

Räumlich-zeitliche Analyse der alpinen Waldgrenze während der letzten 40 Jahre im Dischmatal (Davos)

Masterarbeit
von
Elisabeth Leibold

Zur Erlangung des akademischen Grades Diplomingenieurin der
Forstwirtschaft (Dipl.-Ing)



Erstprüfer:

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Hubert Hasenauer
Institut für Waldbau
Department für Wald- und Bodenwissenschaften

Zweitprüfer:

Dr. Peter Bebi
Eidg. Institut für Schnee- und
Lawinenforschung Davos (SLF)

eingereicht im November, 2012

Insitut für Waldbau
Department für Wald- und Bodenwissenschaften
der Universität für Bodenkultur Wien

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	2
Danksagung.....	4
Zusammenfassung.....	5
Abstract.....	7
Abkürzungsverzeichnis.....	8
Abbildungsverzeichnis.....	9
Tabellenverzeichnis.....	10
1. Einleitung.....	11
1.1 Ausgangslage und Motivation.....	11
1.2 Grundlagen.....	11
1.3 Offene Forschungsfragen.....	14
1.4 Vorstellung der zu vergleichenden Arbeit.....	16
1.5 Zielsetzung und Fragestellung.....	17
2 Untersuchungsgebiet.....	20
2.1 Allgemeiner Überblick.....	20
2.2 Geologie und Böden.....	21
2.3 Klima.....	22
2.4 Vegetation.....	23
2.5 Land- und Forstwirtschaft.....	24
3 Material und Methoden.....	25
3.1 Vorbereitende Arbeiten und Bildverarbeitung.....	25
3.2 Aufnahmeverfahren im Feld.....	26
3.3 Das MAB- Projekt Davos - Bearbeitung und Analyse der MAB-Daten.....	28
3.4 Räumlicher Vergleich der Aufnahmepunkte der Aufnahmeperiode 1972° /73 und 2012.....	31
3.5 Statistische Analysen.....	31
4 Ergebnisse.....	34
4.1 Situation 2012.....	34
4.1.1 Baumhöhe und Stammdurchmesser in Abhängigkeit der Exposition.....	35

4.1.2	Zusammenhang von Stammdurchmesser, Baumhöhe und Höhenlage der untersuchten Baumarten.....	36
4.1.3	Verteilung der Häufigkeiten der Baumarten in Abhängigkeit von Höhenlage und Topographie	39
4.1.4	HD- Verhältnis im Bezug zur Exposition	42
4.1.5	Verbissituation.....	43
4.1.6	Der Weisse Schneeschnitzpilz (<i>Phacidium infestans</i>)	43
4.2	Übersicht der Daten der Aufnahmeperiode 1972 /73	45
4.3	Veränderungen zwischen der Aufnahmeperiode 1972/73 und 2012	46
4.4	Ausschlaggebende Faktoren für die Etablierung der Bäume	50
4.5	Darstellung der Bedeutung verschiedener Einflussvariablen auf Basis der Datensätze 1972 /73 und 2012	53
5	Diskussion.....	56
5.1	Diskussion der Ergebnisse 2012	56
5.2	Die Bedeutung der Einflussvariablen und Klassifikationsbäume auf das Wachstum und Etablierung der Bäume.....	63
5.3	Diskussion der Methodik	67
6	Schlussfolgerungen	71
7	Ausblick	72
	Literatur.....	73

Danksagung

Ich bedanke mich bei Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Hubert Hasenauer für die Vergabe meiner Masterarbeit und die fachliche Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit.

Ganz besonders möchte ich mich bei meinem Betreuer Herrn Dr. Peter Bebi bedanken. Stets hat er sich Zeit genommen und gab mir in allen Phasen meiner Arbeit konstruktive Kritik und Ideen.

Zudem möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Instituts für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) in Davos bedanken. Ich durfte dort eine unvergessliche Zeit erleben.

Für statistisches Fachwissen möchte ich mich besonders bei Herrn Dr. Frank Graf und Ignacio Barbeito bedanken. Des Weiteren hat mir Herr Andreas Stoffel bei so manch scheinbar unlösbaeren GIS-Problem weitergeholfen und stand mir mit Rat und Tat zur Seite.

Zum Gelingen dieser Arbeit haben viele Menschen beigetragen, denen ich an dieser Stelle ganz herzlich danken möchte. Besonders möchte ich hierbei Herrn Walder Urs hervorheben, welcher mir zahlreiche Tipps bezüglich seiner Feldarbeit und methodischer Vorgangsweise weitergeholfen hat.

Ein herzliches Dankeschön gilt natürlich meinen Eltern, die mir das Studium ermöglichten und mich während dieser Zeit moralisch unterstützten und motivierten.

Zusammenfassung

Die Waldgrenze ist eine markante Vegetationsgrenze. Die Diskussion zum Thema "Klimawandel" rückt die Dynamik der Waldgrenze nicht nur in den Fokus zahlreicher Forschungsarbeiten, sie gewinnt auch in der Öffentlichkeit immer mehr an Bedeutung.

Es stellt sich die zentrale Frage, inwieweit sich die verschiedenen Baumarten im Bereich der Wald- und Baumgrenze an veränderte Umweltbedingungen anpassen können. Auf Grund des komplexen Zusammenspiels zahlreicher Einflussfaktoren können die Wirkungen dieser allmählichen Veränderungen kaum durch eine einmalige Untersuchung ermittelt werden. Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es daher, durch den Vergleich mit historischen Daten aus 1972 /73 Analysen durchzuführen und dadurch Erkenntnisse zu den Veränderungen der Waldgrenze aufzuzeigen.

In den Sommermonaten des Jahres 2012 erfolgte diesbezüglich die Datenerhebung im Dischmatal bei Davos. Vorbereitende Arbeiten wie Waldflächenabgrenzung, Digitalisierung der Datenpunkte des Vergleichsjahres, sowie das Erstellen von Rasterdatensätze zur Analyse der Einflussfaktoren, erfolgte durch GIS- unterstützte Anwendungen. Die Aufnahmeparameter waren neben der Baumart (*Picea abies*, *Larix decidua* und *Pinus cembra*), der Baumhöhe, dem Durchmesser und den Kategorien *Einzelbaum* bzw. *Gruppen* auch die Intensität von Verbiss und Schneeschimmelbefall.

Durch graphische Analysen der Aufnahmepunkte 2012, sowie die Vergleichsdaten der Aufnahmeperiode 1972 /73 wurden ausgewertet um Unterschiede herauszuarbeiten. Multivariate Analysen (Klassifikationsbäume) stellten den Einfluss verschiedener Variablen (Höhenlage, Ausaperung, Vegetation, Nutzung, Lawinengefahr, Exposition, Topographie, Hangneigung) bezüglich des Wachstums- und der Existenz von Bäumen im Bereich der Baumgrenze dar.

Im Vergleich zur Aufnahmeperiode 1972 /73 zeigt die Waldgrenze deutliche Unterschiede. Generell hat sich die Anzahl der aufgenommen Baumpunkte in allen Höhenstufen verdreifacht. Sowohl auf der Nord- als auch auf der Südseite ist die Lärche die in den höchsten Lagen vorkommende Baumart. Die prozentual stärkste Zunahme mit 16.3 Prozent auf der Nordseite- und 20 Prozent auf der Südseite des Tals wird bei der Arve am deutlichsten. Generelle Zusammenhänge von Höhenlage, Stammdurchmesser und Exposition geben baumartenspezifische Reaktionen wider, wobei hierbei die Exposition und Topographie besonders ausschlaggebend sind. 1972 /73 ist die Nutzung eine der stärksten Variablen. Im Datensatz 2012, sowie im Datensatz der Entwicklung zwischen der Aufnahmeperiode 1972 /73 und 2012, sind Ausaperung und Vegetation ausschlaggebend.

Die Arbeit zeigt, wie anhand eines konkreten Beispiels Aussagen über die Waldgrendynamik gemacht werden und baumartenspezifische Reaktionen und Charakteristika aufgezeigt werden können. Langfristig ist bestätigt worden, dass ein Trend von Landnutzung- hin zu Klimawandel verläuft. Es ist dennoch kritisch zu betrachten, dass eine

generelle Waldausdehnung (bzw. Verlagerung der Waldgrenze nach oben) auf allen Standorten möglich ist. Das komplexe Zusammenspiel zahlreicher weiterer Faktoren in dem sensiblen Ökosystem "Waldgrenze" ist zu berücksichtigen.

Schlüsselwörter: Waldgrendynamik, Vergleichsanalysen, *Picea abies*, *Pinus cembra*, *Larix decidua*, Klimawandel

Abstract

The timberline is a very important vegetation line. Particularly, in the context of the current issue of "climate change", the tree line dynamic is in the focus of many researchers and is gaining more and more importance. The central question is how the different type of trees are able to adapt to these changes which cause new conditions. However, it is due to the complex interaction of many different factors not easy to point out the reasons for a possible change in the development of trees above the treeline. Thus, this work should give a better understanding about treeline dynamics in the Alps.

The aim of the present study was to identify changes in the pattern of treeline trees in the Dischma valley during the last 40 years. In the summer months of 2012, the data collection was carried out in the Dischma- valley nearby Davos. Preparatory work was made by GIS-supported applications, such as forest area demarcation, digitization of the data points of 1972°/73, and the creation of raster data sets for analysis concerning the influence of different variables. A re-assessment of the treeline tree species Larch (*Larix decidua*), Spruce (*Picea abies*) and Swiss Stone Pine (*Pinus cembra*) and various additional inventory parameters (tree height, stem diameter, intensity of browsing and snow mold infestation) have been carried out. Multivariate- and statistical analyses were used to analyse differences between the two surveys and influences of different variables (altitude, snowmelt, topography, slope, vegetation, exposure, land -use and avalanche tracks) on the pattern and the dynamics of treeline trees.

The results show significant differences between the recording 1972 /73 and 2012. In general, the number of recorded trees have tripled in all altitudes. On the north and on the south side, larch is occurring in the upper elevations. With 16.3 percent on the north and 20 percent on the southside- slope Stone Pine increased most. General correlations of altitude, stem diameter and exposure show tree species specific reactions, whereby the exposure and the elevation are the most important influences. In 1972 /73, the landuse is one of the strongest variable. However, variables like vegetation and snowmelt date are increasing in importance since 1972 /73. The trend that land use out runs to climate change is shown in various results of this thesis. In this context, it has to be considered critically that a general forest expansion on all sites (and thus a shift of timberline in higher elevations) could be possible. The complex interplay of many other factors in the sensitive ecosystems "treeline" has to be included.

Keywords: treeline-shift, comparison analyses, *Picea abies*, *Pinus cembra*, *Larix decidua*, climate change

Abkürzungsverzeichnis

BHD	Brusthöhendurchmesser, Messhöhe am Stamm auf 1,3m
DHM-AV	Digitales Höhenmodell der amtlichen Vermessung, engl. Digitale Surface Model
DOM	Digitales Oberflächenmodell (mit Vegetation dargestellt)
LiDAR	Laserscanning, engl. Light Detection and Ranging
GIS	Geoinformationssystem

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematische Übersicht der Nomenklatur oberhalb der Waldgrenze	14
Abbildung 2:	Ausschnitt der Karte "Jungwuchszonen und Einzelbaumwuchs ("Kampfzone") über der aktuellen Waldgrenze"	17
Abbildung 3:	Das Einzugsgebiet des Dischmatals bei Davos. Das Untersuchungsgebiet ist mit einer gestrichelten Linie abgegrenzt	20
Abbildung 4:	(a) Baumhöhe vs. Exposition; (b) Stammdurchmesser vs. Exposition.....	35
Abbildung 5:	Korrelation Baumhöhe versus Höhenlage des Datensatzes 2012.....	36
Abbildung 6:	Korrelation Baumhöhe versus Stammdurchmesser des Datensatzes 2012.....	37
Abbildung 7:	Verteilung der Baumarten in Abhängigkeit der Höhenlage auf Süd- und Nordseite	40
Abbildung 8:	Topographieabhängigkeit der Baumarten auf Nord- und Südseite des Tals ...	41
Abbildung 9:	H/D Verhältnis der Baumart Lärche auf Nord- und Südexposition	42
Abbildung 10:	Von Schneeschimmel befallene Arve am Südhang des Dischmatals	44
Abbildung 11:	Vergleich der Datensätze 1972 /73 und 2012; Anzahl der Bäume für verschiedene Höhenstufen auf der Nordseite des Dischmatals	46
Abbildung 12:	Vergleich der Datensätze 1972 /73 und 2012; Anzahl der Bäume für verschiedene Höhenstufen auf der Südseite des Dischmatals	47
Abbildung 13:	Prozentualer Unterschied der Baumarten 1972 /73 im Vergleich zu 2012 auf der Nord- und Südseite	48
Abbildung 14:	Ausschnitt des Untersuchungsgebiets: Rasterfile der Daten der Entwicklung zwischen 1972 /73 und 2012	49
Abbildung 15:	Klassifikationsbaum der Aufnahmeperiode 1972 /73.....	50
Abbildung 16:	Klassifikationsbaum 2012.....	51
Abbildung 17:	Klassifikationsbaum der Veränderung seit 1972 /73	52
Abbildung 18:	Reihenfolge der Einflussvariablen (a) gemäss Datensatz 2012, (b) gemäss Datensatz 1972 /73.....	53
Abbildung 19:	Datensatz der Entwicklung zwischen 1972 /73 und 2012	54
Abbildung 20:	Einfluss der Topographie auf den Waldgrenzenverlauf	58
Abbildung 21:	Ausschnitt aus dem Untersuchungsgebiet Dischmatal	68
Abbildung 22:	Starker Verbiss bei einer Fichte, Höhe ca. 60cm.....	69

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Kategorien Befall	28
Tabelle 2:	Kategorien Verbiss.....	28
Tabelle 3:	Übersicht des Gefährdungsfaktors Lawine	29
Tabelle 4:	Übersicht des Datensatzes "Nord" 2012	34
Tabelle 5:	Übersicht des Datensatzes "Süd" 2012	34
Tabelle 6:	Ergebnisse des Spearman-Korrelationstests Baumhöhe versus Stammdurchmesser des Datensatzes 2012.....	38
Tabelle 7:	Ergebnisse des Spearman- Korrelationstests Baumhöhe versus Höhenlage ...	38
Tabelle 8:	Verbiss der Baumartenanteile auf Nord- und Südseite in Prozent des jeweiligen Baumart	43
Tabelle 9:	Übersicht des Schneeschimmelbefalls in Prozent.....	44
Tabelle 10:	Übersicht des Vergleichsdatensatzes "Nord", aufgeteilt nach Baumarten und Kategorien Einzelbaum und Gruppen.....	45
Tabelle 11:	Übersicht des Vergleichsdatensatzes "Süd", aufgeteilt nach Baumarten und Kategorien Einzelbaum und Gruppen.....	45
Tabelle 12:	Variable Vegetation in Prozent der untersuchten Baumarten.....	55
Tabelle 13:	Variable Ausaperung in Prozent der untersuchten Baumarten	55

1. Einleitung

1.1 Ausgangslage und Motivation

Die Entwicklung der Waldgrenze ist derzeit weltweit auf Grund der aktuellen Diskussionen um den Klimawandel und den tendenziellen Temperaturanstieg in zahlreichen Untersuchungen und Forschungen eine umstrittene Thematik. Bereits seit einigen Jahrzehnten beschäftigen sich zahlreiche Forscher mit dem sensiblen Ökosystem "Waldgrenze". Dieses besteht aus zahlreichen kleinen Ökosystemen und Kreisläufen, welche schnell auf Klimaveränderungen reagieren [KESSLER ET AL., 2007, TRANQUILLINI, 1979]. Darüber hinaus gibt es zahlreiche Studien, die ein vermehrtes Wachstum von Bäumen an- und oberhalb der Waldgrenze in den verschiedensten Gebirgszügen der Welt belegen und dabei den Faktor "Klimawandel" als wesentliche Komponente nennen [DANBY, R., 2003; DULLINGER ET AL., 2004; DULLINGER ET AL., 2005; MOTTA ET AL., 2006; HARSCH ET AL., 2009]. Es ist dabei unumstritten, dass in den letzten Jahrzehnten ein Anstieg der durchschnittlichen Temperatur stattgefunden hat und dieser noch weiter fortschreiten wird [WIESER ET AL., 2007, NICULOSI ET AL., 2006, IPCC, 2007].

Dabei weist das Thema "Wachstum oberhalb der Waldgrenze" noch zahlreiche offene Fragen auf. Trotz zahlreicher Untersuchungen sind viele Zusammenhänge noch unklar. Die Aktualität des Themas, der zunehmende Umfang der Diskussionen und meine Begeisterung für die Berge und den Wald lenkten mein Interesse auf diese Thematik. Die Chance die Waldgrenzendynamik an einem konkreten Beispiel zu analysieren wurde mir an der SLF – in Davos gegeben.

1.2 Grundlagen

Im Rahmen ökologischer Untersuchungen an der Waldgrenze stösst man immer wieder auf die Frage nach den Ursachen dieser deutlich wahrnehmbaren Vegetationsgrenze. Einige dieser so genannten "Grenzen" werden im Folgenden genauer beschrieben.

Gebirgswald

Der subalpine Gebirgswald nimmt weltweit eine herausragende Bedeutung im Hinblick auf den Schutz vor Lawinen und anderen Naturgefahren ein [OTT, 1997]. Eine geographische und standörtliche Gliederung der Alpen erfolgt in Nordalpen, Zentralalpen und Südalpen. Durch diese starke Gliederung des schweizerischen Alpenraums sind dabei die klimatischen Verhältnisse bei gleicher Höhenlage sehr verschieden. Eine generelle Einteilung der Höhenstufen der Alpen wird in drei Stufen vorgenommen: Obere, und untere subalpine Stufe sowie montane Stufe (Bergstufe). Die Definition Gebirgswald bezieht sich nur auf Wälder der subalpinen Stufe. Diese sind standörtlich stark schwankenden Bedingungen ausgesetzt. Insbesondere Gefahren durch Lawinenereignisse und extremen Witterungsverhältnisse spielen

vor allem für die subalpinen Waldgesellschaften eine grosse Rolle. Wesentliche Merkmale eines Gebirgswaldes sind ihre Heterogenität, der hohe Anteil von Starkholz und das Fehlen einer kontinuierlichen Verjüngung [LEIBUNDGUT, 1986].

Waldgrenze

Die Waldgrenze, eine äusserst wichtige und zugleich markante "Vegetationsgrenze", war schon früh, Gegenstand zahlreicher Untersuchungen. Sie verläuft nicht parallel zu Boden-, Gesteins- oder Reliefdiskontinuitäten. Eine einheitliche Definition des Begriffs existiert dabei nicht. Die Waldgrenze ist eine Art gedachte Linie, welche die höchstgelegenen zusammenhängenden Waldflächen innerhalb einer bestimmten Exposition und Hangneigung darstellt [BIRMANN ET AL., 2009; HOLTMEIER, 1985; GROSS, 1989].

Die alpine Waldgrenze wird auch von ELLENBERG [2010] als eine sehr auffällige Grenze des Gehölzwuchses bezeichnet. Wobei diese nicht als eine Art Trennlinie verstanden werden sollte, welche markant in der alpinen Stufe ins Auge fällt, sondern vielmehr als eine Abnahme der Waldproduktivität. Als Produktivitätsgradient wird durch ELLENBERG in erster Linie die abnehmende Temperatur in steigender Seehöhe genannt. Die alpine Waldgrenze ist somit laut ELLENBERG eine Art Wärmegrenze. Ab einer bestimmten Höhe ist die Vegetationsperiode für lebenswichtige Stoffwechselprozesse zu kurz, wodurch (neben anderen Faktoren) das Überleben eines Baumes erschwert wird. LEIBUNDGUT [1986] unterscheidet zwischen einer klimatischen und einer aktuellen Waldgrenze. Die klimatische Waldgrenze ist die Verbindungslinie der obersten Ränder von Beständen, welche im Inneren noch die klimatischen, vegetations- und bodenkundlichen Merkmale eines Waldes aufweisen. Ohne sowohl anthropogene, als auch Einflüsse wie zum Beispiel Lawinenzüge, Topographie, etc. würde der Wald bis zu dieser Grenze hinaufsteigen. Im Gegensatz dazu liegt die aktuelle Grenze meist tiefer, da durch Waldweide, Holznutzung und Rodung die Waldfläche bis zu mehrere Hundert Meter hinabgedrückt wird [HOLTMEIER, 1985; HOLTMEIER ET AL., 2005]. Eine exakte Definition und Eingrenzung der Waldgrenze ist damit derzeit noch nicht möglich. Zu viele Ungenauigkeiten und noch offene Fragen schränken die Definitionsmöglichkeit ein.

Krummholzzone

Wie aus dem Titel dieser Arbeit hervorgeht, liegt das Augenmerk der Untersuchung auf den höchstgelegenen Einzelbaumindividuen. Die obere Auflösungszone des Waldes wird auch Krummholzzone genannt. Diese Zone wird wiederum in eine Wald-, Baum- und Krüppelgrenze unterteilt. Es existieren dort lediglich einzelne Baumgruppen und Trupps. Das bedeutet, dass die Krummholzzone zwischen der Baumgrenze und Baumartengrenze einzuordnen ist. Alle natürlichen Umweltbedingungen sowie anthropogene Einflüsse wirken sich in dieser Höhenlage verstärkt aus. [TRANQUILLINI, 1979; LEIBUNDGUT, 1986]. Auch KÖRNER [1998] definiert die so genannte "Krummholzzone" als Grenze des möglichen Wachstums von einzelnen Baumarten.

Baumgrenze

Die Baumgrenze, in der ist ein Teil der Krummholzzone. In dieser Vegetationszone wurden die Aufnahmen dieser Arbeit durchgeführt. Die Baumgrenze entspricht der Grenzlinie der obersten Einzelbäumen und Baumgruppen mit einer Höhe von etwa 2 - 5 m. Die Definition der Höhe der Bäume variiert zwischen ELLENBERG [2010] und LEIBUNDGUT [1986]. Im Bereich der Baumgrenze gedeiht ein Baum nur in besonders günstigen klimatischen Perioden. Eine Vielzahl an sekundär limitierenden Faktoren spielen eine bedeutende Rolle [KÖRNER ET AL., 2006]. Nicht nur das Klima, sondern auch Mikrorelief, Eigenschaft des Bodens, Windverhältnisse und Schneebedeckung spielen eine entscheidende Rolle für die Existenz eines Baumes oberhalb der Waldgrenze.

Aus ökologischer Sicht wird die Baumgrenze in erster Linie durch den Mangel an Wärme gebildet [KALTENRIEDER ET AL., 2005]. Konsens herrscht darüber, dass niedrige Temperaturen, Wind, Mikro- und Makroklima auf grossflächigeren Gebieten, sowie fehlende Bodenfeuchte und Schneebedeckung auf eher kleinflächigeren spezifischen Teilgebieten in subalpinen- und alpinen Regionen die Haupteinflussfaktoren sind. Der Faktor "Stress" ist ein Synonym für die Verlangsamung des Wachstums der Bäume und eine Limitation, welche besonders in der Baumgrenze und der darauf folgenden Kampfzone auftritt. Typische Stresssituationen entstehen durch extreme Temperaturen, Lichtmangel- bzw. überschuss, oder Wasserknappheit [Körner, 2012]. Diese Limitation resultiert in niedrigen Baumhöhen im subalpinen Gelände, da bei zunehmender Höhenlage ein langsames Wachstum die Folge ist. Dennoch ist durch die veränderten Proportionen das Verhältnis von oberirdischer Biomasse und Wurzelmasse nicht verschlechtert. In der forstwissenschaftlichen Literatur ist dies ein gängiges Phänomen [MAIHE ET AL., 2004; BERNOULLI ET AL., 1999]. Die Differenzierung zwischen Baumgrenze und Einzelbaumwuchs ist graphische in Abbildung 1 dargestellt.

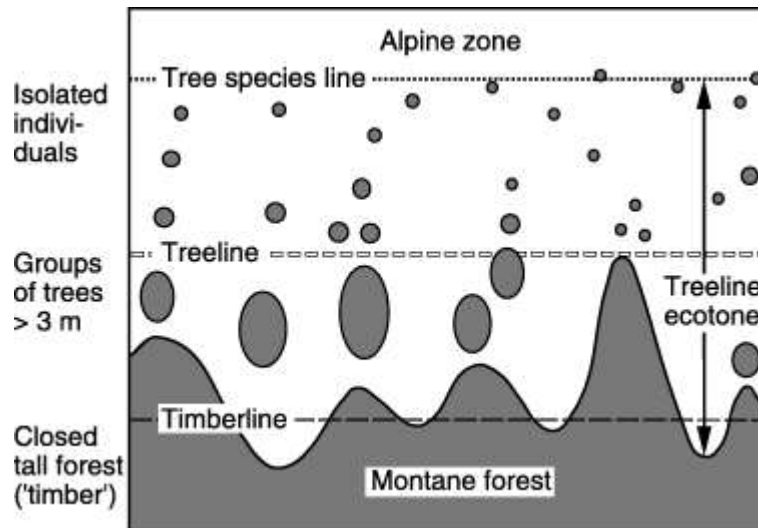


Abbildung 1: Schematische Übersicht der Nomenklatur oberhalb der Waldgrenze¹

Untersuchte Baumarten

Die in dieser Arbeit untersuchten Baumarten sind Arve (*Pinus cembra*), Lärche (*Larix decidua*) und Fichte (*Picea abies*). In der Schweiz bilden die genannten Baumarten hauptsächlich die obere subalpine Stufe. Vor allem die langlebige und frosttolerante Arve kann äusserst gut in rauem Klima überleben. Sie ist die frosthärteste Baumart, die in den Alpen vorkommt. Eine niedrige Fotosyntheserate, sowie eine saisonbedingte Kohlenstoffaufnahme sind Voraussetzung für das Überleben an der Wald- und Baumgrenze [BODEN ET AL., 2009]. Oft ist ihr Vorkommen auf Standorten zusammen mit der Lärche. Bis zu einer Höhe von 2400 m ist die Lärche zusammen mit der Arve häufig bestandesbildend. ELLENBERG [2010] betont, dass die Bedingungen der Lärche und Arve in den Zentralalpen der oberen subalpinen Stufe hart sind. Unempfindlichkeit gegen scharfe Fröste ist eine lebensnotwendige Voraussetzung. Die Lärche ist eine Pionierbaumart, welche grundsätzlich an das Leben in subalpinen Gebieten angepasst ist. Die hohen Lichtansprüche kommen ihr in der lichten Vegetation oberhalb der Waldgrenze zugute [BURSCHEL ET AL., 2003]. Auch die Fichte ist eine relativ lichtbedürftige Baumart, welche Dominanz in hochmontanen- subalpinen Gebieten zeigt und in höheren Lagen von Lärche und Arve abgelöst wird [ELLENBERG, 2010]. Hierbei ist zu differenzieren zwischen kontinentalen Alpen, in denen Arve und Lärche vorzufinden ist, hingegen in ozeanischen Alpen ist zudem die Fichte an der Waldgrenze wüchsig.

1.3 Offene Forschungsfragen

Die Höhe die Baumgrenze ist von zahlreichen Standortfaktoren abhängig und ihr Entstehen ist nicht anhand einer bestimmten Höhe definiert [Bernoulli, M., Körner, Ch., 1999]. Es ist bekannt, dass Bäume nicht in allen Höhen und Klimazonen vorzufinden sind. Die ist beispielsweise bei Zwergsträuchern anders. Als Teil der Bodenvegetation können sie

¹ Körner et al., 2004, S. 714.

vermutlich vom speziellen, günstigen Mikroklima in Bodennähe profitieren. Eine lange Kältephase und der damit einhergehende kalte bis gefrorene Boden in subalpinen oder alpinen Regionen wird als grösster limitierender Faktor für hohe Fotosyntheseraten und Wachstumsprozesse genannt [Wieser et al., 2007; Körner, 2012]. Mit fortschreitendem Alter muss sich ein Baum aufgrund des zunehmenden Abstandes zum Boden an eine immer kühlere Lufttemperatur anpassen. Das weitere Wachstum wird dadurch gehemmt. Dieser Punkt zwischen den Wachstumsphasen vom Sämling (ein gerade gekeimte Jungpflanze) zum Baum wird als "kritische Phase" bezeichnet. Dass Bäume weiterhin ein ungleiches Verhältnis zwischen Wurzel und oberirdische Biomasse aufweisen, ist ein weiterer Grund, weshalb ab einer gewissen Höhe fast ausschliesslich Bodenvegetation vorhanden ist. Denn der grösste Teil ihrer Biomasse dient nicht der Photosynthese, sondern ist lediglich ein unterstützender Faktor für die Photosyntheseproduktion. Das Verhältnis der Biomasse bei Bäumen ist daher in der Baumgrenze nachteilig und erschwert eine Balance zwischen Erwerb und Verbrauch von Ressourcen [Grace et al., 2002].

Eine weitere viel diskutierte Frage ist zudem, in welchem Ausmass der Klimawandel das Wachstum der Bäume oberhalb der Waldgrenze beeinflusst. Es ist anzunehmen, dass der Anstieg der durchschnittlichen Temperaturen einen Einfluss auf die ökologischen Prozesse oberhalb der Waldgrenze hat [HARSCH ET AL., 2009]. Zudem ist noch nicht zur Gänze geklärt, ob Klimawandel oder anthropogene Einwirkungen einen grösseren langfristigen Einfluss auf die Waldgrenzendynamik ausüben [KESSLER ET AL., 2007, GRACE ET AL., 2002].

