



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich



WSL-Institut für Schnee-  
und Lawinenforschung SLF

# Lawinenschutzwirksamkeit der Hochlagenaufforstung Stillberg

---

Einfluss von Lawinenverbauungen auf das Wachstum und  
Überleben von Bäumen an der alpinen Waldgrenze

Masterarbeit  
Mai 2011

Autor:

Men Dellagiovanna

Studiengang Umweltnaturwissenschaften  
Master of Forest- and Landscapemanagement  
ETH Zürich

Betreuer:

Dr. Peter Bebi

WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF), Davos

Dr. Monika Frehner

Gruppe Waldmanagement - Waldbau, Institut für Terrestrische Ökosysteme, ETH Zürich

## Zusammenfassung

Die zunehmend dichte Besiedlung des Alpenraums in den letzten Jahrhunderten machte den Schutz vor Naturgefahren zu einem immer wichtiger werdenden Bedürfnis der Bevölkerung. Im Rahmen des in den fünfziger Jahren lancierten „Gebirgsprogramms“ sollen die anthropogen bedingten Waldgrenzenverschiebungen nach unten in Lawinenanrissgebieten rückgängig gemacht und, durch konsequentes Wiederaufforsten von steilen Hängen, das Anreissen von Lawinen verhindert werden. Kritische Umweltfaktoren, welche in grossen Höhenlagen das Baumwachstum kontrollieren, machen jedoch besonders das Aufforsten von Flächen nahe an der oberen Baumgrenze zu einem schwierigen Unterfangen. Häufig werden temporäre Lawinenverbauungen mit einer Standdauer von ca. 25 - 40 Jahren errichtet, um die Pflanzen vor Schäden durch Schneebewegungen und Lawinen zu schützen. Die Schutzwirkung der Werke muss allerdings solange gewährleistet sein, bis der heranwachsende Wald die Schutzfunktion selbst übernehmen kann.

In der 5 ha grossen Versuchsaufforstung „Stillberg“ in Davos wurden im Jahr 1975 je 30'000 Arven, Bergföhren und Lärchen in einem regelmässigen Muster gepflanzt, über 400 Schneepegel gesetzt und auf einer Teilfläche temporäre Holzrechen erstellt. Seit nunmehr über 35 Jahren wird die Entwicklung der Bäume hinsichtlich ihrer Mortalität und Baumhöhen in Abhängigkeit von verschiedensten kleinstandörtlichen Bedingungen erforscht.

Die vorliegende Studie untersucht den Einfluss von temporären Lawinenverbauungen auf das Wachstum und das Überleben der drei Baumarten auf dem Stillberg mit Hilfe des einmaligen Datensatzes der Hochlagenaufforstung und eigens durchgeführten Aufnahmen von Baumhöhen, Stammdurchmessern und Mortalitätsraten innerhalb einer ausgewählten Stichprobe. Die Daten wurden mit statistischen Varianzanalysen auf Unterschiede zwischen dem nicht verbauten und verbauten Aufforstungsteil für verschiedene Höhenlagen getestet und ausgewertet. Weiter wurden die Schutzwirksamkeit der Aufforstung gegen Lawinenanrisse, für extreme Schneehöhen und für durchschnittliche Winter, beurteilt und räumliche Unterschiede innerhalb der Fläche aufgezeigt. Das Kriterium war dabei, dass die Baumhöhen die maximale Schneehöhe um mindestens das Eineinhalbfache bis Doppelte überragen und genügend schutzwirksame Bäume vorhanden sind, um potentiell

schutzwirksame Rotten zu bilden. Weiter wurde der minimale Zuwachs eines jeden Baumes der Stichprobe bestimmt, um die zukünftige Schutzwirksamkeit für die Jahre 2015 und 2020 abschätzen zu können.

Die temporären Lawinenverbauungen der Stillberg-Aufforstung hatten bisher einen negativen Effekt auf das Überleben und einen positiven Effekt auf das Wachstum, wobei jedoch zwischen den Höhenlagen und Baumarten teilweise starke Unterschiede gefunden wurden. Zu den negativen Auswirkungen der Werke auf das Überleben der Bäume gehört insbesondere die spätere Ausaperung im Frühling, verbunden mit einer starken Belastung durch pathogene Schneepilze. Das Wachstum wird besonders durch die Verminderung von Schneebewegungen und Lawinen, welche zu Stammbrüchen und Gipfeltriebsverletzungen führen, und durch die kleinere Anzahl Schneefreier Tage im Winter begünstigt.

Die Lawinenschutzwirksamkeit ist 35 Jahre nach der Pflanzung erst bis zu einer Höhe von 2100 m.ü.M. bei extremen Schneehöhen, bzw. bis 2150 m.ü.M. bei durchschnittlicher Schneehöhe, genügend gut, um Lawinenanrisse verhindern zu können. Nicht ideal ist jedoch die Baumartenmischung, da nur sehr wenige schutzwirksame Arven und Bergföhren in der Fläche vorkommen. Die Prognosen haben gezeigt, dass wahrscheinlich auch in den nächsten 10 Jahren noch kein umfassender Schutz vor Lawinenanrissen gewährleistet werden kann.

Die Untersuchungen haben bestätigt, dass bei Aufforstungen von Lawinenanrissgebieten oberhalb der Waldgrenze mit sehr langen Zeiträumen gerechnet werden muss, bis eine genügende Lawinenschutzwirkung erreicht wird. Temporäre Lawinenverbauungen mit einer Lebensdauer von 30 - 40 Jahren sind also in Hochlagenaufforstungen, mit ähnlichen Standortverhältnissen wie auf dem Stillberg, oberhalb von ca. 2100 - 2150 m.ü.M. nicht sinnvoll. Um einen ausreichenden und nachhaltigen Schutz vor Lawinenanrissen sicherzustellen, sollten folglich Verbauungstypen mit längerer Lebensdauer gewählt und heikle Gebiete sogar permanent verbaut werden.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>VI</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Problemstellung .....	1
1.2 Ziel der Arbeit, Forschungsfragen und Hypothesen .....	3
<b>2 Grundlagen</b> .....	<b>4</b>
2.1 Untersuchungsgebiet „Stillberg“ .....	4
2.1.1 Natürliche Grundlagen .....	5
2.1.2 Versuchsanordnung und Pflanzung .....	6
2.2 Schutzwirksamkeit des Waldes gegen Lawinenanrisse .....	8
<b>3 Material und Methoden</b> .....	<b>10</b>
3.1 Datengrundlage .....	10
3.2 Datenerhebung .....	11
3.3 Beurteilung der Schutzwirksamkeit der Aufforstung.....	16
3.3.1 Kriterien.....	16
3.3.2 Szenarien .....	17
3.3.3 Auswertung .....	18
3.3.4 Schutzwirksamkeit von potentiellen Rotten .....	19
3.4 Statistische Datenauswertung .....	21
<b>4 Resultate</b> .....	<b>22</b>
4.1 Einfluss der Lawinenverbauungen auf Wachstum und Überleben .....	22
4.1.1 Wachstumsentwicklung zwischen 1975 und 2010 .....	22
4.1.2 Überleben.....	25
4.1.3 Stammdurchmesser und Baumlängen .....	26
4.1.5 Einfluss der Höhenstufen auf die Baumlänge .....	29
4.1.4 Einfluss der Höhenstufen auf den Stammdurchmesser .....	32

4.2 Schutzwirksamkeit.....	35
4.2.1 Maximale 30-jährige Schneehöhe (Szenario 1) .....	35
4.2.2 Durchschnittliche maximale Schneehöhe (Szenario 2).....	39
<b>5 Diskussion.....</b>	<b>43</b>
5.1 Einfluss der Lawinenverbauungen auf Wachstum und Überleben .....	43
5.1.1 Überleben.....	44
5.1.2 Wachstum .....	47
5.2 Beurteilung der Schutzwirksamkeit .....	53
5.2.1 Szenario 1 .....	55
5.2.2 Szenario 2 .....	57
<b>6 Schlussfolgerung .....</b>	<b>59</b>
<b>7 Danksagung .....</b>	<b>61</b>
<b>8 Literaturverzeichnis .....</b>	<b>62</b>
<b>9 Anhang .....</b>	<b>65</b>
9.1 Bestehende GIS-Datensätze .....	65

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Versuchsaufforstung Stillberg (Wasem 2008) .....	4
Abb. 2: Luftbild des Dischmatal in Davos mit Versuchsfläche Stillberg .....	5
Abb. 3: Geländemodell der Versuchsfläche mit den 4052 Einheitsflächen.....	6
Abb. 4: Pflanzungsschema Stillberg mit unterschiedlich verbauten Aufforstungsteilen .....	7
Abb. 5: Schneedeckenaufbau im Übergangsbereich zwischen Baum und Freiland .....	8
Abb. 6: Luftbild der Untersuchungsfläche Stillberg mit Stichprobenanordnung .....	12
Abb. 7: Position des einzelnen Baumes innerhalb der Einheitsfläche .....	13
Abb. 8: Foto Feldaufnahme Sommer 2010 .....	14
Abb. 9: Zufälliges Auswahlverfahren zur Bestimmung der zu messenden Bäume .....	15
Abb. 10: Modell einer Rottenaufforstung mit Fichten im Gebirgswald .....	20
Abb. 11: Baumlängenentwicklung der Lärche zwischen 1975 und 2010 .....	23
Abb. 12: Baumlängenentwicklung der Bergföhre zwischen 1975 und 2010.....	23
Abb. 13: Baumlängenentwicklung der Arve zwischen 1975 und 2010.....	24
Abb. 14: Verhältnis Baumlänge und Stammdurchmesser von Arve, Föhre und Lärche.....	26
Abb. 15: Verhältnis Baumlänge und Stammdurchmesser unterteilt nach Aufforstungsteilen .....	28
Abb. 16: Baumlängen der Lärche unterteilt nach Höhenstufen .....	30
Abb. 17: Baumlängen der Bergföhre unterteilt nach Höhenstufen .....	30
Abb. 18: Baumlängen der Arve unterteilt nach Höhenstufen .....	31
Abb. 19: Stammdurchmesser der Lärche unterteilt nach Höhenstufen.....	33
Abb. 20: Stammdurchmesser der Bergföhre unterteilt nach Höhenstufen .....	33
Abb. 21: Stammdurchmesser der Arve unterteilt nach Höhenstufen .....	34
Abb. 22: Schutzwirksame Bäume bei maximaler 30-jähriger Schneehöhe, Kriterium A.....	36
Abb. 23: Schutzwirksame Bäume bei maximaler 30-jähriger Schneehöhe, Kriterium B.....	36
Abb. 24: Schutzwirksame Bäume bei durchschnittlicher maximaler Schneehöhe, Kriterium A ...	40
Abb. 25: Schutzwirksame Bäume bei durchschnittlicher maximaler Schneehöhe, Kriterium B ...	40

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einteilung der Versuchsfläche in vier Höhenstufen .....	11
Tabelle 2: Aufteilung der Höhenstufen in vier Zonen mit und ohne Lawinenverbauungen .....	11
Tabelle 3: Überleben im nichtverbauten und verbauten Teil, unterteilt nach Höhenstufen.....	25
Tabelle 4: Durchmesser, Baumlänge und Schlankheitsgrad unterteilt nach Aufforstungsteil.....	27
Tabelle 5: Schutzwirksamkeit bei Szenario 1, unter Kriterium A, für 2010, 2015 und 2020 .....	37
Tabelle 6: Bewertung der Schutzwirksamkeit von potentiellen Rotten, Szenario 1 .....	38
Tabelle 7: Schutzwirksamkeit bei Szenario 2, unter Kriterium B, für 2010, 2015 und 2020 .....	41
Tabelle 8: Bewertung der Schutzwirksamkeit von potentiellen Rotten, Szenario 2 .....	42

## 1 Einleitung

### 1.1 Problemstellung

Durch die zunehmend dichte Besiedlung des Alpenraums in den letzten Jahrhunderten, wurde der Schutz vor Naturgefahren zu einem immer wichtiger werdenden Bedürfnis der Bevölkerung. Die starke anthropogene Nutzung der Wälder durch Beweidung und Rodungen hat dazu geführt, dass die aktuelle Waldgrenze von subalpinen Gebirgswäldern 200 - 300 Meter unter der potentiell möglichen oder natürlichen Waldgrenze liegt (Eckmüller 1972), wodurch viele neue Lawinenanrissgebiete entstanden sind. Die Tatsache, dass zwei Drittel aller Lawinen oberhalb der Waldgrenze ausgelöst werden (Zürcher 1973), bestätigt die grosse Relevanz der sogenannten „Kampfzone“ oberhalb der subalpinen Waldgrenze als Anrissgebiet für Lawinen. Seit Mitte des 19. Jahrhunderts wurde konsequent mit der Wiederaufforstung von zurückgedrängten Beständen begonnen (Schönenberger 2001), wodurch die Schutzwirksamkeit von heutigen alpinen Gebirgswäldern stark verbessert wurde (Brassel und Brändli 1999). Die kritischen Umweltfaktoren welche in grossen Höhenlagen das Baumwachstum kontrollieren (Tranquillini 1979; Körner 2003), machen jedoch besonders das Aufforsten von Flächen nahe der oberen Baumgrenze zu einem schwierigen Unterfangen (Schönenberger 1985).

Das allgemein unter dem Namen „Gebirgsprogramm“ bekannt gewordene interdisziplinäre Forschungsprojekt „Wiederherstellung der oberen Waldgrenze“ wurde nach dem katastrophalen Lawinenwinter 1951/52 geschaffen, um biologisch und technisch geeignete und finanziell tragbare Verfahren für Aufforstungen in Lawinenanrissgebieten innerhalb der Wald- und Kampfzone zu entwickeln (Senn und Schönenberger 2001). Im Rahmen dieses Projektes wurde an der alpinen Waldgrenze in Davos gemeinsam von den WSL Standorten Birmensdorf und Davos die Versuchsaufforstung „Stillberg“ eingerichtet, welche seither Aufschluss über die ökologischen Prozesse an der alpinen Waldgrenze liefert. Dank der intensiven Erfassung und Auswertung von Daten über die aufgeforsteten Bäume, wie auch über Mikroklima und Boden, Pilze und Fauna, sowie über Schnee und Lawinen, konnten bereits viele für die Praxis relevante Erkenntnisse gewonnen und durch zahlreiche

Publikationen und Führungen der Wissenschaft zugänglich gemacht werden (Bebi et al. 2009).

Während regional das Überleben und das Wachstum von Bäumen in der subalpinen Zone stark von den Temperaturverhältnissen abhängen (Brockmann-Jerosch 1919; Tranquillini 1979; Wieser und Tausz 2007; Vittoz et al. 2008; Holtmeier 2009), spielen lokal besonders die Unterschiede im Mikroklima nahe an der Bodenoberfläche zwischen verschiedenen Standorten eine entscheidende Rolle (Barry 1981). In solchen Höhenlagen verursachen bereits kleinste Unregelmässigkeiten in der Hangoberfläche lokale Variationen der Umweltbedingungen (Turner et al. 1982). Dank umfassender Untersuchungen zum Einfluss von einzelnen Standortfaktoren auf das Überlebensmuster und das Wachstum der Bäume auf dem Stillberg, werden bei neueren Hochlagenaufforstungen die Ökologie und der Kleinstandort besser berücksichtigt und standortgerechter gepflanzt (Bebi et al. 2009).

Nach dem heutigen Wissenstand erfüllen rottenartig strukturierte Gebirgswälder mit vielen inneren Waldrändern und mit grünen Kronen bis zum Boden die Anforderungen eines subalpinen Lawinenschutzwaldes am besten (Schönenberger 2001). Um dieses Ziel zu erreichen, muss die gewünschte Textur allerdings schon frühzeitig bei der Jungwuchspflege vorgezeichnet werden (Zeller 1977; Marugg 1978), oder im Idealfall schon durch eine rottenartige Auspflanzung erfolgen (Rüedi 1964; Barandun 1983).

Bei der Aufforstung von Lawinanrissgebieten oberhalb der Waldgrenze werden häufig temporäre Holzwerke errichtet, um die Pflanzen vor den Schäden durch Schneebewegungen und Lawinen zu schützen. Auf der Versuchsfläche Stillberg wurde ein Drittel des Untersuchungsgebiets mit solchen temporären Lawinenverbauungen ausgestattet. Die Auswirkungen dieser Werke auf die Lawinenhäufigkeit, wurden von Rychetnik (1985) bereits untersucht. Welchen Einfluss die Verbauungen jedoch auf das Wachstum und Überleben der Forstpflanzen haben, blieb bisweilen unerforscht. Inwiefern eine Verbauung im Lawinanrissgebiet für den Aufforstungserfolg notwendig ist, wurde bisher ebenfalls noch nicht untersucht.

Der temporäre Stützverbau eignet sich gut für die Verhinderung von Lawinenanbrüchen im Aufforstungsgebiet, allerdings nur unter der Bedingung, dass seine Schutzwirkung solange

gewährleistet ist, bis der heranwachsende Wald die Schutzfunktion selbst übernehmen kann (Rychetnik 1982; Fillbrandt 2000; Leuenberger 2003). Die häufig aus Edelkastanienholz gefertigten temporären Schutzwerke haben eine ungefähre Standdauer von 25 - 40 Jahren (Leuenberger 2003). Somit stellt sich unweigerlich die Frage, ob die Schutzwirkung der Stillbergaufforstung gegen Lawinenanrisse, 35 Jahre nach ihrer Pflanzung, bereits genügend ist.

## 1.2 Ziel der Arbeit, Forschungsfragen und Hypothesen

In der vorliegenden Arbeit wurde das Wachstum und das Überleben der Bäume zwischen dem verbauten und dem nicht verbauten Teil der Stillbergaufforstung verglichen, um Rückschlüsse auf den Einfluss von temporären Lawinenwerken zu ziehen. Weiter wurden die Schutzwirksamkeit der Aufforstung gegen Lawinen, 35 Jahre nach der Pflanzung der Bäume, mit Hilfe von ausgewählten Kriterien beurteilt und räumliche Unterschiede aufgezeigt.

Die folgenden **Forschungsfragen** wurden dabei untersucht:

**Frage 1:** Was für Auswirkungen haben temporäre Lawinenverbauungen auf das Wachstum und Überleben der drei Baumarten in der Stillbergaufforstung?

**Hypothese:** Es wird erwartet, dass alle drei Baumarten im verbauten Teil der Aufforstung höhere Baumhöhen und Stammdurchmesser aufweisen und mehr Exemplare überlebt haben, da sie vor Lawinenaktivitäten und Schneebewegungen besser geschützt sind.

**Frage 2:** Genügt die Schutzwirksamkeit der Aufforstung, 35 Jahre nach der Pflanzung, um Lawinenanrisse zu verhindern? Gibt es Unterschiede zwischen den drei Baumarten und zwischen einzelnen Aufforstungsteilen?

**Hypothese:** Die Schutzwirksamkeit ist im grössten Teil der Aufforstung ungenügend, weil die Bäume unter den schwierigen Wachstumsbedingungen über der Waldgrenze mehr als 35 Jahre benötigen, um eine schutzwirksame Höhe zu erreichen. Höchstens im untersten Teil des Untersuchungsgebiets können Lawinenanrisse verhindert werden. Die Lärche bietet gegenüber den immergrünen Baumarten einen besseren Schutz vor Lawinenanrissen.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Untersuchungsgebiet „Stillberg“

Die Versuchsaufforstung „Stillberg“ (Abb. 1) liegt auf 2000 - 2230 m.ü.M. an einem nordostexponierten, 35 - 40 Grad steilen Hang des Dischmatals in der Gemeinde Davos (09°52'E, 46°47'N) (Abb. 2). Es handelt sich hierbei um eine rund 10 ha grosse Versuchsfläche, welche in den fünfziger Jahren gemeinsam vom WSL-Institut für Schnee und Lawinenforschung (SLF) und der damaligen Eidgenössischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen (EAFV, heute WSL) eingerichtet wurde. Die wegen ihrer starken Neigung als Lawinenanrissgebiet charakterisierte Fläche ist in fünf Lawinenkammern unterteilt und hat dadurch ein topographisch reich strukturiertes Relief (Abb. 3).



Abb. 1: Versuchsaufforstung Stillberg (Wasem 2008).

### 2.1.1 Natürliche Grundlagen

Das Untersuchungsgebiet liegt im gemässigt kontinentalen Klimagebiet der Zentralalpen. Die mittlere Jahrestemperatur liegt bei  $1,6^{\circ}\text{C}$ , wobei die Sommer relativ warm (mittlere Juli-Temperatur  $9,4^{\circ}\text{C}$ ) und die Winter relativ kalt sind (mittlere Januar-Temperatur  $-5,8^{\circ}\text{C}$ ). Die Fläche liegt oberhalb der aktuellen Waldgrenze, in der sogenannten „Kampfzone“, und ist typisch für das Verbreitungsareal des Lärchen-Arvenwaldes (Schönenberger und Frey 1988).



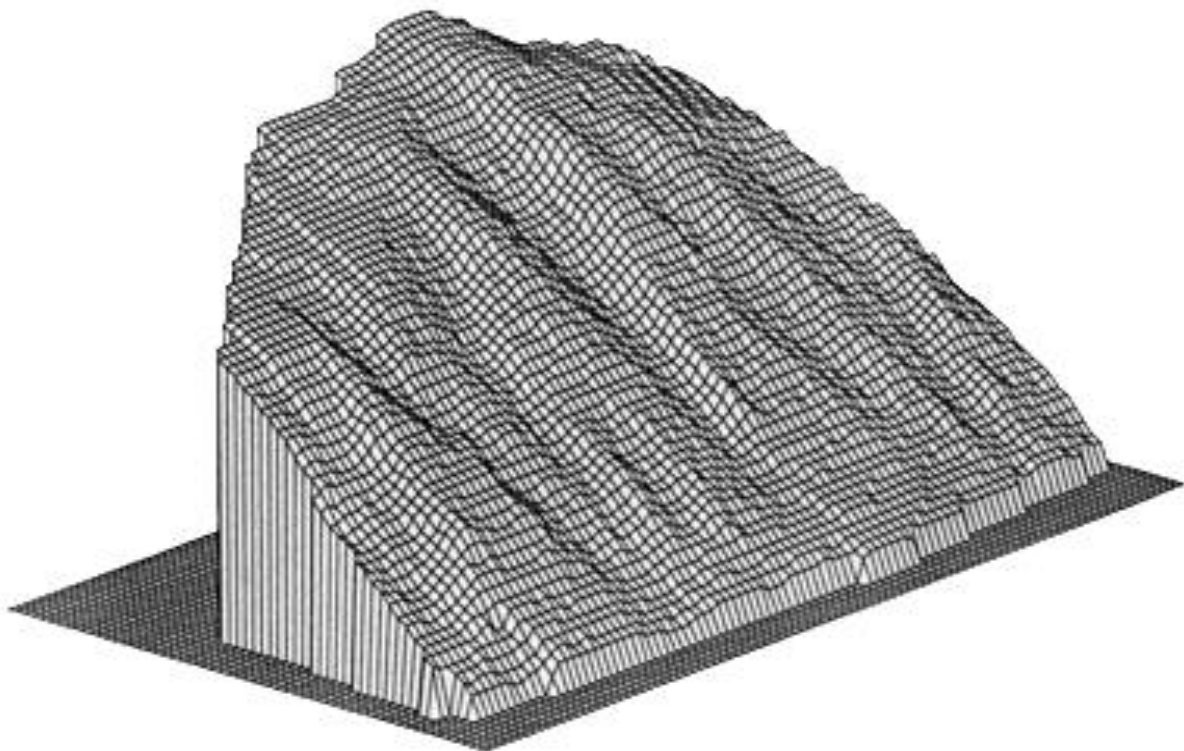
**Abb. 2:** Luftbild des Dischmatals in Davos, welches sich vom Landwassertal in südöstliche Richtung bis zum Scalettagletscher und Scalettapass erstreckt. Rot eingekreist ist die Nordost exponierte Versuchsfläche Stillberg (Horak, 1963).

