



Berner Fachhochschule

Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft SHL



WSL-Institut für Schnee-
und Lawinenforschung SLF

Lawinenschutzwirksamkeit auf Vivian-Windwurfflächen

Stand der Verjüngung 20 Jahre nach dem
Sturmereignis

Bachelor-Thesis am WSL Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF

**Studiengang Forstwirtschaft
Gebirgswald und Naturgefahren
Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft SHL**

Marius Fankhauser

01.12.2010

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

Referent: Thormann Jean-Jacques, Dozent Forstwirtschaft, Schweizerisch Hochschule
für Landwirtschaft SHL

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	IV
Zusammenfassung.....	V
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Ziel der Arbeit.....	2
2 Stand des Wissens	3
2.1 Störungselastizität auf Schutzwaldflächen.....	3
2.2 Schutzwirksamkeit des Waldes gegen Lawinenanrisse	4
2.2.1 Schneeinterzeption	5
2.2.2 Strahlungshaushalt.....	6
2.2.3 Wind.....	6
2.2.4 Stützwirkung der Stämme.....	7
3 Material und Methoden	8
3.1 GIS-Analyse.....	8
3.1.1 Datengrundlage	8
3.1.2 Datenverwertung	9
3.2 Eigene Feldaufnahmen.....	9
3.2.1 Ausarbeitung der Flächenverteilung	9
3.2.2 Aufnahmeebenen	11
3.2.3 Flächenaufnahme.....	12
3.3 Daten aus anderen Erfassungen	15
3.4 Schneehöhen.....	15
3.5 Datenauswertung.....	16
3.5.1 Statistische Auswertungen	16
3.5.2 Kriterien der Schutzwirksamkeit	17

3.6	Herleiten der Schutzkriterien.....	17
3.6.1	Kronendeckungsgrad.....	17
3.6.2	Minimale Stammzahl pro Hektare.....	18
3.6.3	Baum-Schneehöhen-Faktor.....	21
3.6.4	Lückengrösse	22
3.6.5	Kriterienbäume	24
4	Resultate	25
4.1	Gesamtschweizerische Analysen	25
4.2	Flächenparameter	26
4.2.1	Deckungsgrad.....	26
4.2.2	Stammzahlen pro Hektare	27
4.2.3	Baumhöhen	29
4.2.4	Lückengrössen	31
4.3	Ergebnisse der Schutzwirksamkeit	32
5	Diskussion.....	35
5.1	Gesamtschweizerische Analyse der Schadenflächen	35
5.2	Flächenparameter.....	35
5.3	Schutzwirksamkeit	38
5.4	Diskussion der Methoden	39
6	Schlussfolgerung.....	40
7	Dank.....	42
8	Literatur.....	43
9	Anhang.....	47

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Konzeptionelles Modell der Wirkung von Störungen und waldbaulichen Eingriffen auf Walddynamik, Waldstruktur und Schutzwirkung (Brang, Schönenberger, Bachofen, Zingg, & Wehrli, 2004)	4
Abbildung 2: Aufbau der Schneedecke unter Schirm (B) und im Freiland (A). Durch die Wirkungen der Interzeption ist die Schneedecke im Bestand stark strukturiert und die Schneehöhe ist reduziert. Im Freiland ist der Aufbau homogen, was zu Schichtenbildung führen kann(Imbeck, 1987).	6
Abbildung 3: Skizze der Schneeablagerung(Frehner, Wasser, & Schwitter, Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald, 2005)	7
Abbildung 4: Lage der untersuchten Vivian-Sturmflächen auf pot. Lawinenanrissgebieten ..	10
Abbildung 5: Lawine in einer Waldlichtung (De Quervain, 1978)	23
Abbildung 6: Anordnung der Sturmschadenflächen nach Hangrichtung(Schmidtke & Scherrer, 1997)	26
Abbildung 7: Deckungsgrade in prozentualer Verteilung, nach Exposition und Anrissgebiet (Anrissgebiet 1: unter- und obermontane Höhenstufe; Anrissgebiet 2: Hochmontane und subalpine Höhenstufe)	27
Abbildung 8: Boxplot der Stammzahlen/ha in BHD-Klassen über alle aufgenommenen Flächen.....	28
Abbildung 9: Stammzahlen/Ha in BHD-Klassen aufgeteilt nach Expositionen und Anrissgebieten.....	29
Abbildung 10: Baumhöhen nach Hauptexpositionen und Anrissgebiete mit dem Mittelwert über die gesamten Gruppen.....	30
Abbildung 11: Histogramme der Lückenlängen und -breiten (links), Lückengrößen in Meter (rechts)	31

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einflussfaktoren der Schneeeintzeption durch Wald	5
Tabelle 2: Parameter für die Abgrenzung der Anrissgebiete	8
Tabelle 3: Minimale Höhenstufe in Abhängigkeit der Region.....	9
Tabelle 4: Auflistung der Aufnahme­flü­che.....	11
Tabelle 5: Aufnahme­ebenen und Aufnahme­parameter	11
Tabelle 6: Aufnahme­jahre der Orthophotos (swisstopo (DV033594) 2010).....	12
Tabelle 7: Parameter der Plotaufnahmen	14
Tabelle 8: Korrekturfaktor für die maximalen Schneehöhen nach Expositionen (Stoffel, et al. 2006)	16
Tabelle 9: Beurteilungskriterien für die Schutzwirksamkeit anhand des DG.....	18
Tabelle 10: Anzahl Stämme/ha in Abhängigkeit der Neigung, um einen Lawinenanriss zu verhindern nach Meyer-Grass und Schneebeli (1992).....	19
Tabelle 11: Beurteilungskriterien für die Schutzwirksamkeit anhand der Stammzahl.....	21
Tabelle 12: Maximale Lückengrösse in Abhängigkeit der Neigung nach NaiS (2005).....	22
Tabelle 13: Beurteilungskriterien bezüglich der Schutzwirksamkeit anhand der Lückengrösse	24
Tabelle 14: Überschneidung von Viviansturmflächen mit Waldflächen die vor Naturgefahrenprozessen schützen; Aufgeteilt nach prozentualen Anteilen der Gefahrenprozesse, deren mittlere Höhe und der Exposition (SilvaProtect-CH)	25
Tabelle 15: Flächenbewertung nach den Kriterien.....	32
Tabelle 16: Anrissgebiet 1 mit einer Neigung <37° (Gruppe 1).....	33
Tabelle 17: Anrissgebiet 1 mit einer Neigung >37° (Gruppe 2).....	33
Tabelle 18: Anrissgebiet 2 mit Neigung <37° (Gruppe 3).....	34
Tabelle 19: Anrissgebiet 2 mit einer Neigung von >37° (Gruppe 4).....	34

Zusammenfassung

Der Wintersturm Vivian, der im Februar 1990 über die Schweiz zog, verursachte in den Wäldern der Voralpen starke Schäden. Durch grossflächige Störungen in Schutzwäldern kann die Erfüllung der Schutzfunktion über lange Zeit erheblich beeinträchtigt sein. In der vorliegenden Arbeit wurde in einem ersten Teil das gesamtschweizerische Ausmass der Schäden durch Vivian in den Wäldern mit Schutzfunktion im Allgemeinen und mit einer Lawinenschutzfunktion im Speziellen aufgezeigt. Um die Schutzwirksamkeit der Flächen 20 Jahre nach dem Sturmereignis beurteilen zu können, wurden in einem zweiten Teil auf 26 Schadenflächen in den Nord- und Inneralpen, welche auf potentiellen Lawinenanrissgebieten liegen, stichprobenartige Aufnahmen zu der Entwicklung der Flächenverjüngung gemacht. Um eine Aussage über den Flächenzustand bezüglich der Schutzwirksamkeit machen zu können, wurden mit Hilfe von Literatur Kriterien zu den Parameter Deckungsgrad, Stammzahl pro ha, mittlere Baumhöhe und Lückengrösse formuliert.

Nach zwei Dekaden ist keine der aufgenommenen Flächen in der Lage, nach den formulierten Kriterien eine genügende Schutzwirksamkeit vor Lawinen zu gewährleisten. Am weitesten entwickelt sind die Flächen, die nach dem Sturm bepflanzt wurden. Die Datengrundlage ist jedoch nicht geeignet um eine Aussage darüber zu machen, ob beplante Flächen nach einem Sturmereignis schneller wieder eine Schutzwirkung erfüllen können als naturverjüngte. Unter den einzelnen Flächen sind sehr grosse Unterschiede in der Verjüngungsdichte erkennbar. In der Entwicklung von Flächen unterteilt nach Expositionen und Höhenstufen sind keine markanten Unterschiede vorhanden.

Durch die abnehmende Stützwirkung von Totholz und den noch fehlenden Bestandesaufbau zur Verhinderung von Lawinenanrissen, ist 20 Jahre nach dem Sturmereignis ein Schutzwirksamkeitsdefizit festzustellen. Bis die Verjüngung eine Schutzwirkung erfüllen kann ist noch mindestens mit weiteren 10 Jahren zu rechnen.

Schlagwörter:

Lawinenschutzwirksamkeit, Sturmflächen, Verjüngungsentwicklung, Schutzwirksamkeitskriterien

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Einer der wichtigsten Ansprüche des Menschen an den Gebirgswald ist der Schutz vor Naturgefahren. Nach den Flächenberechnungen der Kantone für BSF-Wald (BSF: besondere Schutzfunktion) erfüllen 280'000ha (23% der Waldfläche) eine besondere (Objekt-) Schutzfunktion und 430'000ha (36%) eine allgemeine Schutzfunktion. Im Gebirgswald spielt dabei der Schutz vor Lawinenanrissen eine wichtige Rolle. Laut dem LFI2 sind mit 58'100 ha etwa 5 % der Gesamtwaldfläche als Lawinenschutzwald ausgeschieden (Duc, Brändli, & Brassel, 2004). Die Wirkung die der Wald dabei ausübt ist durch verschiedene Faktoren geprägt, welche sich stabilisierend auf die Schneedecke auswirken. Die Hauptfaktoren sind Schneeinterzeption, Strahlungshaushalt, Wind und die Stützwirkung der Stämme (Margreth, Die Wirkung des Waldes bei Lawinen, 2004). Während des Winters 1999 konnte diese positive Wirkung des Waldes erneut festgestellt werden. Trotz der Rekordschneehöhen dieses Winters wurden praktisch keine Lawinenanrisse in bewaldetem Gebiet beobachtet (SLF, 2000).

Wälder die an Hängen mit einer Neigung von über 30° stehen und in Regionen liegen in welchen die Schneesverhältnisse die Bildung von Schneebrettern oder Gleitschneelawinen ermöglichen, gelten aus diesem Grund als potentielle Lawinenschutzwälder. In Wäldern die durch das Verhindern oder Abschwächen von Gefahrenprozessen Menschen und Sachwerte vor Naturgefahren schützen, ist es wichtig über stabile Bestandesstrukturen zu verfügen. Das Ideal ist je nach Standort und Naturgefahr anders zu definieren und erfüllt die Anforderungen langfristig durch eine stetige standortgerechte Verjüngung (Frehner, Wasser, & Schwitter, Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald, 2005).

Die Dynamik von biologischen Systemen wie dem Gebirgswald wird hauptsächlich durch Wachstum, Tod und Erneuerung auf Ebene der Individuen geprägt. Neben diesen individuellen Einflüssen spielen jedoch auch andere Faktoren eine wichtige Rolle. Dazu zählen in erster Linie natürliche Störungen. Nach Pickett und White (1985) werden darunter Umfeld bedingte Schwankungen und zerstörerische Ereignisse verstanden. Waldbrände, Insektenbefall, Stürme, Überschwemmungen und Lawinen sind Störungen die periodisch auftreten und innerhalb kürzester Zeit starke und grossflächige Auswirkungen auf den Aufbau und die zukünftige Entwicklung von Ökosystemen haben können.

In den Schweizer Gebirgswaldökosystemen sind Stürme die Hauptereignisse für grossflächige Störungen in der Struktur der Bestände (Rammig, Fahse, Bugmann, & Bebi,

2006). Durch grosse Sturmereignisse können die Strukturen von Schutzwäldern so stark zerstört werden, dass die Erfüllung der Schutzwirksamkeit des Waldes gegenüber den Naturgefahren über lange Zeit in Frage gestellt sein kann.

Im Februar 1990 zog der Sturm „Vivian“ über West- und Mitteleuropa. Der Orkan erreichte bisher in Mitteleuropa noch nie gemessene Windgeschwindigkeiten. In Belgien, Luxemburg und Deutschland (Saarland 20% der Waldflächen) hinterliess der Sturm grossflächige Waldschäden. Während das Schweizer Mittelland nur wenig von den Folgen betroffen war, führten die Barrieren des Jura und der Alpen zu extremen Windgeschwindigkeiten. An der alpinen Passstation des Grossen St. Bernhard wurde die Höchstgeschwindigkeit von 75m/s (270km/h) gemessen. Speziell im Gebirgswald hinterliess der von Westen kommende Sturm starke Spuren. Von den in der Schweiz inventierten Schadenflächen befanden sich 92% in den Alpen und Voralpen(Schmidtko & Scherrer, 1997). Durch die grossflächigen Blößen die in den Schutzwäldern entstanden sind, musste die Frage gestellt werden, wie sich die Sturmflächen in den nächsten Jahren entwickeln und wie lange es dauert, bis der Wald die minimale Schutzwirksamkeit wieder gewährleisten kann.

1.2 Ziel der Arbeit

Mit dieser Arbeit soll ein Überblick über die Entwicklung der Vivian-Sturmflächen auf potentiellen Lawinenanrissgebieten gegeben werden. In einem ersten Schritt werden die Flächenverhältnisse des Sturmereignisses bezüglich des Schutzwaldes aufgezeigt, im Speziellen in Bezug auf Lawinenschutzwälder. In einem zweiten Schritt wird stichprobenartig die vorhandene Verjüngungsstruktur in den Sturmflächen untersucht und anhand von Schutzkriterien bewertet. Die Kriterien für die Erfüllung der Schutzwirksamkeit werden in der Literatur kontrovers diskutiert. Für die Formulierung der Schutzwirksamkeit wurden die Kriterien anhand der vorliegenden Literatur zusammengestellt und formuliert. Auf Basis der Kriterien soll aufgezeigt werden, in wie weit nach 20 Jahren eine Schutzwirksamkeit übernommen werden kann. Zu diesem Zweck sollen die folgenden Forschungsfragen und Hypothesen untersucht werden:

Frage 1: Wie weit haben sich Windwurfflächen in potentiellen Lawinenanrissflächen 20 Jahre nach dem Vivian-Sturmereignis verjüngt?

Frage 2: Sind Unterschiede in der Verjüngungsentwicklung bezüglich verschiedener Standorte vorhanden?

Frage 3: Können die Vivian-Sturmflächen nach 20 Jahren die Funktion als Schutzwald vor Lawinenanrissen wieder vollständig gewährleisten?

2 Stand des Wissens

2.1 Störungselastizität auf Schutzwaldflächen

Durch Störung werden die Strukturen von Ökosystemen abrupt umgestaltet. Dies kann langfristige Veränderung der Ressourcen, der Substratverfügbarkeit und der Umwelt zur Folge haben (Pickett & Withe, 1985). Werden durch einen Sturm Bäume geworfen, beeinflusst dies die Auf- und Abbauprozesse des Waldökosystems (Brang, Schönenberger, Bachofen, Zingg, & Wehrli, 2004). Dasselbe gilt im Übrigen auch für waldbauliche Eingriffe wie das Fällen von Bäumen und das Räumen von Windwurfflächen. Dadurch werden die Waldstrukturen, welche eine potentielle Schutzwirksamkeit gewährleisten, stark beeinflusst. Der Begriff Störungselastizität bezeichnet die Fähigkeit eines Waldes, nach einer Störung möglichst schnell wieder in den ursprünglichen Zustand zurück zu kehren. Oft wird in diesem Zusammenhang auch von Resilienz gesprochen. Damit wird die allgemeine Fähigkeit umschrieben, nach einer Störung wieder in den Ausgangszustand zurück zu kehren, also zum Beispiel die Möglichkeit spontaner Wiederbewaldung von Störungsflächen. Die Geschwindigkeit der Wiederbewaldung wird dabei nicht berücksichtigt.

Nach Brang et al. (2004) sind die meisten unserer Schutzwälder resilient und ihre Wiederbewaldung somit gesichert. Für Störungsflächen in Schutzwäldern steht also die Frage wie rasch sich die Wiederbewaldung einstellt und wie bald die Strukturen wieder Schutzcharakter aufweisen im Vordergrund (Grimm & Wissel, 1997). Laut Brang et al. (2004) sollte die Bezeichnung „Stabilität“ im Zusammenhang mit Schutzwald nicht verwendet werden, da der Begriff ein Gefühl von statischem Verhalten und somit einer Unveränderlichkeit vermittelt. Dies ist allerdings in Waldökosystemen nicht möglich und nach einer Störung zudem nicht erwünscht. Unterschiede sind nur in der Störungsresistenz und der Störungselastizität von Schutzwäldern vorhanden.

Gebirgswälder verfügen über eine wesentlich niedrigere Störungselastizität als Tieflagenwälder. Sie ist in erster Linie bedingt durch die geringeren Verjüngungsdichten und das langsame Baumwachstum. Dies hat auch eine Untersuchung auf Sturmflächen in Schwanden, Disentis und Pfäfers gezeigt (Wohlgemuth, Kull, & Wüthrich, 2002). Die Verjüngungsdichten auf den untersuchten Flächen unterschieden sich beachtlich von solchen in tieferen Lagen. Nach Wohlgemuth et al. (2002) reicht eine Zeitperiode von 20-30 Jahren nicht aus damit sich auf den Windwurfflächen eine ausreichende Verjüngung etablieren kann um die Schutzfunktion wieder zu gewährleisten. Auch Ott et al. (1997) und Brang und Duc (2002) stellen fest dass bedingt durch die sehr langsamen Verjüngungsabläufe in Gebirgswäldern mit einer Zeitspanne von 30-80 Jahren gerechnet

werden muss, bis eine Fichte zwei Meter hoch ist und damit vor Schneeabwurf, Pilzkrankheiten und Wildverbiss einigermaßen sicher. Der Zeitraum in dem die Verjüngung die örtliche maximale Schneedecke deutlich überragt und somit das schutzfähige Alter erreicht, wird subalpin innerhalb relativ kleiner Lücken auf mindestens 50 bis 80 Jahre geschätzt (Ott, Frehner, Frey, & Lüscher, 1997).