Um einen möglichst guten Einblick in die Waldgrenzendynamik in den Alpen zu erhalten, gibt es mehrere Methoden. Eine Luftbildanalyse ist vor allem für weitläufige Gebiete eine gute Alternative, um sich einen Überblick zu verschaffen. Da vor allem oberhalb der Baumgrenze die Baumindividuen sehr klein sind, ist eine Erkennung auf dem Orthophoto bei dieser Methode jedoch nur schwer möglich. Eine weitere häufig angewandte Methodik sind dendrochronologische Untersuchungen. Dendroökologie bezieht Informationen aus den Jahrringen um Auswirkungen ökologischer Bedingungen über einen längeren Zeitraum zu rekonstruieren. Mit einer fundierten Jahrringanalyse können vergangene Ereignisse rekonstruiert werden. Es ist ein geeignetes Mittel, die Reaktion von Pflanzen auf extreme Standortsbedingungen zu ermitteln. Hierbei werden aber nur Einzelbäume untersucht, welche Rückschlüsse auf ein grosses Gesamtes geben. Ein Vergleich mit historischen Daten ist eine weitere praktikable Möglichkeit. Die Entwicklungen der Waldgrenze sind damit sehr gut nachzuvollziehen. In dieser Studie wurde daher auf diese Methodik zurückgegriffen, um die Veränderungen im Laufe der Jahrzehnte aufzuzeigen und mögliche Schlüsse für die zukünftigen Entwicklungen zu ziehen.

1.4 Vorstellung der zu vergleichenden Arbeit

Das Vergleichsmaterial für diese Arbeit stammt von Walder [1983], der in den Jahren von 1960 bis 1963 eine eingehende Kartierung des Dischmatal bezüglich der Ausaperungsverhältnisse durchgeführt hat. Zwischen 1971 und 1973 ist die Vegetation untersucht worden. In dieser Aufnahmeperiode wird die Kartierung der Zwergstrauchgesellschaften in den Jahren 1971/1972 vorgenommen. Die Suche der Einzelbäume wurde gezielt in den Sommermonaten der Jahre 1972 /1973 durchgeführt. Die Ergebnisse sind in seiner Dissertation zusammengefasst, die im Jahr 1983 im Rahmen der Mitteilungen der Eidgenössischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen veröffentlicht wurde. Die Kartierung der in grosse Höhen vorstossenden Einzelbäume der drei Baumarten Fichte (*Picea abies*), Lärche (*Larix decidua*) und Arve (*Pinus cembra*) wurde im gesamten Dischmatal exakt auf einer Karte dokumentiert. Flächiges Auftreten von Baumwuchs unterhalb der Einzelbäume wurde als Jungwuchsfläche bezeichnet. Diese Jungwuchsflächen wurden dabei der Übersichtlichkeit und Genauigkeit wegen differenziert nach Artzusammensetzung in der Karte eingetragen [WALDER, 1983].

Folgende Abbildung stellt einen Ausschnitt der Karte aus der Dissertation von Walder [1983] dar. Diese Karte war die Grundlage für die vergleichenden Analysen bezüglich des Einzelbaumwuchses bzw. des Vorkommens von Baumgruppen oberhalb der Waldgrenze, auf welche im weiteren Verlauf dieser Arbeit genauer eingegangen wird.

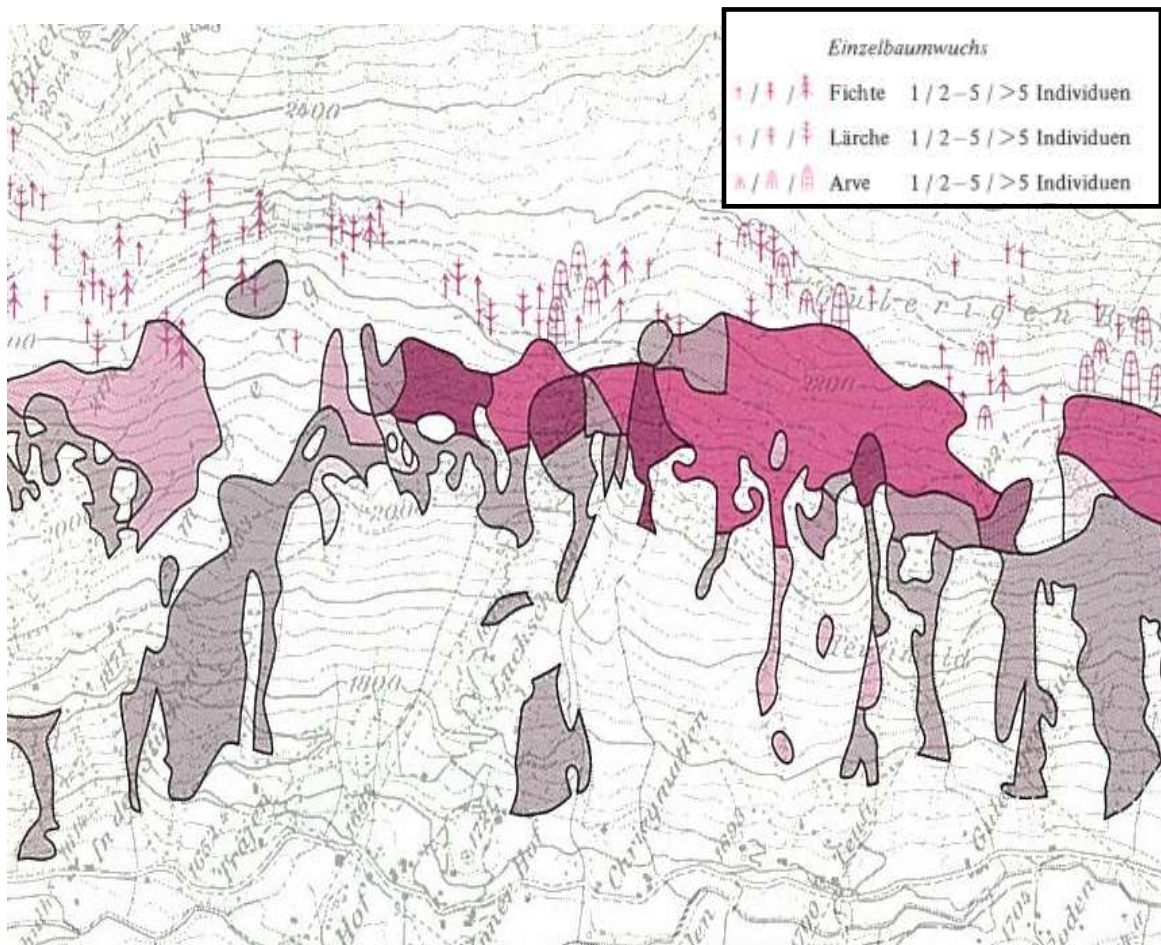


Abbildung 2: Ausschnitt der Karte "Jungwuchszonen und Einzelbaumwuchs ("Kampfzone") über der aktuellen Waldgrenze"²

1.5 Zielsetzung und Fragestellung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit liegt darin, die Entwicklung des Waldgrenzenverlaufs im Dischmatal bei Davos durch einen Vergleich mit den in der Aufnahmeperiode 1972 /73 aufgenommenen Baumpunkten aufzuzeigen. Dabei wird vor allem auf die gegebenen Standortfaktoren eingegangen. Mit Hilfe von statistischen Analysen und GIS soll aufgezeigt werden, welche Umweltfaktoren einen wesentlichen Einfluss auf das Wachstum der Einzelbäume ausüben. Die Arbeit soll zum besseren Verständnis der räumlichen und zeitlichen Dynamik oberhalb der Waldgrenze beitragen.

² Walder, U., 1983, Karte 7.

Mit dieser Zielsetzung verbunden sind folgende Forschungsfragen:

- Frage 1:** Durch welche standörtlichen Faktoren wird das Wachstum, die Baumhöhe und der Stammdurchmesser vor allem bestimmt?
- Frage 2:** Welche Veränderungen fanden innerhalb von 40 Jahren statt?
- Frage 3:** Welche Baumart zeigt die stärkste Reaktion?
- Frage 4:** Welche Umwelt- und Standortfaktoren sind ausschlaggebend für die Etablierung der Bäume zwischen den Aufnahmeperioden 1972 /73 und 2012?
- Frage 5:** Ist der Klimawandel ein entscheidender Faktor für die Waldgrenzenverschiebung?

Zu diesen Forschungsfragen können auf Basis der durchgeführten Arbeit verschiedene Hypothesen gebildet werden:

- Hypothese 1:** Das Baumwachstum wird entscheidend durch den limitierenden Faktor Höhenlage beeinflusst. Temperatur und Niederschlag sind weitere wesentliche Einflussfaktoren. Das Wachstum des Baumes, welches in starker Korrelation zum Stammdurchmesser steht, wird mit zunehmender Höhe niedriger [WIESER ET AL., 2007]. Vor allem im Bereich der Baumgrenze ist die Baumstatur ausschlaggebend für das Überleben. Das Höhenwachstum der Bäume in diesem Bereich ist stärker beeinträchtigt, als das Stammdurchmesserwachstum [KÖRNER, 2012]. Zudem wird angenommen, dass am Südhang sowohl die Bauhöhen, als auch der Stammdurchmesser im Durchschnitt höher liegt, die Exposition somit ein ausschlaggebender Faktor ist.
- Hypothese 2:** Der Anstieg der durchschnittlichen Temperaturen und die abnehmende Weidewirtschaft im Dischmatal haben zur Folge, dass die Baumgrenze im Vergleich zur Aufnahmeperiode 1972 /73 höher verläuft. Es wird angenommen, dass mehr Einzelbäume, bzw. Gruppen in den Lagen oberhalb 2200m vorgefunden werden.
- Hypothese 3:** Je nach sonstigen Lebensbedingungen gelangen unterschiedliche Arten zur Dominanz, da sich an Existenzgrenzen deutlich zeigt, wie ungleich die Arten auf verschiedene Umweltfaktoren reagieren [ELLENBERG, 2010]. Im Hinblick auf die Reaktionsfähigkeit ist die Arve weniger flexibel als die Licht- und Pionierbaumart Lärche. Diese besitzt die Fähigkeit einen breiten Vegetationsgürtel zu bewachsen. Sogar die Besiedelung von Rohböden- und Kahlfächen ist ihr selbst bei extremen Klimaverhältnissen möglich. Dennoch ist auch die Arve eine alpine Baumart, welche besonders exponierte Standorte

bewachsen kann, was Vorteile verschafft, beispielsweise Geländerippen zu bewachsen.

Hypothese 4: Die Höhenlage (m ü. M.) wird der am stärksten korrelierende Faktor bezüglich der Etablierung eines Baumes im Baumgrenzenbereich sein, da diese stark mit der Temperatur, dem Wasserhaushalt, Schneefall und Bodenbeschaffenheit zusammenhängt [WIESER ET AL., 2007]. Die Vegetation ist zudem von besonderer Wichtigkeit, da diese eine schützende Funktion bezüglich der mikroklimatischen Bedingungen besitzt. Des Weiteren wird angenommen, dass der Ausaperungszeitpunkt ein weiterer wesentlicher Faktor sein wird [Barbeito et al., 2012].

Hypothese 5: Fest steht, dass es bereits zahlreiche Untersuchungen gibt, die eine weitere Verschiebung der Waldgrenze nach oben, auf die durchschnittlichen höheren Temperaturen zurückführen [HARSCH ET AL., 2009; GRACE ET AL., 2002; KESSLER ET AL., 2007; LEONELLI ET AL., 2011; KÖRNER, 2012]. Es wird angenommen, dass der Zeitraum zwischen 1972 /73 und 2012 erste Veränderungen zeigen kann. Eindeutige Aussagen sind jedoch in Anbetracht des komplexen Zusammenspiels vieler Einflussgrößen schwer möglich. Vergleichende Analysen zeigen aber auf, unter welchen walddynamischen Rahmenbedingungen der Klimawandel wirkt und geben Hinweise, welche Trends durch Klimawandel erklärt, bzw. dadurch verstärkt werden.

2 Untersuchungsgebiet



Abbildung 3: Das Einzugsgebiet des Dischmatal bei Davos. Das Untersuchungsgebiet ist mit einer gestrichelten Linie abgegrenzt

Es ist hinzuzufügen, dass das Untersuchungsgebiet der vorliegenden Arbeit nicht die auf der Nordseite vorhandenen Seitentäler inkludiert. Eine Erfassung auch dieser Seite wäre auf Grund der kurzen Zeitspanne nicht zuverlässig möglich gewesen.

2.1 Allgemeiner Überblick

Die Schweizeralpen werden unter geomorphologischen und klimatischen Gesichtspunkten in Nord-, Zentral- und Südalpen unterteilt. Durch die starke Gliederung des Schweizer Alpenraums entstehen grosse klimatische Unterschiede.

Die "Landschaft Davos", (so die offizielle Bezeichnung für die politische Gemeinde), gilt als eine der meist untersuchten Gebiete Europas und liegt im Nordosten des Kantons Graubündens. Mit einer Fläche von 283 km² ist sie die zweitgrösste Gemeinde der Schweiz. Das Landwassertal ist das Haupttal der Landschaft Davos und verläuft von NNE nach SSW. In die Südostflanke des Haupttales münden die drei Seitentäler Flüela-, Dischma-, und Sertigtal. Der nordwestliche Teil des Landwassertals wird nicht von Tälern durchschnitten und endet im Parsenn- und Strelagebiet mit den Gipfeln Weissfluh, Schiahorn und Chüpfenflüe.

Davos-Dorf und Davos-Platz mit über 11.000 Einwohnern im oberen Abschnitt des Haupttales gelegen, zählen zu den grössten städtischen Siedlungen der Landschaft Davos. In den Seitentälern und in den übrigen Bereichen des Haupttales kommen einige kleinere, hauptsächlich landwirtschaftliche Siedlungen hinzu (Laret, Wolfgang, Frauenkirch, Glaris, Spina, Monstein und Clavadel) [GÜNTER, 1986].

Das Untersuchungsgebiet "Dischmatal" erstreckt sich von Davos aus gegen Südosten. Der Talboden ist auf 1560 m, der Talabschluss, welcher von einem Kranz Dreitausender (Piz Radönt 3076 m, Piz Grialetsch 3131 m, Scalettahorn 3068 m und Bocktenhorn 3047 m) eingefasst wird, liegt auf rund 2100 m. Dürrboden ist die letzte sich im Tal befindliche Alp. In die Sonnseite des Tales münden keine Nebentäler. Der Schatthang dagegen besitzt zwei grosse Nebentäler namens Rüedis- und Rhinertäli, welche beide auf einer Höhe von 2000 bis 2100 m einmünden. Generell ist festzustellen, dass die Hänge des Dischmatals beidseits sehr steil sind, da gut die Hälfte der Talfläche eine Neigung von 30 bis 50° aufweist [WALDER, 1983, HORAK, 1963].

Darüber hinaus ist das Dischmatal im Vergleich zu anderen Regionen in der Schweiz verhältnismässig geringen anthropogenen Einflüssen ausgesetzt. Es ist weder ein Durchgangstal, noch weist es touristische Anziehungspunkte auf wie beispielsweise Skilifte oder Sehenswürdigkeiten. Damit kann es als topographisch in sich geschlossener Raum bezeichnet werden, welcher von stark anthropogenen Belastungen weitgehend verschont blieb [VÖGELE, 1984]. Aufgrund seiner idealen Bedingungen ist es Untersuchungsgebiet zahlreicher wissenschaftlicher Arbeiten und Testgebiet des Projektes MAB-Davos. Das MAB- Projekt (Man and the Biosphere) war Bestandteil eines Forschungsprogramms der UNESCO. Das Dischmatal ist damit eines der meist untersuchten Gebirgstäler Europas.

2.2 Geologie und Böden

Das Dischmatal liegt im Gebiet der ostalpinen kristallinen Silvretta-Decke. Orthogneise (Kristalliner Schiefer aus Paragneisen und Amphibolen), welche aus Granit entstammen, nehmen dabei die Hauptfläche des vorderen Teils des Tals ein [VÖGELE, 1984]. Das Relief, Mikroklima und die Vegetation sind wesentliche Einflussfaktoren, welche die verschiedenen Bodenkörper formen. Auf der Forschungsfläche Stillberg wurden bereits zahlreiche bodenkundliche Untersuchungen durchgeführt [BLASER, 1980; GÜNTER, 1986]. BLASER [1980]

und WALDER [1983] beschreiben folgende Böden als typische Böden des Dischmatal, bzw. der Landschaft Davos:

Im Tal herrschen Podsolböden vor, welche in der subalpinen Stufe häufig unter Nadelwäldern vorkommen. Eine Podsolidierung sowie Anreicherung von ausgeprägten Eisenhumuspodsole ist vor allem nach kräftigen Niederschlägen auf der Schattenseite (Nordseite) unter Moos- und Zwergstrauchdecke gegeben. Generell entstehen Eisenpodsole u.a. bei tiefen Temperaturen und unter Vegetation mit schwer abbaubarer Streu. Dies hat die Bildung einer sauren Rohhumusschicht zur Folge, in welcher kaum Mikroorganismen vorzufinden sind. Podsole sind im gesamten Alpenraum verbreitet [SCHEFFER, SCHACHTSCHABEL, 2010].

Dagegen herrschen am Sonnhang (Südseite) andere Bedingungen zur Horizontbildung vor. Hier sind nur schwach podsolierte, aber humusreiche Böden zu erwarten, da die kleinklimatischen Bedingungen und geringere Nährstoffauswaschungen die Humusumwandlung und Streuzersetzung fördern [WALDER, 1983]. Die Geländerippen und Kuppen sind beidseitig stark windexponiert. Es handelt sich hierbei um Spezialstandorte mit starker Forsteinwirkung und edaphisch eher trockene Standorte mit flachgründigen Böden. Des Weiteren sind Silikat-Regosol, Gesteinsböden aus Lockermaterial mit geringer bis keiner Horizontierung sowie Silikatgesteinsboden (Lithosol) vorzufinden. Letztere sind Gesteinsböden, welche nur ein etwa 10 cm hohes Profil auf hartem Fels ausbilden können. Tiefe Temperaturen verhindern hier das Verwittern [FREI, 1983].

2.3 Klima

Die klimatischen Bedingungen im Dischmatal können als gemässigt zentralalpin oder kontinental bezeichnet werden. Generell ist zu sagen, dass das Klima in der Landschaft Davos enorm schwankt und die Region pro Jahr meist wenig Niederschlag aufweist (1007 mm) [ZINGG, 1961]. Eine geringe durchschnittliche Bewölkung, lange Sonnenscheindauer und geringer Windeinfluss bewirken zudem, dass sich die Landschaft Davos zu einem Kurort etabliert hat, dessen Klima einen kontinentalen Charakter aufweist. Zudem halten Bergketten starke Winde zurück, was zu hohen Temperaturen und sogar zur gänzlicher Windstille im Talboden führen kann. Im Gegensatz dazu sind die Gipfelregionen und Hanglagen der Täler hohen Windgeschwindigkeiten ausgesetzt [SCHÜEPP, 1961; GÜNTER, 1980].

Diese verschiedenen Klimacharaktere sind auch im Dischmatal vorzufinden. Nord- und Südteil des Tales haben unterschiedliche Niederschlagsmengen, die durch die angrenzenden Klimaregionen beeinflusst werden. (Die nördlichen Lagen beeinflussen den nördlichen Teil des Tales hinsichtlich des Klimas, die südlichen Lagen bringen die Niederschläge für den südlichen Teil.) Aus diesem Grund erhalten je nach Wetterlage die verschieden exponierten Hänge unterschiedliche Niederschlagssummen [URFER-HENNEBERGER, 1970]. Des Weiteren ist der untere Teil des Talbodens im Einflussbereich des Kaltwassersees des Landwassertals, wodurch die Vegetationszeiten extrem verkürzt werden. Der durchschnittliche Temperaturgradient im

Monat August kann bis zu 1.0°C / 100 hm betragen, wobei deutliche Unterschiede zwischen den beiden Talseiten gegeben sind [VÖGELE, 1984; URFER, 1981].

2.4 Vegetation

Es liegen zahlreiche Untersuchungen und Beschreibungen zum Wald des Dischmatal unter anderem von PRICE [1997], WALDER [1983], HEFTI [1986] und BEBI [1999] vor.

Wie bereits erwähnt bilden Fichte (*Picea abies*), Lärche (*Larix decidua*) und Arve (*Pinus cembra*) den Hauptanteil der subalpinen Baumarten in der Schweiz. Diese drei Baumarten bilden das Waldareal im Dischma. Die teilweise in dieser Klimaregion anzutreffende baumförmige Bergföhre (*Pinus montana*) fehlt gänzlich.

Nach TREPP [1959] reicht die subalpine Stufe von 1400 – 2200 m. Somit gehören die Fettwiesen des Talbodens, die Waldgesellschaften und Zwergstrauchgemeinschaften des Dischmatal zu dieser Stufe. ELLENBERG [2010] hält fest, dass vor allem in der oberen subalpinen Stufe Lärchen oder Arven vorherrschen. Den grössten prozentualen Anteil am Sonnhang nimmt der reine Fichtenwald, gefolgt von Fichten-Lärchenwald (*Larici Piceetum*) ein. Der Fichtenwald wird in zwei weitere Waldgesellschaften unterteilt, welche sich je nach Standortverhältnissen unterscheiden. Der Preiselbeer-Fichtenwald (*Piceetum subalpinum vaccinietosum*) dominiert die Südseite des Dischmatal. Auf der Nordseite kommt der Heidelbeer-Fichtenwald (*Piceetum subalpinum myrtilletosum*) hinzu, welcher feucht-kühle Standorte bevorzugt. Rund 80 % der Waldfläche ist mit diesen beiden Waldtypen bedeckt. Gemäss den Kartierungen von WALDER [1983] tritt auf der Nordseite fast ausschliesslich der Fichten-Arvenwald auf, da dieser vorzugsweise Felsen und Kuppen besiedelt. Die Arven haben an solchen Standorten wenig Konkurrenz. Die verschiedenen Kombinationen aus Fichten-Lärchenwald und Lärchen-Arvenwald wechseln sich mit dem reinen Fichtenwald ab, wobei der Anteil des Lärchen-Arvenwaldes auf beiden Talseiten der geringste ist.

Im hinteren Talabschnitt geht der Wald in einen Lärchen-Arvenwald (*Larici- Pinetum cembra*) über, welcher auch den Abschluss der kontinentalen Gebirgswälder bildet. Die Lärche als Lichtbaumart ist am Sonnhang prozentual am meisten vertreten, gefolgt von der Fichte. Die Arve nimmt nur einen kleinen Teil ein, der sich vor allem auf die höchsten Waldabschnitte beschränkt. Die Grünerle (*Alnus viridis*) kommt in Form des Grünerlengebüsch (*Alnetum viridis*) an besonders feuchten Stellen vor. Entlang der kleinen Gebirgsbäche- und Rinnsale ab der Talmitte, insbesondere auf der Südseite, ist dieser Typ vermehrt vorzufinden. Ab etwa der Mitte der Tallänge bricht der Wald auf beiden Talseiten abrupt ab. Dies ist auf anthropogene Einflüsse zurückzuführen, wie beispielsweise Waldweide, übermässige Holznutzung und Rodung. Hinzu kommt, dass Lawinen schneisenartig die Waldfläche reduzieren und damit Platz schaffen für die sehr rasch aufkommenden Zwergstrauchgesellschaften.

Als prozentual am meisten vorkommende Zwergstrauchgesellschaften sind zu nennen:

- Alpenrosen- Vaccinienheide (*Rhododendro -Vaccinetum*): Verbreitung an nördlich exponierten Hängen, schattigen Mulden, oder Grobschutthaldden
- Wacholder-Bärentraubheide (*Junipero- Arctostaphyletum*): Bevorzugt stark sonnenbestrahlte, wärmebegünstigte und bodentrockene Standorte

Das Hauptareal dieser Gemeinschaften ist zwischen 2000 m und etwa 2300 m Höhe, womit unmittelbar die bestehenden Waldgesellschaften abgelöst werden. Oberhalb dieses Verbreitungsgürtels ist eine starke Abnahme mit nur noch lokal vereinzelt Standorten festzustellen. Auf weitere vorkommende Zwergstrauchgesellschaften wird nicht genauer eingegangen, da diese nur etwa ein Drittel der Zwergstrauch-Gesamtfläche einnehmen [WALDER, 1983; ELLENBERG, 2010; KUOCH ET AL., 1975, BEBI, 1999, HORAK, 1963].

2.5 Land- und Forstwirtschaft

Nach LAELY [1952] ist der Besiedelungsbeginn mit dem Einzug der Walser in das Davoser Tal im 13. Jhd. anzusetzen. Die Schaffung von neuen potentiellen Bebauungsflächen geschah vor allem durch Brandsetzung. Diese effektiv durchgeführte Rodung bewirkte, dass man bereits im 16. Jhd. durch Gesetze versuchte, die Waldrodung einzudämmen. Im 17. Jhd. ist die Einführung von Bannwäldern versucht worden, um die übermässige Nutzung einzuschränken. Im weiteren geschichtlichen Verlauf entstand durch verschiedene Rechtsverhältnisse (von "gemeinen Walden", über genossenschaftliche Wälder zu Privatwälder) eine starke Zerstückelung des Waldes. Erst im Jahre 1876 wurden die Davoser Wälder als so genannte Gebirgswälder zu Schutzwäldern nach dem Bundesgesetz [LAELY, 1952; WALDER, 1983]. Ursprünglich war die "Landschaft Davos" bis zur klimatischen Grenze hin stärker bewaldet. Durch den Einzug der Walser im 13. Jhd. sind grosse Teile ehemaliger Waldflächen durch Axt und teils unkontrollierte Brände radikal vernichtet worden. Diese Bewirtschaftung führte dazu, dass ganze Talseiten bis heute frei von Wald blieben.

GROSSMANN [1927] berichtet, dass neben der Rodung die Waldweide ein entscheidender Faktor war, der den Waldanteil minderte. Der Wald war für Kleinvieh (Schafe und Ziegen) ein beliebter Weidegrund. Vor allem Ziegen schädigten die Bergwälder enorm. Erst durch die Davoser Forstordnung aus dem Jahre 1876 konnte der unkontrollierten Waldweide Einhalt gewehrt werden. Um den Schaden der früheren Jahrhunderte zu kompensieren, mussten daraufhin flächige Aufforstungen werden [PFISTER, 1978]. Aus diesem Grund sind bis zu 50 % der Bäume der Waldfläche Davos zwischen 50 und 100 Jahre alt. Sie wurden im selben Zeitraum gepflanzt [HEFTI, 1986].

Auch im Dischmatal wurde die Waldgrenze aufgrund von Alpweide nach unten verschoben, wobei das Ausmass der Schädigung nicht ganz so gross war. Beispielsweise ist die Region Dürrboden ein Gebiet, welches ehemals bewaldet war und durch Rodung und Lawinen zerstört worden ist [RIKLI, 1909]. Auf Grund der Unzugänglichkeit der Talhänge blieben einige der Waldflächen des Dischmatals dagegen verhältnismässig unberührt und frei von anthropogenen Einflüssen. Forstwirtschaft wurde dort kaum betrieben [LAELY, 1952].

3 Material und Methoden

3.1 Vorbereitende Arbeiten und Bildverarbeitung

Die Grundlage für die Waldabgrenzung bildete das digitale Orthophoto des Bundesamts für Landestopographie [SWISSIMAGE 2011]. Weiterhin wurden zur Identifizierung der Waldfläche, Rohdaten der Technologie des Airborne Laser Scanning, auch als ALS oder LiDAR bekannt, verwendet. Diese neue und weltweit anerkannte Technologie hat die traditionelle Photogrammetrie abgelöst. Mit Hilfe eines Scanners, der auf einem Flugzeug oder Helikopter montiert ist, kann dabei durch extrem kurze und rasche Laserimpulse die Entfernung bzw. Topographie direkt berechnet werden [LANDTWING, 2005]. Im Jahre 1999 wurde im Rahmen des Grossprojekts "LWN" (Landwirtschaftliche Nutzflächen) unter der Leitung der Landestopographie Swisstopo, zwei neue Höhenmodelle entwickelt, welche als Grundlage für die Erstellung von Orthofotos DOM sowie das DTM-AV dienen. Ziel war es eine durchschnittliche Dichte von einem Punkt pro 2 Quadratmetern zu erreichen [SWISSTOPO, 2007, ARTUSO ET AL., 2003].

Die gesamte Verarbeitung der Aufnahmepunkte, sowie die Klassifizierung der Waldflächen dieser Arbeit erfolgt mit der Software Arc GIS 10.0 (ESRI).

Um das wertvolle Kartenmaterial der Dissertation von Walder [1983] in digitaler Form zu erhalten, wurde dieses in höchster Pixelauflösung eingescannt. Mit Hilfe des Tools "*Georeferencing*" der Software GIS konnte die von Hand gefertigte Karte im jpg-Format eingelesen werden. Als Referenzkarte diente die Pixelkarte der Schweiz, Massstab 1:25.000 [SWISSTOPO, 2011]. Die bestehende Waldfläche zu definieren, stellte eine grössere Herausforderung dar. Die reguläre Definition von Wald konnte auf meinen Aufnahmebereich nicht angewendet werden, da die Bestandsstruktur oberhalb von 2000 m lichter wird und die Höhen der Bäume kleiner werden. Aus diesem Grund wurden verschiedene Tools angewandt, um die Waldflächenabgrenzung vorzunehmen. Die Daten des Laserscans, die im Jahr 1999 im Zusammenhang mit dem Projekt "Landwirtschaftliche Flächen" aufgenommen wurden, stellten dabei die Basis dar. Allerdings reichte die damalige Erfassung nicht höher als bis zu einer Seehöhe von ca. 2100 m.

Anhand der Laserscannerphotos erfolgten fokale Funktionen. Das aktuelle Orthofoto wurde als Rasterformat (Grid³) verwendet. Bei diesen Funktionen ist der Wert des Resultatgrids von den Werten des Inputgrids an denselben Stellen abhängig. Für die Berechnung zur Unterscheidung von Waldfläche gegenüber anderen Vegetationszonen, wurde nach einigen Versuchen das Pixelumfeld 6x6 m als am geeignetsten ermittelt, da hierbei der grösste Anteil der Pixel des Laserscannerfotos abgedeckt wurde. Um die Genauigkeit zu erhöhen und noch mehr mögliche Bäume in die Berechnung einzubeziehen, wurde die Funktion Maximum (*Focalmax*) benutzt. Diese berechnet

³ Grid bildet einen räumlichen Datensatz in einem Rasterformat mit einer bestimmten Zellgrösse ab.

den grössten Wert in der Umgebung des Inputgrids. In einem weiteren Schritt wurden mit dem Befehl *Raster Calculator* der Toolanwendung *Spatial Analyst* aus der definierten Waldfläche alle Flächen herausgefiltert, die eine Höhe über 2 m aufweisen. Ein Feinschliff der kalkulierten Waldfläche wurde durch den Befehl *Boundary clean* vorgenommen, um kleine Lücken und Kanten zu glätten.