Der mittlere Jahresniederschlag von 1050 mm ist durch die topographisch bedingte Leelage der Fläche eher gering für solche Höhenlagen. Im Winter beträgt die durchschnittlich maximale Schneehöhe 146 cm, wobei diese von 60 cm (auf windexponierten Rippen) bis 420 cm (in Lawinenrinnen) variieren kann (Senn und Schönenberger 2001). Mit Ausnahme von grossen Staublawinen kommen in der Versuchsfläche alle Lawinentypen vor. In der Periode 1959 bis 1982 sind durchschnittlich 42 Lawinen pro Winter beobachtet worden, wobei es sich bei den meisten um Lockerschneelawinen handelte. Der grösste Teil der Versuchsfläche ist zudem sehr anfällig auf Gleit- und Kriechbewegungen der Schneedecke (Schönenberger und Frey 1988).

Mehr detaillierte Angaben zu der Geologie, Klima, Böden und Vegetation im Untersuchungsgebiet Stillberg können in Schönenberger (1975) und Schönenberger und Frey (1988) gefunden werden.

### 2.1.2 Versuchsanordnung und Pflanzung

Im Jahr 1975 begann auf einer 5ha großen Teilfläche des Stillbergs der eigentliche Hauptversuch. Das Untersuchungsgebiet wurde in 4052 gleich große Quadrate, sogenannte Einheitsflächen, mit einer Seitenlänge von 3,5 m eingeteilt (Abb. 3). Für jede Einheitsfläche wurden anschließend die langjährigen Mittelwerte kleinstandörtlicher Parameter bestimmt (z.B. Höhe über Meer, globale Hangbestrahlung, Windgeschwindigkeit, Anzahl schneefreier Tage im Winter, Ausaperungsdatum, Lawinenfrequenz, Bodentyp, Pflanzengesellschaft) (Senn und Schönenberger 2001). Eine genaue kartographische Darstellung der meisten dieser Standortparameter ist in Schönenberger und Frey (1988) zu finden.

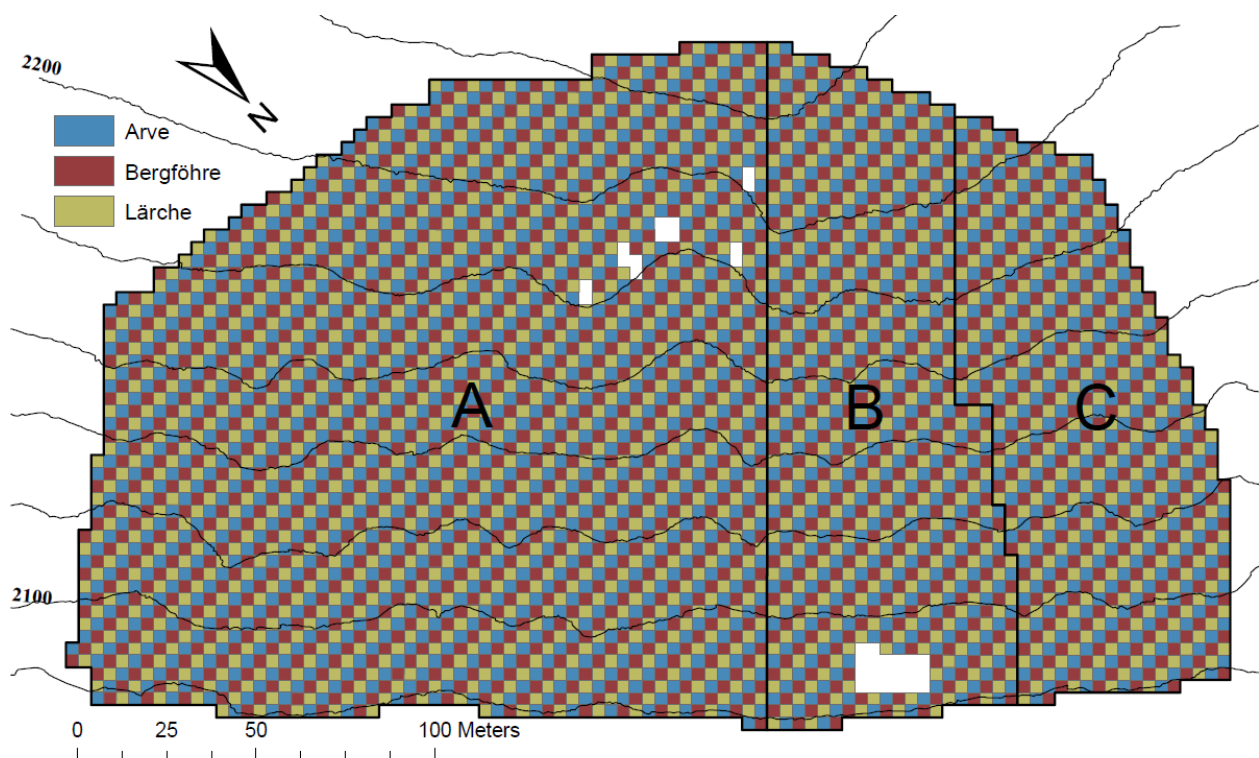


**Abb. 3:** Geländemodell der Versuchsfäche mit den 4052 Einheitsflächen (Schönenberger und Frey 1988).

Bei der anschließenden Pflanzung wurden die Einheitsflächen nach einem festen Schema mit insgesamt 92'000 Bäumchen (alles Topfpflanzen) bepflanzt. In jeder Einheitsfläche wurden in fünf fünferreihen jeweils 25 Bäumchen der gleichen Baumart im Abstand von 70 cm gesetzt. Verwendet wurde die Lärche (*Larix decidua* Mill.), die aufrechte Form der Bergföhre (*Pinus mugo* Turra) und die Arve (*Pinus cembra* L.) (Frey 1977). Die Baumart wurde bei jeder Einheitsfläche gewechselt, so dass das ganze Untersuchungsgebiet völlig regelmäßig mit den

drei Baumarten bepflanzt war (Abb. 4) (Senn und Schönenberger 2001). Die Bäume wurden in den 35 Jahren nach der Pflanzung im Rahmen von intensiven Monitorings und Stichprobenaufnahmen immer wieder überwacht und vermessen.

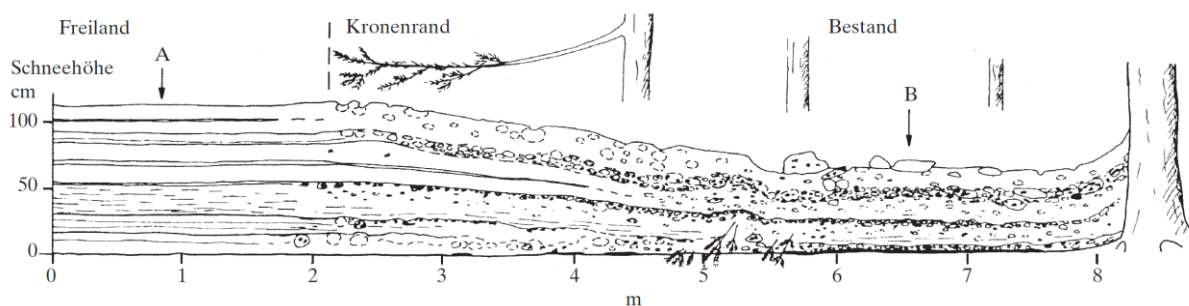
Einige Jahre vor der Pflanzung wurden im Versuchsgebiet über 400 Schneepegel gesetzt und in einem Drittel der Fläche temporäre Lawinenverbauungen errichtet (Abb. 4). Der Lawinenstützverbau wurde in zwei verschiedenen Anordnungen erstellt. Der „durchgehend verbaute Teil“ wurde nach den Schweizerischen Richtlinien für Lawinenverbau (EOFI), und der „aufgelöst verbaute Teil“ mit einer auf die Hälfte reduzierten Verbauungsdichte errichtet (Rychetnik 1985).



**Abb. 4:** Pflanzungsschema der Versuchsfläche Stillberg mit den unterschiedlich durch Lawinenwerke verbauten Aufforstungsteilen (A = nicht verbauter Teil, B = durchgehend verbauter Teil, C = aufgelöst verbauter Teil). In den über 4000 Einheitsflächen wurden jeweils 25 Arven, Bergföhren oder Lärchen gepflanzt.

## 2.2 Schutzwirksamkeit des Waldes gegen Lawinenanrisse

Der Gebirgswald stellt heute flächenmässig den wichtigsten Beitrag zum Lawinenschutz in der Schweiz dar, wobei seine Schutzwirkung insbesondere darauf beruht, dass er die Schneedecke stabilisiert und somit das Anbrechen von Lawinen verhindert (Margreth 2004). Der Schneedeckenaufbau wird durch mehrere Faktoren vom Wald beeinflusst (Abb. 5), welche auf Freiflächen nicht vorkommen. Dazu gehören die Interzeption, die veränderten Strahlungs- und Windverhältnisse innerhalb von Beständen, die erhöhte Bodenrauhigkeit, das Herabfallen von Schnee aus den Baumkronen und die direkte Stützwirkung der Stämme (Frey 1977; Salm 1978; Meyer-Grass 1987; Pfister und Schneebeli 1999; Margreth 2004). Zusätzlich können liegende Stämme und umgekippte Wurzelteller die Stabilisierung der Schneedecke begünstigen (Frey und Thee 2002).



**Abb. 5: Schneedeckenaufbau im Übergangsbereich zwischen Baum und Freiland (Imbeck 1987).**

Als Schlüsselgrößen zur Beurteilung der Schutzwirksamkeit des Waldes gegen Lawinenanrisse wurden von Meyer-Grass und Schneebeli (1992) die Parameter *durchschnittliche Stammzahl pro Hektar*, der *Kronendeckungsgrad*, welcher mindestens 50% betragen sollte, und die *Lückenbreite* von maximal 15 Metern ermittelt. Ein weiterer wichtiger Parameter ist die *Lückenlänge*, welche je nach Hangneigung einen kritischen Wert von 30 bis 60 Meter nicht überschreiten sollte (Gubler und Rychetnik 1991). Besonders in jungen Beständen ist die *Baumlänge* ein zusätzliches wichtiges Kriterium für die Beurteilung der Schutzwirksamkeit. Laut Saeki et al. (1969) muss ein Baum die Schneehöhe mindestens um das Eineinhalbfache bis Doppelte überragen, um einen Beitrag gegen das Anreissen von Lawinen zu leisten.

Frehner et al. (2005) berücksichtigen zusätzlich zu den erwähnten Anforderungen auf Grund der Naturgefahren die minimalen Anforderungen, welche auf Grund des Standortstyps erfüllt sein sollten, um den Schutz vor Naturgefahren gewährleisten zu können. Die dafür verwendeten Kriterien beinhalten die Baumartenmischung, das *horizontale und vertikale Gefüge*, das Vorhandensein von gut verankerten *Stabilitätsbäumen* und eine genügende Anzahl von geeigneten *Keimbetten* und *Jungbäumen*, welche je nach Standortstyp unterschiedliche minimale Anforderungen erfüllen müssen.

In gemischten Arven-Lärchen-Beständen ist eine geeignete *Mischung* der Baumarten besonders relevant, da vor allem bei niedrigen Temperaturen die Interzeptionswirkung und die Zurückhaltung von kurz- und langwelliger Strahlung bei winterkahlen Baumarten tiefer ist als bei wintergrünen Baumarten. Auf solchen Standortstypen muss deswegen ein Arvenanteil von mindestens 50% vorhanden sein, um die minimalen Anforderungen zu erfüllen (Frehner et al. 2005).

## 3 Material und Methoden

### 3.1 Datengrundlage

Für diese Untersuchung wurde vom WSL - Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) eine sehr umfangreiche Datengrundlage zur Verfügung gestellt, aus welcher folgende Daten verwendet wurden:

- *Baumhöhen und Überlebensraten:*  
Wurden periodisch im Rahmen von Vollaufnahmen für die drei Baumarten Lärche, Bergföhre und Arve bestimmt (1975, 1979, 1982, 1985, 1995, 2005).
- *Schneepegeldaten:*  
Mit Hilfe eines systematisch angeordneten Netzes von über 400 Schneepegeln, wurden seit 1959 periodisch die Schneehöhen gemessen. Die digitalisierten Daten der Periode 1959 - 1992 wurden verwendet um die maximale Schneehöhe im Untersuchungsgebiet zu bestimmen.

Für die Diskussion der Resultate wurden zusätzlich bestehende GIS-Datensätze über die räumlichen Unterschiede einzelner Standortfaktoren (z.B. Ausaperungsdatum, Anzahl schneefreier Tage im Winter, Windgeschwindigkeiten, Lawinenhäufigkeit) verwendet (siehe Anhang 9.1).

Im Sommer 2010 machte der Autor eine zusätzliche Aufnahme der Baumhöhen, Stammdurchmesser und Überlebensraten von einer Stichprobe aus 2000 Bäumen (siehe Kapitel 3.2).

### 3.2 Datenerhebung

Für die Feldaufnahmen im Sommer 2010 wurde das Untersuchungsgebiet Stillberg in acht verschiedene Zonen eingeteilt. Zuerst wurden anhand der Einheitsflächennummern vier Höhenstufen von je 30 Höhenmetern definiert. Zwischen den Höhenstufen dient eine 10 Meter hohe Pufferzone dazu, die Zonen klar voneinander abzugrenzen. Die genaue Einteilung der Untersuchungsfläche in die vier Höhenstufen ist in Tabelle 1 ersichtlich.

Weiter wurde jede Höhenstufe in einen Teil mit und einen Teil ohne Lawinenverbauungen eingeteilt. Für die Untersuchungen wurde nur das Gebiet mit durchgehenden Lawinenrechen verwendet. Die unterbrochenen Lawinenrechen wurden bewusst weggelassen, da angenommen wurde, dass der Einfluss der Werke auf die Bäume zwischen den zwei Verbauungsarten variiert. Mit den zwei Variablen „Höhenstufe“ und „Verbauung“ werden also die acht Zonen der Aufforstungsfläche definiert (Tabelle 2).

**Tabelle 1: Einteilung der Versuchsfläche in vier Höhenstufen.**

Name	Meereshöhe [m.ü.M.]	Reihennummern der Einheitsflächen
1. Höhenstufe	2225 - 2195	04 - 12
2. Höhenstufe	2185 - 2155	18 - 25
3. Höhenstufe	2145 - 2115	32 - 40
4. Höhenstufe	2105 - 2075	46 - 55

**Tabelle 2: Aufteilung der vier Höhenstufen in vier Zonen mit und vier Zonen ohne Lawinenverbauungen.**

Höhenlage	ohne Verbauung	mit Verbauung
1. Höhenstufe	Zone I	Zone II
2. Höhenstufe	Zone III	Zone IV
3. Höhenstufe	Zone V	Zone VI
4. Höhenstufe	Zone VII	Zone VIII

Für jede der acht Zonen wurden pro Baumart fünf Einheitsflächen zufällig ausgewählt, welche als Stichprobe für die Feldaufnahmen dienten. Die Auswahl der Plots erfolgte graphisch mithilfe einer GIS-Karte in ArcMap (10.0), welche nur die Topographie und die Einheitsflächen, jedoch nicht das Vorkommen und Überleben der Bäume anzeigte. Um die Vergleichbarkeit der acht Zonen sicherzustellen, wurde speziell darauf geachtet, dass möglichst in jeder Zone der Stichprobe alle Expositionen und topographischen Besonderheiten vertreten waren. Zusätzlich wurde darauf geachtet, dass sich keine Plots in der Hauptlawinenrunse befinden. Die Verteilung der Einheitsflächen der Stichprobe über die Aufforstungsfläche ist in Abb. 6 zu erkennen.

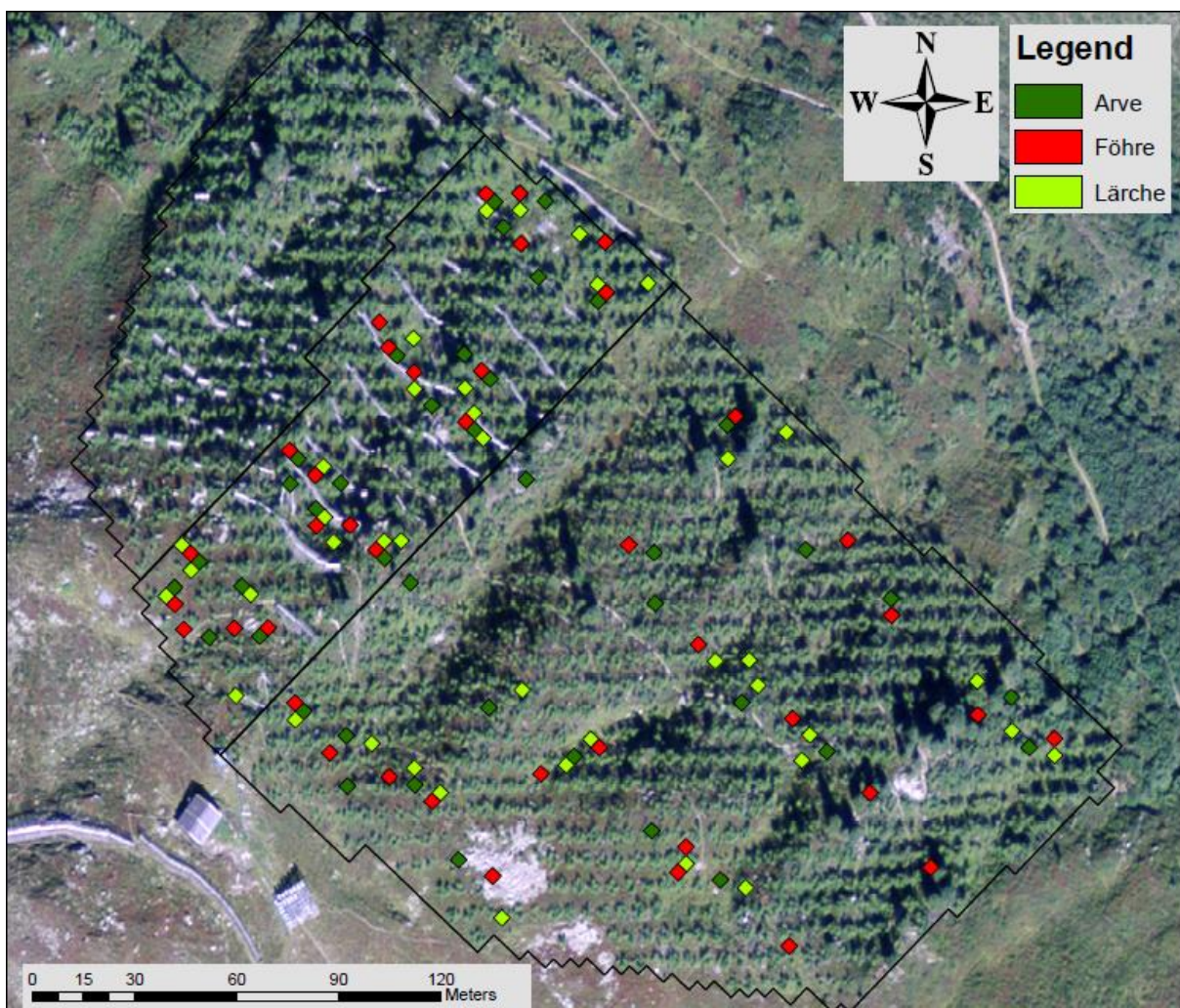


Abb. 6: Luftbild der Untersuchungsfläche Stillberg mit Stichprobenanordnung.

Die Feldarbeit wurde auf den insgesamt 80 Einheitsflächen, welche Lärchen und Föhren enthalten, durchgeführt. Die 40 Arvenplots der Stichprobe mussten nicht mehr aufgenommen werden, da Brücker (2011) im Rahmen ihrer Masterarbeit im Sommer 2010 alle Arven im Untersuchungsgebiet Stillberg aufgenommen und vermessen hat. Diese Daten stellte sie freundlicherweise zur Verfügung.

Falls auf einer Einheitsfläche der Stichprobe mindestens ein Baum lebendig war wurden folgende Parameter aufgenommen:

- **Baumart:** Lärche oder Bergföhre
- **Einheitsflächen (EF) Nummer:** Die Abgrenzungen der Einheitsflächen sind mit vier etwa 10 cm hohen Metallstangen markiert, wobei die linke obere die vierstellige Einheitsflächennummer trägt. Bei manchen Flächen konnte die Markierung wegen der üppigen Bodenvegetation nicht gefunden werden, oder sie wurde durch Lawinnenniedergänge ausgerissen. In solchen Fällen wurde die Nummer durch Vergleichen mit den Nachbarflächen festgestellt.
- **Baumnummer:** Die Position des einzelnen Baumes innerhalb der Einheitsfläche wurde mit Nummern von 1 - 25 angegeben (Abb. 7), wobei jeder Baum 70 cm von seinem Nachbarn entfernt liegen sollte.

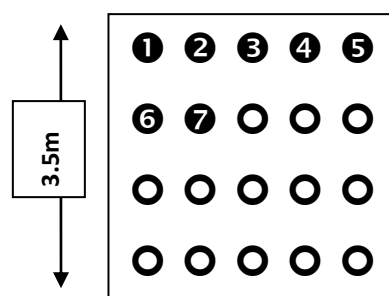


Abb. 7: Position des einzelnen Baumes innerhalb der Einheitsfläche (Horak 2004).

- Anzahl lebender Bäume pro Plot: Es wurde für jede Einheitsfläche bestimmt, wie viele lebende Individuen vorhanden waren. Als lebend wurden nur Bäume betrachtet, welche noch grüne Nadeln an den Zweigen hatten.
- Stammdurchmesser (mm): Der Durchmesser des Baumes wurde an der Stammbasis (5cm über Boden) gemessen. Verwendet wurde ein Durchmesser-Massband um das nicht-zentrische Wachstum der Stämme am Hang zu berücksichtigen. Falls bei der Messposition eine Deformation oder eine Stammverletzung vorlag, wurde an der nächst höheren Position ohne Schäden gemessen. Bei Zwieselwuchs wurde der Durchmesser nur am längsten Teilstamm bestimmt.
- Baumlänge (cm): Die Baumlänge wurde bis zum letztjährigen Trieb gemessen, um das aktuelle Wachstum der laufenden Vegetationsperiode nicht zu berücksichtigen. Die Krümmung des Baumes wurde so gut als möglich miteinbezogen, indem ein Maßband und ein Doppelmeter für die Messung verwendet wurden (Abb. 8). Die sehr langen Bäume (>4m) wurden mit dem Vertex gemessen. Bei Zwieselwuchs wurde die Baumlänge nur für den längsten Teilstamm bestimmt.
- Besonderes: Besonderheiten wie Zwieselwuchs, kriechendes Wachstum (bei der Bergföhre) und Stammbrüche wurden individuell festgehalten.



