
Biologische Rationalisierung im Schutzwald

Einfluss eines Birkenvorwaldes auf Fichten in hochmontanen Wäldern



Masterarbeit von: Simon Imhof [14-051-163], Umweltnaturwissenschaften
Departement für Umweltsystemwissenschaften, ETH Zürich

Referentin: Dr. Monika Frehner, ETH Zürich

Korreferenten: Dr. Peter Ammann, Fachstelle Waldbau, BZW Lyss
Daniel Guggisberg, ETH Zürich

Abgabe: Zürich, März 2020

Das Titelbild zeigt einen Teil der Untersuchungsflächen im Wald Prau Nausch und stammt aus eigener Aufnahme.

Adresse Autor: Simon Imhof, In der Stoffelmatte 10, 6460 Altdorf
E-Mail: simon.imhof@student.ethz.ch



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):

Biologische Rationalisierung im Schutzwald
Einfluss eines Birkenvorwaldes auf Fichten in hochmontanen Wäldern

Verfasst von (in Druckschrift):

Bei Gruppenarbeiten sind die Namen aller Verfasserinnen und Verfasser erforderlich.

Name(n):

Imhof

Vorname(n):

Simon

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

Zürich, 15.3.2020

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.

Zusammenfassung

Die Waldfläche in der Schweiz ist seit Jahrzehnten zunehmend. Diese Entwicklung fand fast ausschliesslich in höheren Lagen statt, auf Kosten des Kulturlandes. In den letzten Jahren sind im Gebirge viele ehemals beweidete Flächen eingewachsen (Finger, 2012). Von der durch die vergangene Bewirtschaftung freigelegten Mineralerde profitiert die Birke (Bugmann & Frehner, 2019). Es können sich auf diesen frischen Waldflächen Birkenvorwälder bilden. Es stellt sich die Frage, welche Ökosystemdienstleistungen diese Vorwälder erfüllen.

Eine zentrale Ökosystemdienstleistung in Gebirgswäldern ist der Schutz vor Naturgefahren. Damit die Schutzfunktion nachhaltig erhalten bleibt, werden Wälder schon vom frühesten Waldstadium an gepflegt. Dies gewährleistet, dass ein Wald alle Ansprüche erfüllt, um vor Steinschlag, Lawinen und anderen Massenbewegungen zu schützen. Die dafür nötigen Pflegeeingriffe verursachen Kosten und sind in Gebirgswäldern besonders aufwendig. Birken werden oft noch durch negative Auslese mit aus den Wäldern entfernt (Gayer, 1896) (Leder, 1992) (Herger, 2019). Dies bedeutet Aufwand und höhere Kosten. Mit steigenden Löhnen und sinkenden Erträgen in der Forstwirtschaft sind alternativen zum herkömmlichen Waldbau gefragt (Schütz, 1999). Das Prinzip der biologischen Rationalisierung bietet hier einen Lösungsweg. Ziel der biologischen Rationalisierung besteht darin, natürliche Abläufe und Dynamiken in der Natur gemäss der waldbaulichen Zielsetzung zu nutzen. Aufgaben, die die Natur von selbst erledigt, werden abgegeben, und unnötige Arbeitsschritte werden weggelassen (Ammann, 2004). Die biologische Rationalisierung baut so auf dem Konzentrationsprinzip und dem Prinzip der Naturautomation auf.

Es finden sich positive Eigenschaften von Birken, die sich ins Konzept der biologischen Rationalisierung einfügen lassen (Glanzmann, Schwitter, & Zürcher, 2019) (Wagnière, 1996). In dieser Masterarbeit werden die Auswirkungen eines solchen Birkenvorwaldes auf die darunter aufwachsenden Fichten ermittelt. Wie sich die Birke nun in den hochmontanen Wäldern im Sinne der biologischen Rationalisierung einsetzen lässt versucht diese Arbeit zu beantworten. Untersucht wurde zum einen, welchen Einfluss eine hohe Birkenstammzahl auf das Auftreten von Schadensbildern hat, insbesondere Gipfelbruch und Säbelwuchs. Des Weiteren wurde untersucht, wie sich der Schlankheitsgrad von Fichten in Abhängigkeit der Anzahl benachbarten Birken verhält. Zusammen wird so die Entwicklung von Stabilitätsträgern unter Birken ermittelt. Ebenfalls von Interesse war der Einfluss der Birken auf die horizontale Strukturierung des Bestandes. Die Erkenntnisse fliessen schlussendlich zusammen in die Beurteilung der Schutzwirkung von Fichtenwäldern mit unterschiedlich hohen Birkenanteilen.

Die vorliegende Arbeit ist eine Fallstudie, basierend auf empirischen Daten aus Untersuchungsflächen in der Surselva (Graubünden). Es wurden fünf Flächen mit graduell ansteigenden Birkenanteilen (10-80%) im nordöstlichen Teil des Waldes Prau Nausch untersucht. Die erhobenen Daten aus der Feldarbeit wurden statistisch analysiert und mittels GIS-Programm räumlich ausgewertet. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten und um die zukünftige Entwicklung der Flächen beurteilen zu können, wurden einige Parameter mittels einfachen Wachstumsmodellen in die Zukunft modelliert.

Kein Resultat zeigt einen positiven signifikanten Einfluss der Birke auf die Fichte. Ebenfalls wurde kein signifikanter negativer Einfluss gefunden. Jedoch lassen sich Trends erkennen. Die vorliegende Arbeit zeigt, dass Birkenvorwälder sich positiv auf die horizontale Struktur auswirken. Unter Birken kommen die Fichten nicht Flächendecken und weniger dicht auf. Es entwickeln sich Strukturen, die genügend Raum für die Bildung eines stabilen Bestandes schaffen. Mit mehr Birkenanteil treten tendenziell we-

niger Säbelwüchse auf und die Schlankheitsgrade bei Fichten fallen tiefer aus. Die Trends weisen darauf hin, dass Birken die Stabilität von Einzelbäumen fördern. Negativ fallen die Birken nur beim Thema Gipfelbruch auf. Tendenziell führt eine höhere Birkenstammzahl zu mehr Gipfelbrüchen. In dieser Arbeit überwiegen die positiven Aspekte der Birke. Stabile Bestände lassen sich tendenziell besser in Mischung mit Birken erreichen. Bezüglich Naturgefahren zeigte sich, dass auch unter einem Birkenvorwald ein Fichtenwald mit Schutzwirkung aufkommen kann und zwar ohne forstlichen Eingriff.

Diese Arbeit liefert keinen Grund für die negative Auslese von Birken in hochmontanen Fichtenwäldern. Es wird empfohlen, diesen Arbeitsschritt zu unterlassen. Trotz hohen Birkenanteilen entwickeln sich in diesen Wäldern stabile Gerüstträger und auch ohne forstliche Eingriffe kann sich unter einem Birkenvorwald ein funktionierender Schutzwald bilden, der in Absehbarer Zeit vor Lawinen, Steinschlag, Rutschungen und Hochwasser schützt. Die hohen Birkenstammzahlen wirken besonders effektiv gegen Steinschlag mit kleineren Steinen. Wird hingegen ein hoher dauernde Deckungsgrad verlangt, so tragen die Birken weniger zur Schutzwirkung bei. Bei Gebirgswäldern mit hohen Birkenanteilen wird die Schutzwirkung tendenziell erst später erreicht als bei fichtendominierten Wäldern.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	8
1.1	Biologische Rationalisierung.....	8
1.2	Eigenschaften von Vorwäldern und Pionierbaumarten.....	11
1.3	Die Birke (<i>Betula pendula</i>).....	12
1.4	Die Fichte (<i>Picea abies</i>).....	14
1.5	Waldbauliche Zielsetzung.....	15
1.6	Methoden zur Zielerreichung.....	15
1.7	Mindestanforderungen im Schutzwald.....	16
1.8	Hypothesen.....	19
2	Material und Methoden.....	20
2.1	Auswahl des Untersuchungsgebietes.....	20
2.2	Beschrieb des Untersuchungsgebietes.....	20
2.3	Übersicht über die Untersuchungsflächen.....	22
2.4	Datenaufnahme im Feld.....	24
2.5	Auswertung.....	26
3	Resultate.....	29
3.1	Untersuchungsflächen.....	29
3.2	Stammzahl pro BHD-Stufe.....	35
3.3	Schäden pro BHD-Stufe.....	37
3.4	Horizontale Strukturierung.....	43
3.5	Schutz vor Naturgefahren.....	46
4	Diskussion.....	50
4.1	Schäden und Gipfelbruch.....	50
4.2	Säbelwuchs.....	51
4.3	Schlankheitsgrad.....	53
4.4	Horizontale Strukturierung.....	54
4.5	Schutz vor Naturgefahren.....	55
4.6	Grösse der Untersuchungsflächen und deren Einfluss.....	56
5	Schlussfolgerung.....	57
5.1	Limitierungen der eigenen Studie.....	58
5.2	Empfehlungen für die Praxis.....	59
6	Danksagung.....	61
7	Literaturverzeichnis.....	62
8	Anhang.....	65

Abkürzungsverzeichnis

Bi	Birke
BHD	Brusthöhendurchmesser
BMD	beobachtete mittlere Distanz (Clark & Evan - Index)
d_{dom}	Oberdurchmesser
DG	Deckungsgrad
Fi	Fichte
G	Grundfläche
GB	Gerüstbaum
Gh	Gefüge horizontal
Gv	Gefüge vertikal
GWP	Fachstelle für Gebirgswaldpflege
h_{dom}	Oberhöhe
h/d-Wert	Schlankheitsgrad
Kor.	Korrelation
M	Mischung
m.ü.M.	Meter über Meer
NaiS	Wegleitung vom BAFU für Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald
r	Radius

1 Einleitung

Wälder erfüllen diverse Ökosystemdienstleistungen. Eine zentrale Ökosystemdienstleistung in Gebirgswäldern ist dabei der Schutz vor Naturgefahren. Damit die Schutzfunktion nachhaltig erhalten bleibt, werden Wälder schon vom frühesten Waldstadium an gepflegt. Dies gewährleistet, dass ein Wald alle Ansprüche erfüllt, um vor Steinschlag, Lawinen oder Rutschungen zu schützen. Die Anforderungen an die Strukturen des Waldes unterscheiden sich dabei je nach Naturgefahr und Höhenstufe. Die dafür nötigen Pflegeeingriffe verursachen Kosten und sind in Gebirgswäldern besonders aufwendig. Mit Hilfe der biologischen Rationalisierung könnte der Aufwand vermindert werden. Die biologische Rationalisierung hat zum Ziel, zusammen mit den natürlichen Dynamiken die erwünschte Ökosystemdienstleistung mit möglichst wenig Aufwand zu gewährleisten.

Die Waldfläche in der Schweiz ist seit Jahrzehnten zunehmend. Diese Entwicklung fand fast ausschliesslich in höheren Lagen statt, auf Kosten des Kulturlandes. In den letzten Jahren sind im Gebirge viele ehemals beweidete Flächen eingewachsen (Finger, 2012). Die meisten davon wurden noch nicht gepflegt. Diese bieten sich nun an, um die Effekte der biologischen Rationalisierung zu beobachten und deren Grenzen auszutesten. In dieser Masterarbeit werden spezifisch die Auswirkungen eines Birkenvorwaldes auf die darunter aufwachsenden Fichten ermittelt. Wie sind die Struktur und Qualität der Fichten zu beurteilen? Verursachen altersschwache Birken Schäden an den Fichten? Können die frisch eingewachsenen Flächen eine Schutzfunktion erfüllen? Welche natürlichen Abläufe im Sinne der biologischen Rationalisierung können genutzt werden? Wäre es von Vorteil gewesen, den Bestand zu pflegen, und wenn ja, mit welchen Massnahmen?

Diese Masterarbeit ist eine Fallstudie, basierend auf empirischen Daten aus Untersuchungsflächen in der Surselva. Die Arbeit stützt sich auf die Diplomarbeit von Wagnière (1996). Wagnière untersuchte bereits auf den gleichen Untersuchungsflächen den Einfluss eines Birkenvorwaldes auf die Schlusswaldsukzession. Seine Arbeit ermöglicht einen detaillierten Blick in die Vergangenheit und eine Rekonstruktion der Entwicklung über 23 Jahre.

1.1 Biologische Rationalisierung

Die wirtschaftliche Situation der Forstbetriebe hat sich in den letzten Jahrzehnten grundsätzlich verändert. Sinkende Holzpreise und gleichzeitig steigende Lohnkosten erschweren eine gewinnbringende Waldbewirtschaftung zunehmend. Schütz (1999) schrieb: *«Die Schweiz betreibt einen pflegeintensiven und kostspieligen Waldbau, der sich nur noch schwer finanzieren lässt»*. Die biologische Rationalisierung bietet einen Weg hin zu einem naturnahen Waldbau mit wirtschaftlichen Vorteilen. Das Konzept der biologischen Rationalisierung entwickelte Peter Ammann in seiner Diplomarbeit (Ammann, 2004). Ziel der biologischen Rationalisierung besteht darin, natürliche Abläufe und Dynamiken in der Natur für die waldbaulichen Ziele zu nutzen. Aufgaben, die die Natur von selbst erledigt, werden abgegeben, um den Arbeitsaufwand zu senken und den Ertrag zu steigern. Konkret greift die biologische Rationalisierung bei der Naturverjüngung, der Selbstdifferenzierung mit automatischer Stammzahlabnahme und bei der Strukturierung. Die biologische Rationalisierung beruht auf zwei Grundsätzen:

1. **Naturautomation:** Hier geht es darum, alle natürlichen Prozesse zu nutzen, welche selbständig im Sinne des Bewirtschafters ablaufen. Es wird nicht eingegriffen solange die Entwicklung zielgemäss verläuft. (Ammann, 2008)

2. **Konzentrationsprinzip:** Nach diesem Prinzip beschränkt sich die waldbauliche Tätigkeit auf das, was zur Zielerreichung unmittelbar nötig ist. Alle unnötigen Arbeitsschritte werden weggelassen (Ammann, 2008).

Durch den Nutzen der biologischen Rationalisierung können einige manuelle aber auch vollmechanisierte Arbeitsschritte bei der Waldbewirtschaftung weggelassen werden. Es folgt eine Substitution von technischen Aufwänden durch natürliche Abläufe. Bestenfalls sollten bei genügender biologischer Rationalisierung die noch nötigen waldbaulichen Tätigkeiten nur noch lenkend in die natürliche Entwicklung des Waldes eingreifen. Es wird mit positiver Auslese gearbeitet. Jeder Eingriff soll fördernd wirken. Zu Beginn war die biologische Rationalisierung vor allem in den Wirtschaftswäldern des Schweizer Mittellandes ein Thema. Der ökonomische Treiber dahinter ist eine Reduktion des kostspieligen Arbeitsaufwands. Auch in der Gebirgswaldpflege spielen Aufwand und Ertrag eine Rolle. Zusätzlich sind Arbeiten im Gebirgswald aufwendiger und gefährlicher als im Flachland. Ein Grund mehr, um auch hier die waldbaulichen Tätigkeiten möglichst klein zu halten und vermehrt auf die biologische Rationalisierung zu setzen.

1.1.1 Biologische Rationalisierung im Gebirgswald

In unseren Gebirgswäldern herrschen unwirtliche Umweltbedingungen. In der Höhe kommen die Lebensgemeinschaften zusehends an ihre Existenzgrenzen. Der Wald reagiert langsamer und ist empfindlicher bezüglich Störungen im Vergleich zu den Wäldern im Mittelland. Missmanagement im Gebirgswald kann langanhaltende negative Wirkungen hervorrufen. Eine Zusammenarbeit mit der Natur im Sinne der biologischen Rationalisierung liegt nahe, um Stress durch unnötige Eingriffe zu vermeiden. Im Management von Gebirgswäldern ist man sich dieser Dynamiken bewusst und arbeitet mit der Natur zusammen. Ernst Ott schrieb: *«Mit waldbaulichen Massnahmen können wir die Entwicklung dieser Wälder bestenfalls günstig beeinflussen, aber niemals in den sogenannten Griff bekommen. Wir können nur naturnah zur Stabilitätsförderung beitragen – vorbeugend und einfühlsam.»* (Ott, Frehner, Frey, & Lüscher, 1997). Man erkennt in diesem Zitat, dass die Natur in den waldbaulichen Tätigkeiten berücksichtigt werden sollte, da im Gebirgswald nie alles kontrolliert werden kann. Im nachhaltigen Management von Schutzwäldern vertritt man diese Ansicht weiterhin. In den Prinzipien für Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald (abgekürzt NaiS) wird unter Punkt 4 auf die Zusammenarbeit mit der Natur hingewiesen: *«Pfleagemassnahmen sind auf die Standortverhältnisse abzustimmen. So lassen sich die Kräfte der natürlichen Walddynamik nutzen.»* (Frehner, Wasser, & Schwitter, 2005).

Die Idee der biologischen Rationalisierung im Gebirgswald unterscheidet sich von der Vorstellung im Mittelland in mehreren Hinsichten. Die klassische biologische Rationalisierung, wie sie von Peter Ammann entwickelt wurde, geht davon aus, dass die Pflegeeingriffe nach der Jungwaldpflege kostendeckend durchgeführt werden können. Im Gebirgs- oder Schutzwald sind Eingriffe fast nie kostendeckend. Wo sich die biologische Rationalisierung bei Amman vor allem auf die Jungwaldpflege bezieht, gelten die Grundsätze der biologischen Rationalisierung bei NaiS praktisch immer, auch im Baumholz. Da die Eingriffe im Baumholz deutlich kostenintensiver sind als in der Dickung, kann es sogar günstiger sein, im Jungwald einzugreifen, anstatt bis zum Baumholz zu warten. Im Mittelland zielt der Waldbau unter anderem auch eher auf das Ausbilden von ertragsreichen und hochwertigen Einzelbäumen ab. Im Gebirgswald, mit dem Fokus auf die Schutzfunktion, steht die Struktur und Stabilität des Waldes im Vordergrund. In der hochmontanen Stufe kann durchaus die Einzelbaumstabilität massgebend sein, weshalb hier die klassische biologische Rationalisierung mit Einzelbaumförderung angewendet werden kann. Vor allem in der hochmontanen und subalpinen

Stufe ist der Fokus auf Einzelbäume aber nicht mehr zielführend. In diesen hohen Lagen hängt die Stabilität vermehrt von Kollektiven ab. Das Risiko von Störungen und Verlusten in den hohen Lagen durch Wind und Lawinen ist gross, es kann deshalb nicht davon ausgegangen werden, dass ein von Jung auf als Stabilitätsträger¹ geförderter Baum später die ihm zugeordnete Rolle auch übernehmen kann. Im folgenden Abschnitt werden einige Beispiele der biologischen Rationalisierung im Gebirgswald erläutert.

Naturverjüngung: Im Gebirgswald wird eine gruppenförmige oder mosaikartige Verjüngung angestrebt (Glanzmann, Schwitter, & Zürcher, 2019). Sind genügend Samenbäume vorhanden, so sorgt der Wald selbst für eine natürliche Verjüngung. Das erfolgreiche Aufkommen der Keimlinge hängt anschliessend von kleinstandörtlichen Umweltbedingungen, der konkurrierenden Bodenvegetation und dem Einfluss des Wildes ab. Später wird auch die Konkurrenz um Licht ein massgebender Faktor sein (Glanzmann, Schwitter, & Zürcher, 2019). Gemäss dem Konzept der Naturautomation sollten Bepflanzungen im Gebirgswald möglichst vermieden werden. Mittels waldbaulichen Tätigkeiten werden günstige Bedingungen für die Naturverjüngung geschaffen. Samenbäumen stehen lassen, Moderholz zulassen und Licht in den Bestand bringen sind einige lenkende Eingriffe, die die Naturverjüngung von Fichten im Gebirgswald im Sinne der biologischen Rationalisierung fördern.

Selbstdifferenzierung: Ab dem Kronenschluss beginnen die Bäume um Licht zu konkurrenzieren. Auf natürliche Weise unterscheiden sich Nachbarbäume aufgrund ihrer genetischen und standörtlichen Voraussetzungen. Manche sind vitaler und wachsen schneller als andere. Diese Differenzierung bildet unterschiedliche soziale Stellungen aus (Abbildung 1). Dominante Bäume werden sich durchsetzen und die Schwächeren werden unterdrückt und sterben mit der Zeit ab. Diese natürliche Mortalität führt zu einer Stammzahlabnahme. Was wiederum den dominanten Bäumen mehr Entwicklungspotenzial bietet, ohne dass der Mensch eingreifen müsste.

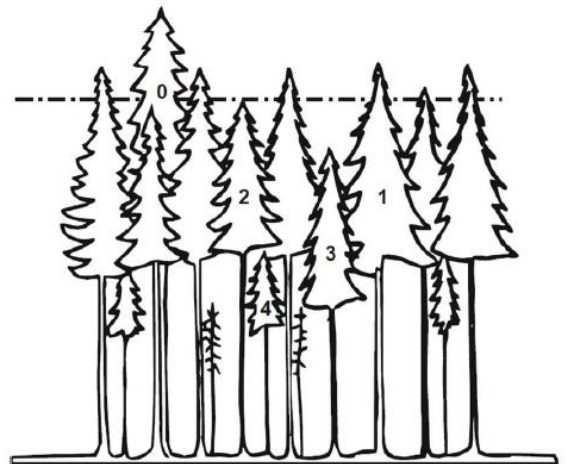


Abbildung 1: Die Klassifikation nach Kraft (1984) für die Einteilung der Bäume nach ihrer sozialen Stellung. 0 voherrschend, 1 herrschend, 2 mitherrschend, 3 beherrscht, 4 unterdrückt.

Strukturierung: Über längere Zeit führen diese Mechanismen zu einer vertikalen und horizontalen Strukturierung. Verläuft die Selbstdifferenzierung und natürliche Mortalität zielgerecht, so erspart die biologische Rationalisierung frühe Durchforstungseingriffe zur Förderung von Stabilitätsträgern im Gebirgswald.

In Gebirgswäldern steht oftmals die Schutzfunktion im Vordergrund. Dies wirft die Frage auf, ob auch mit der biologischen Rationalisierung die Sicherheit gewährleistet ist. Mit der biologischen Rationalisierung nimmt sich der Mensch ein Stück weit aus dem System zurück und gibt der Natur mehr Freiheit. Aber geht die Schutzfunktion aufgrund der neu eingeräumten Freiheit verloren? Die Fachstelle Waldbau zeigte in einem Kurs zum Thema Jungwaldpflege mehrere positive Beispiele der biologischen Rationalisierung im Gebirgswald auf. Verschiedene Naturverjüngungen, die aus

¹ Mit dem Begriff Stabilitätsträger können Gerüstbäume (stabile Bäume der Oberschicht), Kleinkollektive (eng zusammenstehende, voneinander abhängige Bäume), oder Rotten (eng zusammenstehende Bäume mit gemeinsamem Kronenmantel) gemeint sein.

Sturmflächen hervorgingen, entwickelten sich über mehr als 20 Jahre auch ohne Behandlung positiv. Unter Birkengruppen kommen Tanne und Fichte langsam stufig auf, es bilden sich natürliche Ränder und lange Kronen. Die Flächen haben sich dank Weichlaubhölzern und Selbstdifferenzierung genügend stabil entwickelt. Ein Zeichen, dass die biologische Rationalisierung auch im Gebirgswald möglich ist (Ammann, Arnet, & Felder, 2014). Biologische Rationalisierung im Gebirgswald scheint sich mit dem Schutzgedanken zu vertragen. Natürlich muss die Rationalisierung dafür auch richtig angewandt werden. Dafür wiederum müssen die natürlichen Dynamiken verstanden werden. Forschung auf diesem Gebiet ist durchaus wichtig. Diese Arbeit möchte einen relevanten Beitrag dazu leisten.

1.2 Eigenschaften von Vorwäldern und Pionierbaumarten

Vorwälder sind die erste Stufe der Sukzessionen in einem Waldökosystem und entstehen auf Pionierstandorten. Dies kann eine Störungsfläche mitten im Wald sein oder aber auch eine Fläche ausserhalb, zum Beispiel eine aufgegebene Weidefläche. Mayer (1992) definiert einen Vorwald folgender massen: «Vorwald ist eine auf der Kahlfläche natürlich entstandene initiale Waldentwicklungsphase oder ein aufgeforsteter Jungbestand, in dessen Schutz empfindlichere Baumarten natürlich aufkommen oder künstlich eingebracht werden.». Vorwälder setzen sich aus Pionierbaumarten zusammen. Im Gebirgswald weit verbreitete Pionierbaumarten sind die Vogelbeere (*Sorbus aucuparia*), die Hänge-Birke (*Betula pendula*) und die Grünerle (*Alnus viridis*) sowie in der subalpinen Stufe auch die Lärche (*Larix decidua*) (Bugmann & Frehner, 2019). Alle Pionierbaumarten verfügen über eine reiche und weite Samenproduktion, ein rasches Jugendwachstum und geringe Standortansprüche (waldwissen.net, 2018). Diese Eigenschaften erlauben es den Pionierbaumarten, sich rasch auf unbestockten Flächen und an extremen Lagen zu etablieren. Unter dem Schirm eines Vorwaldes kommen später die Hauptbaumarten auf, welche die Pionierarten mit der Zeit verdrängen und ablösen werden. Und genau für das Aufkommen der Hauptbaumart sind Vorwälder ausserordentlich nützlich. Vorwälder helfen, wichtige Waldfunktionen nach Störungen (Windwurf, Lawine, Beweidung etc.) wiederherzustellen. Dazu gehören die Wiederherstellung des Nährstoffhaushalts, sowie der Bestandestranspiration und des Waldklimas, was den Hauptbaumarten das Aufkommen erleichtert (Stark, Nothdurft, & Bauhus, 2011). Ein Vorwald verhindert auch das flächige Aufkommen der Hauptbaumarten. Dies wiederum kann zu einer erwünschten Strukturierung führen (Glanzmann, Schwitter, & Zürcher, 2019). Auch kann möglicherweise das Höhenwachstum der Fichte unter dem Schirm der Vorwaldes gebremst werden, was sich positiv auf den Schlankheitsgrad auswirkt (Wagnière, 1996). Durch die Beschattung wird ebenfalls die Vegetation in der Strauchschicht unterdrückt und die natürliche Fichtenverjüngung begünstigt (Bugmann & Frehner, 2019). Zudem erhöhen Pionierbaumarten die Baumartenvielfalt und tragen wesentlich zu einer grösseren Biodiversität bei (waldwissen.net, 2018).

In dieser Arbeit wurden Birkenvorwälder untersucht. Wagnière (1996) fasst die spezifischen Vor- und Nachteile eines Birkenvorwaldes aus seiner Literaturstudie wie folgt zusammen:

Positive Einflüsse:

- Verdunstungsschutz
- CO₂-Anreicherung
- Schutz vor Frost
- Schutz vor Verbiss
- Unterdrückung der Bodenvegetation
- Bodenverbesserung

Negative Einflüsse:

- Lichtentzug
- Niederschlagsentzug
- Wurzelkonkurrenz

Was Wagnière (1996) noch nicht in seiner Arbeit anbrachte, ist die positive Funktion eines Birkenvorwaldes im Steinschlagschutzwald. Durch das schnelle Wachstum der Birke kann rasch Stangenholz erreicht werden (Frehner, 2004). In diesem Stadium übernimmt der Wald bereits eine Schutzfunktion. Früher oder später wird dann der Birkenvorwald durch schattentolerante Baumarten verdrängt. Dies zeigt sich am Beispiel der Urwälder in den Westkarpaten. Dort können Birken nach Windschäden auf den sauren Böden aufkommen, werden aber bereits nach 25-30 Jahren durch die Hauptbaumarten verdrängt (Korpel, 1995).

1.3 Die Birke (*Betula pendula*)

Die Hänge-Birke² ist in den Vorwaldgesellschaften eine wichtige Pionierart. Nach Mayer (1984) kann sie sich in konkurrenzschwächeren Schlusswäldern mit Lichtbaumarten, in Dauergesellschaften und auf extremeren Standorten auch länger behaupten.

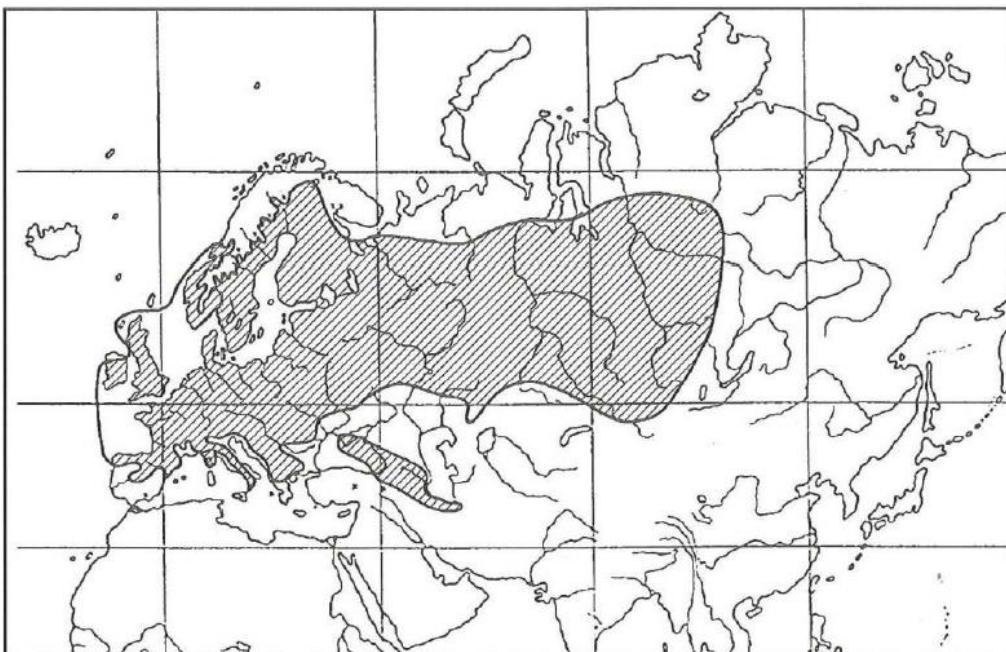


Abbildung 2: Verbreitungskarte von *Betula pendula* in Europa. (Leder, 1992 auf Basis von Meusel, 1957)

Vorkommen: Die Birke tritt sowohl auf den ärmsten und feuchtesten Böden als auch auf den frischen und nährstoffreicheren Standorten auf. Sie fühlt sich auf basischen Böden bis hin zu sehr sauren Böden wohl. Das ökologische Optimum der Birke ist konkurrenzbedingt (Schmidt & Wild, 2000). Die Birke kommt in fast ganz Europa vor, mit Ausnahme Nordskandinaviens (Abbildung 2). Vertikal kann sie sich in den Alpen bis auf 2000 m.ü.M hinauf verbreiten (Leder, 1992). Diese grossräumige Verbreitung resultiert auch aus ihrer ausgesprochenen Robustheit gegenüber Klima- und Witterungsextremen (Mössnang, 2001).

² Im Untersuchungsgebiet kommt nur die *Betula pendula* vor. Ist in der Arbeit die Rede von der Birke, so ist damit immer *Betula pendula* gemeint, zu Deutsch auch oft Hänge-Birke oder Sandbirke genannt.

- Dimensionen: Die Birke weist in der Jugendphase (1. Jahrzehnt) ein rasantes Höhenwachstum auf (1-2 m pro Jahr). In 20 Jahren kann sie gut 15 m erreichen (Mössnang, 2001). Auf wüchsigen Standorten kann die Birke im mittel bis zu 26 m hohe Stämme bilden und einen Brusthöhendurchmesser (BHD) von bis zu 60 cm erreichen (Leder, 1992). Leder gibt ein Höchstalter von 80-100 Jahren an. Auf den Versuchsflächen dieser Arbeit bestimmte man jedoch auch Birken, die über 170 Jahre alt wurden (Wagnière, 1996).
- Nutzung und Waldbau: Die Birke wurde lange vielseitig genutzt, das Holz als Brennstoff, die Äste zum Flechten, die Blätter und die Rinde zum Färben oder als Arznei (Leder, 1992). Trotzdem wurde ihr im vorigen Jahrhundert auch einige negative Eigenschaften nachgesagt. Zum Beispiel das Peitschen von Nadelhölzern, da bis zum Verlust der Wipfel führen kann (Gayer, 1896). Oder die Birke würde den Boden sehr verschlechtern, da bei der geringen Belaubung der Boden nicht genügend beschirmt würde (Pfeil, 1841). Sobald die Birke drohte, der Hauptbaumart in die Quere zu kommen oder Reinbestände zu bilden begann, wurde sie entfernt. Auf guten Standorten wurden Birken über Jahrhunderte bekämpft. Wüchsige Birken wurden durch Aushieb aus Kulturen und Jungwüchsen entfernt. Dies führte auch zu einer negativen Auslese und Einschränkung des Spektrums (Leder, 1992, auf der Basis von Klaehn und Runquist). Ein weiteres Beispiel zur Bekämpfung der Birken stammt von Burckhardt (1855):*«...man sieht es als kein gutes Zeichen für eine Wirthschaft an, wenn die Birke in ihr herrschend geworden ist. [...] und häufig muss sie wie Unkraut ausgemerzt werden»*. Auch heute noch wird die Birke als Bedränger der Kulturpflanzen erwähnt (Rast, 2014). Aktuelle Quellen bezeugen, dass ähnlich negative Praktiken gegen Birken auch heute noch in unseren Bergwäldern angewendet werden (Herger, 2019). Aber man erkennt nun vermehrt die Vorteile der Birke aufgrund ihrer Eigenschaften als wichtige Pionierart (Siehe Kapitel 1.2). In Folge des Klimawandels gehört die Birke auch zu den Gewinnern. Als Ubiquist wird sie in Zukunft besser als andere Arten mit den Veränderungen zurechtkommen (Schütt & Schuck, 1992) (Amt für Wald des Kantons Bern, 2013).