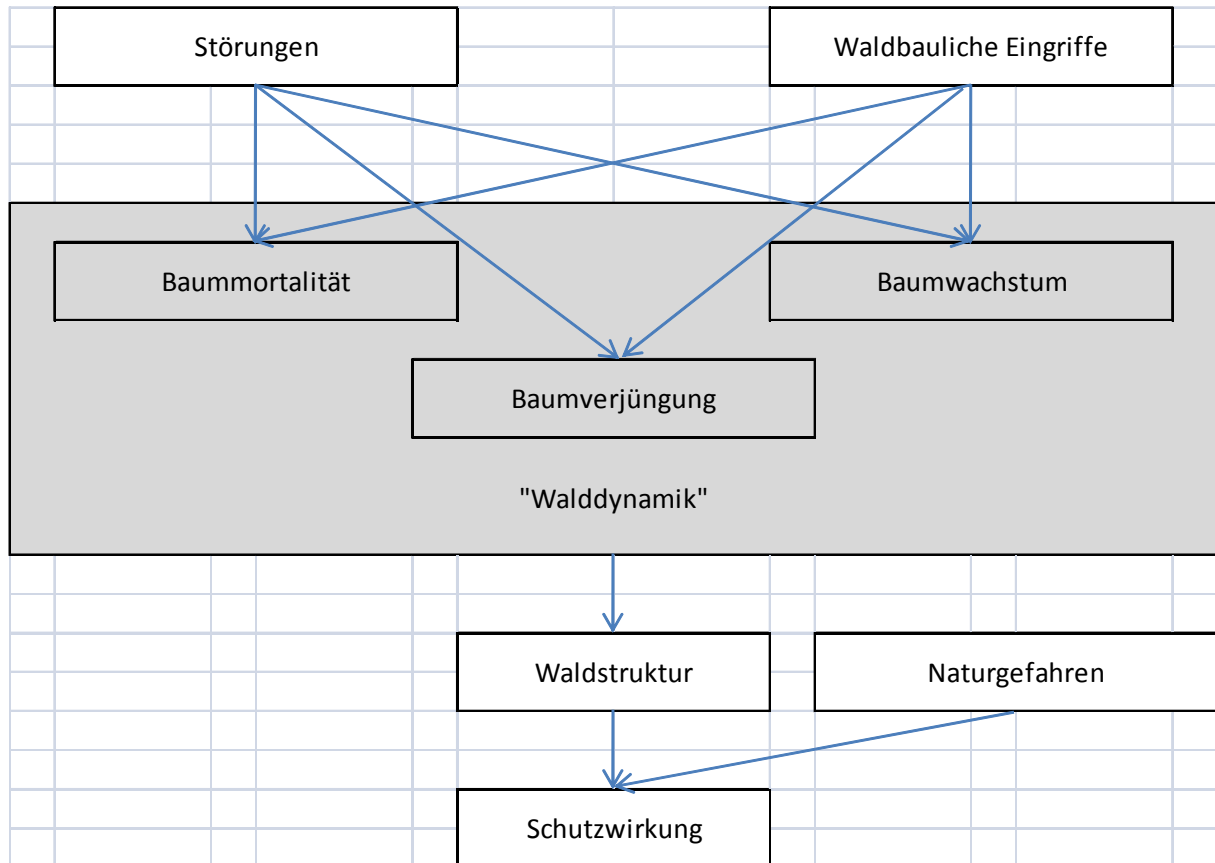


Abbildung 1: Konzeptionelles Modell der Wirkung von Störungen und waldbaulichen Eingriffen auf Walddynamik, Waldstruktur und Schutzwirkung (Brang, Schönenberger, Bachofen, Zingg, & Wehrli, 2004)

2.2 Schutzwirksamkeit des Waldes gegen Lawinenanrisse

Die Schutzwirkung des Waldes gegenüber Lawinenanrisse liegt in erster Linie darin, dass er durch seinen strukturellen Aufbau das Anreissen von Lawinen verhindert. Dabei sind vor allem ein genügender Dichtstand der Bäume und ein gute Altersabstufung wichtig für die Schutzwirksamkeit (Frey, 1977). Der Wald verhindert den Aufbau einer homogenen Schneedecke, dadurch können sich im Schnee keine Gleitschichten bilden und es entsteht ein stabilisierender Effekt. Die wichtigsten Einflussfaktoren sind dabei Schneeinterzeption, Strahlungshaushalt, Wind und die Stützwirkung der Stämme (Margreth, Die Wirkung des Waldes bei Lawinen, 2004).

2.2.1 Schneeinterzeption

Wie bei Regen entsteht auch bei Schneefall eine Interzeptionswirkung durch das Kronendach. Ein Teil des Schnees wird in den Baumkronen abgelagert und verhindert dadurch eine einheitliche Schneedeckenbildung. Dadurch dass ein grosser Teil des Schnees nicht auf den Boden gelangt und in den Baumkronen evaporiert, kann sie laut Hess (1949) eine günstige Einwirkung in Lawinenanrissgebieten haben. Die Stärke der Interzeption hängt in erster Linie vom Bestandaufbau, von klimatischen Verhältnissen sowie von der Höhenlage ab. Eine genauere Umschreibung wird in Tabelle 1 aufgezeigt. Es ist sehr schwierig eine einheitliche Grösse der Schneeinterzeption zu formulieren, da eine grosse Variabilität in den aufgeführten Faktoren herrscht. Bei immergrünen Koniferen kann von einer Interzeptionswirkung in der Grössenordnung von 10-30%, bei winterkahlen Baumarten von 5-15% ausgegangen werden. Grundsätzlich gilt, dass die Interzeptionsverluste umso grösser ausfallen, je dichter der Bestand ist und je grösser die einzelnen Kronen sind (Frey, 1977). In stufig aufgebauten, nadelholzreichen Beständen des Plenterwaldes ist die Schneeinterzeption besonders hoch. Mit steigender Höhenlage nimmt die Interzeption ab. Dies ist laut Brechtel et al. (1971) im wesentlichen darauf zurück zu führen, dass mit zunehmender Höhenlage der Anteil an Nassschneefällen abnimmt und zusätzlich der Windeinfluss zunimmt.

Tabelle 1: Einflussfaktoren der Schneeinterzeption durch Wald

Bestandaufbau	Alter Bestandesform Bedeckungsgrad Baumartenzusammensetzung
klimatische Verhältnisse	Wind Intensität der Schneefälle Abfolge der Schneefälle
Höhenlage	Temperatur der Luft Temperatur der Baumteile Nassschneeanteil

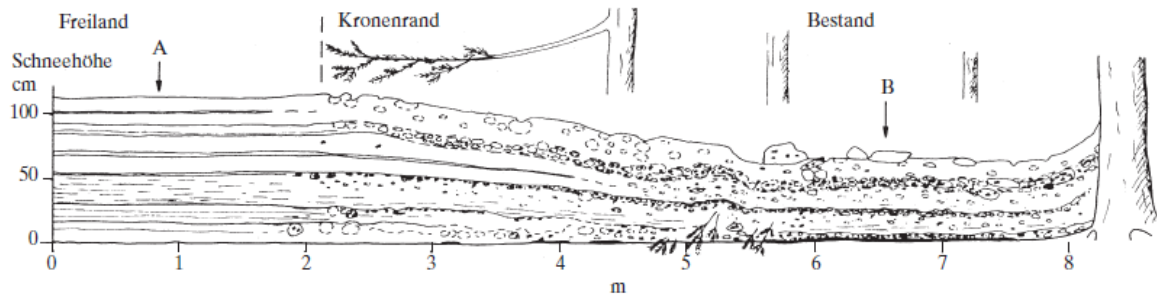


Abbildung 2: Aufbau der Schneedecke unter Schirm (B) und im Freiland (A). Durch die Wirkungen der Interzeption ist die Schneedecke im Bestand stark strukturiert und die Schneehöhe ist reduziert. Im Freiland ist der Aufbau homogen, was zu Schichtenbildung führen kann (Imbeck, 1987).

2.2.2 Strahlungshaushalt

Durch den Schutz der Bäume herrscht im Wald ein Klima das ausgeglichener ist als im Freiland. Die schwächeren Temperaturunterschiede zwischen Tag und Nacht verringern die Gefahr der Bildung von Oberflächenreif. Dieser führt im Freiland zur Bildung von Schichten im Schnee, welche das Abgleiten der darüber liegenden Schneemassen begünstigen (Margreth, Die Wirkung des Waldes bei Lawinen, 2004).

2.2.3 Wind

In einem geschlossenen Bestand ist die Einwirkung von Wind in Bodennähe geringer und dadurch entstehen weniger Schneeverfrachtungen. Im Gegenzug kann der Schnee auf Lichtungen und am Waldrand konzentrierter abgelagert werden (Frehner, Wasser, & Schwitter, Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald, 2005).

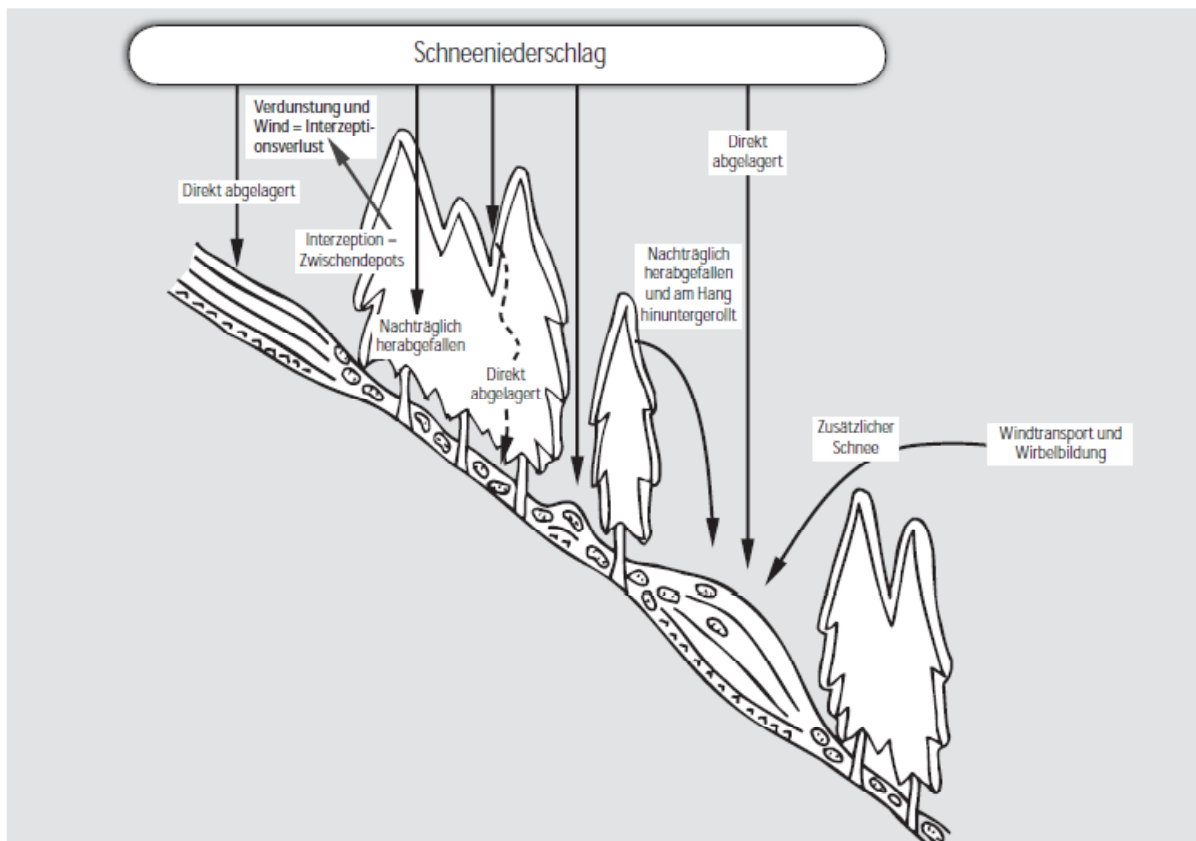


Abbildung 3: Skizze der Schneeablagerung(Frehner, Wasser, & Schwitter, Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald, 2005)

2.2.4 Stützwirkung der Stämme

Falls die Bäume stark genug sind um den Kriech- und Gleitkräften des Schnees zu widerstehen, bilden Stämme mehr oder weniger steife Objekte in der Schneeoberfläche. Dadurch halten sie einen Teil des bodenparallelen Gewichtes des Schnees zurück. In den Zonen des Rückdrucks werden um den Stamm Spannung und zusätzliche Stressfaktoren erzeugt wodurch eine neue Verteilung der Schwachstellen entsteht. Dadurch wird in erster Linie der bodenparallele Stressanteil reduziert. Somit wird eine Stabilisierung hervorgerufen, da vor allem schwache Zwischenschichten in der Hangparallele für den Anbruch von Lawinen verantwortlich sind. Je dichter der Wald ist, desto stärker ist die Reduktion der Hangparallelen Stressanteile und desto höher ist somit die erreichte Stabilität(Salm, 1978). Auch durch umgestürzte Wurzelteller und liegende Stämme wird die Schneedecke stabilisiert. Dieser Effekt gilt aber nur solange, wie das Totholz noch eine genügende innere Festigkeit aufweist um den Kriech- und Gleitkräften des Schnees zu widerstehen. Zudem geht die Schutzwirkung verloren, sobald die Bodenrauigkeiten von der Schneedecke überlagert werden(Margreth, Die Wirkung des Waldes bei Lawinen, 2004).

3 Material und Methoden

Die vorliegende Arbeit basiert einerseits auf einer GIS-Analyse von gesamtschweizerischen Daten zur Schutzfunktion von Vivianflächen, andererseits auf eigenen Feldaufnahmen auf Vivian-Sturmflächen, welche gleichzeitig auf potentiellen Lawinenanrissgebieten liegen. Die gesamtschweizerische Analyse diente dabei als Basis für die Auswahl der 26 Flächen für die Feldaufnahmen, mit welchen detaillierte Informationen zur Entwicklung und Schutzwirksamkeit von Vivianflächen 20 Jahre nach dem Sturm gewonnen wurden.

3.1 GIS-Analyse

3.1.1 Datengrundlage

Als Datengrundlage diente zum einen ein GIS-Coverage (BAFU, 2010) mit den Ergebnissen der Totalschadenerfassung anhand von normalfarbigen Luftbildaufnahmen, welche aus der Sturmschadeninventur von 1990 der Eidgenössischen Forstdirektion hervorging. Die Luftbildaufnahmen im Massstab 1:15'000 ermöglichten eine einheitliche und vollständige Erfassung der Totalschadenflächen. Als Kriterium für die Berücksichtigung galt ein maximaler Deckungsgrad der zerstörten Waldflächen von ≤ 0.2 (20%) der Restbestockung. Der Deckungsgrad der Fläche vor dem Ereignis wurde dabei nicht berücksichtigt. Die Minimalfläche für eine Inventur wurde auf 20 Aaren festgelegt (Schmidtke & Scherrer, 1997). Als weitere Datengrundlage wurde ein GIS-Gridcoverage aller potentiellen (pot.) Lawinenanrissgebiete der Schweiz verwendet (Gruber & Bartelt, 2007). Dieses Gridcoverage wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt im Zusammenhang mit dem Projekt SilvaProject-CH erstellt. Die Berechnungen gehen von einer Lawine mit 300 jähriger Wiederkehrdauer aus und wurden mit dem zweidimensionalen Voellmy-Slam-Modell, AVAL-2D, ausgeführt. Die Inputdaten für die Abgrenzung der Anrissgebiete werden in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Parameter für die Abgrenzung der Anrissgebiete

Parameter	Wert
Hangneigungsunter- /-obergrenze	28°-60°
Minimale Anrissgebietsfläche	5000m ²
Minimale Länge des Anrissgebietes	50m
Rippen-Trennungparameter	20m

Ein weiterer Faktor der für das Auftreten grösserer Lawinenereignisse relevant ist, ist die minimale Höhe über Meer. Sie wurde in Abhängigkeit der Regionen definiert (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Tabelle 3: Minimale Höhenstufe in Abhängigkeit der Region

<u>Region</u>	<u>Minimale Anrissgebietshöhe (m.ü.M.)</u>
Nordalpen	900
Inneralpen	1100
Südalpen	1200

Für die weitere Verarbeitung der Daten wurde zudem das „Digital Elevation Model“ DHM25 (Bundesamt für Landestopographie, 1997) der Schweiz sowie die Luftbildaufnahmen „Swissimage“ mit einer Auflösung von 25 bzw. 50cm verwendet (swisstopo (DV033594), 2010). Alle GIS-Daten wurden für die weiteren Analysen in Grids mit 5-Meter Auflösung und gemeinsamem Ursprung transferiert.

3.1.2 Datenverwertung

Durch die Überschneidung der Gritcoverages „Vivian-Totalschadenflächen“ und „pot. Lawinanrissgebiete“ wurden die für die vorliegende Arbeit relevanten Flächen ermittelt. Dadurch entstand eine gesamtschweizerische Übersicht. Mit Hilfe des DHM25 konnte eine Unterteilung der Vivianflächen auf pot. Lawinanrissgebieten in die Hauptexpositionen Nord (0-89.9°/270-360°) und Süd (90°-269.9°) erfolgen. Für die Feldaufnahmen wurden aus der Gesamtzahl eine statistisch relevante Anzahl Flächen ausgeschieden.