Das so erzielte Ergebnis stellte eine erste Grundlage dar, die gegebene Waldfläche neu zu definieren. Alle Flächen, welche nicht in diese neue Ergebnismenge fielen, wurden im Nachhinein durch rein optische Ausscheidung eingeteilt. Die durch dieses Verfahren erstellte Karte war für eine Orientierung im Gelände unabdingbar und diente als Grundlage der weiteren Aufnahme. Auf ihrer Basis wurden gezielt die Gebiete abgegangen, welche laut Karte als "andere Vegetationszonen" definiert worden waren.

3.2 Aufnahmeverfahren im Feld

Die Aufnahmen wurden mit Hilfe einer speziellen Software für ein Mobiltelefon durchgeführt. Es ist ein elektronisches Feldbuch, welches ursprünglich für Vegetationsaufnahmen auf Berggipfeln programmiert wurde. Der Vorteil des Gerätes ist die automatische Bestimmung der X- und Y-Koordinaten bei Eingabe des Datenpunktes. Zudem können Höhe, Durchmesser und sonstige Bemerkungen zu den jeweiligen Punkten gespeichert werden. Die Datenausgabe erfolgt in tabellarischer Form im Excel-Format.

Die Aufnahmen der Baumpunkte wurden in den Monaten Juni und Juli 2012 durchgeführt. Mit dem elektronischen Feldbuch können die Positionen der Einzelbäume, bzw. kleiner und grosser Gruppen exakt aufgezeichnet werden. In Anlehnung an das Aufnahmeverfahren der Dissertation von Walder [1983], wurde eine Gruppenaufnahme durchgeführt. Hierbei wurde, im Gegensatz zu den früheren Aufnahmen, mit einem Flächenbezug pro aufgenommenen Gruppe gerechnet. Je Gruppe wurde stets das höchste Individuum vermessen und hinsichtlich der unten angeführten Parameter erfasst. Der Radius um die Mittelpunkte (=höchste Individuen) betrug 25 m. Diese Grösse wurde auf Grund der Auflösung des digitalen Höhenmodells DHM25grid mit einer Zellgrösse (x, y) von 25 m x 25 m gewählt.

Folgende Aufnahmeparameter wurden festgelegt:

- Gruppengröße:
 - kleine Gruppe 2-5 Individuen
 - grosse Gruppe > 5 Individuen
- BHD
- Höhe
- Schneeschimmelbefall (*Phacidium infestans*, bzw. *Gremeniella abietina*)
- Verbiss (Schalenwild/Weidevieh/Birkwild)

Die Messung des BHDs wurde mit einem Durchmesserband durchgeführt. Für das gesamte Gebiet wurde der Durchmesser mit einem Abstand von 30 cm über der Stammbasis gemessen.

Dies hat den Vorteil, dass so bei allen Bäumen ein Durchmesser aufgenommen werden kann, selbst wenn eine grosse Anzahl nicht eine Baumhöhe von 1,3 m erreichen. Für ein weit grösseres Gebiet des Dischmatales wurde der Durchmesser zusätzlich in Brusthöhe (1,3 m) gemessen, wenn die Baumhöhe grösser als 1,5 m erreichte. (Baumhöhe < 1,5 m: Durchmesser 30cm oberhalb Stammbasis im Abstand zum Boden ; Baumhöhe >1,5 m: Durchmesser 30cm oberhalb Stammbasis im Abstand zum Boden und zusätzliche Messung des Durchmessers auf Brusthöhe.)

Ein Baum wurde ab einer Mindestgrösse von 50 cm gewertet, da laut mündlicher Überlieferung Bäume ab "Kniehöhe" vermessen wurden. Diese Definition von "etablierten Baum" ist entscheidend, da ab dieser Grösse die Bäume aus dem schützenden Zwergstrauchmilieu herausgewachsen sind. Dadurch sind die jungen Bäume den klimatischen- und mechanischen Beeinträchtigungen ausgesetzt [KÖRNER, 2012]. Die Höhe wurde bei Bäumen mit starkem, als auch mit schwachem Säbelwuchs vertikal eingemessen. Generell wurde die Höhenmessung der Bäume bergseits mit einem Massstab durchgeführt. Es wurde nicht auf ein digitales Höhenmessgerät (z.B. das in der Forstwirtschaft gängige Instrument Vertex) zurückgegriffen, da Höhen über 4 m selten in der Kampfzone vorkommen. Für diese Arbeit ist die Genauigkeit der Höhen bis 4 m mit einem Toleranzbereich von +- 20 cm zu akzeptieren. Höhen über 4 m wurden durch persönliche Einschätzung festgestellt. Eventuelle Fehlmessungen wurden im Hinblick auf die dadurch mögliche Zeitersparnis in Kauf genommen. Bei der Messung wurde grundsätzlich ein Standpunkt bergseits des Baums eingenommen. Darauf wurde jedoch im Falle gefährlicher Hänge und an Standorten, an denen kein aufrechtes Stehen möglich war, verzichtet.

Ein weiterer erfasster Parameter war der Pilzbefall. Mögliche kategorisierte Pilzkrankheiten sind der weisse Schneeschimmel (*Phacidium infestans*) oder das Triebsterben (*Gremeniella abietina*). Es gibt bereits kleinflächige, mehrjährige Untersuchungen auf der Versuchsfläche "Stillberg" im Dischmatal über die Auswirkungen des Pilzbefalls auf das Wachstum der Arve an der Waldgrenze [BARBEITO ET AL., IN REVIEW]. Grossflächige Gebiete wurden diesbezüglich bisher noch keiner genauen Untersuchungen unterzogen. Die beiden Baumpilze *Phacidium infestans* und *Gremeniella abietina* vermehren sich aktiv in den Wintermonaten durch das Wachstum von Myzelsträngen. *Phacidium infestans* befällt in den Alpenregionen nur die Arve. Besonders kleinere Baumindividuen, welche in den Wintermonaten weitgehend unter der Schneedecke liegen, haben dadurch eine geringere Überlebenschance. *Gremeniella* befällt dagegen vor allem bereits geschwächte Bäume. In erster Linie werden Kiefern-Arten befallen. Bei starkem Infektionsdruck werden aber auch andere Gattungen (wie beispielsweise Lärche oder Fichte) befallen. Im Falle einer Infektion ist das Krankheitsbild eine rötliche Verfärbung der jüngsten Nadeln, ausgehend von der Blattbasis. Hingegen wird ein Befall von *Phacidium* durch eine bräunliche Verfärbung der Nadeln und Äste im darauf folgenden Sommer sichtbar. Im weiteren Verlauf eines Phacidiumbefalls erscheint das typische Krankheitsbild von weiss-grauen Nadeln [BARBEITO ET AL., IN REVIEW; WASERN ET AL., 2005]. Bezüglich der Kategorisierung des Befalls von Schneeschimmel wurden zwei Kategorien ausgewählt. Unterschieden wird zwischen starken und schwachen Befall. Schwacher Befall wird als solcher definiert, wenn nur einzelne Äste oder Zweige betroffen sind.

Tabelle 1: Kategorien Befall

	Einzelbaum	Gruppe kl./gross
Schwacher Befall	Einzeläste, bis zu 30% des Baumes befallen	Max. 2 Bäume "schwach befallen"
Starker Befall	Ab 30% des Baumes	> als 2 Bäume leiden unter 30% Befall

Bei den ersten 208 vermessenen Baumpunkten konnte der Parameter Verbiss noch nicht berücksichtigt werden. Dennoch kann repräsentativ für die gesamte Talfläche die Verbissituation veranschaulicht werden. Es wurde die gleiche Kategorisierung angewendet, wie beim Parameter Befall.

Tabelle 2: Kategorien Verbiss

	Einzelbaum	Gruppe kl./gross
Schwacher Verbiss	kein Leittrieb betroffen, jedoch Verbisspuren	Bis max. 2 Bäume schwacher Verbiss
Starker Verbiss	Leittrieb und Seitentriebe verbissen	> als 2 Bäume "stark verbissen"

3.3 Das MAB- Projekt Davos - Bearbeitung und Analyse der MAB-Daten

Ein wesentlicher Teil der vorbereitenden Arbeiten bezieht sich auf das MAB- Projekt Davos. Hierbei wird untersucht, ob anthropogene Einflüsse entscheidend auf Gebirgsökosysteme wirken. Das schweizerische Forschungsprogramm hat das Ziel, die gewonnenen Erkenntnisse direkt anzuwenden. Das MAB-Programm umfasst 4 Testgebiete, eines davon ist der Raum Davos. Dabei sollen insbesondere Zusammenhänge zwischen landwirtschaftlicher, forstwirtschaftlicher und touristischer Nutzung des Raumes und deren Auswirkungen auf die Umwelt geklärt werden. Die Arbeiten wurden 1981 aufgenommen. Im Jahr 1986 erschien die Herausgabe der Ergebnisse des MAB-Projektes Davos mit dem Titel: "Der Naturraum und dessen Nutzung im alpinen Tourismusgebiet von Davos" [WILDI ET AL., 1986]. Alle erhobenen Daten wurden digitalisiert und standen für diese Arbeit zur Verfügung. So war es möglich, eine Vielzahl an Informationen für Analyse und Interpretation zu verwenden.

Die Wahl der Variablen für die nachstehende Analyse basiert auf Überlegungen, welche Faktoren entscheidend für das Wachstum und Überleben von Bäumen oberhalb der Walgrenze sind. Die MAB-Datenfiles wurden aus dem bestehenden Punktformat in ein Rasterformat der Grösse 50 m x

50 m umgewandelt. In Klammern steht die abkürzende Bezeichnung des MAB-Datenfiles. Folgende Variablen wurden als ergänzende Faktoren gewählt.

Erstmalig aper (AP82DAYA)

Die Grundlage für die Ausaperungskarte bilden mehrere Satellitendaten, welche in den Jahren 1976 bis 1982 aus einer Reihe der amerikanischen LANDSAT-Serie (NASA) aufgenommen wurden. Es wurde eine Auswahl aus bereits bestehenden und neu aufgenommenen Satellitendaten getroffen. Durch Überlagerung von sieben ausgewählten klassifizierten Satellitenbildern entstand die Karte der relativen Ausaperung 1982. Sie gibt an, in welcher Reihenfolge die einzelnen Flächenelemente schneefrei werden (erstmalig aper). Der Ausaperungstermin variiert beträchtlich zwischen dem Talboden (Anfang Mai aper) und dem Versuchsfeld Weissfluhjoch auf einer Höhe von 2450 m (Mitte Juli aper) [MOSE ET AL., 1986].

Die verschiedenen Stufen der Aperungsvariable werden als ganze Zahlen repräsentativ für die Ausaperungsfolge angegeben. Folgende Zahlen geben die sieben verschiedenen Stufen der Ausaperungsfolge an und erscheinen bei der Umwandlung zum Rasterformat: 0, 69, 78, 96, 105, 112 und 180. Null bedeutet, die Werte sind ausserhalb des Untersuchungsgebietes. Auf Grund der Ähnlichkeit der fortlaufenden Tagnummern in der Dissertation von KELLER [1987], und dem Vergleich der abgebildeten relativen Ausaperungskarte, war folgende Annahme bestätigt: je grösser die eben erwähnten Zahlen sind, desto später der Ausaperungszeitpunkt. Bei später folgenden Interpretationen der Ergebnisse wurde eine umschreibende Einteilung der Kategorien vorgenommen. Der Ausdruck "sehr früh" (=69), "früh" (=78), "spät" (=96), "sehr spät" (=105) wurde repräsentativ für die Ausaperungsfolge verwendet.

Lawine (GEFAHR_5)

Eine Zusammenfassung der Definitionen der MAB-Legende und der angepassten, neu definierten Legende für diese Arbeit gibt Tabelle 3.

Tabelle 3: Übersicht des Gefährdungsfaktors Lawine

	MAB-Legende	Überarbeitete Legende
0	Keine Gefahr	Keine Gefahr
2	Potenziell	----
3	Erwiesene Gefahr	Erwiesene + potenzielle Gefahr

Das Mab-Datenfile ergibt eine dreistufige Einteilung dieser Variable, die neue Einteilung erfolgt binär (0 und 3). Das Gefahrenpotential „Lawine“ gibt die Wahrscheinlichkeit eines

Lawinenabgangs im bezeichneten Gebiet an. Die Regenerierung des Waldes und der Standorte oberhalb der Waldgrenze sind durch den Faktor "Lawine" in ständiger Bewegung.

Nutzung im Jahre 1982 (NUTZUNG_1)

Die Tabelle der Erhebungsmerkmale "Nutzung" war im Jahr 1982 ursprünglich in zehn Kategorien aufgeteilt. Da für die vorliegenden Analysen lediglich entscheidend ist, ob die Fläche bewirtschaftet oder unbewirtschaftet ist, wurden für die Analysen zwei Kategorien gewählt: bewirtschaftete und unbewirtschaftete Fläche. Fettwiesen, Alpwiesen, Mähder, Weiden, beweideter Wald entsprechen dem Wert 1 (bewirtschaftetes Land). Wert 2 steht für unbewirtschaftete Fläche und schliesst ungenutztes Land, nicht nutzbares Land, Siedlung, sowie Wald in seine Definition ein.

Vegetation (VEGET50E_3)

Insgesamt existieren in den MAB-Daten zehn verschiedene Einheiten. Um diese Arbeit zielgerichtet zu fokussieren, wurden die möglichen Vegetations- Grundeinheiten der MAB-Legende in den weiteren Analysen auf fünf Klassen reduziert. Die Klassifizierung beruht auf der Häufigkeit der im Dischmatal kartierten Vegetationseinheiten.

- Klasse 1: Zwergstrauch-, Spalierstrauch- und Hochgrasgesellschaften
- Klasse 2: Fettwiesen und Subalpine Magerwiesen
- Klasse 3: Subalpine Weiden und Lägerfluren
- Klasse 4: Alpine Rasen auf saurem Silikat
- Klasse 5: Schutt- und Rohbodenvegetation und vegetationslose Flächen

Folgende Einheiten wurden ausgeschlossen, da diese im Aufnahmegebiet nicht bzw. nur im geringen Ausmass auftreten: "Wald und Gebüsch", "Feucht- und Nassstandorte", "Alpine Rasen auf Serpentin" [Legende zu den MAB-Datenfiles].

Topographie (Krümmungswerte)

Werte, welche kleiner Null sind, bedeuten konkaves Gelände (Mulden). Grösser Null sind gleichbedeutend mit Kuppen und kleinen Erhebungen. Das Relief ist ein ausschlaggebender Faktor für die Etablierung der Bäume oberhalb der Waldgrenze und soll mit der Krümmung beschrieben werden.

Hangneigung

Exposition

Binäre Einteilung in Nord (1)- und Südhang (2).

Letztere (Topographie, Hangneigung und Exposition) wurden aus dem digitalen Höhenmodell dhm25 und der Anwendung *Spatial Analyst* mit den Befehlen "*Curvature*", "*Slope*" und "*Aspect*"

in GIS berechnet und modifiziert. Die hier aufgelisteten Variablen wurden sowohl an die Aufnahmepunkte 2012, als auch an die Vergleichsdaten 1972 /73 als zusätzliche Information hinzugefügt. Dies wurde durch Edit- Funktionen in GIS- Tools ermöglicht. Grundlage hierfür war die bereits digitalisierte Karte, in der die Standorte der Baumfunde von 1972 /73 eingezeichnet waren. Eine möglichst hohe Präzision war auch hierbei ausschlaggebend, da Ungenauigkeiten zur Verfälschung der Ergebnisse führen können.

3.4 Räumlicher Vergleich der Aufnahmepunkte der Aufnahmeperiode 1972° /73 und 2012

Um weitere Vergleiche durchführen zu können, ist eine genaue Identifizierung sowohl gleicher, als auch unterschiedliche Standorte von Bäumen der beiden Aufnahmeperioden nötig. Durch das bereits erwähnte Tool *Raster-Calculator* wurde es möglich, Bedingungen zu erstellen, um die Unterschiede darzustellen. Um einen exakten Vergleich zu erhalten, wurden die Flächen, welche in der Periode 1972 /73 als Jungwuchsflächen definiert wurden, als Polygon herausgeschnitten um den Fokus auf Einzelbäume bzw. Gruppen zu richten. Auf Grund der von Walder definierten Jungwuchsflächen, die mehrheitlich unter 2100°m vorkamen, ist ein Ausschluss von Baumpunkten unter 2100°m in den Rasterdaten des Jahres 2012 vorgenommen worden. Dadurch wurde eine einheitliche Vergleichsbasis geschaffen. Die Bezugsfläche der Rasterdatensätze mit der Grösse 50°m x 50°m, stellt eine pragmatische Clusterung zur Einteilung des Wachstums der Bäume dar. Auch hierbei wurde der Ausschluss der Raster unterhalb der genannten Höhe vorgenommen. Die Höhenlinie von 2500°m stellt die obere Grenze dar.

Folgende Rasterdatensätze wurden kalkuliert und in der weiterführenden Arbeit verwendet:

- Flächen, in denen im Jahr 2012 Bäume gefunden wurden.
- Flächen, in denen 1972 /73 Bäume gefunden wurden.
- Flächen, in denen 2012 Bäume gefunden wurden, nicht jedoch 1972 /73.
- Bezugsfläche, bzw. Fläche in der weder 1972 /73 noch 2012 Bäume wuchsen.

Als letzte vorbereitende Kalkulation wurde eine Auswahl von 500 Werten der Bezugsfläche getroffen. In Excel wurden Zufallszahlen für die gesamte potentielle Fläche kalkuliert. Eine rein zufällige Auswahl von 500 Zeilen wurde getroffen. Bei weiteren Analysen wurden diese ins Verhältnis zu den Aufnahmepunkten aus der Aufnahmeperiode 1972 /73 und 2012 gesetzt.

3.5 Statistische Analysen

Ziel der Analyse ist es, die Aufnahmepunkte aus dem Jahr 2012, sowie die Punkte von Baumfunden aus dem Jahr 1972 /73, darzustellen. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf den Vergleich der beiden Aufnahmejahre. Des Weiteren soll der Einfluss verschiedener Variablen auf das Vorkommen von Bäumen an der Waldgrenze dargestellt werden.

Die statistische Auswertung der Daten sowie deren grafische Darstellung erfolgte mit der Statistiksoftware R in der Version 2.15.1. Es sind als Vorarbeit mehrere Schritte notwendig, um den komplexen Datensatz richtig zu interpretieren. Alle Baumpunkte, welche unterhalb einer Seehöhe von 2.000 m aufgenommen wurden, wurden unberücksichtigt gelassen. Dadurch ist die Voraussetzung gegeben, repräsentative Analysen der Waldgrendynamik durchzuführen.

Für eine statistische Auswertung muss zuerst die Verteilung der Daten untersucht werden. Die Quantil-Quantil Plots und der Shapiro Test zeigten, dass die Werte der Baumhöhe, des Stammdurchmessers und des HD-Verhältnisses eindeutig nicht normalverteilt waren. Da die für parametrische Verfahren vorausgesetzte Normalverteilung der Datensätze nicht gegeben war, wurden die Analysen mittels nicht parametrischer Tests durchgeführt [FOWLER, 1998].

Für den Vergleich der Baumhöhen auf den beiden Talseiten (Nord- und Südhang) wurde ein zwei-Stichproben Wilcoxon-Test durchgeführt. Die Korrelation wurde anhand des Spearman-Rangsummentests geprüft, welcher den Spearman-rho-Wert (Spearman Rangkorrelationskoeffizienten) beinhaltet. Dieser Test ist vor allem für nichtparametrische Datensätze geeignet [DALGAARD, 2002]. Für die statistischen Untersuchungen zu dieser Arbeit wurde ein Signifikanzniveau von $\alpha=0.05$ gewählt. Vergleicht man den p-Wert (Irrtumswarscheinlichkeit) einer Untersuchung mit dem Signifikanzniveau α , so zeigt sich, ob die Ergebnisse signifikant ($p<\alpha$), oder nicht signifikant ($p>\alpha$) sind.

Zunächst wurden die aufgenommenen Daten deskriptiv analysiert und einfache univariat statistische und graphische Auswertungen mit den Datensätzen 1972/73 und 2012 durchgeführt. Eine erste Übersicht der vorhandenen Daten und ihrer Zusammenhänge konnte anschliessend erstellt werden. Im weiteren Verlauf wurde der Einfluss verschiedener Variablen auf das Wachstum, bzw. die Existenz von Bäumen mit multivariat statischen Analysen aufgezeigt. Für diese Analyse sind Klassifikations- und Regressionsbäume ("Classification and regression trees") geeignet, da diese den Umgang mit komplexen Umweltdaten ermöglichen. Darüber hinaus ermöglicht eine einfache nichtparametrische Regressionsanalyse den Umgang mit fehlenden Werten und der Nichtlinearität des Datensatzes. Der Einfluss der oben genannten Variablen und ihre komplexen Beziehungen und Abhängigkeiten können ermittelt werden. Ein weiterer Vorteil dieser Methode besteht darin, dass die Interpretation eines Klassifikationsbaumes durch die graphische Darstellung eines Dendrogramms erleichtert wird. Das Modell basiert auf mehrmaligem rekursivem Aufspalten des gesamten Datensatzes, was in Abhängigkeit der Einflussvariablen geschieht. Die dadurch entstehenden Untergruppen werden wiederum durch rekursive Berechnungen in möglichst homogene Untergruppen aufgeteilt. Bei kategorialen Variablen ist die Unterteilung der abzweigenden Äste gleichwertig mit der Anzahl der gegebenen Kategorien. Bei numerischen Variablen sind unendlich viele Möglichkeiten der Kombination für die Verzeigung gegeben [D'EATH ET AL., 2000; STROBL ET AL., 2009]. Die Eingangsvariable ist kategorisch: Baum (B), bzw. kein Baum (kB). Die in GIS berechneten Rasterformate stellen mit Ausnahme der Bezugsfläche die Eingangsdaten des Modells dar (siehe Gliederungspunkt. 3.4). Um einen aussagekräftigen Vergleich durchzuführen, wurden für jeden berechneten Klassifikationsbaum die gleichen Variablen eingesetzt. Das Stop- und Auswahlkriterium für die

eingesetzten Variablen ist der p-Wert. Ein Split wird durchgeführt und die Variable im Knotenpunkt aufgezeigt, welche am stärksten mit der Eingangs-Variable assoziiert [HOTHORN ET AL., 2006; STROBL ET AL., 2009]. Folgende Einflussvariablen wurden in diese Analyse miteinbezogen: Höhenlage, Exposition, Hangneigung, Vegetationsgesellschaften, Ausaperungszeitpunkt, Landnutzung und Topographie.

Auf Grund der Tatsache, dass einzelne Klassifikationsbäume unstabil gegenüber kleinen Veränderungen des ursprünglichen Datensatzes verhalten, wurde als zusätzliches Modell "Random Forest" gewählt. Hierbei werden zahlreiche unabhängige Klassifikationsbäume berechnet und in ein robustes Modell umgewandelt [BREIMANN, 2001]. Darüber hinaus kann die Reihenfolge des Einflusses der Variablen ("Variable importance") dargestellt werden. Auch STROBL et al. (2008) bestätigt, dass der Umgang mit "Random Forest" ein sicheres Tool für eine exakte Vorhersage der Einflussstärke der gegebenen Variablen darstellt, da hierbei jede einzelne Variable unabhängig, sowie in multivariaten Zusammenhänge mit anderen Variablen behandelt wird. Jeder zu kalkulierende Baum wird auf Basis eines verschiedenen ausgewählten Datensamples aus dem Originaldatensatz berechnet. Für jeden Split wird eine zufällige Auswahl von m- Variablen aus der Gesamtauswahl von M- möglichen Variablen, gewählt. Durch "Random forest" ist es darüber hinaus möglich den Einfluss von Variablen darzustellen ("Variable importance"). Durch den Algorithmus des Random Forest kann die "Variable importance" berechnet werden, um die Relevanz jeder einzelnen Variablen zu bewerten.

Die Berechnung der "Variable importance" wurde mit einer konditionalen Permutation durchgeführt. Zudem wurde die Rangfolge der "Variable importance" verglichen und nicht der absolute Wert der Berechnung. Der Algorithmus von "Random Forest" berechnete für jede Variable eines Baumes, die Missklassifikationsrate (in der Literatur als "out of bag"(=oob) bezeichnet. Das Ergebnis der "Variable importance" basierte auf dem Unterschied der Vorhersagegenauigkeit vor und nach dem Vertauschen einer Variablen und ergab den Durchschnitt aller in "Random forest" kalkulierten Einzelbäume [CUTLER ET AL., 2007; STROBL ET AL., 2009].

Drei verschiedene Datensätze wurden für die Berechnung der binären Klassifikationsbäume, des Random Forest und in diesem Zusammenhang stehende Berechnung der Variable Importance verwendet. Der Datensatz der Aufnahmeperiode 1972 /73, 2012 und zusätzlich der Datensatz, welcher die Entwicklung zwischen 1972 /73 und 2012 darstellen (2012 wurden an diesen Standorten Bäume gefunden, die 1972 /73 noch nicht existierten). Für diese Berechnung wurde der Datensatz von Lücken bereinigt. Zeilenreihen, in denen in einer Variablenspalte kein Wert gegeben war, wurde aus dem Datensatz entfernt. Dies führte nicht zu unnötigen Datenverlust, da je ein akzeptabler Prozentsatz von eins bis maximal drei Prozent der gesamten Daten nicht beachtet wurde. Die Klassifikationsbäume, sowie die Methodik "Random forest" im Zusammenhang mit der Gewichtung der Variablen ("Variable importance"), können durch das "party" add- on package der Statistiksoftware R erstellt werden [R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2012].

4 Ergebnisse

4.1 Situation 2012

Um einen ersten Überblick der aufgenommenen Daten zu erhalten, wird eine kurze Zusammenfassung der einzelnen Datensätze in diesem und folgenden Gliederungspunkt gegeben.

Der Datensatz der Nordseite ist etwas kleiner als der des Sonnhangs. Der Grund hierfür liegt an der Topographie und Hangneigung. Bereits WALDER [1983] berichtet, dass am Schatthang sehr steiles und felsiges Gelände vorzufinden ist. Generell wird in den Analysen im Hinblick auf den Vergleich der beiden Aufnahmejahre das Augenmerk auf die Exposition gelegt. In den folgenden Tabellen ist eine erste Übersicht über die Anzahl der aufgenommenen Baumindividuen bzw. Gruppen dargestellt. Die Datensätze wurden bereinigt, indem alle Baumpunkte, die unterhalb einer Höhe von 2000°m liegen, eliminiert wurden. Der Grund hierfür waren die Beobachtungen von WALDER [1983] und der persönliche Eindruck, dass die aktuelle Waldgrenze am Schatthang auf über 2000 m Höhe, am Sonnhang im Allgemeinen etwas höher, sogar in Steilpartien eine Höhe von 2100 m erreicht. In Tabelle 4 wird der Nordhang, in Tabelle 5 der Südhang des Aufnahmegebiets abgebildet.

Tabelle 4: Übersicht des Datensatzes "Nord" 2012

	Einzelbaum	Gruppe klein	Gruppe gross	Anzahl
Picea	22	16	---	38
Pinus	24	47	97	168
Larix	52	101	55	208
				Σ 414

Tabelle 5: Übersicht des Datensatzes "Süd" 2012

	Einzelbaum	Gruppe klein	Gruppe gross	Anzahl
Picea	68	54	16	138
Pinus	35	61	144	240
Larix	120	104	45	269
				Σ 647

Die im Folgenden verwandten Abkürzungen N bzw. S steht für Nord- bzw. Südhang des Dischmatals. Die Zahl steht für die Anzahl der Baumfunde. Auffällig ist in Tabelle 4, dass auf der

Nordseite keine einzige grosse Gruppe der Baumart Fichte gefunden wurde. Auch ist im Vergleich zu den anderen Baumarten die Fichte in allen Kategorien mit Abstand, am wenigsten vertreten (38 von insgesamt 414). Im Vergleich dazu ist sie als Einzelbaum (S: 68) auf der Südseite häufiger als die Arve (S: 35) gesichtet worden. Mit einer Gesamtsumme von 647 Baumfunden ist sie aber erneut mit der geringsten Anzahl von 138 vertreten. Auf beiden Seiten folgt die Arve (N: 168, S: 240). Am häufigsten ist insgesamt die Lärche vertreten (N: 208, S: 269). In den einzelnen Kategorien ist sie im Vergleich zu "Einzelbaum" (N: 52, S: 120) und "Gruppe klein" (N: 101, S: 104) bei "Gruppe gross" (N: 55, S: 45) nicht führend. In "Gruppe gross" war die Arve die am häufigsten kartierte Baumart (N: 97, S: 144).