1.4 Die Fichte (*Picea abies*)

Ein grosser Teil der Schutzwälder liegt in der obermontanen bis subalpinen Vegetationsstufe. Die Wälder dort bestehen vorwiegend aus Fichten³ und Tannen, in der subalpinen Stufe sogar fast ausschliesslich aus Fichten (Bachofen & Zingg, 2005). Die Fichte bildet somit in den alpinen Schutzwäldern eine wichtige Hauptbaumart.

Vorkommen: Die Natürliche Verbreitung der Fichte reicht von Balkans Norden bis nach Skandinavien und vom östlichen Frankreich über Rumänien hinein nach Russland (Abbildung 3) (Praciak, et al., 2013). In den Alpen besiedelt die Fichte vom obermontan bis zu subalpin alle Vegetationsstufen (Bugmann & Frehner, 2019). In der Schweiz kommt die Fichte auch in tieferen Lagen vor, jedoch nicht natürlich, sondern durch Pflanzungen.

Dimensionen: Die Fichte kann eine Höhe von 30-40 m erreichen. In den ersten Jahren geht das Wachstum nur langsam von statten. Nach ca. 5-10 Jahren beschleunigt sie das Wachstum (Praciak, et al., 2013). In der subalpinen Höhenstufe kann die Fichte auch Jahrzehnt benötigen, bis sie etwa Brusthöhe erreicht. Wenn ihr Wurzelwerk dann einmal genügend entwickelt ist, bildet sie kräftige Triebe und gewinnt rasch an Höhe (Ott, Frehner, Frey, & Lüscher, 1997).

Nutzung und Waldbau: Ende des 17. Jahrhunderts waren die Schweizer Wälder aufgrund von Übernutzung heruntergewirtschaftet. Erosion und Überschwemmung waren die Folge dieser Waldwirtschaft. Um dem entgegen zu wirken und den Wald möglichst schnell wieder zu bestocken, bevorzugte man die anspruchslose und wüchsige Fichte. Zudem wurde die Nadelbaumart als universales Bauholz sowie als Rohstoff für die aufstrebende Papierindustrie genutzt. Heute macht die Fichte immer noch den grössten Anteil aller Baumarten am Holzvorrat in der Schweiz aus und im Gebirgswald trägt sie wesentlich zur Schutzfunktion bei. Die Fichte ist mit diversen anderen Nadel- und Laubgehölzen mischungsfähig. (Häne, 2019)



Abbildung 3: Verbreitungskarte von *Picea abies* in Europa. (Farjon, 2017)

³ Ist in der Arbeit die Rede von der Fichte, so ist damit immer *Picea abies* gemeint, zu Deutsch auch oft Rotfichte oder Rottanne genannt.

1.5 Waldbauliche Zielsetzung

Um den durch die Naturautomation entstandenen Nutzen zu bewerten, braucht es eine Zielüberprüfung. Der kürzlich veröffentlichte Leitfaden zum Thema Jungwaldpflege im Gebirgs- und Schutzwald der Fachstelle für Gebirgswaldpflege (GWP) bietet dafür eine passende Grundlage (Glanzmann, Schwitter, & Zürcher, 2019). Darin nennt die GWP waldbauliche Zielvorstellungen um gruppenweise, ungleichaltrige Strukturen zu schaffen und Stabilitätsträger (Einzelbäume oder Kleinkollektive) hervor zu bringen. Das Ziel der GWP ist es, mit Pflegemethoden stufige Gruppenplenterwälder zu erhalten. Laut dem Leitfaden schaffen Gruppenplenterwälder die Voraussetzungen für gestaffelte Verjüngung und stufige Strukturen. Dabei stützen sie sich auf die Prinzipien von NaiS und der biologischen Rationalisierung. Um den standortsbestimmenden Faktoren und natürlichen Dynamiken Rechnung zu tragen, unterscheiden sich die empfohlenen Jungwaldpflegemethoden und angestrebten Strukturen je nach Höhenstufe (Abbildung 4). Wobei die Methoden sich überlappen und im Zuge des Klimawandels sich nach oben verschieben können. Es folgen detailliertere Beschreibungen der drei Methoden mit dem Fokus auf die strukturellen horizontalen Grössen⁴.

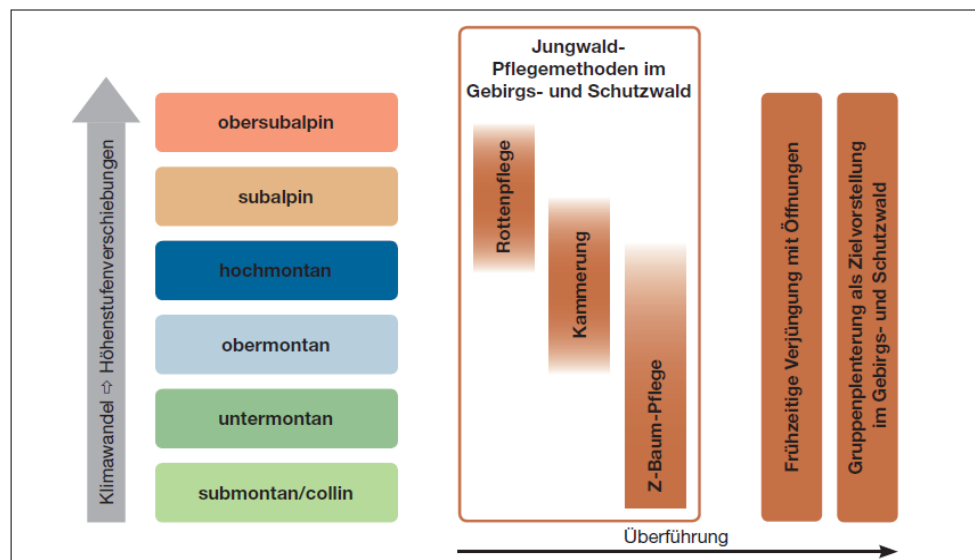


Abbildung 4: Jungwaldpflegemethoden pro Höhenstufe (Glanzmann, Schwitter, & Zürcher, 2019).

1.6 Methoden zur Zielerreichung

1.6.1 Rottenpflege

Rotten sind eng zusammenstehende Bäume (ab 2 Bäumen im Baumholz) mit gemeinsamem Kronenmantel (Frehner, Wasser, & Schwitter, 2005). Die Rottenstruktur ist charakteristisch für die subalpinen Fichtenwälder. Die GWP definiert in der Rottenpflege das Schaffen von kleineren, langfristig stabilen Baumkollektiven mit grünen Rändern als Ziel. Um dies zu erreichen, empfiehlt sich ein Rotendurchmesser von einer halben bis zu einer ganzen maximal zu erwartenden Baumhöhe anzustreben (Zeller, 1993). In der subalpinen Stufe entspricht dies etwa einem Durchmesser von 15-30 m. In Hangfalllinie soll die Rotte maximal 20 m erreichen, um im Idealfall eine längliche Form schräg zum Hang aufweisen zu können. So deckt eine Rotte eine Fläche von bis zu 5 Aren ab. Die hier erwähnten Distanzen werden horizontal von Stamm zu Stamm gemessen. Der Abstand, bezie-

⁴ Die Informationen dazu stammen aus dem Leitfaden für die Jungwaldpflege (Glanzmann, Schwitter, & Zürcher, 2019).

hungsweise die Gassenbreite, zwischen den Rotten muss mindestens die doppelte maximale Astausladung der ausgewachsenen Bäume betragen, damit der grüne Kronenmantel bei ausgewachsenen Rotten erhalten bleibt. Dies entspricht in der Regel mindestens 8-12 m, wobei lange und breite Gassen in Hangfalllinie vermieden werden sollten.

1.6.2 Kammerung

Mit dem Begriff «Kammerung» wird das Bilden von kleineren bis zu ¼ ha grossen Einheiten im Gebirgswald bezeichnet. Die schachbrettartigen Einheiten werden durch das Schlagen von Gassen entlang von stabilen Rändern gebildet. Das Prinzip der Kammerung kommt in nadelholzreichen Wäldern der hochmontanen Stufe zum Zuge (Glanzmann, Schwitter, & Zürcher, 2019). Dort wo der Bestand natürlicherweise nicht mehr in Rotten aufkommt. Nebst der kollektiven Stabilität und grünen Rändern gewinnen Einzelbäume verschiedener Baumarten sowie auch individuelle Stabilitätsträger vermehrt an Bedeutung. Eine Kammer kann bis zu 25 Aren gross sein und einen Durchmesser von 20-40 m aufweisen. Deshalb werden bei der Kammerung nebst dem Anlegen von Gassen bei Bedarf auch einzelne Z-Bäume als Stabilitätsträger und zur Sicherung der gewünschten Mischbaumarten gefördert. Die Gassenbreite beträgt 10-15 m, wobei lange und breite Gassen in Hangfalllinie vermieden werden sollten. Je höher der Fichtenanteil und je geringer die Baumartenmischung und natürliche Strukturierung, desto kleiner sind tendenziell die Kammern zu wählen, um starke Ränder zu erhalten.

1.6.3 Z-Baum-Pflege

Ein Z-Baum (Ziel-Baum/Zukunftsbaum) kann ein zu fördernder Einzelbaum oder zu förderndes Kleinkollektiv (2 bis ca. 6 eng zusammenstehende, voneinander abhängige Bäume) sein. Der Z-Baum besitzt in der Regel die Funktion eines Stabilitätsträgers oder gehört einer zukunftsfähigen Mischbaumart an. Mit der Z-Baum-Pflege sichert man die geforderte Anzahl Stabilitätsträger, wobei es in einem Bestand nebst den Z-Bäumen meist auch noch zusätzliche Stabilitätsträger gibt. Die Z-Baum-Pflege wird in den dichten, tiefer liegenden Wäldern angewandt. Bei der Auswahl der Z-Bäume sind Vitalität und Stabilität, welche in den meisten Fällen einhergehen, die wichtigsten Kriterien. Qualität steht im Schutzwald nicht im Vordergrund. Das Fördern von bis zu 60 Z-Bäumen pro Hektare dürfte zielführend sein. Dies entspricht einem durchschnittlichen horizontalen Abstand von 15 m. Die Abstände zwischen den Z-Bäumen sind dabei oft sehr unregelmässig.

1.7 Mindestanforderungen im Schutzwald

In Bezug auf Schutzwälder ist die bereits erwähnte NaiS-Wegleitung eine weitere wichtige massgebende Grundlage für den Waldbau und kann auch zur Zielsetzung genutzt werden. NaiS bestimmt die Mindestanforderungen für eine nachhaltige Erfüllung der Schutzwirkung eines Gebirgswaldes gegen die Naturgefahren Lawine, Steinschlag, Rutschung, Erosion, Murgang, und Hochwasser. Die folgenden Unterkapitel widmen sich je einer Naturgefahr und beschreiben die Mindestanforderungen für eine wirksame Schutzleistung basierend auf dem Formular 2 von NaiS⁵.

1.7.1 Lawine

Ab einer Höhe von 1200 m.ü.M. und einer Hangneigung von 30°-60° sind alle Wälder potentielle Lawinenschutzwälder. Unterhalb von 1200 m.ü.M. kommen dann nur noch Wälder an sonnenexponierten Hängen, bei welchen die Gefahr von Nassschneelawinen erhöht ist, als Schutzwälder in Frage. Schutzwälder können im Entstehungsgebiet das Anreissen von Lawinen aufgrund geringerer

⁵ Die Informationen der folgenden Unterkapitel stammen aus dem NasiS «Anhang 1: Naturgefahren» und der Vorlesung «Ökologie und Management von Gebirgswäldern», gehalten von Monika Frehner im Frühlingsemester 2019 an der ETH (Frehner, 2019).

Temperaturschwankungen, Interzeption, grösserer Bodenrauigkeit und geringerer Windgeschwindigkeiten im Wald hemmen. Die Minimalanforderungen nach NaIS im Entstehungsgebiet sind:

- Gefüge horizontal:

Hangneigung	Lückenzänge in Falllinie ⁶
≥30° (58%)	kleiner als 60 m
≥35° (70%)	kleiner als 50 m
≥40° (84%)	kleiner als 40 m
≥45° (100%)	kleiner als 30 m
- Deckungsgrad ≥ 50% von immergrünen Bäumen
- Minimale Anforderungen auf Grund des Standortstyps sollen erfüllt sein (Anhang 1).

Falls die Lückenzänge von Kronenrand zu Kronenrand grösser als oben angegeben ist, so muss die Lückenbreite kleiner als 15 m sein. Können all diese Anforderungen erfüllt werden, so gilt das Minimalprofil als erreicht und die Wahrscheinlichkeit von Lawinenanrissen, die den Wald zerstören, als sehr klein. Aber Schäden an der Verjüngung durch die Schneebewegung sind durchaus möglich. Im Transit- und Auslaufgebiet kann eine Lawine von 1-2 m Höhe durch den Wald verlangsamt und die Reichweite reduziert werden. Bei hohen Fliessgeschwindigkeiten und grossen Massen wird der Wald jedoch zerstört. Die immergrünen Fichten wirken effektiver und weisen eine bessere Schutzwirkung gegenüber Lawinen aus, als die winterkahlen Birken, da bei immergrünen Bäumen die Interzeption erhöht und die Abstrahlung reduziert wird. Eine hohe Interzeption bedeutet, dass weniger Schnee auf dem Boden für Lawinen zur Verfügung steht. Geringere Ein- und Abstrahlung führt zu geringen Schneetemperaturen und Temperaturschwankungen, was wiederum zu festeren Schneedecken führt.

1.7.2 Steinschlag

Ein Gebirgswald beeinflusst Steinschläge auf unterschiedlichste Arten. Im Entstehungsgebiet können die Wurzeln den Felsen zusammenhalten und die Gefahr von abbrechenden Steinen vermindern. Andererseits beschleunigen organische Säuren und Wurzeln von Bäumen die Verwitterung und die Bildung von Rissen. Erst im Transitgebiet⁷ entfaltet der Wald seine wirkliche Schutzwirkung. Baumstämme nehmen dort die Energie der fallenden Steine auf und bremsen sie ab. Im besten Falle werden die Steine komplett angehalten. Dies hängt vor allem von der Gassenbreite⁸, der Stammzahl und der Durchmesser-Verteilung ab. Viele Stämme helfen mehr als wenige und dickere mögen grössere Brocken aufhalten als dünnere. Was für Stämme benötigt werden, hängt von der Energie ab, die abgebaut werden muss. Wobei die Energie der Steine von verschiedenen Faktoren wie Hangneigung, Steinvolumen und Oberflächenrauigkeit abhängig ist. NaIS schreibt folgende minimale Anforderungen vor:

- Stammzahlen gemäss Steinschlagtool⁹
- Öffnung in Falllinie von Stamm zu Stamm ≤ 20 m
- Minimale Anforderungen auf Grund des Standortstyps sollen erfüllt sein

⁶ Bei Lücken werden die Abstände von Kronenrand zu Kronenrand gemessen

⁷ Ein Transitgebiet bezeichnet den Raum zwischen dem Lawinenanriss und dem Ort, wo die Lawine zum Stehen kommt (Ablagerungsgebiet).

⁸ Gassenbreite: Abstand von Stamm zu Stamm gemessen

⁹ <http://www.gebirgswald.ch/de/anforderungen-steinschlag.html>

Steine können ab einer Öffnung von 40 m wieder ihre maximale auf dieser Fläche mögliche Geschwindigkeit erreichen. Es ist zu vermerken, dass ein Schutzwald flächig als ein Gesamtsystem wirkt. Deshalb muss nicht ein einzelner Baum die gesamte maximal mögliche Energie aufnehmen können. Der Wald wirkt im Kollektiv. Es liess sich kein Unterschied in der Schutzwirkung von Fichten und Birken gegenüber Steinschlag in der Literatur finden, weshalb in der Arbeit davon ausgegangen wird, dass beide Baumarten gleich stark zum Schutz beitragen.

1.7.3 Rutschung, Erosion und Murgang

Rutschungen lassen sich in flachgründige, mittel- oder tiefgründige Rutschungen unterscheiden. Bei flachgründigen Rutschungen (1 bis 2 m) beeinflusst ein Wald den Wasserhaushalt positiv durch Interzeption, Transpiration und Verbesserung der Bodendurchlässigkeit. Zudem armiert das Wurzelwerk den Boden. Entscheidend für eine gute Schutzwirkung ist eine umfassende Durchwurzelung des Bodens. Diese ist am besten durch kleinflächige, ungleichartige Bestände mit hohem Deckungsgrad gegeben. Man geht davon aus, dass das Wurzelsystem ungefähr dieselbe flächige Ausdehnung wie die Baumkrone besitzt. Entscheidend sind Deckungsgrad, Lückengrösse und Baumartenmischung. Die minimalen NaiS- Anforderungen sind:

- Lückengrösse 6 a, max. 12 a (aber nur bei gesicherter Verjüngung und Aufwuchs in zielgemässer Mischung)
- Deckungsgrad (Stangenholz bis Baumholz) dauernd $\geq 40\%$
- Minimale Anforderungen auf Grund des Standortstyps sollen erfüllt sein

Bei erfüllten Anforderungen kann so die Häufigkeit und Ausdehnung von flachgründigen Rutschungen reduziert werden.

Bei mittel- bis tiefgründigen Rutschungen (2 bis >10m) tritt die unmittelbare Wirkung des Waldes durch die Wurzelarmierung stark zurück. Dafür kann der Wald oberhalb der potentiellen Rutschung viel Einfluss durch das Schaffen von Wasserspeicherräumen nehmen. Somit gelten für tiefgründige Rutschungen folgende minimale Anforderungen:

- Deckungsgrad (Stangenholz bis Baumholz) dauernd $\geq 40\%$
- Lückengrösse max. 6a bei gesicherter Verjüngung max. 12a
- Nachhaltige Verjüngung gesichert
- Minimale Anforderungen auf Grund des Standortstyps sollen erfüllt sein

Weder in NaiS noch in andern Literaturquellen liess sich ein Hinweis darauf finden, dass die Birke weniger oder besser geeignet ist für den Schutz vor Massenbewegungen als die Fichte.

1.7.4 Wildbach und Hochwasser

Die wirkenden Prozesse zwischen Gebirgswäldern, Wildbächen und Hochwasser sind vielseitig. Mit dem Wurzelraum können Wälder den Wasserhaushalt des Bodens beeinflussen. Der Einfluss auf die Speicherwirkung ist dabei stark von der Durchlässigkeit des Bodens, der vorhandenen Baumart und der Niederschlagsintensität abhängig. Am Hang befestigen Gehölze die Ufer und verhindern Erosionen bei Starkniederschlägen oder vom Gewässer selbst. Zudem halten Wälder Hangmuren, Lawinen und andere Massenbewegungen auf, die ins Gerinne gelangen könnten. Auf der anderen Seite liefert der Wald selbst Material und Schwemmholz, dass im Gerinne zu Verklausung führen

kann. Folgende Punkte sollten von einem Schutzwald für Wildbäche und Hochwasser erfüllt werden:

- Deckungsgrad der Baumschicht liegt bei $\geq 60\%$
- Keine instabilen Bäume oder rutschgefährdete Stämme im Gerinneeingang
- Minimale Anforderungen auf Grund des Standortstyps sollen erfüllt sein

In Bezug auf Hochwasserschutz liess sich kein Hinweis darauf finden, dass die Birke weniger oder besser geeignet ist als die Fichte.

1.8 Hypothesen

Die Arbeit will herausfinden, ob sich die Birke in frisch eingewachsenen Waldflächen positiv auf die Struktur des Fichtenbestandes auswirkt. Falls sich dies bestätigen lässt folgt die Frage, wie die Birken konkret für die biologische Rationalisierung in Gebirgswäldern genutzt werden können. Anhand mehrerer Untersuchungen sollen die wichtigsten Einflüsse erfasst werden. Folgende Hypothesen stehen im Vordergrund:

(1) Der Birkenschirm schützt die Fichten vor Gipfelbruch

Ein Gipfelbruch entsteht von aussen durch Schneelast oder Umfallen eines benachbarten Baumes (Baumann, Brang, & Burger, 2010). Gipfelbrüche wollen in Schutzwäldern vermieden werden, da sie zusätzlichen Stress für die Bäume bedeuten und zu Instabilitäten führen können. Unter dem Schirm von Birken könnten aufwachsende Fichten von hohen Schneelasten geschützt werden, was wiederum die Gefahr eines Gipfelbruchs verringern würde.

(2) Eine hohe Stammzahl an Birken schützt die Fichten vor Säbelwuchs

Bei Schneebebewegungen, insbesondere beim Schneegleiten, kommt es zum typischen Säbelwuchs¹⁰ (Bugmann & Frehner, 2019). Eine hohe Anzahl von Stämmen auf der Fläche kann das Schneegleiten verringern.

(3) Eine hohe Dichte an Birken führt zu tieferen Schlankheitsgraden bei den Fichten

Die Schlankheit eines Baumes wird als Verhältnis zwischen seiner Höhe und seinem BHD angegeben. Je grösser der Schlankheitsgrad, desto stärker bruchgefährdet sind die Bäume. Unter dem Birkenschirm legen die Fichten weniger schnell an Höhe zu (Wagnière, 1996). Dies kann sich positiv auf den Schlankheitsgrad auswirken. Daher sollte der Schlankheitsgrad im Fichten-Birken-Bestand tiefer liegen als im reinen Fichtenbestand.

(4) Birken verbessern die horizontale Struktur eines Fichtenbestandes

Birken können das flächige Aufkommen der Fichte verhindern. Dadurch entsteht eine horizontale Struktur, die in Bezug auf die Schutzfunktion vor Steinschlag, Lawine, Rutschung, Erosion, Murgang, Wildbach und Hochwasser wünschenswert ist.

¹⁰ Einseitige Stammverkrümmung am unteren Ende durch Schnee, Bodenbewegungen oder Wind.

2 Material und Methoden

2.1 Auswahl des Untersuchungsgebietes

In der vorliegenden Arbeit waren Birkenvorwälder in der hochmontanen Stufe von Interesse, die früher oder später in einen Fichtenwald übergehen. In den Alpen findet man diese oft auf frisch eingewachsenen Weideflächen. Dort liegt aufgrund der ehemaligen Beweidung, einiges an Mineralerde¹¹ frei. Auf Mineralerde hat die Fichte sowie auch die Birke besonders gute Chancen zum Aufkommen (Bugmann & Frehner, 2019). Die mineralischen Bestandteile besitzen für viele Pflanzen der Bodenvegetation einen zu geringen Nährstoffanteil, was die Konkurrenz für die Fichtenkeimlinge gering hält. Um die natürlichen Dynamiken zu beobachten, benötigt man unberührte Waldbestände, welche bis zum heutigen Zeitpunkt keinen Eingriff durch den Menschen erfahren haben. Dies garantiert, dass ausschliesslich natürliche Prozesse wirkten und für den aktuellen Zustand verantwortlich sind. Die Vergangenheit des Untersuchungsgebietes muss also bekannt sein.

Die gewählte Fläche im nordöstlichen Teil des Waldes Prau Nausch (Abbildung 5) erfüllt die oben genannten Ansprüche. Im Gebiet «Aclas» befindet sich ein Birkenvorwald, in dem die Fichten langsam die Rolle als dominante Baumart übernehmen. Wagnière (1996) untersuchte 1996 dieselbe Fläche schon in seiner Diplomarbeit. Der geschichtliche Hintergrund des Birkenvorwaldes ist also bekannt und zeigt keinen Eingriff durch den Menschen auf.

2.2 Beschrieb des Untersuchungsgebietes

2.2.1 Lage

Das gut vier Hektaren grosse Untersuchungsgebiet liegt im Wald Prau Nausch der Gemeinde Tujetsch (auf Deutsch Tavetsch). Tujetsch liegt im Kanton Graubünden in der Region Surselva, der Talschaft des Vorderrheins, welche unterhalb des Oberalppasses beginnt. Die Region gehört zu den nördlichen Zwischenalpen (Frehner, Wasser, & Schwitter, 2005). Das Haupttal führt entlang des Rheins nach Osten und wird durch die Randalpen abgeschirmt. Die Wälder an den steilen Talflanken bestehen zu grossen Teilen aus Fichte. Der Rest setzt sich aus Vogelbeere, Birke, Bergahorn und Grünerle zusammen (Fritsche & Frei, 2007). Im ganzen Tal entdeckt man immer wieder auch Birkenvorwälder. Das untersuchte Waldstück liegt oberhalb des Dorfes Surrein am Eingang zum Val Nalps. Die Fläche ist nach Südosten ausgerichtet. Das Gelände neigt sich 25°-40° und liegt zwischen 1500 und 1700 m.ü.M. (Abbildung 5).



Abbildung 5: Lage der Untersuchungsfläche in den nördlichen Schweizer Zwischenalpen (swisstopo, Geologischer Atlas GA25, 2019)

¹¹ Als Mineralerde ist der nicht organische Teil des Waldbodens zu verstehen. Dieser befindet sich unter der organischen Humusaufgabe. (Wasler & Schneider, 2018)

2.2.2 Geschichte

Die Geschichte der Fläche bis zum Ende des 20. Jahrhunderts wurde bereits von Wagnière (1996) aufgearbeitet. In einer Karte von Hager (1916) ist ersichtlich, dass das Gebiet Anfangs 20. Jahrhundert landwirtschaftlich genutzt wurde. Es ist die Rede von Fettwiesen und Äckern in kleinen Parzellen. Schon damals wuchsen einzelne Birkengruppen im Gebiet, bildeten aber keine geschlossenen Bestände. Im Frühjahr und Herbst wurden freilaufende Ziegen auf der Fläche gehalten. Diese Situation veränderte sich wohl bis 1943 nicht. Auf dem Map Viewer des Bundes ist ein Luftbild von 1943 ersichtlich, auf dem die landwirtschaftlichen Parzellen noch klar zu erkennen sind (swisstopo, 2019). Dort fallen auch grosse Erosionsstellen auf. Die Birkenheine bedecken vor allem die felsigen Partien. Auf Luftbildern von 1985 und 1990 sind noch grössere Parzellen für Weideland oder Mähwiesen aus zu machen. Die Birkenbestände oberhalb der Maiensäse verdichten sich und schlossen sich zusammen. Auf den Erosionsstellen wuchsen ebenfalls Birken. In den folgenden Jahren kann beobachtet werden, wie sich das Kronendach der Birken immer mehr schliesst. Ab 2016 berühren sich die Kronen und das Dach schliesst sich fast vollständig. Der Boden ist nur noch an felsigen Stellen durch das Blätterdach ersichtlich. Auf dem aktuellsten Luftbild von 2017 erkennt man auch vermehrt Fichten zwischen den Birken. Eine Unterscheidung von Auge ist aber fast nicht möglich (swisstopo, 2019). Waldbauliche Eingriffe seit dem Einwachsen der Fläche um 1943 sind nicht bekannt.

2.2.3 Klima

Die nächst gelegene Wetterstation von Meteo Schweiz befindet sich in Disentis, ca. acht Kilometer weiter westlich talauswärts auf 1190 m.ü.M.. Das Klima in der Surselva ist allgemein kalt und gemässigt. In Disentis fällt 1100 mm Regen pro Jahr mit Höchstwerten im Sommer. Es herrscht eine Durchschnittstemperatur von 6.7 °C, mit den Tiefstwerten im Januar von -4.6 °C und Höchstwerten im Juli von 21.4 °C (Abbildung 6). Die Wetterstation befindet sich jedoch etwa 400 Höhenmeter tiefer als die Untersuchungsfläche, weshalb es im Untersuchungsgebiet durchschnittlich 2.6 °C kälter ist, wenn man von einem feuchtadiabatischen Temperaturgradienten von 0.6 °C Unterschied pro 100 Höhenmeter ausgeht¹². An insgesamt 128 Tagen im Jahr tritt Frost auf. (Meteo Schweiz, 2019)

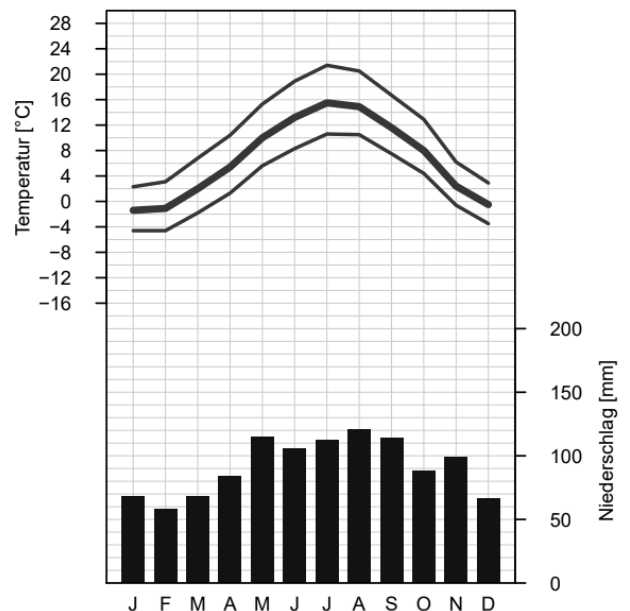


Abbildung 6: Klimadiagramm von Disentis. Die Wetterdaten stammen aus der Normperiode von 1981-2010 (Meteo Schweiz, 2019).

¹² Dieser ist ein häufig verwendeter Mittelwert für die Alpen (Valli & Iyyanki, 2019). Der Wert kann je nach Luftfeuchtigkeit variieren.

2.2.4 Geologie und Boden

Die Karte in Abbildung 7 zeigt die geologischen Verhältnisse auf der Untersuchungsfläche. Der geologische Untergrund besteht teils aus Muskovitgneisen und Schiefer des Tavetscher Zwischenmassivs und Überresten von letzteiszeitlichen Moränen aus dem Quartär.

Die bodenkundlichen Daten stammen aus der Diplomarbeit von Wagnière (1996). Er hob drei Bodenprofile in und um die Untersuchungsfläche aus und stellte fest, dass im Fichten-Altbestand eine siltige Braunerde mit Anflug eines leichten Auswaschungshorizontes zu finden ist (podsolierte Braunerde). Die 15 cm dicke Rohhumusauflage besteht ausschliesslich aus Fichtennadeln. Im Birkenvorwald hingegen bildet ein Mull aus Birkenblätter die Auflage. Der B-Horizont besteht auch aus einer siltigen Braunerde, aber ohne Auswaschungshorizont. Das dritte Profil stammt aus der Freifläche und entspricht einem flachgründigen Regosol. Die pH-Werte lagen überall bei fünf, wobei der obere Bereich im Fichten-Altbestand mit pH 4 etwas saurer war.



Abbildung 7: Ausschnitt aus dem Geologischen Atlas der Schweiz (GA25) (swisstopo, 2019). Der Atlas gibt Auskunft über die obersten Schichten des Untergrundes. Das Tavetscher Zwischenmassiv ist grau eingefärbt, die letzteiszeitlichen Moränen beige. Im orangen Rahmen liegt das Untersuchungsgebiet.

2.3 Übersicht über die Untersuchungsflächen

Für die Felderhebung wurden fünf Untersuchungsflächen (Abbildung 8) gewählt. Es wurde versucht, für jede Fläche ein 6-10 Aren grosses homogenes Gebiet abzustecken. Randeffekte sollten vermieden werden. Zum Waldrand hin nahm man bewusst zwei bis drei Baumreihen Abstand. Mit dem gleichen Abstand wurden Felspartien, Störungszonen und benachbarte Untersuchungsflächen umgangen. Dies erklärt die ungleichmässigen Formen der Polygonflächen. Die Flächen A, B, C und D basieren auf den Standorten von Wagnière (1996) und bilden bezüglich der Baumartenmischung einen Gradienten von viel Fichte mit wenig Birke (Fläche A) zu wenig Fichte mit viel Birke (Fläche D). Die 36 m² kleinen Flächen aus Wagnières Arbeit (1996) befinden sich ungefähr in der Mitte der jetzigen Untersuchungsflächen. Dies erlaubt einen direkten Vergleich der Daten von heute mit der Situation vor 23 Jahren. Die Flächenbezeichnung stimmt mit der von Wagnière (1996) überein. Die in der Arbeit von Wagnière (1996) erwähnte Fläche E liess man bewusst weg, da dort die 170-jährigen Birken schon über hundert Jahre früher aufkamen, als auf den restlichen Flächen. Die Struktur tendiert in diesem Bereich eher auf einen vom Menschen und Vieh beeinflussten Mittelwald und passt so nicht ins Schema eines Birkenvorwaldes. Mit der weiter oben liegenden Fläche X wurde ein zusätzlicher fichtendominierter Wald hinzugekommen, welcher nicht unter dem Schirm eines Birkenvorwaldes entstand. Fläche X gilt als Beispiel für einen von Birken fast unbeeinflussten Fichtenwald.

