

ZÜRCHER HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN  
DEPARTEMENT LIFE SCIENCES UND FACILITY MANAGEMENT  
INSTITUT FÜR UMWELT UND NATÜRLICHE RESSOURCEN

**STRUKTURERFASSUNG UND DYNAMIK VON WALDGRENZENNAHEN  
WÄLDERN MIT VERMINDERTER LAWINENSCHUTZWIRKSAMKEIT  
IN DER LANDSCHAFT DAVOS**

Bachelorarbeit

**von**

**Ulrich Melanie**

Bachelorstudiengang 2005

Abgabedatum 09.10.2008

Studienrichtung Umweltingenieurwesen

Fachkorrektoren:

Dr. Bebi, Peter

SLF, Flüelastrasse 11, Davos

Dr. Köchli, Daniel

ZHAW, Grüental, Wädenswil

## Impressum

### Keywords:

Subalpiner Gebirgswald, Schutzwirksamkeit, Waldlawinen, Waldentwicklung, Laserscanning

### Zitiervorschlag:

Ulrich M. (2008): Waldentwicklung von Strukturerofassung und Dynamik von waldgrenzennahen Wäldern mit verminderter Lawinenschutzwirksamkeit in der Landschaft Davos. Bachelorarbeit, Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen, ZHAW Wädenswil

### Adresse:

Melanie Ulrich  
Weststrasse 36  
8400 Winterthur

[melanie\\_ulrich@bluewin.ch](mailto:melanie_ulrich@bluewin.ch)

## Zusammenfassung

In weiten Teilen der Alpen übernimmt subalpiner Gebirgswald eine grossflächige Schutzfunktion gegenüber Lawinen, ohne diesen Schutz wären viele Täler unbewohnbar. Lichte, nordexponierte Wälder an der oberen Waldgrenze mit einem hohen Lärchenanteil sind potentiell Waldlawinenanrissgebiet. Schnee und Lawinen beeinflussen Einzelbäume und Struktur des Waldes und die Bestandesstruktur wiederum beeinflusst den Schneedeckenaufbau positiv. Von 1986 bis 1990 untersuchte das WSL - Institut für Schnee- und Lawinenforschung Waldlawinen und deren Anrisszone in der ganzen Schweiz. Anhand einer Wiederholung dieser Feldaufnahmen im Jahr 2008 und modernen LiDAR-Daten wurde die Entwicklung von obersubalpinen, nordexponierten Gebirgswäldern in der Landschaft Davos untersucht und die LiDAR-Daten bezüglich ihrer Sensibilität verifiziert.

Bestandesdichten und Verjüngungsaufkommen variierten je nach Standort stark. Topographische Parameter, wie Bodenrauigkeit, Hangneigung, Muldenlagen und Exposition beeinflussten das Vorkommen von kleinen und grossen Bäume unterschiedlich und artspezifisch. Die Bestandesentwicklung war mit LiDAR-Daten nur ungenügend nachzuvollziehen. Dies liegt an der Punktdichte der Rohdaten und am Befliegungszeitpunkt.

Die Schutzwirksamkeit und die Verjüngungssituation haben sich besonders auf Flächen mit Strünken, Totholz und umgekippten Wurzeltellern verbessert. Die grosse Variabilität in der Entwicklung auf den Aufnahmeflächen zeigt, dass Kleinstandorte und Dynamik im Bestand Schlüsselfaktoren sind.



## Abstract

In large areas of the Alps, subalpine mountain forest fulfils the function of protection against avalanches. Without this protection a large number of valleys would not be habitable. Open structured, north exposed and Larch-dominated forests near the upper timber line are potential starting zones for forest avalanches. While there are well known interactions between trees and snow processes in such forests, we know only little about the long-term natural dynamics of such avalanche prone forests. In this study, I repeated a survey of stand structures in avalanche release areas within forested terrain from 1986 to 1990. Therefore, of 23 stands near Davos (Switzerland) were revisited in the year 2008 and the same stand-structural data were re-assessed. Moreover, newly available LiDAR-dates were used to evaluate the potential of such LIDAR-data for the monitoring of structures and development processes in such open forest structures.

Stand density and appearance of regeneration varied strongly according to site conditions. Topographic factors like ground roughness, slope angle, curvature and exposition have an impact on the occurrence of trees of different diameters and species. The stand development could not be satisfactorily reconstructed with LiDAR-Dates, they showed only a limited suitability for the reconstruction of forest development in these stands, mainly because of a relatively low point density and the inappropriate time period of the LIDAR-survey.

The study suggests that the natural development of avalanche prone forest stands near treeline depends strongly on microhabitat, but that the protective effect is generally increasing over long time periods, especially where tree regeneration is favored by rotten death woody debris and pit- and mound micro-topography.



## Danksagung

Im Rahmen meiner Bachelorarbeit durfte ich den Sommer 2008 beim WSL-Institut für Schnee und Lawinenforschung (SLF) in Davos verbringen und erhielt dabei Einblicke in aktuelle Forschungsthemen rund um den Gebirgswald, dessen Ökologie und die Bedeutung der Waldlawinen.

Zum Erfolg dieser Arbeit haben viele Menschen, die an dieser Stelle nicht alle namentlich genannt werden können, beigetragen. An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei ihnen bedanken.

Ein grosses Dankeschön gilt meinem Korrektor und Betreuer Dr. Peter Bebi. Er nahm sich stets Zeit für meine Anliegen und Fragen. Durch unzählige Anregungen leistete er einen grossen Beitrag zum Gelingen der Arbeit. Mit seinem umfassenden Erfahrungsschatz und einer steten Prise Humor konnte er mich auch in schwierigen Phasen für die Arbeit motivieren. Er las meine Arbeit durch und half mir mit konstruktiven Vorschlägen weiter.

Ebenso gebührt Dr. Daniel Köchli grosser Dank. Als GIS-Spezialist und Korrektor der ZHAW Wädenswil investierte er viel Zeit und unterstützte mich einen Tag lang bei der Feldarbeit.

Frank Krumm danke ich herzlich für sein grosses Engagement. Er unterstützte mich viele Tage mit seinem Team Antoine Vullioud und Miriam Ackermann bei der Feldarbeit. Er hat somit einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen der Arbeit geleistet. Dabei entstanden sehr konstruktive Gespräche und ich konnte von seinem breiten Erfahrungsschatz viel profitieren. Zudem hat er meine Arbeit, besonders die Diskussion, durchgelesen und wertvolle Tipps abgegeben.

Auch Mathias Ulmer, dem GIS-Spezialist vom SLF, gebührt grosser Dank. Er organisierte die GIS-Daten und hatte immer ein offenes Ohr für meine Fragen und Anliegen, die dank seiner Hilfsbereitschaft immer sehr rasch und unkompliziert gelöst werden konnten.

Für die freundliche Atmosphäre und die Hilfsbereitschaft bedanke ich mich bei den Kolleginnen und Kollegen des WSL-Instituts für Schnee- und Lawinenforschung.

Herr Christian Ginzler von der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) danke ich besonders für den wertvollen Support bei den GIS-Analysen. Er begutachtete die LiDAR-Daten und gab mir Inputs, die wesentlich zu den vorliegenden Lösungen beigetragen haben.

Besonders meiner Familie und meinen Freunden möchte ich für das gründliche Durchlesen der Arbeit und ihrer moralischen Unterstützung danken.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen .....</b>	<b>15</b>
2.1	Subalpiner Gebirgswald.....	15
2.2	Waldlawinen und Schutzwirkung des Waldes .....	16
2.2.1	Definition.....	16
2.2.2	Entstehung von Waldlawinen .....	16
2.2.3	Schutzwirkung des Waldes .....	17
<b>3</b>	<b>Material und Methoden .....</b>	<b>19</b>
3.1	Untersuchungsgebiet.....	19
3.2	Datengrundlage aus dem Waldlawinenprojekt von 1986/90 .....	23
3.3	Auswahl der Untersuchungsflächen .....	24
3.4	Feldaufnahmen .....	24
3.5	Verarbeitung und Verifizierung von Geodaten .....	25
3.5.1	Geodaten.....	25
3.5.2	Geodatenverarbeitung.....	26
3.5.3	Verifizierung der Geodaten .....	27
3.6	Datenanalysen.....	28
3.6.1	Allgemein.....	28
3.6.2	Analyse der Geodaten.....	28
3.6.3	Analyse der Felddaten .....	29
<b>4</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>31</b>
4.1	Verifizierung der LiDAR-Daten .....	31
4.1.1	Deckungsgrad .....	31
4.1.2	Einzelbäume.....	32

4.2	Gebirgswalddynamik und –Struktur .....	35
4.2.1	Allgemein .....	35
4.2.2	Artenzusammensetzung .....	38
4.2.3	Einfluss der Bodenrauigkeit .....	40
4.2.4	Einfluss der Hangneigung .....	42
4.2.5	Einfluss von Muldenlagen .....	45
4.2.6	Einfluss der Exposition .....	46
<b>5</b>	<b>Diskussion</b> .....	<b>47</b>
5.1	Verifizierung der GIS-Analyse .....	47
5.2	Gebirgswalddynamik und Gebirgswaldstruktur .....	50
5.2.1	Entwicklungsdynamik .....	50
5.2.2	Schutzwirksamkeit der Bestände .....	55
5.3	Einschränkungen .....	58
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick</b> .....	<b>59</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>61</b>

## Terminologie und Abkürzungen

BHD	Brusthöhendurchmesser, Messhöhe am Stamm auf 1.3 m
DOM-AV	Digitales Oberflächenmodell der Amtlichen Vermessung Engl. Digital Surface Model (DSM)
DTM-AV	Digitales Terrainmodell der Amtlichen Vermessung Engl. Digital Terrain Model (DTM)
GIS	Geographisches Informationssystem, in der vorliegenden Arbeit wurde das Programm von ESRI ArcGIS – ArcInfo 9.2 verwendet
LFI	Schweizerisches Landesforstinventar
LiDAR	Laserscanning Light Detection and Ranging
NaiS	Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald
SLF	WSL - Institut für Schnee- und Lawinenforschung
WSL	Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft



# 1 Einleitung

In weiten Teilen der Alpen übernehmen Gebirgswälder eine wichtige Schutzfunktion vor Naturgefahren. Besonders Lawinen stellen in höheren Lagen eine Bedrohung für Menschen und anthropogene Einrichtungen dar. 10% der Gebirgswälder üben oberhalb von 1200 m ü. M. einen direkten Schutz vor Lawinen aus (Brassel & Brändli, 1999) und an waldfähigen Standorten bietet Wald den flächenmässig wichtigsten und günstigsten Schutz vor Lawinen (Margreth, 2004). Dabei sollte der Lawinenschutzwald von oben her nicht oder nur durch kleine Lawinen tangiert werden, und kleinere Lawinen sollten in der oberen Zone auslaufen (de Quervain, 1968). Waldgrenzennahe Beständen sollten verhindernd, dass Lawinen entstehen, die Schäden am Bestand verursachen (Meyer-Grass & Schneebeli, 1992; in der Gand, 1968). Lichte, waldgrenzennahe Wälder mit einem grossen Lärchenanteil sind öfters potentiell Waldlawinenanrissgebiet (Meyer-Grass & Schneebeli, 1992).

Vieles über die Lawinenschutzwirksamkeit der Gebirgswälder ist bekannt (Bebi et al., 2001; Meyer-Grass & Schneebeli, 1992). Die Interaktion zwischen Schnee bzw. Lawinen und Bäumen ist komplex. Einerseits beeinflusst der Bestand den Schneeaufbau günstig (Imbeck, 1987; in der Gand, 1978; de Quervain, 1978; Miller, 1964), andererseits wirken sich Schnee und Lawinen auf Bestandesstruktur aus (Bebi et al., 2001) und somit auch auf Einzelbäume. Besonders bei jungen Bäumen wird Wachstum und Überleben vom Schnee stark beeinflusst und wirkt sich auf die unterschiedlichen Baumarten verschieden aus (Senn & Schönberger, 2001).

Schutzwaldpflege ist sehr kostenintensiv. Durch relativ geringe Holzerlöse ist die Bewirtschaftung und Pflege häufig nicht mehr rentabel. Um die Schutzwaldpflege zu optimieren, stellt sich die Frage nach der Entwicklung in subalpinen Waldbeständen, die nicht von Pflegemassnahmen betroffen waren.

Die Struktur von Gebirgswäldern wurde, bezüglich des Lawinenschutzes, anhand verschiedener Methoden erfasst (Lardelli, 2003; Bebi, 2000; Chauvin et al., 1994; Leibundgut, 1959). Neuere Methoden stützen sich auf Luftbildanalysen und untersuchen die längerfristige Entwicklung des Gebirgswaldes. Das Waldlawinenprojekt, welches das SLF von 1986 bis 1990 durchführte, untersuchte Waldlawinenereignisse in der ganzen Schweiz. Dabei wurde sowohl der Schneeaufbau, wie auch die Waldstruktur äusserst genau erfasst (Meyer-Grass & Schneebeli, 1992). Die Daten aus dem Waldlawinenprojekt 1986/90 bieten eine optimale Grundlage, um die Waldstruktur erneut zu erfassen und Rückschlüsse im Hinblick auf die Waldentwicklung zu ziehen. Mit Laserscanning-Daten (LiDAR) bietet sich zusätzlich eine neue Methode an, um die Waldgrenzbestände zu erfassen (Maier et al., 2008; Hollaus et al., 2006; Morsdorf et al., 2004). Mit diesen zwei Datengrundlagen kann untersucht werden, ob die LiDAR-Daten erlauben, Entwicklungen im Gebirgswald im Laufe von 20 Jahren zu erkennen.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, einen Beitrag zum Verständnis der subalpinen Waldentwicklung, insbesondere auf Lawinenanrisszonen zu leisten. Im Zentrum der Untersuchungen stehen nach Norden ausgerichtete, waldgrenzennahe, subalpine Bestände. Dabei soll mit Hilfe der Bestandesdaten aus dem Waldlawinenprojekt 1986/90 die Waldentwicklung der letzten 20 Jahre untersucht werden. Zusätzlich soll überprüft werden, ob die LiDAR-Daten für solche Untersuchungen und Wälder geeignet sind und wo ihre Grenzen liegen. Damit sind folgende Forschungsfragen verbunden:

- Wie geeignet sind LiDAR-Daten zum Erfassen und Nachvollziehen der Waldentwicklung in der subalpinen Stufe?
- Wie haben sich die Waldbestände in Lawinenanrisszonen in den letzten 20 Jahren entwickelt und welchen Einfluss haben topografische Merkmale?

Auf diesen Forschungsfragen basierend werden folgende Hypothesen aufgestellt und überprüft:

H<sub>1</sub> LiDAR-Daten eignen sich zum untersuchen der Entwicklung von subalpinen Gebirgswäldern.

*Begründung:* LiDAR-Daten scheinen geeignet, meine Fragen in Bezug auf grosse Flächen zu beantworten und Lawinenzüge sind auf den ersten Blick gut erkennbar. Auch bestehen Arbeiten über die Strukturenerfassung von Gebirgswäldern mit LiDAR (Maier et al., 2008; Hollaus et al., 2006; Morsdorf et al., 2004).

H<sub>2</sub> Der waldgrenzennahe Gebirgswald wurde dichter

*Begründung:* Seit Mitte des 19. Jahrhunderts nahm die Waldfläche in der Schweiz um mehr als ein Drittel zu (Brändli, 2000). Besonders in den Alpenregionen und im Süden der Schweiz ist die Waldausdehnung grösser als in den übrigen Gebieten der Schweiz (Brändli, 2000). Die Wiederbewaldung geht in vielen Regionen mit der Nutzungsaufgabe von Alpflächen unterhalb der natürlichen Waldgrenze einher (LFI3, 2007; Baur et al., 2006; ArealstatistikSchweiz, 2001). Dagegen schritt die Waldausdehnung und -verdichtung im Waldgrenzenbereich weniger rasch voran (Bebi et al. (in revision)). In Lawinenschutzwäldern von Davos erkannte Lardelli (2003), dass die Waldausdehnung seit 1954 kleinflächig ist und sich mehrheitlich auf Lücken und Waldrandgebiete beschränkte.

H<sub>3</sub> Die Schutzwirksamkeit gegenüber Lawinen hat zugenommen

*Begründung:* Auf Höhenlagen zwischen 1400 und 2100 m ü. M. und bei Hangneigungen zwischen 20° und 40° ist die Ausdehnung am Grössten (Gellrich et al., 2007). Bebi et al. (in revision) stellten fest, dass die Waldausdehnung in Lawinenanrisszonen (> 30°) über 1200 m ü. M. höher war als auf anderen Flächen.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Subalpiner Gebirgswald

Die Lebensbedingungen im subalpinen Gebirgswald und besonders an der oberen Waldgrenze sind lebensfeindlich und verlangsamen das Wachstum der Bäume bzw. vermindern das Aufkommen von Jungwuchs (Ott et al., 1997). Bäume an der Waldgrenze wachsen natürlicherweise unregelmässig, entweder als relativ freistehende Einzelbäume oder in Gruppen, wo sich die Bäume gegenseitig Schutz bieten. Dabei sind verschiedene Einflussfaktoren für das Wachstum und das Erscheinungsbild von Einzelbäumen und dem Bestand von Bedeutung. Das daraus resultierende Erscheinungsbild ist das Abbild des Mosaiks aus günstigen und ungünstigen Kleinstandorten, die stark an unterschiedliche Einflussfaktoren gebunden sind. Günstige Wachstumsbedingungen finden die Nadelbäume auf leicht erhöhten, früh ausapernden Stellen im Gelände wie Rippen, Kuppen, Baumstrünken und Moderholz vor (Ott et al., 1997). Dagegen ist es in schneereiche Geländevertiefungen für Gebirgsbäume schwer sich zu etablieren.

Bäume brauchen für ihr Wachstum *Wärme* (Ott et al., 1997). Besonders die Verjüngung leidet unter dem Wärmemangel, junge Fichten und Lärchen können ohne direktes, wärmendes Sonnenlicht nicht aufkommen. Die Bodentemperatur spielt eine entscheidende Rolle im Wachstumsverhalten der kleinen Bäume. Durch die kurze Vegetationszeit muss das Wachstum in einer kurzen Zeitspanne abgeschlossen werden. Wenn beispielsweise die Jahrestriebe nicht genügend verholzt sind, fallen die aus der Schneedecke ragenden Jahrestriebe der Frostrocknis zum Opfer, welche besonders nahe an der Waldgrenze ein entscheidender Faktor ist (Ott et al., 1997).

Der *Schnee* hat positive wie negative Einflüsse auf Nadelbäume. Unter der Schneedecke sind kleine Bäume vor Wildverbiss, Frost, Frostrocknis und extremen Temperaturschwankungen geschützt (Frey, 1977). Zudem ist die Bodentemperatur unter dem Schnee höher und an der oberen Waldgrenze wird, durch die Schneelast auf den unteren Ästen, die vegetative Vermehrung der Fichte gefördert. Schneebewegungen deformieren Bäume nachhaltig (Schweingruber, 1996). Durch Kriechbewegungen drücken Schneemassen kleine Bäume schief und können ihren Stamm brechen oder sie entwurzeln. Beim Schneegleiten (Schnee gleitet auf Bodenoberfläche) sind die Schäden gravierender: Bei jährlich wiederkehrendem abgleitendem Schnee kommt es zum typischen, alphornförmigen Säbelwuchs, dabei können Stamm und Wurzeln verletzt werden, was ein Angriffspunkt für Pilze ist (Frey, 1977).

Die *Vegetationskonkurrenz* kann das Aufkommen der Verjüngung verhindern. Besonders an Nordhängen hat es häufig üppige, kniehohe Vegetation, die nur aus wenigen Pflanzenarten besteht (Ott et al., 1997). Die krautigen Pflanzen geniessen im Winter den Schutz der Schneedecke und

besiedeln während der Vegetationsperiode frei werdende Böden rascher als junge Bäume. Die Verjüngung ist auf Standorte angewiesen, an denen die Vegetation nicht vorherrschend ist.

Besonders Keimlinge und Sämlinge reagieren empfindlich auf *Frost* (Ott et al., 1997) und *Trockenheit*. Starke Temperaturdifferenzen zwischen Tag und Nacht, als auch die intensiven Strahlungsverhältnisse führen vermehrt zu Frost. Zusätzlich ist die relative Luftfeuchtigkeit an der oberen Waldgrenze niedrig, wodurch die dünnhäutigen Keimlinge und Sämling eher austrocknen.

## 2.2 Waldlawinen und Schutzwirkung des Waldes

### 2.2.1 Definition

Als *Waldlawinen* werden Lawinen bezeichnet, deren Anrisszone sich im Bereich des Waldes befinden (Meyer-Grass & Schneebeili, 1992). Ausschlaggebend ist der Ort des Anrisses und nicht mögliche Waldschäden. Lawinen, die auf unbestockbaren Flächen wie Erosions- oder Lawinenrinnen, auf einer grossen Blockschuttfläche oder einer steilen Felspartie mit einer Neigung über 60° liegen sind keine Waldlawinen (Meyer-Grass & Schneebeili, 1992).

„Wald“ heisst in diesem Zusammenhang gemäss Landesforstinventar (Zingg, 1988), dass der Deckungsgrad der Baumkronen mindestens 20% ist, der Abstand zwischen den Stämmen weniger als 25 m beträgt und der Bestand eine minimale Oberhöhe von 3 m hat.

### 2.2.2 Entstehung von Waldlawinen

Trockene Schneebretter brechen im Wald über 1600 m ü. M. los, wenn die Nadelwaldbestände Lückenbreiten von mindestens 10 m aufweisen (Meyer-Grass & Schneebeili, 1992). Dabei sind die durchschnittlichen Neigungen der Anrissflächen im Wald mit 42.6° deutlich steiler als jene von Freilandlawinen, deren mittlere Hangneigung 37.7° beträgt (de Quervain & Meister, 1987). Bei mittleren Neigung von weniger als 35° ereignen sich im Wald kaum noch Lawinen und die Dichte des Waldes hat kaum mehr einen Einfluss (Meyer-Grass & Schneebeili, 1992). Damit eine Lawine anreissen kann, muss zwingend eine Gleitschicht mit einer geringen basalen Scherfestigkeit und Überlast vorhanden sein, zudem ist noch eine Fülle von weiteren Parametern involviert (SLF, 2000).

Der Anriss von Waldlawinen und deren Aktivität ist abhängig von einer komplexen Kombination verschiedener Parameter (Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, 2000):

- *Bestandesparameter*: Lückengrösse, Deckungsgrad, Durchlässigkeit für ein- und ausfallende Strahlung
- *Topographische Parameter*: Hangneigung, Exposition (meist sehr steile Schattenhänge), Bodenrauigkeit
- *Nivologische und meteorologische Parameter*: Durchgehende Gleitschicht mit geringer basaler Scherfestigkeit, Überlast, Wind, Neuschnee, Temperaturanstieg

### 2.2.3 Schutzwirkung des Waldes

Oberhalb des Waldbestandes losbrechende Lawinen können durch den Wald verlangsamt oder langsam fließende Lawinen gar gestoppt werden (Salm, 1978). Dabei wird der Wald häufig beschädigt (de Quervain, 1978) und bei hohen Fließgeschwindigkeiten wird der Wald in der Sturzbahn zerstört. Somit ist dann seine Schutzfähigkeit für einen langen Zeitraum zerstört.

Die viel wichtigere Funktion des Waldes besteht darin, in potentiellen Lawinenanrisszonen den Anriss zu verhindern oder mindestens die Häufigkeit eines Anrisses zu verringern (Meyer-Grass & Schneebeili, 1992). Bei einem allfälligen Lawinenanriss ist das Ausmass der Lawinen kleiner und sie kommt meist im Wald wieder zum Stillstand (de Quervain, 1978). Der Wald beeinflusst die Schneedecke durch verschiedene Eigenschaften stabilisierend (in der Gand, 1978; de Quervain, 1978); (Miller, 1964).

Die klimatischen Bedingungen sind im Wald ausgeglichener als im Freiland. Dank der abschirmenden Wirkung der Baumkronen variieren die Strahlungsverhältnisse und damit auch die Temperaturen zwischen Tag und Nacht weniger (McClung & Schaerer, 2006). Starke Abstrahlung in der Nacht fördert die Bildung von Schwachschichten, wie Oberflächenreif und Schwimmschnee. Zudem ist der Windeinfluss im Waldbestand vermindert und Triebsschneeansammlungen sind selten (SLF, 2000). Der verfrachtete Schnee lagert sich als kompakte und spröde Schwachschicht auf der Leeseite von Graten, in Mulden und Rinnen ab (Munter, 2003). Dennoch bilden sich in Lücken grosse Schneeanansammlungen, mit dem durch Wind verwirbelten Interzeptionsschnee (Miller, 1966).

Die Schneedecke wird im Wald durch Stämme, Strünke, umgekippte Wurzelteller und liegende Stämme gestützt. Sofern die Schneedecke bis zum Stamm reicht, ist der Stützbereich grösser als der Stammdurchmesser (de Quervain, 1978). Die Stützwirkung wird eingeschränkt, wenn sich ein Kolk bildet. Ein Kolk entsteht, weil die dunkle Oberfläche des Stamms mehr Sonnenlicht absorbiert und damit schmilzt der umliegende Schnee (Margreth, 2004).

Der Waldbestand verändert den Schnee während und nach dem Schneefall (Abb. 1) (McClung & Schaerer, 2006; SLF, 2000). Während dem Schneefall lagert sich ein Teil des Schnees auf den Baumkronen ab, ein anderer Teil rieselt direkt durch die Krone, ein weiterer Teil wird in Lücken direkt auf dem Boden abgelagert. Mit zunehmender Schneelast fällt immer wieder Schnee von den Baumkronen. Dieser Schnee fällt meist in geklumpter oder leicht vereister Form herunter und strukturiert die am Boden liegende Schneeschicht (Imbeck, 1987). Aber nicht der ganze Schnee auf der Krone fällt zu Boden. Bei der Interzeption wird der Schnee auf der Krone zwischengelagert und zu einem späteren Zeitpunkt durch Verdunstung, Sublimation und Wind wieder entfernt.

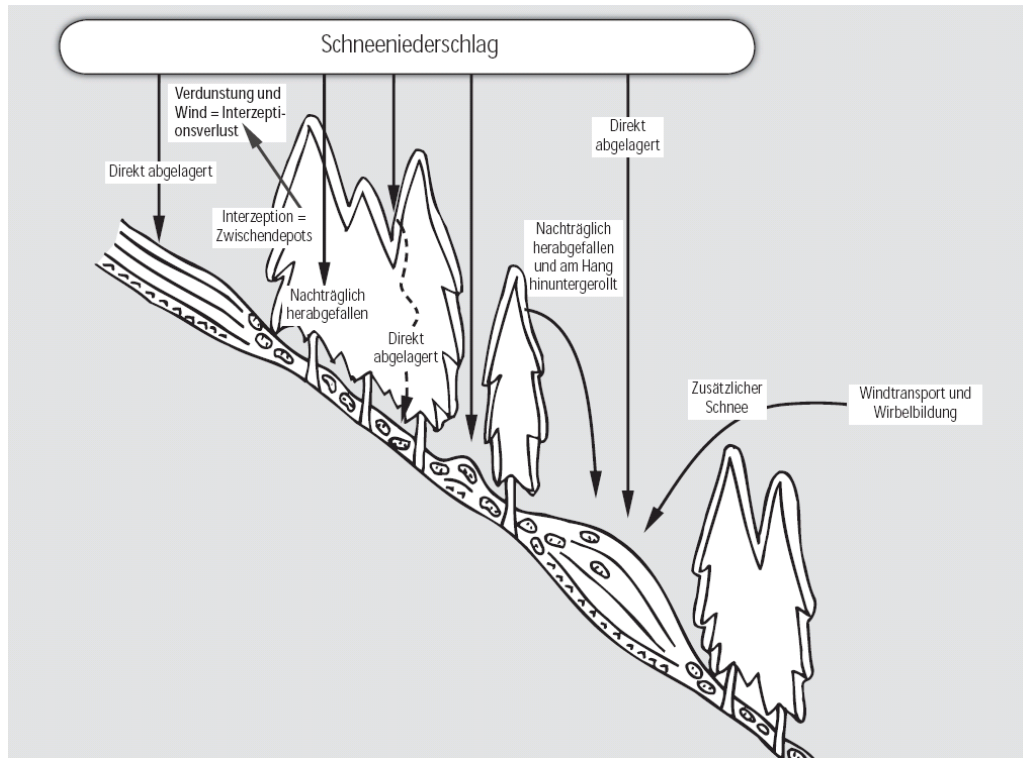


Abb. 1: Schneeablagerung im Wald; Aus (Frehner et al., 2005) nach Meyer 1987 und Cemagref

In diesem komplexen Gefüge „Wald – Schnee – Lawinen“ spielen also viele Eigenarten des Waldes eine entscheidende Rolle und beeinflussen die Lawinenanrisswahrscheinlichkeit. Doch ist noch nicht genau definiert, wo die Grenzen der Schutzwirksamkeit liegen (SLF, 2000). Die räumliche Verteilung der Bäume beeinflusst die Stabilität der Schneedecke (Pfister, 1997; Meyer-Grass & Schneebeli, 1992). Weit voneinander entfernte Baumkronen verhindern die durchgehende Stabilisierung der Schneedecke. Dem Deckungsgrad und der Lückengrösse kommt somit eine entscheidende Rolle zu. Dazu kommt, dass mit zunehmender Hangneigung die gravitativen Kräfte immer grösser werden und die Schneedecke mehr Stabilisierung braucht. Deshalb ist mit einer zunehmenden Hangneigung eine grössere Anzahl an Bäume notwendig, um einen Anriss zu verhindern.

### 3 Material und Methoden

#### 3.1 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet liegt in der „Landschaft Davos“ (offizielle Bezeichnung der Gemeinde) im Nordosten des Kantons Graubünden. Die tourismusorientierte Alpenstadt liegt südlich vom Wolfgang Pass auf rund 1550 m ü. M. Das Gemeindegebiet erstreckt sich von 1260 bis 3146 m ü. M. auf einer Fläche von 254 km<sup>2</sup>. Das Haupttal, das Landwassertal, wird nach SSW von der Landwasser in den Hinterrhein entwässert. Gegen NNW ist das Tal durch das Parsenn- und Strelagebiet mit den Gipfel Weissfluh, Schiahorn und Chüpfernflue begrenzt. In die Südostflanken des Haupttals münden drei Seitentäler, das Flüela- (Äbiwald Flüela), das Dischma- (Mattawald) und das Sertigtal (Äbiwald Sertig). Eingangs dieser Täler liegen in den Nordflanken die Aufnahmeflächen.



Abb. 2: Das Landwassertal mit der städtischen Siedlung Davos, die drei Seitentäler Flüela-, Dischma- und Sertigtal (grau beschriftet) und die Lage der Untersuchungsgebiete Äbiwald Flüela, Mattawald und Äbiwald Sertig (orange gekennzeichnet); swissimage© 2008 swisstopo (DV 033594)

## Klima

Klimatisch liegt Davos im Übergangsbereich der niederschlagsreichen nördlichen Alpen und der trockenen inneralpinen Regionen (Zingg, 1961). Das Landwassertal hat ein trockenes inneralpines Gebirgsklima und das Prättigau, auf der anderen Seite des Wolfgang Passes, gehört zu den feuchten Nordalpen (Zingg, 1961). An den vom Wolfgang nach Süden abnehmenden Niederschlagssummen ist zu erkennen, als das Klima vom Prättigau das obere Landwassertal beeinflusst. In Davos-Dorf (1590 m ü. M.) ist die mittlere Niederschlagssumme mit 1082 mm pro Jahr (MeteoSchweiz, 2005) höher wie im höher gelegenen Dischmatal (1710 m ü. M.). Hier liegen die jährlichen Messwerte bei 992 mm (MeteoSchweiz, 2005). Zum Vergleich, das tiefer und nördlich gelegene Klosters (1200 m ü. M.), weist Niederschlagssummen von 1382 mm pro Jahr auf (MeteoSchweiz, 2005). Die Klimastation am Stillberg in der Nordost Hang des Dischmatals auf 2090 m ü. M. zeigt die Klimabedingungen an der Waldgrenze auf. Die jährliche Niederschlagssumme betrug von 1975 bis 2004 im Mittel 1150 mm/Jahr ( $\pm 164$  mm), dabei fielen 48 % des Niederschlags in der Vegetationsperiode von Juni bis September, die rund 134 Tage im Jahr dauert (Krumm, 2004). Die durchschnittliche Temperatur über das Jahr betragen  $2.0^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 0.7^{\circ}\text{C}$ ) und  $8.5^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ ) über die Vegetationsperiode (Wipf, 2006). Der Februar war mit einer Mitteltemperatur von  $-4.9^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 2.3^{\circ}\text{C}$ ) der kälteste Monat, die wärmsten Monate waren Juli und August mit jeweils  $9.9^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ). Es gab rund 137 Frosttage pro Jahr und ca. 80 Eistage (Lufttemperatur unter  $0^{\circ}\text{C}$ ) (Krumm, 2004). Die Station war schneebedeckt vom 18. Oktober ( $\pm 16$  Tage) bis am 26. Mai ( $\pm 10$  Tage). Die durchschnittliche Schneehöhe war 1.46 m und variierte sehr stark und in Leelagen konnte die Schneehöhe über 4.2 m betragen (Senn & Schönberger, 2001).

## Untersuchungsflächen

Die Untersuchungsflächen befinden sich in den waldgrenzennahen, subalpinen (zwischen 1900 und 2080 m ü.M.) Bereichen eingangs des Flüela-, des Dischma- und des Sertigtals. Alle Flächen sind Nord oder Nordost exponiert und liegen mehrheitlich unterhalb einer markanten Geländekante. Meist handelt es sich um wintergrünen/winterkahlen Nadelwald (immergrüne Arten  $< 90\%$ , Lärchen  $\leq 90\%$ ) und um Lärchenwald (Lärchen  $> 90\%$ ) (Meyer-Grass & Schneebeili, 1992).

Die Aufnahmeflächen des Äbiwald Flüela befinden sich unterhalb des WNW-Rückens des Büelenhorns (Abb. 3). Die östlichste Fläche ist die höchstgelegene (2028 m ü. M.) und liegt am Rande einer Waldschneise. Der tiefste Punkt 1934 m ü. M. liegt bei der westlichsten Fläche. Gegen Westen werden die Flächen steiler und sind teilweise felsdurchsetzt. Die mittlere Hangneigung der steilsten Fläche beträgt  $65^{\circ}$ , die mittlere Hangneigung der flachsten Hänge  $36^{\circ}$ .

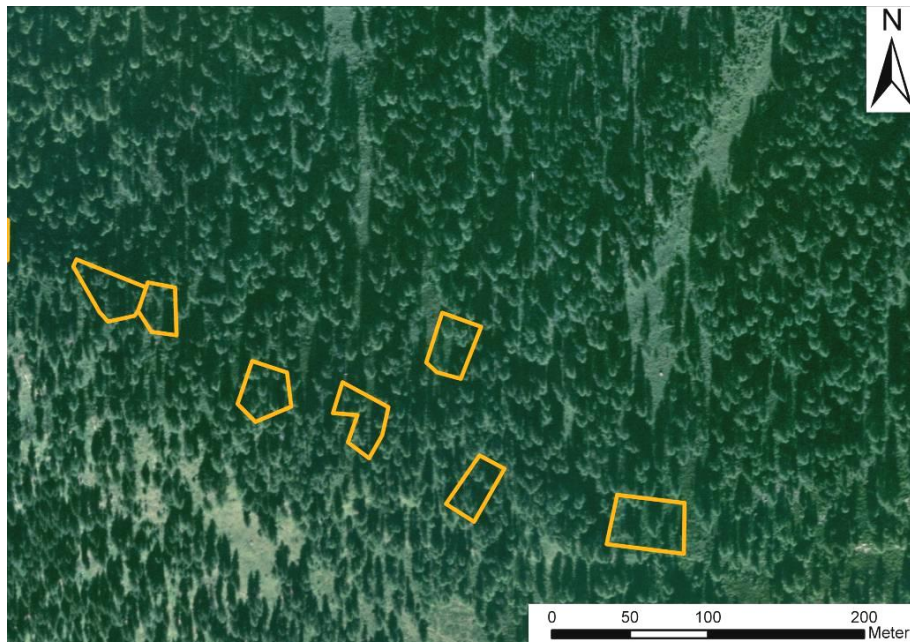


Abb. 3: Untersuchungsflächen im Äbiwald Flüela; swissimage© 2008 swisstopo (DV 033594)

Die Untersuchungsflächen des Mattawaldes befinden sich im offenen, waldgrenznahen Lärchengürtel auf der NNW-Rippe des Jakobshorns (Abb. 4). Die Flächen liegen auf 1985 bis 2070 m ü. M und das Gelände ist zwischen  $34^\circ$  bis  $45^\circ$  steil. Unterhalb befindet sich ein mit Schneisen durchzogener Fichtenbestand, dessen Züge sind in den oberen Teilen mit Lawenverbauungen gesichert. Hefti (1986) erwähnte, dass im Lärchenbestand jährlich kleine Rutsche zu beobachten waren und sich je nach Schneelage Lockerschneelawinen ereigneten.

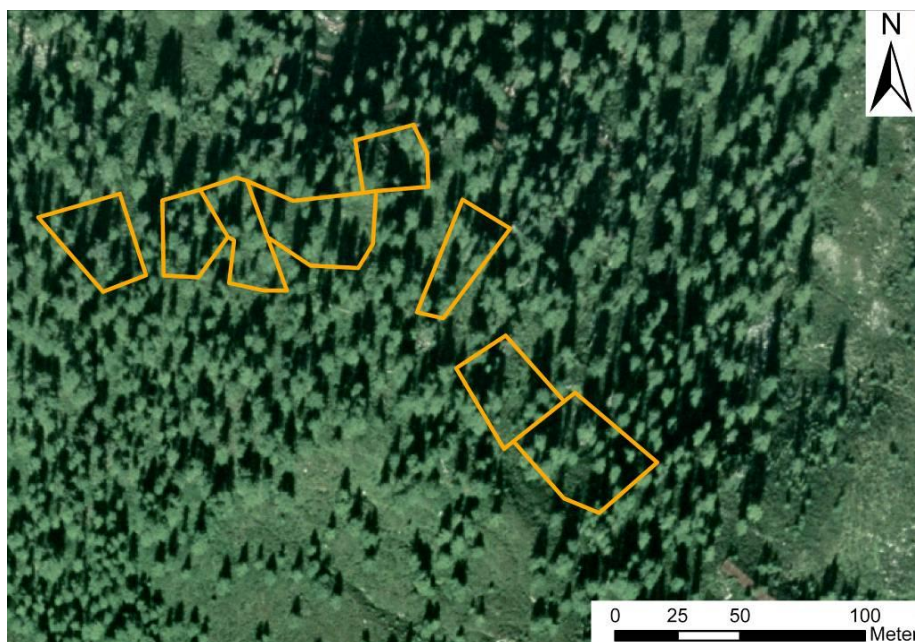


Abb. 4: Untersuchungsflächen im Mattawald; swissimage© 2008 swisstopo (DV 033594)

Der Äbiwald Sertig liegt nördlich vom Rinerhorn auf einer Höhe zwischen 1920 und 2000 m ü. M. und die Flächen sind zwischen 39° und 45° steil (Abb. 5). Die oberen Flächen liegen unterhalb eines markanten Geländeabbruchs. Die untern Flächen liegen oberhalb einer Geländerippe.

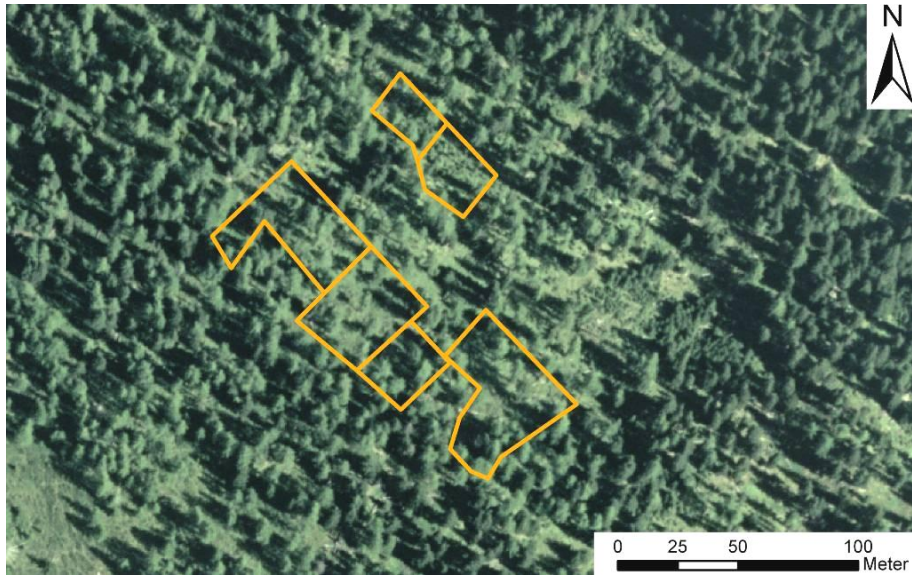


Abb. 5: Untersuchungsflächen im Äbiwald Sertig; swissimage© 2008 swisstopo (DV 033594)

### 3.2 Datengrundlage aus dem Waldlawinenprojekt von 1986/90

Als Grundlage dienten die Bestandes- und Standortaufnahmen aus dem Waldlawinenprojekt von 1986/90. Dabei wurden in der Zeit zwischen 1985/86 und 1989/90, von insgesamt 279 gemeldeten Lawinen (Meyer-Grass, 1991), 153 Lawinenanrissflächen und 131 Vergleichsflächen ohne Anriss aufgenommen. Davon waren 112 Waldlawinenbeobachtungen in Nadelwäldern (Nadelholzanteil > 90%) und die restlichen 41 in Laub- und Mischwäldern (Pfister, 1997). Die Begehung der Anrissfläche fand meist zweimal statt. Im Winter nach dem Lawinenereignis nahmen Meyer-Grass & Schneebeli (1992) die Merkmale der Lawine und der Schneedecke auf. Die Erhebungen im Sommer konzentrierten sich auf Bestandes- und Standortparameter (Pfister, 1997). Die Versuchsflächen wurden links und rechts der Anrissfläche angelegt, teilweise auch ober- und unterhalb und waren vielfach weniger steil als die Lawinenanrissflächen (Meyer-Grass & Schneebeli, 1992).

Gesamthaft protokollierten Meyer-Grass & Schneebeli (1992) 71 Bestandes- und Standortparameter in fünf verschiedenen, für Lawinen relevanten Waldtypen. Davon sind drei Waldtypen für meine Arbeit relevant. Der wintergrüne Wald (Typ 3) mit mehr als 90% immergrünen Nadelbaumarten, die in dieser Höhenstufe mit der Fichte vertreten ist. Weiter der wintergrüne Lärchen-Wald (Typ 4) mit weniger als 90% immergrünen Arten und bis zu 90% Lärchen. Zum Schluss noch den beinahe reinen Lärchenwald (Typ 5), der mehr als 90% Lärche im Bestand hat. Von der Fülle der Einzelbaum-, Bestandes- und topografische Parameter (Tab. 3) verwendete ich folgende Parameter:

- *Einzelbaumparameter*: Baumart, Brusthöhendurchmesser (BHD), Baumhöhe
- *Bestandesparameter*: Deckungsgrad, Bestandeshöhe, Stammzahl/ha pro Art und Durchmesserklasse
- *Topografische Parameter*: Bodenrauigkeit, mittlere Hangneigung, Geländeform, Exposition

Im Waldlawinenprojekt 1986/90 wurden die Einzelbaum- und Bestandesparameter, sofern nicht anders vermerkt, nach LFI1 aufgenommen. Die Baumhöhen wurden geschätzt. Jeder einzelne Baum, mit einem BHD von mindestens 8 cm, wurde auf der Kronenprojektionskarte kartiert und nummeriert. Zusätzlich zu den Kronenprojektionskarten bestanden teilweise Luftaufnahmen vom Wald im Winter und Fotos, die während der Feldbegehung gemacht wurden.

Die Stammzahl/ha wurde für jede Durchmesserklasse und Art separat berechnet und dokumentiert. Es wurden fünf verschiedene Durchmesserklassen gebildet (Verjüngung, BHD < 4 cm, BHD 4-7 cm, BHD 8-15 cm, BHD ≥ 16 cm) und nach Baumart unterteilt. Die Berechnung von der Stammzahl pro Fläche zur Stammzahl/ha erfolgte mit einem Korrekturfaktor.

Wichtig zu beachten ist, dass ich die Gesamtkronenprojektion als Deckungsgrad verwendete, weil im Waldlawinenprojekt die Gesamtkronenprojektion als gesamte beschirmte Fläche definiert ist und dies der Definition des Deckungsgrads vom LFI 3 entspricht. Im Waldlawinenprojekt wurde die Kronenprojektion anhand der Kronenprojektionskarte definiert und Baumgruppen wurden als eine Einheit betrachtet, somit waren Überlappungen nicht betrachtet.

### 3.3 Auswahl der Untersuchungsflächen

Untersucht wurden Lawinenanrissflächen aus dem Waldlawinenprojekt von 1986/90 in den Wäldern Äbiwald Flüela, Mattawald, und Äbiwald Sertig. Die Vergleichsflächen wurden nicht berücksichtigt. Die Mindestgrösse der Flächen betrug 500 m<sup>2</sup>. Bei zum Teil überlagernden Flächen aus unterschiedlichen Ereignisjahren wählte ich die ältere Fläche, sofern die ältere Aufnahme eine grössere oder identische Flächengrösse aufwies. Flächen aus jüngeren Ereignissen wurden gewählt, falls diese grösser waren.

### 3.4 Feldaufnahmen

Die Waldaufnahmen erfolgten im Juni, Juli und August 2008. Zu diesem Zeitpunkt waren die Flächen schneefrei. Die Vermessung der Einzelbäume fand auf den Lawinenanrissflächen statt und stützte sich auf die Waldaufnahmen von 1987. Ich suchte die Flächen mit Hilfe der Kronenprojektionskarten und mit Fotos, mit deren Hilfe charakteristische Bäume, Strünke und Felsen sicher identifiziert werden konnten.

Alle Bäume die höher waren als 0.3 m, wurden dabei berücksichtigt. Bäume mit einer Höhe über 1.3 m wurden nummeriert. Die Nummerierung der einzelnen Bäume erfolgte analog zu den früheren Aufnahmen. Sofern nicht anders vermerkt, wurden die Parameter nach LFI3 (Keller, 2005) aufgenommen. Am Einzelbaum wurden folgende Parameter aufgenommen:

- Baumart
- „lebendig“ oder „tot“
- Brusthöhendurchmesser (BHD)
- Baumhöhe
- Kronendurchmesser

Die Messung des BHD's erfolgte mit Kluppe und Messband. Bäume mit einem BHD kleiner als 60 cm wurden nicht immer mit der Kluppe sondern mit dem Umfangmessband gemessen (vergleiche Keller, 2005). Bei Bäumen mit leichtem Säbelwuchs wurde die Messhöhe (1.3 m) vertikal eingemessen. Nur bei äusserst schiefen Bäumen wurde die Messhöhe entlang des Stamms abgemessen, dies wurde bei den entsprechenden Individuen vermerkt. Die abgelesenen Werte wurden bei allen Bäumen bis BHD „1 cm“ nach LFI3 (Keller, 2005) auf ganze Zentimeter abgerundet. Jungpflanzen mit einem BHD kleiner als „1 cm“ waren aufzurunden (Keller, 2005).

Die Durchführung der Baumhöhenmessung war je nach Baumhöhe unterschiedlich. Kleinere Bäume mass ich vertikal mit dem Messband, auf ganze Dezimeter gerundet. Die Aufnahme von höheren Bäumen erfolgte mit dem Visiergerät Vertex III und dem Transponder T3 von Haglöfs. Ich führte die Messungen' wie im Handbuch vom Visiergerät Vertex III (Anon., 2005) beschrieben, durch.

Die Baumhöhen wurden Bergseits gemessen (Keller, 2005), sofern der Wipfel zu erkennen oder zu erahnen war. Wenn die Baumspitze so nicht zu erahnen war, erfasste ich die Baumhöhe von der Seite, aber nie von der Talseite des Baumes. Auch die Baumhöhe der grösseren Bäume wurde auf Dezimeter genau gemessen. Aus der Baumhöhe berechnete ich, anhand des arithmetischen Mittels aus den fünf höchsten Bäumen, die Bestandeshöhe auf der Fläche.

Die Ermittlung des ungefähren Kronendurchmessers erfolgte horizontal und hangparallel. Ich mass von einem durchschnittlich ausladenden Ast zum gegenüberliegenden. Dabei wurden die äussersten Triebe nicht berücksichtigt, sondern erst die zwei bis drei jährigen.

### 3.5 Verarbeitung und Verifizierung von Geodaten

#### 3.5.1 Geodaten

Als Datengrundlage dienen LiDAR-Rohdaten und Luftbilder. Die Rohdaten vom Terrainmodell (DTM-AV) und vom Oberflächenmodell (DOM-AV) aus dem Jahr 2003, stammten alle von der WSL, sowie auch die Luftbilder, die drei Jahre vor den LiDAR-Daten aufgenommen wurden (Tab. 1).

Tab. 1: Verwendete Geodaten

Art der Daten	Aufnahmedatum	Herkunft/Lieferant	Vertragsnummer
DTM-AV	2003	WSL	DV033531
DOM-AV	2003	WSL	DV033531
Orthophotos	2000	WSL	DV033594

Die digitalen Höhenmodelle (DTM- und DOM-AV) basieren auf luftgestütztem Laserscanning (Swisstopo, 2007; Artuso et al., 2003). Die Überfliegung der Region Davos fand zwei Mal im Jahr 2003 statt. Die genauen Befliegungsdaten sind in Tab. 2 ersichtlich. Laut Swisstopo (2007) müssen die Laserscanning-Flüge im laublosen Zustand stattfinden, um das Ziel eines möglichst genauen Terrainmodells zu erreichen. Das Ziel ist eine Punktdichte auf offenen Flächen, die besser ist als 1 Punkt / 2 m<sup>2</sup> (Swisstopo, 2007; Artuso et al., 2003).

Tab. 2: Befliegungsdaten von DOM-AV und DTM-AV

Wald	Karten Nr.	Flugjahr	1. Befliegung	2. Befliegung
Äbiwald Flüela, Mattawald	1197 32	2003	April 2003	September 2003
Mattawald	1197 34	2003	April 2003	April 2003
Äbiwald Sertig	1217 11	2003	April 2003	April 2003
Äbiwald Sertig	1217 12	2003	April 2003	April 2003

### 3.5.2 Geodatenverarbeitung

Das Vegetationsmodell war für viele Berechnungen eine bedeutsame Grundlage. Der erste Schritt zum Vegetationsmodell war aus den Höhenmodell-Rohdaten Rasterdaten herzustellen. Die Laserscanning-Rohdaten DOM- und DTM-AV rasterste und interpolierte ich im ArcGIS (ArcInfo 9.2 von ESRI) mit der Funktion „Inverse Distance Weighted“ mit einer Zellgrösse von 0.5 m. Laut Ginzler (2008), der einen Teil der Daten gesichtet hat, ist dies eine geeignete Interpolation. Bei dieser Funktion wird davon ausgegangen, dass nahe beieinander liegende Punkte ähnlich sind. Weiter entfernte Punkte haben ein geringeres Gewicht wie nähere (Focke, 2005). Die Gewichtung der einzelnen Punkte stellt das ArcGIS selbst ein. Anschliessend subtrahierte ich das DTM- vom DOM-AV und somit lag die erste Datengrundlage vor.

Eine weitere wichtige Datengrundlage waren die digitalisierten Aufnahmeflächen und ein Teil der vermessenen Einzelbäume. Als Digitalisierungsgrundlage dienten, die zuvor eingescannten und georeferenzierten, Kronenprojektionskarten. Ich rasterste die Flächen anschliessend so, dass die Information „Flächennummer“ nicht verloren ging. Von acht Aufnahmeflächen wurden die Einzelbäume anhand der Kronenprojektionskarte digitalisiert und ihre Höhe und Kronendurchmesser in der Attributtabelle angegeben.

Die Berechnung des Deckungsgrad LiDAR basierte auf dem Vegetationsmodell und den digitalisierten Aufnahmeflächen. Alles was sich 1.3 m oder mehr vom Boden abhob, nahm ich als überschirmte Fläche an. Dieser Wert wurde auch in anderen Projekten verwendet (Maier & Hollaus, 2006). Die vertikale Ungenauigkeit des DOM's ist in bewachsenen Gebieten  $\pm 1.5$  (Swisstopo, 2007), somit konnte davon ausgegangen werden, dass es sich meist um Vegetation handelte und nicht um Bodenunebenheiten. Dafür reklassifizierte ich den Vegetationsraster und addierte ihn anschliessend mit dem gerasterten Layer der Aufnahmeflächen. So entstand ein Raster mit der Information über die Anzahl Zellen, die überschirmt waren. In einem zusätzlichen Feld in der Attributtabelle wurde das Verhältnis von überschirmten und gesamten Zellen in der Fläche berechnet, dies soll dem Deckungsgrad entsprechen.

Den Deckungsgrad der einzelnen Aufnahmeflächen berechnete ich zusätzlich anhand der Luftbilder, die Methode lehnt sich an diejenige des LFI3 an (Keller, 2005). Mit einer Zusatzextension (Hawths Tools) für ArcGIS 9.x stellte ich ein Shapefile mit regelmässigen Punkten her. Sie hatten von Ost nach West und von Nord nach Süd einen Abstand von jeweils 5 m. Im LFI3 sind die Abstände zwischen den Punkten doppelt so gross. Ich wählte den Abstand von 5 m, damit ich in den meisten Fällen auf 25 oder gar mehr Punkte pro Aufnahmefläche kam. Der Layer mit den regelmässigen Punkten wurde im ArcGIS auf dieselben Grössen ausgeschnitten wie alle Untersuchungsflächen zusammen. Nun bekamen die Punkte die auf dem Luftbild auf einem Baum lagen eine andere Farbe. Anschliessend berechnete ich das Verhältnis der Anzahl Punkte auf Bäumen und der gesamten Punktzahl in einer Fläche.

### 3.5.3 Verifizierung der Geodaten

In einem ersten Schritt mussten die im 2008 gemessenen Baumhöhen interpoliert werden, damit sie vergleichbar wurden mit den im Jahr 2002 erfassten LiDAR-Daten. Dies weil die erste Befliegung im 2003 vor der Vegetationszeit statt fand und somit die Baumhöhe vom Ende der Vegetationsperiode 2002 gescannt wurde. Deshalb rechnete ich mit 5½ Jahren Wachstum dazwischen. Ich berechnete die Baumhöhe von 2002 mit der Formel (1). Bei den grösseren Bäumen verwendete ich das individuelle jährliche Höhenwachstum ( $w$ ) und bei den jüngeren Bäumen, die sie (Meyer-Grass & Schneebeli, 1992) Waldlawinenprojekt nicht detailliert aufnahmen, das durchschnittliche jährliche Wachstum ( $w$ ) aller grossen Bäume.

$$h_{2002} = h_{2008} - 5.5 * w \quad (1)$$

h        Baumhöhe  
w        jährliches Höhenwachstum

In einem weiteren Schritt waren die Bäume von acht Aufnahmeflächen mit dem Vegetationsmodell zu vergleichen. Zuerst digitalisierte ich in ArcMap die Daten der Einzelbäume anhand der georeferenzierten Kronenprojektionskarte in einem Punktfile. Die Baumnummern stimmten mit jener in der Excel-Tabelle überein. Damit konnte die Excel-Tabelle angefügt und die Felder interpolierte Baumhöhe und Kronendurchmesser in die Attributtabelle der digitalisierten Einzelbäume übertragen werden. Da nicht davon auszugehen ist, dass die digitalisierten Bäume exakt richtig digitalisiert wurden und nicht ganz gerade wachsen, rechnete ich mit dem halben Kronendurchmesser Puffer. Mit der zonalen Statistik wurde innerhalb dieses Puffers der höchste Punkt im Vegetationsmodell gesucht, dieser Punkt soll der Baumhöhe LiDAR entsprechen.

## 3.6 Datenanalysen

### 3.6.1 Allgemein

Als Mittelwert verwendete ich den Median und das arithmetische Mittel; um die Signifikanz zu prüfen die zwei Wilcoxon-Tests. Bei der Stammzahl/ha fiel die Wahl auf den Median, da die Stammzahl/ha der verschiedenen Aufnahmeflächen sehr variabel war. Beim Median liegen unter- und oberhalb 50% der Messwerte (Köhler et al., 2007) und es ist ein robuster Mittelwert, der unempfindlich auf Ausreisser und Extremwerte ist (Mürset, 2006). Die Signifikanz zweier gepaarter, abhängiger Stichproben prüfte ich mit dem Wilcoxon-Test für Paardifferenzen (Vorzeichenrang-Test) und jene von nicht gepaarten, unabhängigen Stichproben mit dem Wilcoxon Rangsummen-Test (Köhler et al., 2007). Entscheidend bei der Wahl des Tests war, dass die Daten, der maximal 23 Aufnahmeflächen, nicht normalverteilt waren. Das Signifikanzniveau betrug bei allen statistischen Tests  $\alpha=0.05$ . Die Berechnungen erfolgten mit der Software S-Plus (Version 2000, Professional Edition for Windows, Release 2).

### 3.6.2 Analyse der Geodaten

Der „Deckungsgrad LiDAR“ wurde mit dem „Deckungsgrad Luftbild“ und dem „Deckungsgrad 1986/90“ verglichen. Dabei berechnete ich die Korrelation der beiden Datensätze. Der Vergleich mit dem „Deckungsgrad 1986/90“ stützte sich auf 19 Aufnahmeflächen ab, da Flächen mit grossen Veränderungen in den 20 Jahren nicht berücksichtigt wurden und eine Fläche mit einem eher unwahrscheinlichen Wert angegeben wurde. Bei den anderen Flächen ging ich nach den Feldaufnahmen davon aus, dass sich der Deckungsgrad nur geringfügig veränderte und die Schätzungsfehler grösser wären. Zusätzlich untersuchte ich den Deckungsgrad in Abhängigkeit der Hangneigung.

Bei den Einzelbäumen prüfte ich die Übereinstimmung der „Baumhöhe LiDAR“ mit der gemessenen und interpolierten Baumhöhe. Hierfür erfolgte die Unterteilung von immergrünen und winterkahlen Baumarten, da andere Untersuchungen erhebliche Unterschiede feststellten (Heurich et al., 2003). Zuerst wurde die Abweichung zwischen den unterschiedlich erfassten Baumhöhen mit Bäumen, die unter der Baumkrone (Schirm) von grösseren wachsen, untersucht. Dann untersuchte ich die Abweichung der verschiedenen Baumhöhen, ohne die Bäume unter dem Schirm zu beachten. Weiter folgte die Prüfung der Signifikanz zwischen immergrünen und winterkahlen Baumarten, dabei wurden die Bäume unter dem Schirm nicht beachtet.

### 3.6.3 Analyse der Felddaten

Die Analysen der Felddaten, die auf dem BHD basierten, war in zwei Analysen aufgeteilt. Dabei berechnete ich erst die Bestandesparameter für die einzelnen Flächen und anschliessend die Parameter für alle Flächen, wie der schematische Ablauf zeigt (Abb. 6). Bei der ersten Analyse wurden die Rohdaten in fünf Durchmesserklassen (Verjüngung, BHD < 4 cm, BHD 4-7 cm, BHD 8-15 cm, BHD ≥ 16 cm) gruppiert. Diese Klassifizierung entsprach jener aus dem Waldlawinenprojekt 1986/90 (Meyer-Grass & Schneebeli, 1992). Dabei untersuchte ich die Verteilung der Durchmesserklassen in Stammzahl/ha und die Artenzusammensetzung in Prozent in den Jahren 2008 und 1986/90. Die zweite Analyse beinhaltete mehrheitlich die Einwirkungen in Abhängigkeit der Geländeparameter: Bodenrauigkeit, Hangneigung, Geländeform und Exposition. Auch diese Parameter stammten aus den Aufnahmen von 1986/90. Dabei beschränkte sich die Unterteilung der Daten auf zwei Durchmesserklassen (BHD ≤ 7 cm, BHD ≥ 8 cm). Bei dieser Einteilung stützte ich mich auf die Angabe im NaiS. Darin wird eine Schutzwirksamkeit gegenüber Lawinen ab einem BHD von 8 cm angegeben (Frehner et al., 2005). Kleinere Bäume sind noch elastisch und werden unter der Last des Schnees abgelegt oder durchstossen die Schneedecke noch gar nicht.

Tab. 3: Unterteilung der topografischen Parameter.

Geländeparameter	Aufteilung	Begründung
<b>Art der Bodenrauigkeit</b>	glatt	Im Waldlawinenprojekt 1986/90 bezeichneten sie auf den untersuchten Flächen die vier verschiedenen Arten von Bodenrauigkeit, diese wurden hier übernommen. Es gab 1 glatte Fläche, diese wurde nicht weiter berücksichtigt, 12 höckerige, 7 mit Schutt und 3 mit Strünken.
	höckerig	
	Schutt	
	Strünke	
<b>Hangneigung</b>	≤ 39°	Einteilung entspricht den Schwellenwerten in Untersuchungen in Abhängigkeit der Hangneigung von (Meyer-Grass & Schneebeli, 1992).
	40-44°	
	≥ 45°	
<b>Geländeform</b>	Mulden andere	Weil sich in Mulden mehr Schnee ablagert und später ausapert als Rippen und gleichmässige Hänge. Bezeichnungen aus 1986/90.
<b>Exposition</b>	N	Direktes Sonnenlicht ist ein limitierender Faktor im subalpinen Gebirgswald (Ott et al., 1997), kleinste Änderungen der Exposition bringen veränderte Lichtverhältnisse mit sich.
	NE	

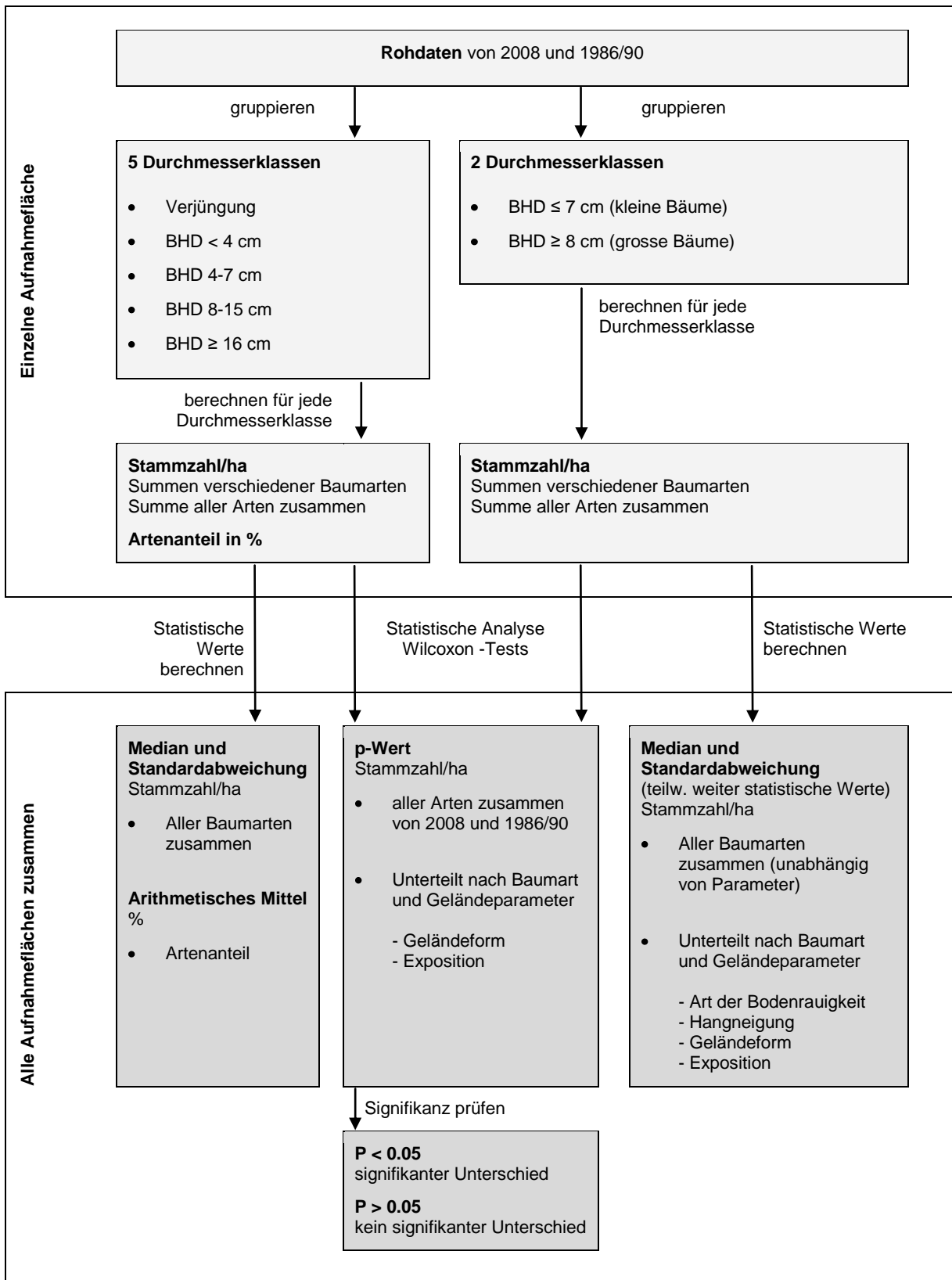


Abb. 6: Schematischer Ablauf von den Analysen der Felddaten.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Verifizierung der LiDAR-Daten

#### 4.1.1 Deckungsgrad

Der, aus den LiDAR-Daten berechnete Deckungsgrad, unterschätzte den Deckungsgrad von den Feldaufnahmen 1986/90 und den auf Luftbildern basierenden Deckungsgrad. Die Abb. 7 zeigt dies beim Vergleich zwischen dem, aus dem Luftbild berechnete, Deckungsgrad und dem LiDAR basierten deutlich. Auf dem Luftbild berechnet, war der Deckungsgrad im Durchschnitt 5% höher und wies ein Maximum von 55% und ein Minimum von 21% auf. Das Maximum des LiDAR-Deckungsgrad betrug 46% und das Minimum 12%. Der, auf dem Laserscanning beruhende, Deckungsgrad war auf sechs der 23 Flächen grösser wie der „Luftbild-Deckungsgrad“. Beim Vergleich des Laserscanning-Deckungsgrads mit dem Deckungsgrad aus den Jahren 1986/90 war der erst genannte im Mittel um 1% grösser. Jedoch bestand kein signifikanter Unterschied ( $p=0.5022$ ; Wilcoxon Vorzeichenrang-Test) und es wurden 11 von 19 Flächen als weniger bedeckt ausgegeben. Die Deckungsgrad-Differenz korreliert nicht mit dem Lärchenanteil im Bestand ( $BHD \geq 8 \text{ cm}$ ) ( $R^2=0.0033$ ).

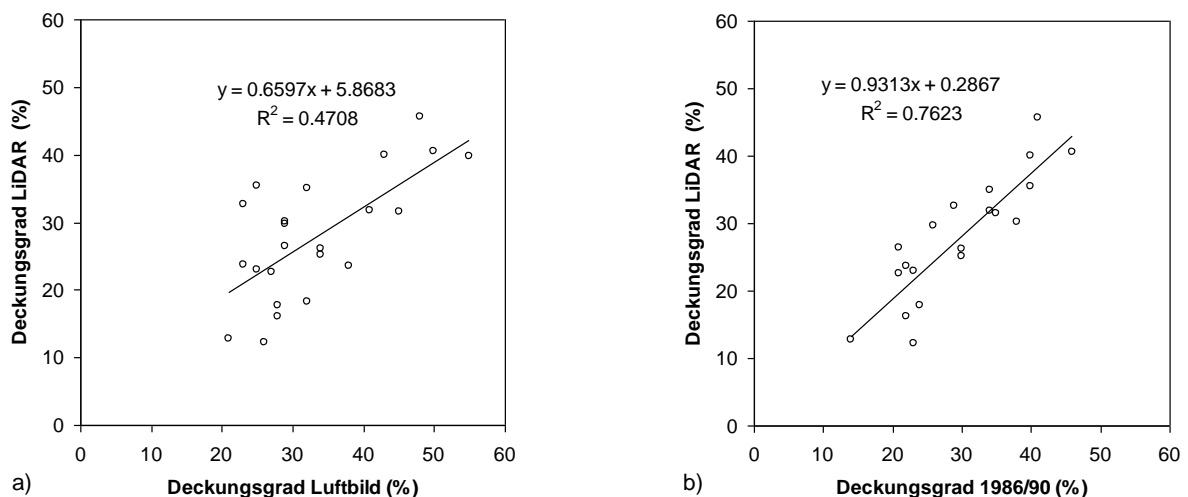


Abb. 7: Vergleich von „Deckungsgrad LiDAR“ und dem „Deckungsgrad Luftbild“ (a) bzw. mit dem „Deckungsgrad 1986/90“ (b). Beim Vergleich Deckungsgrad 1986/90 mit dem Deckungsgrad LiDAR (b) wurden drei Aufnahme­flächen mit grossen Veränderungen nicht berücksichtigt.

### 4.1.2 Einzelbäume

Auf Einzelbaumebene wichen die Baumhöhen der LiDAR-Daten teils stark von den im Feld gemessenen Höhen ab. Einerseits wiesen im Vegetationsmodell, das auf LiDAR-Daten basiert, Baumhöhen häufig tiefere Werte auf, wie die gemessenen und interpolierten Höhen (Abb. 8, Abb. 9, Abb. 10). Vielfach waren die „Baumhöhen LiDAR“ kleiner als die in den Jahren 1986/90 gemessenen Höhen. Andererseits hatten Bäume, die unter dem Schirm von grösseren Bäumen wuchsen, die Höhe der darüber liegenden Ästen (Abb. 8). Die Überschätzung des Jungwuchs unter dem Schirm war beachtlich und besonders bei überschirmten jungen Fichten ausgeprägt (Abb. 8). Folglich war es im Vegetationsmodell nicht möglich Verjüngung und kleinere Bäume, die unter dem Schirm oder in die Krone eines grösseren Baumes wuchsen, zu erkennen. Beim Weglassen der überschirmten Bäume (vergleiche Abb. 8 und Abb. 9) wurden die Baumhöhen mehrheitlich unterschätzt (Abb. 10) und der Unterschied zwischen winterkahlen und immergrünen Baumarten offensichtlicher.

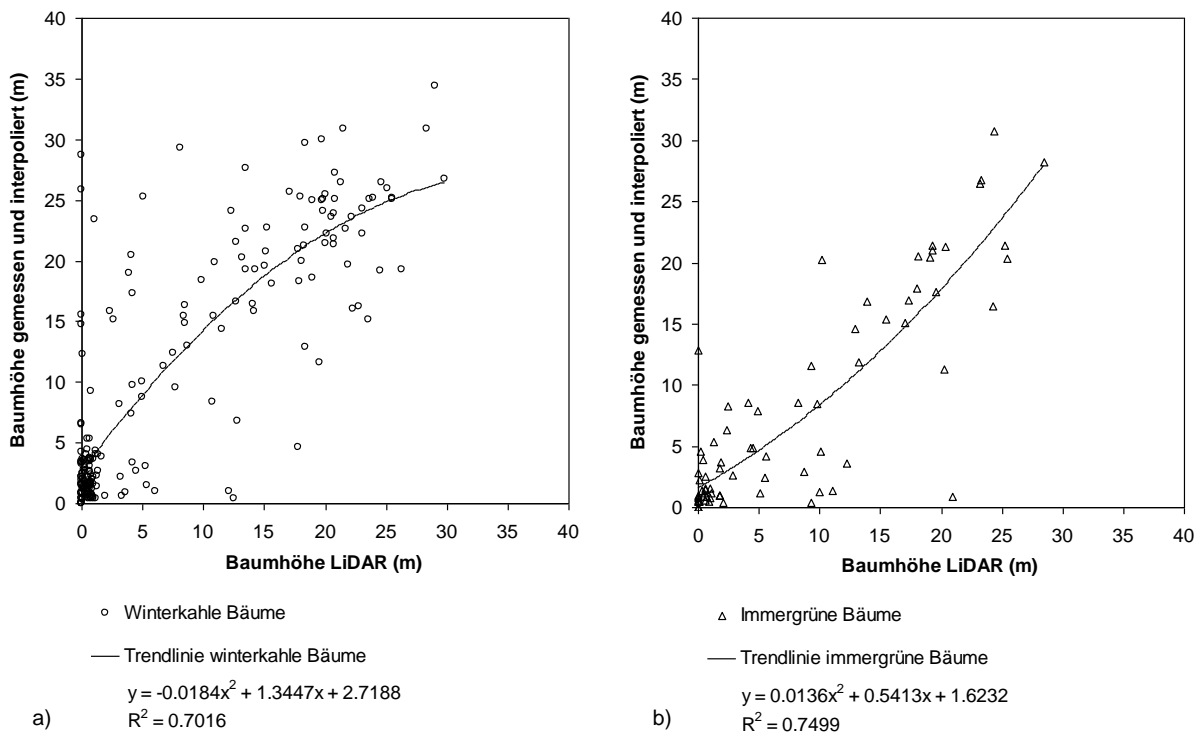


Abb. 8: Vergleich der „Baumhöhe LiDAR“ mit gemessenen und interpolierten Baumhöhen, unterteilt nach winterkahlen (a) und immergrünen (b) Baumarten. Bäume unter dem Schirm von grösseren Bäumen sind aufgeführt (204 winterkahle, 76 immergrüne Bäume).

Immergrüne Bäume, wie Fichten und Arven, wurden genauer erfasst als winterkahle Lärchen. Bei den immergrünen Baumarten korrelierten die „Baumhöhen LiDAR“ und die gemessenen und interpolierten gut ( $R^2=0.9069$ ) (Abb. 9b). Hingegen bei den Lärchen stimmten die zwei unterschiedlich ermittelten Baumhöhen weniger gut überein ( $R^2=0.777$ ) (Abb. 9a). Dabei unterschätzte die „Baumhöhe LiDAR“ die gemessene und interpolierte der Arven und Fichten um rund 0.69 m (Median) und diejenige der Lärchen um 2.07 m (Median) (Tab. 4; Abb. 10). Lärchen wurden zu mehr als 75% unterschätzt. Bei den Fichten gab es mehr Überschätzungen. Der Unterschied in der Erfassungsgenauigkeit zwischen immergrünen und winterkahlen Bäumen war signifikant ( $p=0.0001$ , Wilcoxon Rangsummen-Test). Die Unterschätzung von kleineren Bäumen, mit einer Höhe bis zu fünf Metern, war bei beiden Gruppen zu erkennen. Kleine Lärchen waren mehr und stärker davon betroffen. Von 22 immergrünen höheren Bäumen ( $> 10$  m) wurde ein Baum nicht erkannt und ein weiterer 10 m unterschätzt. Nicht erkannt oder mehr als 10 m unterschätzt wurden im Vegetationsmodell ungefähr 25% der Lärchen, die höher waren als 10 m. Dazu wurden kleine wie grosse Bäume unterschätzt. Bei den grösseren Bäumen (Höhe  $> 10$  m) waren es im Mittel grössere Differenzen wie bei den kleineren (Abb. 10b). Überschätzungen gab es bei beiden Baumtypen und Höhenklassen.

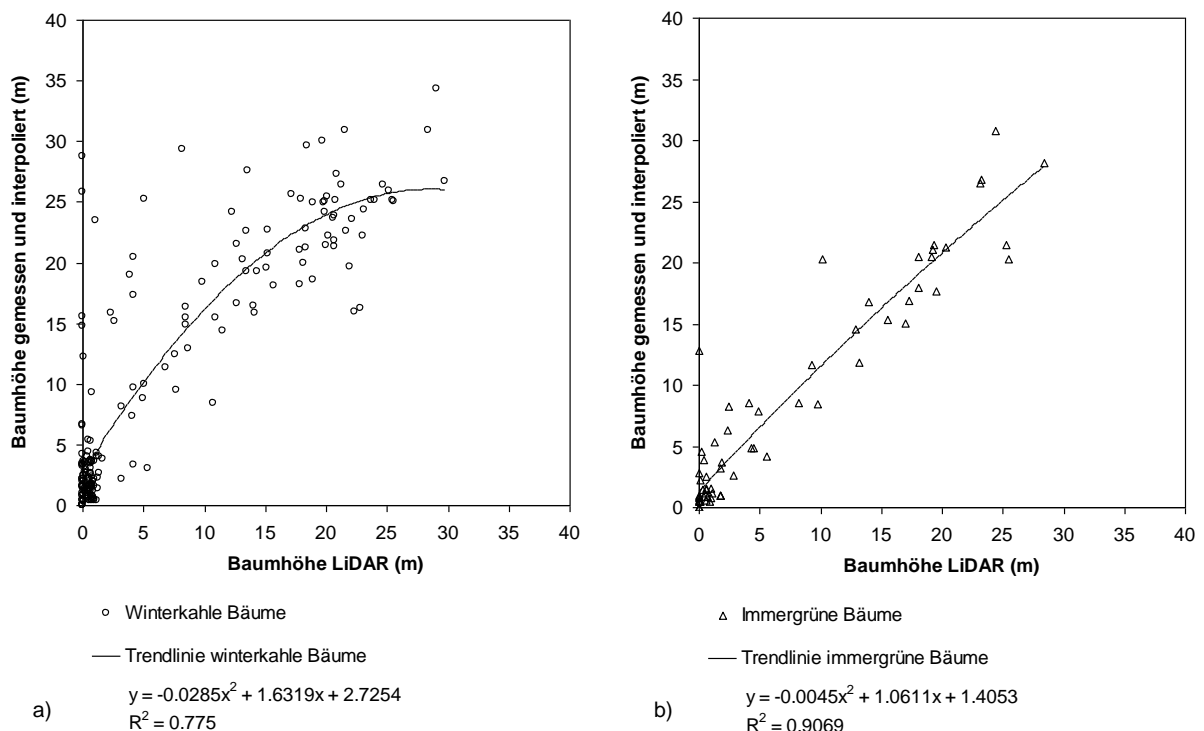


Abb. 9: Vergleich der „Baumhöhe LiDAR“ mit gemessenen und interpolierten Baumhöhen, unterteilt nach winterkahlen (a) und immergrünen (b) Baumarten. Bäume unter dem Schirm von grösseren Bäumen sind nicht aufgeführt (192 winterkahle, 61 immergrüne Bäume).

Tab. 4: Unterschiede zwischen „Baumhöhe LiDAR“ und gemessener und interpolierter Baumhöhe in m.

Baumarten	Mittelwert	Median	SD	1. Quartil	3. Quartil
Alle	-2.97	-1.65	4.66	-4.03	-0.43
Immergrüne	-1.29	-0.69	2.76	-2.26	0.12
Winterkahle	-3.52	-2.07	5.01	-4.59	-0.70

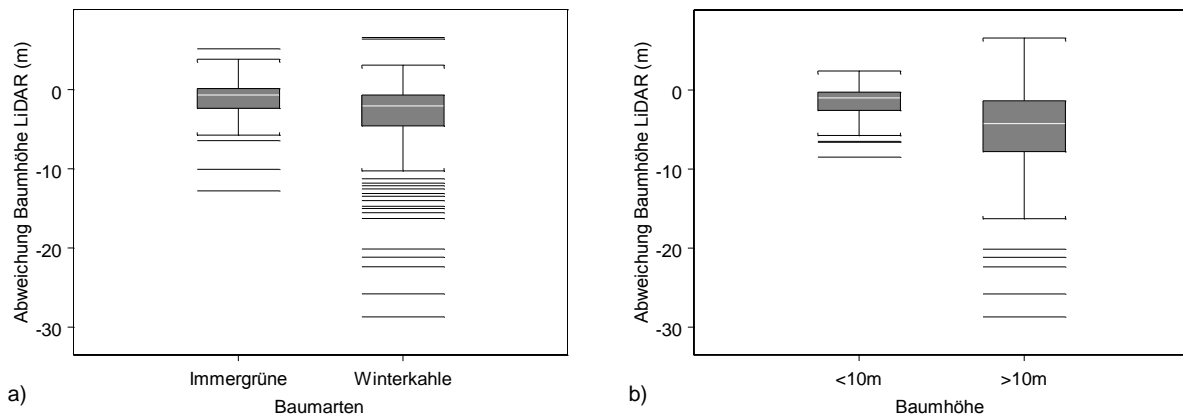


Abb. 10a-b: Abweichung der „Baumhöhe LiDAR“ von der gemessenen und interpolierten Höhe unterschieden nach wintergrünen und winterkahlen Baumarten (a) bzw. nach Baumhöhe < 10 m und > 10 m (b). Abweichung Baumhöhe LiDAR < 0 bedeutet, dass die Laserscanning-Baumhöhe kleiner war wie die reale Höhe.

## 4.2 Gebirgswalddynamik und –Struktur

### 4.2.1 Allgemein

Im Jahr 2008 wuchsen mehr Bäume (Tab. 5) und die Bestände waren im Mittel höher. Bei den kleineren Bäumen ( $BHD \leq 7$  cm) nahm die Stammzahl/ha mehr zu, wie bei den grösseren Bäumen ( $BHD \geq 8$  cm). Jedoch variierte die Anzahl Bäume stark. Die Bestände waren im Jahr 2008 signifikant höher ( $p=0.0345$ ; Wilcoxon Vorzeichenrang-Test) als 20 Jahre zuvor. Hingegen veränderte sich der Deckungsgrad nicht wesentlich. Im Mittel betrug er 29% im 1986/90 und 26% im Jahr 2008. Jedoch stieg der minimale Deckungsgrad 1986/90 von 2% auf 12%.

Tab. 5: Stammzahl/ha von Bäumen mit  $BHD \leq 7$  cm und im  $BHD \geq 8$  cm 1986/90 und 2008

Durchmesserklasse	Jahr	Mittelwert	Median	SD	1. Quartil	3. Quartil
$BHD \leq 7$ cm	1986/90	720	264	1200.8	157.0	686.5
	2008	955	439	1340.4	248.5	1134.5
$BHD \geq 8$ cm	1986/90	157	154	61.3	124.0	197.5
	2008	238	202	161.2	158.0	250.0

Das Verhältnis zwischen BHD und Baumhöhe variierte in den Jahren 1986/90 und im Jahr 2008 bei den kleineren Bäumen weniger als bei den grossen (Abb. 11). Fichten mit einem BHD von 5 cm sind im 2008 zwischen 1.8 bis 5 m und mit einem BHD von 8 cm 3.5 bis 9 m hoch. Die Lärchen erreichten bei einem BHD von 5 cm Höhen zwischen 2.5 und 6.5 m und beim BHD von 8 cm waren sie 3 bis 7.5 m hoch. Die Arven waren etwas weniger hoch. Sie erreichten bei BHD 5 cm 2.5 bis 3.5 m Höhe und bei einem BHD von 8 cm Baumhöhen von 4 bis 5 m und eine Arve mit demselben BHD zwischen 5 und 8 m. Bei den grösseren Arven war die Beziehung zwischen BHD und Baumhöhe sehr unterschiedlich.

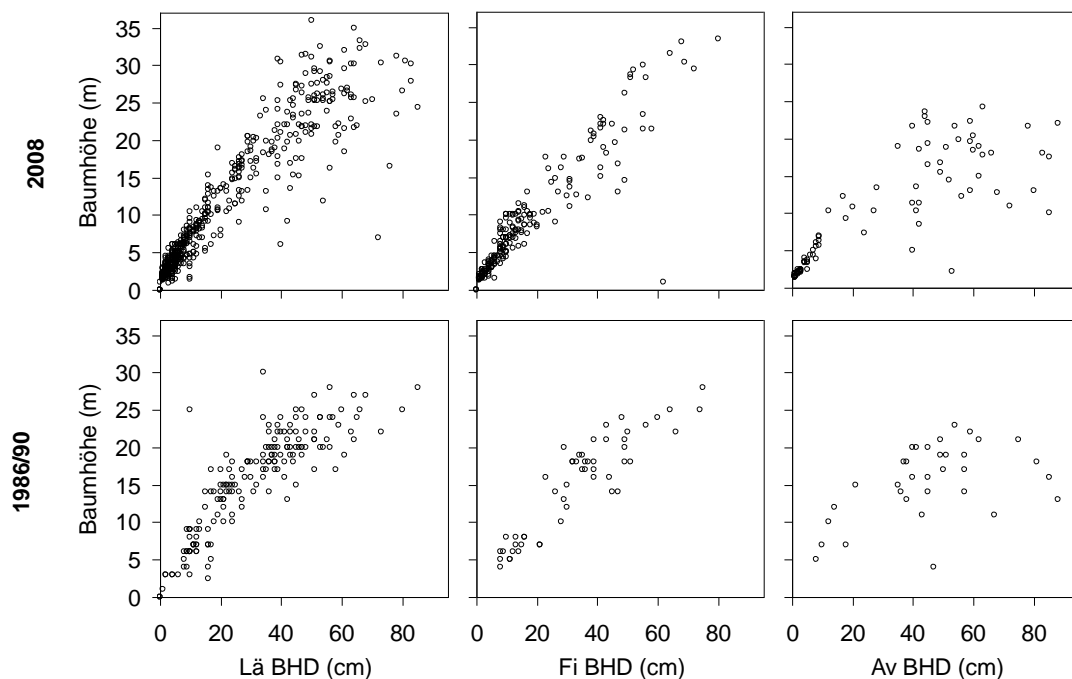


Abb. 11: Vergleich von Baumhöhen mit BHD von Lärchen (Lä), Fichten (Fi) und Arven (Av) im 1986/90 und 2008.

Die Untersuchungsflächen wiesen sehr unterschiedliche Stammzahlen/ha auf. In jeder der fünf Durchmesserklassen (Jungwuchs, BHD < 4 cm, BHD 4-7 cm, BHD 8-15 cm und BHD ≥ 16 cm) wuchsen im Jahr 2008 durchschnittlich mehr Bäume wie in den Jahren 1986/90 (Abb. 12). Auf den 23 untersuchten Flächen hatte es am meisten Jungpflanzen pro ha. Am wenigsten Bäume pro ha hatte es von den Klassen „BHD 4-7 cm“ und „BHD 8-15 cm“. Beim Jungwuchs und bei der Kategorie „BHD < 4 cm“ waren die Unterschiede der Stammzahl pro ha in beiden Untersuchungsperioden am grössten. Der Bereich reicht beim Jungwuchs im Jahr 2008 von 46 bis zu 2023 Pflanzen pro ha. Noch grössere Differenzen gab es bei den ersten Aufnahmen (1986/90). Die Unterschiede reichten von 11 bis 3154 Pflanzen pro ha. Die Kategorie der grössten Bäume (BHD ≥ 16 cm) war mit 20 Bäumen stärker vertreten im Jahr 2008.

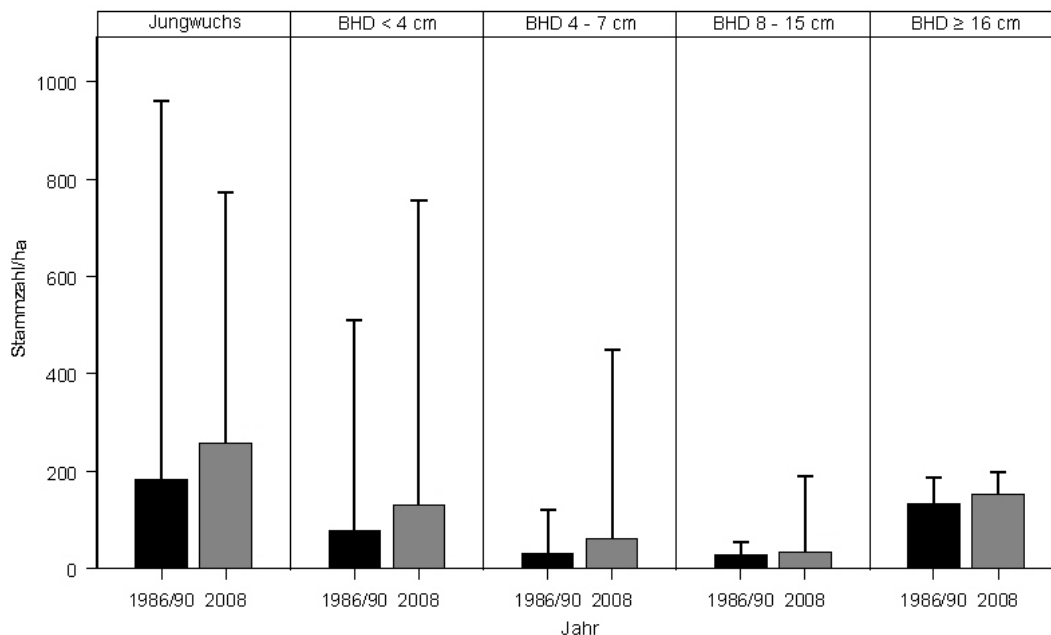


Abb. 12: Entwicklung der verschiedenen Durchmesserklassen zwischen 1986/90 und 2008 auf den 23 Aufnahme-  
flächen (9 Äbiwald Flüela, 6 Äbiwald Sertig, 8 Mattawald). (Mediane und Standardabweichung)

Die Veränderungen sind nicht bei allen Durchmesserklassen signifikant (Tab. 6). Die Stammzahlen/ha des Jungwuchs und der Klasse mit einem BHD < 4 cm unterscheidet sich im Jahr 2008 nicht signifikant von denjenigen in den Jahren 1986/90. Ein signifikanter Unterschied besteht jedoch bei den übrigen Durchmesserklassen (Tab. 6).

Tab. 6: Entwicklung von verschiedenen Durchmesserklassen zwischen 1986/90 und 2008. Ergebnisse des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests: Signifikante Unterschiede zwischen 1986/90 und 2008 ( $p < 0.05$ ) sind fett dargestellt.

Durchmesserklasse	p-Wert Wilcoxon Vorzeichen-Rang-Test	Bedeutung
Jungwuchs	0.5227	Nicht signifikant
BHD < 4 cm	0.0635	Nicht signifikant
BHD 4-7 cm	<b>0.0062</b>	Es hatte mehr Bäume mit BHD 4-7 cm im 2008
BHD 8-15 cm	<b>0.0123</b>	Es hatte mehr Bäume mit BHD 8-15 cm im 2008
BHD ≥ 16 cm	<b>0.0208</b>	Es hatte mehr Bäume mit BHD ≥ 16 cm im 2008

#### 4.2.2 Artenzusammensetzung

Die Artenzusammensetzung veränderte sich bei den kleineren Durchmesserklassen stärker als bei den grösseren Durchmesserklassen. In allen Durchmesserklassen waren Lärchen (*Larix decidua* Miller), Fichten (*Picea abies* Karst.) und Arven (*Pinus cembra* L.) vorhanden. Die Lärche war im Jahr 2008 und in den Jahren 1986/90 bei allen Altersklassen die am häufigsten vertretene Art (Mittelwert=65.7%) und die Fichte mit durchschnittlich 24.7% die zweithäufigste. Zudem war die Lärche in beiden Untersuchungsperioden auf zwei von 23 Flächen die einzige Baumart. Weiter folgte die Arve, die besonders in der Verjüngung und bei der Durchmesserklasse „BHD  $\geq$  16 cm“ in einem beachtlichen Anteil vor kam (Abb. 13, Abb. 17). Vogelbeeren (*Sorbus aucuparia* L.) hatte es bis zu einem BHD von 3 cm und Grünerlen (*Alnus viridis* DC.) bis zu einem BHD von 7 cm.

Der Rückgang des Lärchen- und Fichtenanteils in der Verjüngung war zugunsten von Arven und Vogelbeeren (Abb. 13). Bei der Verjüngung nahm der durchschnittliche Anteil der Vogelbeere (+9%) und der Arven (+3%) zu und derjenige der Fichten nahm im Mittel um 8% ab. Auf vier Aufnahmeflächen im Jahr 2008 und auf sechs Aufnahmeflächen 1986/90 war der Lärchenanteil 100%. Jedoch war der Lärchenanteil in der Verjüngung im Mittel geringer als bei grösseren Durchmesserklassen.

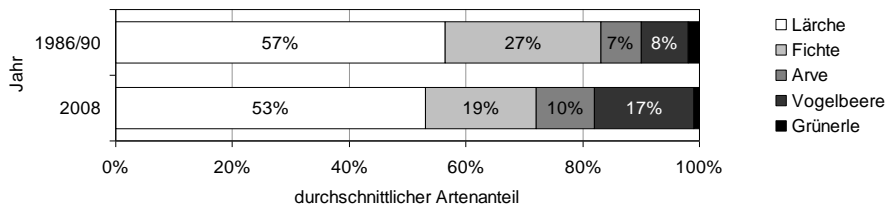


Abb. 13: Entwicklung der Artenzusammensetzung in der Verjüngung zwischen 2008 und 1986/90.

Bei der Durchmesserklasse „BHD  $<$  4 cm“ nahm der Artenanteil der Fichte und Arve zu, derjenige der Lärche und der Grünerle ab und die Vogelbeere verschwand ganz (Abb. 14). Der Lärchenanteil nahm geringfügig ab. Dabei war der Lärchenanteil auf sieben (2008) bzw. auf neun (1986/90) Flächen 100%. Der Arvenanteil nahm 2% und derjenige der Fichte 4% zu. Auf zwei Flächen der 23 hatte es in den Jahren 1986/90 mehr wie 50% Fichten und auf zwölf hatte es keine Fichten der Durchmesserklasse „BHD  $<$  4 cm“. 20 Jahre später hatte es eine Fläche weniger mit einem Fichtenanteil von 0% und auf vier Flächen mehr als 50% Fichten. Hingegen hatte es auf fünf (2008) bzw. vier (1986/90) der 23 Flächen Arven.

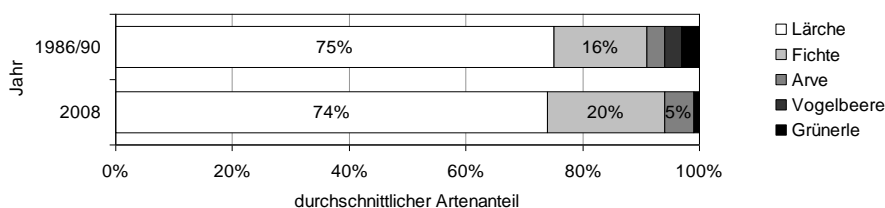


Abb. 14: Entwicklung der Artenzusammensetzung in der Durchmesserklasse „BHD  $<$  4 cm“ zwischen 2008 und 1986/90.

Bei Bäumen mit einem BHD zwischen 4 cm und 15 cm nahm der Anteil an Lärche leicht zu und derjenige der Fichte leicht ab (Abb. 15, Abb. 16). Der mittlere prozentuale Arvenanteil veränderte sich in den 20 Jahren hingegen nicht. Dazu war die durchschnittliche Artenzusammensetzung der Durchmesserklassen „BHD 4-7 cm“ und „BHD 8-15 cm“ sehr ähnlich. Bei der Klasse „BHD 4-7 cm“ nahm der Lärchenanteil mehr zu und der Fichtenanteil mehr ab als bei der Kategorie „BHD 8-15 cm“. Jedoch hatte es im Jahr 2008 in beiden Klassen weniger Flächen die keine Fichten hatten als 20 Jahre zuvor. In beiden Untersuchungsperioden lag der maximale Fichtenanteil bei 100%. Auch die Lärchen waren im Jahr 2008 und in den Jahren 1986/90 nicht auf allen Flächen vorhanden und auf anderen war ihr Anteil wiederum 100%.

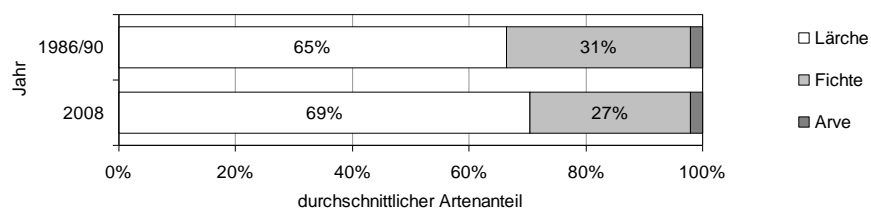


Abb. 15: Entwicklung der Artenzusammensetzung in der Durchmesserklasse „BHD 4-7 cm“ zwischen 2008 und 1986/90.

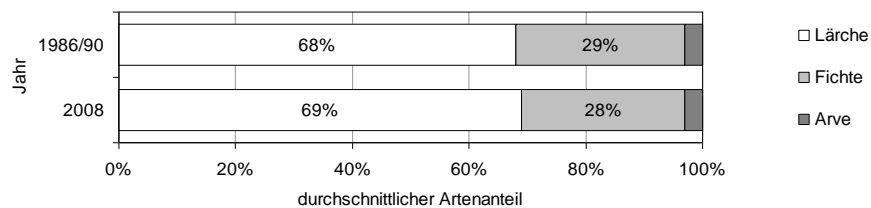


Abb. 16: Entwicklung der Artenzusammensetzung in der Durchmesserklasse „BHD 8-15 cm“ zwischen 2008 und 1986/90.

Der durchschnittliche Anteil von Fichten nahm bei der Kategorie „BHD  $\geq$  16 cm“ zu und der von Lärchen und Arven ab (Abb. 17). Jedoch waren die einzelnen Bestände sehr unterschiedlich. So gab es Flächen mit reinen Fichten- sowie reinen Lärchenbeständen. Der maximale Arvenanteil lag im Jahr 2008 bei 58% und in den Jahren 1986/90 bei 69%.

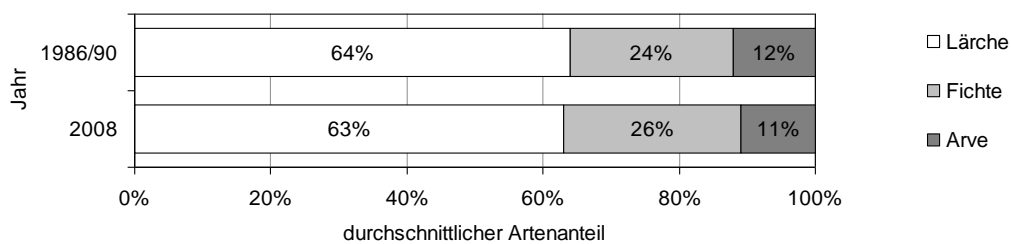


Abb. 17: Entwicklung der Artenzusammensetzung in der Durchmesserklasse „BHD  $\geq$  16 cm“ zwischen 2008 und 1986/90.

### 4.2.3 Einfluss der Bodenrauigkeit

Die Häufigkeit einer Baumart war je nach Art der Bodenrauigkeit unterschiedlich und schien artspezifisch. Im Waldlawinenprojekt 1986/90 waren auf 22 untersuchten Flächen drei verschiedene Arten von Bodenrauigkeit bezeichnet. Gemäss dieser Einteilung gab es zwölf höckerige Flächen, zudem hatte es auf sieben Flächen Felsschutt und auf drei weiteren Baumstrünke.

Das Vorkommen von Baumarten mit einem BHD bis 7 cm war sehr spezifisch je nach Art der Bodenrauigkeit (Abb. 18). Am meisten Lärchen und Fichten kamen im Jahr 2008 und in den Jahren 1986/90 auf Flächen mit Strünken auf. Hier war die mittlere Stammzahl/ha (Median) mehr als doppelt so gross als auf höckerigen Flächen oder auf Flächen mit Schutt. Hingegen wuchsen die Arven kaum auf Strünken, dafür im Jahr 2008 mehrheitlich auf Schutt. Die Vogelbeerenverjüngung gedeihete überwiegend auf höckerigem Gelände und Strünken.

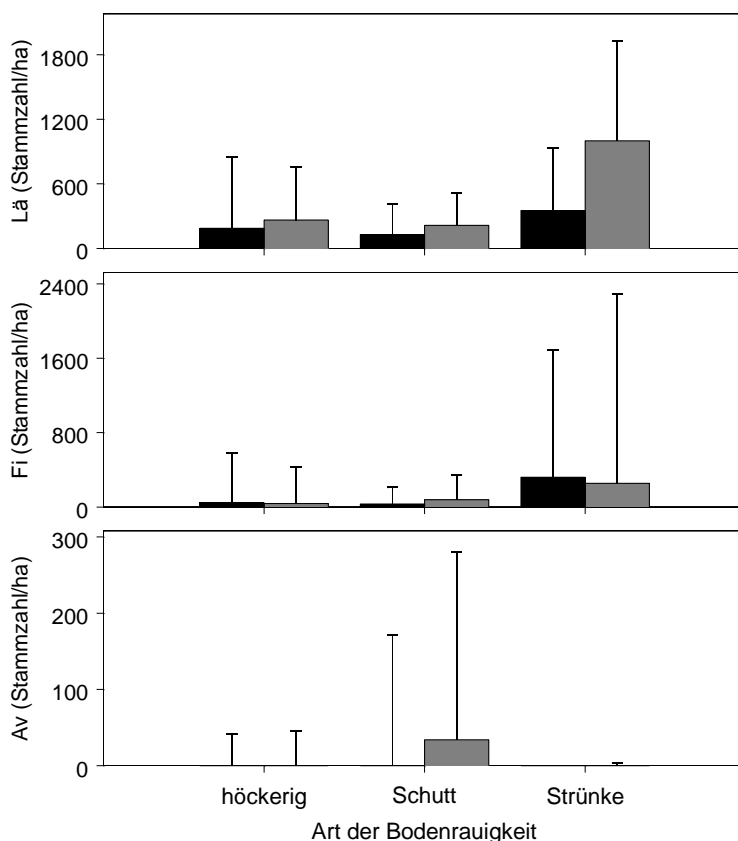


Abb. 18: Entwicklung von Lärchen (Lä), Fichten (Fi) und Arven (Av) mit BHD  $\leq 7$  cm auf verschiedenen Arten von Bodenrauigkeiten im 1986/90 (schwarz) und 2008 (grau). (Mediane und Standardabweichungen)

Auch bei den grösseren Bäumen war das Vorkommen einer Baumart je nach Art der Bodenrauigkeit sehr artspezifisch (Abb. 19). Jedoch wuchs die Lärche im Jahr 2008 und in den Jahren 1986/90 nicht mehr bevorzugt auf Flächen mit Baumstrünken sondern vermehrt auf Flächen mit Felsschutt. In den 20 Jahren nahm die Stammzahl/ha der Lärchen auf höckerigem Gelände stärker zu wie auf Flächen mit Strünken. Die maximale Anzahl Fichten wuchs auf Baumstrünken und jene der Arven auf Schutt. Am zweit häufigsten kamen Arven auf höckerigem Gelände vor. Dabei entsprach die Verteilung der grösseren Fichten und Arven derjenigen der kleineren. Jedoch war bei den grösseren Fichten und Arven die Verteilung der Stammzahl/ha offensichtlicher.

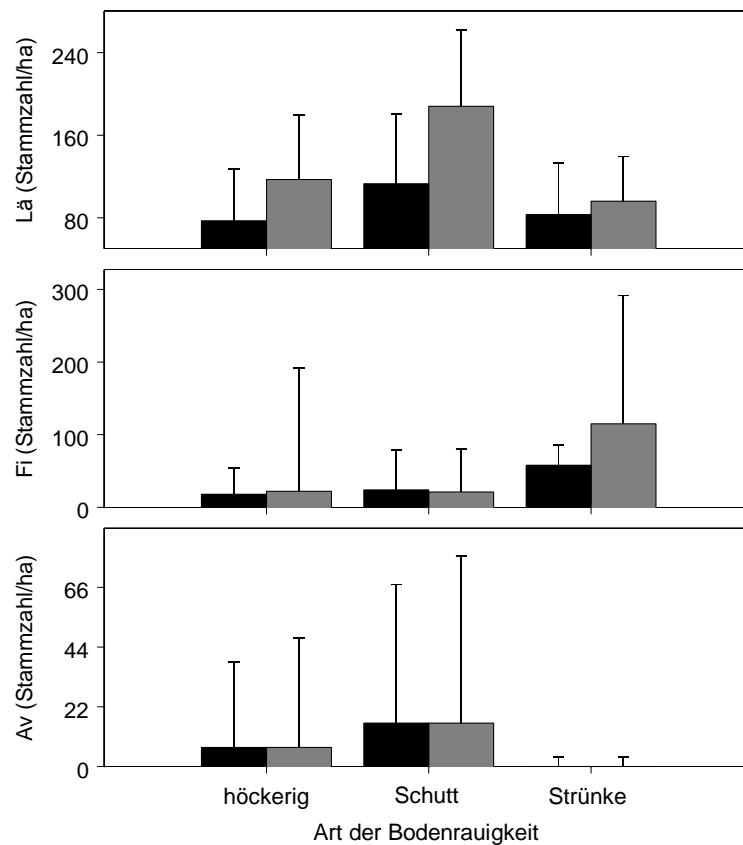


Abb. 19: Entwicklung von Lärchen (Lä), Fichten (Fi) und Arven (Av) mit BHD  $\geq$  8 cm auf verschiedenen Arten von Bodenrauigkeiten im 1986/90 (schwarz) und 2008 (grau). (Mediane und Standardabweichungen)

#### 4.2.4 Einfluss der Hangneigung

Auf steilen Hängen mit einer Neigung ab  $45^\circ$  wuchsen mehr kleinere Bäume, und auf weniger geneigtem Gelände hatte es mehr grössere Bäume (Tab. 7). Die Stammzahl der Durchmesserklassen Verjüngung, „BHD < 4 cm“ und „BHD 4-7 cm“, war jeweils im steilsten Gelände ( $\geq 45^\circ$ ) am grössten. Bei der Klasse „BHD  $\geq 16$  cm“ hatte es auf den Flächen mit einer Neigung von  $40^\circ$  bis  $44^\circ$  am wenigsten Bäume. Hingegen war die Klasse „BHD 8-15 cm“ auf diesen Flächen am häufigsten vertreten. Zusammengefasst hatten diese beiden Klassen am meisten Bäume auf den weniger steilen Hängen ( $\leq 39^\circ$ ).

Tab. 7: Vergleich der Durchmesserklassen der gesamten Stammzahl/ha in Abhängigkeit der Geländeneigung. Mit ■ gekennzeichnet sind jene Hänge, die die grösste Stammzahl pro ha in beiden Untersuchungsperioden hatten. Die mit □ symbolisierten kennzeichnen die höchsten Stammzahlen/ha jeweils in den Jahren 2008 und 1986/90.

Durchmesserklasse	max. Median bei Neigung			Median 2008 (Stammzahl/ha)			Median 1986/90 (Stammzahl/ha)		
	$\leq 39^\circ$	40-44°	$\geq 45^\circ$	$\leq 39^\circ$	40-44°	$\geq 45^\circ$	$\leq 39^\circ$	40-44°	$\geq 45^\circ$
Verjüngung			■	157	301	381	75	163	308
BHD < 4 cm			■	100	112	165	50	78	80
BHD 4-7 cm			■	53	81	85	32	39	32
BHD 8-15 cm		■		30	46	21	15	29	16
BHD $\geq 8$ cm	■			229	179	169	185	145	155
BHD $\geq 16$ cm	□		□	176	141	155	151	114	155

Besonders die kleineren Bäume (BHD  $\leq 7$  cm) wuchsen in stark geneigten Hängen ( $\geq 45^\circ$ ) zahlreicher (Tab. 7, Abb. 20). Speziell Fichten und Lärchen wiesen im Jahr 2008 auf steilen Hängen ab  $45^\circ$  grössere Stammzahlen/ha auf als im flacheren Gelände. 20 Jahre zuvor war der grösste mittlere Stammzahl der Lärchen im Gelände mit einer Neigung von  $40^\circ$  bis  $44^\circ$ . Die Veränderung der Lärchenstammzahl war in den 20 Jahren auf den steilsten Hängen ( $\geq 45^\circ$ ) gross (Abb. 20). Der Lärchenanteil nahm 12% (Median) zu und auf den weniger stark geneigten Flächen ( $\leq 39^\circ$ ,  $40^\circ$ - $44^\circ$ ) um rund 4% ab (Abb. 21). Die mittlere Stammzahl/ha (Median) der Fichten war auch 1986/90 auf steilen Hängen die grösste, jedoch gingen hier die Fichten zurück und auf den weniger geneigten ( $\leq 39^\circ$ ) nahm sie zu. Der prozentuale Fichtenanteil ging jedoch auch auf weniger steilen Hängen zurück. Dabei wurden die mittlern Stammzahlen/ha von Fichten innerhalb der 20 Jahre auf weniger geneigten Hängen grösser. Die Arven waren in den Jahren 1986/90 im steilen Gelände ( $\geq 45^\circ$ ) mit 32 Bäumen/ha (Median) stärker vertreten als auf den weniger geneigten Flächen. Hingegen waren im Jahr 2008 auf vielen steilen Flächen keine Arven mehr vorhanden, dafür wuchsen auf den weniger geneigten Hängen ( $\leq 39^\circ$ ) mehr Arven. Analog dazu veränderte sich der Arvenanteil von einem BHD von 0 bis 7 cm.

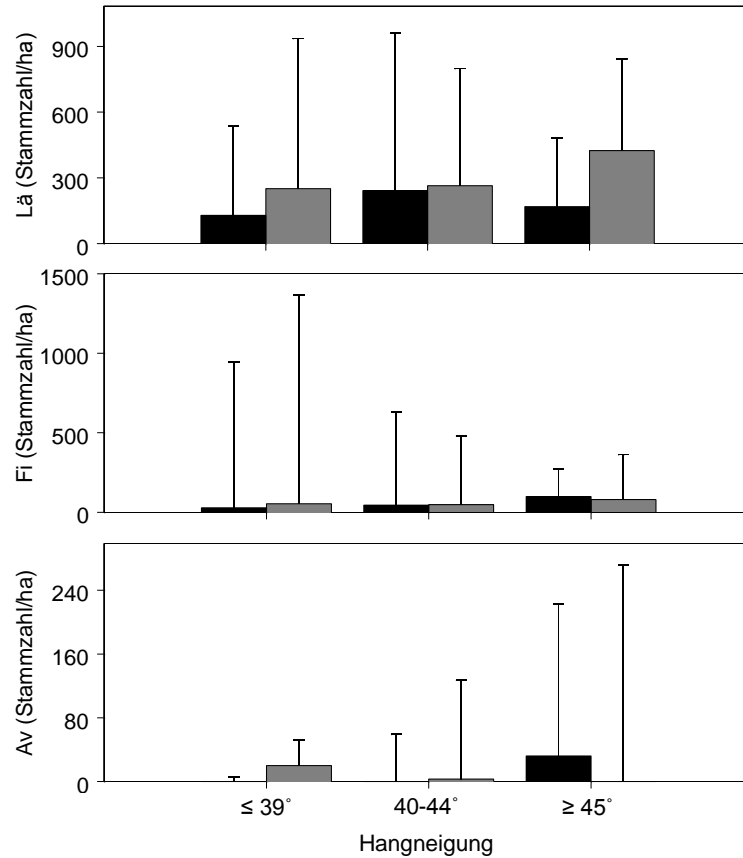


Abb. 20: Verteilung von Lärchen (a), Fichten (b) und Arven (c) mit einem BHD  $\leq 7$  cm auf unterschiedlich geneigtem Gelände im 1986/90 (schwarz) und 2008 (grau). Die Neigungsklassen sind:  $\leq 39^\circ$ ,  $40^\circ$ - $44^\circ$  und  $\geq 45^\circ$  (Mediane und Standardabweichungen)

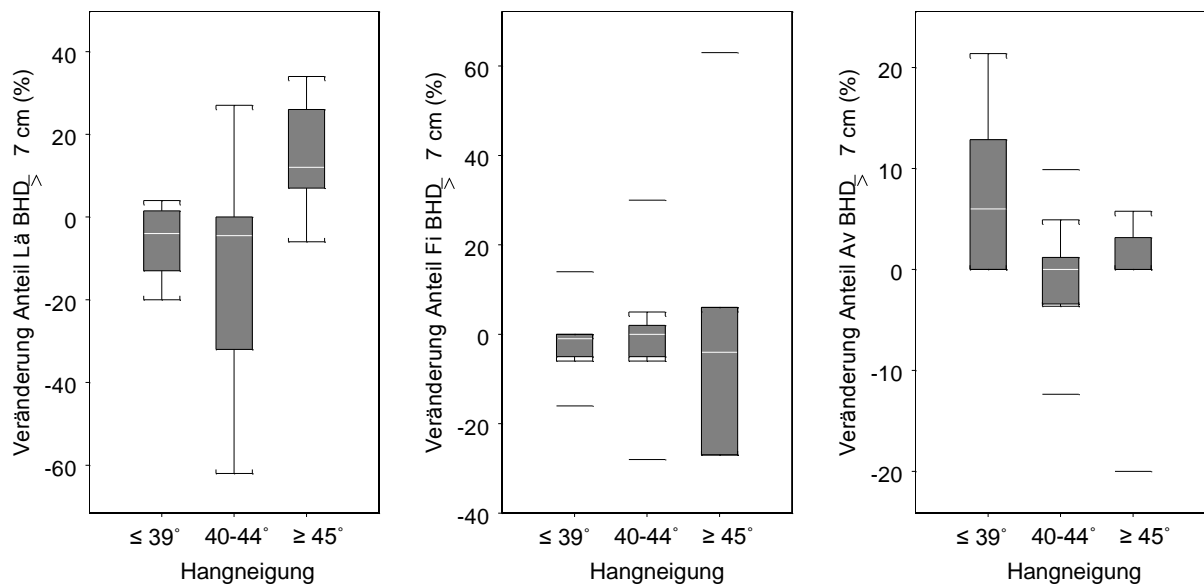


Abb. 21: Veränderung des Arteneinteils von Lärchen (Lä), Fichten (Fi) und Arven (Av) mit einem BHD von  $\leq 7$  cm. Die Neigungsklassen sind:  $\leq 39^\circ$ ,  $40^\circ$ - $44^\circ$  und  $\geq 45^\circ$

Die grösseren Bäume, ab einem BHD von 8 cm, waren anders verteilt als die kleineren. Im stark geneigten Gelände ( $\geq 45^\circ$ ) hatte es weniger Lärchen und mehr Arven (Abb. 22). Zudem nahm die Anzahl Lärchen auf steilen Hängen ( $\geq 45^\circ$ ) und diejenige unter  $40^\circ$  ab und auf  $40^\circ$  bis  $44^\circ$  steilen Hängen zu. Die Lärchen gingen in den 20 Jahren im steilen Gelände ( $40^\circ$ - $44^\circ$ ) mehr als die Hälfte zurück. Die Fichten gingen auf den sehr steilen Hängen ebenfalls zurück, waren aber in den Jahren 1986/90 hier am stärksten vertreten. Ihre mittlere Stammzahl war im weniger geneigten Gelände am kleinsten. Die mittlern Stammzahlen/ha der Arven waren in den 20 Jahren unverändert und sie wuchs bevorzugt auf steilen Hängen ab  $45^\circ$ . Gesamthaft betrachtet war die Stammzahl/ha in den weniger steilen Hängen am grössten (Tab. 7).

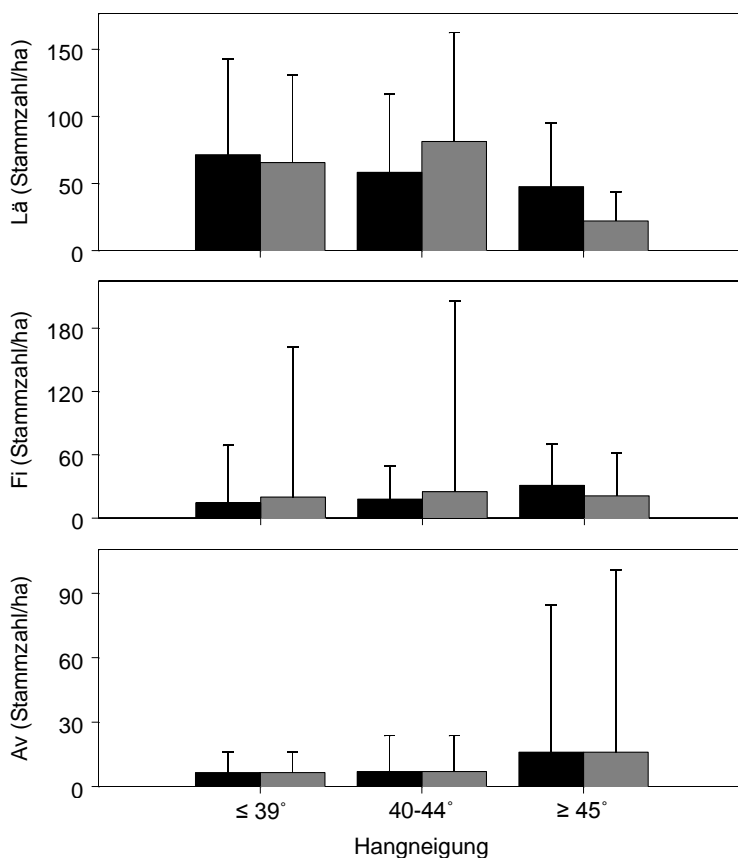


Abb. 22: Verteilung von Lärchen (Lä), Fichten (Fi) und Arven (Av) mit einem BHD  $\geq 8$  cm bei verschiedenen Hangneigungen im 1986/90 (schwarz) und 2008 (grau). Die Neigungsklassen sind:  $\leq 39^\circ$ ,  $40^\circ$ - $44^\circ$  und  $\geq 45^\circ$  (Mediane und Standardabweichungen)

#### 4.2.5 Einfluss von Muldenlagen

In Muldenlagen wuchsen meistens weniger Bäume (Abb. 23). Eine Ausnahme stellten die grösseren Lärchen und die kleineren Arven dar. Die Lärchen der Durchmesserklasse „BHD  $\geq 8$  cm“ waren im Mittel in den Mulden mehr vertreten wie auf gleichmässigen Hängen und Rippen. Hier war ihr Artenanteil in Mulden 86% (Median) und auf anderen Flächen 52% (2008) bzw. 58% (1986/90) und im Vergleich zu den kleineren Lärchen war ihr mittlerer Anteil (Median) in Mulden rund 25% höher. Der mittlere Fichtenanteil (Median) der Klasse „BHD  $\geq 8$  cm“ war mit 5% (2008) bzw. 8% (1986/90) in Mulden kleiner als auf anderen Flächen mit 30% Fichten. Dieser Unterschied war bei den kleineren Bäumen weniger ausgeprägt. Dafür war der Arvenanteil bei kleineren Bäumen in den Jahren 1986/90 in Mulden mit 7% (Median) signifikant höher ( $p=0.0466$ , Wilcoxon Rangsummen-Test). 20 Jahre später war der Arvenanteil bei beiden Geländeformen um rund 4% (Median). Ihre prozentuale Abnahme in den 20 Jahren in Mulden war signifikant ( $p=0.0286$ , Wilcoxon Rangsummen-Test).

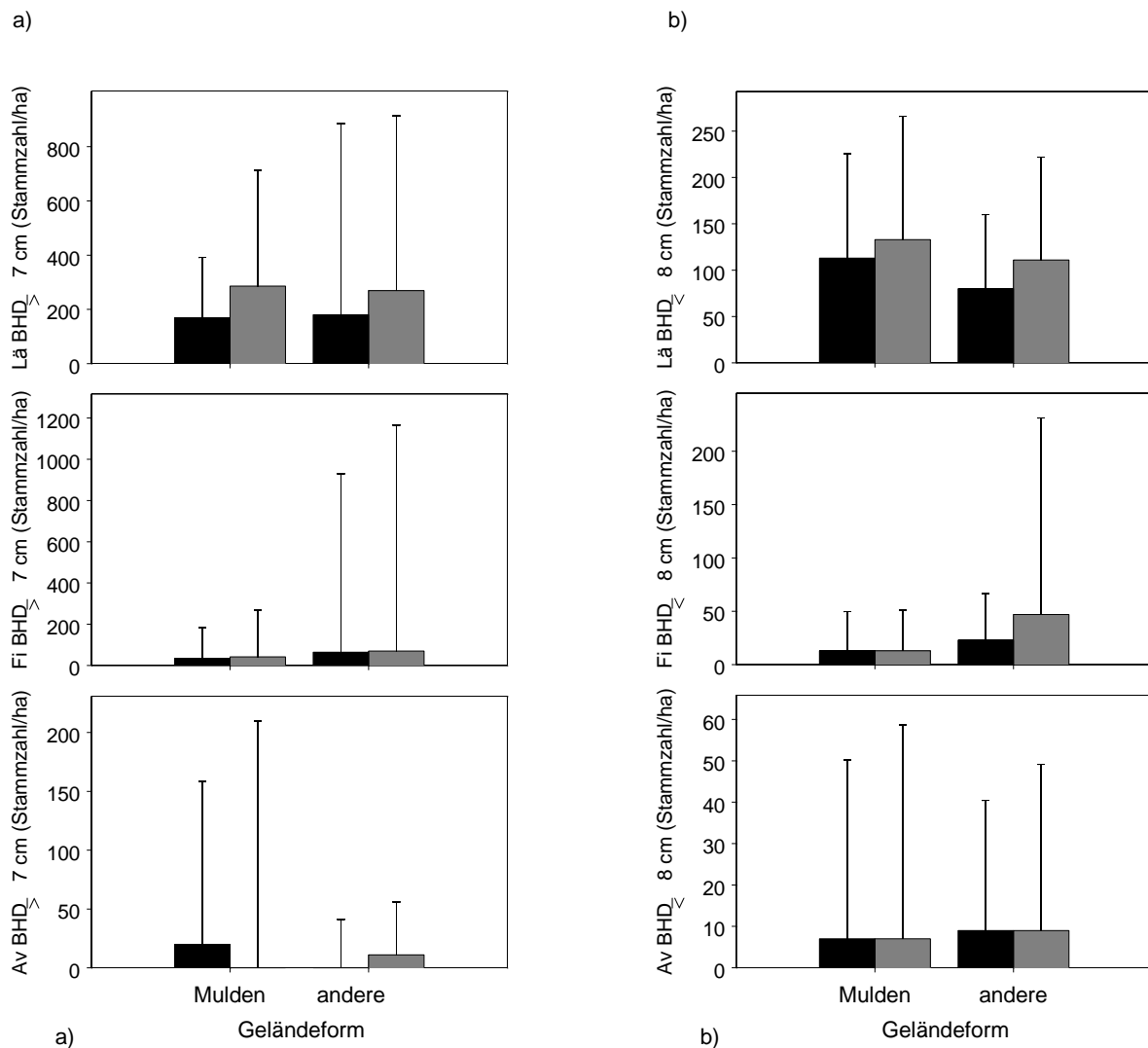


Abb. 23: Einfluss der Geländeform auf die „BHD  $\leq 7$  cm“ (a) und „BHD  $\geq 8$  cm“ (b) (schwarz) und 2008 (grau).

#### 4.2.6 Einfluss der Exposition

Meistens wuchs der grösste Teil der Bäume in den Jahren 1986/90 und im Jahr 2008 auf Nordost exponierten Hängen (Abb. 24). Es gab im Jahr 2008 signifikant mehr kleine Bäume ( $p=0.0273$ ; Wilcoxon Rangsummen-Test) auf Nordost Hängen. Bei allen drei Baumarten gab es mehr kleine Bäume in Nordost Hängen. Es hatte im Jahr 2008 signifikant mehr Fichten ( $p=0.0143$ ; Wilcoxon Rangsummen-Test) in Nordost Hängen, 20 Jahre zuvor war der Unterschied nicht signifikant. Eine Ausnahme stellten die grossen Lärchen (BHD  $\geq 8$  cm) und Arven dar.

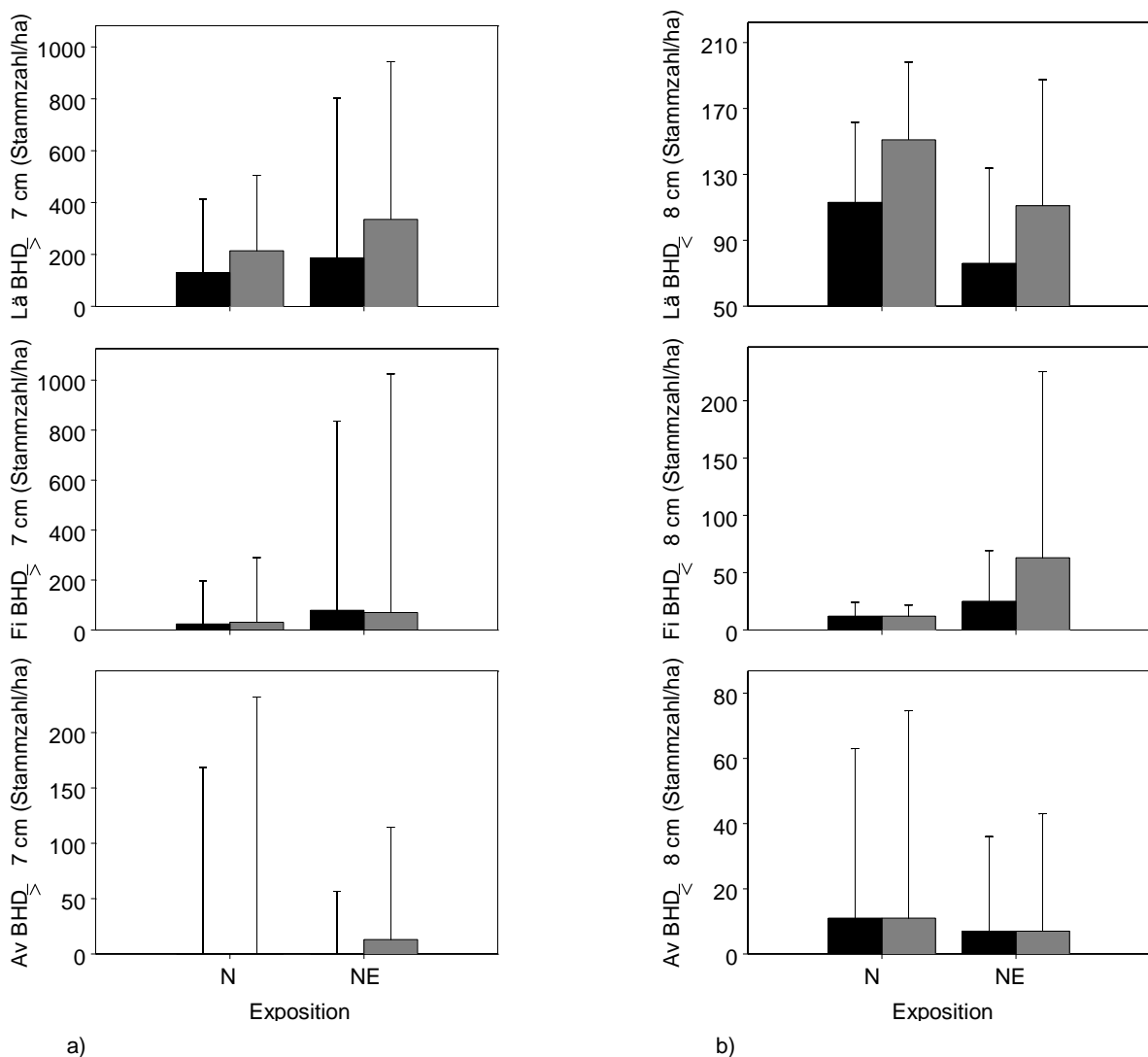


Abb. 24: Einfluss der Exposition auf die Durchmesserklassen „BHD  $\leq 7$  cm“ (a) und „BHD  $\geq 8$  cm“ (b) 1986/90 (schwarz) und 2008 (grau).

## 5 Diskussion

### 5.1 Verifizierung der GIS-Analyse

Der mit LiDAR berechnete Deckungsgrad war kleiner als jener von anderen Erfassungsmethoden. Die Baumhöhe wurde im Vegetationsmodell mehrheitlich unterschätzt, dabei wurden Lärchen mehr unterschätzt als Fichten und Arven. Jedoch gab es auch Überschätzungen der Baumhöhen.

#### Deckungsgrad

In der vorliegenden Arbeit ist anzunehmen, dass der „Deckungsgrad LiDAR“ besser mit dem realen Deckungsgrad übereinstimmt als der „Deckungsgrad Luftbild“ (Abb. 7). Die Deckungsgrade vom Waldlawinenprojekt 1986/90 stimmten gut mit dem „Deckungsgrad LiDAR“ überein, weil sie sich nicht stark verändert haben und jene Bestände, die sich stark verändert haben, nicht berücksichtigt wurden. Besonders Bestände mit winterkahlen Bäumen wurde mehr unterschätzt, weil das Laser-scanning im Winter stattfand. Bösch et al. (2007) stellten ebenfalls fest, dass grössere bestockte Flächen fälschlicherweise nicht erfasst wurden. Dies war der vorliegenden Analyse nie der Fall. Der LiDAR basierte Deckungsgrad unterschätzte auch bei einer anderen Untersuchung den luftbildgestützten Deckungsgrad (Bösch et al., 2007).

Die grosse Streuung beim „Deckungsgrad Luftbild“ (Abb. 7) kommt daher, dass auf den Luftbildern der Schattenwurf kleinere Bäume verdeckt (Abb. 25). Somit ist es schwer zu entscheiden ob es sich um einen Baum oder um eine Bestandesöffnung handelt. Darin liegt der Vorteil von LiDAR-Daten (Maier & Hollaus, 2006), denn diese sind unabhängig von Lichtverhältnissen und die Ansicht ist nicht verzerrt (Abb. 25).

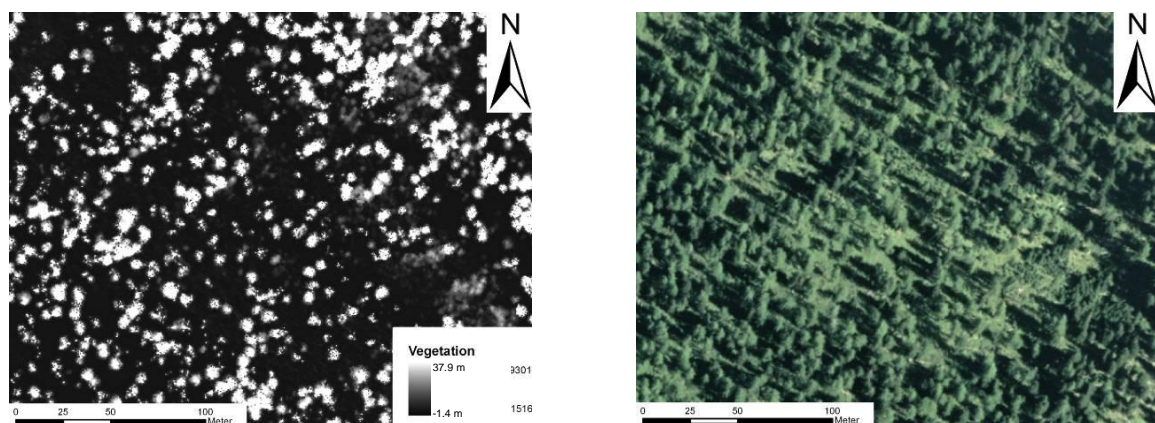


Abb. 25: Vergleich von Vegetationsmodell (links) und Luftbild (rechts); DTM-AV DOM-AV © 2008 Eidg. Vermessungsdirektion (DV033531), swissimage © 2008 swisstopo (DV 033594)

## Einzelbäume

Die Fehleinschätzung der Baumhöhen, sowie das Nichterkennen von Einzelbäumen kann verschiedene technische Ursachen haben. Laut Bösch et al. (2007) ist die Punktedichte mit ungefähr 0.5 Punkten/m<sup>2</sup> zu niedrig, um Rückschlüsse auf die Einzelbaumstrukturen zu ziehen. Weiter verfügt das Oberflächenmodell (DOM) über eine Höhengenaugigkeit von  $\pm 1.5$  m (Swisstopo, 2007), dieser Fehler macht sich mehrheitlich im Kronenbereich bemerkbar (Bösch et al., 2007). Diese Höhenungenauigkeit kann durch Schneeflächen noch verstärkt werden, dabei ist zu beachten, dass zum Zeitpunkt der Befliegung, im April, auf rund 2000 m ü. M. noch Schnee liegt. Schnee reflektiert die Laserstrahlen sogar stärker wie Bäume und Vegetation und zudem gehen die Laserstrahlen nicht durch die Schneedecke hindurch (Bauer & Paar, 2004). Deshalb ist wahrscheinlich auch das Geländemodell nicht exakt. Eine weitere Fehlerquelle besteht im steilen Gelände. Bei steilen Hängen und grossen Bäumen ist der systematische Fehler grösser wie im flachen Gelände (Heurich et al., 2003).

Die Fehleinschätzung der Baumhöhe war grösser als bei anderen Untersuchungen und das arithmetische Mittel war grösser als die von Swisstopo (2007) angegebene Höhengenaugigkeit (Tab. 4). Maier und Hollaus (2006) erwähnen eine geringe Abweichung bei Fichten von  $-0.33$  m (SD  $\pm 2.7$  m). Bei weiteren Untersuchungen waren die Abweichungen grösser, aber immer noch deutlich kleiner als in dieser Untersuchung. Bei einer Analyse im submontanen Wald wird bei Nadelbäumen eine Höhenungenauigkeit von  $-0.79$  m (SD  $\pm 1.25$  m) (Heurich et al., 2003) bzw. von  $-0.65$  m (SD  $\pm 1.43$  m) angegeben (Heurich et al., 2002).

Bei Baumhöhen, die überschätzt werden, bestehen verschiedene Ursachen. Ein Messfehler entsteht, wenn der Baum im steilen Gelände Hang abwärts hängt (Abb. 26). Zudem ist es auffällig, dass besonders hohe Bäume überschätzt werden, weil sich der zuvor beschriebene Fehler stärker auswirkt. Eine weitere technische Fehlerquelle ist das Scannen mit dem Laser. Bei steilen Hängen mit Rohboden oder Felsen ergeben sich mehrfache Echos, die zu Fehlinterpretationen beim DOM führen (Hollaus et al., 2006). Ein anderer Grund kann das in den letzten Jahren stark verlangsamte oder gar stagnierende Wachstum hoher Bäume sein. Diese natürliche Wachstumseigenschaft berücksichtigte ich bei der Interpolation nicht und ging von einem linear verlaufenden Höhenwachstum aus.

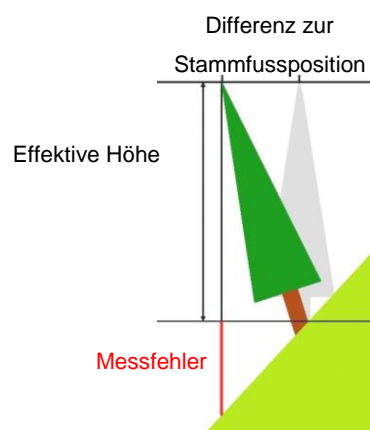


Abb. 26: Messfehler auf dem DOM bei Hang abwärts hängenden Bäumen im steilen Gelände.

Die Unterschätzung der Baumhöhe kann einige Gründe haben. Einerseits können bei den Baumhöhenmessungen mit dem Vertex III Fehler entstehen. Gerade bei hohen Bäumen war es im steilen Gelände unterhalb einer Geländekante schwierig, genügend weit entfernt vom Baum zu messen und auf den effektiv höchsten Trieb zu peilen (Abb. 27). Andererseits entsteht ein zu hohes DTM, wenn beim Scannen noch Schnee liegt. Zudem werden Spitzkronigen Nadelbäume mehr unterschätzt als die runderen Laubbäume (Heurich et al., 2003). Bei einer spitzen Krone ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Laserstrahl genau auf die höchsten Triebe trifft, kleiner als bei einer breiteren Krone (Abb. 28a). Eine weitere Fehlerquelle ist, wenn der Baum an einem steilen Hang aufwärts hängt und somit der Wipfel nicht lotrecht über dem Stammfuss liegt (Abb. 28b).

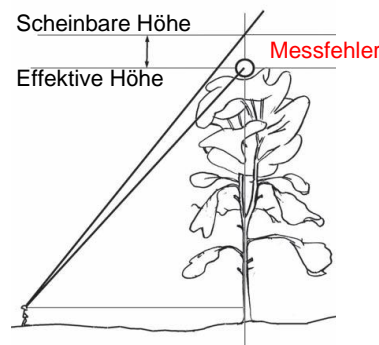


Abb. 27: Messfehler bei der Baumhöhenmessung mit dem Vertex III, aus Keller M. 2005

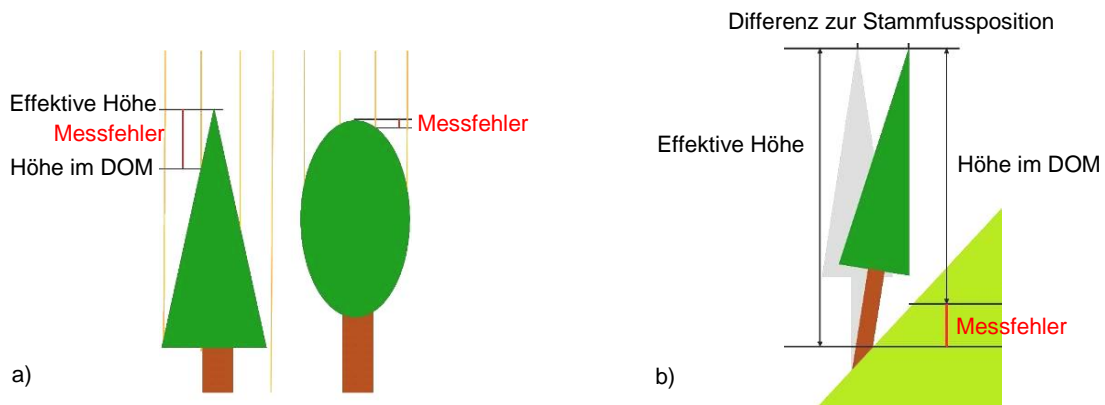


Abb. 28a-b: Messfehler auf dem DOM bei unterschiedlichen Kronenformen (a) und bei Hang aufwärts hängenden Bäumen im steilen Gelände (b).

Die Lärchen wurden schlechter erfasst als Fichten und Arven, weil sie zum Befliegungszeitpunkt keine Nadeln trugen. Dadurch sind die Reflektionsflächen im Winter reduziert (Bösch et al., 2007) und die Kronenprojektionsflächen der Lärchen erscheinen kleiner als jene von gleich grossen Fichten. Auf den Deckungsgrad übertragen bedeutet dies, dass der „Deckungsgrad LiDAR“ mehr unterschätzt wird, je mehr winterkahle Baumarten vorhanden sind (Bösch et al., 2007). Problematisch war, dass fünf von 192 Lärchen, die zwischen 15 und 30 m hoch waren, mit den LiDAR-Daten nicht erfasst wurden (Abb. 9). Dieses Phänomen würde beim Vergleich mit den kleinräumig erfassten Daten aus dem Waldlawinenprojekt 1986/90 schwerwiegende Fehlinterpretationen der Waldentwicklung verursachen.

## 5.2 Gebirgswalddynamik und Gebirgswaldstruktur

Die Bestände wurden dichter. Die Stammzahl nahm in den Jahren 1986/90 bis 2008 bei allen Durchmesserklassen zu, jedoch variierte sie je nach Aufnahme­fläche stark (Tab. 5, Abb. 12). Im Jahr 2008 hatte es signifikant mehr Bäume mit einem minimalen BHD von 4 cm (Tab. 6). Auf Flächen die in den Jahren 1986/90 einen kleinen Deckungsgrad hatten, nahm der Deckungsgrad zu, aber im Durchschnitt blieb er etwa gleich. Zudem waren die Bestände im Jahr 2008 signifikant höher als in den Jahren 1986/90. Dabei erreichten Lärchen die grössten und Arven die kleinsten Baumhöhen (Abb. 11). Die Lärche war in den Jahren 1986/90 und 2008 die dominierende Baumart und am wenigsten häufig war die Arve. In der Verjüngung war der Lärchen- und Fichtenanteil geringer als bei den grösseren Durchmesser­klassen und auch Vogelbeeren und Grünerlen kamen auf.

Die Häufigkeit des Vorkommens war je nach Baumart und topografischen Merkmalen unterschiedlich (S. 40-46). Die grossen Lärchen wuchsen vermehrt auf Schutt, in weniger steilen Hängen ( $\leq 39^\circ$ ,  $40^\circ$ - $44^\circ$ ), in Muldenlagen und in Nord Hängen. Hingegen war die Fichte häufiger auf Flächen mit Strünken, nordostexponierten Flächen und seltener in Muldenlagen. Weiter kamen die Arven vermehrt auf Schutt, sehr steilem Gelände ( $\geq 45^\circ$ ) und Nord Hängen vor, dafür war sie seltener in Muldenlagen. Die kleinen Bäume kamen häufiger auf Nordost exponierten Flächen vor. Die kleinen Lärchen wuchsen häufiger auf Flächen mit Strünken, auf steilen Hängen ( $\geq 45^\circ$ ) und in Muldenlagen. Die Fichte wuchs auch mehrheitlich auf Flächen mit Strünken, jedoch war sie in Muldenlagen seltener. Die kleinen Arven wuchsen bevorzugt auf Felsschutt.

### 5.2.1 Entwicklungsdynamik

#### **Stammzahlabnahme**

Die Abnahme von Stammzahlen mit zunehmendem BHD ist naturbedingt (Abb. 12). Das ist die Folge der natürlichen Mortalität, die durch Konkurrenz, aber auch durch Klima und Krankheit beeinflusst wird (Oliver & Larson, 1996). Kleine Bäume traten öfters gruppiert auf und konkurrenzten sich um Licht, Nährstoffe und Wuchsraum. Wer nicht bei den Grössten mithalten kann, wird allmählich absterben (Oliver & Larson, 1996). Solange die Bäume über den Winter in der Schneedecke eingepackt sind, besteht Schutz vor Wildfrass. Dafür ist für Fichten und Arven die Gefahr von pathogenen Keimen befallen zu werden gross (Stöckli, 2002; Senn & Schönberger, 2001). Schneeschimmel ist eine häufige Todesursache von jungen Fichten und Arven. Sobald die Bäume grösser werden und aus der Schneedecke ragen, ist zwar die Gefahr des Pilzbefalls gebannt, aber sie sind nicht nur dem Wild ausgesetzt, sondern auch dem Frost und Wind. Schneekriechen, -gleiten und Lawinen sind für die jungen Bäume nicht tödlich, solange sie im Stamm genug flexibel sind, um sich abzulegen (Senn & Schönberger, 2001). Die geringe Stammzahl der Durchmesser­klasse „BHD 8-15 cm“ hatte meistens nicht mit Mortalität zu tun, denn es wurden keine toten Bäume dieser Grösse

gefunden. Ein entscheidender Faktor für die geringen Stammzahlen dieser Klasse ist das schnellere Wachstum. Die Jahrestriebe waren bei Bäumen mit einem BHD von 8-15 cm kräftiger und länger als bei den anderen. Die Bäume befinden sich eine kürzere Zeit in dieser Klasse, als sie in den kleineren waren und in grösseren Durchmesserklasse sein werden.

### **Entwicklung der Artenzusammensetzung**

Der geringere Lärchenanteil in der Verjüngung (Abb. 13) kann daher kommen, weil Lärchen in jungen Jahren schneller wachsen als Fichten und Arven. Die Fichte wächst im Gebirgswald bis zu einer Höhe von ungefähr 1.3 m sehr langsam und buschig und kann dafür mehr als 50 Jahre benötigen (Ott et al., 1997). Sobald das Wurzelwerk ausreichend ausgebildet ist, beschleunigt sich das oberirdische Wachstum (Lüscher, 1990). Die Jahrestriebe waren bei der Lärchenverjüngung wesentlich länger als bei der Fichten- und Arvenverjüngung. Die Arvenverjüngung hatte weniger lange Jahrestriebe als die Lärche, aber ihr Wuchs war weniger buschig wie jener der Fichten. Kleine Arven wachsen auch an günstigen Standorten langsam, bis sie eine Höhe von 1 bis 2 m erreicht haben vergehen 30 bis 50 Jahre. Nachher wachsen Arven relativ rasch weiter (Ott et al., 1997).

Der Rückgang des Fichtenanteils in der Verjüngung und die Veränderungen des Fichtenanteils in grösseren Durchmesserklassen ist eng aneinander gekoppelt (Abb. 13 - Abb. 17). Die grossen Fichtenvorkommnisse auf den Untersuchungsflächen traten geklumpt an günstigen Standorten auf. Meistens waren sie unter dem Schirm von grossen Lärchen kombiniert mit Strünken oder auf grossen Blössen mit Strünken. Diese bevorzugten Standorte waren schon in den Jahren 1986/90 reich an Verjüngung. Nun wuchsen diese Bäume, im gegenseitigen Schutz, in eine grössere Durchmesserklasse. In diesen Fichtengruppen wäre es unmöglich für kleine Fichten aufzukommen und vielfach ist die Vegetation zu hoch um neue Flächen zu besiedeln. Und auf Flächen mit viel Dynamik ist die Stammzahl der Lärchen meist um ein mehrfaches grösser.

Ein weiterer Aspekt, der besonders den kleineren Fichten zusetzt oder gar zum Absterben führt, ist der Fichtennadelrost (*Chrysomyxa rhododendri*) (Nierhaus-Wunderwald, 2002; Ott et al., 1997). Fast alle Fichten waren vom Fichtennadelrost befallen. Die kleineren Bäume waren ganz befallen, die grossen Fichten waren meist in den unteren Bereichen befallen und im Wipfelbereich gesund. Der Pilz, dessen Wirtspflanze die Alpenrose ist, infiziert die frischen Nadeln nach dem Austreiben. Die Nadeln verfärben sich im Verlauf des Sommers von hellgrün bis gelbrot und im August treten hellrote Äzidien hervor (Schwerdtfeger, 1981). Später sterben die Nadeln ab. In den Alpen entstehen so teilweise erhebliche Nadelverluste (Schwerdtfeger, 1981). Für kleine Fichten ist der Nadelverlust einschneidend, wenn zwei oder mehr Nadeljahrgänge absterben wird die Photosynthese eingeschränkt (Nierhaus-Wunderwald, 2002). Auf ältere Bäume wirkt sich der Nadelverlust weniger stark aus, da sie über mehr photosynthesefähige Nadeljahrgänge verfügen.

Die starke Zunahme der Vogelbeeren in der Verjüngung sollte nicht überbewertet werden. Ihr Vorkommen war sehr geklumpt in Alpenrosen, die sie nur selten überragten. Bei der Feldaufnahme war die Entdeckung einer Gruppe von Vogelbeeren meist zufällig und es ist davon auszugehen, dass dies auch in den Jahren 1986/90 so war. Die Vogelbeeren waren sehr stark verbissen und waren meist nicht höher als 30 bis 50 cm. Die Wildbestände vom Kanton Graubünden würden einen Rückgang der Vogelbeere prognostizieren, da die Wildbestände, mit Ausnahme desjenigen vom Reh, höher sind (Anon., 2008).

### **Wuchsform**

Abgesehen vom häufigen Säbelwuchs, der besonders bei Lärchen weit verbreitet war, fand ich keine offensichtliche, flächig verbreiteten mechanische Schäden, die durch Schneebewegungen verursacht worden sind. Bei einem BHD von 6 bis 14 cm besteht die Gefahr eines Stammbruches (Horak, 2004). Es handelte sich mehrheitlich um einzelne Bäume die vor längerer Zeit einmal einen Stammbruch erlitten. Dies waren überwiegend Fichten, die nach dem Ereignis wieder austrieben. Neue Stammbrüche waren auf den Flächen nicht zu finden. Zudem lagen auch keine kleineren, entwurzelten Bäume in den unterhalb der Aufnahmeflächen gelegenen flacheren Hangpartien.

### **Stamm- und Wipfelbrüche**

Die Fichte scheint von Wipfelbrüchen weniger betroffen zu sein als Lärchen und Arven (Abb. 11). Bei grossen Lärchen ereigneten sich innert den 20 Jahren einige Wipfel- oder gar Stammbrüche. Fichten waren dagegen nur einzeln von Stammbrüchen betroffen. Auch bei älteren, liegenden Stämmen handelte es sich immer um Lärchen und Fichten. Dafür fehlte im Jahr 2008 keine einzige grosse Arve, die in den Jahren 1986/90 protokolliert wurde. Die Arven haben nach wie vor variable Schlankheitsgrade. Dieser knorrige Kandelaberwuchs wird durch häufige Wipfelbrüche verursacht (Lauber & Wagner, 2001). Durch ihr gedrängter, im Vergleich zu Lärchen und Fichten niedrige, Wuchs und das kräftige Wurzelwerk (Schütt et al., 2004) sind sie weniger anfällig auf Windwurf. Und sich können mit den kräftigen Wurzeln lange Zeit in extremen Positionen halten. Arven, die vor den Aufnahmen vom Waldlawinensprojekt 1986/90 einen Stammbruch erlitten, existierten einzeln.

### **Verjüngungsanzahl**

Auf den untersuchten Flächen nahm die Anzahl kleiner Bäume (BHD  $\leq 7$  cm) zu (Tab. 5). (Hefti, 1986) erwähnt, dass rund 1000 Pflanzen/ha zu wenig sind um den Bestand stabil zu halten. Ott et al. (1997) schätzen eine Mindestanzahl von 1200 bis 1800 Bäume/ha im Verjüngungsanteil (BHD  $< 12$  cm), um die die Schutzwirkung im Bestand nachhaltig zu erhalten. Diese Angaben entsprechen Gebirgswäldern, die nicht nahe an der Waldgrenze liegen. In subalpinen Lagen ist das Samenangebot limitiert. Bei kalten Witterungsverhältnisse können auch bei Vollmast keine keimfähigen Samen ausreifen (Ott et al., 1997). An der Waldgrenze sind die Lebensprozesse stark verlangsamt. Eine Arve kann in diesen Höhen mehr als 1000 Jahre alt werden und eine Lärche kann

mehr als 600 Jahre alt werden (Ott et al., 1997). Weil die vorhandenen Bäume einen langen Lebenszyklus haben, ist ein weniger hoher Verjüngungsanteil notwendig, um die Bestandesstruktur zu erhalten.

### **Einfluss von topografischen Parametern**

Jüngere Lärchen gedeihen vermehrt auf Flächen mit Strünken (Abb. 18.), jedoch wachsen sie auf diesen Flächen mehrheitlich auf Rohboden und umgekehrten Wurzeltellern. Nach Ott et al. (1997) wachsen Lärchen am Besten auf vegetationsfreier, leicht mit Moos überdeckter Mineralerde und in Nordhängen können sie auch gut auf Moderholz ansamen. Von der zweit genannten Eigenschaft machte sie auf den Aufnahmeflächen aber kaum gebrauch. Neben Strünken liegen etliche Stämme, die schon im Waldlawinenprojekt aufgenommen wurden, kreuz und quer. In der Zwischenzeit liegen neue Bäume auf dem Boden. Bei diesen dynamischen Prozessen wird immer wieder Rohboden frei und bietet optimale Bedingungen für das Aufkommen von Lärchenverjüngung, sofern sich die Lärchenkeimlinge gegen die aufkommende Vegetation durchsetzen können. Die kleinen Lärchen wuchsen auf vegetationsfreiem Rohboden und neben, wie auch auf, umgekippten Wurzeltellern. Diese Beobachtung wird in der Literatur bestätigt (Senn & Schönberger, 2001; Ott et al., 1997). Die jungen Bäume finden auf den erhöhten Wurzeltellern Schutz vor Kriechschnee und die klimatischen Bedingungen sind günstiger. Die Gefahr des Austrocknens ist dafür grösser. Auf der dritten Fläche mit Strünken fand vor mehr als 20 Jahren ein Eingriff statt und es wurde eine Lücke von 30 auf 40 m geschlagen, somit waren die Licht- und Wärmeverhältnisse besser.

Auch die kleinen Fichten wuchsen bevorzugt auf Flächen mit Strünken. Dies beobachtete ich nicht nur auf den Aufnahmeflächen mit Baumstrünken, sondern auch auf anderen Flächen. Viele Fichten wuchsen unter dem Schirm von hohen Fichten oder neben Baumstrünken oder bei Wurzeltellern. Stöckli (2002) machte im 400 m tiefer gelegenen Lusiwald eine gleiche Beobachtung. Die Bodenrauigkeit „Strünke“ deckt sich stark mit umgekippten, entwurzelten Bäumen. Strünke und Moderholz beeinflussen das Mikroklima günstig (Jean-Francois et al., 1998; Hofgaard, 1993). Nahe an den Strünken ist das Mikroklima wärmer und die Flächen neben Strünken apert früher aus, weil das dunkle Holz mehr Sonnenlicht absorbiert (Ott et al., 1997). An früh ausapernden Kleinstandorten sind die Fichten besser vom Schneeschimmel geschützt. Auf vielen Untersuchungsflächen war die Vegetation kniehoch und kleinere liegende Stämme ragten nicht aus dem Vegetationsteppich. Viele Strünke wurde auf den ersten Blick nicht mehr als solche erkannt, weil sie mit Moosen und Vegetation bewachsen waren. Das Holz ist im stark verwitterten Zustand für die Ansamung der Fichten gut geeignet, da durch den Faulungsprozess Wasser frei gesetzt wird (Ott et al., 1997).

Das vermehrte Vorkommen der Arven auf Felsschutt ist charakteristisch (Abb. 18; Abb. 19). Ott et al. (1997) erwähnte, dass Arven in den nördlichen Rand- und Zwischenalpen fast nur auf Blöcken und Felsen vorkommen. Dieses typische Vorkommen ist wahrscheinlich auf ihre Anfälligkeit gegenüber Schneepilzen zurückzuführen (Ott et al., 1997). Jedoch kann der schwere Arvensamen auch auf 5 bis 15 cm dicken Moospolstern keimen, (Abb. 29) Die Steine waren meist mit Moos überwachsen und bieten so ein Keimbett mit ausgeglichenem Wasserhaushalt und schützen den Keimling vor dem austrocknen.



Abb. 29: Arvenverjüngung auf mit Moos überwachsenem Stein.

Die kleinen Bäume wuchsen zahlreicher an steilen Hängen über 44°. Trotzdem, dass es im steilen Gelände weniger Tage mit direktem Sonnenlicht gibt und dies für Lärchen und Fichten limitierend ist, wuchsen tendenziell mehr kleine Bäume und mehr grosse Fichten und Arven in den steilsten Hängen. Dies scheint auf den ersten Blick paradox. Im Sommer an Schattenhängen der subalpinen Stufe ist die Fichtenverjüngung auf 1½ bis 2 Stunden und die Lärchenverjüngung auf 4 bis 6 Stunden potentielles Sonnenlicht angewiesen (Ott et al., 1997). Die Arve benötigt dagegen kein direktes Sonnenlicht (Gitz, 1997). Die steilen Hänge hatten aber mehr Kleinstrukturen als weniger geneigte Hänge. Vielfach wuchsen die Bäume an Geländekanten, an diesen sich weniger Schnee ablagert.

## 5.2.2 Schutzwirksamkeit der Bestände

### Bestandesdichte

Die Stammzahl der Durchmesserklasse „BHD  $\geq$  8 cm“ nahm in den 20 Jahren zu, variiert aber von Fläche zu Fläche sehr stark (Tab. 5). Dabei nahm die Stammzahl auf 18 der 23 Flächen zu, auf vier weiteren blieb sie unverändert und auf einer Fläche nahm die Stammzahl ab. In den Jahren 1986/90 betrug die minimale Stammzahl 14 Bäume/ha und im Jahr 2008 132 Bäume/ha. Erfreulicherweise nahm die Stammzahl auf Flächen, deren Stammzahl 1986/90 kleiner war als 100 Bäume/ha überall markant zu.

Bei Flächen, die einen Rückgang in der Durchmesserklasse „BHD  $\leq$  7 cm“ zu verzeichnen hatten, nahm dafür die Stammzahl/ha bei der grösseren Durchmesserklasse „BHD  $\geq$  8 cm“ zu. Somit hat sich ein Teil der im Jahr 1986/90 vorhandenen kleinen Bäume etabliert und wuchsen innert 20 Jahren zu Bäumen, die eine Schutzwirkung ausführen, heran. Damit hat sich die Schutzwirkung auf 22 Flächen von 23 verbessert.

Bei den meisten Aufnahmeflächen nahm die Schutzwirksamkeit zu, da sie innerhalb von 20 Jahren dichter wurden. Lardelli (2003) stellte zwischen den Jahren 1954 und 2000 in den Wäldern von Davos ebenfalls eine Waldverdichtung in höheren Lagen fest, dabei ging der Schlussgrad von aufgelösten in geräumige Strukturen über. Auch in anderen Regionen der Schweiz nahmen die Waldbestände auf potenziellen Lawinenanrissgebieten zu (Bebi et al., 2007). Bebi et al. (in revision) fügt aber an, dass Verdichtungen in Waldgrenzbeständen kleiner war als in tieferen Lagen.

50% der Aufnahmeflächen verfügten in den Jahren 1986/90 über schutzwirksame minimale Stammzahl (BHD  $\geq$  8 cm) von 154 Bäumen und im Jahr 2008 waren es 202 Bäume/ha (Tab. 5). Ohne die Interzeptionswirkung wären in einem 40° steilen Hang 1000 Stämme/ha notwendig, um eine Schutzwirkung wie im technischen Verbau zu erreichen (Salm, 1978). Dieser hohe Wert ist nahe an der Waldgrenze kaum zu erreichen und ist auch nicht notwendig, da die Interzeptionswirkung die Schneedecke, zusätzlich zur Stützwirkung der Stämme, stabilisiert (in der Gand, 1978). Dies ist auch bei statistischen Auswertungen von Pfister (1997) und Meyer-Grass & Schneebeli (1992) ersichtlich, dabei ist der Deckungsgrad ein wichtiger Bestandesparameter. Besonders immergrünen Baumarten, wie Fichten und Arven wird eine gute Interzeptionsleistung zugesprochen (in der Gand, 1978). Aber auch die Lärche beeinflusst die Schneedecke über die Stützwirkung hinaus, ihr Einfluss durch die Kronenprojektion wird häufig unterschätzt (Pfister, 1997; Schweizer et al., 1995). Analysen über die notwendigen Stammzahlen, welche die Interzeptionswirkungen berücksichtigen, geben unabhängig von Hangneigung wieder, dass bei weniger als 200 Bäumen/ha Lawinen losbrechen können (Meyer-Grass & Schneebeli, 1992). Dieser Wert wird auf den hier untersuchten Flächen in den Jahren 1986/90 bei weniger als 50% und im 2008 auf mehr als 50% der Flächen erreicht. Doch sind in den Jahren 1986/90 auf allen Flächen Lawinen angerissen, damit wird verdeutlicht, dass der Parameter Stammzahl/ha nicht allein entscheidend ist. Wird die Hangneigung mit einberechnet, müssten die Stammzahlen zwischen 250 und 550 Bäumen/ha liegen (Meyer-Grass & Schneebeli, 1992). Dabei ist

zu beachten, dass Meyer-Grass & Schneebeili (1992) die minimalen Stammzahlen für Bäume mit einem BHD ab 16 cm berechneten.

### **Verteilung der Einzelbäume**

Die Bäume auf den Flächen wuchsen mehrheitlich gruppiert und nicht regelmässig verteilt. Bei den bis anhin diskutierten Anforderung an Stammzahl/ha, wurde die Verteilung der Einzelbäume nicht berücksichtigt. Aber in Nadelwäldern kann eine Lawine schon bei einer Lückenbreite von mehr als 10 m anreissen (Pfister, 1997; Meyer-Grass & Schneebeili, 1992). Bei den Felderhebungen im Jahr 2008 konnte häufig eine Lückenbreite von mehr als 10 m beobachtet werden. Diese Beobachtung stimmt auch mit dem Deckungsgrad überein (Abb. 7).

Besonders die grossen Bäume wuchsen am Rand der Lawinenanrisszone von 1986/90, bei den kleineren Bäumen mit einer Höhe mit rund 9 m bestanden artspezifische Unterschiede. Bei den Felderhebungen beobachtete ich, dass Lärchen von rund 9 m Höhe auch auf Lücken wuchsen, meist wiesen sie auf Lücken einen Säbelwuchs auf. Fichten mit dieser Grösse wuchsen bevorzugt unter dem „Schirm“ von grossen Lärchen. Die späte Ausaperung auf offenen Flächen verhindert wahrscheinlich das Aufkommen der Fichtenverjüngung (S.15). Für die weniger Schneeschimmelanfälligen Lärchen ist das späte Ausapern weniger schwerwiegend.

### **Schutzwirksame Baumgrösse**

Bei den Untersuchungen der Stammzahl/ha wurde von einem schutzwirksamen BHD ab 8 cm ausgegangen, dieser Wert wird im NaiS erwähnt (Frehner et al., 2005). Bäume mit einem BHD von 8 cm waren im Jahr 2008 auf den Aufnahmeflächen zwischen 3 und 9 m hoch (Abb. 7). Damit ein Baum eine stabilisierende Wirkung auf die Schneedecke hat, sollte seine Höhe etwa 1.5- bis 2-mal höher sein als die Schneedecke (Frey, 1977; Saeki & Matsuoka, 1969). Im Waldlawinenprojekt wurden 1986/90 nach dem Lawinnenniedergang am Anriss Schneehöhen zwischen 1.2 und 1.7 m gemessen. Auch wenn es in den Jahren 1986/90 keine speziell schneereiche Winter waren (Meyer-Grass & Schneebeili, 1992), nehme ich diese Schneehöhen als Anhaltswerte für die weiteren Ausführungen, auch die durchschnittlichen Schneehöhen am Stillberg sind mit 1.46 m vergleichbar (Senn & Schönberger, 2001). Bei einer Schneehöhe von 1.7 m ist also ein schutzwirksamer Baum rund 4 m hoch. In der Gand et al. (1978) war nach Versuchen gar der Meinung, dass eine Baumhöhe, die dem extremen Schneewert entspricht, ausreicht. Doch durch das Schneekriechen an steilen Hängen ( $\geq 35^\circ$ ) kann auch ein Baum mit zweifacher Schneehöhe die Schneedecke nicht durchstossen (Saeki & Matsuoka, 1969). Wahrscheinlich besteht diese Möglichkeit besonders bei Arten mit einem flexiblen Stamm, wie Lärchen. Schon ihr häufig vorkommender Säbelwuchs verriet bei den Feldaufnahmen, dass sie sich jährlich unter der Schneelast abbiegen muss (Ott et al., 1997).

### Topografische Parameter

Die Bestände wurden vor allem auf Flächen mit Felsschutt und mit Strünken dichter (Abb. 19). Auf Flächen mit Schutt hat sich die Schutzwirksamkeit, besonders durch die Lärche und auf Flächen mit Baumstrünken durch Fichten, verbessert. Der Fichtenanstieg ist durch die grosse Dynamik auf Flächen mit Strünken zurückzuführen. Auf diesen Flächen liegen mehr Stämme auf dem Boden, die junge, bruchgefährdete Bäume vor Schneebewegungen schützen. Zudem starben in diesen Beständen mehr alte Bäume und stürzten vielfach zu Boden, so gab es mehr Licht für die darunter liegenden jungen Fichten. Die vorhandenen Baumstrünke waren stark verwittert und wurden vielfach nicht mehr als solche wahrgenommen. Die liegenden Baumstämme und Strünke erhöhen die Bodenrauhigkeit und stabilisieren die Schneedecke (Frey & Thee, 2003).

Auf steilem Gelände zwischen  $40^\circ$  und  $44^\circ$  nahm die Stammzahl der schutzwirksamen Bäume am meisten zu, dagegen nahmen die schutzwirksamen Bäume in steilsten Hängen ( $\geq 45^\circ$ ) markant ab. Auf diesen Hängen gingen Lärchen und die Fichten zurück und die Anzahl Arven blieb in etwa konstant (Abb. 22). In anderen Untersuchungen wurden auf einer Höhenlage zwischen 1400 und 2100 m ü. M. im Gelände zwischen  $20^\circ$  und  $40^\circ$  die grössten Waldausdehnungen beobachtet (Gellrich et al., 2007). Auf Flächen unter  $40^\circ$  gingen die Lärchen zurück und die Fichten nahmen im gleichen Mass zu. Im steilsten Gelände ( $\geq 45^\circ$ ) nahmen die schutzwirksamen Bäume zwar ab, aber es kamen mehr junge Bäume nach (Abb. 20). Es stellt sich die Frage, ob diese jungen Bäume das schutzfähige Alter je erreichen werden, da auf diesen Flächen sehr dynamische Bedingungen herrschen und mehr entwurzelte, gebrochene Bäume gefunden wurden.

Die Schutzwirksamkeit nahm in Muldenlagen weniger zu als auf gleichmässigen Hängen oder Rippenlagen (Abb. 23). Die geringe Verdichtung des Waldes in Muldenlagen ist auf die ungünstigen Wachstumsbedingungen zurückzuführen. Auffallend ist, dass nur die Stammzahl der Lärchen zunahm, diejenige von Arven und Fichten hat sich nicht verändert. In den spät ausapernden Muldenlagen ist das Befallsrisiko durch Schneepilze für immergrüne Nadelbäume grösser (Ott et al., 1997). Der Verjüngungszustand von Arven und Fichten in den Muldenlagen ist labil. Beispielsweise brach in Muldenlagen der Bestand kleiner Arven (BHD  $\leq 7$  cm) innerhalb der 20 Jahre zusammen. Dies kann auch ein Indiz für Schneeschimmelbefall sein.

Die Lawinenschutzwirksamkeit unterscheidet sich von der Stammzahl her nicht in Nord und Nordost Hängen. Bemerkenswert ist der starke Fichtenzuwachs in Nordost ausgerichteten Lagen. Der höhere Fichtenanteil wirkt sich günstig auf die Schneedecke aus (Meyer-Grass & Schneebeil, 1992).

### 5.3 Einschränkungen

Die vorliegende Untersuchung fand regional statt, alle Bestände verfügten über sehr ähnliche Klimabedingungen. Dies ermöglichte einerseits gute Vergleichbarkeit der Mikrohabitate, da keine regionalen Unterschiede, wie beispielsweise Klima und Geologie ausgeschaltet waren. Auf der anderen Seite sind die Resultate nur für eine kleine Region der Alpen repräsentativ. Ein weiterer Aspekt ist, dass die Aufnahmeflächen flächenmässig relativ klein waren und sich Fehler beim Aufnahmeverfahren stärker auswirken, weil ich die Stammzahl/ha hochrechnete. Ein weiterer Unsicherheitsfaktor ist, dass ich bei den Feldaufnahmen nicht exakt mit den gleichen Messinstrumenten die Daten erhob. Bei gewissen Bestandesparametern konnte auch nicht mehr genau nachvollzogen werden, mit welcher Methode die Daten erfasst wurden.

Viele ebenfalls für das Wachstum und die Verbreitung von Bäumen entscheidende Einflussfaktoren wurden nicht berücksichtigt. So schenkte ich beispielsweise folgenden Einflussfaktoren keine Beachtung: dem Einfluss der Wildtiere; vergangenen Bewirtschaftungsformen, wie Beweidung und Holznutzung; sowie Klimabedingungen, wie Schnee- und Niederschlagsmengen oder Spätfrosten. Im komplexen Gefüge von einer Fülle von Einflussfaktoren ist es schwer, die genaue Ursache einer Entwicklung zu eruieren.

## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Bestände wurden besonders an günstigen Standorten dichter, deshalb variierten die Stammzahlen von Fläche zu Fläche sehr stark. Das Wachstum und der Lebenszyklus der Bäume ist, im rauen Gebirgsklima unter anderem durch Wärmemangel, kurze Vegetationszeit, Schnee und Frost stark verlangsamt. Deshalb sind die Bäume auf günstige Standorte angewiesen. Ob ein Standort günstig oder ungünstig ist, hängt stark von topografischen Gegebenheiten ab. Die wärmeren, früher ausapernden Kleinstandorte mit weniger Vegetationskonkurrenz sind verantwortlich dafür, dass Bäume bevorzugt auf erhöhten Geländestrukturen wachsen. Besonders auf Flächen mit umgekippten Wurzeltellern, liegenden Stämmen und Baumstrünken wuchsen vermehrt junge Bäumen.

Die Schutzwirksamkeit hat zwischen den Jahren 1986/90 und 2008 zugenommen, weil die Bestände dichter wurden. Die Schutzwirksamkeit von Waldbeständen kann durch das Belassen von liegenden Stämmen, Wurzeltellern und Baumstrünken erhöht werden. Einerseits wird auf diese Weise die Bodenrauigkeit und somit die Stabilität der Schneedecke erhöht. Auf der anderen Seite sind dies günstige Standorte für Verjüngung.

Für die kleinräumige Analyse, der Entwicklung von subalpinen Gebirgswäldern, sind die verwendeten LiDAR-Daten nicht geeignet, weil die Entwicklung in den untersuchten Beständen meist kleinflächig war und nicht im Erfassungsbereich von LiDAR lag. Ein weiteres Problem ist, dass Verjüngung und kleine Bäume nicht gut erkannt und jene, die unter dem Schirm von grösseren Bäumen wuchsen, aus technischen Gründen nicht erkannt wurden. Auch für die Analyse von Einzelbäumen und für Berechnung der Stammzahlen sind die verwendeten Daten nicht geeignet. Die Punktdichte ist zu gering, um auf Einzelbäume zu schliessen. Jedoch wäre die Methode für grossflächige Bestandesanalysen und Volumenberechnungen geeignet (Mathys, 2005). Das Laserscanning wird noch stark weiter entwickelt und die Daten verbessern sich laufend.

Es stellt sich die Frage, wie sich die Bestände in Lawinenanrisszonen schweizweit entwickelten, und welche Unterschiede zu den Vergleichsflächen bestehen. Interessant wären schweizweite Auswertungen, die auf den Daten vom Waldlawinenprojekt von 1986/90 basieren. Somit könnten allgemeingültigere Erkenntnisse gewonnen werden. Es wäre auch aufschlussreich, wenn die Bestände in 20 Jahren nochmals untersucht werden könnten. Auf diesem Weg könnten weitere Fragen zu den topografischen Einflüssen und weiteren komplexen Zusammenhängen im Gebirgswald beantwortet werden.



## 7 Literaturverzeichnis

- Anon. (2005). Users Guide Vertex III and Transponder T3. Haglöf Sweden AB, Långsele.
- Anon. (2008). Wildzahlen 1990-2007, Amt für Jagd und Fischerei Graubünden, Chur, 06.2008.
- ArealstatistikSchweiz (2001). Bodennutzung im Wandel. Bundesamt für Statistik, Neuchatel, (pp.31).
- Artuso, R., Bovet, S., & Streilein, A. (2003). Practical methods for the verification of countrywide terrain and surface models. Swiss Federal Office of Topographie, CH-3084 Wabern, Switzerland.
- Bauer, A. & Paar, G. (2004). Monitoring von Schneehöhen mittels terrestrischem Laserscanner zur Risikoanalyse von Lawinen, 14th International Conference on Engineering Surveying, Zürich, 15. – 19. März 2004.
- Baur, P., Bebi, P., Gellrich, M., & Rutherford, G. (2006). WaSAlp – Waldausdehnung im Schweizer Alpenraum. Eine quantitative Analyse naturräumlicher und sozio-ökonomischer Ursachen unter besonderer Berücksichtigung des Agrarstrukturwandels. Schlussbericht. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf.
- Bebi, P. (2000). Erfassung von Strukturen im Gebirgswald als Beurteilungsgrundlage ausgewählter Waldwirkungen. PhD thesis, ETH Zürich.
- Bebi, P., Kienast, F., & Schoënenberger, W. (2001). Assessing structures in mountain forests as a basis for investigating the forests' dynamics and protective function. *Forest Ecology and Management*, 145, 3–14.
- Bebi, P., Kulakowski, D., & Rixen, C. (in revision). Snow avalanche disturbances in forest ecosystems - state of research and implications for management. *Forest Ecology and Management*.
- Brassel, P. & Brändli, U. B., Eds. (1999). Schweizerisches Landesforstinventar: Ergebnisse der Zweitaufnahme 1993-1995. Verlag Haupt, Bern.
- Brändli, U. B. (2000). Waldzunahme in der Schweiz – gestern und morgen. Technical report, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.
- Bösch, R., Ginzler, C., & Wang, Z. (2007). Von Decken und Lücken. LFI info, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, 8, 1–4.
- Chauvin, C., Renaud, J., & C., R. (1994). Stabilité et gestion des forets de protection, ONF-Bulletin Technique, 27,37-52.
- de Quervain (1978). Wald und Lawinen. In *Mountain Forests and Avalanches* (pp. 219–239). Davos: IUFRO Working Party Snow and Avalanches.
- de Quervain, M. (1968). Die Rolle des Waldes beim Lawinenschutz. Schweizerische Zeitschrift für

Forstwesen, 119, 393–399/1078.

de Quervain, M. & Meister, R. (1987). 50 years of snow profiles on the Weissfluhjoch and relations to the surrounding avalanche activity (1936/1937-1985/1986). In *Avalanche formation, movement and effects*, Davos, IAHS, volume 162 (pp. 161–181). Davos.

Focke, I. (2005). Geostatistik, interpolation in arcgis. Vorlesungsunterlage Universität Bonn, [www.ikg.uni-bonn.de/vorlesungsarchiv/Seminar\\_Geoinfo\\_2\\_3\\_Sem\\_ws\\_04\\_05/Folien/Geostatistik.ppt](http://www.ikg.uni-bonn.de/vorlesungsarchiv/Seminar_Geoinfo_2_3_Sem_ws_04_05/Folien/Geostatistik.ppt).

Frehner, M., Wasser, B., & Schwitter, R. (2005). Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion, Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.

Frey, W. (1977). Wechselseitige Beziehung zwischen Schnee und Pflanze - eine Zusammenstellung Anhand von Literatur. *Mitteilungen des Eidg. Institutes für Schnee- und Lawinenforschung*, 34.

Frey, W. & Thee, P. (2003). Analanche protection of winthrow areas: A ten year comparison of cleared and uncleared starting zones. *Forestest Snow and Lansdcape Research*, 1/2, 89–107.

Gellrich, M., Baur, P., Koch, B., & Zimmermann, N. E. (2007). Agricultural land abandonment and natural forest re-growth in the Swiss mountains: A spatially explicit economic analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 118, 93–108.

Ginzler, C. (2008). Leiter der Forschungsgruppe Mustererkennung und Fotogrammetrie der Forschungseinheit Landesressourcenbeurteilung, WSL, Birmensdorf (mündliche Mitteilung).

Gitz, D. (1997). Erhebung über Höhenwachstum der Arvenverjüngung in der Aufwuchsstufe in Beziehung zur Sonnenscheindauer on der obersubalpinen Stufe im Oberwallis. Master's thesis, ETH Zürich.

Hefti, R. (1986). Zustand und Gefärdung des Waldes. In O. Wildi & K. Ewaldh (Eds.), *Der Naturraum und dessen Nutzung im alpinen Tourismusgebiet von Davos, Ergebnisse des MAB-Projektes Davos*, number Bericht Nr. 289 (pp. 175–190):. Eidg. Anstalt für forstliche Versuchswesen, Birmensdorf Bosshard, W.

Heurich, M., Persson, ., Holmgren, J., & Kennel, E. (2002). Detecting and measuring individual trees with laser scanning in mixed mountain forest of central europe using an algorithm developed for swedish boreal forest conditions. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36, 307–312.

Heurich, M., Schneider, T., & Kennel, E. (2003). Laser scanning for identification of forest structure in the bavarian forest national park. european association of remote sensing laboratories, paris.

Hofgaard, A. (1993). Structure and regeneratio pattern in a virgin *Picea abies* forest in northern Sweden. *Journal of Vegetation Science*, 4, 601–608.

- Hollaus, M., Wagner, W., Eberhöfer, C., & Karel, W. (2006). Accuracy of large-scale canopy heights derived from lidar data under operational constraints in a complex alpine environment. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 60, 323–338.
- Horak, G. (2004). Growth, survival and stem damages of planted larch and stone pine in an avalanche release area at timberline in Dischmatal. Master's thesis, Universität Zürich.
- Imbeck, H. (1987). Schneeprofile im Wald. Schnee und Lawinen in den Schweizer Alpen Winter 1985/86. Winterbericht des Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, 50, 177–183.
- in der Gand, H. (1968). Aufforstungsversuche an einem Gleitschneehang; Ergebnisse der Winteruntersuchung 1955/56 bis 1961/62. Mitteilung schweizerische Anstalt forstlicher Versuchswesen, 44, 233–326.
- in der Gand, H. (1978). Verteilung und Sturktur der Schneedecke unter Waldbäumen und im Hochwald. In *Mountain Forests and Avalanches* (pp. 97–119). Davos: IUFRO Working Party Snow and Avalanches.
- Jean-Francois, André, J., Zackrisson, O., & Bernier, N. (1998). The Forest Regeneration Puzzle. Biological mechanisms in hums layer and forest vegetation dynamics. *Bio Science*, 47(7), 523–530.
- Keller, M., Ed. (2005). Schweizerisches Landesforstinventar. Anleitung für die Feldaufnahmen der Erhebung 2004–2007. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.
- Köhler, W., Schachtel, G., & Voleske, P. (2007). *Biostatistik: Eine Einführung für Biologen und Agrarwissenschaftler*. Springer, Berlin/ Heidelberg.
- Krumm, F. (2004). Einfluss von extremen Warmjahren auf das Dickenwachstum von Lärchen (*Larix decidua* Mill.) und Arven (*Pinus cembra* L.) an der alpinen Waldgrenze. Master's thesis, Universität Feiburg i. Breisgau, Institut für Waldwachstum (IWW).
- Lardelli, C. (2003). Dynamik und Stabilität von Lawinenschutzwäldern: Eine Luftbild- und GIS-gestützte Analyse. Master's thesis, Geographisches Institut, Universität Zürich.
- Lauber, K. & Wagner, G. (2001). *Flora Helvetica*. Haupt.
- Leibundgut, H. (1959). Über Zweck und Methodik der Struktur- und Zuwachsanalyse von Urwäldern. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 110, 111–124.
- LFI3 (2007). Erste Ergebnisse des dritten Landesforstinventars LFI3. Wissenschaftliche Fakten zur Medienkonferenz WSL/BAFU vom 9. November 2007 in Bern. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.
- Lüscher, F. (1990). Untersuchungen zur Höhenentwicklung der Fichtennaturverjüngung im inneralpinen Gebirgswald. PhD thesis, ETH Zürich.
- Maier, B. & Hollaus, M. (2006). Laserscanning - ein Wald aus Punkten. *Bündner Wald*, 3, 47–53.
- Maier, B., Tiede, D., & Dorren, L. (2008). Characterising Mountain Forest Structure using Landscape metrics on LiDAR-based Canopy Surface Models. In *Object-Based Image Analysis*, chapter 7.2, (pp. 625–643). Verlag Springer, Berlin/ Heidelberg.

- Margreth, S. (2004). Die Wirkung des Waldes bei Lawinen. Forum für Wissen, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, (pp. 21–26).
- Mathys, L. (2005). Erfassung von Waldlücken mittels Laserscanning. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 156, 10, 372–377.
- McClung, D. & Schaerer, P. (2006). The Avalanche Handbook. The Mountaineers Books, 3 edition.
- MeteoSchweiz (2005). Normwert-Tabellen 1961-1990. Schweizerische Eidgenossenschaft, Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, Zürich.
- Meyer-Grass, M. (1991). Einfluss der Bestandesmerkmale sowie der Standortgegebenheiten auf einen möglichen Lawinenanriss im Wald. In Forschungsprojekt "Waldlawinen" Schlussbericht, Interner Schlussbericht Nr. 665, WSL - Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos Dorf.
- Meyer-Grass, M. & Schneebeili, M. (1992). Die Abhängigkeit der Waldlawinen von Standorts-, Bestandes- und Schneeverhältnissen. In Internationales Symposium INTERPRAEVENT, Tagungspublikation, Band 2 (pp. 443–455).
- Miller, D. H. (1964). Interception processes during snow storms. US Forest Service Research Paper PSW, 18, 18–24.
- Miller, D. H. (1966). Transport of intercepted snow from trees during snow storms. US Forest Service Research Paper PSW, 33, 30.
- Morsdorf, F., Meier, E., Kötz, B., Itten, K. I., Dobbertin, M., & Allgöwer, B. (2004). Lidar-based geometric reconstruction of boreal type forest stands at single tree level for forest and wildland fire management. Remote Sensing of Environment, 92, 353–362.
- Mürset, U. (2006). Statistik. Unterrichtsunterlagen ZHAW, Kapitel 1 (unveröffentlicht).
- Munter, W. (2003). 3 x 3 Lawinen: Risikomanagement im Wintersport. Garmisch-Partenkirchen: Pohl & Schellhammer, vivalpin edition.
- Nierhaus-Wunderwald, D. (2002). Rostpilze an Fichten. Merkblatt für die Praxis.
- Oliver, C. & Larson, B. (1996). Forest StandDynamics. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Ott, E., Frehner, M., Frey, H. U., & Lüscher, P. (1997). Gebirgsnadelwälder: Ein praxisorientierter Leitfaden für eine standortgerechte Waldbehandlung. Haupt.
- Pfister, R. (1997). Modellierung von Lawinenanrissen im Wald. Nachdiplomkurs in Angewandter Statistik, ETH Zürich, Davos.
- Saeki, M. & Matsuoka, H. (1969). Snow-buried young forest trees growing on steep slopes. Seppyo; Jap. Soc. Snow and Ice, 31, 19–23.
- Salm, B. (1978). Snow forces on forest plants. In Mountain Forests and Avalanches (pp. 157–181). Davos: IUFRO Working Party Snow and Avalanches.
- Schütt, P., Weisgerber, G., Schuck, H. J., Lang, K. J., & Roloff, A., Eds. (2004). Lexikon der Nadelbäume. Nikol Verlagsgesellschaft, Hamburg.

Schweingruber, F. H. (1996). *Tree Rings and Environment Dendroecology*. Verlag Haupt, Bern.

Schweizer, J., Schneebeli, M., Fierz, C., & Föhn, P. M. B. (1995). Snow mechanics and avalanches formation: Field experiments on the dynamic response of the snow cover. *Surveys in Geophysics*, 16, 621–633.

Schwerdtfeger, F. (1981). *Die Waldkrankheiten, Ein Lehrbuch der Forstpathologie und des Forstschutzes*. Parey, 4. edition.

Senn, J. & Schönberger, W. (2001). Zwanzig Jahre Versuchsaufforstung Stillberg: Überleben und Wachstum einer subalpinen Aufforstung in Abhängigkeit vom Standort. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 152, 226–246.

SLF, Ed. (2000). *Der Lawinenwinter 1999. Ereignisanalyse*. Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos.

Stöckli, V. (2002). Die Bedeutung der winterlichen Schneedecke für junge Fichten im Gebirgswald: Ergebnisse aus dem Lusiwald bei Davos. *Bauhinia*, 16, 23–32.

Swisstopo (2007). *geodata-news 14. Oktober 2007*, Bundesamt für Landestopografie swisstopo.

Wipf, S. (2006). *Winter Climate Change in Tundra Ecosystems: The Importance of Snow Cover*. PhD thesis, Universität Zürich.

Zingg, A. (1988). *Schweizerisches Landesforstinventar. Anleitung für die Erstaufnahmen*, chapter Anleitung für die Feldaufnahmen, (pp. 5–117). Eidg. Anstalt für forstlicher Versuchswesen, Bericht, 304.

Zingg, T. (1961). Beitrag zum Klima von Weisfluhjoch. Winterbericht des Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, 24, 102–107.





## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Schneeablagerung im Wald; Aus (Frehner et al., 2005) nach Meyer 1987 und Cemagref.....	18
Abb. 2: Das Landwassertal mit der städtischen Siedlung Davos, die drei Seitentäler Flüela-, Dischma- und Sertigtal (grau beschriftet) und die Lage der Untersuchungsgebiete Äbiwald Flüela, Mattawald und Äbiwald Sertig (orange gekennzeichnet); swissimage© 2008 swisstopo (DV 033594).....	19
Abb. 3: Untersuchungsflächen im Äbiwald Flüela; swissimage© 2008 swisstopo (DV 033594).....	21
Abb. 4: Untersuchungsflächen im Mattawald; swissimage© 2008 swisstopo (DV 033594).....	21
Abb. 5: Untersuchungsflächen im Äbiwald Sertig; swissimage© 2008 swisstopo (DV 033594).....	22
Abb. 6: Schematischer Ablauf von den Analysen der Felddaten. ....	30
Abb. 7: Vergleich von „Deckungsgrad LiDAR“ und dem „Deckungsgrad Luftbild“ (a) bzw. mit dem „Deckungsgrad 1986/90“ (b). Beim Vergleich Deckungsgrad 1986/90 mit dem Deckungsgrad LiDAR (b) wurden drei Aufnahme­flächen mit grossen Veränderungen nicht berücksichtigt. ....	31
Abb. 8: Vergleich der „Baumhöhe LiDAR“ mit gemessenen und interpolierten Baumhöhen, unterteilt nach winterkahlen (a) und immergrünen (b) Baumarten. Bäume unter dem Schirm von grösseren Bäumen sind aufgeführt (204 winterkahle, 76 immergrüne Bäume). ....	32
Abb. 9: Vergleich der „Baumhöhe LiDAR“ mit gemessenen und interpolierten Baumhöhen, unterteilt nach winterkahlen (a) und immergrünen (b) Baumarten. Bäume unter dem Schirm von grösseren Bäumen sind nicht aufgeführt (192 winterkahle, 61 immergrüne Bäume). ....	33
Abb. 10a-b: Abweichung der „Baumhöhe LiDAR“ von der gemessenen und interpolierten Höhe unterschieden nach wintergrünen und winterkahlen Baumarten (a) bzw. nach Baumhöhe < 10 m und > 10 m (b). Abweichung Baumhöhe LiDAR < 0 bedeutet, dass die Laserscanning-Baumhöhe kleiner war wie die reale Höhe. ....	34
Abb. 11: Vergleich von Baumhöhen mit BHD von Lärchen (Lä), Fichten (Fi) und Arven (Av) im 1986/90 und 2008. ....	35
Abb. 12: Entwicklung der verschiedenen Durchmesser­klassen zwischen 1986/90 und 2008 auf den 23 Aufnahme­flächen (9 Äbiwald Flüela, 6 Äbiwald Sertig, 8 Mattawald). (Mediane und Standardabweichung).....	36
Abb. 13: Entwicklung der Artenzusammensetzung in der Verjüngung zwischen 2008 und 1986/90. .	38
Abb. 14: Entwicklung der Artenzusammensetzung in der Durchmesser­klasse „BHD < 4 cm“ zwischen 2008 und 1986/90. ....	38
Abb. 15: Entwicklung der Artenzusammensetzung in der Durchmesser­klasse „BHD 4-7 cm“ zwischen 2008 und 1986/90. ....	39

Abb. 16: Entwicklung der Artenzusammensetzung in der Durchmesserklasse „BHD 8-15 cm“ zwischen 2008 und 1986/90.....	39
Abb. 17: Entwicklung der Artenzusammensetzung in der Durchmesserklasse „BHD $\geq$ 16 cm“ zwischen 2008 und 1986/90.....	39
Abb. 18: Entwicklung von Lärchen (Lä), Fichten (Fi) und Arven (Av) mit BHD $\leq$ 7 cm auf verschiedenen Arten von Bodenrauigkeiten im 1986/90 (schwarz) und 2008 (grau). (Mediane und Standardabweichungen) .....	40
Abb. 19: Entwicklung von Lärchen (Lä), Fichten (Fi) und Arven (Av) mit BHD $\geq$ 8 cm auf verschiedenen Arten von Bodenrauigkeiten im 1986/90 (schwarz) und 2008 (grau). (Mediane und Standardabweichungen) .....	41
Abb. 20: Verteilung von Lärchen (a), Fichten (b) und Arven (c) mit einem BHD $\leq$ 7 cm auf unterschiedlich geneigtem Gelände im 1986/90 (schwarz) und 2008 (grau). Die Neigungsklassen sind: $\leq$ 39°, 40°-44° und $\geq$ 45° (Mediane und Standardabweichungen) .....	43
Abb. 21: Veränderung des Arteneinteils von Lärchen (Lä), Fichten (Fi) und Arven (Av) mit einem BHD von $\leq$ 7cm. Die Neigungsklassen sind: $\leq$ 39°, 40°-44° und $\geq$ 45° .....	43
Abb. 22: Verteilung von Lärchen (Lä), Fichten (Fi) und Arven (Av) mit einem BHD $\geq$ 8 cm bei verschiedenen Hangneigungen im 1986/90 (schwarz) und 2008 (grau). Die Neigungsklassen sind: $\leq$ 39°, 40°-44° und $\geq$ 45° (Mediane und Standardabweichungen) .....	44
Abb. 23: Einfluss der Geländeform auf die „BHD $\leq$ 7 cm“ (a) und „BHD $\geq$ 8 cm“ (b) (schwarz) und 2008 (grau). .....	45
Abb. 24: Einfluss der Exposition auf die Durchmesserklassen „BHD $\leq$ 7 cm“ (a) und „BHD $\geq$ 8 cm“ (b) 1986/90 (schwarz) und 2008 (grau). .....	46
Abb. 25: Vergleich von Vegetationsmodell (links) und Luftbild (rechts); DTM-AV DOM-AV © 2008 Eidg. Vermessungsdirektion (DV033531), swissimage © 2008 swisstopo (DV 033594) .....	47
Abb. 26: Messfehler auf dem DOM bei Hang abwärts hängenden Bäumen im steilen Gelände. ....	48
Abb. 27: Messfehler bei der Baumhöhenmessung mit dem Vertex III, aus Keller M. 2005.....	49
Abb. 28a-b: Messfehler auf dem DOM bei unterschiedlichen Kronenformen (a) und bei Hang aufwärts hängenden Bäumen im steilen Gelände (b).....	49
Abb. 29: Arvenverjüngung auf mit Moos überwachsenem Stein. ....	54

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Verwendete Geodaten .....	25
Tab. 2: Befliegungsdaten von DOM-AV und DTM-AV .....	25
Tab. 3: Unterteilung der topografischen Parameter. ....	29
Tab. 4: Unterschiede zwischen „Baumhöhe LiDAR“ und gemessener und interpolierter Baumhöhe in m.....	34
Tab. 5: Stammzahl/ha von Bäumen mit BHD $\leq 7$ cm und im BHD $\geq 8$ cm 1986/90 und 2008 .....	35
Tab. 6: Entwicklung von verschiedenen Durchmesserklassen zwischen 1986/90 und 2008. Ergebnisse des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests: Signifikante Unterschiede zwischen 1986/90 und 2008 ( $p < 0.05$ ) sind fett dargestellt. ....	37
Tab. 7: Vergleich der Durchmesserklassen der gesamten Stammzahl/ha in Abhängigkeit der Geländeneigung. Mit ■ gekennzeichnet sind jene Hänge, die die grösste Stammzahl pro ha in beiden Untersuchungsperioden hatten. Die mit □ symbolisierten kennzeichnen die höchsten Stammzahlen/ha jeweils in den Jahren 2008 und 1986/90.....	42

- [Anon., 2005] Anon. (2005). *Users Guide Vertex III and Transponder T3*. Haglöf Sweden AB, Långsele.
- [Anon., 2008] Anon. (2008). *Wildzahlen 1990-2007*, Amt für Jagd und Fischerei Graubünden, Chur, 06.2008.
- [ArealstatistikSchweiz, 2001] ArealstatistikSchweiz (2001). *Bodennutzung im Wandel*. Bundesamt für Statistik, Neuchatel, (pp.31).
- [Artuso et al., 2003] Artuso, R., Bovet, S., & Streilein, A. (2003). Practical methods for the verification of countrywide terrain and surface models. *Swiss Federal Office of Topographie, CH-3084 Wabern, Switzerland*.
- [Bauer & Paar, 2004] Bauer, A. & Paar, G. (2004). Monitoring von Schneehöhen mittels terrestrischem Laserscanner zur Risikoanalyse von Lawinen, 14th International Conference on Engineering Surveying, Zürich, 15. – 19. März 2004.
- [Baur et al., 2006] Baur, P., Bebi, P., Gellrich, M., & Rutherford, G. (2006). *WaSAlp – Waldausdehnung im Schweizer Alpenraum. Eine quantitative Analyse naturräumlicher und sozio-ökonomischer Ursachen unter besonderer Berücksichtigung des Agrarstrukturwandels*. Schlussbericht. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf.
- [Bebi, 2000] Bebi, P. (2000). *Erfassung von Strukturen im Gebirgswald als Beurteilungsgrundlage ausgewählter Waldwirkungen*. PhD thesis, ETH Zürich.
- [Bebi et al., 2001] Bebi, P., Kienast, F., & Schoenenberger, W. (2001). Assessing structures in mountain forests as a basis for investigating the forests' dynamics and protective function. *Forest Ecology and Management*, 145, 3–14.
- [Bebi et al., sion] Bebi, P., Kulakowski, D., & Rixen, C. (inrevision). Snow avalanche disturbances in forest ecosystems - state of research and implications for management. *Forest Ecology and Management*.
- [Brassel & Brändli, 1999] Brassel, P. & Brändli, U. B., Eds. (1999). *Schweizerisches Landesforstinventar: Ergebnisse der Zweitaufnahme 1993-1995*. Verlag Haupt, Bern.
- [Brändli, 2000] Brändli, U. B. (2000). *Waldzunahme in der Schweiz – gestern und morgen*. Technical report, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.
- [Bösch et al., 2007] Bösch, R., Ginzler, C., & Wang, Z. (2007). Von Decken und Lücken. *LFI info, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf*, 8, 1–4.
- [Chauvin et al., 1994] Chauvin, C., Renaud, J., & C., R. (1994). Stabilité et gestion des forets de protection, *ONF-Bulletin Technique*, 27,37-52.
- [de Quervain, 1978] de Quervain (1978). Wald und Lawinen. In *Mountain Forests and Avalanches* (pp. 219–239). Davos: IUFRO Working Party Snow and Avalanches.

- [de Quervain, 1968] de Quervain, M. (1968). Die Rolle des Waldes beim Lawinenschutz. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 119, 393–399/1078.
- [de Quervain & Meister, 1987] de Quervain, M. & Meister, R. (1987). 50 years of snow profiles on the Weissfluhjoch and relations to the surrounding avalanche activity (1936/1937-1985/1986). In *Avalanche formation, movement and effects, Davos, IAHS*, volume 162 (pp. 161–181). Davos.
- [Focke, 2005] Focke, I. (2005). Geostatistik, interpolation in arcgis. Vorlesungsunterlage Universität Bonn, [www.ikg.uni-bonn.de/vorlesungsarchiv/Seminar\\_Geoinfo\\_2\\_3\\_Sem\\_ws\\_04\\_05/Folien/Geostatistik.ppt](http://www.ikg.uni-bonn.de/vorlesungsarchiv/Seminar_Geoinfo_2_3_Sem_ws_04_05/Folien/Geostatistik.ppt).
- [Frehner et al., 2005] Frehner, M., Wasser, B., & Schwitter, R. (2005). *Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion, Vollzug Umwelt*. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- [Frey, 1977] Frey, W. (1977). Wechselseitige Beziehung zwischen Schnee und Pflanze - eine Zusammenstellung Anhand von Literatur. *Mitteilungen des Eidg. Institutes für Schnee- und Lawinenforschung*, 34.
- [Frey & Thee, 2003] Frey, W. & Thee, P. (2003). Analanche protection of winthrow areas: A ten year comparison of cleared and uncleared starting zones. *Forest Snow and Landscape Research*, 1/2, 89–107.
- [Gellrich et al., 2007] Gellrich, M., Baur, P., Koch, B., & Zimmermann, N. E. (2007). Agricultural land abandonment and natural forest re-growth in the Swiss mountains: A spatially explicit economic analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 118, 93–108.
- [Gitz, 1997] Gitz, D. (1997). Erhebung über Höhenwachstum der Arvenverjüngung in der Aufwuchsstufe in Beziehung zur Sonnenscheindauer on der obersubalpinen Stufe im Oberwallis. Master's thesis, ETH Zürich.
- [Hefti, 1986] Hefti, R. (1986). Zustand und Gefärdung des Waldes. In O. Wildi & K. Ewaldh (Eds.), *Der Naturraum und dessen Nutzung im alpinen Tourismusgebiet von Davos, Ergebnisse des MAB-Projektes Davos*, number Bericht Nr. 289 (pp. 175–190).: Eidg. Anstalt für forstliche Versuchswesen, Birmensdorf Bosshard, W.
- [Heurich et al., 2002] Heurich, M., Persson, ., Holmgren, J., & Kennel, E. (2002). Detecting and measuring individual trees with laser scanning in mixed mountain forest of central europe using an algorithm developed for swedish boreal forest conditions. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36, 307–312.
- [Heurich et al., 2003] Heurich, M., Schneider, T., & Kennel, E. (2003). Laser scanning for identification of forest structure in the bavarian forest national park. european association of remote sensing laboratories, paris.
- [Hofgaard, 1993] Hofgaard, A. (1993). Structure and regeneratio pattern in a virgin Picea abies forest in northern Sweden. *Journal of Vegetation Science*, 4, 601–608.

- [Hollaus et al., 2006] Hollaus, M., Wagner, W., Eberhöfer, C., & Karel, W. (2006). Accuracy of large-scale canopy heights derived from lidar data under operational constraints in a complex alpine environment. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 60, 323–338.
- [Horak, 2004] Horak, G. (2004). Growth, survival and stem damages of planted larch and stone pine in an avalanche release area at timberline in Dischmatal. Master's thesis, Universität Zürich.
- [Imbeck, 1987] Imbeck, H. (1987). Schneeprofile im Wald. Schnee und Lawinen in den Schweizer Alpen Winter 1985/86. *Winterbericht des Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung*, 50, 177–183.
- [in der Gand, 1968] in der Gand, H. (1968). Aufforstungsversuche an einem Gleitschneehang; Ergebnisse der Winteruntersuchung 1955/56 bis 1961/62. *Mitteilung schweizerische Anstalt forstlicher Versuchswesen*, 44, 233–326.
- [in der Gand, 1978] in der Gand, H. (1978). Verteilung und Struktur der Schneedecke unter Waldbäumen und im Hochwald. In *Mountain Forests and Avalanches* (pp. 97–119). Davos: IUFRO Working Party Snow and Avalanches.
- [Jean-Francois et al., 1998] Jean-Francois, André, J., Zackrisson, O., & Bernier, N. (1998). The Forest Regeneration Puzzle. Biological mechanisms in hums layer and forest vegetation dynamics. *Bio Science*, 47(7), 523–530.
- [Keller, 2005] Keller, M., Ed. (2005). *Schweizerisches Landesforstinventar. Anleitung für die Feldaufnahmen der Erhebung 2004–2007*. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.
- [Köhler et al., 2007] Köhler, W., Schachtel, G., & Voleske, P. (2007). *Biostatistik: Eine Einführung für Biologen und Agrarwissenschaftler*. Springer, Berlin/ Heidelberg.
- [Krumm, 2004] Krumm, F. (2004). Einfluss von extremen Warmjahren auf das Dickenwachstum von Lärchen (*Larix decidua* Mill.) und Arven (*Pinus cembra* L.) an der alpinen Waldgrenze. Master's thesis, Universität Feiburg i. Breisgau, Institut für Waldwachstum (IWW).
- [Lardelli, 2003] Lardelli, C. (2003). Dynamik und Stabilität von Lawinenschutzwäldern: Eine Luftbild- und GIS- gestützte Analyse. Master's thesis, Geographisches Institut, Universität Zürich.
- [Lauber & Wagner, 2001] Lauber, K. & Wagner, G. (2001). *Flora Helvetica*. Haupt.
- [Leibundgut, 1959] Leibundgut, H. (1959). Über Zweck und Methodik der Struktur- und Zuwachsanalyse von Urwäldern. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 110, 111–124.
- [LFI3, 2007] LFI3 (2007). Erste Ergebnisse des dritten Landesforstinventars LFI3. Wissenschaftliche Fakten zur Medienkonferenz WSL/BAFU vom 9. November 2007 in Bern. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.
- [Lüscher, 1990] Lüscher, F. (1990). *Untersuchungen zur Höhenentwicklung der Fichtennaturverjüngung im inneralpiner Gebirgswald*. PhD thesis, ETH Zürich.
- [Maier & Hollaus, 2006] Maier, B. & Hollaus, M. (2006). Laserscanning - ein Wald aus Punkten. *Bündner Wald*, 3, 47–53.

- [Maier et al., 2008] Maier, B., Tiede, D., & Dorren, L. (2008). *Characterising Mountain Forest Structure using Landscape metrics on LiDAR-based Canopy Surface Models*. In *Object-Based Image Analysis*, chapter 7.2, (pp. 625–643). Verlag Springer, Berlin/ Heidelberg.
- [Margreth, 2004] Margreth, S. (2004). Die Wirkung des Waldes bei Lawinen. *Forum für Wissen, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf*, (pp. 21–26).
- [Mathys, 2005] Mathys, L. (2005). Erfassung von Waldlücken mittels Laserscanning. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 156, 10, 372–377.
- [McClung & Schaerer, 2006] McClung, D. & Schaerer, P. (2006). *The Avalanche Handbook*. The Mountaineers Books, 3 edition.
- [MeteoSchweiz, 2005] MeteoSchweiz (2005). Normwert-Tabellen 1961-1990. Schweizerische Eidgenossenschaft, Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, Zürich.
- [Meyer-Grass, 1991] Meyer-Grass, M. (1991). Einfluss der Bestandesmerkmale sowie der Standortgegebenheiten auf einen möglichen Lawinenanriss im Wald. In *Forschungsprojekt "Waldlawinen" Schlussbericht, Interner Schlussbericht Nr. 665, WSL - Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos Dorf*.
- [Meyer-Grass & Schneebeli, 1992] Meyer-Grass, M. & Schneebeli, M. (1992). Die Abhängigkeit der Waldlawinen von Standorts-, Bestandes- und Schneebedingungen. In *Internationales Symposium INTERPRAEVENT, Tagungspublikation, Band 2* (pp. 443–455).
- [Miller, 1964] Miller, D. H. (1964). Interception processes during snow storms. *US Forest Service Research Paper PSW*, 18, 18–24.
- [Miller, 1966] Miller, D. H. (1966). Transport of intercepted snow from trees during snow storms. *US Forest Service Research Paper PSW*, 33, 30.
- [Morsdorf et al., 2004] Morsdorf, F., Meier, E., Kötz, B., Itten, K. I., Dobbertin, M., & Allgöwer, B. (2004). Lidar-based geometric reconstruction of boreal type forest stands at single tree level for forest and wildland fire management. *Remote Sensing of Environment*, 92, 353–362.
- [Mürset, 2006] Mürset, U. (2006). Statistik. Unterrichtsunterlagen ZHAW, Kapitel 1 (unveröffentlicht).
- [Munter, 2003] Munter, W. (2003). *3 x 3 Lawinen: Risikomanagement im Wintersport*. Garmisch-Partenkirchen: Pohl & Schellhammer, vivalpin edition.
- [Nierhaus-Wunderwald, 2002] Nierhaus-Wunderwald, D. (2002). Rostpilze an Fichten. *Merkblatt für die Praxis*.
- [Oliver & Larson, 1996] Oliver, C. & Larson, B. (1996). *Forest StandDynamics*. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- [Ott et al., 1997] Ott, E., Frehner, M., Frey, H. U., & Lüscher, P. (1997). *Gebirgsnadelwälder: Ein praxisorientierter Leitfaden für eine standortgerechte Waldbehandlung*. Haupt.
- [Pfister, 1997] Pfister, R. (1997). Modellierung von Lawinenanrissen im Wald. Nachdiplomkurs in Angewandter Statistik, ETH Zürich, Davos.

- [Saeki & Matsuoka, 1969] Saeki, M. & Matsuoka, H. (1969). Snow-buried young forest trees growing on steep slopes. *Seppyo; Jap. Soc. Snow and Ice*, 31, 19–23.
- [Salm, 1978] Salm, B. (1978). Snow forces on forest plants. In *Mountain Forests and Avalanches* (pp. 157–181). Davos: IUFRO Working Party Snow and Avalanches.
- [Schütt et al., 2004] Schütt, P., Weisgerber, G., Schuck, H. J., Lang, K. J., & Roloff, A., Eds. (2004). *Lexikon der Nadelbäume*. Nikol Verlagsgesellschaft, Hamburg.
- [Schweingruber, 1996] Schweingruber, F. H. (1996). *Tree Rings and Environment Dendroecology*. Verlag Haupt, Bern.
- [Schweizer et al., 1995] Schweizer, J., Schneebeli, M., Fierz, C., & Föhn, P. M. B. (1995). Snow mechanics and avalanches formation: Field experiments on the dynamic response of the snow cover. *Surveys in Geophysics*, 16, 621–633.
- [Schwerdtfeger, 1981] Schwerdtfeger, F. (1981). *Die Waldkrankheiten, Ein Lehrbuch der Forstpathologie und des Forstschutzes*. Parey, 4. edition.
- [Senn & Schönberger, 2001] Senn, J. & Schönberger, W. (2001). Zwanzig Jahre Versuchsaufforstung Stillberg: Überleben und Wachstum einer subalpinen Aufforstung in Abhängigkeit vom Standort. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 152, 226–246.
- [SLF, 2000] SLF, Ed. (2000). *Der Lawinenwinter 1999. Ereignisanalyse*. Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos.
- [Stöckli, 2002] Stöckli, V. (2002). Die Bedeutung der winterlichen Schneedecke für junge Fichten im Gebirgswald: Ergebnisse aus dem Lusiwald bei Davos. *Bauhinia*, 16, 23–32.
- [Swisstopo, 2007] Swisstopo (2007). geodata-news 14. Oktober 2007, Bundesamt für Landestopografie swisstopo.
- [Wipf, 2006] Wipf, S. (2006). *Winter Climate Change in Tundra Ecosystems: The Importance of Snow Cover*. PhD thesis, Universität Zürich.
- [Zingg, 1988] Zingg, A. (1988). *Schweizerisches Landesforstinventar. Anleitung für die Erstaufnahmen*, chapter Anleitung für die Feldaufnahmen, (pp. 5–117). Eidg. Anstalt für forstlicher Versuchswesen, Bericht, 304.
- [Zingg, 1961] Zingg, T. (1961). Beitrag zum Klima von Weisfluhjoch. *Winterbericht des Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung*, 24, 102–107.