehren (Höllerl 2009, Wohlgemuth et al. 2019). In Verbindung mit der Resilienz taucht auch oft der Begriff der Elastizität auf, welche angibt wie schnell sich ein System von einer Störung erholen kann (Grimm et al. 1992, Motta und Haudemand 2000). Die Resistenz bezeichnet die Fähigkeit eines Systems trotz Anwesenheit von Störungen im Gleichgewichtszustand zu verharren, zum Beispiel bleiben die betroffenen Bäume trotz sehr starkem Wind stehen und erfüllen ihre Schutzfunktion (Grimm et al. 1992, Höllerl 2009). Stabile Bestände zeigen die grösste Widerstandsfähigkeit gegen Naturgefahren und können die gestellten Anforderungen betreffend der Schutzwirkung permanent erfüllen (Ott et al. 1997).

Die Stabilität und somit nachhaltige Schutzfunktion vieler Fichtenbestände im Alpenraum ist heutzutage aus verschiedenen Gründen beeinträchtigt (Wehrli et al. 2007). Die Resilienz in solchen Fichtenbeständen ist aufgrund des geschlossenen Kronenschirmes und der infolge dessen fehlenden Verjüngung oft stark vermindert (Bebi et al. 2013). Ausserdem wird die Resistenz der Fichte (*Picea abies*) durch verschiedene Faktoren negativ beeinflusst. Zum einen ist die Fichte anfällig für Trockenheit, Borkenkäferbefall und Verbiss (ZÜRICH 2002, Kupferschmid et al. 2015). Zum anderen führt der Umstand, dass die Fichte ein Flachwurzler ist dazu, dass sie im Vergleich zu anderen Baumarten anfälliger für Sturmschäden ist (Frehner et al. 2005). Sie ist durch das erhöhte Risiko für Stammfäule auch besonders anfällig für Wind- und Schneebruch (Rottmann 1985, Zeller 1994). Die Gefährdung für Sturmschäden gilt ganz besonders für einschichtige, dichte Fichtenbestände, welche sich in der Selbstdifferenzierungsphase befinden (Bebi et al. 2013). Aber auch während der Bestandesentwicklung in natürlich entstandenen Fichtenbeständen gibt es instabile Bestandesphasen. Die kontinuierliche Stabilität steht im Schutzwald allerdings im Vordergrund, was bedeutet, dass gezielte waldbauliche Eingriffe sowohl in den dichten, einschichtigen Fichtenschutzwäldern als auch in natürlichen Fichtenschutzwäldern unumgänglich sind (Hillgarter 1971, Zeller 1994, Bachofen und Zingg 2005).

Um die Resilienz in dichten, einschichtigen Beständen zu erhöhen wird bei den meisten waldbaulichen Eingriffen versucht, die Verjüngung einzuleiten beziehungsweise zu fördern. Hierfür werden in den meisten Eingriffen geeignete Kleinstandorte gesucht und begünstigt. Diese Eingriffe müssen so durchgeführt werden, dass diese Kleinstandorte genügend direkte Sonneneinstrahlung erhalten (für die Fichte mindestens zwei Stunden Sonne pro Tag im Juni). Südhänge unterscheiden sich dabei stark von Nordhängen. Während es an Südhängen oft genügt wenige Bäume zu entfernen, um genügend Sonne zu erhalten, müssen an steilen Nordhängen häufig schmale und lange Schlitze (Verjüngungsschlitze) schräg zur Falllinie angelegt werden (Frehner et al. 2005). Gemäss Bebi (2013) müssen diese Eingriffe genügend früh erfolgen, um die Schutzwirksamkeit möglichst effizient zu gewährleisten. Denn mit zunehmendem Alter des Bestandes nimmt die Konkurrenz stark zu. Dies führt

zu immer kürzer werdenden Baumkronen und somit zu einer starken Beeinträchtigung der Resistenz der einzelnen Bäume. Aufgrund der reduzierten Resistenz können späte Eingriffe beziehungsweise Öffnungen des Kronendaches leicht zu einer vorübergehenden Destabilisierung der Waldstruktur und zu Folgeschäden führen. Die Fichten, die während dem Jugendwachstum in solchen Beständen während Jahrzehnten unterdrückt wurden, haben ein geringes Jahrringwachstum, weisen kurze Kronen auf und können deshalb kaum noch zu einer erhöhten Bestandesstabilität beitragen (Krumm et al. 2012).

Aufgrund der Zunahme von dichten, einschichtigen Fichtenbeständen, der höheren Empfindlichkeit der Fichten in diesen Beständen auf klimatischen Stress (Panayotov et al. 2016) oder auch als Folge der durch die Klimaveränderung verursachte Zunahme der Gefährdungen, wird eine geeignete Bewirtschaftung solcher Fichtengebirgswälder immer wichtiger. Trotzdem gibt es noch offene Fragen zur Dynamik in diesen Beständen. Mit dem Ziel in Zukunft objektiver und differenzierter entscheiden zu können, wie Schutzwaldpflegeeingriffe in solchen Beständen durchgeführt werden sollten, werden in der folgenden Masterarbeit einige dieser Fragen aufgegriffen. Bisherige praktische Erfahrungen und wissenschaftliche Untersuchungen weisen darauf hin, dass eine Verbesserung der Resilienz und die langfristige Schutzfunktion dichter, einschichtiger Fichtenbeständen vor allem dann erzielt werden können, wenn frühzeitig eingegriffen wird (Rottmann 1985, Bebi et al. 2013). Es ist also aussichtsreicher stabile Bestände stabil zu erhalten, als instabile zu sanieren. Dies setzt allerdings voraus, dass früh genug eingegriffen wird (Zeller 1994). Es stellt sich aber die Frage nach dem idealen Eingriffszeitpunkt, falls dieser frühzeitige Eingriffszeitpunkt verpasst wurde. Denn viele dieser heute 70 bis 160 Jahre alten Fichtenbestände wurden bereits über längere Zeit nicht mehr bewirtschaftet und ein frühes Eingreifen wurde somit verpasst. Sie befinden sich häufig in der Selbstdifferenzierungsphase, in der die Kronen aufgrund des intensiven Konkurrenzkampfes bereits stark verkürzt sind und somit sowohl die Resistenz als auch die Resilienz bereits beeinträchtigt sind.

Aufgrund der geringeren Resistenz steigt das Risiko für Folgeschäden beim Anlegen von Schneisen. Um das Risiko für Folgeschäden zu minimieren, sollten gemäss «Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald» (NaiS) wenn möglich stabile Kleinkollektive oder stabile Einzelbäume gewählt werden (Frehner et al. 2005). Krumm (2011) hat die Dynamik in ebensolchen subalpinen fichtendominierten Beständen untersucht. Er konnte zeigen, dass die Basalfläche in fichtendominierten Beständen in den letzten Jahren zugenommen hat, die Stammzahl aber oft ähnlich geblieben ist. Dies bedeutet, dass diese Bestände noch dichter geworden sind und natürliche Verjüngung sich kaum etablieren kann. Daher sind Verjüngungseingriffe in solchen Beständen oft von zentraler Bedeutung. Die Frage nach Erfolgsfaktoren für Schutzwaldpflegeeingriffe in solchen Beständen und wie diese möglichst einfach erkannt werden können, ist trotzdem noch wenig untersucht. Die Kronenlänge wird im NaiS zwar als Indikator für stabile Ränder genannt und Zeller (1994) nannte zusätzlich den Schlankheitsgrad als Faktor für «widerstandskräftige Baumgestalten», allerdings gibt es kaum wissenschaftliche Publikationen, die diese bestätigen beziehungsweise untersucht haben, welche Faktoren für stabile Ränder in dichten, einschichtigen Fichtenbeständen entscheidend sind.

Gemäss Brang (2017) ist auch die Wachstumsreaktion der Fichte auf Freistellungen, welche durch Schlagränder verursacht wurden, nur sehr wenig untersucht. Daher hat er vier eher heterogene Schlagflächen analysiert und konnte zeigen, dass sich in den beiden nordexponierten Schlagflächen der Zuwachs von Randbäumen signifikant vom Zuwachs im Bestand unterscheidet. In den beiden südexponierten Flächen war allerdings kein signifikanter Unterschied zu erkennen, da aufgrund der Trockenheit wahrscheinlich mehr ins Wurzelwachstum investiert wurde. Die Frage, welche Bäume genau von der Freistellung profitieren können, wurde allerdings nicht thematisiert. In derselben Arbeit wurde auch die Verjüngung untersucht und es konnte gezeigt werden, dass es keinen signifikanten

Unterschied der Verjüngungsdichte zwischen schmalen und breiten Verjüngungsschlitzten gibt. Die Frage der Rolle des Randbereiches und der räumlichen Verteilung der Verjüngung blieben aber noch offen. (Brang et al. 2017). Der Gebrauch von dendrochronologischen Methoden zur Identifizierung von Störungsereignissen und den daraus folgenden Freistellungseffekten ist ebenfalls ein wichtiger Bestandteil von Untersuchungen zur Bestandesdynamik (Rubino und McCarthy 2004). Aus diesem Grund wird die Thematik der Freistellungseffekte ebenfalls aufgegriffen. Es gibt verschiedene Methoden zur Identifizierung von Freistellungseffekten. Eine oft verwendete Methode ist die Boundary-Line Methode nach Black und Abrams (2013), welche auch in dieser Arbeit verwendet wurde.

In der vorliegenden Masterarbeit werden verschiedene nordwestexponierte Verjüngungseingriffe in dichten, einschichtigen Fichtenwaldbeständen im Kanton Graubünden untersucht. Damit sollen folgende, noch offene Fragen zu solchen Beständen und deren Dynamik geklärt werden:

I. Kann, falls bis zum Kronenschluss kein Eingriff stattgefunden hat, ein Eingriffszeitpunkt identifiziert werden, welcher die Bestandesstabilität minimal beeinträchtigt?

Hypothese: Hat bis zum Kronenschluss kein Eingriff stattgefunden, sind im Feld keine Faktoren erkennbar, die Rückschlüsse auf einen besseren Eingriffszeitpunkt geben.

II. Können Faktoren bestimmt werden, die zu einer erhöhten Baummortalität in Schlagrändern beziehungsweise zu instabilen Rändern führen?

Hypothese: Brusthöhendurchmesser (BHD), Kronenlänge und Schlankheitsgrad können die Mortalität von Bäumen vorhersagen und zur Identifizierung stabiler Ränder beitragen. Bäume mit grossem BHD, tiefem Schlankheitsgrad und einer langen Krone haben eine höhere Einzelbaumstabilität und führen so zu stabileren Rändern.

III. Welchen Einfluss haben Verjüngungsschlitze auf den Durchmesserzuwachs? Bis zu welchem Abstand zum Verjüngungsschlitz können Bäume von einem solchen Eingriff profitieren?

Hypothese: Vor allem die Bäume, welche direkt am Rand zum Verjüngungsschlitz stehen, profitieren stark vom Eingriff. Bäume, die weiter im Bestand innen sind, können weniger von dieser Freistellung profitieren.

IV. Lassen sich durch die BHD-Verteilung des Bestandes Rückschlüsse auf dessen Altersverteilung machen?

Hypothese: Einschichtigkeit ist ein Indikator für Gleichaltrigkeit, vor allem wenn der BHD aller Bäume in derselben Grössenordnung liegt.

V. Gibt es eine Abhängigkeit der Auftretenswahrscheinlichkeiten der Verjüngung in Bezug auf dessen Standort im Verjüngungsschlitz?

Hypothese: In der Mitte des Verjüngungsschlitzes hat es am meisten Verjüngung. Diese nimmt zum Schlagrand beziehungsweise zum dichten Bestand hin ab.

VI. Wie können Verjüngungseingriffe mittels dendrochronologischen Analysen am besten datiert werden?

Hypothese: Vergangene Störungen können mit Hilfe der Boundary-Line Methode nach Black und Abrams (2013) datiert werden. Ein Verjüngungseingriff stellt eine solche Störung dar und daher sollte sich die Methode auch für die Datierung von Eingriffen eignen.

2. Material und Methoden

2.1. Untersuchungsgebiete

Die Untersuchungsgebiete wurden mit Hilfe der Regionalforstingenieure der Region Südbünden und dem Förster aus Davos ausgewählt. Grundsätzlich sollten es, wenn möglich dichte, einschichtige und fichtendominierte "Problembestände" höherer Lage sein, welche die folgenden fünf Kriterien erfüllen:

- I. Einschichtig und dicht (typischerweise Bestände, die nach Aufgabe der Landwirtschaft vor ca. 80-150 Jahren oder durch Aufforstungen entstanden sind)
- II. Subalpin oder hochmontan
- III. Fichtendominiert (>70% Fichte)
- IV. Eingriff bereits vor etwas längerer Zeit (vor 5-15 Jahren), damit nachvollzogen werden kann, wie diese Bestände auf den jeweiligen Eingriff reagiert haben
- V. Idealerweise Verjüngungsschlag mit Folgeschäden im Randbereich

Anhand dieser Kriterien konnten fünf Bestände im Osten des Kantons Graubünden ausgewählt werden (siehe Abbildung 1). Neben dem Bestand in Davos schienen die Bestände in Sur En und Zernez im Unterengadin, in Sta. Maria im Münstertal und in Pedecosta im Puschlav als die geeignetsten für die Fragestellung in dieser Masterarbeit.

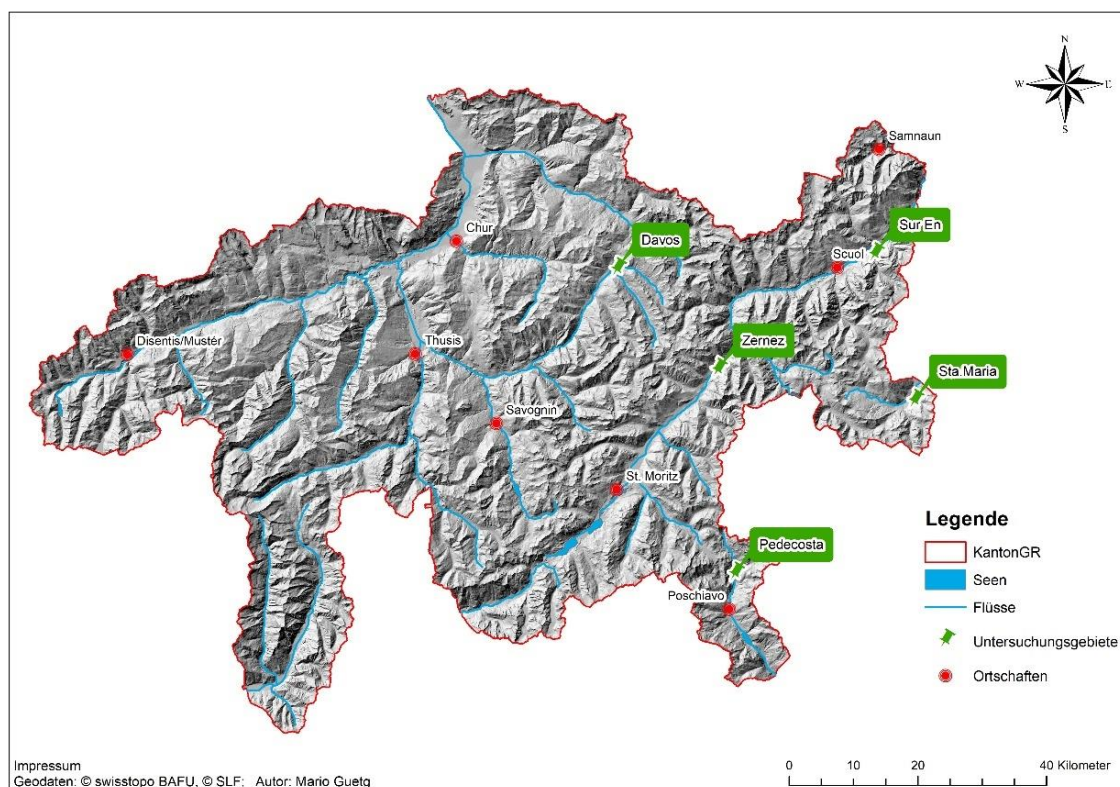


Abbildung 1: Karte des Kantons Graubünden mit den Untersuchungsgebieten

Der Bestand in Davos besitzt gemäss Bestandeskartierung des Kantons Graubünden einen Fichtenanteil von 90%. Im Jahr 2011 wurde mit einem Langstreckenseilkran eingegriffen, um die Verjüngung zu fördern. Der als Hochwald kartierte Bestand wird als einschichtig beschrieben. Der ebenfalls als Hochwald ausgeschiedene Bestand in Sur En besitzt einen Fichtenanteil von 80%. Der Eingriff mit dem Ziel der Verjüngungseinleitung und -förderung fand im Jahr 2010 mittels Seilkran statt.

Die Bestandesstruktur wurde anders als in Davos als stufig nach unten beschrieben. Mit einem Fichtenanteil von 70% ist der Bestand in Zernez jener mit dem kleinsten Fichtenanteil. Die Struktur des Hochwaldes wurde als stufig nach unten bezeichnet und im Jahr 2015 fand ein Eingriff mittels Seilkran zur Verjüngungsförderung statt. Im Bestand in Sta. Maria wurde im Jahr 2011 zur Verjüngungseinleitung mittels Langstreckenseilkran eingegriffen. Der Bestand wurde als einschichtiger Hochwald mit einem Fichtenanteil von 100% beschrieben. Der Fichtenanteil des Bestandes in Pedecosta liegt gemäss Bestandeskartierung des Kantons Graubünden bei 90%. 2009 wurde ein Langstreckenseilkran angelegt, um die Verjüngung im Hochwald von Pedecosta einzuleiten (Überblick siehe Tabelle 3 im Anhang). In den drei Beständen mit dem höchsten Fichtenanteil, das heisst in den Beständen von Davos, Pedecosta und Sta. Maria, mussten im Jahr nach dem Eingriff Zwangsnutzungen durchgeführt werden (Graubünden 2019). Gemäss NaiS befinden sich die Bestände von Davos, Sta. Maria, Sur En und Zernez in den kontinentalen Hochalpen und der Bestand von Pedecosta in den südlichen Zwischenalpen. Die alten Luftbilder aus dem Jahr 2006, welche noch vor dem Eingriff aufgenommen wurden (siehe Abbildungen 2, 4, 6, 8 und 10), wurden verwendet um die Einschätzungen der Forstfachleute, wonach es sich um dichte, fichtendominierte Bestände handelte, zu überprüfen. Die neuen Luftbilder aus dem Jahr 2015 zeigten die Folgen der Eingriffe (siehe Abbildungen 3, 5, 7, 9 und 11) und wurden verwendet, um die Probeflächen zu bestimmen.



Abbildung 2: Luftbild des Bestandes aus Davos aus dem Jahr 2006 (swisstopo 2020)



Abbildung 3: Luftbild des Bestandes aus Davos aus dem Jahr 2015 (swisstopo 2020)

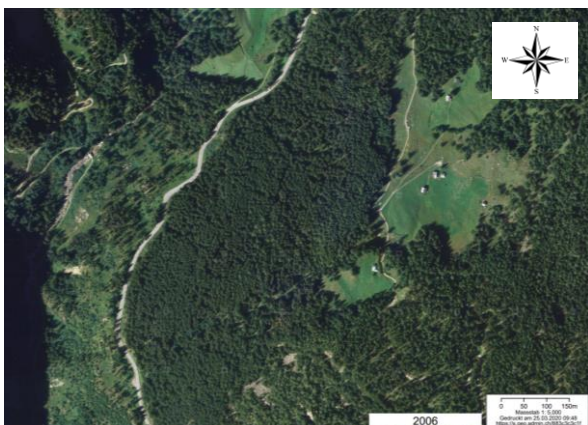


Abbildung 4: Luftbild des Bestandes aus Pedecosta aus dem Jahr 2006 (swisstopo 2020)



Abbildung 5: Luftbild des Bestandes aus Pedecosta aus dem Jahr 2015 (swisstopo 2020)



Abbildung 6: Luftbild des Bestandes aus Sta. Maria aus dem Jahr 2006 (swisstopo 2020)



Abbildung 7: Luftbild des Bestandes aus Sta. Maria aus dem Jahr 2015 (swisstopo 2020)



Abbildung 8: Luftbild des Bestandes aus Sur En aus dem Jahr 2006 (swisstopo 2020)



Abbildung 9: Luftbild des Bestandes aus Sur En aus dem Jahr 2015 (swisstopo 2020)



Abbildung 10: Luftbild des Bestandes aus Zernez aus dem Jahr 2006 (swisstopo 2020)



Abbildung 11: Luftbild des Bestandes aus Zernez aus dem Jahr 2015 (swisstopo 2020)

Der durchschnittliche Jahresniederschlag in den Beständen bewegt sich zwischen ca. 750-1'300 mm (siehe Tabelle 1) (Quelle: Meteo Schweiz). Der Bestand in Pedecosta hat mit 1'290 mm pro Jahr den höchsten Jahresniederschlag während es in Sta. Maria mit 747 mm pro Jahr am trockensten ist. Die Jahresmitteltemperatur liegt zwischen 1.1-3.9°C. Die Bestände von Sur En, Pedecosta und Davos haben eine Jahresmitteltemperatur von drei Grad oder mehr, während die Bestände in Zernez und Sta. Maria lediglich Jahresmitteltemperaturen von 1.2°C beziehungsweise von 1.1°C aufweisen.

Tabelle 1: Interpolierter durchschnittlicher Jahresniederschlag und durchschnittliche Jahresmitteltemperatur der verschiedenen Untersuchungsgebiete für die Periode 1981-2010 (Quelle: Meteo Schweiz)

Standort	Jahresniederschlag [mm/a]	Jahresmitteltemperatur [°C]
Davos	1'001	3
Pedecosta	1'290	3.9
Sur En	867	3.9
Sta. Maria	747	1.1
Zernez	850	1.2

In den fünf Untersuchungsgebieten wurden insgesamt 30 Probeflächen und 14 Transekte aufgenommen. Die Probeflächen befinden sich auf 1'367-1'703 m ü. M. (siehe Abbildung 49 im Anhang) und sind zwischen 10° und 41° steil (siehe Abbildung 12). Die Probeflächen in Zernez sind mit einer mittleren Hangneigung von 19° am wenigsten steil. Die Probeflächen von Pedecosta und Sta. Maria sind mit einer mittleren Hangneigung von über 30° die steilsten. Obwohl die Hangexposition kein Auswahlkriterium war, liegt die Hangexposition aller Probeflächen im nordwestlichen Bereich.

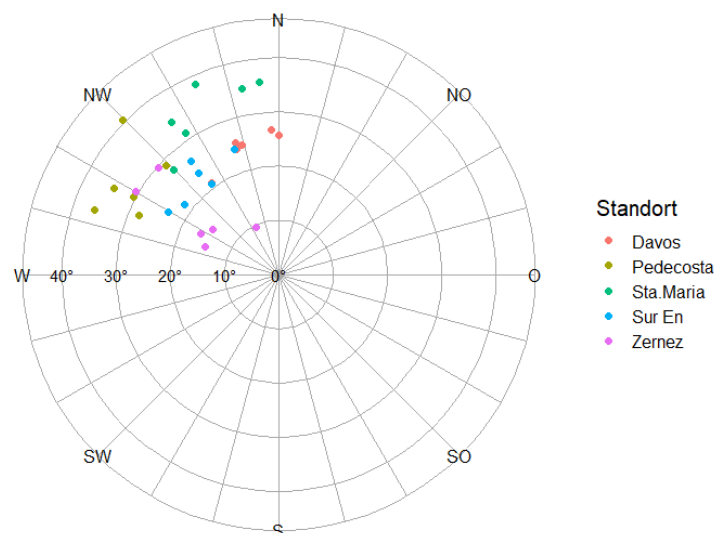


Abbildung 12: Exposition und Hangneigung der verschiedenen Probeflächen

Nebst den fünf neuen Untersuchungsgebieten der vorliegenden Arbeit wurden auch die Daten aus den Untersuchungsgebieten der Arbeit von Krumm (2011) aufgegriffen. Die Probeflächen wurden damals anhand der folgenden vier Kriterien ausgewählt:

- I. Subalpin (Höhen zwischen 1'700 und 2'100 m ü. M.)
- II. Fichtendominiert (> 80% Fichte)
- III. Keine aktive Bewirtschaftung und seit mindestens 1933 keine Holzernte mehr
- IV. Homogene und dichte Bestandesstruktur (Kronendeckungsgrad > 75%, Stammdichte > 400 Stämme pro ha mit BHD > 12 cm und Abwesenheit von Lücken > 5 m Breite)

Des Weiteren sollten die Probeflächen so nah wie möglich an den entsprechenden LFI-Flächen (in denen keine dendroökologischen Analysen durchgeführt werden durften) platziert werden. Anhand dieser Kriterien konnten 20 Probeflächen in Andeer, Ausserferrera, Davos, Derberonce, Flums, Grindelwald, Lenz, Olivone, Safien, Savognin, Soazza, Stels, Turtmann, Vals, Valzeina und Wengen bestimmt werden. Im Vergleich zu den Flächen, welche neu aufgenommen wurden, waren nicht alle Flächen aus der Arbeit von Krumm (2011) nordwestexponiert und auch die Höhenlage unterscheidet sich von den neuen Probeflächen (siehe Tabelle 4 im Anhang).

2.2. Feldaufnahmen

2.2.1. Probeflächen

Randflächen

Um den Randbereich zu untersuchen, wurden 10 m x 10 m grosse Probeflächen bestimmt. Diese wurden so abgesteckt, dass die äussere Abgrenzung der Randlinie zwischen Bestand und Schlag entsprach (siehe Abbildung 13). Wenn möglich sollten sowohl die äusseren als auch die inneren seitlichen Begrenzungen dieser Randflächen in der Falllinie liegen. Die Randflächen sollten sowohl gegen unten als auch gegen oben horizontal entlang der entsprechenden Höhenlinien verlaufen. In allen fünf Beständen wurden je drei solche 10 m x 10 m grosse Randflächen aufgenommen.



Abbildung 13: Randfläche in Davos

Bestandesflächen

Zu jeder Fläche im Randbereich des Schlags wurde auf derselben Höhe eine ebenfalls 10 m x 10 m grosse Fläche im geschlossenen Bestand - eine Bestandesfläche - aufgenommen (siehe Abbildung 14). Diese wurden angelegt, um Vergleichswerte für die Zuwächse zu bekommen. Es wurde angenommen, dass die Bestandesflächen längere Zeit nicht anthropogen beeinflusst wurden. So konnten Parameter aus dichten, einschichtigen Beständen mit den Resultaten aus den Randflächen verglichen werden. Wenn möglich sollte die Bestandesfläche 20 m von der vom Schlagrand weiter entfernten Seite der Fläche im Randbereich entfernt sein. Falls die betreffende Bestandesfläche allerdings aufgrund von Störungen oder zu geringer Stammzahl ungeeignet war, wurde sie zuerst nach oben beziehungsweise unten gespiegelt (siehe Sta. Maria 4 auf Abbildung 22). Falls diese Fläche ebenfalls ungeeignet war musste der Abstand zwischen den beiden Flächen verkleinert oder vergrössert werden (siehe Sur En 6 auf Abbildung 19) beziehungsweise die Fläche musste an eine passende Stelle verschoben werden (siehe Zernez 6 auf Abbildung 21). Alle Flächen wurden direkt vor Ort bestimmt und ausgemessen, weswegen kein Korrekturfaktor für die Hangneigung angewendet wurde. In allen fünf Beständen konnten schlussendlich je drei 10 m x 10 m grosse Bestandesflächen aufgenommen werden.



Abbildung 14: Bestandesfläche in Davos

Vergleichsflächen

Zusätzlich zu den Bestandesflächen wurden Vergleichsflächen aus der Arbeit von Krumm (2011) aufgegriffen, um die Baumparameter der Randflächen mit Flächen vergleichen zu können, die längere Zeit nicht bewirtschaftet wurden. Die Vergleichsflächen waren 22 m x 22 m gross und wurden in dichten, unbewirtschafteten Beständen aufgenommen (siehe Abbildung 15). Insgesamt wurden 20 solche 22 m x 22 m grosse Vergleichsflächen aufgenommen.