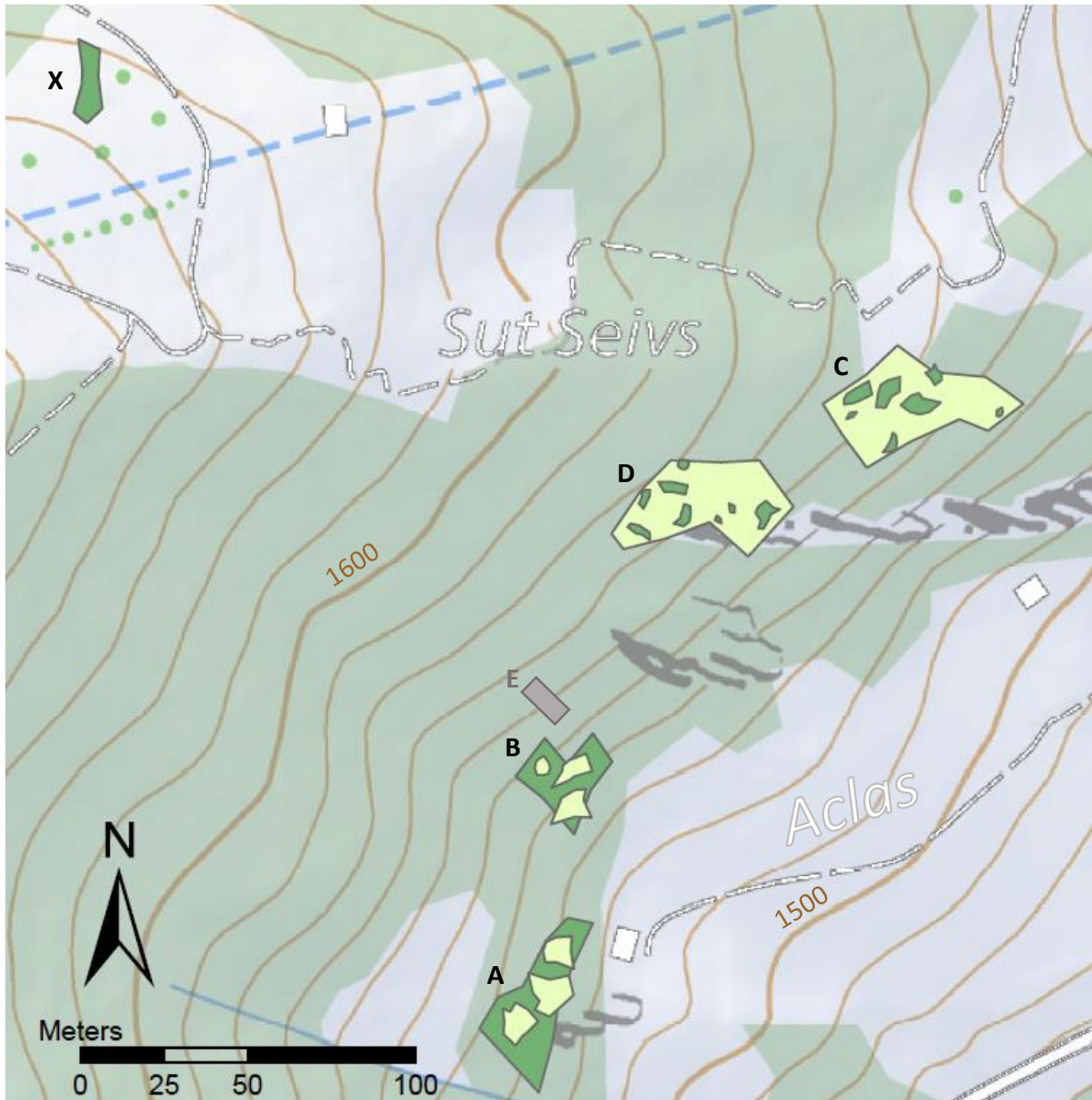


Abbildung 8: Lageplan der fünf untersuchten Flächen. Flächen mit Fichten sind dunkelgrün eingefärbt, die fichtenfreien Flächen sind olivgrün. Dort wachsen hauptsächlich Birken. In den Dunkelgrünen Bereich können durchaus auch Birken vorkommen. Das graue Rechteck repräsentiert die Fläche E von Wagnière (1996), welche aber in der vorliegenden Arbeit nicht miteinbezogen wurde.

2.4 Datenaufnahme im Feld

2.4.1 Kartierung

Jede Fläche wurde als Polygon abgesteckt. Und jeder Polygonpunkt wurde mittels Distanz und Azimut zum vorhergehenden Punkt eingemessen. Die Distanz erhob man mit einem Vertex¹³, das Azimut mit einem Wyssenkompass. Auf einer baumfreien Fläche mit gutem Satellitenempfang wurde jeweils die Position mittels GPS¹⁴ geortet. Vom GPS-Punkt aus liessen sich alle Koordinaten der Polygonpunkte mittels Distanz und Azimut berechnen.

Innerhalb der Flächenpolygone wurden Öffnungen als wichtige Hinweise auf die Bestandesstruktur vermessen. Als Öffnung gilt eine Fläche zwischen Fichtenstämmen, in der eine herrschende Fichte mit gut ausgebildeter Krone Platz finden würde. Die Birken denkt man sich weg, da diese nicht zum Hauptbestand gehören und früher oder später absterben werden. Eine Fichte in der hochmontanen und subalpinen Stufe benötigt ausgewachsen ungefähr 8 Meter horizontale Distanz von Fichtenstamm zu Fichtenstamm (Glanzmann, Schwitter, & Zürcher, 2019). Dies entspricht ungefähr einer Öffnung von mindestens 50 m². Auf den Untersuchungsflächen ist auch Rottenbildung möglich. Rotten sind eng zusammenstehenden Baumkollektive ab 2 Bäumen im Baumholz¹⁵ und bis zu 5 a Ausdehnung mit einem gemeinsamem Kronenmantel (Frehner, Wasser, & Schwitter, 2005). Rottenstrukturen gelten als typische Struktur in der subalpinen Stufe.

Für die Ausmessung der Öffnungen und Rotten setzte man einen ungefähren Mittelpunkt in der Rotte oder Öffnung, dessen Koordinaten vom nächst gelegenen Polygonpunkt via Azimut und Distanz berechnet wurden. Vom Mittelpunkt wird in acht Himmelsrichtungen (N, NO, O, SO, S, SW, W, NW) bis zu den äussersten Stämmen die horizontale Distanz ermittelt¹⁶. So ergibt sich ein ungefährender Umriss der Öffnung beziehungsweise der Rotten.

2.4.2 Kluppierung und Schadenserhebung

Zur Erhebung des BHDs und der Schäden wurde jede Untersuchungsfläche vollkluppiert. Der BHD wurde auf einer Höhe von 130 cm bei lebenden und toten Bäumen mittels einer Kluppe auf einen Zentimeter genau erhoben. Die Millimeter rundete man auf den nächsten Zentimeter ab. Es ergibt sich pro Zentimeter eine BHD-Klasse. Zusätzlich wurde gezählt, wie viele Bäume zwischen 40 cm bis <130 cm gross sind. Gleichzeitig mit dem BHD wurden die Schäden an den Bäumen erhoben, aufgeschlüsselt nach BHD-Klasse und Baumart. Als Schäden zählten Gipfelbrüche, Zwiesel¹⁷, ausgeprägter Säbelwuchs, Pilzbefall, Wildschäden (Verbiss, Fegen, Schlagen) und Hänger. In dieser Arbeit ist der Begriff Hänger als Bezeichnung für einen schiefstehenden Baum zu verstehen. Nach eigener Definition, basierend auf Beobachtungen im Feld, gilt ein Baum ab einem 25°-Winkel zwischen Fuss und Wipfel als Hänger.

¹³ Verwendet wurde das Modell Vertex IV der Firma Haglöf Sweden AB mit dem dazugehörigen Transponder T3.

¹⁴ Von der Firma Topcon wurde das Modell Hiper SR als Antenne verwendet, zusammen mit dem Feldrechner Topcon Tesla Geo.

¹⁵ Bezeichnung einer natürlichen Altersstufe ab 30 cm BHD

¹⁶ Im Feld wurde bei den Rotten fälschlicherweise die Distanz zwischen Mittelpunkt und Kronenrand, statt dem äussersten Stamm, gemessen. Die Messungen für die Rotten wurden nachträglich im ArcGIS um den durchschnittlichen Kronenradius von 2.2 m korrigiert.

¹⁷ Gabelung bei Fichten. Folge einer Fehlentwicklung, hervorgerufen durch Knospenschädigung oder von genetischen Defekten

2.4.3 Gerüstbäume

Gerüstbäume sind stabile Bäume der Oberschicht und bilden im Gebirgswald neben den Rotten eine weitere Art von Stabilitätsträgern (Frehner, Wasser, & Schwitter, 2005). Ein Gerüstbaum nimmt lokal eine vorherrschende Rolle ein und kann sich im Optimalfall noch mehrere Jahrzehnte im Bestand behaupten. Das bedeutet, ein Gerüstbaum besitzt lokal den stärksten BHD, überragt seine Nachbarn, verfügt über eine gut ausgebildete Krone und ist gesund¹⁸. Im Feld wurden keine Birken als Gerüstbäume ausgewählt. Die Birken sind Pioniergehölze. Die meisten Birken auf den Untersuchungsflächen sind bereits beherrschte Bäume. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Fichte auf längere Sicht die Birke verdrängt. Die Fichte hingegen bildet die gewünschte Hauptbaumart und soll deswegen auch die Gerüstbäume stellen.

Die Position aller Gerüstbäume wurde mit dem Vertex relativ zu einem Polygonpunkt gemessen. Danach folgte eine Messung der Höhe mit dem Vertex-Gerät. Die Höhe des Kronenansatzes (unterster grüner Quirl) wird ebenfalls mit dem Vertex gemessen. Bei asymmetrischen Kronen wurde das Mittelmaß zwischen den untersten Quirlen berechnet. Die Kronenlänge ergibt sich aus der Differenz von Baumhöhe und Kronenansatz. Bei Gerüstbäumen nahm man den BHD zweimal übers Kreuz auf einen Millimeter genau, einmal von oben und ein zweites Mal an der gleichen Stelle im rechten Winkel dazu. Das Alter der Gerüstbäume wurde nur stichprobenweise durch das Zählen von Quirlen von drei Bäumen pro Fläche erhoben. Aus Wagnières Arbeit (1996) ist das Alter der Fichten bereits sehr genau bekannt. Die Einschätzung im Feld dient lediglich zur Überprüfung dieser Werte. Anschliessend charakterisiert man den Gerüstbaum und seine Umgebung stichwortartig, um Schäden oder andere Auffälligkeiten festzuhalten. Um den Einfluss der Birke quantifizieren zu können, wurden im Umkreis von 5 m um jeden Gerüstbaum die Anzahl Birken notiert und die Höhe und den BHD der höchsten zwei Birken gemessen. Die fünf Meter ergaben sich aus der Beobachtung, dass doch einige der Birkenwipfel durch die starke Schiefelage dem Fuss bis zu fünf Meter weit entwachsen und so mit ihrer Krone auch entfernte Fichten erreichten.

¹⁸ Es ist an zu merken, dass Gerüstbäume nicht gleich Z-Bäume sind. Nicht jeder Gerüstbaum ist ein Z-Baum, sowie nicht jeder Z-Baum ein Gerüstbaum sein muss (Siehe Z-Baum Definition im Kapitel 1.6.3)

2.5 Auswertung

Die Datenauswertung geschah vor allem im Excel¹⁹ oder dem Statistikprogramm R²⁰. Den R-Skript, sowie alle relevanten Excel-Sheets sind auf einer CD abgespeichert (Abgelegt im Datenarchiv der Professur Waldökologie an der ETH). Räumliche Darstellungen und Karten wurden mit dem GIS-Programm ArcMap²¹ erstellt. Mit denen im Feld aufgenommenen Parametern wurden weitere Bestandesmerkmale ausgerechnet (Tabelle 1). Alle flächenbezogenen Parameter wurden, wie im Forstwesen üblich, auf eine Hektare hochgerechnet. Eine Berücksichtigung der Hangneigung war nicht von Nöten, da der Vertex alle Distanzen bereits in Horizontalwerten angibt.

Tabelle 1: Berechnete Parameter aus den erhobenen Felddaten und Erklärung dazu.

Bestandesmerkmale	Kürzel	Einheit	Beschrieb
Oberhöhe	h_{dom}	[m]	Mittlere Höhe der hundert dicksten Bäume/ha
Oberdurchmesser	d_{dom}	[cm]	Mittlerer BHD der hundert dicksten Bäume/ha
Grundfläche	G	[m ² /ha]	$\sum_{i=1}^n \pi \left(\frac{BHD}{2} \right)^2$
Schlankheitsgrad	h/d-Wert	[-]	$\frac{Baumhöhe}{BHD}$

(1) Statistische Analyse

Die Statistische Analyse erfolgte mit R 3.5.0. Alle für die Analyse verwendeten Datenreihen wurden als erstes mit einem Shapiro-Wilks-Test auf ihre Normalverteilung getestet. Anschliessend wurde bei normalverteilten Daten der T-Test angewandt, um zu eruieren, ob die zentralen Tendenzen zweier unabhängigen Stichproben verschieden sind. Bei nicht-normalverteilten Daten wurde zum Testen der zentralen Tendenzen der Mann-Whitney-u-Test verwendet. Der kritische Wert zur Annahme oder Verwerfung der Null-Hypothese wurde in allen Tests bei einem Signifikanzniveau von $p=0.05$ festgelegt.

(2) Räumliche Verteilung

Im Gebirgswald spielt die Verteilung der Stabilitätsträger eine Rolle. Die Gerüstbäume sollten zufällig oder regelmässig verteilt sein um die Schutzwirkung flächig zu gewährleisten (Abbildung 25, Anhang 2) (Glanzmann, Schwitter, & Zürcher, 2019). Der Index von Clark & Evans (1954) beschreibt ein Baumverteilungsmuster in dem die beobachtete mittlere Distanz (BMD) zum nächsten Nachbarn, beziehungsweise zum nächsten Gerüstbaum mit dem erwarteten mittleren Abstand bei zufälliger Baumverteilung in Beziehung gesetzt wird. Verhalten sich beide Abstände gleich, so ergibt sich der Wert 1.0, was einer komplett zufälligen Verteilung entspricht. Werte kleiner als 1.0 deuten auf eine Klumpung hin, Werte grösser als 1.0 weisen auf eine regelmässige Verteilung hin. Der Index reicht von 0.0 (alle GB am selben Ort) bis 2.19 (regelmässige Dreiecksverteilung). Im ArcGis Maps lässt sich mit der «Average Nearest Neighbor» Funktion der Clark & Evans - Index berechnen. In der gleichen Funktion ist auch ein Signifikanztest integriert. Bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $p \geq 0.05$ wird eine zufällige Verteilung angenommen, bei $p < 0.05$ gilt die beobachtete Verteilung als statistisch signifikant.

¹⁹ Microsoft Excel 2016

²⁰ R 3.5.0 (2018-04-23)

²¹ ArcMap 10.7.1 von Esri

(3) Berechnung der zukünftigen h/d-Werte

Die Fichtenbestände auf den untersuchten Flächen haben sich zu unterschiedlichen Zeitpunkten angesamt. Der daraus resultierende Altersunterschied erschwert den Vergleich der Resultate untereinander. Insbesondere, den Vergleich von Höhe und Durchmesser und dem daraus berechneten h/d-Wert. Die Höhe und der Durchmesser eines Baumes sind stark vom Alter abhängig. Deshalb empfiehlt es sich, gleichaltrige Bestände zu vergleichen. Mittels Ertragstafeln wurden grob die Fichtenmasse einer jeder Untersuchungsfläche im Alter von 80 Jahren berechnet. Achtzig Jahre bedeute ein Sprung von 30-50 Jahre in die Zukunft, je nach Alter der Fichten auf den Untersuchungsflächen. Dieser grosse Sprung ermöglicht eine Aussage über die Entwicklung der Bäume über einen längeren Zeitraum.

Als Grundlage für die Berechnungen dienten die Ertragstafeln von Badoux (1966-1969). Anhand des beobachteten durchschnittlichen Alters der Fichten auf einer Fläche und des gemessenen d_{dom} wurde die Bonität jeder Fläche bestimmt (Abbildung 26 und Abbildung 27, Anhang 3). Hier hätte auch h_{dom} verwendet werden können, die BHD Messwerte konnten jedoch im Feld präziser gemessen werden und sind deshalb verlässlicher. Der Unterschied, von d_{dom} oder h_{dom} ausgehend, beträgt maximal 1.75 Bonitäten (Tabelle 11, Anhang 4). Im Nächsten Schritt konnte aus den Ertragstafeln d_{dom} und h_{dom} in einem Alter von 80 Jahren abgelesen werden, ausgehend von der nächsten beobachteten Bonität. Der Unterschied zwischen d_{dom} und h_{dom} heute und den Werten im Alter von 80 Jahren dient als Multiplikationsfaktor. Unter Annahme einer linearen Steigung, wurden die gemessenen Höhen und BHDs der Fichten mit dem erhaltenen Faktor multipliziert um so für jeden Baum einen zukünftigen h/d-Wert zu ermitteln.

(4) Schutz vor Naturgefahren

Für die Auswertung bezüglich Schutzwirkung von Naturgefahren wurden die erhobenen Parameter mit den Anforderungen aus NaiS (Formular 2) verglichen (siehe Kapitel 1.7 Mindestanforderungen). Es wurden fünf verschiedene Szenarien für Naturgefahren betrachtet:

- Wirkung des Waldes im Transitgebiet einer Lawine
- Wirkung des Waldes im Transitgebiet eines Blockschlags
- Wirkung des Waldes im Transitgebiet eines Steinschlags
- Wirkung des Waldes auf eine flachgründige Rutschung im Entstehungsgebiet
- Wirkung des Waldes auf Wildbach und Hochwasser im Einzugsgebiet

Die Auswertung basiert auf subjektiven Einschätzungen des Autors. Die Ergebnisse wurden anschliessend mit Monika Frehner, Expertin in Gebirgswaldpflege und Schutzwaldmanagement, diskutiert und verifiziert.

Speziell an zu merken ist hier das Schätzverfahren zur Beurteilung der Waldwirkung auf den Hochwasserabfluss (Zürcher & Lüscher, 2003). Das Verfahren ist ein vereinfachtes Modell, welches zur Abschätzung und Veranschaulichung der Waldwirkung auf die Rückhaltung von Wasser bei Starkregenfällen entwickelt wurde. Aus der Abschätzung von Interzeption, Infiltration und Durchlässigkeit wird die Speicherkapazität im Boden und der Abfluss ermittelt. Die Daten dahinter setzten sich aus forstlichen Parametern (Deckungsgrad, Mischung, Kronenlänge ect.) und Bodenparametern (Schichtung, Porenanteil, Skelettgehalt ect.) zusammen. Die Angaben zum Boden wurden aus den Bodenprofilen von Wag-nière (1996) entnommen.

(5) Steinschlag-Tool

Die Schutzwirkung eines Gebirgswaldes gegen Steinschlag hängt von mehreren zusammenhängenden Faktoren ab. Je nach erwarteter Gesteinsgrösse und Masse, Eigenschaften des Hanges und der Baumartenmischung sind andere Stammzahlen gefordert. Mit dem Steinschlag-Tool der Gebirgswaldpflegegruppe lässt sich die Schutzwirkung eines Gebirgswaldes gegen Steinschlag einfach online schätzen (Fachstelle für Gebirgswaldpflege, 2020). Das Werkzeug berechnet das minimale und ideale Anforderungsprofil. Für alle Untersuchungsflächen wurden zwei Szenarien mit dem Steinschlag-Tool simuliert. Die Szenarien unterschieden sich nur in der Grösse der Steine. Ein Szenario simuliert ein Steinschlagereignis mit stürzenden Steinen von bis zu 0.006 m^3 Volumen (Gesteinsgrösse: $0.1 \text{ m} \times 0.2 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$). Das andere stellt ein Blockschlag dar, bei dem Blöcke von bis zu 1.8 m^3 (Blockgrösse: $2.0 \text{ m} \times 1.8 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$) hinunterstürzen würden. Jedes der Szenarien wurde zweimal gerechnet, einmal mit der Gesamtstammzahl von Birken und Fichten zusammen und einmal nur mit der Fichtenstammzahl. Die restlichen Parameter blieben identisch. Im Datenverzeichnis²² können die PDFs mit alle Eingabedaten für die verwendeten Szenarien eingesehen werden.

(6) Schätzverfahren Hochwasserabfluss

Zur Beurteilung der Waldwirkung auf Hochwasser kann neben dem NaiS Formular auch das von der GWG entwickelte Schätzverfahren angewendet werden (Zürcher & Lüscher, 2003). Das Schätzverfahren ist ein stark vereinfachtes Modell, welches zur Abschätzung und Veranschaulichung der Waldwirkung auf das Rückhalten von Wasser bei Starkregenfällen entwickelt wurde. Ziel des Verfahrens ist es, die Wirkung unterschiedlicher Waldzustände auf das abflussverhalten darzustellen. Das Verfahren stützt sich dabei auf Daten, welche im Feld durch die Beurteilung eines Waldbestandes und eines Bodenprofils gewonnen werden.

Das Schätzverfahren wurde nach der Feldarbeit mit Hilfe der beobachteten Parameter und den Angaben aus Wagnière (1996) für eine fichtendominierte Fläche (repräsentativ für A, B und X) und einen Birkenvorwald (repräsentativ für C und D) durchgeführt. Es konnten die Interzeption- und Infiltrationsfähigkeiten abgeschätzt werden. Es fehlten Informationen zur Durchwurzelung, den Makroporen und der Matrix. Zu diesen Punkten wurde keine Daten im Feld erhoben und auch Wagnière (1996) beschreibt diese Eigenschaften in seinen Bodenprofilen nicht. Für die Durchlässigkeit (Zusammenfassung aus Durchwurzelung, Makroporen und Matrix) kam also kein Resultat zu Stande.

²² Verfügbar auf einer CD im Datenarchiv der Professur Waldökologie der ETH

3 Resultate

3.1 Untersuchungsflächen

Einen ersten Vergleich der Flächen ermöglicht Tabelle 2. Sie fasst die wichtigsten Merkmale jeder Fläche mit Daten aus der Feldaufnahme zusammen. Dies ergibt eine Übersicht über alle fünf Untersuchungsflächen. In den folgenden Unterkapiteln wird jede Untersuchungsfläche nochmals separat angesprochen und ausführlich beschrieben.

Tabelle 2: Beschreibende Daten zur Übersicht über die fünf Untersuchungsflächen.

	Einheit	X	A	B	C	D
Standorttyp	[-]	57V	55	55	55*	55*
Fläche	[m ²]	123	670	398	1'039	972
Höhenlage	[m.ü.M.]	1'638	1'526	1'532	1'564	1'570
Hangneigung	[°]	24	32	39	39	30
Öffnungen/fichtenfreie Flächen	[%]	0	34	32	87	89
Mischung 2019 ²³	[Fi:Bi]	90:10	60:40	47:53	17:83	14:86
Mischung 2019 ²⁴	[Fi:Bi]	94:6	56:44	46:54	10:90	13:87
Mischung 1996 ²⁵	[Fi:Bi]	-	50:50	30:70	44:56	0:100
Stammzahl Fi	[n/ha]	15'121	2'501	2'608	357	556
Stammzahl Bi	[n/ha]	1'058	1'942	3'060	3'437	3'765
Grundfläche	[m ² /ha]	46	55	48	38	39
h _{dom} Fi	[m]	14	18	13	11	10
h _{dom} Bi	[m]	6	13	12	12	12
d _{dom} Fi	[cm]	20	29	21	21	17
d _{dom} Bi	[cm]	12	19	17	20	18
Alter Fi	[a]	40 ²⁶	47	44	37	32 ²⁷
Alter Bi	[a]	-	49	49	49	49
GB ²⁸	[n/ha]	680	320	310	125	134
h/d-Wert GB	[-]	76	66	60	55	60
Kronenlänge von Gerüstbäumen	[%]	68	71	79	88	89
DG Fi dominiert ²⁹	[%]	-100	-100	50-100	-100	-100
DG Fi freie ³⁰	[%]	-	85	70	60	60

²³ Auf Grundfläche basierend

²⁴ Auf Stammzahlen basierend

²⁵ Auf Stammzahlen basierend

²⁶ Basierend auf einer Schätzung, die anderen Altersangaben stammen aus Wagnière (2019).

²⁷ Basierend auf einer Schätzung, da es 1996 auf dieser Fläche noch keine Fichten gab.

²⁸ GB = Gerüstbaum

²⁹ Deckungsgrad auf fichtendominierten Flächen

³⁰ Deckungsgrad auf fichtenfreien Flächen

3.1.1 Fläche A

Auf der gesamten untersuchten Fläche von 670 m² wachsen die Fichten dicht beieinander auf. Im Schnitt beträgt die Hangneigung 32°. Der Wald erreicht eine Stammzahl von 4'414 Stück pro Hektare. Die Mischung besteht aus 60% Fichte und 40% Birke, wenn mit der Grundfläche gerechnet wird. Und aus 56% Fichte und 44% Birke, wenn die Stammzahlen betrachtet werden. Bei Wagnière (1996), berechnet aus den Stammzahlen, enthielt die Mischung 50% Fichte und 50% Birke. Fläche A enthält drei Öffnungen, welche 34% der Fläche ausmachen und vermutlich aufgrund von anstehenden Felsplatten entstanden. Birken mögen sich dort, trotz des flachgründigen Bodens, zu etablieren. Birken schieben sich auch von aussen in die Öffnungen. So beträgt der Deckungsgrad in den Öffnungen bis zu 80%. Auf dem Rest der Fläche herrscht ein Deckungsgrad von nahezu 100%. Unter der Baumschicht kommt weder eine Strauch- noch eine Krautschicht auf. Lediglich die Heidelbeere schafft es, sich in den Öffnungen zu etablieren, erreicht jedoch nur eine geringe Wuchshöhe. Aufgrund der Standortverhältnisse kommt auf der Fläche A ein Ehrenpreis-Fichtenwald (55) auf.

Im Jahre 1996 enthielt Fläche A noch einen geschlossenen Birkenvorwald von 11 m Höhe mit Fichten zwischen 2 und 4 Metern (Abbildung 9). Heute, 23 Jahre später, beträgt die Oberhöhe der Fichten 18 m und die der Birken 13 m. Wagnière (1996) bestimmte für die Birken einen Ansamlungszeitpunkt kurz vor 1970, was auch für die meisten Fichten auf dieser Fläche zutrifft. Heute war fast keine Verjüngung mehr zu finden. Auf der Fläche wurden 21 Gerüstbäume ausgemacht, was einer Dichte von 320 Gerüstbäumen pro Hektare entspricht. Der h/d-Wert bei den Gerüstbäumen liegt bei 66 und die Kronenlänge beträgt um die 70%.

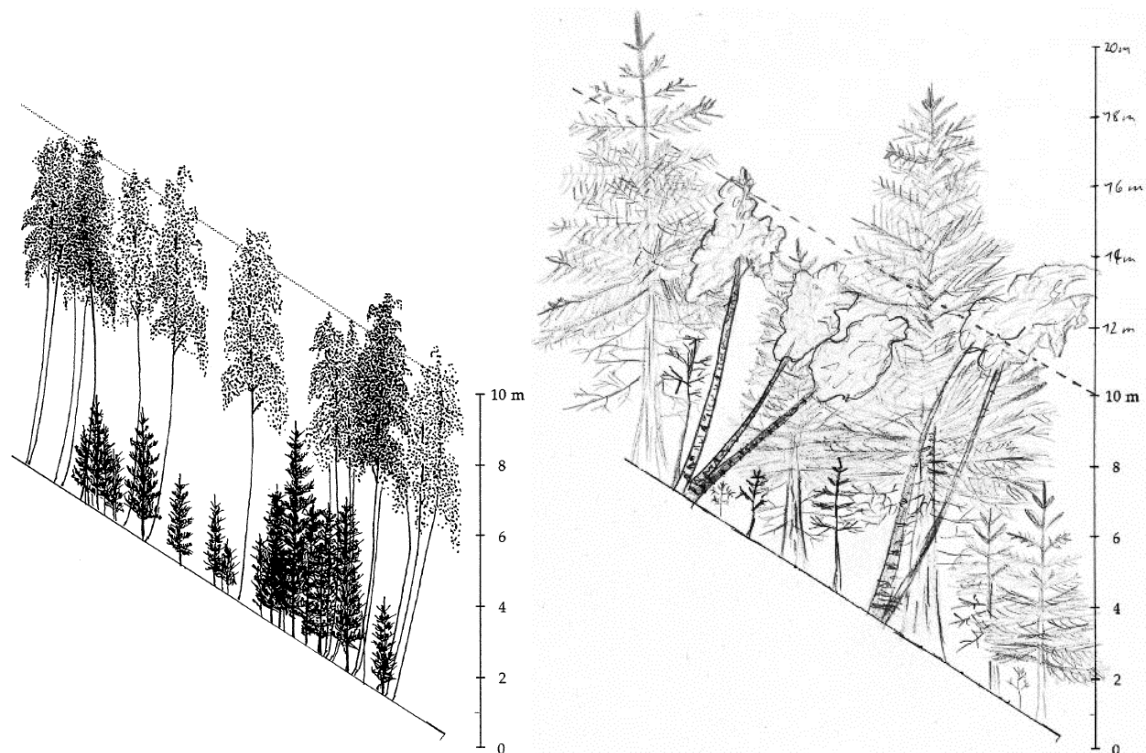


Abbildung 9: Links: Waldquerschnitt der Fläche A von 1996 (Wagnière, 1996). Rechts: eigene Skizze des heutigen Zustandes.

3.1.2 Fläche B

Fläche B ist mit 398 m² deutlich kleiner als die anderen Untersuchungsflächen ausgefallen. Die Fläche konnte aufgrund der Randeffekte nicht grösser ausgesteckt werden. Unterhalb der Fläche endet der Wald, nach rechts begrenzen Felsen die Fläche, links stösst schon bald Fläche A an und gegen oben wirkt eine Windwurffläche als Grenze. Die Hangneigung beträgt im Schnitt 39°. Der Wald erreicht eine Stammzahl von 6'420 Stück pro Hektare und bei der Mischung erlangt die Birke 53% und die Fichte 47%, wenn mit der Grundfläche gerechnet wird. Und 46% Fichte und 54% Birke, wenn die Stammzahlen betrachtet werden. Bei Wagnière (1996) war die Birke mit 70% Mischungsanteil noch stärker vertreten. Die Fläche B weist drei Öffnungen auf, die leicht mit Gras bewachsen sind und zusammen 32% der Flächen ausmachen. Auch hier befinden sich Birken in den Öffnungen, aufgrund deren der Deckungsgrad in der Öffnung doch auf 50-80% (je nach Öffnung) geschätzt wurde. Im fichtendominierten Bestand herrscht ein Deckungsgrad von nahezu 100%. Gräser bilden eine lockere Bodenvegetation. Die Heidelbeere kommt weniger häufig vor als auf der Fläche A. Die Verjüngung der Fichte ist spärlich. Aufgrund dieser Standortverhältnisse ist die Fläche B ebenfalls ein Ehrenpreis-Fichtenwald (55).

Im Jahre 1996 enthielt Fläche B noch einen geschlossenen Birkenvorwald von 11 m Höhe mit Fichten von 0.5 bis zu 2 Metern (Abbildung 10). Heute, 23 Jahre später, beträgt die Oberhöhe der Fichten 13 m und die der Birken 12 m. Die Birken sind momentan noch herrschend oder mitherrschend. Wagnière (1996) bestimmte für die Birken einen Ansamlungszeitpunkt um 1970. Die Zeitpunkte für das Ansamen der Fichte sind sehr verstreut zwischen 1966 und 1985. Im Durchschnitt spross die Fichte etwa 5 bis 7 Jahre später als die Birke. Auf der Fläche wurden 12 Fichten als Gerüstbäume ausgemacht, was einer Dichte von 310 Gerüstbäumen pro Hektare entspricht. Der h/d-Wert liegt bei den Gerüstbäumen bei 60 und die Kronenlänge beträgt um die 79%. Die Kronen erschienen ausladender und kräftiger als auf A und sind auch weiter nach unten beastet.

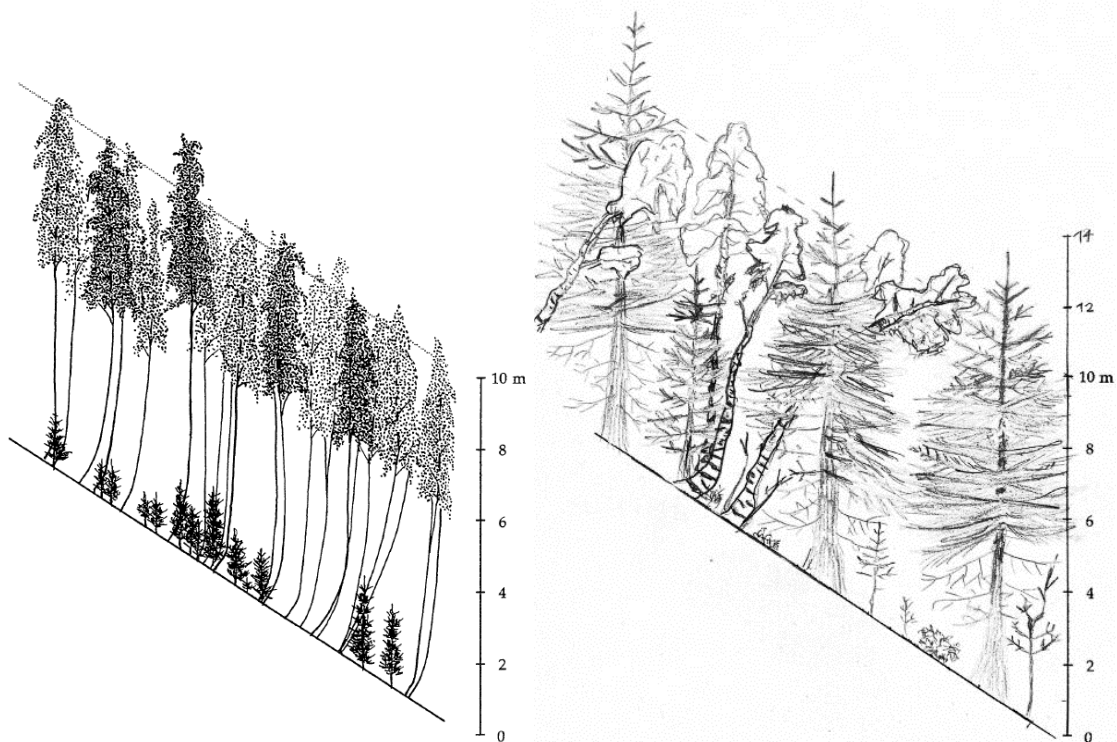


Abbildung 10: Links: Waldquerprofil der Fläche B von 1996 (Wagnière, 1996). Rechts: eigene Skizze des heutigen Zustandes.