3.2 Eigene Feldaufnahmen

3.2.1 Ausarbeitung der Flächenverteilung

Nachdem mit Hilfe des GIS die Vivian-Schadenflächen in potentiellen Lawinanrissgebieten bestimmt wurden, konnten 26 Flächen für die stichprobenartigen Feldaufnahmen festgelegt werden. Dabei wurden verschiedene Faktoren berücksichtigt:

1. Nord-Südexposition gleichmässig vertreten
2. Nord- und Inneralpen über gesamte Breite vertreten
3. Zufällige Auswahl der Flächen aus den durch Punkt 1. und 2. definierten Bedingungen

Alle Feldaufnahmen wurden in der Vegetationsperiode 2010 von Mitte Juni bis Ende September durchgeführt.

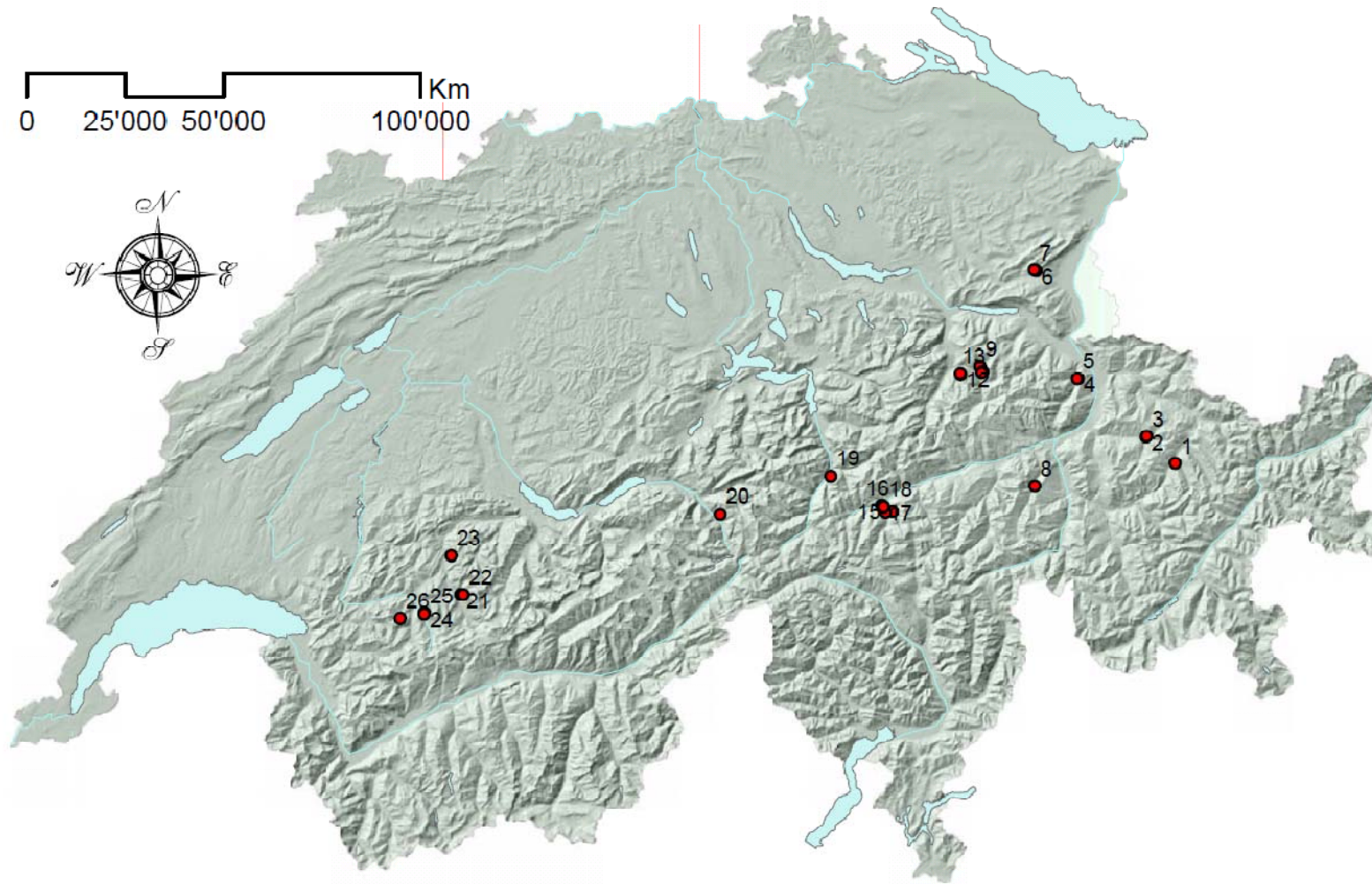


Abbildung 4: Lage der untersuchten Vivian-Sturmflächen auf pot. Lawinenanrissgebieten

Tabelle 4: Auflistung der Aufnahme­flü­che

Fläche	Ort	X-Koord.	Y-Koord.	m.ü.M.	Höhenstufe	Anrissgebiet	Exp
1	Frauenkirch	781176	181774	1770	Subalpin	2	N
2	Langwies	773744	188506	1550	Hochmontan	2	S
3	Langwies	773898	188649	1650	Subalpin	2	S
4	Pfaefers	756548	203296	1345	Obermontan	1	N
5	Pfaefers	756225	203250	1170	Obermontan	1	N
6	Wildhaus	745849	230651	1360	Hochmontan	2	S
7	Wildhaus	745350	230900	1245	Obermontan	1	S
8	Safien	745500	176024	1500	Hochmontan	2	N
9	Engi	731553	206404	1340	Obermontan	1	N
10	Engi	732301	205045	1680	Subalpin	2	S
11	Engi	731972	204803	1495	Hochmontan	2	N
12	Schwanden	726646	204284	1530	Hochmontan	2	S
13	Schwanden	726580	204573	1475	Hochmontan	2	N
14	Medel	709375	169527	1620	Subalpin	2	N
15	Medel	707576	169275	1580	Hochmontan	2	N
16	Disentis	706628	171073	1275	Obermontan	1	S
17	Disentisa	707051	170721	1450	Hochmontan	2	N
18	Disentisb	707051	170721	1450	Hochmontan	2	N
19	Silenen	693671	178500	1400	Hochmontan	2	N
20	Guttannen	665649	168800	1495	Hochmontan	2	S
21	Matten	599750	148474	1240	Obermontan	1	S
22	Matten	600325	148425	1500	Hochmontan	2	S
23	Zweisimmen	597302	158365	1500	Hochmontan	2	S
24	Im Fang	590449	143799	1275	Obermontan	1	S
25	Im Fang	590426	143501	1250	Obermontan	1	S
26	Oey	584349	142449	1490	Hochmontan	2	N

3.2.2 Aufnahmeebenen

Die Analyse der Flächen wurde auf zwei Ebenen durchgeführt. Zum einen wurde die gesamte Fläche betrachtet, zum anderen wurden jeweils fünf Plots für die Aufnahmen eingelegt. Die Aufnahme umfasst folgende Angaben:

Tabelle 5: Aufnahmeebenen und Aufnahme­parameter

Flächenaufnahme	Plotaufnahme
Deckungsgrad der Windwurffläche Lückenlänge Lückenbreite Behandlungsmassnahmen	Neigung Bodenvegetation Verjüngung (0.1-1.3m) Wildverbiss Bestockung (>1.3) Totholz

3.2.3 Flächenaufnahme

Deckungsgrad und Lückengrösse

Der Deckungsgrad der aufgenommenen Flächen wurde mit Hilfe der Orthophoto SWISSIMAGE (swisstopo (DV033594), 2010) im GIS ermittelt. Wenn vorhanden, wurden Orthophoto mit einer Bildauflösung von 25cm genutzt, welche im Zeitraum 2007-2008 aufgenommen wurden. Da diese noch nicht flächendeckend für die gesamte Schweiz vorhanden sind, musste stellenweise auf ältere Daten mit einer Auflösung von 50 cm Genauigkeit aus den Jahren 2003-2005 zurückgegriffen werden. Welche Fläche in welchem Jahr fotografiert wurde, kann aus **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** entnommen werden. Der Deckungsgrad wurde in einem GIS-Layer erfasst und je Flächenaufnahme ausgewertet. In einem zweiten Schritt wurde pro Fläche die maximale Lückengrösse eingemessen, welche auf der jeweiligen Fläche vorhanden ist. Dabei wurde die grösste Fläche ohne Kronenbedeckung in Hangfalllinie berücksichtigt. Diese aus dem GIS entnommenen Daten wurden mit den Angaben abgeglichen, welche für denselben Parameter im Feld aufgenommen wurden. Die stichprobenartigen Sichtaufnahmen haben eine gute Übereinstimmung mit den im GIS erfassten DG ergeben. Es muss an dieser Stelle allerdings erwähnt werden, dass nicht bei allen Flächen eine aussagekräftige Schätzung des Deckungsgrades und der Lückengrösse im Feld vorgenommen werden konnte, da die topographische Situation und die Flächengrösse dies nicht immer zuliesse. Aus diesem Grund wurden für die weiteren Auswertungen die einheitlichen Daten der GIS-Analyse verwendet.

Tabelle 6: Aufnahmejahre der Orthophotos (swisstopo (DV033594) 2010)

2003	<ul style="list-style-type: none">• Silenen (Nr. 19)
Vermutlich 2003	<ul style="list-style-type: none">• Disentis (Nr. 16, 17, 18)• Medel (Nr. 14, 15)• Safien (Nr. 8)
2004	<ul style="list-style-type: none">• Guttannen (Nr. 20)
2005	<ul style="list-style-type: none">• Wildhaus (Nr. 6, 7)
2007	<ul style="list-style-type: none">• Öy (Nr. 26)• Im Fang (Nr. 24, 25)• Matten (Nr. 21, 22)• Zweisimmen (Nr. 23)
2008	<ul style="list-style-type: none">• Schwanden (Nr. 12, 13)• Engi (Nr. 9, 10, 11)• Pfäfers (Nr. 4, 5)• Langwies (Nr. 2, 3)

Behandlungsmassnahmen

Für jede aufgenommene Fläche wurde erfasst, welche Massnahmen nach dem Sturmereignis getroffen wurden. Dafür wurden während der Feldaufnahmen folgende Aspekte berücksichtigt:

Räumung

Pflanzung Baumart

Temporäre Verbauungen

Pflege

Plotaufnahme

Pro Fläche wurden fünf Plots eingemessen. Die Plots wurden rechteckig angelegt und wiesen eine Grösse von 10 * 10 Meter auf. Die Abmessung der Seitenlängen erfolgte parallel zu der Hangneigung. Um eine statistische Unabhängigkeit zu gewährleisten aber trotzdem flexibel auf die lokalen Gegebenheiten reagieren zu können, wurde die Plotanordnung erst im Feld definiert. Sie wurde immer nach demselben Muster angelegt. An einem vor Ort gewählten Punkt in der Fläche wurde ein Holzstock gedreht. In die Richtung in die die Spitze des Stockes zeigte, wurden 20m abgemessen. Von dem dadurch erreichten Punkt wurde der erste Plot in weiterführender Richtung mit der oberen Horizontale parallel zum Hang eingelegt. Die Lage des nächsten Plots wurde wiederum durch das drehen eines Stockes bestimmt. Der Abstand von 20m wurde ab der Ecke des vorhergehenden Plots gemessen, die in der Richtung der Stockspitze liegt. Kam der neue Plot in der Richtung der anderen Plots oder auf eine nicht repräsentative Fläche (Felsband, Strasse) zu liegen, wurde in die entgegengesetzte Richtung gegangen. War dies nicht möglich, wurde eine neue Richtung bestimmt.

Tabelle 7: Parameter der Plotaufnahmen

Mittlere Neigung	mit Hilfe eines Neigungsmessers in Grad
Bodenvegetation	Hauptart
	Höhe in Stufen
	Stufe 1 -30cm
	Stufe 2 -50cm
	Stufe 3 -70cm
	Stufe 4 70cm+
	Deckungsgrad in Prozent der Plotfläche
Verjüngung (10-130cm)	Stammzahl pro Baumart
	Wildverbiss pro Baumart
Bestockung (130cm ≤)	Höhe
	Brusthöhendurchmesser (BHD)
Totholz	Wirkhöhe der 5 höchsten Elemente
	Deckungsgrad des Totholzes in Prozent der Plotfläche
	Zersetzungsgrad nach Renvall (1995)

Die Bodenvegetation wurde mit maximal drei Arten angegeben, welche hauptsächlich vertreten sind. Wie in Tabelle 7 beschrieben, wurde die Höhe in vier Stufen eingeteilt. Sie bezieht sich auf die mittlere Höhe der Hauptvegetation. Der Deckungsgrad ist auf die gesamte Bodenvegetation bezogen.

Als Verjüngung wurden alle Baumarten berücksichtigt, die eine Stammhöhe zwischen 10 und 130cm aufweisen. Die Verjüngung wurde pro Baumart ausgezählt. Gebogene Bäume unter 130cm wurden als Verjüngung bezeichnet. Trotz des fortgeschrittenen Alters sind sie noch dem verstärkten Wilddruck und der Konkurrenzvegetation ausgesetzt. Zudem übernehmen sie noch keine relevante Schutzfunktion.

Der Verbiss der Verjüngung wurde prozentual für jede Baumart erhoben, wobei kein Unterschied zwischen dem Verbiss des Haupttriebes und der Seitentriebe gemacht wurde. Er wurde nur bei der Verjüngung erhoben, da der Wilddruck in erster Linie in dieser Periode starken Einfluss auf die Entwicklung der Verjüngung hat.

Als Hauptbestockung wurden alle Baumarten erfasst, die grösser als 130cm sind. Die Höhe wurde mit dem Doppelmeter auf 10cm genau gemessen, ab einer Höhe von 400cm wurde geschätzt. Der BHD ist mit einer Kluppe auf einen Zentimeter genau gemessen.

Die Wirkhöhe des Totholzes wurde als ein Mittel der fünf höchsten Elemente pro Plot angegeben. Waren weniger als fünf Elemente vorhanden, wurde das Mittel dieser Anzahl genommen. Für die Schätzung des Deckungsgrades wurde die gesamte Menge an Totholz berücksichtigt. Der Zersetzungsgrad wurde in fünf Stufen mit Hilfe eines Sackmessers nach der Methode von Renevall (1995) bestimmt.

3.3 Daten aus anderen Erfassungen

Einige für diese Arbeit verwendete Flächen wurden bereits für eine andere Untersuchung, welche von Kathrin Priewasser für ihre Doktorarbeit an der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL durchgeführt wird, aufgenommen. Da diese Aufnahmen ausführlicher gemacht wurden als es für die hier vorliegende Arbeit notwendig war, konnten die Daten von insgesamt sechs Flächen auf meine Aufnahmemethode umgewandelt werden. Da für diese Untersuchung insgesamt sechs Plots pro Fläche aufgenommen wurden, konnte für die Übernahme mit Hilfe verschiedener Kriterien gewählt werden. Zum einen wurden zuerst Plots berücksichtigt, welche 28° und mehr Neigung aufwiesen. Waren nicht genügend Plots mit einer solchen Neigung vorhanden, wurden vereinzelt auch solche einbezogen, die eine kleinere Neigung aufwiesen. Die minimale Neigung betrug dabei 24°. Wiesen alle sechs Plots eine Neigung von mehr als 28° auf, wurden die fünf ersten Plots berücksichtigt.

3.4 Schneehöhen

Für die Berechnung der für die aufgenommenen Flächen relevante Schneehöhe wurde das nach den technischen Richtlinien für Lawinenverbau im Anrissgebiet zu berechnende Flächenmittel der extremen Schneehöhe H_{ext} für eine Wiederkehrdauer von 100 Jahren gewählt (Margreth, 2007). Diese Schneehöhe wurde mit dem Faktor von 0.83 auf eine Wiederkehrdauer von 30 Jahren umgerechnet (Stoffel, Schär, Margreth, & Müller, 2006). Im Wald wird für Lawinen eine mittlere statistische Wiederkehrdauer von 30 Jahren angenommen. Da davon ausgegangen wird, dass Lücken in dieser Zeitperiode so weit zuwachsen, dass später keine Waldlawinen mehr anreissen können (Frehner, Wasser, & Schwitter, 2005). Im selben Leitfaden ist auch ein Faktor zu finden, mit dem sich der Einfluss der Sonneneinstrahlung nach Exposition und Hangneigung auf die maximalen Schneehöhen berechnen lässt (Tabelle 8). Da in dieser Arbeit nur nach den Hauptexpositionen Nord und Süd unterschieden wird und somit auch Flächen die nach der Tabelle 8 im Ost- und Westsektor liegen zu den Hauptexpositionen gezählt werden, wurde für Nord mit einem reduzierten Faktor von 1.1 und für Süd von 0.9 gearbeitet. Dies ermöglicht einen einfach zu beschaffenden Anhaltspunkt für die anzustrebende minimale Baumhöhe.