Abbildung 15: Vergleichsfläche (Krumm 2011)

Damit die Dynamik in den Randflächen besser untersucht werden konnte, wurden die Randflächen in drei Teilgebiete unterteilt (siehe Abbildung 16): der äussere, der mittlere und der innere Rand. Der äussere Rand entspricht den Bäumen, welche direkt am Schlagrand standen. Diese müssen aber nicht zwingend im ersten Drittel der Fläche stehen. Die Bäume im mittleren Rand können zwar noch nahe am Rand stehen, allerdings werden deren Kronen seitlich bereits teilweise durch die Kronen der Bäume des äusseren Randes verdeckt. Im inneren Rand sind die Bäume bereits sehr stark vom Schlagrand abgeschirmt und deren Kronen sind seitlich ganz durch die Kronen des mittleren und äusseren Randes verdeckt.

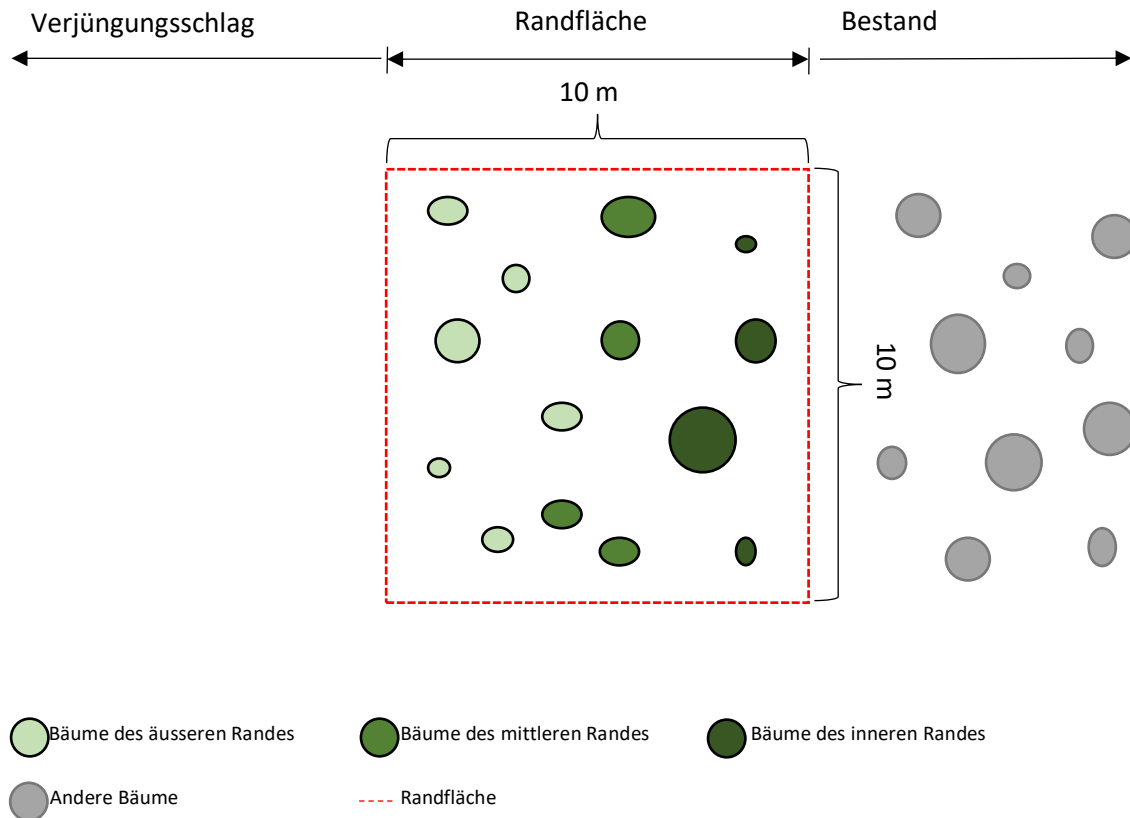


Abbildung 16: Einteilung der Randfläche in die drei Bereiche äusserer, mittlerer und innerer Rand

In den Randflächen, welche untersucht wurden, wurden die Koordinaten der schlagrandnäheren, äusseren unteren Ecke mit Hilfe eines Stonex (GNSS) eingelesen. In Flächen in denen eindeutige Fixpunkte erkennbar waren, wurden die Eckpunkte zusätzlich von Auge verifiziert.

Die Verjüngung wurde mittels Transekten aufgenommen, welche wenn möglich aus jeweils fünf Transektpunkten bestanden. Die fünf Transektpunkte befanden sich in der Mitte des Verjüngungsschlitzes, zwischen der Mitte und dem äusseren unteren Eckpunkt der Randfläche, dem äusseren unteren Eckpunkt der Randfläche, dem inneren unteren Eckpunkt der Randfläche und dem äusseren unteren Eckpunkt der Bestandesfläche. An Stellen, an denen die Lücke zu schmal war, als dass zwei Transektpunkte hineingepasst hätten ohne sich zu überschneiden, wurde auf den fünften Transektpunkt verzichtet (siehe beispielsweise oberster Transekt in Abbildung 20). Die ideale Anordnung der Probeflächen und Transekte wird anhand des Beispiels von Davos verdeutlicht (siehe Abbildung 18).

Die alten Luftbilder desselben Ausschnittes wurden verwendet, um sicherzugehen, dass an der Stelle, an der sich der Schlag beziehungsweise Schlagrand befindet, nicht bereits vor dem Eingriff eine Öffnung des Kronendaches befand (siehe Abbildung 17). Solche Öffnungen könnten die Resultate aus zwei wichtigen Gründen verfälschen. Zum einen würden die Bäume, welche bereits vor dem Eingriff am Rand einer solchen Öffnung standen, nicht mehr auf eine einstweilige Freistellung reagieren, da sie bereits freigestellt waren. Zum andern besteht das Risiko, dass bereits eine Vorverjüngung vorhanden gewesen sein könnte. Dies bedeutet, dass bereits Verjüngung vorhanden war, bevor der Eingriff erfolgte und sich diese nicht erst nach einer einstweiligen erhöhten Licht-/Wärmeverfügbarkeit etablieren konnte.



Abbildung 17: Luftbild vom Bestand in Davos aus dem Jahr 2006



Abbildung 18: Luftbild vom Bestand in Davos aus dem Jahr 2015 mit Anordnung der Probeflächen



Abbildung 19: Anordnung der Probeflächen in Sur En



Abbildung 20: Anordnung der Probeflächen in Pedecosta



Abbildung 21: Anordnung der Probeflächen in Zernez

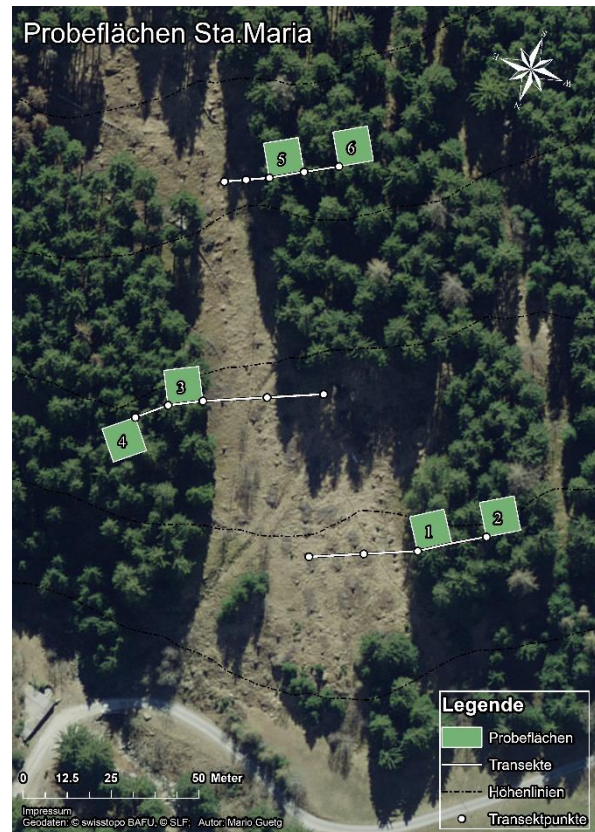


Abbildung 22: Anordnung der Probeflächen in Sta. Maria

2.2.2. Baumparameter

In den Randflächen wurden für alle Bäume mit einem BHD grösser als 12 cm der BHD, die Baumhöhe, die Kronenlänge, die Baumart und der Baumzustand bestimmt. In den Bestandesflächen wurde jeweils der BHD für die Bäume mit einem BHD grösser als 12 cm gemessen, der Anteil der Kronenlänge an der gesamten Baumhöhe geschätzt und die Baumart und der Baumzustand bestimmt. In den Vergleichsflächen aus der Arbeit von Krumm (2011) wurden der BHD der Bäume mit einem BHD grösser als 10 cm, die Baumhöhe, die Kronenlänge die Baumart und der Baumzustand aufgenommen. Der Baumzustand wird in die zwei Kategorien lebend und abgestorben unterteilt.

Der BHD wurde mit einer Kluppe oder falls der Umfang zu gross war mit einem BHD-Messband gemessen. Um die Kronenlänge und die Baumhöhe in den Randflächen zu bestimmen wurde mit dem Vertex III gearbeitet. Der Vertex III ist ein ultraschallbasiertes Messgerät, welches basierend auf dem trigonometrischen Prinzip und mit Hilfe der Distanz und dem Winkel zwischen Baumstamm und Baumkrone beziehungsweise Kronenansatz die Baumhöhe respektive die Kronenlänge bestimmen kann (Božić et al. 2005). Die Baumhöhe wurde mit dem Mittelwert aus drei Messungen bestimmt. Um die Kronenlänge zu bestimmen, wurde ebenfalls dreimal die Höhe vom Boden zum Kronenansatz gemessen und gemittelt und anschliessend von der Baumhöhe abgezogen. Aus dem Verhältnis von der Baumhöhe zum BHD konnte zusätzlich der Schlankheitsgrad bestimmt werden. Für die lebenden Bäume wurde der Kronenansatz als erster grüner Ast, welcher noch mit der Krone zusammenhängt definiert (Stierlin 1994). Die Kronenlänge ergibt sich daher aus der Länge von Kronenansatz bis zum Gipfel und kann als das «zusammenhängende Grün» bezeichnet werden. Da bei den abgestorbenen Bäumen keine grünen Äste mehr vorhanden waren, wurde in den Rand- und Bestandesflächen der unterste Ast, welcher noch als solcher identifiziert werden konnte, als Kronenansatz verwendet.

2.2.3. Verjüngung

Bei jedem Transektpunkt wurden in einem 5 m Radius die nächsten drei Verjüngungsansätze gesucht und deren Distanz zum Transektpunkt ausgemessen, um eine Proxy-Variable für die Verjüngungsdichte zu erhalten. Als Verjüngungsansatz gelten in diesem Fall Gehölzpflanzen die höher als 5 cm sind und aufgrund ihrer Grösse mit grosser Wahrscheinlichkeit nicht Teil einer Vorverjüngung sein können. Für jeden Transektpunkt wurden die Anzahl Stunden Junisonne pro Tag, die dominante Vegetation und die Vegetationskonkurrenz bestimmt. Für die einzelnen Verjüngungsansätze wurden deren Höhen, die Längen der Endtriebe, der Verbiss und die Baumart aufgenommen. Die dominante Vegetation besteht aus sechs verschiedenen Kategorien, nämlich Moose, Moose mit Heidelbeere, Wollreitgras, Wollreitgras mit Himbeere, Wollreitgras mit Farn und andere Gräser. Die Vegetationskonkurrenz beruht auf einer subjektiven Einschätzung mit den drei Stufen gering, mittel und gross. In den Vergleichsflächen wurden keine Transekte angelegt.

2.2.4. Dendrochronologische Aufnahmen

In den Randflächen wurde allen Bäumen mit einem BHD grösser als 20 cm ein Bohrkern entnommen. Falls dies im Vergleich zu anderen Flächen zu wenig Proben lieferte, wurden auch Bäume mit einem BHD kleiner als 20 cm beprobt. Für die Flächen im geschlossenen Bestand wurden lediglich Bohrkern der fünf Bäume mit dem grössten BHD entnommen. Die Bohrkern wurden mittels Zuwachsbohrer entnommen, auf ein Brett geklebt und beschriftet. Bei der Entnahme wurde darauf geachtet, dass stets seitlich gebohrt wurde, um Druckholz zu vermeiden (Grissino-Mayer 2003). Des Weiteren wurden die Bäume so nahe wie möglich am Boden beprobt. Die Bohrkern wurden nach Bestand, Versuchsfläche, Baumnummer, Höhe der Probeentnahme und Teilgebiet beschriftet. Die Bestände wurden mit den Anfangsbuchstaben des Untersuchungsgebietes beschrieben (d = Davos, p = Pedecosta, s = Sur En, st = Sta. Maria, z = Zernez). Die Teilgebiete wurden mit R für den äusseren Rand, M für den mittleren Rand und B für den inneren Rand abgekürzt. Zum Beispiel steht d1-1-50-R für einen Bohrkern des ersten Baumes, der ersten Versuchsfläche aus dem Bestand in Davos, welcher auf einer Höhe von 50 cm entnommen wurde und sich im äusseren Randbereich befindet. In den Vergleichsflächen wurden alle Bäume mit einem BHD grösser als 10 cm beprobt. Zum einen wurde ein Bohrkern so nahe wie möglich am Boden und zum anderen einer auf 1.3 m Höhe entnommen. Die Bohrkern wurden ebenfalls mittels Zuwachsbohrer entnommen, auf ein Holzbrett geklebt und beschriftet.

2.3. Laborarbeit

Die Bohrkern wurden in der Werkstatt und im Dendrologielabor der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft in Birmensdorf aufgearbeitet und ausgemessen. Insgesamt wurden 226 Bohrkern analysiert (43 aus Davos, 49 aus Pedecosta, 47 aus Sta. Maria, 45 aus Sur En und 41 aus Zernez). Bevor die Proben analysiert werden konnten, mussten sie mit einer zunehmenden Körnung abgeschliffen werden, damit die einzelnen Jahrringe möglichst gut erkennbar wurden. In diesem Fall wurde mit einer Körnung von 80, 120, 240 und falls nötig 320 gearbeitet. Je höher die Körnung wurde, desto feiner wurde die abgeschliffene Oberfläche und desto besser konnten die Jahrringe ausgemessen werden. Danach konnten die Jahrringe mittels der TSAP-Win Software und mit Hilfe eines LINTAB Messtisches ausgemessen werden. Die Messgenauigkeit des Messtisches belief sich dabei auf 0.01 mm. Die Bohrkern der Vergleichsflächen wurden gemäss der Beschreibung von Krumm (2012) mit einem halbautomatischen Messsystem, welches am Institut für Waldwachstum (IWW) in Freiburg entwickelt wurde, ausgemessen. Die Messgenauigkeit belief sich dabei ebenfalls auf 0.01 mm.

2.4. Datenanalyse

2.4.1. Dendrochronologische Analyse

Nachdem die Bohrkerne ausgemessen waren, mussten diese noch kreuzdatiert werden. Eines der am weitesten verbreiteten Computerprogramme für die Kreuzdatierung ist das 1982 von Richard L. Holmes verfasste Programm COFECHA. Dieses verwendet Zeitreihenkorrelationstechniken, um die Kreuzdatierung zu überprüfen. Allerdings gilt zu beachten, dass die Korrelation von Baumart zu Baumart, von Standort zu Standort usw. sehr unterschiedlich sein kann. Daher kann COFECHA nicht als objektive Entscheidungshilfe für die Frage, ob eine Jahrringserie richtig kreuzdatiert wurde, eingesetzt werden. Es ist vielmehr ein Hilfsmittel, um eine Entscheidung zu treffen. Die endgültige Entscheidung liegt trotzdem noch beim Dendrochronologen (Grissino-Mayer 2001). Die für die Jahrringserien dieser Arbeit verwendeten Einstellungen in COFECHA sind in Tabelle 2 dargestellt. Als Referenzjahrringserien wurden Jahrringserien aus dem betreffenden Bestand ausgewählt, welche eine hohe optische Korrelation aufwiesen und mit hoher Wahrscheinlichkeit richtig datiert und ausgemessen wurden.

Tabelle 2: Einstellungen für die Kreuzvalidierung der Jahrringserien mit Hilfe des Programmes COFECHA

1 Rigidity of SPLINE for filtering	32
2 SEGMENT length to examine	30 lagged 15
3 AUTOREGRESSIVE MODEL	A
4 TRANSFORM series to logarithms	Y
5 CORRELATION critical level	0.4226 Type P
6 MASTER dating series, save	N
7 LIST ring measurements	N
8 Parts of output to print	1234567
9 Omit absent rings in master series & segment corr	Y
F First-difference transform of data	N

Die erfolgreich kreuzdatierten Jahrringserien wurden in die Statistiksoftware R (Version 3.5.1) importiert (R Development Core Team 2011). Unter der Verwendung von R Studio (Version 1.2.5001) wurden in einem ersten Schritt alle Jahrringserien mit der Funktion *detrend()* des R-Paketes *dplR* vereinheitlicht. Dies bedeutet, die Wachstumstrends wurden standardisiert und die altersbedingten Abnahmen der Jahrringbreiten korrigiert (Bunn und Korpela 2015). Die vereinheitlichten Jahrringbreiten wurden in einem neuen Datensatz gespeichert, in welchem diese nicht mehr in 1/100 mm, sondern als ein Zuwachsindex (ring-width index RWI) angegeben werden. Ein RWI-Wert von eins entspricht dem mittleren Zuwachs. Somit sind Werte grösser als eins überdurchschnittliche Zuwächse und Werte kleiner als eins unterdurchschnittliche Zuwächse.

Für das Alter der Bäume, welches anfangs lediglich aus der Summe der Jahrringe einer Jahrringserie bestand, musste sowohl eine Korrektur für die Bohrhöhe als auch für das Verfehlen des Marks angewendet werden (Duncan 1989). Die Korrektur für die Bohrhöhe wurde analog zu Könz (2018) berechnet. Basierend auf der Höhen-Altersbeziehung der Fichtenverjüngung der hochmontanen und subalpinen Höhenstufe von Brang und Duc (2002) wurde folgende lineare Gleichung verwendet:

$$\text{Alter} = \frac{189.5 + \text{Höhe [cm]}}{10.2} \quad (1)$$

Die Korrektur für das Verfehlen des Marks basierte auf einer optischen Schätzung mit Hilfe einer Klarsichtfolie mit verschiedenen Jahrringbreiten. Die Summe aus der Anzahl Jahrringe der jeweiligen Jahrringserie, dem Korrekturfaktor der Bohrhöhe und dem Korrekturfaktor für das Verfehlen des Marks ergaben eine Schätzung für das tatsächliche Alter des jeweiligen Baumes.

2.4.2. Freistellungseffekte

Ein Freistellungseffekt oder auch Release-Effekt genannt, ist die Reaktion eines Baumes auf eine abrupte, positive Veränderung der Konkurrenzbedingungen. Bei einem Holzschlag werden zum Beispiel direkte Konkurrenten gewisser Bäume entfernt, wovon jene Bäume profitieren können, die nicht gefällt wurden. Diese wurden zuvor zum Teil unterdrückt, wurden nun aber mindestens teilweise freigestellt (Lorimer und Frelich 1989). Die Identifizierung von Freistellungseffekten gehört zu den fundamentalsten dendrochronologischen Methoden zur Rekonstruktion vergangener Störungen (Black und Abrams 2004). Es ist anzunehmen, dass es nach einem Verjüngungsschlag bei Bäumen der Randfläche zu eben solchen Freistellungseffekten kommen kann. In einem ersten Schritt wurde daher versucht mit Hilfe der Boundary-Line-Methode nach Black und Abrams (2003) die durch den Verjüngungsschlag verursachten Freistellungseffekte zu identifizieren und den Eingriff anhand dieser korrekt zu datieren. Das Vorgehen richtete sich stark an jenem der Bachelorarbeit von Markus Schorn (2018). Da in den Vergleichsflächen kein Eingriff stattgefunden hat, wurde auf eine Analyse der Freistellungseffekte verzichtet.

In einem ersten Schritt wurde die Boundary-Line gefittet. Diese ist baumartenspezifisch und repräsentiert die baumphysiologisch maximal mögliche Zuwachsveränderung in Abhängigkeit des vorangegangenen Zuwachses. Damit können Freistellungen in Abhängigkeit zum vorangegangenen Wachstum gestellt werden. Dies bedeutet, falls der jährliche Zuwachs eines Baumes bereits gross und nahe am physiologischen Maximum war, kann dessen Reaktion beziehungsweise Zuwachsveränderung auf eine Freistellung nicht so stark ausfallen, wie wenn der jährliche Zuwachs sehr klein war. Für das Fitten der Boundary-Line wurden dieselben 202 Jahrringserien beziehungsweise 67'676 Jahrringbreiten der elf Standorte der internationalen Jahrring Datenbank ITRDB verwendet wie in der Arbeit von Schorn (2018) (siehe Tabelle 4 im Anhang). Bevor die Boundary-Line gefittet werden konnte, mussten zuerst der vorherige Zuwachs (prior growth, pg) und die prozentuale Wachstumsveränderung (percent growth change, %GC) berechnet werden. Anders als in Schorn (2018) wurden der vorherige Zuwachs und die prozentuale Wachstumsveränderung jeweils über vier Jahre und nicht über zehn Jahre gemittelt. Dies geschah aufgrund der Tatsache, dass der letzte Eingriff der untersuchten Verjüngungsschläge nur vier Jahre zurück lag. Motta (1999) unterstützt diesen Entscheid, denn auch er verwendete einen Zeitraum von vier Jahren für das Mitteln des vorherigen Zuwachses und der prozentualen Wachstumsveränderung von Fichten der subalpinen Stufe. Wichtig ist, dass die Periode für die Berechnung des vorherigen Zuwachses und der prozentualen Wachstumsveränderung für das Fitten der Boundary-Line identisch mit jener der zu untersuchenden Jahrringserien ist.

In diesem Fall entspricht der vorherige Zuwachs dem Mittelwert der vorangegangenen vier Jahre. Die prozentuale Wachstumsveränderung wurde wie in der nachfolgenden Formel berechnet (2). Wobei M1 den Mittelwert aus dem Zuwachs des betreffenden Jahres und den vorangegangenen drei Jahren darstellt und M2 aus dem Mittelwert der darauffolgenden vier Jahre berechnet wird (siehe Abbildung 23).

$$\%GC = \frac{M2 - M1}{M1} \quad (2)$$

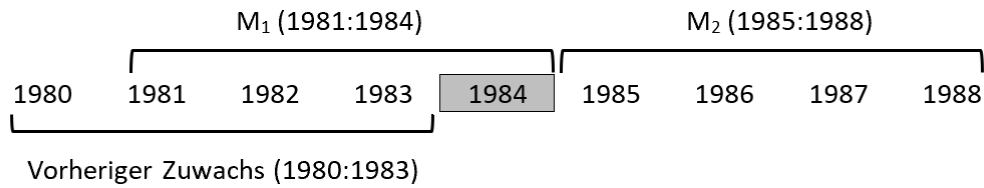


Abbildung 23: Veranschaulichung zur Berechnung der prozentualen Wachstumsveränderung und dem vorherigen Wachstums für einen Zeitraum von vier Jahren

Um die Boundary-Line zu fitten, wurde zuerst nach aufsteigendem vorherigem Zuwachs sortiert und in Segmente von 0.5 mm unterteilt. Die Jahre mit den höchsten zehn Werten für die zugehörigen prozentualen Wachstumsveränderungen pro Segment wurden benutzt, um die Boundary-Line zu definieren. Damit ein möglichst guter Fit gewählt werden konnte, wurden lineare, exponentielle, logarithmische und potenzielle Modelle getestet und verglichen (siehe Abbildung 50 im Anhang). Der Fit mit dem niedrigsten AIC Wert wurde dann verwendet, um die Kurve zu beschreiben. Das exponentielle Modell hatte in diesem Fall den tiefsten AIC Wert und wurde deshalb für die Boundary-Line verwendet. Die Gleichung für die Boundary-Line lautete: $y = 620.63 \times e^{(-0.99x)}$. In Abbildung 24 sind alle Datenpunkte der ITRDB mit der gefitteten Boundary-Line dargestellt. Die Datenpunkte, welche rot eingefärbt sind, wurden für die Berechnung der Boundary-Line verwendet.

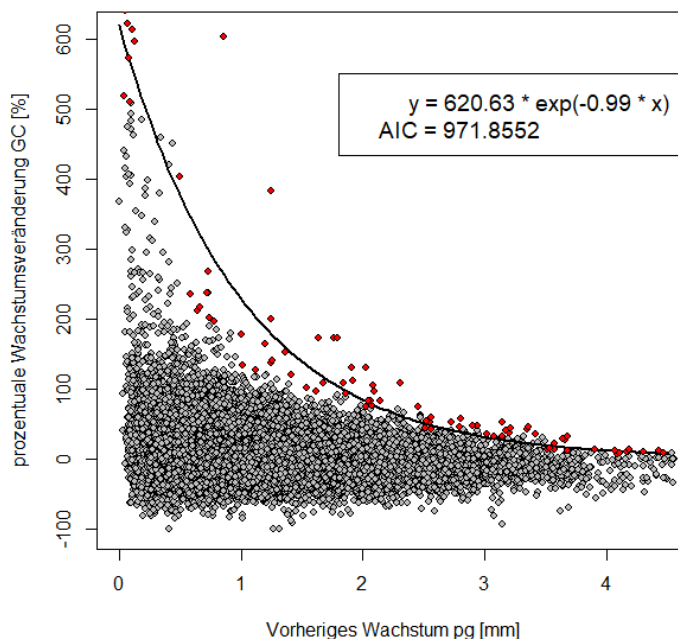


Abbildung 24: Mittels exponentiellen Modells gefittete Boundary-Line für die Fichte. Dargestellt sind alle ausgewählten Punkte der ITRDB, wobei die roten Punkte für das Fitten verwendet wurden.

Im nächsten Schritt wurden die prozentualen Wachstumsveränderungen und die vorherigen Zuwächse für die Bestände aus Davos, Zernez, Pedecosta, Sta. Maria und Sur En berechnet. Die prozentualen Wachstumsveränderungen wurden anschliessend isoliert betrachtet, um potenzielle Freistellungseffekte zu bestimmen. Da es sich bei den prozentualen Wachstumsveränderungen um laufende Mittelwerte handelt, schwingen sich diese stets zu einem Maximum oder Minimum auf beziehungsweise ab (Motta et al. 1999, Black und Abrams 2004). Für die Identifizierung von Freistellungseffekten gemäss Black und Abrams (2003) sind allerdings nur die Maxima mit einer

prozentualen Wachstumsveränderung von über 10% entscheidend (siehe Abbildung 25). Diese werden für alle Bestände beziehungsweise alle Bäume extrahiert und ins Verhältnis zur Boundary-Line gesetzt.

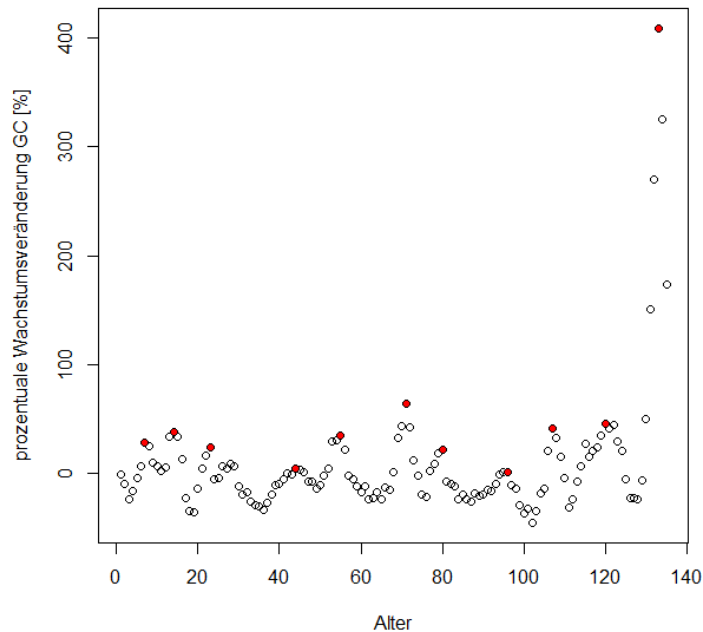


Abbildung 25: Maxima der prozentualen Wachstumsveränderungen über 10% (rot) für den Baum p1-1-20-R

Nach Black und Abrams (2003) handelt es sich um moderate Freistellungen (moderate releases), falls das Verhältnis der maximalen prozentualen Wachstumsveränderungen zum jeweiligen Boundary-Line Wert zwischen 20 und 49.99% liegt. Bei maximalen Werten über 50% handelt es sich um bedeutende Freistellungen (major releases) (siehe Abbildung 26). Gemäss Motta (1999) sind moderate Freistellungen solche mit einem Verhältnis von Boundary-Line Wert zu prozentualer Wachstumsveränderung von 50-100% und bedeutende Freistellungen solche mit einem Verhältnis von Boundary-Line Wert zu prozentualer Wachstumsveränderung von über 100%.