Abb. 8: Foto Feldaufnahme Sommer 2010

Auf jeder Einheitsfläche wurden alle Bäume ausgezählt und aufgenommen, jedoch maximal zehn Bäume vermessen. Falls auf einem Plot mehr Bäume am Leben waren, wurden mit Hilfe eines zufälligen Auswahlverfahrens (Abb. 9) zehn Bäume bestimmt, welche gemessen wurden. Wichtigstes Kriterium war dabei die einfache und schnelle Handhabung im Feld, um möglichst wenig Zeit für die Auswahl der Bäume zu verlieren. Dafür wurde das Auswahlverfahren, welches für die Inventur im Jahre 2005 verwendet wurde, angepasst und etwas abgeändert, unter anderem weil damals nur maximal drei Bäume pro Plot gemessen wurden. Für Einheitsflächen mit geraden und ungeraden Flächennummern kamen verschiedene Auswahlverfahren zum Einsatz (Abb. 9). Es wurden jeweils drei Bäume möglichst am Rand der Einheitsfläche, drei möglichst in der Mitte und vier am Rand mit einem Nachbarn gemessen, wobei die Auswahl durch drei verschiedene Priorisierungen bestimmt wurde.

**Priorisierung bei ungerader Einheitsflächennummer:**

1	5	6	7	2
16	17	18	19	8
15	24	25	20	9
14	23	22	21	10
4	13	12	11	3

**Bäume 1 - 3:**  
Möglichst am Rande,  
beginnend oben links.

16	18	20	22	24
12	4	6	8	14
10	2	1	3	11
13	5	7	9	15
17	19	21	23	25

**Bäume 4 - 6:**  
Möglichst in der Mitte,  
Priorität links oben.

15	10	9	8	25
11	19	18	17	7
12	20	21	16	6
1	13	14	15	5
22	2	3	4	23

**Bäume 7 - 10:**  
Priorität Randbaum mit  
einem Nachbar.

**Priorisierung bei gerader Einheitsflächennummer:**

2	7	6	5	1
8	19	18	17	16
9	20	25	24	15
10	21	22	23	14
3	11	12	13	4

**Bäume 1 - 3:**  
Möglichst am Rande,  
beginnend oben rechts.

25	23	21	19	17
15	9	7	5	13
11	3	1	2	10
14	8	6	4	12
24	22	20	18	16

**Bäume 4 - 6:**  
Möglichst in der Mitte,  
Priorität rechts unten.

24	8	9	10	25
7	17	18	19	11
6	16	21	20	12
5	15	14	13	1
23	4	3	2	22

**Bäume 7 - 10:**  
Priorität Randbaum mit  
einem Nachbar.

**Abb. 9: Zufälliges Auswahlverfahren zur Bestimmung der zu messenden Bäume.**

### 3.3 Beurteilung der Schutzwirksamkeit der Aufforstung

Im Folgenden sind die verwendeten Kriterien zur Beurteilung der Schutzwirksamkeit beschrieben; es werden zwei Szenarien für die maximale Schneehöhe vorgestellt; die Auswertung der Daten wird erläutert und die Beurteilung von potentiellen Rotten beschrieben.

#### 3.3.1 Kriterien

Für die Beurteilung der Schutzwirksamkeit der Aufforstung wurde in dieser Untersuchung nur die Baumlänge berücksichtigt. Die spezielle Pflanzungsart in der Versuchsfläche Stillberg, bei welcher abwechslungsweise Einheitsflächen mit Lärche, Bergföhre und Arve bepflanzt wurden, machte es sehr schwierig andere Kriterien zur Beurteilung der Schutzwirksamkeit anzuwenden. So können beispielsweise die *Lückengrösse*, und der *Deckungsgrad* für die einzelnen Baumarten nur sehr schwierig und unpräzise bestimmt werden.

Die Tatsache, dass alle Bäume in der Aufforstung dasselbe Alter haben und nur drei Baumarten in derselben Menge gepflanzt wurden, machen weitere Kriterien wie beispielweise die *Mischung*, das *Gefüge*, das Vorhandensein von verschiedenen *Verjüngungsstufen* und von *Stabilitätsträgern* für die Beurteilung der Schutzwirksamkeit auf dem Stillberg nicht anwendbar.

Da man sich in der Literatur nicht einig ist, ob die Baumlänge die doppelte oder eineinhalbfache maximale Schneehöhe erreichen muss (Saeki und Matsuoka 1969), um als Schutzwirksam zu gelten, wurden in dieser Studie die Bäume der Stichprobe auf beide Kriterien getestet.

1. Kriterium A: Bäume müssen doppelt so lang sein wie die maximale Schneehöhe.
2. Kriterium B: Bäume müssen eineinhalb mal so lang sein wie die maximale Schneehöhe.

### 3.3.2 Szenarien

Für den Faktor „maximale Schneehöhe“ wurden zwei Szenarien hergeleitet, welche sich unterschiedlichen Schneehöhen bedienen:

#### Szenario 1: Maximale 30-jährige Schneehöhe

Die maximale 30-jährige Schneehöhe wurde anhand der archivierten Schneepegelmessungen auf dem Stillberg ermittelt. Die Messreihe geht zurück bis ins Jahr 1959 und wurde bis zum Jahr 1992 digitalisiert. Es standen für die Untersuchung also 33 Jahre mit insgesamt 990 Pegelmessungen zur Verfügung.

Für jede Einheitsfläche der Stichprobe wurde der dazugehörige Schneepegel durch graphisches Abgleichen der Schneepegelkarte und der Karte der Einheitsflächen ermittelt. Somit entstand für jede Einheitsfläche ein Datensatz von 990 Schneehöhen, von welcher der maximale Wert der 33 Jahre bestimmt und mit den jeweiligen Baumhöhen verglichen werden konnte.

#### Szenario 2: Durchschnittliche maximale Schneehöhe

Es wurde erwartet, dass das Kriterium der doppelten Baumhöhe bei maximaler 30-jähriger Schneehöhe nur von sehr wenigen Individuen erreicht werden würde. Deshalb wurde zusätzlich die durchschnittliche maximale Schneehöhe pro Jahr berechnet und mit den Baumhöhen der einzelnen Einheitsflächen verglichen. Dadurch erhält man ein Bild über die Schutzwirksamkeit der Versuchsfläche Stillberg in einem durchschnittlichen Winter.

### *3.3.3 Auswertung*

Die anhand der Kriterien als schutzwirksam geltenden Bäume wurden mit der ArcGIS-Anwendung ArcMap (10.0) graphisch dargestellt, um ihre Verteilung beurteilen zu können. Die Auswertung dieser Daten erfolgte nur qualitativ, durch die Beurteilung der Karten, und nicht mit Hilfe von statistischen Tests.

Des Weiteren wurde die prozentuale Anzahl der lebenden Bäume ermittelt, welche im Jahr 2010 als schutzwirksam galten, also die Kriterien für die Schutzwirksamkeit erfüllten, und diese nach Höhenstufe und Verbauungszustand unterteilt. Es wurde zusätzlich versucht eine Prognose für die zukünftigen Baumhöhen im Jahr 2015 und 2020 zu machen. Prognosen welche weiter in die Zukunft reichen wurden nicht gemacht, weil dadurch die Genauigkeit und die Plausibilität des Modells in Frage gestellt worden wäre.

Für das Modell wurde der Zuwachs der letzten fünf Jahre (2005 - 2010) zur Baumhöhe im Jahr 2010 für jeden Baum einzeln dazugezählt. Es konnten allerdings nicht alle Bäume der Stichprobe verwendet werden, da in der Aufnahme 2005 maximal drei Bäume pro Einheitsfläche gemessen wurden und nur diejenigen Bäume verwendet werden konnten, welche im Jahr 2010 noch lebten. Es entstand also eine neue, verkleinerte Stichprobe von 168 Bäumen (105 Lärchen, 47 Bergföhren, 16 Arven).

Die somit berechneten zukünftigen Baumhöhen stellen einen minimalen Wert dar, da der Zuwachs eher exponentiell als linear verläuft. Die effektiven zukünftigen Baumhöhen werden also sehr wahrscheinlich grösser sein als vom Modell prognostiziert.

### 3.3.4 Schutzwirksamkeit von potentiellen Rotten

Zusätzlich zur qualitativen Beurteilung der Schutzwirksamkeit durch graphische und numerische Methoden, wurde versucht das Potential der Aufforstungsfläche zur Bildung von schutzwirksamen Rotten zu beurteilen (Abb. 10). Die jeweiligen fünf Einheitsflächen pro Baumart in jeder Zone der Aufforstung bildeten dabei die zu Beginn gepflanzten Kleinrotten (mit je 25 Bäumchen), welche sich schliesslich zu einer zusammenhängenden Rotte entwickeln sollten. Die Modellannahmen sind, dass sich in jeder der acht Zonen drei potentielle Rotten aus maximal fünf Kleinrotten einer Baumart entwickeln könnten. Diese modellierten Rotten wurden auf ihre Schutzwirksamkeit gegen Lawinenanrisse, mithilfe des folgenden Punktesystems, bewertet:

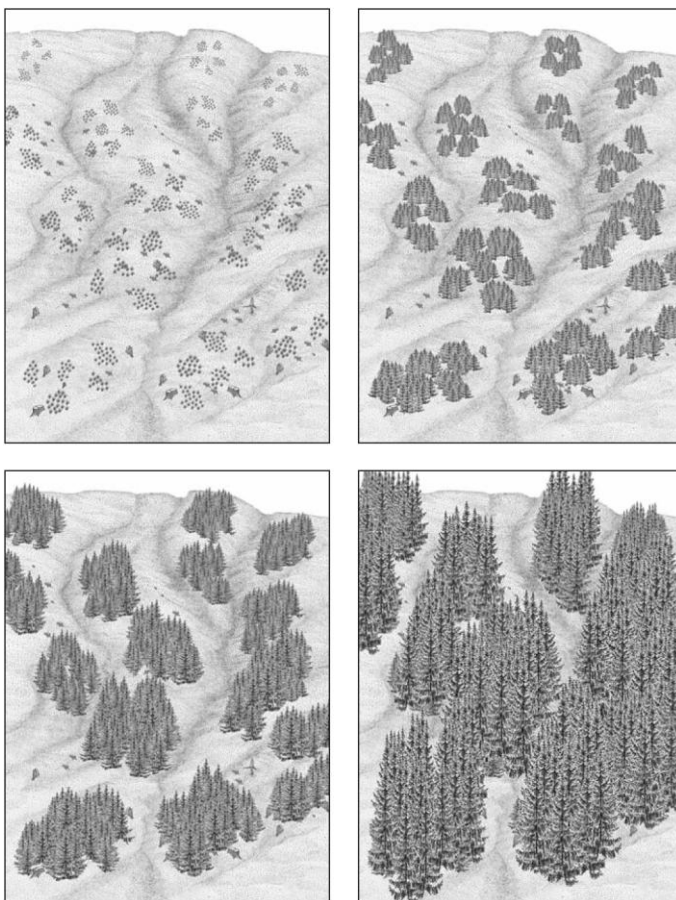
- Jede Kleinrotte erhält eine Punktzahl, welche von der Anzahl schutzwirksamer Bäume innerhalb der Einheitsfläche abhängig ist:

0 Punkte	keine schutzwirksamen Bäume
1 Punkt	1 schutzwirksamer Baum
2 Punkte	2 schutzwirksame Bäume
3 Punkte	3 oder mehr schutzwirksame Bäume

- Die Summe der Punkte der fünf Kleinrotten, addiert mit der Anzahl schutzwirksamer Kleinrotten, ergibt die Punktzahl für die potentielle Rotte einer Zone.
- Anhand der Punktzahl der Rotten kann deren Schutzwirksamkeit gegen Lawinenanrisse mit Hilfe des folgenden Schemas beurteilt werden:

<u>Punkte</u>	<u>Schutzwirksamkeit</u>
17 - 20	sehr gut
13 - 16	gut
9 - 12	genügend
5 - 8	schlecht
2 - 5	sehr schlecht
0	keine

Die Schutzwirksamkeit einer Rotte hängt somit nicht nur von der Anzahl Kleinrotten mit schutzwirksamen Bäumen ab, sondern auch von der Anzahl schutzwirksamer Bäume innerhalb der Kleinrotten. Durch Selbstdifferenzierung werden sich mit der Zeit die Stammzahlen soweit verringern, dass in der Baumholzstufe idealerweise noch ein Baum pro Kleinrotte vorhanden sein sollte. Die Punktwertung der Kleinrotten basiert deshalb auf der Wahrscheinlichkeit, dass in Zukunft noch mindestens ein schutzwirksamer Baum pro Einheitsfläche vorhanden sein wird. Bei nur einem schutzwirksamen Baum pro Einheitsfläche ist das Risiko relativ hoch, dass dieser durch äussere Einflüsse absterben könnte und die Kleinrotte somit nicht mehr zur kollektiven Schutzwirksamkeit der Rotte beitragen würde. Es wurde angenommen, dass ab drei schutzwirksamen Bäumen pro Kleinrotte die Wahrscheinlichkeit, dass sich mindestens ein Baum durchsetzen kann, nicht mehr stark zunehmen wird. Somit ist „3“ die höchste zu erreichende Punktzahl in der Wertung.



Die Beurteilung der kollektiven Schutzwirksamkeit der potentiellen Rotten wurde so gewählt, dass die Bewertung „sehr gut“ nur von Rotten erfüllt werden kann, welche aus fünf Kleinrotten bestehen. Die maximal mögliche Punktzahl bei vier Kleinrotten mit Schutzwirksamen Bäumen ist „16“. Die Grenze zwischen „gut“ und „sehr gut“ wurde also bei einer Punktzahl von „17“ gewählt. Dieselbe Vorgehensweise wurde bei den Bewertungen „gut“, „genügend“, „schlecht“ und „sehr schlecht“ angewendet.

**Abb. 10:** Modell einer Rottenaufforstung mit Fichten im Gebirgswald (Schönenberger 2001; Zeichnung: V. Fataar und U. Wasem).

### 3.4 Statistische Datenauswertung

Für die Auswertung der Daten wurden die Bäume anhand des Verbauungsgrades in zwei Gruppen, und anhand der Höhenstufe in einzelne Untergruppen, eingeteilt. Die Baumhöhen und Stammdurchmesser wurden mit ANOVAs (Analysis of Variance) auf Unterschiede in den Mittelwerten der Gruppen getestet, unter Berücksichtigung der Varianz. Als Signifikanzschwelle wurde die Irrtumswahrscheinlichkeit  $p < 0.05$  festgelegt.

Voraussetzung für die Anwendbarkeit von Varianzanalysen ist die Erfüllung der Modellannahmen. Dafür wurde die Normalverteilung der Residuen einerseits graphisch, mit dem "quantile-quantile plot", und mit Hilfe des "Shapiro-Wilcoxon Test" untersucht. Weiter wurden die Daten auf mögliche Ausreißer und homogene Varianz mit Hilfe des "Bartlett Test" analysiert. Bei Nichterfüllen der Modellannahmen wurden die Datensätze transformiert (log, sqrt) und erneut getestet. Konnten alle Modellannahmen bestätigt werden, wurde „ANOVA“ für die Varianzanalyse verwendet. "One-way ANOVA" kam bei inhomogener Verteilung der Varianz aber Normalverteilung der Residuen zum Einsatz. Wurden beide Modellannahmen nicht erfüllt, wurde die Varianz mit Hilfe des "Wilcoxon Test" analysiert.

Für die statistische Auswertung der Daten wurde ausschließlich die Statistiksoftware R (Version 2.12.0), ohne spezielle Zusatzpakete verwendet.

## 4 Resultate

### 4.1 Einfluss der Lawinenverbauungen auf Wachstum und Überleben

#### 4.1.1 Wachstumsentwicklung zwischen 1975 und 2010

Die Lärche zeigte einen exponentiellen Trend im Höhenwachstum zwischen 1975 und 2010, sowohl im verbauten als auch im nichtverbauten Teil der Aufforstung (Abb. 11). Mit zunehmendem Alter der Bäume nahm auch die Varianz der Baumhöhen stetig zu. Im Pflanzjahr konnten noch keine signifikanten Unterschiede in der Baumhöhe zwischen dem verbauten und dem nicht verbauten Teil der Aufforstung festgestellt werden. Jedoch bereits vier Jahre später, bei der Aufnahme 1979, waren die Lärchen im Teil mit Lawinenverbauungen grösser als ihre Nachbarn ohne Lawinenschutz ( $P_{1979} = 4.4e-04$ ). Derselbe Trend konnte bei den sechs folgenden Aufnahmen beobachtet werden, wobei der Unterschied der Baumhöhen im Jahr 1995 am signifikantesten war ( $P_{1982} = 2.5e-05$ ;  $P_{1985} = 7.0e-08$ ;  $P_{1990} = 7.8e-12$ ;  $P_{1995} = 2.9e-16$ ;  $P_{2005} = 8.5e-04$ ;  $P_{2010} = 2.7e-10$ ).

Die Baumhöhenentwicklung der Bergföhre zeigte, anders als diejenige der Lärche, weder im verbauten noch im unverbauten Teil der Aufforstung einen klar erkennbaren exponentiellen Trend zwischen der Pflanzung 1975 und der Aufnahme 2010 (Abb. 12). Das Höhenwachstum nahm zwischen 1990 und 2005 etwas ab, schien sich aber zwischen 2005 und 2010 wieder erholt zu haben. Betrachtet man nur die letzten fünf Jahre der Wachstumskurve, so könnte ein zukünftiges exponentielles Wachstum erahnt werden. Wie bei der Lärche nahm auch bei der Bergföhre die Varianz zwischen den Baumhöhen mit der Zeit stetig zu und erreichte ihr Maximum im Jahr 2010.

Im Pflanzjahr 1975 wiesen die Föhren im unverbauten Teil des Stillbergs bereits eine höhere Baumhöhe auf ( $P_{1975} = 6.5e-03$ ). Während für die folgenden zwei Aufnahmen keine Unterschiede beobachtet werden konnten, lösten zwischen 1985 und 1995 die durch Lawinenerwerke geschützten Bergföhren ihre ungeschützten Nachbarn mit signifikant höheren Baumhöhen ab ( $P_{1985} = 5.1e-03$ ;  $P_{1990} = 0.015$ ;  $P_{1995} = 4.6e-04$ ). Für die Jahre 2005 und 2010 konnten wiederum keine Unterschiede festgestellt werden.

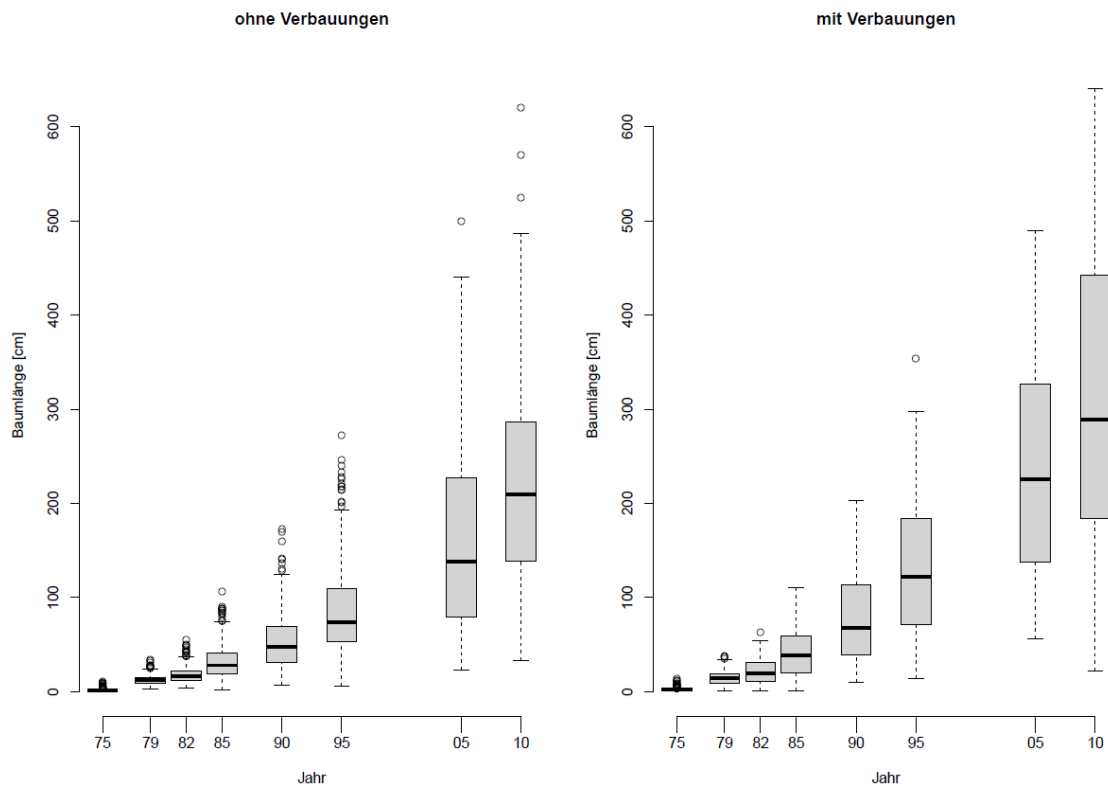


Abb. 11: Baumlängenentwicklung der Lärche zwischen 1975 und 2010 im nicht verbauten und verbauten Teil der Aufforstung.