Tabelle 8: Korrekturfaktor für die maximalen Schneehöhen nach Expositionen (Stoffel, et al. 2006)

Exposition und Hangneigung	Korrekturfaktor
Nordsektor und Hangneigung > 15°	ca. 1.2
Ost- und Westsektor mit Hangneigung > 15° und allg. Neigung < 15°	1
Südsektor und Hangneigung > 15°	ca. 0.8

3.5 Datenauswertung

3.5.1 Statistische Auswertungen

Für die statistischen Auswertungen wurde das Statistikprogramm R 2.12.0 verwendet. In einem ersten Schritt wurde mit explorativen Analysen ein Überblick über die Daten geschaffen. Der einfachste Weg um Daten auf Normalverteilung zu testen, ist die grafische Darstellung mit Hilfe von Q-Q-Plots. Dabei werden die klassifizierten Daten der Aufnahme in einem x-y-Diagramm dargestellt. Bei einer Normalverteilung ergibt sich eine linear ansteigende Linie in Richtung der zunehmenden x bzw. y-Achse. Bei einer nicht normalen Verteilung ergibt sich eine nicht lineare Darstellung (z.B. S-oder Bananenform). Um das Ausmass der Verteilung zu quantifizieren wurde ein Shapiro-Test durchgeführt. Für die weiteren Vergleiche wurden die Daten mit Normalverteilung mit dem „Shapiro-Wilk Zweistichproben t-Test“ getestet. Für die nicht normalverteilten Daten wurde bei gleicher Stichprobengrösse der „Wilcoxon-signed-Rank-Test“ verwendet. Für ungleiche Stichprobengrössen wie dies bei den Anrissgebieten der Fall war, wurde mit dem „Wilcoxon Rank Sum Test“ gearbeitet. Im Falle der BHD-Klassen mussten alle Klassen einzeln gegeneinander getestet werden. Da es unter den Klassen Normalverteilungen wie auch nicht Normalverteilungen gab, wurde über den gesamten Datensatz der „Wilcoxon Rank Sum Test“ verwendet. So ist eine einheitliche Datenbehandlung möglich. Zudem ist die Genauigkeit des Wilcoxon-Test bei Normalverteilung zu 95% gleich stark wie mit einem t-Test und kann sogar noch genauer sein wenn die Verteilung stark durch Ausreisser verzogen ist. Wenn eine Signifikanz unter einem Wilcoxon-Test gegeben ist, wäre sie noch stärker unter einem t-Test (Crawley, 2007).

Die relevanten Variablen für die Bestimmung der Schutzwirksamkeit sind der Deckungsgrad, die Stammzahl pro ha, die Baumhöhe, die Schneehöhe und die Lückengrösse. Um die Weitere Entwicklung der Fläche besser Abschätzen zu können, wurden zusätzlich noch die Variablen Verjüngung, Verbiss und Baumartenmischung aufgenommen.

3.5.2 Kriterien der Schutzwirksamkeit

Damit ein Schutzwald die in Kapitel 2.2 formulierten Wirkungen erzielen kann, muss er gewisse Anforderungen erfüllen. Diese Anforderungen werden vor allem durch (1) einen minimalen Kronendeckungsgrad (DG), (2) eine minimale Stammzahl pro Hektare, (3) eine minimale Baumhöhe verglichen zur lokalen maximalen 30 jährigen Schneehöhe (BSH-Faktor) und (4) die maximale Lückengrösse definiert.

3.6 Herleiten der Schutzkriterien

In der Untersuchung über die Abhängigkeit der Waldlawinen von Standorts-, Bestandes- und Schneebedingungen (Meyer-Grass & Schneebeli, 1992) wurden in Abhängigkeit der Baumartenmischung fünf Waldtypen definiert, um kritische Werte bezüglich der Bestandesparameter fest zu legen. Dabei ergab sich folgende Einteilung: „Laubwald“ (weniger als 10% Nadelholz)(Typ 1), „Mischwald“ (11 bis 90% Nadelholz)(Typ2), „wintergrüner Wald“ (Fichten-, Tannenwald, mehr als 90% wintergrüne Arten)(Typ 3), „wintergrüner/Lärchen-Wald“ (weniger als 90% wintergrüne Arten, bis 90% Lärchen)(Typ 4) und „Lärchenwald“ (>90% Lärche)(Typ 5). In der „Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion, NaiS“ von Frehner et al. (2005) wird das Anforderungsprofile des Waldes bezüglich Lawinen für zwei Entstehungsgebiete formuliert: „Unter- und obermontane Laub- und Mischwälder“ und „Hochmontane und subalpine Nadelwälder“. Auf Grund der geringen Stichprobengrösse von 26 Flächen wurden die Kriterien für diese Arbeit in Anlehnung an Frehner et al. in zwei Hauptgruppen unterteilt, wobei die „Unter- und obermontane Laub- und Mischwälder“ als Anrissgebiet 1 und die „Hochmontane und subalpine Nadelwälder“ als Anrissgebiet 2 bezeichnet werden. Da die Mindestkriterien für die Stammzahl/ha sowie die Lückengrösse zusätzlich stark von der Hangneigung abhängen, wurden die Anrissgebiete zusätzlich nach Neigung $<37^\circ$ und $\geq 37^\circ$ eingeteilt.

3.6.1 Kronendeckungsgrad

Zur Bestimmung der Kronendeckung wird der gesamte Anteil der beschirmten Bodenfläche aus der Vertikalprojektion ermittelt. Nach Meyer-Grass und Schneebeli (1992) kann als kritischer Wert für Nadelholzbestände ein DG $<30\%$ angenommen werden. Als Sollwert wird ein DG von 50% angegeben. Für Laubholz und Mischbestände wird als Kritischer- und als Sollwert ein DG von 80 bzw. 70% angegeben. Frehner et al. geben für alle Bestandestypen und Standortcharakteristiken einen minimalen Wert von 50% an. Bebi et al. (2009) schreiben, dass das Auftreten von Lawinen bei einem DG unter 30% in erster Linie eine Frage der Geländeneigung ist. Waldspezifische Faktoren haben in diesem Fall nur einen sehr geringen Einfluss auf die Lawinenbildung. Mit einer Kronendichte von 30-50% können Lawinen an Hängen mit über 30° Neigung auftreten, wenn eine minimale Lückenlänge von

25m vorhanden ist oder in sommergrünen Beständen (bzw. *L. decidua* Beständen). Aus diesen Zusammenstellungen wurden für die vorliegende Arbeit die in Tabelle 9 dargestellten Werte nach Anrissgebieten und Neigung abgeleitet.

Tabelle 9: Beurteilungskriterien für die Schutzwirksamkeit anhand des DG

Gruppen nach Höhenstufe und Neigung	Kritischer Wert des DG	Beurteilung
Gruppe 1: Anrissgebiet 1, Neigung <37°	>80%	erfüllt
	>50%	teilweise erfüllt
	<50%	nicht erfüllt
Gruppe 2: Anrissgebiet 1, Neigung ≥37°	>80%	erfüllt
	>60%	teilweise erfüllt
	<60%	nicht erfüllt
Gruppe 3: Anrissgebiet 2, Neigung <37°	>50%	erfüllt
	>30%	teilweise erfüllt
	<30%	nicht erfüllt
Gruppe 4: Anrissgebiet 2, Neigung ≥37°	>50%	erfüllt
	>30%	teilweise erfüllt
	<30%	nicht erfüllt

3.6.2 Minimale Stammzahl pro Hektare

Die notwendige Stammzahl pro Hektare und der minimal BHD, um einen Lawinenanriss im Wald zu verhindern, werden in der Literatur sehr kontrovers diskutiert. Frehner et al.(2005) definieren die Erfüllung der Schutzwirksamkeit mit einer Stammzahl pro ha. von 500 ab 30° und von 1000 ab 40° bei einem minimalen BHD von 8cm. Nach Meyer-Grass und Schneebeili (1992) wird eine Schutzwirksamkeit erst ab einem BHD von grösser als 16cm gewährleistet. Dabei schwankt die kritische Stammzahl bei der sich Anrisse bilden können, je nach Waldtyp zwischen 180 und 450 Bäumen pro Ha. In Tabelle 10 wird die Anzahl Stämme aufgeführt, die notwendig ist um in Abhängigkeit der Neigung ein Anriss zu verhindern. Viglietti (2010) hat in seiner Untersuchung über den Anriss von Lawinen im Wald festgestellt, dass an Hängen mit einer Neigung von weniger als 35° eine durchschnittliche Dichte von

330 Stämmen pro ha mit einem BHD von über 8cm und eine durchschnittliche Dichte von 250 Stämmen pro ha mit einem BHD grösser als 16cm nicht ausreicht, um einen Lawinnenniedergang zu verhindern. Das gleiche gilt für Neigungen zwischen 35° bis 40° bei einer Stammdichte von 360 Stück pro ha mit minimal 8cm BHD und einer Dichte von 240 Stämmen pro ha mit einem BHD von minimal 16cm. Für Neigungen über 40° wurden noch Lawinnenniedergänge verzeichnet, bei einer mittleren Stammdichte von 450 Stück/ha mit einem BHD von über 8cm und mit einem minimalen BHD von 16cm mit einer Dichte von 260 Stämmen/ha.

Tabelle 10: Anzahl Stämme/ha in Abhängigkeit der Neigung, um einen Lawinnenanriss zu verhindern nach Meyer-Grass und Schneebeli (1992)

Neigung	Anzahl Stämme/ha (BHD>16cm)			
	Waldtyp			
	1	3	4	5
30°	50	50	200	300
35°	250	150	300	300
40°	600	250	400	300
45°	850	350	550	300
50°	1100	450		300

Mit der von Ishikawa et al. (1968) entwickelten Formel, lässt sich die notwendige Anzahl Bäume n pro ha bei gegebenem Brusthöhendurchmesser D in cm und der Hangneigung B in Grad herleiten, um einen Lawinnenanriss zu verhindern. Allerdings geben Ishikawa et al. (1968) keine Angaben zu einem minimalen BHD bei dem die Bäume unter der Schneelast nicht nachgeben.

$$n = 12'500 * \frac{(B-30) * (\sec B)}{D^2}, \text{ wobei } \sec B = \frac{1}{\cos B}$$

Die Voraussetzung für eine Schneedeckenstabilisierung ist allerdings, dass die Stämme einen genügenden Durchmesser aufweisen, um den Kriech- und Gleitkräften des Schnees standhalten zu können (Salm, 1978). Der Durchmesser muss dabei so gross sein, damit die Stämme sich durch den Schneedruck nicht biegen oder brechen lassen. Untersuchungen in einem Lawinenzug in den südlichen Kanadischen Rockymountains haben ergeben, dass sich die Küsten-Föhre *Pinus contora* und die Engelmann-Fichte *Picea engelmannii* von einer oberhalb anbrechenden Lawine bis zu einem Durchmesser von bis zu 6 cm, am Boden gemessen, biegen lassen. Sind die Durchmesser höher, brechen die Stämme (Johnson, 1987). Um das Anreissen von Grundlawinen zu verhindern muss nach Saeki et al. (1969) und (1970) mit Stämmen gerechnet werden die mind. 2m über die Schneeoberfläche reichen und an der Oberfläche einen Durchmesser von 2-5 cm erreichen. Dabei sind bei 30° Hangneigung mindestens 200 Stämme pro ha, bei 35° mindestens 500 Stämme/ha und bei

40° im mindesten 800 Stämme pro ha notwendig. Für die vorliegende Arbeit wird davon ausgegangen, dass Stämme ab einem BHD>8cm den Gleit- und Kriechkräften widerstehen können.

Nach der Untersuchung von Viglietti (2010) sind Stammzahlen von Meyer-Grass und Schneebeil als zu niedrig einzustufen. Allerdings ist die Datengrundlage von Viglietti mit 15 Anriss- bzw. 12 Vergleichsflächen gegenüber der von Meyer-Grass und Schneebeil mit 118 Anriss- bzw. 131 Vergleichsflächen, eher schwach gestützt. Die Angaben in NaiS (Frehner, Wasser, & Schwitter, 2005) sind sehr allgemein gehalten. Für einen BHD>8cm ist die Dichte eher knapp, ab einem BHD>16cm ist eine Dichte von 500 bis 1000 Stämmen hoch. Nach de Quervain (1978) ist diese Anzahl pro ha notwendig, wenn bei einem Durchmesser von 20cm durch die Stämme alleine ein Anriss verhindert werden soll. Wird in die Formel von Ishikawa et al. (1968) auf ein BHD von 16cm angewendet, ergibt sich eine ähnliche Steigerung der Stammzahlen in Abhängigkeit der Neigung wie sie Meyer-Grass und Schneebeil für den Waldtyp 1 formulieren. Die Formel fordert eine im Mittel 16% höhere Stammzahl. Es gibt allerdings keine Anpassung für verschiedene Waldtypen. Gegenüber den restlichen von Meyer-Grass und Schneebeil definierten Waldtypen ergibt sich aus der Formel eine erheblich höhere geforderte Stammdichte. Aufgrund der besten Datengrundlage entscheidet sich der Autor, die Stammzahldichten von Meyer-Grass und Schneebeil als Kriterium für die Erfüllung der vollständigen Schutzwirksamkeit ab einem BHD>16cm heranzuziehen. Für die Gruppe 1 (Anrissgebiet 1, Neigung <37°) wurde der Wert des Waldtyps 1 bei einer Neigung von 35° bzw. 40° für die Gruppe 2 (Anrissgebiet 2, Neigung >37°) verwendet. Für das Anrissgebiet 2 wurde jeweils der stärkste Wert der Waldtypen 2, 3 und 4 bei einer Neigung von 35° für die Gruppe 3 (Neigung <37°) bzw. 40° für die Gruppe 4 (Neigung >37°) benutzt. Um eine bedingte Schutzwirksamkeit ab einem BHD von 8cm herleiten zu können, wurde mit Hilfe der Formel von Ishikawa et al. (1968) die Stammzahldichte berechnet. Dabei wurden ein Faktor eingebaut, um die Formel an die oben benutzten Werte von Meyer-Grass anzupassen.

Tabelle 11: Beurteilungskriterien für die Schutzwirksamkeit anhand der Stammzahl

Gruppen nach Höhenstufe und Neigung	Stammzahl/ha	Mindest BHD und Beurteilung
Gruppe 1: Anrissgebiet 1, Neigung <37°	>250	BHD>16cm erfüllt
	>1000	BHD>8cm teilweise erfüllt
Gruppe 2: Anrissgebiet 1, Neigung ≥37°	>600	BHD>16cm erfüllt
	>2400	BHD>8cm teilweise erfüllt
Gruppe 3: Anrissgebiet 2, Neigung <37°	>300	BHD>16cm erfüllt
	>1200	BHD>8cm teilweise erfüllt
Gruppe 4: Anrissgebiet 2, Neigung ≥37°	>400	BHD>16cm erfüllt
	>1600	BHD>8cm teilweise erfüllt

3.6.3 Baum-Schneehöhen-Faktor

In Jungbeständen müssen die Bäume eine gewisse Baumhöhe, die auch mit dem Bestandesalter umschrieben werden kann, erreichen, um Lawinenanrisse zu verhindern. Laut Saeki et al (1969) muss die mittlere Baumhöhe das 1.5 – 2-fache der Schneehöhe aufweisen. Schilcher (1964) beobachtet allerdings, dass auch Bäume, welche eine bis zu 2fache Baumhöhe bezogen auf die Schneehöhe aufweisen, vollständig durch Schnee bedeckt werden können. Bei Hangneigungen über 35° auf die Stammbasis talwärts bezogen, konnten auch 6m hohe Bäume eine 3m hohe Schneedecke nicht durchstossen. Nach In der Gand (1968) ist in Lärchenjungbeständen eine der durchschnittlichen Baumhöhe entsprechende mittlere Schneehöhe notwendig um 95% der Bäumchen vollständig zu überdecken. Er folgert, dass für die Gewährleistung eines genügenden Lawinenschutzes bei gleichbleibender Schneeablagerungsbedingungen und einer extremen Schneehöhe von 2.5m, für dieses Aufforstungsgebiet eine mittlere Baumhöhe von 2.5m erforderlich ist. Dies entspricht am untersuchten Standort (SE-Hang Davos, 1800 m.ü.M) einem Baumalter von ca. 20 Jahren. Eine Untersuchung in Kanada hat ergeben, dass Baumhöhen von mehr als 2m notwendig sind, um Lawinenanrisse zu verhindern und dass 90% der Lawinenanrisse auftreten, wenn die Vegetationshöhe kleiner als 2m ist. Aufgrund dieser Grundlagen wurde entschieden, dass als Kriterium für das Erfüllen einer Schutzfunktion eine 1.5-fache

Baumhöhe verglichen zu der extremen 30-jährigen Schneehöhe gelten soll. Dieser Wert wird als Baum-Schneehöhen-Faktor (BSH-Faktor) bezeichnet.

3.6.4 Lückengrösse

Nach Bebi et al. (2009) sind ab 30° Lückenlängen von 25m notwendig für einen Lawinenanriss. Die notwendige Lückenbreite in sommergrünen Laubbeständen ist mit 5-10m schmaler als mit 20m in Nadelwäldern. Dies gilt für eine DG von 60% und bei einer Neigung von 35°. Meyer-Grass und Schneebeli (1992) geben in Laub- und Mischwäldern eine kritische Grösse von >5m und in Nadelwäldern eine kritische Grösse von >10m an. Latsch (1977) schreibt in seiner Veröffentlichung, dass die Mindestbreite der Bestandeslücke, in der sich ein Schneebrett lösen kann, abnimmt je grösser die Hangneigung ist. Seine Beobachtungen haben gezeigt, dass die Lücke bei einer Neigung von 30-34° ohne kräftige Verjüngung, breiter als 50m sein muss. Mit Hangneigungen zwischen 35-40° sind Lückenbreiten von 15-20m ausreichend und in Hängen mit einer Neigung von mehr als 40° sind bereits 10m ausreichend. Die gesamten Angaben von Laatsch beziehen sich auf Bestände oberhalb von 1200 m.ü.M, über Unterschiede durch verschiedene Bestandestypen macht er keine Erwähnungen, da sich die Beobachtungen auf Bestände über 1200 m.ü.M. beziehen kann es den subalpinen und hochmontanen Wäldern zugerechnet werden. Die in Nais formulierten Anforderungen an die maximalen Bestandeslücken werden in Tabelle 12 aufgelistet.