3.1.3 Fläche C

Die Untersuchungsfläche C erstreckt sich über 1'039 m². Die Hangneigung beträgt 39°. Der Wald erreicht eine Stammzahl von 3'739 Stück pro Hektare. Die Mischung besteht aus 17% Fichte und 83% Birke, wenn mit der Grundfläche gerechnet wird. Und aus 10% Fichte und 90% Birke, wenn die Stammzahlen betrachtet werden. Bei Wagnière (1996) trug die Birke lediglich 56% am Mischungsanteil bei. Die Fläche C ist die einzige Fläche, auf der die Birken seit 1996 ihren Anteil vergrößerten. Fläche C scheint auf einem weniger wüchsigen Standort zu liegen. Deshalb tendieren die Fichten hier zu Rottenstrukturen, obwohl die Fläche nur geringfügig höher liegt als A und B. Die Kuppenlage und der felsige Untergrund begünstigen ebenfalls das Aufkommen von Rotten. Es sind 13% der Fläche C durch Rotten bedeckt. Ganze 87% beträgt die fichtenfreie Fläche. In den Rotten beträgt der Deckungsgrad fast 100%, während auf der fichtenfreien Fläche etwa 60% erreicht wird. Unter dem Birkenschild auf den fichtenfreien Flächen besteht die Bodenvegetation aus einer dichten Graschicht. Unter den Rotten liegt dichter Nadelstreu. In den Rotten hat es ein paar wenige Verjüngungsansätze. Aufgrund der Standortverhältnisse wächst auf C ein Schneesimsen-Fichtenwald (55*).

Im Jahre 1996 enthielt die Fläche C noch einen geschlossenen Birkenvorwald von bis zu 11 m Höhe. Darunter kamen kleine 50 cm hohe Fichten auf (Abbildung 11). Heute, 23 Jahre später, beträgt die Oberhöhe der Birken knapp 12 m und die der Fichten 11 m. Die Birken überragen die Fichten momentan noch. Aber von der Kronenausdehnung sind die Birken nicht mehr dominierend. Wagnière (1996) bestimmte für die Birken einen Ansamlungszeitpunkt nach 1970. Die Zeitpunkte für das Ansameln der Fichte sind sehr verstreut zwischen 1980 und 1990. Im Durchschnitt spross die Fichte etwa zehn Jahre später als die Birke. Auf der Fläche wurden 15 Gerüstbäume ausgemacht, was einer Dichte von 125 Gerüstbäumen pro Hektare entspricht. Der h/d-Wert der Gerüstbäume liegt bei 55 und die Kronenlänge beträgt um die 88%.

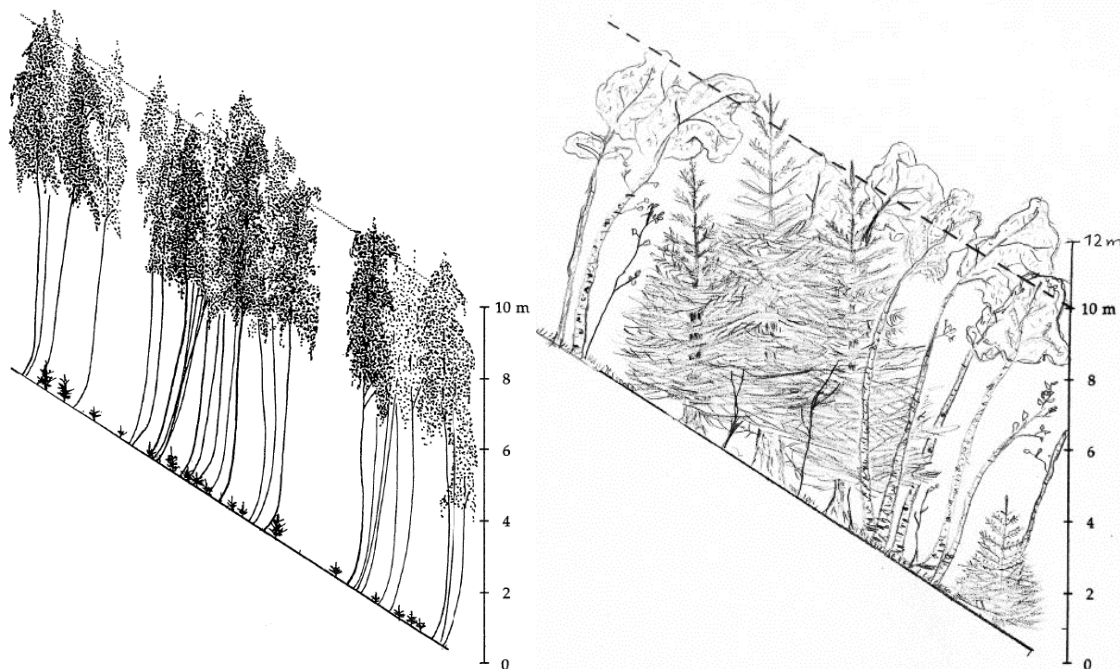


Abbildung 11: Links: Waldquersprofil der Fläche C von 1996 (Wagnière, 1996). Rechts: eigene Skizze des heutigen Zustandes.

3.1.4 Fläche D

Die Untersuchungsfläche D erstreckt sich über 972 m². Die Hangneigung beträgt 31°. Der lockere Wald erreicht eine Stammzahl von 4'321 Stück pro Hektare. Die Mischung besteht aus 14% Fichte und 83% Birke, wenn mit der Grundfläche gerechnet wird. Und aus 13% Fichte und 87% Birke, wenn die Stammzahlen betrachtet werden. Bei Wagnière (1996) handelte es sich noch um einen reinen Birkenwald. Die Fläche D liegt wegen der Kuppenlage und dem felsigen Untergrund auf einem weniger wüchsigen Standort. Dies führt wiederum tendenziell zu Rottenstrukturen. Deshalb kommen die Fichten hier auch schon als Rotte auf, obwohl die Fläche nur geringfügig höher liegt als A und B. Einige Fichten wachsen auch als Einzelbäume. Lediglich 11% der Fläche D sind durch die Rotten und Einzelbäume bedeckt. Ganze 89% beträgt die fichtenfreie Fläche. In den Rotten beträgt der Deckungsgrad fast 100%, während auf der fichtenfreien Fläche etwa 60% erreicht wird. Unter dem Birkenschirm auf den fichtenfreien Flächen besteht die Bodenvegetation aus einer dichten Graschicht mit Wald-Wachtelweizen, Goldrute und Schneesimse. Unter den Rotten liegt dichter Nadelstreu. In den Rotten hat es wenig Verjüngungsansätze. Aufgrund der Standortverhältnisse bildet sich auf der Fläche D ebenfalls einen Schneesimsen-Fichtenwald (55*).

Wagnière (1996) bestimmte für die Birken einen Ansamungszeitpunkt um 1970. Die Zeitpunkte für das Ansamen der Fichte wurde im Feld auf etwas um 1990 geschätzt. Die Schätzung macht durchaus Sinn, da Wagnières Untersuchungsflächen viel kleiner waren und er die damals sechs Jahre alten Fichten verfehlt haben könnte. Die Birken erreichten damals eine Höhe von 10 m (Abbildung 12). Heute, 23 Jahre später, beträgt die Oberhöhe der Fichten 10 m und die der Birken 12 m. Die Birken überragen die Fichten. Auf der Fläche wurden 14 Gerüstbäume ausgemacht, was einer Dichte von 134 Gerüstbäumen pro Hektare entspricht. Der h/d-Wert der Gerüstbäume liegt bei 60. Die Rotten und Einzelbäume verfügen über grüne Kronen bis fast zum Boden, was zu einer Kronenlänge von 89% führt.

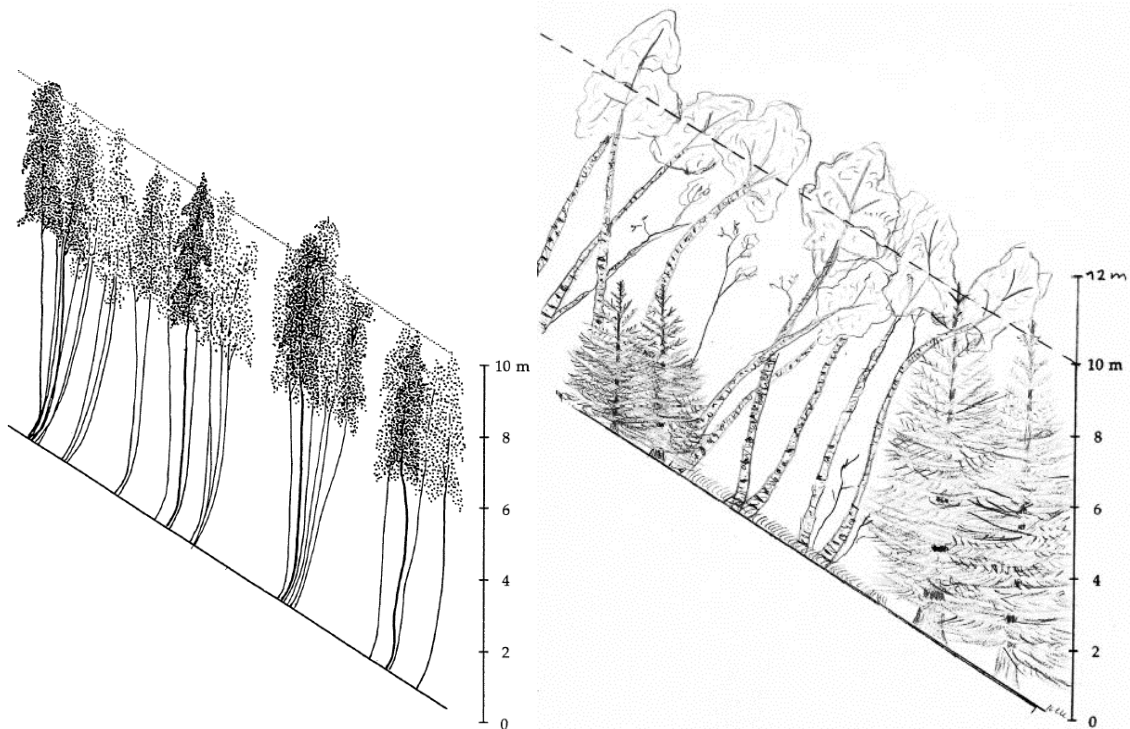


Abbildung 12: Links: Waldquersprofil der Fläche D von 1996 (Wagnière, 1996). Rechts: eigene Skizze des heutigen Zustandes.

3.1.5 Fläche X

Die Fläche X ist lediglich 132 m² gross und liegt auf 1'638 m.ü.M. Die Fläche befindet sich im Gebiet Sut Seivs, ist nach Nordost ausgerichtet und neigt sich mit 24°. Der dichte Fichtenwald erreicht eine Stammzahl von 14'516 Bäumen pro Hektare. Die Mischung besteht aus 90% Fichte und 10% Birke, wenn mit der Grundfläche gerechnet wird. Und aus 94% Fichte und 6% Birke, wenn die Stammzahlen betrachtet werden. Die Fläche ist äusserst dicht bewachsen und enthält keine Öffnungen. In den eng beieinanderstehenden Fichten herrscht ein Deckungsgrad von 100%. Der Boden ist mit einer Schicht aus Nadelstreu und Moos bedeckt. Unter der Baumschicht kommt weder eine Strauch- noch eine Krautschicht auf. Ausserhalb der Untersuchungsfläche in offeneren Bereichen wachsen kniehohe Heidelbeersträucher. Der Boden ist sehr flachgründig und steinig. Die Fläche X befindet sich schon in der subalpinen Stufe, was zu einem Alpenlattich-Fichtenwald mit Heidelbeere (57V) führt. Heute beträgt die Oberhöhe der Fichten 14 m und die der Birken lediglich 6 m. Die wenigen Birken kommen in grossen Sträuchern von bis zu 23 Individuen auf. Die Birken sind alle krumm und verkümmert, so wie auch viele Fichten unter dem Kronendach. Es ist darunter keine Verjüngung zu finden. Auf der Fläche wurden neun Gerüstbäume ausgemacht, was einer Dichte von 680 Gerüstbäumen pro Hektare entspricht. Der h/d-Wert liegt bei den Gerüstbäumen bei 76 und die Kronenlänge beträgt um die 68%. Die Gerüstbäume stehen in starker Konkurrenz zueinander.

Fläche X wurde nicht von Wagnière (1996) erhoben. Die Entwicklungsgeschichte von X lässt sich nur mittels Luftbilder und Aussagen des lokalen Försters rekonstruieren. Die Fläche wuchs kurz vor 1970 mit Fichten ein (swisstopo, 2019). Die Fläche erlitt dann 1976 beinahe einen Totalschaden wegen Schneeschimmelbefall, konnte sich aber wieder regenerieren (Ott, 1985). Auch die Untersuchungsfläche X erfuhr bis heute keine waldbaulichen Eingriffe.

Fläche X gilt als eine Art Referenzfläche, um zu sehen, wie sich die Struktur in einem fast reinen Fichtenbestand ohne Birke entwickeln würde. Wobei man mit dem Begriff «Referenz» vorsichtig sein muss, da die Fläche X höher liegt und eine andere Exposition aufweist, als die restlichen Untersuchungsflächen. Eine gleichaltrige fichtendominierte Waldfläche mit denselben Standorteigenschaften wie A-D liess sich in der näheren Umgebung nicht finden.

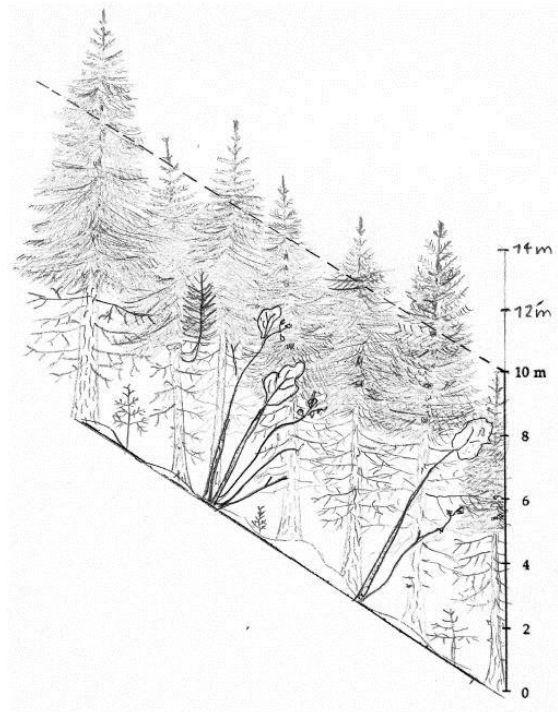


Abbildung 13: eigene Skizze des heutigen Zustandes der Fläche X

3.2 Stammzahl pro BHD-Stufe

Aus den Abbildung 14 und Abbildung 15 lässt sich die Durchmesserverteilung jeder Untersuchungsfläche ablesen. Die Birken (orange) tendieren in allen Flächen zu einer Normalverteilung, während die Fichten (blau) auf A und B eher linksschief verteilt sind. Auf C und D kommen in jeder BHD-Klasse in etwa gleich viele Fichten vor. Die meisten toten Bäume (grau) sind in den kleineren BHD-Klassen (0 cm -10 cm) zu finden. Wobei die Birken in allen Durchmesserklassen einen höheren Anteil an toten Bäumen aufweisen. Auf C und D, wo die Birken zahlenmässig massiv überwiegen, sind keine stehenden toten Fichten zu verzeichnen. Die Fichten stellen die dicksten Bäume, während die Birken mit wenigen Ausnahmen nicht über einen BHD von 20 cm herauskommen. Eine Ausnahme bildet die Fläche D, wo die dicksten Bäume zwei Birken sind. Diese zwei Birken sind etwa 100 Jahre älter als alle anderen Birken oder Fichten auf dieser Fläche (Wagnière, 1996) und zählen nicht zum untersuchten Birkenvorwald.

Die Gerüstbäume konzentrieren sich auf den oberen Drittel der Durchmesserverteilung. Auf jeder Fläche sind die dicksten Bäume auch Gerüstbäume³¹. Bei den sehr dünnen Gerüstbäumen auf den Flächen C und D handelt es sich um Einzelbäume, die nicht in Rotten vorkommen. Aufgrund ihres solitären Standes wurden sie auch als Gerüstbäume aufgenommen.

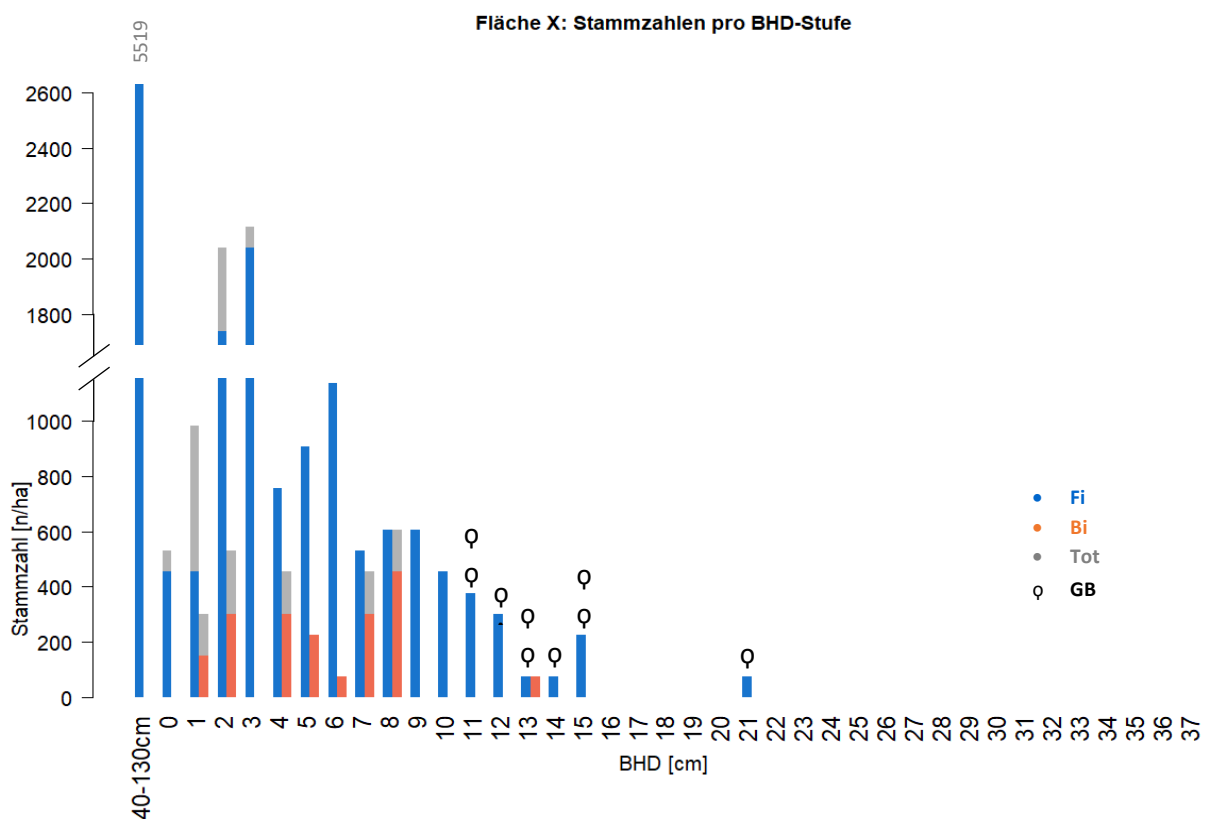


Abbildung 14: Stammzahlverteilung auf der Fläche X nach BHD, hochgerechnet auf eine Hektare. Die Fichten sind in blau dargestellt, die Birken in orange und der Anteil der stehenden toten Bäume in grau. Mit \varnothing wird angezeigt, welche Anzahl von GBs sich in dieser Klasse befinden. Ein Symbol zählt als ein GB, die y-Achse ist dafür nicht mehr relevant. Die Anzahl GBs wurden nicht auf eine Hektare umgerechnet. In der ersten Klasse liegt die Stammzahl mit 5'519 Individuen ausserhalb der Skala.

³¹ Achtung beim Interpretieren der Gerüstbäume in der Grafiken 14 und 15. Die mit \varnothing markierten BHD-Klassen beinhalten Gerüstbäume. Das bedeutet aber nicht, dass alle Fichten dieser Klasse Gerüstbäume sind. Wobei Ausnahmen existieren, bei denen dies der Fall ist. Zahlen sind der Tabelle 12 im Anhang 5 zu entnehmen.

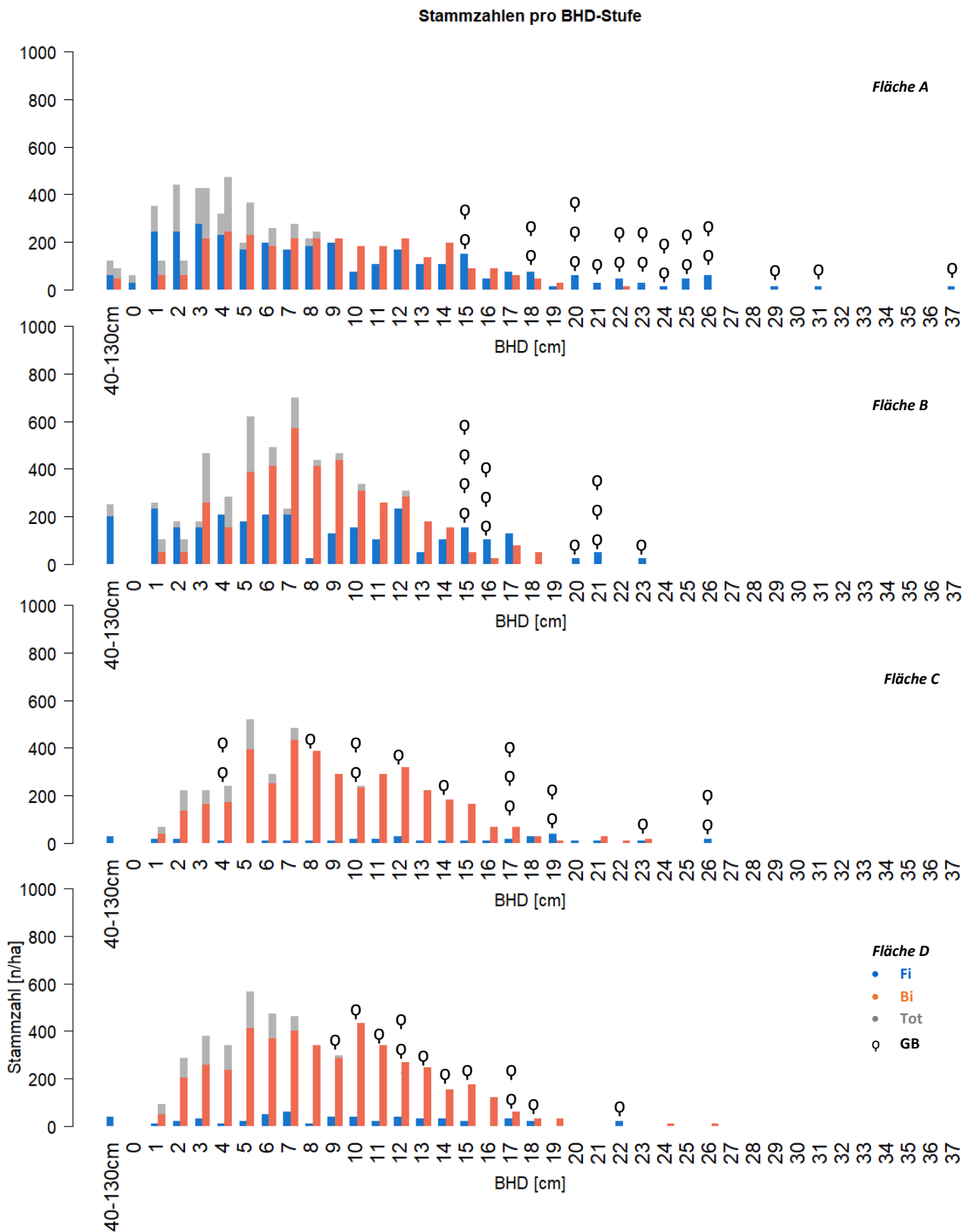


Abbildung 15: Stammzahlverteilung auf den Untersuchungsflächen A, B, C und D nach BHD, hochgerechnet auf eine Hektare. Die Fichten sind in blau dargestellt, die Birken in orange und der Anteil der stehenden toten Bäume in grau. Mit \varnothing wird angezeigt, welche Anzahl von GBs sich in dieser Klasse befinden. Ein Symbol zählt als ein GB, die y-Achse ist dafür nicht mehr relevant. Die Anzahl GBs wurden nicht auf eine Hektare umgerechnet.

3.3 Schäden pro BHD-Stufe

Im Feld wurden parallel zur Kluppierung auch Schäden aufgenommen. Vier Schadenstypen liessen sich erheben: Gipfelbruch, Säbelwuchs, Zwieselung, Wildschaden und Hänger. Hänger wurden nur bei den Birken beobachtet. Dort trat diese Schadensart sehr häufig auf. Je nach Fläche waren bis zu $\frac{3}{4}$ der Birken Hänger (Tabelle 3). Je grösser der Anteil der Fichten an der Mischung ausfällt, desto mehr Hänger treten bei den Birken auf.

Tabelle 3: Hänger in Abhängigkeit der Mischung

Fläche	X	A	B	C	D
Mischung Fi:Bi [%]	90:10	60:40	47:53	17:83	14:86
Hänger [%]	79	74	59	58	55

Welche Schäden bei den Fichten auftreten, lässt sich aus der Abbildung 16 herauslesen. Die Darstellung zeigt, wie viel Fichten prozentual in einer BHD-Klasse beschädigt sind. Eine Fichte kann gleichzeitig mehrere Schadensarten aufweisen, weshalb die Schäden innerhalb einer Durchmesserklasse nicht aufsummiert werden dürfen. In höheren BHD-Klassen sind prozentual mehr Fichten beschädigt. Dies hängt stark damit zusammen, dass in höheren Durchmesserklassen weniger Individuen vorkommen. So führen in den höheren Klassen einige wenige beschädigte Fichten zu einer hohen Prozentzahl. Die Abbildung 16 sollte daher gemeinsam mit den Stammzahlen pro BHD-Klasse aus Abbildung 15 interpretiert werden. Das Erreichen von 100 % geschädigter Fichten in einer BHD-Klasse ist in allen Fällen darauf zurück zu führen, dass im Feld die Stammzahl in dieser Durchmesserklasse bei eins lag. Ist diese eine Fichte beschädigt, so liegt die Schadensrate bei 100 %. Die absoluten Zahlen von geschädigten Fichten verhalten sich stabil über alle BHD-Klassen hinweg (Tabelle 13, Anhang 6). Ausgenommen auf der Fläche X, wo Schäden in den tiefen Klassen sehr zahlreich vorkommen. Prozentual gesehen nehmen die Schäden jedoch auf allen Flächen zu. Ausgenommen auf der Fläche C und D, wo sich die Zahlen relativ stabil verhalten. Ab einem BHD von 20 treten praktisch keine Schäden mehr auf. Eine Aussage über die Verteilung der unterschiedlichen Schadenstypen gestaltet sich schwierig. Allerdings fällt auf, dass dünnere Fichten vermehrt von Säbelwuchs betroffen sind. Fichten ab einem BHD von 18 cm zeigen keinen Säbelwuchs mehr.

Die Abbildung 16 weist auch auf die Stellung der Gerüstbäume hin. Nur wenige Gerüstbäume befinden sich in schadlosen BHD-Klassen. Tendenziell sind das die dicksten Fichten. Abbildung 16 sagt nichts darüber aus, ob Gerüstbäume auch wirklich beschädigt sind. Die erhobenen Daten im Feld ergaben jedoch, dass mit 24 zu 46 Bäumen die Mehrheit der Gerüstbäume keine Schäden aufweist (Tabelle 4). Gipfelbrüche sind bei Gerüstbäumen die häufigste Schadensart

Tabelle 4: Anzahl Schäden an Gerüstbäumen pro Untersuchungsflächen A, B, C, D und X.

n = absolute Schäden, % = prozentualer Anteil an Schäden der Untersuchungsfläche, *n/ha* = Anzahl Schäden pro Hektare.

G = Gipfelbrüche, W = Wildschäden, S = Säbelwüchse und Z = Zwiesel, - = keine Schäden

	A					B					C					D					X				
	G	W	S	Z	-	G	W	S	Z	-	G	W	S	Z	-	G	W	S	Z	-	G	W	S	Z	-
n	1	1	-	1	18	5	-	-	1	6	4	2	-	1	8	-	-	-	5	8	2	-	-	1	6
%	5	5	-	5	85	42	-	-	8	50	27	14	-	7	53	-	-	-	38	62	22	-	-	11	67
n/ha	15	15	-	15	265	125	-	-	25	150	39	19	-	10	77	-	-	-	51	82	151	-	-	76	454

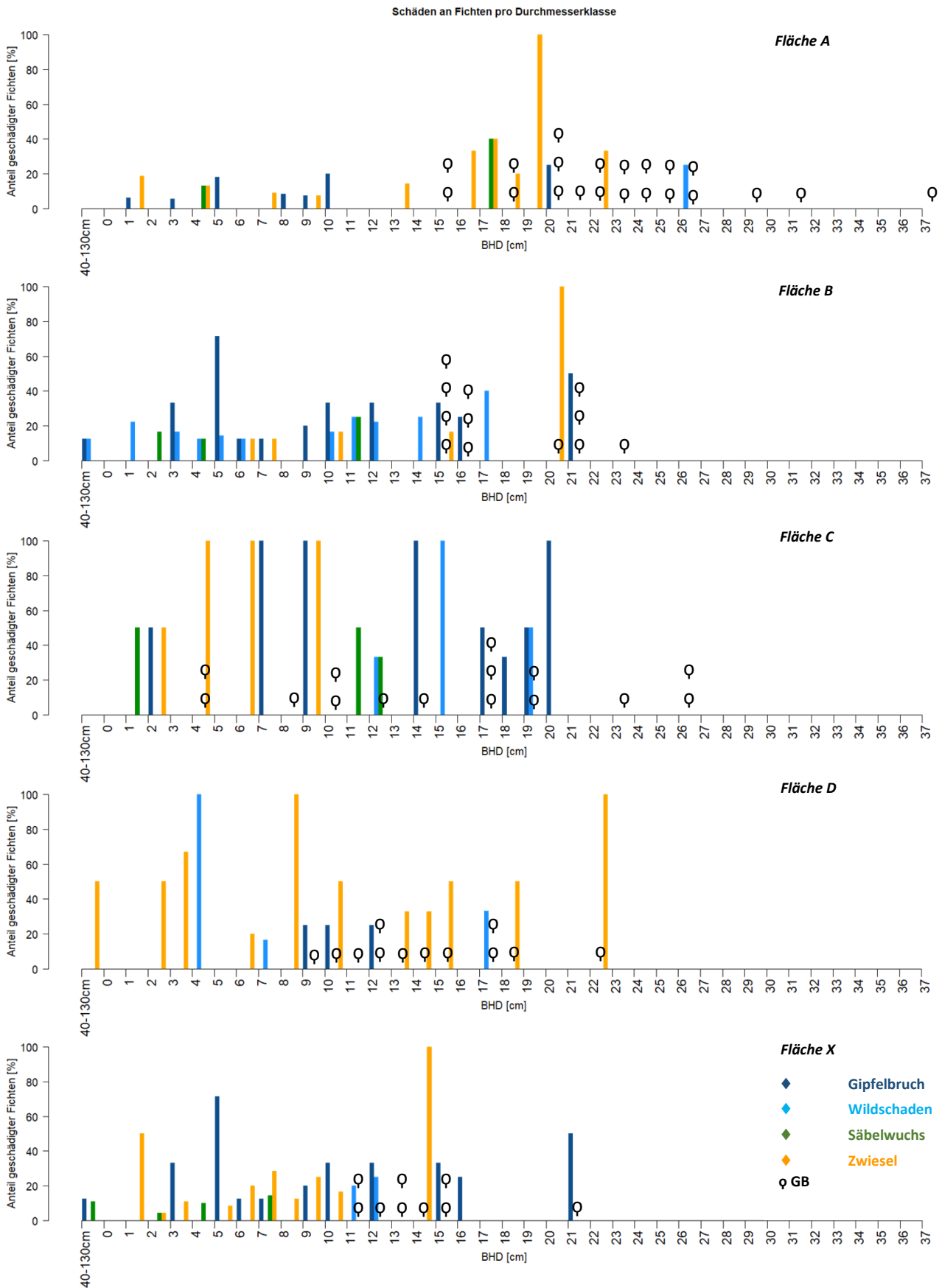


Abbildung 16: Prozentual beschädigte Fichten pro BHD-Klasse auf den Untersuchungsflächen A, B, C, D und X. Gipfelbrüche sind dunkelblau, Wildschäden hellblau, Säbelwüchse grün und Zwiesel orange eingefärbt. Mit ϕ wird angezeichnet, welche Anzahl von GBs sich in dieser Klasse befinden. Ein Symbol zählt als ein GB, die y-Achse ist dafür nicht mehr relevant. Die Grafik macht keine Aussage darüber, ob die Gerüstbäume auch beschädigt sind.

3.3.1 Gipfelbrüche

Im Hinblick auf die Hypothese (1) wurde der Zusammenhang von Gipfelbrüchen und Birken spezifisch ausgewertet. In der folgenden Grafik sind prozentual die Gipfelbrüche bei Fichten abhängig von der Birkenstammzahl aufgeführt (Abbildung 17). Die absoluten Zahlen können aus der Tabelle 13 im Anhang 6 entnommen werden. Auf der Fläche C erleidet fast jede dritte Fichte einen Gipfelbruch, während auf den restlichen Flächen deutlich tiefere Werte auftreten. Das Bestimmtheitsmass (R^2) von 0.047 fällt äusserst schwach aus und auch die im Statistikprogramm R berechnete Korrelation von 0.21 liegt sehr niedrig, somit ist kein deutlicher Trend ersichtlich. Der Anteil an Fichten mit Gipfelbrüchen scheint nicht von der Birkenanzahl abzuhängen.