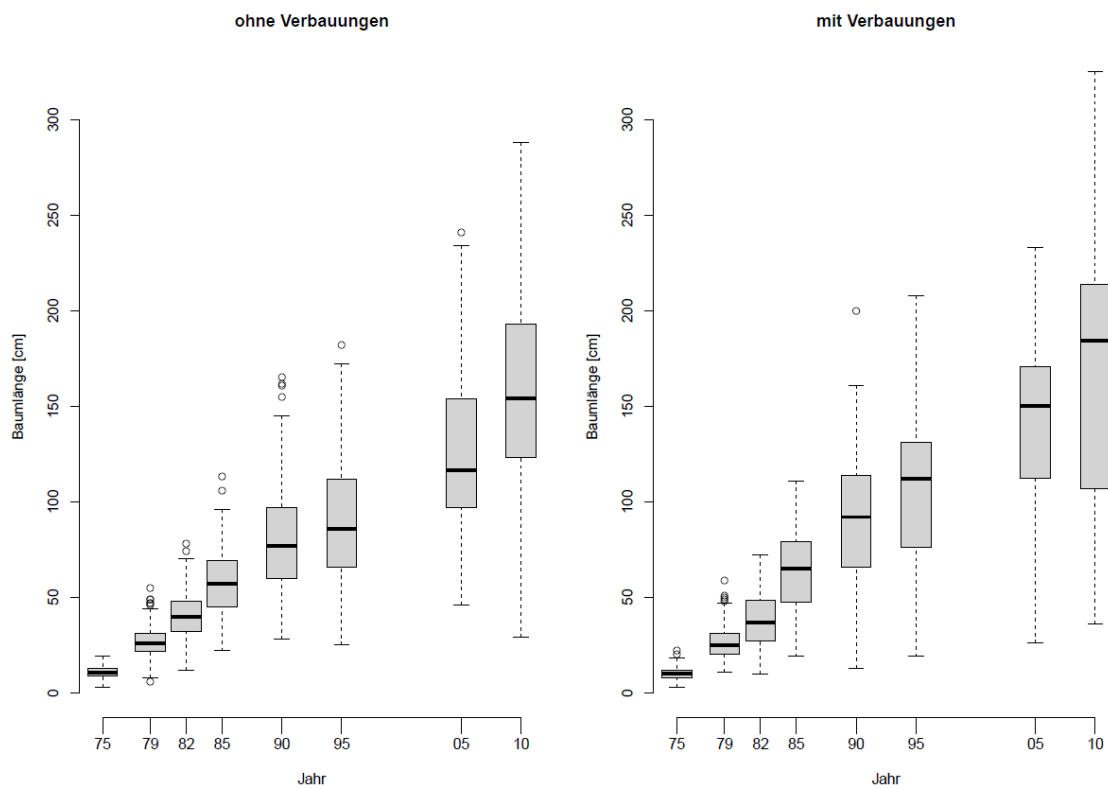
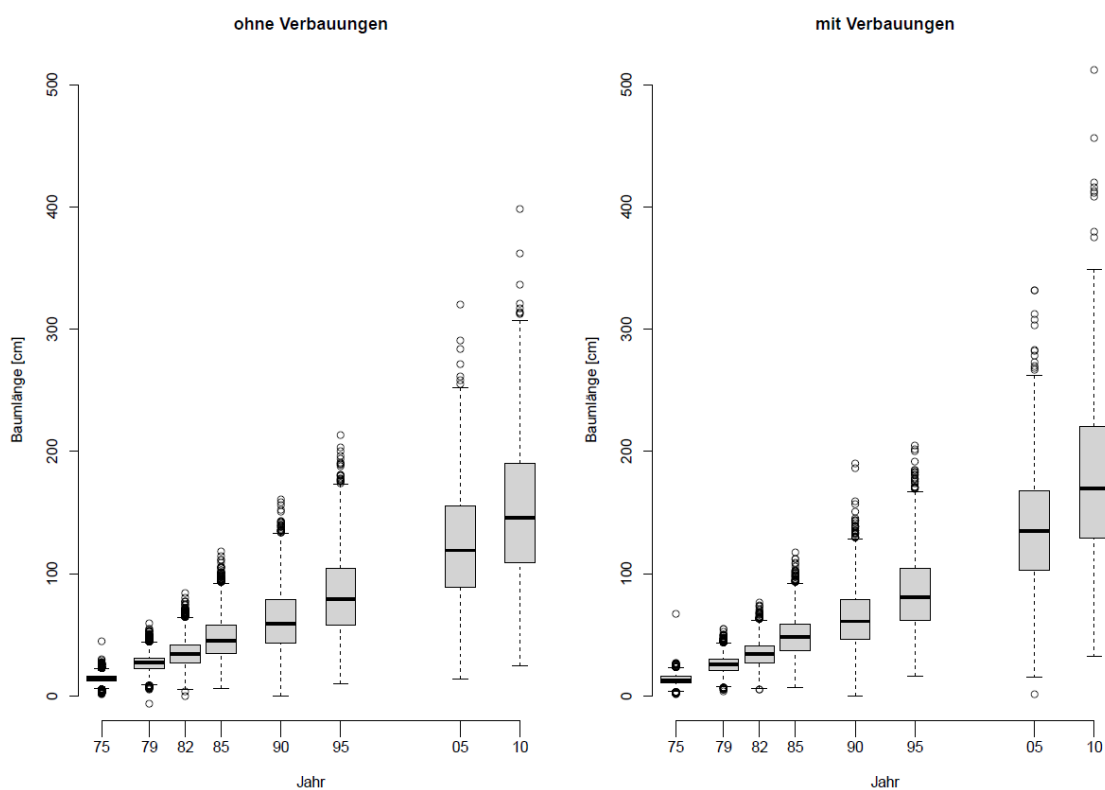


Abb. 12: Baumlängenentwicklung der Bergföhre zwischen 1975 und 2010 im nicht verbauten und verbauten Teil der Aufforstung.

Die Arve zeigte, besonders im verbauten Teil der Aufforstung, einen leicht exponentiellen Trend im Längenwachstum zwischen 1975 und 2010 (Abb. 13). Im nichtverbauten Teil war der Trend nur sehr leicht exponentiell und könnte auch als linear beschrieben werden. Gleich wie bei der Lärche und der Bergföhre nahm die Varianz der Baumhöhen mit zunehmendem Alter stetig zu. Vom Pflanzjahr bis zur Aufnahme im Jahr 1982 waren die Arven ohne Lawinenschutz länger als ihre geschützten Nachbarn ( $P_{1975} = 2.2e-16$ ;  $P_{1979} = 2.2e-16$ ;  $P_{1982} = 3.3e-03$ ). Ab 1985 wiesen die Arven im Teil mit Lawinenverbauungen, mit Ausnahme des Aufnahmejahres 1995, höhere Baumhöhen auf ( $P_{1985} = 3.4e-07$ ;  $P_{1990} = 0.02$ ;  $P_{2005} = 2.9e-06$ ;  $P_{2010} = 7.9e-11$ ).



**Abb. 13: Baumhöhenentwicklung der Arve zwischen 1975 und 2010 im nicht verbauten und verbauten Teil der Aufforstung.**

### 4.1.2 Überleben

Das Überleben seit der Pflanzung im Jahr 1975 von Lärche, Bergföhre und Arve auf dem Stillberg war stark unterschiedlich. Während bei der Lärche nach 35 Jahren noch 50,4% der Individuen überlebt haben, zählen die Bergföhren heute nur noch 8,4% und die Arven 3,1% ihres Anfangsbestands. Vergleicht man das Überleben der Bäume im Aufforstungsteil mit und ohne Lawinenverbauungen, so fällt auf, dass die Lärche und die Bergföhre ohne Lawinenschutz jeweils besser überlebt haben als ihre geschützten Nachbarn. Die Arve hingegen hatte prozentual mehr Überlebende im verbauten Teil der Aufforstung (Tabelle 3).

**Tabelle 3: Überleben von Lärche, Bergföhre und Arve im nichtverbauten (nv) und verbauten (v) Teil der Stillbergaufforstung, aufgeteilt nach den vier Höhenstufen im Jahr 2010.**

Höhenstufe	Lärche <sup>a</sup>		Föhre <sup>a</sup>		Arve <sup>b</sup>	
	nv (%)	v (%)	nv (%)	v (%)	nv (%)	v (%)
1	57.6	25.6	4.8	0	0.6	0
2	35.2	60	4	12.8	2.3	2.8
3	58.4	57.6	16.8	6.4	4.7	5.8
4	52.8	56	16.8	4.8	3.2	5.4
Total	51	49.8	10.6	6	2.7	3.5

<sup>a</sup> nur Daten von Stichprobe verwendet

<sup>b</sup> Daten von gesamten Untersuchungsgebiet verwendet

Berücksichtigt man zusätzlich die Höhe über Meer, so wird ersichtlich, dass je nach Höhenstufe der Einfluss der Verbauungen auf das Überleben der Bäume sehr unterschiedlich ist (Tabelle 3). In der obersten Höhenstufe überlebten alle drei Baumarten ohne Lawinenverbauungen besser als mit Lawinenverbauungen. Im verbauten Teil dieser Höhenlage haben von der Bergföhre und der Arve gar keine Individuen überlebt. Die zweite Höhenstufe zeigte dagegen genau ein umgekehrtes Muster, wobei das Überleben aller drei Baumarten im verbauten Teil der Aufforstung besser war als im unverbauten Teil. Die Bergföhre scheint besonders in der dritten und der untersten Höhenstufe ohne Lawinenverbauungen viel besser zu überleben als wenn sie geschützt ist. Dieser Unterschied ist im untersten Teil der Aufforstung mehr als dreimal so groß. Nur noch kleine Unterschiede wies die Lärche in den untersten zwei Höhenstufen auf, wobei sie in der dritten mit Lawinenverbauungen und in der vierten ohne Lawinenverbauungen besser überlebte. Mit Ausnahme von der obersten Höhenstufe überlebte die Arve im verbauten Teil der Aufforstung besser. Die Unterschiede waren jedoch nur gering.

### 4.1.3 Stammdurchmesser und Baumlängen

Durchmesser- und Höhenwachstum sind bei allen drei Baumarten stark korreliert, was in Abb. 14 durch die lineare Regression gezeigt werden kann. Es ist klar ersichtlich, dass sich die Regressionslinie der Lärche signifikant von der Föhre und Arve unterscheidet, wobei die Korrelation bei allen Arten positiv ist. Das Bestimmtheitsmass  $R^2$ , welches den Anteil der durch das Modell erklärten Varianz widerspiegelt, ist bei allen drei linearen Regressionen sehr hoch. Es beträgt  $R^2=0.76$  für die Lärche,  $R^2=0.55$  für die Föhre und  $R^2=0.47$  für die Arve.

Die unterschiedlichen Regressionsgeraden zeigen, dass die Arve und die Föhre tendenziell einen höheren Durchmesser im Verhältnis zur Baumlänge hatten als die Lärche, welche ihrerseits länger und schlanker war (Abb. 14). Dieser Trend kann ebenfalls durch den „Schlankheitsgrad“ gemessen werden (Horak 2004), welcher sich aus dem Verhältnis der Baumlänge zum Durchmesser an der Stammbasis zusammensetzt.

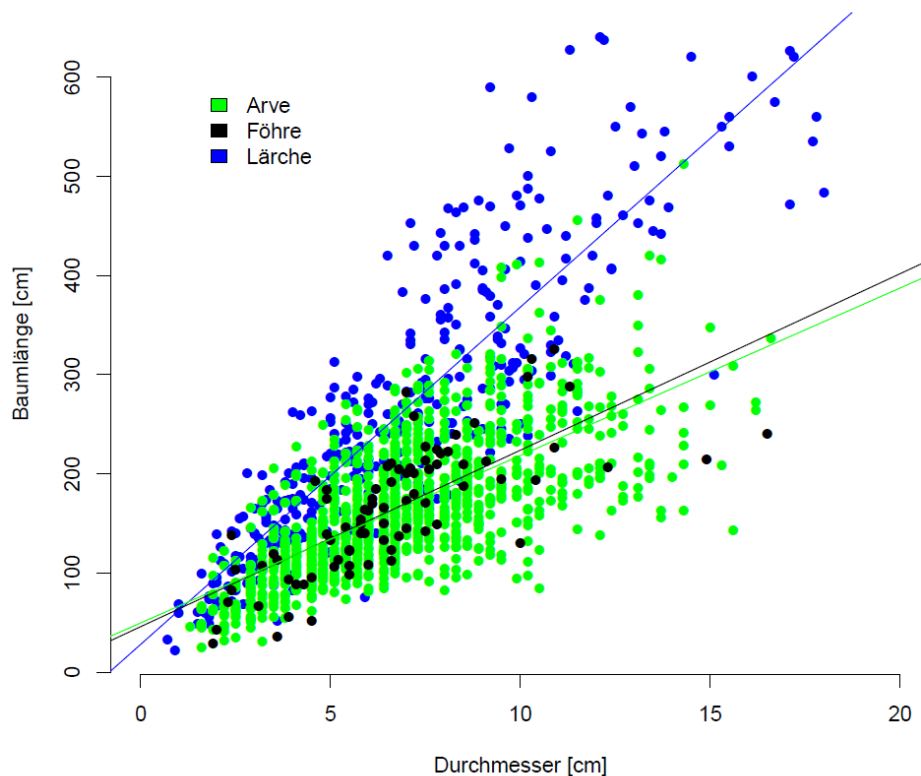


Abb. 14: Verhältnis von Baumlänge und Stammdurchmesser von Arve, Föhre und Lärche im 2010.

Im Jahr 1999 hatte die Lärche im Untersuchungsgebiet Stillberg einen durchschnittlichen Schlankheitsgrad von 40, und die Arve einen Wert von 25 (Vanomsen 1999). Vier Jahre später betrug der Schlankheitsgrad der Arve nur noch 22, wobei sich der Wert der Lärche auf 41 erhöhte (Horak 2004).

Die Lärche hatte im Jahr 2010 einen durchschnittlichen Schlankheitsgrad von 38, ein etwas tieferer Wert als bei den vorhergehenden Aufnahmen. Der Trend, welcher zwischen 1999 und 2003 beobachtet wurde, konnte also nicht bestätigt werden. Dasselbe zeigte sich bei der Arve, welche einen durchschnittlichen Schlankheitsgrad von 24 hatte. Die Bergföhre, die bei den Untersuchungen von Vanomsen (1999) und Horak (2004) nicht berücksichtigt wurde, hatte im Jahr 2010 einen Schlankheitsgrad von 25. Sie scheint also eine ähnliche Wachstumsstrategie wie die Arve zu haben.

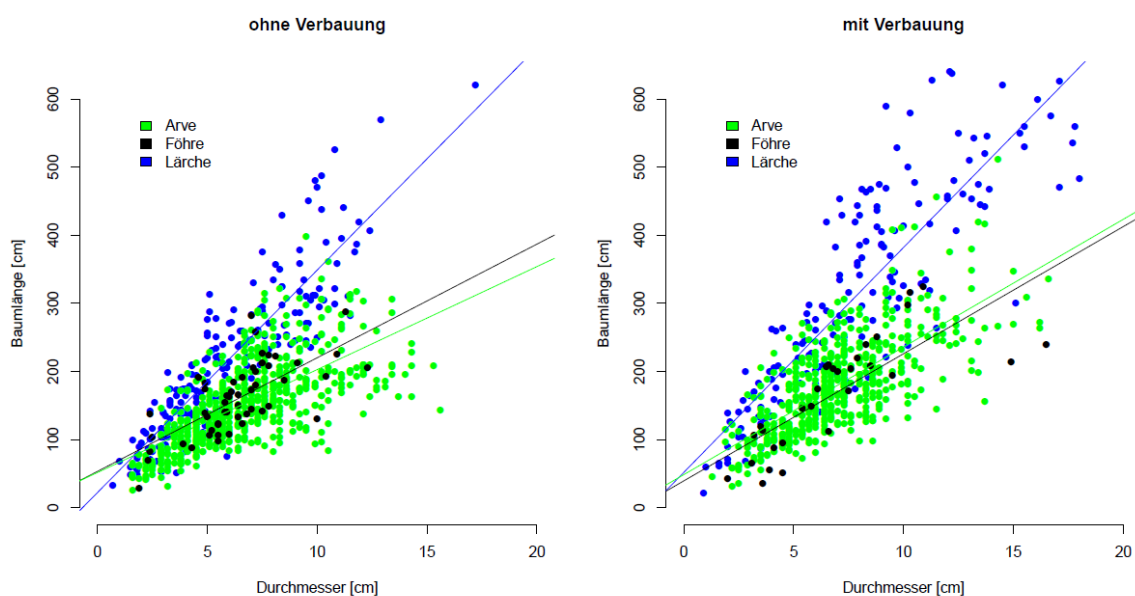
Die im Jahr 2010 noch überlebenden Arven erreichten eine durchschnittliche Baumlänge von 165 cm, die Bergföhren von 163 cm und die Lärchen von 261 cm. Dabei gilt zu beachten, dass die Arve die einzige Baumart ist, von der alle lebenden Bäume aufgenommen wurden. Bei den anderen zwei Baumarten wurden nur die Bäume der Stichprobe verwendet. Wird zusätzlich zur Baumart der Faktor Lawinenverbauungen berücksichtigt, so fällt auf, dass alle drei Baumarten im verbauten Teil der Aufforstung einen höheren durchschnittlichen Stammdurchmesser und eine höhere durchschnittliche Baumlänge aufwiesen (Tabelle 4).

**Tabelle 4: Durchschnittlicher Durchmesser, durchschnittliche Baumlänge und Schlankheitsgrad von Lärche, Föhre und Arve im Jahr 2010 im Teil ohne/mit Lawinenverbauungen mit Standartabweichung in Klammern.**

		ohne Verbauung	mit Verbauung
Lärche	Durchmesser	6 ( $\pm$ 2.8)	7.8 ( $\pm$ 2.9)
	Baumlänge	218 ( $\pm$ 89)	309 ( $\pm$ 97)
	Schlankheitsgrad	36	39
Föhre	Durchmesser	6.4 ( $\pm$ 2.7)	6.9 ( $\pm$ 2.9)
	Baumlänge	160 ( $\pm$ 83)	168 ( $\pm$ 101)
	Schlankheitsgrad	25	24
Arve	Durchmesser	6.7 ( $\pm$ 2.8)	7 ( $\pm$ 2.9)
	Baumlänge	153 ( $\pm$ 93)	179 ( $\pm$ 89)
	Schlankheitsgrad	23	25

Diese Unterschiede waren bei der Lärche - mit 1.8cm Durchmesser- und 91cm Längenunterschied - am deutlichsten sichtbar. Bei der Föhre unterschieden sich die Durchmesser nur um 0.5cm und bei der Arve sogar nur um 0.3cm. Allerdings war der BaumLängenunterschied bei der Arve mit 29cm deutlich höher als derjenige der Föhre, welcher mit nur 8cm nicht signifikant war (siehe Kapitel 4.1.1). Dementsprechend war die Föhre auch die einzige der drei Baumarten, welche im unverbauten Teil einen höheren durchschnittlichen Schlankheitsgrad aufwies als im verbauten Teil der Aufforstung. Die Standardabweichungen der BaumLängen und Stammdurchmesser sind - mit Ausnahme der BaumLängen der Arven - im Aufforstungsteil mit Verbauungen grösser.

Die Unterschiede der durchschnittlichen BaumLängen und Baumdurchmesser sind auch graphisch gut zu erkennen (Abb. 15). Es fällt auf, dass sich die längsten und dicksten Exemplare der drei Baumarten jeweils im verbauten Teil der Aufforstung befanden. Bei der Lärche beispielsweise erreichten im unverbauten Teil nur gerade drei Bäume einen Stammdurchmesser von mindestens 12cm. Im verbauten Teil der Aufforstung war dieser Wert - mit 29 Exemplaren von mindestens 12cm Durchmesser - deutlich höher. Die Föhren und Arven zeigten ein ähnliches Muster, welches jedoch weniger stark ausgeprägt war. Bei der Arve ist besonders der Längenunterschied zwischen dem verbauten und unverbauten Teil der Aufforstung zu erwähnen.



**Abb. 15:** Verhältnis von BaumLänge und Stammdurchmesser von Arve, Föhre und Lärche im 2010, unterteilt nach den Aufforstungsteilen ohne und mit Lawinenverbauung.

#### 4.1.5 Einfluss der Höhenstufen auf die Baumlänge

Die Baumängen der Lärche unterschieden sich in der ersten Höhenstufe nicht zwischen dem verbauten und dem unverbauten Teil der Aufforstung (Abb. 16). In den drei tiefer liegenden Höhenstufen waren die Lärchen im verbauten Teil höher (2. Höhenstufe:  $P = 0.0006$ ; 3. Höhenstufe:  $P = 0.002$ ). Sogar hoch signifikant war der Unterschied in der untersten Höhenstufe ( $P = 4.8e-07$ ). Während die durchschnittliche Baumänge der Lärche im verbauten Teil der Aufforstung mit der Meereshöhe sank, war sie im unverbauten Teil in der ersten Höhenstufe grösser als in den zwei darunter liegenden Höhenstufen.

Nur in der dritten Höhenstufe waren die Bergföhren im verbauten Teil der Aufforstung signifikant höher als im unverbauten Teil ( $P = 0.0012$ ) (Abb. 17). In den drei anderen Höhenstufen waren keine Unterschiede feststellbar, wobei im verbauten Teil der ersten Höhenstufe keine lebenden Föhren in der Stichprobe vorhanden waren. Die dritte Höhenstufe wies für die Bergföhren ohne Lawinenschutz etwas tiefere Baumängen auf als die zwei höher liegenden Stufen. Somit korreliert die Baumänge nicht schön mit der Meereshöhe.

Die Baumängen der durch Lawinenwerke geschützten Arven zeigten eine negative Korrelation mit der Meereshöhe (Abb. 18). In den beiden unteren Höhenstufen waren diese Arven höher als diejenigen im unverbauten Teil (3. Höhenstufe:  $P = 0.016$ ). In der untersten Höhenstufe war der Unterschied sogar hoch signifikant ( $P = 2.28e-16$ ). Keine Unterschiede konnten in den oberen beiden Höhenstufen entdeckt werden, wobei im verbauten Teil der ersten Höhenstufe keine lebenden Arven in der Stichprobe vorhanden waren.

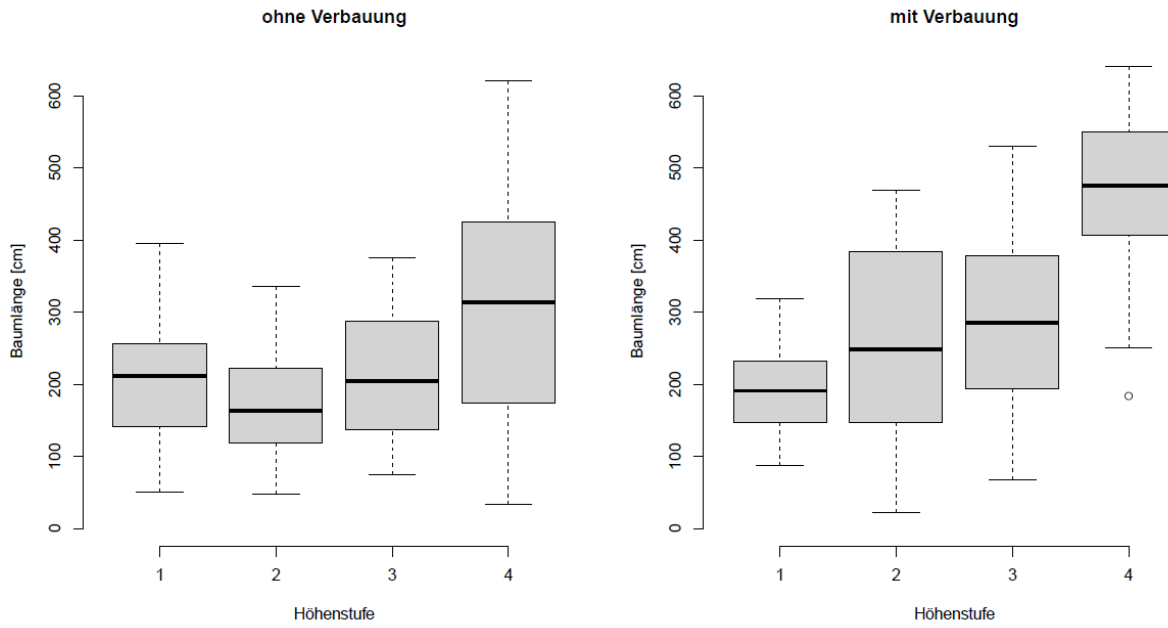


Abb. 16: Baumlängen der Lärche im Aufforstungsteil ohne und mit Lawinerverbauungen unterteilt nach Höhenstufen.

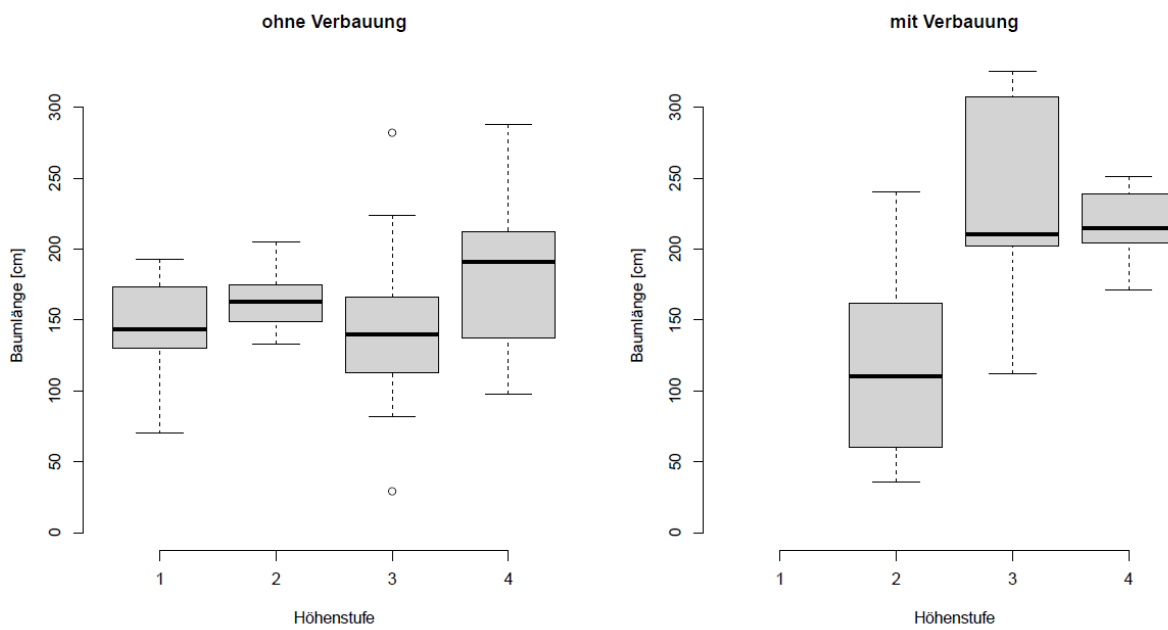


Abb. 17: Baumlängen der Bergföhre im Aufforstungsteil ohne und mit Lawinerverbauungen unterteilt nach Höhenstufen.