Tabelle 12: Maximale Lückengrösse in Abhängigkeit der Neigung nach NaiS (2005)

	Neigung	Lückenlänge	Lückenbreite
Unter- und obermontane Laub- und Mischwälder	30°	<50	<5m
	35°	<40	<5m
	40°	<30	<5m
	45°	<60m	<5m
Hochmontane und subalpine Nadelwälder	30°	<50m	15-20m
	35°	<40m	15-20m
	40°	<30m	5-10m
	45°		5-10m

De Quervain (1978) gelangt bei einer Hangneigung von 35° zu einer maximal zulässigen Länge in hangparalleler Länge einer Lichtung von 35-40m. Dabei wird berücksichtigt, dass ein Schneebrett eine minimale Länge und einen gewissen Abstand zum oberen Waldrand aufweisen muss damit es zum Anriss kommen kann (Abbildung 5).

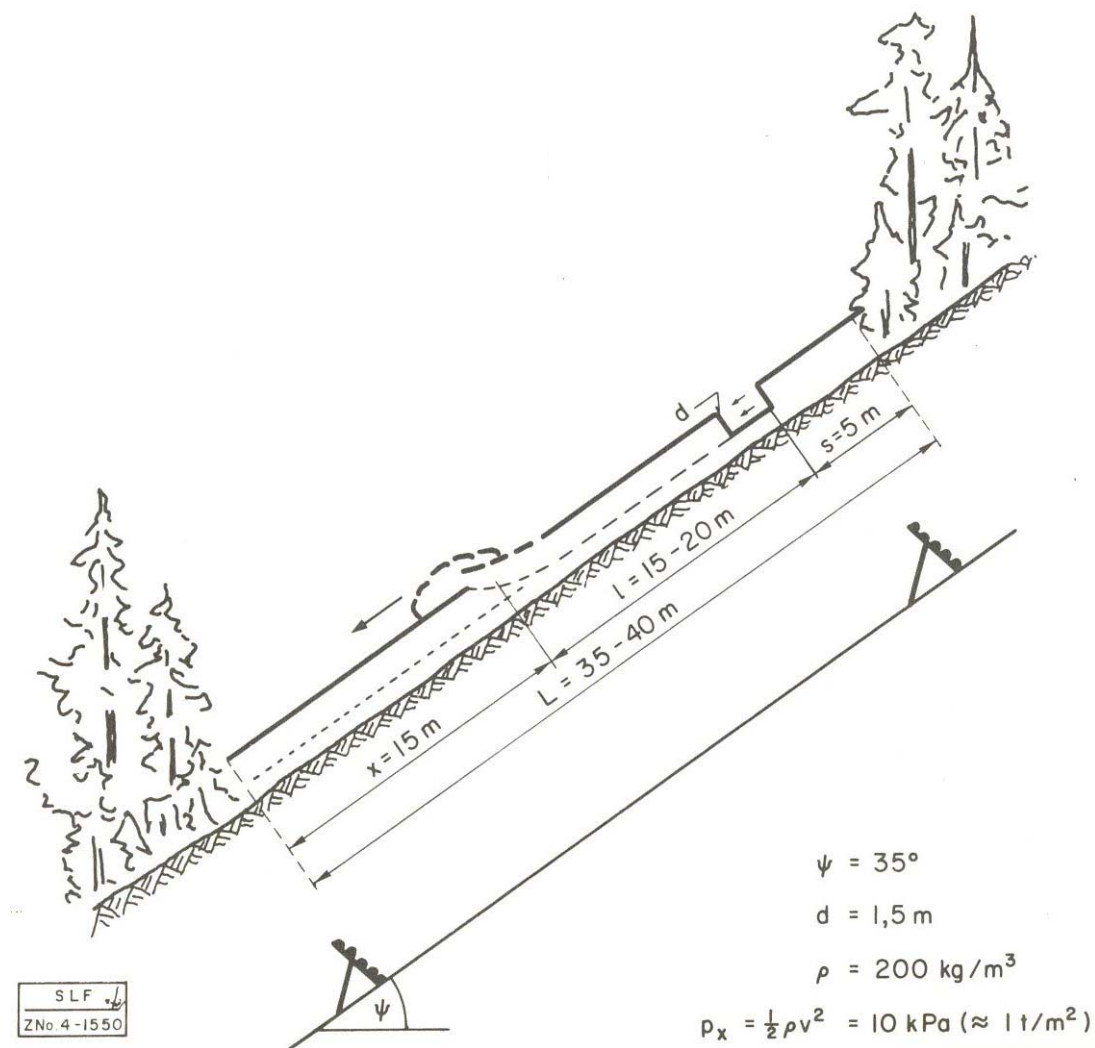


Abbildung 5: Lawine in einer Waldlichtung (De Quervain, 1978)

Die Länge muss für steilere Hänge und grössere Fließgeschwindigkeiten reduziert werden. Die Abmessung in Hangfalllinie entspricht demnach ungefähr den Abständen von Lawinenverbauwerken nach den Richtlinien für den Stützverbau von 1968. De Quervain (1978) schreibt, dass die horizontale Erstreckung einer Lichtung nicht mehr als ca. 50m betragen sollte. Dadurch kann die Anrisswahrscheinlichkeit bestmöglich eingeschätzt werden und die günstigen seitlichen Randwirkungen des Waldes werden mit einbezogen. Die in dieser Arbeit verwendeten Kriterien der Abmessung wurden aus der oben erwähnten Literatur zusammengestellt und sind in Tabelle 13 aufgelistet.

Tabelle 13: Beurteilungskriterien bezüglich der Schutzwirksamkeit anhand der Lückengrösse

Gruppen nach Höhenstufe und Neigung	Lückenlänge	Lückenbreite	Schutz-wirksamkeit
Gruppe 1: Anrissgebiet 1, Neigung <37°	>50m	<5m	erfüllt
	<50m	<10m	erfüllt
Gruppe 2: Anrissgebiet 1, Neigung ≥37°	>40m	<5m	erfüllt
	<40m	<10m	erfüllt
Gruppe 3: Anrissgebiet 2, Neigung <37°	>50m	<15m	erfüllt
	<50m	>20m	erfüllt
Gruppe 4: Anrissgebiet 2, Neigung ≥37°	>40m	<15m	erfüllt
	<40m	<20m	erfüllt

3.6.5 Kriterienbäume

Um eine übersichtliche Darstellung der Werte in den verschiedenen Gruppen zu erhalten, wurden Kriterienbäume erstellt die im Anhang zu finden sind.

4 Resultate

4.1 Gesamtschweizerische Analysen

Die Gesamtwaldfläche der Schweiz beläuft sich laut LFi2 auf 1'234'100ha. Davon sind nach dem Modell LFi2 mit 111'000ha 9% als Schutzwald ausgeschieden. In dieser Auflistung sind allerdings nur die Prozesse Steinschlag und Lawine inbegriffen. Als Lawinenschutzwald wird eine Gesamtfläche von 17'200ha angegeben. Die berechnete Fläche zum Schutz vor Steinschlag beläuft sich auf 52'800ha und auf einer Fläche von 40'900ha müssen beide Prozesse berücksichtigt werden. Werden die Flächenberechnungen der Kantone für BSF-Wald (BSF: besondere Schutzfunktion) gemäss dem Waldgesetz verwendet, erhöht sich die Schutzwaldfläche mit besonderer (Objekt-) Schutzfunktion auf 280'000ha (23% der Waldfläche) und die mit allgemeiner Schutzfunktion auf 430'000ha (36%). Dabei wird auch die Hochwasserschutzwirkung des Waldes berücksichtigt (Duc, Brändli, & Brassel, 2004).

Laut der Datenbank von SilvaProtect-CH umfasst das Schadeninventar des Sturmereignisses Vivian eine Gesamtfläche von 4949ha Wald. Somit wurde durch den Sturm 0.4% der gesamten Schweizer Waldfläche geworfen. Am stärksten betroffen waren mit 92% der Schäden die Alpen und Voralpen. Die Schadenfälle reichen von einer Höhenlage von 700-1700m.ü.M. Im Höhenbereich von 1300-1500m.ü.M. sind die Totalschäden signifikant überrepräsentiert (Schmidtke & Scherrer, 1997). Insgesamt 56.7% der Gesamtschadenfläche überlagert sich mit Waldflächen, die vor Naturgefahrenprozessen schützen (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Als Lawinenschutzwald sind mit 1112.8ha rund 23% der Sturmflächen ausgeschieden. Die mittlere Höhe der von Vivian geworfenen Lawinenschutzwälder liegt bei 1392m.ü.M.

Tabelle 14: Überschneidung von Viviansturmflächen mit Waldflächen die vor Naturgefahrenprozessen schützen; Aufgeteilt nach prozentualen Anteilen der Gefahrenprozesse, deren mittlere Höhe und der Exposition (SilvaProtect-CH)

	Vivian (ha)	Prozent der Gesamtfläche	Mittlere Höhe (m.ü.M)	Nord	Süd
Gesamtsturmschadenfläche	4949.6	100%	1305		
Naturgefahrenprozesse	2805.4	57%	1359	67%	33%
Gerinnerelevante Prozesse	2427.6	49%	1374	68%	32%
Lawine	1112.8	23%	1392	66%	34%
Sturz	243.2	5%	1291	67%	33%
Hangmure/Rutschung	700.6	14%	1337	59%	41%

An der Anordnung der Schadenflächen nach der Hangneigung kann man deutlich die Windrichtung ablesen. Die auf dem Säntis gemessene Hauptwindrichtung war WNW. Dies

zeigt sich auch in den flächenmässig überrepräsentierten SW-, W-, NW-, und N-Hängen (Abbildung 6), auf denen Schäden aufgetreten sind (Schmidtke & Scherrer, 1997). Insgesamt liegen mit 1880ha 67% der Vivianflächen die gleichzeitig auf Naturgefahrenprozessflächen liegen in nördlicher Hauptexposition. Von den Flächen die in Lawinenanrissgebieten liegen sind 66% (734ha) nord- und 34% (368ha) südexponiert.

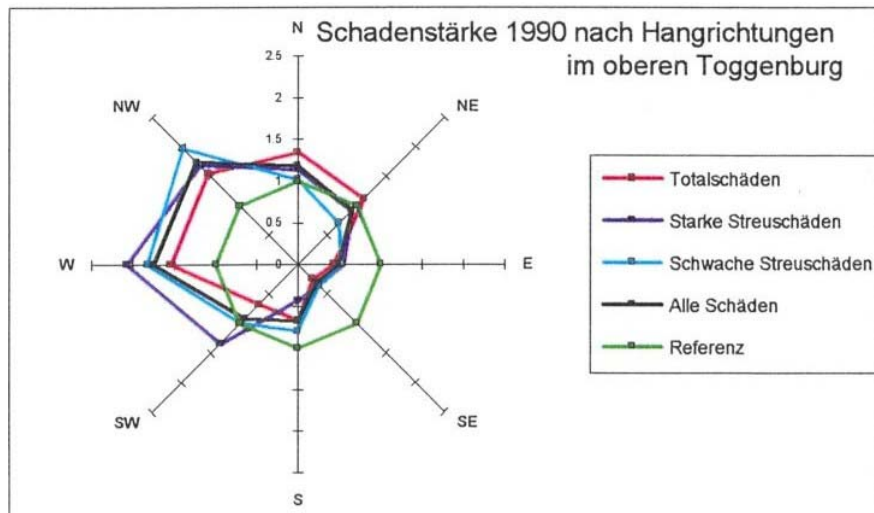


Abbildung 6: Anordnung der Sturmschadenflächen nach Hangrichtung (Schmidtke & Scherrer, 1997)

4.2 Flächenparameter

4.2.1 Deckungsgrad

Die 26 untersuchten Windwurfflächen weisen 20 Jahre nach dem Sturm einen durchschnittlichen Deckungsgrad von 23,9% auf. Der tiefste Wert mit 6% ist auf der Fläche 2 in „Engi“ zu finden. Der höchste Wert mit 55% auf der Fläche 14 „Im Fang“ bei Lenk. Wie aus **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zu entnehmen ist, weisen nur 2 der 26 Flächen einen DG höher als 40% auf. Die mittleren 50% der Daten befinden sich zwischen 12,75% und 32,75%. Es wurde eine eher schwache negative Korrelation zwischen dem DG und der Flächengrösse nachgewiesen (Pearson; $r = -0.39$). Dasselbe gilt, wenn der Test auf die Daten aufgeteilt nach Anrissgebiet angewendet wird (Pearson; $r = 0.37$).

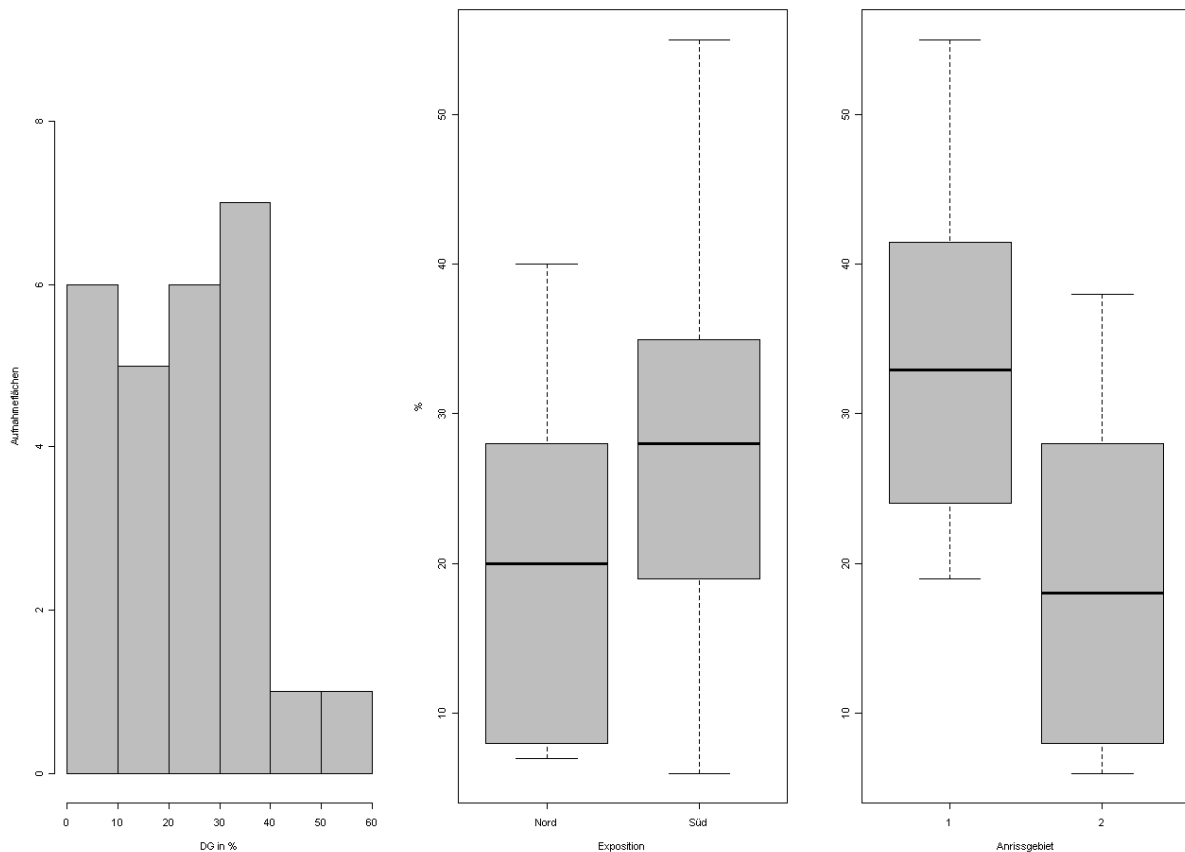


Abbildung 7: Deckungsgrade in prozentualer Verteilung, nach Exposition und Anrissgebiet (Anrissgebiet 1: unter- und obermontane Höhenstufe; Anrissgebiet 2: Hochmontane und subalpine Höhenstufe)

Werden die Flächen nach den Hauptexpositionen Nord und Süd getrennt, ergibt sich für die Flächen mit nördlicher Exposition ein Deckungsgrad mit einem arithmetisches Mittel von 19.5%. Der Deckungsgrad der südlich gelegenen Flächen ist mit einem Mittel von 28% höher, jedoch konnte durch die breitere Streuung der Daten kein signifikanter Unterschied gefunden werden. Wird der DG nach den Anrissgebieten getestet, kann ein signifikanter Unterschied ($p < 0.05$) zwischen dem mittleren DG (33.9%) der unter- und obermontanen Flächen im Anrissgebiet 1 und dem mittleren DG (19.4%) auf den hochmontanen und subalpinen Flächen (Anrissgebiet 2) festgestellt werden.

4.2.2 Stammzahlen pro Hektare

Auf den Aufnahmeflächen konnte eine deutliche Abnahme der Stammzahlen mit zunehmendem BHD beobachtet werden. Die Durchmesserklasse 1 (1-3cm) ist mit einem Mittel von 723 Stämme/ha über alle 26 Flächen am besten vertreten. Der Median liegt mit 470 Stämmen wesentlich tiefer als der Mittelwert. Die Flächen „Matten“ (21) und „Im Fang“ (25) weisen mit 2600 bzw. 2340 Stämmen pro ha sehr hohen Stammzahlen/ha auf

(Abbildung 8). Dies erklärt den grossen Unterschied zwischen Mittelwert und Median der ersten Klasse. Auch in der Klasse drei (BHD 8-11cm) sind Flächen mit markanten Ausreissern vertreten (Flächen mit zwischen 320-940 Stämme/ha). Aus diesem Grund wird im weiteren mit dem Median gearbeitet. In der Klasse 2 (4-7cm) liegt der Median bei 400 Stämmen/ha. Ab Klassen 3 sinkt der Stammzahlmedian stark ab auf 80 bzw. 0 Stück/ha in den BHD-Klassen 4 + 5 (12-15 bzw >16cm).