4.1.1 Baumhöhe und Stammdurchmesser in Abhängigkeit der Exposition

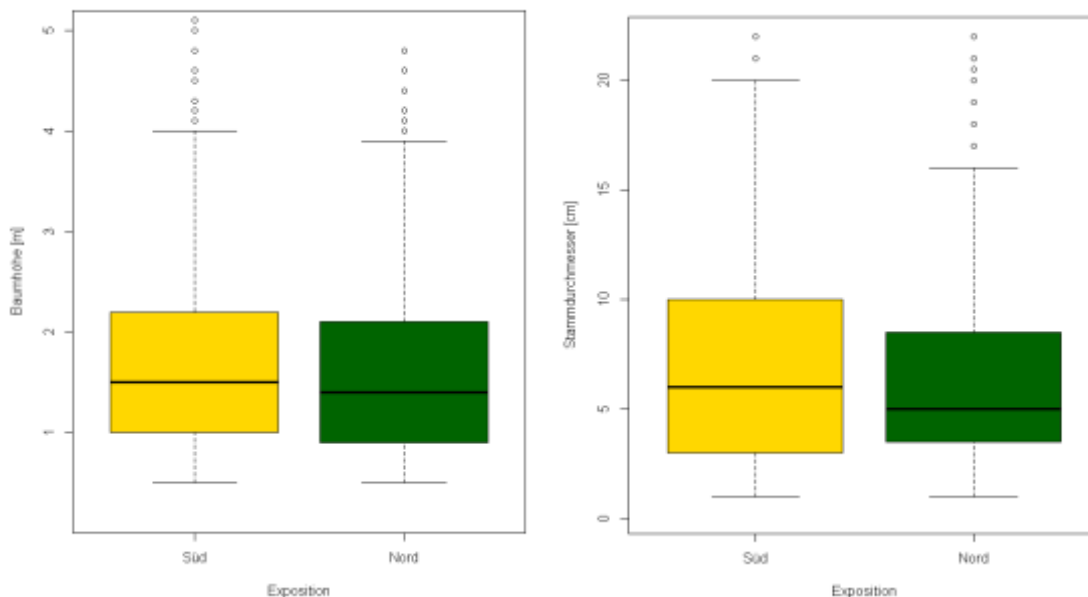


Abbildung 4: (a) Baumhöhe vs. Exposition (b) Stammdurchmesser vs. Exposition

Die Pflanzengrösse und der Stammdurchmesser sind auf der Südseite des Dischmatalts im Mittelwert (Median) jeweils grösser als auf der Nordseite. Das Minimum und Maximum ist oben in einem Boxplot der jeweiligen Variablen abgebildet. So wird ersichtlich, dass die Werte sowohl bei der Baumhöhe, als auch bei der Variable Stammdurchmesser der aufgenommenen Bäume ein weites Spektrum aufweisen und zudem einige Ausreisser beinhalten. Diese werden durch die Punkte oberhalb des Boxplots dargestellt. Anhand der graphischen Darstellung wird ein enger Zusammenhang vermutet. Der zwei-Stichproben Wilcoxon-Test für die Baumhöhe ergab ein signifikantes Ergebnis ($p=0.02$). Das Ergebnis der Berechnung des Stammdurchmessers der beiden Datensätze, ist nicht signifikant ($p=0.10$).

4.1.2 Zusammenhang von Stammdurchmesser, Baumhöhe und Höhenlage der untersuchten Baumarten

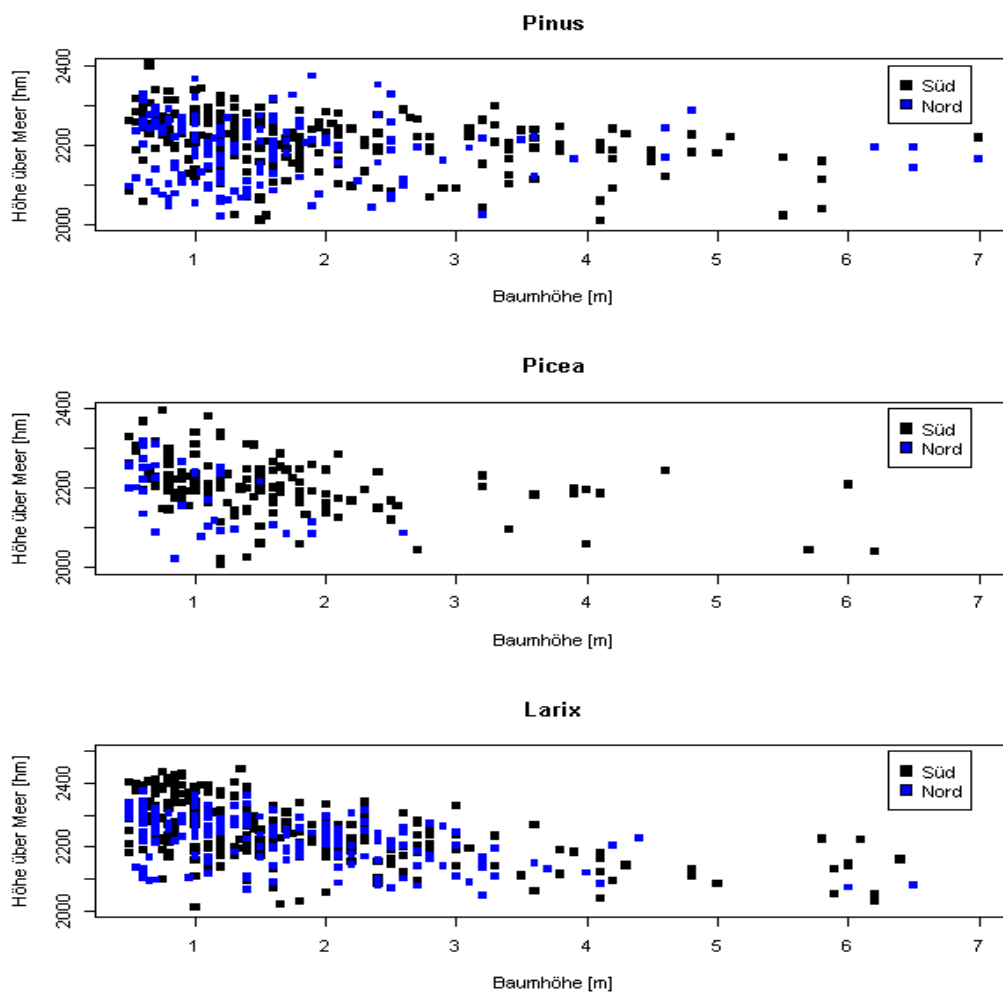


Abbildung 5: Korrelation Baumhöhe versus Höhenlage des Datensatzes 2012

Blaue Punkte sind repräsentativ für die Nordseite, schwarze Punkte für die Südseite des Dischmatal.

Mit zunehmender Höhenlage nimmt die Baumhöhe bei allen drei Baumarten ab. Lediglich das Ausmass der Abnahme ist stark abhängig von der Baumart. Die stärkste Abnahme ist bei der Baumart Picea und Larix gegeben. Bei der Arve ist die Korrelation nicht sehr stark, was sich auch in den statistischen Auswertungen zeigt. Dabei ist der Abfall der Lärche im Vergleich zur Arve eindeutiger.

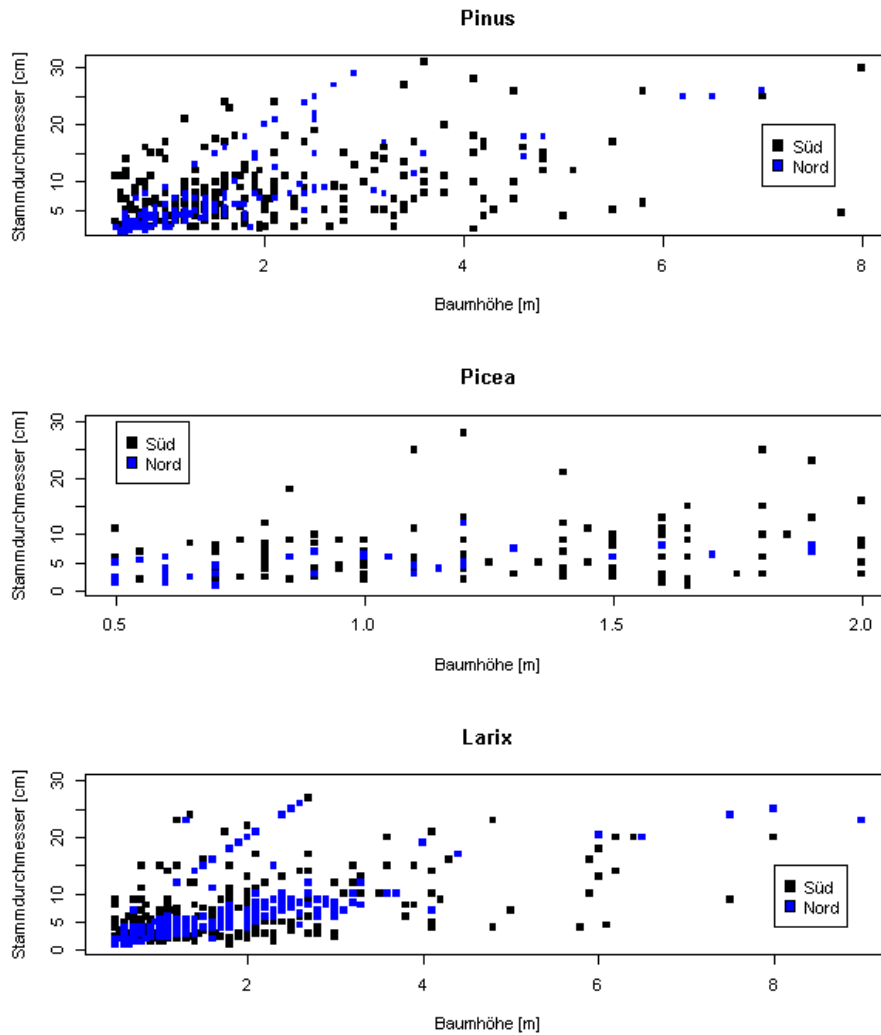


Abbildung 6: Korrelation Baumhöhe versus Stammdurchmesser des Datensatzes 2012.

Der Zusammenhang zwischen der Baumhöhe und Stammdurchmesser ist graphisch nicht eindeutig gegeben (siehe Abbildung 6). Die weite Streuung der Daten und die Akkumulation der Baumpunkte unterhalb einer Baumhöhe von zwei Metern zeigen die Charakteristik der Datenpunkte 2012. Bei der Baumart Picea ist bei dieser Korrelation nur ein sehr schwacher Zusammenhang gegeben. Auch bei Pinus ist die Streuung der Baumpunkte bis zu einer Baumhöhe von vier Metern sehr gross und lässt nur eine vage Tendenz erkennen. Ein Spearman-Korrelationstest wurde für beide Zusammenhänge berechnet um die Zusammenhänge rechnerisch zu testen. Tabelle 6 stellt die berechneten p- Werte und den Spearman rho Werte dar.

Tabelle 6: Ergebnisse des Spearman-Korrelationstests Baumhöhe versus Stammdurchmesser des Datensatzes 2012

Sehr stark korrelierende Spearman-rho Werte sind fett dargestellt. Die p- Werte sind durchwegs höchst signifikant. Der Spearman-rho Wert lässt auf eine starke Korrelation Baumhöhe versus Stammdurchmesser auf der Nordseite für alle Baumarten schliessen. Die Exposition ist hierbei ausschlaggebend.

Baumhöhe/Stammdurchmesser	p-Werte	Spearman rho
Picea N	<0.001	0.73
Pinus N	<0.001	0.83
Larix N	<0.001	0.82
Picea S	<0.001	0.33
Pinus S	<0.001	0.34
Larix S	<0.001	0.47

Tabelle 7: Ergebnisse des Spearman- Korrelationstests Baumhöhe versus Höhenlage des Datensatzes 2012

Lediglich schwach- bis moderate Zusammenhänge sind durch die Ergebnisse des Spearman-rho Werts berechnet worden. Ein Nord- /Südtrend ist nicht festzustellen

Baumhöhe/Höhenlage	p-Werte	Spearman rho
Picea N	<0.001	-0.60
Pinus N	<0.001	-0.15
Larix N	<0.001	-0.56
Picea S	<0.001	-0.41
Pinus S	<0.001	-0.38
Larix S	<0.001	-0.61

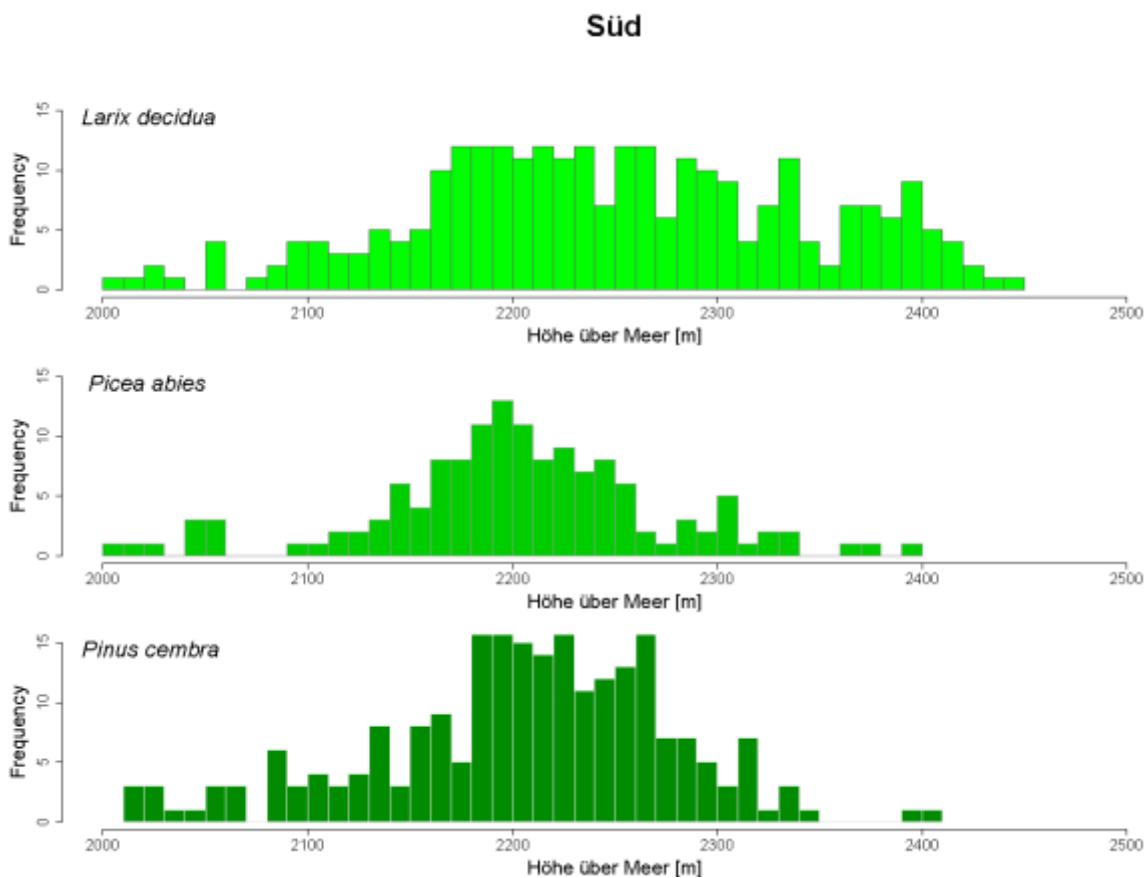
Für die bereits dargestellten graphischen Zusammenhänge wurde für alle Baumarten und beide Exposition Signifikanztests durchgeführt. Alle hierbei kalkulierten p-Werte waren höchst signifikant, was sich durch die starke Streuung der Datensätze erklären lässt. Zusätzlich wird der

Spearman rho Wert berechnet, welcher zum Ausdruck gibt, in welcher Stärke und Art die Korrelation gegeben ist [FOWLER ET AL., 1998].

Die Werte der Abbildung Baumhöhen versus Stammdurchmesser (Tabelle 6) zeigen trotz der graphisch nicht eindeutigen Darstellung, einen durchwegs positiven Zusammenhang, welcher auf der Nordseite sehr stark, bzw. stark, auf der Südseite wenig bis morderat korreliert. Es ist somit eine starke Expositionsabhängigkeit bezüglich des HD-Verhältnisses auf der Nordseite, hingegen eine schwache Abhängigkeit auf der Südseite gegeben.

Der ermittelte Zusammenhang Baumhöhe versus Höhenlage ist jedoch nicht sehr aussagekräftig. Es besteht ein negativer Zusammenhang, welcher in der Stärke lediglich zwischen schwach bis moderat variiert. Arve korreliert schwach auf beiden Talseiten, was bedeutet, dass die Auswirkungen der Höhenlage sich nicht so stark auf das Wachstum der Arve wirken. Hingegen Lärche und Fichte zeigen mit Werten zwischen -0.41 und - 0.61 eine durchaus moderat bis starke Korrelation. Dennoch ist kein Nord- / Südtrend festzustellen.

4.1.3 Verteilung der Häufigkeiten der Baumarten in Abhängigkeit von Höhenlage und Topographie



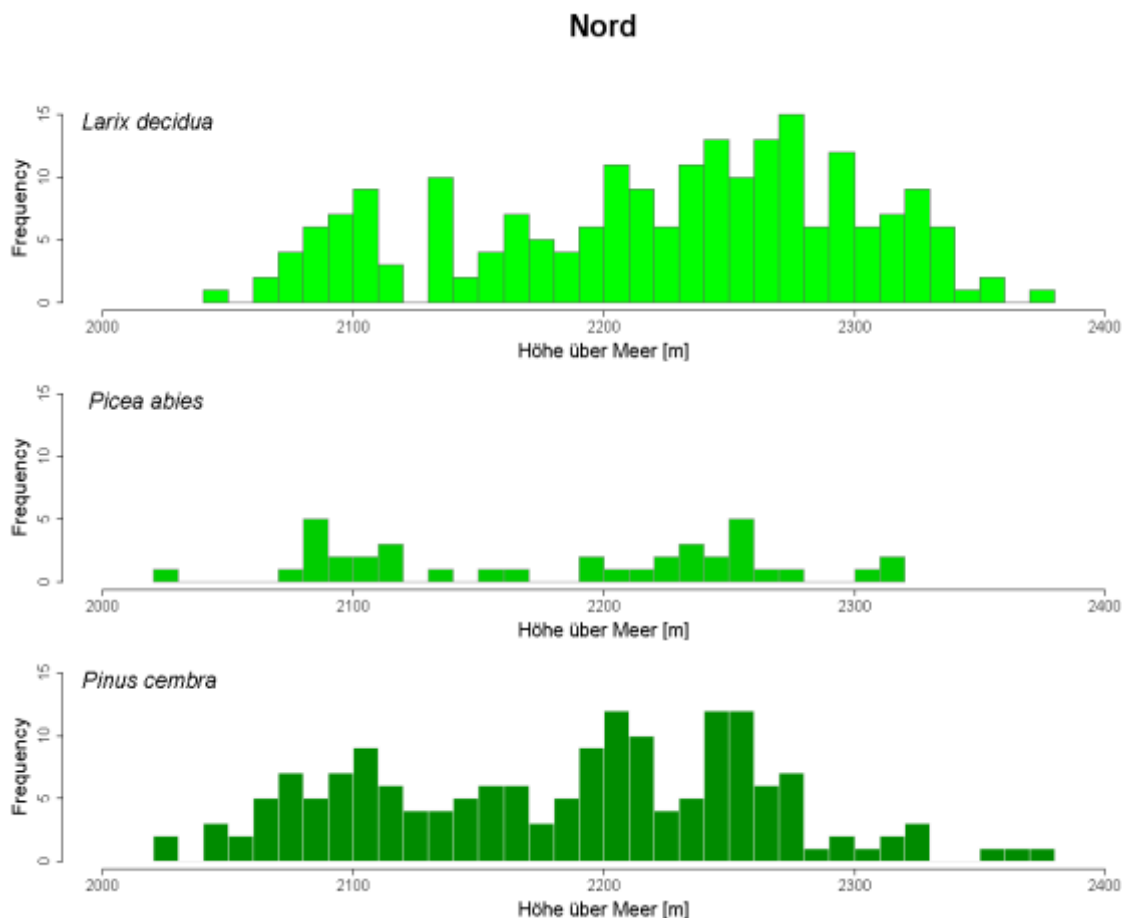


Abbildung 7: Verteilung der Baumarten in Abhängigkeit der Höhenlage auf Süd- und Nordseite

Die Barplots repräsentieren die Häufigkeit der einzelnen Baumarten in den verschiedenen Höhenstufen. Die Grünstufen repräsentieren die drei untersuchten Baumarten. Auf der Südseite reichen diese bis zu 2500 m, auf der Nordseite bis 2400 m.

Der Aspekt der Verteilung der Baumarten auf verschiedenen Höhenstufen ist in dieser Arbeit besonders hervorgehoben worden. Es soll damit ein Überblick gegeben werden, welche Baumart in Hinblick auf die stark limitierenden Umweltfaktoren die stärkste Konkurrenzkraft in höheren Lagen besitzt und sich somit langfristig zu etablieren vermag.

Aus Abbildung 7 geht hervor, dass die Lärche auf der Südseite des Tales Höhen bis zu 2.450 m erreicht. Auf der Nordseite bilden die Bäume in niedrigeren Höhenstufen von maximal 2.350 m die obere Baumgrenze. Insbesondere die Baumarten Lärche und Arve dringen in diese Höhen vor. Die Fichte etabliert sich südseitig bis zu einer Höhe von 2400 m, auf der Nordseite erreichen die höchsten Individuen eine maximale Höhe von knapp über 2300 m.

Während den Aufnahmen 2012 im Untersuchungsgebiet wurden folgende Individuen jeweils an höchst gelegener Stelle gefunden:

Südseitig wurde auf 2445 m eine Lärche, die höchste Fichte auf 2.380 m und eine Arve auf 2348 m (alle höchst gelegenen Funde fielen in die Kategorie *Einzelbaum*), gesichtet. Auf der Nordseite war ebenfalls die Lärche der höchste Einzelbaumfund auf 2376 m., gefolgt von der Arve (2373 m) und Fichte mit 2316 m.

Topographieaspekt

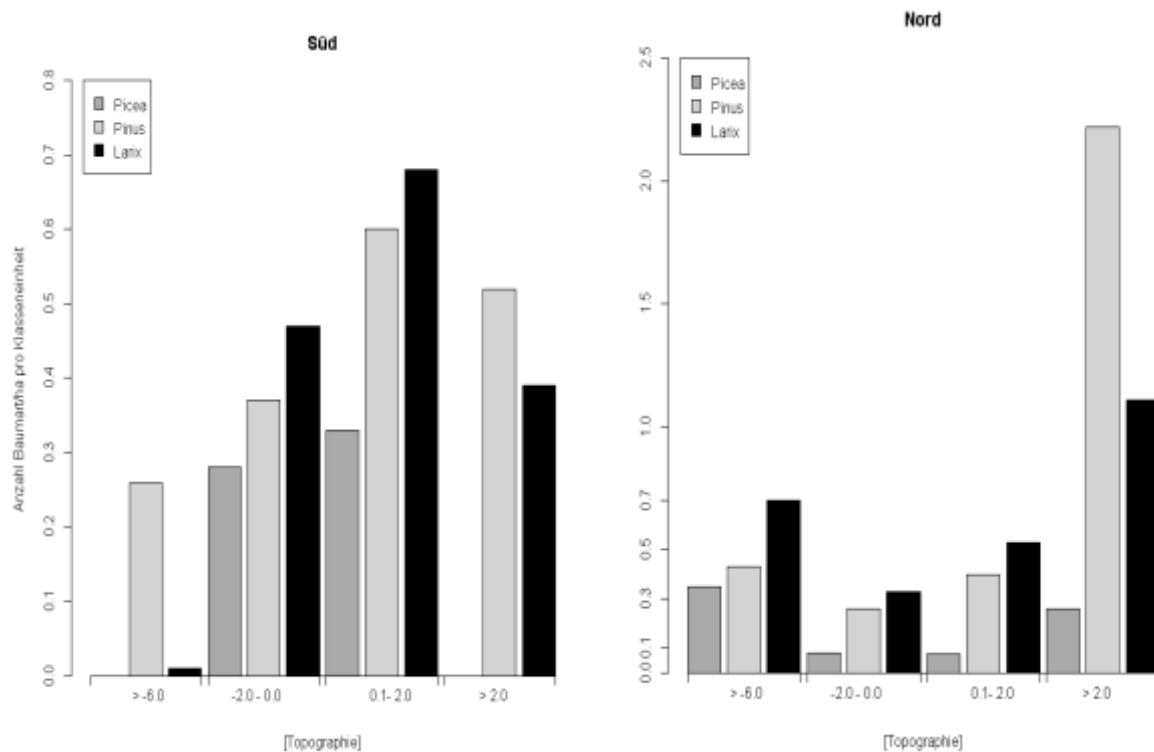


Abbildung 8: Topographieabhängigkeit der Baumarten auf Nord- und Südseite des Tals

Negative Werte stehen für Mulden, positive Werte sind Geländerippen oder Kuppen. Die in Graustufen dargestellten Barplots repräsentieren die verschiedenen Baumarten und die Anzahl pro Hektar und Topographieeinheit (Mulden/Kuppen). Negative Werte repräsentieren Mulden, positive Werte (>0) leichte Kuppen bis zu steilen Geländerippen.

Die grösste Anzahl von allen Baumarten ist auf Kuppen, bzw. Geländerippen gegeben. Alle drei Baumarten sind auf der Nordseite in tiefen Mulden, als auch auf Kuppen vorzufinden. Besonders die Arve ist auffallend mit einer hohen Anzahl im Topographieaspekt > 2 vermessen worden, was bedeutet, dass diese vor allem auf der Nordseite auf Kuppen und Geländerippen vorzufinden ist. Auf der Südseite ist eine nicht so starke Ausprägung vorhanden. Die kleinstandörtlichen Unterschiede sind hier nicht so gross wie es auf der Nordseite vorzufinden ist. Die meisten Baumpunkte befinden sich in einem leicht positiv gewölbten Gelände. Die Präsenz der Fichte ist

sowohl auf der Nordseite, als auch auf der Südseite kaum auf extremen Standorten (Geländerippen /starke Mulden) vorzufinden, eher in mittleren Lagen der Topographie (leichte Kuppen /Mulden).

4.1.4 HD- Verhältnis im Bezug zur Exposition

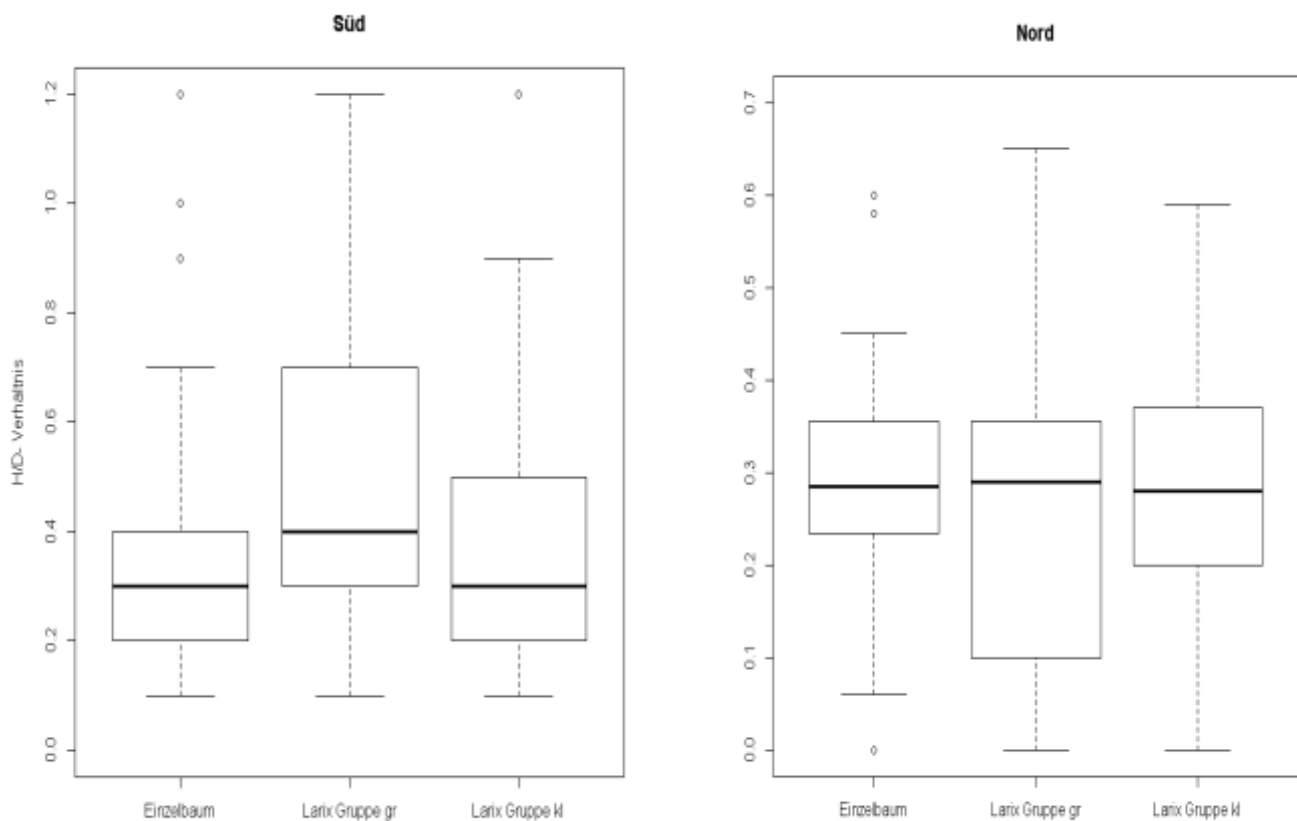


Abbildung 9: H/D Verhältnis der Baumart Lärche auf Nord- und Südexposition

Einzelbäume (Boxplot links), große Gruppen (Boxplot Mitte) und kleine Gruppen (Boxplot rechts)

Der Aspekt der Gruppenaufnahme steht nicht im Fokus dieser Arbeit. Dennoch soll anhand des Boxplots der Baumart Lärche in den verschiedenen Kategorien (*Einzelbaum* und *Gruppen*) der Unterschied zwischen den HD-Verhältnissen der verschiedenen Baumarten angesprochen werden. Die Lärche ist in Bezug auf das Höhenwachstum sehr sensibel und wurde somit beispielhaft in Abbildung 9 dargestellt. Der Gruppeneffekt und die Annahme dass der HD-Wert in grossen Gruppen höher ist, wurden visuell statistisch bei der Baumart Lärche und Arve nur auf der Südseite bestätigt. Für die Baumart Fichte hingegen werden sowohl in kleinen, als auch in grösseren Gruppen höhere Werte berechnet. Auf der Nordseite ist bei der Lärche (siehe Abbildung 9) kein entsprechender Effekt ersichtlich. Auf dieser Talseite zeigt sich für die Arve ein leicht erhöhter

Wert in der Kategorie *Gruppe klein*. Bei der Fichte konnten nordseitig keine grosse Gruppe gefunden werden. Auf der Südseite zeigt diese im Gegensatz zur Arve und Lärche ein identisches H/D-Verhältnis in der Kategorie *kleine* und *grosse Gruppe*. Eine rechnerische Überprüfung der Zusammenhänge zeigte jedoch nur in der Kategorie *Einzelbaum* signifikante Ergebnisse.