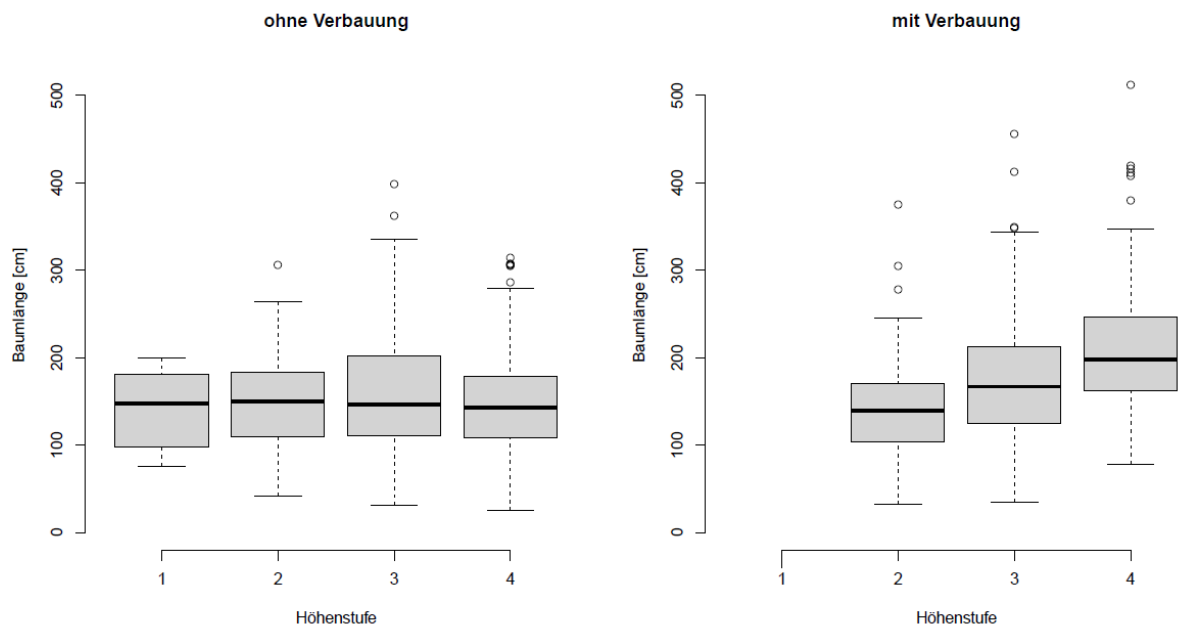


Abb. 18: Baumlängen der Arve im Aufforstungsteil ohne und mit Lawinerverbauungen unterteilt nach Höhenstufen.

#### 4.1.4 Einfluss der Höhenstufen auf den Stammdurchmesser

Die Lärche zeigte nur in der vierten Höhenstufe einen Unterschied im Stammdurchmesser zwischen dem verbauten und dem unverbauten Teil der Aufforstung (Abb. 19). Sie waren im Teil mit Lawinenverbauungen markant dicker ( $P = 1.7e-07$ ). In den höheren Lagen unterschied sich der Durchmesser der Lärchen wiederum nicht zwischen dem verbauten und dem unverbauten Teil. Auf der gesamten Breite der Versuchsfläche in der obersten Höhenstufe waren die Stammdurchmesser dicker als in der darunterliegenden zweiten Höhenstufe, im unverbauten Teil sogar dicker als in der dritten Höhenstufe.

Die Stammdurchmesserverteilung der Bergföhre zeigte ein komplett anderes Muster als das der Lärche (Abb. 20). Im verbauten Teil der Aufforstung waren die Föhren in der dritten Höhenstufe dicker als im unverbauten Teil ( $P = 0.002$ ). In den drei anderen Höhenstufen waren keine Unterschiede feststellbar, wobei im verbauten Teil der ersten Höhenstufe keine lebenden Föhren in der Stichprobe vorhanden waren. Markant ist der Unterschied zwischen der zweiten und dritten Höhenstufe im Aufforstungsteil mit Verbauungen. Die Bergföhren waren in der dritten Höhenstufe deutlich dicker als in der zweiten. Im unverbauten Teil der Aufforstung waren keine grossen Unterschiede zwischen den Höhenstufen erkennbar.

Die Arven waren in der zweiten Höhenstufe im unverbauten Teil der Aufforstung dicker als im verbauten Teil ( $P = 0.0022$ ) (Abb. 21). In der vierten Höhenstufe hingegen waren die Arven im verbauten Teil der Aufforstung sogar deutlich dicker als im unverbauten Teil ( $P = 1.181e-06$ ). Keine Unterschiede konnten in der dritten und ersten Höhenstufe gefunden werden, wobei im verbauten Teil der ersten Höhenstufe gar keine lebenden Arven in der Stichprobe vorhanden waren.

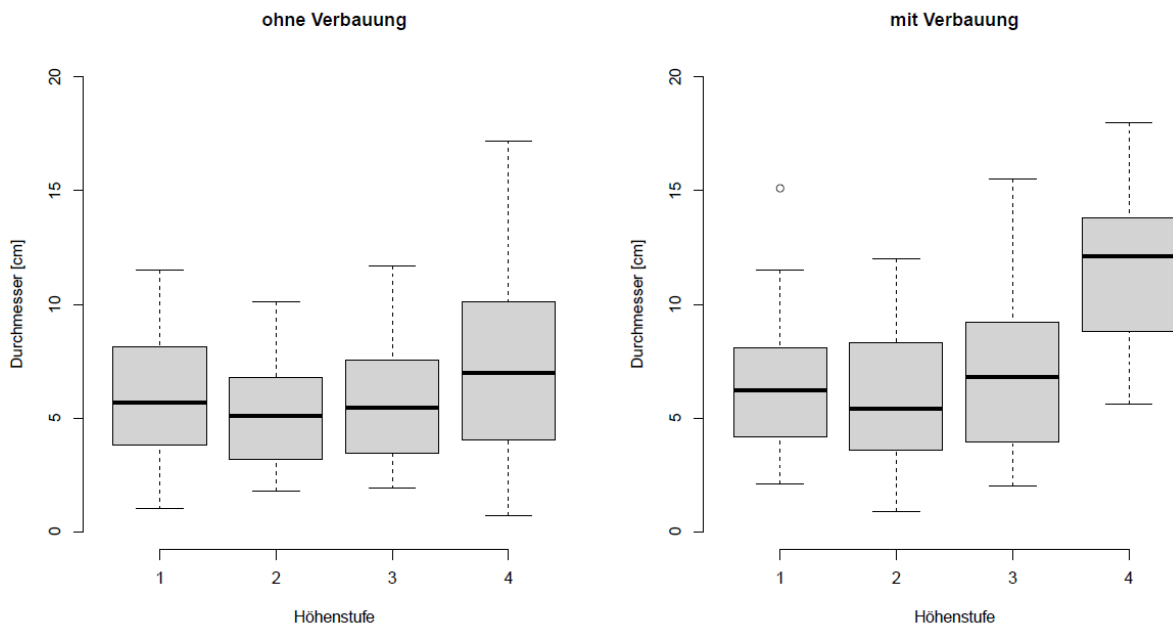


Abb. 19: Stammdurchmesser der Lärche im Aufforstungsteil ohne und mit Lawinerverbauungen, unterteilt nach Höhenstufen.

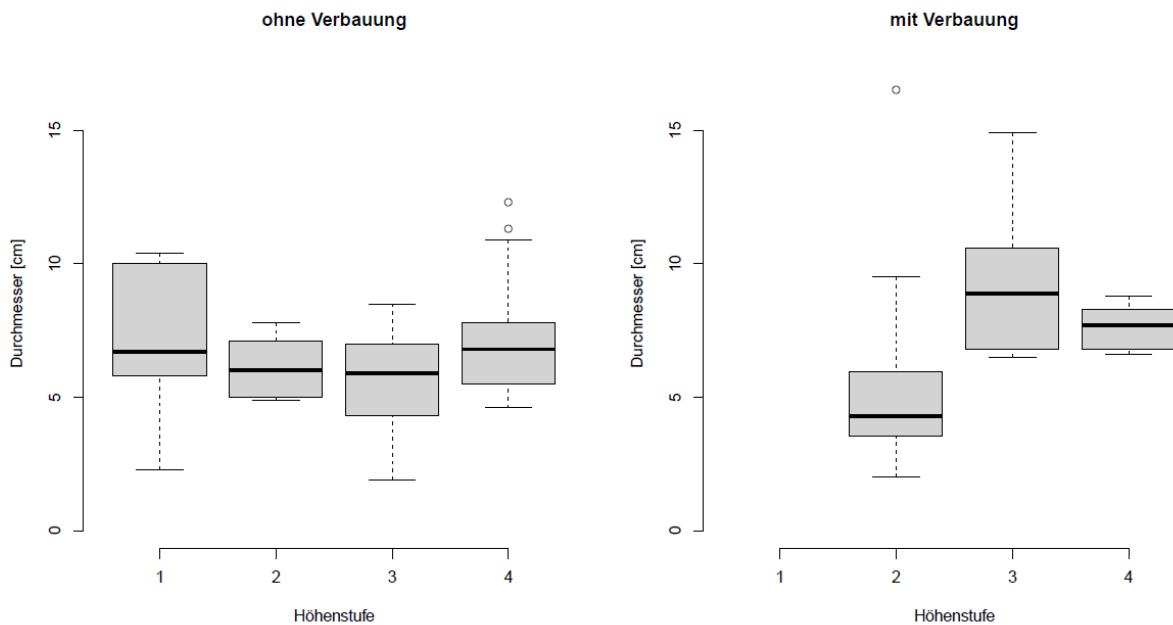


Abb. 20: Stammdurchmesser der Bergföhre im Aufforstungsteil ohne und mit Lawinerverbauungen unterteilt nach Höhenstufen.

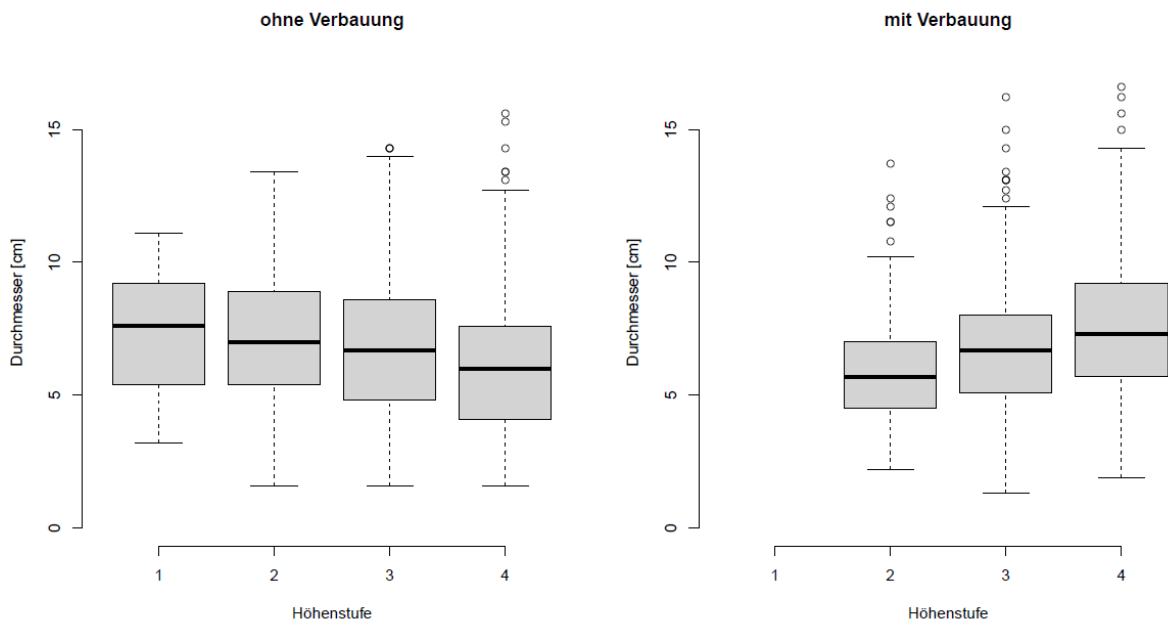


Abb. 21: Stammdurchmesser der Arve im Aufforstungsteil ohne und mit Lawinerverbauungen unterteilt nach Höhenstufen.

## 4.2 Schutzwirksamkeit

### 4.2.1 Maximale 30-jährige Schneehöhe (Szenario 1)

Bei maximaler 30-jähriger Schneehöhe erfüllten im Jahr 2010 nur 33 Lärchen das Kriterium A (Abb. 22) und 68 Lärchen das Kriterium B (Abb. 23). Die Föhren und Arven der Stichprobe waren auf der gesamten Versuchsfläche nicht lang genug um eines der beiden Kriterien zu erfüllen.

Während das Kriterium A, mit Ausnahme von einer Lärche, nur von Bäumen in der untersten Höhenstufe erreicht wurde, konnte das Kriterium B auf dem ganzen Höhengradienten von Lärchen erreicht werden. Der prozentuale Anteil der schutzwirksamen Lärchen nimmt allerdings auch unter dem Kriterium B mit der Höhe ab (Tabelle 5).

64% der nach Kriterium A als schutzwirksam geltenden Lärchen befanden sich im verbauten Teil der Aufforstung. Nach Kriterium B befanden sich sogar 66% der schutzwirksamen Lärchen im durch Lawinenverbauungen geschützten Teil. Im steilsten Teil der Aufforstung, also in den Höhenstufen zwei und drei, war der Unterschied besonders markant. Es befanden sich hier nur gerade 7% der schutzwirksamen Bäume (Kriterium B) im nicht verbauten Teil der Aufforstung.

Die Prognose der zukünftigen Schutzwirksamkeit zeigte (Tabelle 5), dass im Jahr 2015 noch nicht genügend viele Arven schutzwirksam sein werden. Auch im Jahr 2020 könnten höchstens im unverbauten Teil der vierten Höhenstufe einige schutzwirksame Exemplare (Kriterium B) vorkommen. Die Föhre wird unter Kriterium A erst im Jahr 2020 im unverbauten Teil der untersten Höhenstufe einige schutzwirksame Bäume aufweisen. Das Kriterium B allerdings, wird im Jahr 2020 schon von mehreren Exemplaren der unteren zwei Höhenstufen erfüllt werden.

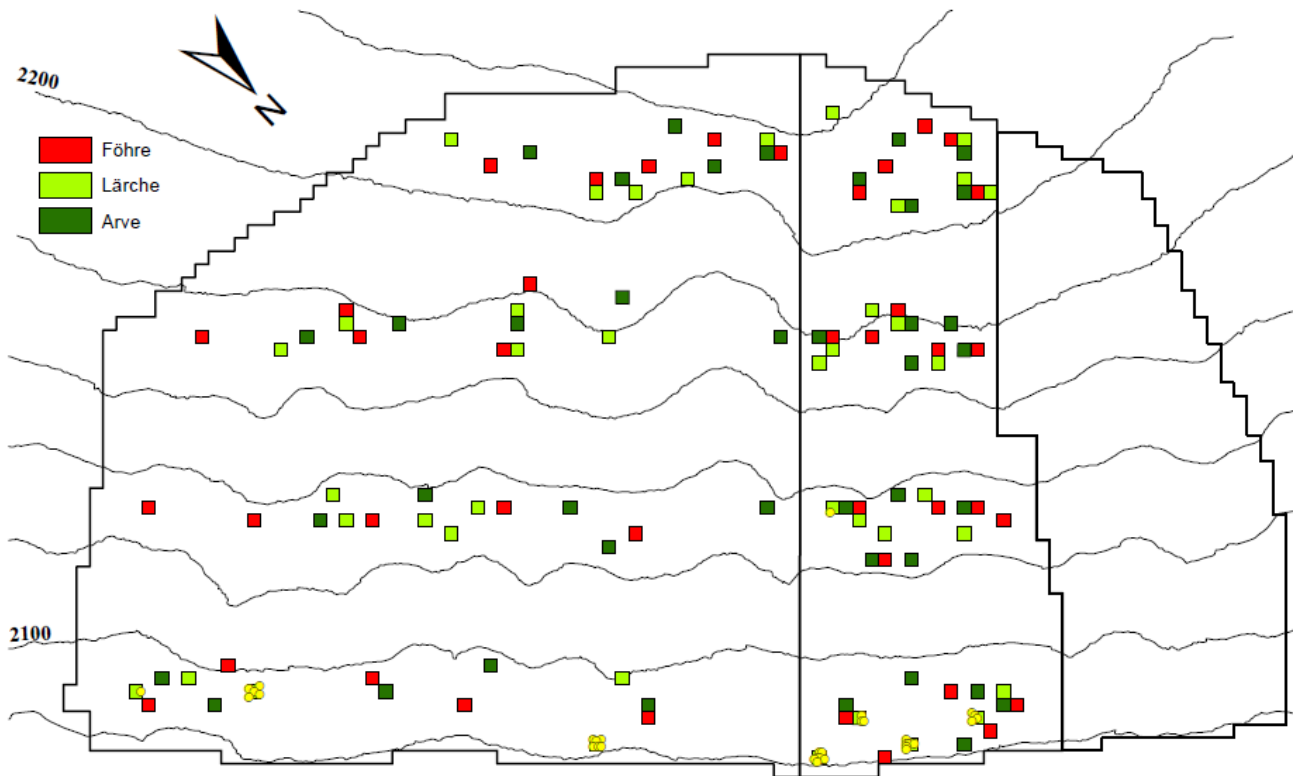


Abb. 22: Schutzwirksame Bäume (gelbe Punkte) im Jahr 2010, bei maximaler 30-jähriger Schneehöhe, unter dem Kriterium A (Baumlänge  $\geq$  doppelte maximale Schneehöhe), auf der Versuchsfläche Stillberg.

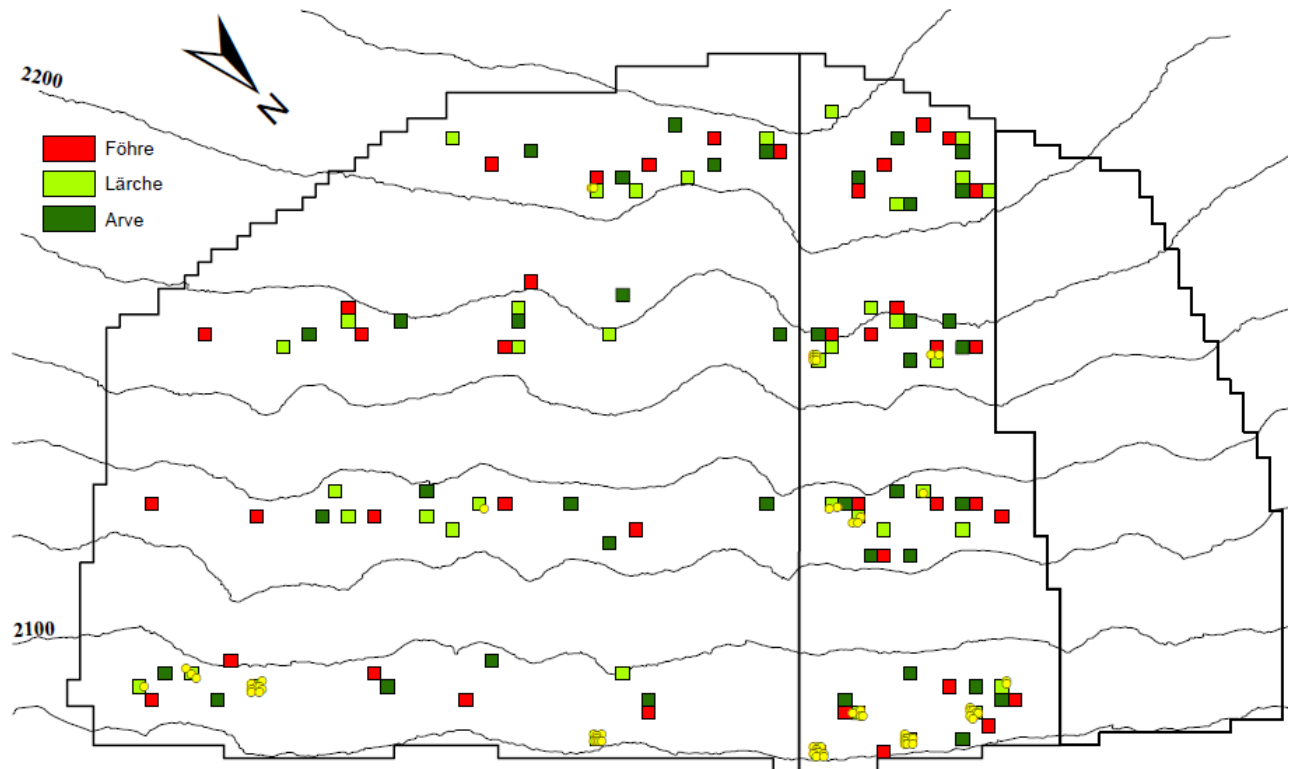


Abb. 23: Schutzwirksame Bäume (gelbe Punkte) im Jahr 2010, bei maximaler 30-jähriger Schneehöhe, unter dem Kriterium B (Baumlänge  $\geq$  eineinhalbfache maximale Schneehöhe), auf der Versuchsfläche Stillberg.

Unter dem Kriterium A wird die Lärche erst im Jahr 2020 auf dem gesamten Höhengradienten schutzwirksame Exemplare bilden können (Tabelle 5). Diese werden sich in der zweiten und dritten Höhenstufe (steilster Teil) nur im verbauten Teil der Aufforstung und in der obersten Höhenstufe nur im unverbauten Teil der Aufforstung befinden. Unter Kriterium B werden im Jahr 2020 sogar im verbauten Teil der ersten und im unverbauten Teil der zweiten und dritten Höhenstufe schutzwirksame Lärchen stehen. Im Jahr 2015 werden in der untersten Höhenstufe unter Kriterium A bereits über 2/3 und unter Kriterium B sogar 3/4 der lebenden Lärchen genügend lang sein um als schutzwirksam zu gelten.

**Tabelle 5: Schutzwirksamkeit bei maximaler 30-jähriger Schneehöhe: Prozentualer Anteil von schutzwirksamen Bäumen, deren Baumhöhen das Kriterium (eineinhalbfache maximale Schneehöhe; doppelte maximale Schneehöhe) erfüllen, zur Anzahl lebender Bäume, für die drei Jahre 2010, 2015 und 2020. Es wird zwischen den drei Baumarten Lärche, Bergföhre und Arve, sowie zwischen der Höhenstufe und dem Verbauungszustand unterschieden (nv = nicht verbauter Teil der Aufforstung; v = verbauter Teil der Aufforstung). Stichprobengröße: 105 Lärchen, 47 Bergföhren, 16 Arven.**

Baumart	Kriterium	Jahr	1. Höhenstufe		2. Höhenstufe		3. Höhenstufe		4. Höhenstufe	
			nv	v	nv	v	nv	v	nv	v
Lärche	eineinhalbfache max. Schneehöhe	2010	0	0	0	14	0	25	69	67
		2015	23	0	0	29	30	58	77	73
		2020	46	8	7	43	50	67	85	80
	doppelte max. Schneehöhe	2010	0	0	0	0	0	0	46	53
		2015	0	0	0	14	0	17	69	67
		2020	17	0	0	29	0	50	69	71
Föhre	eineinhalbfache max. Schneehöhe	2010	0	0	0	0	0	0	0	0
		2015	0	0	0	0	0	0	9	0
		2020	0	0	0	0	13	50	18	33
	doppelte max. Schneehöhe	2010	0	0	0	0	0	0	0	0
		2015	0	0	0	0	0	0	0	0
		2020	0	0	0	0	0	0	9	0
Arve	eineinhalbfache max. Schneehöhe	2010	0	0	0	0	0	0	0	0
		2015	0	0	0	0	0	0	0	0
		2020	0	0	0	0	0	0	25	0
	doppelte max. Schneehöhe	2010	0	0	0	0	0	0	0	0
		2015	0	0	0	0	0	0	0	0
		2020	0	0	0	0	0	0	0	0

**Schutzwirksamkeit von potentiellen Rotten (Szenario 1)**

Unter dem Kriterium der doppelten maximalen Baumlänge erreichten nur die potentiellen Lärchenrotten der untersten Höhenstufe (Zone VII und VIII) eine mindestens „genügende“ Bewertung (Tabelle 6). Im verbauten Teil war die Schutzwirksamkeit sogar „sehr gut“. Die Lärchen der Zone VI konnten dagegen nur eine „sehr schlechte“ Schutzwirksamkeit bieten.

Bei dem Kriterium der eineinhalbfachen maximalen Baumlänge konnten sich die Lärchenrotten der Zonen VI und VII jeweils auf die Bewertungen „genügend“ und „gut“ verbessern (Tabelle 6). Die Schutzwirksamkeit der Lärchenrotte aus Zone IV war „schlecht“, diejenigen aus den Zonen I und V sogar „sehr schlecht“.

Die Bergföhren und Arven konnten unter Szenario 1 in keiner Zone der Aufforstung schutzwirksame Rotten bilden.

**Tabelle 6: Bewertung der Schutzwirksamkeit von potentiellen Rotten unter Szenario 1, aufgeteilt nach den Kriterien A (doppelte maximale Baumlänge) und B (eineinhalbfache Baumlänge) für die acht Zonen der Aufforstung.**

Zone	Kriterium A			Kriterium B		
	Lärche	Föhre	Arve	Lärche	Föhre	Arve
I	-	-	-	sehr schlecht	-	-
II	-	-	-	-	-	-
III	-	-	-	-	-	-
IV	-	-	-	schlecht	-	-
V	-	-	-	sehr schlecht	-	-
VI	sehr schlecht	-	-	genügend	-	-
VII	genügend	-	-	gut	-	-
VIII	sehr gut	-	-	sehr gut	-	-

#### **4.2.2 Durchschnittliche maximale Schneehöhe (Szenario 2)**

Bei durchschnittlicher maximaler Schneehöhe, welche einen durchschnittlichen Winter simulierte, erfüllten im Jahr 2010 bereits 128 Bäume (122 Lärchen, 5 Föhren, 1 Arve) das Kriterium A (Abb. 24) und sogar 200 Bäume (181 Lärchen, 15 Föhren, 4 Arven) das Kriterium B (Abb. 25). Die grundsätzlichen Muster, beispielsweise dass die Anzahl schutzwirksamer Bäume mit der Höhe abnahm, waren ähnlich wie für das Szenario 1. Allerdings haben insgesamt mehr Bäume die Kriterien A und B erfüllt als bei maximaler 30-jähriger Schneehöhe. Während die Lärchen unter beiden Kriterien in allen acht Zonen der Versuchsaufforstung schutzwirksame Bäume bilden konnten (Abb. 24 und Abb. 25), hatten die anderen zwei Baumarten immer noch deutlich mehr Mühe. Die Arven beschränkten sich hauptsächlich auf die unverbauten Zonen und die Föhren auf die verbauten Zonen der untersten zwei Höhenstufen (Abb. 25).

Anders als bei Szenario 1 befanden sich, bei Betrachtung aller drei Bauarten, die gleiche Anzahl schutzwirksamer Bäume im verbauten und im unverbauten Teil der Aufforstung (Abb. 24). Zwischen den Höhenstufen und den Baumarten gab es jedoch Unterschiede. In der obersten Höhenstufe war die Anzahl schutzwirksamer Bäume im verbauten, in der zweiten Höhenstufe im unverbauten Teil der Aufforstung grösser (Abb. 24 und Abb. 25). In der dritten und untersten Höhenstufe waren die Unterschiede nicht mehr so markant.

Die Arve wird in Zukunft, anders als bei Szenario 1, bereits ab dem Jahr 2015 mehrere schutzwirksame Bäume in der dritten Höhenstufe bilden können und ab 2020 bereits in der obersten Höhenstufe vereinzelt schutzwirksam werden (Tabelle 7). Die Föhre wird es wahrscheinlich bis im Jahr 2015 (Kriterium B), mit noch höherer Wahrscheinlichkeit aber bis im Jahr 2020 schaffen, auf dem gesamten Höhengradienten schutzwirksame Bäume zu bilden. In den oberen zwei Höhenstufen werden sich diese allerdings hauptsächlich im unverbauten Teil der Aufforstung befinden (Tabelle 7). Gemäss Szenario 2 wird die Lärche auch in Zukunft in allen acht Zonen der Aufforstung schutzwirksame Exemplare aufweisen. Der Trend, dass sich in der obersten Höhenstufe im nichtverbauten Teil und in den unteren drei Höhenstufen im verbauten Teil der Aufforstung mehr schutzwirksame Lärchen befinden, wird sich in Zukunft bestätigen (Tabelle 7).

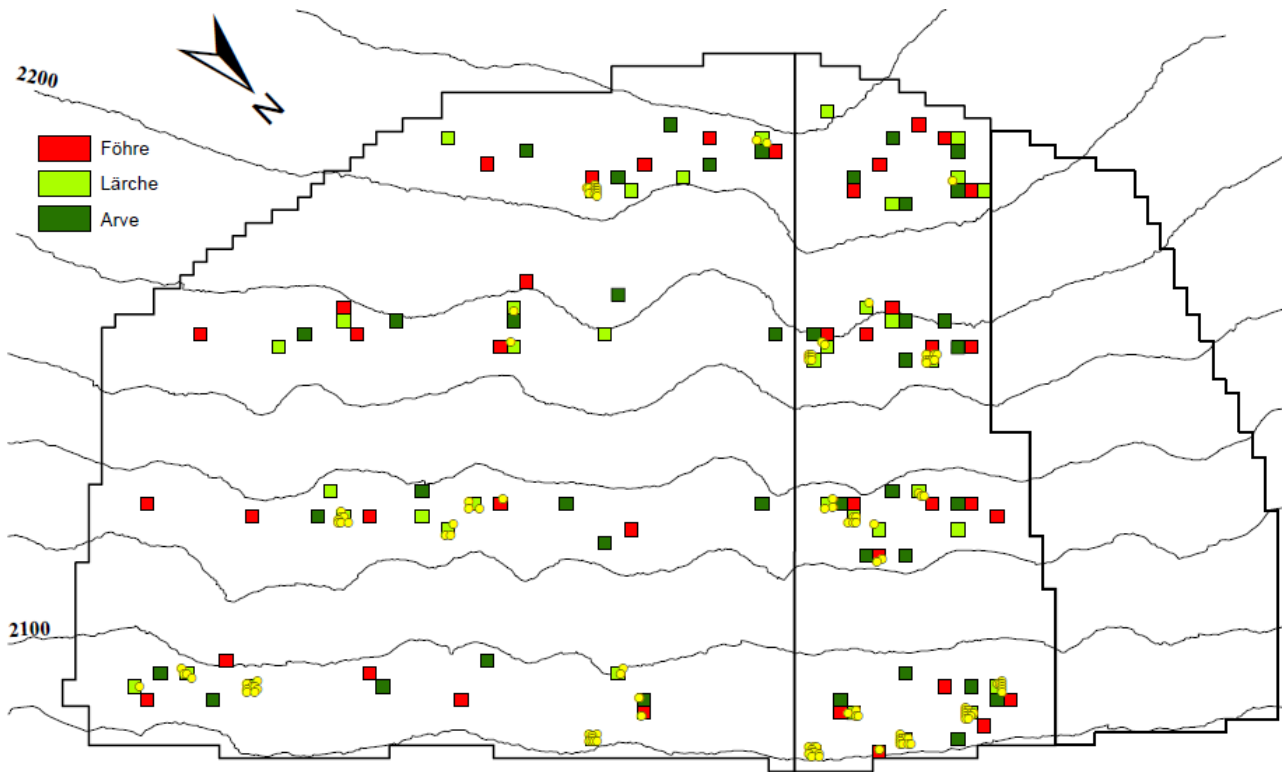


Abb. 24: Schutzwirksame Bäume (gelbe Punkte) im Jahr 2010, bei durchschnittlicher maximaler Schneehöhe, unter dem Kriterium A (Baumlänge  $\geq$  doppelte maximale Schneehöhe), auf der Versuchsfläche Stillberg.

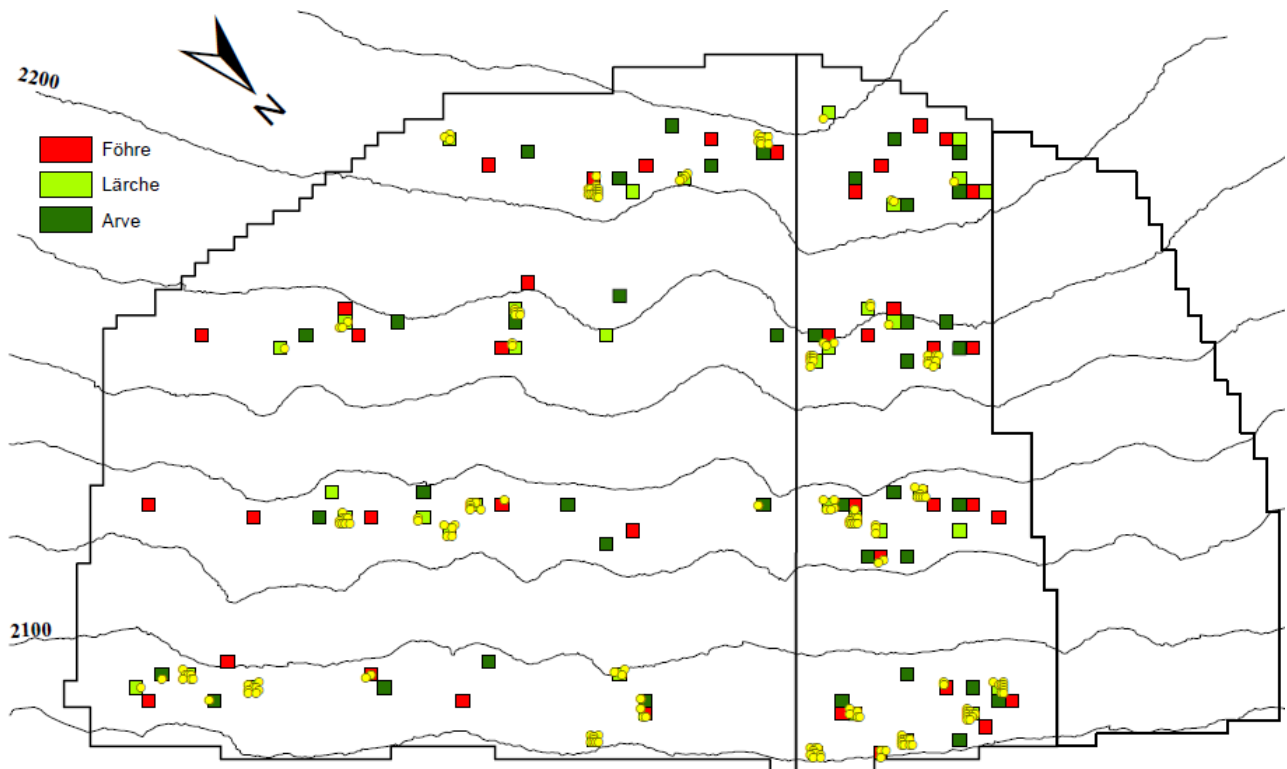


Abb. 25: Schutzwirksame Bäume (gelbe Punkte) im Jahr 2010, bei durchschnittlicher maximaler Schneehöhe, unter dem Kriterium B (Baumlänge  $\geq$  eineinhalbfache max. Schneehöhe), auf der Versuchsfläche Stillberg.

Tabelle 7: Schutzwirksamkeit bei durchschnittlicher maximaler Schneehöhe: Prozentualer Anteil von schutzwirksamen Bäumen, deren Baumhöhen das Kriterium (eineinhalbfache maximale Schneehöhe; doppelte maximale Schneehöhe) erfüllen, zur Anzahl lebender Bäume, für die drei Jahre 2010, 2015 und 2020. Es wird zwischen den drei Baumarten Lärche, Bergföhre und Arve, sowie zwischen der Höhenstufe und dem Verbauungszustand unterschieden (*nv* = nicht verbauter Teil der Aufforstung; *v* = verbauter Teil der Aufforstung). Stichprobengrösse: 105 Lärchen, 47 Bergföhren, 16 Arven.

Baumart	Kriterium	Jahr	1. Höhenstufe		2. Höhenstufe		3. Höhenstufe		4. Höhenstufe	
			<i>nv</i>	<i>v</i>	<i>nv</i>	<i>v</i>	<i>nv</i>	<i>v</i>	<i>nv</i>	<i>v</i>
Lärche	<i>eineinhalbfache max. Schneehöhe</i>	2010	46	8	13	43	50	83	84	93
		2015	84	54	33	79	70	100	100	93
		2020	92	62	53	93	90	100	100	93
	<i>doppelte max. Schneehöhe</i>	2010	15	0	0	29	20	58	84	80
		2015	38	23	13	36	50	83	92	93
		2020	69	42	27	57	70	92	100	93
Föhre	<i>eineinhalbfache max. Schneehöhe</i>	2010	20	0	0	0	13	50	36	84
		2015	20	0	20	0	38	84	55	84
		2020	20	0	80	17	38	84	55	84
	<i>doppelte max. Schneehöhe</i>	2010	0	0	0	0	13	34	0	17
		2015	20	0	0	0	13	50	36	67
		2020	20	0	20	0	13	84	36	84
Arve	<i>eineinhalbfache max. Schneehöhe</i>	2010	0	0	0	0	0	0	75	0
		2015	0	0	0	0	50	25	75	0
		2020	100	0	0	0	50	75	75	0
	<i>doppelte max. Schneehöhe</i>	2010	0	0	0	0	0	0	25	0
		2015	0	0	0	0	0	0	50	0
		2020	0	0	0	0	50	25	75	0

### *Schutzwirksamkeit von potentiellen Rotten (Szenario 2)*

Unter Kriterium A konnten die potentiellen Lärchenrotten in der untersten Höhenstufe eine „sehr gute“ Schutzwirksamkeit bieten (Tabelle 8). In den Zonen IV und VI war sie „gut“, in der Zone V „genügend“. Eine höchstens „schlechte“ Bewertung erhielten die Lärchenrotten der Zonen I, II und III. Die Bergföhren konnten in den untersten beiden Höhenstufen potentielle Rotten bilden, allerdings nur mit „sehr schlechter“ Schutzwirksamkeit. Ebenfalls eine Rotte mit „sehr schlechter“ Bewertung konnten die Arven in der Zone VII bilden.

Bei dem milderen Kriterium B erreichten die potentiellen Lärchenrotten in allen Zonen, mit Ausnahme von Zone II, eine Bewertung von „gut“ oder „sehr gut“. Die Bergföhren und Arven konnten in Zone I, bzw. in Zone V, eine zusätzliche Rotte bilden, allerdings nur mit „sehr schlechter“ Schutzwirksamkeit. In der untersten Höhenstufe konnten sich beide auf die Bewertung „schlecht“ verbessern.

**Tabelle 8: Bewertung der Schutzwirksamkeit von potentiellen Rotten unter Szenario 2, aufgeteilt nach den Kriterien A (doppelte maximale Baumlänge) und B (eineinhalbfache Baumlänge) für die acht Zonen der Aufforstung.**

Zone	Kriterium A			Kriterium B		
	Lärche	Föhre	Arve	Lärche	Föhre	Arve
I	schlecht	-	-	gut	sehr schlecht	-
II	sehr schlecht	-	-	schlecht	-	-
III	sehr schlecht	-	-	gut	-	-
IV	gut	-	-	sehr gut	-	-
V	genügend	sehr schlecht	-	gut	sehr schlecht	sehr schlecht
VI	gut	sehr schlecht	-	gut	sehr schlecht	-
VII	sehr gut	sehr schlecht	sehr schlecht	sehr gut	schlecht	schlecht
VIII	sehr gut	sehr schlecht	-	sehr gut	schlecht	-

## 5 Diskussion

### 5.1 Einfluss der Lawinerverbauungen auf Wachstum und Überleben

Die Gründe für das unterschiedliche Wachstum und Überleben der drei Baumarten zwischen dem verbauten und dem unverbauten Teil der Aufforstung konnten jeweils nicht mit gänzlicher Sicherheit bestimmt werden. In den meisten Fällen spielten wahrscheinlich viele verschiedene Faktoren eine wichtige Rolle, welche zudem miteinander korreliert sein könnten. Es ist schwierig zu beurteilen, ob die Lawinerverbauungen und die damit zusammenhängenden Unterschiede im Schneeregime, oder andere nicht berücksichtigte Faktoren der Grund für die unterschiedlichen Entwicklungen sind. Um die folgenden Erläuterungen zu überprüfen müssten weitere Untersuchungen auf dem Stillberg durchgeführt und die einzelnen Einflussfaktoren genauer getestet werden.

Für weiterführende Untersuchungen müssten jedoch die Stichproben idealerweise etwas grösser gewählt werden. Da besonders bei den zwei immergrünen Baumarten teilweise nur noch sehr wenige Exemplare überlebt haben, war die Anzahl gemessener Bäume für einige Untersuchungen eher an der unteren Grenze des Machbaren. Besonders bei der statistischen Auswertung der Baumhöhen und Stammdurchmesser der einzelnen Höhenstufen könnten die Resultate möglicherweise nicht vollkommen repräsentativ sein, da in einigen Zonen nur sehr wenige Bäume vorhanden waren.

Ebenfalls interessant wäre zudem die Aufnahme und Auswertung von Bäumen im aufgelösten verbauten Teil der Aufforstung. Es ist zu erwarten, dass sich die Effekte der durchgehenden und aufgelösten Lawinenerwerke auf das Wachstum und Überleben der drei Baumarten unterscheiden.

In den folgenden Abschnitten wird der Einfluss der durchgehenden Lawinerverbauungen auf das Überleben und das Wachstum von Lärche, Bergföhre und Arve auf dem Stillberg diskutiert.

### 5.1.1 Überleben

Über die gesamte Aufforstungsfläche gesehen scheinen die Lawinenverbauungen bei den Lärchen und den Bergföhren einen negativen Einfluss auf das Überleben gehabt zu haben. Einzig die Arven haben in den durch Lawinenverbauungen geschützten Teilen der Aufforstung besser überlebt. Werden die vier Höhenstufen einzeln beurteilt, so zeichnen sich besonders im unteren Teil der Untersuchungsfläche jedoch grundlegende Unterschiede zwischen den drei Baumarten ab. In den höheren Lagen war das Überlebensmuster der drei Arten dasselbe. Während die Arven und Bergföhren im verbauten Teil der obersten Höhenstufe überhaupt nicht mehr vorkamen, konnten sich auch von den Lärchen nur ein Viertel der ursprünglich 125 gepflanzten Exemplare der Stichprobe durchsetzen. Im unverbauten Teil dieser Höhenlage haben alle drei Baumarten besser überlebt (Tabelle 3). Dass dieser Unterschied auf die Verbauungen zurückzuführen ist, muss allerdings bezweifelt werden. Die ersten Holzrechen innerhalb der Verbauung befinden sich nämlich unterhalb von den in Zone II liegenden Plots der Stichprobe. Zwar wurden oberhalb der Aufforstungsfläche ebenfalls Lawinenverbauungen aufgestellt, jedoch sind diese relativ weit von den Einheitsflächen entfernt und haben somit vermutlich nur eine kleine Wirkung auf die untersuchten Bäume.

Das schlechte Überleben im verbauten Teil dieser Höhenlage kann dadurch erklärt werden, dass der Schnee im Frühling in dieser Zone sehr lange liegen bleibt. Das Überleben aller drei Baumarten ist stark negativ mit dem durchschnittlichen Ausaperungsdatum korreliert (Senn 1999). Je später der Schnee im Frühling schmilzt, desto stärker werden die immergrünen Nadelbäume von pathogenen Pilzen befallen (Senn 1999; Senn und Schönenberger 2001) und gehen ein. Besonders der Befall des Triebsterbepilzes (*Gremmeniella abietina*) hängt sehr stark mit dem Ausaperungsdatum im Frühling zusammen (Senn 1999; Brücker 2011), dieser kommt allerdings nur selten bei Lärchen vor (Petrini et al. 1989). Für die Arven und Bergföhren war er jedoch die häufigste Todesursache auf dem Stillberg (Senn und Schönenberger 2001). Die Zone II befindet sich zusätzlich zum größten Teil in einer nördlichen Exposition, welche allgemein durch schlechte Kleinstandorte für das Überleben der Pflanzen geprägt ist.

Da die erste Höhenstufe noch eine relativ geringe Hangneigung aufweist, spielen Schneebewegungen für das Überleben der Bäume eine untergeordnete Rolle. Das Untersuchungsgebiet wird von der zweiten Höhenstufe abwärts jedoch markant steiler, wodurch auch die Lawinanrisse häufiger werden. Hier beginnen die Verbauungen einen Einfluss auf Schneebewegungen - relevant ist besonders der Gleitschnee - und auf das Lawinenregime zu haben. Laut Leuenberger (2003) haben sich Temporäre Holzrechen bei der Stabilisierung der Schneedecke in Aufforstungen von Lawinanrissgebieten, unter anderem auch auf dem Stillberg, bisher gut bewährt. Das Vermindern von Schneebewegungen ist vermutlich auch der Grund dafür, dass alle drei Baumarten im verbauten Teil der zweiten Höhenstufe besser überlebt haben als im nicht verbauten Teil (Tabelle 3). Ohne die schützenden Holzwerke sind die Bäume viel stärker der Lawinenaktivität und dem Gleitschnee ausgesetzt, welcher zu Schürfungen, Stammrissen bei Säbelwuchs, Stammbrüchen oder zur vollständigen Entwurzelung der Bäume führen kann (Leuenberger 2003).

In der unteren Hälfte der Untersuchungsfläche zeigten die Lärchen nur noch geringe Unterschiede im Überleben zwischen dem verbauten und dem unverbauten Teil. Die Bergföhren hingegen überlebten im nichtgeschützten Teil der Aufforstung viel besser. Die Lawinenwerke im verbauten Aufforstungsteil tragen dazu bei, dass der Schnee im Frühling länger liegen bleibt (Senn 1999, Senn und Schönenberger 2001), was sich wiederum schlecht auf das Überleben der Bäume auswirkt.