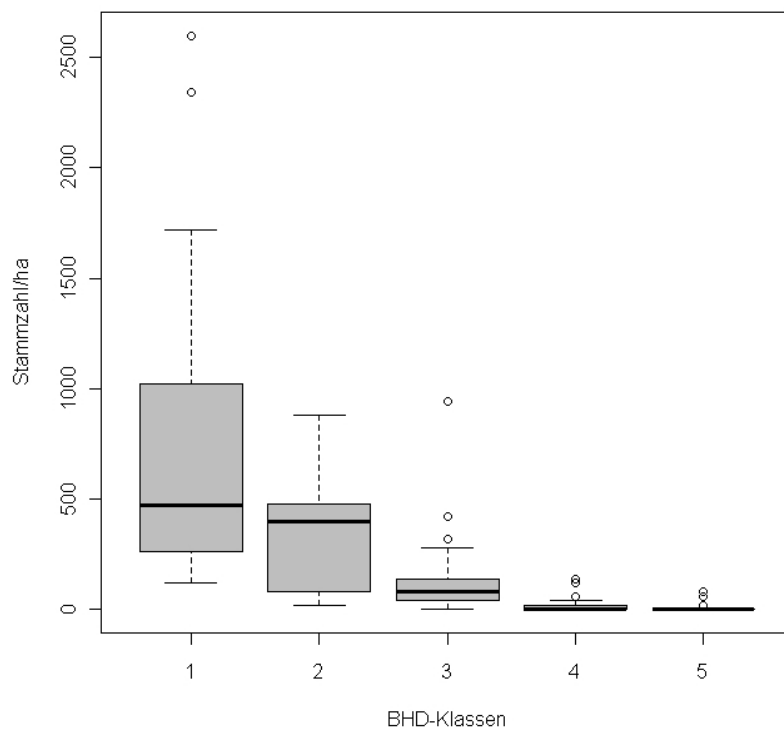


Abbildung 8: Boxplot der Stammzahlen/ha in BHD-Klassen über alle aufgenommenen Flächen

Auf den südlich gelegenen Flächen sind mit einem Median von 560 Stämmen/ha eine signifikant ($p < 0.05$) höhere Anzahl in der ersten Durchmesserklasse vorhanden als auf den nördlichen Flächen (Median = 340 Stämme/ha). In den Klassen 2-5 konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den Hauptexpositionen Nord und Süd festgestellt werden. Unterteilt nach den Anrissgebieten ist nur in der Klasse 3 eine signifikanter Unterschied ($p < 0.05$) vorhanden. Die Stammzahl beträgt dabei auf den hochmontanen und subalpinen Flächen mit einem Median von 60 Stämmen pro ha weniger als die Hälfte der Anzahl von 130 Stämmen/ha auf den unter- und obermontanen Flächen. Für die anderen Klassen kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen der Anrissgebiete vorhanden.

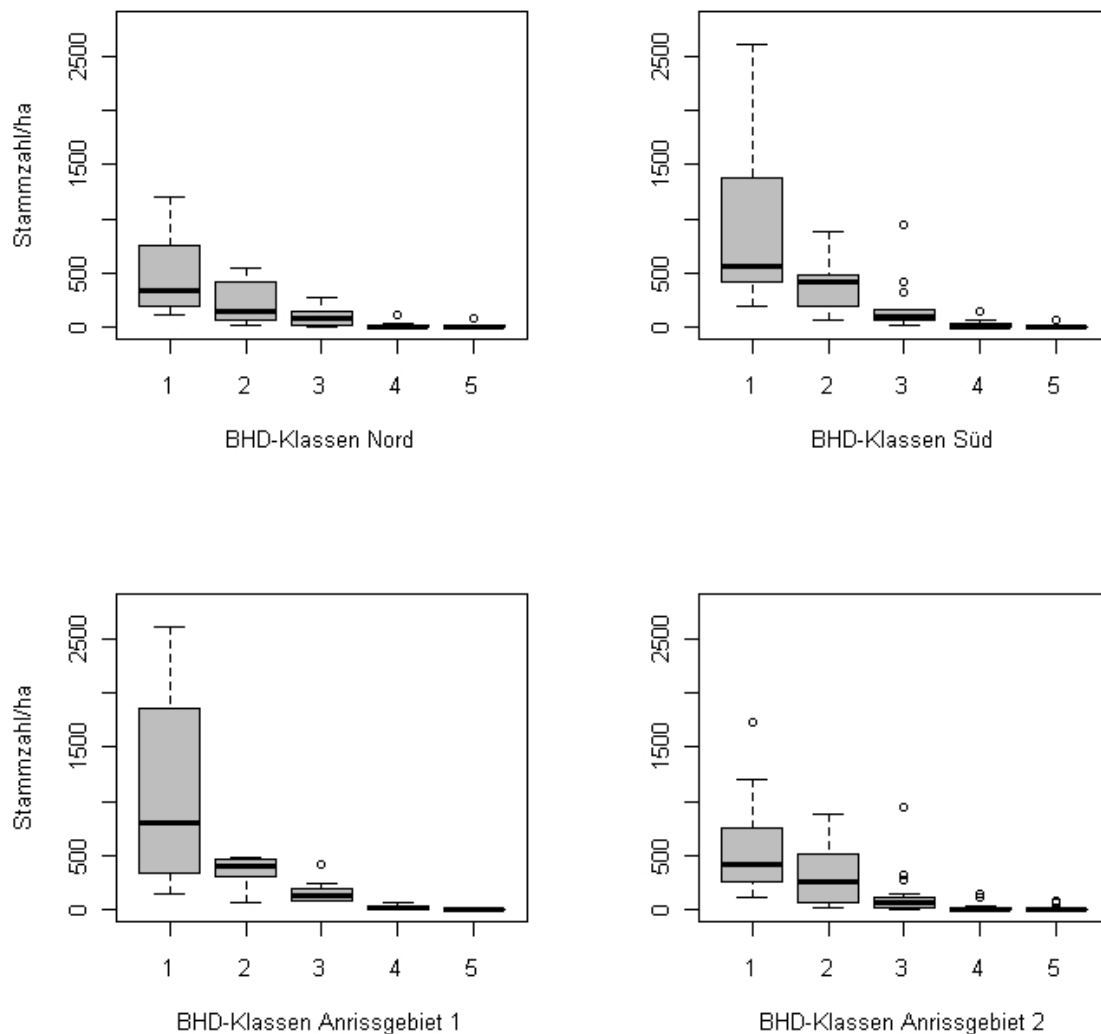


Abbildung 9: Stammzahlen/Ha in BHD-Klassen aufgeteilt nach Expositionen und Anrissgebieten

4.2.3 Baumhöhen

Die mittlere Baumhöhe ist auf den Aufnahme­flächen Süd (Abbildung 10) mit 382cm signifikant höher ($p < 0.01$) als auf den nördlich gelegenen Flächen auf welchen sie 354cm beträgt. Das arithmetische Mittel der extremen 30-jährigen Schneehöhen aller südexponierten Flächen liegt bei 302cm. Auf den nordexponierten Flächen liegt es bei 311cm. Im Mittel über die Expositionen wird somit nach 20 Jahren auf südlich gelegenen Flächen ein Baum-Schneehöhen-Faktor von 1.3 und auf den nördlich Flächen ein Faktor von 1.1.

Werden die Flächen nach den Anrissgebieten aufgeteilt, sind die Bäume der hochmontanen und subalpinen Stufe (Anrissgebiet 2) im Mittel mit 393cm signifikant höher ($p < 0.001$) als die Bäume der unter- und obermontanen Stufe (Anrissgebiet 1, arithmetisches Mittel=342cm).

Das Mittel der extremen 30-jährigen Schneehöhen liegt im Anrissgebiet 1 bei 270cm und im Anrissgebiet 2 bei 322cm. Der Baum-Schneehöhen-Faktor im Anrissgebiet 1 beträgt demzufolge im Durchschnitt 1.3, in der Anrissgebiet 2 ist er mit 1.2 etwas tiefer.

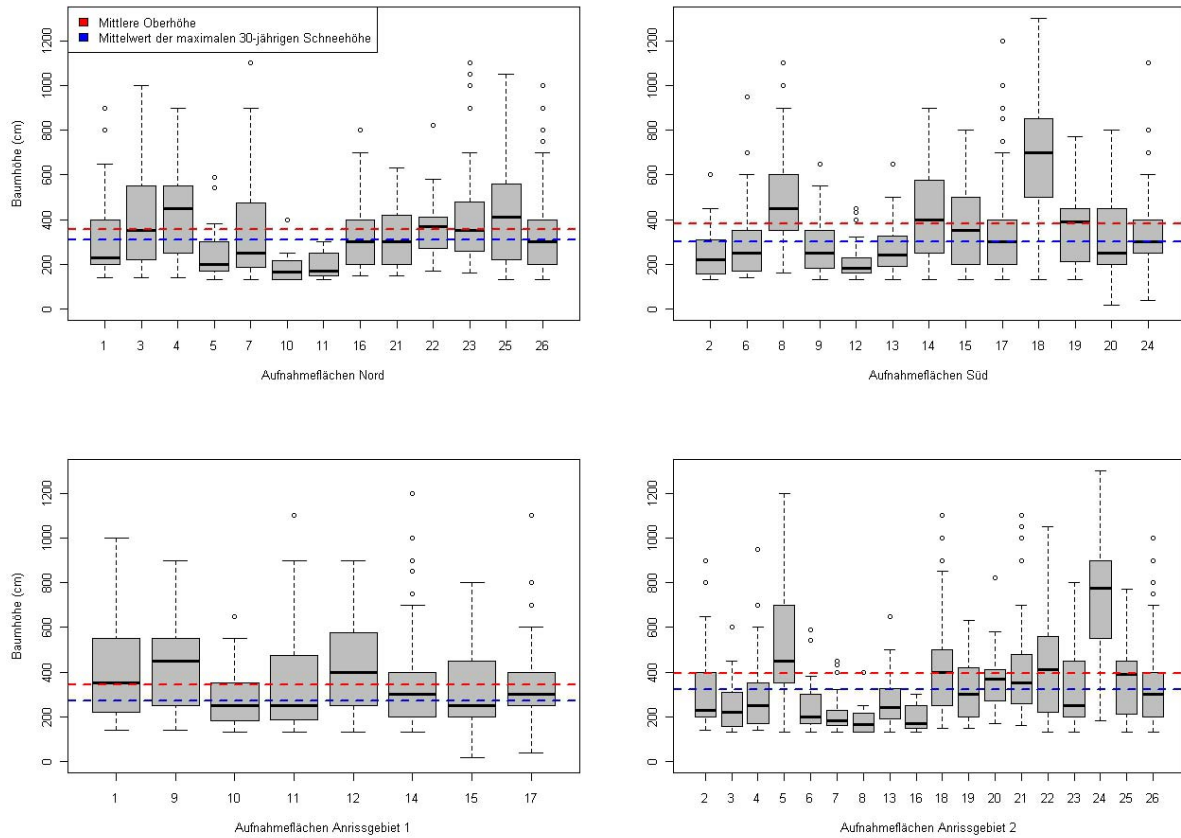


Abbildung 10: Baumhöhen nach Hauptexpositionen und Anrissgebiete mit dem Mittelwert über die gesamten Gruppen

4.2.4 Lückengrößen

Zwischen der Lückenlänge und der Lückenbreite besteht ein hochsignifikanter Zusammenhang ($p=0.0001$). Mit Abstand die grösste Lücke von 520*260m befindet sich auf der Fläche in Disentis. Auf der Aufnahmefläche Guttannen am Grimselpass befindet sich mit 385*125m der zweite starke Ausreisser (Abbildung 11). Es weisen 50% der Flächen eine kleinere Lückengrösse als 65*40m auf.

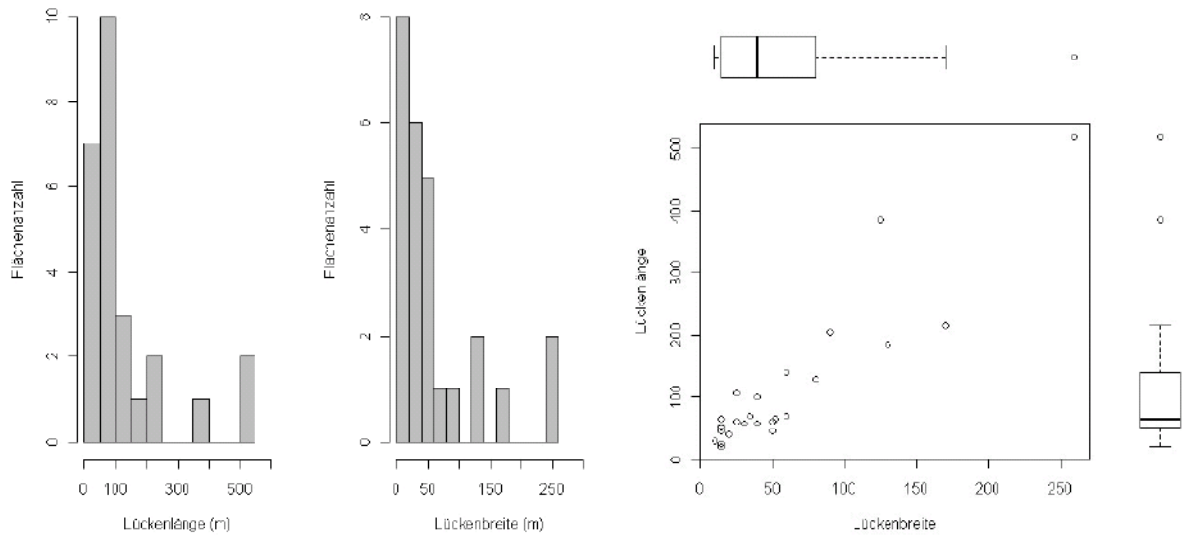


Abbildung 11: Histogramme der Lückenlängen und -breiten (links), Lückengrößen in Meter (rechts)

4.3 Ergebnisse der Schutzwirkbarkeit

Die Schutzwaldkriterien (vgl. Kap. 3.6 und Kriterienbaum im Anhang) kann von keiner der untersuchten Flächen vollständig erfüllt werden. In Tabelle 15 wird eine Übersicht über alle Flächen und ihre Daten bezogen auf die jeweiligen Kriterienpunkte dargestellt. Von den insgesamt 26 untersuchten Flächen konnten 16 keine der vier Kriterien erfüllen. Drei der Flächen konnten zumindest ein Kriterium teilweise erfüllen und sieben Flächen haben im Mindesten ein Kriterium vollständig erfüllt. Im Nachfolgenden werden die Flächen nach ihrer Zuteilung auf die Kriterienbäume aufgeteilt und im einzelnen besprochen.

Tabelle 15: Flächenbewertung nach den Kriterien

Flächen	DG (%)	Stammzahl/ha		BSH-Faktor	Lückengrösse (m)	
		(>16cm)	(>8cm)		Länge	Breite
1	28	20	220	1.0	65	52
2	38	0	60	1.2	60	25
3	15	0	40	1.2	100	40
4	40	20	260	1.4	57	40
5	32	0	140	1.7	57	30
6	32	60	520	1.6	70	35
7	19	0	120	1.0	45	15
8	16	0	40	0.7	140	60
9	21	20	180	1.0	65	15
10	6	0	40	0.6	70	60
11	21	0	20	0.5	105	25
12	10	0	20	0.8	45	50
13	8	0	0	0.5	130	80
14	7	0	40	0.9	215	170
15	12	0	60	0.9	205	90
16	43	0	480	1.9	40	20
17	8	20	20	1.2	520	260
18	8	180	200	1.3	520	260
19	20	0	300	1.1	185	130
20	28	0	100	1.1	385	125
21	27	0	200	1.5	51	15
22	35	0	1080	2.4	20	15
23	25	0	140	1.3	60	50
24	55	0	80	1.4	30	10
25	34	0	80	1.4	25	15
26	33	0	140	1.0	50	15

nicht erfüllt

teilweise erfüllt

erfüllt

Flächenaufteilung nach Anrissgebiet und Neigung

Tabelle 16: Anrissgebiet 1 mit einer Neigung <37° (Gruppe 1)

Flächen	DG (%)	Stammzahl/ha		BSH-Faktor	Lückengrösse (m)	
		(>16cm)	(>8cm)		Länge	Breite
4	40	20	260	1.4	57	40
7	19	0	120	1.0	45	15
25	34	0	80	1.4	25	15

Im Anrissgebiet 1 mit einer Neigung von unter 37° befinden sich 3 der 26 untersuchten Sturmflächen. Die Flächen „Wildhaus“ und „Im Fang“ (7 und 25) können das Kriterium der Lückengrösse in einem ersten Teil erfüllen, da sie die Länge von 50m nicht überschreiten, allerdings sind beide Lücken breiter als 10m und somit für Laub- und Mischwälder lawinenanrissgefährdet. Die Kriterien DG, Stammzahl/ha und Baum-Schneehöhen-Faktor können von keiner Fläche erfüllt werden.

Tabelle 17: Anrissgebiet 1 mit einer Neigung >37° (Gruppe 2)

Flächen	DG (%)	Stammzahl/ha		BSH-Faktor	Lückengrösse (m)	
		(>16cm)	(>8cm)		Länge	Breite
5	32	0	140	1.7	57	30
9	21	20	180	1.0	65	15
16	43	0	480	1.9	40	20
21	27	0	200	1.5	51	15
24	55	0	80	1.4	30	10

Die Gruppe 2 weist eine Grösse von 5 Flächen auf. In dieser Gruppe können die Kriterien DG und Stammzahl /ha von keiner Fläche erfüllt werden. Die Flächen 5, 16 und 21 (Pfäfers, Disentis und Matten) erreichen einen BSH-Faktor von 1.7, 1.9 und 1.5. Somit verfügen sie über eine 1.5-fache Baumhöhe gegenüber der 30-jährigen extremen Schneehöhe. Auf der „Im Fang“ (Nr. 24) weist die grösste Lücke eine Fläche von 30*10m auf und liegt mit einer Breite von 10m noch unter der kritischen Grenze.