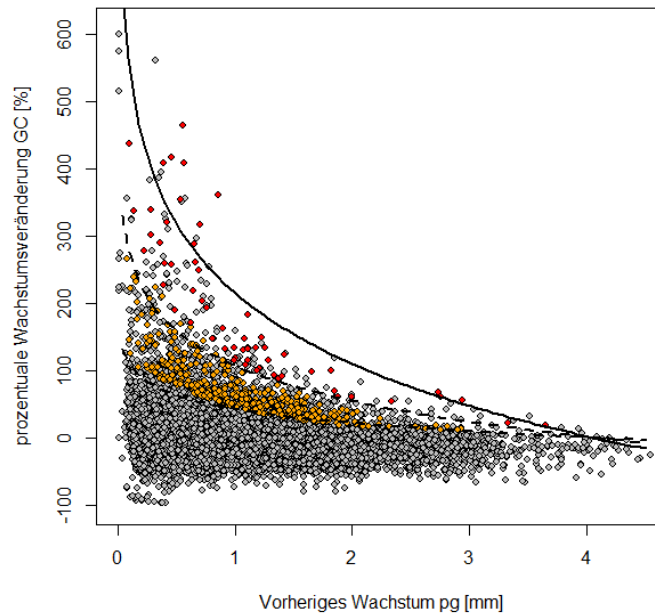


Abbildung 26: Prozentuale Wachstumsveränderung und vorheriges Wachstum der Bestände in Davos, Zernez, Pedecosta, Sur En und Sta. Maria. In Rot sind die bedeutenden Freistellungen und in orange die moderaten Freistellungen nach Black und Abrams (2013) eingezeichnet

Da beide Definitionen darauf beruhen, dass jene Jahre mit maximalen prozentualen Wachstumsveränderung herausgefiltert werden, erlaubten die Datierungen der Freistellungseffekte keine klaren Rückschlüsse auf das Eingriffsjahr. In Abbildung 25 wird klar, dass die Maxima nicht ideal für die Datierung der Freistellungen sind, da die Freistellungen in den meisten Fällen eher früher zu finden wären und nicht erst bei den grössten Wachstumsveränderungen. Anhand vorhandener Literatur sollten daher neue Kriterien für die Datierung von Freistellungseffekten ausgearbeitet werden.

Als erstes wurden die prozentualen Wachstumsveränderungen, die kleiner als 10% sind, ebenfalls ausgeschlossen. Gemäss Black und Abrams (2003) handelt es sich bei Verhältnissen der prozentualen Wachstumsveränderungen zum passenden Boundary-Line Wert von über 50% um bedeutende Freistellungen und bei Werten zwischen 20 und 49.99% um moderate Freistellungen. Diese Annahme wurde nach einer ersten Überprüfung weiterhin als korrekt interpretiert und als Kriterium zur Datierung von moderaten und bedeutenden Freistellungseffekten übernommen. Allerdings wurde in den Daten ersichtlich, dass Bäume unterschiedlich schnell auf die Freistellung reagieren können und die maximale Wachstumsveränderung eher ungeeignet ist, um den Eingriffszeitpunkt zu datieren.

In einem ersten Versuch wurde angenommen, dass die maximale Zuwachsveränderung zwei Jahre nach der Freistellung erfolgt (Dale 1968, Nowacki und Abrams 1997). Die Resultate dieser Annahme erlaubten bereits genauere Rückschlüsse auf das Eingriffsjahr, allerdings zeigten in Pedecosta lediglich vier von elf und in Sur En vier von 19 Bäumen eine bedeutende Freistellung. Daher wurde in einem zweiten Versuch das erste Jahr mit einer Zuwachsveränderung von über 50% respektive 20% als Freistellungsjahr datiert. Brang (2017) konnte zeigen, dass die durch die Freistellung verursachten Zuwachssteigerungen der betroffenen Fichten erst nach 7-10 Jahren abklingt und auch bei der Eiche wurde beobachtet, dass die Freistellungseffekte erst nach 10-12 Jahren abklingen (Cutter et al. 1991). Daher wurde nach Jahren gesucht, die in den vorhergehenden Jahren keine Freistellungseffekte aufzeigten, so soll sichergestellt werden, dass der erste Freistellungseffekt über 20% beziehungsweise 50% extrahiert wird. Theoretisch müssten auch die Jahre nach der Freistellung Freistellungseffekte

aufzeigen, allerdings musste in dieser Arbeit darauf verzichtet werden diese in die Kriterien einzubeziehen, denn die verzögerte Reaktion der Bäume auf die Freistellung und der Umstand, dass die Eingriffe erst kürzlich erfolgten, verhindern eine Berechnung der prozentualen Wachstumsveränderung ab dem Jahr 2015.

Zusammengefasst bedeutet dies für die überarbeiteten Kriterien, dass eine moderate Freistellung ebenfalls ein Verhältnis von Boundary-Line zu prozentualer Wachstumsveränderung zwischen 20% und 50% haben sollte und die prozentuale Zuwachssteigerung in den Jahren vor der Freistellung kleiner als 20% gewesen sein muss. Für die bedeutenden Freistellungen gelten dieselben Kriterien, das Verhältnis von Boundary-Line zu prozentualer Zuwachssteigerung sollte allerdings grösser als 50% sein und die prozentuale Zuwachssteigerung in den Jahren vor der Freistellung kleiner als 50%. Im Vergleich zu der Methode von Black und Abrams werden so nicht die Maxima extrahiert, sondern die ersten Werte, welche die Grenzwerte überschreiten. Für moderate und bedeutende Freistellungen gilt, dass die prozentuale Wachstumsveränderung mindestens 10% betragen muss.

2.4.1. Statistische Analyse

Die statistische Datenanalyse wurde ebenfalls mit Hilfe der Statistiksoftware R (Version 3.5.1) unter Verwendung von R Studio (Version 1.2.5001) durchgeführt (R Development Core Team 2011). Für die statistische Analyse wurden die jeweiligen CSV-Dateien importiert und so aufgearbeitet, dass diese statistisch ausgewertet werden konnten. In einem ersten Schritt wurde eine Korrelationsmatrix mit allen numerischen Variablen mit Hilfe der *chart.Correlation()* Funktion geplottet, um einen Überblick zu erhalten. Um den Einfluss der verschiedenen Baumparameter auf den Baumzustand zu untersuchen wurde mit dem Mann-Whitney-U-Test, auch Wilcoxon-Rangsummentest genannt, gearbeitet. Die dafür verwendete Funktion in R heisst *wilcox.test()*. Damit werden die beiden Gruppen lebend und abgestorben auf Unterschiede bezüglich Baumparameter untersucht. Für den Vergleich der Zuwächse in den verschiedenen Bereichen und den Vergleich der verschiedenen Transektpunkte musste mit dem Kruskal-Wallis-Test gearbeitet werden, da der Unterschied von mehr als zwei Gruppen statistisch analysiert werden sollte. Mit Hilfe dieses Tests konnte untersucht werden, ob es signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Gruppen gab. Falls dieser Test auf signifikante Unterschiede verwies, wurde mit Hilfe der Funktion *pairwise.wilcox.test()* genauer untersucht, welche Gruppen signifikante Unterschiede zu anderen aufzeigten. Um die Signifikanz der Unterschiede graphisch zu überprüfen, wurden in den betreffenden Boxplots die Notches (Kerben) eingeblendet. Diese zeigen das 95%-Konfidenzintervall um den Median an. Falls sich die Kerben zweier Boxplots nicht überlappen, deutet dies auf einen signifikanten Unterschied hin (Chambers et al. 1983).

Falls keine Unterschiede, sondern Zusammenhänge quantifiziert werden sollten, wurde grundsätzlich mit einer linearen Regression überprüft, ob es eine lineare Abhängigkeit gibt. Dies geschah mit der Funktion *lm()*. Falls die Daten aller Bestände zugleich untersucht wurden, wurde mit der Funktion *lme()* gearbeitet. Diese erlaubt es zufällige Effekte, wie in diesem Beispiel den Standort, in die lineare Funktion miteinzubeziehen. Sowohl für die statistische Untersuchung des Einflusses des Alters und der Kronenlänge auf die Zuwachsreaktion der Randbäume als auch für die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen BHD und Alter wurde die Funktion *lme()* verwendet. Die Annahme der Normalverteilung wurde sowohl für die lineare Funktion mit zufälligen Effekten als auch für jene ohne zufällige Effekte mit Hilfe von Quantil-Quantil-Diagrammen (Q-Q-Plots) und Tukey-Anscombe-Diagrammen (TA-Plots) überprüft. Da es sich bei den abhängigen Variablen stets um eine kontinuierliche Variable handelte, wurden diese falls nötig mittels logarithmischer Transformation aufgebessert (Gatecki und Burzykowski 2013).

Falls die Distanz zwischen einem oder mehreren der drei aufgenommenen Verjüngungsansätze und dem jeweiligen Transektpunkt grösser als 5 m war, so wurde diese Distanz nicht ausgemessen. Trotzdem besitzt der Umstand, dass im Umkreis von 5 m weniger als drei Verjüngungsansätze vorkommen einen hohen Informationsgehalt bezüglich der Verjüngungsdichte. Damit dieser nicht verloren geht und damit dieser in die statistische Auswertung eingebunden werden konnte, wurden die Distanzen, welche grösser als 5 m waren durch den Wert 501 cm ersetzt.

Um die Zuwachsveränderung zu quantifizieren, wurden zuerst die jeweiligen Mittelwerte der Zuwächse nach dem Eingriff mit denjenigen vor dem Eingriff verglichen. Die Mittelwerte wurden sowohl von einander subtrahiert, was die Differenz der Zuwächse lieferte, als auch dividiert, um eine prozentuale Zuwachsveränderung zu berechnen. Dies geschah sowohl für die absoluten Jahrringbreiten als auch für die standardisierten Jahrringbreiten. Der Mittelwert der Zuwächse wurde für zwei verschieden lange Perioden berechnet. Für beide gilt, dass der Zeitraum für den Mittelwert vor und nach dem Eingriff gleich gross sein musste. Im ersten Ansatz wurde die Periode auf vier Jahre festgelegt. Im zweiten Ansatz entsprach der Zeitraum der Differenz zwischen dem Jahr 2019 und dem Eingriffsjahr im jeweiligen Bestand. Das heisst zum Beispiel für *Pedecosta* (Eingriffsjahr = 2009) wurden die beiden Mittelwerte der Jahrringbreiten aus den 10 Jahren vor dem Eingriff (1999-2008) und den 10 Jahren nach dem Eingriff (2009-2018) berechnet.

3. Resultate

3.1. Baumparameter

Die Probeflächen der vorliegenden Arbeit enthielten total 292 Bäume. Es wurden 282 Fichten, 6 Waldföhren (*Pinus sylvestris*) und 4 Lärchen (*Larix decidua*) erfasst. Insgesamt waren 26 Bäume abgestorben und 266 Bäume lebend. Da der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit auf der Dynamik der Fichte in fichtendominierten Beständen lag, wurden die Lärchen und Föhren für die folgenden Analysen nicht beachtet. Trotzdem wurden diese Arten ebenfalls aufgenommen, um ein komplettes Bild der jeweiligen Probefläche zu erhalten. In der Randfläche wurden 160 Fichten (17 abgestorben, 143 lebend) und in der Bestandesfläche 122 Fichten (9 abgestorben, 113 lebend) aufgenommen. Abbildung 51 im Anhang zeigt einen Überblick der verschiedenen numerischen Parameter und deren Korrelationen. In den Vergleichsflächen der Arbeit von Krumm (2011) wurden die Baumparameter von insgesamt 1'412 Bäumen aufgenommen, von diesen waren 388 abgestorben und 1'024 lebend. Es wurden 1'324 Fichten, 40 Lärchen, 15 Vogelbeeren (*Sorbus aucuparia*), 9 Arven (*Pinus cembra*) und 5 Waldföhren erfasst. Für die nachfolgenden Analysen wurden allerdings lediglich die 1'089 Fichten mit einem BHD grösser als 12 cm verwendet.

Mit 12% aller Bäume war die Mortalität im äusseren Rand der Randfläche am höchsten und rund doppelt so hoch wie jene der Bestandesfläche (siehe Abbildung 27). Die räumliche Verteilung der abgestorbenen Bäume in den Randflächen zeigte, dass der Anteil abgestorbener Bäume mit zunehmender Distanz zum Schlagrand abnahm. In der Bestandesfläche war der Anteil aber wieder höher als im inneren und mittleren Rand der Randflächen. Im mittleren Rand belief sich der Anteil der abgestorbenen Bäume auf 10%, im inneren Rand auf 0% und in der Bestandesfläche auf 7%. In den Vergleichsflächen war die Mortalität mit 27% deutlich höher als in den Probeflächen aus der vorliegenden Arbeit.

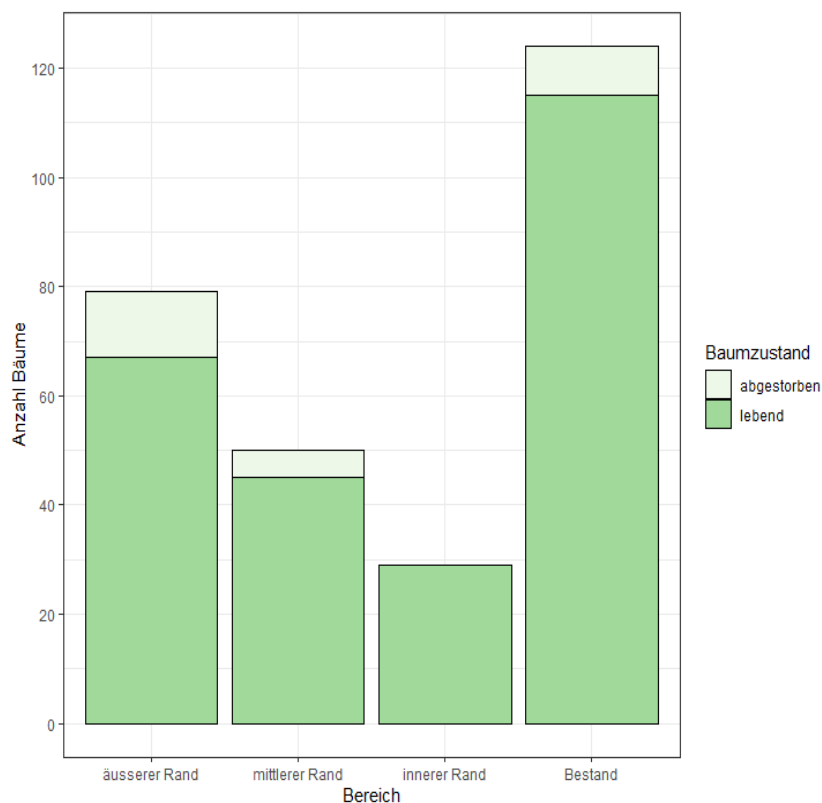


Abbildung 27: Anteil an abgestorbenen Bäumen in den verschiedenen Bereichen

Die statistische Analyse der 160 Fichten in den Randflächen und der 1'089 Fichten aus den Vergleichsflächen zeigten signifikante Unterschiede in BHD, Schlankheitsgrad und Kronenlänge zwischen den beiden Baumzuständen. Es gab einen signifikanten Unterschied zwischen den lebenden und den abgestorbenen Bäumen der Randfläche bezüglich des BHDs. Der Wilcox-Rangsummentest ergab, dass der Unterschied zwischen den beiden Gruppen einen P-Wert von $5.13e-05$ aufweist und somit hochsignifikant ist. Abgestorbene Bäume hatten im Median einen BHD von 0.17 m, während die lebenden Randbäume im Median einen BHD von 0.28 m aufwiesen (siehe Abbildung 28). Der Wilcox-Rangsummentest für den Vergleich des BHDs der lebenden und abgestorbenen Bäume der Vergleichsflächen zeigten ebenfalls einen signifikanten Unterschied ($P\text{-Wert} = 2.60e-11$) zwischen den beiden Kategorien (siehe Abbildung 29). Der BHD der abgestorbenen Bäume betrug im Median 0.18 m und jener der lebenden 0.26 m.

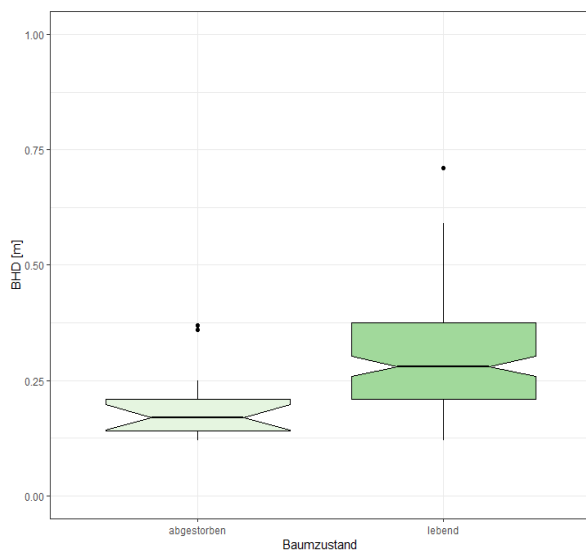


Abbildung 28: BHD in Abhängigkeit des Baumzustandes in den Randflächen

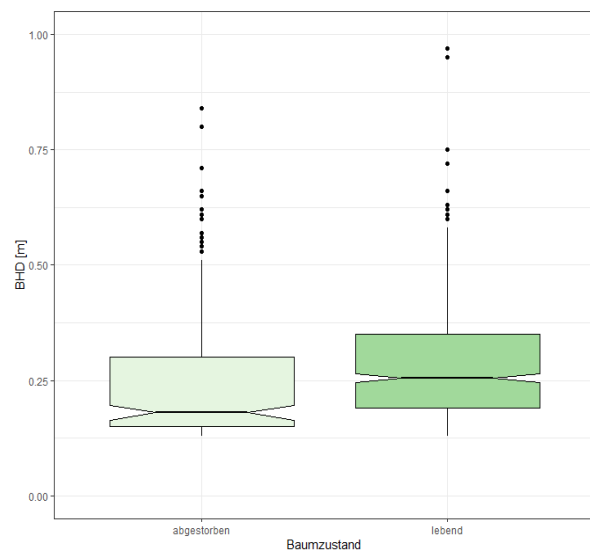


Abbildung 29: BHD in Abhängigkeit des Baumzustandes in den Vergleichsflächen

Der Unterschied der Kronenlängen der Randflächen der beiden Kategorien war ebenfalls hochsignifikant (siehe Abbildung 30). Der P-Wert des Wilcox-Rangsummentests beträgt $9.566e-07$. Dies bedeutet, dass die abgestorbenen Bäume der Randfläche die kürzeren Kronen aufwiesen als die lebenden Bäume der Randfläche. Im Median hatten die abgestorbenen Bäume der Randfläche eine Kronenlänge von 27%, während die lebenden Bäume der Randfläche im Median eine Kronenlänge von 51% aufwiesen. Die Kronenlängen in den Vergleichsflächen unterschieden sich ebenfalls signifikant voneinander ($P\text{-Wert} = 0.0214$) (siehe Abbildung 31). Der Median der Kronenlänge der abgestorbenen Bäume der Vergleichsflächen lag bei 40%, derjenige der lebenden Bäume lag bei 52%.

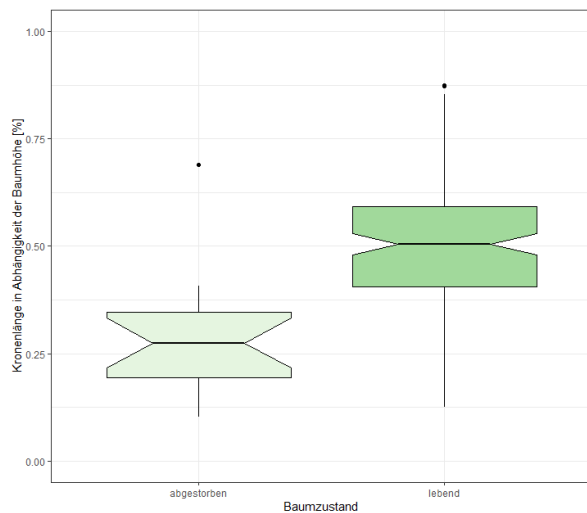


Abbildung 30: Kronenlänge in Abhängigkeit des Baumzustandes in den Randflächen

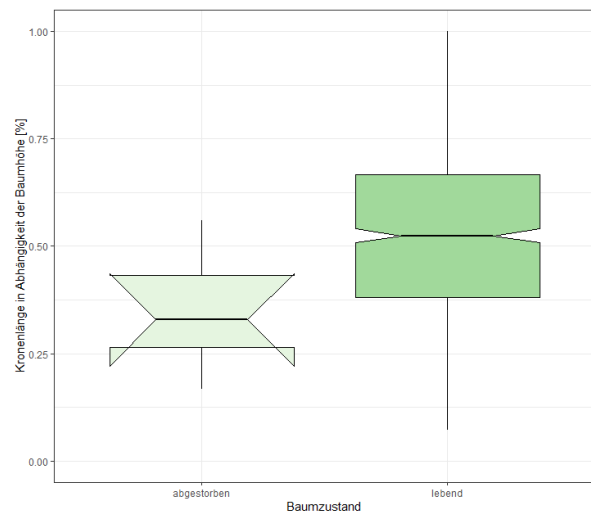


Abbildung 31: Kronenlänge in Abhängigkeit des Baumzustandes in den Vergleichsflächen

Der Wilcoxon-Rangsummentest zur Untersuchung des Unterschiedes des Schlankheitsgrades zeigte wie auch jener des BHDs und der Kronenlänge einen signifikanten Unterschied (P-Wert = 0.033) zwischen den abgestorbenen und lebenden Bäumen der Randfläche (siehe Abbildung 32). Fichten im Randbereich, welche abgestorben waren, hatten im Median den höheren Schlankheitsgrad als lebende Fichten. Die abgestorbenen Fichten wiesen im Median einen Schlankheitsgrad von 96.7 auf, jener der lebenden lag im Median bei 82.9. Die lebenden Bäume der Vergleichsfläche waren signifikant schlanker als die abgestorbenen (P-Wert von 1.63e-08) (siehe Abbildung 33). Allerdings war es in den Vergleichsflächen umgekehrt als in den Bestandesflächen und die abgestorbenen Bäume hatten den tieferen Schlankheitsgrad als die lebenden. Im Median lag der Schlankheitsgrad der abgestorbenen Bäume bei 60 und jener der lebenden bei 67.

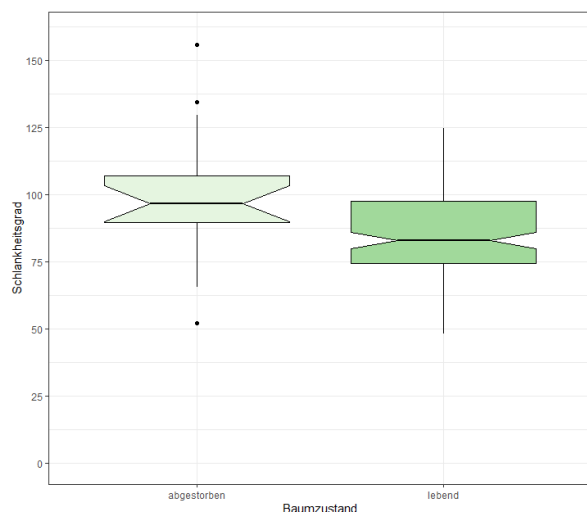


Abbildung 32 Schlankheitsgrad in Abhängigkeit des Baumzustandes in den Randflächen

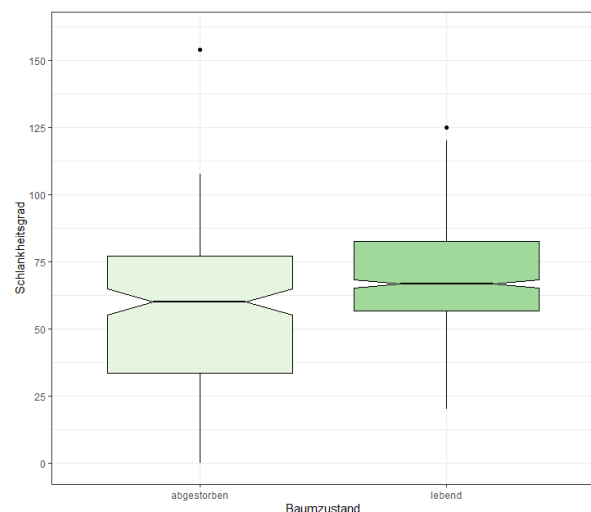


Abbildung 33: Schlankheitsgrad in Abhängigkeit des Baumzustandes in den Vergleichsflächen

3.2. Dendrochronologische Analyse

Von den 226 Bohrkernen konnten 199 (Davos 40, Pedecosta 42, Sta. Maria 35, Sur En 42 und Zerne 40) kreuzdatiert werden, so dass sie für die statistische Auswertung und zur Untersuchung von Freistellungseffekten verwendet werden konnten. Insgesamt wurden 26'822 Jahrringe ausgemessen, die datiert werden konnten. Nach der Korrektur des Alters in Abhängigkeit der Bohrhöhe und des Verfehlens des Marks konnte das mittlere Alter des jeweiligen Bestandes bestimmt werden. Das Alter konnte lediglich für 130 Bohrkern (65%) bestimmt werden, denn viele Bäume waren innen zu faul, als dass bis zum Mark hätte gebohrt werden können.

Der älteste Bestand beziehungsweise jener mit den Bäumen mit dem höchsten Durchschnittsalter war derjenige von Sta. Maria. Die Bäume waren dort im Schnitt 186 Jahre alt. Der Bestand in Zerne war mit durchschnittlich 147 Jahre alten Bäumen der jüngste Bestand. Das Durchschnittsalter der übrigen drei Bestände lag in Sur En bei 159 Jahren, in Pedecosta bei 175 Jahren und in Davos bei 178 Jahren. Über alle Bestände lag das Durchschnittsalter bei 170 Jahren. Die Verteilung des Alters ist von Bestand zu Bestand unterschiedlich. Während in Sta. Maria, Davos, Sur En und Pedecosta ein klarer Peak der Anteile erkennbar ist, gibt es in Zerne eine breitere Streuung mit zwei Peaks (siehe Abbildung 34). Der älteste Baum, dessen Mark erreicht wurde, steht im Bestand in Pedecosta und stammt aus dem Jahr 1769.