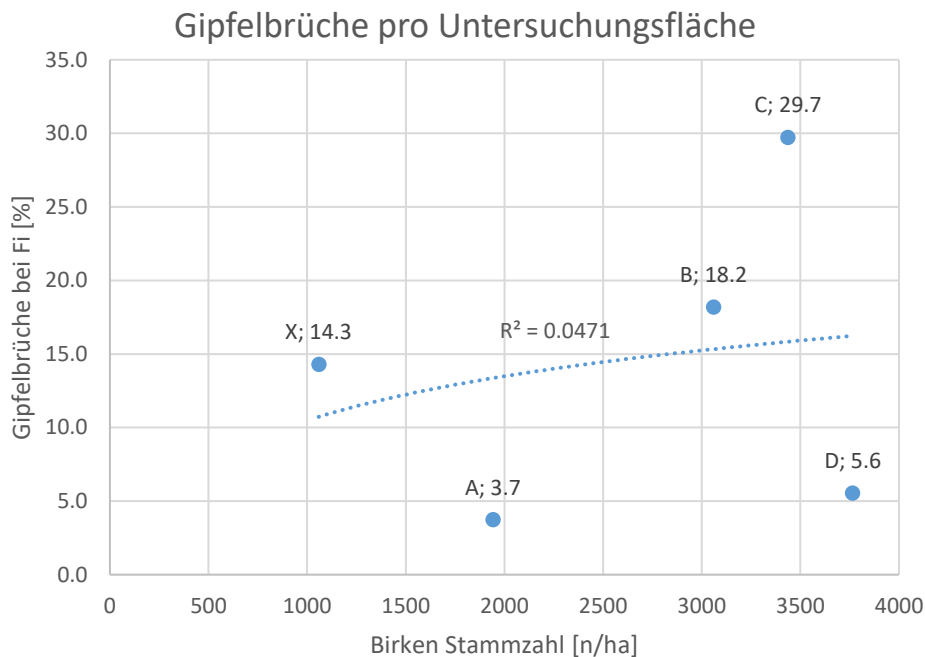


Abbildung 17: Anzahl Birken pro Hektare gegenüber den Gipfelbrüchen pro Hektare. Die Gipfelbrüche sind prozentual zu den Fichtenstammzahlen angegeben. Jeder Punkt repräsentiert eine Untersuchungsfläche. Das Bestimmtheitsmass R^2 beträgt 0.047.

Im folgenden Boxplot (Abbildung 18) ist die Aufmerksamkeit auf die Gerüstbäume gerichtet. Es wird die Anzahl von benachbarten Birken um Fichten mit und ohne Gipfelbruch verglichen. Als benachbart gelten alle Birken im Umkreis von 5 m. Die Statistik bezieht alle Gerüstbäume aller Untersuchungsflächen mit ein. Insgesamt weisen 14 Gerüstbäume einen Gipfelbruch auf. Dem gegenüber stehen 44 Gerüstbäume mit intakter Krone. In beide Gruppen können die Bäume weitere Schäden aufweisen, welche aber nicht in diese Analyse miteinbezogen wurden.

Im Schnitt sind die Gerüstbäume mit Gipfelbruch von mehr Birken umgeben als die intakten Bäume. Die Resultate zeigen in beiden Gruppen eine grosse Streuung. Dass die Streuung in der Gruppe mit Gipfelbruch ein wenig geringer ausfällt, könnte auf die geringere Gruppengrösse zurückzuführen sein. Die mit dem Mann-Whitney-U-Test ermittelte asymptotische Signifikanz weist einen p-Wert von 0.36 auf, womit kein signifikanter Unterschied in der Anzahl Birken zwischen Gerüstbäumen mit und ohne Gipfelbruch nachgewiesen werden kann.

Zusammenhang von benachbarten Birken und Gipfelbrüchen

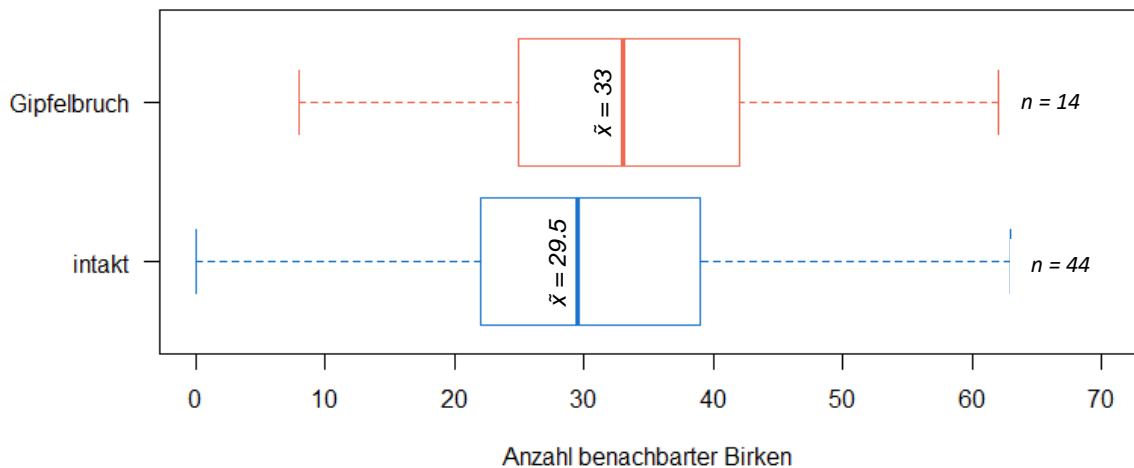


Abbildung 18: Vergleich der Anzahl benachbarter Birken von Gerüstbäumen mit Gipfelbrüchen und intakten Gerüstbäumen. Zu der Statistik beigetragen haben 44 Gerüstbäume ohne Gipfelbruch und 14 mit Bruch. Der Median bei den intakten Gerüstbäumen liegt bei 29.5 Birken, bei den Fichten mit Gipfelbruch liegt der Median bei 33 Birken. Die asymptotische Signifikanz weist einen p-Wert von 0.36 auf.

3.3.2 Säbelwuchs

Ein weiterer Schwerpunkt der Auswertung liegt auf dem Zusammenhang zwischen Säbelwuchs bei Fichten und der Birkenstammzahl. Die Zahl der von Säbelwuchs betroffenen Fichten fällt auf allen Flächen sehr klein aus. Betrachtet man Abbildung 19 (gestrichelte Trendlinie), so zeigt sich, dass mit mehr Birken das Auftreten von Säbelwuchs bei Fichten abnimmt. Das Bestimmtheitsmass von $R^2 = 0.011$ und die im Programm R berechnete Korrelation von -0.10 weisen darauf hin, dass der Trend äusserst schwach ausfällt. Ausfällig ist die Fläche C, deren Wert mit 8.1% deutlich über den anderen Datenpunkten liegt. Würde C als Ausreisser betitelt und aus der Datenreihe entfernt, würde R^2 bei 0.72 und die Korrelation bei -0.9 liegen (gepunktete Trendlinie). Der Extremwert C wird in der Diskussion noch ausführlich behandelt.

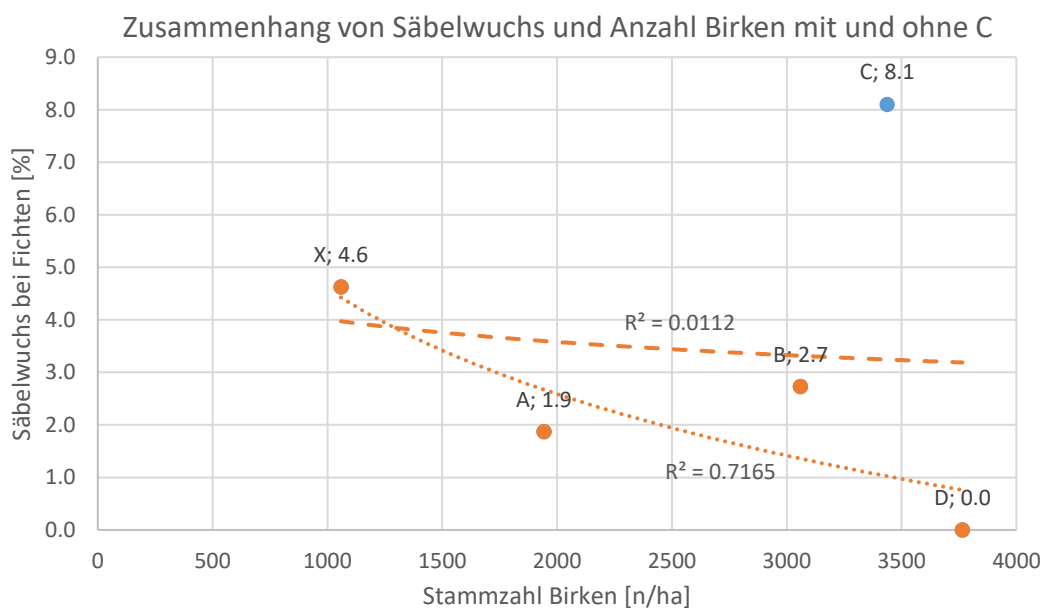


Abbildung 19: Anzahl Birken pro Hektare gegenüber den Säbelwüchsen pro Hektare. Jeder Punkt repräsentiert eine Untersuchungsfläche. Einmal ohne den Extrempunkt C (gepunktet) und einmal mit C (gestrichelt). Das Bestimmtheitsmass R^2 mit C beträgt 0.011. Das Bestimmtheitsmass ohne C beträgt 0.72.

Keiner der Gerüstbäume litt unter Säbelwuchs. Ein Vergleich zwischen Gerüstbäumen und Anzahl Birken in der Nähe der Gerüstbäume war deshalb nicht möglich.

Steilere Hänge sind anfälliger für Schneegleitschäden. Deshalb macht ein Miteinbeziehen der Hangneigung Sinn (Tabelle 5). Ein Vergleich vom Anteil an Säbelwüchsen und Hangneigung pro Untersuchungsfläche zeigt jedoch fast keinen Zusammenhang (Kor.: 0.21, R^2 : 0.04) (Anhang 7). Auch ein Multiple Regression von Hangneigung und Birkenzahl lässt keine Zusammenhänge erkennen (Abbildung 29, Anhang 8).

Tabelle 5: Überblick über die beeinflussenden Faktoren von Säbelwuchs

Fläche	X	A	B	C	D
Birkenstammzahl [n/ha]	1'058	2'014	3'151	3'444	3'765
Säbelwuchs [n/ha]	832	59	75	29	0
Säbelwuchs [%]	4.6	1.9	2.7	8.1	0
Hangneigung [°]	24	32	39	39	30

3.3.3 Schlankheitsgrad

Um die dritte Hypothese beweisen zu können, wurde der Schlankheitsgrad von Fichten mit der Anzahl Birken in Verbindung gebracht (Abbildung 20). Die im Feld gemessenen Werte (Abbildung 20, linke Grafik) ergeben kein klares Muster.

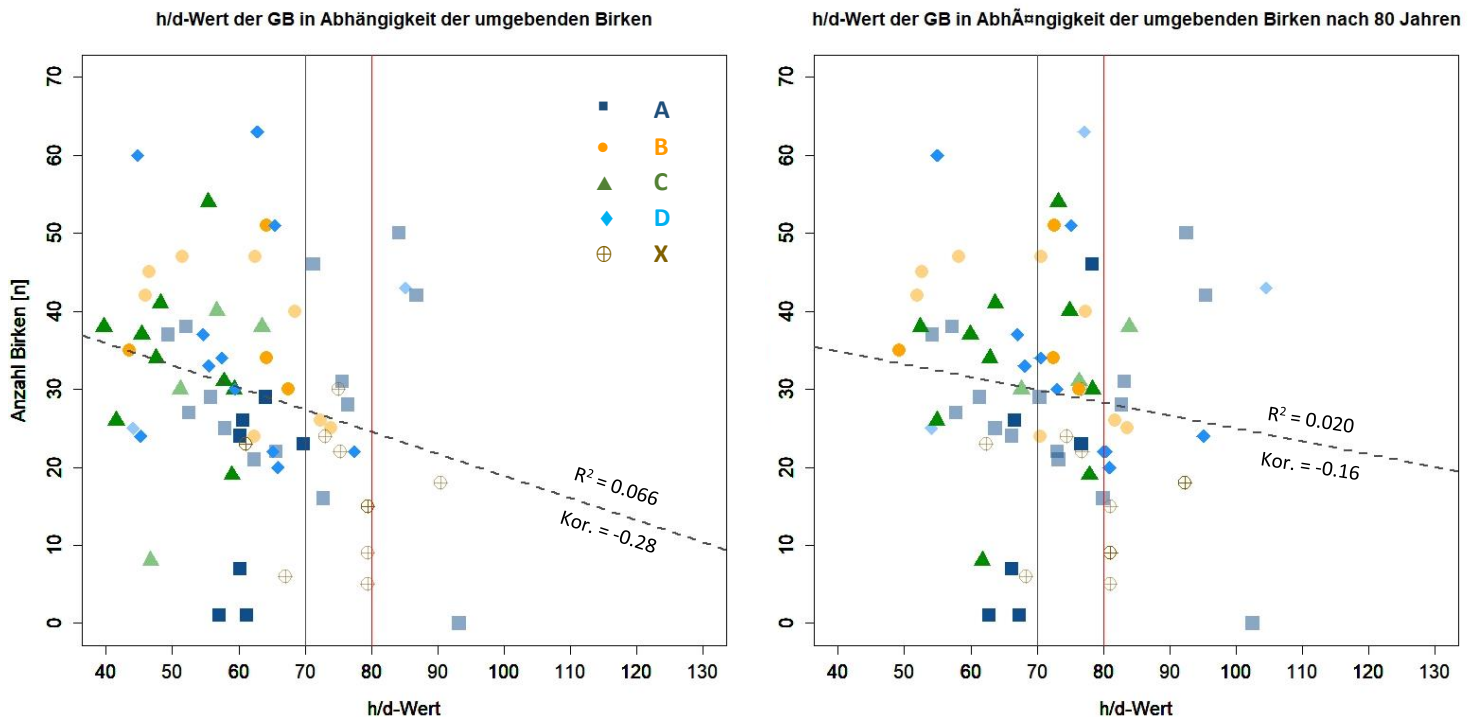


Abbildung 20: Vergleich der h/d-Werte von Gerüstbäumen mit der Anzahl Birken im Radius von 5 m um die Gerüstbäume, aufgeschlüsselt nach den Untersuchungsflächen A, B, C, D und X. Die Grafik links stellt die aktuell gemessenen Werte dar, die Grafik rechts beschreibt eine simulierte Situation bei einem Bestandesalter von 80 Jahren. Die gestrichelte Linie repräsentiert die gefittete Trendlinie. Die graue durchgezogene Linie markiert den Übergang des Schlankheitsgrades in den ungünstigen Bereich, bei einem h/d-Wert von 80, dargestellt durch die rote Linie, beginnt der kritische Bereich. Die gesättigten Punkte stellen die Verteilung der 100 stärksten Gerüstbäume (d_{dom}) dar.

Die Spitzenwerte von über 80 erreichen mehrere Gerüstbäume der Fläche A, sowie eine Fichte der Fläche X und eine Fichte von D. Ein h/d-Wert von über 80 ist als kritisch einzustufen (Bachmann, 2004). Schlankheitsgrade von über 70 gelten als ungünstig³². Tendenziell weisen die Bäume auf A und X höhere Werte auf. Eine Trendkurve weist darauf hin, dass viele Birken in unmittelbarer Nähe ($r = 5$ m) tendenziell kleinere h/d-Werte bei Gerüstbäumen hervorrufen. Diese Schlussfolgerung hat aber aufgrund ihres tiefen R²-Wertes von 0.066 und der tiefen Korrelation von -0.28 keine Aussagekraft. Die ausgemessenen Gerüstbäume sind nicht gleich alt (Tabelle 6). Auf den einen Untersuchungsflächen kamen die Fichten früher auf als auf den anderen, was zu einem Altersunterschied von bis zu 17 Jahren führt. Dies erschwert einen Vergleich der Resultate. Die rechte Grafik eliminiert den Faktor Alter. Dafür wurden die Werte aller Gerüstbäume mittels Ertragstabellen in die Zukunft modelliert. Die Datenpunkte stellen die h/d-Werte der Gerüstbäume nach einer simulierten Wachstumszeit von 80 Jahren dar. Nach 80 Jahren verschieben sich alle Gerüstbäume im Spektrum weiter nach rechts. Die Bäume auf den Flächen A und X erhöhen ihre Schlankheitsgrade nur geringfügig. Wohingegen bei C und D die h/d-Werte sich teils stark erhöhen, was das zu führt, dass auch auf diesen Flächen einige Bäume im ungünstigen oder sogar im kritischen Bereich von über 80 landen.

Die h/d Werte der 100 stärksten (d_{dom}) Gerüstbäume liegen heute grösstenteils unter 70 (Tabelle 6 und intransparente Punkte in Abbildung 20), mit Ausnahme von X, wo schon $\frac{3}{4}$ der stärksten Gerüstbäume im ungünstigen Bereich liegen. Tabelle 6 zeigt, dass bei einem Bestandesalter von 80 Jahren auf den Flächen X die stärksten Gerüstbäume ausnahmslos im kritischen Bereich liegen, während dies bei A nur auf einen Viertel der Bäume zutrifft. Bei B, C und D rutschen im Vergleich zu heute noch einige Bäume in die ungünstigen und kritischen Bereiche.

Tabelle 6: Anzahl der 100 stärksten (d_{dom}) Gerüstbäume pro ha, welche über 80 oder zwischen 70 und 80 liegen.

Flächen		X	A	B	C	D
Alter Fi	[a]	40	47	44	37	32
h/d-Wert GB	[n, h/d ≥ 80]	0	0	0	0	0
heute	[n, h/d ≥ 70 - <80]	76	15	0	0	11
h/d-Wert GB	[n, h/d ≥ 80]	100	0	0	0	40
Im Alter von 80 J.	[n, h/d ≥ 70 - <80]	0	25	75	40	30

Es ist durchaus auch möglich, dass der Schlankheitsgrad bei der Fichte von anderen Faktoren als dem Birkenanteil dominiert wird. Die allgemeine Stammzahl kann einen Einfluss auf den Schlankheitsgrad haben (Tabelle 7). Mit einer Korrelation von 0.71 zwischen Stammzahl und h/d Wert der 100 stärksten Bäumen ist hier ein dominanter Einfluss erkennbar. Mit mehr Stämmen pro Fläche steigt auch der h/d- Wert. Allerdings weist der p-Wert von 0.13 das Ergebnis als nicht statistisch signifikant aus. Es ergibt sich hier die Frage, welcher Faktor für die allgemeine Stammzahl relevanter ist, die Zahl der Birken- oder die Zahl der Fichtenstämme? Die statistische Auswertung ergab, dass ein stärkerer Zusammenhang zwischen der Fichtenstammzahl und der Anzahl Bäume über einem h/d-Wert von 70 besteht als zwischen der Birkenstammzahl und den h/d Werten (Tabelle 14, Anhang 9). Die Hangneigung ist ein weiterer möglicher Einflussfaktor. An steileren Hängen Konkurrenzierung die Fichten weniger um Licht, da die Fichten sowieso höhenversetzt aufwachsen. Ein Vergleich der Hangneigung mit dem h/d-Wert ergibt eine treffende Korrelation von -0.9 und einem Signifikaten p-Wert von 0.03. (Anhang 10).

³² Gemäss dem NaiS Formular 2 ist das Idealprofil gegen Lawinen ab einem h/d-Wert >70 nicht mehr erfüllt (Frehner, Wasser, & Schwitter, 2005). Daraus ergibt sich die Bezeichnung «ungünstig» für h/d-Werte >70.

Tabelle 7: Mögliche Einflussfaktoren auf den Schlankheitsgrad der Fichten.

Flächen		X	A	B	C	D
Hangneigung	[°]	24.2	32.2	39.2	39.3	30.3
Stammzahlen ³³	[n/ha]	16'179	4'443	5'668	3'794	4'321
h/d-Wert GB	[n, h/d > 80]	100	0	0	0	40
Im Alter von 80 J.	[n, h/d >70 - < 80]	0	25	75	40	30

3.4 Horizontale Strukturierung

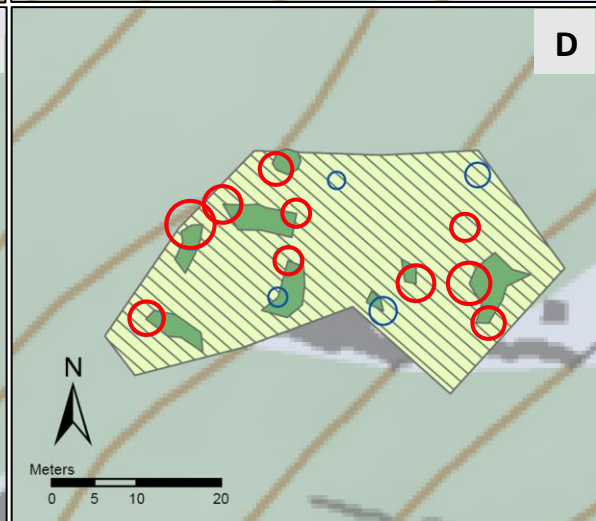
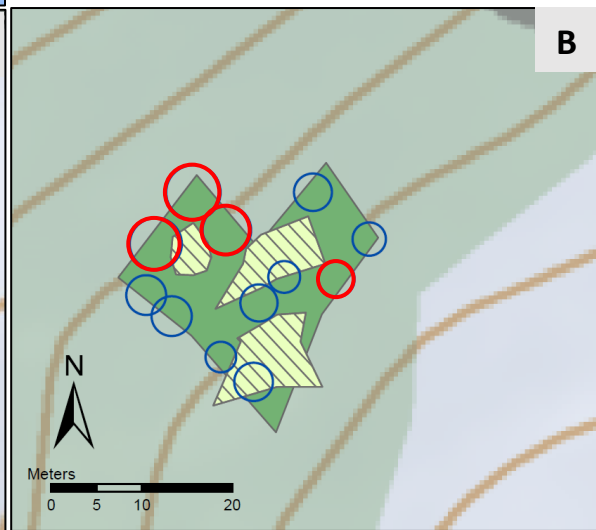
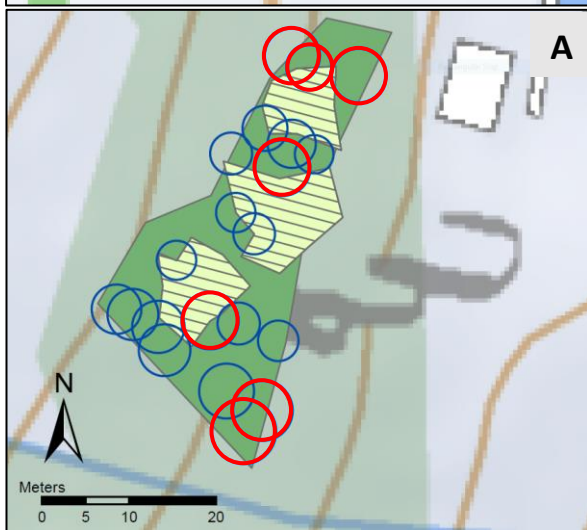
Um die Schutzfunktion des Waldes in Bezug auf Steinschlag, Lawine und Massenbewegungen beurteilen zu können, aber auch für die Einschätzung der Bestandesstabilität, sind Daten über die horizontale Strukturierung notwendig. In der folgenden Grafik (Abbildung 21) wurden die horizontal strukturierenden Elemente (Öffnungen, Rottenabstände und Gerüstbäume) jeder Untersuchungsfläche hervorgehoben. Zur Klarstellung der verwendeten Begriffe: Als Öffnungen werden die fichtenfreien Flächen auf A und B bezeichnet (olivgrün). Auf C und D existieren keine Öffnungen, die olivgrünen Bereich werden dort als fichtenfreie Flächen betitelt. Bei fichtenfreien Flächen kann davon ausgegangen werden, dass diese ausschliesslich mit Birken bewachsen sind. Birken könne aber auch in den fichtendominierten Flächen (dunkelgrün) vorkommen. Fichtendominierte Flächen sind auf C und D mit Rotten gleich zu setzten. Die grauen Striche in den olivgrünen Flächen sind Hangfalllinien und deuten die Fall- bzw. Fliessrichtung einer Massenbewegung an. Weiter ist in den folgenden Kapiteln die Rede von verschiedenen Distanzen. Es wird von der Öffnungslänge gesprochen. Damit ist immer der grösste Durchmesser einer Öffnung gemeint, gemessen in Hangfalllinie von Stamm zu Stamm. Der Rottendurchmesser bezieht sich auf die grösste Distanz von Stamm zu Stamm innerhalb einer Rotte. Mit Gassenbreite wird der Abstand zwischen zwei Rotten oder Kammern bezeichnet, unabhängig von deren Orientierung im Raum.

Die Karten aus Abbildung 21 zeigen, dass die kleinste Untersuchungsfläche X aus fichtendominiertem Wald besteht und über keine Öffnungen verfügt. Die Gerüstbäume sind über die gesamte Fläche verteilt. Die Kronen der Gerüstbäume überschneiden sich teilweise. Die Darstellung auf der Karte geht von symmetrischen Kronen aus, während in der Realität Fichten an Hängen meist asymmetrische Kronen ausbilden. Die Ausdehnungen der Kronen auf der Karte stimmen also nicht exakt mit den realen Bedingungen überein. Die Fläche A verfügt über drei benachbarte Öffnungen. Dazwischen stehen die Gerüstbäume. Auf der Fläche B befinden sich auch drei Öffnungen, hier aber in der Hangfalllinie untereinander angeordnet. Auf B berühren sich die Kronen der Gerüstbäume momentan noch nicht. Auf C und D zeichnen sich klare Rottenstrukturen ab. Die beiden Untersuchungsflächen werden aber von fichtenfreien Flächen dominiert. Die Rotten bilden meist länglich Formen und sind mehr oder weniger rechtwinklig zur Hangfalllinie ausgerichtet. Die Gerüstbäume auf C und D verfügen über kleinere Kronenradien als die Gerüstbäume auf A und B. Die Fichten auf C und D sind auch jünger und kleiner als die Fichten auf A und B.

³³ Birken und Fichten



Abbildung 21: Darstellung der Strukturelemente der fünf Untersuchungsflächen. Fichtendominierte Flächen bzw. Rotten sind dunkelgrün eingefärbt, die fichtenfreien Flächen bzw. Gassen sind olivgrün. Die Hangfalllinien sind die grauen Striche in den fichtenfreien Flächen. Die blauen Kreise stellen die Gerüstbäume dar, deren Durchmesser entspricht dem Kronendurchmesser (unter der Annahme einer symmetrischen Krone). In Realität überschneiden sich die Kronen praktisch nicht, da die Kronen hangseitig schwächer ausgebildet sind und die Bäume am Hang höhenversetzt stehen. Die roten Kreise markieren Gerüstbäume, welche zu den 100 stärksten Bäumen (d_{dom}) pro ha zählen.



Die Untersuchungsflächen X, C und D sollten aufgrund der Standortfaktoren Rottenstrukturen aufweisen. Deshalb werden sie mit dem Idealprofil für eine Rottenpflege verglichen (Tabelle 8, letzte Spalte). Die Fläche X besteht jedoch aus einem fichtendominierten Bestand ohne Öffnungen oder Gassen. Auf C und D sind die Rotten mehrheitlich parallel und länglich zum Hang geformt. Die Rottendurchmesser betragen 3-8 m. Die Grössen der Rotten sind mit 0.15 a bis 0.2 a noch sehr klein, was sich wiederum in den Rottenabständen widerspiegelt. In horizontaler Richtung sind die Abstände alle unter 20 m, meist auch unter 15 m breit. Aber vertikal, in Hangfalllinie, fallen die Abstände mit bis zu 39 m auf C bzw. 27 m auf D breiter aus als von der GWP empfohlen (siehe Kapitel 1.6.1 und Tabelle 8, letzte Spalte). Die Untersuchungsflächen A und B weisen aufgrund der Standortfaktoren keine Rottenstruktur mehr auf. Natürliche Öffnungen sorgen aber für eine Strukturierung. Da sich für A und B eine Kammerung als Pflegemassnahme empfiehlt, werden die Resultate in der Tabelle 8 mit dem Idealprofil einer Kammerung verglichen. Auf A betragen die Öffnungslängen 9 m - 13 m. Auf B fallen sie deutlich kürzer aus mit 5 m – 9 m. Die Grösse der Kammern wäre ein weiterer Vergleichspunkt. Die in der Arbeit ausgemessenen Untersuchungsflächen sind jedoch zu klein, als dass sich überhaupt einzelne Kammern abgrenzen liessen.

Tabelle 8: Parameter zur horizontalen Strukturierung der Untersuchungsflächen. C und D verfügen über eine Rottenstruktur, weshalb dort gewisse andere Parameter massgebend sind. Das Minus bedeutet, dass keine Daten erhoben wurde, zum Beispiel aufgrund von fehlenden Öffnungen auf X.

Fläche	X	A	B	C	D	Ideal ³⁴
Rottengrösse [A]	-	-	-	0.2	0.15	≤5
Rotten Ø ³⁵	-	-	-	3-12	3-8	≤20
Rottenabstände [m]	-	-	-	4-39	5-27	8-12
Öffnungslänge ³⁶ /Gassenbreite [m]	-	9-13	5-9	-	-	10-15
GB [n/ha]	680	320	310	125	134	>60
GB BMD ³⁷ [m]	3.2	3.5	5.0	7.3	5.6	8
Clark & Evan - Index	1.7	1.2	1.8	0.6	1.4	≥1
p ³⁸	0.0002	0.031	0.000001	0.328	0.006	<0.05

Bei der Kammerung dient der Kronenrand als wesentliches stabilisierendes Element, im Innern der Kollektive werden noch wenige zusätzliche Gerüstbäume benötigt. Zusätzlich spielt der Abstand zwischen den Fichten eine Rolle. Bei einer Kronenausdehnung der Fichte von 4 m soll der Abstand zwischen den Gerüstbäumen im Optimalfall 8 m betragen. Wird Tabelle 8 betrachtet, so schneidet die Fläche C mit 125 Gerüstbäumen und mit 7.3 m zwischen den Gerüstbäumen am besten ab. Mehr Birken verringern die Anzahl an Gerüstbäumen pro Hektare. Allerdings tritt auch ein Zusammenhang zwischen der Anzahl an Gerüstbäumen und der Fichtenstammzahl auf (Abbildung 30, Anhang 9). Bei einer höheren Stammzahl stehen mehr Fichten zur Verfügung, welche sich zu Gerüstbäumen entwickeln können. Die Gerüstbäume sollen auf der ganzen Fläche verstreut vorkommen und nicht geklumpt auftreten. Der Clark & Evans - Index ergibt für alle Flächen ausser C einen Wert höher als 1.0 aus³⁹. Unter Berücksichtigung der Signifikanz ist die räumliche Verteilung der Stabilitätsträger auf den Flächen A, B,

³⁴ Für A und B wird eine Kammerung als Idealprofil angenommen. Bei X, C und D bezieht sich das Idealprofil auf eine Rottenstruktur.

³⁵ Durchmesser in Hangfalllinie

³⁶ in Hangfalllinie

³⁷ beobachtete mittlere Distanz (Clark & Evan - Index)

³⁸ Signifikanztest (Clark & Evan - Index). Bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $p \geq 0.05$ wird eine zufällige Verteilung angenommen, bei $p < 0.05$ gilt die beobachtete Verteilung als statistisch signifikant.

³⁹ Eine Erklärung zum Clark & Evans – Index gibt es in Kapitel 2.5

D und X somit «regelmässig». Mit einem Indexwert von 0.6 tendiert C zur Klumpung von Gerüstbäumen. Der p-Wert fällt mit 0.328 jedoch zu hoch aus, so dass auf C eine zufällige Verteilung angenommen wird.

3.5 Schutz vor Naturgefahren

Die Resultate in den vorherigen Kapiteln lassen sich ins Formular 2 von NaiS (Frehner, Wasser, & Schwitter, 2005) übertragen. Das ausgefüllte Formular (Anhang 11) weist auf die Schutzwirkung der jeweiligen Flächen gegenüber den möglichen Naturgefahren hin. Die Tabelle 9 fasst die Beurteilung aus dem Formular 2 zusammen. Drei verschiedene Wertungen wurden vergeben ideale-, minimale- und ungenügende Schutzwirkung. Eine ideale Schutzwirkung wird erzielt, wenn das Idealprofil erreicht wurde. Wird nur das Minimalprofil erreicht, so wird auch die Schutzwirkung mit minimal bewertet. Eine Fläche mit minimaler Schutzwirkung bietet immer noch ausreichend Schutz vor der Naturgefahr um erhebliche Schäden zu vermeiden. Wird das Minimalprofil nicht erreicht, so bietet die Fläche keinen genügenden Schutz und wird mit einer ungenügenden Schutzwirkung bewertet. Die Kriterien Mischung, Gefüge-vertikal, Gefüge-horizontal und Stabilitätsträger wurden einzeln bewertet und schlussendlich zu einem einzigen Wert zusammengefasst, welcher in Tabelle 9 vermerkt ist. Das Kriterium Verjüngung wurde aussen vorgelesen. Liegen zwei der bewerteten Kriterien unter dem Minimalprofil, so wurde die Bewertung «ungenügende Schutzwirkung» vergeben. Liegt nur ein Kriterium unter dem Minimalprofil, so wurde die Bewertung «minimal» vergeben. Die Untersuchungsflächen sind noch jung und Verjüngung wird erst später eine Rolle spielen. Die Angaben aus NaiS beziehen sich immer auf eine Hektare. Somit sind die untersuchten Flächen auch zu klein, als dass zwingend genügend Verjüngungsansätzen nachgewiesen werden könnten. In der Feldarbeit wurden deshalb keine Daten zur Verjüngung erhoben. Die Flächen A und B sind Standortstyp 55 (Ehrenpreis-Fichtenwald) während die Flächen C und D sich auf dem Standortstyp 55* (Schneesimsen-Fichtenwald) befinden. Die Fläche X kann dem Standortstyp 57V (Alpenlattich-Fichtenwald mit Heidelbeere) zugewiesen werden. Die Anforderungen für die Minimal- und Idealprofile ändern sich je nach Standortstyp leicht.⁴⁰

Ein Vergleich zwischen den Flächen ist nur möglich, wenn die Bestände auch gleich alt sind. Das Alter der Fichte hat einen Einfluss auf die im NaiS Formular 2 verwendeten Parameter. Es wurde versucht einiger der Parameter für ein Fichtenalter von 80 Jahren zu prognostizieren. Für den Deckungsgrad wurde angenommen, dass die Fichten nach 80 Jahren mindestens eine Kronenradius von 4 m, wie es bei ausgewachsenen Fichten der Fall ist, erreichen (Glanzmann, Schwitter, & Zürcher, 2019). Daraus lässt sich der zukünftige Deckungsgrad und Öffnungsgrösse ableiten. Den Wert für den Schlankheitsgrad kann aus Kapitel 3.3.3 übernommen werden. Die Parameter Mischung und Stammzahl wurden beibehalten. Eine Modellierung dieser Parameter übersteigt die Möglichkeiten dieser Arbeit. Die Tabelle 10 fasst, parallel zur Tabelle 9, die Bewertung der Schutzwirkung vor Naturgefahren im simulierten Bestandesalter von 80 Jahren zusammen.