4.1.5 Verbissituation

Um einen weiteren äusserst wichtigen Aspekt in die Arbeit mit einzubringen, wurde der Verbiss kartiert, da dieser Faktor, die Etablierung der Bäume erheblich erschwert. Eine Darstellung des Verbisses pro Baumart in Prozent erfolgt nachstehend in Tabelle 8. Die Tabelle zeigt die Differenzierung des Verbissdrucks pro Baumart in Prozent der jeweiligen Baumart, aufgeteilt in Nord und Südseite des Tals.

Tabelle 8: Verbiss der Baumartenanteile auf Nord- und Südseite in Prozent des jeweiligen Baumart

Verbiss in %	Picea	Pinus	Larix	Gesamt
Nord	5.3	7.1	26.4	16.6
Süd	3.6	4.2	22.3	11.6

Die Lärche ist demzufolge auf beiden Expositionen die Baumart mit dem grössten Verbissdruck, gefolgt von der Arve. Bei Fichten wurde am Nordhang mit 5.3 % und Südhang mit 3.6 % der geringste Verbiss beobachtet. Auffallend ist zudem, dass der Gesamtprozentsatz von 16.6 % auf der Nordseite höher ist, wie auf der Südseite mit 11.5 %.

4.1.6 Der Weisse Schneeschimmel (*Phacidium infestans*)

Bereits nach wenigen Tagen Feldarbeit wurde ersichtlich, dass die Anzahl der befallenen Bäume mit der Krankheit *Gremeniella abietina* sehr gering bzw. nicht vorhanden ist. Daher wurde diese Befallskategorie in der Arbeit nicht weiter analysiert. Der weisse Schneeschimmel (*Phacidium infestans*) ist jedoch eine häufige, vor allem in alpinen Regionen verbreitete Pilzkrankheit der Baumart *Pinus cembra*.

Der Parameter "Schneeschimmel" wurde kartiert, um mögliche Auffälligkeiten des Befalls bezüglich der Exposition aufzuzeigen. Ein Befall ist flächig, ohne Ausnahme einzelner Teilgebiete, während der Suchgänge im gesamten Aufnahmegebiet gesichtet worden. Tabelle 9 stellt den Prozentsatz des Schneeschimmelbefalls (*Phacidium infestans*) des gesamten Datensatzes 2012 dar. Die Anzahl der auf der Nordseite sowohl *leicht*, als auch *stark befallenen* Arven beträgt 53. Auf der Südseite wurden hingegen insgesamt 148 Baumindividuen befallen. (Die Gesamtanzahl der Arven beträgt 168 auf dem Nord- und 240 auf der Südseite.

Tabelle 9: Übersicht des Schneeschimmelbefalls in Prozent

	Leicht	Stark	Gesamt [%]
Nord	21.4	10.1	31.6
Süd	51.7	10.0	61.6

Der deutliche Unterschied des Schneeschimmelbefalls zwischen Nord- und Südhang ist auffallend. Nur 31.6 % sind auf der Nordseite befallen, wohingegen 61.6 % auf der Südseite Befallsmerkmale zeigen. Dieser Unterschied ergibt sich aus der Kategorie *leicht befallen*. 21.4 % auf der Nordseite, hingegen 51.7 % des Bestandes auf der Südseite sind befallen. Die Kategorie *stark befallen* ist auf beiden Talseiten mit einem Prozentsatz von rund 10 % gleichermassen vertreten. Zwar ist der Gesamtprozentsatz von 61.6 % sehr hoch, doch nur 10 % auf beiden Expositionen fallen in die Kategorie *stark befallen*. Dies relativiert den sehr hohen Anteil auf der Südseite.

Weiterhin wurde der Zusammenhang zwischen dem Auftreten des Schneeschimmelbefalls und der Topographie untersucht. Von den insgesamt 148 auf der Süd- und 53 auf der Nordseite befallenen Arven (Kategorie *leicht* und *stark*) befanden sich sowohl süd- als auch nordseitig 63 % auf Kuppen/Geländerippen (konvexes Gelände) und 32 % (N) und 35 % (S) in Mulden (konkaves Gelände).



Abbildung 10: Von Schneeschimmel befallene Arve am Südhang des Dischmatals
(Foto Leibold, E.)

4.2 Übersicht der Daten der Aufnahmeperiode 1972 /73

In Punkt 3.3 wurde die Methodik erläutert, mit welcher die Karte der Baumfunde in digitaler Form gebracht wurde. Es ist zu beachten, dass die Genauigkeit der eingezeichneten Baumpunkte 1972 /73 nicht auf der gleichen Detailliertheit beruht als im Datensatz 2012. In Tabelle 10 sind die Baumfunde des Nordhangs, in Tabelle 11 die Baumfunde des Südhangs aufgelistet. Im Folgenden wird der Datensatz 1972 /73 auch als Vergleichsdatsatz genannt.

Tabelle 10: Übersicht des Vergleichsdatsatzes "Nord", aufgeteilt nach Baumarten und Kategorien Einzelbaum und Gruppen

	Einzelbaum	Gruppe klein	Gruppe gross	Anzahl
Picea	9	---	2	11
Pinus	14	9	4	27
Larix	42	25	8	75
				Σ 113

Tabelle 11: Übersicht des Vergleichsdatsatzes "Süd", aufgeteilt nach Baumarten und Kategorien Einzelbaum und Gruppen

	Einzelbaum	Gruppe klein	Gruppe gross	Anzahl
Picea	32	15	2	49
Pinus	11	11	6	28
Larix	59	24	2	85
				Σ162

Es ist festzustellen, dass die Anzahl der Baumfunde des Vergleichsdatsatzes im Hinblick auf die Exposition das gleiche Verteilungsmuster haben wie die Daten 2012. Auf der Nordseite wurde eine Gesamtanzahl von 113 Punkten, auf der Südseite 162 kartiert. Die Fichte konnte in diesem Datensatz in der Kategorie "Gruppe klein" nicht gefunden werden. Jedoch ist die Reihenfolge der Artenvertretung nur auf der Nordseite im Vergleich zu den Daten 2012 gleich geblieben: Auf der Nordseite ist die Lärche führend mit 75 Baumpunkten, gefolgt von der Arve mit 27 und der Fichte mit 11 Baumpunkten. Auf der Südseite ist zwar wiederum die Lärche mit 85 Funden an erster

Stelle, doch folgt dahinter die Fichte mit 49 und danach die Arve mit 28 Funden. Letztere hat auf der Südseite in der Kategorie "Gruppe gross" mit einer Anzahl von 6 die meisten Baumpunkte. Auf der Nordseite ist dagegen die Lärche mit 8 Baumpunkten am häufigsten zu finden, gefolgt von Arve mit 4 und Fichte mit 2.

Es ist festzuhalten, dass die Verteilung der Baumpunkte hinsichtlich der Exposition das gleiche Muster ergibt: Im Südhang wurden innerhalb des Aufnahmegebietes mehr Baumpunkte aufgenommen als am Nordhang. Des Weiteren ist der Unterschied festzuhalten, dass die Reihenfolge der Baumartenanzahl gegenüber dem Datensatz 2012, bis auf den Datensatz "1972°/73-Südseite" (Lärche>Fichte>Arve), gleich ist (Lärche>Arve>Fichte).

4.3 Veränderungen zwischen der Aufnahmeperiode 1972 /73 und 2012

Vergleich der Baumartenanzahl in zwei Höhenstufen

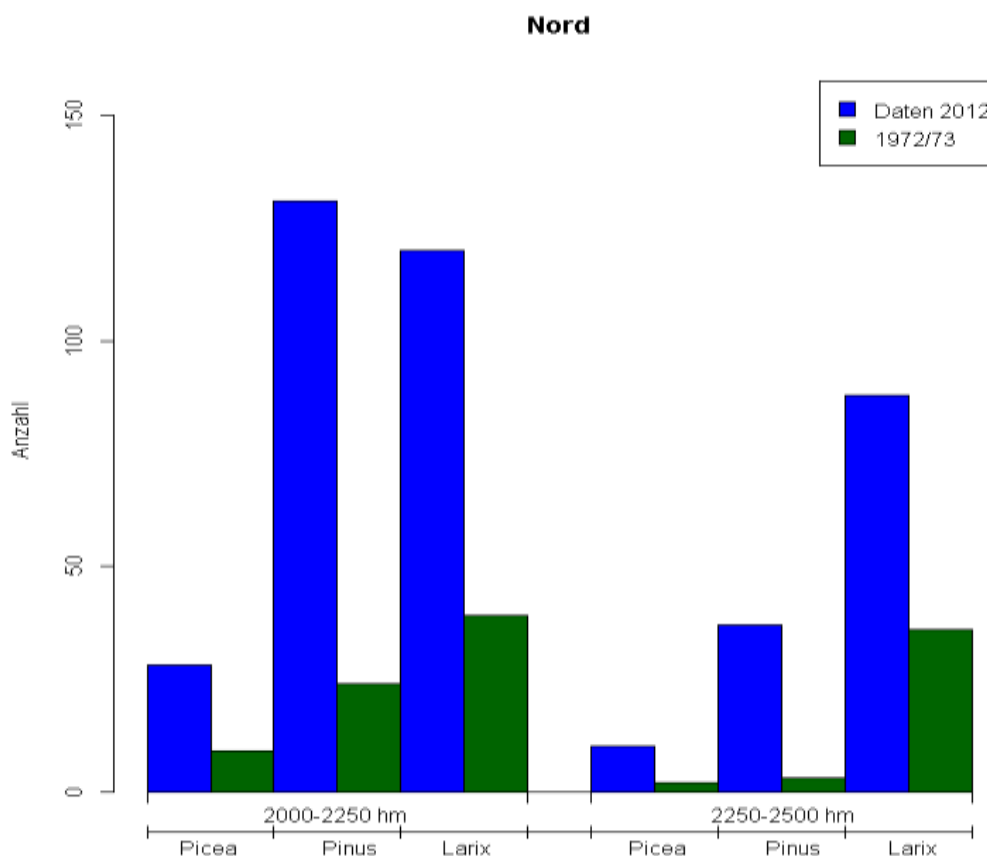


Abbildung 11: Vergleich der Datensätze 1972 /73 und 2012; Anzahl der Bäume für verschiedene Höhenstufen auf der Nordseite des Dismatals

1972 /73 (grüne Balken); 2012 (blaue Balken)

Die Unterteilung der x- Achse erfolgt in zwei Höhenstufen, die wiederum in die drei Baumarten unterteilt sind.

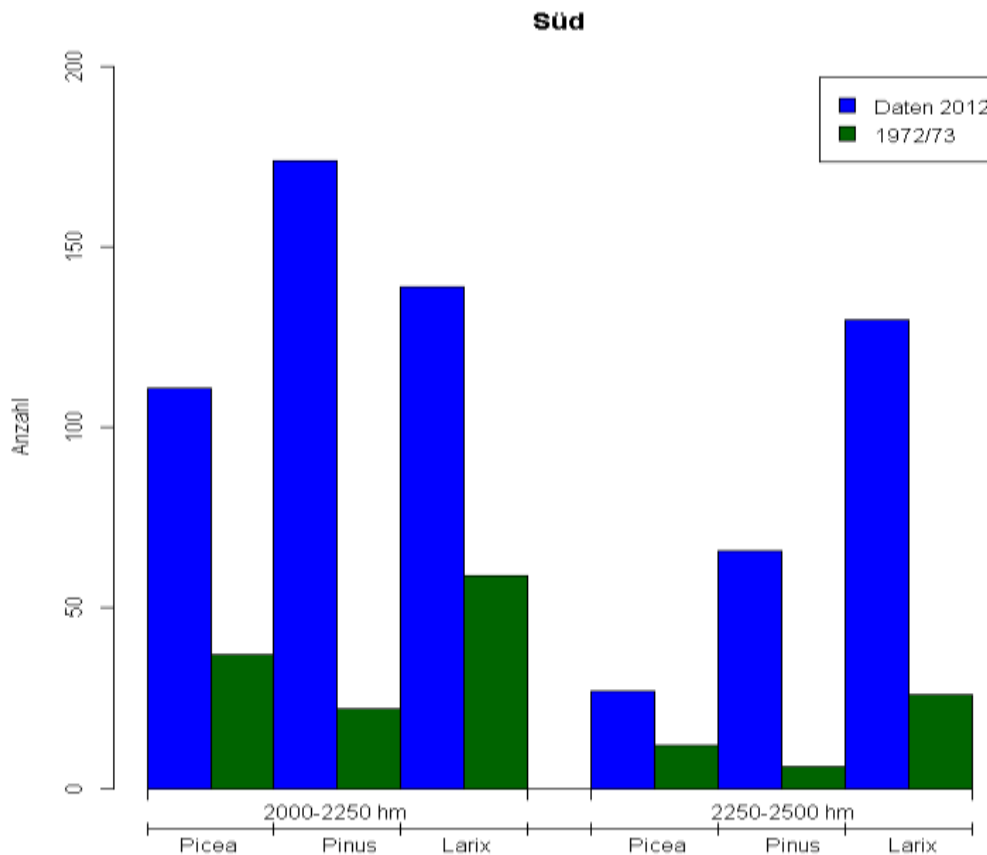


Abbildung 12: Vergleich der Datensätze 1972 /73 und 2012; Anzahl der Bäume für verschiedene Höhenstufen auf der Südseite des Dismatals
Darstellung s. Abbildung 11

Die quantitative Anzahl der vermessenen Einzelbäume- bzw. Gruppen hat sich seit 1972 /73 beinahe verdreifacht. Die Graphik enthält mehrere zu beachtende Aussagen. Es ist festzustellen, dass unter Berücksichtigung der Exposition der Trend der Baumartenverteilung in jeder Höhenstufe gleich ist. In der ersten Höhenstufe (2000 - 2250 m) ist die Arve die dominante Baumart, in der zweiten (.250 – 2500 m) die Lärche. Auf der Südseite ist, wie bereits aus der Übersicht der Situation 2012 und 1972 /73 hervorgegangen ist, eine deutlich erhöhte Anzahl jeder Baumart vorhanden.

Prozentualer Unterschied der Baumartenverteilung auf beiden Talseiten

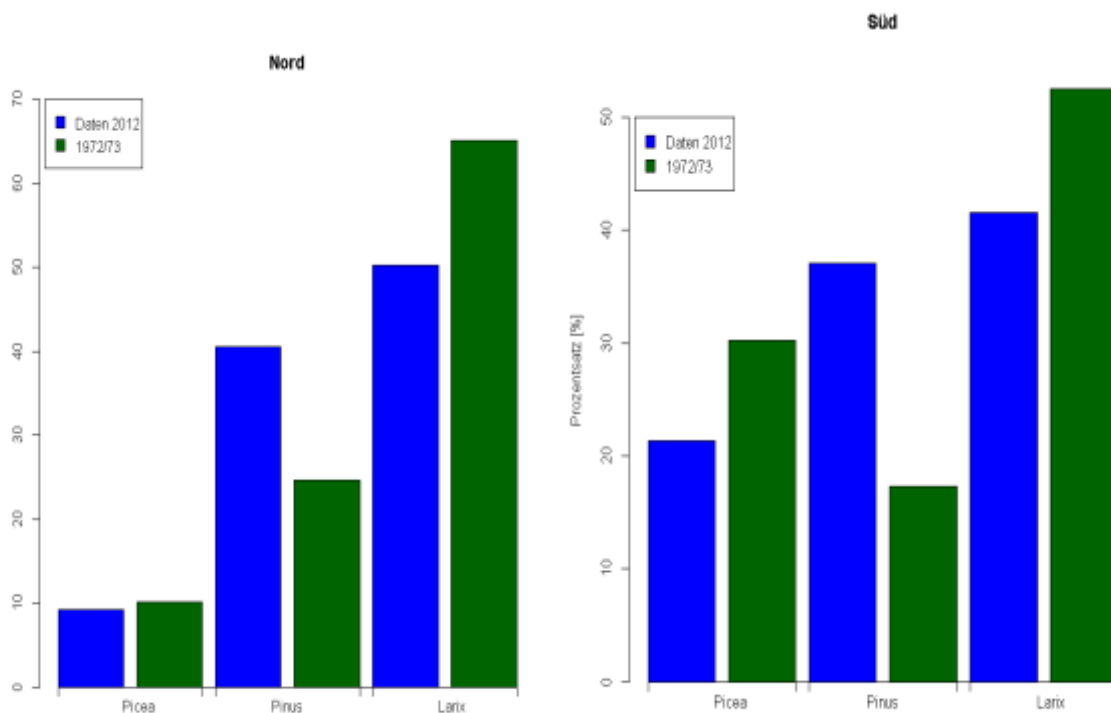


Abbildung 13: Prozentualer Unterschied der Baumarten 1972 /73 im Vergleich zu 2012 auf der Nord- und Südseite

1972 /73 (grüne Balken), 2012 (blaue Balken).

Ein prozentualer Vergleich zwischen der Aufnahmeperiode 1972 /73 und 2012 zeigt, dass sowohl auf der Nordseite, als auch auf der Südseite die Anzahl der Arten zugenommen hat. Mit 17.3 % Zuwachs auf der Nord-, sowie 20 % auf der Südseite zeigt die Arve prozentual den stärksten Anstieg. Die Lärche war hingegen in der Aufnahmeperiode 1972/73 mit einem Prozentsatz von 66 % auf der Nord-, bzw. 53 % auf der Südseite stärker vertreten, was bedeutet, dass ihre Anzahl um 11 % bzw. 15 % im Vergleich zu 2012 abgenommen hat. Bei der Fichte ist nordseitig keine grosse Differenz festzustellen. Auf der Südseite hingegen hat sich das Vorkommen von Fichte seit 1972/73 um 24 % erhöht. Im Gesamten ist wie in Abbildung 13 ersichtlich der Trend der Baumartenverteilung auf beiden Expositionen gleich.

Um den räumlichen Aspekt der gegebenen Veränderung zwischen den Aufnahmejahren zu veranschaulichen, ist in Abbildung 14 die Entwicklung zwischen 1972 /73 und 2012 im Rasterdatensatz dargestellt. Die rot abgebildeten Rechtecke zeigen, an welchen Standorten 2012 neue Baumindividuen gefunden wurden. Vor allem auf der Südseite des Dischmatals (obere rote Datenreihe im Kartenausschnitt) sind durchwegs vermehrt in höheren Lagen Baumindividuen vorgefunden worden. Doch auch in mittlere Lagen ab 2200 m sind neue Standorte im Jahr 2012 für

die Etablierung vorhanden. Diese Rasterfiles mit der Gridgrösse 50 x 50 m wurden für die weiteren Analysen bezüglich der Einflussvariablen auf die Etablierung der Bäume in GIS verwendet.

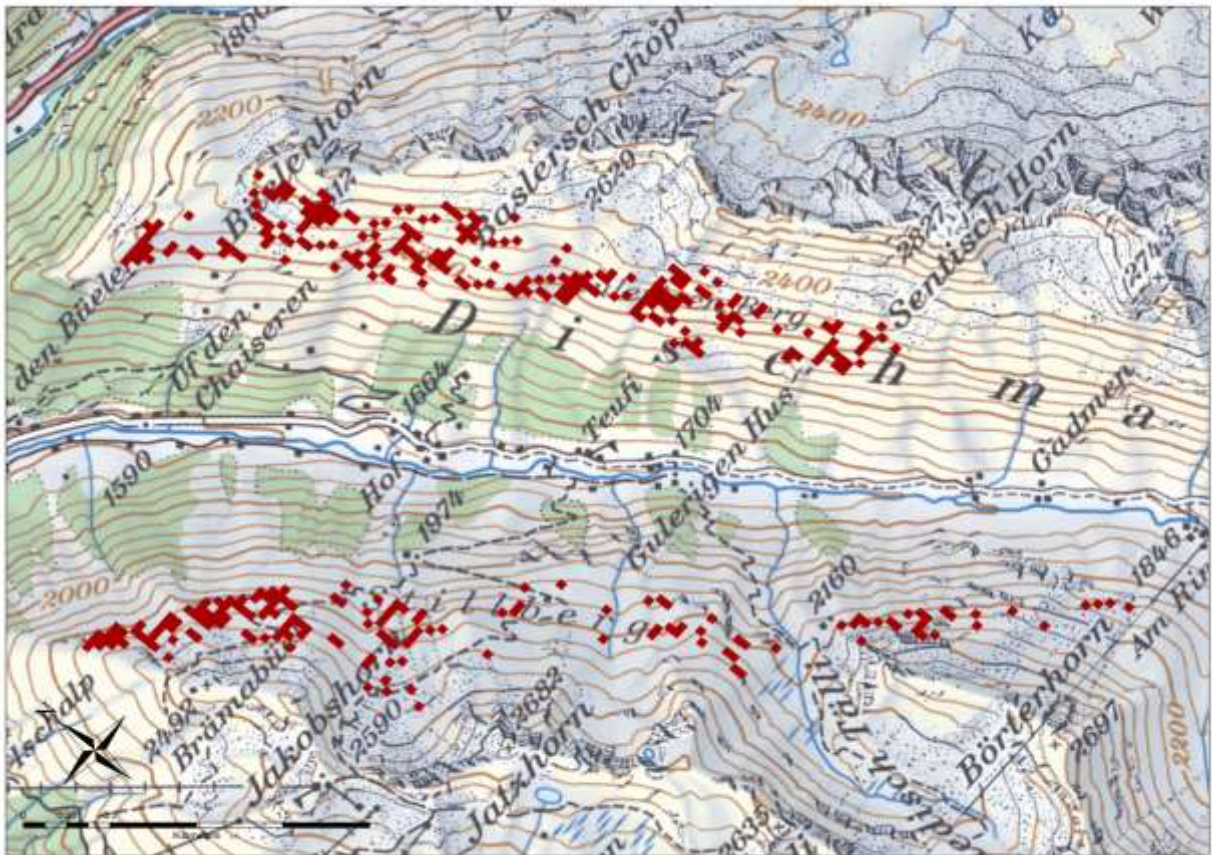


Abbildung 14: Ausschnitt des Untersuchungsgebiets: Rasterfile der Daten der Entwicklung zwischen 1972 /73 und 2012

Das 50 x 50 m Rastergrid stellt Standorte dar, an denen 2012 neue Baumindividuen gefunden wurden.

4.4 Ausschlaggebende Faktoren für die Etablierung der Bäume

Einflussvariablen 1972 /73

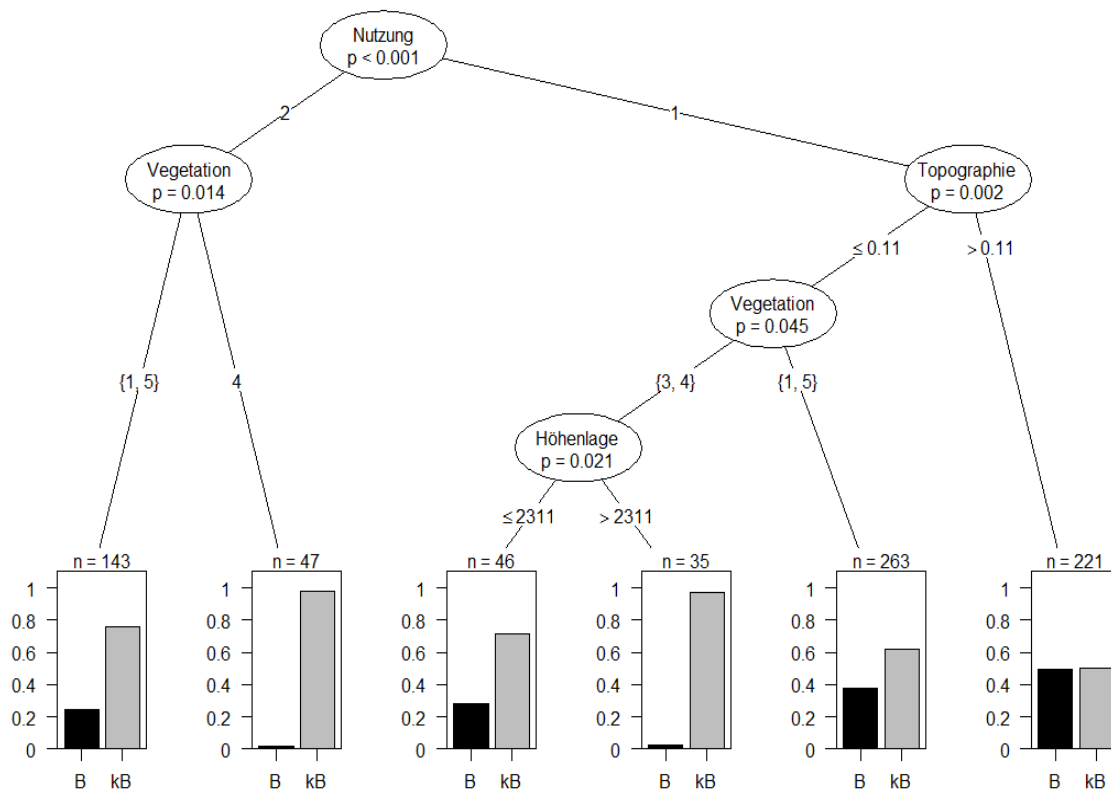


Abbildung 15: Klassifikationsbaum der Aufnahmeperiode 1972/73

Die Klassifikationsbäume basieren auf acht möglichen Einflussvariablen. Die Verteilung des Merkmals Baum (B), bzw. potentiell möglicher Wachstumsflächen auf denen kein Baum gefunden wurde (kB), wird im Endknoten anhand eines grauen und schwarzen Barplots wiedergegeben, welche die entsprechende relative Häufigkeit des Auftretens der Eingangsvariable veranschaulicht. Der n-Wert gibt die Anzahl des Merkmals Baum (B), bzw. kein Baum (kB) an, welche durch den dazugehörigen Ast beschrieben wird.

Der erste Knotenpunkt des abgebildeten Dendrogramms zeigt, dass die Landnutzung die stärkste Einflussvariable in Bezug zur Eingangsvariablen darstellt.

Die beiden Gruppen mit den grössten n^o-Werten werden repräsentiert durch den Einflussfaktor Nutzung in unbewirtschaftete Flächen (2) und bewirtschaftete Flächen (1). In letzterer Gruppe ist der Faktor Topographie stark signifikant. Die Gruppe mit n = 221 im Endknoten des Baumes ist auf Kuppen und kleinen Erhebungen (>0.11) vorzufinden. Kleiner als 0.11 ist die Vegetation ausschlaggebend. Der zweite Ast differenziert diese Gruppe des Knotenpunkts "Vegetation" einerseits in Strauchgesellschaften, bzw. Schutt- und Rohbodenvegetation (1, 5) und andererseits in

die Gruppe der subalpine Weiden und Lägerfluren (3) - und alpine Rasen (4) zusammen. Letztere stellt gleichzeitig die grösste Gruppe mit einer Anzahl von 263 Baumindividuen dar.

Einflussvariablen 2012

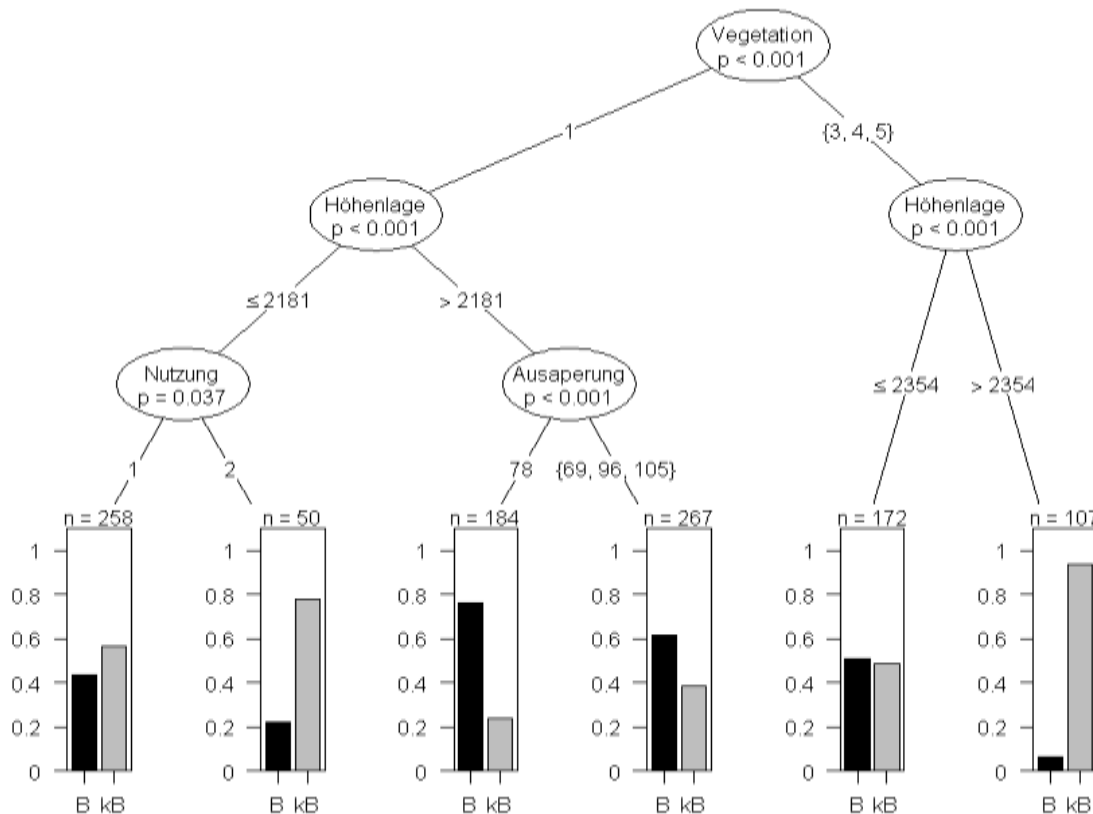


Abbildung 16: Klassifikationsbaum 2012

Der Unterschied zwischen beiden Aufnahmejahren ist bereits grafisch ersichtlich. Im Vergleich zu den Daten 1972 /73 steigt die Einflussnahme der kategorialen Variablen Vegetation, da sie hierbei nun im ersten Splitpunkt erscheint. Die Unterteilung dieses Splits erfolgt in die Kategorie Zwergsträucher und sonstige Vegetation, welche mit Subalpine Weiden, Alpine Rasen, sowie Vegetationslose Flächen vertreten sind. Sogleich nach der Vegetation ist die Höhenlage erneut eine der wichtigsten Einflussvariablen. Unterhalb von 2181°m spielt die Ausaperung eine wichtige Rolle. Die grösste Untergruppe bildet hierbei die Untergruppe mit einer Aufteilung der Ausaperung in früh, spät und sehr spät mit einer Anzahl von 267.