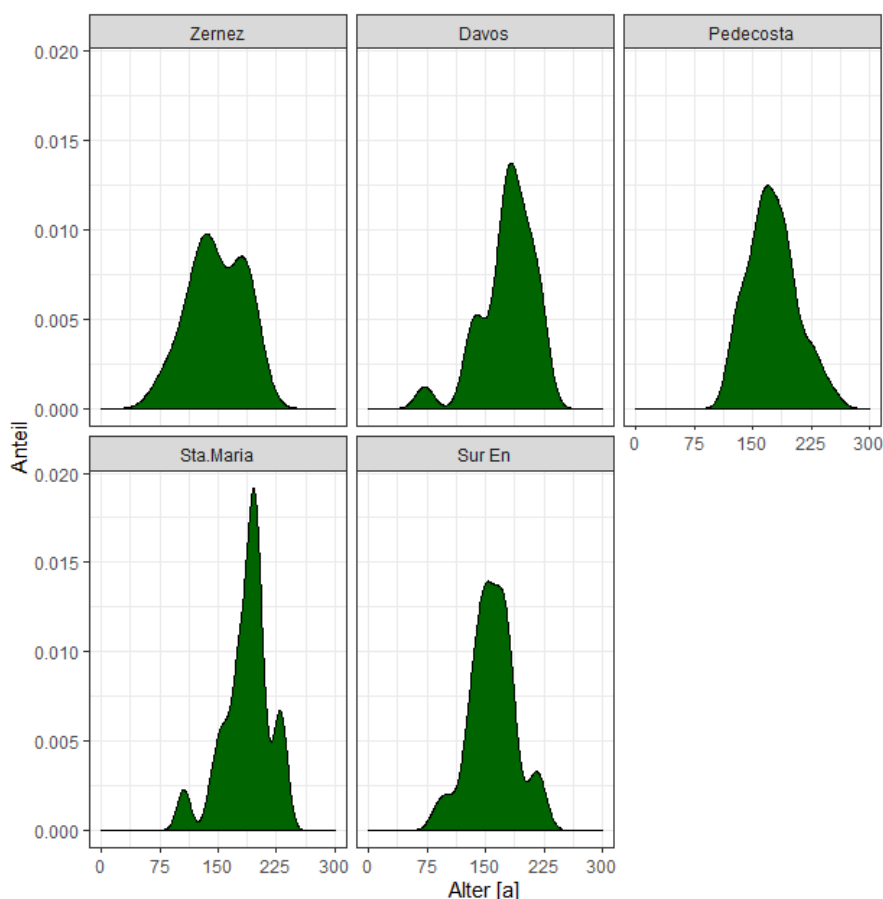


Abbildung 34: Altersverteilung der fünf untersuchten Bestände

Um die Abhängigkeit des BHDs vom Alter zu untersuchen wurden die beiden Variablen gegeneinander aufgetragen und zur Veranschaulichung mit einer einfachen linearen Regression verglichen (siehe Abbildung 52 im Anhang). Dieser Vergleich impliziert eine Zunahme des BHDs um rund 1 mm pro Jahr. Für die statistische Auswertung wurde die Korrelation mit Hilfe einer linearen Funktion mit dem Standort als zufälligem Effekt getestet. Der Zusammenhang zwischen BHD und Alter ist sehr diffus. Zum Beispiel weisen zwei fast gleich alte Bäume aus dem Bestand von Sta. Maria sehr unterschiedliche BHD auf. Im Alter von ca. 175 Jahren weist der eine einen BHD von ungefähr 15 cm auf während der andere einen BHD von beinahe 60 cm hat. Trotzdem zeigt die lineare Gleichung mit dem Standort als zufälligem Effekt über alle Bestände einen signifikanten Zusammenhang zwischen BHD und Alter (P-Wert = 0.0012). Die Annahme der Normalverteilung wurde mit Hilfe des Q-Q-Plots und des TA-Plots überprüft (siehe Abbildung 53 im Anhang). Zur Überprüfung wurden die beiden Diagramme auch für den log-transformierten BHD erstellt (siehe Abbildung 54 im Anhang). Die Diagramme der log-transformierten Daten zeigten die bessere Verteilung der Residuen und daher wurde eine lineare Funktion mit zufälligen Effekten für die log-transformierten Daten durchgeführt (siehe Abbildung 35). Diese zeigte einen hochsignifikanten Zusammenhang zwischen BHD und Alter (P-Wert = $4e-04$).

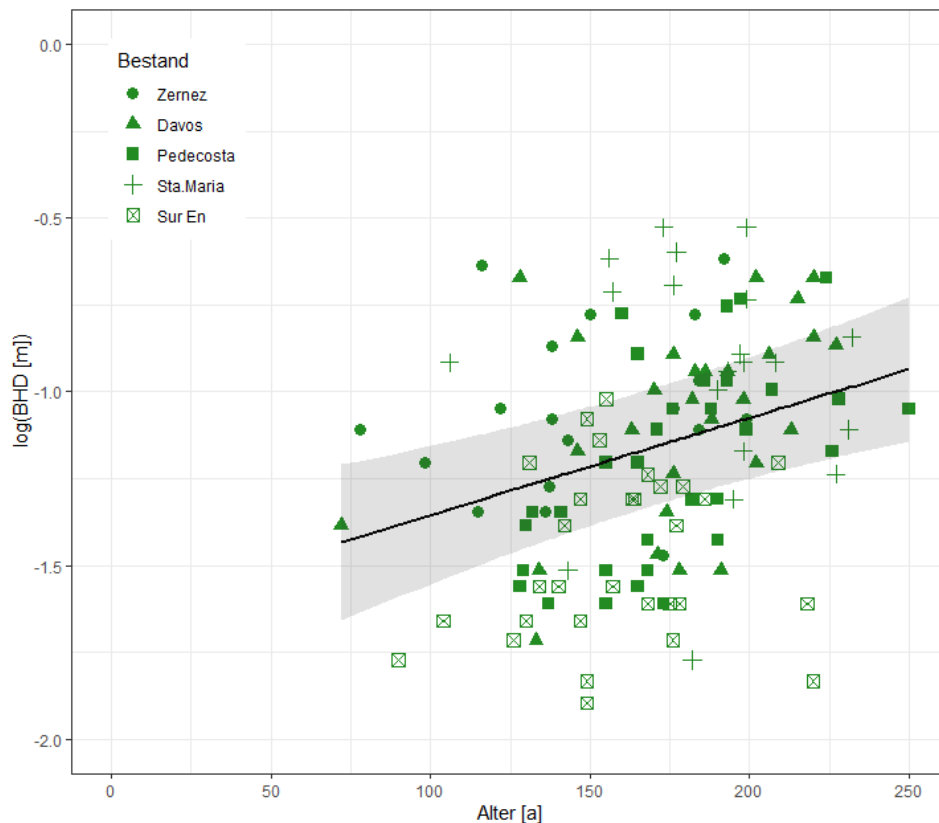


Abbildung 35: Log-transformierter BHD in Abhängigkeit des Alters, lineare Funktion mit dem Standort als zufällige Variable, in grau wird das 95%-Vertrauensintervall aufgezeigt

Die Abhängigkeit des log-transformierten BHDs vom Alter war stark standortsabhängig (siehe Abbildung 35). Sur En hatte im Schnitt den kleinsten BHD, die Bäume zeigten allerdings eine schöne Korrelation zum Alter. Auf der anderen Seite besitzt Sta. Maria im Median den grössten BHD, der Bestand zeigte allerdings keine eindeutige Abhängigkeit vom Alter. Sowohl der Bestand von Zernez als auch jener von Davos zeigten eine diffuse Verteilung, trotzdem liess sich eine leichte Korrelation feststellen. Der Bestand von Pedecosta zeigte die höchste Korrelation und besitzt eine sehr breite Verteilung der BHD. Daher wurden die Standorte anstelle einer linearen Funktion mit dem Standort als zufälligen Effekt noch einzeln betrachtet und mit einer einfachen linearen Funktion ohne zufällige

Effekte untersucht (siehe Abbildung 36). Hier wurde klar ersichtlich, dass vor allem Davos und Pedecosta die erwartete Abhängigkeit aufzeigten. Die Bestände von Sta. Maria, Zernez und Sur En konnten den erwarteten eindeutigen Zusammenhang nicht aufzeigen. In Sta. Maria gab es sogar eine negative Korrelation zwischen BHD und Alter. Die lineare Gleichung zeigte nur bei zwei der fünf Probeflächen einen signifikanten Zusammenhang zwischen dem log-transformierten BHD und dem Alter. Die Bestände aus Davos (P-Wert = 0.0166) und Pedecosta (P-Wert = 0.000571) waren die einzigen, die eine signifikante positive Korrelation aufzeigten. Die Bestände von Sur En und Zernez zeigten einen positiven aber nicht signifikanten Zusammenhang zwischen BHD und Alter. Der Bestand von Sta. Maria zeigte sogar eine negative Korrelation zwischen dem log-transformierten BHD und dem Alter.

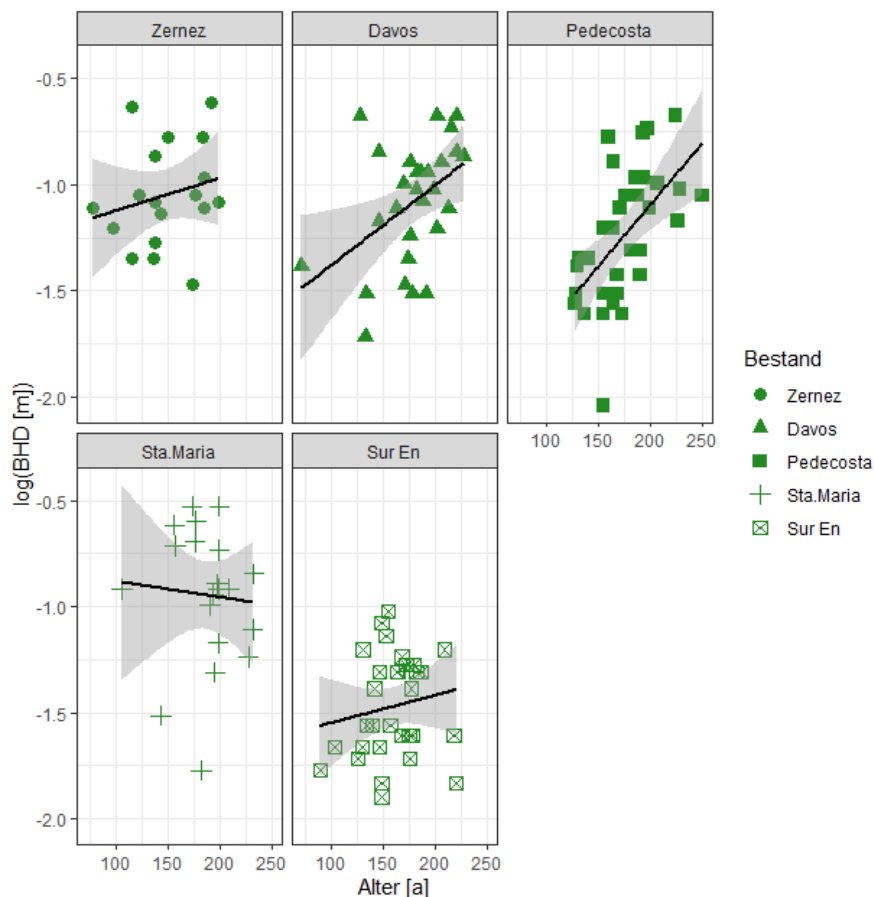


Abbildung 36: BHD in Abhängigkeit des Alters für die fünf Bestände der vorliegenden Arbeit, in grau wird das 95%-Vertrauensintervall aufgezeigt

Die Bäume der Vergleichsfläche zeigten ebenfalls einen hochsignifikanten Zusammenhang zwischen log-transformiertem BHD und Alter (P-Wert < 0.0001) (siehe Abbildung 37). Die Korrelation wurde ebenfalls mit einem linearen Modell mit dem Standort als zufälligem Effekt überprüft. Die Verteilung der Punkte war noch diffuser als jene der Daten aus den fünf Beständen aus der vorliegenden Arbeit. Die Abhängigkeit des BHDs war noch weniger ausgeprägt als für die fünf untersuchten Bestände aus der vorliegenden Arbeit. Des Weiteren fällt auf, dass das Alter der Bäume der Vergleichsflächen hauptsächlich zwischen 50 und 150 Jahren liegt während jenes der Bäume der Bestände aus der vorliegenden Arbeit eher zwischen 150 und 200 Jahren lag.

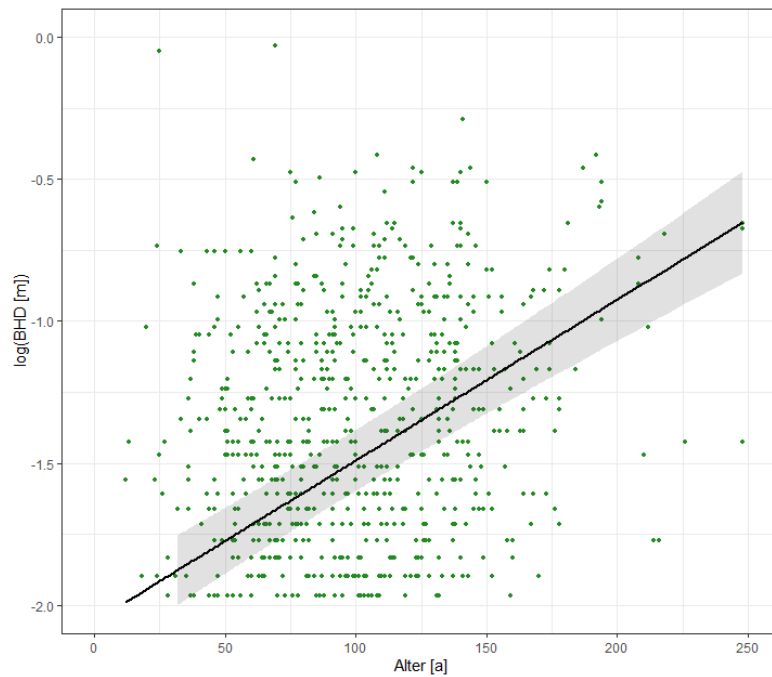


Abbildung 37: Log-transformierter BHD in Abhängigkeit des Alters, lineare Funktion mit dem Standort als zufällige Variable für die Daten aus den Vergleichsflächen, in grau wird das 95%-Vertrauensintervall aufgezeigt

Die Bäume der Vergleichsflächen wurden nebst einer linearen Funktion mit dem Standort als zufälligem Effekt ebenfalls noch einzeln für jeden Standort betrachtet und mit einer einfachen linearen Funktion ohne zufällige Effekte untersucht (siehe Abbildung 38). Diese zeigten ebenfalls sehr unterschiedliche Resultate, wobei lediglich 13 der 20 Bestände einen signifikanten Zusammenhang zwischen BHD und Alter zeigten (siehe Tabelle 6 im Anhang).

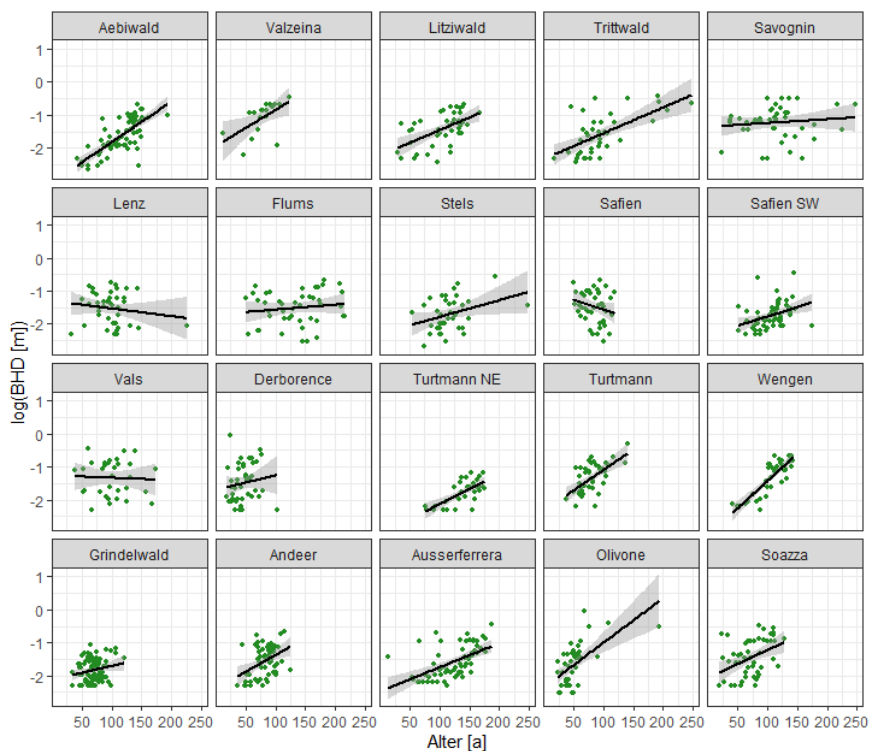


Abbildung 38: BHD in Abhängigkeit des Alters für die Daten aus den Vergleichsflächen, in grau wird das 95%-Vertrauensintervall aufgezeigt

3.3. Freistellungseffekte

Die räumliche Analyse der Jahrringbreiten zeigte, dass die Zuwachsveränderung der Bäume, welche auf die jeweiligen Freistellungen erfolgte, auf den äusseren Rand beschränkt war (siehe Abbildung 39). Mit einer Zuwachssteigerung, welche im Median 52% betrug, reagierten die Bäume des äusseren Randes stark auf die jeweiligen Freistellungen. Doch bereits der Median des mittleren Randes liess auf keinerlei Zuwachssteigerungen durch den Eingriff schliessen. Der innere Rand und der Bestand zeigten je eine Zuwachssteigerung von 1%. Die P-Werte des Wilcoxon-Tests zur statistischen Analyse des Unterschiedes zwischen dem äusseren Rand und den anderen Bereichen betragen 0.00019 für den mittleren Rand, 0.00090 für den inneren Rand und $2.2 \cdot 10^{-7}$ für den Bestand. Dies zeigte, dass die Zuwachsveränderung des äusseren Randes sich hochsignifikant von den übrigen drei Bereichen unterschied. Auch wenn die standardisierten Jahrringbreiten beziehungsweise die Mittelwerte für einen Zeitraum von vier Jahren angewendet wurden, waren die Unterschiede vom äusseren Rand zu den anderen drei Bereichen hochsignifikant (siehe Abbildungen 55-57 im Anhang). Allerdings waren die Unterschiede weniger signifikant, wenn die prozentuale Zuwachsveränderung auf den Mittelwerten aus den vier Jahren vor und nach dem Eingriff beruhten.

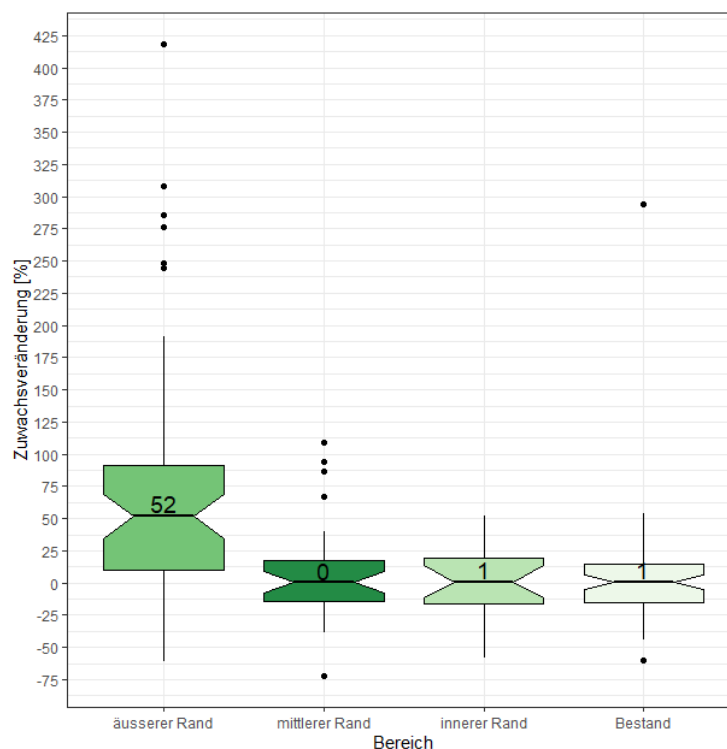


Abbildung 39: Zuwachsveränderung in Prozent für die verschiedenen Bereiche, Zeitraum vor = nach = 2019 - Zeitpunkt des Eingriffes

Da lediglich der äussere Rand eine Zuwachssteigerung zeigte und auf den jeweiligen Eingriff reagierte, wurde dieser zusätzlich getrennt für die verschiedenen Bestände betrachtet. Sowohl die Resultate für die Zuwachsveränderung der einzelnen Bestände als auch jene der Freistellungseffekte basieren daher auf den Jahrringdaten der 60 Randbäume im äusseren Randbereich. In Pedecosta und Zernez waren es je 11 Randbäume, in Sta. Maria 7, in Sur En 19 und in Davos 12 Randbäume. Die Zuwachsveränderung des äusseren Randes der einzelnen Bestände bewegte sich im Median zwischen 11% und 90% (siehe Abbildung 40). Der Bestand in Davos konnte im Median am wenigsten von der Freistellung profitieren. Der Bestand in Pedecosta hingegen wies im Median eine Zuwachssteigerung von 90% auf und konnte somit am meisten von der Freistellung profitieren. Dieselbe Untersuchung

wurde auch für die RWI-Daten und mit dem Zeitraum für den Mittelwert von vier Jahren durchgeführt (siehe Abbildungen 58-60 im Anhang). Wie schon die Resultate zur Zuwachsveränderung in den verschiedenen Bereichen zeigten auch die Resultate zu den Zuwachsveränderungen des äusseren Bereichs für die verschiedenen Bestände, welche auf dem Mittelwert der Messungen aus vier Jahren beruhten, eine geringere Zuwachssteigerung als jene, die auf der Differenz zwischen dem Eingriffsjahr und dem Jahr 2019 basierten.

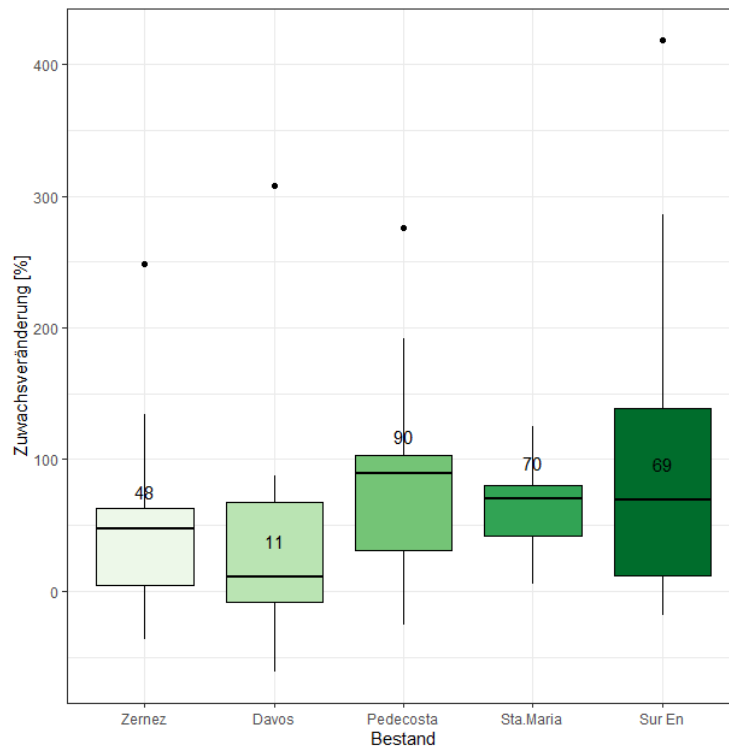


Abbildung 40: Zuwachsveränderung des äusseren Randes in Prozent für die verschiedenen Untersuchungsgebiete, basierend auf nicht standardisierten Jahrringserien mit Zeitraum vor = nach = 2019 - Zeitpunkt des Eingriffes

Für die statistische Untersuchung zur Zuwachsreaktion der Randbäume in Abhängigkeit der Kronenlänge und des Alters wurde die abhängige Variable, die Zuwachsdifferenz, ebenfalls log-transformiert, denn sowohl der TA-Plot als auch der Q-Q Plot zeigten eine bessere Verteilung der Residuen für die log-transformierte Zuwachsdifferenz (siehe Abbildungen 61-64 im Anhang). Die Zuwachsdifferenz entspricht der Differenz der mittleren Zuwächse von vor und nach dem Eingriff, wobei die Anzahl Jahre für den Mittelwert der Differenz zwischen Eingriffsjahr und dem Jahr 2019 entspricht. Damit alle Zuwachsdifferenzen log-transformiert werden konnten, mussten diese mit einer Konstante addiert werden, sodass keine negativen Werte mehr auftraten. Diese Konstante «a» wurde so gewählt, dass der kleinste Wert für die Zuwachsdifferenz nach der Addition dem Wert eins entsprach.

Die Abhängigkeit der log-transformierten Zuwachsdifferenz von der Kronenlänge liess auf keinen signifikanten Zusammenhang zwischen Zuwachsreaktion und Kronenlänge schliessen (P-Wert = 0.7164) (siehe Abbildung 41). Die lineare Funktion mit dem Standort als zufälligen Faktor, welche gefittet wurde, zeigte eine leicht negative Tendenz und ein sehr breites Vertrauensintervall. Bäume mit einer längeren Krone zeigten also geringfügig kleinere Zuwachsdifferenzen. Die Kronen der meisten Randbäume waren bereits verkürzt und die Länge betrug meist weniger als die Hälfte der gesamten Baumlänge. Trotzdem reagierten diese teilweise sehr stark auf die Freistellung durch den Eingriff, während andere Bäume mit längeren Baumkronen weniger stark reagierten.

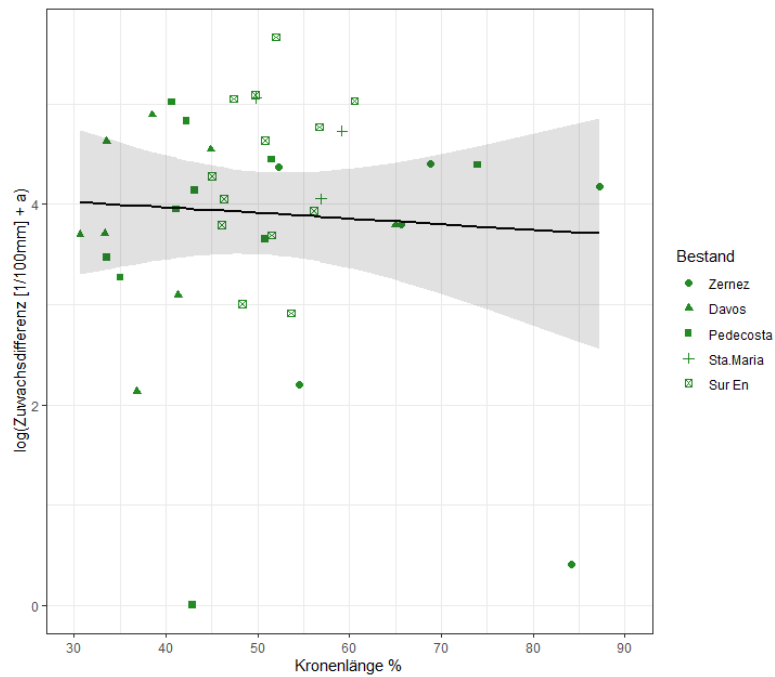


Abbildung 41: Log-transformierte Zuwachsdifferenz der einzelnen Bäume im äusseren Rand in Abhängigkeit der Kronenlänge, in grau wird das 95%-Vertrauensintervall aufgezeigt

Die statistische Auswertung der Abhängigkeit der log-transformierten Zuwachsdifferenz vom Alter ergab, dass es keinen signifikanten Zusammenhang zwischen Alter und Zuwachsdifferenz gab (P-Wert = 0.2487) (siehe Abbildung 42). Die Zuwachsreaktion der Randbäume in Abhängigkeit des Alters liess trotzdem eine Abhängigkeit erkennen. Ältere Bäume reagierten tendenziell weniger stark auf die Freistellung als die jüngeren. Für die statistische Auswertung wurde ebenfalls die lme-Funktion von R mit dem Standort als Zufallsfaktor verwendet.