⁴⁰ Die ausgefüllten Formulare für jede Fläche sind im Anhang 11 zu finden.

Tabelle 9: Bewertung der Schutzwirkung vor Naturgefahren im aktuellen Zustand, basierend auf dem Formular 2 der Gebirgswaldpflege. Ideal = Idealprofil erreicht, Minimal = Minimalprofil erreicht, Ungenügend = Minimalprofil nicht erreicht. Die Kursiven Buchstaben heben zusätzlich hervor, in welchen Bereichen das Minimalprofil nicht erreicht wurde: M = Mischung, Gh = Gefüge horizontal und Gv = Gefüge vertikal.

Alter [a]	X 40	A 47	B 44	C 37	D 32
Lawine	Minimal	Ideal	Minimal	Ungenügend <i>M, Gh</i>	Ungenügend <i>M, Gh</i>
Blockschlag	Ungenügend <i>Gv, Gh</i>	Minimal <i>Gh</i>	Minimal <i>Gh</i>	Ungenügend <i>M, Gh</i>	Ungenügend <i>M, Gh</i>
Steinschlag	Ideal	Ideal	Minimal	Minimal <i>M</i>	Minimal <i>M</i>
Rutschung, Erosion und Murgang	Minimal	Ideal	Minimal	Minimal <i>M</i>	Minimal <i>M</i>
Wildbach und Hochwasser	Minimal	Ideal	Minimal	Ungenügend <i>M, S</i>	Ungenügend <i>M, S</i>

Tabelle 10: Bewertung der Schutzwirkung vor Naturgefahren im simulierten Bestandesalter von 80 Jahren, basierend auf dem Formular 2 der Gebirgswaldpflege. Ideal = Idealprofil erreicht, Minimal = Minimalprofil erreicht, Ungenügend = Minimalprofil nicht erreicht.

Die Kursiven Buchstaben heben zusätzlich hervor, in welchen Bereichen das Minimalprofil nicht erreicht wurde: M = Mischung, Gh = Gefüge horizontal und Gv = Gefüge vertikal, S = Stabilitätsträger

Alter [a]	X 80	A 80	B 80	C 80	D 80
Lawine	Minimal <i>S</i>	Ideal	Minimal	Minimal <i>M</i>	Minimal <i>M</i>
Blockschlag	Ungenügend <i>Gv, Gh, S</i>	Minimal <i>Gh</i>	Minimal <i>Gh</i>	Ungenügend <i>M, Gh</i>	Ungenügend <i>M, Gh</i>
Steinschlag	Minimal <i>S</i>	Ideal	Minimal	Minimal <i>M</i>	Minimal <i>M</i>
Rutschung, Erosion und Murgang	Minimal <i>S</i>	Minimal	Minimal	Minimal <i>M</i>	Minimal <i>M</i>
Wildbach und Hochwasser	Minimal <i>S</i>	Minimal	Minimal	Minimal <i>S</i>	Minimal <i>S</i>

(1) Lawinen

Fläche A schneidet heute bezüglich Lawinenschutz am besten ab. Mit 85 % Fichtenanteil, genügend entwicklungsfähigen Bäumen in mindestens drei Durchmesserklassen, langen Kronen und geringen Schlankheitsgraden wird in der Mischung, dem horizontalen und vertikalen Gefüge, so wie bei den Stabilitätsträgern das Idealprofil erreicht. Geringfügig schlechter schneidet Fläche B ab. Die Mischung und das vertikale Gefüge fallen auf das Minimalprofil zurück. Die Flächen C und D bieten einen ungenügenden Schutz vor Lawinen als B. Den Flächen C und D mangelt es in der Mischung an immergrünen Fichten. Dafür sind die Stabilitätsträger aber hervorragend ausgebildet. Fläche X schneidet geringfügig schlechter als B ab. Obwohl die Mischung mit einem Fichtenanteil von 95% immer noch dem Idealprofil entspricht, sind das vertikale Gefüge und die Stabilitätsträger nur noch sehr knapp im Minimalprofil einzuordnen.

Aufgrund der steigenden Schlankheitsgraden fällt die Bewertung der Stabilitätsträger in Zukunft auf allen Flächen schlecht aus, am extremsten auf der Fläche X, wo die h/d-Werte voraussichtlich deutlich über 80 liegen werden. C und D profitieren von der Ausdehnung der Rotten, was den immergrünen Deckungsgrad erhöht. Die Veränderungen im Deckungsgrad sind bei einem Vergleich von Abbildung 22 mit Abbildung 21 ersichtlich. So werden die Flächen C und D das Minimalprofil erreichen. Bei den restlichen Flächen bleibt die Einstufung gleich.

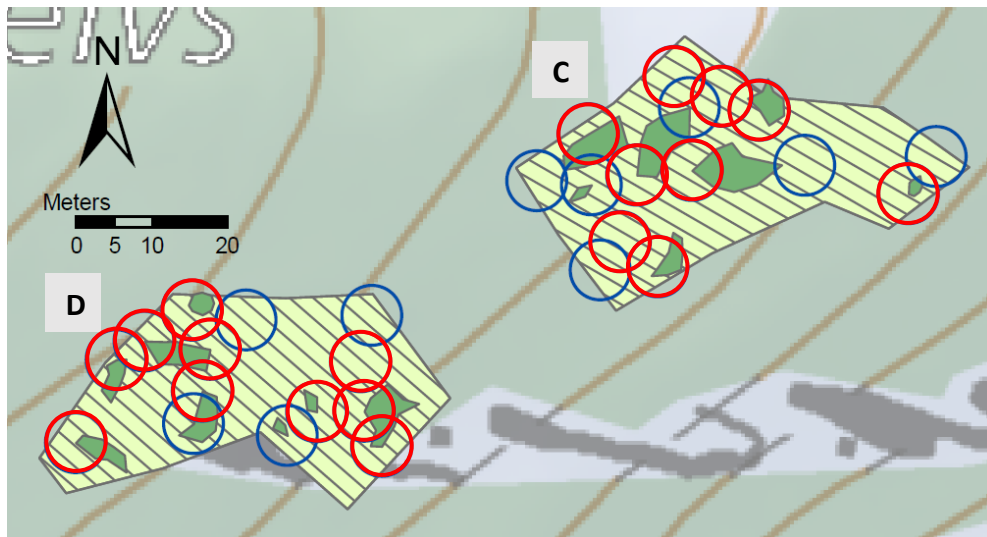


Abbildung 22: Darstellung der Strukturelemente der Flächen C und D. Die Hangfalllinien sind die grauen Striche in den fichtenfreien Flächen. Die blauen Kreise stellen die Gerüstbäume im Alter von 80 Jahren dar. Es wurde ein Kronenradius von 4 m angenommen. Die Roten Kreise markieren Gerüstbäume, welche zu den 100 stärksten (d_{dom}) zählen. Neu muss die Kronenausdehnung als fichtendominierte Fläche betrachtet werden.

(2) Blockschlag

Bei einem Blockschlag mit grossen Blöcken um die 1.8 m^3 erreicht keine der untersuchten Fläche aktuell das Idealprofil und somit bietet auch keine Fläche guten Schutz gegen Blockschlag. Das Problem liegt bei allen Flächen in der fehlenden Menge an Bäumen mit einem BHD von über 36 cm. Verlangt wären mindestens 150 Bäume pro Hektare in der dicksten Klasse. Die Fläche A kommt mit 15 Fichten der Anforderung noch am nächsten. A und B bieten beide nur einen minimalen Schutz. Wobei A aufgrund der dickeren Bäume und einer besseren Mischung einen leicht besseren Schutz bietet. Bei C und D wirkt sich die ungenügende Mischung negativ auf die Schutzwirkung aus, was auf diesen Flächen zu einer ungenügenden Bewertung führt. Es zeigte sich, dass die Birken auf den Flächen C und D wichtig für das Erreichen der geforderten Stammzahl sind. Nur allein mit den Fichten würde im Bereich «Gefüge-horizontal» nicht einmal das Minimalprofil erreicht werden. Die Fläche X besitzt zwar eine ideale Mischung, erzielt aber bei den Anforderungen an die die Stabilitätsträger (hoher Schlankheitsgrad und kürzere Kronen) das schlechteste Resultat.

Wie auch schon beim Schutz vor Lawine erwähnt, verschlechtert sich die Werte für die Stabilitätsträger auf allen Flächen. Trotzdem ändert sich auch nach 80 Jahren nichts in der Einstufung. Vor allem, weil keine Änderung in der Stammzahl und den Stammklassen vorgenommen wurde.

(3) Steinschlag

Bei einem Steinschlag mit kleineren Steinen von bis zu 0.006 m^3 erreichen heute A und X mit ihrer idealen Mischung von ungefähr 90% Fichtenanteil eine gute Schutzwirkung. Die Fläche X fällt wegen schwachen Stabilitätsträgern ein Stück hinter A zurück. B verfügt über ideale Stabilitätsträger, erreicht

aber bei der Mischung und dem Gefüge nur das Minimalprofil. Auch beim Steinschlag sind die Birkenstämme für C und D wichtig. So schaffen es beide, das minimal Profil im vertikalen Gefüge mit Hilfe der Birken zu erreichen. Da bei kleineren Steinen dicke Bäume nicht mehr ausschlaggebend sind, dafür aber in den mittleren BHD-Klassen eine hohe Stammzahl gefordert ist, wird das horizontale Gefüge bei C und D sogar mit ideal bewertet.

Die zukünftigen Prognosen für den Schutz vor Steinschlag decken sich mit den zukünftigen Einschätzungen für den Schutz vor Blockschlag.

(4) Rutschung, Erosion und Murgang

Auf der Fläche A herrscht ein Deckungsgrad von nahezu 100%. Zusammen mit gut ausgebildeten Stabilitätsträgern, bietet dies einen idealen Schutz vor jeglicher Art von Rutschungen. Auf B geht der Deckungsgrad zurück und die Durchmesser-Verteilung beschränkt sich nur auf zwei BHD-Klassen, weshalb hier eindeutig nur noch das Minimalprofil für flachgründige Rutschungen erreicht wird. Bei C und D wird immer noch ein dauernder Deckungsgrad von 60% erreicht. Es bildet sich aber grössere Öffnungen, damit bieten C und D nur minimalen Schutz vor Rutschungen, Erosion und Murgängen. Die Fläche X erreicht im Schnitt das Minimalprofil. Der Vorteil von X ist der hohe Deckungsgrad von 100%. Negativ fallen bei der Fläche X die Stabilitätsträger und die geringe Durchmesser-Verteilung auf.

Betrachtet man die Schutzwirkung ab einem Bestandesalter von 80 Jahren, so zeigt sich eine interessante Verschiebung. Die Fläche A fällt aufgrund zu schlanken Stabilitätsträger zurück ins Minimalprofil. Die Flächen C und D profitieren von der Kronenausdehnung der Fichten mit dem Alter. Die grösser der Öffnungen vermindert sich, so dass die Bewertung des horizontalen Gefüges sich verbessert, für das Idealprofil reicht es aber noch nicht.

(5) Wildbach und Hochwasser

Hier liegt der Wert auf dem Vermeiden von sturzgefährdeten Bäumen im Gerinneeinhang. Die Bewertung fällt gleich aus wie bei den flachgründigen Rutschungen. Die Fläche A bietet momentan guten Schutz, B und X nur minimalen Schutz und C und D fallen durch. Die Flächen C und D erhalten wegen den vielen hängenden und sturzgefährdeten Birken zusätzlichen Abzug.

Beim Schutz vor Wildbächen und Hochwasser kann in Zukunft ebenfalls eine Verbesserung der Schutzwirkung auf den Flächen C und D festgestellt werden. Dies hängt hier mit der Verminderung der Öffnungsgrössen zusammen. Durch die höheren h/d-Werte wird der Fläche A nur noch eine minimale Schutzwirkung zugeschrieben. Auch auf der Fläche D stehen die Stabilitätsträger nun auf der Kippe ins ungenügende.

Hier lassen sich ebenfalls die Resultate aus dem Schätzverfahren für Hochwasser (Anhang 12) miteinbinden. Für Flächen unter einem fichtendominierten Bestand erhält die Interzeption die Gesamtnote «gut», was für eine positive Wirkung des Waldes auf den Hochwasserabfluss spricht. Die Wirkung von Birkenvorwäldern auf Hochwasserabflüsse wurde gesamthaft nur als «mässig» eingestuft.

4 Diskussion

4.1 Schäden und Gipfelbruch

Auf allen Flächen treten Schäden bei Fichten ähnlich häufig auf, unabhängig von der Anzahl Birken. Der häufigste Schaden bei Fichten ist der Gipfelbruch. Bei der Betrachtung nach BHD-Stufen fällt auf, dass Säbelwuchs nur bis zu einem BHD von 17 cm auftritt. Diese Auffälligkeit wird im nächsten Kapitel diskutiert.

Wichtig für die Stabilität im Gebirgswald ist der Zustand der Gerüstbäume. Deshalb lohnt es sich hier einen genaueren Blick auf die Gerüstbäume zu werfen. Die Resultate haben gezeigt, dass etwa ein Drittel der Gerüstbäume beschädigt sind. Auch bei den Gerüstbäumen ist der Gipfelbruch das häufigste Schadensbild, gefolgt von Verzweiselung. Kein einziger der Gerüstbäume leidet an Säbelwuchs. Besonders positiv sticht die Fläche A, mit 85% gesunden Gerüstbäumen heraus. Es gilt aber auch zu beachten, dass möglicherweise nicht alle Schäden auf A erkannt wurden. Die Fichten von A sind die höchsten und der Bestand ist sehr dicht. Gipfelbrüche oder Verzweiselungen in der Krone könnten übersehen worden sein. Deshalb könnte die Zahl an unbeschädigten Gerüstbäumen in der Realität etwas tiefer liegen. Schäden können auch eine strukturierende Funktion übernehmen, in dem sie Bäume am Aufkommen hindern und so auf natürliche Weise Konkurrenten ausschalten, was den unbeschädigten Bäumen mehr Raum für eine stabile Entwicklung bietet. Viele Schäden bei jungen Bäumen sind also nicht per se schlecht, so lange später genügend vitale Stabilitätsträger zur Verfügung stehen. Es lohnt sich hier einen vertieften Blick auf die Gerüstbäume zu werfen. In höheren BHD-Klassen sind weniger Schäden zu verzeichnen und auf allen Flächen überwiegt die Anzahl an vitalen Gerüstbäumen. Dies zeigt, dass die unbeschädigten Fichten sich besser durchsetzen. Es findet eine Selbstdifferenzierung statt. Dies bietet gute Voraussetzungen für die zukünftige Entwicklung der Bestandesstabilität und zeigt, dass auch ohne waldbauliche Eingriffe sich die gesunden Bäume behaupten können.

Ein Vergleich der Anzahl benachbarten Birken von intakten Gerüstbäumen und Gerüstbäumen mit Gipfelbruch ergab keinen signifikanten Unterschied. Dass viele Birken zu mehr Gipfelbrüchen bei Fichten führen kann also nicht bewiesen werden. Das Ergebnis deutet jedoch an, dass eine höhere Anzahl an benachbarten Birken tendenziell die Gefahr eines Gipfelbruchs erhöhen kann. Der Grund dafür können peitschende oder umfallende Birken sein, welche die Krone der Fichten verletzen oder abbrechen. Im Feld wurden ein paar Beispiele gefunden, bei denen eine umfallende Birke eindeutig den Gipfel einer hangabwärts benachbarten Fichte brach (Abbildung 23). Ein positiver Effekt von Birken bezüglich Gipfelbrüchen bei Fichten kann nicht aufgezeigt werden. Die Interzeption der laubfreien Birken im Winter scheint zu klein zu sein, als dass sich dies schützend auf die Fichten auswirken würde. Hier ist wichtig anzumerken, dass Birken im Umkreis von fünf Metern als benachbart interpretiert wurden. Da am Hang aber nur Birken oberhalb der betroffenen Fichte wirklichen Einfluss haben können, ist diese Herangehensweise fraglich. Vielleicht würden die Resultate anders aussehen, wenn nur ein Halbkreis ausgezählt worden wäre.



Abbildung 23: Gipfelbruch bei einer Fichte (rote Markierung), bedingt durch das Umfallen einer Birke. Beobachtet auf der Fläche B.

Die Anfälligkeit zum Gipfelbruch kann auch genetisch bedingt sein (Zuber, 2014). Dieser Verdacht äusserte bereits Wagnière (1996) in seiner Diplomarbeit. Ein starker Hinweis auf einen genetischen Einfluss ist das Auftreten der vielen Zwiesel auf allen Untersuchungsflächen, in allen Altersstufen und auf verschiedenen Baumhöhen. Ob die Ursache für Gipfelbrüche wirklich auch zum Teil der Genetik zugeschrieben werden kann müsste noch wissenschaftlich überprüft werden. Bis jetzt ist es nur eine Hypothese.

Bei den Birken treten nur Hänger als Schadensbild auf. Dies dafür aber sehr häufig und vermehrt dort, wo auch viel Fichten vorkommen (Tabelle 3). Ein Vergleich der Waldquerprofile von früher und heute (Kapitel 3.1) zeigt, dass 1996 die Birken vornehmlich eine senkrechte Wuchsform aufzeigten. Das Ausbilden von Hänger geschieht erst nach einigen Jahren. Dies lässt sich mit der Konkurrenz um Licht erklären. In jungen Jahren bekommt jede Birke genug Licht hin. Ab dem Kronenschluss werden die kleineren Birken von den Grösseren beschattet. Jede Birke versucht sich möglichst gut zu positionieren. Die Birken wachsen vom Hang weg nach Aussen zum Licht, und neigen sich immer mehr. Die Fichte, als schattentolerante Art, kümmert der Lichtmangel wenig. Sie wächst stur gerade nach oben. Sobald die Fichte in den Kronenbereich der Birken gelangt, nimmt sie den Birken sehr viel Licht. Die dichte Krone der Fichte wirft einen stärkeren Schatten als die lichten Kronen der benachbarten Birken. Deshalb neigen sich Birken in der Nähe von Fichten noch stärker dem Licht hinneigen, beziehungsweise versuchen dem Schatten zu entwachsen.

Hypothese (1): Der Birkenschirm schützt die Fichten vor Gipfelbruch

Diese Hypothese kann nicht bestätigt werden. Es liegt ein Trend vor, dass die Gipfelbrüche mit der Anzahl benachbarten Birken zunehmen. Dieser Trend ist allerdings nicht signifikant. So kann die Hypothese auch nicht eindeutig verworfen werden.

4.2 Säbelwuchs

Die Zahl der von Säbelwuchs betroffenen Fichten fällt auf allen Flächen sehr klein aus. Bezüglich Säbelwuchs lässt sich ein Trend erkennen, bei dem eine höhere Birkenstammzahl auch zu weniger Säbelwüchsen führt. An Hängen mit mittlerer Neigung ($<40^\circ$) drücken hangparallele Schneebewegungen die Stämme schief (Schönenberger, Schweingruber, & Mattheck, 1994). Eine genügend hohe Birkenstammzahl kann gravitative Schneebewegungen vermindern. Später aufkommende Fichten werden so vor Säbelwuchs geschützt. Allerdings ist der beobachtete Trend nicht signifikant. Weiter tritt Säbelwuchs nur in Durchmesserklassen unter 18 cm auf. Dies lässt sich wie folgt erklären. In jungen Jahren sind Bäume anfälliger gegenüber den mechanischen Kräften des Schnees. Der Säbelwuchs bildet sich bei den Fichten in jungen Jahren aus. Später ist die Fichte genug stabil, um keine weitere Krümmung des Stammes mehr zu erleiden. Mit den Jahren kann der Säbelwuchs durch das Dickenwachstum sogar verschwinden. Dadurch deutet später nichts mehr am Stamm der Fichte auf eine Krümmung hin.

4.2.1 Ist die Fläche C ein Ausreisser?

Die Untersuchungsfläche C weist sowohl bei den Gipfelbrüchen, wie auch bei den Säbelwüchsen ausserordentlich hohe Zahlen auf. In diesem Abschnitt wird versucht, eine rationale Begründung für die Extremwerte der Fläche C zu finden. Die Untersuchungsfläche C verfügt über ähnliche Eigenschaften und Standortbedingungen wie die Untersuchungsfläche D. Die Flächen sind praktisch gleich gross, befinden sich in der gleichen Höhenlage und sie haben beide denselben Standortstyp. Es ist möglich, dass der Untergrund von C weniger felsig ist. Dies würde für die Fichten auf C aber eher bessere Lebensbedingungen schaffen. Trotzdem besteht ein starker Unterschied zwischen C und D bei der Zahl an Gipfelbrüchen und Säbelwüchsen. Auffällig ist die starke Hangneigung bei

C, anders als bei D. Die Untersuchungsfläche B hat ebenfalls eine Hangneigung von 39°, aber C hat dazu noch eine um 10 m² niedrigere Grundfläche. Evt. bietet die starke Hangneigung zusammen mit der kleinen Grundfläche und der niedrigen Stammzahl ungünstige Bedingungen für die Fichten auf der Fläche C. Es besteht auch die Möglichkeit, dass die Fläche C stärker dem Wetter ausgesetzt ist, da C sich an einer Kuppe befindet, wo sich das Seitental zum Haupttal hin öffnet. Dies würde insbesondere in einem Lawinenwinter wie 1999 starke Schneelasten bedeuten. Diese Kombination von Faktoren könnte durchaus Schneebewegungen begünstigen, was zu vermehrtem Säbelwuchs führen kann. Besonders auffällig ist die Änderung des Mischungsverhältnisses auf der Fläche C zwischen heute und 1996. Aus Wagnière (1996) ergibt sich ein Verhältnis von 44% Fichte und 56% Birke⁴¹. Heute jedoch, verfügt die Fläche C über 90% Birken und lediglich noch 10 % Fichten⁴². Normalerweise würde eine Abnahme der Birkenzahl mit der Zeit erwartet, da die Fichten die Birken verdrängen. Eine mögliche Erklärung für diese gegenseitige Entwicklung kann eine Störung sein. Möglich wäre ein Schneeschimmelbefall, zum Beispiel im Winter 1999. Ein Schneeschimmelbefall hätte eine hohe Mortalität bei den Fichten zufolge, was die Verschiebung im Mischungsverhältnis erklären könnte.

Ob die Fläche C nun aus der Wertung ausgeschlossen werden soll oder nicht, hat einen entscheidenden Einfluss auf die Aussagekraft der Daten. Würde man die Fläche C als Ausreisser betrachten und beim Vergleich von Säbelwuchs und Birkenstammzahl weglassen, so würde das Resultat signifikant ausfallen (Abbildung 19, orange Datenpunkte). Aber ist C wirklich ein Ausreisser? Die Werte von C liegen weder beim Gipfelbruch noch beim Säbelwuchs über dem 1.5-fachen des Quartilsabstands. Somit sind die Werte von C gemäss statistischer Definition keine Ausreisser. Die Fläche C darf also nicht weggelassen werden. Dies würde auch aufgrund der Datenlage nicht sinnvoll sein. Die Vergleiche der Flächen setzten sich aus nur fünf Datenpunkten zusammen. Um hier aussagekräftige Resultate zu erhalten ist schon sehr knapp. Mehr Untersuchungsflächen konnten im Rahmen der Masterarbeit aber nicht ausgewertet werden. Jetzt zusätzlich einen Datenpunkt auszulassen gefährdet die Aussagekraft noch mehr.

Statistisch gesehen lässt sich ein Ausschluss von C nicht legitimieren. Die rationalen Überlegungen bezüglich Standortbedingungen basieren auf Vermutungen und können in dieser Arbeit nicht ausreichend begründet werden. Deshalb empfiehlt es sich, die Untersuchungsfläche C weiterhin in der Auswertung beizubehalten. Die Fläche C wird aber im Ausblick auf die Schlussfolgerung als «Extremwert» betrachtet und somit wird dessen Einfluss weniger gewichtet.

Hypothese (2): Eine hohe Stammzahl an Birken schützt die Fichten vor Säbelwuchs

Tendenziell treten bei höheren Birkenstammzahlen weniger Säbelwüchse bei Fichten auf. Die Ergebnisse fallen jedoch nicht signifikant aus. Somit muss diese Hypothese verworfen werden. Allgemein ist Säbelwuchs auf den hier untersuchten Flächen kein langfristiges Problem. Säbelwuchs scheint nur in kleinen BHD-Klassen aufzutreten, was zur Annahme führt, dass sich die Krümmung im Stamm mit den Jahren auswachsen kann. Genügend stabile Gerüstbäume können sich trotzdem entwickeln.

⁴¹ Berechnet aus der Stammzahl, nicht wie sonst üblich aus der Grundfläche, da für die Birken um 1996 keine Angaben zum BHD zu finden waren.

⁴² Diese Prozentzahlen basieren ebenfalls auf den Stammzahlen

4.3 Schlankheitsgrad

Wie bereits in den Resultaten erwähnt, wird beim Zusammenhang von Anzahl Birken und dem Schlankheitsgrad eine negative Tendenz angedeutet (Kapitel 3.3.3, Abbildung 20). Dies zeigt sich sowohl in den gemessenen Daten wie auch in den simulierten Werten im Alter von 80 Jahren. Dass nun aber viele Birken zu einem gewünschten niedrigeren h/d-Wert führen, lässt sich nicht mit Sicherheit sagen. Die Ergebnisse fallen nicht signifikant aus und die Korrelationen sind schwach. Aber die Resultate widersprechen auch nicht der Idee, dass Birken den Schlankheitsgrad von Fichten positiv beeinflussen können.

Wird der Faktor Alter beseitigt, so schwindet der Unterschied in den h/d-Werten. Im Alter von 80 Jahren haben die birkendominierten Flächen C und D deutlich mehr Gerüstbäume mit einem h/d-Wert von über 70. Von den Flächen C und D rutschen mehr Gerüstbäume in den ungünstigen und kritischen Bereich, als bei A und X. Aus den Ertragstafeln zeigt sich, dass Durchmesser und Höhe sich nicht gleich entwickeln. Dies führt dazu, dass der h/d-Wert zuerst mit zunehmendem Alter grösser wird, dann aber stagniert und später wieder abnimmt. Die Fichten auf den Flächen C und D sind jünger als A und X und der h/d-Wert steigt pro Jahr schneller. Dies kann eine Erklärung für die Differenzverminderung sein. Oder das Höhenwachstum der Fichten erhöht sich, sobald sie die Birken überragen. Dass die Flächen C und D in Zukunft höhere Schlankheitsgrade aufwiesen muss nicht zwingend zu einem Problem werden. Es ist durchaus natürlich, dass Fichten im Rotteninnern hohe h/d-Werte erreichen (Strobel, 1995). Wichtig ist, dass die Randbäume der Rotten stabil bleiben. Wie sich die Stabilität der Randbäume in Zukunft verhält lässt sich aber in dieser Arbeit nicht beantworten.

Die Ergebnisse sind sehr schwierig zu werten. Die Berechnung der zukünftigen h/d-Werte beruht der Einfachheit halber auf vielen Annahmen. Die verwendeten Ertragstafeln gehen von Reinbeständen in niederen Lagen aus, während es sich in der Arbeit um Mischbestände auf über 1500 m.ü.M. handelt. Das Höhenwachstum wird mit dieser Methode eher überschätzt, da Bäume in dieser Höhenstufe allgemein kleinere Maximalwerte erreichen. Demzufolge wird der h/d-Wert in der Realität auch niedriger ausfallen.

Die Zunahme der h/d-Werte der 100 dicksten Gerüstbau aufgrund der Stammzahl zeigte einen auffällig starken Zusammenhang. Höhere Stammzahlen führen zu höheren Schlankheitsgraden. Diese Feststellung entspricht dem aktuellen Forschungsstand (Bachmann, 2004). Die Unterscheidung von Fichten- und Birkenstammzahlen ergab, dass die Fichtenstammzahl einen bedeutenderen Einfluss ausübt, während die Birkenstammzahl nur einen schwachen Zusammenhang aufzeigt. Daraus kann geschlossen werden, dass die Fichtenstammzahl die dominierende Variabel darstellt. Dies entlastet die Birke und ist ein Argument gegen die Entfernung von Birken in hochmontanen Wäldern.

Hypothese (3): Eine hohe Dichte an Birken führt zu tieferen Schlankheitsgraden bei den Fichten

Tendenziell treten auf Flächen mit einem hohen Anteil an Birken tiefere Schlankheitsgrade auf. Mit dem Laufe der Zeit verkleinert sich dieser Unterschied. Aber die Resultate fallen nicht signifikant aus. Andere Faktoren wie Fichtenstammzahl und Hangneigung haben wahrscheinlich einen stärkeren Einfluss auf den Schlankheitsgrad, als der Birkenanteil.

4.4 Horizontale Strukturierung

Aus heutiger Sicht ist die horizontale Strukturierung auf den fichtendominierten Flächen X, A und B schon nicht mehr optimal. Gemäss den Empfehlungen zur Jungwaldpflege der Fachstelle Gebirgswaldpflege (Glanzmann, Schwitter, & Zürcher, 2019) soll in den hochmontanen Fichtenwäldern die Gassenbreite 10-15 m betragen. Auf X ist der Bestand so dicht, dass keine Gassen ausgemacht wurden. Die Entwicklung von stabilen Rändern innerhalb des Bestandes ist somit unterbunden. Allerdings kann das Fehlen einer Lücke oder Öffnung auch eine Auswirkung der kleinen Untersuchungsfläche sein. Auf einer ein Hektar grossen Fläche würde auf X eventuell doch eine Öffnung zu finden sein. Auf B liegen die Gassenbreiten mit maximal 9 m schon unter dem minimalen Wert. Ein Jungwaldpflegeeingriff im Stangenholz wäre wahrscheinlich bereits vor ein paar Jahren geboten gewesen, bei dem Gassen im bevorzugten Abstand angelegt werden. Auch die Zahl der Gerüstbäume ist auf den fichtendominierten Flächen hoch und dementsprechend sind die Abstände auch zu klein. Statt den empfohlenen 8 m liegen auf X nur 3.2m, auf A nur 3.5 m und auf B nur 3 m zwischen den Gerüstbäumen. Die Fichten stehen zu dicht. Dies zeigt sich auch in den Karten der Untersuchungsflächen (Abbildung 21). Die Kronen der Gerüstbäume beginnen sich bereits zu überschneiden. Dies kann dazu führen, dass die Entwicklung, hin zu wirkungsvollen Stabilitätsträgern gehemmt ist.

Die Flächen C und D haben in der heutigen Situation noch Platz zur Verfügung. Die Fichten auf den Flächen C und D sind noch rund 10 Jahre jünger als auf A, B und X. Die Rottengrössen dürften sich noch stark erhöhen. Dementsprechend können auch die Rottendurchmesser von 12 m auf C, respektive 8 m auf D noch bis auf 20 m anwachsen. Auf C und D wurden die empfohlenen Abstände noch nicht unterschritten. Es besteht das Potenzial, dass sich Rotten mit stabilen Rändern bilden.

Auch bei den h/d-Werten ist ein Vergleich von gleichaltrigen Flächen interessant. Dafür werden die Untersuchungsflächen im Alter von 80 Jahren betrachtet. Für die Modellierung der zukünftigen Bestände wurde eine Ausdehnung der Fichtenkrone auf 4 m angenommen. In Zukunft ändert sich auf den Flächen X, A und B nicht viel bezüglich der horizontalen Struktur. Die Kronen werden sich soweit es noch geht ausdehnen und der bereits hohe dauernde Deckungsgrad wird sich noch mehr in Richtung 100% verschieben. Es findet keine Verbesserung der horizontalen Strukturierung statt. Auf den Flächen C und D führt die Kronenausdehnung zum Zusammenschluss von Rotten (Kapitel 3.5, Abbildung 22). Dies erhöht auf der Fläche C die Rottengrösse von 0.2 a auf 3.5 a und auf D von 0.15 a auf 3 a. Somit liegen beide noch im idealen Bereich von unter 5 a. Die Rottendurchmesser verdoppeln sich auf beiden Flächen. Fläche D liegt zukünftig mit 15-20 m im idealen Bereich. Die Fläche C schießt mit bis zu 25 m breiten Rottendurchmessern über den idealen Wert von 20 m hinaus. Wichtig hier sind die Abstände zwischen den Rotten, die sich durch den Zusammenschluss der Rotten in Zukunft wesentlich verkleinern. Auf C sind die Rottenabstände zukünftig mit 7-14 m noch leicht grösser als auf D mit 6-12 m. Ideal wäre der Bereich von 8-12 m. Die gewünschten horizontalen Strukturen sind auf den Flächen C und D nach 80 Jahren noch vorhanden. Die Chancen stehen gut, dass sich Rotten mit stabilen Rändern bilden können.

Birkenvorwälder führen auch ohne Pflegeeingriff zu der gewünschten horizontalen Struktur, welche die Entwicklung eines stabilen Fichtenbestands erlaubt. Es zeigt sich, dass ein Birkenanteil von 10 % nicht zu der angepeilten Strukturierung führt. Bei X deutet nichts darauf hin, dass die horizontale Struktur jemals den Anforderungen entsprochen hätte. Die Fichten scheinen seit je her ohne Lücken oder Öffnungen und zu dicht auf zu wachsen. Ein gewisser Anteil an Birken scheint aber durchaus wünschenswert. Wie gross soll dieser Anteil sein? Der Birkenanteil verändert sich im Laufe der Zeit. Zu Beginn liegt er im Birkenvorwald bei 100% und nimmt mit dem Aufkommen der Fichte stetig ab. Somit ist die

Frage nach dem idealen Birkenanteil abhängig vom Alter des Bestandes. Diese Arbeit zeigt, dass im Stangenholz bei einem Birkenanteil von 40% die Fichten bereits zu dicht wachsen, so dass sich stabilisierende Elemente nicht mehr entwickeln können und ein Eingriff zur Strukturbildung nötig sein kann. Liegt der Birkenanteil im Stangeholz noch bei 80% so kann laut den Resultaten davon ausgegangen werden, dass noch Raum und Zeit für die Entwicklung eines stabilen Bestandes zur Verfügung steht. Auch 40-Jahre später kann die horizontale Strukturierung die geforderten Abstände noch erfüllen. Die Resultate deuten darauf hin, dass auf C und D momentan noch kein strukturierender Jungwaldpflegeeingriff nötig ist.

Hypothese (4): Birken verbessern die horizontale Struktur eines Fichtenbestandes

Ja, ein gewisser Mindestanteil an Birken führt zur gewünschten horizontalen Struktur. Die Anwesenheit von Birken führt zu weniger dichten Fichtenbeständen und bietet Raum für die Entwicklung von stabilen Ränder, Kollektiven und oder Gerüstbäumen.

4.5 Schutz vor Naturgefahren

Hier fließen einige Resultate und Erkenntnisse aus den vorangehenden Kapiteln zusammen. Die vorherigen Kapitel stellten sich die Frage, ob Birken stabilisierende Elemente im Gebirgswald fördern. In diesem Kapitel werden die Resultate genutzt, um die Schutzfähigkeit, in Abhängigkeit der Birkenanteile, abschätzen zu können. Hier ändert sich die Sicht auf die horizontale Strukturierung. Während im Kapitel 4.4 grosse Abstände und viel Platz als Chance für eine positive Entwicklung angesehen wurde, sind hier grosse Öffnungen zum Schutz vor Naturgefahren zu vermeiden.

Bei der Bewertung der Schutzwirkung mussten viele Annahmen getroffen werden (siehe Kapitel 5.1). Trotzdem scheinen die Resultate durchaus sinnvoll. Fläche A kann mit einem grossen Anteil an Nadelbäumen punkten. Dies verhilft nicht nur in der Mischung zu idealen Werten, sondern auch beim Deckungsgrad. Der Deckungsgrad ist für den Schutz vor Erosion, Rutschung, Wildbächen und Hochwasser wichtig. Beim Schutz vor Lawinen zählt besonders der immergrüne Deckungsgrad. Den Flächen C und D fehlt es an Fichten, was sich negativ im Lawinenschutz zeigt

Die Flächen C und D verfügen über die jüngsten Fichten. Mit der Zeit werden die Fichten auswachsen und die Lage wird sich verbessern. So prognostiziert es auch die Modellierung im Bestandesalter von 80 Jahren. Diese Simulation zeigt, dass auch unter Birken ein Fichtenwald aufkommen kann, der über eine genügende Schutzfunktion verfügt. Wichtig sind hier auch die Stabilitätsträger, die sich unter dem Birkenschirm besonders gut entwickeln. Dass ein Schutz vor Blockschlägen im Stangenholz heute sowie auch nach 80 Jahren Wuchszeit nicht gewährleistet werden kann, scheint plausibel. Um die geforderten Durchmesserklassen zu erreichen, die zum Aufhalten von grossen Gesteinsblöcken nötig wären, vergehen mindestens 100 Jahre (Frehner, 2020). Im Allgemeinen wird erwartet, dass die Flächen C und D in der Simulation eher unterschätzt werden, während X, A und B eher zu gut wegkommen. Dies, weil keine Änderung in der Mischung und im vertikalen Gefüge vorgenommen wurde. Die Mischung wird sich auf C und D eher positiv, hin zu einem grösseren Fichtenanteil entwickeln. Auf den fichtendominierten Flächen kommen sich die Fichten heute schon in die Quere. In Zukunft wird dort die steigende Konkurrenz zu mehr Mortalität und kürzeren Baumkronen führen.

Auf den Flächen C und D wirkt die horizontale Strukturierung heute hinderlich für die Schutzfunktion. Problematisch sind die grossen Öffnungen und Abstände zwischen den Rotten in Hangfalllinie. Mit der Zeit wird sich dieses Defizit von Natur aus verringern, wenn mehr Fichten aufkommen und sich die Kronen ausdehnen. Laut den Resultaten erreichen aber auch die heute birkendominierten Flächen in

Zukunft eine genügende Schutzwirkung vor Naturgefahren. Wobei das geschätzt zwischen 50 und 70 Jahre dauern kann. Dies kann problematisch sein, wenn möglichst schnell eine Schutzwirkung erzeugt werden soll.

Die Resultate zeigen, dass auch unter einem Birkenvorwald ein Fichtenwald mit Schutzwirkung aufkommen kann und zwar ohne forstlichen Eingriff, ganz im Sinne der Naturautomation. Gegen Naturgefahren, bei denen die Stammzahl ein wichtiger Schutzfaktor ist (zB. Steinschlag), helfen die schnell etablierten Birkenvorwäldern. Wird hingegen ein hoher dauernde Deckungsgrad verlangt, so tragen die Birken wenige zur Schutzwirkung bei. Die beste Schutzwirkung erzielte mit A eine fichtendominierte Fläche. Die Mischung der Fläche A im Stangenholz beträgt über 40% Birke. Ob das aber einen Grund zum Fällen von Birken darstellt, um die gewünschte Mischung zu erreichen lässt sich nicht beantworten. Negative Auslesen sind im Sinne des Konzentrationsprinzips nicht zu empfehlen.

4.6 Grösse der Untersuchungsflächen und deren Einfluss

Die Grössen der Untersuchungsflächen variieren stark. Einige Flächen wie B und X fielen sehr viel kleiner aus. Dies schmälert deren Aussagekraft. Je kleiner die Fläche, desto mehr fallen deren Eigenheiten ins Gewicht. Einen grossen Einfluss könnte dies auf die Anzahl beobachteter Schäden haben. Auch trifft man auf kleinen Flächen weniger Öffnungen und Lücken an. Weiter kann ein gewisser Einfluss durch die eigene Voreingenommenheit bei kleinen Untersuchungsflächen nicht ausgeschlossen werden. Beim Auswerten der Resultate scheint die Kleinheit der Fläche B aber keinen merklichen Einfluss gehabt zu haben. Die Resultate der Fläche B scheren nirgends aus. Auf der Fläche X wurde keine Öffnung ausgemacht. Dies, weil die Fläche vielleicht schlichtweg zu klein ist, um solche räumlichen Elemente zu repräsentieren.

Für die Analyse der horizontalen Strukturen hätten sich grössere Untersuchungsflächen angeboten, um grossräumige Strukturen genauer abbilden zu können. Im Vergleich zu den 12 m² Flächen von Wagnière (1996) fallen die hier verwendeten Flächengrössen wiederum gross aus. Beim Vergleich von dieser Arbeit mit Wagnière (1996) spielt diese Diskrepanz auch eine Rolle. Die Fläche D wird in Wagnières Diplomarbeit (1996) als fichtenfrei beschrieben. Eine Altersschätzung der Fichten heute zeigt aber, dass in diesem Gebiet durchaus schon junge Fichten wuchsen, welche anscheinend nicht unmittelbar in der kleinen Untersuchungsfläche von Wagnière auftraten. Die Untersuchungsflächen von Wagnière (1996) sind nicht georeferenziert. Dessen Lage musste aus seinen Skizzen abgeleitet werden. Eine exakte Rekonstruktion seiner Flächen war nicht mehr möglich.

5 Schlussfolgerung

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass Birkenvorwälder sich positiv auf die horizontale Struktur auswirken. Unter Birken kommen die Fichten weniger dicht auf. Es entwickeln sich Strukturen, die genügend Raum für die Bildung eines stabilen Bestandes schaffen. So können die Empfehlungen der Jungwaldpflege (Glanzmann, Schwitter, & Zürcher, 2019) ja nach Birkenanteil bis über 80 Jahre hinweg eingehalten werden. Was später eine Gruppenplenterung erlauben wird. Mit mehr Birkenanteilen tritt tendenziell weniger Säbelwuchs auf und die Schlankheitsgrade bei Fichten fallen ebenfalls tiefer aus. Die Resultate zu den Säbelwüchsen und den h/d-Werten vielen jedoch nicht signifikant aus. Trotzdem weisen die Trends darauf hin, dass Birken die Stabilität von Einzelbäumen fördern. Eindrücke aus dem Feld unterstützen diese Schlussfolgerung. Manche Beispiele zeigen, wie sich Fichten unbeirrt durch den Birkenvorwald hochdrücken, ohne Anzeichen von Schäden oder Benachteiligung (Abbildung 24). Negativ fallen die Birken nur beim Thema Gipfelbruch auf. Tendenziell führt eine höhere Birkenstammzahl zu mehr Gipfelbrüchen. Die Resultate bezüglich Gipfelbruch sind jedoch ebenfalls nicht signifikant. In dieser Arbeit überwiegen die positiven Aspekte der Birke. Stabile Bestände lassen sich tendenziell besser in Mischung mit Birken erreichen.



Abbildung 24: Links, eine 3.5 m hohe Fichte schiebt sich unbeirrt zwischen den teils dicht stehenden Birken hervor. Rechts, ein weiteres Beispiel einer unbeschädigten Fichte zwischen Birken.

Bezüglich Naturgefahren zeigte sich, dass auch unter einem Birkenvorwald ein Fichtenwald mit Schutzwirkung aufkommen kann und zwar ohne forstlichen Eingriff, ganz im Sinne der Naturautomation. Die hohen Birkenstammzahlen wirken besonders effektiv gegen Steinschlag mit kleineren Steinen. In Lawenschutzwäldern können hohe Birkenanteile ein Problem darstellen, da die sommergrünen Birken wenig zu Interzeption im Winter beitragen. Bei Gebirgswäldern mit hohen Birkenanteilen wird die Schutzwirkung tendenziell erst später erreicht als bei fichtendominierten Wäldern. Ob dies das Fällen von Birken legitimiert, um die gewünschte Mischung zu erreichen, lässt sich hier nicht beantworten.

Diese Arbeit liefert keinen Grund für die negative Auslese von Birken in hochmontanen Fichtenwäldern. Im Sinne des Konzentrationsprinzips wird empfohlen, diesen Arbeitsschritt zu unterlassen. Die Birken werden nach ca. 40 Jahren ohne Probleme von den Fichten überwachsen. Ab dann nimmt ihre Mortalität zu und sie verschwinden langsam von selbst. Trotz hohen Birkenanteilen entwickeln sich in diesen Wäldern stabile Gerüstbäume und auch ohne forstliche Eingriffe kann sich unter einem Birkenvorwald ein funktionierender Schutzwald bilden, der in Absehbarer Zeit vor Lawinen, Steinschlag, Rutschungen und Hochwasser schützt. In diesem Fall können die Interaktionen zwischen Birkenvorwald und Fichtenwald im Sinne der Naturautomation genutzt werden.

5.1 Limitierungen der eigenen Studie

Viele Vergleiche zwischen den untersuchten Flächen scheitern daran, dass die Fichten unterschiedlich alt sind und verschiedenen Standortstypen zugehören. Aufgrund der Altersunterschiede müssen zukünftige Entwicklungen angenommen werden, die auf simplen Modellen beruhen. Die künstlich hergestellte Vergleichsbasis birgt grosse Unsicherheiten. Daraus lässt sich ableiten, dass bei zukünftigen Studien gleichaltrige Flächen zum Vergleich ausgewählt werden sollen und wenn möglich vom selben Standortstyp. Je mehr Ähnlichkeiten die Untersuchungsflächen bieten, desto exakter lassen sich die Ursachen den beobachteten Unterschieden zuschreiben.

Die erhaltenen Resultate zur Schutzwirkung sind stark subjektiv geprägt. Auch wenn strikt nach den Angaben in Formular 2 gehandelt wird, lassen einige Kriterien immer noch Raum für Interpretation. Mit dem Aggregieren der Werte zu einer Bewertung in Tabelle 9 und Tabelle 10 gehen Informationen und Transparenz verloren. Ebenfalls sind die Modellierungen, welche zur Einschätzung der Schutzwirkung im Alter von 80 Jahren verhelfen, sehr vereinfacht. Es wurde angenommen, dass die Fichten im Alter von 80 Jahren mindestens eine Kronenausdehnung von 4 m erreichen. Dies ist der Platz, der eine Fichte in der hochmontanen Stufe für die Entwicklung einer gesunden Krone benötigt (Glanzmann, Schwitter, & Zürcher, 2019). Das Voraussagen der Mortalität und Verjüngung stellt sich als sehr kompliziert heraus, was den Rahmen der Arbeit sprengen würde. Weshalb die Mischung und die Stammzahlverteilung unverändert blieben. Die Einschätzung basiert insgesamt auf vielen Annahmen und vagen Werten.

Es zeichnete sich ab, dass bei einer Mischung kleiner als 40 % Birkenanteil im Stangenholz ein Eingriff schon früh nötig wird. Es war nicht möglich einen idealen Wert oder einen Schwellenwert fest zu legen. Es stellte sich heraus, dass die Abstufung der Flächen von wenig zu viel Birken in der Mischung dafür zu holprig verläuft. Von der Fläche B zu C entsteht ein Sprung von 30 % und C und D unterscheiden sich anschliessend nur noch um 3 %. Eine Fläche, die die Lücke zwischen 50 % und 80 % Birkenanteil abdeckt, wäre wünschenswert gewesen. Ebenfalls ist für diesen Zweck eine zusätzlich zeitliche Komponente interessant. Eine wiederholte Untersuchung der Flächen zum Beispiel in 10 Jahren könnte Antworten bringen.

5.1.1 Ausblick und offene Fragen

Diese Arbeit leistet einen Beitrag zum besseren Verständnis der Interaktion zwischen Birkenvorwäldern und Fichten in hochmontanen Wäldern. Manches bleibt aber noch ungeklärt. Im Laufe der Arbeit sind neue Fragen aufgetaucht. Die folgende Liste beinhaltet interessante Fragestellungen, die in einer anschließenden Arbeit weiter untersucht werden könnten.

(1) Eingriffszeitpunkt bestimmen

Untersuchung der Flächen über einen zeitlichen Horizont von mehreren Jahren. Wie entwickelt sich das Mischungsverhältnis über die Zeit? Kann anhand des Birkenanteils der erste Eingriffszeitpunkt bestimmt werden? Dies kann für praktische Anwendungen von Interesse sein.

(2) Verjüngung unter dem Birkenschild

Untersuchung der Fläche auf Keimlinge und Verjüngungsansätze. Welchen Einfluss hat ein Birkenvorwald auf die Verjüngung der Fichte? Führen weniger Birken zu mehr Verjüngung bei Fichten und so später zu einem höheren dauernden Deckungsgrad?

(3) Einfluss des Klimawandels

Erhöhte Temperaturen und vermehrt auftretende Störungen (Trockenheit, Wind, Feuer, Insektenbefall) führen zu neuen Herausforderungen im Gebirgs- und Schutzwald. Welche Rolle übernehmen Birkenvorwälder unter dem Einfluss des Klimawandels?

(4) Interaktionen im Wurzelbereich

Diese Arbeit hat sich die oberirdischen Interaktionen von Birkenvorwäldern und Fichten behandelt. Aber was für Konkurrenzsituationen und Synergien entstehen im Wurzelsystem?

5.2 Empfehlungen für die Praxis

Wie sollen frisch eingewachsenen Birkenvorwälder behandelt werden, um später einen Gruppenplenterwald zu erreichen? Es folgen einige Vorschläge zum Management von hochmontanen Fichtenwäldern, die unter einem Birkenvorwald aufwachsen und eine Schutzfunktion ausüben sollen. Es wird davon ausgegangen, dass die natürliche Ansammlerung der Fichte erfolgreich verläuft (Samenbäume vorhanden, genügend Licht, genügend Wasser, genügend Wärme usw.).

(1) Birken stehen lassen

In dieser Arbeit konnte kein negativer Einfluss von Birken auf Fichten in der hochmontanen Stufe signifikant nachgewiesen werden. Im Sinne des Konzentrationsprinzips wird deshalb dazu geraten, die negative Auslese von Birken zu unterlassen. Durch die Beschattung wird die Vegetation in der Strauchschicht unterdrückt und die natürliche Fichtenverjüngung begünstigt (Bugmann & Frehner, 2019). Wie sich in dieser Arbeit zeigte, fördern die Birken eine gewünschte horizontale Strukturierung und tragen durch ihre Stammzahl schon früh einen wesentlichen Teil zum Schutz vor Steinschlägen bei. Nebenbei erhöhen Pionierbaumarten die Baumartenvielfalt und führen zu einer grösseren strukturellen Diversität (waldwissen.net, 2018). Das Erhöhen der Baumarten- und Strukturvielfalt ist ein zentrales Element zur Anpassung an den Klimawandel (Brang, Küchlie, Schiwttler, Bugmann, & Ammann, 2016).

(2) Erster Eingriff

Je grösser der Birkenanteil, desto länger kann mit einem Jungwaldpflegeeingriff zugewartet werden. Das Beobachten der Fläche hilft, den passenden Zeitpunkt für einen waldbaulichen Eingriff abzuschätzen. Indizien für den Eingriffszeitpunkt sind das Mischungsverhältnis von Birke zu Fichte und die horizontale Strukturierung der Fläche. Erreicht der Bestand einen Birkenanteil von 50% oder weniger im Stangenholz, so ist ein strukturschaffender Eingriff geboten. Überwiegen die Birken im Bestand, so kann mit dem Eingriff gewartet werden. Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass bei einem Birkenanteil von 80% im Stangenholz noch bis zu 40 Jahre bis zum Eingriff verstreichen können. Es wird empfohlen den Eingriff gemäss den Jungwaldpflegerichtlinien (Glanzmann, Schwitter, & Zürcher, 2019) zu vollziehen.

(3) Schutzwirkung erreichen

Gemäss den Resultaten benötigen birkendominierte Flächen mehr Zeit als fichtendominierte Flächen, um eine genügende Schutzwirkung zu erreichen. Mit Ausnahme bei Steinschlägen mit kleinen Steinen, wo die hohe Birkenstammzahl ein frühes Erreichen der Schutzwirkung (nach ca. 25-35 Jahren) begünstigt. Werden zum Schutz vor Naturgefahren hohe immergrüne Deckungsgrade verlangt (Lawinen), so können gut 60-70 Jahre vergehen, bis unter dem Birkenschirm ein wirkungsvoller Schutzwald herangewachsen ist. Dies gilt es bei der Planung zu beachten.

(4) Prinzip der Biologischen Rationalisierung

Grundsätzlich wird empfohlen, sich am Prinzip der biologischen Rationalisierung zu orientieren. Die Resultate sprechen dafür, dass Birkenvorwälder bezüglich zielführender Strukturierung und Ausbildung von Stabilitätsträger im Sinne der Naturautomation genutzt werden können. Es wird davon abgeraten Birken zu fällen. Dadurch gehen die Vorteile eines Birkenvorwaldes verloren und ist gemäss den Resultaten dieser Arbeit nicht zielführend.

6 Danksagung

Als erstes möchte ich mich bei meiner Referentin Dr. Monika Frehner für ihre professionelle und kompetente Betreuung bedanken. Sie stand mir mit ihrem Fachwissen und ihren Kenntnissen über die lokalen Begebenheiten stets für Fragen zur Verfügung. Ebenfalls ein grosses Dankeschön geht an meinen Korreferenten Dr. Peter Ammann, der mir sein Wissen über biologische Rationalisierung zugänglich machte. Ebenfalls konnte ich bei der Planung meines Praxisteils von seinen jahrelangen Erfahrungen im Feld profitieren. Ebenfalls möchte ich mich bei meinem zweiten Korreferenten Daniel Guggisberg bedanken. Er nahm sich viel Zeit für meine Fragen und behielt bei unseren stets die Übersicht. Die Zusammenarbeit mit allen Referenten stellte sich als sehr unkompliziert und angenehm heraus. Für meine Feldarbeit konnte ich auf die tatkräftige Unterstützung von Daniel Guggisberg, Benedikt Hochuli, Heidi Mathys und Joel Gisler zählen. Dank ihrem Einsatz und gutem Wetter verlief die Arbeit im Feld speditiv. Weiter bedanke ich mich herzlich bei der ganzen Gruppe Waldökologie der ETH Zürich, die mir während meiner sechs monatigen Arbeitsphase das Feldmaterial und einen Arbeitsplatz zur Verfügung stellten und mir Gesellschaft in den Kaffee- und Mittagspausen leisteten. Schlussendlich geht ein grosses Dankeschön an meinen Vater Alexander Imhof. Von seiner konstruktiven Kritik durfte ich während dem ganzen Arbeitsprozess profitieren.

7 Literaturverzeichnis

- Ammann, P. (2004). *Untersuchung der natürlichen Entwicklungsdynamik in Jungwaldbeständen - Biologische Rationalisierung der waldbaulichen Produktion bei Fichte, Esche, Bergahorn und Buche*. Zürich: ETH Zürich.
- Ammann, P. (2008). *Biologische Rationalisierung - Teil 1: Einleitung und ökonomische Grundlagen*. Wald und Holz 86, S. 42-45.
- Ammann, P. (11. 11. 2019). *Zwischenbesprechung Masterarbeit*. (S. Imhof, Interviewer)
- Ammann, P., Arnet, A., & Felder, U. (2014). *Biologische Rationalisierung auch im Bergwald?* Wald und Holz, 11.
- Amt für Wald des Kantons Bern. (2013). *Wald und Klimawandel - Waldbauliche Empfehlungen für den Gebirgswald*. Bern: Amt für Wald des Kantons Bern.
- Bachmann, P. (2004). *Waldwachstum I/II*. [Vorlesung 60-302 HS 2004].
- Bachofen, H., & Zingg, A. (2005). *Auf dem Weg zum Gebirgsplenterwald: Kurzeffekte von Durchforstungen auf die Struktur subalpiner Fichtenwälder*. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 12.
- Badoux, E. (1966-1969). *Ertragstabellen für Fichte, Tanne, Buche und Lärche*. Eidg. Anst. forstl. Versuchswes.
- Baumann, M., Brang, P., & Burger, T. (2010). *Wald und Wild - Grundlagen für die Praxis*. Bern: Bundesamt für Umwelt.
- Böhlmann, D. (2009). *Warum Bäume nicht in den Himmel wachsen: eine Einführung in das Leben unserer Gehölze*. Quelle & Meyer.
- Brang, P., Küchlie, C., Schwitter, R., Bugmann, H., & Ammann, P. (2016). *Waldbauliche Strategie im Klimawandel*. Zürich: WSL.
- Bugmann, H., & Frehner, M. (2019). *Ökologie und Management von Gebirgswäldern*. [Vorlesung 701-1636-01L FS 2019].
- Bugmann, H., & Märki, C. (2012). *Der Lehr- und Forschungswald der ETH in Sedrun*. Bündler Wald, 22-27.
- Burckhardt, H. (1855). *Säen und Pflanzen nach forstlicher Praxis*. Hannover.
- Caveng, D., & Albin, C. (30. September 2019). *wetter-sedrun*. Von https://www.wetter-sedrun.ch/start.php?inhalt_mitte=klima.inc.php abgerufen
- Clark, P., & Evans, F. (1954). *Distance to the nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations*. Ecology Vol. 35, 445—453.
- Fachstelle für Gebirgswaldpflege. (06. 01 2020). *Steinschlag-Tool*. Von Gebirgswaldbau und Schutzwaldpflege: <http://www.gebirgswald.ch/de/anforderungen-steinschlag.html> abgerufen
- Farjon, A. (2017). *Picea abies*. The IUCN Red List of Threatened Species.
- Finger, A. (2012). *Die Waldausbreitung im Alpenraum*. Neuchâtel: Bundesamt für Statistik.
- Fischer, A., & Fischer, H. (2015). *Sturmwurf - und was dann?* LWF aktuell.
- Frehner, M. (2004). *Jungwaldpflege Haggisberg - Gutachten auf Grund der Begehung vom 9- Juli 2004*.
- Frehner, M. (19. 04 2019). *06_Management Gebirgswälder 2019*. [Vorlesung ETH FS 2019].
- Frehner, M. (23. Januar 2020). *Besprechung Masterarbeit*. (S. Imhof, Interviewer)
- Frehner, M., Wasser, B., & Schwitter, R. (2005). *Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald*. Bern: Bundesamt für Umwelt.
- Fritsche, B., & Frei, M. (2007). *Waldreservat Ual Prau Nausch - wo die Natur das Sagen hat*. Chur: Amt für Wald und Naturgefahren Graubünden.
- Gayer, C. (1896). *Der gemischte Wald*. Berlin.
- Geiser, C. (2019). *Untersuchung unbehandelter Mischbestände der obermontanen Höhenstufe*. Berner Fachhochschule: Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften.

- Glanzmann, L., Schwitter, R., & Zürcher, S. (2019). *Jungwaldpflege im Gebirgs- und Schutzwald*. Maienfeld: Fachstelle für Gebirgswaldpflege.
- GWP. (20. 11 2019). *Formular 2 automatisch*. Von Gebirgswald: <http://www.gebirgswald.ch/de/formular-2-automatisch.html> abgerufen
- Hager, K. (1916). *Verbreitung der wildwachsenden Holzarten im Vorderrheintal (Kanton Graubünden): von der Oberalp bis Illanz-Schleuis*. Bern: Buchdruckerei Bächler.
- Häne, K. (15. 11 2019). *waldwissen.net*. Von *Die Fichte _ Baum des Jahres 2017*: https://www.waldwissen.net/wald/baeume_waldpflanzen/nadel/wsl_fichte/index_DE abgerufen
- Herger, B. (12 2019). *Erfahrungen aus dem Strum "Vivian"*. Zürcher Wald, S. 23-25.
- Korpel, S. (1995). *Die Urwälder der Westkarpaten*. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag.
- Kraft, G. (1984). *Beiträge zur Lehre von den Durchforstungen, Schlagstellungen und Lichtungshieben*. Hannover.
- Leder, B. (1992). *Weichlaubhölzer*. Arnsberg: Landesanstalt für Forstwirtschaft Nordrhein-Westfalen.
- Mayer, H. (1984). *Waldbau auf soziologisch-ökologischer Grundlage 3. Auflage*. Stuttgart: Fischer Verlag.
- Mayer, H. (1992). *Waldbau auf soziologisch-ökologischer Grundlage 4. Auflage*. Stuttgart: Fischer Verlag.
- Meteo Schweiz. (18. 11 2019). *Klimadiagramme und Normwerte pro Station*. Von Meteo Schweiz: <https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/klima-normwerte/klimadiagramme-und-normwerte-pro-station.html?station=dis> abgerufen
- Mössnang, M. (2001). *Die Rolle der Birke im Waldbau - Die Sandbirke in Bayern*. Freising: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft.
- Ott, E. (1985). *Aussage zum Schneeschimmelbefall 1976*. (M. Frehner, Interviewer)
- Ott, E., Frehner, M., Frey, H.-U., & Lüscher, P. (1997). *Gebirgsnadelwälder - Ein praxisorientierter Leitfaden für eine standortgerechte Waldbehandlung*. Bern: Haupt Verlag.
- Pfeil, F. (1841). *Über die Vermischung der Fichte mit der Birke*. Kritische Blätter.
- Praciak, A., Pasiecznik, N., Sheil, D., Dixon, C., Fyson, G., & Rushforth, k. (2013). *The CABI Encyclopedia of Forest Trees*. Croydon: CPI Group.
- Rast, S. (2014). *Die Kultur- und Jungbestandespflege - Exkursion des Waldbauernverbands*. Münster: Forstdienst Münsterland.
- Schmidt, O., & Wild, C. (2000). *LWF-Bericht NR.28: Beiträge zur Sandbirke*. München: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft.
- Schönenberger, W., Schweingruber, F., & Mattheck, C. (1994). *Baumformen an der oberen Waldgrenze*. Bündnerwald, 35-42.
- Schütt, P., & Schuck, H. (1992). *Lexikon der Forstbotanik 1. Auflage*. Berlin: Ecomed.
- Schütz, J.-P. (1999). *Neue Waldbehandlungskonzepte in Zeiten der Mittelknappheit Prinzipien einer biologischen rationellen und kostenbewussten Waldpflege*. 150.
- Stark, H., Nothdurft, A., & Bauhus, J. (2011). *Effekte von Vorwäldern auf den Nährstoff- und Kohlenstoffhaushalt des Waldbodens*. AFZ-Der Wald, 14.
- Strobel, G. (1995). *Rottenstrukturen und Konkurrenz im subalpinen Fichtenwald - eine modellhafte Betrachtung*.
- swisstopo. (2. 12 2019). *Areal Images b/w 1973*. Von Maps of Switzerland: https://api3.geo.admin.ch/luftbilder/viewer.html?lang=en&width=5954&layer=ch.swisstopo.lubis-luftbilder_schwarzweiss&bildnummer=19430260030607&title=ch.swisstopo.lubis-luftbilder-dritte-kantone.ebkey&rotation=58&datenherr=swisstopo&height=5952&x=1929.10&y abgerufen
- swisstopo. (21. 11 2019). *Geologischer Atlas GA25*. Von swisstopo: maps.geo.admin.ch abgerufen

- Ukrainski, P. (20. 12 2019). *How are point objects distributed in space? Finding an answer with spatial statistics, Clark-Evans test*. Von 50° North: <http://www.50northspatial.org/point-objects-distribution-spatial-statistics-clark-evans-test/> abgerufen
- Valli, M., & Iyanki, M. (9. 12 2019). *Adiabatic Lapse Rate*. Von Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/adiabatic-lapse-rate> abgerufen
- Wagnière, S. (1996). Einfluss eines Birkenvorwaldes auf eine Schlusswaldsukzession. Zürich: ETH.
- Waldbau, A. (2016). *Merkblatt zu Bewirtschaftung von Fichtenbeständen*. Magdeburg: Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt Sachsen-Anhalt.
- waldwissen.net, R. (2018). *Pionierbaumarten: ökologisch wertvoll*. Abgerufen am 8. 11 2019 von waldwissen: https://www.waldwissen.net/wald/baeume_waldpflanzen/laub/lwf_pioniere/index_DE#1_pionier
- Wasler, M., & Schneider, M. (2018). *Der Waldboden lebt – Vielfalt und Funktion der Bodenlebewesen*. Birmensdorf: WSL.
- Zeller, E. (1993). *Die Rottenpflege - Bericht Gebirgswaldpflegeprojekt II*. Interkantonale Försterschule Maienfeld.
- Zuber, R. (16. Januar 2014). *Genetische Vielfalt bei Waldbäumen*. Buendnerwald, S. 42-47.
- Zürcher, K., & Lüscher, P. (2003). *Schätzverfahren zur Beurteilung der Waldwirkung auf den Hochwasserabfluss*. Bern: BUWAL.