Einflussvariablen der Entwicklung zwischen der Aufnahmeperiode 1972 /73 und 2012

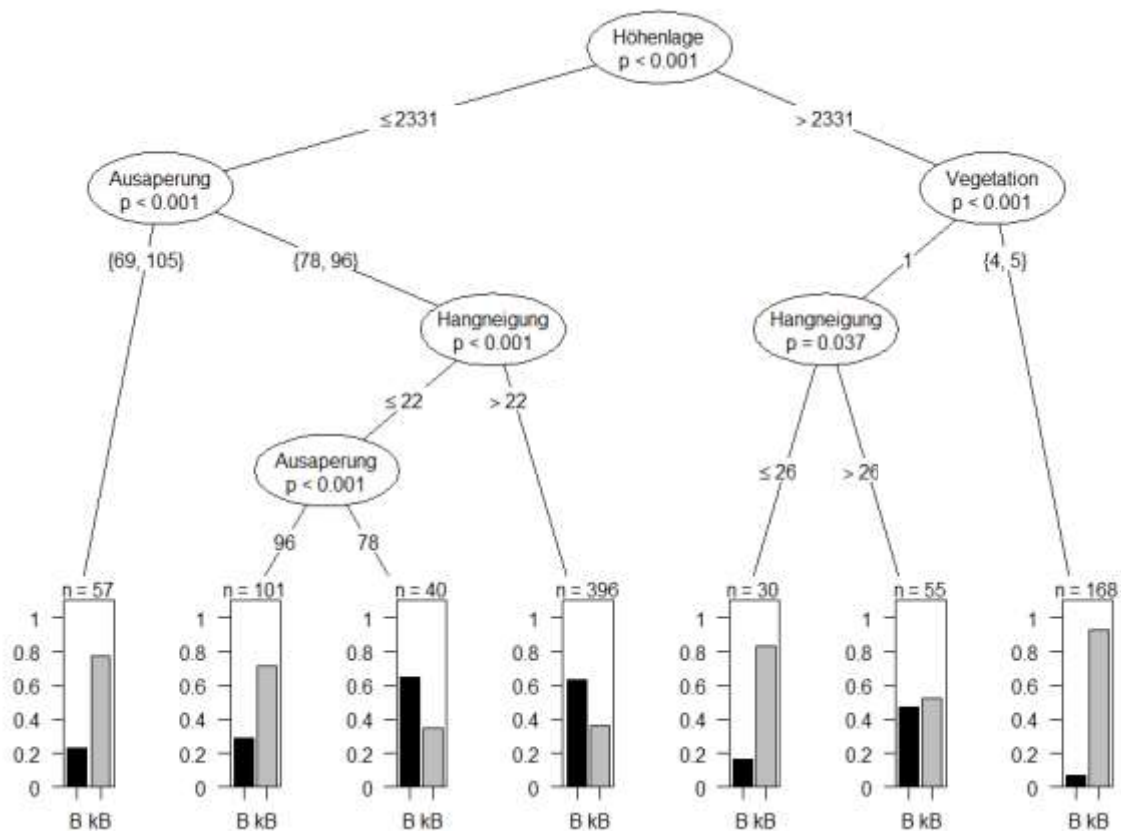


Abbildung 17: Klassifikationsbaum der Veränderung seit 1972/73

Die Höhenlage ist die am stärksten mit der Eingangsvariablen korrelierender Faktor, was bereits im Klassifikationsbaum 2012 ersichtlich ist. Bei der nächsten Unterteilung unter- und oberhalb von 2331 Höhenmetern ist Ausaperung und Vegetation zu nennen. Die grösste Untergruppe mit einer Anzahl 396 des gesamten Datensatzes von 871, bildet der Ast, die auch die Hangneigung oberhalb 22 Grad als dritte Einflussvariable enthält.

4.5 Darstellung der Bedeutung verschiedener Einflussvariablen auf Basis der Datensätze 1972 /73 und 2012

Durch die Verwendung des gleichen Datensatzes sollte erwartungsgemäss die Reihenfolge in den einzelnen Datensätzen, zwischen den aufgespalteten Faktoren in den Klassifikationsbäumen und der *Variable Importance* nicht sehr stark voneinander abweichen. Das bedeutet, dass die Faktoren, welche die ersten Aufspaltungen der Dendrogramme ergeben, in den ersten Rängen der *Variable Importance* Graphik erscheinen müssten. Nachfolgend sind die Grafiken der Variable Importance des Datensatzes der Aufnahmeperioden 1972 /73 und 2012 abgebildet.

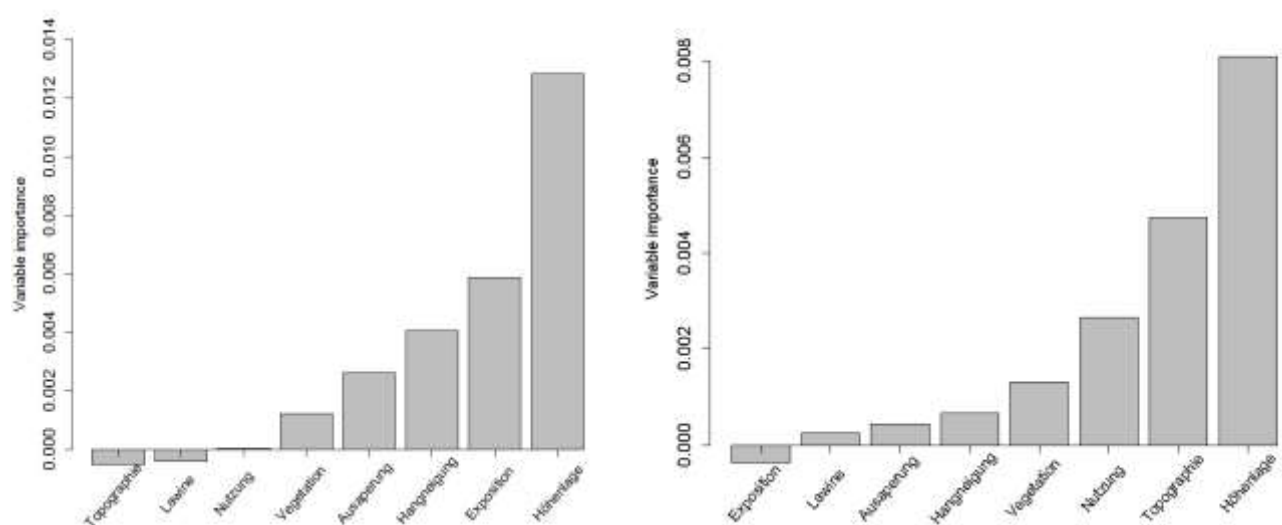


Abbildung 18: Reihenfolge der Einflussvariablen

(a) gemäss Datensatz 2012

(b) gemäss Datensatz 1972/73

Der Einfluss der Variablen wird durch die Grösse der Barplots veranschaulicht.

In der Grafik der *Variable Importance* sind in der Aufnahmeperiode 2012 (Abbildung 18 (a)) die Variablen Topographie und Lawine und in der Aufnahmeperiode 1972 /73 (Abbildung 18 (b)) die Variable Exposition mit negativen Werten auffallend. Dies bedeutet für die jeweiligen Variablen absolute Irrelevanz [Strobl et al., 2009]. Der Faktor Lawine ist in beiden Aufnahmejahren mit äusserst geringen Werten vertreten und somit als wenig relevant einzustufen. Ein wesentlicher Unterschied besteht hinsichtlich der Variablen Nutzung. 1972/73 stellt diese die dritt-wichtigste Variable dar, 2012 ist sie hingegen nur knapp über dem Nullwert einzuordnen.

Des Weiteren ist die Topographie 1972 /73 mit einem Wert von knapp 0.005 als eine der wesentlichsten Einflussvariablen zu nennen. 2012 zeigt sie, dagegen einen Minuswert. Da Topographie in der Aufnahmeperiode 1972 /73 wesentlich ist, wurde diese differenzierter betrachtet. Baumpunkte sind sowohl auf der Nord- als auch auf der Südseite vermehrt auf Kuppen vorzufinden, wobei der Abstand der Anzahl der Bäume in Mulden nicht sehr gross ist. Auf sehr steile Geländerippen, bzw. Mulden sind in dieser Aufnahmeperiode nicht aufgetreten.

Die Höhenlage ist in beiden Graphiken der am stärksten mit der Eingangsvariablen assoziierende Faktor. Die Hangneigung ist von Rang 4 in 1972/73 auf Rang 3 im Jahre 2012 gestiegen. Der Einfluss der Exposition ist 2012 der zweitwichtigste Faktor in der Periode 1972/73 dagegen irrelevant. Lediglich die Variable Vegetation variiert nicht sehr in ihrem Rangplatz (1972/73 Rang 4, 2012 Rang 5). Die Ausaperung ist weder in der Aufnahmeperiode 1972/73 noch 2012 ein entscheidender Einflussfaktor.

Bedeutung der Einflussfaktoren für die Etablierung von Bäumen zwischen 1972 /73 und 2012

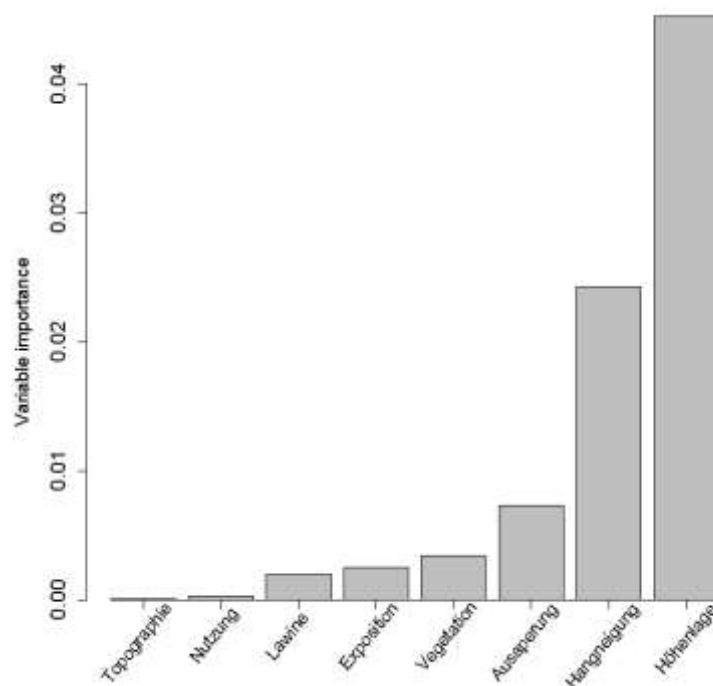


Abbildung 19: Datensatz der Entwicklung zwischen 1972 /73 und 2012

Die Entwicklung zwischen den beiden Aufnahmeperioden hat Ähnlichkeit mit der beschriebenen *Variable Importance* des Jahres 2012. Das Merkmal Höhenlage ist auch für die Entwicklung im gesamten Betrachtungszeitraum der einflussreichste Faktor. Die Entwicklung zwischen 1972 /73 und 2012 wird danach durch die Merkmale Hangneigung und Ausaperungsverhältnisse am stärksten beeinflusst. Beide Variablen haben in den einzelnen Datensätzen geringere Bedeutung. Vegetation zeigt geringe Variation in ihrer Einflussnahme. Exposition liegt in Abbildung 19 auf Rang 4. Lawine und Nutzung zeigen leicht positive Werte, Topographie zeigt einen Minuswert.

Da die Variablen Vegetation und Ausaperung eine wichtige Rolle bezüglich ihres Einflusses auf das Wachstum- und Etablierung der Bäume hat, wurden diese eingehender betrachtet. Der prozentuale Anteil der untersuchten Baumarten in jeder Klasse des Datensatzes der Entwicklung zwischen der Aufnahmeperiode 1972 /73 und 2012 ist in Tabelle 12 und Tabelle 13 aufgelistet.

Tabelle 12: Variable Vegetation in Prozent der untersuchten Baumarten

	Larix	Picea	Pinus
Zwergstrauchgesellschaften	76.0	90.8	85.5
Alpine Rasen/ Magerweiden	15.0	5.5	10.5
Schutt-vegetationslose Flächen	9.0	3.7	4.0

Tabelle 13: Variable Ausaperung in Prozent der untersuchten Baumarten

Ausaperungsstufe	Larix	Picea	Pinus
Sehr früh	2.5	-	7.9
Früh	27.1	70.4	53.5
Spät	69.9	29.6	38.6
Sehr spät	0.5	-	-

Hinsichtlich des Faktors Vegetation kommt die Fichte mit 90.8 %, dicht gefolgt von der Arve mit 85.5 % und der Lärche mit 76.0 % in Zwergstrauchgesellschaften am häufigsten vor. In der Klasse der alpinen Rasen/Magerweiden, sowie in Schutt-vegetationslose Fläche ist die Lärche am meisten vertreten.

Bei den Ausaperungsstufen ist die Fichte wiederum mit 70.4 % am häufigsten vertreten, in der Kategorie "spät" ist die Lärche mit 69.9 % am häufigsten vorzufinden.

Die hier vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass eine Veränderung zwischen den Aufnahmeperiode 1972 /73 und 2012 stattgefunden hat. Sowohl in den Klassifikationsbäumen, als auch in der dazugehörigen Berechnung der Variable Importance durch das Tool Random Forest der Statistiksoftware R, stellen sich grössere Unterschiede, bezüglich der Reihenfolge der Einflussvariablen dar. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden diese eingehend diskutiert.

5 Diskussion

Dieser Teil ist in mehrere Abschnitte unterteilt. Zuerst werden die Ergebnisse der Aufnahmeperiode 1972 /73 und des Datensatzes 2012 betrachtet und Unterschiede herausgestellt. Im weiteren Verlauf werden die Modelle bezüglich des Einflusses verschiedener Umweltvariablen genauer untersucht und Vor- und Nachteile ihrer Anwendung erläutert. Eine Diskussion der Methodik schliesst diesen Gliederungspunkt ab.

5.1 Diskussion der Ergebnisse 2012

Zusammenhänge im Bezug zu Baumarten, Höhenlage, Exposition und Topographie

Die Eigenschaften der untersuchten Baumarten spiegeln sich in der Höhenverteilung wieder. Auf beiden Talseiten ist die Lärche die dominierende Baumart über alle Höhenstufen hinweg.

Auf der Nordseite ist daneben die Arve fähig, in die höchsten Lagen vorzudringen. Wie erwartet ist die Fichte weder nord- noch südexponiert stark vertreten. Dies könnte vor allem im Bereich der Waldgrenze auf die relative Frostempfindlichkeit zurückzuführen sein [SCHÖNENBERGER, 1975]. Auch WALDER [1983] beobachtet, dass die Fichte auf strahlungsschwachen Nordexpositionen fehlt und eher auf gut bestrahlten, früh ausapernden Standorten vorkommt. Es gibt Nachweise, dass die Fichte für ihre Etablierung gewisse Wärmesummen benötigt, welche vor allem in höheren Lagen nicht mehr gegeben sind [Gross, 1989]. Die Lärche hat vor allem oberhalb von 2300 m im Vergleich zur Fichte und Arve stärkere Konkurrenzskraft. Durch ihre Charakteristika als Pionier- und Lichtbaumart hat sie grosse Chancen, sich auf grossflächigen Gebieten oberhalb der Waldgrenze zu etablieren. Besonders Standorte, an denen kein Konkurrenzdruck und dadurch eine grosse Strahlungsintensität vorhanden sind, werden von der Lärche bevorzugt. Daraus kann man schliessen, dass auf den südexponierten Hängen ein schnelleres Jugendwachstum gewährleistet ist und so Veränderungen der Waldgrenze auf dieser Seite früher erkennbar werden [PAULSEN ET AL., 2001; KAPRALOV ET AL., 2006; ELLENBERG, 2010]. Des Weiteren besitzt die Lärche Vorteile durch die frühe Fruktifikation und Windverbreitung. Beschädigungen in der Vegetations- und Humusdecke, welche oberhalb der Waldgrenze nicht selten vorkommen, erleichtern die Keimung und das erste Heranwachsen von Lärchen. So kann es auf grossen freiliegenden Flächen zu Ansamungen kommen [BURSCHEL ET AL., 2003; WALDER, 1983]. Darüber hinaus ist die Gefährdung durch Schneepilze nicht gegeben. Bereits bei den Aufnahmen der Jahre 1972 /73 war der höchstgelegene Baum eine Lärche, die auf einem Felsplateau auf 2440 m. gesichtet wurde. WALDER [1983] beschreibt, dass die Lärche die beiden anderen Arten bezüglich der Einnahme hochgelegener Standorte (vor allem ab einer Höhe von 2300 m) bei weitem übertrifft, was durch die Aufnahmen 2012 bestätigt werden kann. Die Lärche ist sozusagen eine Art Vorreiter in der Etablierung neuer Lebensräume, dicht gefolgt von der Arve, welche auch in den oberen subalpinen Höhengürtel vordringt [ALBERT ET AL, 2008].

Die Feststellung, dass am Nordhang geringere Höhen als auf der südexponierten Seite der Aufnahmeperiode 1972 /73 vorzufinden waren, trifft auch für den Datensatz 2012 zu. Der Grund, weshalb die Arve nicht die gleiche Konkurrenzkraft in höchsten Lagen verfügt, liegt an ihrer kleinstandörtlichen Ausbreitung und ihrer Abhängigkeit gegenüber der Existenz des Tannenhähers. Darüber hinaus ist die Arve äusserst anfällig für Pilzkrankheiten. Speziell *Phacidium infestans* ist vor allem in frühem Wachstumsstadium ein ausschlaggebender limitierender Faktor [BARBEITO ET AL., 2012].

Die Baumhöhen auf der südexponierten Talseite sind im Durchschnitt höher als auf der Nordseite. Dieses Ergebnis ist gemäss den Erwartungen ausgefallen. Reduzierte Sonneneinstrahlung ist laut KRONFUSS [1999] der entscheidende Grund für das verminderte Wachstum auf nordexponierten Hängen. Auch KÖRNER [1999] und SCHÖNENBERGER [1975] weisen darauf hin, dass die Dauer der Vegetationsperiode stark expositionsabhängig ist. Standorte mit starker Hangstrahlung und geringer Windgeschwindigkeit sind gegenüber schattigen und windexponierten Standorten bezüglich des Zuwachses im Vorteil. Im Winter sammelt sich auf den nordexponierten Standorten sehr viel Schnee. Ein spätes Ausapern ist die Folge. Die dadurch verkürzte Vegetationsperiode und eine niedrigere Photosyntheserate führen entsprechend zu einem verringerten Wachstum auf der Nordseite. Eine differenzierte Betrachtung der Expositionsabhängigkeit der einzelnen Baumarten zeigt bei Arve und Fichte einen deutlichen Unterschied. Lediglich bei der Lärche ist visuell auf der Nordseite ein durchschnittlich höheres Baumwachstum festgestellt worden. Dies führt zur Annahme, dass bei *Larix* die Exposition nicht der ausschlaggebende Einflussfaktor für das Wachstum im Bereich der Baumgrenze ist. Vielmehr wird der Höhenzuwachs durch direkte und indirekte klimatische Einflüsse gesteuert. Auch PAULSEN [2001] betont, dass eine Expositionsabhängigkeit vor allem im Sämlingsstadium eines Baumes gegeben ist. Es bleibt unklar, ob Temperatur, Topographie, standörtlichen Gegebenheiten wie Bodenbeschaffenheit und Nährstoffverfügbarkeit oder die frühere Landnutzung einen stärkeren Einfluss auf das Wachstum und Etablierung der Baumarten hat [SCHÖNENBERGER, 1975; PAULSEN ET AL., 2001]. Auch wurden die höchsten Baumindividuen auf der südexponierten Seite des Tals vorgefunden. Dies stützt die Annahme, dass hier für das Wachstum und die Etablierung der Bäume günstigere Bedingungen herrschen.

Der gleiche Nord- / Süd-Trend wird graphisch auch bezüglich des Parameters Stammdurchmesser ersichtlich. Weitere Interpretationen beruhen auf der Tatsache der nicht gegebenen Signifikanz des Ergebnisses. KRONFUSS [1999], KÖRNER [2012] und PAULSEN [2000] beschreiben, dass oberhalb der Waldgrenze das Wachstum der Baumhöhen stärker beeinflusst wird als die Zunahme des Stammdurchmessers. Mit steigender Höhenlage ist die Abnahme des Stammdurchmessers somit geringer als die der Baumhöhen. Der Radialzuwachs ist eher von den jährlich schwankenden Temperaturen abhängig. Bei genauerer Betrachtung der Baumarten bezüglich des Stammdurchmessers, ist es erneut die Baumart Lärche, die den geringsten Unterschied bezüglich der Exposition aufweist. Auch KRUMM [2004] bestätigt, dass die Baumart Lärche wenig auf sich verändernde Temperaturverhältnisse reagiert und im Vergleich zu Arve und Fichte keine starke Expositionsabhängigkeit aufweist. Sie kann von der erhöhten Einstrahlung auf der Südseite

profitieren, ist aber auch auf der Nordseite bis in die höchsten Lagen präsent. Die Kältetoleranz der Lärche kann während der Etablierung auf dieser Seite nützlich sein. Auf der Nordseite ist die Anfälligkeit gegenüber Spätfrost, der vor allem in den Monaten Mai bis Juni auftritt, verringert. Der Effekt der frühzeitigen Transpiration, welche durch die verstärkte Einstrahlung auf der Südseite angekurbelt wird, ist auf der Nordseite nicht gegeben.

Der Topographieaspekt ist in engem Zusammenhang mit der Höhenlage und Exposition zu betrachten, da Kleinstandorte und ihre Standortfaktoren vor allem mit zunehmender Höhe entscheidend sind. Wesentliche Faktoren, die bestimmen, ob ein Baum an einem subalpinen Standort überlebt, sind die Temperatur im Sommer, die Schneebedeckung im Winter und die Ausaperung im Frühjahr [SENN ET AL., 1996].



Abbildung 20: Einfluss der Topographie auf den Waldgrenzenverlauf
(Foto Leibold, E.)

Besonders auf der Nordseite wird dieser Effekt deutlich. Auffallend ist dort die sehr grosse Anzahl von Arven auf Kuppen oder Geländerippen. Auch in der Aufnahmeperiode 1972 /73 wurde die Annahme bestätigt, dass die meisten Individuen auf Kuppen vorkommen. Beidseitig ist hier die Lärche die dominierende Baumart, gefolgt von der Arve, welche die Kuppen besiedeln, aber auch vermehrt in Mulden wachsen.

Vor allem auf der Nordseite ist die Schneebedeckung ausschlaggebend. Durch die steilen Hänge hält sich der Schnee nicht sehr lange, was einen Vorteil für die Arve darstellt. Die frühere Ausaperung reduziert die Gefahr einer Infektion des weissen Schneeschimmels. Auch Lawinenabhänge, welche auf den steilen Nordhängen öfters vorkommen, können dem Wachstum der Arven auf Geländerippen nicht schaden [Paulsen et al., 2000]. In Mulden (negative Werte) auf der Nordseite wurde am meisten die Lärche gezählt. Hier ist sie vor starkem Wind- und extremen

Frostereignissen geschützter. Allgemein ist die Lärche weniger anfällig gegenüber Schneebewegungen. Rinnen und Mulden, prädestiniert für Lawinenabgänge, sind dank der schnellen Regenerationsfähigkeit der Lärche ein möglicher Standort. Auf der Südseite hingegen ist die Lärche am meisten auf leicht positiv gewölbtem Gelände vorzufinden. Auch auf der Südseite des Tales ist die Arve die am häufigsten auf besonders exponierten Standorten anzutreffende Baumart. Sie profitiert einerseits von der auf Geländerippen intensivere Einstrahlung, andererseits spiegelt dies auch die Eigenschaft des Tannenhähers wider, welcher gerne exponierte Felskuppen für seine Deponie der Arven bevorzugt. Die Gefahr eines Schneeschimmelbefalls ist zudem nicht so gross, da die Ausaperung früher erfolgt [Barbeito et al., in review]. Eine Ausbreitung der Waldgrenze verläuft laut GREEN [2012] am schnellsten auf Geländerippen, bzw. zwischen den einzelnen Rippen, da hier die standörtlichen Vorteile überwiegen und so vor allem in der Initialphase eines Baumes die höchste Überlebensrate auf Geländerippen vorgefunden wird. Konkurrenzvegetation ist hier zudem sehr schwach bis gar nicht ausgeprägt.

Neben der Expositionsabhängigkeit und dem Einfluss der Topographie, soll die Darstellung der Korrelationen der drei Baumarten versus Höhenlage, bzw. Baumhöhe versus Stammdurchmesser erläutert werden. Durch diese grundsätzlichen Korrelationen können wesentliche Zusammenhänge in der subalpinen Zone aufgezeigt werden. Die Unterschiede zwischen den Expositionen zeigen sich deutlich in den statistischen Auswertungen. Vor allem die Werte der Baumhöhe in Bezug zum Stammdurchmesser liessen bei allen Baumarten auf ein starkes Ausmass an Abhängigkeit schliessen. Dies lässt sich dadurch erklären, dass steilere Hänge, spätere Ausaperung und ein hoher Verbissdruck Auswirkungen auf das Wachstum der Bäume haben. Vor allem der Ausaperungszeitpunkt ist ein wichtiger Faktor für die Überlebenschance der Bäume oberhalb der Waldgrenze [SENN ET AL., 1996]. Die Baumarten reagieren im Allgemeinen in gleicher Weise, aber die Empfindlichkeit auf die Variation verschiedener Klimaeinflüsse und deren Stärke ist ausschlaggebend und bei allen Baumarten verschieden [SCHÖNENBERGER, 1975]. Auch KÖRNER [1999] ist der Meinung, dass die Exposition und die damit im Zusammenhang stehende Ausaperung, Temperatur und der Strahlungshaushalt der Schlüsselfaktor für die Etablierung der Bäume oberhalb der Waldgrenze ist. Untersuchungen, die auf der Versuchsfläche "Stillberg" durchgeführt wurden bestätigen, dass die Exposition und die damit zusammenhängenden Faktoren entscheidende Wirkung auf die Etablierung und das Wachstum der Bäume hat [KNUFINKE, 1998; KRUMM, 2004; ESSIG, 2004]. Darüber hinaus wird die Annahme bestätigt, dass die Exposition vor allem in der Jungwuchsphase der Bäume entscheidend ist. In dieser Phase eines Baumes ist der Standort ausschlaggebend für das Überleben. Im weiteren Verlauf des Wachstums und der Etablierung bis zum adulten Baum spielt sie nur noch eine untergeordnete Rolle [PAULSEN ET AL., 2000].

Die Hypothese, dass das Wachstum und Auftreten der Baumarten stark von der Höhenlage abhängig ist, wird durch die Ergebnisse bestätigt. Die Expositionsabhängigkeit ist vor allem bei Arve und Fichte stark, jedoch bei Lärche geringfügig ausgeprägt. Die Annahme, dass die Exposition ein entscheidender Faktor für die Entwicklung der Waldgrenze ist, trifft nicht für die Baumart Lärche zu. Die Topographie ist Ausdruck der standörtlichen Vorteile.

Erwähnenswert ist zudem der Unterschied der H/D-Verhältnisse in kleinen und grossen Gruppen. Die Lärche ist keine Gruppenbaumart, sondern eine absolute Lichtbaumart, was sich vor allem in den Ergebnissen auf der Nordseite deutlich zeigt. Die H/D-Verhältnisse sind in allen Kategorien der Lärche gleich. Auf der Südseite wird die Annahme bestätigt, dass in der Kategorie Gruppe gross ein höheres H/D-Verhältnis vorliegen sollte. Der Konkurrenzdruck ist hier so stark, dass ein verstärkter Drang zu mehr Licht gegeben ist. In kleinen Gruppen ist dieser Effekt noch zu gering, da das Aufnahmeverfahren einen Radius von 25 m umfasst und so das Verhältnis von Baumanzahl zur Fläche zu klein ist. Im Gegensatz dazu ist die schattenverträglichere Arve in der Lage unter dem Schirm der Lärche langsam zu wachsen. Die Fichte hingegen ist eher ein "Gruppenbaum". Das bedeutet, dass sie keinerlei Nachteile im Zusammenleben mit anderen Baumarten hat. Dieser gruppenspezifische Aspekt der untersuchten Baumarten wird zudem von den Ergebnissen der Korrelationen Baumhöhe versus Höhenlage bestätigt. Hierbei zeigt sich, dass die Arve ein deutlich weiteres Spektrum an Punkten an möglichen Baumhöhen in höheren Lagen aufweist. Im Vergleich dazu zeigt die Lärche eine stark abfallende Punktwolke. Die Lärche ist somit weniger kompetitiv als die Arve und Fichte. Die Methodik dieser Arbeit lies aber eine eingehende Untersuchung des Gruppenaspekts und Nachbarschaftsdynamik zu.

Verbiss

Die Ergebnisse bezüglich des aufgenommenen Verbisses lassen nicht sehr viel Spielraum für Interpretationen. Besonders die Huftiere (Reh- und Rothirsch), sowie Auer- und Haselhühner werden mit Schäden in Wald und Flur in Zusammenhang gebracht. Diese Tierarten stossen in den Gebieten oberhalb der Waldgrenze an die Grenzen ihrer Existenzmöglichkeit [MÜLLER ET AL., 1986]. Es wird angenommen, dass dadurch der Verbissdruck in diesen Gebirgsregionen besonders stark auftritt.

Im MAB-Projekt wurden 1982 die Verteilungsmuster der Huftierarten (Reh, Rothirsch, Steinbock und Gemse), sowie der Rauhfußhühnerarten (Schnee-, Birk-, Auer- und Haselhuhn) untersucht. Da die Aufnahmen oberhalb der Waldgrenze durchgeführt wurden, ist der Einfluss von Reh- und Rotwild auf Grund ihrer Habitatansprüche (ausschliesslich Waldgebiete) fast gänzlich auszuschliessen. Das Verbreitungsgebiet von Rauhfußhühner (mit Ausnahme des Birkwilds) und der Gemse hingegen liegt ab der Waldgrenze bis zu 2800 m. Der Vergleich mit den Verteilungsmustern, der im Zuge des MAB-Projektes durchgeführten Feldaufnahmen, lassen einen höheren Verbissanteil auf der Nordseite des Dischmatal vermuten. Mit 5 % mehr Verbiss Spuren auf der Nordseite wird dieses Ergebnis anhand der Feldaufnahmen 2012 bestätigt. Es muss hierbei darauf hingewiesen werden, dass die Kartierung 2012 nicht im ganzen Tal erfolgte. Anhand der Verteilungsmuster der MAB-Karten liegt jedoch der Grossteil der Habitate im Bereich des Untersuchungsgebietes [MÜLLER ET AL., 1986; MAB- KARTEN VERTEILUNGSMUSTER].

Die Annahme, dass auf der Nordseite die Hänge steiler und potentielle Äsungsflächen geringer vorhanden sind, könnte eine Erklärungsmöglichkeit für den erhöhten Prozentsatz auf der Nordseite sein. Das Nahrungsangebot welches vorhanden ist, wird mit einer grösseren Wahrscheinlichkeit

verbissen, als es auf der Südseite der Fall ist. Mit einem eher geringen Prozentsatz in der Kategorie *stark verbissen*, spiegelt sich die Annahme wider, dass der Verbissdruck nicht der entscheidend limitierende Faktor im Baumgrenzenbereich ist. (In dieser Verbisskategorie kann von einer eindeutigen Identifikation ausgegangen werden.) Vielmehr spielen die ökologischen Bedingungen zwischen den verschiedenen Expositionen eine grössere Rolle. Dies wird auch durch Studien im Schweizerischen Nationalpark bestätigt. In einer vergleichenden Feldstudie wird gezeigt, dass trotz hoher Dichten von Huftieren eine Zunahme vor allem im Bereich der Waldgrenze stattfindet. Lediglich ein Abbremsen der Verjüngungsdynamik wird durch die Huftiere hervorgerufen, nicht aber eine Reduktion insgesamt. Interessant ist zudem zu vermerken, dass die Reihenfolge des Verbissanteils der Baumarten mit den Aufnahmen im Dischmatal identisch ist. Am stärksten wurde, sowohl auf der nord- als auch süd-exponierten Talseite die Lärche betroffen. Nachfolgend die Arve und Fichte, welche den geringsten Prozentanteil aufwies [WEPPLER ET AL., 2006].

Der Weisse Schneeschimmel

Auffällig ist die starke Nord- Süd-Differenz des Befalls durch Weissen Schneeschimmel (Nord 14.5 %, Süd 61.6 %). Es wurde bereits gezeigt, dass der Ausaperungszeitpunkt im engen Zusammenhang mit der Sterblichkeitsrate von Bäumen oberhalb der Waldgrenze steht [BARBEITO ET AL., 2012]. Zudem führt eine lang anhaltende Schneedecke häufig zum Befall des Schneepilzes, da das Klima unter der Schneedecke ideal für die Bildung und Ausbreitung des Pilzes geeignet ist. Die am meisten beeinflussende Variable bezüglich der Ausbreitung von *Phacidium infestans* ist die Dauer der Schneebedeckung im Frühjahr. Doch auch Faktoren wie Topographie, Höhenlage und Windeinfluss [BARBEITO ET AL., IN REVIEW] haben einen Einfluss.

Bezogen auf die Exposition ist der Befall auf der Südseite um 47 % höher als auf der Nordseite. Dieser gravierende Unterschied ist zunächst überraschend. Eine Erklärung hierfür wäre das Ausaperungsdatum. Es wurde festgestellt, dass ein erhöhter Befall vorliegt, wenn die Ausaperung vor dem 10. Mai auftritt [BARBEITO ET AL., IN REVIEW]. Auf der südexponierten Seite könnte auf Grund der vermehrten Sonneneinstrahlung ein schnellerer Rückgang der Schneedecke gewährleistet werden, als auf der Schattenseite des Tals. Die starke Korrelation der Temperaturen und Schneehöhen im Bezug zu einem möglichen Befall ist ein jährlich schwankender Faktor. Generell ist die Befallsintensität sehr stark abhängig von den Witterungsverhältnissen. Vor allem die Temperatur ist ein ausschlaggebender Faktor [BARBEITO ET AL., IN REVIEW; HANSO, 2000]. Zudem ist der Pilz abhängig von der Dichte der auftretenden Arven oberhalb der Waldgrenze, da seine Verbreitung sowohl sexuell durch Ascosporen, als auch durch Myzelstränge erfolgt [HANSO, 2000]. Durch geringe Distanzen zwischen den Einzelbäumen- oder Gruppen ist eine schnelle Verbreitung möglich. Eine dichtere Anordnungen der vorgefunden Arven auf der Südseite, könnten eine erhöhte Befallschance hervorrufen. Eine frühzeitige Ausaperung der Schneedecke wirkt zudem begünstigend für eine Verbreitung des Pilzes. Dies geschieht auf exponierten Standorten wie Geländekuppen. In diesem Zusammenhang bestätigen dies die Ergebnisse 2012. Ein starker Befall des Schneeschimmels ist jedoch auf beiden Seiten mit einem Prozentsatz von zehn gleichermassen vorgefunden worden. Das ungleiche Verhältnis bezüglich der Expositionen

wird hiermit relativiert, zeigt jedoch auch in dieser Kategorie nicht die zu erwartende Nord- / Südverteilung mit dem Schwerpunkt der Befallsintensität auf der Nordseite. Im Hinblick auf den Einfluss der Topographie auf die Befallsgefahr sind die Ergebnisse 2012 eindeutig. 63 % der befallenen Bäume (Kategorie *leicht* und *stark* befallen) sind auf konvexen Standorten vorzufinden, hingegen zeigen lediglich 32 auf der Nord- und 35 auf der Südseite Befallsmerkmale in Mulden (konkaven Gelände). Das bedeutet, dass der Schneeschimmelbefall auf Geländekuppen / -rippen und auf leicht positiv gewölbten Geländes vermehrt auftritt, da dort günstigere Bedingungen für die Vermehrung vorhanden sind.

Vergleich 1972 /73 – 2012

Anhand dieser Studie ist deutlich geworden, dass die Anzahl der etablierten Bäume seit der Aufnahmeperiode 1972 /73 zugenommen hat. Die sensible Reaktion der Waldgrenze deutet darauf hin, dass eine mögliche Klimaerwärmung zum Anstieg der Wald- und Baumgrenzen führt. Der aufsteigende Trend der Waldgrenze in den Alpen ist eine nicht zu ignorierende Tatsache [Dullinger et al., 2005; Grace et al., 2002]. Doch dieser Aufwärtstrend kann nicht verallgemeinert werden. Es existiert eine Vielzahl an Faktoren, die eine Verschiebung der Waldgrenzen beeinflussen können. Die Waldgrendynamik ist eher Zeiger von standörtlichen Gegebenheiten, als Folge der Klimaerwärmung. Es gilt auch zu vermerken, dass die Aufnahmeverfahren in den Aufnahmeperioden 1972 /73 sowie 2012, nicht ohne subjektive Abschätzung von Höhen, Abständen, etc. möglich war. Dennoch können eine Aussage über den Trend der Baumartenausbreitung erfolgen und Anhaltspunkte über zukünftig mögliche Entwicklungen abgeleitet werden.

Die Zunahme in der Baumanzahl der Arve auf beiden Expositionen der ersten Höhenstufe spiegelt sich auch in der prozentualen Darstellung bezogen auf die Gesamtanzahl vermessener Baumindividuen der drei Baumarten wider. Die Abnahme der Lärche kann auf Frostereignisse zurückzuführen sein. Die Frosthärte bleibt nicht das ganze Jahr konstant, sondern variiert nach Alter, Jahreszeit und Höhenlage. Besonders im Spätfrühjahr bzw. Frühsommer besteht erhöhte Gefahr (vor allem in den Monaten Mai und Juni), wenn die Transpiration anläuft, der Boden jedoch noch gefroren ist und der Wasserverlust dadurch nicht gedeckt werden kann. Bei geringer Schneedecke sind vor allem die Triebe im Frühjahr extrem gefährdet. [ELLENBERG, 2010; SCHÖNENBERGER, 1975]. Die Arve hingegen verfügt über eine gute Resistenz gegenüber Frostereignissen. Ihre Fähigkeit, eine niedrige Fotosyntheserate, sowie eine saisonbedingte Kohlenstoffaufnahme zu erhalten, kommt ihr zugute und lässt sie in einer breiten ökologischen Amplitude wachsen [Boden et al., 2005].

Standorte, an denen die Ausaperung früh stattfindet und warme Temperaturen einen Schneepilzbefall weniger stark fördern, sind für die Arve profitabel. In der Tat wurde bei genaueren Untersuchungen der seit 1972 /73 neu etablierten Baumindividuen festgestellt, dass die Arve im Vergleich zur Lärche und Fichte vermehrt in frühen Ausaperungszonen vorkommt. Bei den Suchgängen im Feld war auffallend, dass Arven besonders an sehr steilen, nordexponierten

Felskuppen wuchsen. Möglicherweise ist dies auch auf die enge Lebensgemeinschaft mit dem Tannenhäher (*Nucifraga caryocatactes* L.) zurückzuführen, der so die Verbreitung der Arve über weite Distanzen hinweg gewährt. Exponierte und gleichzeitig geschützte Standorte werden von ihm bevorzugt. Die zukünftige Verbreitung der Arve oberhalb der Waldgrenze ist ohne Zweifel abhängig von der Existenz des Tannenhähers. Dabei ist es auch ausschlaggebend, ob ein darunter liegender Waldbestand präsent ist, da der Tannenhäher in diesem Unterschlupf findet [BODEN ET AL., 2005; WALDER, 1983]. Eine günstige Veränderung sämtlicher Umweltfaktoren (Frostereignisse, Temperatur, Ausaperungszeitraum, Schneehöhen, u.a.) führten zu einer überproportionalen Etablierung der Arve.

5.2 Die Bedeutung der Einflussvariablen und Klassifikationsbäume auf das Wachstum und Etablierung der Bäume

Klassifikationsbaum-basierte Methoden sind für statistische Anwendungen, Darstellungen und Analysen ökologischer Daten sehr anschaulich und hilfreich [VENABLES ET AL., 1994]. Die Abbildung als Dendrogramm lässt den Entscheidungsweg anschaulich nachvollziehen.

Der Vergleich der Klassifikationsbäume lässt eine eindeutige Veränderung erkennen. Der Faktor Nutzung ist im Datensatz 1972 /73 ein entscheidender Faktor. Im Datensatz 2012 und im Datensatz der Entwicklung sind Vegetation und Ausaperung entscheidend. Auf den Flächen, auf denen die Landnutzung eingestellt wurde, wachsen nun vermehrt Zwergsträucher. [WALDER, 1983; GELLRICH ET AL., 2008]. Es ist anzumerken, dass die Daten der Nutzung aus dem Jahre 1982 stammen. Die Flächen der Bewirtschaftung ändern sich. Sie sind daher für den Datensatz 2012 nicht mehr exakt zutreffend.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die Nutzung immer auch in den Variablen wie Vegetation und Hangneigung reflektiert wird. Auf sehr steilen und exponierten Flächen wurde keine Bewirtschaftung durchgeführt. Laut GELLRICH [2008] sind Faktoren wie Hangneigung, Steilheit, sowie verschiedene andere lokale Einflussfaktoren äusserst wichtig und müssen beachtet werden. Durch den Vergleich der Klassifikationsbäume lässt sich ein erster Eindruck über den Einfluss der Variablen gewinnen und die enorme Veränderung der Gewichtung erkennen.

Im Hinblick auf die Entwicklung zwischen 1972 /73 und 2012 wurde spezifisch auf das Vorkommen der untersuchten Baumarten in jeder Vegetations- bzw. Ausaperungsklasse eingegangen, da diese beiden Variablen eine herausragende Rolle spielen. Die meisten Baumindividuen wurden in allen untersuchten Baumarten in der Klasse der Zwergsträucher und in der Ausaperungsstufe *spät* vermessen. Dabei ist die Arve in frühen Ausaperungsklassen häufig vertreten, während die Lärche vor allem auf Standorten mit einer späten Ausaperung wächst. Die Fichte ist in frühen Ausaperungsstufen vorzufinden. Dies zeigt, dass die Ausaperung sehr wohl direkter Zeiger der Höhenlage ist, da die Lärche die Baumart ist, welche sich mit Abstand am meisten auf späten Ausaperungsstandorten vorfindet und somit in höheren Lagen vorkommt. In der Klasse der Zwergsträucher ist es die Fichte mit 90 Prozent, gefolgt von der Arve mit 86 Prozent, welche die dominierenden Arten sind. Auf Grund der hohen Wärmeaffinität der Fichte ist es

nachvollziehbar, dass diese besonders im Makroklima der Zwergsträucher fähig sind sich zu etablieren. Die Lärche ist im Vergleich zu den anderen Baumarten in der Klasse "Schutt- und vegetationslose Flächen" am häufigsten vorzufinden, was wiederum die Aussage bestätigt, dass die Lärche die Fähigkeit besitzt, in die höchst gelegenen Standorte vorzustossen (siehe Tabelle 12 und Tabelle 13).

Diese Ergebnisse der Klassifikationsbäume sollten durch die Darstellung der Variable Importance - Graphiken bestätigt werden. Der starke Einfluss der Nutzung sowie der Vegetation im Datensatz 2012 wurde relativiert, da bei diesen Berechnungen nicht der vollständige Datensatz verwendet wird wie bei den Klassifikationsbäumen, sondern eine vorher zu bestimmende Anzahl an Teildatensätzen. Ein Grund für die unterschiedliche Veranschaulichung des Einflusses der Variablen, könnte die starke Korrelation zwischen den einzelnen Variablen sein, was auf das „Splitkriterium“ (ein signifikanter p-Wert) der Klassifikationsbäume zurückzuführen sein könnte. Der Versuch, die Klassifikationsbäume ohne die stark korrelierenden Variablen (Höhenlage, Vegetation, Ausaperung und Topographie) darzustellen, führte zu keinem schlüssigen Ergebnis. Die Klassifikationsbäume änderten sich dahingehend, dass die Variable an die Stelle rückte, welche mit der Eingangsvariablen am zweitstärksten korrelierte. Des Weiteren wurde eine Reduzierung der Klassen der kategorialen Variablen (Vegetation, Ausaperung) versucht. Hierdurch ließ sich keine Veränderung in der Darstellung der Klassifikationsbäume feststellen. Als letzte Möglichkeit wurde die Kalkulation der Klassifikationsbäume nur mit einem Teildatensatz (80 Prozent des Datensatzes) durchgeführt. Diese Idee basiert auf dem Algorithmus von Random Forest, welcher das gleiche Schema für die Kalkulation der Variable Importance durchführt und sehr viele einzelne, voneinander unabhängige Teildatensätze verwendet. Es blieb die erhoffte Veränderung des Ergebnisses aus.

Eine weitere Möglichkeit um den Unterschied der verschiedenen Darstellungen zu erklären, wäre, dass die Vegetation indirekt Ausdruck der Höhenlage ist. Die Vegetation wird im Klassifikationsbaum in Zwergstrauchgesellschaften, Alpine Rasen und Rohbodenvegetation aufgeteilt. Sie ist somit Zeiger der Höhenstufen. Zwergstrauchgesellschaften dringen zwar in hohe exponierte Lagen vor, doch gibt es Grenzen, die durch die Keimungsfähigkeit gebildet werden. Tendenziell wird in höheren Lagen durch extreme Umwelteinflüsse und das vermehrte Auftreten von Schutt- und Felsen das Wachstum der Zwergsträucher erschwert. Darüber hinaus ist auch die Ausaperung ein wesentlicher Einflussfaktor auf das Wachstum der Bäume. Vor allem nahe der Baumgrenze ist dies ein entscheidender Faktor für die Überlebenschance [BARBEITO ET AL., 2012]. Sowohl 2012, als auch im Datensatz der Entwicklung ist die Ausaperung neben der Vegetation ein entscheidender Faktor. Auch die Ausaperung korreliert sehr stark mit der Höhenlage. Um alle wesentlichen Einflussfaktoren gezielt darzustellen, wurde auch die Topographie gezielt untersucht, da diese in der Variable Importance der Aufnahmeperiode 1972 /73 die zweitwichtigste Variable ist. Die Verteilung der Baumpunkte ist hier ziemlich gleichmässig zwischen Mulden (konkav)- und Kuppenstandorten (konvex) aufgeteilt. Extreme Werte sind nicht gegeben. Die Lärche ist sowohl auf der Nord- als auch auf der Südseite die in ihrer Anzahl am häufigsten vorkommende Baumart. Die Arve ist auf der Nord- und die Fichte auf der Südseite jeweils die darauf folgend häufigsten

Baumarten. Diese Verteilung spiegelt die Expositionsabhängigkeit der einzelnen Baumarten wider. Die auf Wärme eher angewiesene Fichte ist auf der Südseite gleich verteilt in Mulden- und Kuppen vorzufinden. Die auch auf extremen Standorten wüchsige Arve ist hingegen auf der Nordseite häufiger. Die Annahme, dass der Topographieaspekt in der Aufnahmeperiode eindeutig auf Kuppen, bzw. Mulden verteilt sein müsste, ist somit widerlegt worden, da auf beiden Expositionen (Nord- und Südseite) die Baumartenanzahl fast gleich verteilt auf Mulden und Kuppen sind.

Es ist festzuhalten, dass die Klassifikationsbäume des Datensatzes 2012 und der Entwicklung zwischen den Aufnahmeperioden im Vergleich zu den Grafiken der Variable Importance nicht grundlegend verschieden sind, sondern die Variablen Vegetation und Ausaperung ein indirekter Ausdruck für die Höhenlage, Exposition und Topographie ist. Die Höhenlage ist bei allen Graphiken der *Variable importance* am einflussreichsten. Dies ist nicht überraschend, da sie wiederum den grössten Einfluss auf Temperatur, Bodenbeschaffenheit, etc. ausübt. Die Nutzung spielt 1972 /73 eine grössere Rolle als 2012, was sowohl im Klassifikationsbaum, als auch in der graphischen Darstellung der Variablen Importance eindeutig bestätigt wird.

Es ist offensichtlich, dass das neue Bild der Waldflächen von natürlicher Wiederbewaldung geprägt wird. Die Tendenz der Waldausdehnung ist vor allem im Alpenraum ein Phänomen, welches vor allem in den letzten Jahrzehnten sehr deutlich wurde. Die Tatsache, dass die verwendeten Daten des MAB-Projektes aus dem Jahre 1982 sind und im Laufe der Zeit weitere Veränderungen unterstellt werden dürfen. Der Einfluss der Landnutzung hat im Zeitraum zwischen 1972 /73 bis 2012 abgenommen. Laut DUNWIDDLE [1977] ist die Abnahme der Beweidung ein weiterer Grund für den vermehrten Anwuchs und Etablierung von Bäumen. Die Konkurrenz von Weidevegetation ist besonders in den ersten Jahren ausschlaggebend und kann durch Kühe oder Schafe nieder gehalten werden. Nach ca. 25 Jahren sind nun günstige Standorte für das Wachstum entstanden. Genau diese Entwicklung spiegelt sich in den Ergebnissen wider: Eine Zunahme der vermessenen Bäume oberhalb der Waldgrenze. Vor allem ab einer Höhenstufe von 2200 m ist die Waldausbreitung mit einem Prozentsatz der Arve von bis zu 10 % am stärksten ausgeprägt. Die zunehmende Extensivierung ist Ausdruck des Rückgangs der Landwirtschaft und als Folge des Wegzugs der jungen Menschen aus den Alpregionen. Auf Flächen, welche durch landwirtschaftliche Nutzung freigehalten wurden, kommen zunehmend erst Strauch- dann Waldgesellschaften auf. Der natürliche Prozess der Wiederbewaldung ist im gesamten schweizerischen Alpenraum statistisch erfasst und bestätigt [BUNDESAMT FÜR STATISTIK, 2008].

Bei dem Versuch zwischen den einzelnen Variablen Korrelationen herzustellen, wurde die Komplexität der Datensätze deutlich. Durch die hochgradige Verknüpfung der Faktoren untereinander ist es leicht möglich, dass gut korrelierende Faktoren nur Voraussetzungen oder Folgen anderer Faktoren darstellen. Aus diesem Grund wurden keine detaillierten Analysen bezüglich der Korrelationen durchgeführt, da die möglichen Ergebnisse nur als Stütze bereits erkannter Zusammenhänge dienen. Auch GROSS [1989] betont, dass die Komplexität der an der Waldgrenze beteiligten Prozesse die Interpretation der Beobachtungen und Ergebnisse äusserst schwierig gestaltet.

Ergebnisse als Zeiger des Klimawandels

Im Rahmen von Untersuchungen an der Waldgrenze stösst man immer wieder auf die Frage nach den Ursachen dieser deutlichen Vegetationsgrenze. Sie verläuft nicht parallel zu Boden-, Gesteins- oder Reliefdiskontinuitäten. Diese haben zwar erheblichen Einfluss, sind jedoch nicht ausschlaggebend. Der Klimawandel zeigt sich in veränderten klimatischen Bedingungen. Starke anthropogene Einflüsse an der Waldgrenze müssen zusätzlich berücksichtigt werden. Bis heute ist eine Kausalanalyse, besonders hinsichtlich des Klimawandels noch offen und eine quantitative Beschreibung vieler Phänomene der Waldgrenze steht noch aus.

Anhand der Ergebnisse dieser Arbeit ist eine deutliche Zunahme der Baumindividuen festzustellen. Auch die Veränderung der Einflussvariablen legt die Vermutung nahe, dass der Klimawandel ein treibender Faktor sein kann. Dies sollte aber mit Vorsicht interpretiert werden. Auch KÖRNER (2012) betont, dass die Waldgrenze und vor allem auch die Dynamik im Baumgrenzenbereich sich immer erst in Folge des Klimawandels verändert und daher zeitlich nachgelagert sind. Es kann sehr lange dauern, bis ein Baum sich etabliert hat und aus dem schützenden Zwergstrauchmilieu herauswächst. Oftmals sind 50 cm hohe Bäume bereits bis zu 60 Jahre alt. Die Ausbreitung der untersuchten Bäume, vor allem der Arve ist langsam und reagiert nicht so schnell auf die in den letzten Jahrzehnten gestiegene Durchschnittstemperatur [IPCC, 2007]. Auch ist im Untersuchungsgebiet der menschliche Einfluss vor allem in der Vergangenheit sehr stark gewesen. Der Grund für die rasche Ausbreitung von Zwergsträuchern und der Anstieg der Waldgrenze ist auch auf nachlassende anthropogene Einflüsse zurückzuführen.

In diesem Zusammenhang ist zu diskutieren, inwiefern Klimawandel oder Landnutzungswandel ausschlaggebende Faktoren für die Entwicklung der Waldgrenzen im Alpenraum sind. In den meisten Studien wird der Klimawandel als treibende Kraft für eine Veränderung erwähnt [GRACE ET AL., 2002, DULLINGER ET AL., 2004; HARSCH ET AL., 2009]. Generell ist der Einfluss der Faktoren Klimawandel und Landnutzung einzeln bereits in zahlreichen Studien bewiesen worden. Dabei sind die stärksten Veränderungen durch Landnutzungswandel festgestellt worden, was zur einer Vereinheitlichung des Landschaftsbilds führt [GEHRIG-FASEL, 2007; KULAKOWSKI ET AL., 2011]. Dies trifft auch auf die Landschaft um Davos zu, die geprägt ist durch zunehmende Waldausbreitung, was durch die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigt wird.

Das Zusammenspiel beider Faktoren und die starken Abhängigkeiten des komplexen Gefüges wurden jedoch bisher kaum untersucht. Es ist wichtig zu betonen, dass nur ein Zusammenspiel beider Faktoren den jetzigen Zustand im Untersuchungsgebiet herbeigeführt hat. Diese Studie kann einen Beitrag dazu leisten, die Interaktion dieser beiden äusserst ausschlaggebenden Faktoren besser zu verstehen. Dies ist essentiell um zukünftige Entwicklungen der Wald- und Baumgrenze mit grösserer Sicherheit vorhersagen zu können. Der Effekt der Landnutzung kann sich auch kurzfristig verändern. In der Aufnahmeperiode 1972 /73 war dieser Faktor noch dritt-einflussreichster, knapp 41 Jahre später ist die Landnutzung hingegen nicht mehr erwähnenswert. Die mit dem Klimawandel assoziierten Faktoren (Vegetation, Topographie, Ausaperung und Exposition) haben in der Aufnahmeperiode 2012 Einfluss gewonnen. Nach wie vor ist jedoch die Höhenlage die am meisten beeinflussende Variable.

Der zeitliche Unterschied in der Wirkung zwischen Landnutzung und Klimawandel ist entscheidend für die beobachtete Entwicklung der Bäume. Dies gilt besonders für die ökologisch äusserst empfindlichen Lebensgemeinschaften oberhalb der Waldgrenze. Besonders bei einer kleinflächigen Betrachtung überwiegen meist topographische Einflüsse (Hangneigung, Wind, Sonneneinstrahlung ...) gegenüber langfristigen Trends. Die Aussage, dass eine Waldausdehnung generell auf allen Standorten stattfindet ist kritisch zu beurteilen, da jeder Standort wiederum Schauplatz verschiedener Wechselwirkung ist [DULLINGER ET AL., 2004; HOLTMEIER ET AL., 2005; HARSCH ET AL., 2009].

5.3 Diskussion der Methodik

Eine erste schwierige Aufgabe bestand darin, die Waldgrenze zu ermitteln. Die Flüge des LIDAR-Projektes wurden nur bis 2000 m durchgeführt. Entsprechend waren nicht alle Waldflächen gemäss der festgelegten Definition inkludiert. Eine rein visuelle Einschätzung und Interpretation des Orthofotos "Swissimage" war erforderlich. Dies führt jedoch dazu, dass eine persönliche Einschätzung anhand der Orthofotos gemacht werden musste. Eine vollständig automatisierte Darstellung war nicht möglich.

Bezüglich der Methodik, Rohdaten von LiDAR zu verwenden, ist zu berücksichtigen, dass das Aufnahmeverfahren durch Laserscanner auch Nachteile mit sich bringt. Beispielsweise werden die Laserstrahlen bereits abgelenkt, wenn der Strahl auf einen Zweig des Baumes fällt. Die echte Grösse wird dadurch verfälscht. Auch die Hangneigung und die unterschiedlichen Einfallswinkel können zu Ungenauigkeiten der Messdaten führen. Detaillierte Ausführung des Airborne Laser Scanning und die in diesem Zusammenhang stehenden Methoden und Unsicherheiten werden von LÜTHY [2008] eingehend beschrieben.

Es wurde nur ein Teil des Dischmatal als Untersuchungsgebiet dieser Arbeit gewählt, da bereits in diesem Teil alle Expositionen berücksichtigt wurden. Zur Vereinfachung wurde eine binäre Einteilung der Exposition gewählt (Nord- / Südhang). Auch die Vegetationsklassen wurden von zehn auf fünf reduziert. Der Detaillierungsgrad wird durch diese Vereinfachung gemindert. Bei den Analysen war dieser Vorgang jedoch unabdingbar, da bereits mit reduzierten Einteilungen die Komplexität der Variablen gross war. Die Interpretation der Klassifikationsbäume, sowie die multivariaten Statistiken wurde somit etwas vereinfacht.

Obwohl bei den Feldaufnahmen versucht wurde, methodisch möglichst das gleiche Verfahren zu verwenden wie in der Vergleichsperiode 1972 /73, war es doch auf Grund von fehlenden Informationen nicht zur Gänze möglich gewesen. Die Definition der Gruppengrösse aus 1972 /73 war vorhanden, es fehlte jedoch die Information, welcher Flächenbezug pro festgelegter Gruppe gewählt war. Aus diesem Grund ist es möglich, dass mit der Festlegung des Radius von 25 m, mehr Gruppenpunkte aufgenommen wurden, als 1972 /73. Ein methodisch völlig identischer Vorgang kann nicht gewährleistet werden, obwohl bei den Feldaufnahmen versucht wurden, möglichst objektiv und unvoreingenommen vorzugehen. Eine gewisse Subjektivität ist nicht auszuschliessen. Andererseits konnte anhand der GIS-basierten Karten sicher gestellt werden, dass

die Aufnahmepunkte aus der Aufnahmeperiode 1972 /73 vollständig erfasst wurden und die Methodik, welche 2012 angewandt wurde, detailliert genug gewählt wurde. Anhand der GIS°-°Karten wird ersichtlich, dass zwischen zwei Punkten der Aufnahmeperiode 1972 /73 in 2012 viele neue Baumpunkte gefunden wurden. Ein "Übersehen" der Punkte kann praktisch ausgeschlossen werden. Ein weiterer erwähnenswerter Punkt ist der Unterschied im Detailliertheitsgrad der heutigen Aufnahmepunkte im Vergleich zu den kartieren Baumpunkten 1972 /73, da die Position der Baumpunkte im Jahr 2012 auf Grund der GPS- Koordinaten exakte bestimmt werden konnte. Früher waren bei der Kartierung genügend grosse Abstände zwischen den aufgenommenen Punkten einzuhalten, um diese noch massstabsgetreu einzeichnen zu können [WALDER, 1983].

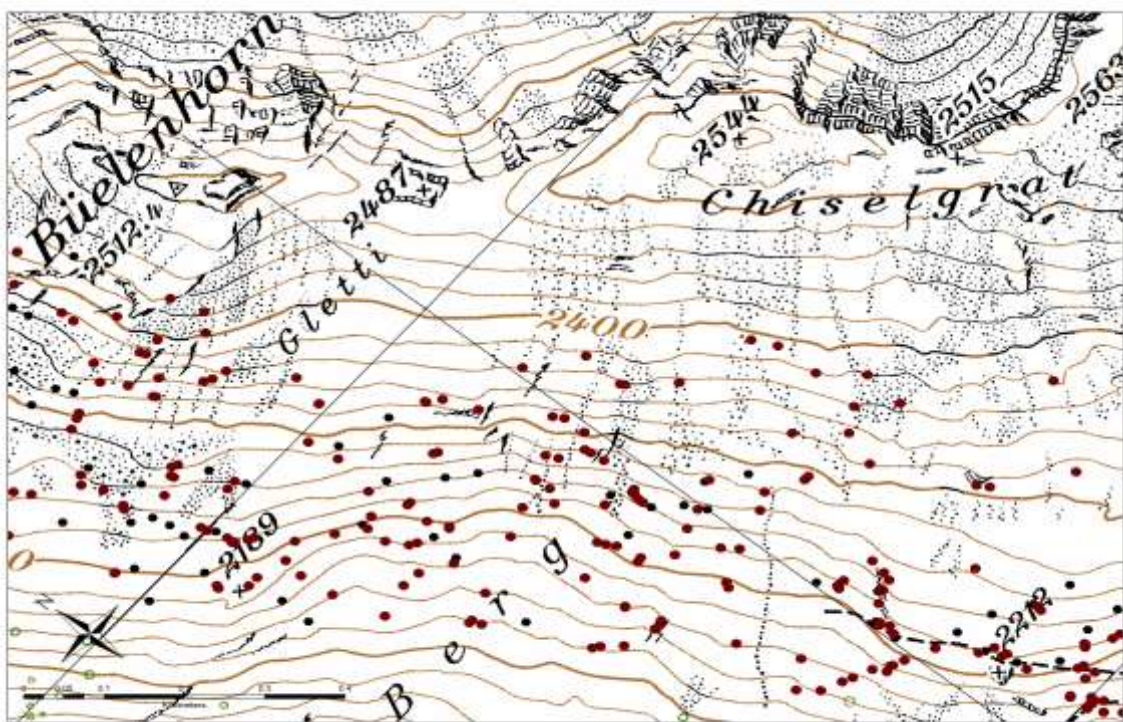


Abbildung 21: Ausschnitt aus dem Untersuchungsgebiet Dischmatal

Die roten Punkte stellen die Baumpunkte aus dem Jahr 2012, die schwarzen die Vergleichsdaten 1972 /73 dar.

Im Zuge einer einwöchigen Lehrveranstaltung der Universität Freiburg in Kooperation mit der ETH Zürich und Universität Nancy wurden von Studentengruppen im Dischmatal Stichproben für Jahrringanalysen im Juni 2012 entnommen. Hierbei wurden jeweils Lärche und Arve auf beiden Talseiten untersucht. Die Analysen bestätigen, dass die vermessenen Baumproben ein Alter zwischen 20 und 40 Jahren besaßen. Um Gewissheit zu erhalten müssen im Laufe nachfolgender Untersuchungen grössere Stichproben entnommen werden, um repräsentative statistische Aussagen treffen zu können.

Die Verwendung der vorliegenden handgezeichneten Karte von Walder [1983] machte zunächst eine Digitalisierung erforderlich. Die Karte beinhaltete jedoch Ungenauigkeiten bezüglich der Festlegung der exakten Standpunkte der Einzelbäume/Gruppen von 1972 /73. Die Qualität der Daten wird zusätzlich durch Ungenauigkeiten und Messfehler bei der Bestimmung der Höhe und des Durchmessers der Bäume beeinträchtigt. Vor allem bei der Bestimmung des Stammdurchmessers war es nicht immer möglich, auf einer Höhe von genau 30 cm oberhalb des Bodens zu messen, da die Bäume in der Krüppelzone, sehr kleinwüchsig sind und oft dicke Verwachsungen bilden.

Eine weitere Schwierigkeit bestand darin, den Parameter Verbiss immer eindeutig zu bestimmen. Durch die hohe Verwechslungsmöglichkeit mit Frostschäden, war es in einigen Fällen schwierig, den Verbiss eindeutig den Klassen zuzuordnen.



Abbildung 22: Starker Verbiss bei einer Fichte, Höhe ca. 60cm
(Foto Leibold, E.)

Bezüglich der Auswahl der Variablen aus dem Katalog der GIS-Datenfiles des MAB-Projektes Davos ist folgendes anzumerken: Sowohl die Nutzung, als auch die Ausaperungsdaten stammen aus dem Jahre 1982. Dies ist jedoch auf Grund der Tatsache, dass die Bäume, die die Verfasserin 2012 vermessen hat, zwischen 20 und 100 Jahre alt sind, von Vorteil. Die Variable erklärt das Vorkommen und die in diesem Zusammenhang gemessenen Höhen und Durchmesserhältnisse besser, als es aktuelle Daten wiedergeben würden. Im Bezug zu den Aufnahmen des Schneeschimmelbefalls wären aktuelle Daten besser geeignet, doch wurde dahingehend kein Schwerpunkt in dieser Arbeit gesetzt.

Wie bereits erwähnt eignen sich Klassifikationsbäume sehr gut für die Analyse von Datensätzen mit unabhängigen Variablen. Abschliessend soll bemerkt werden, dass die Klassifikationsbäume sehr instabil gegenüber kleinen Veränderungen des Datensatzes sind. Die Schwierigkeiten zwischen den verschiedenen Darstellungen könnte hiermit erklärt werden. Instabilität bedeutet, dass bei Veränderungen einer Variable kann es zu enormen Verschiebungen des Dendrogramms führen. Diese Unsicherheit der Klassifikationsbäume wirkt sich negativ auf die Interpretation aus, da kleine Veränderungen zu grossen Unterschieden im Einfluss der einzelnen Variablen führen [BREIMAN, 1996; STROBL ET AL., 2008]. Dennoch überwiegen die Vorteile von Entscheidungsbäumen und stellen den Einfluss der Variablen übersichtlich dar (einfache Interpretation, Handling von kategorialen- als auch numerischen Variablen, schnelle Übersicht über einen grossen und vielseitigen Datensatz).

Eine interessante Alternative zu den Klassifikationsbäumen wären Analysen mit multivariat-logistischen Modellen. Hierbei werden alle Variablen gleichzeitig für die Entscheidungsfindung miteinbezogen. Auch die Korrelationen zwischen den Variablen könnte dadurch exakt beschrieben werden [VENABLES ET AL., 1994].

6 Schlussfolgerungen

Wie in weiten Teilen der Alpen hat sich auch der Wald in der Landschaft Davos ausgebreitet. Ein genereller Anstieg der Baumindividuen in allen Höhenstufen seit der Aufnahmeperiode 1972 /73 ist durch die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigt worden. Hierbei sind die Exposition, Topographie und vor allem die Höhenlage entscheidende Einflussfaktoren. Die Anzahl der untersuchten Baumarten variiert zudem erheblich in den verschiedenen Höhenstufen. Die Lärche erreicht sowohl auf der Nord- als auch auf der Südseite des Dischmatal die höchsten Standorte, was auf ihre Fähigkeit der schnellen Etablierung durch die Windverbreitung ihrer Samen und die geringfügige Anfälligkeit gegenüber Schneepilzen zurückzuführen ist. Darüber besitzt sie eine schnelle Regenerationsfähigkeit nach Lawinenereignissen. Es ist festzuhalten, dass generell Exposition, Höhenlage sowie die Dauer der jährlichen Vegetationsperiode entscheidenden Einfluss auf das Wachstum der Bäume oberhalb der Waldgrenze haben. Die Reaktion der untersuchten Baumarten ist jedoch sehr unterschiedlich. In der Verbiss- und Schneeschimmelkartierung des Datensatzes 2012 zeigt sich zudem der starke Einfluss der Exposition. Der prozentuale Anstieg von bis zu 20 Prozent der Baumart *Pinus cembra* ist im Vergleich zur Aufnahmeperiode 1972°/73 auffällig. Hierbei wird auf die zoochore Verbreitung der Arve und der Nachteil der extreme Frostgefährdung der Lärche verwiesen.

Die Ergebnisse der multivariaten Analysen zeigen, dass es eine bedeutende Veränderung der Einflussfaktoren gab. 1972 /73 war die Nutzung ausschlaggebend, 2012 ist neben standörtlichen Faktoren die Vegetation ein einflussreicher Faktor. Auch im Hinblick auf die Entwicklung zwischen den beiden Aufnahmeperioden ist die Tendenz vorhanden, dass Vegetation und Ausaperung an Bedeutung zunehmen. Die Höhenlage ist weiterhin der dominierende Faktor, was auf eine zunehmende Relevanz des Klimawandels hinweist, da die Wachstumsbedingungen sich verbessern. Dies bestätigt auch die Tatsache, dass die Ausaperung und Vegetation an Einfluss zunehmen, da diese stark mit der Höhenlage korrelieren. Der starke Rückgang der Bedeutung des Faktors "Landnutzung" seit der Aufnahmeperiode 1972 /73 zeigt, dass dieser kurzfristige Einfluss auf die Entwicklung verstärkt wird durch den gleichlaufenden, langfristig wirkenden Einfluss des Klimawandels. Keinesfalls bestimmt nur der Aspekt Klimawandel die zukünftige Position der Waldgrenze. Zahlreiche weitere Faktoren (Bodenzustand, anthropogene Einflüsse, Pilz- und Insektenbefall, etc.) spielen im komplexen System "Waldgrenze" eine bedeutende Rolle.

7 Ausblick

Im Hinblick auf die Durchführung weiterer Untersuchungen zu dem vorgestellten Themengebiet sollen hier noch einige wichtige Aspekte angesprochen werden, die in dieser Arbeit noch zu wenig bearbeitet wurden und Potential für weiterführende Analysen geben.

Zur Festigung der in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse, wären dendrochronologische Untersuchungen eine komplementäre Methodik. Die Tatsache, dass die vorgefundenen Bäume des Aufnahmejahres 2012 sich erst in den letzten 40 Jahren etablierten, könnte hiermit bewiesen werden. Der Vorbehalt, dass die Suchvorgänge und die Aufnahmemethodik sehr unterschiedlich durchgeführt wurden, könnte zerschlagen werden. Eine Alternative wäre ein Vergleich von Orthofotos, die zeitnah zu den Aufnahmejahren aufgenommen wurden. Hierfür ist eine hohe Auflösung notwendig, da die Einzelbäume oberhalb der Waldgrenze sehr klein und nur schwer von der Oberfläche zu unterscheiden sind. Die Vervollständigung der Datenaufnahme für das gesamte Dischmatal wäre zudem empfehlenswert.

Weitere Untersuchungen und die Ausweitung des Untersuchungsgebietes hätten jedoch den Rahmen dieser Arbeit gesprengt. Auch bezüglich des Aspekts der Gruppenaufnahmen könnten weitere Analysen durchgeführt werden. GIS-basierte Analysen (Nachbarschaftsanalysen) könnten beispielsweise Aufschluss geben über das gemeinsame Vorkommen von Lärche geben. Generell könnten mögliche Interaktionen zwischen den untersuchten Baumarten damit ermittelt werden.

Der Fokus dieser Arbeit liegt darauf, den Einfluss verschiedener Umweltfaktoren und Variablen aufzuzeigen. Die in dieser Arbeit analysierten Punkte diskutieren schwerpunktmässig die Veränderung der drei Baumarten im Hinblick auf ihr Vorkommen und den Einfluss verschiedener Umweltfaktoren auf das Wachstum der etablierten Bäume im Vergleich zur Aufnahmeperiode 1972 /73. Deutliche Ergebnisse bezüglich der Veränderungen innerhalb von 40 Jahren im Bereich der Baumgrenze wurden erzielt. Zudem lassen die Ergebnisse der Arbeit den Schluss zu, dass der Klimawandel Veränderungen im sensiblen Ökosystem "Waldgrenze" verursacht.

Abschliessend für ein ökologisches Thema an der Waldgrenze könnte Edward O. Wilson [1984] zitiert werden: " It is enough to work on assumptions that all of the details matter in the end, in some unknown but vital way."

Literatur

Albert, C.H., Thuiller, W., Lavorel, S., Davies, I.D., Garbolino, E., 2008: Land-use change and subalpine tree dynamics colonization of *Larix decidua* in French subalpine grasslands, *Journal of Applied Ecology*, Vol. 45, S. 659- 669.

Artuso, R., Bovet, S., Streilein, A., 2003: Practical methods for the verification of countrywide terrain and surface models, Swiss Federal Office of Topographie, Wabern, 6 S.

Barbeito, I., Dawes, M., Rixen, Ch., Senn, J., Bebi, P., 2012: Factors driving mortality and growth at treeline: A 30- year experiment of 92 000 conifers, *Ecology*, Nr. 93 (2), S. 389-401.

Bebi, P., 1999: Erfassung von Strukturen im Gebirgswald als Beurteilungsgrundlage ausgewählter Waldwirkungen, Dissertation zur Erlangung des Titels Doktor der Naturwissenschaften an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, 125 S.

Bernoulli, M., Körner, Ch., 1999: Dry matter allocation of Treeline zone, *Phyton* 39, S. 7–12.

Birmann, K., Körner, Ch., 2009: Nitrogen status of conifer needles at the alpine treeline, *Plant Ecology & Diversity*, Vol. 2, No. 3, S. 233–241.

Blaser, P., 1980: Der Boden als Standortsfaktor bei Aufforstungen in der subalpinen Stufe (Stillberg, Davos), *Mitteilungen*, Vol. 56, Heft 3, Eidgenössischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen (EAFV), 82 S.

Boden, S., Pytell, P., Eastaugh, C., 2009: Impacts of climate change on the establishment, distribution, growth and mortality of Swiss stone pine (*Pinus cembra* L.), *iForest – Biogeosciences and Forestry*, Review Article - doi: 10.3832/ifor0537-003.

Breiman, L., 1996: Heuristics of Instability and Stabilization in Model Selection, *the Annals of Statistics*, Vol. 24, Nr. 6, S. 2350- 2383.

Breiman, L., 2001: Random Forests, *Machine Learning*, 45, S. 5-32.

Bundesamt für Statistik, 2001: Bodennutzung im Wandel, *Arealstatistik Schweiz*, Neuchatel, 31 S.

Burschel, P., Huss, J., 2003: Grundlagen des Waldbaus, Eugen Ulmer GmbH&Co, Stuttgart, 466 S.

Cutler, D. E., Edwards, T. C., Beard, K.H., Cutler, A., Hess, K.T., Gibson, J., Lawler, J.J., 2007: Random forests for classification in ecology, *Ecology*, Vol. 88, Nr. 11, S. 2783- 2792.

Dalgaard, P., 2002: Statistics and computing, *Introductory Statistics with R*, Springer- Verlag, New York, 261 S.

Danby, R., 2003: A Multi-scale Study of Tree- line Dynamics in Southwestern Yukon, Arctic, Vol. 58, Nr. 4, S. 427- 438.

D'eath, G., Fabricius, K. E., 2000: Classification and regression trees: a powerful yet simple technique for ecological data analysis, *Ecology*, Vol. 81, Nr. 11, S. 3178-3192.

Dullinger, S., Dirnböck, T., Grabherr, G., 2005: Modelling climate change- driven treeline shifts: relative effects of temperature increase, dispersal and invasibility, *J. Ecology* Nr. 92, S. 241- 252.

Dunwiddie, P.W., 1977: Recent tree invasion of subalpine meadows in the Wind River Mountains, Wyoming, *Arctic and Alpine Research*, Vol. 9, Nr. 4, S. 393-399.

Ellenberg, H., Leuschner, Ch., 2010: *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen*, 6. Auflage, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 1280 S.

Essig, S., 2004: Analyse der Höhenentwicklung von Bäumen der Versuchsaufforstung Stillberg an verschiedenen Kleinstandorten der oberen subalpinen Stufe, Diplomarbeit an der Fachhochschule Rottenburg, Institut für Waldbau, 119 S.

Frei, E., 1983: *Agrarpedologie*, Arbeitsgemeinschaft Bernensia, Geographische Gesellschaft, Bern, 150 S.

Fowler, J., Cohen, L., Jariv, P., 1998: *Practical Statistics for Field Biology*, 2. Auflage, John Wiley&Sons Ltd, Chichester, 257 S.

Fuchs, H.J., 2003: Methodische Ansätze zur Erfassung von Waldbäumen mittels digitaler Luftbildauswertung, Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie der Georg-August-Universität Göttingen, 139 S.

Gehrig-Fasel, A. J., 2007: Treeline and Climate change: Analyzing and modelling patterns and shifts in the Swiss Alps, Dissertation an der Universität Lausanne, Department für Ökologie und Evolution, 143 S.

Gellrich, M., Baur, P., Robinson, H.B., Bebi, P., 2008: Combining classification tree analyses with interviews to study why sub-alpine grasslands sometimes revert to forest: A case study from the Swiss Alps, *Agricultural Systems*, Nr. 96, S. 124–138.

Green, K., Venn, S., 2012: Tree-Limit Ribbons in the Snowy Mountains, Australia, *Characterization and Recent Seedling Establishment, Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, Vol. 44, No. 2, S. 180-187.

Grace, J., Berninger, F., Nagy, L., 2002: Impacts of climate change on tree line, *Annals of Botany* 90, S. 537-544.

Gross, M., 1989: Untersuchungen an Fichten der alpinen Waldgrenze, *Dissertation Bontanicae*, Band 139, J.Cramer- Verlag, Stuttgart, 167 S.

Grossmann, H., 1927: Die Waldweide in der Schweiz, *Dissertation an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich*, 124 S.

Günter, T., 1986: Das Testgebiet Davos, der Naturraum und dessen Nutzung im alpinen Tourismusgebiet von Davos, *Bericht Nr. 289, Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen (EAFV), Birmensdorf*, S.21-29.

Hanso, M., 2000: Phacidium snow blight in the Baltic countries, *Metsanduslikud uurimused XXXIV*, S. 64–74.

Harsch, M., Philip E., Hulme, Matt, S., McGlonez, Richard, D., 2009: Are treeline advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming, *Ecology Letters*, Nr. 12, S. 1040 - 1049.

Hefti, R., 1986: Zustand und Gefährdung des Waldes, *Ergebnisse des MaB-Projektes Davos, Eidgenössische Anstalt für forstliches Versuchswesen, Birmensdorf*, S. 175- 190.

Holtmeier, F. K., 1985: Die klimatische Waldgrenze- Linie oder Übergangsraum (Ökoton)?, *Ein Diskussionsbeitrag unter besonderer Berücksichtigung der Waldgrenzen in den mittleren und hohen Breiten der Nordhalbkugel, Erdkunde*, Band 39, Nr. 4, S. 271-285.

Holtmeier, F.K., Broll, G., 2005: Sensitivity and response of northern hemisphere altitudinal and polar treelines to environmental change at landscape and local scales, *Global Ecology and Biogeography*, Nr. 14, S. 395- 410.

Horak, E., 1963: Pilzökologische Untersuchungen in der subalpinen Stufe (*Piceetum subalpinum* und *Rhodoreto-Vaccinietum*) der Rätischen Alpen (Dischmatal, Graubünden), Nr. 39, Heft 1, Mitteilungen, Schweizerische Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Birmensdorf, 112 S.

Hothorn, T., Hornik, K., Zeileis, A., 2006: Unbiased Recursive Partitioning: A conditional Inference Framework, *Journal of Computational and Graphical Statistics*, Nr. 15 (3), S. 651- 647.

IPCC Forth Assessment Report, 2007: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation, Vulnerability, Cambridge University Press, Cambridge, 976 S.

Kaltenrieder, H., Tinner, W., Ammann, B., 2005: Zur Langzeitökologie des Lärchen-Arvengürtels in den südlichen Walliser Alpen, *Institut für Pflanzenwissenschaften der Universität Bern, Abteilung Paläoökologie, Botanica Helvetica* 115, S. 137–154.

Kessler, M., Böhner, J., Kluge, J., 2007: Modelling tree height to assess climatic conditions at tree lines in the Bolivian Andes, *Ecological modelling* 207, S. 223-233.

Keller, M., 1987: Ausaperungskartierung mit Landsat-MSS Daten zur Erfassung ökologischer Einflussgrößen im Gebirge, Dissertation an der philosophischen Fakultät II der Universität Zürich, 111 S.

Knufinke, A., 1998: Frostringe in Lärchen (*Larix decidua* MILL.) und deren Beziehung zu Wetter und Standort, dargestellt an Material aus Waldgrenz- Aufforstung Stillberg, Davos, Schweiz, Diplomarbeit an der Universität Bielefeld, Fakultät für Biologie, 109 S.

Körner, Ch., 1998: A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation, *Oecologia* 115, S. 445-459.

Körner, Ch., 1999: Alpine plant life, *Functional Plant Ecology of High mountain Ecosystems*, Springer- Verlag, Heidelberg, 344 S.

Körner, Ch., 2012: Alpine treelines, *Functional Ecology of the global high elevation tree limits*, Springer- Verlag, Basel, Schweiz, 190 S.

Körner, Ch., Hoch, J., 2006: A Test of Treeline Theory on a Montane permafrost Island, Arctic, Antarctic, and Alpine Research, Vol. 38, No. 1, S. 113-119.

Körner, Ch., Paulsen, J., 2004: A worldwide study of high altitude treeline temperature, *Journal of Biogeography*, Nr. 31, Issue 5, S. 713- 732.

Kronfuss, H., Havranke, W. M., 1999: Effects of Elevation and Wind on the Growth of *Pinus cembra* L. in a Subalpine Afforestation, *Phyton* (Austria), Vol. 39, Heft 4, S. 99- 106.

Krumm, F., 2004: Einfluss von extremen Warmjahren auf das Dickenwachstum von Lärchen (*Larix decidua* MILL.) und Arven (*Pinus cembra* L.) an der alpinen Waldgrenze, Diplomarbeit an der Universität Freiburg im Breisgau, Institut für Waldwachstum, 82 S.

Kulakoski, D., Bebi, P., Rixen, Ch., 2011: The interacting effects of land use change, climate change and suppression of natural disturbances on landscape forest structure in the Swiss Alps, *Oikos* 120:, S. 216–225.

Laely, A., 1952: Davoser Heimatkunde, Band 1, Buchdruckerei Davos AG, 275 S.

Landtwing, S., 2005: Airborne Laserscanning- Genauigkeitsinformation für den Auswertungsprozess, Diplomarbeit and der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, 95 S.

Leibundgut, H., 1986: Unsere Gebirgswälder, Verlag Paul Haupt, Bern und Stuttgart, 84 S.

Legende zu den MAB- Datenfiles: Beschreibung der Faktoren, 18 S.

Leonelli, G., Pelfini, M., Morra di Cella, U., Garavaglia, V., 2011: Climate Warming and the Recent Treeline Shift in the European Alps: The Role of Geomorphological Factors in High-Altitude Sites, *Ambio*, Vol. 40, Nr. 3, S. 264- 273.

Lüthy, J., 2008: Entwicklung eines Qualitätsmodells für die Generierung von Digitalen Geländemodellen aus Airborne Laser Scanning, Dissertation der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Diss. ETH Nr. 17066, 157 S.

Mai-He, L., Jian, Y., 2004: Effects of microsite on growth of *Pinus cembra* in the subalpine zone, *Annual Forest Science*, S. 319–325.

MAB- Davos- Karte, 1986: Günther, T., Karte Landnutzung 1982 und Nutzungsänderung seit 1950, Massstab 1:25000, Eidgenössische Anstalt für forstliche Versuchswesen (EAFV), Birmensdorf.

Moser, R., Keller, M., Kunz, S., 1986: Klima und Luftbelastung, Ergebnisse des MAB- Projektes Davos, Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Birmensdorf, S. 107-118.

Motta, R., Morales, M., Nola, P., 2006: Human land-use, forest dynamics and tree growth at the treeline in the Western Italian Alps, *Forest Science* 63, S. 739- 747.

Müller, P. J., Ackermann, G., Jenny, H., 1986: Das Verteilungsmuster ausgewählter Wirbeltierarten, Ergebnisse des MAB- Projektes Davos, Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Birmensdorf, S. 191-199.

Niculossi, K., Patzelt, G., 2006: Klimawandel und Veränderungen an der alpinen Waldgrenze - aktuelle Entwicklungen im Vergleich zur Nacheiszeit, BFW- Praxisinformation Nr. 10, 5 S.

Ott, E., 1996: Leitbilder zur Schutzwirkung des Waldes vor Lawinenbildung, Volume 115, Nummer 1, Forstwissenschaftliches Centralblatt, S. 223-230.

Paulsen, J., Weber, U.M., Körner, Ch., 2000: Tree Growth near Treeline: Abrupt or Gradual reduction with Altitude, Arctic Antarctic and Alpine Research, Vol. 32, Nr. 1, S. 14-20.

Paulsen, J., Körner, Ch., 2001: GIS- analyses of Tree- line Elevation in the Swiss Alps suggests no Exposure Effects, Journal of Vegetation Science, Vol. 12, Nr. 6, S. 817- 824.

Pfister, M., 1978: Die Landschaft Davos, Haupt, Bern, 112 S.

Price, M., 1997: The complex life: Human land uses in Mountain Ecosystems, Global ecology and biogeography letters 6, Nr. 1, S. 77-90.

R Development Core Team, 2012: R: A Language and Environment for Statistical Computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org>.

Rikli, M., 1909: Die Arve in der Schweiz, ein Beitrag zur Waldgeschichte und Waldwirtschaft in der Schweiz, Kommissionsverlag Georg & Co, Neue Denkschriften der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft, Band 44, Basel, Genf und Lyon, 455 S.

Scheffer, F., Schachtschabel, P., 2010: Lehrbuch der Bodenkunde, Spektrum Akademischer Verlag, 15. Auflage, Heidelberg und Berlin 2002, 570 S.

Schönenberger, W., 1975: Standortseinflüsse auf Versuchsaufforstungen an der alpinen Waldgrenze (Stillberg, Davos), Vol. 51, Heft 4, Mitteilungen, Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Birmensdorf, 69 S.

Senn, J., Schönenberger, W., Wasem, U., Schnyder, D., Frey, W., 1996: Lawinenhänge aufforsten - gewusst wie. 20 Jahre Versuchsaufforstung Stillberg bei Davos. - Argumente aus der Forschung 12, S. 2-12.

Strobl, C., Boulesteix, A. L., Kneib, T., Augustin, T., Zeileis, A., 2008: Conditional variable importance for random forests, *Bioinformatics*, Nr. 9: 307.

Swisstopo, 2003: Flugdienst, *Geodata news* - Nr. 4, Dezember 2003, Bundesamt für Landestopographie, swisstopo.

Swisstopo, 2006: Luftaufnahmen mit einer digitalen Kamera, *Viewer von Luftbilder*, *Geodata news*- Nr. 12, Dezember 2006, Bundesamt für Landestopographie, swisstopo.

Swisstopo, 2007: Die Laserhöhenmodelle DTM- AV und DOM, *Geodata news*- Nr. 14, Oktober 2007, Bundesamt für Landestopographie, swisstopo.

Scheffer, F., Schachtschabel, P., 2010: Lehrbuch der Bodenkunde, Spektrum Akademischer Verlag, 15. Auflage, Heidelberg und Berlin 2002, 570 S.

Tranquillini, W., 1979: Physiological Ecology of the Alpine Timberline, Tree existence at High Altitudes with Special Reference to the European Alps, *Ecological Studies* 31, Springer-Verlag, Berlin, 137 S.

Trepp, W., 1959: Die Waldgesellschaften im Landwassertal, Vol. 12, in *Bündnerwald* 7, Chur, S. 180-185.

Urfer-Henneberger, C., 1970: Die Sommerniederschläge im Dischmatal bei Davos, Vol. 46, *Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen (EAFV), Mitteilungen EAFV: Birmensdorf*, S. 67-110.

Urfer, C., 1981: Mittlere Temperatur- und Windverteilung im Dischmatal bei Davos bei typischen sommerlichen Witterungslagen, *Schweizerische Meteorologische Zentralanstalt, Veröffentlichung* Nr. 43, Zürich, 49 S.

Venables, W. N., Ripley, B. D., 1994: *Statistics and Computing: Mordern applied Statistics with S-Plus*, Springer-Verlag, New York, 462 S.

Vögele, E.-A., 1984: Untersuchungen zur Geomorphologie und Jungquartären Talgeschichte des Dischma, *Geographisches Institut der Universität Zürich, Physische Geographie* Vol. 14: Zürich.

Wasern, U., Engesser, R., Heiniger, U., Senn, J., 2005: Der Arvenschneepilz (*Phacidium infestans* KARST.), *Faktenblatt der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Lawinen (WSL), Birmensdorf*, 1 S.

Wildi, O., Ewald, K., 1986: Der Naturraum und dessen Nutzung im alpinen Tourismusgebiet von Davos, Bericht Nr. 289, Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen (EAFV), Birmensdorf, 313 S.

Wieser, G., Tausz, M., 2007: Trees at their upper limit, Treeline limitation at the Alpine timberline, Springer Verlag, 225 S.

Walder, U., 1983: Ausaperung und Vegetationsverteilung im Dischmatal, Dissertation, Vol. 59, Heft 2, Mitteilungen, Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Birmensdorf.

Wepler, T., Suter, W., 2006: Entwicklung der Waldverjüngung angesichts hoher Dichten von wilden Huftieren in der Val Trupchun (Schweizer Nationalpark) von 1991/1992 und 2003, Nationalparkforschung in der Schweiz, Band 93, S. 213- 241.

Wilson, E.O., 1984: Biophilia, Harvard University Press, Cambridge Mass, 157 S.