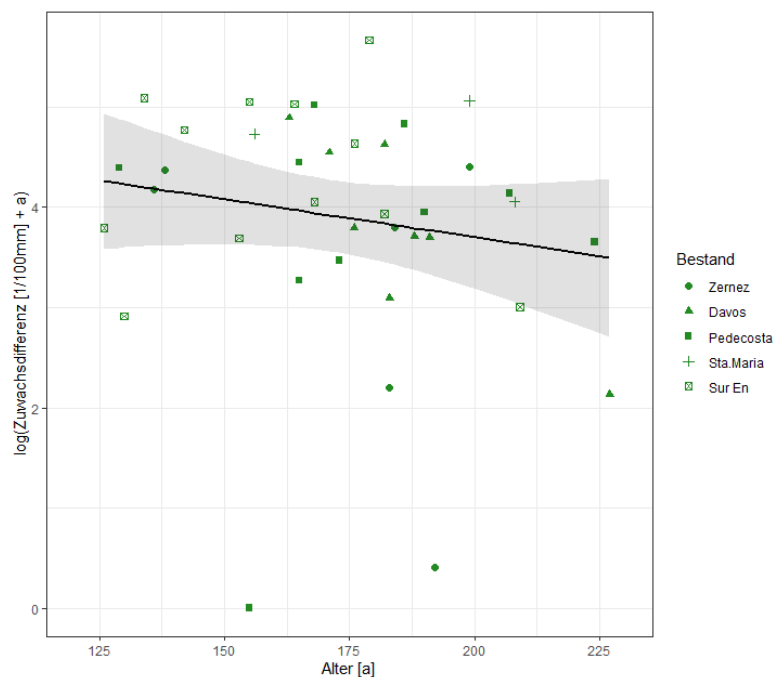


Abbildung 42: Log-transformierte Zuwachsdifferenz der einzelnen Randbäume in Abhängigkeit des Alters, in grau wird das 95%-Vertrauensintervall aufgezeigt

Um die Methoden zur Datierung von Eingriffen anhand von Freistellungseffekten zu vergleichen, wurden die Bestände von Pedecosta und Sur En verwendet. Der Bestand von Davos wurde als ungeeignet eingestuft, da dieser nur geringe Zuwachssteigerungen aufzeigte und der Eingriff daher mit hoher Wahrscheinlichkeit nur wenig Freistellungseffekte zur Folge hatte. Der Bestand von Sta. Maria wurde nicht in die Analyse miteinbezogen, da dort lediglich sieben Bäume im äusseren Rand aufgenommen wurden, welche verwertbare Jahrringserien lieferten. Der Bestand in Zernez wurde ebenfalls als ungeeignet eingestuft, da der Eingriff erst vier Jahre zurück liegt und die Resultate zu den Zuwachssteigerung gezeigt haben, dass die Zuwachssteigerung länger anhält. Dies bedeutet, dass die Bäume womöglich nicht genügend Zeit hatten, um auf die Freistellung zu reagieren. Des Weiteren wären die Kriterien zur Bestimmung der Boundary-Line nicht anwendbar gewesen.

Anhand der Kriterien von Black und Abrams (2013) zeigten im Bestand von Pedecosta insgesamt sieben der elf aufgenommenen Bäume des äusseren Randes im gleichen beziehungsweise in den Jahren nach dem Eingriff moderate oder bedeutende Freistellungseffekte (siehe Abbildung 43). Ein Baum zeigte bereits im Jahr des Eingriffes eine moderate Freistellung. Die anderen Freistellungseffekte traten verzögert auf. Es traten jeweils zwei Freistellungen drei, vier und fünf Jahre nach dem Eingriff auf. Die bedeutenden Freistellungen traten alle erst mit mindestens drei Jahren Verzögerung auf. Mit zwei bedeutenden Freistellungseffekten im Jahr 2015 zeigte der Bestand erst fünf Jahre nach dem tatsächlichen Eingriff am meisten bedeutende Freistellungen.

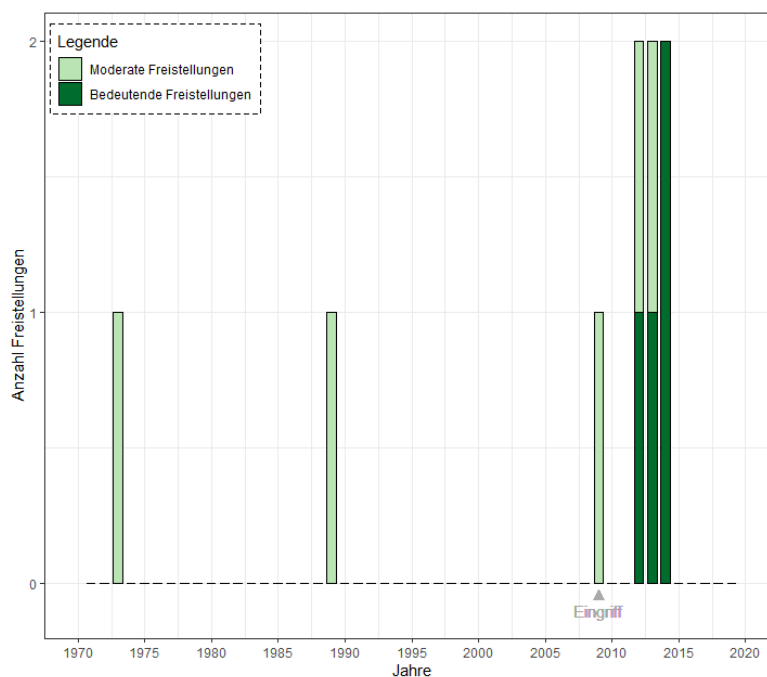


Abbildung 43: Moderate und bedeutende Freistellungen der letzten 50 Jahre gemäss den Kriterien von Black und Abrams (2013) für die Bäume des äusseren Randes in Pedecosta

Mit Hilfe der überarbeiteten Kriterien für die Freistellungseffekte konnten in Pedecosta insgesamt neun Freistellungen identifiziert werden. Auch mit diesen Kriterien erfolgte die erste Freistellung noch im selben Jahr wie der Eingriff selbst (siehe Abbildung 44). Es konnten insgesamt fünf bedeutende Freistellungen identifiziert werden und für die Datierung des Eingriffes verwendet werden. Die bedeutenden Freistellungen traten alle mit einer unterschiedlichen Verzögerung von zwei bis sechs Jahren auf.

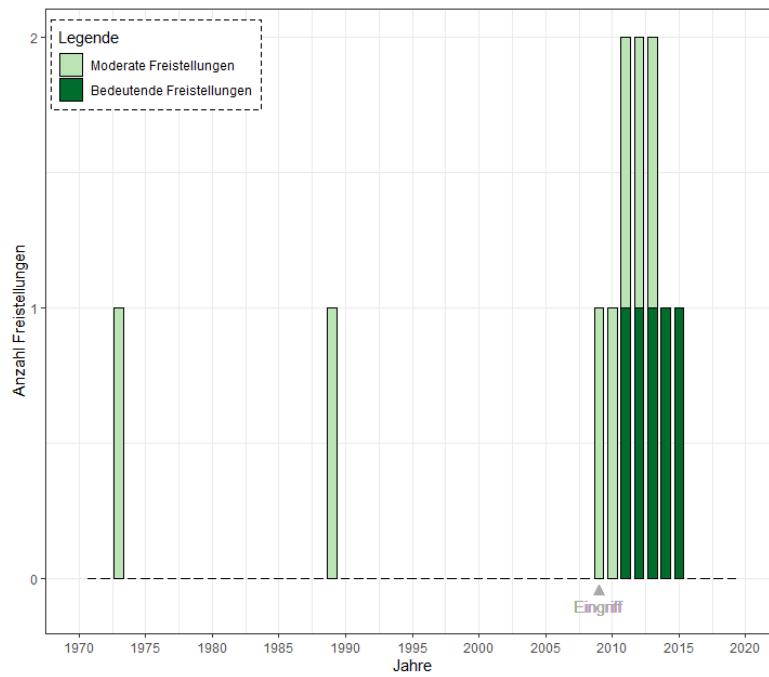


Abbildung 44: Moderate und bedeutende Freistellungen der letzten 50 Jahre gemäss den überarbeiteten Kriterien für die Bäume des äusseren Randes in Pedecosta

Im Bestand von Sur En zeigten neun von 19 Bäumen noch während beziehungsweise nach dem Jahr des Eingriffes moderate oder bedeutende Freistellungen (siehe Abbildung 45). In den drei Jahren vor dem Eingriff zeigten allerdings auch bereits zwei Bäume eine moderate Freistellung.

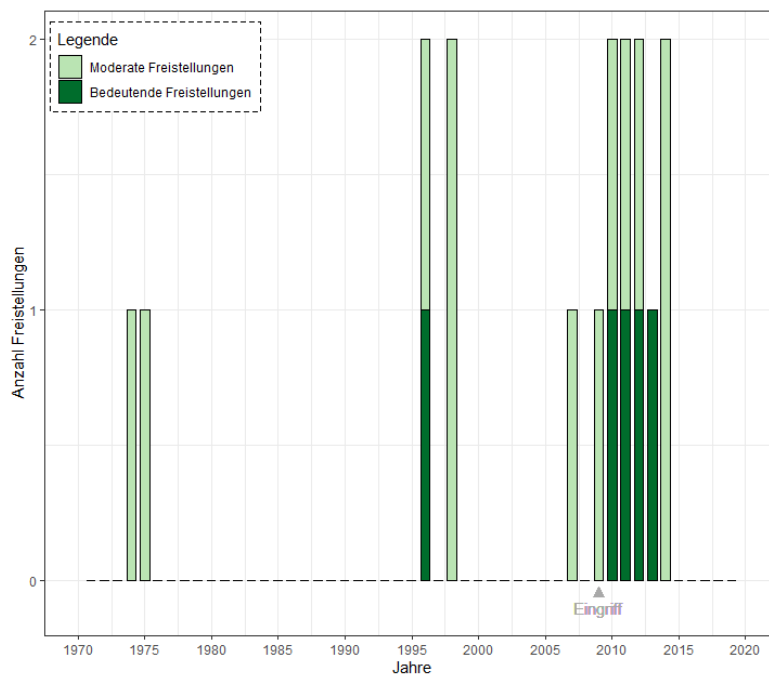


Abbildung 45: Moderate und bedeutende Freistellungseffekte der letzten 50 Jahre gemäss den Kriterien von Black und Abrams (2013) für die Bäume des äusseren Randes in Sur En

Mit den überarbeiteten Kriterien konnten insgesamt sechs moderate und bedeutende Freistellungseffekte identifiziert werden, welche noch während beziehungsweise nach dem Jahr des Eingriffes auftraten (siehe Abbildung 46). Die bedeutenden Freistellungen traten im selben Jahr wie der Eingriff und mit einem und drei Jahren Verzögerung auf. Bereits ein Jahr vor dem Eingriff konnte eine bedeutende Freistellung identifiziert werden.

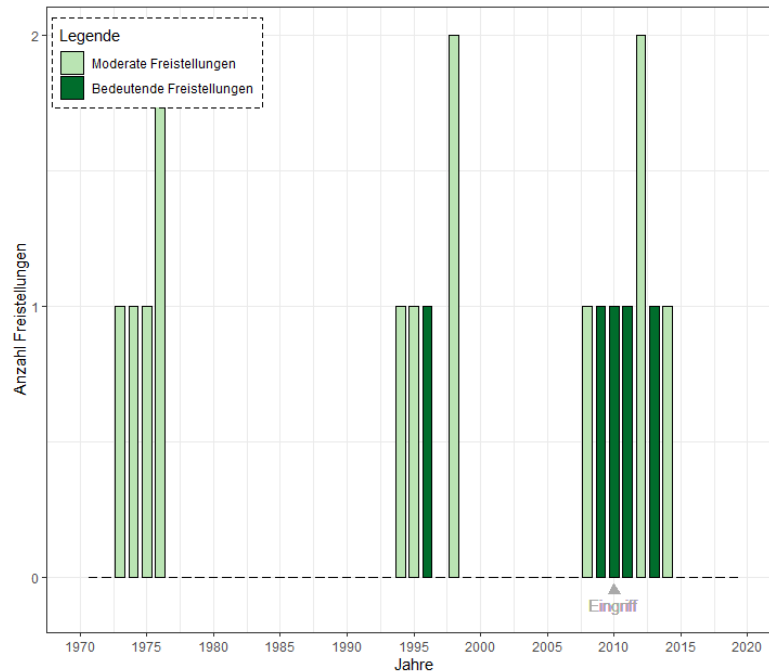


Abbildung 46: Moderate und bedeutende Freistellungseffekte der letzten 50 Jahre gemäss den überarbeiteten Kriterien für die Bäume des äusseren Randes in Sur En

3.4. Verjüngung

In den 14 Transekten mit je vier bis fünf Transektpunkten wurden insgesamt 195 Verjüngungsansätze und deren Distanz zum jeweiligen Transektpunkt erfasst. Die Distanzen der Transektpunkte zu den Verjüngungsansätzen beziehungsweise die Verjüngungsdichten unterscheiden sich teilweise signifikant (siehe Abbildung 47). Die Verjüngungsdichten am äusseren Rand, im ersten Viertel des Eingriffes und in der Mitte des Eingriffes waren signifikant höher als jene des inneren Randes und des dichten Bestandes. Zwischen den Verjüngungsdichten am Schlagrand, im ersten Viertel des Eingriffes und in der Mitte des Eingriffes gab es allerdings keine signifikanten Unterschiede. Auffällig ist, dass der Median der Distanz vom äusseren Rand zum ersten Viertel des Schlages zunahm und zur Mitte des Schlages hin wieder abnahm.

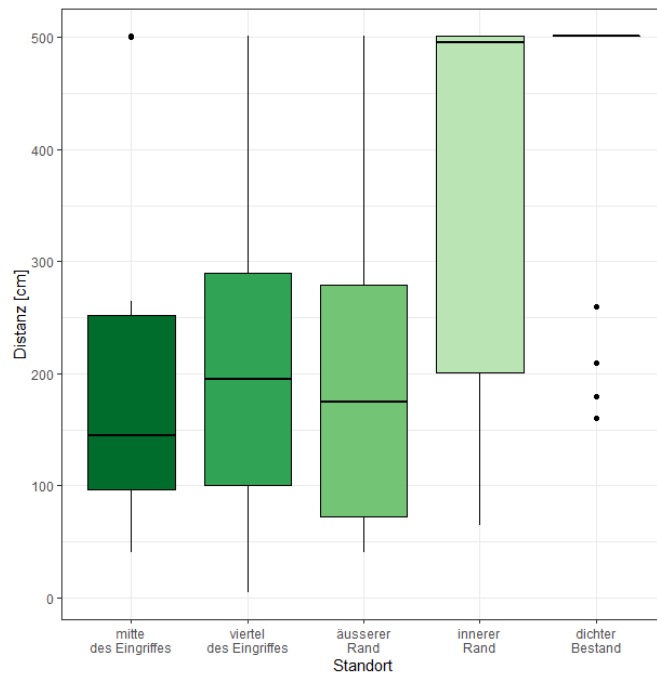


Abbildung 47: Distanz zu den nächsten drei Verjüngungsansätzen für die verschiedenen Bereiche

Die Messungen mit dem Sonnenkompass zeigten, dass die Anzahl an Sonnenstunden im Juni vom dichten Bestand bis hin zur Mitte der Schlagfläche kontinuierlich zunahm (siehe Abbildung 48). Der Unterschied zwischen dem inneren Rand und der Bestandesfläche war dabei allerdings minimal. Vom Transektpunkt am äusseren Rand an, hatten im Mittel alle Transektpunkte mehr als zwei Stunden Junisonne pro Tag. Der Median nahm trotzdem nach wie vor zu und stieg im Mittel von ungefähr 5.5 Stunden am äusseren Rand auf ungefähr 7.5 Stunden in der Mitte des Eingriffes.

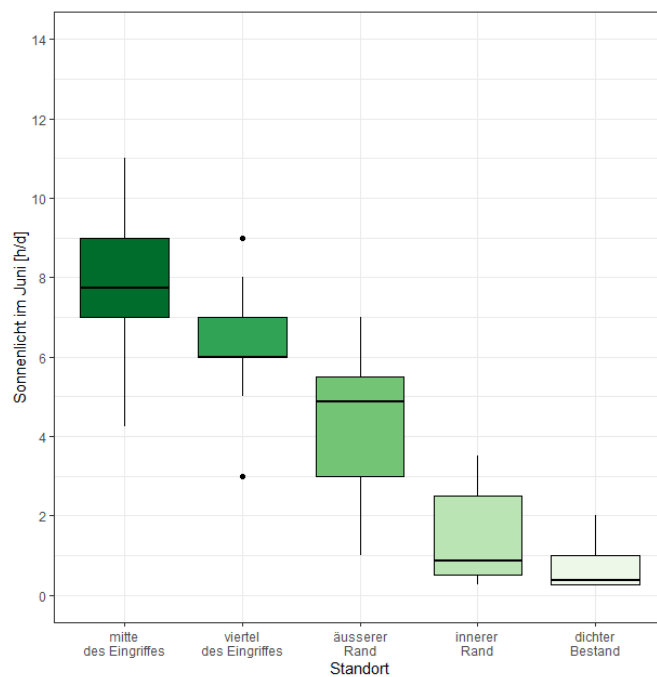


Abbildung 48: Gemessene Sonnenstunden pro Tag im Juni für die verschiedenen Transektpunkte

4. Diskussion

4.1. Stabilität von Schlagrändern

Erhöhte Mortalität in der Randfläche im Vergleich zur Bestandesfläche

Die Resultate zeigen, dass die Mortalität im äusseren Rand fast doppelt so gross ist wie jene in der Bestandesfläche. Es ist davon auszugehen, dass die Anzahl der erfassten toten Bäume im Randbereich noch höher ausgefallen wäre, falls in keinem der fünf Untersuchungsgebiete Zwangsnutzungen stattgefunden hätten. Es wird angenommen, dass der Unterschied zwischen der Mortalität im Bestand und jener im äusseren Rand durch den Eingriff verursacht wurde. Daraus kann geschlossen werden, dass späte Eingriffe in dichte, einschichtige Fichtenbestände häufig zu Folgeschäden führen. Die Mortalität wird durch den Eingriff fast verdoppelt. Bei Eingriffen in solche Fichtenbestände ist es daher von zentraler Bedeutung, dass darauf geachtet wird, möglichst stabile Ränder auszubilden, um die anthropogen verursachte Mortalität zu minimieren und Folgeschäden zu verringern. Dies führt nicht nur zu einer nachhaltigeren Schutzwaldbewirtschaftung, sondern reduziert auch die Zwangsnutzungen und somit den finanziellen Aufwand.

Die erhöhte Mortalität im Randbereich wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst. Die Bäume werden durch die plötzliche Freistellung gestresst und können daher nicht immer von der erhöhten Lichtverfügbarkeit profitieren. Diese Stresszunahme hat seinen Ursprung im Verlust des Waldklimas im Randbereich. Oft sind die Temperaturschwankungen in den Freiflächen viel grösser und durch die Turbulenzen, welche die Lücken verursachen, lagert sich mehr Schnee in diesen ab, so dass die Vegetationszeit verkürzt wird. Zudem steigt durch die zusätzlichen Angriffsflächen das Windwurfrisiko. Des Weiteren sind die Bäume anfälliger auf Borkenkäferbefall, da die Stämme viel stärker sonnenexponiert sind und so attraktiver für die Borkenkäfer werden.

Um die Mortalität in den Randflächen mit jener in den Beständen zu vergleichen, wurden je 15 Flächen untersucht. Lediglich in zwei der fünf Bestände mussten keine Zwangsnutzungen durchgeführt werden. Dies führte mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einer systematischen Unterschätzung der Mortalität im Randbereich, da der Totholzanteil in der Randfläche noch höher ausgefallen wäre, falls keine Zwangsnutzungen stattgefunden hätten. Für eine genauere Untersuchung der Dynamik des Randbereiches, welche durch einen Eingriff entsteht, wäre es daher wünschenswert, dass in den betreffenden Schlägen noch keine Zwangsnutzungen durchgeführt wurden. Dies sollte für eine zukünftige Arbeit unbedingt bedacht werden und falls möglich sollten Schläge ausgewählt werden, in denen noch keine Zwangsnutzungen erfolgten. In einem nächsten Schritt sollten auch die Faktoren für die erhöhte Mortalität im Schlagrand in die Untersuchung miteinbezogen werden, um ein besseres Verständnis für die Prozesse nach einem Eingriff in einen dichten, einschichtigen Fichtenbestand zu erhalten.

Die Mortalität der Vergleichsflächen war höher als jene im äussersten Randbereich. Dies kann vor allem mit der Entwicklung der Bestände, welche für die Arbeit von Krumm (2011) untersucht wurden begründet werden. Die Bäume der vorliegenden Arbeit waren im Schnitt 170 Jahre alt, während die Bäume aus der Arbeit von Krumm (2011) im Schnitt lediglich 100 Jahre alt waren. Dies kann darauf hindeuten, dass während eines früheren Zeitpunktes der Selbstdifferenzierungsphase die Mortalität aufgrund des stärkeren Konkurrenzkampfes höher ist als zu einem späteren Zeitpunkt. Zudem wurden die Bestände aus der vorliegenden Arbeit im Gegensatz zu jenen aus der Arbeit von Krumm (2011) bewirtschaftet, wodurch tote Bäume womöglich entfernt wurden. Des Weiteren haben Zwangsnutzungen dazu beigetragen, dass die Anzahl der toten Bäume in den untersuchten Beständen tiefer war als in jenen von Krumm (2011).

Stabilität der Ränder

Um die erhöhte Baum mortalität in den Schlagrändern zu minimieren sind stabile Ränder von entscheidender Bedeutung. Gemäss Zeller (1994) soll die Pflege in erster Linie auf die Stabilität der einzelnen Bäume ausgerichtet werden. Vorliegende Masterarbeit zeigt, dass die Stabilität beziehungsweise der Baumzustand in den Randflächen einen signifikanten Unterschied betreffend der Kronenlänge, dem BHD und dem Schlankheitsgrad aufweist. Die Annahmen aus NaiS und von Rottmann (1885), wonach kurze Kronen einen negativen Einfluss auf Mortalität in Schlagrändern haben, sind somit auch für dichte einschichtige Fichtenbestände bestätigt. Es wird empfohlen, dass auch in dichten, einschichtigen Fichtenbeständen in erster Linie darauf geachtet wird, dass die gewählten Randbäume möglichst lange Kronen aufweisen. In zweiter Linie sollte auch der BHD und der Schlankheitsgrad miteinbezogen werden. Aus praktischer Sicht lässt sich im Feld am leichtesten erkennen, ob eine Krone $\frac{1}{2}$ oder lediglich $\frac{1}{4}$ der Baumlänge ausmacht. Die beiden anderen Baumparameter BHD und Schlankheitsgrad sind schwieriger einzuschätzen und sollten daher eine untergeordnete Rolle einnehmen. Aufgrund der Zwangsnutzungen, welche in den drei Beständen mit dem höchsten Fichtenanteil durchgeführt werden mussten (>80% Fichtenanteil), kann darauf geschlossen werden, dass es von Vorteil sein kann, andere Baumarten beizumischen und dass man sich beim Anzeichnen der Schläge wo immer möglich an anderen Baumarten orientieren sollte.

Die Daten der Vergleichsflächen zeigen ebenfalls, dass die beiden Baumzustände einen hoch signifikanten Unterschied betreffend Kronenlänge und BHD aufweisen. Die lebenden Bäume der Vergleichsflächen haben im Median die längeren Kronen und den höheren BHD als die abgestorbenen Bäume. Der Schlankheitsgrad unterscheidet sich ebenfalls signifikant zwischen den beiden Baumzuständen, allerdings haben die lebenden Bäume der Vergleichsfläche den höheren Schlankheitsgrad als die abgestorbenen. Es ist also genau umgekehrt zu den Randflächen. Dies kann einerseits durch den Konkurrenzkampf im dichten Bestand begründet werden. Andererseits ist das Kollektiv möglicherweise trotz hohen Schlankheitsgraden stabil, solange keine Freistellungen erfolgt sind, beziehungsweise kann es sogar ein Vorteil sein, weil höhere Bäume einen Konkurrenzvorteil in der Lichtverfügbarkeit haben. Nach einem Eingriff werden die Bäume allerdings freigestellt und die hohen Schlankheitsgrade werden zum Problem, denn der Schwerpunkt dieser Bäume ist sehr hoch und die Bäume sind somit anfälliger für Schneebruch und Sturmschäden (Groome 1988). Es könnte auch sein, dass der Schlankheitsgrad im Verlauf der Selbstdifferenzierungsphase den Einfluss auf die Stabilität verändert. In einem früheren Stadium ist es notwendig für die Bäume einen hohen Schlankheitsgrad zu haben beziehungsweise alles in das Höhenwachstum zu investieren damit sie konkurrenzfähig sind. Später werden dann aber jene Bäume mit dem höchsten Schlankheitsgrad aussortiert. Der Vergleich der beiden Flächen zeigt, dass die Schlankheitsgrade der Randflächen um einiges höher sind als jene der Vergleichsflächen, der BHD in beiden Flächen aber sehr ähnlich ist. Dies zeigt wiederum, dass auch wenn die Bäume bereits über 100 Jahre alt sind, nach wie vor hauptsächlich in das Höhenwachstum und nicht in das Dickenwachstum investiert wird. Dies könnte auf den anhaltenden Konkurrenzkampf um Lichtverfügbarkeit zurückgeführt werden.

Die Resultate für die Randflächen basieren auf den Baumparametern von 17 abgestorbenen und 143 lebenden Fichten. Wegen der relativ geringen Anzahl an abgestorbenen Bäumen müssen die Resultate mit Vorsicht betrachtet werden. Für eine nachfolgende Untersuchung sollte darauf geachtet werden, dass mehr abgestorbene Bäume der Randfläche miteinbezogen werden können. Des Weiteren wurde in dieser Arbeit nicht nach verschiedenen Ursachen für die Mortalität am Rand unterschieden. Dies könnte allerdings von Interesse sein, um die Bewirtschaftung so anzupassen, dass die Bäume eine möglichst hohe Stabilität gegen die jeweilige Ursache für die Mortalität aufweisen. In Bezug auf die Klimaveränderung könnte auch die Veränderung der Anteile der Ursachen für eine erhöhte Mortalität

im Schlagrand von grossem Interesse sein. Dabei muss man sich allerdings bewusst sein, dass meistens mehrere Faktoren zusammenspielen und es durchaus schwierig sein könnte die eine Ursache für das Absterben eines bestimmten Baumes zu identifizieren. Des Weiteren wurde in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht, welche Baumarten sich besonders gut für die Ausformung von stabilen Rändern eignen. Dies sollte auf jeden Fall besser untersucht und in zukünftigen Arbeiten berücksichtigt werden. Trotz dieser Einschränkungen konnten in dieser Arbeit Faktoren identifiziert werden, welche zu einer erhöhten Stabilität der Randbäume beitragen.

Eingriffszeitpunkt nach verpasstem frühem Eingriff

Um den geeigneten Eingriffszeitpunkt nach verpasstem frühem Eingreifen zu identifizieren wird die Abhängigkeit der Zuwachsreaktionen auf den Eingriff vom Alter und von der Kronenlänge überprüft. Die Resultate zeigen keinen signifikanten Zusammenhang zwischen der Zuwachsreaktion und dem Alter beziehungsweise der Zuwachsreaktion und der Kronenlänge. Auch die Abhängigkeit der Kronenlänge vom Alter ist nur schwach signifikant, zeigt aber eine leichte Abnahme der Kronenlänge mit zunehmendem Alter. Die meisten Kronen in solchen dichten, einschichtigen Fichtenbeständen sind aufgrund des starken Konkurrenzkampfes ohnehin bereits stark verkürzt.

Ein möglichst rascher Eingriff kann daher nicht mit einer verbesserten Reaktionsfähigkeit der Bäume aufgrund der längeren Kronen oder des geringeren Alters gerechtfertigt werden. Auch kann ein möglichst rascher Eingriff nicht mit der mangelnden Verjüngung begründet werden. Denn die Lebenserwartung subalpiner Fichten liegt bei etwa 400 Jahren (Hillgarter 1971, Bebi et al. 2013). Es ist davon auszugehen, dass Fichten in solchen dichten Beständen oft nicht ganz so alt werden. Eine wichtige Rolle dabei könnten die hohen Wachstumsraten zu Beginn des Baumlebens spielen. Meist sterben Bäume, die früh stark gewachsen sind, früher wieder ab als jene, die anfangs langsamer gewachsen sind. Bäume, die zu schnell wachsen, investieren weniger in die Verteidigungsmechanismen und die mechanische Stabilität als jene, die langsam wachsen (Bigler und Veblen 2009). In solchen dichten, einschichtigen Beständen ist schnelles Wachstum aber entscheidend, um unter den hohen Konkurrenzbedingungen überleben zu können und es ist davon auszugehen, dass die Bäume daher früher absterben als in anderen Beständen. Obwohl die Bäume in dichten, einschichtigen Beständen deshalb nicht ganz so alt werden, bleibt meistens noch genügend Zeit für einen Eingriff. Fichten aus den meisten Problembeständen sind oft noch keine 200 Jahre alt, sodass in vielen Beständen noch reichlich Zeit bleibt, um die Verjüngung zu fördern. Auch in den Untersuchungsgebieten der vorliegenden Masterarbeit wäre noch viel Zeit für einen Eingriff zur Förderung der Verjüngung geblieben.

Für die Bewirtschaftung bedeutet dies, dass Eingriffe in solchen bereits älteren, einschichtigen, dichten Beständen nicht die höchste Priorität haben sollten. In jüngeren Beständen kann eine starke Verkürzung der Kronen noch verhindert und somit die Resistenz der einzelnen Bäume noch gefördert werden (Bebi et al. 2013). Zudem kann noch eine geeignete Strukturierung zu Rotten oder Kleinkollektiven vorgenommen werden, so dass die Stabilität des gesamten Bestandes erhöht wird. Aus diesen Gründen sollte die Priorität auf die noch jungen Bestände gesetzt werden. Dies bedeutet aber nicht, dass Eingriffe in bereits ältere, dichte, einschichtige Fichtenschutzwälder unnötig sind. Die Verjüngung muss nach wie vor gefördert werden, um die Resilienz zu fördern, allerdings bleibt dafür in den meisten Fällen noch genügend Zeit.

Trotzdem stellt sich die Frage nach einer geeigneten Priorisierung für Schutzwälder, in denen kein früher Eingriff stattgefunden hat. Die folgenden fünf Aspekte können eine Hilfe für eine Priorisierung

darstellen. Diese sind nicht abschliessend und müssen je nach Standortsbegebenheit angepasst werden. (1) Der Schutzwaldstatus des Bestandes ist ein wichtiger Aspekt, denn die Verjüngungseinleitung ist in wichtigen Schutzwäldern von besonders zentraler Bedeutung. In Beständen, welche keine beziehungsweise nur eine geringe Schutzfunktion übernehmen, sollte auch mit Einbezug der jetzigen Holzpreise eine Nichtbewirtschaftung in Betracht gezogen werden. Natürliche Störungsereignisse können das Kronendach soweit öffnen, dass sich wieder Verjüngung etablieren kann. Ob das anfallende Totholz entfernt werden sollte, muss aufgrund der Borkenkäferproblematik allerdings diskutiert und gründlich abgewogen werden. (2) Die Höhe, die Art und die Nähe zum Schadenspotential sollte auch miteinbezogen werden. Schutzwälder, die sich in unmittelbarer Nähe zu einem Schadenspotential befinden, sollten Vorrang haben. Die Höhe des Schadenspotentials ist ebenfalls wichtig und Bestände, welche Objekte mit einem hohen Schadenspotential schützen, sollten priorisiert werden. Des Weiteren kann die Art des Schadenspotentials ebenfalls wichtig sein. Beispielsweise ist es für die Priorisierung wichtig, ob es sich um eine Strasse oder ein Dorf handelt. (3) Die Hangneigung ist eine weitere Entscheidungshilfe für eine Priorisierung. In steilen Schutzwäldern ist die Schutzfunktion sehr stark beeinträchtigt, wenn es zu einem flächigen Störungsereignis kommt. In weniger steilen Schutzwäldern (< ca. 35°) kann die Schutzfunktion vielfach trotz flächiger Störungen aufrecht erhalten bleiben und daher können diese eine geringere Priorität für Eingriffe haben. (4) Wie in der Einleitung bereits erwähnt wurde, reduzieren Schutzwälder den Eintrag von Geschiebe in Gerinne und können so das Risiko für Verklausungen reduzieren. Bei der Priorisierung sollte dieser Faktor auch eine wichtige Rolle spielen. (5) Das Bestandesalter sollte ebenfalls als Indikator für die Priorisierung zukünftiger Holzschläge dienen, denn auch wenn der Zusammenhang zwischen Alter und Kronenlänge nicht signifikant ist, ist eine leichte Tendenz zu erkennen. Aus praktischer Sicht ist dies allerdings eher schwierig umzusetzen, da man vor jedem geplanten Eingriff Bohrkerne zur Altersbestimmung entnehmen müsste.

Am wichtigsten ist nichtsdestotrotz, dass wenn immer möglich kein Eingriff in einen alten Bestand auf Kosten eines Eingriffes in einen noch jungen Bestand mit relativ langen Kronen durchgeführt werden darf. Des Weiteren muss die Situation für Nichtschutzwälder anders beurteilt werden, denn eine hohe Resilienz ist nicht so zentral wie in Schutzwäldern. Grundsätzlich zeigen die Resultate aus der Arbeit von Krumm (2011) und dieser Arbeit, dass man grossflächig eingreifen kann, wenn der Wald keine Schutzfunktion erfüllen muss, denn grosse Eingriffe sind wirtschaftlich gesehen meist lukrativer. Eine weitere Möglichkeit für Nichtschutzwälder ist das bewusste Nichteingreifen, so dass natürliche Störungen nach und nach für eine Ausdünnung und somit Förderung von Verjüngung sorgen. Für eine zukünftige Arbeit zur genaueren Beurteilung der Entwicklung der Krone mit zunehmendem Alter müsste man eine gepaarte Stichprobenaufnahme durchführen. Das heisst, dass im Idealfall eine Langzeitstudie durchgeführt wird, in welcher die Entwicklung der einzelnen Kronenlängen genauer untersucht wird und wiederholt über mehrere Jahre für dieselben Bäume gemessen wird. Die Hilfe für eine geeignete Priorisierung der Eingriffe hinterfragt die Priorisierung gemäss NaiS bewusst und sollte als Denkanstoss für die Zukunft gesehen werden.

Abhängigkeit des BHDs vom Alter

Das Baumalter beziehungsweise Bestandesalter ist im Feld nur schwer anhand des BHDs einzuschätzen, denn die Resultate zeigen, dass lediglich zwei der fünf beziehungsweise 13 der 20 Bestände, welche untersucht wurden, einen signifikanten Zusammenhang zwischen BHD und Alter aufweisen. In Sta. Maria gibt es sogar negative Korrelationen. Der allgemeine Trend über alle Bestände zeigt trotzdem einen signifikanten Zusammenhang und lässt auf eine allgemeine Abhängigkeit des

BHDs vom Alter schliessen. Die Baumhöhe zeigte sowohl für die Bestände aus dieser wie auch für jene aus der Arbeit von Krumm die bessere Korrelation zum Alter als der BHD. Trotzdem wird für die Ansprache im Feld empfohlen den BHD nach wie vor als Indikator für das Alter zu verwenden, da dieser leichter bestimmt werden kann. Allerdings sollte diese Herangehensweise mit grosser Vorsicht angewendet werden, denn es kann durchaus sein, dass es im betreffenden Bestand keinen direkten Zusammenhang gibt oder sogar eine negative Korrelation besteht. Die Baumhöhe sollte ergänzend angewendet werden, um Altersunterschiede abzuschätzen. Die Daten aus den Vergleichsflächen zeigen ebenfalls, dass der Zusammenhang zwischen BHD und Alter nicht so trivial ist wie man annehmen könnte.

Der Zusammenhang zwischen BHD und Alter wurde mittels eines linearen Modelles überprüft und es wurde darauf verzichtet andere Modelle, wie zum Beispiel ein logarithmisches, welches vermutlich besser passen würde, zu verwenden. Dies geschah zum einen, weil nur ein Teil der potenziellen Lebensdauer betrachtet wurde und zum anderen, weil die Resultate beziehungsweise die Kurven der Modelle auf diese Weise besser verglichen werden können. Für eine genauere Untersuchung des Zusammenhangs und um detaillierte Aussagen zu diesem machen zu können, müssten andere Modelle miteinbezogen werden.

4.2. Freistellungseffekte

Zuwachs im Randbereich

Die Resultate dieser Arbeit zeigen, dass Bäume an Lückenrändern oft auf die durch den Eingriff verursachte Freistellung reagieren. Das Ausmass der Zuwachssteigerung ist allerdings von Baum zu Baum und von Bestand zu Bestand sehr unterschiedlich. Die Resultate bestätigen somit jene des Projektes «Auswirkungen grosser Verjüngungslücken im Gebirgswald auf Verjüngung und Holzzuwachs» von Brang (2017). Dieser konnte bereits zeigen, dass Randbäume in nordexponierten Flächen stärker auf eine Freistellung reagieren als solche auf südexponierten Flächen. Die Untersuchung von Brang (2017) ergab für Sur En eine Veränderung des Zuwachses von 61.3%. Im Vergleich dazu wurde in der vorliegenden Arbeit ein Zuwachs von 69% bestimmt. Die zweite nordexponierte Fläche in Furna aus der Arbeit von Brang (2017) zeigte einen Zuwachs von 34.3%. Für diese Probefläche ist kein direkter Vergleich möglich, da in vorliegender Masterarbeit keine Fläche in Furna untersucht wurde. Allerdings passt auch dieser Wert in die Grössenordnung der Werte aus vorliegender Arbeit und scheint durchaus plausibel zu sein. Über alle Bäume des äusseren Randes wurde eine Zuwachssteigerung von rund 50% festgestellt. Die kleine Anzahl an Fallstudien und die grosse Variabilität der Zuwachsreaktion verunmöglichte Brang (2017) eine allgemeine Aussage zur Grösse der Zuwachsreaktion. Mit den zusätzlichen Werten der fünf Bestände aus der vorliegenden Arbeit kann nun allerdings eine allgemeine Aussage gemacht werden. Im Mittel über alle Bestände inklusive den beiden nordexponierten aus der Arbeit von Brang (2017) liegt die Zuwachssteigerung bei etwas über 50%. Das Problem mit der grossen Variabilität bleibt allerdings bestehen und wird mit hoher Wahrscheinlichkeit auch mit mehr Zuwachsdaten bestehen bleiben.

In vorliegender Arbeit konnte kein signifikanter Zusammenhang zwischen Lückenbreite und Zuwachssteigerung erkannt werden. Dies lässt darauf schliessen, dass schmalere Schläge für die Zuwachssteigerung gleich gut sind wie breitere Schläge und daher meistens bevorzugt werden sollten, da die Schutzwirkung so am wenigsten beeinträchtigt wird. Die Annahme von Brang (2017) wonach die Zuwachssteigerung den Zuwachsverlust durch die Entnahme der Bäume aus der Schlagfläche nicht

kompensieren kann, wird durch die Resultate der vorliegenden Arbeit gestützt, denn es konnte gezeigt werden, dass nur die äussersten Randbäume von einer Freistellung profitieren.

Für eine spätere Arbeit wäre es von Vorteil, wenn noch mehr nordwestexponierte beziehungsweise Bestände aller Expositionen aufgenommen werden könnten. In vorliegender Arbeit konnte gezeigt werden, dass ausschliesslich Bäume des äussersten Randbereiches profitieren und daher müssten für eine zukünftige Arbeit in nordwestexponierten Beständen auch lediglich jene Bäume beprobt werden. Eine Untersuchung in südexponierten Beständen wäre ebenfalls interessant, um die Resultate mit jenen aus der vorliegenden Arbeit zu vergleichen. Des Weiteren könnte die Hypothese aus einer früheren Arbeit, wonach die Bäume an südexponierten Standorten vermehrt in das Wurzelwachstum investieren, überprüft werden (Brang et al. 2017). Die Resultate der Zuwachsreaktionen, welche für zwei unterschiedlich lange Zeiträume vor und nach dem Eingriff berechnet wurden, zeigen, dass ein Zeitraum von vier Jahren vor und nach dem Eingriff zu kurz ist. Zum einen kann dies durch die verzögerte Reaktion auf die Freistellung, zum anderen auf die fehlenden Jahre der Zuwachssteigerung zurückgeführt werden. Es wird daher empfohlen in zukünftigen Arbeiten darauf zu achten, dass der Eingriff mindestens zehn Jahre zurückliegt.

Freistellungseffekte nach Black und Abrams (2003) und den überarbeiteten Kriterien

Eine genaue Datierung des Eingriffes mittels Boundary-Line Methode stellt sich als schwierig heraus. Bäume können sehr unterschiedlich schnell auf eine einstweilige Freistellung reagieren. Die Resultate der vorliegenden Masterarbeit zeigen, dass Freistellungseffekte der Randbäume mit bis zu sechs Jahren verzögert auftreten können. Dies bedeutet, dass die Zuwachsreaktionen unterschiedlich schnell auftreten und nur anhand der Freistellungseffekte eines einzelnen Baumes eine Störung unmöglich auf das genaue Jahr datiert werden kann. Daten dieser Arbeit zeigen, dass die Methode von Black und Abrams nicht geeignet ist, um Eingriffe oder Störungen anhand von Freistellungseffekten auf das Jahr genau zu datieren. Auch mit den weiterentwickelten Kriterien ist es nicht möglich einen Eingriff oder eine Störung so genau zu datieren.

Die Daten geben trotzdem einige wichtige Hinweise zum Verhalten von Randbäumen nach Verjüngungseingriffen. Es wird ersichtlich, dass sowohl die maximale Zuwachsveränderungen als auch die ersten Zuwachsveränderungen über 20% beziehungsweise 50% unterschiedlich früh erfolgen können. Des Weiteren ist es möglich anhand von Freistellungseffekten Perioden mit vermehrten Freistellungseffekten aufzuzeigen und somit einen Anhaltspunkt für einstweilige Störungen zu erhalten (siehe Abbildungen 65 und 66 im Anhang).

Die überarbeiteten Kriterien führten zu keiner eindeutigen Verbesserung bei der Datierung von Störungsereignissen. Auch mit den überarbeiteten Kriterien ist eine eindeutige Datierung nahezu unmöglich. Für weitere Arbeiten mit der Boundary-Line Methode, sei dies mit den Kriterien nach Black und Abrams (2013) oder mit den überarbeiteten Kriterien, wird empfohlen, dass das Jahr, welches die ersten bedeutenden Freistellungseffekte zeigt, als Eingriffsjahr datiert wird. So ist man auf der sicheren Seite, was eine zu frühe Datierung betrifft. Es könnte allerdings sein, dass der Eingriff ein bis zwei Jahre früher stattgefunden hat. In einem weiteren Schritt könnten die verzögerten Reaktionen der Bäume auf eine Freistellung genauer untersucht werden. Zum Beispiel könnten klimatische Faktoren wie die Trockenheit oder die Jahresmitteltemperatur miteinbezogen werden.

4.3. Verjüngung

Verjüngung und Breite der Schläge

Die Resultate betreffend Verjüngung bestätigen die allgemeinen Annahmen und die Erkenntnisse aus früheren Arbeiten. Um die Resultate mit früheren Arbeiten vergleichen zu können, wird ebenfalls die Arbeit von Brang (2017) verwendet. Der Verjüngungserfolg in den drei Bereichen äusserer Rand, erster Viertel des Schlages und Mitte des Schlages zeigt keinen signifikanten Unterschied. Alle drei Transektpunkte zeigen allerdings einen signifikanten Unterschied zu den beiden Transektpunkten im geschlossenen Bestand. Beim Vergleich mit der Anzahl Stunden Junisonne fällt direkt auf, dass sich die Verjüngung besser einstellt, sobald die Anzahl Sonnenstunden über zwei Stunden ansteigt. Dies bestätigt die allgemeinen Annahmen und zeigt, dass Eingriffe in dichten, einschichtigen Fichtenbeständen unabdingbar sind, um die Schutzwirkung permanent zu erhalten und um die Resilienz genügend hoch zu halten. Falls dieser Grenzwert von zwei Stunden direktem Sonnenlicht im Juni erreicht wird, gibt es keinen signifikanten Unterschied der Verjüngungsdichte zu noch mehr Sonnenlicht. Für die Praxis bedeutet dies, dass es im Schutzwald nicht sinnvoll ist, zu breite Lücken anzulegen, da auf diese Weise nicht mehr Verjüngung aufkommt, die Schutzwirkung des Waldes aber stärker beeinträchtigt wird.

Um genauere Aussagen machen zu können, hätte man die Anzahl Sonnenstunden im Juni für jede Pflanze einzeln messen müssen und nicht nur an den Transektpunkten. Die Vegetationskonkurrenz müsste ebenfalls besser beschrieben werden. Für die Arbeit und das Vorgehen im Allgemeinen gilt, dass nicht alle Bestände wirklich einschichtig waren und mehr Proben für den jeweiligen Bestand wünschenswert gewesen wären. Vor allem mehr Proben von Randbäumen im äusseren Rand wären sinnvoll, da in dieser Arbeit gezeigt werden konnte, dass ausschliesslich die äussersten Bäume von einer Freistellung profitieren. Es wäre ebenfalls interessant, wenn in einer späteren Arbeit noch ältere Schläge verwendet werden könnten, damit auch Aussagen zur Dauer solcher Freistellungseffekte in nordwestexponierten Beständen gemacht werden könnten. Die Altersbestimmung der Bestände basiert jeweils auf nur wenigen Proben, daher wäre eine umfassendere Jahrringuntersuchung zur Bestimmung des Alters wünschenswert. Die Zwangsnutzungen verfälschen sowohl die Resultate zu Mortalität im Schlagrand als auch jene der Freistellungseffekte. Es wird deshalb empfohlen in einer späteren Arbeit darauf zu achten, dass Verjüngungsschläge ausgewählt werden, in denen keine Zwangsnutzungen stattgefunden haben oder die zwangsgenutzten Bäume miteinbezogen werden können.

5. Schlussfolgerung

Späte Eingriffe in dichte, einschichtige Fichtenbestände führen häufig zu Folgeschäden. Um diese zu minimieren, sollte darauf geachtet werden, dass möglichst stabile Ränder ausgebildet beziehungsweise ausgewählt werden. Nebst der Förderung anderer Baumarten, wie zum Beispiel der Lärche oder der Föhre im Randbereich, sollte primär darauf geachtet werden, dass Randbäume eine möglichst lange Krone aufweisen. Aber auch der BHD und der Schlankheitsgrad sollten in der Entscheidungsfindung für geeignete Randbäume miteinbezogen werden, da auch diese einen signifikanten Einfluss auf die Baumstabilität besitzen. Der BHD sollte nur mit Vorsicht als Indikator für das Alter eines Baumes beziehungsweise für die Beurteilung von Altersunterschieden innerhalb eines Bestandes verwendet werden. In Zukunft könnte die Baumhöhe vermehrt als Faktor zur Schätzung von Unterschieden bezüglich des Baumalters hinzugezogen werden, da der Zusammenhang statistisch signifikanter ist als jener zwischen BHD und Alter.

Falls ein früher Eingriffszeitpunkt verpasst wurde, gibt es keinen idealen Eingriffszeitpunkt mehr. Zum einen haben die betreffenden Bäume bereits stark verkürzte Kronen und zum anderen konnte in der vorliegenden Masterarbeit gezeigt werden, dass weder die Kronenlänge noch das Alter einen signifikanten Einfluss auf die durch eine Freistellung bedingte Zuwachsreaktion haben. Eingriffe in solche dichten, einschichtigen Fichtenwaldstrukturen sollten deshalb, wenn immer möglich zu einem frühen Zeitpunkt erfolgen, so dass die Struktur des Bestandes und die Kronenlänge der Bäume noch entscheidend beeinflusst werden können. Ein früher Eingriff in einen noch jungen Fichtenbestand mit entwicklungsfähigen Kronen sollte auf jeden Fall gegenüber einem Eingriff in einen bereits kurzkrönigen, einschichtigen Fichtebestand priorisiert werden. Dieser frühe Eingriffszeitpunkt kann als einziger idealer Zeitpunkt betrachtet werden, denn später kann ein Eingriff kaum noch zu einer erhöhten Bestandesstabilität beitragen und auch die Zuwachsreaktion zeigt keine signifikante Abhängigkeit vom Alter oder der Kronenlänge der Bäume. Dennoch muss in gewissen Beständen, in denen ein früher Eingriff verpasst wurde, eingegriffen werden. Für die Auswahl dieser Bestände beziehungsweise für die Priorisierung sollten unter anderem die Nähe zum Schadenspotential, das Schadenspotential selbst, der Schutzstatus, die Hangneigung, das Alter, die Nutzungsmöglichkeiten des Holzes und die Grossflächigkeit der einschichtig, dichten Struktur beurteilt werden. Es sollte auch in Betracht gezogen werden nicht in einen solchen dichten, einschichtigen Fichtenbestand einzugreifen, falls es sich um keinen Schutzwald beziehungsweise um einen mit nur geringer Wichtigkeit handelt. Diese Priorisierung für dichte, einschichtige Bestände kann in diesem Sinne teilweise jener gemäss NaIS widersprechen und sollte für eine einstweilige Überarbeitung diskutiert werden.

Wenn ein Eingriff erfolgen muss, um die Verjüngung zu fördern beziehungsweise einzuleiten, gilt es in erster Linie die oben genannten Aspekte zu beachten. Falls es sich um einen Schutzwald handelt, sollten möglichst kleine Eingriffe durchgeführt werden, um die Schutzleistung minimal zu beeinträchtigen. Je kleiner der Eingriff, desto wahrscheinlicher ist es auch, dass die Randbäume den durch die Ernte verursachten Zuwachsverlust kompensieren können. Für die Fichtenverjüngung gilt jedoch zu beachten, dass diese mehr als zwei Stunden Junisonne haben sollte und die Lückenbreite im Schutzwald vor allem an diesem Grenzwert ausgerichtet werden sollte. Weder in dieser noch in früheren Arbeiten konnte ein Zusammenhang zwischen der Lückenbreite und dem Verjüngungserfolg nachgewiesen werden, falls die zwei Stunden Junisonne erreicht wurden. Falls es sich um keinen Schutzwald handelt oder je nach Beurteilung des betreffenden Schutzwaldes, können auch breitere Verjüngungsschläge in Betracht gezogen werden. Zum einen hat die Lückenbreite (in nordwestexponierten Hängen, wie sie in dieser Arbeit untersucht wurden) keinen Einfluss auf die Verjüngung, zum anderen könnte in dieser Lücke später auch eine grossflächigere Strukturierung

vorgenommen werden. Ausserdem könnte eine grössere Lückengrösse unter Umständen für die Wirtschaftlichkeit der Holznutzung entscheidend sein.

In vorliegender Arbeit wurden nordwestexponierte Bestände untersucht und sowohl die Resultate als auch die Diskussion sind auf eben solche Bestände ausgelegt. In Beständen mit einer anderen Exposition beziehungsweise anderen Eigenschaften sind diese Resultate nur beschränkt anwendbar und müssen daher mit Vorsicht interpretiert werden. Deshalb sollten in zukünftigen Arbeiten auch andere Bestände in anderen Expositionen untersucht werden.

6. Danksagung

Ich möchte mich ganz herzlich bei meinen beiden Betreuern Peter Bebi und Frank Krumm bedanken. Sie haben mich während der ganzen Zeit betreut und sich immer die nötige Zeit genommen mich bei Fragen zu unterstützen. Ganz besonders möchte ich mich auch bei Anne Verstege bedanken. Sie hat mir während der Zeit in Birmensdorf sehr geholfen und mir die dendrochronologische Arbeit stark erleichtert. Frank Graf hat mich bei statistischen Angelegenheiten stark unterstützt und sich immer viel Zeit für mich genommen, vielen Dank auch dafür.

Des Weiteren möchte ich mich bei Gilbert Berchier, Martin Keiser, Lorenzo Martino, Giorgio Renz und Roberto Paravicini bedanken, sie haben mich bei der Wahl geeigneter Bestände beraten und unterstützt. Im Speziellen möchte ich mich bei Martin Keiser bedanken, welcher den Grundstein für die vorliegende Masterarbeit gelegt hat und auch Roberto Paravicini gilt ein besonderes Dankeschön, denn er hat sich die Zeit genommen um mir die beiden Untersuchungsgebiete in Zernez und Sta. Maria zu zeigen und mich ins Feld zu begleiten. Riet Gordon hat mir bei meinen GIS Problemen geholfen und mir den Zugang zu den LeiNa Daten gewährt. Er war auch sonst sehr an meiner Arbeit interessiert und hat durch sein kritisches Denken die Arbeit verbessert, vielen Dank auch dafür. Bei meinen Feldaufnahmen haben mich verschiedene Personen unterstützt. Insbesondere möchte ich mich bei Elia Stihl bedanken, der mich oft begleitet und mich tatkräftig unterstützt hat. Auch Julian Bleiker und Herbert Schnyder möchte ich meinen Dank für ihre Unterstützung bei meiner Feldarbeit aussprechen. Weiter möchte ich mich bei Jens Furrer und Kevin Simmler für die fortlaufenden Verbesserungsvorschläge bedanken. Markus Schorn möchte ich für die Bereitstellung des R-Skripts zur Berechnung der Freistellungseffekte danken. Zum Schluss will ich mich noch bei Livia Baumann und Curdin Spirig für das Gegenlesen und die konstruktive Kritik bedanken.

7. Literaturverzeichnis

- Akaike, H. 1998. Information theory und an extension of the maximum likelihood principle. Pages 199-213 Selected papers of hirotugu akaike. Springer.
- AWN. 2014. Anleitung zur Waldbestandeskartierung des Kantons Graubünden. Amt für Wald und Naturgefahren.
- Bachofen, H., und A. Zingg. 2005. Auf dem Weg zum Gebirgsplechterwald: Kurzzeiteffekte von Durchforstungen auf die Struktur subalpiner Fichtenwälder | On the way to a mountain selection forest: Short-term effects of thinning on the structure of subalpine spruce forests (reviewed paper). Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen **156**:456-466.
- Bebi, P., H. Bugmann, P. Lüscher, B. Lange, und P. Brang. 2016. 4.1 Auswirkungen des Klimawandels auf Schutzwald und Naturgefahren.
- Bebi, P., F. Krumm, U.-B. Brändli, und A. Zingg. 2013. Dynamik dichter, gleichförmiger Gebirgsfichtenwälder. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen **164**:37-46.
- Bigler, C., und T. T. Veblen. 2009. Increased early growth rates decrease longevities of conifers in subalpine forests. *Oikos* **118**:1130-1138.
- Black, B. A., und M. D. Abrams. 2003. USE OF BOUNDARY-LINE GROWTH PATTERNS AS A BASIS FOR DENDROECOLOGICAL RELEASE CRITERIA. *Ecological Applications* **13**:1733-1749.
- Black, B. A., und M. D. Abrams. 2004. Development and application of boundary-line release criteria. *Dendrochronologia* **22**:31-42.
- Božić, M., J. Čavlović, N. Lukić, K. Teslak, and D. Kos. 2005. Efficiency of ultrasonic Vertex III hypsometer compared to the most commonly used hypsometers in Croatian forestry. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering* **26**:91-99.
- Brändli, U.-B. 2010. Schweizerisches Landesforstinventar: Ergebnisse der dritten Erhebung: 2004-2006. Swiss Federal Research Institute (WSL).
- Brang, P., und P. Duc. 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., P. Nikolova, R. Gordon, und S. Zürcher. 2017. Auswirkungen grosser Verjüngungslücken im Gebirgswald auf Verjüngung und Holzzuwachs. Schlussbericht des Projektes Eingriffsstärke und Holzzuwachs im Gebirgswald. ETH Zurich.
- Brang, P., W. Schönenberger, H. Bachofen, A. Zingg, und A. Wehrli. 2004. Schutzwalddynamik unter Störungen und Eingriffen: Auf dem Weg zu einer systemischen Sicht. Pages 55-66 *in* Forum für Wissen.
- Brang, P., W. Schönenberger, M. Frehner, R. Schwitter, und B. Wasser. 2006. Management of protection forests in the European Alps: an overview. *in* For. Snow Landsc. Res. Citeseer.
- Bunn, A., und M. Korpela. 2015. An introduction to dplr.
- Chambers, J. M., W. S. Cleveland, B. Kleiner, und P. A. Tukey. 1983. Comparing data distributions. graphical methods for data analysis **62**.
- Cutter, B. E., K. E. Lowell, und J. P. Dwyer. 1991. Thinning effects on diameter growth in black and scarlet oak as shown by tree ring analyses. *Forest ecology and management* **43**:1-13.
- Dale, M. E. 1968. Growth response from thinning young even-aged white oak stands. Northeastern Forest Experiment Station, Forest Service, US Department of
- Duc, P., U.-B. Brändli, und P. Brassel. 2004. Der Schutzwald im zweiten Schweizerischen Landesforstinventar (LFI2). Pages 7-13 *in* Forum für Wissen.
- 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.
- Frehner, M., B. Wasser, und R. Schwitter. 2005. Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern **564**.