8 Anhang

1. Minimale Anforderungen auf Grund des Standortstyps Ehrenpreis-Fichtenwald (55)

54 Typischer Perlgras-Fichtenwald 55 Ehrenpreis-Fichtenwald		
Bestandes- und Einzelbaummerkmale	Anforderungen minimal	Anforderungen ideal
Mischung Art und Grad	Fi 50 - 100 % Lä 0 - 50 % Vb Samenbäume	Fi 80 - 100 % Lä 10 - 20 % Vb Samenbäume <i>Im Vorderthental: Keine Lärche</i>
Gefüge BHD-Streuung	Genügend entwicklungsfähige Bäume in mind. 2 verschiedenen Durchmesserklassen pro ha	Genügend entwicklungsfähige Bäume in mind. 3 verschiedenen Durchmesserklassen pro ha
Horizontal	Kleinkollektive, allenfalls Einzelbäume	Kleinkollektive, allenfalls Einzelbäume
Stabilitätsträger Kronen	Kronenlänge min. ½	Kronenlänge mind. 2/3
Schlankeitsgrad	< 80	< 70
Stand/Verankerung	Lotrechte Stämme mit guter Verankerung, nur vereinzelt starke Hänger	Lotrechte Stämme mit guter Verankerung, keine starken Hänger
Verjüngung Keimbett	Auf mind. ½ einer ha: - keine starke Vegetationskonkurrenz	Auf mind. 3/4 einer ha: - keine starke Vegetationskonkurrenz
Anwuchs (10 cm bis 40 cm Höhe)	Auf mind. 1/10 der Fläche vorhanden	Auf mind. 1/5 der Fläche vorhanden
Aufwuchs (bis und mit Dichtung, 40 cm Höhe bis 12 cm BHD)	Pro ha mind. 30 Verjüngungsansätze (durchschnittlich alle 19 m) oder Deckungsgrad mind. 4 % Mischung zielgerecht	Pro ha mind. 50 Verjüngungsansätze (durchschnittlich alle 15 m) oder Deckungsgrad mind. 6 % Mischung zielgerecht

Schneesimsen-Fichtenwald (55*)

55* Schneesimsen-Fichtenwald		
Bestandes- und Einzelbaummerkmale	Anforderungen minimal	Anforderungen ideal
Mischung Art und Grad	Fi 50 - 100 % Lä oder WFö 0 - 50 % Vb Samenbäume - 30 %	Fi 70 - 90 % Lä oder WFö 5 - 25 % Vb 5 %
Gefüge BHD-Streuung	Genügend entwicklungsfähige Bäume in mind. 2 verschiedenen Durchmesserklassen pro ha	Genügend entwicklungsfähige Bäume in mind. 3 verschiedenen Durchmesserklassen pro ha
Horizontal	Kleinkollektive und Einzelbäume, auch Rotten	Kleinkollektive und Einzelbäume, auch Rotten
Stabilitätsträger Kronen	Kronenlänge min. ½	Kronenlänge mind. 2/3
Stand/Verankerung	Lotrechte Stämme mit guter Verankerung, nur vereinzelt starke Hänger	Lotrechte Stämme mit guter Verankerung, keine starken Hänger
Verjüngung Keimbett	Auf mind. 1/20 einer ha: - keine starke Besonnung - keine Überschirmung - keine starke Vegetationskonkurrenz	Auf mind. 1/20 einer ha: - keine starke Besonnung - keine Überschirmung - keine starke Vegetationskonkurrenz
Anwuchs (10 cm bis 40 cm Höhe)	Auf Mineralerde in Lücken vorhanden	Auf Mineralerde in Lücken vorhanden
Aufwuchs (bis und mit Dichtung, 40 cm Höhe bis 12 cm BHD)	Pro ha mind. 30 Verjüngungsansätze (durchschnittlich alle 19 m) oder Deckungsgrad mind. 4 % Mischung zielgerecht	Pro ha mind. 50 Verjüngungsansätze (durchschnittlich alle 15 m) oder Deckungsgrad mind. 6 % Mischung zielgerecht

Alpenlattich-Fichtenwald mit Heidelbeere (57V)

57V Alpenlattich-Fichtenwald mit Heidelbeere			57C Alpenlattich-Fichtenwald mit Wollreitgras		
Bestandes- und Einzelbaummerkmale	Anforderungen minimal		Anforderungen ideal		
Mischung					
Art und Grad	Fi	70 - 100 %	Fi	85 - 95 %	
	Vb	Samenbaume - 30 %	Vb	5 %	
	Lä	0 - 30 %	Lä	0 - 10 %	
Gefüge					
BHD-Streuung	Genügend entwicklungsfähige Bäume in mind. 2 verschiedenen Durchmesserklassen pro ha		Genügend entwicklungsfähige Bäume in mind. 3 verschiedenen Durchmesserklassen pro ha		
Horizontal	Rotten, allenfalls Einzelbäume		Rotten, allenfalls Einzelbäume Schlussgrad locker - räumig		
Stabilitätsträger					
Kronen	Kronenlänge mind. 2/3		Kronen bis zum Boden		
Stand/Verankerung	Lotrechte Stämme mit guter Verankerung, nur vereinzelt starke Hänger		Lotrechte Stämme mit guter Verankerung, keine starken Hänger		
Verjüngung					
Keimbett	Alle 10 m (100 Stellen /ha) Moderholz oder erhöhte Kleinstandorte mit Vogelbeerwäldchen oder Mineralerde vorhanden 57C: Schutz gegen Schneegleiten (Baumstrünke, Totholz, Steine etc.) vorhanden		Alle 8 m (150 Stellen /ha) Moderholz oder erhöhte Kleinstandorte mit Vogelbeerwäldchen oder Mineralerde vorhanden 57C: Schutz gegen Schneegleiten (Baumstrünke, tholz, Steine etc.) vorhanden		
Anwuchs (10 cm bis 40 cm Höhe)	An mind. 1/3 der verjüngungsgünstigen Stellen Fichte und Vogelbeere vorhanden		An mind. 1/2 der verjüngungsgünstigen Stellen Fichte und Vogelbeere vorhanden		
Aufwuchs (bis und mit Dichtung, 40 cm Höhe bis 12 cm BHD)	Mindestens 70 Verjüngungsansätze/ha (durchschnittlich alle 12 m) Mischung zielgerecht		Mindestens 100 Verjüngungsansätze/ha (durchschnittlich alle 10 m) Mischung zielgerecht		

2. Arten der Räumlichen Verteilung nach Clarks & Evans

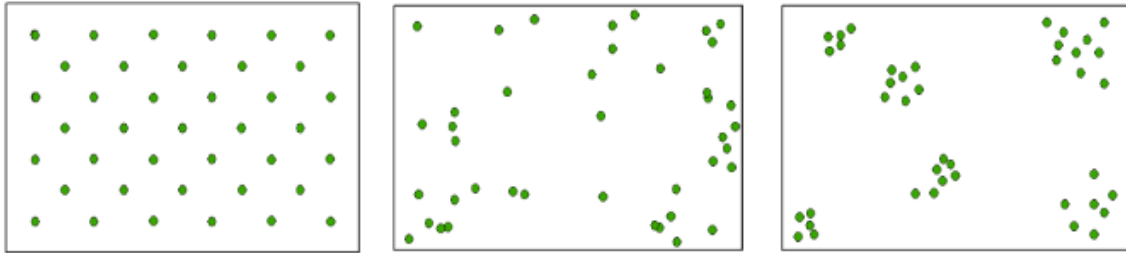


Abbildung 25: Arten von räumlichen Verteilungen nach Clarks & Evans. Von links nach rechts: regelmässig, zufällig und geklumpt. (Ukrainski, 2019)

3. Ertragstafeln nach Badoux (1966-1969)

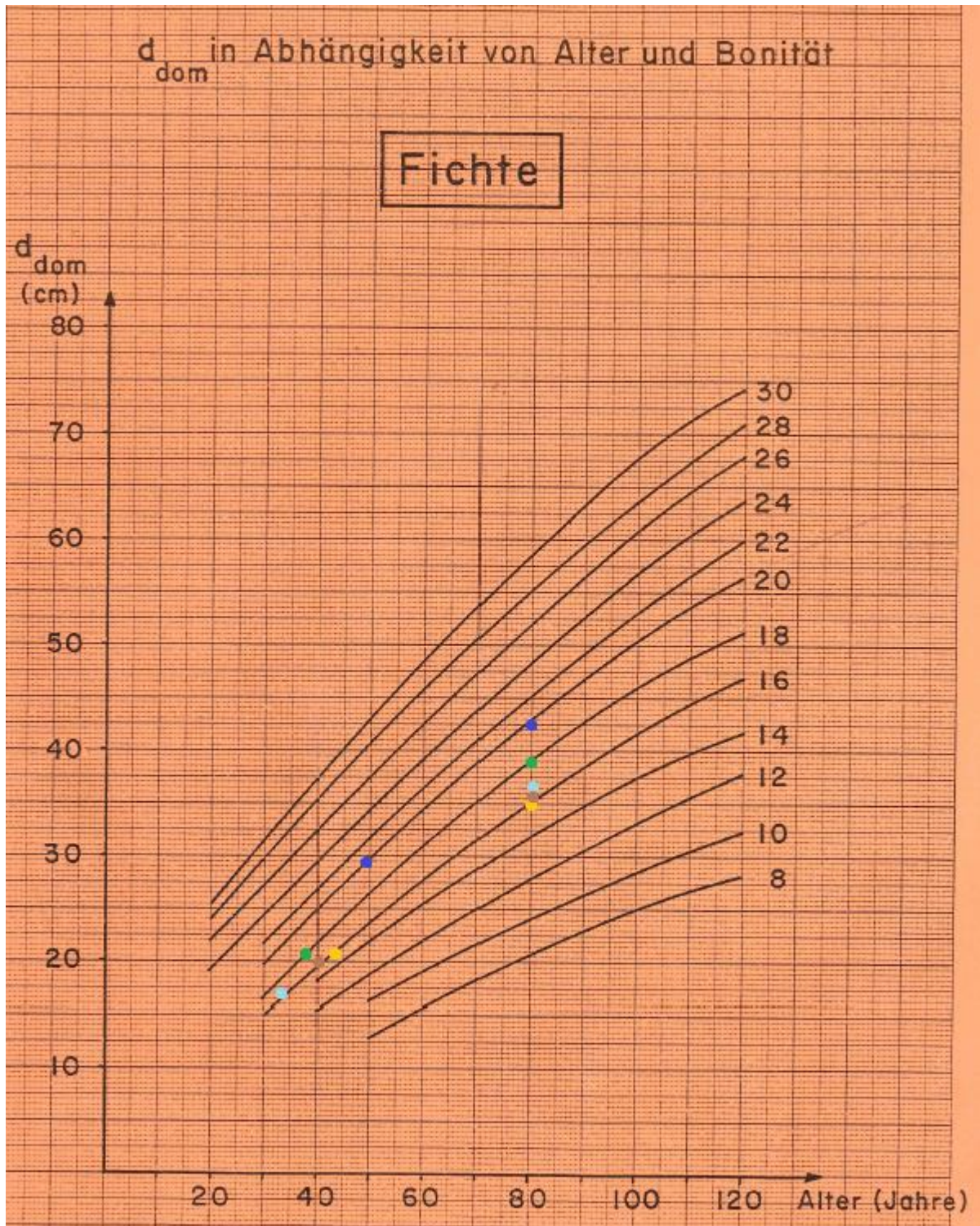


Abbildung 26: Ertragstafel der Fichte mit d_{dom} in Abhängigkeit von Alter und Bonität von Badoux (1966-1969). Die Ersten Punkte stellen die Werte aus dem Feld dar, die oberen Punkte zeigen die simulierte Situation im Alter von 80 Jahren dar. Dunkelblau = Fläche A, orange = Fläche B, Grün = Fläche C, Hellblau = Fläche D und Braun = Fläche X.

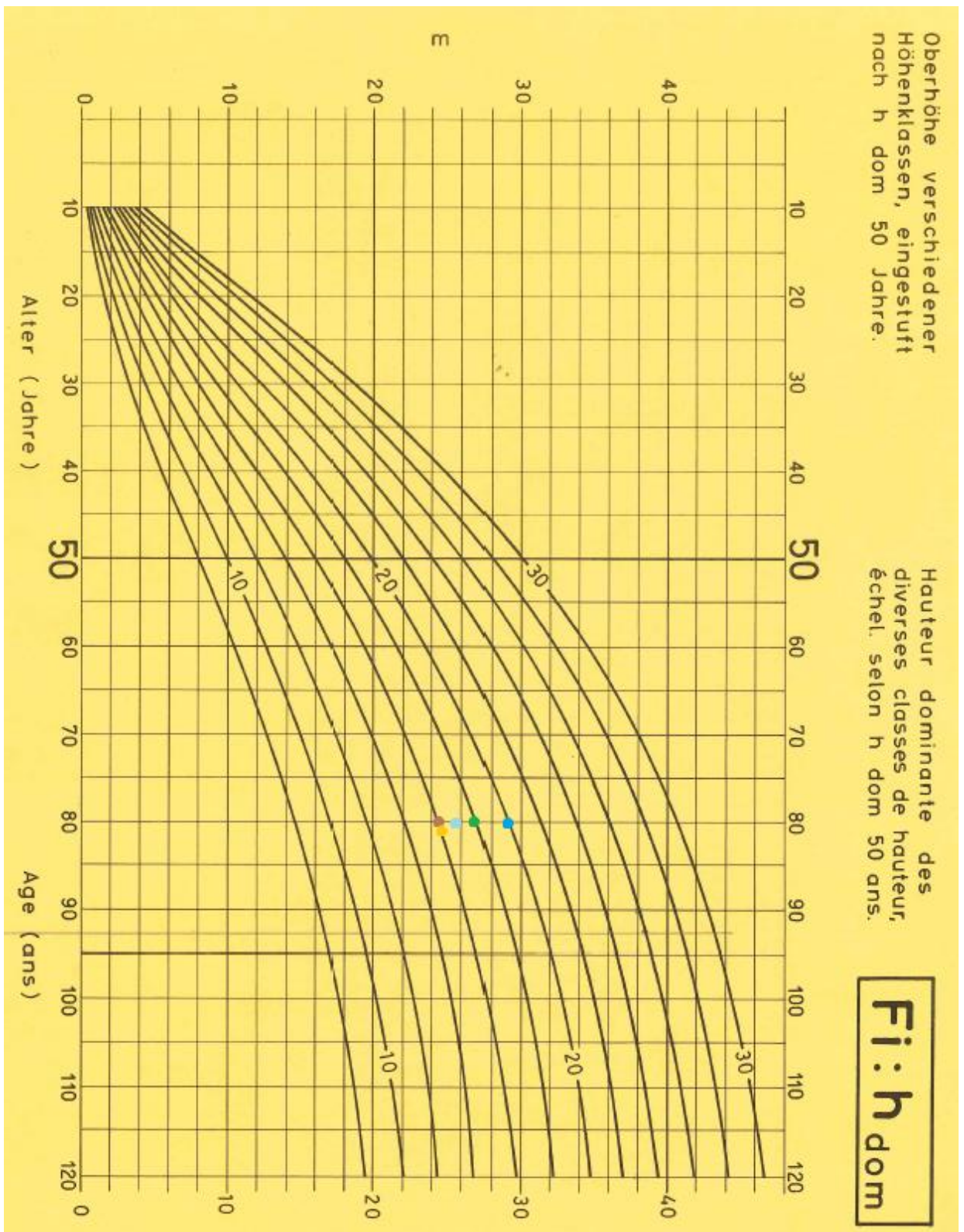


Abbildung 27: Ertragstafel der Fichte mit h_{dom} in Abhängigkeit von Alter und Bonität von Badoux (1966-1969). Die Punkte stellen die Höhen im Alter von 80 Jahren dar. Dunkelblau = Fläche A, orange = Fläche B, Grün = Fläche C, Hellblau = Fläche D und Braun = Fläche X.

4. Unterschiede in der Bonitätsabschätzung

Tabelle 11: Bonitätenabschätzung ausgehend von d_{dom} Fi oder h_{dom} Fi. Verwendet wurden die Abschätzungen aus d_{dom} .

Bonitäten nach:	X	A	B	C	D
d_{dom} Fi	16.25	20	16	18	16.5
h_{dom} Fi	18	18	16	18	19

5. Stammzahlen

Tabelle 12: Stammzahlen auf einer Hektare pro BHD Stufe und Fläche

BHD [cm]	A				B				C				D				X			
	Fi	Fi tot	Bi	Bi tot	Fi	Fi tot	Bi	Bi tot	Fi	Fi tot	Bi	Bi tot	Fi	Fi tot	Bi	Bi tot	Fi	Fi tot	Bi	Bi tot
n > 40- 130	59	44	44	44	201	50	0	0	29	0	0	0	41	0	0	0	5519	1890	0	0
0-1	29	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	454	76	0	0
1-	235	103	59	59	226	25	50	50	19	0	39	29	10	0	51	41	2117	529	151	151
2-	235	191	59	59	150	25	50	50	19	0	135	87	21	0	206	82	1739	302	302	227
3-	265	147	206	206	150	25	251	201	0	0	164	58	31	0	257	123	2041	76	0	0
4-	221	88	235	221	201	0	150	125	10	0	173	67	10	0	237	103	756	0	302	151
5-	162	29	221	132	176	0	376	226	0	0	395	125	21	0	411	154	907	0	227	0
6-	191	0	177	74	201	0	401	75	10	0	250	39	51	0	370	103	1134	0	76	0
7-	162	0	206	59	201	25	552	125	10	0	433	48	62	0	401	62	529	0	302	151
8-	177	29	206	29	25	0	401	25	10	0	385	0	10	0	339	0	605	0	454	151
9-	191	0	206	0	125	0	426	25	10	0	289	0	41	0	288	10	605	0	0	0
10-	74	0	177	0	150	0	301	25	19	0	231	10	41	0	432	0	454	0	0	0
11-	103	0	177	0	100	0	251	0	19	0	289	0	21	0	339	0	378	0	0	0
12-	162	0	206	0	226	0	276	25	29	0	318	0	41	0	267	0	302	0	0	0
13-	103	0	132	0	50	0	176	0	10	0	221	0	31	0	247	0	76	0	76	0
14-	103	0	191	0	100	0	150	0	10	0	183	0	31	0	154	0	76	0	0	0
15-	147	0	88	0	150	0	50	0	10	0	164	0	21	0	175	0	227	0	0	0
16-	44	0	88	0	100	0	25	0	10	0	67	0	0	0	123	0	0	0	0	0
17-	74	0	59	0	125	0	75	0	19	0	67	0	31	0	62	0	0	0	0	0
18-	74	0	44	0	0	0	50	0	29	0	29	0	21	0	31	0	0	0	0	0
19-	15	0	29	0	0	0	0	0	39	0	10	0	0	0	31	0	0	0	0	0
20-	59	0	0	0	25	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21-	29	0	0	0	50	0	0	0	10	0	29	0	0	0	0	0	76	0	0	0
22-	44	0	15	0	0	0	0	0	0	0	10	0	21	0	0	0	0	0	0	0
23-	29	0	0	0	25	0	0	0	10	0	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24-	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0
25-	44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26-	59	0	0	0	0	0	0	0	19	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0
27-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29-	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31-	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37-	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

6. Schäden pro BHD-Stufe

Table 13: Anzahl beschädigter Fichten pro BHD-Klasse pro Hektare auf den Untersuchungsflächen A, B, C, D und X. G = Gipfelbrüche, W = Wildschäden, S = Säbelwüchse und Z = Zwiesel

BHD [cm]	A				B				C				D				X				
	G	W	S	Z	G	W	S	Z	G	W	S	Z	G	W	S	Z	G	W	S	Z	
h > 40- 130					25	25										21	378		605		
0-1																					
1-	15			44		50					10						605				227
2-							25		10			10				10	151		76		76
3-	15				50	25										21	302				227
4-			29	29		25	25					10		10			151		76		
5-	29				125	25											227				76
6-					25	25		25				10				10	151				227
7-				15	25			25	10					10					76		151
8-	15															10	302				76
9-	15			15	25				10			10	10				76				151
10-	15				50	25		25					10			21	76				76
11-						25	25					10							76		
12-					75	50				10	10		10						76		
13-				15												10	76				
14-						25			10							10					76
15-					50			25		10						10					
16-				15	25																
17-			29	29		50			10					10							
18-				15					10							10					
19-				15					19	19											
20-	15							25	10												
21-					25												76				
22-				15												21					
23-									10												
24-																					
25-																					
26-		15							10												
27-37																					

7. Säbelwuchs in Abhängigkeit der Hangneigung

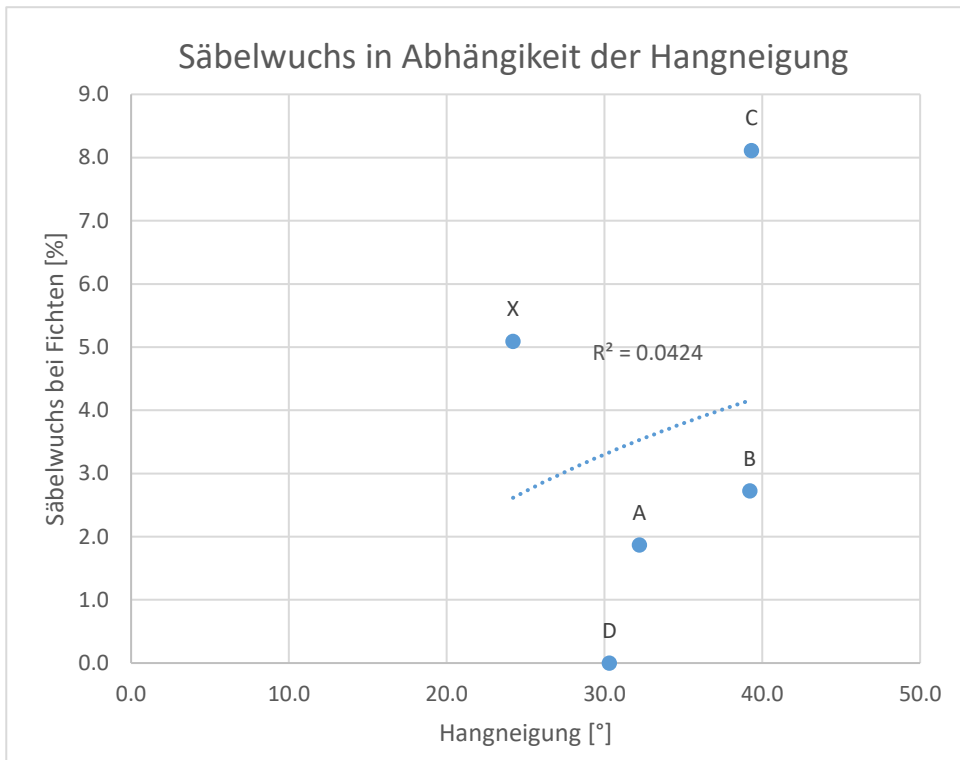


Abbildung 28: Säbelwuchs in Abhängigkeit der Hangneigung.

8. Multiple Regression von Säbelwuchs Stammzahl und Hangneigung

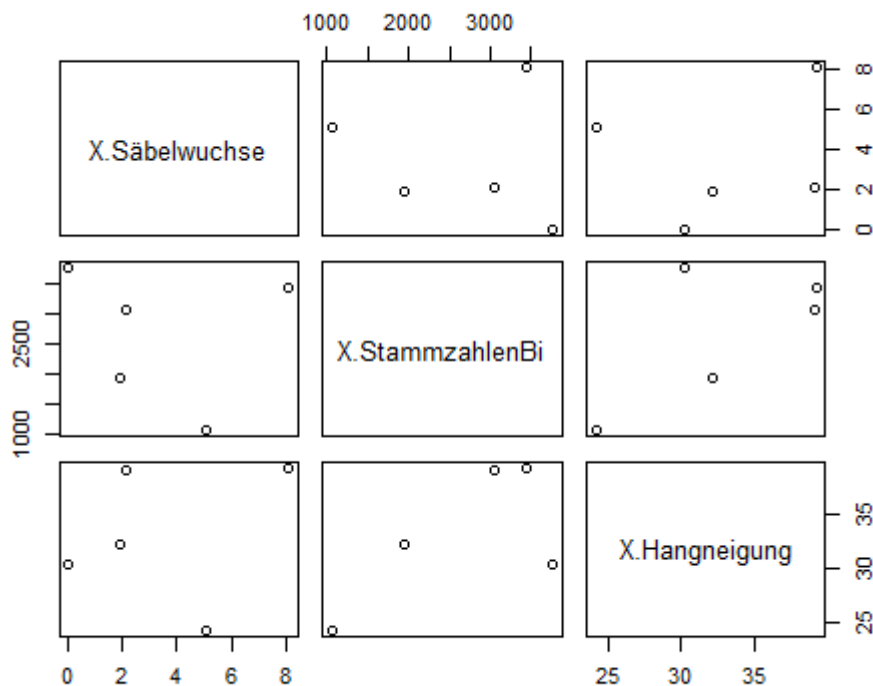


Abbildung 29: Output aus R. Multiple Regression von Hangneigung und Birkenstammzahl um den Säbelwuchs zu erklären.

```

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  -1.781432  10.931213  -0.163   0.886
StammzahlenBi -0.001494  0.002386  -0.626   0.595
Hangneigung   0.277977  0.419977   0.662   0.576

Residual standard error: 4.023 on 2 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.2003,    Adjusted R-squared:  -0.5994
F-statistic: 0.2505 on 2 and 2 DF,  p-value: 0.7997
    
```

Der ungenügende p- und R^2 -Wert deuten darauf hin, dass auch mit dem Hangneigungsfaktor und der Birkenstammzahl zusammen keine Voraussage über den Säbelwuchs gemacht werden kann. Der Nutzen von Hangneigung und Birkenstammzahlen zusammen ist nicht signifikant besser zu Voraussage von Säbelwuchs, als die Faktoren jeweils einzeln zu benutzen.

9. Zusammenhang Stammzahlen und h/d-Werte

Tabelle 14: Statistische Auswertung Zusammenhang der verschiedenen Stammzahlen mit der Anzahl GB mit einem h/d-Wert von über 80. Für die Analyse in R wurden die stärksten 100 GB (d_{dom}) im Bestandesalter von 80 Jahren verwendet.

	Kor	R ²
Birkenstammzahl	-0.30	0.64
Fichtenstammzahl	0.70	0.18
Stammzahlen total	0.76	0.13

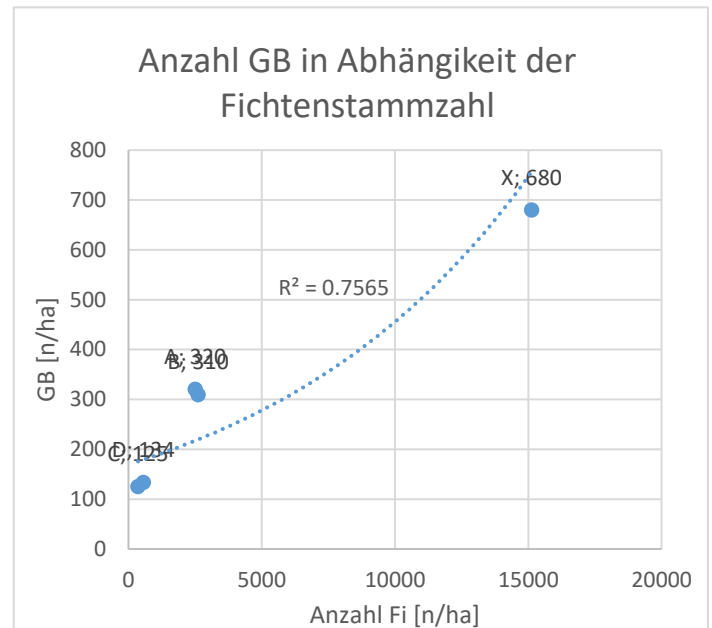
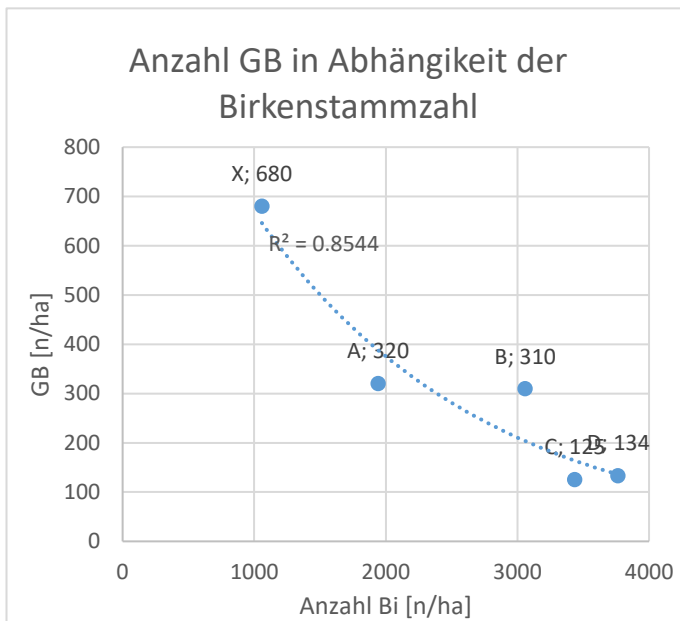


Abbildung 30: Anzahl Gerüstbäume in Abhängigkeit der Birkenstammzahl (links) und der Fichtenstammzahl (rechts)

10. Simple Regression von h/d-Wert mit Hangneigung erstellt in R

```
> summary(simple.regression.Hangneigung)
Call:
lm(formula = hdwertGB100ber80 ~ Hangneigung)

Residuals:
    1     2     3     4     5 
8.985 -13.042  12.309  -3.329  -4.923 

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  154.6571    31.6744   4.883  0.0164 *
Hangneigung   -3.6216     0.9446  -3.834  0.0313 *
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 12.08 on 3 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8305,    Adjusted R-squared:  0.774 
F-statistic: 14.7 on 1 and 3 DF,  p-value: 0.03128

> cor(hdwertGB100ber80, Hangneigung )
[1] -0.9113154
```

Abbildung 31: Simple Regression zwischen Hangneigung und der 100 dicksten Gerüstbäume im Bestandesalter von 80 Jahren.

11. Anforderungsprofile Naturgefahren

X:

Naturgefahren	Standortstyp	Anforderungsprofil	Lärme		Streichholz/Trastgebiert		Streichholz/Trastgebiert		Muldung/Erden-/Muldung		Wildbach/Hochwasser	
			Min/Max	Maßprofil	Min/Max	Maßprofil	Min/Max	Maßprofil	Min/Max	Maßprofil	Min/Max	Maßprofil
Muldung	Friede X Vb 0/5 Vb 0/5	Vb 0/5 Vb 0/5	1,0 - 2,0% Vb 0/5 Vb 0/5	F: 85-95% Vb 5% L3 0-10%	Schlaggegend < 80 Schlechte Stämme mit großer Verankerung, keine Stößen	Korkeinsatz mit 2/3 Stämme mit guter Verankerung, keine Stößen	Schlaggegend < 80 Schlechte Stämme mit großer Verankerung, keine Stößen	Korkeinsatz mit 2/3 Stämme mit guter Verankerung, keine Stößen	Schlaggegend < 80 Schlechte Stämme mit großer Verankerung, keine Stößen	Korkeinsatz mit 2/3 Stämme mit guter Verankerung, keine Stößen	Schlaggegend < 80 Schlechte Stämme mit großer Verankerung, keine Stößen	Korkeinsatz mit 2/3 Stämme mit guter Verankerung, keine Stößen
geringe Verfall	Nach 1/10 8-11, 20/12/24 25-30, 0/0 25-30, 0/0	Nach 1/10 1-11, 8/9/10/17 25-30, 0/0 25-30, 0/0	Geringe Entwicklungslänge Bäume in mind. 2 versch. Richtungen Geringe Entwicklungslänge Bäume in mind. 3 versch. Richtungen Zielstruktursergeignis	Geringe Entwicklungslänge Bäume in mind. 2 versch. Richtungen Geringe Entwicklungslänge Bäume in mind. 3 versch. Richtungen Zielstruktursergeignis	Korkeinsatz mit 2/3 Stämme mit guter Verankerung, keine Stößen	Korkeinsatz mit 2/3 Stämme mit guter Verankerung, keine Stößen	Korkeinsatz mit 2/3 Stämme mit guter Verankerung, keine Stößen	Korkeinsatz mit 2/3 Stämme mit guter Verankerung, keine Stößen	Korkeinsatz mit 2/3 Stämme mit guter Verankerung, keine Stößen	Korkeinsatz mit 2/3 Stämme mit guter Verankerung, keine Stößen	Korkeinsatz mit 2/3 Stämme mit guter Verankerung, keine Stößen	Korkeinsatz mit 2/3 Stämme mit guter Verankerung, keine Stößen
geringe Verfall	Nach 1/10 8-11, 20/12/24 25-30, 0/0 25-30, 0/0	Nach 1/10 1-11, 8/9/10/17 25-30, 0/0 25-30, 0/0	Geringe Entwicklungslänge Bäume in mind. 2 versch. Richtungen Geringe Entwicklungslänge Bäume in mind. 3 versch. Richtungen Zielstruktursergeignis	Geringe Entwicklungslänge Bäume in mind. 2 versch. Richtungen Geringe Entwicklungslänge Bäume in mind. 3 versch. Richtungen Zielstruktursergeignis	Korkeinsatz mit 2/3 Stämme mit guter Verankerung, keine Stößen	Korkeinsatz mit 2/3 Stämme mit guter Verankerung, keine Stößen	Korkeinsatz mit 2/3 Stämme mit guter Verankerung, keine Stößen	Korkeinsatz mit 2/3 Stämme mit guter Verankerung, keine Stößen	Korkeinsatz mit 2/3 Stämme mit guter Verankerung, keine Stößen	Korkeinsatz mit 2/3 Stämme mit guter Verankerung, keine Stößen	Korkeinsatz mit 2/3 Stämme mit guter Verankerung, keine Stößen	Korkeinsatz mit 2/3 Stämme mit guter Verankerung, keine Stößen
geringe Verfall	Nach 1/10 8-11, 20/12/24 25-30, 0/0 25-30, 0/0	Nach 1/10 1-11, 8/9/10/17 25-30, 0/0 25-30, 0/0	Geringe Entwicklungslänge Bäume in mind. 2 versch. Richtungen Geringe Entwicklungslänge Bäume in mind. 3 versch. Richtungen Zielstruktursergeignis	Geringe Entwicklungslänge Bäume in mind. 2 versch. Richtungen Geringe Entwicklungslänge Bäume in mind. 3 versch. Richtungen Zielstruktursergeignis	Korkeinsatz mit 2/3 Stämme mit guter Verankerung, keine Stößen	Korkeinsatz mit 2/3 Stämme mit guter Verankerung, keine Stößen	Korkeinsatz mit 2/3 Stämme mit guter Verankerung, keine Stößen	Korkeinsatz mit 2/3 Stämme mit guter Verankerung, keine Stößen	Korkeinsatz mit 2/3 Stämme mit guter Verankerung, keine Stößen	Korkeinsatz mit 2/3 Stämme mit guter Verankerung, keine Stößen	Korkeinsatz mit 2/3 Stämme mit guter Verankerung, keine Stößen	Korkeinsatz mit 2/3 Stämme mit guter Verankerung, keine Stößen

12. Hochwasser Schätzverfahren nach Zürcher & Lüscher (2003)

Hydrologische Wirkung des Gebirgswaldes			
Abschätzung des Einflusses des Waldes auf das hochwasser-Geschehen			
Unter Fichtenaltbestand		Unter Birkenvorwald	
Interzeption		Interzeption	
DG/ Baumschicht	9	DG/ Baumschicht	6
Kronenlänge	2	Kronenlänge	1
Mischung	2	Mischung	1
Dg Krautschicht	0	Dg Krautschicht	10
	22 gut		17 mässig
Infiltration		Infiltration	
Dg Krautschicht	0	Dg Krautschicht	2
Bodenoberfläche	2	Bodenoberfläche	1
Humusfrom	0	Humusfrom	2
Durchmischungstiefe	0	Durchmischungstiefe	2
mechanische Verdichtung	4	mechanische Verdich	4
Hydromorphie im Oberboden	0	Hydromorphie im Ob	4
	6 schlecht		15 sehr gut
Durchwurzelung und Makroporen		Durchwurzelung und Makroporen	
Deckungsgrad Baumschicht	4.5	Deckungsgrad Baums	4.5
Stufigkeit des Bestandes	0	Stufigkeit des Bestar	0
Lücken im Bestand	4	Lücken im Bestand	4
Feinwurzeln	-	Feinwurzeln	-
Grobwurzeln	-	Grobwurzeln	-
Starkwurzeln	-	Starkwurzeln	-
Makroporen	-	Makroporen	-
Risse/hohlräume	-	Risse/hohlräume	-
Wurmgänge	-	Wurmgänge	-
Matrix		Matrix	
nicht möglich		nicht möglich	
Speicherung		Speicherung	
Mächtigkeit des Wurzelraums	5.8	Mächtigkeit des Wurz	4
Skelettgehalt	0.3	Skelettgehalt	0.25
Feinerde	20	Feinerde	20
Speicherkapazität	81.2 mm	Speicherkapazität	60 mm