Tabelle 18: Anrissgebiet 2 mit Neigung <37° (Gruppe 3)

Flächen	DG (%)	Stammzahl/ha		BSH-Faktor	Lückengrösse (m)	
		(>16cm)	(>8cm)		Länge	Breite
1	28	20	220	1.0	65	52
3	15	0	40	1.2	100	40
6	32	60	520	1.6	70	35
10	6	0	40	0.6	70	60
11	21	0	20	0.5	105	25
12	10	0	20	0.8	45	50
13	8	0	0	0.5	130	80
15	12	0	60	0.9	205	90
22	35	0	1080	2.4	20	15
23	25	0	140	1.3	60	50

Mit 10 Flächen ist die 3 die Grösste der Gruppen. Das Kriterium des DG kann von den Flächen Wildhaus und Matten (6 und 22) zum Teil erfüllt werden. Beide Flächen erreicht zudem mit einem Wert von 1.6 bzw. 2.4 den BSH-Faktor. Die Fläche 22 verfügt auch über keine Lücke die grösser als die kritischen Werte sind. Die geforderten Stammzahlen/ha konnten auch in dieser Gruppe in keiner der BHD-Klassen erfüllt werden.

Tabelle 19: Anrissgebiet 2 mit einer Neigung von >37° (Gruppe 4)

Flächen	DG (%)	Stammzahl/ha		BSH-Faktor	Lückengrösse (m)	
		(>16cm)	(>8cm)		Länge	Breite
2	38	0	60	1.2	60	25
8	16	0	40	0.7	140	60
14	7	0	40	0.9	215	170
17	8	20	20	1.2	520	260
18	8	180	200	1.3	520	260
19	20	0	300	1.1	185	130
20	28	0	100	1.1	385	125
26	33	0	140	1.0	50	15

Der Gruppe 4 können 8 der aufgenommenen Flächen zugeordnet werden. Von diesen Flächen weisen zwei (Langwies, Oey) einen DG von mehr als 30% auf und können somit das Kriterium des DG teilweise erfüllen. Die Fläche 26 kann zudem mit einer Länge von 50m und einer Breite von 15m knapp die Bedingungen der maximalen Lückengrösse erfüllen.

Gesamthaff gesehen kann somit keine der Flächen die Schutzkriterien DG und Stammzahl pro ha vollständig erfüllen. Der BSH-Faktor wird von insgesamt 5 Flächen erfüllt werden. Zudem weisen 3 weitere Flächen einen Faktor von 1.4 auf und werden somit in absehbarer

Zeit die Grenze erreichen. Das Kriterium der minimalen Lückengrösse wird von 3 Flächen erfüllt.

5 Diskussion

5.1 Gesamtschweizerische Analyse der Schadenflächen

Der Sturm hat mit 92% den Grossteil der Schäden in den Alpen und Voralpen hinterlassen. Die Kernzonen der Totalschäden in der vertikalen Gliederung liegen laut der Analyse von Schmidtke und Scherrer (1997) in 1300-1500m.ü.M. Somit sind sie je nach Standortregion in der ober-hochmontanen Stufe zu finden, welche die Übergangszone der für diese Arbeit definierten Anrissgebiete 1 und 2 bildet. Mit 2805ha haben sich insgesamt 57% der Schäden auf Waldflächen ereignet, die laut dem Projekt SilvaProtect-CH dem Schutz vor Naturgefahrenprozessen dienen. Rund ein Viertel (23%) der gesamten Schadenfläche ist Lawinenschutzwald. Die mittlere Höhe der Schadenflächen in Schutzwald liegt auf 1400 m.ü.M. und somit zu einem grossen Teil in der obermontanen Stufe (Anrissgebiet 2). Wie *Abbildung 6* zeigt sind die Sturmschäden hauptsächlich auf nordwestlich exponierten Hängen aufgetreten. Auch die Unterteilung der Vivian-Sturmflächen auf potentiellen Lawinanrissgebieten nach Hauptexpositionen hat ergeben, dass 67% der Flächen nördlich exponiert sind. Wie die Auswertung der extremen 30-jährigen Schneehöhen unter Punkt 4.2.3 gezeigt haben, sind die Schneemengen auf den nordexponierten Flächen im Mittel um 9cm höher als auf südlich gelegenen Flächen. Dies deckt sich auch mit der Aussage von Stoffel et al. (2006) wonach in Schattenlagen deutlich grössere maximale Schneehöhen gemessen werden als in Südhängen. Mit einer mittleren extremen Schneehöhe von 322cm ist auf den Flächen in den hochmontanen und subalpinen Höhenstufen (Anrissgebiet 2) mit im Mittel 50cm mehr Schnee zu rechnen als auf den Flächen des Anrissgebietes 1. Somit kann gesagt werden, dass die Kernzonen der Schäden in den Schutzwäldern auf die Flächen fallen auf welchen tendenziell mehr Schnee zu erwarten ist und somit einer erhöhten Gefahr von Lawinanrissen ausgesetzt sind.

5.2 Flächenparameter

Mit einem durchschnittlichen DG von 23.9% weisen die Flächen in der Gesamtsicht einen sehr tiefen Wert auf. Nur zwei Flächen haben einen DG über 40%. Der vergleichsweise Hohe Wert der Fläche „Im Fang“ (Nr. 24) mit 55% ist nach Auffassung des Autors in erster Linie darauf zurück zu führen, dass die Fläche eine kleine Gesamtfläche von 0.7ha aufweist, und zudem aus mehreren kleineren Schadenflächen zusammengesetzt ist, die sehr nahe beieinander liegen. Die Schadenflächen sind stellenweise durch Altbestand unterbrochen sie

gleicht also eher einem starken Streuschaden. Die zweite Fläche liegt in „Disentis“ (Nr. 16) am Gegenhang der WSL-Untersuchungsfläche und ist mit einer Fläche von 0.6ha auch eine der Kleinsten. Es kann allerdings nicht generell gesagt werden, dass der DG zunimmt, je kleiner die Fläche ist, da nur eine schwache Korrelation (Pearson; $r = 0.39$) nachzuweisen war. Es ist auch keine starke Korrelation (Pearson; $r = 0.37$) zwischen DG und Fläche zu finden, wenn die Flächen nach Anrissgebiet getestet werden. Die Flächen der südlichen Expositionen haben tendenziell einen höheren DG als die der nördlichen Expositionen. Allerdings ist keine statistische Signifikanz vorhanden. Es fällt auf, dass die südlich gelegenen Flächen eine viel breitere Streuung haben. Die beiden Flächen mit dem höchsten DG, „Im Fang“ und „Disentis“ sind beide in der Gruppe Süd zu finden. Aber auch die Fläche „Engl“, die mit 6% den tiefsten DG aufweist, ist in dieser Gruppe. Die restlichen 4 Flächen, welche noch einen $DG < 10\%$ aufweisen, sind nördlich exponiert. Durch die Unterteilung in die Anrissgebiete entsteht ein klareres Bild. Die Flächen der unter- und obermontanen Stufe erreichen mit einem Mittel von 33.9% einen signifikant höheren Wert als die Flächen der hochmontanen und subalpinen Stufe (19.4%). Die DG im Anrissgebiet 1 sind markant höher als die in Anrissgebiet 2.

Die Stammzahlen pro ha zeigen mit zunehmendem BHD eine typisch degressive Form auf. In der ersten Durchmesserklasse (1-3cm) ist eine starke Streuung vorhanden. Dabei sind in „Disentis a“ (Nr. 17) mit 120 Stämmen/ha am wenigsten Stämme vorhanden. Mit Abstand die grösste Stammdichte pro ha in der BHD-Klassen 1 weisen mit 2600 bzw. 2340 Stämmen/ha die Flächen „Matten“ (Nr. 21, 0.7ha) und „Im Fang“ (Nr. 25, 0.6ha) auf. Beide Flächen liegen in der obermontanen Stufe (Anrissgebiet 1), auf südlicher Exposition und weisen eine relativ geringe Fläche auf. Die Tendenz der höheren Stammzahlen auf Südexpositionen und im Anrissgebiet 1 ist auch in der Gegenüberstellung in [Abbildung 9](#) zu erkennen. Die Klasse 1 ist auf den südlichen Flächen mit im Mittel 220 Stämmen/ha mehr, wesentlich dichter bestockt als die nordexponierten Flächen ($p < 0.05$). Die vier bestbestockten Flächen (1360-2600 Stämme/ha) liegen an südlicher Exposition. Die vier am schwächsten bestockten Flächen (120-200 Stämme/ha) auf Nordexpositionen. Unterteilt nach Anrissgebieten ist kein signifikanter Unterschied zu finden. Zwischen der Flächengrösse und der Stammzahl konnte keine gewichtige Korrelation gefunden werden (Pearson; $r = -0.06$). Die Durchmesserklasse 2 weist eine Streuung von 20 bis 880 Stämmen/ha auf. Die beiden höchsten Werte mit 880 bzw. 820 Stämmen/ha befinden sich auf den Flächen „Wildhaus“ und „Matten“ (Nr. 6 bzw. 22). Beide Flächen wurden nach dem Sturmereignis geräumt, bepflanzt und gepflegt. Die Pflanzungen auf diesen Flächen wirken sich nach Ansicht des Autors zur Hauptsache in den BHD-Klassen > 2 (ab 4cm) aus. Die Fläche welche die dritthöchste Stammzahl/ha in der Klasse 2 aufweist liegt in „Guttannen“ (Nr. 20 mit 740 Stämmen/ha). Sie wurde geräumt, jedoch nicht bepflanzt und gepflegt. Alle drei Flächen sind südlich exponiert und in

Anrissgebiet 2 zu finden. In der BHD-Klasse 3 sticht vor allem die Fläche „Matten“ (Nr. 22) mit einer Stammzahl/ha von 940 hervor. Wie bereits erwähnt, handelt es sich dabei um eine rottenartig mit Fichten bepflanzte Fläche. Nach den Expositionen konnte in dieser Klasse kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Werden die Mediane der Flächen im Anrissgebiet 1 und 2 in der Klasse 3 verglichen, ist in Anrissgebiet 2 weniger als die Hälfte der Stammzahl (60 Stämme/ha) vorhanden als in Anrissgebiet 1 (130 Stämme/ha). Die Flächen, welche in der BHD-Klasse 4 (12-15cm) am meisten Stämme/ha aufweisen sind wiederum die bepflanzten Flächen Nr. 6 und 22. Die dritte Fläche welche mit 120 Stämmen/ha einen vergleichsweise hohen Wert aufweist, liegt in Frauenkirch. In dieser Fläche fiel ein Plot in eines kleines Bestandesstück, welches mit grosser Wahrscheinlichkeit kurz vor dem Sturmereignis mit Fichten verjüngt wurde. Dies bedingt die relativ hohen Stammzahlen in den oberen BHD-Klassen dieser Fläche. Fünf der sechs Flächen die eine Bestockung aufweisen die zu der Klasse 5 zählen, sind entweder bepflanzte oder die Bäume sind vorverjüngt eingestuft (Nr. 1, 4, 6, 9, 18). Einzig auf der Fläche „Disentis“ (Nr. 17) wurde eine Weide *salix* mit einem BHD von 16 cm aufgenommen, die nicht als vorverjüngt eingestuft wurde.

Es besteht ein signifikanter Unterschied zwischen den Baumhöhen der nördlichen und südlichen Expositionen. Die südlichen Flächen weisen mit einer mittleren Oberhöhe von 382cm im Durchschnitt ca. 30cm höhere Bäume auf als die nördlich gelegenen Flächen. Speziell auffallend ist die Fläche „Matten“ (Nr. 22) mit Fichtenbepflanzung (Abbildung 10). Sie weist mit 663cm eine 90cm höhere mittlere Oberhöhe auf als die mit Lärchen bepflanzte Fläche in „Wildhaus“ (Nr. 6, 472cm). Bei den nordexponierten Flächen ist „Pfäfers“ (Nr. 5) mit 433cm die Fläche mit der höchsten durchschnittlichen Oberhöhe. Diese Fläche weist allerdings mit 340 Stämmen/ha die geringste Gesamtstammzahl auf und dadurch werden wenige weiterentwickelte Bäume auf dieser Fläche stärker gewichtet. Die Oberhöhe der hochmontanen und subalpinen Flächen (Anrissgebiet 2) sind überraschenderweise mit einem Unterschied von 50 cm signifikant höher ($p < 0.0001$) als die Oberhöhen der unter- und obermontanen Flächen. Es ist aber auch auffallend, dass in Anrissgebiet 2 relativ viele Ausreisser nach oben vorhanden sind. Verglichen mit dem Mittel der extremen 30 jährigen Schneehöhen weisen die Untergruppen nach Expositionen und Anrissgebiete im Mittel alle eine durchschnittliche Baumhöhe auf, die die Schneedecke durchbricht.

Die Lückengrössen variieren extrem in Länge und Breite. Prinzipiell nimmt die Lückenbreite mit wachsender Lückenlänge auch zu. Eine speziell grosse Lücke findet sich auf den Flächen „Disentis a+b“ (Nr. 17, 18), welche auf derselben Windwurffläche unterteilt nach geräumt und nicht geräumt aufgenommen wurden. Zwischen der Flächengrösse und der Flächenlänge (Pearson; $r = 0.98$) bzw. Flächenbreite (Pearson; $r = 0.91$) ist eine sehr starke

positive Korrelation vorhanden. Je grösser die Flächen sind, desto grösser sind auch die Lücken in welchen Lawinen anreissen können.

5.3 Schutzwirksamkeit

Keine der untersuchten Flächen kann nach 20 Jahren die Anforderungen, welche in der vorliegenden Arbeit für die Erfüllung der Schutzwirksamkeit formuliert wurden, erfüllen. Nur auf 7 der 26 untersuchten Flächen konnten einzelne Kriterienpunkte erfüllt werden.

In der Gruppe 1 (Tabelle 16) welche alle Flächen in Anrissgebiet 1 und mit einer Neigung $<37^\circ$ umfasst, erfüllt keine der 3 Flächen (Nr. 4, 7, 25) eines der formulierten Kriterien. Der Deckungsgrad muss in den Laub- und Mischwäldern der unter- und obermontanen Stufe einen Wert von $>80\%$ aufweisen um eine Interzeptionswirkung zu erzielen, die vor Lawinenanrissen schützen kann. Mit einem DG von $>50\%$ wird eine begrenzte Wirkung erzielt. Ist der DG unter 50% können in sommergrünen Laubwäldern mit einer Neigung von über 30° Lawinen auftreten. Liegt der DG unter 30% , ist das Anreissen von Lawinen hauptsächlich eine Frage der Neigung (Bebi, Kulakowski, & Rixen, 2009). Die Fläche „Pfäfers“ (Nr. 4) hat mit 40% den höchsten DG der Gruppe 1. Alle drei Flächen sind sehr weit entfernt davon, die Anforderungen an die Stammzahl zu erfüllen. Nur auf der Fläche 4 ist eine kleine Anzahl (20 Stämme/ha) von Bäumen mit einem BHD $>16\text{cm}$ vorhanden. Auch die beschränkte Erfüllung der mit 1000 Stämmen/ha von BHD $>8\text{cm}$ konnte mit 260, 120 bzw. 80 Stämmen/ha bei weitem nicht erfüllt werden. Der Baum-Schneehöhenfaktor (BSH-Faktor) von >1.5 ist von keiner Fläche erfüllt. Allerdings wird das Kriterium auf den Flächen „Pfäfers“ und „Im Fang“ (Nr. 4, 25) mit einem Faktor von 1.4 beinahe erreicht. Die Lücken sind auf allen Flächen zu gross.

In der Gruppe 2 (unter- und obermontane Höhenstufe mit einer Neigung $>37^\circ$) erfüllen 4 von 5 Flächen eines der Kriterien komplett. Die Flächen „Pfäfers“, „Disentis“ und „Matten“ (Nr. 5, 16, 21) erreichen mit den Werten 1.7, 1.9 bzw. 1.5 die Anforderungen des BSH-Faktors. Die Fläche „Im Fang“ (Nr. 24) erfüllt mit einer Lückenlänge von 30m und einer Lückenbreite von 10m knapp die maximale Masse des Kriterienpunktes Lückengrösse. Die Fläche 24 ist mit einem BSH-Faktor von 1.4 nur minim unter dem geforderten Wert und auch der DG von 55% erfüllt beinahe die Anforderungen für eine reduzierte Schutzwirksamkeit.

Mit „Wildhaus“ und „Matten“ (Nr. 6, 22) sind die einzigen Flächen in der Gruppe 3, die auf einem guten Weg sind um bald eine begrenzte Schutzwirksamkeit erfüllen zu können, die Flächen die mit Fichte *Picea abies* bzw. Lärche *Larix decidua* bepflanzt wurden. In der hochmontanen und subalpinen Höhenstufe mit einer Neigung von $<37^\circ$ (Gruppe 3) ist ein DG von 30% erforderlich um das Kriterium teilweise zu erfüllen. Beide Flächen erfüllen mit

32 bzw. 35% diese Anforderung. Mit Werten von 1.6 bzw. 2.4 für den BSH-Faktor erreichen sie auch eine genügende mittlere Baumhöhe. Die Fläche 22 kann zudem das Kriterium der Lückengrösse erfüllen. Desweiteren ist sie mit einer Stammzahl/ha von 1080 mit BHD>8cm sehr nahe daran, die Anforderungen an dieses für die Gruppe 3 formulierte Kriterium (1200 Stämme/ha) zu erfüllen. Die restlichen Flächen dieser Gruppe sind alle sehr weit davon entfernt eine Schutzwirkung übernehmen zu können. Fünf der Flächen weisen einen DG von weniger als 20% und einen BSH-Faktor <1.0 auf.