Bei der Bergföhre ist dieser Effekt sehr wahrscheinlich stärker zu gewichten als der Schutz vor Schneebewegungen, da sie sehr anfällig auf den Triebsterbepilz (*Gremmeniella abietina*) reagiert. Hinzu kommt, dass sich die kleine Anzahl der überlebenden Bergföhren des unverbauten Aufforstungsteils wahrscheinlich größtenteils auf Standorten mit wenig Lawinenaktivität und kleinerem Risiko für Schneegleiten befinden. Bei den Lärchen hingegen scheint sich der negative Effekt der späten Ausaperung und das Absterben durch Schneebewegungen und Lawinen gegenseitig mehr oder weniger auszugleichen. Ein weiterer Grund für das Bessere Überleben könnte die Tatsache sein, dass im unverbauten Teil der Aufforstung mehr Schneefreie Tage im Winter vorkommen als im verbauten Teil

(siehe Anhang 9.1). Senn und Schönenberger (2001) haben gezeigt, dass eine größere Anzahl Tage ohne Schnee einen positiven Effekt auf das Überleben der Bäume hat.

Die Arven überlebten, mit Ausnahme der obersten Höhenstufe, im verbauten Teil der Aufforstung besser als im Unverbauten. Dies erscheint im ersten Moment ungewöhnlich, da diese Baumart am anfälligsten für Triebsterben ist. Jedoch ist ihr heutiges Vorkommen - auch im verbauten Teil der Aufforstung - fast ausschließlich auf sonnenzugewandte und im Winter mit wenig Schnee bedeckte Geländeerhöhungen beschränkt, wo sie auch von Natur aus am besten gedeihen. Der Grund für das großräumige Absterben der Arven war, dass sie in den 80er Jahren zusätzlich zum starken Befall durch den Triebsterbepilz von der Ausbreitung des Schneeschüttepilzes (*Phacidium infestans*) betroffen waren (Bebi et al. 2009). Mit dem abnehmenden Einfluss von pathogenen Pilzen auf das Überleben der Arven scheinen jedoch die negativen Auswirkungen von Schneegleiten und Lawinenereignissen im unverbauten Aufforstungsteil eine immer wichtiger werdende Rolle zu spielen. Laut Horak (2004) wiesen im Jahr 2003 ein Viertel aller Arven durch Schneebewegungen verursachte Verletzungen des Stammes auf.

### 5.1.2 Wachstum

Senn und Schönenberger (2001) haben gezeigt, dass die Entwicklung der mittleren Baumhöhen zwischen 1975 und 1995 für alle drei Baumarten sehr ähnlich verlief, wobei es allerdings dreimal zu Rangänderungen zwischen den Arten kam. Ab 1980 verloren die anfänglich mit grösster durchschnittlicher Baumhöhe gepflanzten Arven ihren Vorsprung an die Bergföhren, welche wiederum im Jahr 1995 von den Lärchen überholt wurden. In den darauf folgenden 15 Jahren entwickelte sich das Höhenwachstum der drei Baumarten sehr unterschiedlich. Die Lärche wies eine starke exponentielle Zunahme der Baumhöhen auf (Abb. 11) wodurch sie fortan an der Spitze der Rangordnung blieb. Während die Arven nur eine schwache exponentielle Entwicklung der Baumhöhen erfuhr, entwickelte sich die Bergföhre eher linear (Abb. 12 und Abb. 13). Im Aufnahmejahr 2010 konnte die Arve mit einer durchschnittlichen Baumhöhe von 165 cm die Bergföhre wieder überholen, welche im Durchschnitt nur 163 cm lang war. Spitzenreiter blieb die Lärche mit einer durchschnittlichen Höhe von 261 cm. Anders als vermutet, gab es also auch nach 1995 noch Änderungen in der Rangordnung zwischen den drei Arten. Dies bestätigt die Dringlichkeit von Langzeituntersuchungen, auf welche bereits von Senn und Schönenberger (2001) hingewiesen wurde.

Obwohl bei allen drei Arten die Durchmesser und Baumhöhen stark miteinander korreliert waren, zeichnen sich trotzdem wesentliche Unterschiede in der Wachstumsstrategie ab. Die steileren Regressionsgeraden der Lärche gegenüber denjenigen der Pinus-Arten zeigt auf, dass die Lärchen in der Aufforstung mehr Energie ins Höhenwachstum investieren und die Arven und Föhren mehr ins Dickenwachstum (Abb. 14 und Abb. 15). Die Schlankheitsgrade der Baumarten bestätigten die unterschiedlichen Strategien zusätzlich (Tabelle 4). Der Trend welcher von Horak (2004) beschrieben wurde, dass die Schlankheitsgrade der Lärchen über die Zeit grösser und die der Arven kleiner werden, konnte allerdings in dieser Untersuchung nicht bestätigt werden. Die Lärchen hatten mit einem Schlankheitsgrad von 38 sogar einen tieferen Wert als vor elf Jahren und der Wert der Arve lag zwischen den von Vanomsen (1999) und Horak (2004) beschriebenen Schlankheitsgraden. Da die durchschnittliche Baumhöhe der Lärche zwischen 2005 und 2010 stark zugenommen hat (Abb. 11), ist anzunehmen, dass die durchschnittlichen Stammdurchmesser in dieser Periode proportional sogar noch stärker zunahmen.

Senn und Schönenberger (2001) weisen darauf hin, dass die Baumlänge nicht nur aus dem Wachstum resultiert, sondern eine Funktion der Ausgangshöhe bei der Pflanzung, des Zuwachses, der Höhenreduktion durch Schäden und sogar teilweise der Ausfälle ist. Das Vorhandensein von Lawinenwerken ist für das Baumängenwachstum also ein relevanter Faktor, da diese einen großen Einfluss auf Schäden durch Schneebewegungen haben können und das Überleben der Bäume beeinflussen. Dies wird deutlich, wenn man die Baumängenentwicklung der drei Baumarten zwischen dem verbauten und dem nicht verbauten Teil der Aufforstung vergleicht. Je nach Baumart zeichnen sich starke Unterschiede zwischen diesen Gebieten ab.

Die Lärche beispielsweise wies seit der Aufnahme 1979 im durch Holzwerke geschützten Aufforstungsteil höhere Baumängen auf als im ungeschützten Teil. Mögliche Erklärungen dafür wären einerseits der erwähnte positive Einfluss von Lawinenwerken auf die Schneebewegungen, welche bei Bäumen im ungeschützten Aufforstungsteil Gipfeltriebverletzungen verursachen können. Solche Verletzungen geschehen hauptsächlich dann, wenn eine instabile Schneeschicht über einer stabileren Schneeschicht ins Rutschen kommt und den herausragenden Baumgipfel abbricht. Zusätzlich können durch Gletschneereignisse ausgelöste Verletzungen des Baumes, wie beispielsweise Schürfungen oder abgerissene Baumteile (Leuenberger 2003), zu erhöhten Stresssituationen für das Individuum führen, wodurch der Zuwachs in der folgenden Vegetationsperiode vermindert sein kann. Ebenfalls zu erwähnen ist die geringere Anzahl Schneefreier Tage im Winter (siehe Anhang 9.1), welche im verbauten Aufforstungsteil durch die Verminderung der Schneebewegungen und den größeren Schneemengen zu begründen ist. Besonders an steilen, unverbauten Hängen entstehen, durch den abrutschenden Schnee, Gebiete mit sehr geringer oder sogar nicht vorhandener Schneebedeckung.

Die durchschnittliche Anzahl Schneefreier Tage ist negativ mit der Baumlänge korreliert (Senn und Schönenberger 2001), das Wachstum ist bei möglichst wenigen schneefreien Tagen also besser. Ohne die schützende Schneedecke sind besonders die Bäume nahe an der Waldgrenze stärkeren Schwankungen der Tages- und Nachttemperaturen ausgesetzt (Tranquillini und Turner 1961). Dies erhöht das Risiko von Frostrocknis, was zum Absterben

der Gipfeltriebe oder sogar von grösseren Teilen der Baumkrone, im Extremfall sogar von ganzen Bäumen, führen kann (Tranquillini 1979).

Die grosse Relevanz von äusseren Einflüssen für das Höhenwachstum zeigt sich in der Tatsache, dass in der Zeitspanne zwischen der Pflanzung und der Aufnahme 1995, bei 97.7% der Lärchen bereits mindestens einmal Verletzungen des Gipfeltriebes festgestellt wurden (Senn und Schönenberger 2001). Im Jahr 2010 war der Einfluss der Holzrechen auf die Baumhöhen der Lärchen über den gesamten Höhengradienten sichtbar, mit Ausnahme der obersten Höhenstufe (Abb. 16). Der unverbaute Teil dieser Höhenlage ist, wie bereits erwähnt, flacher als die darunterliegenden Zonen, womit Schneeabfuhr als äussere Einflussfaktoren eine kleinere Rolle spielen (Rychetnik 1985). Zusätzlich ist diese Zone grösstenteils ostwärts ausgerichtet, wodurch günstige Bedingungen für das Wachstum entstehen. Diese zwei Faktoren scheinen der Grund dafür zu sein, dass die Lärchen in dieser Zone länger sind als diejenigen der darunterliegenden Zone. Ansonsten scheint die Baumhöhe - im verbauten wie im unverbauten Teil der Aufforstung - mit der Meereshöhe abzunehmen, was auch bereits von Senn und Schönenberger (2001) gezeigt wurde.

Die Bergföhre wies, anders als die Lärche, nur in der Periode 1985 bis 1995 in dem verbauten Teil der Aufforstung höhere Baumhöhen auf (Abb. 12). In den ersten zehn Jahren nach der Pflanzung scheinen die Verbauungen also keinen Effekt auf das Höhenwachstum dieser Art gehabt zu haben, oder die positiven und negativen Effekte haben sich gegenseitig aufgehoben. In der Wachstumskurve der Föhren des unverbauten Aufforstungsteils ist ab dem Jahr 1985 ein deutlicher Knick zu erkennen (Abb. 12). Sie scheinen also ab einer durchschnittlichen Baumhöhe von ungefähr 60 cm von den Lawinerverbauungen profitiert zu haben. Die kleinere Schneehöhe und die frühere Ausaperung des unverbauten Aufforstungsteils könnten, abgesehen von den bereits erwähnten negativen Auswirkungen von Schneeabfuhr, dazu beigetragen haben, dass die Föhren ab dieser Höhe vermehrt vom Birkhuhn (*Tetrao tetrix*) genutzt wurden. Dieser Vogel ernährt sich von leicht erreichbaren Knospen und Nadeln und kann somit sehr wirksam das Höhenwachstum verhindern (Streule 1973). Auf dem Stillberg ist dieses Phänomen besonders bei den Bergföhren häufig beobachtet worden, die Lärchen blieben grösstenteils verschont (Senn und Schönenberger 2001). Erstaunlich ist, dass bei den Aufnahmen 2005 und 2010 keine

Unterschiede zwischen dem verbauten und dem unverbauten Aufforstungsteil gefunden wurden. Bei der Aufnahme 2010, in welcher die Aufforstung zusätzlich in vier Höhenlagen unterteilt wurde, konnten nur in der dritten Höhenstufe längere Bäume im geschützten Teil nachgewiesen werden (Abb. 17). Dieser Unterschied ist vermutlich auf die oben genannten negativen Auswirkungen der Schneebewegungen und kleineren Schneemengen zurückzuführen. In den übrigen Höhenlagen scheinen die Lawinenerwerke allerdings keinen Einfluss auf das Längenwachstum der Bäume gehabt zu haben, oder die Zusammenhänge sind zu verknüpft um sie mit dieser Untersuchung beantworten zu können. Um diesen Sachverhalt zu klären, wären weitere Untersuchungen über den Einfluss von Lawinenerbauungen auf das Höhenwachstum der Bergföhren erforderlich.

Die Arven konnten erst seit der Aufnahme 1985 von einem besseren Wachstum im durch Lawinenerbauungen gesicherten Teil der Aufforstung profitieren. Das durch die beiden Schneeschimmelarten (*Gremmeniella abietina*, *Phacidium infestans*) bedingte flächige Absterben an den spät ausapernden Stellen der verbauten Zonen, beschränkte nach 1985 das Vorkommen der Arven auf Standorte mit vorteilhaften Wachstumsbedingungen. In der unverbauten Zone erfolgte das großräumige Absterben wahrscheinlich etwas später, wodurch zu dieser Zeit an ungünstigeren Stellen noch Exemplare - mit entsprechend kleineren Baumhöhen - überleben konnten. Ab 1995 dürften die Arven auch im unverbauten Aufforstungsteil nur noch an Osthängen und auf Rippen mit guten Wachstumsbedingungen überlebt haben, wodurch die durchschnittliche Baumhöhe angehoben wurde. Diese Entwicklung würde erklären, warum im Jahr 1995 keine Unterschiede zwischen den geschützten und den ungeschützten Gebieten entdeckt werden konnten. Mit zunehmendem Durchmesser der Bäume wurde jedoch das Risiko von Stammbrüchen im unverbauten Teil der Aufforstung erheblich grösser, wodurch die Arven im Schutze der Lawinenerwerke wieder im Vorteil waren. Horak (2004) hat herausgefunden, dass die Häufigkeit von Stammverletzungen bei den Arven zwischen 1995 und 2003 um den Faktor zehn zugenommen hat, wodurch im Sommer 2003, im nicht verbauten Teil des Stillbergs, bereits ein Viertel aller Arven Stammverletzungen aufwies. Weiter war Horak (2004) der Meinung, dass die kritische Periode für Stammverletzungen auf dem Stillberg erst begonnen habe, und in den folgenden Jahren sogar noch mit einer Zunahme der Stammverletzungen gerechnet werden müsse. Die signifikant längeren Arven im geschützten Teil der Aufforstung

in den Jahren 2005 und 2010 deuten darauf hin, dass diese Annahme richtig war (Abb. 13). Die genauere Untersuchung der einzelnen Höhenlagen zeigte allerdings, dass die Arven nur in der unteren Hälfte des verbauten Aufforstungsteils länger waren. Keine Unterschiede konnten in den höheren Lagen gefunden werden. Dies wird jedoch durch die Tatsache relativiert, dass sich 80% der überlebenden Arven in der unteren Aufforstungshälfte befanden.

Der Einfluss von Lawinerverbauungen auf den Stammdurchmesser ist etwas komplexer als deren Einfluss auf die Baumlänge. Die dicke eines Baumes hängt, anders als die Länge, nur indirekt von Verletzungen einzelner Baumteile ab. Das Dickenwachstum kann zwar durch eine kleiner werdende Vitalität des Baumes vermindert werden, der effektive Durchmesser nimmt dadurch jedoch nicht ab. Wichtiger für den durchschnittlichen Stammdurchmesser ist wahrscheinlich der Einfluss von Ausfällen durch Stammbrüche. Das Vorkommen von Stammbrüchen ist stark von der Dicke des Baumes abhängig und kommt erst ab einer gewissen Durchmesserklasse vor (Horak 2004). Werden viele Bäume gebrochen, wird somit der mittlere Durchmesser herabgesetzt.

Bei den zwei Baumarten Lärche und Arve liegt der kritische Stammdurchmesser bei etwa 6cm (Horak 2004). Allerdings gilt dieser Wert nur für den horizontal gemessenen Durchmesser. Er muss für die Lärche folglich nach oben korrigiert werden, da diese Baumart am Stillberg starken Säbelwuchs ausbildet (Horak 2004) und der effektive Durchmesser über dem horizontal gemessenen liegt.

In der untersten Höhenstufe der Aufforstung haben schon viele Lärchen den kritischen Stammdurchmesser erreicht, wodurch im unverbauten Teil mit starken Ausfällen in den höheren Durchmesserklassen gerechnet werden muss. Dies würde die signifikant dickeren Bäume in der geschützten Aufforstungszone erklären. Die dicksten Lärchen aller vier Höhenstufen befinden sich im verbauten Teil der Aufforstung. Die Anzahl der Stammbrüche ist aber wahrscheinlich in den höheren Lagen noch zu gering, um Unterschiede in den Stammdurchmessern hervorzurufen.

Welchen kritischen Stammdurchmesser die Bergföhren haben ist nicht bekannt. Die dickeren Bäume im verbauten Aufforstungsteil der dritten Höhenstufe könnten allerdings darauf

hinweisen, dass auch bei den Bergföhren das Absterben durch Stammbrüche relevant geworden ist. In der untersten Höhenstufe sind die Wachstumsbedingungen der Bergföhre stark von der Konkurrenz durch die Lärche geprägt, welche in dieser Höhenlage Bäume von über sechs Meter Höhe bildet. Deswegen wurde vielleicht der kritische Stammdurchmesser der meisten Bäume dieser Höhenstufe noch nicht erreicht, wodurch noch keine Unterschiede zwischen dem geschützten und dem ungeschützten Teil gefunden werden konnten.

Die Arven waren in der untersten Höhenstufe des verbauten Aufforstungsteils dicker, anscheinend ebenfalls weil viele ungeschützte Arven mit hohem Durchmesser durch Stammbrüche eingegangen sind. Auffällig ist, dass der Stammdurchmesser im Aufforstungsteil mit Lawinenverbauungen wie erwartet negativ, im Teil ohne Lawinenverbauungen jedoch positiv mit der Meereshöhe korreliert war. Die maximalen Stammdurchmesser sanken hingegen in beiden Teilen der Aufforstung mit der Meereshöhe (Abb. 18).

Ein weiterer bisher nicht erwähnter Faktor ist die Windgeschwindigkeit. Auf dem Stillberg wurden für alle drei Baumarten signifikant negative Zusammenhänge zwischen der Baumlänge und der Windgeschwindigkeit gefunden (Senn und Schönenberger 2001). Allerdings wurden bei diesen Untersuchungen die Windgeschwindigkeit nur anhand der Meereshöhe, der Exposition und der Hangneigung berechnet und nicht für jede Einheitsfläche gemessen. An Standorten mit hoher Windgeschwindigkeit wird im Winter der Schnee weggeweht, wodurch die Anzahl schneefreier Tage zunimmt und somit das Wachstum vermindert. Die kühlende Wirkung des Windes, welche das Wachstum der Bäume verlangsamt, spielt dabei wahrscheinlich ebenfalls eine Rolle (Senn und Schönenberger 2001). Ob die Lawinenverbauungen nun die Windgeschwindigkeit herabsetzen, weil sie Hindernisse in der Landschaft bilden, oder den Wind eher kanalisieren und die Geschwindigkeit damit erhöhen ist bisweilen nicht bekannt. Folglich wird der Wind als Einflussfaktor von temporären Lawinenverbauungen auf das Baumwachstum hier nicht weiter diskutiert.

## 5.2 Beurteilung der Schutzwirksamkeit

Die Beurteilung der Schutzwirksamkeit der Stillbergaufforstung kann nicht mit der Beurteilung eines nicht aufgeforsteten Schutzwaldes oder mit einer Aufforstung unterhalb der Waldgrenze verglichen werden. Anders als in „herkömmlichen“ Schutzwäldern sind auf dem Stillberg alle Bäume gleich alt und es wurde flächendeckend gepflanzt. Die meisten Kriterien für die Beurteilung eines Waldstücks zielen auf das Vorhandensein von verschiedenen Alters- und Durchmesserklassen der Bäume und auf eine genügende Verjüngung ab. Eine natürliche Fortpflanzung der Bäume hat jedoch auf dem Stillberg noch nicht stattgefunden, beziehungsweise hat sich noch keine generative Verjüngung durchsetzen können. Die Aufforstung ist somit noch zu jung um die „Verjüngung“ als Kriterium berücksichtigen zu können. Andere Kriterien wie beispielsweise die „Lückengrösse“ zwischen Bäumen in der Baumholzklasse (>30cm Durchmesser) können im aktuellen Entwicklungsstadium der Bäume ebenfalls nicht angewendet werden. Somit war es nahe liegend, die Baumlänge als momentan wichtigstes Kriterium anzunehmen und damit die Schutzwirksamkeit abzuschätzen.

Diese gewählte Methode für die Abschätzung der Schutzwirksamkeit der Aufforstung muss allerdings kritisch hinterfragt werden. Die Baumlänge als einzigen relevanten Faktor zu wählen war zwar naheliegend, sie erklärt die tatsächliche Schutzwirkung allerdings nicht vollumfänglich. Bei persönlichen Feldbegehungen im Winter 2010/2011 konnten zusätzliche Eindrücke über die momentane Schutzwirksamkeit der Aufforstung gesammelt werden. Auffällig war, dass kleine Grüppchen von zwei bis drei Arven den Schneedeckenaufbau stark beeinflusst haben. Durch die grosse Oberfläche der sehr buschigen Kleinrotten wurde das Setzen und Kriechen der Schneeoberfläche erstaunlich gut verhindert, obwohl die Baumlängen noch nicht eineinhalb bis doppelt so gross waren wie die Schneehöhe. Bei den Lärchen konnte dieser Effekt weniger beobachtet werden. Der positive Einfluss von Lärchengruppen mit grosser Baumlänge auf die Schneedecke war zwar deutlich zu erkennen, die kleinen Lärchen schienen aber die Bewegungen der Schneedecke nicht beeinflussen zu können. Dementsprechend wurde der positive Effekt der immergrünen Baumarten auf die Schutzwirksamkeit sehr wahrscheinlich etwas unterschätzt und der Effekt der Lärchen vielleicht etwas überschätzt. Es muss allerdings angefügt werden, dass die Schneehöhe im

besagten Winter 2010/2011 relativ klein war. Bei sehr hohen Schneemengen oder sogar extremen Schneehöhen wäre der erwähnte positive Effekt der kleinen Arvengruppen auf die Schneebewegungen wahrscheinlich nicht mehr relevant.

In den folgenden Abschnitten wird zuerst die aktuelle Schutzwirksamkeit der Aufforstung unter Szenario 1, also mit maximaler 30-jähriger Schneehöhe, diskutiert. Dieses Szenario ist für die tatsächliche Schutzwirksamkeit eines Lawinenschutzwaldes deswegen am relevantesten, weil die Aufforstung auch bei extremen Schneehöhen noch einen genügenden Schutz gegen Lawinenanrisse bieten sollte. Es wird im Weiteren ebenfalls die Schutzwirksamkeit unter Szenario 2 beurteilt und die potentielle zukünftige Schutzwirksamkeit diskutiert.

### 5.2.1 Szenario 1

Betrachtet man die gesamte Aufforstungsfläche, muss die momentane Schutzwirksamkeit als „sehr schlecht“ beurteilt werden. In 35 Jahren konnten keine einzige Arve oder Bergföhre aus der Stichprobe die Kriterien erfüllen. Somit ist klar, dass in Hochlagenaufforstungen mit deutlich längeren Zeitspannen gerechnet werden muss, bis die Schutzwirksamkeit dieser Baumarten gegeben ist, als in Aufforstungen unter der Waldgrenze. Die Bäume auf solchen Höhenlagen leben nahe an ihren physiologischen Grenzen (Häsler 1982; Körner 1995), wodurch das Wachstum stark gehemmt ist. Bei der Lärche waren nach 35 Jahren immerhin 3.3% (Kriterium A), beziehungsweise 6.8% (Kriterium B) der ursprünglich 1000 gepflanzten Lärchen in der Stichprobe genügend lang um wirksam gegen Lawinen schützen zu können. Dies ist über die gesamte Fläche sehr wenig und erfüllt die Anforderungen eines Lawinenschutzwaldes nicht. Betrachtet man allerdings nur die unterste Höhenstufe, so erfüllen bereits ein Viertel der ursprünglich 125 gepflanzten Lärchen das Kriterium der doppelten maximalen Schneehöhe (Abb. 22) und sogar über 40% das mildere Kriterium der eineinhalb fachen maximalen Schneehöhe (Abb. 23). Berücksichtigt man nur die Werte für die Bäume, welche im Jahr 2005 noch gelebt haben, so sind diese Werte noch höher (Tabelle 5). Dies kann durchaus als eine gute Anzahl schutzwirksamer Bäume gewertet werden.

Salm (1978) berechnete, dass je nach Hangneigung und Schneehöhe eine Anzahl von 500 - 1000 schutzwirksamer Bäume pro Hektar vorhanden sein müssten, um Lawinenanrisse erfolgreich zu verhindern. Dies entspricht für die 30 gemessenen Einheitsflächen je Höhenstufe einer nötigen Stammzahl von 18 - 30 Bäumen und wird somit unter beiden Kriterien in der untersten Höhenstufe erfüllt. Allerdings ist die Tatsache, dass weder die Arven noch die Bergföhren genügende Baumlängen erreicht haben problematisch, weil diese eigentlich die geeigneteren Baumarten für einen Lawinenschutzwald sind als die Lärche (Frehner et al. 2005). Die wintergrünen Baumarten zeigen besonders bei tiefen Temperaturen eine höhere Interzeption als winterkahle Baumarten (Pfister und Schneebeili 1999). Die Beurteilung der potentiellen Rotten bestätigte die gute Schutzwirksamkeit in der untersten Höhenstufe (Tabelle 6). In den höheren Lagen ist das Potential für die Bildung von Lärchenrotten zwar vorhanden - die Anzahl überlebender Lärchen ist gross genug - die Bäume sind allerdings grösstenteils noch zu kurz um schutzwirksam zu sein.

Die Lawinenwerke in der Aufforstung wirkten sich sehr positiv auf die Schutzwirksamkeit der Bäume und der potentiellen Rotten aus, nicht zuletzt weil nur das Kriterium Baumlänge – der positive Effekt von Verbauungen auf das Wachstum der Bäume wurde bereits weiter oben diskutiert (siehe 5.1.2) - für die Beurteilung verwendet wurde. Bei Aufforstungen an der oberen Waldgrenze sollte demnach die Möglichkeit in Betracht gezogen werden, temporäre Lawinenverbauungen, zur Unterstützung des Baumwachstums und zur frühest möglichen Erreichung einer genügenden Schutzwirksamkeit, in der Aufforstungsfläche zu verwenden, falls diese nicht zum Schutz von Infrastrukturen sowieso errichtet werden müssen.

In den nächsten zehn Jahren wird sich bei der Baumartenzusammensetzung der schutzwirksamen Bäume unter Kriterium A nicht viel verändern. Es werden sich höchstens in der untersten Höhenstufe einige schutzwirksame Föhren entwickeln können, welche die Lärchen im Schutz vor Lawinenanrissen ergänzen können, allerdings auch eher im unverbauten Teil der Aufforstung. Der Zeitraum von 45 Jahren ist für die zwei immergrünen Baumarten auf dieser Höhenlage immer noch zu kurz, um das Kriterium der doppelten Baumlänge zu erreichen. Unter Kriterium B wird es in den nächsten zehn Jahren möglich sein, dass im unverbauten Teil der untersten Höhenstufe alle drei Baumarten mit schutzwirksamen Exemplaren vorkommen. Allerdings wird die Anzahl der Arven vergleichsweise immer noch sehr unbedeutend sein. In den unteren zwei Höhenstufen wird sich eine genügende Anzahl schutzwirksamer Föhren und Lärchen entwickelt haben, um die Gefahr von Lawinenanrissen stark zu vermindern. Die Lärche wird dabei jedoch immer noch die wichtigere Rolle spielen. Ihre Schutzwirkung wird bis in die oberste Höhenstufe einen positiven Einfluss auf das Lawinenregime ausüben können. Problematisch werden dabei allerdings die Zonen II und III bleiben, also der verbaute Teil der obersten und der nicht verbaute Teil der zweiten Höhenstufe. Dort werden sich auch bis im Jahr 2020 nur wenige Lärchen bis zur schutzwirksamen Baumlänge entwickeln können. Lawinenanrisse können in diesen Zonen also auch in 10 Jahren nicht ausgeschlossen werden.

Der Schutz vor Lawinenanrissen unter Szenario 1 kann heute also erst in der untersten Höhenstufe als gut beurteilt werden, obwohl auch dort die Baumartenmischung noch nicht ideal ist. Die Prognosen zeigen, dass auch in 10 Jahren noch kein alle Zonen umfassender Schutz vor Lawinenanrissen gegeben sein wird.

### 5.2.2 Szenario 2

In einem Winter mit durchschnittlicher Schneehöhe haben über die gesamte Aufforstungsfläche gesehen bereits über ein Achtel (Kriterium A), beziehungsweise über ein Sechstel (Kriterium B), der ursprünglich 1000 gepflanzten Lärchen der Stichprobe, eine schutzwirksame Baumlänge erreicht. Pro Einheitsfläche wäre dies durchschnittlich jeder dritte bis vierte Baum. Unter beiden Kriterien kommen bereits im Jahr 2010 in allen acht Zonen der Aufforstung schutzwirksame Lärchen vor, wobei sie auch in diesem Szenario recht unterschiedlich verteilt sind (Abb. 24 und Abb. 25). Die kritischen Zonen sind wie bei Szenario 1 der verbaute Teil der obersten und der nicht verbaute Teil der zweiten Höhenstufe, in welchen nur vereinzelt schutzwirksame Bäume auftreten und somit die stabilisierende Wirkung der Stämme begrenzt ist. Unter Kriterium B kann allerdings schon heute in allen Zonen von einer positiven stabilisierenden Wirkung der Lärchen auf die Schneedecke ausgegangen werden.

Die Anzahl der schutzwirksamen Arven und Föhren ist zwar immer noch beschränkt, sie leistet aber bereits jetzt einen wichtigen Beitrag zur Schutzwirksamkeit. Unter Kriterium A spielen die Arven erst im unverbauten Teil der untersten Höhenstufe eine Rolle, in welchem sie mit einigen schutzwirksamen Exemplaren die Stabilität der Schneedecke unterstützen können. Die Föhren unterstützen ihrerseits die Stabilität der dritten Höhenstufe und die des unverbauten Teils der untersten Höhenstufe. Unter dem Kriterium der eineinhalb fachen Schneehöhe können die Föhren bereits heute in den untersten zwei Höhenstufen einen wichtigen Beitrag zur Stabilität leisten. Die Arven beschränken sich auch hier auf den unverbauten Teil der untersten Höhenstufe, allerdings mit einigen schutzwirksamen Exemplaren mehr als unter Kriterium A. Die Baumartenzusammensetzung von schutzwirksamen Bäumen in einem durchschnittlichen Winter ist im jetzigen Zustand der Aufforstung in den unteren zwei Höhenstufen zwar nicht gut - dafür hat es immer noch zu wenig Föhren und Arven - allerdings ist sie deutlich besser als für Szenario 1. In den oberen zwei Höhenstufen ist die Lärche die einzig relevante Baumart und die Mischung somit ungenügend. Die von Salm (1978) postulierte notwendige Stammzahl von 18 - 36 schutzwirksamen Bäumen pro Höhenstufe wird unter Kriterium A jedoch nur in den Zonen II + III, und unter Kriterium B nur in der Zone II, nicht erreicht.

Die Untersuchung der potentiellen Rotten bestätigte die gute Schutzwirksamkeit der unteren Aufforstungshälfte (Tabelle 8). Unter Szenario 2 haben heute sogar die Arven und Föhren das Potential zur Ausbildung von Rotten, allerdings nur mit schlechter oder sogar sehr schlechter Schutzwirksamkeit. Zusammen mit der Lärche kann das Rottenkonzept für die Verminderung von Lawinenanrissen allerdings schon heute als gut bezeichnet werden.

In den nächsten zehn Jahren wird sich die Schutzwirksamkeit der Aufforstung in einem Winter mit durchschnittlicher Schneemenge positiv entwickeln (Tabelle 7). Die Föhren werden es unter Kriterium B in allen Bereichen der Aufforstung schaffen schutzwirksame Bäume zu bilden. Eine Ausnahme bildet die Zone II, welche auch im Jahr 2020 grösstenteils von Lärchen besiedelt sein wird. Die Arven werden zumindest in den unteren zwei Höhenstufen einen wirksamen Beitrag zur Stabilität der Schneedecke leisten können. Die Mischung der drei Baumarten wird also in den nächsten zehn Jahren besser werden, allerdings wird ein optimaler Anteil an immergrünen, schutzwirksamen Bäumen nicht erreicht werden.

Der Schutz vor Lawinenanrissen in einem Winter mit durchschnittlicher Schneehöhe kann heute in den untersten zwei Höhenstufen als gut bis sehr gut und in Teilen der oberen zwei Höhenstufen als genügend bis gut beurteilt werden. Ungenügend sind jedoch wie erwähnt die Zonen II und III. Die Baumartenmischung ist zwar nicht ideal, dies wird aber durch eine grosse Anzahl von schutzwirksamen Lärchen teilweise kompensiert. Die Prognosen zeigen, dass die Schutzwirksamkeit der Aufforstung im Jahr 2020 über den gesamten Höhengradienten mindestens als „gut“ beurteilt werden kann. Die Zonen II und III werden allerdings auch in Zukunft höchstens eine „genügende“ Schutzwirksamkeit erreichen können.

## 6 Schlussfolgerung

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass temporäre Lawinenverbauungen einen grossen Einfluss auf das Wachstum und das Überleben der Bäume in Hochlagenaufforstungen haben. Anders als erwartet, waren die Auswirkungen jedoch nicht für alle Baumarten gleich und zeigten zum Teil starke Unterschiede zwischen den verschiedenen Höhenlagen.

Während die Lawinenwerke bei der Bergföhre zu einer vergleichsweise höheren Mortalitätsrate führten, konnten die Arven im verbauten Teil der Aufforstung besser überleben als im nicht verbauten Teil. Die längere Schneebedeckung innerhalb der Verbauungen, mit der damit einhergehenden stärkeren Belastung durch pathogene Schneepilze, war dabei wahrscheinlich der ausschlaggebende Faktor. Da die Mortalität der Arven jedoch schon soweit fortgeschritten ist, dass sie in der gesamten Aufforstung nur noch an Stellen mit früher Ausaperung vorkommen, spielen Schneebewegungen eine immer wichtiger werdende Rolle. Bei der Lärche war der Einfluss der Verbauungen auf das Überleben leicht negativ, wobei sich starke Unterschiede zwischen den Höhenstufen abzeichneten.

Das Wachstum der drei Baumarten wurde durch die Verbauungen stark begünstigt. Entscheidend war dabei insbesondere der positive Effekt auf Schneebewegungen und Lawinen, welche zu Höheneinbussen durch Gipfeltrieb- und Stammverletzungen führten, und auf die Anzahl schneefreier Tage im Winter. Der durchschnittliche Stammdurchmesser wurde zudem stark von Ausfällen durch pathogene Schneepilze und Stammbrüche beeinflusst. Während die Lärchen im verbauten Aufforstungsteil bereits vier Jahre nach der Pflanzung deutlich grösser waren als ihre ungesicherten Nachbarn, brauchten die zwei immergrünen Baumarten deutlich länger um von den positiven Einflüssen der Holzwerke profitieren zu können. Die Bergföhren wiesen seit 2005 allerdings keine Unterschiede mehr zwischen den Aufforstungsteilen auf.

Die Lawinenschutzwirksamkeit der Aufforstung bei extremen Schneehöhen kann heute erst in der untersten Höhenstufe, also bis zu einer Meereshöhe von ca. 2100 [m.ü.M.], als gut beurteilt werden, obwohl auch dort die Baumartenmischung noch nicht ideal ist. Eine

grössere Anzahl von schutzwirksamen Bergföhren und Arven ist dringend notwendig um Lawinenanrisse erfolgreich verhindern zu können. Die angestrebte Baumartenzusammensetzung von mindestens 50% Arven (Frehner et al. 2005) ist auf dem Stillberg allerdings nicht erreichbar.

In einem Winter mit durchschnittlicher Schneehöhe kann zumindest in der unteren Aufforstungshälfte bereits heute von einem guten bis sehr guten Schutz vor Lawinenanrissen ausgegangen werden. Die Baumartenmischung ist zwar nicht ideal, dies wird aber durch eine grosse Anzahl von schutzwirksamen Lärchen teilweise kompensiert. Oberhalb von 2150 m.ü.M. kann das Anreissen von Lawinen nicht ausgeschlossen werden. Besonders der unverbaute Hang der zweitobersten Höhenstufe erfüllt die Schutzwirksamkeitskriterien nicht und bildet somit die Schwachstelle der Aufforstung.

Die Prognosen haben gezeigt, dass wahrscheinlich auch in den nächsten 10 Jahren noch kein umfassender Schutz vor Lawinenanrissen bei extremen Schneeereignissen gewährleistet werden kann. Bei durchschnittlichen Schneemengen wird die Aufforstung jedoch auch in den höheren Lagen, mit Ausnahme der erwähnten Schwachstelle, Lawinenanrisse grösstenteils verhindern können.

Die Untersuchungen haben bestätigt, dass bei Aufforstungen von Lawinenanrissgebieten oberhalb der Waldgrenze mit sehr langen Zeiträumen gerechnet werden muss, bis eine genügende Lawinenschutzwirkung erreicht wird. Temporäre Lawinenverbauungen mit einer Lebensdauer von 30 - 40 Jahren sind also in Hochlagenaufforstungen, mit ähnlichen Standortverhältnissen wie auf dem Stillberg, oberhalb von ca. 2100 - 2150 m.ü.M. nicht sinnvoll. Um einen ausreichenden und nachhaltigen Schutz vor Lawinenanrissen sicherzustellen, sollten folglich Verbauungstypen mit längerer Lebensdauer gewählt und heikle Gebiete sogar permanent verbaut werden.

Welchen Einfluss Lawinenverbauungen auf das Wachstum, die Mortalität und somit auch auf die Schutzwirksamkeit der Bäume haben, hängt sehr stark von den kleinräumigen Standortverhältnissen innerhalb der Aufforstung ab. Um die genauen Auswirkungen von temporären Werken vollumfänglich verstehen zu können, sind deshalb weitere Langzeituntersuchungen zu diesem Thema dringend notwendig.

## 7 Danksagung

Mein Dank kommt von Herzen und gebührt allen, die mir während meiner Arbeit in irgendeiner Weise geholfen haben:

- Dr. Peter Bebi und Dr. Monika Frehner, für ihre kompetente und unkomplizierte Betreuung während der ganzen Arbeit.
- Dr. Ignacio Barbeito, für die Hilfe bei statistischen Fragen und die Unterstützung im Feld.
- Michaela Teich und Frank Krumm, für die geduldige Unterstützung bei zahlreichen kleinen und grossen Anliegen.
- Andrea und Ivo, für die enorme Geduld, die sehr hilfreichen Kommentare und das anschliessende Laden in der Cactus...
- Waia, für die Hilfe im Feld und die schönen Stunden auf dem Stillberg.
- Regina Brücker, für die guten Tipps und die gemessenen Arven...
- Meiner Freundin Sara, die mit mir durch alle Hochs und Tiefs ging und mich in so vieler Hinsicht unterstütz hat... Muah
- Meiner Familie und meinen Freunden - einfach so...

## 8 Literaturverzeichnis

- Barandun, J. (1983). "Aufforstung in hohen Lagen." Schweiz. Z. Forstwes. 134(6): 431 - 441.
- Barry, R. G. (1981). "Mountain Weather and Climate. Methuen: London/New York."
- Bebi, P., F. Hagedorn, et al. (2009). "Forschung am Stillberg vor 25 Jahren und heute." Informationsblatt des Forschungsbereich Wald 25: 5 - 7.
- Brassel, P. und U.-B. R. Brändli (1999). Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der Zweitaufnahme 1993-1995. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. Bern, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Bern, Stuttgart, Wien, Haupt.
- Brockmann-Jerosch, H. (1919). "Baumgrenze und Klimacharakter." Pflanzengeographische Kommission der Schweiz. Naturforschenden Gesellschaft, Beiträge zur geobotanischen Landesaufnahme 6, Rascher: Zürich.
- Brücker, R. L. (2011). "Tree mortality caused by snow fungi near the treeline. Spatio-temporal analysis of snow fungi infection on swiss stone pine." Master Thesis Departement of Geography, University of Zürich.
- Eckmüller, O. (1972). "Schutzwaldsanierung und Hochlagenaufforstung." Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Wien.
- Fillbrandt, T. (2000). "Strukturentwicklung gepflanzter Fichtenkollektive (Rotten) in der hochmontanen und subalpinen Stufe." Schweiz. Z. Forstwes. 87: 124p.
- Frehner, M., B. Wasser, et al. (2005). "Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wälder mit Schutzfunktion." Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 564 S.
- Frey, W. (1977). "Wechselseitige Beziehung zwischen Schnee und Pflanze - eine Zusammenstellung anhand von Literatur." Mitt. Eidg. Institut für Schnee und Lawinenforschung SLF 34: 223 pp.
- Frey, W. und P. Thee (2002). "Avalanche protection of windthrow areas: A ten year comparison of cleared and uncleared starting zones." Forest Snow and Landscape Research 77: 89-107.
- Gubler, H. und J. Rychetnik (1991). "Effects of forests near the timberline on avalanche formation." Snow, hydrology and forests in high alpine areas. Wallingford, England; International Association of Hydrological Sciences (IAHS) 205: 19 - 38.
- Häsler, R. (1982). "Net photosynthesis and transpiration of Pinus montana on east and north facing slopes at alpine timberline." Oecologia 54: 14-22.
- Holtmeier, F.-K. (2009). "Mountain Timberlines. Springer: Berlin/Heidelberg/New York."
- Horak, G. (2004). "Growth, survival and stem damages of planted larch and stone pine (1975-2003) in an avalanche release area at timberline in Dischmatal." Diplomathesis Uni Zürich: 98 pp.
- Imbeck, H. (1987). "Schneeprofile im Wald." Winterbericht EISLF 1985/86 50: 177-183.
- Körner, C. (1995). "Biodiversity and CO2: global change is under way." Gaia 4: 234-243.
- Körner, C. (2003). "Carbon limitation in trees." Journal of Ecology 91(1): 4-17.
- Leuenberger, F. (2003). "Bauanleitung Gleitschneeschutz und temporärer Stützverbau. Davos, Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung." 97.
- Margreth, S. (2004). "Die Wirkung des Waldes bei Lawinen." Forum für Wissen: 21 - 26.
- Marugg, A. (1978). "Stangenholzdurchforstung im Gebirge." Bündnerwald 31(6): 186 - 194.

- Meyer-Grass, M. (1987). "Waldlawinen als Folge immissionsgeschädigter Gebirgswälder - Massnahmen." Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie.
- Meyer-Grass, M. und M. Schneebeili (1992). Die Abhängigkeit der Waldlawinen vom Standorts-, Bestandes- und Schneeverhältnissen. Schutz des Lebensraumes vor Hochwasser, Muren und Lawinen, Interpraevent 92. 2: 443-455.
- Petrini, O., L. Petrini, et al. (1989). "Taxonomic position of *Gremmeniella abietina* and related species: a reappraisal." Can. J. Bot. 67: 2805 - 2814.
- Pfister, R. und M. Schneebeili (1999). "Snow accumulation on boards of different sizes and shapes." Hydrological Processes 13(14-15): 2345-2355.
- Rüedi, M. (1964). "Aufforstung Fengst in der Gemeinde Sils i.D." Bündnerwald 18(1): 30 - 33.
- Rychetnik, J. (1982). "Sanierung der Schnee- und Lawinenverhältnisse in Lawinenanbruchgebieten." Mitteilungen der forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien 144: 169-185.
- Rychetnik, J. (1985). "Lawinenaktivität im Lawinenanbruchgebiet mit und ohne Lawinenstützverbau und Aufforstung." Mitteilungen der forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien 156: 197-208.
- Saeki, M. und H. Matsuoka ( 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. Mountain forests and avalanches. Proceedings of the Davos Seminar, September 1978, SLF.
- Schönenberger, W. (1975). "Standortseinflüsse auf Versuchsaufforstungen an der alpinen Waldgrenze (Stillberg, Davos)." Mitt. Eidgenöss. Anstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL 51: 359-428.
- Schönenberger, W. (1985). "Performance of a high altitude afforestation under various site conditions." Proc. 3rd IUFRO Workshop P. 1.07-00.
- Schönenberger, W. (2001). "Cluster afforestation for creating diverse mountain forest structures - a review." Forest ecology and management 145: 121-128.
- Schönenberger, W. und W. Frey (1988). "Untersuchungen zur Ökologie und Technik der Hochlagenaufforstung- Forschungsergebnisse aus dem Lawinenanrissgebiet Stillberg." Schweiz. Z. Forstwes. 139(9): 735-820.
- Senn, J. (1999). "Tree mortality caused by *Gremmeniella abietina* in a subalpine afforestation in the central Alps and its relationship with duration of Snow cover." Eur. J. For. Path. 29: 64-74.
- Senn, J. und W. Schönenberger (2001). "Zwanzig Jahre Versuchsaufforstung Stillberg: Überleben und Wachstum einer subalpinen Aufforstung in Abhängigkeit vom Standort." Schweiz. Z. Forstwes. 152: 226-246.
- Streule, A. (1973). "Schäden in Gebirgsaufforstungen durch das Birkhuhn (*Lyrurus tetrix*)." Bündnerwald 26: 249-254.
- Tranquillini, W. (1979). Physiological ecology of the alpine timberline. Tree Existence at High Altitudes with Special Reference to the European Alps. Berlin, Springer.
- Tranquillini, W. und H. Turner (1961). "Untersuchungen über die Pflanzentemperaturen in der subalpinen Stufe mit besonderer Berücksichtigung der Nadeltemperaturen der Zirbe." Mitt. Forstl. Bundesversuchsanstalt Mariabrunn 59: 127 - 151.
- Turner, H., R. Häslner, et al. (1982). "Contrasting microenvironments and their effects on carbon uptake and allocation by young conifers near alpine treeline in Switzerland." Proc. IUFRO Workshop Ecology of Subalpine Zones, Corvallis Oregon.

- Vanomsen, P. (1999). "Stammbrüche und -spaltungen in Lawinenanrissgebieten in der Versuchsaufforstung Stillberg (Graubünden) nach einem schneereichen Winter. Vergleichende Untersuchung der Stabilität junger Arven (*Pinus cembra* L.) und Lärchen (*Larix decidua* L.)." Diplomarbeit des Departements Forstwissenschaften, ETH Zürich.
- Vittoz, P., B. Rulence, et al. (2008). "Effects of Climate and Land-Use Change on the Establishment and Growth of Cembran Pine (*Pinus cembra* L.) over the altitudinal Treeline Ecotone in the Swiss Alps." *Arctic Antarctic, and Alpine Research* 40: 225-232.
- Wieser, G. und M. Tausz (2007). "Trees at Their Upper Limit. Treelife Limitation at the Alpine Timberline. Springer: Berlin/Heidelberg/New York."
- Zeller, E. (1977). "Pflege von Fichtenaufforstungen im Gebirge." *Bündnerwald* 30(6): 197 - 202.
- Zürcher, U. (1973). "Der Wald in der Raumplanung." *Mitteilung der Schweizerischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen* 49.

## 9 Anhang

### 9.1 Bestehende GIS-Datensätze