- Gałecki, A., und T. Burzykowski. 2013. Linear mixed-effects model. Pages 245-273 *Linear Mixed-Effects Models Using R*. Springer.
- Graubünden, A. f. W. u. N. K. 2019. LeiNa. Kanton Graubünden.
- Grimm, V., E. Schmidt, und C. Wissel. 1992. On the application of stability concepts in ecology. *Ecological modelling* **63**:143-161.
- Grissino-Mayer, H. D. 2001. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA.
- Grissino-Mayer, H. D. 2003. A manual and tutorial for the proper use of an increment borer.
- Groome, J. 1988. Mutual support of trees. *Scottish Forestry* **42**:12-14.
- Hillgarter, F.-W. 1971. Waldbauliche und ertragskundliche Untersuchungen im subalpinen Fichtenurwald Scatlé/Brigels. ETH Zurich.
- Höllnerl, S. 2009. Auswirkungen von waldbaulichen Maßnahmen auf die Stabilität (Resistenz und Elastizität) von Fichtenreinbeständen in der Bergmischwaldstufe der Bayerischen Alpen. Technische Universität München.
- Keller, M. 2005. Schweizerisches Landesforstinventar: Anleitung für die feldaufnahmen der Erhebung 2004-2007.
- Könz, G. S. 2018. Räumliche Erfassung von Waldgeschichte und Schutzwirkung eines subalpinen Fichten-Lärchenbestandes.
- Köttl, S. 2017. Widerstandsfähige, stabile Waldbestände in Zeiten des Klimawandels. Steiermärkischer Forstverein.
- Krumm, F. 2011. Natural dynamics in dense subalpine forests of the Swiss Alps. Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek.
- Krumm, F., D. Kulakowski, A. C. Risch, H. Spiecker, U.-B. Brändli, und P. Bebi. 2012. Stem exclusion and mortality in unmanaged subalpine forests of the Swiss Alps. *European journal of forest research* **131**:1571-1583.
- Kupferschmid, A. D., C. Heiri, M. Huber, M. Fehr, M. Frei, P. Gmür, N. Imesch, J. Zinggeler, P. Brang, und J.-C. Clivaz. 2015. Einfluss wildlebender Huftiere auf die Waldverjüngung: ein Überblick für die Schweiz. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* **166**:420-431.
- Lorimer, C. G., und L. E. Frelich. 1989. A methodology for estimating canopy disturbance frequency and intensity in dense temperate forests. *Canadian Journal of Forest Research* **19**:651-663.
- Losey, S., und A. Wehrli. 2013. Schutzwald in der Schweiz. Vom Projekt SilvaProtect-CH zum harmonisierten Schutzwald. Bern: Bundesamt Umwelt.
- Mayer, H. 1978. Ökosystem Lawinenschutz. *in* Mountain Forests and Avalanches IUFRO Working Party Snow and Avalanches. SFISAR, Davos.
- Motta, R., und J.-C. Haudemand. 2000. Protective forests and silvicultural stability. *Mountain Research and Development* **20**:180-187.
- Motta, R., P. Nola, und P. Piussi. 1999. Structure and stand development in three subalpine Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stands in Paneveggio (Trento, Italy). *Global Ecology and Biogeography* **8**:455-471.
- Nowacki, G. J., und M. D. Abrams. 1997. Radial-growth averaging criteria for reconstructing disturbance histories from presettlement-origin oaks. *Ecological Monographs* **67**:225-249.
- Ott, E., M. Frehner, H.-U. Frey, und P. Lüscher. 1997. Gebirgsnadelwälder: Ein praxisorientierter Leitfaden für eine standortgerechte Waldbehandlung. Haupt.
- Panayotov, M., D. Kulakowski, N. Tsvetanov, F. Krumm, I. Barbeito, und P. Bebi. 2016. Climate extremes during high competition contribute to mortality in unmanaged self-thinning Norway spruce stands in Bulgaria. *Forest ecology and management* **369**:74-88.
- Peet, R. K. 2000. Forests and meadows of the Rocky Mountains. *North American terrestrial vegetation* **2**:75-122.
- R Development Core Team, R. 2011. R: A language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing Vienna, Austria.

- Rottmann, M. 1985. Schneebruchschäden in Nadelholzbeständen: Beiträge zur Beurteilung der Schneebruchgefährdung, zur Schadensvorbeugung und zur Behandlung schneegesetziger Nadelholzbestände. Sauerländer.
- Rubino, D. L., und B. McCarthy. 2004. Comparative analysis of dendroecological methods used to assess disturbance events. *Dendrochronologia* **21**:97-115.
- Schorn, M. E. 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.
- Stierlin, H.-R. 1994. Schweizerisches Landesforstinventar: Anleitung für die Feldaufnahmen der Erhebung 1993-1995. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft.
- swisstopo, F. O. o. T. 2020. SWISSIMAGE Journey through time. Federal Office of Topography swisstopo.
- Thomasius, H. 1988. Stabilität natürlicher und künstlicher Waldökosysteme sowie deren Beeinflussbarkeit durch forstwirtschaftliche Maßnahmen. *Allgemeine Forstzeitschrift* **43**:1064-1068.
- von Siemens, M., S. Hanfland, W. Binder, M. Herrmann, W. Rehkla, B. Landesamt, M. Krolo, und D. Schall. 2005. Wo Totholz im Fließ-gewässer ist, sind auch Fische. Kein Anglerlatein, sondern eine Tatsache. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft.
- Wasser, B., und B. Perren. 2014. Wirkung von schutzwald gegen gravitative naturgefahren—protect-bio. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* **165**:275-283.
- Wehrli, A., P. Brang, B. Maier, P. Duc, F. Binder, E. Lingua, K. Ziegner, K. Kleemayr, und L. Dorren. 2007. Schutzwaldmanagement in den Alpen—eine Übersicht | Management of protection forests in the Alps—an overview. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* **158**:142-156.
- Wheater, C. P., J. R. Bell, und P. A. Cook. 2011. *Practical field ecology: a project guide*. John Wiley & Sons.
- Wohlgemuth, T., A. Jentsch, und R. Seidl. 2019. *Störungsökologie*. UTB GmbH.
- Zeller, E. 1994. *Stabilitätspflege im Gebirgswald: Beurteilungs- und Entscheidungshilfen für die waldbauliche Praxis*. Interkantonale Försterschule.
- ZÜRICH, E. 2002. *Mitteleuropäische Waldbaumarten: Artbeschreibung und Ökologie unter besonderer Berücksichtigung der Schweiz*. ETH Zürich.

8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Karte des Kantons Graubünden mit den Untersuchungsgebieten	5
Abbildung 2: Luftbild des Bestandes aus Davos aus dem Jahr 2006 (swisstopo 2020)	6
Abbildung 3: Luftbild des Bestandes aus Davos aus dem Jahr 2015 (swisstopo 2020)	6
Abbildung 4: Luftbild des Bestandes aus Pedecosta aus dem Jahr 2006 (swisstopo 2020)	6
Abbildung 5: Luftbild des Bestandes aus Pedecosta aus dem Jahr 2015 (swisstopo 2020)	6
Abbildung 6: Luftbild des Bestandes aus Sta. Maria aus dem Jahr 2006 (swisstopo 2020).....	7
Abbildung 7: Luftbild des Bestandes aus Sta. Maria aus dem Jahr 2015 (swisstopo 2020).....	7
Abbildung 8: Luftbild des Bestandes aus Sur En aus dem Jahr 2006 (swisstopo 2020).....	7
Abbildung 9: Luftbild des Bestandes aus Sur En aus dem Jahr 2015 (swisstopo 2020).....	7
Abbildung 10: Luftbild des Bestandes aus Zernez aus dem Jahr 2006 (swisstopo 2020)	7
Abbildung 11: Luftbild des Bestandes aus Zernez aus dem Jahr 2015 (swisstopo 2020)	7
Abbildung 12: Exposition und Hangneigung der verschiedenen Probeflächen	8
Abbildung 13: Randfläche in Davos	9
Abbildung 14: Bestandesfläche in Davos	10
Abbildung 15: Vergleichsfläche (Krumm 2011)	11
Abbildung 16: Einteilung der Randfläche in die drei Bereiche äusserer, mittlerer und innerer Rand ..	12
Abbildung 17: Luftbild vom Bestand in Davos aus dem Jahr 2006.....	13
Abbildung 18: Luftbild vom Bestand in Davos aus dem Jahr 2015 mit Anordnung der Probeflächen ..	13
Abbildung 19: Anordnung der Probeflächen in Sur En	13
Abbildung 20: Anordnung der Probeflächen in Pedecosta	13
Abbildung 21: Anordnung der Probeflächen in Zernez.....	14
Abbildung 22: Anordnung der Probeflächen in Sta. Maria	14
Abbildung 23: Veranschaulichung zur Berechnung der prozentualen Wachstumsveränderung und dem vorherigen Wachstums für einen Zeitraum von vier Jahren	18
Abbildung 24: Mittels exponentiellen Modells gefittete Boundary-Line für die Fichte. Dargestellt sind alle ausgewählten Punkte der ITRDB, wobei die roten Punkte für das Fitten verwendet wurden.....	18
Abbildung 25: Maxima der prozentualen Wachstumsveränderungen über 10% (rot) für den Baum p1-1-20-R.....	19
Abbildung 26: Prozentuale Wachstumsveränderung und vorheriges Wachstum der Bestände in Davos, Zernez, Pedecosta, Sur En und Sta. Maria. In Rot sind die bedeutenden Freistellungen und in orange die moderaten Freistellungen nach Black und Abrams (2013) eingezeichnet	20
Abbildung 27: Anteil an abgestorbenen Bäumen in den verschiedenen Bereichen	23
Abbildung 28: BHD in Abhängigkeit des Baumzustandes in den Randflächen.....	24
Abbildung 29: BHD in Abhängigkeit des Baumzustandes in den Vergleichsflächen	24
Abbildung 30: Kronenlänge in Abhängigkeit des Baumzustandes in den Randflächen.....	25
Abbildung 31: Kronenlänge in Abhängigkeit des Baumzustandes in den Vergleichsflächen.....	25
Abbildung 32: Schlankheitsgrad in Abhängigkeit des Baumzustandes in den Randflächen	25
Abbildung 33: Schlankheitsgrad in Abhängigkeit des Baumzustandes in den Vergleichsflächen.....	25
Abbildung 34: Altersverteilung der fünf untersuchten Bestände	26
Abbildung 35: Log-transformierter BHD in Abhängigkeit des Alters, lineare Funktion mit dem Standort als zufällige Variable, in grau wird das 95%-Vertrauensintervall aufgezeigt	27
Abbildung 36: BHD in Abhängigkeit des Alters für die fünf Bestände der vorliegenden Arbeit, in grau wird das 95%-Vertrauensintervall aufgezeigt	28
Abbildung 37: Log-transformierter BHD in Abhängigkeit des Alters, lineare Funktion mit dem Standort als zufällige Variable für die Daten aus den Vergleichsflächen, in grau wird das 95%-Vertrauensintervall aufgezeigt	29

Abbildung 38: BHD in Abhängigkeit des Alters für die Daten aus den Vergleichsflächen, in grau wird das 95%-Vertrauensintervall aufgezeigt	29
Abbildung 39: Zuwachsveränderung in Prozent für die verschiedenen Bereiche, Zeitraum vor = nach = 2019 - Zeitpunkt des Eingriffes	30
Abbildung 40: Zuwachsveränderung des äusseren Randes in Prozent für die verschiedenen Untersuchungsgebiete, basierend auf nicht standardisierten Jahrringserien mit Zeitraum vor = nach = 2019 - Zeitpunkt des Eingriffes	31
Abbildung 41: Log-transformierte Zuwachsdifferenz der einzelnen Bäume im äusseren Rand in Abhängigkeit der Kronenlänge, in grau wird das 95%-Vertrauensintervall aufgezeigt	32
Abbildung 42: Log-transformierte Zuwachsdifferenz der einzelnen Randbäume in Abhängigkeit des Alters, in grau wird das 95%-Vertrauensintervall aufgezeigt	32
Abbildung 43: Moderate und bedeutende Freistellungen der letzten 50 Jahre gemäss den Kriterien von Black und Abrams (2013) für die Bäume des äusseren Randes in Pedecosta	33
Abbildung 44: Moderate und bedeutende Freistellungen der letzten 50 Jahre gemäss den überarbeiteten Kriterien für die Bäume des äusseren Randes in Pedecosta	34
Abbildung 45: Moderate und bedeutende Freistellungseffekte der letzten 50 Jahre gemäss den Kriterien von Black und Abrams (2013) für die Bäume des äusseren Randes in Sur En	34
Abbildung 46: Moderate und bedeutende Freistellungseffekte der letzten 50 Jahre gemäss den überarbeiteten Kriterien für die Bäume des äusseren Randes in Sur En	35
Abbildung 47: Distanz zu den nächsten drei Verjüngungsansätzen für die verschiedenen Bereiche ...	36
Abbildung 48: Gemessene Sonnenstunden pro Tag im Juni für die verschiedenen Transektpunkte ...	36
Abbildung 49: Höhenverteilung der Probeflächen	56
Abbildung 50: Verschiedene Modelle zur Identifizierung der Boundary-Line	58
Abbildung 51: Überblick der numerischen Parameter und deren Korrelationen	58
Abbildung 52: Linearer Zusammenhang zwischen BHD und Alter ohne zufällige Effekte	59
Abbildung 53: Residuen-Analyse für ein nicht log-transformiertes Modell mittels Tukey-Anscombe-Diagramms (links) und Quantil-Quantil-Diagramms (rechts)	59
Abbildung 54: Residuen-Analyse für ein log-transformiertes Modell mittels Tukey-Anscombe-Diagramms (links) und Quantil-Quantil-Diagramms (rechts)	59
Abbildung 55: Zuwachsveränderung in Prozent für die verschiedenen Bereiche basierend auf standardisierten Jahrringserien, Zeitraum vor = nach = 2019 - Zeitpunkt des Eingriffes	61
Abbildung 56: Zuwachsveränderung in Prozent für die verschiedenen Bereiche mit nicht standardisierten Jahrringserien, Zeitraum vor = nach = 4 Jahre	61
Abbildung 57: Zuwachsveränderung in Prozent für die verschiedenen Bereiche mit standardisierten Jahrringserien, Zeitraum vor = nach = 4 Jahre	62
Abbildung 58: Zuwachsveränderung des äusseren Randes in Prozent für die verschiedenen Untersuchungsgebiete, basierend auf nicht standardisierten Jahrringserien mit Zeitraum vor = nach = 2019 - Zeitpunkt des Eingriffes	62
Abbildung 59: Zuwachsveränderung des äusseren Randes in Prozent für die verschiedenen Untersuchungsgebiete, basierend auf nicht standardisierten Jahrringserien mit Zeitraum vor = nach = 4 Jahre	63
Abbildung 60: Zuwachsveränderung des äusseren Randes in Prozent für die verschiedenen Untersuchungsgebiete, basierend auf standardisierten Jahrringserien mit Zeitraum vor = nach = 4 Jahre	63
Abbildung 61: Residuen-Analyse der Zuwachsdifferenz in Abhängigkeit des Alters mittels Tukey-Anscombe-Diagramms (links) und Quantil-Quantil-Diagramms (rechts)	64
Abbildung 62: Residuen-Analyse für eine log-transformierte Zuwachsdifferenz in Abhängigkeit des Alters mittels Tukey-Anscombe-Diagramms (links) und Quantil-Quantil-Diagramms (rechts)	64

Abbildung 63: Residuen-Analyse der Zuwachsdifferenz in Abhängigkeit der Kronenlänge mittels Tukey-Anscombe-Diagramms (links) und Quantil-Quantil-Diagramms (rechts).....	64
Abbildung 64: Residuen-Analyse für eine log-transformierte Zuwachsdifferenz in Abhängigkeit der Kronenlänge mittels Tukey-Anscombe-Diagramms (links) und Quantil-Quantil-Diagramms (rechts)..	64
Abbildung 65: Moderate und bedeutende Freistellungseffekte der letzten 150 Jahre gemäss den Kriterien von Black und Abrams (2013) für alle Bäume des äusseren Randes.....	65
Abbildung 66: Moderate und bedeutende Freistellungseffekte der letzten 150 Jahre gemäss den überarbeiteten Kriterien für alle Bäume des äusseren Randes	65

9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Interpolierter durchschnittlicher Jahresniederschlag und durchschnittliche Jahresmitteltemperatur der verschiedenen Untersuchungsgebiete für die Periode 1981-2010 (Quelle: Meteo Schweiz)	8
Tabelle 2: Einstellungen für die Kreuzvalidierung der Jahrringserien mit Hilfe des Programmes COFECHA	16
Tabelle 3: Überblick zu den verschiedenen Beständen	56
Tabelle 4: Exposition und Höhenlage der Probeflächen von Krumm (2011)	57
Tabelle 5: Datensätze für das Fitten der Boundary-Line (Schorn 2018)	57
Tabelle 6: Überblick der Signifikanzen der BHD-Alter-Beziehung für die Daten der Vergleichsflächen	60

10. Glossar

AIC	Akaike information criterion. Je tiefer der Wert desto besser das Modell (Akaike 1998)
BHD	Brusthöhendurchmesser, Baumstammdurchmesser auf 1.3 m Höhe über dem Boden (Stierlin 1994)
Einschichtig	Bestände, welche aus +/- gleich hohen Bäumen bestehen (AWN 2014)
Endtrieb	letztgebildeter Teil des Leittriebes (Keller 2005)
Freistellungseffekt	Auch Release-Effekt, abrupter Anstieg des Jahrringwachstums
Hochmontan	Ökologische Höhenstufe auf 1000-1500 m ü. M. (Frehner et al. 2005)
Krone	Benadelter Teil des Baumes zwischen Kronenansatz (erster grüner Ast, ohne Berücksichtigung der Klebäste) und Gipfel (Stierlin 1994)
Kruskal-Wallis-Test	Statistischer Test für den Vergleich von mehr als zwei Gruppen
Leittrieb	Spross der vom Stammfuss zum Gipfel die geringste Richtungsänderung zeigt und die höchste Spitze bildet (Keller 2005)
LFI	Landesforstinventar
NaiS	Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald - Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wälder mit Schutzfunktion (Frehner et al. 2005)
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
Resistenz	Fähigkeit eines Systems trotz Anwesenheit von Störungen im Gleichgewichtszustand zu verharren
Schlankheitsgrad	Verhältnis von Baumhöhe zu Brusthöhendurchmesser (Stierlin 1994)
Selbstdifferenzierungsphase	Zunahme der Mortalität und kaum natürliche Verjüngung
Stabilität	Kombiniertes Auftreten von Resistenz und Resilienz
Subalpin	Ökologische Höhenstufe auf 1500-2100 m ü. M. (Frehner et al. 2005)
Transekt	Messpunkte entlang einer geraden Linie, welche im Allgemeinen verwendet wird um einen Umweltgradienten zu untersuchen (Wheater et al. 2011)
Transektpunkt	Einzelner Messpunkt auf einem Transekt
Verjüngung	In einem Altholz, einem stufigen Bestand oder auf einer Schlagfläche neu aufkommende Baumgeneration (Stierlin 1994)

Verklausung	Teilweiser oder vollständiger Verschluss des Gewässerbetts durch Treibgut, wie z. B. Totholz (von Siemens et al. 2005)
Vorverjüngung	Verjüngung, welche bereits vorhanden war, bevor eingegriffen wurde
Waldfunktion	Vom Wald erbrachte oder verlangte Wirkungen und Leistungen (Stierlin 1994)
Wilcox-Rangsummentest	Statistischer Test für den Vergleich von zwei unabhängigen Stichproben
Zwangsnutzung	Ungeplante, durch Naturereignisse (Sturm, Lawinen, Insekten, Rutschungen usw.) verursachte Nutzung von Bäumen (Stierlin 1994)

11. Anhang

Tabelle 3: Überblick zu den verschiedenen Beständen

	Davos	Zernez	Pedecosta	Sta. Maria	Sur En
Exposition	Nordwest	Nordwest	Nordwest	Nordwest	Nordwest
Fichtenanteil	90%	70%	90%	100%	80%
Eingriffsjahr	2011 & 2012	2015	2009 & 2010	2011 & 2012	2010
Eingriffsmethode	Langstreckenseilkran	Seilkran	Langstreckenseilkran	Langstreckenseilkran	Seilkran
Holzreimassnahme	Verjüngungseinleitung	Verjüngungsförderung	Verjüngungseinleitung	Verjüngungseinleitung	Verjüngungseinleitung/ Verjüngungsförderung
Bestandesstruktur	einschichtig	stufig nach unten	einschichtig	einschichtig	stufig nach unten
Waldform	Hochwald	Hochwald	Hochwald	Hochwald	Hochwald

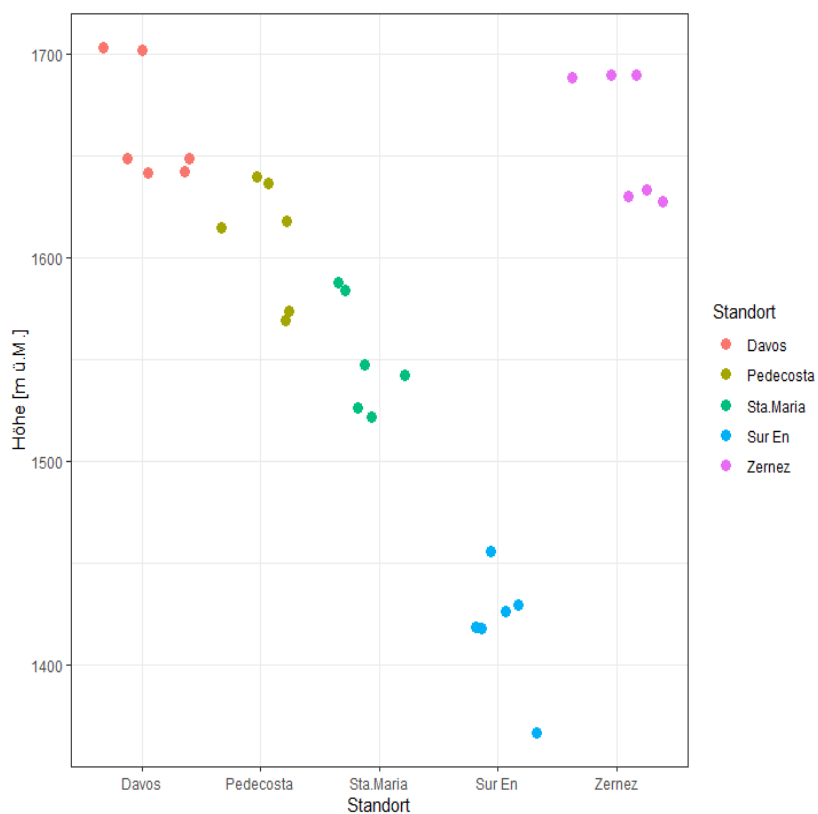


Abbildung 49: Höhenverteilung der Probeflächen

Tabelle 4: Exposition und Höhenlage der Probeflächen von Krumm (2011)

Standort	Exposition	Höhenlage [m ü. M.]
Aebiwald	NO	1'626
Valzeina	NW	1'517
Litziwald	N	1'680
Trittwald	SW	1'831
Savognin	W	1'950
Lenz	S	1'762
Flums	W	1'774
Stels	NW	1'608
Safien	N	1'650
Safien SW	SW	1'900
Vals	N	1'720
Derborence	SW	1'713
Trutmann NE	NO	1'905
Trutmann	SW	1'583
Wengen	S	1'823
Grindelwald	NO	1'524
Andeer	NO	1'811
Ausserferrera	SW	1'724
Olivone	SW	1'709
Soazza	O	1'662

Tabelle 5: Datensätze für das Fitten der Boundary-Line (Schorn 2018)

ID	Standort	Höhenlage	Autor
SWIT107	Arosa GR Rot Tritt North	1'940	Schweingruber, F.H.
SWIT108	Arosa Arlenwald South	2'000	Schweingruber, F.H.
SWIT174	Grindelwald BE Nord (N3)	1'700	Schweingruber, F.H.
SWIT175	Grindelwald BE Süd (S3)	1'960	Schweingruber, F.H.
SWIT179	Davos GR Sertig	1'960	Bigler, C.
SWIT180	Briegels GR Scatle	1'600	Bigler, C.
SWIT181	Davos GR Dischma - Flüela	1'800	Bigler, C.
SWIT186	Bergün GR Val Tours	2'065	Bigler, C.; Bircher, N.; Meile, C.
SWIT193	Vals GR Riefawald	1'900	Bigler, C.; Kühne, K.
SWIT279	Grindelwald BE Mettla	1'850	Bigler, C.; Etter, S.
SWIT332	San Bernardina GR	1'660	Fonti, P.

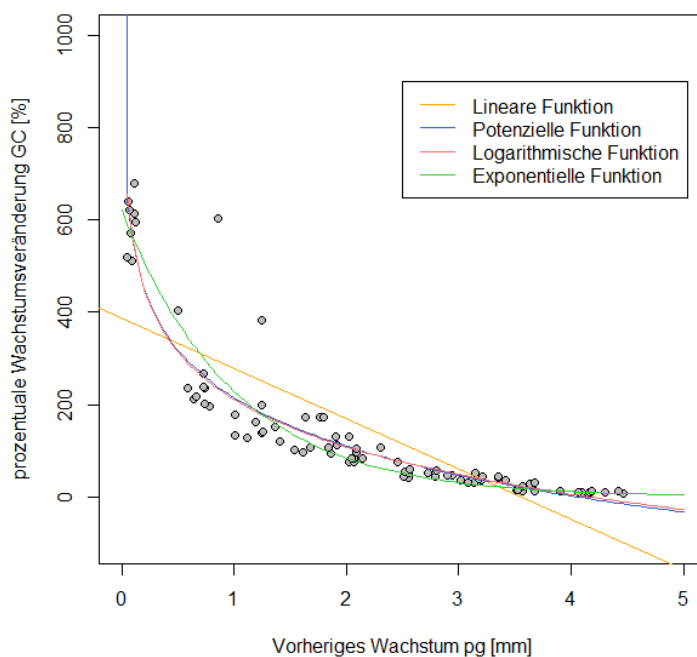


Abbildung 50: Verschiedene Modelle zur Identifizierung der Boundary-Line

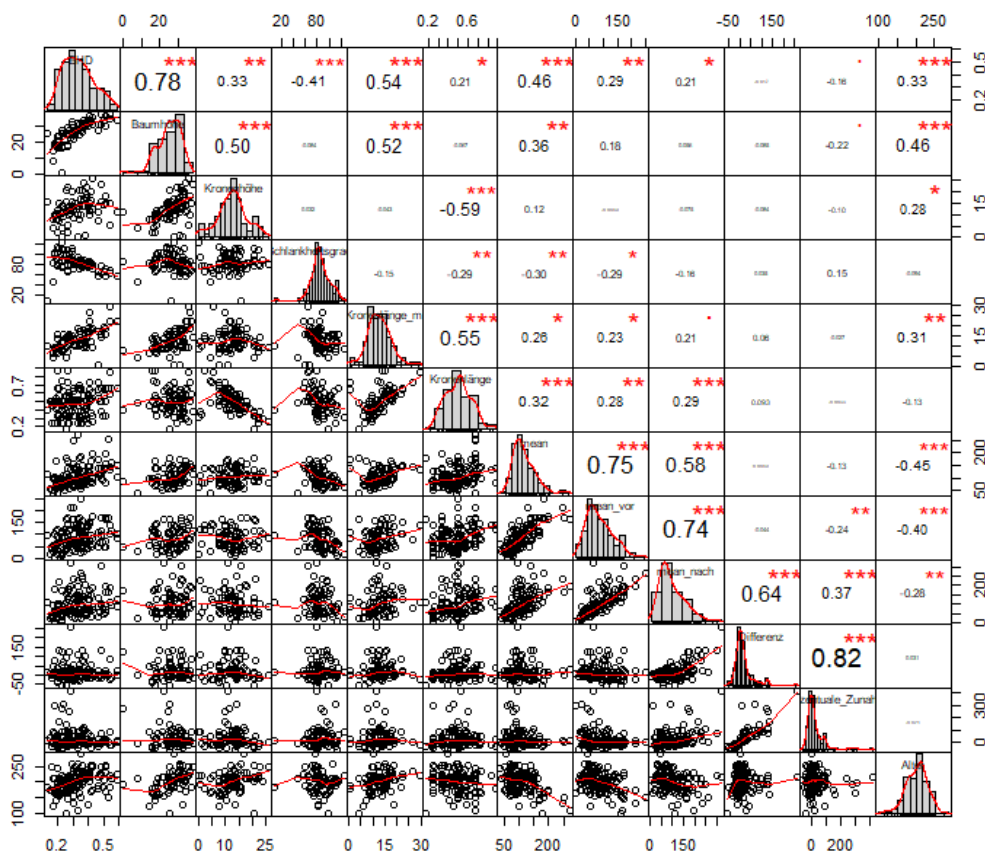


Abbildung 51: Überblick der numerischen Parameter und deren Korrelationen

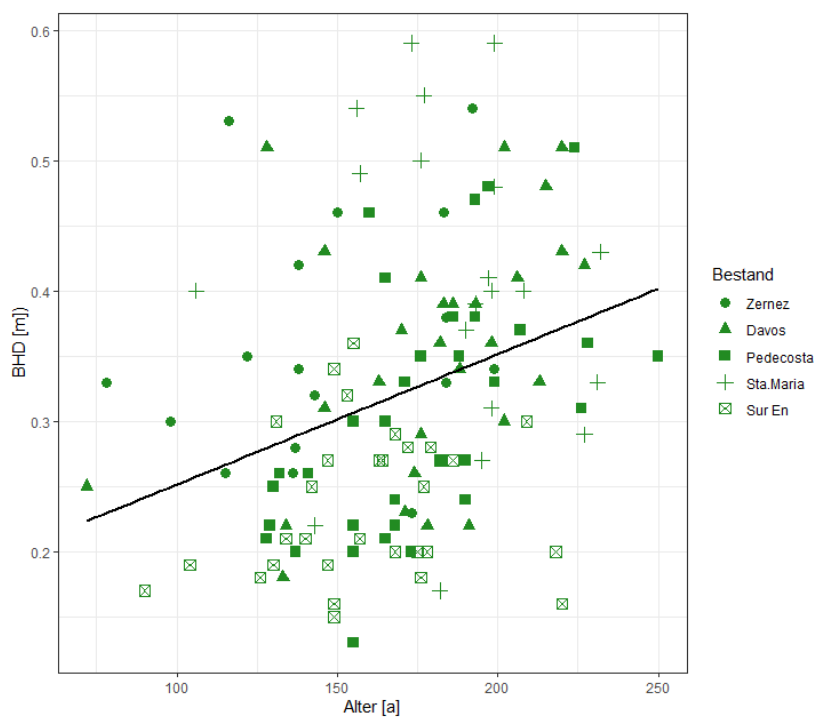


Abbildung 52: Linearer Zusammenhang zwischen BHD und Alter ohne zufällige Effekte

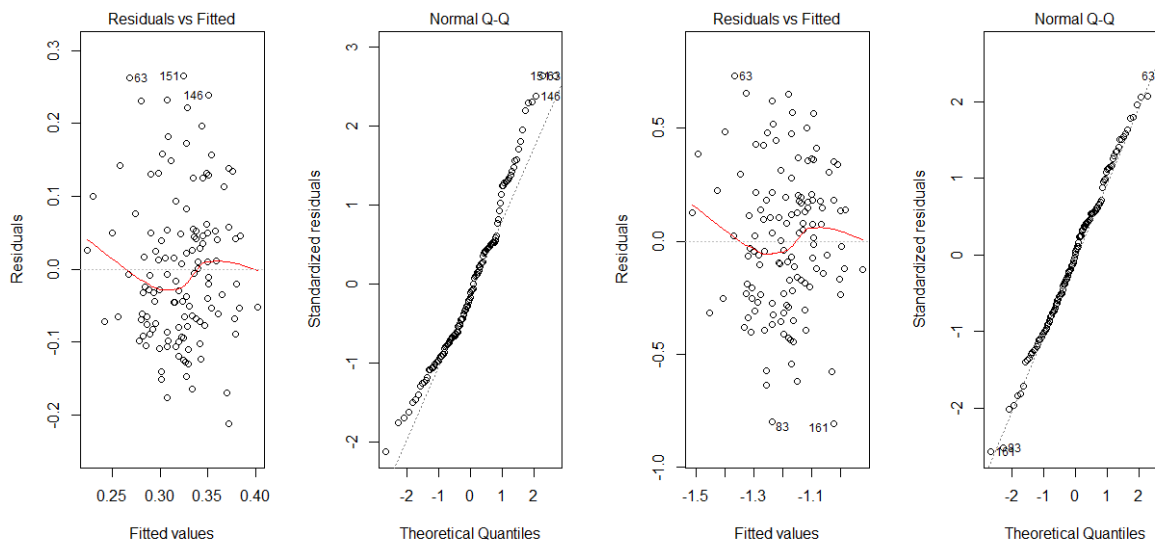


Abbildung 53: Residuen-Analyse für ein nicht log-transformiertes Modell mittels Tukey-Anscombe-Diagramms (links) und Quantil-Quantil-Diagramms (rechts)

Abbildung 54: Residuen-Analyse für ein log-transformiertes Modell mittels Tukey-Anscombe-Diagramms (links) und Quantil-Quantil-Diagramms (rechts)

Tabelle 6: Überblick der Signifikanzen der BHD-Alter-Beziehung für die Daten der Vergleichsflächen

Standort	Exposition	Anzahl Bäume	P-Wert	Signifikanz
Aebiwald	NO	74	7.83E-14	***
Valzeina	NW	18	0.0151	*
Litziwald	N	43	0.0001	***
Trittwald	SW	39	1.99E-05	***
Savognin	W	46	0.446	n.s.
Lenz	S	42	0.35	n.s.
Flums	W	44	0.375	n.s.
Stels	NW	36	0.038	*
Safien	N	43	0.1488	n.s.
Safien SW	SW	59	0.0039	**
Vals	N	32	0.8093	n.s.
Derborence	SW	43	0.375	n.s.
Trutmann NE	NO	32	8.50E-06	***
Trutmann	SW	43	1.46E-05	***
Wengen	S	39	1.67E-11	***
Grindelwald	NO	94	0.0593	n.s.
Andeer	NO	63	0.0016	**
Ausserferrera	SW	62	2.42E-06	***
Olivone	SW	45	1.44E-05	***
Soazza	O	50	0.0035	**

n.s. = nicht signifikant, **schwach signifikant*, ***signifikant*, ****stark signifikant*

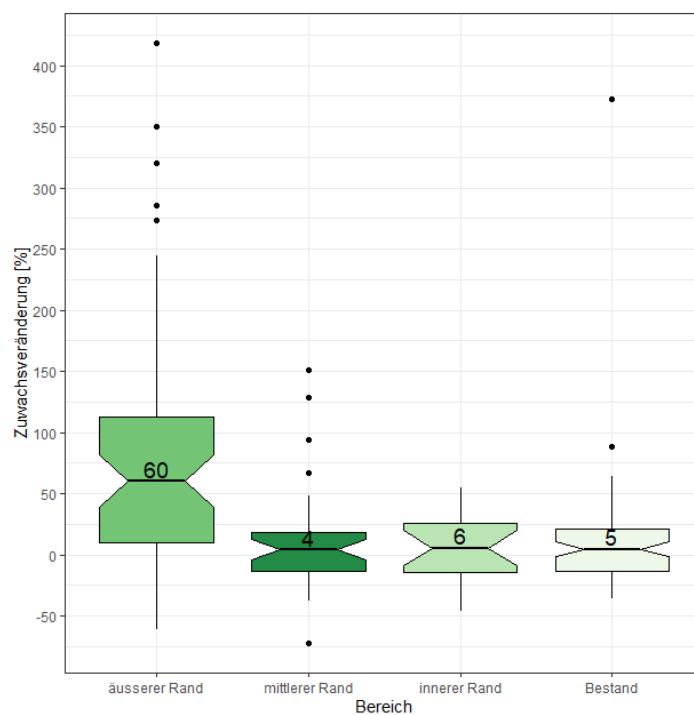


Abbildung 55: Zuwachsveränderung in Prozent für die verschiedenen Bereiche basierend auf standardisierten Jahrringserien, Zeitraum vor = nach = 2019 - Zeitpunkt des Eingriffes

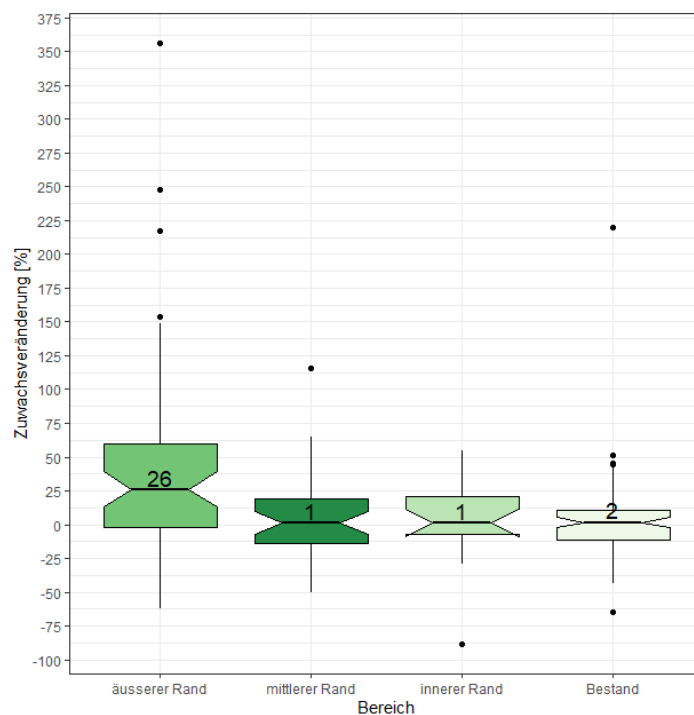


Abbildung 56: Zuwachsveränderung in Prozent für die verschiedenen Bereiche mit nicht standardisierten Jahrringserien, Zeitraum vor = nach = 4 Jahre

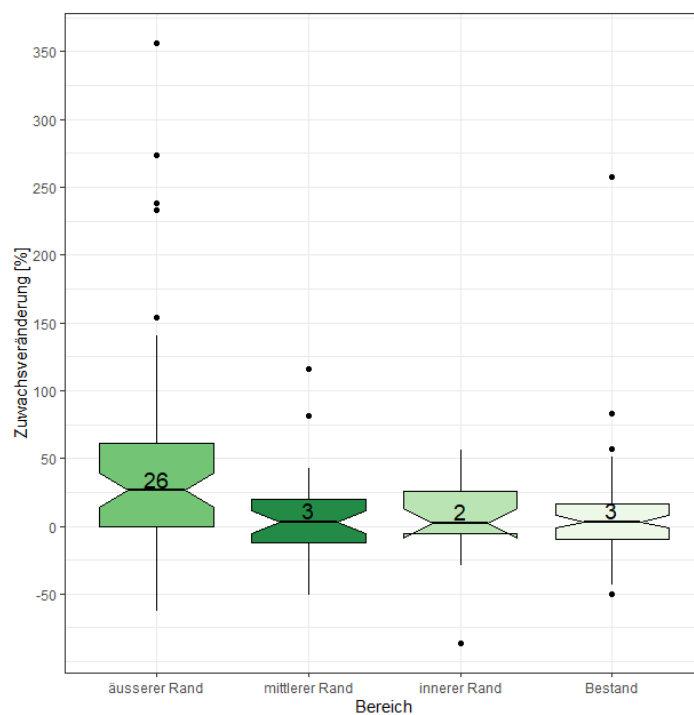


Abbildung 57: Zuwachsveränderung in Prozent für die verschiedenen Bereiche mit standardisierten Jahrringserien, Zeitraum vor = nach = 4 Jahre

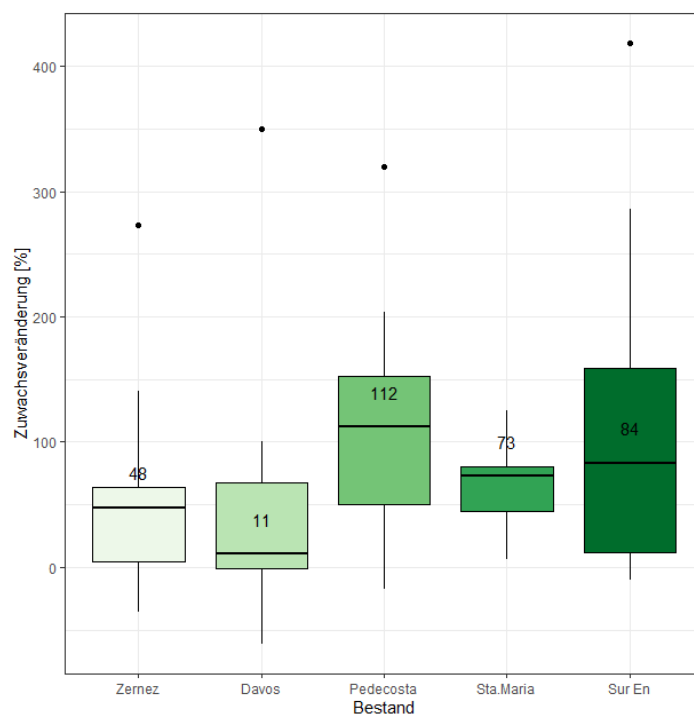


Abbildung 58: Zuwachsveränderung des äusseren Randes in Prozent für die verschiedenen Untersuchungsgebiete, basierend auf nicht standardisierten Jahrringserien mit Zeitraum vor = nach = 2019 - Zeitpunkt des Eingriffes

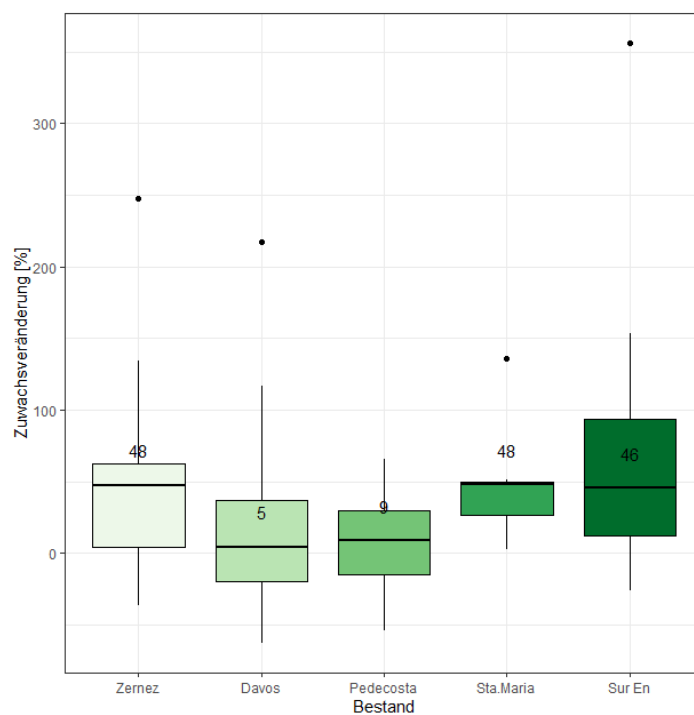


Abbildung 59: Zuwachsveränderung des äusseren Randes in Prozent für die verschiedenen Untersuchungsgebiete, basierend auf nicht standardisierten Jahrringserien mit Zeitraum vor = nach = 4 Jahre

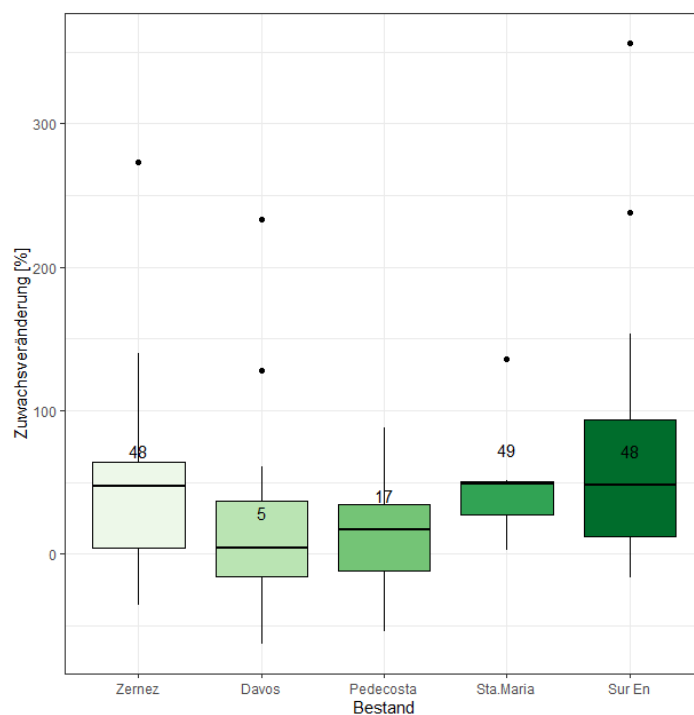


Abbildung 60: Zuwachsveränderung des äusseren Randes in Prozent für die verschiedenen Untersuchungsgebiete, basierend auf standardisierten Jahrringserien mit Zeitraum vor = nach = 4 Jahre

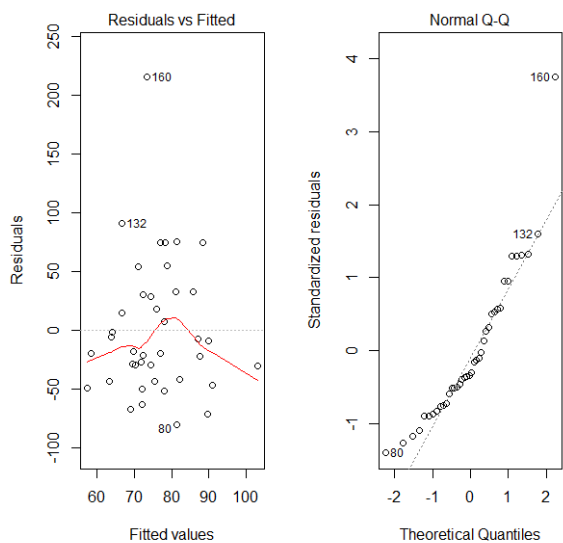


Abbildung 61: Residuen-Analyse der Zuwachsdifferenz in Abhängigkeit des Alters mittels Tukey-Anscombe-Diagramms (links) und Quantil-Quantil-Diagramms (rechts)

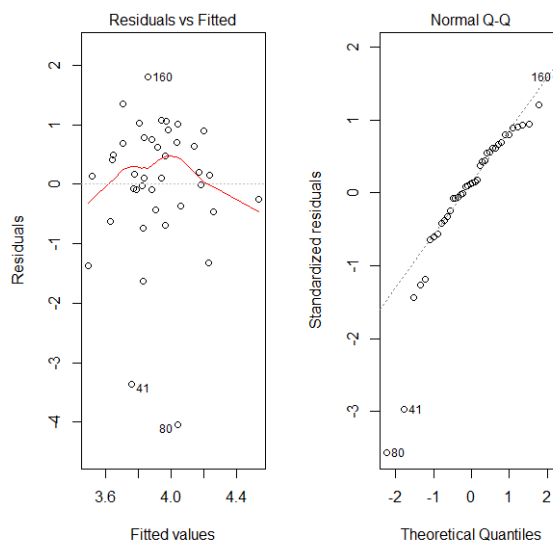


Abbildung 62: Residuen-Analyse für eine log-transformierte Zuwachsdifferenz in Abhängigkeit des Alters mittels Tukey-Anscombe-Diagramms (links) und Quantil-Quantil-Diagramms (rechts)

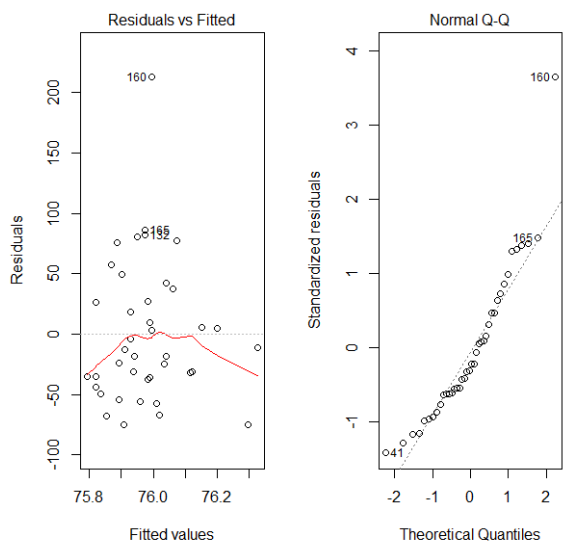


Abbildung 63: Residuen-Analyse der Zuwachsdifferenz in Abhängigkeit der Kronenlänge mittels Tukey-Anscombe-Diagramms (links) und Quantil-Quantil-Diagramms (rechts)

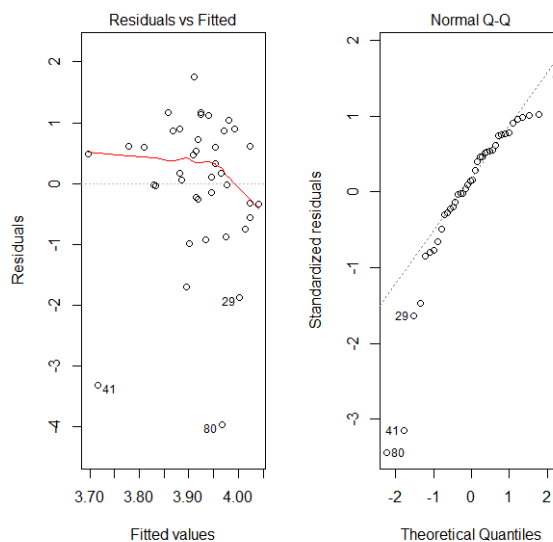


Abbildung 64: Residuen-Analyse für eine log-transformierte Zuwachsdifferenz in Abhängigkeit der Kronenlänge mittels Tukey-Anscombe-Diagramms (links) und Quantil-Quantil-Diagramms (rechts)

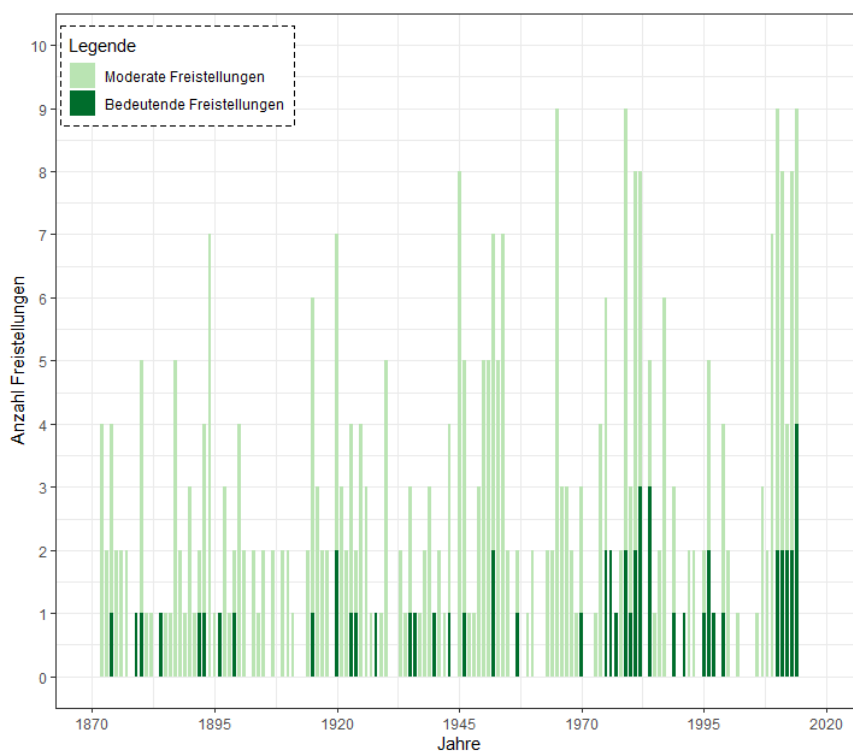


Abbildung 65: Moderate und bedeutende Freistellungseffekte der letzten 150 Jahre gemäss den Kriterien von Black und Abrams (2013) für alle Bäume des äusseren Randes

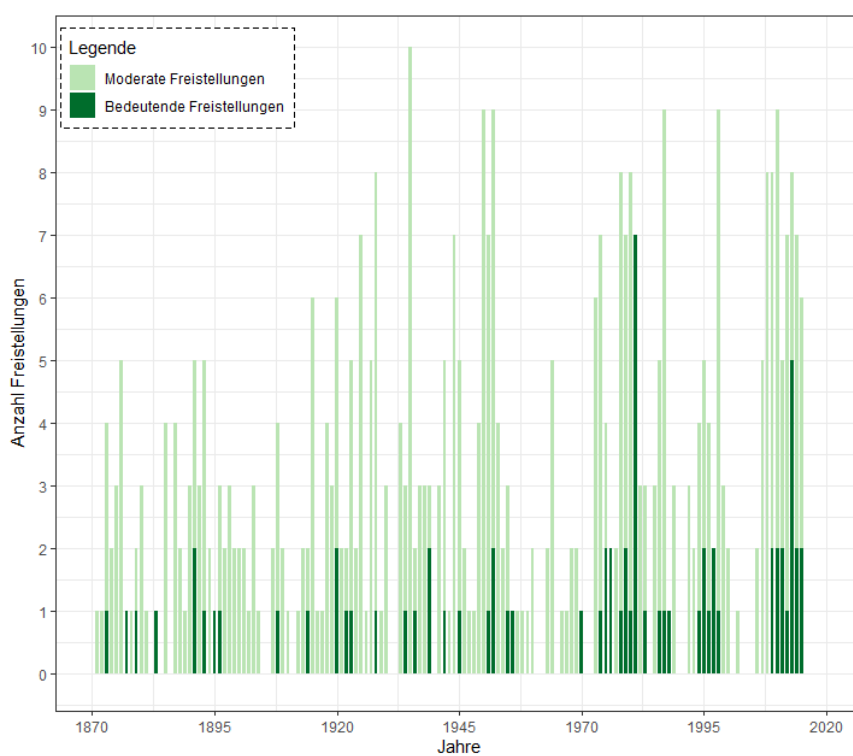


Abbildung 66: Moderate und bedeutende Freistellungseffekte der letzten 150 Jahre gemäss den überarbeiteten Kriterien für alle Bäume des äusseren Randes

Eigenständigkeitserklärung



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

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):

Dynamik in einschichtigen, dichten Fichtenbeständen:
Eine Untersuchung in nordwestexponierten Verjüngungsschlitzen

Verfasst von (in Druckschrift):

Bei Gruppenarbeiten sind die Namen aller Verfasserinnen und Verfasser erforderlich.

Name(n):

Guetg

Vorname(n):

Mario

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 14.04.20

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.