In der Gruppe 4 welche im Anrissgebiet 2 mit einer Neigung>37° liegt, erfüllen die Flächen „Langwies“ und „Öy“ (Nr. 2, 26) mit 38 bzw. 33 % die reduzierten Bedingungen der Kronendeckung. Die Fläche 26 kann zusätzlich das Kriterium der Lückengrösse erfüllen. Alle anderen Flächen dieser Gruppe haben extrem grosse Lücken.

Die einzige Fläche die nach den hier formulierten Kriterien in absehbarer Zeit eine bedingte Schutzwirkung erreichen kann, ist die mit Fichten *Picea abies* bepflanzte Fläche in „Matten“. Die zweite bepflanzte Fläche (Nr. 6), wird etwas schlechter eingestuft. Dies dürfte in erster Linie daraus resultieren, dass sie nicht ganzflächig mit Lärchen *Larix decidua* bepflanzte wurde und es dadurch auch Aufnahmeplots gab, auf denen nur Naturverjüngung vorhanden war. Die Fläche „Wildhaus“ (Nr. 22) verfügt allerdings über mehr Stämmen mit BHD>16cm. Die restlichen Flächen sind in allen oder in mehr als 2 Kriterienpunkten ungenügend entwickelt um in absehbarer Zeit eine Schutzwirkung gegen Lawienenanrisse zu gewährleisten.

5.4 Diskussion der Methoden

Für die Untersuchungen wurden über das gesamte Band der Nord- und Inneralpen Flächen aufgenommen. Die Hauptexpositionen wurden zu gleichen Teilen berücksichtigt. In der horizontalen Unterteilung in die Anrissgebiete 1 und 2 konnte keine gleichmässige Anzahl aufgenommen werden, da die potentiellen Flächen durch das Anforderungsprofil eingeschränkt wurden und dadurch in den tieferen Lagen weniger Flächen in Frage kamen. Durch die Bestimmung der Flächen über GIS konnte eine neutrale Auswahl getroffen werden. Bei den Aufnahmen im Gelände wurden viele verschiedene Parameter aufgenommen. Aus Zeitmangel konnten in dieser Arbeit nur die für die Schutzwirksamkeit wichtigsten Variablen analysiert werden. Parameter wie Verjüngung, Wildverbiss Bodenvegetation und Totholz konnten nicht weiter untersucht werden. In den statistischen Auswertungen wurden nur einfache Abhängigkeiten getestet und dadurch konnten auch nur grobe Tendenzen skizziert werden. Um detailliertere Informationen zu erhalten, könnten mit multivariaten Verfahren verschiedene Abhängigkeiten noch vertiefter untersucht werden.

Durch die Auswahlmethode über GIS waren vor den Feldaufnahmen keine Informationen über die Behandlung der Flächen nach dem Sturm bekannt. Unter den 26 aufgenommenen Flächen, befanden sich nur drei bepflanzte. Eine dieser Flächen war erst im Frühling vor den Aufnahmen Verbaut und um die Ogiböcke bepflanzte worden. Eine Nachfrage bei den lokalen Forstrevieren hätte interessante Informationen über die vergangene Behandlung einbringen können. Mit den erfolgten Aufnahmen konnte jedoch ein guter Überblick über die Entwicklung von Vivian-Sturmflächen in den letzten 20 Jahren hergestellt werden.

Das Kriterium der Stammzahl pro ha wurde in einigen Fällen eher etwas zu hoch angesetzt. Vor allem bei den Werten für $BHD > 8\text{cm}$ könnten auch weniger Stämme zu einer Schutzwirkung führen.

6 Schlussfolgerung

Die gesamtschweizerische Analyse hat gezeigt dass der grösste Teil der Vivian-Sturmschäden auf Waldflächen mit Schutzfunktion und fast ein Viertel in Lawinenschutzwald aufgetreten sind. Aufgrund der vorherrschenden Windrichtung waren nördliche Expositionen deutlich stärker betroffen. Mit dem Sturmereignis ging somit eine deutliche Zunahme der Lawinengefährdung einher. Insbesondere in solchen vom Sturm zerstörten Lawinenschutzwäldern mit nördlicher Exposition.

Die Entwicklung der Sturmflächen zeigt nur teilweise ein standortabhängiges Muster. Im Allgemeinen zeichnet sich auf südlichen Expositionen eine schnellere Entwicklung der Verjüngung ab als auf nördlichen. Die tiefer liegenden Flächen der montanen Stufe wiesen keine auffallend schnellere Entwicklung auf als höher liegende Flächen. Der Deckungsgrad ist in den unter- und obermontanen Gebieten signifikant höher als auf den hochmontan und subalpin gelegenen Flächen, aber die Stammzahlen der beiden Zonen unterscheiden sich nur schwach und die mittlere Oberhöhe der Bäume war in der hochmontanen und subalpinen Stufe gar höher.

Die Schutzfunktion kann 20 Jahre nach dem Sturm von keiner Fläche vollständig erfüllt werden. Von den insgesamt 26 aufgenommenen Flächen können nur deren 7 einzelne Kriterienpunkte erfüllen. Der DG ist auf keiner Fläche ausreichen um das Schutzwirksamkeitkriterium vollständig zu erfüllen. Auf 4 Flächen in den Gruppen der hochmontanen und subalpinen Nadelwälder ist eine bedingte Schutzwirksamkeit gegeben, da ein DG von über 30% vorhanden ist. Die minimalen Stammzahlen/ha bezogen auf den BHD werden von keiner Fläche erreicht. Die einzigen Flächen die in die Nähe des geforderten Wertes bei einem $BHD > 8\text{cm}$ kommen sind die beiden nach dem Sturmereignis

bepflanzten Flächen in „Wildhaus“ und „Matten“. Die geforderte Baumhöhe bezogen auf die extreme 30-jährige Schneehöhe wird auf 5 Flächen erfüllt. Drunter befinden sich wiederum die beiden bepflanzten Flächen. Die maximalen Lückengrößen werden auf 3 Flächen unterschritten. Die einzige Fläche die in die Nähe der geforderten Werte der Schutzwirksamkeit gelangt ist die mit Fichten bepflanzte Fläche in „Matten“.

Wie eine Untersuchung über die mechanischen Eigenschaften von Totholz in der Vivian Sturmfläche in Disentis gezeigt hat, ist die Vermoderung der Stämme, die eine Lawinenschutzwirkung übernehmen können, stark fortgeschritten. In den ersten zehn Jahren nach dem Sturmereignis war durch die liegenden Stämme eine effiziente Schutzwirkung gewährleistet. Inzwischen ist die Wirkungshöhe der Stämme auf einen Meter zurückgegangen und kann somit bei extremen Schneemengen keinen Lawinenschutz mehr gewährleisten (Putallaz, 2010). Eine weitere Untersuchung (Netzer, 2010) hat gezeigt, dass die Verjüngung, im Speziellen die Verjüngung auf Moderholz nach 20 Jahren noch nicht genügend entwickelt ist, um eine genügende Lawinenschutzwirksamkeit zu gewährleisten. Nach den Resultaten der vorliegenden Arbeit muss auf Flächen mit Naturverjüngung mit mindestens 30 Jahren gerechnet werden bis sie eine genügende Schutzwirkung gewährleisten kann. Dadurch ergibt sich eine Zeitspanne von mindestens 10 bis 15 Jahren, in der eine belassene Sturmfläche in Lawinenanrissgebiet die Schutzwirksamkeit nicht erfüllen kann.

Die zwei in dieser Arbeit untersuchten Flächen welche nach dem Sturmereignis bepflanzt wurden, sind die einzigen Flächen die nach den formulierten Kriterien eine begrenzte Schutzwirksamkeit erzielen können oder zumindest auf gutem Weg dazu sind. Allerdings kann keine fundierte Aussage darüber gemacht werden, da die Datenlage viel zu klein ist. Eine Gegenüberstellung der Entwicklungsgeschwindigkeit von bepflanzten und naturverjüngten Flächen könnte interessante Aussagen darüber geben, wie eine Sturmfläche nach dem Ereignis zu behandeln ist, um die Schutzwirksamkeit in möglichst kurzer Zeit wieder durch die Bestockung gewährleisten zu können.

7 Dank

An erster Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei Dr. Peter Bebi für die Möglichkeit bedanken meine Bachelorarbeit am WSL Institut für Schnee- und Lawinenforschung zu verfassen, sowie für die tolle Unterstützung und die fachliche Begleitung.

Jean-Jacques Thormann möchte ich herzlich danken für seine Unterstützung von Seiten der Hochschule.

Desweiteren möchte ich mich bei Michaela Teich, Frank Krumm und Dr. Ignacio Barbeito für die tatkräftige und geduldige Unterstützung bei zahlreichen kleinen und grossen Anliegen bedanken.

Zum Schluss möchte ich mich herzlich bei meinen Eltern bedanken, die durch ihre langjährige Unterstützung diese Arbeit ermöglicht haben, sowie bei meinen Freunden, die mich auch in dunkleren Stunden unterstützt haben.

8 Literatur

BAFU. (2010). SilvaProtect-CH: Naturgefahrenprozesse, die in Vivian Flächen vorhanden sind. Bern.

Bebi, P., Kulakowski, D., & Rixen, C. (2009). Snow avalanche disturbances in forest ecosystems - State of reserche and implications for management. *Forest Ecology and Management* , S. 1883-1892.

Brang, P., & Duc, P. (2002). Zu wenig Verjüngung im Schweizer Gebirgs-Fichtenwald: Nachweis mit einem neuen Modellansatz. *Schweiz. Z. Forstwesen* , S. 6: 219-227.

Brang, P., Schönenberger, W., Bachofen, H., Zingg, A., & Wehrli, A. (2004). Schutzwalddynamik unter Störungen und Eingriffen: auf dem Weg zu einer systematischen Sicht. *Forum für Wissen* , S. 55-66.

Brechtel, H., & Zahorka, H. (1971). Wald und Schnee. Beeinträchtigt die Umwandlung von Buchen- in Fichtenbestände die wasserwirtschaftliche Funktion des Waldes? *Allgem. Forstzeitschrift* (26), S. 147-150.

Bundesamt für Landestopographie. (1997). Geländedaten: DHM25. Wabern.

Crawley, M. J. (2007). *The R Book*. Southern Gate, Chichester: John Wiley & Sons Ltd, The Atrium.

De Quervain, M. (1978). Wald und Lawinen. *Mountain Forests and Avalanches* (S. 219-239). Davos: SFISAR.

Duc, P., Brändli, U.-B., & Brassel, P. (2004). *Der Schutzwald im zweiten Schweizerischen Landesforstinventar (LF12)*. Abgerufen am 25. 11 2009 von Forum für Wissen: http://www.wsl.ch/publikationen/reihen/forum/forum_2004_DE

Frehner, M., Wasser, B., & Schwitter, R. (2005). *Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald*. Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Schnee (BUWAL).

Frehner, M., Wasser, B., & Schwitter, R. (2005). *Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald*. Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL).

Frey, W. (1977). *Wechselseitige Beziehung zwischen Schnee und Pflanze: Eine Zusammenstellung anhand von Literatur*. Davos: WSL Institut für Schnee- und Lawinenvorschung SLF.

- Grimm, V., & Wissel, C. (1997). Babel, or the ecological stability discussion: an inventory and analysis of threminology and a guide for avoiding confusion. *Oecologia* , S. 323-334.
- Gruber, U., & Bartelt, P. (2007). Snow avalanche hazard modelling of large areas using shallow water numerical methods and GIS. *Environmental Modelling & Software* , S. 1472-1481.
- Hess, E. (1949). Torrents and Avalanches. *U.N. Sci. Cons. and Util. Nat. Res.* , S. 151-155.
- Imbeck, H. (1987). *Schneeprofile im Wald. Schnee und Lawinen in den Schweizer Alpen Winter 1985/86*. Davos: WSL Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF.
- In der Gand, H. (1968). *Aufforstungsversuche an einem Gleitschneehang; Ergebnisse der Winteruntersuchung 1955/56 bis 1961/62*. Davos: Mitt. Eidgenöss. Forsch.anst. Wald, Schnee und Landschaft; 44, 3: 233-326.
- Ishikawa, M., Sato, S., & Kawaguchi, T. (1968). Stand density of avalanche prevention forest. *Br. For. Exp* , S. 204-211.
- Johnson, E. A. (1987). The relative Importance of Snow Avalanche disturbance and thinning on Canopy Plant Population. *Ecology* (68), S. 43-53.
- Latsch, W. (1977). Zur Struktur und Bewirtschaftung der Wälder im bayrischen Alpenraum. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* , S. 89-93.
- Margreth, S. (2004). Die Wirkung des Waldes bei Lawinen. *Forum für Wissen* , S. 21-26.
- Margreth, S. (2007). *Lawinenverbau im Anrissgebiet; Technische Richtlinien als Vollzugshilfe*. Bern: Bundesamt für Umwelt BAFU; WSL Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF.
- Meyer-Grass, M., & Schneebeli, M. (1992). Die Abhängigkeit der Waldlawinen von Standorts-,Bestandes- und Schneeverhältnissen. In G. Fiebiger, & F. Zollinger, *Schutz des Lebensraumes vor Hochwasser, Muren und Lawinen* (S. 443-454). Klagenfurt: Forschungsgesellschaft für vorbeugende Hochwasserbekämpfung.
- Netzer, V. (2010). *Langfristige Lawinenschutzwirksamkeit auf Windwurfflächen: Entwicklung der Verjüngung*. Davos: WSL Institut für Schnee und Lawinenforschung SLF.
- Ott, E., Frehner, M., Frey, H.-U., & Lüscher, P. (1997). *Gebirgsnadelwälder: Ein praxisorientierter Leitfaden für eine standortgerechte Waldbehandlung*. Bern; Stuttgart; Wien: Haupt.

Pickett, S., & Withe, P. (1985). *The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics*. Orlando: Academic Press, INC.

Putallaz, J.-M. (2010). *Protection à long terme contre les avalanches sur les surfaces de chaplis; Etude sur l'efficacité mécanique des arbres au sol*. Davos: L'Institut pour l'Etude de la Neige et des Avalanches (SLF).

Rammig, A., Fahse, L., Bugmann, H., & Bebi, P. (2006). Forest regeneration after disturbance: A modelling study for the Swiss Alps. *Forest Ecology and Management*, S. 123-136.

Saeki, M., & Matsuoka, H. (1970). Ground avalanche prevention function of broad-leaved young stand. *Seppyo; Jap. Soc. Snow and Ice*, S. 43-54.

Saeki, M., & Matsuoka, H. (1969). Snow-buried young forest trees growing on steep slopes. *Seppyo; Jap. Soc. Snow and Ice* (32), S. 19-23.

Salm, B. (1978). Snow Forces on Forest Plants. In M. De Coulon, *Mountain Forests and Avalanches* (S. 357). Bern: Swiss Federal Forestry Office.

Schilcher, C. (1964). Erschwernisse bei Hochlagenaufforstungen. *Allg. Forstztg. Wien* (75), S. 237-238.

Schmidtke, H., & Scherrer, H.-U. (1997). *Sturmschäden im Wald*. Zürich: vdf Hochschulverlag AG der ETH Zürich.

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

Stoffel, L., Schär, M., Margreth, S., & Müller, R. (2006). *Berücksichtigung der Lawinen- und Schneedruckgefährdung bei touristischen Transportanlagen*. Bern; Davos: Bundesamt für Verkehr (BAF); Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF).

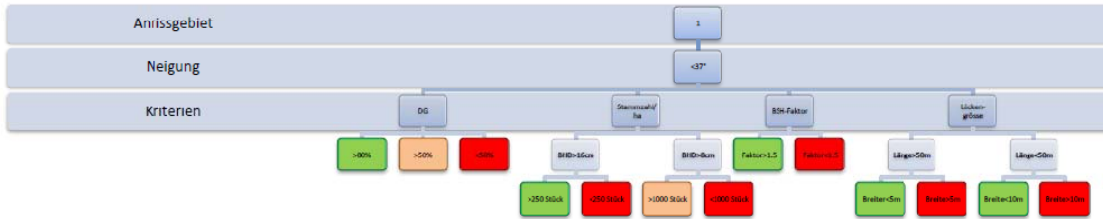
swisstopo (DV033594). (2010). Kartendaten swissimage.

Viglietti, D. (15. 08 2010). Snow avalanche release in forest ecosystems: A case study in the Aosta Valley Region (NW-Italy). *Cold Regions Science and Technology*, 64, S. 167-173.

Wohlgemuth, T., Kull, P., & Wüthrich, H. (2002). Disturbance of microsites and early tree regeneration after windthrow in Swiss mountain forests due to the winter storm Vivian 1990. *For. Snow Landsc. Res.* 77, S. 1/2: 17-47.

9 Anhang

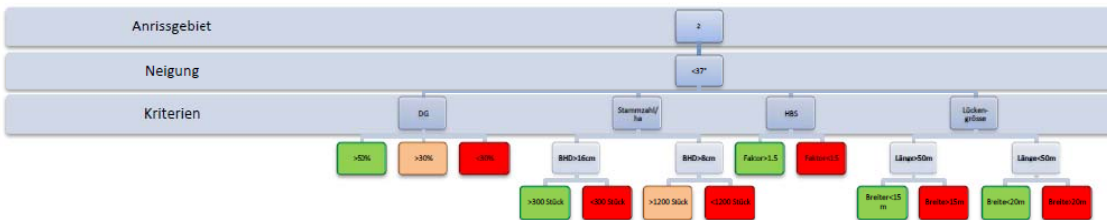
Gruppe 1:



Gruppe 2:



Gruppe 3:



Gruppe 4:

